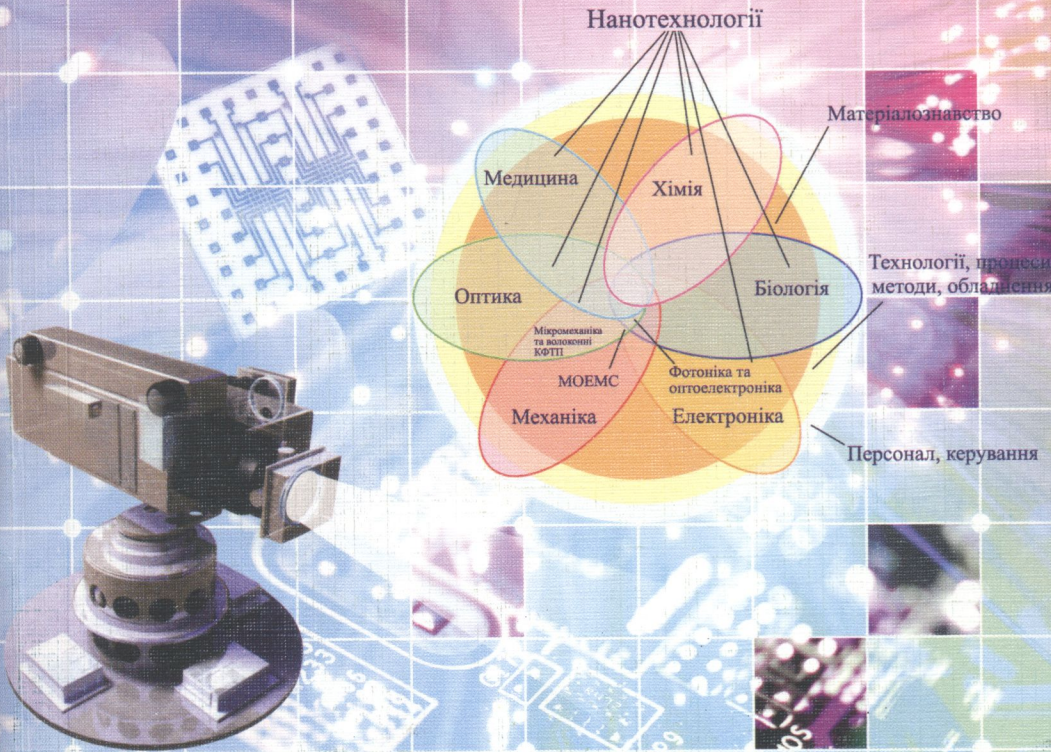


620.3(075)

С30 В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін

ВВЕДЕННЯ В МІКРОСИСТЕМНУ ТЕХНІКУ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ

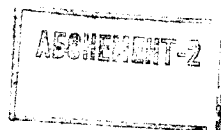


620.3107:
С30

В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін

ВВЕДЕННЯ В МІКРОСИСТЕМНУ ТЕХНІКУ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ

*Затверджено Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів,
які навчаються за напрямом підготовки "Радіоелектронні апарати"*



Харків
Компанія СМІТ
2011

УДК 621.3.049.77

ББК 32.844.1

С30

*Затверджено Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів,
які навчаються за напрямом підготовки «Радіоелектронні апарати»
(Лист № 1/11-7464 від 06.08.2010 р.)*

Р е ц е н з е н т и:

М. В. Замірець, д-р техн. наук, проф., ген. директор НДТНІ, Харків;
В. М. Ілюшко, д-р техн. наук, проф., декан радіотехнічного факультету
НАУ «ХАІ»

Семенець В. В.

С30 Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології
[Текст] : підручн. / В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов,
В. А. Палагін. — Х. : ТОВ «Компанія СМІТ», 2011. — 416 с.

ISBN 978-966-2028-73-7

Викладено принципи створення МЕМС та основні відомості про технології їх виробництва, що дозволяють на єдиній кремнієвій підкладці виготовити мікромеханічні вузли та деталі, а також електронні системи обробки інформації та системи керування. Розглянуто масштабні та квантово-механічні ефекти, електромеханічні аналогії, математичні моделі для проектування чутливих елементів датчиків. Наведені відомості про конструктивні та технологічні рішення, про інструментальні методи вивчення нанооб'єктів, технологічне обладнання.

Для студентів вузів за спеціальностями, пов'язаними з розробкою, виробництвом та експлуатацією нової техніки. Може бути корисним магістрантам, аспірантам, а також фахівцям промисловості.



450296

УДК 621.3.049.77
ББК 32.844.1

© Семенець В. В., Невлюдов І. Ш.,
Палагін В. А., 2010
© ТОВ «Компанія СМІТ», 2011

ISBN 978-966-2028-73-7

ЗМІСТ

Передмова	5
Прийняті скорочення	9
Використані символи	12
Вступ	15
1. Теоретичні основи елементів MEMC	24
1.1. Ефекти масштабу в мікросистемній техніці	24
1.2. Електро механічні аналогії	32
1.3. Сенсори та актюатори	40
1.3.1. Ємнісні чутливі елементи	42
1.3.2. Індуктивні чутливі елементи	49
1.3.3. Електростатичні перетворювачі	51
1.3.4. Напівпровідникові датчики.	54
1.3.5. Тензорезистивні перетворювачі фізичних величин	56
1.3.6. Субмікронні магнітні сенсори.	59
1.3.7. Датчики концентрації газів	64
1.3.8. Мікрокабелі на поліімідному носії	67
1.3.9. Міжз'єднання та кросбари	71
1.3.10. Оптиволоконні позиціонери	80
Запитання та завдання для самоперевірки	81
2. Математичні моделі типових елементів MEMC та система автоматизованого проектування МСТ	83
2.1. Математичні моделі балок	95
2.2. Математичні моделі напівпровідникових датчиків.	107
2.3. Математичні моделі мембран	119
2.4. Математичні моделі зустрічно-штирєвих резонаторів	127
Запитання та завдання для самоперевірки	129
3. Матеріали для MEMC та НТ	131
3.1. Електричні та механічні властивості кремнію.	131
3.2. Вуглецеві форми матеріалів	140
3.3. Провідникові матеріали.	151
3.4. Феромагнітні рідини	160
3.5. Фотонні кристали	163
3.6. Кераміка	164
3.7. Полімерні матеріали	166
3.8. ДНК	167
3.9. Інтелектуальні матеріали	169
Запитання та завдання для самоперевірки	171
4. Технології MEMC.	172
4.1. Технологія LIGA	181
4.2. MUMPS-технологія виготовлення мікродвигуна	186
4.3. Технологія SUMMIT і SUMMIT-V	187
4.4. Особливості травлення МКК.	190
Запитання та завдання для самоперевірки	195

5. MEMC прилади	196
5.1. Елементи сонячних батарей	198
5.2. Гальванічні елементи	211
5.3. Струминні друкуючі головки	215
5.4. Паливні елементи	216
5.5. Мікрофон — телефон, слухові апарати	218
5.6. MEMC проектори зображень	219
5.7. Акселерометри	220
5.8. Мікрогіроскопи	224
5.9. Конденсат Бозе — Ейнштейна	232
Запитання та завдання для самоперевірки	234
6. Міні-, мікро- та нанороботи	236
Питання та завдання для самоперевірки	253
7. Нанотехнології	254
7.1. Наноімпринтинг або нанодруківана літографія (НДЛ)	258
7.2. Нанотехнології самоскладання	267
7.3. Методи дослідження в нанотехнологіях	269
7.4. Біотехнології	280
7.5. Нанобіологічні структури	285
Запитання й завдання для самоперевірки	293
Висновки	294
Перелік посилань	299
Словник термінів	311
Додаток 1. Періодична система елементів Д. І. Менделєєва	315
Додаток 2. Види деформацій мікромеханічних елементів. Основні розрахункові формули	316
Додаток 3. Фундаментальні константи	331
Додаток 4. Тензори однорідних напруг та деформацій 4-го рангу	334
Додаток 5. Латинський і грецький алфавіти	337
Додаток 6. Проектування елементів мікросистемної техніки	338
Д6.1. Мова опису елементів мікросистем VHDL-AMS	338
Д6.2. Проектування елементів МСТ у САІР Tanner Pro.	345
Д6.3. Проектування елементів МСТ у САІР CoventorWare	351
Д6.4. Програма кінцево-елементного моделювання ANSYS	356
Додаток 7. Науково-дослідні прилади для MEMC та НТ	360
Додаток 8. Кольорові ілюстрації	368
Додаток 9. Технологічне обладнання для виробництва MEMC	404
Додаток 10. Технологічне обладнання для наноімпринтинга	406
Предметний покажчик	411

ПЕРЕДМОВА

XXI століття буде відзначене великою кількістю технічних досягнень, серед яких пріоритетними, революційними, проривними в усьому світі будуть мікроелектромеханічні системи та нанотехнології.

Розвиваючись на основі колишніх наукових і технічних рішень, мікросистемна техніка (МСТ) та нанотехнології (НТ) дозволять підняти на більш високий рівень багато галузей виробництва, матеріалознавство, медицину, освіту, соціальну сферу, військову справу та ін. Перспективність МСТ та НТ доведена цілим рядом виробів, уже реалізованих у мікроелектромеханічному виконанні. Поряд з істотним підвищенням технічних характеристик на кілька порядків поліпшуються габаритно-масові показники, надійність, знижуються матеріаломісткість, вартість. Таким чином, у цілому можна вважати, що мікромініатюризація з використанням електромеханічних систем та НТ забезпечить високу техніко-економічну ефективність і, за оцінками фахівців багатьох країн світу, буде визначати науково-технічний потенціал та пріоритет держав у світовому співтоваристві.

Розуміючи це, багато країн мають державні програми розвитку мікросистемної техніки та нанотехнологій. Перша державна програма з нанотехнологій, у якій проекту був наданий статус національного та стратегічного, прийнята в Німеччині (1998). Німеччина дотепер залишається першою в багатьох нанотехнологічних напрямках робіт.

В 2000 р. США прийняли довгострокову програму з розвитку нанотехнологій («Національна нанотехнологічна ініціатива») з державним фінансуванням у 3,4 млрд доларів щорічно.

Аналогічна програма розроблена в Росії (2006). В 2007 р. прийнятий федеральний закон, по якому, зокрема, організована державна корпорація нанотехнологій «Роснано». У Росії підготовка кадрів для наноіндустрії та мікросистемної техніки з фінансуванням від «Роснано» доручена провідним навчальним закладам: Московському інженерно-фізичному інституту, Московському інституту сталі та сплавів. На хімічних факультетах МГУ створений науково-організаційний центр з наноматеріалів та нанотехнологій разом з Курчатівським інститутом. Центр забезпечив високу концентрацію унікального лабораторного обладнання та розробку сучасних навчальних програм.

У НАНУ реалізується програма з обсягом фінансування 30 млн грн на рік (2007). Визнано ряд серйозних досягнень українських учених, що традиційно працюють в області медицини, фізичної хімії та хімічної фізики біохімії, колоїдної хімії, матеріалознавства, із мікро- та нанооб'єктами. Матеріали з пам'яттю форми, нанопорошки оксидів елементів четвертої групи, нанопокриття та елементи сонячних батарей, надпровідникові матеріали, пориста кераміка отримані Донецьким фізико-технічним інститутом ім. А. М. Галкіна НАНУ. Розробляються матеріали для цільової доставки медикаментів по кровоносній системі людини (Інститут експериментальної патології, онкології та радіології ім. Р. Є. Кавецького), лікарські носії, протиопікові високоефективні мазі, наноматеріали, технологія переробки автомобільних шин у «нафту» з високим вмістом легких фракцій (Інститут проблем матеріалознавства НАНУ, м. Київ), монокристали сцинтиляційних та ін. речовин, розроблена технологія використання для готування кераміки оксидних нанопорошків, що мають підвищену хімічну активність та високий ступінь дисперсності, що істотно знижує температуру спікання кераміки (Інститут монокристалів НАНУ, м. Харків), досліджений вплив вуглецевих нанотрубок на організм, метод водного розчинення ВНТ (1995) (Інститут терапії АМН, м. Харків), ВНТ, органічні та неорганічні хімічні матеріали (ХНУ ім. Каразіна, м. Харків), каталітичний крекінг нафти з використанням цеолітів з української сировини (Інститут біоорганічної хімії й нафтохімії НАНУ, м. Київ), нанопокриття (Харківський фізико-технічний інститут), мікрокабелі й елементи сонячних батарей (НДТІ Приладобудування, м. Харків), тунелюючі скануючі мікроскопи (ДНВО «Комунар», м. Харків), електронно-променеві методи нанесення термо-, зносо-, корозійностійких нанопокриттів, технологічного обладнання — EB-PVD (electronic-beam process vapor deposition) (Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ, м. Київ). Інженери Полтавського алмазного заводу ще до 1990 р. вміли одержувати алмазні нанопорошки за допомогою вибуху.

По тематиці МЕМС та НТ ведуться роботи у ряді університетів України, початі роботи з підготовки фахівців МСТ та НТ.

Для забезпечення розвитку мікросистемної техніки та нанотехнологій особливу увагу слід звернути на підготовку кадрів, організацію технопарків, оснащених сучасними науково-аналітичними приладами, на створення науково-виробничих фірм та взаємодію університетської науки, приватних фірм і державних

підприємств, а також на необхідність довгострокового державного фінансування науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт.

В цьому підручнику розглянуто основні принципи створення мікроелектромеханічних пристроїв, функціональний склад та конструктивно-технологічні рішення великого числа МЕМС-пристроїв, розрахунки чутливих елементів різного виду сенсорів, наведена класифікація технологічних процесів, що використовуються в їхньому виробництві, особливості структур нанодіапазону, принцип електромеханічних аналогій, ефекти зміни масштабу, що проявляються в МСТ, а також квантово-механічні ефекти, що діють у діапазоні 1...100 нм, науково-аналітичні прилади для досліджень наноструктур, методи формування малюнка та структур приладів, принципи, що використовуються при складанні наноструктур, основні групи матеріалів, які застосовують у МЕМС та НТ, області використання та перспективи розвитку МЕМС та НЕМС.

МСТ та НТ є результатом використання великої кількості фундаментальних наук, тобто являють собою синтетичну науку, що використовує теорії різних розділів фізики, хімії, термодинаміки, електротехніки та електроніки, математики та біології, медицини та військової техніки, стосовно до завдань одержання матеріалів із властивостями, що прогнозуються, їхнього формування на атомно-молекулярному рівні, синтезу структур нано- і мікророзмірного діапазону, створення мікромініатюрних пристроїв, приладів та систем різного призначення.

Таке складне об'єднання компонентів різної природи в одному пристрої, системі призводить до накладення однотипних термінів, що використовуються в підручнику, та до необхідності уточнення їхніх зв'язків, співвідношень і вибору однакових символів для їхнього позначення. Так, терміни жорсткості, пружності, що використовують в опорі матеріалів та механіці, та модулі жорсткості, пружності, піддатливості — у теорії пружності, фізиці твердого тіла вимагають зіставлення; символи, що позначають кінематичну та динамічну в'язкість, неоднакові в різних літературних джерелах. Для визначення єдиних позначень у підручнику введено список використаних символів, перелік скорочень і визначення ряду термінів, що зустрічаються в тексті, а також алфавітний предметний покажчик.

Посилання на використані літературні джерела наведені в тексті за прізвищами першого автора та року публікації роботи.

Рисунки, таблиці та формули пронумеровані за главами та в порядку їхньої появи в тексті, крім кольорових рисунків, які винесені в окремий додаток наприкінці книги.

Наприкінці кожної глави наведені запитання та завдання для перевірки засвоєння матеріалу.

Додаток 6 наведений за навчальним посібником [Лисенко, 2005], додаток 7 за роботою [Пул, 2007], які рекомендовані як навчальні посібники для ВНЗ Росії. Розділи 2.2—2.3 підготовлені к. т. н. Харенком К. Ю.

Дана робота має на меті заповнити один із пробілів освоєння цього виду техніки — відсутність підручника для підготовки фахівців в області мікросистемної техніки та нанотехнологій.

Книга призначена в якості підручника для студентів напряму «Радіоелектронні апарати», може використовуватись і для інших напрямів підготовки: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», «Системна інженерія», «Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології».

Книга може бути корисною для фахівців у галузях конструювання та технології виробництва РЕА, фахівців, зв'язаних з експлуатацією нової техніки, а також для магістрантів, аспірантів, керівників промисловості.

Особливу вдячність автори висловлюють інженеру Жаріковій І. В. за наполегливу, клопітку працю, ініціативні рішення та творчий внесок у оформлення рукопису, що надало книзі привабливості та значної виразності, які сприяють кращому сприйняттю викладеного матеріалу.

ПРИЙНЯТІ СКОРОЧЕННЯ

АСМ	— атомний силовий мікроскоп
АТФ	— аденозинтрифосфат (натрію/кальцію)
АЦП	— аналогово-цифровий перетворювач
БКПл	— багатопарова комутаційна плата
БКП	— багатозондовий контактуючий пристрій
БМО	— балістичний магнітний опір
ВАК	— високоактивні кислоти
ВГІС	— велика гібридна інтегральна схема
ВНТ	— вуглецеві нанотрубки
ГМ	— гігантський магнітоопір
ГМО	— генетично модифіковані об'єкти
ГМХ	— габаритно-масові характеристики
ДЖ	— джерело живлення
ДКШ	— датчик кутової швидкості
ДНК	— дезоксирибонуклеїнова кислота
ЕА	— електронна апаратура
ЕДП	— етилендіамін і пірокатехін (протравлюючий розчин)
СМС	— емнісні мікромеханічні системи
ІМС	— інтегральна мікросхема
ІЧ	— інфрачервоний
ІС	— інтегральна (напівпровідникова) мікросхема
КБЕ	— конденсат Бозе — Ейнштейна
КНС	— кремній на сапфірі
КФТП	— корпускулярно-фотонні ТП
ЛЗ	— лінії зв'язку
МАЕМС	— мікроакустoeлектромеханічні системи
МЕА	— мікроелектронна апаратура
МЕМС	— мікроелектромеханічні системи
МОП	— магнітна оптична пастка
МОЕМС	— мікрооптоелектромеханічні системи
МС	— мікросистеми
МСК	— мікроскладання
МСЛ	— мікростереолітографія
МСМ	— магнітно-силова мікроскопія
МСТ	— мікросистемна техніка
МХЕМС	— мікрохемoeлектромеханічні системи
НЖМД	— накопичувач на жорсткому магнітному диску
НТ	— нанотехнології
ОЗП	— оперативний запам'ятовувальний пристрій
ПМВ	— перетворювач механічних величин

ПММА	— поліметилметакрилат (фоторезист)
ПНК	— пептид-нуклеїнова кислота
ПФВ	— перетворювач фізичних величин
РНК	— рибонуклеїнова кислота
САІР	— система автоматизованого проектування
СНК	— система на кристалі
ТМАН	— гідроксид тетраметиламонію $[(\text{CH}_3)_4\text{NOH}]$, анізотропний травильний реагент для кремнію
ТСМ	— тунелюючий скануючий мікроскоп
УФ	— ультрафіолетовий
ЧЕ	— чуттєвий елемент
ЧЕД	— чуттєвий елемент датчика
	—
АСР	— air cushion press (пресування з повітряною прокладкою)
AMANDA	— Abformung, Oberflächen mikromechanik, Membran bertragung (мікрообробка, лиття та переміщення діафрагми)
CISC	— complete integrated schemes commands (повна система команд інтегральних схем)
DARPA	— defense advanced research projects agency (агентство передових оборонних дослідницьких проєктів)
DMD	— digital micromirror devices (мікродзеркальні цифрові пристрої)
DRAM	— dynamic random access memory (динамічна пам'ять з довільним доступом)
DSP	— digital signal processor (цифровий сигнальний процесор)
EDP	— етилендіамін і пірокатехін (анізотропний проотравлювач)
iMEMS	— integrated MEMS, інтегрована в одному чипі MEMC
IP	— intellectual property (інтелектуальні властивості)
LIGA	— lithographic, galvanoformung, abformung (німецькі — літографія, гальваніка, формування (лиття))
LPCVD	— low pressure chemical vapor deposition (процес лазерного хімічного парового осадження)
MUMPS	— Multi User MEMS Process Silicon (універсальні процеси для MEMC)
NIL	— nanoimprint lithography (наноімпринтова літографія)
P. NIL	— photo-curable NIL (фотостимульована NIL)
T. NIL	— thermo NIL (термічна NIL)
NGL	— next generation lithography (літографія наступного покоління, відомості ITRS, 2003)
PECVD	— plasma enhanced chemical vapor deposition (поліпшений процес хімічного парового осадження)
PDMS	— polydimethyl siloxane (прозорий полімер для виготовлення нанощтампів)

RIE	— Reactive Ion Etching (реактивно-іонне травлення)
RISC	— reduce integrated schemes commands (скорочена система команд IC)
RTL	— register transfer level (рівень регістрових передач)
SCREAM	— Single Crystal Reactive Etching and Metallization — вертикальне об'ємне травлення кремнію з металізацією, що є комбінацією анізотропного й ізотропного плазмового травлення
SEM	— Simultaneously Electroplating Machining (сумісна гальванічна обробка)
SUMMIT	— Sandia Ultra-Planar Multi-layer MEMS Technology (технологія багат шарових МЕМС з вирівнюванням ф. Sandia)
SLIGA	— sacrificial LIGA (LIGA з жертвовним шаром)
SPICE	— simulation program with integrated circuit emphasis (моделююча програма з орієнтацією на IC)
SRAM	— static random access memory (статична пам'ять з довільним доступом)
VHDL	— very high device language (мова пристроїв високого рівня)
VHSIC	— very high speed IC (високошвидкісні IC)
VLIW	— very long instructive word (дуже довга машинна команда)

ВИКОРИСТАНІ СИМВОЛИ

A	— робота
a	— атто, 10^{-18}
Г	— гіга, 10^9
г	— гекто, 10^2
д	— деци, 10^{-1}
Е	— інтенсивність випромінювання
Е	— екса, 10^{18}
З	— зетта, 10^{21}
з	— зепто, 10^{-21}
І	— йотта, 10^{24}
й	— йокто, 10^{-24}
К	— градус Кельвіна
к	— кіло, 10^3
л	— літр
М	— момент (крутильний, згинальний); мега, 10^6
м	— метр
Н	— Ньютон, одиниця сили
н	— нано, 10^{-9}
П	— пета, 10^{15}
п	— піко, 10^{-12}
с	— санти, 10^{-2} ; секунда
Т	— тера, 10^{12}
Ф	— функція Лапласа
ф	— фемто, 10^{-15}
a	— постійна решітки кристала
Å	— ангстрем, 10^{-10} м
b	— ширина, м
c	— жорсткість конструкції в напрямку, обумовленому індексами; концентрація
C	— центр симетрії кристала; °C — градус Цельсія
D	— коефіцієнт пружності; $E = D/\epsilon_0$
d	— діаметр, м
e	— електрон
E	— модуль пружності Юнга, H/m^2 ; енергія, eB
f	— частота коливань, Гц
F	— зосереджена сила, Н; °F — градус Фаренгейта, °F = 0,556 K; $t = 1,8t_c + 32$
g	— прискорення земного тяжіння, m/s^2
h	— висота, м; постійна Планка, $\hbar = h/2\pi$
ΔH	— ентальпія

i	— індекс нумерації в тензорах, матрицях; одиничний вектор, орт
I	— момент інерції (осьовий, полярний, відцентровий), м^4 ; струм, А
j	— щільність струму, $\text{А}/\text{м}^2$; індекс нумерації в тензорах, матрицях
k	— коефіцієнт; індекс нумерації в тензорах, матрицях; пружність; жорсткість
l	— довжина, м; індекс нумерації в тензорах, матрицях
L	— вісь симетрії кристала; індуктивність, Гн
m	— маса, кг
M	— крутильний або згинальний момент, Н·м
n	— номер гармоніки, моди
N	— енергія
O	— початок відліку, координат, центр геометричної фігури
p	— тиск, Па
P	— зосереджена сила, Н; площа симетрії кристала
q	— розподілена сила, Н/м
Q	— добротність
r	— радіус, м
R	— універсальна газова постійна
s	— піддатливість конструкції в напрямку, обумовленому індексами
S	— площа, м^2 ; статичний момент інерції, м^3
t	— час, с
T	— абсолютна температура, К
U	— кінетична енергія
v	— швидкість, м/с; об'єм, м^3
V	— напруга, В
w	— товщина елементів зустрічно-штирьової системи
W	— осьовий момент опору, м^3
x	— вісь координат
y	— вісь координат
Y	— піддатливість; комплексна провідність
z	— вісь координат
Z	— комплексний опір
α	— кут згорання ВНТ
β	— загасання (коливачь)
γ	— кут зсуву (при крутітні, зсуві), град або рад
δ	— похибка
ε	— відносні деформації (стиску, розтягування); похибка, мала величина, діелектрична проникність; кутове прискорення

η	— коефіцієнт корисної дії, демпфування; в'язкість рідини, мастила
θ	— кут зсуву перерізу
i	— уявна одиниця; поточний індекс у нумерації; орт
k	— одиничний вектор, орт
λ	— довжина хвилі, м; теплопровідність, Вт/м·град
μ	— коефіцієнт Пуассона; динамічна в'язкість; магнітна проникність
ν	— кінематична в'язкість, $\nu = \mu / \rho$
$\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}$	— переміщення, швидкість, прискорення, м, м/с, м/с ² ; інтенсивність оптичного поля в перерізі
π	— число пі; $\pi = 3,14142$
ρ	— щільність матеріалу, кг/м ³
σ	— нормальні напруги в перерізі, Н/м ²
σ_s	— поверхневий натяг, Н/м
τ	— дотичні напруження, Н/м ² ; час (відрізок або момент), с
u	— $u(x)$ — зсув у напрямку дії сили перерізу з координатою x , м
φ	— кут повороту перерізу (при крутінні), зсув фаз, град або рад
χ	— магнітна сприйнятливність
ψ	— відносна величина проміжку: $\psi = (D - d)/d$ (при терті); хвильова функція основного стану електрона
ω	— циклічна частота, $\omega = 2\pi f$, с ⁻¹

ВСТУП

Об'єднання механічних та електричних (електронних) частин у єдину систему було плідним рішенням у техніці, відомій за назвою електромеханіка. У міру розвитку цього напрямку (мініатюризації електронних систем керування та включення до складу систем інформаційної частини — сенсорів та програмного забезпечення) вона перетворилася в мехатроніку [Исин, 1988], яка забезпечила істотне підвищення надійності за рахунок автономності підсистем та вузлів пристроїв, передачі ряду функцій від механіки — електроніці або програмному забезпеченню, децентралізації керування, зменшення довжини ліній зв'язку, а також використання інших принципів проектування виробів мехатроніки.

Наступним логічним кроком удосконалення електромеханічних конструкцій та систем стала мікромініатюризація механічних вузлів та деталей. У сучасних розробках — це MEMS, MOEMS, MST, systems in chip (або MEMC, MOEMC, MST, системи на кристалі), мікро-, опти- електромеханічні системи, мікросистемна техніка, мікротехніка, мікромеханіка, мікроприладобудування, мікротроніка. Всі перераховані назви — близькі за змістом визначення однієї і тієї ж техніки, але в строгому визначенні не тотожні. Найбільш загальним з них є MST, що має на увазі інтеграцію на кристалі мікроелектронних, мікромеханічних пристроїв, інформаційної та вимірювальної підсистем. При цьому в основі розвитку та практичного використання технологій мікросистемної техніки лежать техніко-економічні фактори (очікувані в майбутньому переваги). Відомо, що масове виробництво мікросхем дешеве. У той же час класичні промислові технології (механообробка, лиття, технологія переробки пластмас, фотонно-корпускулярні методи обробки та ін.), використовувані при виготовленні традиційних електромеханічних пристроїв, характеризуються різким збільшенням вартості виробництва в міру зниження лінійних розмірів та зростання точності виготовлення деталей механічних систем. Цим і зумовлено прагнення до виготовлення електронної та механічної частини в єдиному технологічному процесі, що при масовому виробництві значно знизить вартість усього електромеханічного пристрою. Істотне також зниження матеріаломісткості, габаритно-масових характеристик, енергоспоживання, підвищення надійності виробів MEMC.

«Класичні» вироби MST повинні забезпечувати мінімальні габаритно-масові характеристики (ГМХ), низьке енергоспоживання,

мінімальну вартість, високу надійність та стабільність параметрів, масовість виробництва та широку номенклатуру модифікацій.

Досить чітким визначенням МСТ у сучасному розумінні можна вважати формулювання В. В. Лучиніна з доповненнями авторів (у дужках):

«Мікросистемна техніка — це науково-технічний напрямок, метою якого є створення в обмеженому об'ємі твердого тіла або на його поверхні мікросхем, (механізмів мікромеханіки та функціональної електроніки) у вигляді впорядкованих композицій областей із заданими властивостями, структурою (та зв'язками між ними), статична або динамічна сукупність яких забезпечує реалізацію процесів генерації, перетворення, передачі енергії та руху в інтеграції із процесами сприйняття, (виміру) і обробки, трансляції, збереження інформації (та спілкування) при виконанні запрограмованих операцій та дій у визначених умовах експлуатації з необхідними функціональними, часовими та надійністними показниками».

Існують аналітичні матеріали, що відстоюють необхідність спільного розгляду мікро- та наноелектромеханіки [Пул, 2007], тому що об'єднання мікромеханічних рухливих та чутливих елементів із електронними схемами обробки перетворюють технічну систему в інтелектуальну, здатну забезпечити виконання складних функцій для досягнення поставленої людиною мети на основі прийняття рішень, адаптації своїх дій до умов навколишнього середовища та зовнішніх впливів, оцінки власних можливостей та результатів дій. Крім цього, найчастіше неможливий поділ або віднесення тих або інших пристроїв до мікро- або нанотехніки. Багато реалізацій квантово-механічних ефектів представляються у формі мікропристроїв; мікромеханічні вузли являють собою вимірювальні або робочі інструменти для нанометрового діапазону (нанометри, позиціонери, зонди ТСМ та АСМ, нанодозатори і т. д.), нанороботи з розмірами мікродіапазону та т. ін. Мікро- та нанороботи, що впливають на зовнішнє середовище, оснащені сенсорами та здатні до переміщення, колективних дій, маніпулювання об'єктами атомного та молекулярного рівня та навіть окремих атомів, створення матеріалів зі спеціальними заздалегідь заданими властивостями, інтелектуальних матеріалів і пристроїв на їхній основі виводять людство на зовсім новий, більш високий етап розвитку. Можливості, створювані МСТ та НТ, дозволять глибше зрозуміти історію, передбачити розвиток цивілізації, Землі та всесвіту. Ці напрямки доповнюють один одного, сприяють розвитку та

виявленню ефектів, недосяжних у роздільних застосуваннях МЕМС та НЕМС, а найчастіше вони просто нерозрізнені, хоча фізико-хімічні процеси та принципи дії пристроїв різних діапазонів розмірів істотно розрізняються.

Основні етапи розвитку МЕМС та НТ:

1905 р. Швейцарський фізик Альберт Ейнштейн опублікував роботу, у якій довів, що розмір молекули цукру становить приблизно 1 нм.

1928 р. Фізик Гамов Г. А. відкрив тунельний ефект, вирішивши рівняння Шредингера, що описують можливість подолання часткою енергетичного бар'єра навіть у випадку, коли енергія частки менша за висоту бар'єра [Ратнер, 2004].

1935 р. Німецькі фізики Макс Кнолл та Ернст Руска створили електронний мікроскоп, що вперше дозволив досліджувати нанооб'єкти.

1958 р. Створені кремнієві вимірювачі напруг.

1959 р. Вчений фізик, лауреат Нобелівської премії Річард Фейнман на лекції в Каліфорнійському технологічному інституті вимовив знамениту фразу «There's plenty of room at the bottom» («Внизу досить місця») та заявив, що, навчившись маніпулювати окремими атомами, людство зможе синтезувати все що завгодно. Привселюдно обіцяв нагороду в тисячу доларів першій людині, що створить електродвигун із розмірами менш ніж 1/64 дюйма.

1961 р. Створений перший кремнієвий датчик тиску.

1967 р. Розроблена поверхнева мікрообробка. Фірма Вестингауз створила резонансний польовий транзистор. Описане використання матеріалу для забезпечення рухливості мікромеханічних пристроїв із кремнієвої підкладки.

1970 р. Продемонстрований перший кремнієвий акселерометр.

1979 р. Створено перший вузол головки струминного друкувального пристрою.

1981 р. Створення Г. Біннігом та Г. Рорером скануючого тунельного мікроскопа.

1982 р. Датчик кров'яного тиску. Petersen K. E. «Silicon as Mechanical Material» — наведені основні механічні властивості матеріалу та відомості по травленню кремнію.

1985 р. Відкриття фулеренів, нової форми існування вуглецю в природі (H. Koroto, J. Health, S. O'Brien). Розроблений LIGA Process, Німеччина, Карлсруе.

НТБ ВНТУ
М.Вінниця

1985 р. Американські фізики Роберт Керл, Херольд Крото та Ричард Смол створили технологію, що дозволяє точно вимірювати предмети діаметром в 1 нм.

1986 р. Нанотехнологія стала відома широкому загалу. Американський футуролог Ерік Дрекслер опублікував книгу, у якій передбачив, що нанотехнологія незабаром почне активно розвиватися.

1986 р. Створення атомного силового мікроскопа (Нобелівська премія), що дозволяє взаємодіяти з будь-якими матеріалами, а не тільки із провідниками.

1988 р. Перша конференція з MEMC.

1989 р. Дональд Ейглер, співробітник компанії ІВМ, виклав назву своєї фірми атомами ксенону.

1990 р. Маніпулювання одиничними атомами.

1992 р. Розроблений MUMPS Process за замовленням DARPA, США. Створено перший мікромеханічний шарнір.

1993 р. Створено перший MEMC-акселерометр, виготовлений методом поверхневої мікромашинної обробки (Analog Device, ADXL 50).

1994 р. Запатентоване глибоке реактивно-іонне травлення (RIE).

1995 р. Швидко розвилися біо-MEMC.

1998 р. Голландський фізик Сесз Деккер створив нанотранзистор.

2000 р. Адміністрація США прийняла «Національну нанотехнологічну ініціативу».

2000 р. НАСА розробила великий проект під назвою «Програма розвитку технологій для досліджень у глибокому космосі» та позначенням X2000, у рамках якого, починаючи з 2000 р., кожні два-три роки в космос повинні виводитися ракети з удосконаленим бортовим обладнанням, призначеним для вивчення Сонячної системи та навіть її околиць. Особлива увага приділяється зменшенню розмірів космічних апаратів; для цього постійно знижуються розміри та вага систем авіоніки — авіаційної електроніки, бортового обладнання літальних апаратів (рис. В.1).

У рішенні цього завдання важливу роль повинне зіграти інтегрування мікро- та нанотехнологій.

2000 р. MEMC-компоненти оптоволоконних мереж стали великим бізнесом.



Рис. В.1. Прогноз розвитку авіоники

2004 р. Адміністрація США підтримала «Національну наномедичну ініціативу» у якості частини «Національної нанотехнологічної ініціативи».

Існують можливості розробки та потреба в мініатюрних сенсорах багатьох інших фізичних величин, хімічних речовин (у тому числі отруйних, вибухонебезпечних), радіації, електромагнітних полів.

Використання нових фізичних ефектів, властивостей наноматеріалів, зокрема інтелектуальних матеріалів, може забезпечити швидкий прогрес у сфері створення високоінформативних інтегрованих датчиків, а з огляду на низьку вартість та трудомісткість їхнього масового виготовлення, мікро- та наносенсори стануть основою глобальної інформатизації життя суспільства, стану зовнішнього середовища, у тому числі екології, виховання та освіти високоінтелектуального людського суспільства [Бескоровайный, 2005].

За лінійними розмірами компонентів виробу різного ступеня мініатюризації прийнято ділити в такий спосіб [Шевченко, 2004]:

Електромеханіка та мехатроніка (механічні компоненти) > 1 мм.

МЕМС, МОЕМС, МСТ — 1...1000 мкм.

НЕМС (нано-ЕМС), нанотехнології (НТ) — 1,0...100,0 нм.

Атомний масштаб розташований нижче — порядку 0,1 нм (10^{-10} м), ще нижче лежить ядерний масштаб — порядку фемтометра (10^{-15} м).

Відомо, що всі атоми мають розміри порядку 0,1 нм, а найбільший діаметр в урану ~ 0,22 нм. Середня відстань між атомами в молекулах порядку 0,15 нм. Наноструктури перебувають на межі

(або розділі на шкалі розмірів) найменших зі створених людиною пристроїв та найбільших молекул живих організмів. МЕМС та НЕМС розглядають всі властивості структур у мікро- та наномасштабах незалежно від того, якими вони є: хімічними, фізичними (електромагнітними, оптичними, квантово-механічними), біохімічними, біологічними.

МСТ та НТ визнані пріоритетними напрямками техніки в ХХІ столітті в багатьох країнах світу: США, Європейський Союз, Японія, Китай, Бразилія, Росія [Іванов, 2004]. Національною нанотехнологічною ініціативою США НТ розглядається як ефективний інструмент, здатний забезпечити лідерство США в першій половині поточного сторіччя, новітні технології цих напрямків є фундаментом науково-технічної революції ХХІ століття, порівнянної та навіть переважаючої за своїми масштабами перетворення, викликані науковими відкриттями ХХ століття. Ці перетворення відбудуться в промисловості та на транспорті, у військовій техніці, медицині, екології, науці та освіті, соціальній сфері.

МЕМС-вироби відомі більше п'ятдесятьох років, але їхнє промислове виробництво відставало. Тільки 15—20 років тому ряд сенсорів знайшов широке застосування в автомобільній техніці з обсягами використання по декілька мільйонів штук на рік.

Відомо, що тільки масове виробництво може забезпечити низьку вартість виготовлення виробів. Тому на етапі розробки, виготовлення дослідних зразків важко забезпечити економічну ефективність робіт, необхідна державна підтримка досліджень, створення експериментальної бази та матеріально-технічного виробництва.

У загальному випадку в складі МСТ можна виділити наступні складові на рис. В.2: джерела енергії та передачі руху — активатори (актюатори), електронні підсистеми (системи на кристалі (СНК), мікропроцесори, ЗП, мікроконтролери), сенсори, об'ємні електро-радіоелементи з керованими параметрами, системи внутрішніх міжз'єднань та телекомунікаційних зв'язків. Кожна система може використовувати для свого функціонування різні ефекти (електромагнітні, оптичні, механічні, молекулярно-квантові, мезаскопічні, хімічні, біохімічні, біологічні). Електронні підсистеми МЕМС — це інтелектуальні пристрої, які реалізуються на базі універсальних мікросхем (СНК, мікропроцесори, пам'ять, АЦП, ЦАП, ОП та ін.), на базі мікросхем, які програмуються виробником мікросхем, а також тих, що програмуються споживачем, та на базі замовлених мікросхем, розроблених спеціально для конкретних пристроїв.



Рис. В.2. Узагальнений склад МСТ

Основною ідеєю розвитку проектування замовлених мікросхем є використання в проекті готових складно-функціональних (СФ) блоків або IP (intelligent property)-блоків.

Оскільки у технологіях МЕМС у порівнянні з мікроелектронними новими елементами є мікромініатюрні рухливі механічні деталі та вузли, перелічимо найбільш уживані з них. Це — мікроантени, балки, вали, хвилеводи, двигуни, дисплеї, дозатори, затискачі, затвори, дзеркала, зубчасті колеса та передачі, кабелі, кантилевери, консолі, лінзи, мембрани, мікроманіпулятори, мікророботи, оптичними модулятори, оптичними еднувачі та комутатори, пінцети, підшипники, позиціонери, смужкові лінії, поршні, пружини, резонатори, сенсори фізичних величин, столи, струни, транспортери, фільтри та ін.

Мікросистемна техніка (МСТ) — є найбільш загальним терміном для визначення виробництва пристроїв, що містять електронні та механічні компоненти з розмірами від одиниць мікрометрів до міліметрів, а також самих цих пристроїв та систем. Можливо також включення в пристрої оптичних, хімічних, акустичних, гідравлічних, магнітних та інших компонентів з тим же діапазоном розмірів.

Наявність електронних схем у пристроях та системах МСТ вимагає використання на певних етапах виробництва технологічних процесів напівпровідникової техніки. Якщо ТП мікроелектроніки

використовується також для виготовлення механічних пристроїв, то це чиста технологія МЕМС; якщо присутні й оптичні (оптико-механічні) компоненти, маємо технологію МОЕМС; з акустичними компонентами — МАЕМС і т. д. Характерною ознакою для технологій цієї групи є виготовлення всіх видів компонентів, що входять до складу пристроїв, систем, з використанням технологічних процесів мікроелектроніки, які є груповими процесами. Принцип такої класифікації показано на рис. Д8.1, а класифікація може бути продовжена відображенням інших істотних ознак систем (розподілом фізичних процесів на більше число розділів: атомна фізика, теорія газів, рідин, фізика твердого тіла, напівпровідників та ін.; хімічних процесів на неорганічну, органічну, колоїдну та фізичну хімію і т. д.).

Схема наведена для демонстрації об'єднання різних фундаментальних наук, створення складного, синтетичного напрямку, що змінює глибину пізнання світу, що дає людині нові можливості взаємодії з навколишнім середовищем, що виводить на більш високий виток розвитку.

Конструктивно виробу МЕМС бажано реалізовувати на єдиній підкладці, тобто напівпровідниковій. Але можливе одержання готових приладів і за гібридною технологією, коли механічні та електричні частини виготовляються на різних підкладках, а потім збираються в єдиний пристрій, наприклад, з використанням термокомпресійного зварювання, що забезпечує з'єднання частин на молекулярному рівні.

Крім мікроелектронних технологій, одержання мікромеханічних деталей, вузлів і виробів у МСТ може бути здійснено й іншими способами. Це мікромеханічні способи [Вернер, 2004] (мікрошліфування, алмазна та мікроерозійна обробка, мікроліття під тиском, штампування, спікання), волоконна технологія [Телець, 2004], корпускулярно-фотонне формоутворення [Нейдриен, 2004], (лазерне осадження з газової фази — LPCVD, випар, фотостимулювання полімеризації) та ін.

Оскільки мікромеханічна обробка в основному придатна лише для індивідуального виготовлення 3D-механічних елементів, а вартість обробки збільшується при зменшенні розмірів деталей та підвищенні вимог до точності, ці методи придатні для виготовлення формотворного інструмента, а також виробів аерокосмічного та військового призначення, де важливі, насамперед, габаритно-масові характеристики, а не вартість. Крім того, звичайні методи

мікромеханічної обробки придатні для виготовлення деталей порівняно малої складності.

Технології МЕМС не тільки є способом мініатюризації електронних та механічних компонентів пристроїв або їхнього виготовлення із кремнію, але й представляються парадигмою розробки та створення складних електромеханічних пристроїв з використанням групових методів виготовлення, промислових технологій.

Як промислова технологія МСТ придатна для виготовлення виробів найрізноманітніших галузей промисловості та життєдіяльності людини; дозволяє одержати вироби більш високої якості та надійності при більш низьких ГМХ та вартості; є базою для виробництва ряду виробів, які неможливо одержати іншими методами, наприклад, інструментів і науково-дослідних приладів для нанотехнологій.

Однак існує й безліч труднощів і проблем, які необхідно вирішити, перш ніж МСТ виявить всі свої переваги.

Нанотехнології є більш глобальним у порівнянні із МСТ напрямком, що охоплює всі мислимі сторони життя людини. Створення матеріалів із заданням їхніх властивостей на атомно-молекулярному рівні, синтез будь-яких складних речовин аж до органічних (у майбутньому) живих організмів повністю змінить умови життя людей.

1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕМЕНТІВ МЕМС

1.1. Ефекти масштабу в мікросистемній техніці

Властивості матеріалів можуть змінюватися не тільки в результаті зміни хімічного складу, але також і в результаті зміни форми та розмірів компонентів, матеріалів. Багато властивостей твердих тіл пов'язані з характерними розмірами, вище та нижче яких ці властивості різні. Такі характерні розміри є в діапазонах і мікро-, і нанооб'єктів.

Так, зі зменшенням розмірів елементів змінюються співвідношення об'ємних і поверхневих сил, інерційних і сил пружності твердого тіла, сил тертя та інерції, умови теплопередачі, швидкості та інші електрофізичні параметри елементів. При розмірах структур менше 100 нм багато фундаментальних властивостей речовин (температура плавлення, ширина забороненої зони напівпровідників) визначаються розмірами кристалів.

Так, діаметр екситону в напівпровідниках складає від десятків до сотень нанометрів, відстань між стінками в доменах магнітних матеріалів — сотні нанометрів, що відкриває можливість переходу до нового покоління матеріалів, властивості яких змінюються не шляхом зміни хімічного складу компонентів, а в результаті цілеспрямованого регулювання їхніх розмірів і форми, що безмежно розширює можливості матеріалознавства, а також фундаментальних наук і галузей виробництва.

При вивченні мікросистем особливий інтерес представляють наслідки пропорційного зменшення розмірів, при якому всі розміри та кути залишаються у фіксованому співвідношенні один з одним, а змінюється тільки масштаб довжини. Для того, щоб процеси залишилися незмінними, відповідні характеристичні числа повинні залишитися постійними. Деякі характеристичні числа залежать від основної одиниці «довжини», а інші незалежні від неї. Характеристичні числа, що залежать від масштабу довжини, надають інформацію для одержання загального висловлювання про

відносіть фізичних процесів у мікродіапазоні. Нижче представлені деякі характеристичні числа, які особливо цікаві для застосування в мікросистемах.

Число Коші (пружні коливання) $C_a = \frac{\rho}{E} \omega^2 l^2$ визначає

співвідношення інерційних сил і сил пружності у твердому тілі. Воно характеризує рух або вібрацію, включаючи інерційні сили (маси) і сили пружності (пружини). Число Коші залежить тільки від квадратів довжини l та частоти коливань ω , а також від властивостей матеріалу (щільності — ρ та модуля Юнга — E). За умов пружної вібрації, це співвідношення показує, що частота коливань обернено пропорційна довжині. Із цього витікає, що механічні мікросистеми мають дуже високі частоти власного резонансу, поліпшені динамічні характеристики та малий час реакції. Типове застосування — це швидкодіючий мікрOMEХАНІЧНИЙ СЕНСОР ПРискорення для автомобільних систем безпеки, інерційна маса, підвішена на балках, що використовуються в якості пружин (рис. 1.1).

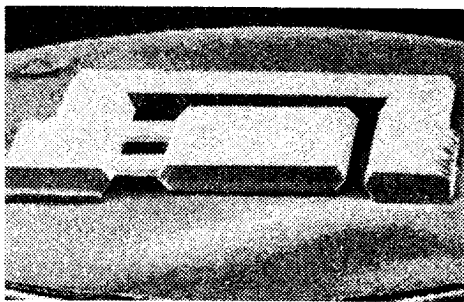


Рис. 1.1. МікрOMEХАНІЧНИЙ СЕНСОР прискорення

Число Вебера (інерція, поверхневий натяг) $W_e = \frac{\rho v^2 l}{\sigma_s}$

визначене, як співвідношення інерційних сил і поверхневого натягу. Тут v — це швидкість, ρ — щільність і σ_s — поверхневий натяг, для води значення $\sigma_s = 0,073$ Н/м. Для великих чисел Вебера інерційні сили відіграють головну роль, у той час як для малих чисел Вебера значними є сили поверхневого натягу. Число Вебера має значення при формуванні хвиль на вільних поверхнях, для потоків рідини в капілярах і каналах, а також у формуванні крапель. Число Вебера пов'язує силу поверхневого натягу з об'ємними силами. При невеликих розмірах сили, пов'язані з поверхнею, домінують.

Число Фур'є (перехідний процес під час переносу тепла) $F_0 = \frac{\lambda t}{c_p \rho l^2}$ вказує на співвідношення між накопиченою та переданою тепловою енергією. Проблеми перехідного процесу при

переносі тепла подібні, якщо число Фур'є однакове. Число Фур'є визначає ступінь проникнення та поширення тепла у випадку перехідного процесу при переносі тепла за рахунок теплопровідності з коефіцієнтом λ , питомої теплоємності c_p та щільності ρ . Число Фур'є обернено пропорційне квадрату довжини l та прямо пропорційне часові. Для $F_0 < 1$ тіло має однорідну температуру та перехідний ефект не має значення. Якщо розміри зменшені в 10 разів, то коефіцієнт теплопровідності повинен збільшитися в 100 разів для збереження постійним числа Фур'є. У мікросистемах, теплові актюатори досить швидкі для того, щоб виконати механічну функцію. Актюатори макродіапазону занадто повільні через свою теплову інерцію. Цей ефект стає очевидним у випадку теплового біметалічного актюатора, показаного на рис. 1.2. Якщо прийняти $F_0 = 1$, число Фур'є може слугувати для визначення



Рис. 1.2. Мікромеханічне термореле

швидкості розсіювання тепла крізь поверхню $l^2 = \lambda t / (c_p \rho)$, всередині якої температура може вважатися однорідною.

Число Фруда (механіка, конвекція, механіка рідини) — безрозмірна величина

$$F_r = \frac{v^2}{gl}$$

має важливе значен-

ня для всіх динамічних переміщень у гравітаційному полі [Введенский, 1966]. Воно характеризує співвідношення між інерційними силами та силами гравітації (тяжіння) залежно від швидкості v , прискорення через силу тяжіння g і масштабу довжини l . За більших значень числа Фруда ефектом сили тяжіння нехтують, у той час як за малих значень числа Фруда можна знехтувати силами інерції. Оскільки число Фруда обернено пропорційне величині довжини, ефект гравітації зменшується при зменшенні розмірів. Дійсно, малі тварини та мікроорганізми використовують більш високу частоту кроку, чим люди або більші тварини.

Число Рейнольдса (механіка рідини) $R_e = \frac{vl}{\nu}$ — найбільш широ-

ко відоме та найбільш часто використовуване характеристичне число (ν — середня швидкість рідинного середовища, l — визначальний лінійний розмір (дорівнює діаметру, якщо поперечний переріз круглий), ν — кінетична в'язкість рідинного середовища:

$\nu = \eta/\rho$, η — динамічна в'язкість рідинного середовища, ρ — щільність рідинного середовища). Воно показує співвідношення між інерційними силами та силами тертя або в'язкості в потоці рідини або газу [Степанов, 1955]. Число Рейнольдса головним чином використовується для характеристики режиму потоку рідинного середовища, як показано на рис. 1.3.

При значенні числа Рейнольдса нижчому за критичне, буде ламінарний потік; вищому за критичне, розвивається вихровий потік, швидкість і тиск якого змінюються стохастично навколо середнього значення. Часто залежне від довжини число Рейнольдса використовується для того, щоб обчислити точні розміри, за яких потік стає не ламінарним, а вихровим. Товщина граничного шару в теорії примежового ламінарного шару обернено пропорційна кореню з числа Рейнольдса. Якщо число Рейнольдса стає занадто великим або занадто малим, це призводить до спрощеного рівняння Нав'єра — Стокса. Якщо кінематична в'язкість наближається до нуля, то число Рейнольдса прямує до нескінченності $R_e \rightarrow \infty$. Випадок потоку ідеальної рідини (рівняння Ейлера) застосовуємо у випадку, якщо число Рейнольдса дуже велике. Випадок $R_e \rightarrow 0$ отриманий для дуже в'язких рідин ($\eta \rightarrow \infty$), для потоку рідини у вакуумних трубах ($\rho \rightarrow 0$), для потоку навколо малих тіл ($l \rightarrow 0$), і для

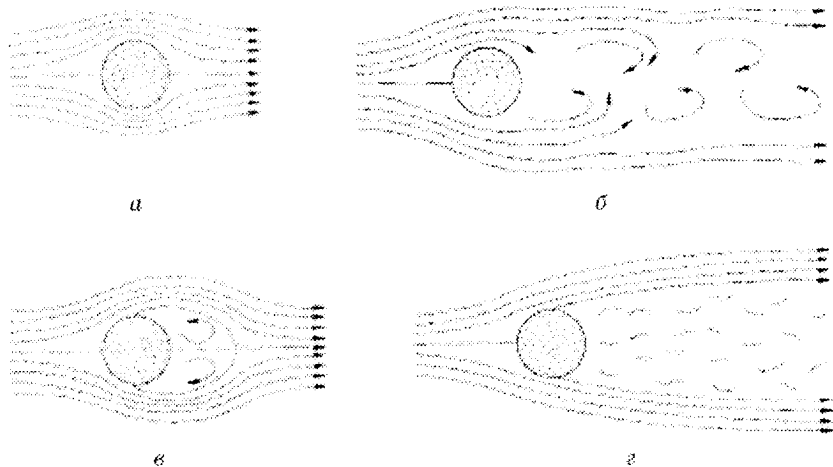


Рис. 1.3. Залежність режиму потоку текучого середовища від числа Рейнольдса: а — ламінарний потік $R_e < 4$; б — формування попутного потоку $4 < R_e < 40$; в — періодичний попутний потік $40 < R_e < 300$; г — нерегулярний попутний потік $5 \cdot 10^3 < R_e < 2 \cdot 10^5$

потоків з низькою швидкістю ($v > 0$). У цих випадках інерційними силами можна знехтувати, за допомогою чого нелінійна складова в рівнянні Нав'єра — Стокса обертається в нуль та рішення істотно спрощується.

Правила пропорційної мініатюризації приводять до факту, що на мікрорівні поверхневі сили в порівнянні з об'ємними мають більше значення. Із цього витікає, що для мікроактуаторів тертя має дуже велике значення. Крім того, через свою малу масу мікро-механічні елементи мають малу силу інерції, що веде до високих динамічних характеристик, і отже вони часто працюють із високою робочою частотою та швидкістю.

Тертя в механіці — це результат взаємодії контактних областей поверхонь.

З однієї сторони, тертя веде до втрат, які є причиною погіршення функціонування елементів, з іншої сторони, тертя призводить до зношування, що негативно впливає на функціональну поведінку та веде до прискороного старіння й, у підсумку, до поломки компонента. Тертя є ключовим чинником, що визначає не тільки ефективність, але й довговічність.

Важливі фактори, що впливають на величину тертя: стан поверхні, поверхнева топологія та взаємодіючі матеріали. У порівнянні із традиційним машинобудуванням у мікросистемах з'являється тертя твердих тіл (сухе тертя). Перехід між сухим тертям і тертям зі змащенням характеризується *формулою Зоммерфельда*:

$$S_0 = \frac{p\psi^2}{\omega\eta} \quad (1.1)$$

де $p = F/(ld)$ — тиск; $\psi = (D - d)/d$ — відносний радіальний проміжок; D — зовнішній діаметр підшипника; d — внутрішній діаметр підшипника; η — в'язкість мастила; ω — швидкість і l — довжина підшипника.

У формулі Зоммерфельда більш ніж де-небудь є присутнім сухе тертя, що є домінуючим у точному машинобудуванні та в мікро-механічних пристроях. Тому гідродинамічні підшипники ковзання, де вал рухається по замкнутій мастильній плівці, майже не вживаються. До того ж для мікро-моторів сила поверхневого натягу настільки велика, що істотно впливає на їхнє функціонування. Тому як підшипники ковзання використовують підшипники сухого тертя, які, однак, можуть бути оснащені молекулярними мастильними плівками [Бобров, 2008] для зменшення тертя та зношування. В цьому випадку характеристики мастила та контактної

поверхні стають головними факторами. З однієї сторони, характеристики матеріалів для мастильних плівок молекулярної товщини змінюються, з іншої сторони, адгезія мастил із поверхнею, що пояснюється хімічною та фізичною адсорбцією, набуває більшої важливості. Варто відзначити, що на сьогоднішній день ще не існує загальноприйнятих методів застосування молекулярних плівок товщиною в кілька нанометрів. У цьому випадку шорсткість поверхні більш важлива, аніж товщина використовуваної в мікросистемах плівки, що лежить у межах від декількох десятків до декількох сотень нанометрів.

Класична інженерна модель макроскопічного тертя має наступні істотні характеристики:

- а) сила тертя залежить тільки від нормальної сили F_N і завжди діє в напрямку, протилежному напрямку руху;
- б) сила тертя не залежить від величини поверхні стикання;
- в) сила тертя залежить від швидкості ковзання;
- г) сила тертя спокою завжди більша за силу тертя руху;
- д) сили тертя залежать тільки від двох матеріалів, які ковзають один по одному.

Наступна формула, названа законом Кулона — Амонтона (Coulomb — Amonton), виражає ці співвідношення:

$$F_{\tau} = \mu F_N \quad (1.2)$$

де F_{τ} і F_N — це тангенціальна та нормальна складові сили та μ — кінематичний коефіцієнт тертя. Будь-яка поверхня має нерівності та поверхневу хвилястість, що призводить до того, що фактична область контакту складається з окремих контактних точок. Точки контакту або нерівності становлять тільки малу частку загальної площі поверхні, що залежить від навантаження.

Оскільки винятково точки контакту роблять внесок у генерацію сили, напруга в точках контакту відповідно висока, і границя текучості матеріалу σ_m може бути досягнута за відносно малих сил. У межах контактних точок відбуваються еластичні та пластичні деформації, завдяки чому загальна сумарна площа контакту S стає прямо пропорційною тиску та обернено пропорційною граничній текучості: $S = p/\sigma_m$. У контактних областях сили міжатомної взаємодії діють між суміжними ділянками речовини, які протистоять дотичному напруженню τ . У цьому випадку сили тертя переносяться тільки в область контакту. Таким чином, сила тертя стає пропорційною фактичній площі контакту, і коефіцієнт тертя

визначається за формулою $\mu = \tau/\sigma_m$. Ця модель дає можливість пояснити тертя Кулона, тому що тертя стає пропорційним навантаженню і не залежить від уявної площі. Сума точок області, що знаходяться в реальному контакті, зростає зі збільшенням навантаження через залучення більшої області в адгезійну взаємодію деформацією. Модель також пояснює, чому різні поверхні матеріалів мають різний коефіцієнт тертя — атомні поверхні мають різні міжмолекулярні зв'язки. Деякі застосування цієї ідеї можуть підтвердити висновок про те, що грубі поверхні можуть мати менше тертя, чим дуже добре відполіровані, оскільки більша частина поверхні перебуває в контакті. Головна роль мастила — тримати поверхні роздільно.

Зношення, що супроводжує тертя, частково можна представити у вигляді наступної картини. Усередині точок контакту відбувається сильне навантаження на матеріал, що призводить до пластичних деформацій з однієї сторони та з іншого боку, через злипання точок контакту до формування тріщин на поверхні контактуючого матеріалу та в результаті до необоротних змін. Для зношення характерні наступні механізми:

- а) адгезія (злипання);
- б) абразивне зношення (стирання);
- в) ерозія через розрив оксидних покриттів;
- г) втома.

Міжатомні взаємодії — це результат руйнування та перетворення атомних зв'язків. Усередині діапазону контактної області завдяки адгезійній силі може відбуватися переміщення речовини між точками контакту та перекручування кристалічної ґратки. Переміщення речовини стає більш очевидним при комбінуванні матеріалів, які мають більшу взаємну адгезивну схожість або хімічну розчинність, створюючи більше зношення при контакті схожих поверхонь, ніж при різнорідних. При абразивному зношенні, матеріал стирається через нерівності поверхонь взаємодіючих матеріалів або через тверді частки. В основному більш твердий матеріал видаляє верхній шар більш м'якого матеріалу під час проходження контакту. Оскільки поверхня металевих матеріалів вкрита оксидною плівкою, високі локальні навантаження можуть привести до розриву оксидної плівки. Це приведе до відкриття металевої поверхні та в результаті до формування нової оксидної плівки. Втома — це результат циклічних напружень, які викликають пластичні деформації поверхні.

Вивчення тертя на атомному рівні назване нанотрибологією — це дослідження, виконані шляхом вимірювання сили тертя за допомогою растрового силового мікроскопа [Уайтсайдс, 2002]. Нові концепції й іноді інтригуючі, але суперечливі інтуїтивні результати були відкриті з тих пір, коли ця техніка була вперше представлена наприкінці 80-х років. Сили тертя породжують гармонійні коливання атомної кристалічної ґратки, що розрізняються у двох матеріалів. Енергія механічних коливань, у підсумку, виробляє тепло. Це показує, що на атомному рівні тертя — це величина, що залежить від матеріалу та пропорційна фактичній, замість уявної області контакту. Сила до того ж пропорційна ступеню своєї необоротності, наприклад, вона залежить від коефіцієнта легкості, з якою області зліплюються одна з одною. Ідеальним для запобігання тертя є матеріал, що пручається утворенню хімічних зв'язків з безліччю інших матеріалів. Ця хімічна інертність знайдена в деяких матеріалах, таких як тефлон. На атомному рівні було визначено, що сухе тертя іноді менше, ніж рідинне, тому що рідина має більший фактичний контакт між поверхнею та рідиною, що призводить до набагато більшого адгезійного тертя. Текстурування може бути насамперед використане для зменшення стикції (зліпання) і тертя спокою, тому що більш нерегулярні поверхні мають меншу стикцію. Текстурування також може надавати деяку допомогу мастильному матеріалу.

При зменшенні розмірів часток матеріалів збільшується відношення площі часток до їх об'єму S/V . Це призводить до підвищення ролі властивостей поверхні часток (поверхневих невірноважених сил) у порівнянні з об'ємними (масою). Вже при розмірах порядку одиниць мікрометрів частки при зближенні зліплюються — коагують і для їхнього роз'єднання необхідно вживати спеціальних заходів. Наприклад, впливати УЗ-коливаннями для диспергації. У наноконпонентах відношення площі до об'єму може бути настільки велике, що поверхневі ефекти стають переважаючими. Так, при напилюванні металів на підкладку спостерігається миттєве стягування часток плівки в кластери певної форми, що залежить від умов напилювання та матеріалів підкладки та дифузанта.

У мікро- та наносвіті на механічну поведінку деталі можна істотно вплинути, змінивши тонкий шар матеріалу на її поверхні.

Молекулярні сили притягання між наноб'єктами можуть перевищувати пружні сили відштовхування. Наприклад, зонд АСМ може захоплюватися й прилипати до поверхні в процесі зближення, що буде вимагати зусиль для відриву зонда при віддаленні від неї.

Для запобігання цьому на деякі елементи мікромашин, можливо, доведеться наносити спеціальні покриття, що перешкоджають прилипанню.

У випадку макромашин використовуються електромагнітні сили, а електростатичні сили мають мале значення. На противагу цьому, електромагнітні сили стають занадто малими, коли елементи мотора здобувають мікронні розміри, а електростатичні сили стають істотними. Тому електростатичні приводи в MEMS пристроях використовуються часто.

Коли розміри часток матеріалу зменшуються до значень 0,1...100 нм, все більшу роль починають грати й інші квантово-механічні ефекти [Исин, 1988]:

- синергетичні ефекти, які полягають у нелінійності змін властивостей часток залежно від їхніх розмірів;
- розмірне, зарядне й енергетичне квантування (1, 2 атомних або молекулярних шари ізоляції, заряд 1, 2 електрони, мала кількість квантів енергії, необхідної для зміни стану пристрою);
- нерівномірність розподілу домішок в об'ємі напівпровідника (концентрація основних атомів 10^{23} атом/см³, а домішок $\sim 10^{17}$ — 10^{19} атом/см³);
- збільшення взаємного впливу сусідніх елементів через зменшення проміжків між ними;
- хвильова передача та зв'язок;
- тунельний ефект;
- синергічна взаємодія декількох факторів;
- зміна оптичних, магнітних або інших властивостей, і т. ін.

1.2. Електромеханічні аналогії

Під механічною системою розуміють систему, що складається зі зв'язаних між собою твердих тіл або елементів, що мають масу, пружність, тертя. Для аналізу поведінки механічної системи при дії зовнішніх сил часто буває припустимим використання поняття ідеальних механічних елементів, тобто таких, які володіють лише однією з перерахованих властивостей: масою, пружністю або тертям. Такі елементи й будуть називатися масою, пружністю, тертям.

Елемент маси (або маса) являє собою точку або тіло, що володіє масою m та здобуває під дією зовнішньої сили F прискорення $\ddot{\xi}$:

$$F = m\ddot{\xi} \quad (1.3)$$

Це головна, переважаюча властивість елемента.

Реальні тіла під дією прикладеної сили можуть зазнавати також деформацій — пружних та непружних. Деформації супроводжуються втратами на внутрішнє тертя. Чим менше відносні розміри маси та втрати на внутрішнє тертя в ній, тим справедливішим буде прийняття основної властивості — маси.

Пружність — елемент механічної системи, у якому при закріпленні якої-небудь із точок (або низки точок) елемента та прикладанні до іншої його точки сили F відносному переміщенню зазначених точок протидіє тільки пружна сила, пропорційна відносному переміщенню ξ та коефіцієнту пружності D :

$$F = D\xi, \quad (1.4)$$

тобто $D\xi$ — це реакція пружної сили, що врівноважує прикладену зовнішню силу.

Тертя визначає втрати енергії, що виникають через відносне переміщення частин механізму або внутрішнє тертя, може бути чітко вираженим конструктивним елементом або характеризувати втрати мікро- та макропереміщень із деформаціями або без деформацій частин тіла. Сила тертя пропорційна відносній швидкості переміщення частин пристрою та коефіцієнту тертя R , тобто

$$F = R\dot{\xi}, \quad (1.5)$$

Лінійній залежності підпорядковується в'язке тертя.

Внутрішнє тертя може мати більш складну залежність:

$$F = R(\dot{\xi})\dot{\xi} \quad (1.6)$$

У конструктивних елементах, що утворюють кінематичні пари, розрізняють тертя ковзання та тертя котіння, їхні коефіцієнти відрізняються приблизно на порядок.

Елементи пружності та тертя, звичайно ж, володіють і масою, але властивості пружності та тертя в них є визначальними.

Замість пружності іноді використовується термін «жорсткість», що відноситься до властивостей деякого пружного елемента, представленого певною конструкцією (наприклад, балка, пружина, мембрана, торсіон).

Будь-який механічний елемент (m , D або R) чинить опір діючій на цей елемент силі, отже, величина швидкості переміщення тієї або іншої точки механічної системи під впливом прикладеної сили буде залежати не тільки від величини цієї сили, але й від величини зазначеної реакції.

Для усталеного коливального процесу під дією гармонічної сили з постійною амплітудою будь-який механічний елемент чинить деякий опір коливальній швидкості $\dot{\xi}$. Отже, можна прийняти

$$\dot{\xi} = \frac{F}{Z_m}, \quad (1.7)$$

де F — гармонічна сила, $F = F_m e^{i\omega t}$; Z_m — повний або комплексний механічний опір.

Можна бачити відповідність виразів (1.5) і (1.7) для випадку нехтування масою та пружністю елемента, тобто присутності одних сил тертя, звідси R характеризує необоротні втрати на тертя та називається активним механічним опором. У комплексному або повному опорі Z_m за аналогією з електричними колами, крім активного механічного опору R , присутні й реактивні складові X_m і X_c , створювані елементами маси та пружності відповідно:

$$Z_m = R + iX. \quad (1.8)$$

Для аналізу механічних елементів широко використовується символічний метод, операційне числення та Z -перетворення [Калантаров, 1951].

При впливі сили F на масу m маємо:

$$F = mg = m \frac{d\dot{\xi}}{dt},$$

де g — прискорення вільного падіння, m/c^2 ;

Переходячи до амплітудних значень, одержимо:

$$F_m = i\omega \cdot m \dot{\xi}_m, \quad (1.9)$$

де $\dot{\xi}_m$ — комплексна амплітуда зсуву (необхідно пам'ятати, що максимальних значень $\dot{\xi}$ і F досягають у різні моменти часу. На комплексній площині цьому зсуву відповідає кут ϕ повороту вектора-наслідку від вектора-причини, додатним значенням ϕ відповідає поворот проти годинникової стрілки).

Тоді

$$\frac{F_m}{\dot{\xi}_m} = i\omega \cdot m. \quad (1.10)$$

У загальному випадку, кожному механічному ланцюгу, що складається з елементів маси, пружності та тертя, може бути поставлене у відповідність електричне коло, що містить «еквівалентні» значення ємності C , індуктивності L та опору R .

Для вивчення періодичних процесів зі зміною діючих сил, зсувів, швидкостей та деформацій за гармонічним законом у механічних ланцюгах і напруг, струмів, зарядів в електричних схемах зручно використовувати символічний метод, заснований на застосуванні комплексних чисел для зображення дійсних гармонічних функцій часу, що спрощує зображення змінних, що містять у собі дві величини — модуль A й аргумент φ за показової форми запису [Калантаров, 1951]

$$\dot{A} = A \cdot e^{i\varphi}. \quad (1.11)$$

або дійсну $a_1 = A \cos \varphi$ та уявну $ia_2 = iA \sin \varphi$, що складають при алгебраїчній і тригонометричній формах запису:

$$\dot{A} = a_1 + ia_2 = A \cos \varphi + iA \sin \varphi, \quad (1.12)$$

де $i = \sqrt{-1}$, e — основа натуральних логарифмів.

Для дійсної та уявної частин комплексного числа вживаються такі позначення: $a_1 = \text{Re}(\dot{A})$, $a_2 = \text{Im}(\dot{A})$.

Нагадаємо, що

$$e^{i(\alpha \pm 2\pi)} = e^{i\alpha}, \quad i = e^{i\frac{\pi}{2}}, \quad -i = \frac{1}{i} = e^{-i\frac{\pi}{2}}, \quad i^2 = -1, \\ e^{\pm i\pi} = -1, \quad e^{i\frac{3}{2}\pi} = -i, \quad e^{\pm i2\pi} = 1. \quad (1.13)$$

Дві комплексні величини, що мають рівні модулі та рівні, але протилежні за знаком аргументи, називають *спряженими*.

Якщо маємо комплексне число $\dot{A} = A \cdot e^{i\varphi} = a_1 + ia_2$, то спряжене до нього комплексне число

$$\dot{A}^* = A \cdot e^{-i\varphi} = a_1 - ia_2. \quad (1.14)$$

$$\dot{A} \dot{A}^* = A \cdot e^{i\varphi} \cdot A \cdot e^{-i\varphi} = A^2. \quad (1.15)$$

$$\text{Re}(\dot{A}) = \frac{1}{2}(\dot{A} + \dot{A}^*), \quad \text{Im}(\dot{A}) = \frac{1}{2i}(\dot{A} - \dot{A}^*). \quad (1.16)$$

Множення комплексного числа на $e^{i\varphi}$ рівнозначне повороту відповідного до цього числа вектора на кут φ проти годинникової стрілки, а множення на $e^{-i\varphi}$ повертає вектор на кут φ за годинниковою стрілкою.

Миттєві значення, що змінюються в часі за синусоїдальним законом, наприклад, швидкість

$$\dot{\xi} = \dot{\xi}_m \sin \omega t \quad (1.17)$$

або сила

$$\dot{F} = \dot{F}_m \sin \omega t, \quad (1.18)$$

можуть бути визначені через проекції на яку-небудь вісь відповідного вектора, що обертається з рівномірною кутовою швидкістю ω та складає в кожний момент із цією віссю кут $\alpha = \omega t$.

У загальному випадку

$$\bar{A} = A \cdot e^{i(\omega t + \varphi)} = A \cdot e^{i\varphi} e^{i\omega t} = \dot{A} e^{i\omega t}, \quad (1.19)$$

де φ — початковий (постійний) кут зсуву.

Величина $\dot{A} \cdot e^{i\varphi}$ називається комплексною амплітудою. Вона характеризує довжину вектора (модуль, амплітуду й ін.) і його початкове положення на площині. Множник $e^{i\omega t}$ характеризує гармонійний закон зміни (обертання) миттєвих величин.

Легко одержати похідну за часом:

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = i\omega \bar{A} \cdot e^{i\omega t} = i\omega \bar{A}; \quad \frac{\partial^n \bar{A}}{\partial t^n} = (i\omega)^n \bar{A} \quad (1.20)$$

і інтеграл

$$\int \bar{A} dt = \frac{\dot{A} \cdot e^{i\omega t}}{i\omega} = \frac{\bar{A}}{i\omega}. \quad (1.21)$$

Таким чином, операція диференціювання за часом зводиться до множення на $i\omega$ або/та повороту на кут $\pi/2$ проти годинникової стрілки та збільшенню комплексної амплітуди в ω раз, а інтегрування рівносильне зменшенню амплітуди в ω раз і повороту вектора на $\pi/2$ за годинниковою стрілкою. Комплексний метод є методом вирішення алгебраїчних диференціальних рівнянь, що полягає в тому, що спочатку всі задані функції часу замінюємо їхніми комплексними зображеннями та всі диференціальні й алгебраїчні рівняння замінюємо алгебраїчними рівняннями в комплексній формі, що містять комплексні величини заданих і шуканих функцій та їхніх похідних та інтегралів. Вирішуючи ці алгебраїчні рівняння, знаходимо комплексні вирази шуканих функцій і від них переходимо до оригіналів цих функцій. У механічних системах вихідні диференціальні рівняння виражають баланс сил у кожний момент часу (принцип Даламбера), а в електричних колах вони складаються відповідно до законів Кірхгофа. Розглянемо паралельно реакції механічних систем та електричних кіл при дії на перші гармонічної сили F і на другі — струму i , відповідно:

$$F = F_m \cdot e^{i\omega t}; \quad (1.22)$$

$$i = I_m \cdot e^{i\omega t}. \quad (1.23)$$

При дії сили F на масу m маємо:

$$F = m\ddot{\xi} = m \frac{d^2 \dot{\xi}}{dt}, \quad (1.24)$$

де ξ , $\dot{\xi}$ і $\ddot{\xi}$ — зсув, швидкість і прискорення.

Переходячи до амплітудних значень, маємо:

$$\dot{F}_m = i\omega m \dot{\xi}_m, \quad (1.25)$$

$$\frac{\dot{F}_m}{\dot{\xi}_m} = i\omega m. \quad (1.26)$$

Дія сили на елемент пружності дає

$$F = D\xi, \quad (1.27)$$

але

$$\xi = \int \dot{\xi}_m dt = \frac{\dot{\xi}_m}{i\omega}. \quad (1.28)$$

Тому

$$F_m = \dot{\xi}_m \frac{D}{i\omega}, \quad (1.29)$$

$$\frac{F_m}{\dot{\xi}_m} = \frac{D}{i\omega}. \quad (1.30)$$

Для елемента тертя

$$F = R\dot{\xi}, \quad (1.31)$$

$$\frac{F_m}{\dot{\xi}_m} = R. \quad (1.32)$$

При дії сили на послідовно з'єднані елементи маси пружності та тертя вона врівноважується спільними реакціями елементів, що можна представити рівнянням:

$$\frac{F_m}{\dot{\xi}_m} = R + i\omega m + \frac{D}{i\omega} = R + X_m + X_c = R + iX = Z_{\text{мех}}, \quad (1.33)$$

де $X_m = i\omega m$ — інерційний, а $X_c = \frac{D}{i\omega}$ — пружний опір.

Величина $c = \frac{1}{D}$ в механіці називається гнучкістю.

Останнє рівняння аналогічне до рівняння, що пов'язує значення струмів і напруг в електричному колі, що містить послідовно

ввімкнені активний опір R , котушку індуктивності L і конденсатор з ємністю C :

$$\dot{\xi}_m \left(R + i\omega m + \frac{D}{i\omega} \right) = \dot{F}_m; \quad (1.34)$$

$$\dot{I}_m \left(R + i\omega L + \frac{1}{i\omega C} \right) = \dot{U}_m. \quad (1.35)$$

$$k = \frac{D}{\omega} = \frac{1}{\omega \cdot C}. \quad (1.36)$$

Для цього ланцюга маємо:

$$Z = R + i\omega L + \frac{1}{i\omega C}. \quad (1.37)$$

Зіставлення виразів (1.34)—(1.35) демонструє відповідність механічних і електричних величин, наведених у табл. 1.1 згідно з першим законом Кірхгофа.

Таблиця 1.1

Відповідні одна до одної механічні й електричні величини

Механічні	Електричні
F — сила	U — напруга
$\dot{\xi}$ — швидкість	I — струм
m — маса	L — індуктивність
$c = \frac{1}{D}$ — гнучкість	C — ємність
R — втрати на тертя	R — активний опір
Y — піддатливість	Y — комплексна провідність

Тому подальший аналіз механічних і еквівалентних їм електричних кіл абсолютно ідентичний, а характер процесів визначається співвідношеннями активної та реактивної складових комплексного опору ланцюга.

Тоді зв'язок між модулями діючої сили, швидкості й опору описується в механічній системі виразом

$$\dot{\xi}_m = \frac{\dot{F}_m}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{\dot{F}_m}{|Z_{\text{мех}}|}. \quad (1.38)$$

Фазовий кут зсуву j між швидкістю та силою, створюваною опором $|Z_{\text{мех}}|$, визначається співвідношенням

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} \quad (1.39)$$

і може бути будь-якого знака залежно від величини X . Величина, зворотна механічному опору, називається піддатливістю:

$$Y = \frac{1}{|Z_{\text{мех}}|} \quad (1.40)$$

Вільні коливання в механічних системах із зосередженими параметрами

Розглянемо поздовжні коливання в найпростішій механічній системі, що містить зосереджені елементи маси m , пружності D , втрат R . Як відомо з [Степанов, 1959], за відсутності зовнішніх сил механічної системи, що має запас енергії, коливання в системі описуються диференціальним рівнянням другого порядку:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + R \frac{dx}{dt} + kx = 0. \quad (1.41)$$

Вирішення рівняння залежить від стану параметрів, що входять у нього [Степанов, 1959]. Причому частота власних коливань системи

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}. \quad (1.42)$$

Позначивши

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2; \quad (1.43)$$

$$\beta = \frac{R}{2m}, \quad (1.44)$$

розглянемо можливі співвідношення параметрів:

$$\begin{aligned} \beta < \omega_0 \text{ або } R < 2\sqrt{mk} \quad (R < 2\sqrt{\frac{m}{c}}); \\ \beta = \omega_0 \text{ або } R = 2\sqrt{mk} \quad (R = 2\sqrt{\frac{m}{c}}); \\ \beta > \omega_0 \text{ або } R > 2\sqrt{mk} \quad (R > 2\sqrt{\frac{m}{c}}). \end{aligned} \quad (1.45)$$

Механічні елементи, як і електричні, можуть з'єднуватися послідовно або паралельно з іншими механічними елементами для утворення складних ланцюгів, а їхній стан може перетворюватися

в електромагнітні величини з використанням ємнісних, електромагнітних, п'єзоелектричних та інших ефектів. Слід зазначити, що еквівалентні значення електричних параметрів, механічних елементів можуть значно перевищувати значення цих параметрів, досяжних при використанні електронних компонентів. Так, добротність коливального контуру, реалізованого на вібруючому кільці [Ayazi, 2001], може досягти при вакуумуванні робочого об'єму $(20-80) \cdot 10^3$; чутливість MEMC-конденсатора до зміни ємності в ємнісних акселерометрах перебуває у межах 100 аФ [Телець, 2004]. Цей факт може з успіхом використовуватися для поліпшення електрофізичних характеристик MEMC.

Існує декілька заслужовуючих на увагу переваг NEMS-пристроїв, які створюють гарну перспективу їхнього подальшого розвитку. Мала ефективна маса нанометрової балки робить її резонансну частоту надзвичайно чутливою до незначних змін маси. Наприклад, власна частота кантилеверів може реагувати на адсорбцію невеликого числа атомів або одиничних молекул на поверхні. Це стало принциповою основою для безлічі дуже високочутливих датчиків.

Нанорозмірні кантилевери мають дуже високі значення добротності Q і при коливаннях розсіюють мало енергії. Прилади на їхній основі мають високу чутливість, що істотно для їхнього застосування в якості датчиків. Крім того, вони мають низький рівень термомеханічних шумів, що означає можливість досягнення високої реальної чутливості приладу. У звичайних електричних пристроях добротність порядку декількох сотень вважається високою, тоді як NEMS-осцилятори можуть мати Q в 10^3 разів більше. Ще одна перевага NEMS-приладів — дуже мале енергоспоживання. Потужності в піковат достатньо для роботи NEMS-приладу з малим відношенням сигнал/шум.

1.3. Сенсори та актюатори

Механічні величини є найважливішими параметрами, контрольованими в технологічних процесах практично в усіх галузях народного господарства. Збільшення точності вимірювання механічних параметрів підвищує вірогідність одержуваних результатів вимірів і надійність функціонування систем. Потреба у вимірювальних приладах в умовах промисловості, що розвивається, наростає, й одночасно потрібне розширення їхніх можливостей та поліпшення технічних і експлуатаційних характеристик. Це досягається застосуванням нових конструкцій вимірювальних ПМВ,

схемотехнічних рішень, а також засобів сучасної цифрової електроніки й алгоритмічних методів корекції похибок і т. ін. Питання підвищення точності вимірів, довгострокової стабільності метрологічних характеристик, розширення функціональних можливостей перетворювачів і зниження собівартості є закономірними в постійному еволюційному процесі розвитку й удосконалювання засобів вимірювань.

Механічні величини можна розділити на три основні групи:

- лінійні та кутові розміри, геометричні параметри площин;
- узагальнені сили, напруження, тиски, моменти сил;
- параметри руху — положення, швидкості та прискорення (лінійні та кутові);

Вимірювання проводять за допомогою різноманітних датчиків, які здійснюють функцію первинного елемента перетворення, що сприймає інформацію від об'єкта та перетворює її для передачі в канали інформаційно-вимірювальних систем. Якщо датчики будуть мати недостатню швидкодію, велику похибку, низьку надійність, то й уся система, незалежно від ступеня досконалості обчислювальних пристроїв, буде працювати незадовільно. Датчики — це джерела вихідної інформації, їхня похибка не може бути скоректована ніякими наступними пристроями.

Технічна досконалість датчиків механічних величин залежить від безлічі конструктивно-технологічних і схемотехнічних рішень. При цьому величезний потенціал закладено у питаннях реалізації пружного елемента, його фізико-механічних властивостях, конструкції та технології виготовлення. Тиск незмінно посідає перше місце серед усіх контрольованих параметрів [Ваганов, 1988], до того ж багато видів вимірювань базуються на перетворенні тисків (сила, рівень, витрата, переміщення та т. ін.).

Вимір нестационарних тисків і переміщень пред'являє низку особливих вимог до пружних елементів перетворювачів.

Пружний елемент повинен мати певні динамічні властивості, мати лінійну пружну характеристику та високу чутливість.

Від динамічних властивостей пружного елемента залежить одержання правильного запису швидкозмінних величин. Найважливішими параметрами, що характеризують якість системи, є власна частота коливань і величина сил опору коливальної системи. Однак найбільш повне уявлення про динамічні властивості коливальної системи можна одержати за допомогою амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик.

1.3.1. Ємнісні чутливі елементи

Серед МЕМС, на основі яких створюються прилади для керування рухом, — акселерометри та датчики кутових швидкостей (ДКС) або мікрогіроскопи, переважну більшість займають ємнісні мікромеханічні системи (ЄМС), у яких знімання сигналу про вимірювану фізичну величину чи електростатичний вплив на рухомий елемент, а також обидві дії разом реалізуються за допомогою простого або диференціального мікромеханічного конденсатора. У простому конденсаторі одна обкладка є нерухомою, а друга рухома щодо неї. У диференціальному конденсаторі рухомий електрод з погляду електронної схеми поєднує в собі дві «внутрішні» обкладки пари послідовно з'єднаних конденсаторів. Оскільки моделі ЄМС у першу чергу призначені для аналізу акселерометрів або ДКС, то практичний інтерес представляє створення динамічної моделі, що забезпечує одержання залежності переміщення рухомих елементів ЄМС від часу при впливі сил пружності, інерції та електростатики.

Основні принципи побудови SPICE-макромоделей ЄМС

Відповідно до математичного апарата PSPICE, конденсатор ЄМС можна представити як «аналоговий функціональний блок», що може бути змодельований за допомогою джерел напруги (E) або струму (G). Очевидно, що для конденсатора залежність між прикладеною напругою, струмом навантаження та ємністю, що змінюється в часі, у більш простому для моделювання випадку має вигляд залежності струму від напруги та ємності:

$$I = -\frac{dQ}{dt} = -\left(V \cdot \frac{dC}{dt} + C \cdot \frac{dV}{dt} \right). \quad (1.46)$$

Аналогічним чином схема диференціального мікромеханічного конденсатора представляється триполюсником із двома джерелами струму. При цьому функціональна залежність джерел визначається за виразами

$$I_1 = -\frac{dQ_1}{dt} = -\left(V_{21} \cdot \frac{dC_1}{dt} + C_1 \cdot \frac{dV_{21}}{dt} \right); \quad (1.47)$$

$$I_2 = -\frac{dQ_2}{dt} = -\left(V_{32} \cdot \frac{dC_2}{dt} + C_2 \cdot \frac{dV_{32}}{dt} \right). \quad (1.48)$$

Схеми заміщення представлені на рис. 1.4.

Розрахунок потенціалів у вузлах схеми та їхніх похідних здійснюється в будь-якій системі аналізу електронних схем і відповідно в PSPICE. Отже, подальшим етапом розробки динамічних моделей ЄМС є математичний опис рівнянь руху рухомих елементів ЄМС та відповідне одержання виразів для ємності.

Для плоского конденсатора (рис. 1.5) накопичена енергія U може бути розрахована за формулою

$$U = \frac{CV^2}{2}, \quad (1.49)$$

де C — ємність і V — напруга між обкладками конденсатора.

Коли пластини конденсатора переміщуються назустріч одна одній, робота, виконувана силою взаємодії між ними, може бути розрахована, як зміна U залежно від зміни відстані x . Сила розраховується за формулою (1.50) з урахуванням виразу визначення C

$$F_x = \frac{V^2}{2} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1.50)$$

Існує декілька варіантів реалізації електростатичних актуаторів на основі плоскопаралельних конденсаторів (рис. 1.6, с. 44).

Розглянемо методику одержання моделей для акселерометра на основі диференціального мікромеханічного конденсатора. Практично всі конструктивні варіанти подібних акселерометрів

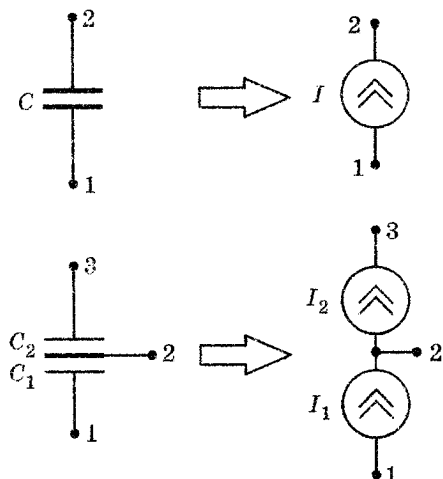


Рис. 1.4. Схема заміщення одиночного та диференціального конденсаторів ЄМС залежними джерелами струму

анти подібних акселерометрів

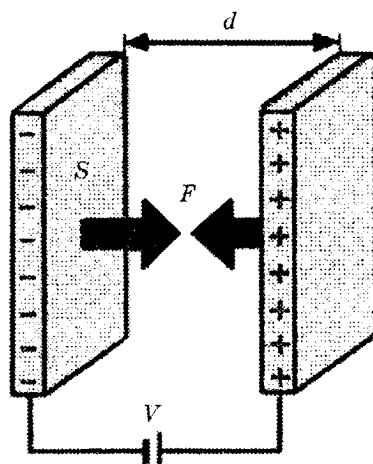


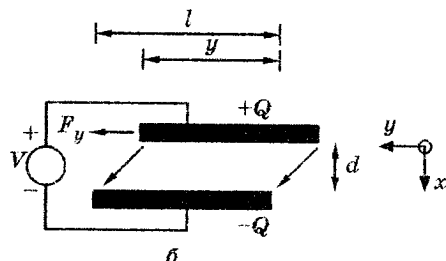
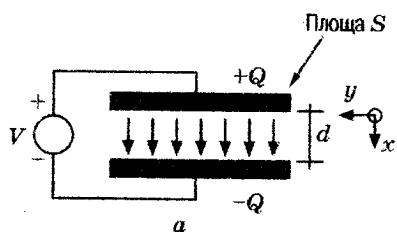
Рис. 1.5. Модель плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{x}$$

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S}{x^2} V^2$$

$$C = \frac{\epsilon_0 y z}{d}$$

$$F_y = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 z}{d} V^2$$



$$C = C_{\text{пов}} + C_{\text{серд}} = \frac{\epsilon_0(1-y)z}{d} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_d y z}{d}$$

$$F_y = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 (\epsilon_d - 1) z}{d} V^2$$

$$F_y = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 z d}{d(d-d')} V^2$$

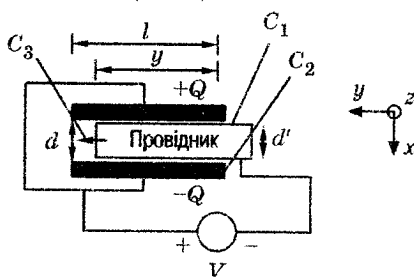
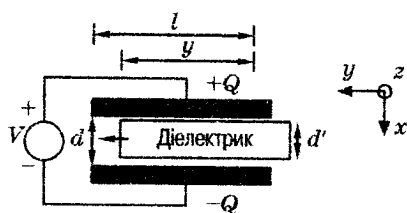


Рис. 1.6. Варіанти зміни ємності конденсаторів:

- a* — перпендикулярний рух обкладинок; *б* — зсув по довжині обкладин; *в* — введення діелектрика в проміжок; *г* — введення в проміжок провідника

з погляду опису руху рухомого електрода можна розділити на два типи. До першого типу належать конструкції з лінійним переміщенням рухомого електрода між міцно закріпленими нерухомими електродами (рис. 1.7).

У цьому випадку рівняння лінійного переміщення в напрямку, перпендикулярному площинам акселерометра, у системі координат, прив'язаній до нерухомих елементів акселерометра, визначається за наступними силами:

- силою інерції внаслідок впливу зовнішнього прискорення;
- силою гальмування, пропорційною до швидкості руху, викликаную демпфуванням, тертям та іншими видами втрат енергії;

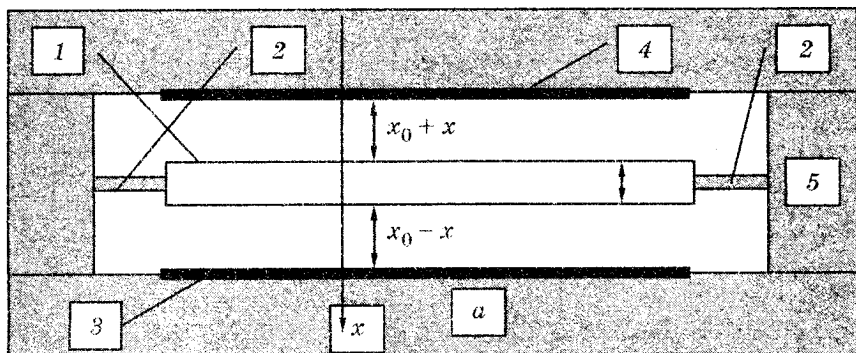


Рис. 1.7. Схема акселерометра на основі плоского мікромеханічного диференціального конденсатора: 1 — кремнієвий рухомий електрод; 2 — пружний підвіс; 3 — підкладка з першим керуючим електродом (напруга V_{12} щодо рухомого електроду); 4 — підкладка із другим керуючим електродом (напруга V_{32} щодо рухомого електроду); 5 — рамка закріплення пружного підвісу

- силою пружності підвісу (порядок розрахунку наведений у розділі 2.1);
- силою електростатичного притягання внаслідок різниці потенціалів між обкладинами конденсатора.

Оскільки всі ці сили в цьому випадку описуються тривіальними виразами, то загальне рівняння виглядає наступним чином:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} - R \frac{dx}{dt} - kx - \frac{\varepsilon \cdot S \cdot V_{12}^2}{2(x_0 + x)^2} + \frac{\varepsilon \cdot S \cdot V_{12}^2}{2(x_0 - x)^2} = 0. \quad (1.51)$$

Математичний апарат і технічні можливості PSPICE забезпечують складання еквівалентної схеми та вирішення рівняння (1.51).

На рис. 1.8 (с. 46) показані результати розрахунку залежності зміщення рухомого електроду від часу в результаті впливу зовнішнього прискорення величиною $40g$ на акселерометр, характеристики якого представлено в табл. 1.2 при постійній напрузі між рухомих і нерухомих електродами, що дорівнює 5 В .

Отримана залежність $x(t)$ визначає значення ємностей C_1 і C_2 :

$$C_1 = \frac{\varepsilon \cdot S}{(x_0 - x)}, \quad (1.52)$$

що, у свою чергу, забезпечує знаходження функціональних залежностей (1.47) і (1.48).

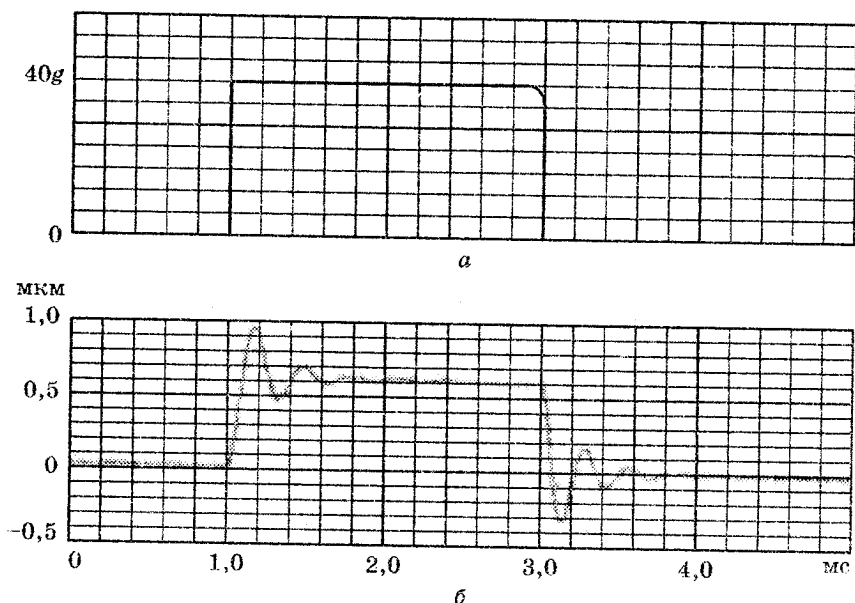


Рис. 1.8. Моделювання зміщення рухомого електрода ємнісного акселерометра в системі PSPICE:

a — вплив прискорення; *b* — зміщення

Таким чином, на основі представлених співвідношень отримана еквівалентна SPICE-модель акселерометра на основі мікромеханічного диференціального конденсатора. Модель забезпечила можливість спільного моделювання механічного руху рухомого електрода ЄМС і процесів в електричній схемі. Проведене моделювання при підстановці різних параметрів, зміні діючого прискорення та напруг між електродами показали правильність зроблених припущень і збіг результатів моделювання з оцінками та розрахунками, зробленими за допомогою інших методів.

Розроблена методика застосовна до будь-якої ЄМС, для якої визначена математична модель, аналогічна тим, що представлені вище.

Розглянемо одержання даної моделі для другого конструктивного типу ємнісного акселерометра, схема якого показана на рис. 1.9. У даній конструкції рухомий електрод може виконувати оберতальне (кутове) переміщення відносно осі, що проходить через центри торсіонів пружного підвісу. Відповідно основними параметрами замість зсуву x і маси m будуть кут повороту a та момент сил M .

Параметри моделі ємнісного акселерометра

Позначення параметра	Найменування (позначення у формулі (1.51))	Розмірність	Значення
M	Маса рухомого електрода	кг	$5,256 \cdot 10^{-9}$
R	Коефіцієнт сили гальмування (демпфування)	$\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}$	$3,26 \cdot 10^{-5}$
K	Коефіцієнт жорсткості пружного підвісу	$\text{Н}/\text{м}$	4,81
S	Площа електродів	м^2	$123,75 \cdot 10^{-9}$
x_0	Відстань між рухомих і нерухомих електродами в стані спокою	м	$2,0 \cdot 10^{-6}$
ϵ	Діелектрична постійна	$\Phi/\text{м}$	$8,85 \cdot 10^{-12}$

Вплив поперечного до поверхні кристала прискорення буде повертати масу відносно торсіонів внаслідок різного розміру лівої та правої частин маятника — L_1 і L_2 , відповідно. Нехай W — ширина маятника та нижніх електродів; X_1, X_2 і X_3, X_4 — координати відповідних границь керуючих електродів 3 і 4; (x, α) — відстань від маятника до поверхні електродів.

Розглянемо моменти сил, що діють на маятник.

Момент сил пружності внаслідок крутіння торсіонів

$$M_{\text{пр}} = \frac{\alpha G I_p}{l}, \quad (1.53)$$

де G — модуль пружності при крутінні; I_p — полярний момент поперечного перерізу торсіона; $G I_p$ — жорсткість або пружність при крутінні; l — довжина частини торсіона, що закручується.

Моменти, що діють на елементи маси маятника

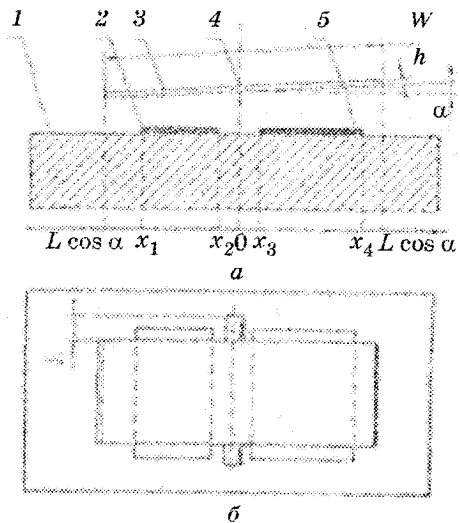


Рис. 1.9. Ескіз конструкції маятникового акселерометра:
 1 — кремнієвий маятник (рухомий електрод); 2 — торсіони підвісу;
 3 — перший керуючий електрод (напруга V_{12} відносно маятника);
 4 — другий керуючий електрод (напруга V_{32} відносно маятника);
 5 — підкладка

внаслідок зовнішнього прискорення a , дають результуюче значення моменту крутіння

$$M(a) = \int_{-L_1 \cos \alpha}^{L_2 \cos \alpha} x a d m = a \rho W h \int_{-L_1 \cos \alpha}^{L_2 \cos \alpha} x dx = \frac{1}{2} a \rho W h (L_2^2 - L_1^2) \cos^2 \alpha, \quad (1.54)$$

де ρ — щільність матеріалу торсіона; W і h — відповідно ширина та товщина маятника.

Моменти, що діють на маятник внаслідок сил електростатичного притягання F_{ec} ,

$$M_{ec1} = \int_{x_1}^{x_2} x d F_{ec} = \int_{x_1}^{x_2} x \frac{\varepsilon \cdot V_{12}^2 \cdot W}{2(d+x \operatorname{tg} \alpha)} dx =$$

$$= \frac{\varepsilon \cdot V_{12}^2 \cdot W}{2(\operatorname{tg} \alpha)^2} \left[\ln \frac{1+(X_2/d) \operatorname{tg} \alpha}{1+(X_1/d) \operatorname{tg} \alpha} + \frac{1}{1+(X_2/d) \operatorname{tg} \alpha} - \frac{1}{1+(X_1/d) \operatorname{tg} \alpha} \right]; \quad (1.55)$$

$$M_{ec1} = \frac{\varepsilon \cdot V_{32}^2 \cdot W}{2(\operatorname{tg} \alpha)^2} \left[\ln \frac{1+(X_4/d) \operatorname{tg} \alpha}{1+(X_3/d) \operatorname{tg} \alpha} + \frac{1}{1+(X_4/d) \operatorname{tg} \alpha} - \frac{1}{1+(X_3/d) \operatorname{tg} \alpha} \right]; \quad (1.56)$$

$$M_{ec} = M_{ec1} - M_{ec2}. \quad (1.57)$$

Зрозуміло, що активний кутовий момент, розрахований шляхом підсумовування елементарних моментів, створюваних прискоренням a , що діє під кутом ($90^\circ - \alpha$) на елементарні маси d_m лівої й правої частин маятника, пов'язаний з моментом інерції маятника I щодо осі торсіона співвідношенням

$$M(a) \equiv I \frac{d^2 \alpha}{dt^2}. \quad (1.58)$$

Отже, рівняння кутових коливань маятника буде виглядати таким чином:

$$M(a) - \lambda \frac{d\alpha}{dt} - \frac{GI_{\text{торс}} \alpha}{l} + M_{ec} = 0, \quad (1.59)$$

де λ — коефіцієнт сили гальмування (демпфування); $I_{\text{торс}}$ — полярний момент поперечного перерізу торсіона.

Таким чином, створований прискоренням та електростатичною взаємодією рухомих частин маятника активний момент зрівноважується моментом крутіння торсіона та втратами.

Як і слід було сподіватися, рівняння коливань маятника (1.59) виглядає аналогічно рівнянню (1.51) при більш складній залежності окремих його складових від шуканої функції. Для завершення математичної моделі до представлених рівнянь необхідно додати залежність ємностей від кута α :

$$C_1 = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\varepsilon \cdot W dx}{d(x, \alpha)} = \left(\frac{\varepsilon \cdot W}{\operatorname{tg} \alpha} \ln \frac{d + X_2 \operatorname{tg} \alpha}{d + X_1 \operatorname{tg} \alpha} \right); \quad (1.60)$$

$$C_1 = \int_{x_3}^{x_4} \frac{\varepsilon \cdot W dx}{d(x, \alpha)} = \left(\frac{\varepsilon \cdot W}{\operatorname{tg} \alpha} \ln \frac{d + X_4 \operatorname{tg} \alpha}{d + X_3 \operatorname{tg} \alpha} \right). \quad (1.61)$$

Дані вирази мають невизначеність при значеннях $\alpha = 0$. Тому в області малих значень кутів закручування (тобто саме в області функціонування акселерометра) їхній вигляд для практичних розрахунків при моделюванні повинен бути змінений відповідно до правил знаходження границь функції при $\alpha \rightarrow 0$:

$$C_1 = \varepsilon \cdot W \left(\frac{X_2}{d + X_2 \operatorname{tg} \alpha} - \frac{X_1}{d + X_1 \operatorname{tg} \alpha} \right); \quad (1.62)$$

$$C_2 = \varepsilon \cdot W \left(\frac{X_4}{d + X_4 \operatorname{tg} \alpha} - \frac{X_3}{d + X_3 \operatorname{tg} \alpha} \right). \quad (1.63)$$

1.3.2. Індуктивні чутливі елементи

Магнітним аналогом конденсатора з рухомою пластиною є індуктивність із рухомою котушкою. Ці пристрої також належать до класу енергонакопичувальних перетворювачів. У них використовуються два види енергії: магнітна та механічна. Спрощена схема такого перетворювача наведена на рис. 1.10 (с. 50).

Коли через котушку протікає струм i , створюється магнітний потік Φ . Вважаючи систему ідеальною, тобто нехтуючи власною ємністю й опором котушки, а також механічною масою й тертям, можна вивести основні співвідношення для такого перетворювача, що зв'язують струм i і силу F з переміщенням X і потоком магнітної індукції B .

Нехай нерухомий якір має обмотку з N витків. Вважаючи магнітну проникність рухомої та нерухомої частин магнітопроводу

в багато разів більшою за проникність повітря μ_0 , можна вважати, що магнітний опір такого перетворювача буде визначатися тільки проміжком d_0 між ними.

З урахуванням двох проміжків вираз для повного магнітного опору має вигляд

$$R \approx \frac{2d(t)}{\mu_0 S}, \quad (1.64)$$

де S — площа поперечного перерізу проміжку.

Зрозуміло, що в стані спокою

$$R_0 \approx \frac{2d_0}{\mu_0 S}. \quad (1.65)$$

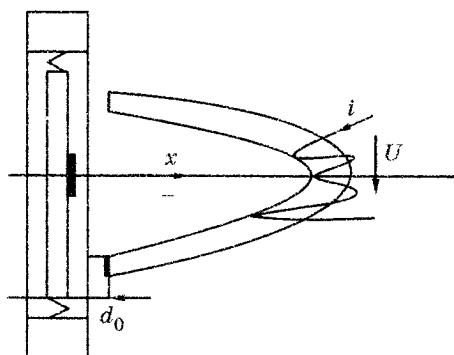


Рис. 1.10. Схема електромагнітного перетворювача

Положення фіксованого елемента на рухомій частині можна виразити у вигляді

$$d(t) = d_0 - x(t). \quad (1.66)$$

Тоді одержимо

$$R = R_0 \left(1 - \frac{x}{d_0}\right). \quad (1.67)$$

Індуктивність котушки може бути виражена через повний магнітний опір у вигляді:

$$L = \frac{N^2}{R} = L_0 \left(1 - \frac{x}{d_0}\right)^{-1}. \quad (1.68)$$

Цей вираз можна спростити для випадку малих переміщень, розклавши його в ряд Тейлора. Ігноруючи члени високого порядку, одержуємо:

$$L \approx L_0 \left(1 + \frac{x}{d_0}\right). \quad (1.69)$$

Напруга, індукована на котушці, дорівнює:

$$U = -\frac{d(Li)}{dt} \approx -L_0 \frac{di}{dt} - L_0 i \frac{v}{d_0}, \quad (1.70)$$

де $v = dx/dt$ — швидкість рухомої котушки. Звідси видно, що вираз для електромеханічного зв'язку є нелінійним.

Накопичену магнітну енергію можна визначити в наступному вигляді:

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{\Phi^2}{2L}. \quad (1.71)$$

Виходячи з принципу збереження енергії, зрозуміло, що ця енергія врівноважується механічною енергією, використовуваною для переміщення.

Для будь-якого інтервалу часу dt можна записати вираз для магнітної сили, що викликає переміщення рухомої частини, у вигляді

$$F_{\text{магн}} = \frac{\partial W_m}{\partial x}. \quad (1.72)$$

Як і у випадку електростатичних перетворювачів, нелінійні вирази для електромеханічного зв'язку можна лінеаризувати, визначивши потік Φ у вигляді

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_d, \quad (1.73)$$

де Φ_0 — постійний магнітний потік; Φ_d — динамічний магнітний потік.

Вважаючи, що динамічна складова $\Phi_d \ll \Phi_0$, співвідношення між індукованою напругою та динамічною складовою струму можна записати у вигляді

$$Ud = L_0 \frac{di_d}{dt} - L_0 I_0 \frac{V}{d_0} = L_0 \frac{di_d}{dt} - \frac{\Phi_0}{d_0} V. \quad (1.74)$$

Динамічна складова магнітної сили може бути оцінена за допомогою наступного виразу:

$$(F_{\text{магн}})_d = \frac{\Phi_0}{d_0} i_d + \frac{\Phi_0^2}{L_0 d_0^2} x. \quad (1.75)$$

Для виготовлення мініатюрних електромагнітних приводів потрібно налагодити виробництво тонких магнітних плівок і струмопровідних котушок.

Поки широкого виробництва таких пристроїв немає. Існує також проблема захисту сусідніх пристроїв від магнітних полів.

1.3.3. Електростатичні перетворювачі

Електростатичні приводи є розповсюдженим видом перетворювачів, що застосовуються у мікроелектромеханічних системах. Вони належать до класу енергонакопичувальних перетворювачів, що запасують енергію, коли над ними виконується електрична або

механічна робота. Без врахування втрат можна вважати, що накопичувана енергія повністю перетворюється в іншу форму енергії

$$dw = dw_{\text{ел}} + F_{\text{кулона}} dx = 0. \quad (1.76)$$

У загальному випадку структуру таких перетворювачів можна представити у вигляді конденсатора, одна пластина якого під дією прикладеної напруги може переміщуватися, перетворюючи електричну енергію в механічну.

Ємність конденсатора в стані спокою визначається за виразом

$$C_0 = \frac{\epsilon S}{d_0}, \quad (1.77)$$

де S — площа перекриття обкладок конденсатора; d_0 — проміжок між обкладками.

Коли до обкладок прикладається напруга, рухома пластина переміститься вбік нерухомої, проміжок зменшиться до значення $d = d_0 - x$, а ємність конденсатора стане рівною

$$C = \frac{\epsilon S}{d_0 - x} = C_0 \frac{d_0}{d_0 - x}. \quad (1.78)$$

Миттєва напруга на обкладках конденсатора дорівнює

$$U(t) = \frac{Q(t)}{C} \left(\frac{d_0 - x}{d_0} \right) = \frac{Q(t)}{C_0} \frac{Q(t)x(t)}{C_0 d_0}. \quad (1.79)$$

Тут заряд $Q(t)$ є електричною величиною, а переміщення $x(t)$ — механічною.

Вважаючи, що $Q(t) = Q_0 + Q_{\text{дин}}$, тобто заряд $Q(t)$ може бути виражений через статичний заряд Q_0 і динамічну складову $Q_{\text{дин}}$

$$U(t) = \frac{Q_0}{C_0} + \frac{Q_{\text{дин}}}{C_0} - \frac{Q_0}{C_0 d_0} x - \frac{Q_{\text{дин}}}{C_0 d_0} x. \quad (1.80)$$

З огляду на те, що $Q_{\text{дин}} \ll Q_0$ і $x \ll d_0$, одержуємо для динамічної складової перше лінеаризоване рівняння електромеханічного зв'язку:

$$U_{\text{дин}} = \frac{Q_{\text{дин}}}{C_0} - \frac{U_0}{d_0} x. \quad (1.81)$$

Тепер виведемо співвідношення між силою та зарядом. З (1.76)

$$F_{\text{кул}} = - \frac{dw_{\text{ел}}}{dx}. \quad (1.82)$$

Нехтуючи членами другого порядку малості, отримуємо

$$dw_{\text{ел}} = -U_0 Q_{\text{дин}} + \frac{1}{2} \frac{U_0 Q_0}{d_0} x + \frac{U_0 Q_{\text{дин}}}{d_0} x. \quad (1.83)$$

Відповідно,

$$\frac{dw_{\text{ел}}}{dx} = \frac{U_0 Q_0}{2d_0} + \frac{U_0 Q_{\text{дин}}}{d_0} = F_{\text{кул.стат}} + F_{\text{кул.дин}}, \quad (1.84)$$

де $F_{\text{кул.дин}} = \frac{U_0}{d_0} Q_{\text{дин}}$ — друге лінеаризоване рівняння електро-механічного зв'язку.

Природно, що лінеаризовані вирази справедливі тільки для дуже малих відхилень від стану спокою.

Рівняння для електростатичного зв'язку за синусоїдальної форми впливів мають такий вигляд:

$$\tilde{U}_{ca} = \frac{\tilde{J}}{j\omega C_0} - \frac{U_0}{j\omega d_0} \tilde{V}; \quad (1.85)$$

$$\tilde{F}_{ca} = \frac{U_0}{j\omega d_0} \tilde{J}. \quad (1.86)$$

Коефіцієнт у правій частині рівняння (1.86) є коефіцієнтом електростатичного зв'язку. На рис. 1.11 наведено одну з можливих еквівалентних схем електростатичного приводу.

Параметри елементів, що входять до схеми, визначаються за виразами:

$$C'_{\text{ер}} = \frac{C_m}{1 - C_0 C_m (U_0/d_0)^2} \times \left(\frac{V_0 C_0}{d_0} \right)^2; \quad (1.87)$$

$$Z'_{\text{ер}} = Z'_m + \frac{1}{j\omega C'_n}, \quad (1.88)$$

де $C'_n = \frac{C_m}{1 - C_0 C_m (U_0/d_0)^2}$, а C_m і Z_m є пружністю та механічним

імпедансом рухомої пластини відповідно.

Виготовлення мікропристроїв з електростатичними приводами — порівняно нескладний процес, оскільки він не залежить від

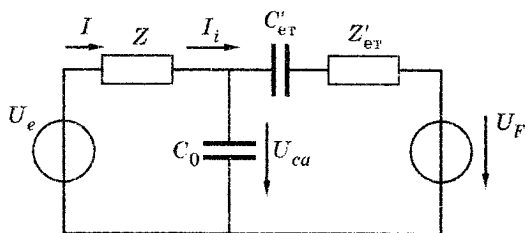


Рис. 1.11. Еквівалентна схема електростатичного приводу

властивостей матеріалу системи. Саме тому такі приводи часто застосовуються в мікросистемах. Крім описаної вище схеми з паралельними пластинами в мікросистемах часто використовуються гребінчасті електростатичні приводи.

1.3.4. Напівпровідникові датчики

Медичні датчики тиску. Іншим прикладом дуже успішного застосування МЕМС є мініатюрні датчики для вимірювання тиску крові. Ці сенсори накладаються на вену для вимірювання кров'яного тиску. Завдяки вартості ≈ 10 доларів вони замінили більш ранні вимірювачі, що коштували ≈ 600 доларів і вимагали стерилізації та калібрування перед застосуванням.

У накладних датчиках використовується кремнієва пластина, у якій за допомогою травлення отримана мембрана, з'єднана з підкладкою (рис. Д8.2).

П'єзорезистивний шар накладений на поверхню мембрани поблизу країв для перетворення механічного напруження в електричну напругу. Тиск викликає прогин мембрани. Чутливий елемент встановлюється на пластмасову або керамічну підкладку із пластмасовим покриттям для припасування до корпусу виробника. Основними виробниками датчиків тиску є Zucas Novasensor, EG & GJC Sensors, Motorola, що випускає більше 17 мільйонів датчиків на рік. Більш пізня розробка сенсора зробила крок уперед, розробивши датчик тиску на поверхні катетера. Його розміри $0,15 \times 0,40 \times 0,90$ мм. Датчик використовується для внутрішньовенного (intrascular) вимірю тиску.

Чутливі елементи високотемпературних мікро датчиків. Недоліком монокристалічного кремнію як матеріалу для чутливих елементів датчиків є його недостатня температурна стабільність, що пояснюється в основному його порівняно вузькою забороненою зоною, яка становить 1,1 еВ при 300 К, що не дозволяє використовувати кремній при більших температурах і значних рівнях електромагнітних і радіаційних впливів [Михайлов, 2004].

Останнє пояснюється тим, що енергії теплового збудження кристалічних ґраток, а також енергії фотонів і елементарних часток буває цілком достатньо, щоб ініціювати переходи електронів і дірок через потенційні бар'єри в напівпровідникових структурах. Збільшення числа дефектів (термічних, радіаційних), викликаних термоударами, радіацією та механічними деформаціями, приводить до нестабільності характеристик мікроелектронних датчиків. Зазначених явищ можна уникнути, використовуючи в якості

функціональних матеріалів широкозонні напівпровідники і напівпровідникові сполуки.

Єдиним представником широкозонних монокристалічних напівпровідників є алмаз, у якого ширина забороненої зони становить 5,5 еВ при 300 К. Він є перспективним матеріалом для високо-температурних і працюючих в агресивних умовах мікроелектронних датчиків [Михайлов, 2004]. Але на даний час поки ще не отримані алмазні пластини достатньої площі, а сама технологія одержання навіть невеликих кристалів залишається дуже складною та дорогою. Але завдяки таким властивостям, як висока теплопровідність, термостабільність і стійкість практично до будь-яких агресивних середовищ і радіоактивних випромінювань, можливе створення різних приладів з унікальними характеристиками, недосяжними для аналогічних приладів, виготовлених з монокремнію й арсеніду галію.

Зокрема радіаційна стійкість алмаза до нейтронів в 100 разів вища, ніж у монокремнію, робоча температура може досягати 1000—1200 °С, робоча напруга до 1 кВ, а теплопровідність вище, ніж у Si, в 14 разів.

Основними труднощами проведення технологічних операцій і процесів в алмазі є його природна інертність, у тому числі відносно термодифузійних процесів. Тому для легування кристалів алмаза використовується винятково іонна імплантація пучками великих енергій (від 100 кеВ до 1 МеВ). Імплантація іонів He^+ , N^+ , O^+ , Ne^+ , Si^+ , Ni^+ , Cr^+ , Zn^+ , C^+ , B^+ та інших дозволяє створювати шари й області з *p*- і *n*-типами провідності.

Останнім часом прискорено розвивається напрямок синтезу тонких алмазних плівок на поверхні різних матеріалів, у тому числі на кремнії та на металах. Полікристалічні алмазні плівки одержують методом газофазного осадження різних газів, що містять вуглець (метану в суміші з воднем, ацетилену, бензолу та низки інших). Активація процесу синтезу плівок здійснюється тліючим або СВЧ розрядами. Принципово можливим способом модифікації алмазних плівок є їхнє легування різними домішками, що дозволяє створювати тонкоплівкові активні та пасивні електронні прилади, а також чутливі елементи на основі полікристалічних алмазних плівок. У міру вдосконалювання технології легування монокристалічного алмаза та полікристалічних плівок, а також одержання пластин достатньої площі та прийнятної ціни будуть розроблятися мікроелектронні датчики на основі алмаза.

1.3.5. Тензорезистивні перетворювачі фізичних величин

Основні співвідношення. Електрична схема сучасних інтегральних тензоперетворювачів, як правило, являє собою міст Уїтстона, що складається із чотирьох дифузійних резисторів, опір двох з яких збільшується, а двох зменшується внаслідок виникнення в кристалі механічних напружень при дії відповідної механічної величини.

Не розглядаючи зміну кожного тензорезистора, значення вихідного сигналу чутливої мостової схеми можна представити у вигляді квадратичної залежності з похибкою, що не перевищує 0,05 % від діапазону:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{м}} (V_0 + S \cdot p + Q \cdot p^2), \quad (1.89)$$

де p — значення діючої фізичної величини; $U_{\text{м}}$ — напруга живлення мостової схеми; V_0 — «нульовий сигнал», тобто значення вихідного сигналу за відсутності впливу вимірюваної фізичної величини, що з'являється внаслідок технологічного розкиду параметрів тензорезисторів і залишкових механічних напружень; S — чутливість перетворювача, тобто лінійна складова передатної характеристики; Q — коефіцієнт, що визначає нелінійність передатної характеристики.

Дане твердження ґрунтується на численних експериментальних даних, отриманих у процесі розробок серії інтегральних тензорезистивних перетворювачів фізичних величин (тиску, прискорення, мікропереміщення, сили) [Ховард, 1964]. Очевидно, що три параметри (V_0 , S , Q) виразу (1.89) нормовані до напруги живлення мостової схеми (тобто повинні бути визначені для $U_{\text{м}} = 1$ В). Крім того, ці параметри також залежать від температури, і дана залежність, у свою чергу, може бути виражена квадратним тричленом, що забезпечує досить високу точність апроксимації (0,02 %):

$$V_0 = V_{00} (1 + K_{01}(T - T_0) + K_{02}(T - T_0)^2); \quad (1.90)$$

$$S = S_0 (1 + K_{S1}(T - T_0) + K_{S2}(T - T_0)^2); \quad (1.91)$$

$$Q = Q_0 (1 + K_{Q1}(T - T_0) + K_{Q2}(T - T_0)^2), \quad (1.92)$$

де T — температура, що задається для моделювання; T_0 — температура, за якої здійснюються вимірювання характеристик у нормальних умовах.

Дев'ять коефіцієнтів апроксимації можуть бути визначені за результатами вимірів передатних характеристик перетворювачів за декількох значень температури.

Опис моделі. Передатна характеристика (1.89) з температурними залежностями «нуля», чутливості та нелінійності (1.90)—(1.92) у системі PSPICE може бути реалізована різними способами. Найбільш простим є одержання еквівалентної моделі шляхом додавання до мостової резистивної схеми двох залежних джерел напруги (рис. 1.12).

Вплив фізичної величини задається залежним від часу параметром PD моделі (табл. 1.3), а джерела $U/2$ визначаються з використанням математичного апарату PSPICE, як залежні від PD (тобто від фізичної величини), температури та відповідних коефіцієнтів, що є параметрами моделі, значення яких визначаються відповідно до виразів (1.89)—(1.92).

Описана модель не враховує закони й особливості руху окремих деталей MEMS, тобто припускає однозначну залежність вихідного сигналу тензорезистивного мосту від впливу фізичної величини, без врахування частотних характеристик. Це цілком припустимо для більшості випадків застосування тензорезистивних перетворювачів тиску, сили, мікропереміщення. Очевидно, що для тензорезистивних перетворювачів прискорення, так само як і для інших типів акселерометрів, необхідне відповідне доопрацювання моделей.

На рис. 1.13 (с. 58) показано передатні характеристики перетворювача тиску ТДМ, виготовленого на основі кристала інтегрального перетворювача тиску ИПД-9. Маркерами позначені експериментальні значення, безперервними лініями — результати розрахунку в PSPICE.

Як приклад можливості спільного моделювання перетворювача й електронної схеми в системі SPICE на рис. 1.14 (с. 58) показано схему датчика тиску, «зібрану» із представленої вище моделі перетворювача й інструментального підсилювача. Задаючи в моделі перетворювача зміну тиску від нуля до 40 кПа, одержуємо відповідну

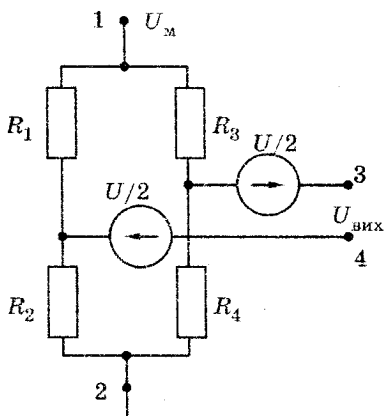


Рис. 1.12. Еквівалентна схема моделі тензорезистивного перетворювача фізичних величин

Параметри моделі тензорезистивного перетворювача

Параметр	Найменування (позначення у формулах (1.90)—(1.92))	Розмірність	Значення за умовчанням
U_0	Значення «нульового сигналу» за температури T_0 (V_{00})	В	0,0
$Tk1u0$	Лінійний коефіцієнт температурної залежності «нульового сигналу» (K_{01})	$1/^\circ\text{C}$	0,0
$Tk2u0$	Квадратичний коефіцієнт температурної залежності «нульового сигналу» (K_{02})	$1/^\circ\text{C}^2$	0,0
s	Чутливість перетворювача за температури T_0 (S_0)	В/кПа	0,001
$Tk1s$	Лінійний коефіцієнт температурної залежності чутливості (K_{S1})	$1/^\circ\text{C}$	-0,002
$Tk2s$	Квадратичний коефіцієнт температурної залежності чутливості (K_{S2})	$1/^\circ\text{C}^2$	0,0
q	Значення нелінійного (квадратичного) коефіцієнта характеристики перетворення за температури T_0 (Q_0)	$\text{В}/\text{кПа}^2$	0,0
$Tk1q$	Лінійний коефіцієнт температурної залежності нелінійного коефіцієнта характеристики перетворення (K_{Q1})	$1/^\circ\text{C}$	0,0
$Tk2q$	Квадратичний коефіцієнт температурної залежності нелінійного коефіцієнта характеристики перетворення (K_{Q2})	$1/^\circ\text{C}^2$	0,0
ТЕМРО	Температура T_0	$^\circ\text{C}$	0
	Опори резисторів мостової схеми (R_1, R_2, R_3, R_4)	кОм	3,0
	Лінійний температурний коефіцієнт резисторів мостової схеми	$^\circ\text{C}^{-1}$	$0,776 \cdot 10^{-3}$
	Квадратичний температурний коефіцієнт резисторів мостової схеми	$^\circ\text{C}^{-2}$	$1,1127 \cdot 10^{-5}$

зміну значення вихідного сигналу датчика від нуля до 5 В шляхом підбору значення опору R_{X1} . Аналіз схеми, зокрема, показує, що застосування в схемі інструментального підсилювача резисторів з номіналами 15, 20 і 40 кОм з температурним коефіцієнтом опору, що дорівнює 0,0001, а резистора для встановлення номінального

вихідного сигналу при калібруванні датчика (у цьому випадку 1 кОм) з температурним коефіцієнтом опору 0,0025 забезпечує компенсацію температурного коефіцієнта чутливості (ТКЧ) перетворювача. Значення ТКЧ для датчика в цілому складо не більше $\pm 0,02 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ при значенні відповідного коефіцієнта перетворювача $0,21 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

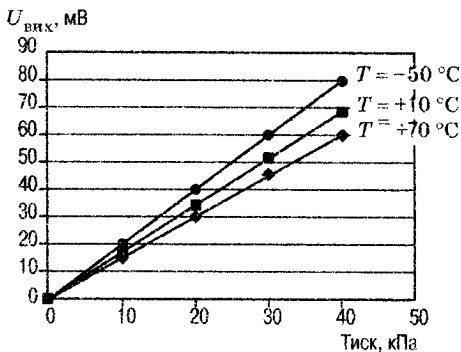


Рис. 1.13. Передатні характеристики перетворювача тиску ТДМ

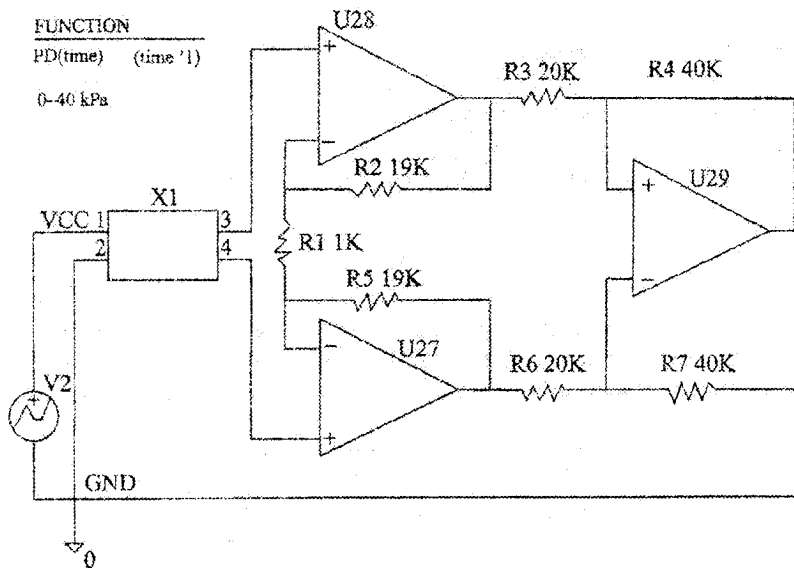


Рис. 1.14. Схема чотириполюсника датчика тиску з вузлами (1, 2, 3, 4) — модель перетворювача тиску з діапазоном вимірювання 40 кПа

1.3.6. Субмікронні магнітні сенсори

В останні десятиріччя досягнуто великих успіхів в створенні мініатюрних і в той же час високочутливих магнітних сенсорів, що базуються на великих магнітооперах (МО). Відомі різні види магнітоопору наведено на рис. Д8.3 [Солин, 2004].

Магнітоопором (МО) називається зміна питомого електричного опору речовини під впливом магнітного поля. Магнітоопір

металів, відкритий в 1857 р. британським фізиком Вільямом Томсоном (лордом Кельвіном), безкінечно малий. Напівпровідники характеризуються малим і помірним магнітоопором. За останні десятиріччя вчені відкрили декілька видів МО. Практичне використання деяких з них уже приносить багатомільярдні доходи.

Гігантський магнітоопір (ГМО) відкритий в 1988 р. Петером Грюнбергом (Peter A. Grünberg) з Юліхського дослідницького центру й Альбером Фертом (Albert Fert) з Університету Південного Парижа. Класичний ГМО-пристрій складається із двох шарів феромагнітного матеріалу (кобальту та заліза), розділених шаром немагнітного металу. Напрямок намагніченості одного феромагнітного шару підтримується незмінним, а напрямок намагніченості іншого змінюється під впливом зовнішнього магнітного поля. Струм у немагнітному металі максимальний, коли напрямки намагніченості феромагнітних шарів збігаються, і мінімальний, коли вони протилежні (анти-паралельні). ГМО використовується в зчитувальних головках сучасних накопичувачів на жорстких магнітних дисках (НЖМД).

Структури з ефектом ГМО (що також називають спіновими закривами) можуть бути отримані досить простими методами та використані для реалізації дуже слабких магнітних полів. Зчитувальну ГМО-головку представлено на рис. 1.15 [Уайтсайде, 2002].

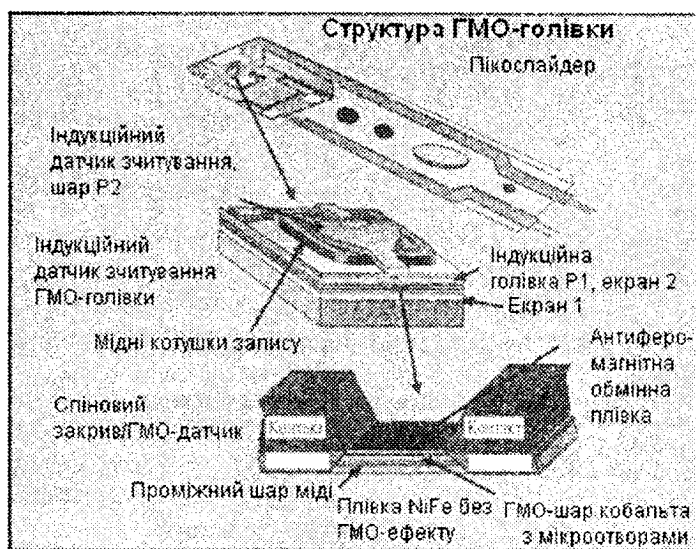


Рис. 1.15. Зчитувальна ГМО-головка, що випускається фірмою ІВМ

Вона містить проміжний шар міді товщиною близько 2 нм та ГМО-шар кобальту з наноотворами (товщиною близько 2,5 нм). Зазначені товщини шарів дотримуються з атомною точністю.

Тунельний магнітоопір (ТМО) вперше виміряний Мішелем Жюльєром (Michel Julliere) з Національного інституту прикладних наук у Рене. Конструкція така ж, як у випадку ГМО, але замість немагнітного металу використовується тонкий шар діелектрика, провідність якого обумовлена квантовим тунельним ефектом. Можливо, ТМО буде реалізований в зчитувальних головках НЖМД наступного покоління. ГМО- і ТМО-пристрої здатні реєструвати незначні зміни зовнішнього магнітного поля.

Колосальний магнітоопір (КМО) був виявлений в 1950-х рр. Г. Х. Йонкером (G.H. Jonker) та Й. Х. Ван Сантенем (J. H. van Santen) з компанії Philips. В 1994 р. його знову «відкрив» Суні-Хо Дзинь (Sung-Ho Jin) з Bell Laboratories. Виникає в манганітах — діелектричних кристалах оксиду марганцю. Магнітне поле зменшує їхній електричний опір: під його впливом речовина переходить із немагнітного та непровідного стану у феромагнітний металевий. Фазовий перехід відбувається в магнітних полях у декілька тесла за температур не вище 150 К. Застосування КМО у зчитувальних головках вже давно не розглядається.

Балістичний магнітоопір (БМО) відкрили в 1999 р. Н. Гарсія (N. Garcia), М. Муньос (M. Munoz) та І. Чжао (Y.-W. Zhao), Рада з наукових досліджень у Мадриді. Спостерігається у феромагнітній металевій системі, що складається з голки та провідника, з'єднаних субмікронним контактом. Зовнішнє магнітне поле переводить систему зі стану з паралельною намагніченістю компонентів (низький опір) у стан з антипаралельною намагніченістю (високий опір). Ефект обумовлений балістичним проходженням електронів через субмікронний контакт. Наприкінці 2003 р. відомості про БМО підлягли сумніву: деякі вчені думають, що отримані результати обумовлені іншим явищем. У довгостроковій перспективі не виключене використання БМО у зчитувальних головках.

В 1998 р. був відкритий екстраординарний магнітоопір (ЕМО), що характеризується більшою відносною зміною опору, величина якого залежить від геометрії пристрою з металу та напівпровідника.

Екстраординарний магнітоопір подібний до звичайного МО та на відміну від інших розглянутих МО-ефектів спостерігається в структурах, що не містять магнітних матеріалів (рис. Д8.4).

Подробиці — у тексті статті [Стюарт, 2004]. Зазначені також можливі галузі їхнього застосування.

ЕМО можна використовувати для створення магнітних зчитувальних головок, що відрізняються високою швидкістю та здатністю працювати за високих щільностей запису. Інша перевага ЕМО-головок — низький рівень шуму, обумовлений відсутністю в їхніх конструкціях магнітних матеріалів.

У майбутньому ЕМО знайде застосування в робототехніці, медицині, автомобілебудуванні, виробництві побутової техніки та багатьох інших галузях народного господарства.

Особливістю ЕМО є те, що для його одержання не потрібні магнітні матеріали. Етапи утворення конформності та самий ЕМО-пристрій наведено на рис. Д8.5. Коли магнітне поле змінює конфігурацію електричного поля в напівпровіднику, сила струму зменшується. Цей ефект можна значно підсилити, якщо правильно підібрати геометрію напівпровідникових і металевих елементів пристрою.

Коли на торці напівпровідникового бруска подається напруга, у ньому створюється електричне поле, що змушує електрони, що рухаються хаотично, дрейфувати уздовж силових ліній.

У результаті через брусок починає текти електричний струм, напрямком якого за визначенням вважається протилежним до напрямку дрейфу електронів (рис. Д8.6).

Магнітне поле, спрямоване перпендикулярно електричному, викривляє траєкторії електронів. Відстань, що проходять заряджені частки, збільшується, а середня швидкість дрейфу та, отже, сила струму зменшуються. Таким є механізм звичайного магнітоопору.

Викривлення траєкторій призводить до накопичування електронів на нижній поверхні бруска, а дірок — на верхній. У результаті виникає поперечне електричне поле. Струм, що відхиляється магнітним полем, тече під кутом до напрямку результуючого електричного поля.

Якщо збільшити магнітне поле, то наведене поперечне електричне поле стане сильнішим за первісне поздовжнє та струм потече перпендикулярно силовим лініям останнього (рис. Д8.7).

Металевий диск усередині напівпровідника викривляє електричне поле таким чином, що його силові лінії зближаються та виявляються майже перпендикулярними границі металу. У результаті електрони проходять через диск, опір якого малий. Сила струму зростає, і опір всієї структури виявляється дуже малим. При

впливі досить сильного магнітного поля відбувається накопичування зарядів у верхній та нижній поверхні бруска, і поперечне електричне поле виявляється більш сильним, ніж поздовжнє. Результуюче електричне поле змушує електрони рухатися в обхід металевого диска по вузьких напівпровідникових каналах. Сила струму різко зменшується, тобто опір пристрою стає більшим. Таким є механізм ЕМО.

З використанням теорії конформних відображень кругова структура із золотим шунтом перетворюється в лінійну, придатну для промислового виробництва зчитувальних головок НЖМД (рис. Д8.8).

У табл. 1.4 показано найкращі очікувані характеристики різних видів МО, а також значення, які повинні бути досягнуті в магнітному записі давих через п'ять років. Зокрема, зчитувальні головки на основі ЕМО зможуть працювати за набагато більших високих щільностей запису та істотно більшої (більше 100 разів) швидкодії, ніж сьогоденні ГМО-головки.

ЕМО-головки виготовляються на напівпровідникових підкладках і тому дешеві. Поки це нова, неперевірена технологія.

На жаль, вони працюють упевнено лише за порівняно низьких температур, що небагато перевищують кімнатну. Інший недолік ЕМО-головок — нелінійність динамічної характеристики: їхній сигнал пропорційний квадрату напруженості магнітного поля. Втім, це підвищує їхню чутливість і може вважатися перевагою.

Таблиця 1.4

Характеристики МС

Тип МО-ефекту	МО при 300 К, %	Щільність запису, Гбіт/дюйм ²	Відношення сигнал/шум, дБ	Постійна часу, нс	Мінімальне магнітне поле, Тл
Бажані значення	4...10	100...1000	30...40	0,01...0,1	0,005...0,05
ЕМО	> 35	> 300	43	< 0,001	0,05
ГМО	10	125	29	0,1	0,005
ТМО	15	200 (прогноз)	34	0,1	0,001
КМО	0,4	100 (прогноз)	-17	1,0	0,05
БМО	3000	> 1000	10	0,1	0,03

1.3.7. Датчики концентрації газів

Виявлення присутності та вимірювання газоподібних речовин у навколишнім середовищі — давня та важлива проблема.

У ряді випадків це пов'язано з безпекою життєдіяльності людини. Незліченні аварії в шахтах, на хімічних виробництвах, при обслуговуванні каналізаційних мереж і в багатьох інших галузях викликані скупченням вибухонебезпечних і шкідливих газів. В інших сферах постійна присутність газів навіть у кількостях, що не перевищують граничну допустиму концентрацію (ГДК), негативно впливає на здоров'я робітників, є шкідливим виробничим фактором і вимагає постійного контролю.

Не менш важливими та великомасштабними застосуваннями датчиків газів може бути їхнє використання в пакуванні харчових продуктів, що реагує на їхнє цування; сенсорах природного, угарного газу або озону в будинку; складу повітря у квартирі хворого та багатьох інших ситуаціях.

Природними вимогами до датчиків концентрації газів є: надійність, довговічність, необхідний діапазон вимірювань, чутливість, роздільна спроможність стосовно інших газів, точність, здатність самовідновлення, інерційні властивості, мале споживання енергії, простота використання, зручна індикація, малі ГМХ та вартість.

Такий набір вимог можуть забезпечити сенсори, зроблені в МЕМС, МОЕМС і нанотехнологічному виконанні.

Мініатюризація ЧЕ датчиків вирішує проблему лише наполовину, тому що при цьому ускладнюється інтерпретація стану датчика, а тим більше числове оцінювання. Тому використовується оцінювання за зміною кольору ЧЕ при опроміненні променями певної довжини або впливі електричним або магнітним полем.

Датчики концентрації водню й метану. Рівень концентрації метану та водню, які при скупченні в атмосфері в критичних концентраціях створюють небезпеку вибуху, традиційно оцінюють за допомогою електрично нагрітої платинової нитки або керамічних кульок, що входять до складу каталітичних газових датчиків. На зміну температури навколишнього середовища, викликану горінням, датчики реагують зміною питомого опору.

МЕМС датчики виготовляються за кремнієвою технологією [Юрре, 2003]. Використовуючи поверхневу мікромеханічну обробку та метод механічного осадження з парової фази, одержують дві полікремнієві (нітридкремнієві) мікронитки з конфігурацією меандру та з наступним осадженням на них тонкої плівки платини.

ЧЕ датчика з розмірами $2 \times 10 \times 100$ мкм нагрівається до температури 500°C за $0,5$ с за потужності підігрівача 70 мВт.

За рахунок високої температури на поверхні мікрониток відбувається загоряння навколишньої горючої газової суміші, що призводить до зростання поверхневого опору ЧЕ. За зростанням опору визначається значення концентрації газу компенсаційним методом.

Точність і швидкість вимірювань визначається товщиною та рівномірністю платинової плівки.

Конструкцію, принцип дії та характеристики датчиків концентрації газів наведено на рис. Д8.9.

Одним зі способів створення ультрачутливих наносенсорів є використання молекулярного розпізнавання. Спосіб полягає в синтезі складних молекул, названих за їхньою структурною формою металевими квадратами, які здатні приєднувати лише певні молекули. Як тільки молекулярний квадрат розпізнав і захопив аналізовану молекулу, необхідно визначити, що захоплення дійсно відбулося, для чого зазвичай квадрат опромінюється світлом. При поглинанні молекули квадрат поглинає енергію світла в іншому діапазоні частот або довжин хвиль у порівнянні із квадратом без шуканої речовини або самою речовиною, тобто квадрат змінює свій колір. Подібні сенсори здатні виявити менше 10 молекул шуканої речовини, що у високоточних вимірюваннях можна не побачити неозброєним оком. Але можливе створення приладів, які можуть її зафіксувати. На рис. 1.16 (с. 66) наведено приклад використання металевих квадратів.

Нанотехнологія може внести докорінні зміни в методи захисту від хімічної та біологічної зброї, ліквідації наслідків природних катастроф. Необхідність розробки подібних датчиків не викликає сумнівів [Уайтсайдс, 2002], оскільки, наприклад, у відомому інциденті із застосуванням в 1995 р. терористами секти «Аум сенріке» хімічної зброї поліція для виявлення нервовопаралітичного газу використовувала канарок.

В якості датчика NO_2 можливо використовувати польовий нанотранзистор на напівпровідній хіральній вуглецевій нанотрубці (рис. 1.17, с. 66).

Польовий транзистор розміщується в посудині ємністю 500 мл з виводами електроживлення та двома клапанами для введення та виведення газу, що омиває транзистор. Протікання газу, що містить від 2 до 200 часток на мільйон, зі швидкістю 700 мл/хв протягом 10 хвилин призводить до трикратного підвищення провідності нанотрубки.

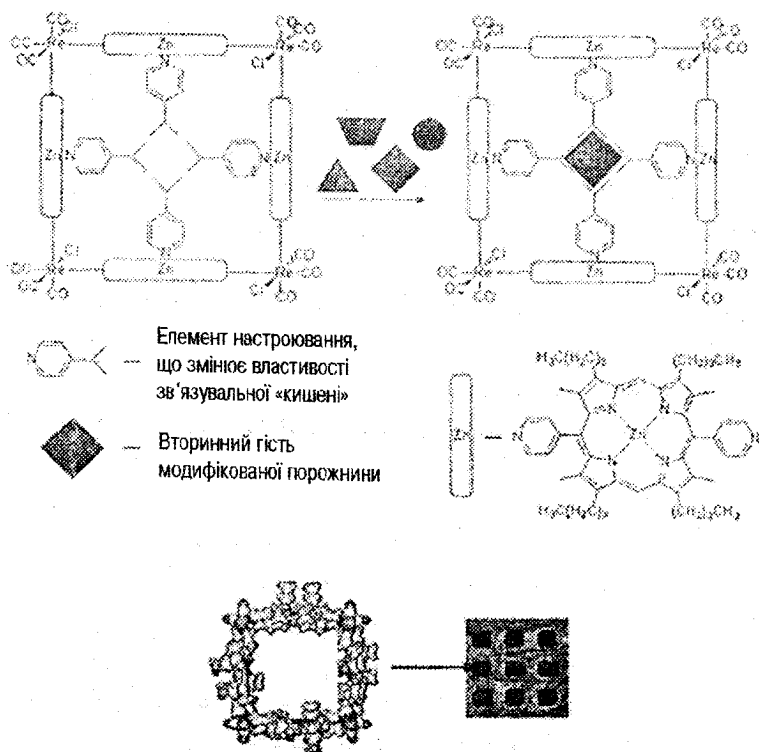


Рис. 1.16. Приклад використання металевих молекулярних квадратів

Змінюється також і вольт-амперна характеристика транзистора. До впливу NO_2 на транзистор струм не змінювався при зміні від $-0,1$ до $+0,1$ В на транзисторі за напруги закриву 4 В.

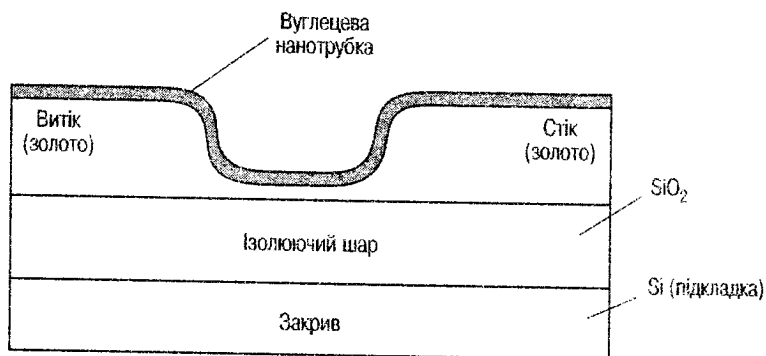


Рис. 1.17. Польовий транзистор на вуглецевій нанотрубці

Після омивання транзистора NO_2 при тих же напругах струм лінійно змінювався від $-0,3$ до $+0,3$ мкА.

Паралельне ввімкнення транзисторів може поліпшити параметри датчика.

1.3.8. Мікрокабелі на полімідному носії

Гнучкі плати та кабелі є одним з перспективних напрямків в області техніки монтажу виробів МЕМС. Здатність неодноразово згинатися та згортатися в трьох площинах, приймати форму корпусу складної конфігурації, малі товщини і відповідно маса, ударостійкість — ось далеко не повний перелік переваг гнучких плат і плоских кабелів у МЕМС.

У наш час у технології гнучких плат тенденції подальшого розвитку визначаються підвищенням вимог до щільності елементів і компонентів у пристроях МЕА. Широке розповсюдження одержали безкорпусні мікросхеми із кроком контактних площадок 80 мкм та менше. Специфіка нових конструкцій вимагає виготовлення носіїв площею до 20 см^2 та кабелів загальною довжиною до 700 мм.

Ці конструкторсько-технологічні напрямки в розвитку техніки монтажу МЕА висувають цілу низку специфічних вимог до якості матеріалу гнучких підкладок, до технологічних операцій при виготовленні плат і кабелів і їхнього складання. За фізико-механічними властивостями матеріал повинен забезпечувати високу механічну міцність за малої товщини плати, гарну теплопровідність, достатню теплову, хімічну та радіаційну стійкість, стабільність, температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР), близький до ТКЛР нанесених матеріалів (для зменшення внутрішніх механічних напружень у структурі). Крім того важливими технологічними характеристиками гнучких полімерних плат і кабелів варто вважати: можливість вибіркового травлення; високу міцність на розривання та згинання; стійкість до тертя; відсутність істотних газовиділень у вакуумі за високих температур. Природно, що фольгований діелектрик необхідно ретельно обирати з тих, що використовуються.

Нижче показана можливість поліпшення якості фольгованого діелектрика ФДІ-А для виготовлення багатошарових плат і кабелів підвищеної точності.

Виробництво лакофольгових діелектриків типу ФДІ-А освоєне з кінця 70 р. минулого сторіччя. Діелектрики досить широко застосовувалися в радіаційностійкій апаратурі як матеріали стрічкових

носіїв безкорпусних мікросхем, шарів гібридних мікрозбірок на твердій підкладці та плоских кабелів. Матеріал забезпечував можливість виготовлення носіїв безкорпусних мікросхем (найбільш складних елементів номенклатури кабельної продукції, виробленої із ФДІ) із кроком контактних площинок 300 мкм із кількістю виводів до 60 при загальній площі носія не більше 2 см².

Мікрокабелі, для виготовлення яких призначений ФДІ, являють собою складні вироби, у виробництві яких використовують специфічні процеси прецизійної фотохімії, очищення поверхні, хімічного селективного травлення, електро- та хімічного осадження металу і т. п. У зв'язку з тим, що властивості матеріалу можуть змінюватися в тому числі й на площі заготівки для виготовлення кабелю, реальні похибки виготовлення можуть бути вірогідно оцінені тільки в процесі спеціально проведених контрольних операцій збирання та статистичної обробки отриманої інформації.

Для реалізації конструкцій мікрокабелів у Науково-дослідному технологічному інституті приладобудування (м. Харків) були проведені детальні дослідження основних технологічних процесів їхнього виготовлення: підготовки поверхні ФДІ та фінішне очищення мікрокабелів, формування фоторезистивної маски для двостороннього травлення ФДІ, розмірне травлення алюмінію та полііміду та ін. У результаті досліджень встановлені наступні закономірності.

При підготовці поверхні ФДІ та наступних технологічних обробках зменшується товщина та підвищується шорсткість поверхні алюмінію, що вимагає на фінішному очищенні мікрокабелів застосування м'якого поліруючого травлення. Профілограми типових поверхонь алюмінію в ході виготовлення мікрокабелів наведено на рис. 1.18. Склади травників і режими обробки повинні бути оптимізовані.

У зв'язку зі значним поглинанням шаром полііміду оптичного випромінювання в діапазоні довжин хвиль 320—420 нм (рис. 1.19) при двосторонньому експонуванні фоторезисту час експонування із протилежних сторін ФДІ відрізняється майже на порядок. У результаті досліджень оптимізовані процеси обробки фоторезисту ФН-11з.

З урахуванням значного впливу розмірів і форми провідників на якість наступного складання встановлена експериментальна залежність величин клина Δ травлення та підтраву δ алюмінію під фоторезистивною маскою від її товщини h (рис. 1.20, с. 70).

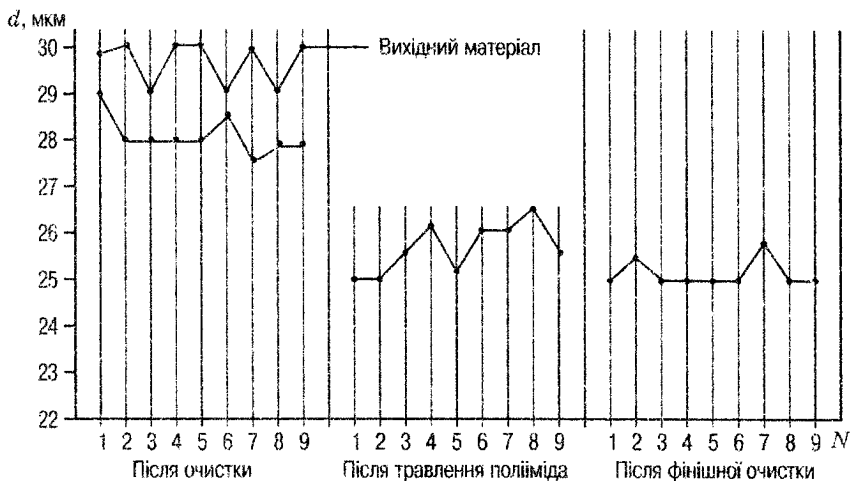


Рис.1.18. Профілограми поверхні алюмінію в процесі технологічних обробок

Методично збір інформації виконується на чотиризондовому методі вимірювання перехідних опорів струмопровідних шарів, що виключає вплив на результат вимірювання опору провідників і контактних переходів [Степаненко, 2008].

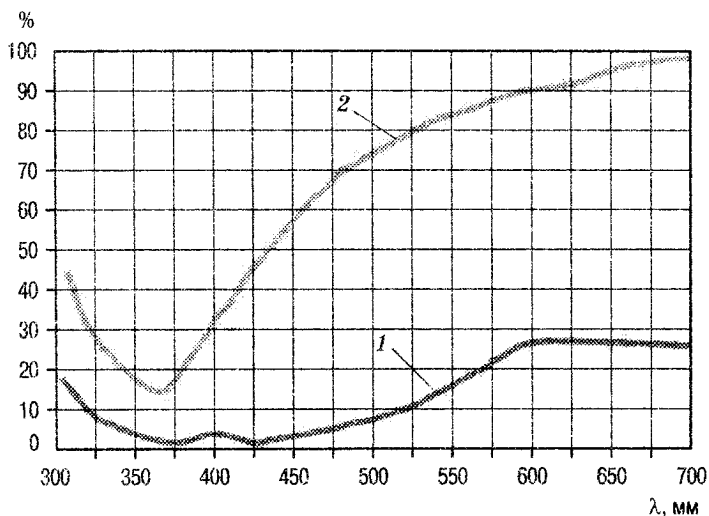


Рис. 1.19. Спектри поглинання поліміду та фоторезисту ФН-113 (крива 1 — спектр поглинання ФН-113, крива 2 — спектр поглинання поліміду)

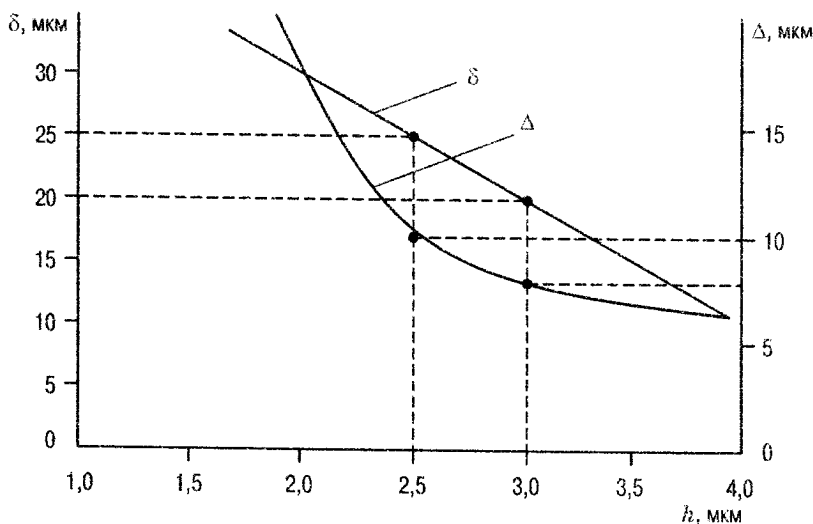


Рис. 1.20. Залежність клина травлення Δ та підтраву δ алюмінію від товщини фоторезистивної маски

При цьому контролюється опір звареного міжшарового з'єднання алюміній-алюміній та опір паяного з'єднання навісний компонент (SMD)-олово/вісмут-нікель-алюміній.

Вимірювання виконані в температурному діапазоні від -40 до $+100$ °C з метою виявлення прихованих дефектів. Результати випробувань представлено на рис. 1.21.

Для контролю поверхневого опору R_s струмопровідних структур алюміній, алюміній-нікель, алюміній-нікель-олово/вісмут і ефективної ширини струмопровідних доріжок W можуть бути

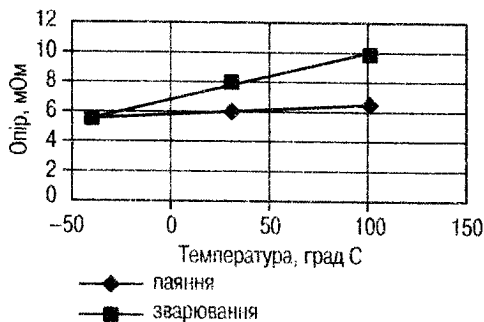


Рис. 1.21. Залежність опору зварених і паяних контактних з'єднань від температури

використані широко відомі в мікроелектроніці структури Ван-Дер-Пау (рис. Д8.10).

Для одержання можливості екстраполяції залежності цих параметрів від геометричних розмірів елементів варіювалася ширина струмопровідних доріжок від 50 до 800 мкм. Крім того, з постійним кроком змінювалося розташування структур по полю заготовки

для контролю відтворюваності параметрів відносно зміни лінійних розмірів.

Для визначення параметрів-критеріїв використовуються наступні розрахункові співвідношення:

1. Поверхневий опір R_s не залежить від розміру структури та визначається за формулою

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{\Delta U_1}{I}, \quad (1.93)$$

де I — струм, що протікає від струмового контакту I_1 до I_2 ; ΔU_1 — різниця потенціалів між контактами U_1 і U_2 .

2. Ефективна ширина струмопровідної структури описується за виразом

$$W = R_s L \frac{I}{\Delta U_2}, \quad (1.94)$$

де L — довжина струмопровідної доріжки між контактами U_3 і U_4 ; ΔU_2 — різниця потенціалів між контактами U_2 і U_4 .

1.3.9. Міжз'єднання та кросбари

При здійсненні мініатюризації ІС перешкодою на шляху подальшого збільшення ступеня інтеграції можуть стати з'єднання між окремими приладами на кристалі ІС та ліній зв'язку між кристалами в частині обмеження швидкодії та надійності схем. Так, багато відомих розробників суперкомп'ютерів стверджують, що без серйозних удосконалень архітектури навіть поява приладів з нульовими затримками не дозволить поліпшити роботу машини більш ніж на 20 %, тому що визначальну обмежуючу роль все одно грають затримки в з'єднаннях. Оцінки нижнього та верхнього рівня затримки в межах одного кристала лежать в інтервалі $> 0,026$ нс ... $> 0,1$ нс [Ферри, 1991].

Швидкодія центральних процесів багатьох машин стала визначатися часом проходження між кристалами. Для зменшення часу затримки сигналів кристали варто розташовувати як можна більш щільно. Комутаційні плати при цьому повинні мати значно більшу щільність розміщення з'єднань, аніж плати з периферійними виводами. Крім того, у щільно упакованій матриці кристалів виділяється значна кількість тепла, яку потрібно відвести: у багатьох випадках проблема тепловідводу виявляється найбільш складною.

Проблему погіршення тепловідводу при зменшенні ГМХ апаратури можна спрощено представити так. При збереженні розсіюваної потужності та зменшенні лінійних розмірів елементів

в K разів питома об'ємна потужність P_v , що визначає нагрівання цього об'єму, зростає в K^3 разів. Розсіювана потужність, що відводиться від нагрітого об'єму $P_{\text{розс}}$ пропорційна до площі поверхні, що обмежує об'єм, тобто до величини K^2 . Відношення потужності, що виділяється, до потужності, що відводиться $P_v/P_{\text{розс}} \approx K > 1$ тобто зі зменшенням розмірів теплонапруженість або температура розглянутого об'єму зростає. Так, розсіювана потужність сучасних мікропроцесорів сімейства Pentium перебуває на рівні 100 Вт, за площі кристала близько квадратного сантиметра. Лише небагато відстають від них відеоконтролери. Тепловиділення є однією з основних перешкод підвищення тактової частоти. Забезпечення припустимого перегріву кристалів досягається їхнім примусовим охолодженням (вентиляторами або іншими спеціальними заходами).

Таким чином, такі параметри ЕА, як рівень інтеграції, швидкість, надійність, теплові режими, ГМХ, вартість істотно залежать від використовуваних конструктивно-технологічних рішень з'єднань, комунікацій елементів, вузлів і пристроїв систем, значна частина яких виконується у вигляді БКП.

ВГІС, МСК та РЕА на їхній основі характеризуються великою конструктивною різноманітністю ліній зв'язку [Семенец, 2005]. ЛЗ напівпровідникових ІС та ВІС виконуються за допомогою шару металізації та дифузійного шару; монтажні з'єднання ВГІС та МСК — одно-, двох- і багатошаровими плівковими та мікродротовим монтажем; з'єднання між ВІС і МСК — друкованим та мікродротовим монтажем; з'єднання між елементами та блоками МЕА — джгутами, гнучкими шлейфами і плоскими кабелями. Перераховані види МЕА мають різну технологічну природу та сильно відрізняються за конструктивними характеристиками.

Серед усіх видів ЛЗ можна умовно виділити дві групи з'єднань: плоскі (плівкові, друковані) та об'ємні (мікродротові, гнучкі шлейфи та плоскі кабелі). На рівні мікросхем і мікроблоків усе ширше використовується матричне розташування виводів, що забезпечує до півтисячі виводів (у перспективі до декількох тисяч) від одного мікроблоку.

Разом з удосконалюванням технології виготовлення нанопристроїв повинні з'явитися й нові види міжз'єднань. Так, запропоновано багато розрізних технічних прийомів для реалізації ліній зв'язку. Наприклад, використання нанотрубок для електричного та навіть оптичного з'єднань окремих елементів, отриманих

скануючим зондуванням. Але поки відсутні серйозні роботи з одержання систем. Залишаються невирішеними проблеми вибору матеріалів для сполучних «проводів», техніки з'єднання елементів, архітектури систем [Ратнер, 2004]. Більш того, у деяких наноструктурах (наприклад, вуглецевих трубках) закон Ома не виконується. Багато які з базових правил, що визначають поведінку наноструктур, є законами квантової механіки. Тільки з їхнім використанням можна визначити мінімальний переріз провідника, що ще може проводити струм, мінімальну величину енергії для зміни стану комірки пам'яті. Існує зв'язок між розмірами структури та квантом енергії, що взаємодіє з нею, і цей зв'язок важливий для керування світлом за допомогою молекул і т. ін.

Теоретично за допомогою вуглецевих нанотрубок можна створити універсальну пам'ять, що буде поєднувати в собі швидкість статичного ОЗП (SRAM), низьку вартість динамічного ОЗП (DRAM) та енергонезалежність флеш-пам'яті [Стикс, 2004]. Властивості цього матеріалу гарантують низьке енергоспоживання, а також стійкість до впливу холоду, тепла та магнітних полів.

У новому пристрої пам'яті нанотрубки відіграють роль електро-механічних перемикачів, розташованих на поверхні мікросхеми, ємність яких могла б становити сотні гігабайт і навіть декілька терабайт (рис. Д8.11). Якщо прикласти до нанотрубок напругу, вони прогинаються в поглиблення, витравлене на поверхні плати, і торкаються до інших нанотрубок або до металевих електродів. Трубки залишаються у зігнутому положенні навіть при відімкненому живленні, чим і забезпечується енергонезалежність пам'яті. Вандер-Ваальсові сили (слабке міжмолекулярне тяжіння) утримують перемикач у заданому стані доти, поки дія протилежної напруги не змусить нанотрубку перейти у вихідний стан (рис. Д8.12).

Фірма Nantero (Mas., USA) розробила придатний для нанесення покриття методом центрифугування розчинник. Тонкий шар нанотрубок, що утворюється після його видалення, підлягає обробці літографією та травленням, після чого на поверхні підкладки залишаються впорядковані групи ниткоподібних нанотрубок (рис. Д8.13). Компанія LSJ Logic, провідний виробник мікросхем для засобів телекомунікацій, побутової електронної техніки та комп'ютерів освоїла процес виготовлення енергонезалежної оперативної пам'яті, який фірма Nantero назвала NRAM (Nanotube random access memory), за дев'ять місяців був випущений

дослідний зразок, і незабаром планується розпочати масове виробництва мікросхем пам'яті, які будуть замінювати вбудовані в мікропроцесори модулі статичних ОЗП, що займають більшу їхню частину. NRAM швидша, набагато компактніша та споживає менше енергії. Щоб домогтися високої швидкодії, необхідно забезпечити одержання гострих країв заглиблень, над якими підвішуються нанотрубки, у протилежному випадку погіршуються й інші електричні характеристики пристрою та збільшується напруга ввімкнення та вимикання.

Фахівці інших фірм висловлюють сумніви щодо широкого поширення цієї технології, але навіть один продаж ліцензій на 60 пакетів, отриманих у процесі розробки, з надлишком покривають витрати на розробку. На розробку отримано також 10 грантів.

Оскільки щільність розміщення та рівень інтеграції транзисторів в ІС невпинно збільшуються, розміри їхніх елементів зменшуються до нанометрів і часток нанометрів. Це межа існуючих технологій.

Для подальшого розвитку необхідні зовсім нові технологічні рішення, що дозволяють зменшити розміри обчислювальних пристроїв. Однак, приголомшливий успіх кремнієвих ІС піднімає планку необхідних характеристик настільки високо, що на розробку прийнятних рішень піде тривалий час.

Тому багато науково-дослідних груп займаються пошуком середньострокової альтернативи, промислове впровадження якої займе не більше 10 років. Такі технології повинні ґрунтуватися на сучасній мікроелектроніці, щоб можна було використовувати вже наявні виробничі потужності та програмне забезпечення.

Одним з перспективних напрямків створення електронних пристроїв є так звана кросбар-архітектура, розробка якої розпочата фірмою Hewlett Packard в 1995 г., а на даний час роботи ведуться низкою фірм [Кьюкс, 2006].

Кросбар складається із двох взаємно перпендикулярних наборів паралельних провідників товщиною в одиниці нанометрів, розділених шаром матеріалу, опором якого можна керувати за допомогою електричних сигналів. У точках перехрещування провідників виникають електронні ключі, які можна перемикаєти із замкненого стану в розімкнений та навпаки.

У кросбара є декілька переваг: регулярну сітку із двох схрещених наборів паралельних провідників виготовити неважко

(у порівнянні зі структурою сучасних мікропроцесорів). Матрична структура дозволяє без особливих зусиль підвищувати стійкість схеми до неминуче виникаючих у ній дефектів. Для виробництва кросбарів можна використовувати цілий спектр матеріалів і технологічних процесів, що дозволяє пристосовувати існуючі конструкції до нових матеріалів. Нарешті, обрана геометрична конфігурація виявляється дуже гнучкою, тому що підходить для створення комірок пам'яті, логічних елементів і міжз'єднань.

Провідники в кросбарах настільки малі, що при їхньому виготовленні неминуче виникає безліч дефектів атомного розміру. На щастя, їх можна компенсувати, роблячи схему надлишковою та застосовуючи теорію кодування.

Об'єктом, що підказав принцип забезпечення стійкості до дефектів, став суперкомп'ютер фірми HP «Гермак», незважаючи на те, що 220 тис. його компонентів (приблизно 3 %) виявились дефектними. При проектуванні в схему міжз'єднань була закладена надлишковість. Це дозволило виявити всі браковані елементи та скласти програму таким чином, щоб виключити їхнє використання за допомогою надлишкових з'єднань.

Основою кросбар-архітектури є ключ, який можна переводити із замкненого стану в розімкнений і навпаки, подаючи відповідну напругу на провідники, які він з'єднує.

У системі, розробленій фахівцями Hewlett Packard, у місцях перехрещування нанопровідників, розділених мономолекулярним шаром, формуються ключі (рис. Д8.14). На початку вони розімкнені (стан з більшим опором, показано червоним). Коли до пари нанопровідників (жовтий та оранжевий) прикладають досить велику напругу певної полярності, ключ, що їх з'єднує, замикається (стан з малим опором, показано зеленим). Він залишається в цьому положенні доти, поки на нього не буде подано напругу протилежної полярності, що знову розімкне його. Деякі досліджені ключі зберігають задані їм стани вже більше трьох років. Їх можна використовувати для створення оперативної пам'яті або програмувальних логічних елементів.

Кросбар схожий на кристал і тому його структура може бути отримана хімічним шляхом, розділивши рівні провідників шаром електрохімічно активної речовини. Подаючи напругу між перехресними провідниками, ключ буде замикатися в результаті електрохімічного звуження бар'єра, який повинні подолати

електрони в результаті тунельного ефекту, щоб перейти з одного провідника на іншій. Подача зворотної напруги, що розширює бар'єр, буде знову розмикати ключ. Молекули матеріалу-прокладки відіграють роль електрохімічно керованих механічних перемикачів, тому що зміна форми прокладки призводить до зміни ймовірності тунельних переходів.

Можливі дві технології формування кросбарів: «зверху-вниз», тобто напівпровідникова технологія фотолітографії та травлення; і «знизу-вгору» — нанесення необхідних структур з використанням хімічних або біохімічних процесів, у результаті яких атоми або молекули самі вибудовуються в потрібні конфігурації за рахунок своїх внутрішніх властивостей (рис. Д8.15).

Маслянисті молекули матеріалу прокладки, названі ротаксанами, мають спеціальну структуру, на поверхні води розтікаються рівномірним мономолекулярним шаром, що переноситься на підкладку зі сформованої на ній нижньою системою провідників (за технікою Ленгмюра — Блоджетта). Потім методом напилювання металу через маску на молекулярному шарі створюється верхня система провідників.

Молекули ротаксанів можуть перемикатися між станами з високим і низьким опором. У цей час можливість електрохімічного перемикання одержала широке визнання, над створенням надійних наноскопічних ключів з атомів і молекул працюють десятки дослідницьких груп у різних країнах світу.

У кросбарах припускаються неминучі у виробництві дефекти та вживаються заходи для їхнього виявлення та обходу. Але для цього потрібно вміти керувати наноелектронними пристроями за допомогою звичайних кремнієвих ІС. Якщо кожний мікропровідник можна з'єднати тільки з одним нанопровідником, використання нанокросбара втрачає сенс. Проблема вирішується за допомогою демультимплексора — допоміжної схеми, що вибирає нанопровідник, двійковий номер якого (наприклад, 1010) подається на її вхід. Демультимплексор дає можливість з'єднати безліч нанопровідників з декількома звичайними провідниками. Якщо є k звичайних провідників, то мультимплексор може управляти 2^k провідниками. Ще d звичайних провідників забезпечують надлишковість, що дозволяє системі працювати навіть тоді, коли деякі з'єднання між звичайними та нанопровідниками порушені. На наведеній спрощеній схемі $k = 2$ і $d = 1$: два мікропровідники керують чотирма

нанопровідниками, а надлишковість становить один біт. У даному прикладі керуючі провідники задають адресу 01 (червоні цифри), до якої схема кодування додає надлишковий біт, у результаті чого виходить кодована адреса 011 і демультимплексор активізує провідник 011.

Рішення стійкості до дефектів за рахунок надлишковості коду забезпечує відновлення інформації при дефектах певної кількості з'єднань. Природно, що необхідний ступінь надлишковості залежить від імовірності появи дефектності з'єднань. За допомогою кросбар-архітектури створені також деякі логічні схеми (рис. Д8.16).

У виробництві багатошарових комутаційних плат, що слугують конструктивною основою сучасної ЕА та МЕА, важливою операцією є електричний контроль цілісності провідників і відсутності коротких замикань між роз'єднаними ланцюгами. Зі зменшенням розмірів провідників і проміжків, а також зі збільшенням ступеня інтеграції вузлів апаратури на багатошарових комутаційних платах (БКПл) складність цієї операції зростає, тому що на малій площі необхідно встановити велику кількість зондів для підключення багатозондових контактних пристроїв (БКП) до автоматичного тестера. Наприклад, на платі 48×60 мм потрібно підключити 2400 точок. І це не є межею складності. Тому за минулі десятиріччя створена велика кількість БКП. Вони відрізняються значною складністю, трудомісткістю та малою надійністю. До 5 % ланцюгів після автоматичної перевірки контролюють вручну, щоб уникнути відбракування придатних виробів, або забракованих внаслідок відсутності контакту окремих зондів БКП із платою.

Мікромеханічний БКП [Невлюдов, 2008] на основі поліімідного багатошарового шлейфа з матричними виводами-зондами, виготовленими за технологією BGA/CSP-структур, може забезпечити істотне підвищення надійності контактування контрольованих плат із зондами БКП, істотно простіший за аналоги, забезпечує однаковий тиск зондів за рахунок притиснення стисненим повітрям.

Конструктивні варіанти БКП можуть забезпечити самотестування контактування кожного окремого зонда. Подібні БКП можуть бути використані для вхідного та функціонального контролю електронних компонентів з BGA виводами.

Приклад товстоплівкової плати розмірами 48×60 мм і з 2400 виводами наведено на рис. 1.22 (с. 78), а БКП з необхідною кількістю зондів для її контролю — на рис. 1.23, 1.24 (с. 78, 79).

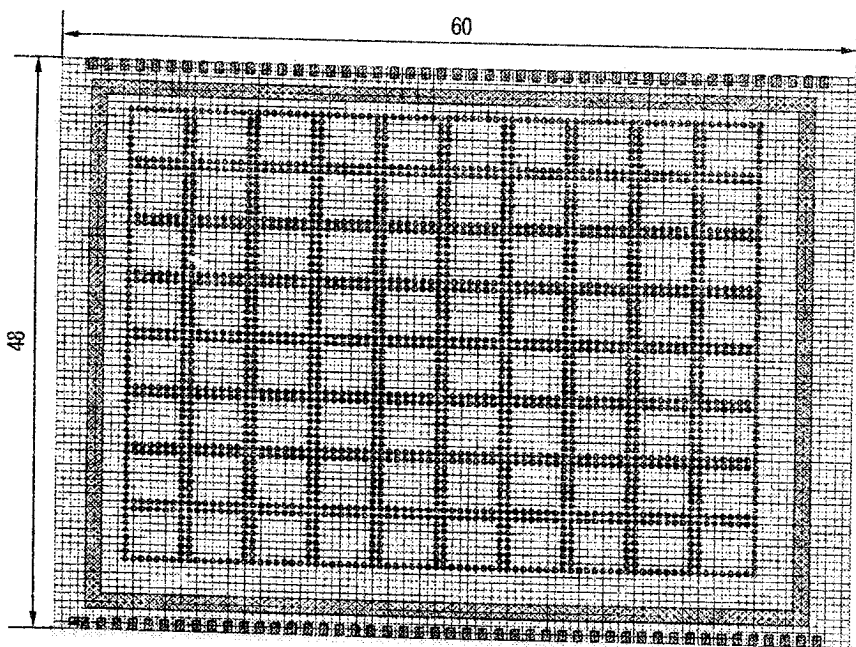


Рис. 1.22. П'ятишарова товстоплівкова БКП

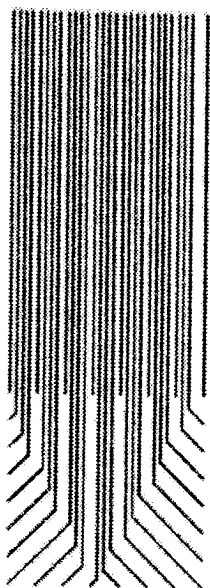
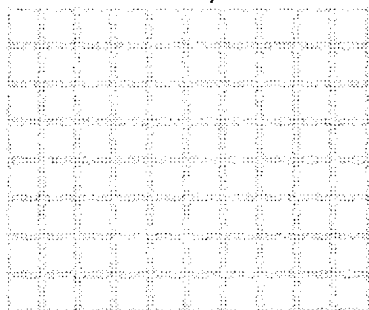
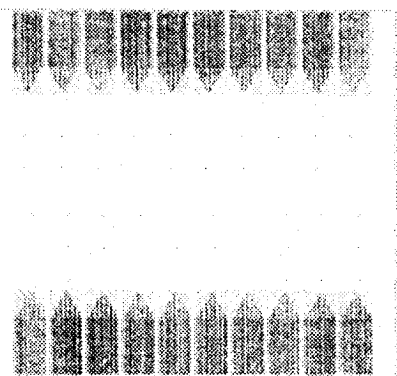


Рис. 1.23. Стандартна контактна група одного посадного місця

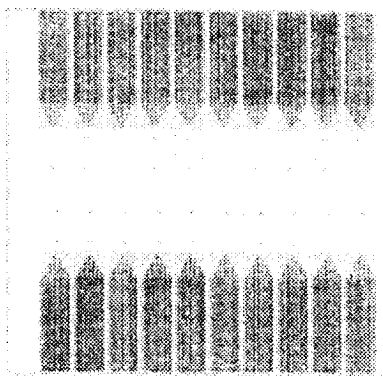
1-й шар



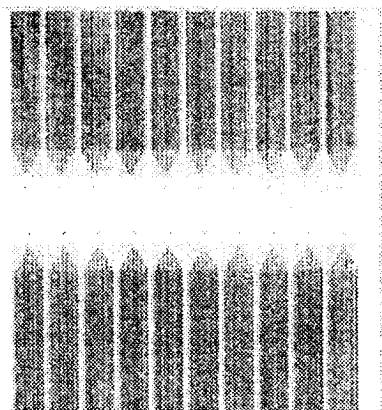
2-й шар



3-й шар



4-й шар



5-й шар

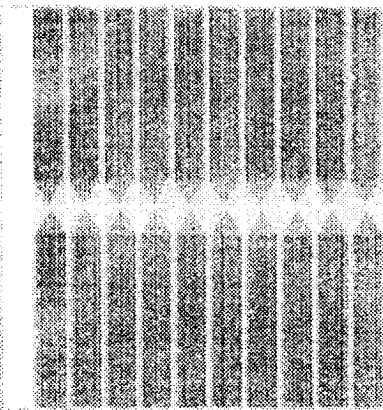


Рис. 1.24. Шари БКП

1.3.10. Оптиволоконні позиціонери

Для надійної передачі оптичного сигналу визначальним є прецизійне позиціонування фотонно-кристалічних волокон (ФКВ) між собою або з іншими елементами функціональної електроніки.

В запропонованому методі [Филипенко, 2009] підвищення точності позиціонування та надійності досягається за рахунок використання методів оптимальної фільтрації сформованих ФКВ зображень і спрощення математичної обробки.

Відомо [Филипенко, 2009], що за відсутності неприйнятних дефектів оптичних волокон створюваний ними розподіл поля при поперечному зондуванні має симетричний характер відносно осі серцевини та являє собою парну функцію відносно осі, що проходить через центр симетрії, який збігається із шуканою оптичною віссю серцевини за відсутності зсуву.

Тому задача позиціонування зводиться до визначення та мінімізації бічного зсуву центра сигналу, яку можна вирішити з використанням принципу узгодженої фільтрації у формі автозгортки.

Модель сигналу в перерізі розподілу інтенсивності оптичного поля можна представити у вигляді

$$\xi(x) = I(x) + n(x), \quad (1.95)$$

де $I(x) = E^2(x)$ — функція розподілу інтенсивності; $n(x)$ — адитивний шум з нульовим середнім значенням.

Узгоджений фільтр є оптимальним фільтром, що мінімізує середньоквадратичну похибку при виділенні корисної складової $I(x)$ із суміші з шумом. Вихідний сигнал узгодженого фільтра можна представити у вигляді інтеграла згортки

$$s(z) = \xi(x) * h(x) = \int_{-D/2}^{D/2} \xi(x)h(z-x)dx,$$

де D — довжина ділянки регенерації.

З огляду на те, що $h(x) = \alpha \cdot I(-x)$ та $\alpha = 1$, у точці $z = 0$ маємо

$$s(0) = \int_{-D/2}^{D/2} I^2(x)dx + R_{ni}(0) \approx R_n(0),$$

де оцінка взаємної коваріаційної функції шуму та сигналу R_{ni} близька до 0 внаслідок їхньої статистичної незалежності. Таким чином, вихідний сигнал узгодженого фільтра відповідає автоковаріаційній функції корисної складової $I(x)$ і досягає максимуму в момент точної ідентифікації цієї складової.

Проведений аналіз дозволяє побудувати алгоритм комп'ютерної обробки вимірюваного розподілу оптичного поля методом автозгортки, реалізованої шляхом реєстрації послідовності зі зворотною перенумерацією елементів, попарного перемноження значень елементів цих послідовностей і підсумовування отриманих значень при варіюваному параметрі зсуву z . Максимальному результуючому значенню отриманої суми відповідає такий зсув другої послідовності відносно першої, за якого спостерігається їхній збіг за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки.

Метод автозгортки забезпечує похибку контролю позиціонування ФКВ, що не перевищує $0,1$ мкм.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які закономірності спостерігаються при зменшенні розмірів елементів у мікрометровому діапазоні розмірів і нанометровому діапазоні розмірів часток?
2. Що таке «скейлінг»?
3. Наведіть механічні величини, що відповідають електричним: струму, напрузі, індуктивності, ємності, активному опору. Доведіть ці аналогії.
4. Як визначити частоту коливань механічної системи, використовуючи принцип електромеханічних аналогій?
5. Яка технічна ефективність може бути отримана при використанні в чутливих елементах мікромеханічних елементів замість електричних?
6. За рахунок яких рішень МЕМС досягається підвищення надійності?
7. У чому полягають економічні переваги МЕМС і які умови необхідні для їхнього практичного одержання?
8. Навести приклади конструкції пружинних підвісів роторних секцій конденсаторів для одержання чутливості ЧЕ в напрямку:
 - а) перпендикулярному до площини пластин;
 - б) паралельному до площини пластин.
9. Навести умови рівноваги для диференціального конденсатора з електростатичним збудженням і торсіонним кріпленням ротора.
10. Записати першу та другу лінеаризовані електромеханічні залежності для електростатичних перетворювачів.
11. Що таке принцип ізоморфізму математичних моделей для фізичних явищ різної природи й як він використовується при математичному моделюванні ТП?
12. Чому електростатичні перетворювачі широко використовуються в МЕМС, а в макротехніці — електромагнітні?
13. Що таке магнітоопір? Назвати відомі на цей час види магнітоопорів.
14. Пояснити відмінності ГМО, екстраординарного та балістичного магнітоопорів.

15. Де використовується ефект ГМО у РС?
16. Які фізичні ефекти використовуються в напівпровідникових датчиках тиску, температури, вібрацій?
17. Що таке п'єзоелектричний ефект?
18. Навести приклади використання п'єзоелектричного ефекту в радіоелектроніці.
19. Матеріали, що володіють п'єзоелектричним ефектом.
20. Що таке магнітострикційний ефект?
21. Які ефекти використовуються для створення газових сенсорів?
22. Перелічити основні характеристики датчиків.
23. Чому при легуванні алмазів використовується винятково іонне легування?
24. Описати конструкцію ГМО-головки зчитування, використовуваної в НЖМД.
25. Які особливості технологічних операцій виготовлення мікрокабелів на поліімідній плівці?
26. Записати рівняння для розрахунку сили, що діє в плоскому конденсаторі за відомим зсувом Δx рухомої обкладини, за значенням Δy (y паралельна обкладам конденсатора).
27. Що таке спітроніка?
28. Які датчики газів ви знаєте?
29. Перелічити галузі застосування датчиків газів.
30. Що таке «металеві квадрати»?
31. Назвіть лінійні розміри, що належать до макро-, мікро-, нано-, атомного та ядерного діапазонів об'єктів.
32. Чому в макродіапазоні в електродвигунах використовуються електромагнітні сили та пристрої, а мікродвигуни використовують електростатичні сили?
33. Навести основне рівняння, що визначає коливальні рухи в електричних і механічних системах.
34. Які можливі випадки коливань в електричних і механічних системах?
35. Як визначається похідна та інтеграл за часом при гармонійних впливах на систему? Фізичний зміст диференціювання та інтегрування гармонійних функцій.
36. Які конструктивні рішення перспективних видів міжа'еднань розробляються в цей час?

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТИПОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ МЕМС ТА СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ МСТ

Правильний вибір МС продукту, технології та організації його виробництва — одна з важливих проблем для МСТ. Це змушує виробників шукати найбільш ефективні методи розробки виробів, організації та керування виробництвом. За рахунок вертикальної інтеграції виробництва цикл від розробки до повномасштабного виробництва скорочується від 3—6 років за традиційним циклом до 8—14 місяців. З метою прискорення виходу продукції на ринок активно об'єднуються традиційні виробники МСТ із дослідницькими групами, насамперед з університетів. Прикладом може слугувати об'єднання норвезької виробничої фірми *SensoNor* і фірми-розробника ТМП при університеті м. Енсхеде (Нідерланди). Аналогічний приклад — об'єднання фірми *AN-SYS* — світового лідера в галузі техніки з комп'ютерним керуванням *computer aided engineering (CAE)* і французької фірми *MEM-SCAP* — лідера в галузі проектування МЕМС.

Існує велика кількість САПР МСТ. Вибір може бути зроблений тільки на основі аналізу відповідності САПР розроблюваному продукту МСТ. Специфічність конструкції (найменші розміри, матеріали, необхідність урахування тривимірності та т. ін.) накладають свої відбитки на параметри моделі. Наприклад, у мікродозуючих рідинних пристроях важливого значення набувають капілярні та адгезійні явища. Ефективність розробки МС виробів залежить від стадії моделювання та САПР у набагато більшій мірі, ніж за розробки макроаналога цього виробу.

Під час освоєння нової науково-технічної галузі основні труднощі виникають на стадії переходу до виробництва, оскільки на стадії освоєння виробничих технологій, як і в будь-якому іншому виробництві, у МСТ існує набір основних технологій (уже говорилося, що їх близько 20), які дозволяють виготовити всі необхідні компоненти, деталі та виконати їхнє складання. Як ми вже

відзначали, першими технологіями виробництва елементів МС були технології мікроелектроніки, а першим матеріалом — кремній. Кремній як і раніше широко використовується в МСТ, оскільки дозволяє виготовити не тільки деталь МС, але й розмістити схеми обробки сигналу та керування на одному матеріалі. Однак спектр матеріалів для МС набагато ширший: метали, сплави, пластмаси та інші полімери, скло і т. ін. Із цих матеріалів потрібно виготовляти не тільки поверхневі конструкції, але й об'ємні. При цьому індивідуальна обробка припустима тільки для прототипів виробів. Масове виробництво дешевих виробів вимагає застосування групової технології. Однією з перших технологій подібного типу була розроблена в Німеччині ЛІГА-технологія. У цій технології за допомогою синхротронного випромінювання в товстому фоторезисті формуються порожнини, по сторонах яких електрохімічно осаджується метал. Таким чином створюються або готові вироби з металу, або прес-форми для їхнього подальшого тиражування. Технологія має два недоліки: вимагає застосування синхротронного випромінювання та дає можливість одержати вироби тільки із прямокутної утворюючої форми (циліндри, прямі паралелепіпеди та т. ін.). Незважаючи на це ЛІГА-технологія займає друге місце за частотою застосування. Об'ємні деталі більш складної форми (наприклад, звиті поверхні, пружини й т. ін.) отримують методами стереообробки (стереолітографія, стереосаження і т. ін.), у яких здійснюється програмоване осадження (видалення) шарів — перерізів виробу. Ці методи не групові і тому придатні лише для створення прототипів. З'явилися повідомлення про технології (DEM-технологія), подібні до ЛІГА-технології, але які базуються на кремнієвій технології та не потребують застосування синхротронного випромінювання деталі з металу чи пластмаси. Це дає можливість розглядати кремнієву технологію в якості базової.

Однак, незважаючи на всі успіхи кремнієвої технології в мікроелектроніці, перехід до МСТ не дуже простий. Навіть у випадку простих МС часто потрібно вводити нові процеси, пов'язані з формуванням об'ємних структур. До їхнього числа належать процеси травлення з більшими аспектними відношеннями (глибини до бічних розмірів), двостороння фотолітографія, корпусування. Ще більш складні проблеми виникають при виготовленні деталей і елементів конструкції МЕМС та МОЕМС, що крім тривимірності часто повинні мати складну форму.

Пошук оптимальних рішень призводить до синергічного злиття різних типів технологій МСТ. Наприклад, DEM-технологія

е сполученням методів об'ємного травлення кремнію із процесами гальванічного осадження, уперше використаними в ЛІГА-процесі. Ці ж процеси у волоконній технології дозволяють одержати трубчасті деталі складної форми, недоступні для самої ЛІГА-технології. Стереолітографія, що методом пошарової полімеризації дозволила вперше одержати об'ємні деталі складної форми, дала стимул для розвитку методів пошарового осадження металів з газової фази або його наплавлення з порошку.

У цей час практично вирішені питання створення експериментальних зразків багатьох деталей, необхідних для МЕМС будь-якої складності, однак, як ми вже відзначали, ефективним виробництвом МСТ стає тільки за умов групової обробки, здатної зробити серійне виробництво рентабельним. Побічним доказом ефективності технологічного процесу може слугувати поява на ринку спеціалізованого для МСТ устаткування. Спочатку МСТ устаткування почали робити для процесів літографії та сухого травлення. У цей час уже декілька фірм, наприклад австрійська фірма EVG, поставляють комплексне обладнання для кремнієвої МСТ.

Одна з можливих форм підвищення ефективності виробництва МСТ полягає в територіальному поділі технологій. Кожен з етапів (або хоча б їхня частина) може бути високоефективним виробництвом. Відомо, що зараз у світі існує велика кількість фірм, що виробляють мікроелектронну продукцію, не маючи власного технологічного встаткування (fables). Це стало можливим після появи на ринку доступних і універсальних САПР, за допомогою яких можна спроекувати оригінальну власну інтегральну схему, блок або апаратуру, а їхнє виробництво здійснювати на технологічних лінійках фірм, що спеціалізуються на виробництві масової продукції (наприклад, схем пам'яті або мікропроцесора).

У технології МСТ був зроблений наступний крок поділу технологій. Спроекувана МС частково виготовляється на серійному мікроелектронному підприємстві (поверхнева обробка), а частково — на спеціалізованому виробництві (об'ємна обробка). Подібне виробництво може бути організоване в лабораторії або на малій фірмі, тому що технологічне обладнання може бути недорогим, а його розміщення не вимагає чистих кімнат мікроелектронного рівня. Подальше підвищення ефективності виробництва МС може бути досягнуте за рахунок збільшення серійності спеціалізованого виробництва, наприклад, якщо один технологічний процес використовується при обробці великої кількості однотипних виробів. Ідея такого глибокого поділу виробництва МС на етапи, кожний

з яких може виконуватися на територіально віддалених одна від одної виробничих ділянках, реалізована у США шляхом створення «віртуального виробництва» (Virtual fab) фірмою MEMS Exchange. Розробник за допомогою цієї фірми може спроектувати та виготовити за необхідним технологічним маршрутом окремі компоненти або закінчену МС. При цьому сама фірма є тільки менеджером-диспетчером, забезпечуючи проходження замовлення на технологічних лінійках різних виробничих фірм [Стикс, 2004].

Підсумовуючи викладене вище, можна відзначити наступне:

- МСТ уже сформувалася як один із провідних напрямків техніки ХХІ сторіччя;
- обсяг уже виробленої продукції дозволяє говорити про глобальний ринок МСТ із високими темпами росту;
- труднощі розширення номенклатури МСТ тільки частково пов'язані з технологічними проблемами виробництва, тому що вони можуть бути переборені тим або іншим шляхом;
- більш істотною є проблема вибору для виробництва певного типу МС і МСТ, оскільки сфера взаємодії виробника та споживача в цій області техніки тільки-но складається.

З метою усунення розриву між потенційними споживачами та виробниками мікросистем у західних країнах були розроблені та діють національні та міждержавні програми з МС, різного роду союзи, клуби й асоціації. Ключовим моментом стало створення інформаційних мереж з МСТ. У Європі роль мережної структури, що сприяє об'єднанню фахівців з МСТ, грають НЕКСУС (NEXUS) та МИНАНЕТ (MINANET) — неурядові організації, що працюють за контрактом з Європейським Союзом.

Розглянемо ряд широко використовуваних систем автоматизованого проектування. Одна з перших наскрізних систем автоматизованого проектування РСАD дозволяє автоматизувати всі етапи проектування апаратури, починаючи від створення та перевірки правильності розробленої схеми та закінчуючи розводкою провідників друкованої плати та створенням керуючої інформації для виконавчого обладнання.

Версія РСАD 4.5 одержала більшу популярність. Вона була русифікована, для неї були створені великі бібліотеки графічних описів вітчизняних компонентів, а, головне, саме для неї були вирішені проблеми виходу на вітчизняне технологічне обладнання — фотоплотери та свердлувальні автомати.

Завдяки цим досягненням РСАD 4.5 дотепер знаходить застосування на вітчизняних підприємствах електронної промисловості.

В 1992 році випущена версія PCAD 6.0, у якій здійснений перехід до арифметики із плаваючою комою. Завдяки цьому на два порядки підвищилася розрізняюча здатність графічних редакторів і було усунуто багато проблем, пов'язаних з розводкою провідників друкованих плат.

Змінено формати графічних бібліотек на 32-розрядні для опису даних. Щоб не втратити всі бібліотеки графічних описів, створені для більш ранніх версій, фірма розробила спеціальну програму, що конвертує старі бібліотеки в новий формат.

Однак ні ця, ні наступні DOS-версії PCAD (PCAD 7.0, PCAD 8.0, PCAD 8.5) не завоювали особливої прихильності у вітчизняного розробника апаратури. Стара любов до PCAD 4.5 виявилася сильнішою за нові можливості.

Треба сказати ще про одну особливість більш пізніх версій PCAD. З них була вилучена підсистема моделювання, і пакет перестав бути наскрізною САПР.

В останні роки (а точніше з 1995 року) власником пакета PCAD є фірма ACCEL Technologies, що припинила лінію DOS-версій даного продукту та перейшла на платформу Windows-додатків.

Остання розробка — ACCEL EDA 14.0 зберегла ідеологію більш ранніх версій PCAD, так що розробникам апаратури не прийдеться знову перенавчатися.

Фірма ACCEL Technologies зробила ще одну спробу повернути собі втрачені позиції лідера в області CAD-систем для персональних комп'ютерів. У всякому разі, створивши гарячий зв'язок із системою моделювання Dr.Spice 2000 A/D 8.2 фірми Deutsch Research, вона відновила колишній статус пакета ACCEL EDA 14.0 в якості наскрізної системи проектування.

Треба сказати, що фірма ACCEL Technologies використання «чужих» програм зробила стратегічною лінією своєї поведінки. Аналогічним чином вона підключила до своєї системи програму авторозміщення та автотрасування SPECCTRA 7.1 фірми Cadence. Це одна з самих потужних та ефективних програм, що використовує новітні безстічні алгоритми трасування друкованих плат.

Система SPICE [Шелєпин, 2004]

Ця САПР почалася з розробки наприкінці 1970-х років у Каліфорнійському університеті (м. Берклі) програми схемотехнічного моделювання SPICE 2. Її вхідна мова опису схеми виявилася настільки вдалою, що на багато років уперед визначила неофіційний стандарт опису електронної апаратури.

Прийняті в ній формати та моделі застосовуються зараз у багатьох програмах аналогічного призначення, а списки з'єднань схеми у форматі SPICE використовуються в багатьох сучасних пакетах, наприклад, в Micro-Cap, Dr. Spice, OrCAD, ACCEL EDA, Viewlogic та інших.

Абревіатура PSpice розшифровується як моделююча програма з орієнтацією на інтегральні схеми (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis).

Перша версія програми PSpice на PC-платформі була створена в 1984 р. корпорацією MicroSim. Ця та наступна версії використовують ті ж алгоритми, що й SPICE, той же формат подання вхідних і вихідних даних. Перша версія програми PSpice моделювала тільки аналогові схеми.

В 1989 році з'явилася версія PSpice 4.0, що дозволяє моделювати змішані аналого-цифрові схеми. П'ята версія дозволяла вводити схему в текстовому та в графічному вигляді. Крім того, фірма MicroSim випустила версію, що працює в середовищі Windows.

Починаючи з 1994 року, на базі розроблених програм моделювання фірма MicroSim стала випускати САПР Design Center (версії 6.0, 6.1, 6.2, 6.3), у яку були включені додатково програми технічного проектування, зокрема, автотрасувальник SPECCTRA.

В 1996 році відбулася ще одна зміна назви системи. Нова версія 7.1 одержала назву DesignLab. В 1997 році з'явилася остання версія під цією назвою DesignLab 8. Після її виходу корпорація MicroSim об'єдналася з фірмою OrCAD. Створена фірма вже повідомила про розробку нової САПР — OrCAD 9.0.

Мова опису апаратури VHDL. VHDL — це не САПР та не АСМ, а мова опису апаратури, що підтримується в цей час багатьма системами моделювання, такими як GMVHDL, Active VHDL, Accolade Peak VHDL, OrCAD та ін. Історія появи та розвитку цієї мови в багатьох відношеннях показова.

Мова VHDL з'явилася не на порожньому місці. Можна навести досить довгий список мов опису та моделювання цифрових пристроїв, наприклад, ФОРС, OCC-2, DDL, HSL та т. ін., які начебто призначалися для тих же цілей. Однак всі вони мали один недолік — моделюючи функцію об'єкта, вони не мали розвинених засобів для опису та контролю часових співвідношень у цифровій апаратурі (ЦА).

Особливо гостро це відчувалося при розробці надшвидкісних інтегральних схем (VHSIC — Very High Speed Integrated Circuits). Схема правильно працює на помірних частотах. Але на високих

частотах синхронізації з'являються збої, і працездатність ЦП порушується. Моделюванням на існуючих дотепер мовах виявити ці граничні для апаратури частоти не вдавалося.

В остаточну редакцію мови VHDL (1993 рік) увійшли пропозиції та рекомендації багатьох відомих фахівців в галузі обчислювальної техніки та провідних фірм, що займаються розробкою САПР електронної апаратури. Тому можна говорити, що мова VHDL відбиває загальну думку про те, якими характеристиками повинна володіти ефективна стандартна мова опису апаратури.

Мова VHDL має розвинену загальноалгоритмічну базу, запозичену від мови програмування PASCAL. Вона містить ретельно пророблені конструкції для поведінкового (функціонального) та структурного подання, а також засоби для документування проєктів.

Високорівневі описи можуть комбінуватися з низькорівневими принциповими схемами. Інакше кажучи, це багаторівнева мова, що підтримує ієрархічне проєктування.

Мова має засоби для опису процесів, що протікають у часі, для завдання часових затримок на елементах. З її допомогою можна описати часові діаграми на входах модельованої схеми та взаємодії між окремими пристроями через системну шину.

Міністерство оборони США зобов'язало своїх постачальників ІМС представляти в складі документації на нові вироби VHDL-моделі та VHDL-вектори, що їх тестують.

Інтерес до мови VHDL величезний. У США створена VHDL Users Group, у Європі — VHDL FORUM групи, які займаються впровадженням цієї мови. У колишньому СРСР також існувала подібна асоціація.

Мова VHDL дозволяє «експериментально» проробляти на комп'ютерах ідеї з проєктування цифрової апаратури на архітектурному рівні та негайно бачити результати своїх експериментів.

Їм більше не знадобиться чекати деталізації своїх проєктів аж до рівня логічних вентилів, щоб одержати можливість практичного оцінювання своїх ідей. Їм більше не знадобиться чекати моменту, коли буде вже занадто пізно вертатися назад, щоб вносити фундаментальні зміни в загальну архітектуру проєкту без великих втрат часу та засобів.

На відміну від інших мов опису та моделювання апаратури, мова VHDL не нав'язує розробнику конкретний метод проєктування. Він вільний обрати будь-який спосіб проєктування з використанням як поведінкових, так і структурних подань компонентів,

можна застосувати як висхідне так і низхідне проектування або комбінувати їх.

Мова VHDL дозволяє спочатку створити абстрактний опис функцій, а потім (у міру пророблення проекту) здійснювати їхню деталізацію, аж до того моменту, коли для них стануть зрозумілими структурні рішення. Інші мови не мають таких широких можливостей.

Системи моделювання, що підтримують мову VHDL, звичайно містять у собі компілятор мови VHDL, відладнач вихідного коду та інтерактивну підсистему цифрового моделювання. Деякі АСМ додатково включають схемний редактор або інтегруються з іншими САПР, що мають такий редактор. Наприклад, можна створити принципову схему в пакеті OrCAD і спеціальна програма конвертує графічний опис в VHDL-код.

Одна з найсучасніших систем моделювання мовою VHDL зветься Active VHDL 3.3.

Процесори для MEMC. Процесори, що є найнеобхіднішою частиною будь-якої MEMC або (і) системи на кристалі, повинні задовольняти низці специфічних вимог [Ерохин, 2005]:

- забезпечувати високу продуктивність при низьких за сучасними вимогами тактових частотах і відсутності буферних пристроїв, таких як кешпам'ять, у зв'язку з обмеженістю площі кристала;
- бути компактним (з тих же міркувань);
- мати специфічне керування та забезпечувати умови поставки процесорного ядра відповідно до технічних вимог замовника.

У цей час у СНК використовуються як відомі процесори із традиційною архітектурою, так і процесорні ядра, спеціально розроблені для систем на кристалі.

Як правило, розроблені для СНК функціональні аналоги традиційних мікропроцесорів відрізняються від оригіналів підвищеними тактовими частотами та скороченим часом виконання команди в тактах, аж до розробки RISC-версій відомих процесорів. Іншим напрямком доробки традиційних архітектур є демультимплексування шини адреси/даних. Третя зміна в порівнянні зі звичайними процесорами також стосується шин. Використання тристабільних шин у СНК недоцільне, тому, як правило, єдина шина даних розділяється на дві шини — вхідних і вихідних даних, що також сприяє підвищенню продуктивності системи.

RISC-процесори. RISC-процесори особливо часто використовуються при побудові СНК. Це пояснюється співвідношенням

компактності та продуктивності, які вони забезпечують. Абсолютним лідером за всіма показниками є сімейство процесорів ARM, для яких серед RISC-процесорів частка для СНК досягає 75 %. Серйозною перешкодою для їхнього використання є висока ціна, а привабливими властивостями — висока продуктивність (до 1,3 MIPS/МГц), невелике енергоспоживання (0,7 мВт/MIPS (для 0,15 мкм — процесу)); використання системи команд Thumb (забезпечує можливість скорочення пам'яті на 35—40 %); підтримка систем реального масштабу часу та можливість повного програмного налагодження систем на кристалі.

DSP-процесори. Системи на кристалі, навіть найпростіші або ті, що призначені для побутових застосувань типу MPEG флеш-програвачів, є системами реального часу. Друга особливість значної частини СНК — цифрова обробка сигналів, через що в СНК велике розповсюдження одержали процесори цифрової обробки сигналів або DSP-процесори, продуктивність яких може на порядки перевершувати продуктивність процесорів із класичною архітектурою. Серед DSP-процесорів поширені ядра фірм MIPS, Motorola.

Процесори, що конфігуруються. Це особливий вид процесорів для СНК, що дозволяє підбудувати ядро під вимоги замовника, пропонуючи програмованість разом з можливістю швидко додати необхідну замовникові логіку для збільшення продуктивності.

Існує два головних класи процесорів, що конфігуруються: конфігурувальні RISC-процесори та конфігурувальні VLIW-процесори (VLIW-процесор з дуже довгим словом інструкції).

Для вбудованих мікроконтролерів архітектура зі скороченим набором команд (RISC) стала основною, бо вона забезпечує можливість вводити замовлені команди в RISC-процесори для прискорення звичайних операцій. Замовлена логіка для цих операцій додається в послідовнісну логіку обробки даних процесора.

Для всіх зазначених груп обов'язковою є вимога спеціального оформлення пристроїв, що поставляються, у вигляді ІТЛ-коду на мовах опису апаратури. Рідкісний виняток — процесори ARM. Як особливо позитивну властивість виробники відзначають, що для проектування пристрою використовується тільки один фронт сигналу тактування.

Ще одна тенденція — розробка особливих режимів енергозбереження, що для СНК є дуже актуальним.

Для подальшого скорочення енергоспоживання використовується спеціальний підхід до проектування — «clock gating».

Моделювання МЕМС. Через складність і значну трудомісткість розробки та виготовлення дослідних зразків пристроїв МЕМС величезний інтерес представляє моделювання структури, функціонування та розрахунок їхніх параметрів під час проектування.

В галузі створення МЕМС, і особливо складних функціональних МЕМС ситуація аналогічна тому шляху, що пройшли системи моделювання та проектування НВІС. У цей час при розробці надскладних ІС, що одержали назву «система на кристалі», можливість їх високоякісного та адекватного моделювання не просто забезпечує скорочення витрат на експериментальне відпрацювання та доведення схеми до функціонування, а визначає принципову можливість їхнього створення. При цьому найважливішого значення набуває можливість використання відпрацьованих раніше складних СФ-блоків для проектування систем на кристалі [Ерохин, 2005].

У МЕМС (ФС МЕМС) електронна схема не тільки зчитує сигнали мікромеханічних електронних компонентів (резисторів, конденсаторів), але й керує ними (наприклад, підтримує рівність номіналів ємностей на диференціальному конденсаторі прецизійного акселерометра за рахунок сил електростатичної взаємодії). При цьому ситуація значно ускладнюється тим, що для їхнього аналізу найчастіше недостатньо статичних або динамічних розрахунків тільки мікромеханічної частини системи. Необхідно забезпечити аналіз, у тому числі динамічний, функціонування всієї електронної схеми ФС МЕМС, щоб визначити її характеристики. Звідси витікає, що для реалізації подібного аналізу необхідно розробити моделі електронних елементів МЕМС, що враховують вплив фізичних величин, які можна було б включити до складу системи для аналізу та розрахунку електронних схем.

Загальний підхід до моделювання МЕМС перетворювачів фізичних величин, оцінка значення параметра в яких проводиться за сигналом розбалансу, може бути визначений наступними кроками:

1. За рівності параметра вихідному (заданому, еталонному) значенню вихідний сигнал (сигнал розбалансу, розузгодженості, відмінності від опорного рівня) дорівнює нулю; умова реалізується мостовими та компенсаційними схемами вимірювань.

2. Вихідний параметр при відхиленні від положення рівноваги представляється розкладенням функції, що описує залежність вимірюваного параметра від діючої фізичної величини, у ряд Тейлора з необхідним для врахування нелінійностей і забезпечення точності числом членів розкладання.

3. Коефіцієнти в членах ряду, що залежать від інших параметрів (відмінних від діючої фізичної величини), також можуть бути розкладені в ряд з необхідним числом похідних по відхиленням цих параметрів від вихідних (нормальних) значень.

4. Підстановка виразів коефіцієнтів (крок 3) у вирази вимірюваного параметра (крок 2) дозволяє визначити всі коефіцієнти, а отже, і вихідний параметр за результатами вимірювань характеристик перетворювачів для низки значень вимірюваного й інших діючих параметрів.

Обумовлені таким способом коефіцієнти забезпечують мінімальне значення квадратичної функції втрат [Де Гротт, 1974].

Моделі тензорезистивних та ємнісних елементів розглянуті нижче [Палагин, 2007].

Існують різні способи моделювання. Основними з них є математичне та фізичне моделювання. В якості фізичних моделей використовуються різні макети, стенди.

У математичному моделюванні широко застосовуються ЕОМ, тобто здійснюється машинне моделювання. Машинні моделі реалізуються на основі математичних моделей у вигляді систем різнісних або диференціальних рівнянь, що описують спільний вплив різних параметрів елементів на вихідні характеристики системи. При машинному моделюванні вихідним змінним ставляться у відповідність машинні змінні, котрими можуть бути електричні напруги, як в аналогових обчислювальних машинах, або цифрова інформація для ЦОМ.

При цьому розрізняють аналогове, цифрове, аналого-цифрове або гібридне моделювання. Крім того, при машинному моделюванні обчислювальна система може сполучатися з реальною апаратурою, тобто реалізувати напівнатурне моделювання, що дозволяє відтворювати процеси, математичний опис яких складний або невідомий, а також одержувати інформацію про функціонування системи в умовах випадкових зовнішніх впливів.

При математичному моделюванні ТП часто використовується принцип ізоморфізму математичних моделей для фізичних явищ різної природи [Черняев, 1987], тобто однакової залежності величин, що спостерігаються у різних процесах.

Так, електричний струм за законом Ома:

$$I = -\sigma \frac{du}{dx}; \quad (2.1)$$

перенос тепла (тепловий потік) за законом Фур'є:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (2.2)$$

перенос речовини (дифузія) за законом Фіка:

$$j\partial = -D \frac{\partial c}{\partial x}; \quad (2.3)$$

швидкість перетворення речовини в хімічній реакції:

$$jk = -K \frac{\partial c}{\partial \tau}; \quad (2.4)$$

перенос кількості руху при в'язкому протіканні рідини за законом Ньютона:

$$P = \eta_v \frac{\partial V}{\partial x}; \quad (2.5)$$

швидкість осадження речовини в шарі:

$$j = \rho_m \frac{\partial \delta}{\partial \tau}; \quad (2.6)$$

де I , q , j_d , j_k , j_{oc} , P — щільності потоків електричного заряду (струм), тепла, компонента, імпульсу відповідно; а σ , λ , D , κ , η_v , ρ_m — коефіцієнти електропровідності, теплопровідності, дифузії, швидкості хімічної реакції, динамічної в'язкості, густина речовини; U , T , C , V , δ — електрична напруга, температура, концентрація, швидкість, товщина осадженого шару відповідно.

В усі ці рівняння входять градієнти відповідних змінних і коефіцієнти. Тому при введенні відповідних перерахункових коефіцієнтів кожне явище можна змодельовати будь-яким іншим, з урахуванням реальних обмежень протікання відповідного процесу.

Відомі також інші аналогії. Наприклад, електрогідродинамічні, в яких швидкість обтікання рідиною (електролітом) перешкод (профіль крила або хвилеріза) може визначатися в різних точках за електричними потенціалами. Процеси описуються диференціальними рівняннями другого порядку.

У випадку моделювання мікроелектромеханічних систем, що містять електронні компоненти та вузли, а також мікромеханічні деталі та пристрої, вочевидь, цікавими та зручними будуть електромеханічні аналогії, як з погляду однаковості їхнього математичного опису, так і з погляду можливості масштабування номінальних значень параметрів мікроелектронних компонентів, впливу виробничих похибок і дестабілізуючих факторів на вихідні

характеристики пристроїв. Такі аналогії відомі в галузі електро-механічних фільтрів, ультразвукової техніці, пристроях, що працюють на поверхневих акустичних хвилях [Варадан, 2004], антенних системах. Перетворення електричних коливань у механічні відбувається з використанням різних фізичних ефектів, а також низки спеціальних матеріалів із властивостями значного п'єзоелектричного або магнітострикційного ефекту.

2.1. Математичні моделі балок

Балки є конструктивним елементом багатьох більш складних конструкцій. Вони розрізняються способом закріплення, взаємним розташуванням ділянок, характеристиками поперечного перерізу, матеріалом. На них можуть впливати різні види навантажень: згинальні моменти, зосереджені та розподілені сили, які за характером можуть бути постійними, змінними (циклічними — гармонічними, імпульсними); реверсивними і т. ін.

При розрахунках плоских пружин (балок), що працюють на згинання, варто враховувати, що зусилля згинання за довжиною балки неоднакове, воно залежить від згинального моменту в кожному перерізі. При створенні моменту зосередженою або розподіленою по довжині силою згинальний момент для різних перерізів змінюється. Відомо [Феодос'єв, 1986], що профіль згину балок у загальному випадку визначається диференціальними рівняннями четвертого порядку, тобто форма осі вигнутої балки описується кривою четвертого порядку.

Основні відомості про напруження, що виникають при деформаціях згину, наведені в додатку 2, докладніше викладені в підручниках по «Опору матеріалів», наприклад [Беляев, Феодос'єв]. Прийmemo при розгляді балок систему координат, представлену на рис. 2.1.

Найпростішою конструкцією консольної балки, використовуваної в МЕМС, є балка, представлена на рис. 2.2.

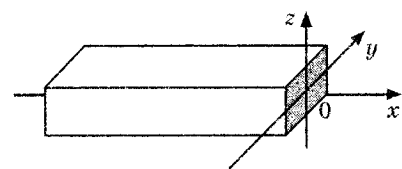


Рис. 2.1. Система координат при розгляді деформацій згину балки

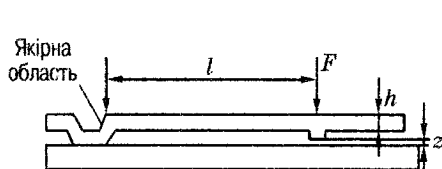


Рис. 2.2. Консольна балка, що працює на згинання

Найпоширенішим видом балок у МЕМС є консольні балки з моментом, що створюється зосередженою силою і змінюється за її довжиною.

Відповідно до теореми Кастильяно [Беляев, 1976] узагальнене переміщення (прогин вздовж осі Z та поворот перерізу θ) дорівнює похідній потенціальної енергії U по узагальненій силі (моменту, зосередженій або розподіленій силі). Для випадку зосередженої сили P :

$$Z_0 = \frac{dU}{dP} = \frac{1}{E} \int_0^l \frac{M(x) dM(x)}{I_y(x) dP}, \quad (2.7)$$

де U — потенціальна енергія; $I_y(x)$ — осьовий момент перерізу балки відносно осі y на відстані x .

Вибравши початок координат у точці O , значення моменту $M(x)$ у будь-якому перерізі балки одержимо у вигляді (рис. 2.3)

$$M(x) = -Px \quad (2.8)$$

та

$$\frac{dM(x)}{dP} = -x. \quad (2.9)$$

Для балки постійного перерізу ($I_y(x) = \text{const}$) переміщення кінця балки O визначиться у вигляді

$$Z_0 = \frac{1}{EI_y} \int_0^l (-Px)(-x) dx = \frac{P}{EI_y} \int_0^l x^2 dx = \frac{Pl^3}{3EI_y}. \quad (2.10)$$

Для балки прямокутного перерізу шириною b , висотою h

$$I_y = \frac{bh^3}{12}. \quad (2.11)$$

Радіус кривизни нейтрального шару балки зі згинальним моментом $M(x)$ у перерізі x (див. Додаток 2):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI_y}; \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{Z''}{(1+Z'^2)^{3/2}}. \quad (2.13)$$

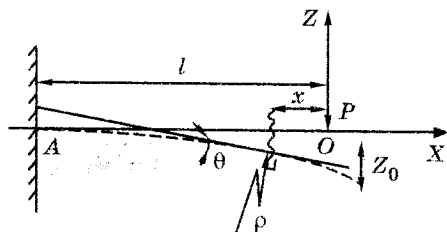


Рис. 2.3. Згин консольної балки під дією зосередженої сили

Для малих кутів θ між дотичною до пружної лінії та віссю x величинами Z'^2 у порівнянні з одиницею можна знехтувати та

$$\frac{1}{\rho} \approx Z'' = \frac{M(x)}{EI_y} \quad (2.14)$$

Відносне подовження шару балки, розташованого на відстані Z від нейтрального шару

$$\varepsilon = \frac{Z d\theta}{\rho d\theta} = \frac{Z}{\rho} \quad (2.15)$$

Аналогічно для консольної балки постійного перерізу (рис. 2.4) під дією зосередженої сили P та рівномірно розподіленої сили з інтенсивністю q переміщення

$$Z_0 = \frac{1}{EI_y} \int_0^l \left(-Px - \frac{qx^2}{2} \right) (-x) dx = \frac{1}{EI_y} \left(\frac{Pl^3}{3} + \frac{ql^4}{8} \right) \quad (2.16)$$

Рівняння переміщення містить доданки, обумовлені дією сил P і qx , тобто показує адитивність дії сил і відсутність лінійної залежності $Z = Z(x)$.

З огляду на відомі диференціальні співвідношення:

$$Q = \frac{dM}{dx}; \quad q = \frac{dQ}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2} \quad (2.17)$$

содержимо ланцюжок рівнянь

$$\theta = Z'; \quad M = EI_y Z''; \quad Q = EI_y Z'''; \quad q = EI_y Z^{IV} \quad (2.18)$$

Нарешті, у найбільш загальному випадку дії на консольну балку згинального моменту M , зосередженої P та рівномірно розподіленої сили qx (рис. 2.5) необхідно враховувати розходження діючих згинаючих моментів на ділянках балки.

Розглянемо балку довжиною l , затиснену одним кінцем і навантажену моментом M у точці B на відстані a від опори, силою P на вільному кінці O та рівномірно розподіленою силою q . Точка прикладення M розділює балку на 2 ділянки: перша OB і друга AB . На цих ділянках діють згинальні моменти M_1 та M_2 . Тому кут повороту перерізу за теоремою Кастильяно буде дорівнювати:

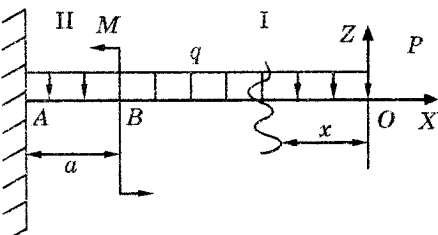


Рис. 2.5. Загальний випадок згинання балки

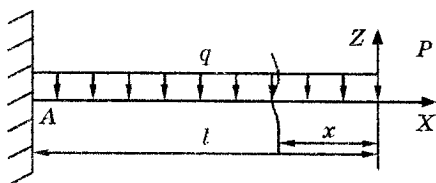


Рис. 2.4. Розрахункова схема консольної балки

$$\theta_B = \frac{dU}{dM} = \int \frac{M_1 dx dM_1}{EI_y dM} + \int \frac{M_2 dx dM_2}{EI_y dM} \quad (2.19)$$

(при обертанні переміщенням є кут повороту, а момент є узагальненою силою).

Для першої ділянки візьмемо довільний переріз на відстані x від кінця O . Згинальний момент у цьому перерізі дорівнює:

$$M_1 = -Px - \frac{qx^2}{2} \text{ і } \frac{dM_1}{dM} = 0; \quad (2.20)$$

межі інтегрування будуть 0 та $l - a$, а перший інтеграл буде дорівнювати 0 .

При обчисленні згинального моменту в перерізі другої ділянки

$$M_2 = -Px - \frac{qx^2}{2} + M \text{ та } \frac{dM_2}{dM} = 1 \quad (2.21)$$

межі інтегрування будуть $l - a$ та l . Вибравши початок відліку в точці B , рівність запишеться у вигляді

$$M_2 = -P(x+l-a) - \frac{q}{2}[x^2 + (l-a)^2] + M \quad (2.22)$$

з межами інтегрування від 0 до a .

Тоді

$$\begin{aligned} \theta_B &= \frac{1}{EI_y} \int_0^a \left\{ -P(x+l-a) - \frac{q}{2}[x^2 + (l-a)^2] + M \right\} dx = \\ &= \frac{1}{EI_y} \left(\frac{P(2l-a)a}{2} - \frac{qa^3}{6} - \frac{q(l-a)^2 a}{2} - Ma \right). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Цей вираз також містить доданки адитивно діючих узагальнених сил.

Велика кількість рухомих елементів МЕМС: керовані контактні пари, пружні підвіси, клапани, кантилевери, міліпеди, резонансні системи, акселерометри та гіроскопи — мають деталі у формі консольної балки, що підлягають дії згинаючих узагальнених сил. З огляду на розміри елементів МЕМС (від 1 мкм до 1 мм), балки є найпростішими пружинами або ділянками більш складних композицій з послідовно (і) або паралельно з'єднаних елементів балок. При згинанні балка переходить у складний напружений стан, обумовлений системою діючих на неї сил, конструкцією та властивостями матеріалу. До особливостей розрахунку додається

необхідність обліку масштабного фактору, що змінює співвідношення впливу інерційних сил і сил пружності у твердому тілі, інерції та сил поверхневого натягу в рідинному середовищі та ін. При розрахунку балок використовуються класичні підходи опору матеріалів [Беляев, 1976]: методи кінцевих елементів, початкових параметрів, вузловий аналіз, функція Гріна задачі про згин балки, функції Ерміта [Ваганов, 1988]. Для розрахунку деформації в матеріалах балок при об'ємному напруженому стані необхідний облік дії нормальних і дотичних напружень, і в загальному випадку тензори напруг і деформацій визначаються для анізотропних матеріалів 81 компонентою (3^4 — тензором четвертого рангу). З урахуванням просторової симетрії за властивістю пружності матеріалів з кубічною кристалічною структурою, якою володіє кремній, число незалежних змінних зменшується до 36 (Додаток 4), а ізотропних матеріалів — до 3 [Най, 1960]. Так компоненти тензорів деформації можуть бути виражені через піддатливості, а тензорів напружень через пружності (наслідок адитивної дії сил у зоні пружних деформацій).

Тензор деформації можна представити наступною лінійною залежністю:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= s_{11}\sigma_x + s_{12}\sigma_y + s_{13}\sigma_z + s_{14}\tau_{yz} + s_{15}\tau_{zx} + s_{16}\tau_{xy}, \\ \varepsilon_y &= s_{21}\sigma_x + s_{22}\sigma_y + s_{23}\sigma_z + s_{24}\tau_{yz} + s_{25}\tau_{zx} + s_{26}\tau_{xy}, \\ \varepsilon_z &= s_{31}\sigma_x + s_{32}\sigma_y + s_{33}\sigma_z + s_{34}\tau_{yz} + s_{35}\tau_{zx} + s_{36}\tau_{xy}, \\ \gamma_{yz} &= s_{41}\sigma_x + s_{42}\sigma_y + s_{43}\sigma_z + s_{44}\tau_{yz} + s_{45}\tau_{zx} + s_{46}\tau_{xy}, \\ \gamma_{zx} &= s_{51}\sigma_x + s_{52}\sigma_y + s_{53}\sigma_z + s_{54}\tau_{yz} + s_{55}\tau_{zx} + s_{56}\tau_{xy}, \\ \gamma_{xy} &= s_{61}\sigma_x + s_{62}\sigma_y + s_{63}\sigma_z + s_{64}\tau_{yz} + s_{65}\tau_{zx} + s_{66}\tau_{xy}.\end{aligned}$$

Аналогічну структуру має тензор напружень. У векторно-матричній формі:

$$\varepsilon_{ij} = s_{ij}\sigma_{ij}$$

та

$$\sigma_{ij} = c_{ij}\varepsilon_{ij},$$

де ε_{ij} , σ_{ij} — тензори другого рангу деформацій і напружень, одержувані згортанням тензорів четвертого порядку ε_{ijkl} , σ_{ijkl} за правилами підсумовування Ейнштейна [Най, 1960]; c_{ij} — коефіцієнти жорсткості; s_{ij} — коефіцієнти піддатливості матеріалу в напрямку дії відповідного напруження; ε_i — відносні деформації

(розтягання-стиску) уздовж осей x, y, z ; γ_{ij} — кути зсуву в площинах, позначених нижніми індексами.

Ці коефіцієнти визначаються властивостями матеріалу, але не є константами, тому що залежать ще й від орієнтації обраної системи осей x, y, z .

У наведених рівняннях тензор s_{ij} — симетричний, тобто $s_{ij} = s_{ji}$, що випливає з теореми рівності робіт [Феодос'єв, 1986]. Наприклад, робота сили $\sigma_x dydz$ на переміщенні s_{12} , викликаному силою $\sigma_x dydz$, дорівнює роботі сили $\sigma_y dx dz$ на переміщенні $s_{21} \sigma_x dy$:

$$\sigma_x dydz \cdot s_{12} \sigma_y dx = \sigma_y dx dz \cdot s_{21} \sigma_x dy,$$

звідки

$$s_{ij} = s_{ji}.$$

Найбільш простий вид матриця піддатливості одержує за ізотропії властивостей матеріалу балки:

$$s = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Компоненти піддатливості матеріалу до дії нормальних напружень — це величини обернено пропорційні до модуля Юнга E (для s_{ii}).

$$s_{ii} = \frac{1}{E}.$$

$s_{ik} = s_{ki} = -\frac{\mu}{E}$ для $i, k = 1, 2, 3$, що характеризує деформації розтягання-стиску; $s_{ii} = \frac{1}{G}$ для $i, k = 4, 5, 6$, що характеризує деформації зсуву.

$$\text{Тут } G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

Значення незалежних коефіцієнтів піддатливості та пружності для кремнію наведено в табл. 2.1 [Ваганов, 1988].

Значення незалежних коефіцієнтів піддатливості та пружності для кремнію

$S_{11}, \frac{\text{м}^2}{10^{11}\text{Н}}$	s_{12}	s_{44}	$c_{11}, \frac{10^{11}\text{Н}}{\text{м}^2}$	c_{12}	c_{44}
0,768	0,214	1,256	1,657	0,639	0,796

Динаміка руху балки в загальному випадку визначається диференціальним рівнянням другого порядку у вигляді:

$$[m]\{\ddot{\xi}\} + [R]\{\dot{\xi}\} + [K]\{\xi\} = \{F\},$$

де $\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}$ — переміщення, швидкості та прискорення обраних вузлових точок балки відповідно; $[m]$ — система матриць маси структурної ділянки балки, кг; $[R]$ — системи матриць демпфування, втрат, нс/м; $[K]$ — системи матриць жорсткості ділянки балки, Н/м; $\{q\} = \{x_i, z_i, \theta_i, \dots, x_N, z_N, \theta_N\}$ — розташування вузлів N трикомпонентних векторних стовпців; $\{F\}$ — вектор узагальнених сил (M, Q, q) .

Будь-які пов'язані між собою ділянки балки в точках з'єднань мають однакові переміщення за координатами та кут повороту перерізу для виконання умови безперервності. Розмір матриці всієї системи залежить від числа обраних вузлів балки.

У деформаціях згину та розрахунках переміщень враховуються співвідношення згинального моменту M , зосередженої поперечної сили Q та розподіленої поперечної сили q

$$\frac{dM}{dx} = Q; \quad \frac{dQ}{dx} = q; \quad \frac{d^2M}{dx^2} = q.$$

Тоді в загальному випадку для підстановки в правій частині значень Q і q ліву частину рівняння необхідно двічі продиференціювати по x .

Поперечні відхилення $v(x)$, осьові зсуви $u(x)$ та кут зсуву $\theta = \frac{dv}{dx}$ можна описати трьома ступенями свободи в кожному вузлі.

Оскільки в проміжках між вузлами відсутні зосереджені сили та діє тільки розподілена сила, умова рівноваги балки визначається за рівнянням

$$\frac{\partial^4}{\partial x^4} v(x) = 0.$$

Розв'язок рівняння з урахуванням граничних умов для обох кінців ділянки балки дає 4 рівняння з 4 невідомими.

Виражаючи функції $v(x)$ та $\theta(x)$ і групуючи подібні члени, одержуємо

$$v(x) = H_1(x)v_1 + H_2(x)\theta_1 + H_3(x)v_2 + H_4(x)\theta_2.$$

У цій рівності $H_i(x)$ — кубічні функції Ерміта.

У рівнянні руху балки жорсткість K і компоненти тензора жорсткості K_{ij} характеризують амплітуду відхилення тіла або окремих частин, точок тіла від положення статичної рівноваги під дією одиничної сили та мають розмірність Н/м. Зворотні жорсткості величини C називаються пружністю та мають розмірність м/Н.

У матриці піддатливості s_{ij} мають розмірності $\text{м}^2/\text{Н}$, а модулі пружності c_{ij} — $\text{Н}/\text{м}^2$. Таким чином, за встановленою в теорії опору матеріалів і теорії пружності термінології модулі пружності c_{ij} відповідають жорсткості K одиничної довжини, а піддатливості s_{ij} — пружностям $C = 1/K$. Тоді

$$K_{ij} = c_{ij}l,$$

$$c_{ij} = \frac{S_{ij}}{l}.$$

Коефіцієнт відносної жорсткості балки при деформації розтягування-стиску $K_{\text{розг}}$ визначається як відношення жорсткості ES до довжини l , тобто

$$K_{\text{розг}} = \frac{ES}{l} \text{ [Н/м]}.$$

Тут S — площа поперечного перерізу балки.

При деформаціях згинання доцільно ввести поняття «еквівалентної жорсткості» ділянки балки довжиною l , пов'язане із прогином кінця цієї ділянки, яке необхідне для «зшивки» складної сполученої балки. Прогин кінця балки під дією зосередженої сили обернено пропорційний до кубу довжини та пропорційний жорсткості перерізу при згині EI_y . Тоді

$$K_{\text{зг}} = \frac{EI_y}{l^3} \text{ [Н/м]}.$$

Тоді матриця жорсткості згину балки буде представлена у вигляді матриці 6×6 :

$$K = \frac{E}{l^3} \begin{bmatrix} Sl^2 & 0 & 0 & -Sl^2 & 0 & 0 \\ 0 & 12I_y & 12EI_y l & 0 & -12I_y & 6I_y l \\ 0 & 6I_y l & 6EI_y l^2 & 0 & -6I_y l & 2I_y l^2 \\ -ESl^2 & 0 & 0 & Sl^2 & 0 & 0 \\ 0 & -12I_y & -12EI_y l & 0 & 12I_y & -6I_y l \\ 0 & 6I_y l & 6EI_y l^2 & 0 & -6I_y l & 4I_y l^2 \end{bmatrix}.$$

Жорсткість балки можна розрахувати за теоремою Кастильяно [Феодосьев, 1986], відповідно до якої частинна похідна від потенціальної енергії системи по силі дорівнює переміщенню точки прикладення сили за напрямком цієї сили:

$$F_i = \frac{\partial U}{\partial \xi_i},$$

де F_i — сила або момент, а ξ_i — зсув координат для ступенів свободи $i=1, 2, 3$, тобто для $\xi = x, z, \theta$ відповідно.

Для лінійної моделі потенціальна енергія балки постійного перерізу визначається як сума енергії переміщення та зміни форми

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial^2 v(x)}{\partial x^2} \right)^2 dx + \frac{ES}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial u(x)}{\partial x} \right)^2 dx.$$

Підстановка цього виразу в попередні визначає компоненти жорсткості у вигляді:

$$K_{ij} = EI \int_0^l H''_i(x) H''_j(x) dx + ES \int_0^l H'_i(x) H'_j(x) dx,$$

яка дає наведену раніше матрицю жорсткості ділянки балки (2.24).

При розрахунках складних балок, складених з лінійних ділянок, розташованих в одній площині, але орієнтованих по-різному, кожна ділянка балки впливає на суміжні з нею силами реакції, а властивість самої ділянки може бути охарактеризована еквівалентними параметрами жорсткості для деформації розтягування-стиску та згину відповідними коефіцієнтами (див. ф. (2.19)—(2.20)).

Матриця мас m_{ij} визначається прирівнюванням внутрішньої та зовнішньої робіт, викликаних віртуальними переміщеннями

$$m_{ij} = \int_0^l \rho(x) S(x) H_i(x) H_j(x) dx,$$

де $\rho(x)$ — щільність і $S(x)$ — площа поперечного перерізу по осі x .

Для $\rho(x) = \text{const}$, $S(x) = \text{const}$

$$[m] = \frac{\rho S l}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22l & 0 & 54 & -13l \\ 0 & 22l & 4l^2 & 0 & 13l & -3l^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13l & 0 & 156 & -22l \\ 0 & -13l & -3l^2 & 0 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

Для випадку простого ламінарного протікання визначальне демпфування (загасання, втрати) матрицю $R(x)$ одержуємо аналогічним до матриці $[m]$ способом:

$$R = \frac{\mu l w}{420 \Delta} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22l & 0 & 54 & -13l \\ 0 & 22l & 4l^2 & 0 & 13l & -3l^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13l & 0 & 156 & -22l \\ 0 & -13l & -3l^2 & 0 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

де μ — в'язкість рідини; Δ — проміжок між балкою та підкладкою; w — ширина капіляра.

Складні балки можуть складатися з послідовно та (або) паралельно з'єднаних ділянок, еквівалентну жорсткість яких можна розраховувати з огляду на зміну довжини, ширини та товщини балок.

Так, при збільшенні довжини балки в n раз при незмінному поперечному перерізі, її жорсткість може бути отримана в вигляді

$$K_1 = \frac{EI_y}{(nl)^3} = \frac{K}{n^3}.$$

Конструктивно подовжена балка може бути представлена у вигляді «згорнутої» конструкції з 2-х або більше послідовних ділянок, з'єднаних жорсткими перемичками.

Точка кріплення пружини (анкер) віддалена від підтримуваного вантажу на відстань $2l$ (рис. 2.6, а).

Ділянки балки можуть з'єднуватися паралельно, збільшуючи площу поперечного перерізу балки (рис. 2.6, б) (ширину b), тому

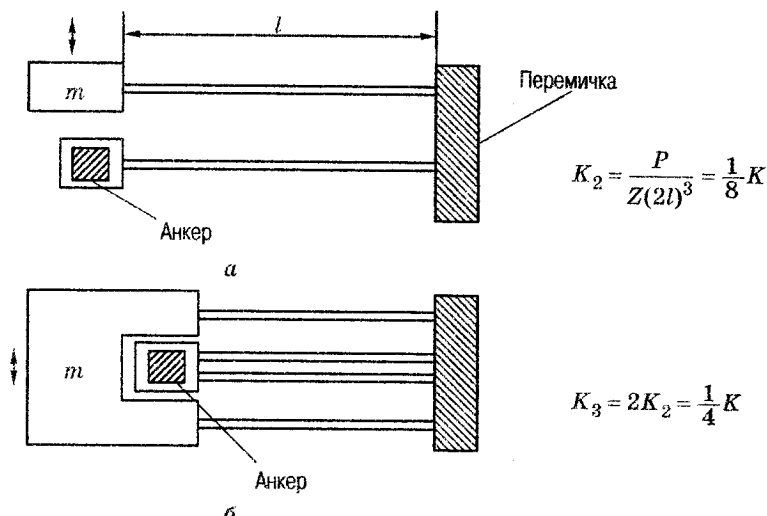


Рис. 2.6. Послідовне (а) та паралельне (б) з'єднання балок

що обидві паралельні ділянки перебувають на однаковій відстані від осі згину.

Конструктивний параметр жорсткості для S-подібного згину балки (рис. 2.7) визначається за допомогою виразу (вертикальне переміщення на Z на довжині $l/2$)

$$K_4 = \frac{P}{2Z_0(l/2)^3} = \frac{4P}{l^3 Z_0} = 4K. \quad (2.27)$$

Моделювання поведінки балок може бути реалізоване з використанням різних пакетів програм: SUGAR (Univ. of California at Berkeley), Ansys, SPICE, Tanner Pro, Coventor Ware. Вихідні дані для проектування містять текстовий опис геометричної форми балки, напруження та прикладені сили. Визначаються точки кріплення частин балки, вузлові точки конструкції, електростатичні проміжки, діючі сили. Вказуються матеріали шарів, модулі пружності Юнга.

За вихідною інформацією SUGAR представляє креслення балки і розрахункові матриці мас $[m]_i$, жорсткостей конструкції у вузлових точках K_i і матриці демпфування $[C]_i$.

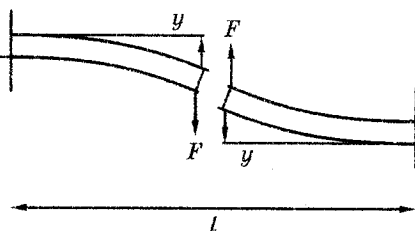


Рис. 2.7. S-подібний згин консольної балки

Як правило системи моделювання містять режими завантаження вихідних даних, аналізу системи на постійному струмі, аналізу сталого стану системи, аналізу перехідного процесу, вивчення частотно-фазових характеристик за різних видів впливів.

Одним з можливих застосувань балок є високочутливі датчики температури. Консольна балка — кантилевер субмікронних розмірів — здатна згинатися під дією різних факторів. Найбільш простий з таких пристроїв складається з набору закріплених

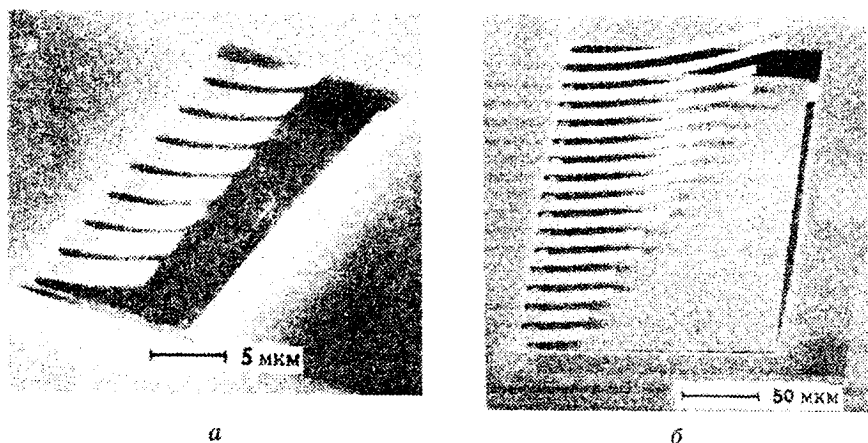


Рис. 2.8. Тестова структура мікробалок: *a* — балки довжиною 8 мкм і товщиною менше 0,1 мкм, що мають частоту механічного резонансу 1,2 МГц; *б* — ґратки з балок довжиною від 118 до 30 мкм, отриманих із сухої термічно вирощеної SiO_2

кремнієвих кантилеверів, що мають різні відношення довжини до ширини (рис. 2.8). Балочки встановлені таким чином, щоб вони могли коливатися під дією механічного, електричного або теплового збудження. Для вимірювання частоти та амплітуди коливань можуть використовуватися оптичні й інші методи.

Як показано на рис. 2.9, частота коливань згину дуже чутлива до довжини балки, тому що вона обернено пропорційна до квадрату довжини балки. На цій основі розроблені термічні датчики, при виготовленні яких на кантилевер наноситься шар матеріалу з температурним коефіцієнтом лінійного розширення, що істотно відрізняється від значення ТКЛР самого кантилевера (звичайно — кремнію). При нагріванні балки через розходження ТКЛР покриття та кремнію вона згинається, а її резонансна частота змінюється. Чутливість такого пристрою перебуває в мікроградусному

діапазоні, так що його можна використовувати в якості детектора ІК випромінювання.

Подібну конструкцію можна використовувати для виготовлення чутливих елементів (ЧЕ) постійних магнітних полів. У цьому випадку одна з поверхонь балки покривається матеріалом з гарними магнітострикційними властивостями. Якщо помістити в магнітне поле, матеріал покриття змінює свої розміри, що призводить до згинання кантилевера та зміни резонансної частоти його коливань. Такі ЧЕ можуть виявити магнітні поля всього 10^{-3} Гс (10^{-9} Тл).

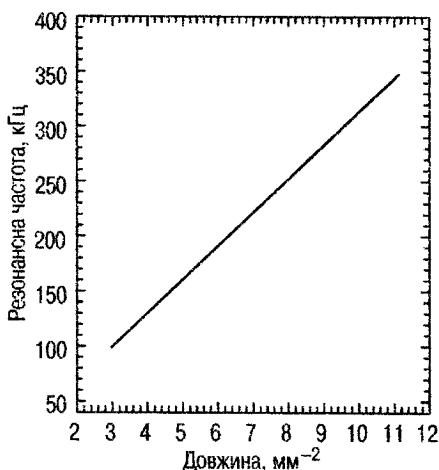


Рис. 2.9. Графік залежності резонансної частоти MEMS-кантилевера від квадрата зворотної довжини балки

2.2. Математичні моделі напівпровідникових датчиків

Розробка інтегрального перетворювача датчиків механічних величин

Постановка задачі. Основними під час розробки КТР датчиків приймаються наступні положення:

- мініатюризація конструкції;
- групові методи виготовлення;
- спільність вихідних матеріалів для перетворювачів різних видів енергії;
- багатofункціональність елементів конструкції;
- орієнтація на визначення гранично досяжних для обраного об'єкта технічних, експлуатаційних і конструктивно-технологічних параметрів.

Вибір об'єктів для розробки КТР датчиків. Вибір об'єктів здійснюється, виходячи з наступних посилань:

- три перших місця серед перетворювачів, що виробляються у світі, займають сенсори для вимірювання тиску, температури та параметрів руху;
- кількість механоелектричних перетворювачів, побудованих за тензорезистивним принципом, більш ніж у три рази

перевищує кількість перетворювачів, побудованих за іншими принципами перетворення;

- найбільш відпрацьованою та широко використовуваною у світовій практиці є кремнієва технологія;
- конструктивно-технологічні рішення, закладені при розробці кремнієвого інтегрального перетворювача механічних величин, здебільшого можуть бути перенесені на створення інших видів виробів мікромеханіки.

Виходячи з вищесказаного, в якості об'єктів при розробці КТР сенсорів, що виготовляються на базі кремнієвої технології, були обрані: трипараметровий тензомодуль тиск-температура-прискорення та тензомодуль динамічних тисків.

Структура будь-якого тензоперетворювача забезпечує, у першу чергу, розрахунок електричної вимірювальної схеми та напружено-деформованого стану пружного елемента. Електрична схема та пружний елемент по суті визначають основні метрологічні характеристики тензоперетворювача.

Традиційною для інтегральних тензоперетворювачів схемою є повний міст Уітстона з ланцюгами балансування початкового вихідного сигналу, регулювання чутливості та схемами термокомпенсації. Різноманіття застосовуваних форм пружних елементів продиктоване конкретністю розв'язуваних задач вимірювання та поточних технологічних можливостей їхнього формування.

За результатами розрахунків може бути проведене топологічне проектування інтегрального перетворювача (рис. Д8.17), відмінними рисами якого є наступні конструктивно-технологічні рішення:

1. Пружний елемент:

- пружна мембрана являє собою смугу зі співвідношенням сторін $\approx 2,4$;
- меандри тензорезисторів розташовані попарно на балках з боку закріплення посередині довгих сторін мембрани;
- наявність прямокутного жорсткого центра практично по всій довжині мембрани;
- використання канавок травлення, що самозамикаються, для шарнірних з'єднань;
- висока відтворюваність габаритних розмірів за рахунок поділу кремнієвих пластин на окремі кристали за допомогою операцій травлення в єдиному технологічному циклі з формуванням профілю мембрани;

- у випадку наскрізного травлення тонкої мембрани жорсткий центр виконує роль інерційної маси сенсора прискорень.
2. Електрична вимірювальна схема:
- повний тензорезистивний міст Уїтстона із вхідним (вихідним) опором, що узгоджений із загальнопромисловими нормувальними підсилювачами (3—5 кОм);

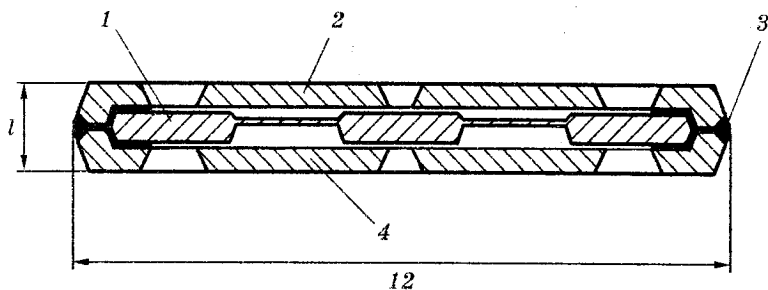


Рис. 2.10. Кремнієвий вимірювальний елемент:

- 1 — кремнієвий інтегральний перетворювач; 2 — верхня кришка;
3 — клейовий шов; 4 — нижня кришка

- два дифузійних терморезистори з аналогічним опором і температурним коефіцієнтом опору $\approx 2,3 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$;
- шестисекційні резистивні області регулювання чутливості та балансування початкового вихідного сигналу тензо- і термомоста.

3. Кремнієвий вимірювальний елемент (рис. 2.10):

- кремнієвий інтегральний перетворювач, розміщений між двома кришками ідентичної конструкції (узгодження за температурним коефіцієнтом лінійного розширення);
- кришки мають високу відтворюваність геометричних розмірів, оскільки виготовляються груповими методами хімічного анізотропного травлення;
- кришки слугують для захисту електричної вимірювальної схеми від механічних ушкоджень, перевантажень і розв'язки від термомеханічних напружень, що виникають після з'єднання кремнієвого вимірювального елемента з корпусними деталями;
- у кришках передбачені вікна під зварні з'єднання кабельної перемички з інтегральним перетворювачем і отвір для подачі тиску.

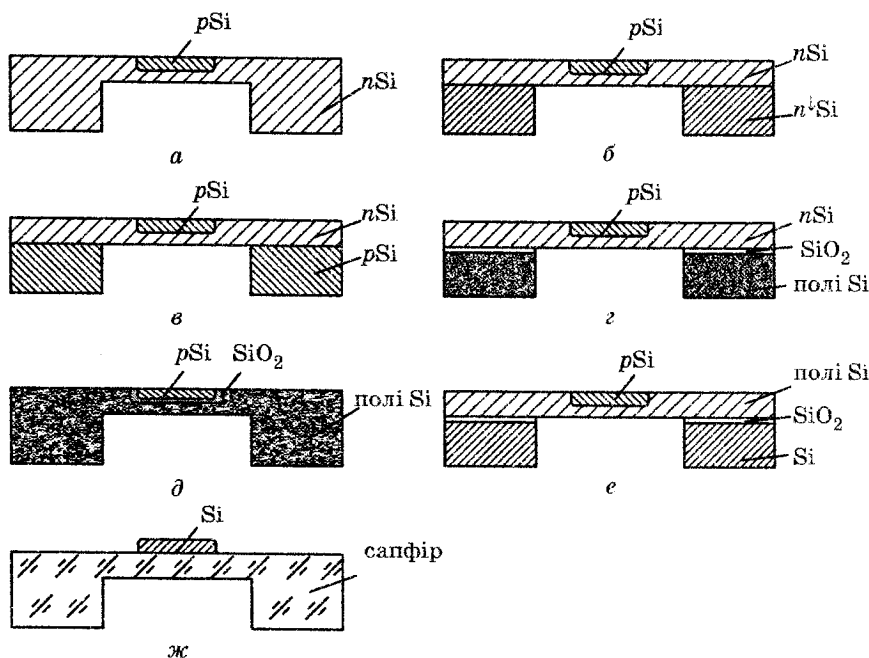


Рис. 2.11. Основні структури відомих інтегральних перетворювачів

На рис. 2.11 представлено основні структури відомих інтегральних перетворювачів тиску. Матеріали вказані на рисунках.

Узагальнена технологічна послідовність виготовлення інтегральних тензоперетворювачів

Технологія виготовлення інтегральних механоелектричних перетворювачів хоча й базується на загальній технології інтегральних мікросхем (фото- або електронній літографії, дифузії або іонній імплантації, металізації та ін.), однак припускає розробку та використання специфічних технологічних операцій. До них належать формування пружного елемента перетворювача, точне розташування тензочутливих компонентів на пружному елементі, взаємне з'єднання окремих конструктивних елементів перетворювачів та ін. Основні вимоги, такі як ґрунтовий спосіб проведення операцій, можливість автоматизації, точність, контроль і, звичайно, вартість, необхідно пред'являти й до цих специфічних операцій [Ваганов, 1981].

У світовій і вітчизняній практиці розробки інтегральних перетворювачів механічних величин уже накопичено деякий досвід,

що дозволяє розглянути специфічні задачі розробки механоелектричних перетворювачів та існуючі способи вирішення цих задач. Зрозуміло, конкретні послідовності технологічних операцій для виготовлення перетворювачів з різною структурою відрізняються одна від одної. Однак між ними є багато спільного, що дозволяє представити їх у вигляді узагальненої технологічної послідовності виготовлення ІТП (рис. 2.12). Розглянемо окремі етапи цієї послідовності.

Підготовка вихідних пластин. Цей етап припускає, поперше, виготовлення однорідних за товщиною пластин з відповідною структурою (див. рис. 2.11). Для цього використовуються стандартні методи вирощування авто- та гетероепітаксціальних шарів кремнію [Палатник, 1971], а також шарів полікристалічного кремнію [Колешко, 1978].

По-друге, на відміну від стандартного планарного процесу, тут використовуються обидві сторони пластини. Тому необхідно підготувати другу (звичайно спеціально не оброблювану після різання злитка на пластини) сторону пластини для наступного проведення на ній фотолітографічного процесу. З цією метою звичайно використовують стандартні методи механічної обробки пластин — шліфування та полірування [Мазель, 1974]. Загалом кажучи, існує обладнання для двостороннього шліфування та полірування кремнієвих пластин. Якщо ж застосовують стандартне обладнання для односторонньої обробки пластин, спочатку доцільніше обробляти ту сторону пластини, з якої буде виконуватися локальне мікропрофілювання, а потім, і більш ретельно, лицьову сторону, де будуть формуватися компоненти інтегральної мікросхеми.

Відомо, що використовувані в напівпровідниковій промисловості пластини мають товщину від 200 до 400 мкм, причому розкид за товщиною від пластини до пластини може бути значним. Іноді

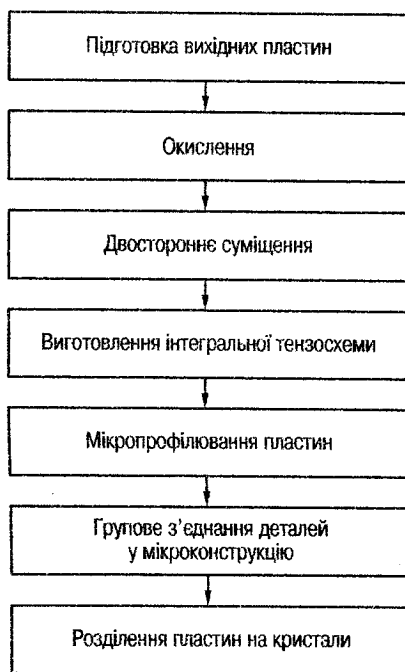


Рис. 2.12. Узагальнена технологічна послідовність виготовлення ІТП

при виробництві механоелектричних перетворювачів (наприклад, у випадку формування пружного елемента методом анізотропного травлення) виявляється необхідним використовувати пластини суворо заданої товщини. У цьому випадку видалення непотрібного матеріалу, крім механічного способу, можна здійснити хімічним травленням. Однак поверхня, одержувана при цьому, повинна бути полірованою, щоб, по-перше, проводити на ній фотолітографію, а по-друге, не погіршувати якості поверхні після травлення, за допомогою якого далі виконується сам пружний елемент.

Мікронерівності на поверхні пружного елемента визначають нерівномірність його товщини, відіграють роль концентраторів механічних напружень, впливаючи на характер їхнього розподілу. Це призводить до неконтрольованого та невідтворюваного розкиду параметрів перетворювачів, тим більшому, чим більші мікронерівності у порівнянні з товщиною пружного елемента. Подібна ситуація є цілком реальною, оскільки товщина пружних елементів може досягати одиниць і навіть часток мікрометра. У цьому випадку можливе навіть утворення наскрізних отворів у процесі травлення пружних елементів, які, природно, ведуть до збільшення браку та відповідного зменшення виходу придатних приладів.

Якщо поверхню кремнієвої пластини, отриману безпосередньо після розрізання злитка з мікронерівностями порядку декількох десятків мікрометрів, піддати поліруючому травленню, то після видалення шару кремнію близько 50—70 мкм вдається одержати поліровану злегка хвилясту поверхню з мікронерівностями порядку декількох мікрометрів [Stoller, 1970]. Хоча якість поверхні при цьому виходить значно гіршою, ніж після стандартної механічної обробки, проте цю поверхню з успіхом можна використовувати для проведення фотолітографії та наступного мікропрофілювання пластини.

Окислювання пластини. Цей етап є добре дослідженим. Однак у порівнянні зі стандартною технологією тут є особливості. По-перше, якісний окислювач повинен бути отриманий по обидві сторони пластини. По-друге, товщина окислювача визначається вже не тільки звичайними вимогами (наприклад, захисними властивостями при дифузії домішок, паразитними ємностями провідників на підкладку й т. п.), але й специфічними. Наприклад, існує необхідність захисту поверхні кремнію при глибокому мікропрофілюванні пластини методом анізотропного хімічного травлення. У тих випадках, коли для захисту поверхні кремнієвої пластини при мікропрофілюванні, а також з іншою метою використовуються

інші захисні покриття, наприклад, нітрид кремнію Si_3N_4 , тоді до шару двоокису кремнію висуваються звичайні вимоги.

Двостороннє суміщення являє собою перший великий етап виготовлення ІТП, не типовий для стандартного планарного процесу. Зміст його очевидний, тому що, як правило, тензочутливі елементи виготовляють з одного боку пластини, а мікропрофілювання проводиться на іншому.

Виготовлення інтегральної тензосхеми. Це стандартний планарний процес виготовлення інтегральних напівпровідникових мікросхем [Іванов-Есипович, 1972]. Для виготовлення ІТП у принципі можна використовувати будь-які модифікації планарного процесу, застосовуваного для виготовлення мікросхем як на біполярних, так і на МДП-транзисторах [Bosnell, 1976]. Цей етап містить у собі декілька операцій фотолітографії, одну або кілька операцій дифузії або іонної імплантації домішок, створення металевих з'єднань і контактних площинок. За допомогою планарного процесу можна виготовити майже всі відомі тензочутливі компоненти: тензорезистори, діоди та біполярні тензотранзистори [Беклемишев, 1980], тензодіоди Шоттки, МДП-тензотранзистори [Dogeу, 1975] і навіть завершені тензочутливі схеми.

Мікропрофілювання пластин є основним специфічним етапом технології виготовлення ІТП. Необхідно відзначити, однак, що хімічне мікропрофілювання, зокрема анізотропне травлення кремнію, уже досить широко використовується в технології інтегральних мікросхем [Вишнева, 1976]. У технології інтегральних перетворювачів мікропрофілювання використовується для:

- формування пружних елементів механоелектричних перетворювачів;
- одержання деталей і вузлів мікроконструкцій перетворювачів (наприклад, кришок, корпусів, сполучних елементів і т. ін.).

При формуванні пружних елементів вирішують декілька задач, головними з яких є забезпечення та контроль відтворюваності: 1) геометричної форми пружних елементів перетворювачів та їхніх розмірів; 2) товщини пружних елементів перетворювачів. Ці задачі розділені не штучно, оскільки для їх вирішення використовують різні технологічні прийоми.

Поділ пластин на кристали. Цей етап також має деяку специфіку в порівнянні з аналогічним етапом виробництва традиційних інтегральних мікросхем. Звичайно застосовуване скрайбування та розламування пластини на кристали хоча й можна іноді використовувати при виробництві інтегральних перетворювачів, проте

для більшості випадків не може вважатись прийнятним принаймні з двох причин: по-перше, у багатьох конструкціях принципово важливі зовнішня форма та точні розміри кристала; по-друге, механічна міцність пластин після виготовлення пружних елементів, наприклад, мембран, виявляється недостатньою — розламування пластини традиційним способом не відбувається за потрібними напрямками. Спростує вирішення те, що локальне мікропрофілювання пластин пружних елементів може з успіхом слугувати для поділу пластин на окремі кристали. Для цього можна використувати:

1) наскрізне травлення та автоматичний поділ пластини на кристали;

2) травлення кристалів по периферії до товщини пружного елемента та наступний механічний поділ пластини на кристали. Цей спосіб можна реалізувати за будь-якого методу мікропрофілювання (електроерозія, ізотропне та анізотропне травлення);

3) часткове підтравлювання по периферії кристалів з наступним механічним поділом пластини на кристали. Цей спосіб можна реалізувати при використанні, в основному, анізотропного травлення.

Як видно з наведеного опису узагальненої технологічної послідовності виготовлення ІТП, кожен етап може бути реалізований різними технологічними прийомами. Різноманітність конкретних технологічних послідовностей визначається, зокрема, множиною можливих сполучень цих прийомів. Крім того, сама послідовність узагальнених етапів може змінюватися. Так, наприклад, етап мікропрофілювання може йти безпосередньо після окислювання пластин або після двостороннього сполучення, а потім можуть бути виготовлені тензочутливі компоненти. Це також розширює різноманітність конкретних технологій. Зрозуміло, деякі з розглянутих етапів можуть у деяких випадках бути відсутніми.

Наведемо приклад конкретної послідовності технологічних операцій виготовлення інтегральних тензоперетворювачів тиску. Ця послідовність схематично зображена на рис. 2.13 і призначена для виготовлення перетворювачів зі структурою, що відповідає рис. 2.11, *a*. Пластини орієнтовані в площині (001), використовується мікропрофілювання на основі анізотропного травлення кремнію. У результаті виконання зазначеної послідовності операцій і поділу пластини виходять кристали профільованих чутливих модулів, один із яких зображено на рис. 2.14.

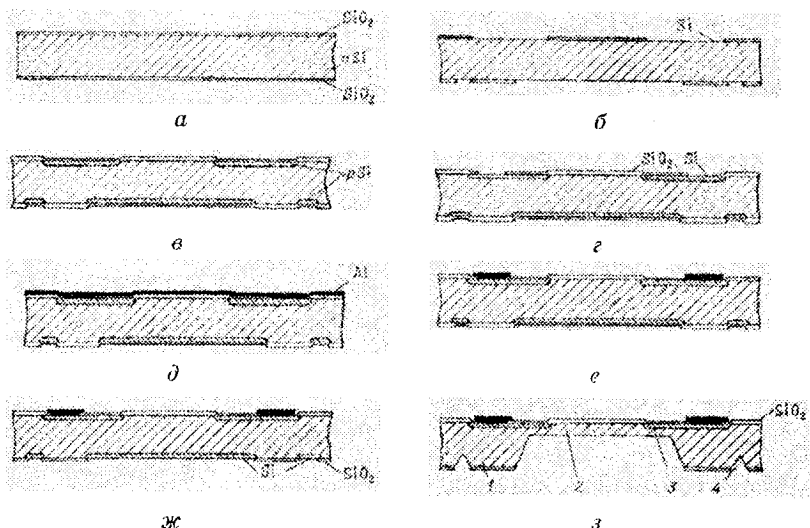


Рис. 2.13. Етапи виготовлення ТПІ: а — вихідна окислена кремнієва пластина (100) *n*-типу провідності; б — двостороння фотолітографія; в — *p*-дифузія для створення тензорезисторів; г — розкриття вікон під контакти; д — металізація; е — фотолітографія для виготовлення між'єднань і контактних площинок; ж — розкриття вікон зі зворотної сторони для локального травлення; з — формування пружного елемента за допомогою анізотропного травлення; 1 — підкладка; 2 — мембрана; 3 — тензорезистор; 4 — канавка для поділу пластини на кристали

Двостороннє суміщення. Двостороннє суміщення, або сполучення зображень компонентів або деталей пружних елементів на різних сторонах вихідної напівпровідникової пластини, можна використовувати для:

1) формування пружних елементів складної форми;

2) точного взаємного розташування компонентів інтегральної схеми та пружного елемента.

Необхідно відзначити, що при виготовленні тензочутливих компонентів механоелектричних

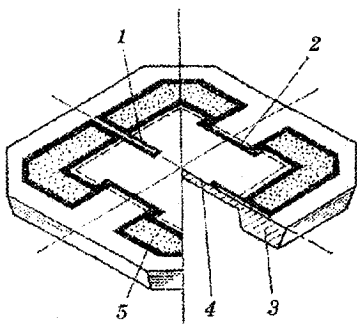
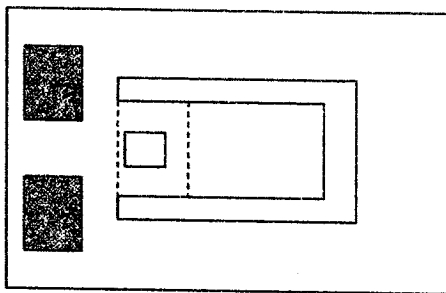


Рис. 2.14. Профільований чутливий елемент інтегрального перетворювача тиску:

- 1 — радіальний тензорезистор;
2 — тангенціальний тензорезистор;
3 — підкладка; 4 — мембрана;
5 — контактні площинки



перетворювачів потрібно вирішувати також задачу орієнтації цих компонентів уздовж певних кристалографічних напрямків на поверхні напівпровідникової пластини. Цю задачу можна вирішити як безпосередньо в процесі двостороннього суміщення, так і попередньо у вигляді окремої операції.

У деяких випадках виникає задача формування пружних елементів складної форми. На рис. 2.15 схематично зображений поперечний переріз інтегрального балкового акселерометра [Ваганов, 1978]. Балка відділена із трьох сторін від кільцевої підкладки наскрізним щілинним отвором, для виготовлення якого

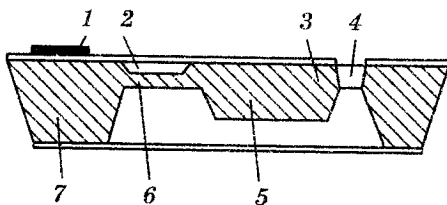


Рис. 2.15. Інтегральний балковий акселерометр: 1 — контактні площинки; 2 — тензокомпонент; 3 — балка; 4 — щілина; 5 — інерційна маса; 6 — пружний елемент; 7 — підкладка

найпростіше використовувати локальне травлення кремнієвої пластини із двох сторін. За малої ширини щілинного отвору, наприклад порядку декількох мікрометрів, точність двостороннього суміщення масок локального травлення, звичайно, повинна бути досить високою.

Цей же приклад ілюструє друге призначення двосторонньої фотолітографії. Балка акселерометра, як видно на рис. 2.15, має складний профіль, що складається з масивної частини — інерційної маси та тонкої частини — концентратора механічних напружень, на якому із протилежного боку розташований тензочутливий компонент, наприклад тензорезистор.

Інший приклад створення пружного елемента складної форми представлено на рис. 2.16, де схематично

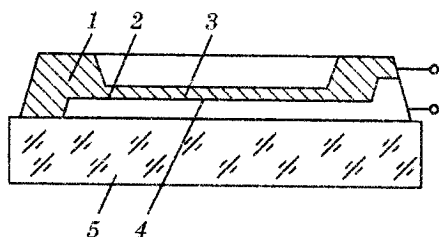


Рис. 2.16. Інтегральний кремнієвий ємнісний перетворювач тиску: 1 — підкладка; 2 — проміжок; 3 — мембрана; 4 — металева обкладинка; 5 — скло

зображений інтегральний ємнісний перетворювач тиску. Однією обкладиною конденсатора слугує кремнієва мембрана, отримана за допомогою локального травлення вихідної пластини із двох сторін. Травлення з іншої сторони необхідне для забезпечення точного й однакового проміжку між обкладинами конденсатора та для виготовлення паза для виводу другої обкладини конденсатора, яку можна виконати за допомогою металізації на ізольованій підкладці, наприклад на склі. Кремнієва мембрана за допомогою масивної підкладки з'єднується з ізольованою підкладкою, наприклад, методом анодної герметизації, і тим самим забезпечується певний проміжок між обкладинами, а отже, певне значення ємності.

До відомих способів двостороннього суміщення належать:

- а) суміщення в інфрачервоному світлі;
- б) двостороння фотолітографія;
- в) суміщення за наскрізними отворами.

Суміщення в інфрачервоному світлі. У наш час це найбільш досконалий простий і точний спосіб двостороннього суміщення. Воно проводиться на спеціальному устаткуванні. Спочатку на одній стороні пластини звичайними способами планарної технології формується малюнок компонентів ІС або їхніх деталей, наприклад створюються тензочутливі елементи. При цьому одночасно вирішується задача їхньої орієнтації уздовж певних кристалографічних напрямків. Потім фоторезист наносять на іншу сторону пластини та суміщення із черговим фотошаблоном проводять в інфрачервоному світлі. Прозорість кремнієвих пластин для ІК-випромінювання дозволяє спостерігати малюнок топології компонентів і деталей, сформованих на протилежній стороні пластини, і сумістити з ним необхідний фотошаблон, наприклад створити малюнок вікон в окислі для локального травлення з метою формування пружного елемента перетворювача. До переваг даного методу належать простота як самого суміщення, так і орієнтації компонентів, універсальність, точність, а до недоліків — необхідність використання спеціалізованого обладнання.

Двостороння фотолітографія. Суть цього методу полягає в тому, що фоторезист наносять на обидві сторони пластини, яку після цього розміщують у спеціальному пристрої між попередньо суміщеними фотошаблонами, і виконують експозицію фоторезисту із двох сторін. Подальша обробка резиста та травлення окисла не відрізняються від стандартних операцій.

При використанні звичайного способу нанесення резиста необхідно використовувати центрифугу з вакуумним присосом

пластини та резист наносити спочатку на одну сторону пластини, а потім, після підсушування, на іншу сторону. Як правило, стандартних режимів нанесення та підсушування резиста виявляється достатньо, щоб при нанесенні резиста на іншу сторону попередньо нанесений шар резиста не псувався ущільнювальним кільцем головки центрифуги.

Конструкції та пристрої з попередньо суміщеними фотошаблонами для проведення двосторонньої експозиції фоторезисту можна умовно розділити на дві групи: нерознімні та рознімні. У нерознім-

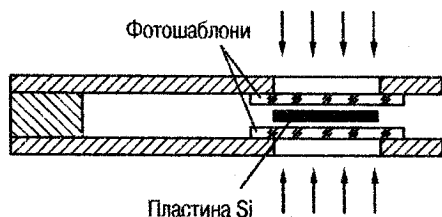


Рис. 2.17. Пристосування для проведення двосторонньої фотолітографії

них пристроях (рис. 2.17) фотошаблони жорстко закріплені один відносно іншого на деякій відстані, що дорівнює товщині пластини, яка розміщується між ними. Рознімні пристрої складаються із двох частин, кожна з яких жорстко пов'язана зі своїм фотошаблоном. Крім того, передбачена система штирів, пружин, гвинтів, за

допомогою яких обидві частини пристрою з'єднуються таким чином, що фотошаблони виявляються суміщеними. При проведенні двосторонньої фотолітографії пластину спочатку розташовують на одному з фотошаблонів і проводять орієнтацію пластини відносно шаблону за потрібним кристаліграфічним напрямком. Потім зверху накладають другу частину пристрою, де закріплений інший фотошаблон, і виконують складання. Похибка суміщення за допомогою простих пристроїв зазвичай становить декілька мікрометрів.

До переваг двосторонньої фотолітографії ставиться простота: спосіб може бути освоєний в умовах стандартної фотолітографії. До недоліків можна віднести порівняно невисоку точність сполучення.

Суміщення за наскрізними отворами. Суть цього методу полягає в наступному. З однієї сторони кремнієвої пластини проводиться фотолітографія, і за допомогою локального травлення створюються наскрізні отвори по периферії пластини, які згодом слугують реперними знаками для суміщення зображень на одній та іншій сторонах пластини. Для локального травлення переважно слід застосовувати анізотропне травлення, що забезпечує найкращу відтворюваність геометричної форми лунки травлення, обумовлену відповідними кристаліграфічними площинами. Тому при анізотропному

травленні пластини відомої товщини краю отвору на одній та іншій сторонах пластини виявляються сполученими з високою точністю. При товщині пластини порядку 300 мкм похибка відтворення геометричних розмірів отвору, отриманого анізотропним травленням, може досягати $\pm (2-3)$ мкм. Однак анізотропне травлення отворів по периферії пластини може призвести до утворення додаткових дефектів у центральній частині пластини, де згодом будуть формуватися прилади. До переваг методу належать його простота та точність, а до недоліків — ускладнення технології.

2.3. Математичні моделі мембран

Мембрана має найбільшу чутливість до вимірюваного параметра. Залежно від геометричних розмірів, форми та матеріалу мембрани може бути перекритий широкий діапазон вимірюваних тисків.

Балкові пружні елементи дозволяють одержати більші переміщення. Деформації стиску та розтягування в них суворо однакові. Розподіл напружень у балці постійного перерізу нерівномірний.

Вибір пружного чутливого елемента залежить від типу та характеру вимірюваного параметра, а також від передбачуваного способу перетворення переміщення або деформації чутливого елемента у вихідний, як правило, електричний сигнал.

Тип пружного чутливого елемента необхідно вибирати в першу чергу виходячи з вимог чутливості датчика. У деяких випадках вимога високої чутливості повинна поєднуватися з вимогами високої швидкодії. Для знаходження компромісного рішення між чутливістю та швидкодією доцільно кожний пружний елемент характеризувати добутком чутливості на власну частоту:

$$A = f_0 S, \quad (2.28)$$

де f_0 — власна резонансна частота пружного чутливого елемента; S — чутливість пружного елемента.

Підстановка в (2.28) власної частоти та чутливості дає наступний вираз для добутку чутливості на власну частоту:

$$A = \frac{CB}{V\sqrt{E\rho}}, \quad (2.29)$$

де V — об'єм пружного чутливого елемента; E — модуль пружності матеріалу пружного елемента; ρ — щільність матеріалу пружного чутливого елемента; B — конструктивний коефіцієнт чутливості;

C — числовий коефіцієнт у виразі для власної частоти пружного чутливого елемента.

Оскільки від величини C залежить власна частота пружного чутливого елемента, а остання є характеристикою швидкодії, то за аналогією з конструктивним коефіцієнтом чутливості та для стислості подальшого викладу назовемо його конструктивним коефіцієнтом швидкодії.

Конструктивний коефіцієнт швидкодії для стрижневого пружного ЧЕ становить 0,249, для кільцевого — 0,778, для мембранного — 1,54, для балкового — 0,160. З огляду на те, що конструктивні коефіцієнти чутливості кожного типу конструкції пружного ЧЕ відомі, можна пружні ЧЕ різних конструкцій порівнювати між собою по величині добутку $a = CB$. Назвемо цей добуток інформаційним коефіцієнтом пружного ЧЕ. Так при максимальних значеннях конструктивного коефіцієнта інформаційний коефіцієнт стрижневого пружного елемента складе 0,25, кільцевого — 1,5, мембранного — 2,0, балкового — 0,96. Тому найбільш перспективним пружним елементом є мембранний, найменш — стрижневий. Це необхідно враховувати при виборі типу пружного елемента.

Серед інших параметрів пружний ЧЕ характеризується жорсткістю (відношенням прикладеної сили до переміщення), що одночасно визначає його чутливість (відношення переміщення до прикладеної сили) і власну частоту. Чутливість обернено пропорційна до жорсткості k , а власна частота f_0 збільшується зі зростанням k :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2.30)$$

де m — маса пружного елемента й інших жорстко пов'язаних з ним деталей.

Збільшення співвідношення k/m поліпшує стійкість до вібрацій і прискорень. Далі, збільшення власної частоти одночасно підвищує швидкодію. При цьому корисна чутливість зменшується, тому що більш жорсткий пружний ЧЕ менше деформується; пропорційно знижуються деформації, передані на чутливий елемент перетворювача, а отже і рівень вихідного сигналу, що може зменшити відношення сигнал/шум і погіршити точність.

Оптимальним критерієм для вибору типу пружного елемента та розробки датчиків тиску служить інваріант.

Для кожного типу пружних ЧЕ існує інваріант у вигляді формули, що пов'язує масу m , чутливість S і власну частоту f_0 :

$$mSf_0^2 = \text{const.} \quad (2.31)$$

У випадку круглої мембрани $mSf_0^2 = 0,043$, а у випадку балки, жорстко закріпленої із двох сторін, $mSf_0^2 = 0,25$.

Проаналізувавши основні характеристики різних типів пружних ЧЕ, можна зробити висновок, що найбільшою чутливістю та власною частотою володіють пружні ЧЕ типу мембрана та балка. Саме за допомогою мембранного або балкового пружного елемента можливо з незначним діапазоном зміни відношення розмірів перекрити значний діапазон зміни чутливості. Ці ЧЕ розглянуто в наступних розділах.

Метою застосування мембранно-балкових пружних ЧЕ є підвищення точності, швидкодії та розширення динамічного діапазону вимірювань за рахунок зменшення маси та нелінійності перетворення пружного ЧЕ.

Для цього на пружній мембрані виконується, принаймні, одне ребро жорсткості у формі балки. Під дією вхідної (вимірюваної) величини мембрана та ребра жорсткості деформуються, згинаючись спільно. Чутливі елементи розташовуються на ребрах жорсткості балкового типу, реструючи лінійну залежність між зовнішнім навантаженням і деформацією в балках. Зовнішнє навантаження розподіляється між мембраною та балками в деякому співвідношенні, величина якого залежить тільки від співвідношення розмірів мембрани та балок.

Для інженерного проектування пружних елементів мембранно-балкового типу варто вирішити задачу оптимізації геометричних параметрів у наступній постановці.

1. У якості цільової функції (функціонала) приймається інваріант $mSf_0^2 \rightarrow \max$.
2. Інженерна система обмежується сукупністю мембрани та ребер жорсткості.
3. У якості незалежних змінних приймаються відношення довжини до ширини ребра жорсткості l/b та товщини ребра жорсткості до сумарної товщини ребра жорсткості та мембрани h/H .
4. Визначаються взаємозв'язки незалежних змінних, і побудова моделі відбувається для конкретного виду вхідної величини й обраної конфігурації (сукупності мембрани та ребер жорсткості) пружного елемента.
5. Умови-обмеження встановлюються виходячи з конструкторсько-технологічних рішень формоутворення пружного елемента та принципу перетворення енергії в чутливому елементі.

Математична модель пружного елемента мембранно-балкового типу

У загальному випадку, вимоги, що висуваються до функції перетворення пружного ЧЕ, зводяться до забезпечення певних динамічних властивостей у діапазоні лінійних пружних деформацій за максимально можливої чутливості.

Від динамічних властивостей ЧЕ залежить вірогідність реєстрації швидкозмінних величин. Якість коливальної системи характеризується власною частотою коливань і величиною сил опору до навантаження. Найбільш повне уявлення про динамічні властивості коливальної системи можна одержати за допомогою амплітудно-частотної та фазочастотної характеристик, одержання яких аналітичним шляхом ускладнене, оскільки пружні елементи (у тому числі й мембранно-балкові) належать до систем з розподіленими параметрами. Тому для опису коливань ЧЕ повинні застосовуватися диференціальні рівняння в частинних похідних з урахуванням змін досліджуваних величин не тільки в часі, але й у просторі. У цьому випадку розподілену масу замінюють низкою еквівалентних сконцентрованих мас, розташованих на пружній основі. Така заміна призводить до заниження частоти власних коливань системи, однак спрощує аналітичне рішення та дає можливість орієнтовно визначити параметри системи.

Важливою властивістю ЧЕ є чутливість — величина, що обернено пропорційна до жорсткості. Якщо характеристика ЧЕ лінійна, то жорсткість являє собою відношення діючої сили до відповідного переміщення, а чутливість — відношення переміщення до діючої сили. Таким чином, чутливість чисельно дорівнює переміщенню ЧЕ під дією одиничного навантаження.

Конструктивну схему ЧЕ мембранно-балкового типу можна розглядати як єдину пружну систему, у якій за рахунок жорсткого з'єднання мембрани та балки, усувається зазізнювання деформації одного елемента (мембрани) щодо іншого (балки) при швидких змінах входної (вимірюваної) величини.

У такій системі пружні елементи з'єднані послідовно, тому чутливість системи дорівнює сумі чутливості мембрани та балки:

$$S_{\text{мб}} = S_{\text{м}} + S_{\text{б}}, \quad (2.32)$$

а жорсткість

$$k_{\text{мб}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{м}}} + \frac{1}{k_{\text{б}}}}, \quad (2.33)$$

де $S_{мб}$, $S_м$, $S_б$ і $k_{мб}$, $k_м$, $k_б$ — відповідно чутливість і жорсткість мембранно-балкового ЧЕ, мембрани та балки.

Чутливість за переміщенням, при дії вхідної величини, в ЧЕ мембранного типу прямо пропорційна до четвертого ступеня лінійного розміру та обернено пропорційна до третього ступеня товщини пружної області, а також залежить від форми й способу закріплення та матеріалу мембрани, тобто

$$S_м = K_м \frac{l^4(1-\mu^2)}{Eh_м^3}, \quad (2.34)$$

де $K_м$ — безрозмірний коефіцієнт форми ЧЕ, що характеризує як форму пружної частини (коло, квадрат, смужка й т. ін.), так і спосіб її закріплення (жорстке закріплення по контуру, вільно обперта за периметром і т. ін.); l — лінійний розмір пружної частини (для круглої мембрани це діаметр, для квадрата — сторона й т. ін.); μ — коефіцієнт Пуассона; E — модуль пружності; $h_м$ — товщина мембрани.

Балка при дії рівномірно розподіленого навантаження у випадку симетричної конструкції згинається з максимальним прогином посередині. Чутливість за переміщенням пропорційна до четвертого ступеня довжини балки й обернено пропорційна до третього ступеня її товщини, а також залежить від матеріалу, з якого вона виготовлена, та способу закріплення:

$$S_б = \frac{K_б l^4}{Eh_б^3}, \quad (2.35)$$

де $K_б$ — безрозмірний коефіцієнт, величина якого залежить від способу закріплення балки. Відзначимо, що чутливість вільно обпертої з двох кінців балки в 5 разів вища за чутливість балки, жорстко затисненої із двох сторін.

При впливі на пружний елемент зовнішнього (вимірюваного) параметра, напружено-деформований врівноважений стан характеризується рівністю зовнішніх сил і протидіючих сил, що виникають у балках і мембрані, тобто

$$F_{мб} = F_м + F_б. \quad (2.36)$$

Прогин $w_{мб}$ мембранно-балкового пружного елемента відбувається під дією сил, що розподіляються між балками $F_б$ та мембраною $F_м$.

Оскільки сила, що діє на жорстко закріплену із двох кінців прямокутну балку, може бути визначена з виразу

$$F_6 = \frac{16Ebh_6^3 w_{м6}}{l^3}, \quad (2.37)$$

а сила, що діє на круглу, жорстко закріплену по периметру мембрану описується співвідношенням

$$F_M = \frac{16Ew_{м6}h_M^3}{l^2}, \quad (2.38)$$

тоді чутливість за переміщенням мембранно-балкового пружного елемента, що представляє собою круглу мембрану, по діаметру якої сформована прямокутна балка, можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} S_{м6} &= \frac{w_{м6}}{F_{м6}} = \frac{l^2}{16E \left[(H - h_6^3) + \frac{Bh_6^3}{l} \right]} = \\ &= \frac{l^2}{16EH^3 \left[(1-x)^3 + \frac{x^3}{y} \right]} = \frac{S_M}{\left[(1-x)^3 + \frac{x^3}{y} \right]}, \end{aligned} \quad (2.39)$$

де $h_m = H - h_6$, тобто H — сумарна товщина мембрани та балки; $x = h_6/H$ — відношення товщини балки до сумарної товщини мембрани та балки; $y = l/b$ — відношення довжини балки (діаметра мембрани) до ширини балки.

Масу такого пружного елемента можна визначити як сумарну масу мембрани та балки, тоді

$$\begin{aligned} m_{м6} &= \pi \frac{l^2}{4} (H - h) \rho + b l H \rho = l \rho \left[\pi \frac{l}{4} (H - h) + b h \right] = \\ &= l^2 \rho \left[\frac{\pi}{4} (H - h) + \frac{b}{l} h \right] = l^2 H \rho \left[\frac{\pi}{4} (1 - x) + \frac{x}{y} \right] = \\ &= \frac{4m_M}{\pi} \left[\frac{\pi}{4} (1 - x) + \frac{x}{y} \right] = m_M \left[(1 - x) + \frac{4x}{\pi y} \right], \end{aligned} \quad (2.40)$$

де m_M — маса мембрани товщиною H ; ρ — щільність матеріалу мембрани.

Крім того, для спрощення математичних викладень і їхнього наступного аналізу, зроблено допущення, що $(1-\mu^2) \approx 1$, що цілком виправдано для оцінних обчислень, оскільки, наприклад, для монокристалічного кремнію (100) коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,066$.

Таким чином, очевидно, що формування балкового пружного елемента на мембрані в межах товщини H приведе до зниження маси пружного елемента (підвищення власної частоти ЧЕ), а також до різкого збільшення чутливості. Це означає, що інваріант mSf_0^2 керує простим вибором співвідношень геометричних параметрів мембрани та балки.

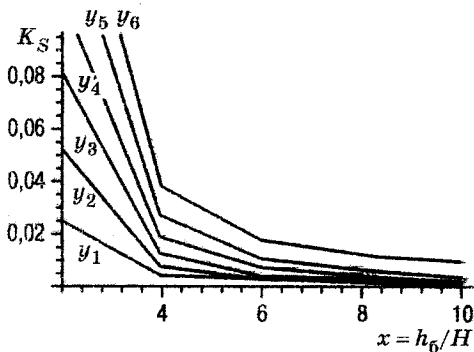


Рис. 2.18. Залежність коефіцієнта частоти від співвідношень геометричних розмірів елементів конструкції

Інакше кажучи, зміна чутливості відносно плоскої мембрани визначається коефіцієнтом

$$K_S = \frac{S_{\text{мб}}}{S_M} = \frac{1}{\left[(1-x)^3 + \frac{x^3}{y} \right]} \quad (2.41)$$

Коефіцієнт маси

$$K_M = \frac{m_{\text{мб}}}{m_M} = \left(1-x + \frac{4x}{\pi y} \right) \quad (2.42)$$

Коефіцієнт частоти визначається із рівності інваріантів

мембранного та мембранно-балкового пружних елементів $S_M m_M f_{0M}^2 = S_{\text{мб}} m_{\text{мб}} f_{0\text{мб}}^2$

$$K_f = \frac{f_{0\text{мб}}}{f_{0M}} = \sqrt{\frac{(1-x)^3 + \frac{x^3}{y}}{1-x + \frac{4x}{\pi y}}} \quad (2.43)$$

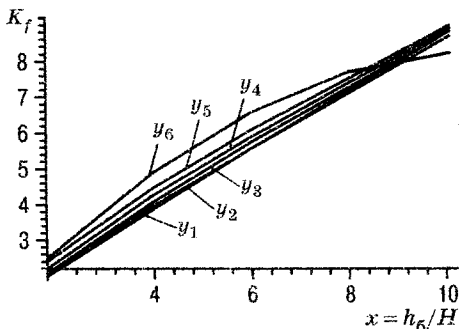


Рис. 2.20. Залежність коефіцієнта частоти від співвідношень геометричних розмірів елементів конструкції

Таким чином, повністю визначений інваріант $mSf_{0\text{мб}}^2$ мембранно-балкового пружного елемента:

$$mSf_{0\text{мб}}^2 = 0,043 \frac{1-x + \frac{4x}{\pi y}}{(1-x)^3 + \frac{x^3}{y}} \cdot \left(\frac{f_{0\text{мб}}}{f_{0\text{м}}} \right)^2. \quad (2.45)$$

Графік залежності інваріанта від співвідношень геометричних розмірів елементів конструкції представлено на рис. 2.21.

Коефіцієнт 0,043 відповідає, як це було сказано вище, інваріанту $mSf_{0\text{м}}^2$ круглої плоскої мембрани, а $f_{0\text{м}}$ та $f_{0\text{мб}}$ — власні частоти мембранного та мембранно-балкового пружних елементів.

Для пружних елементів з однаковою резонансною частотою множину значень конструкторивного коефіцієнта залежності

$$K = \frac{1-x + k \frac{x}{y}}{[(1-x)^3 + \frac{x^3}{y}]}$$

від співвідношень геометричних розмірів елементів конструкції можна представити у вигляді графіка рис. Д8.18.

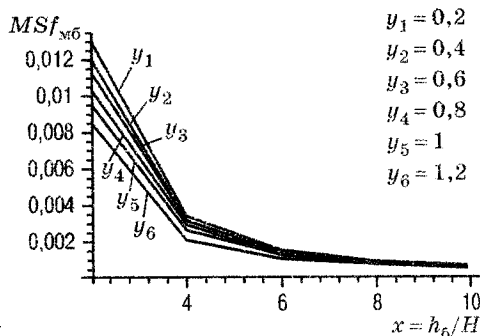


Рис. 2.21. Залежності інваріанта від співвідношень геометричних розмірів елементів конструкції

Тут k — коефіцієнт форми, що залежить від обраної кількості та конфігурації балок і мембрани.

Очевидно, що задача оптимізації зводиться до знаходження максимуму функції (2.45). Тобто, перша похідна у виразі для конструктивного коефіцієнта K повинна дорівнювати нулю.

$$\frac{dK}{dx} = \frac{\left[(1-x)^3 + \frac{x^3}{y} \right] \left(\frac{k}{y} - 1 \right) - \left(1-x + k \frac{x}{y} \right) \left(\frac{3x^2}{y} - 3x^2 + 6x - 3 \right)}{\left[(1-x)^3 + \frac{x^3}{y} \right]^2} = 0. \quad (2.46)$$

Ця умова виконується за

$$\left[(1-x)^3 + \frac{x^3}{y} \right] \left(\frac{k}{y} - 1 \right) = \left(1-x + k \frac{x}{y} \right) \left(\frac{3x^2}{y} - 3x^2 + 6x - 3 \right). \quad (2.47)$$

Таким чином, існує множина співвідношень параметрів x та y , а значить і геометричних розмірів елементів конструкції пружного елемента — довжини та ширини балки, товщини балки та мембрани, за яких досягається оптимальне (максимальне) значення інваріанта mSf_0^2 (рис. Д8.19).

Розроблені та досліджені моделі представлені в аналітичному та графічному вигляді та можуть бути використані як для практичного проектування пружних елементів перетворювачів механічних параметрів в електричні величини, так і для оцінювання основних технічних характеристик існуючих виробів.

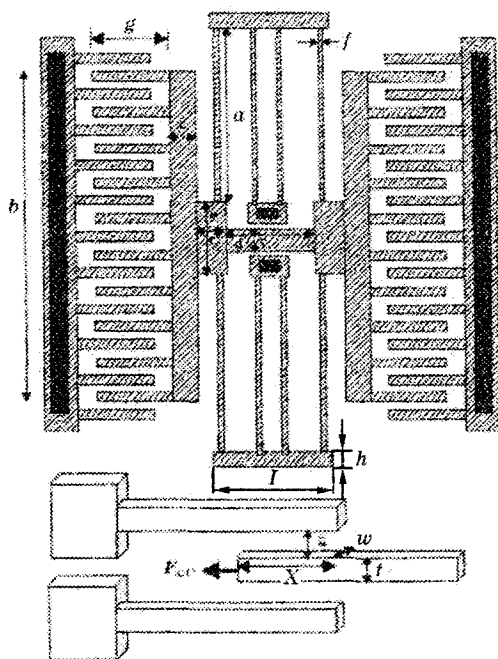
Запропонований методологічний підхід може бути поширений на розрахунок пружних елементів складної форми з довільним сполученням мембранних (круглих, квадратних, прямокутних, із жорстким центром і т. ін.) і балкових (прямокутних, однакового перерізу та т. ін.) елементів конструкції.

2.4. Математичні моделі зустрічно-штирьових резонаторів

На рис. 2.22 представлено горизонтальну проекцію зустрічно-штирьового мікрорезонатора. Наведені розміри елементів конструкції дають уявлення про масштабний коефіцієнт мікромеханічних елементів. Симетрія коливальних елементів системи забезпечує високу чутливість системи уздовж однієї осі x .

Маса рухомих частин резонатора m може бути розрахована за формулою (або іншою, що враховує особливості конструкції):

$$m = \rho_{poly} w (2bc + 2ce + cd + 20tg).$$



Вихідні дані

$a = 112$ мкм
$b = 120$ мкм
$c = 12$ мкм
$d = 30$ мкм
$e = 24$ мкм
$f = 2,0$ мкм
$g = 30$ мкм
$X = 20$ мкм
$w = 3,5$ мкм

Рис. 2.22. Конструкція зустрічно-штирьового мікрорезонатора

Жорсткість пружин визначається, виходячи з послідовного та паралельного з'єднання частин, а саме:

- одна пружина (від точки кріплення до корпусу до точки кріплення вантажу масою m) складається з послідовно з'єднаних двох ділянок довжиною a , тобто $l = 2a$, між собою ці частини скріплені перемичкою, що не деформується;
- усього таких пружин у конструкції — 4. Кожна з 4 внутрішніх частин пружин, ближніх до анкера, при відхиленні вантажу в одну зі сторін має однаковий розподіл нормальних напружень розтягування-стиску на однакових віддаленнях від осі згину, яка проходить через центр елемента кріплення. Аналогічне твердження справедливе для чотирьох частин, з'єднаних з вантажем, тобто ці 4 пружини з'єднані між собою паралельно.

Жорсткість однієї пружини

$$k_1 = \frac{Ewf^3}{4(2a)^3} = \frac{Ewf^3}{32a^3}. \quad (2.48)$$

Жорсткість 4-х пружин, з'єднаних паралельно, в чотири рази вища (можна сказати, що ширина однієї пружини W стала в чотири рази більше)

$$k = 4k_1 = \frac{Ewf^3}{8a^3}. \quad (2.49)$$

Користуючись принципом електромеханічних аналогій, визначаємо частоту резонансу коливальної системи (1.42)

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}. \quad (2.50)$$

Загасання

$$\beta = \frac{\omega_0 m}{Q}, \quad (2.51)$$

де Q — добротність коливальної системи.

Максимальна сила електростатичної взаємодії

$$F_{x,c} = \frac{dc}{2dx} U^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \frac{xw \cdot n \cdot 2}{z} U^2 = \frac{\varepsilon_0 n w}{z} U^2, \quad (2.52)$$

де ε_0 — діелектрична проникність вакууму.

Тут n — число поверхонь ротора, що утворюють конденсатор зі статором. Максимальне переміщення вздовж осі X знаходимо з умови

$$k \cdot \Delta x = F_{x,c}; \quad \Delta x = \frac{F_{x,c}}{k}. \quad (2.53)$$

Енергія входу

$$N_{\text{вх}} = \int IV dt = \int \frac{dQ}{dt} V dt = \int_0^{\tau} V^2 dC. \quad (2.54)$$

Енергія виходу

$$\begin{aligned} N_{\text{вих}} &= \int_0^{\Delta x} (F_{x,c} - F_i) dx = \int_0^{\Delta x} \left(\frac{\varepsilon_0 n w}{z} U^2 - k \Delta x \right) dx = \\ &= \frac{\varepsilon_0 n w}{z} U^2 \Delta x - k \frac{\Delta x^2}{2}. \end{aligned} \quad (2.55)$$

Коефіцієнт корисної дії резонатора

$$\eta = \frac{N_{\text{вих}}}{N_{\text{вх}}}. \quad (2.56)$$

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Перелічити найбільш відомі САІР мікросистемної техніки.
2. У чому полягає специфіка проектування виробів МСТ?

3. Які принципи кооперації та спеціалізації можуть використовуватися при освоєнні МСТ?
4. Які рівні розробки апаратури використовуються в САПР МСТ?
5. Перелічити основні механічні конструктивні елементи, що слугують конструктивною основою багатьох інших вузлів.
6. Якими кривими визначаються профілі згину консольних балок?
7. У чому полягає адитивність дії сил на балку?
8. Які режими функціонування моделюються системами САПР МСТ?
9. Що таке узагальнені сили та узагальнені переміщення?
10. Як визначається узагальнене переміщення з використанням теореми Кастильано?
11. Чи справедлива лінійна залежність переміщення від довжини консольної балки під дією поперечної сили?
12. Написати вирази тензорів деформації та напружень у загальному випадку складного напруженого стану матеріалу.
13. Що таке піддатливість матеріалу? Навести вирази компонентів піддатливості при ізотропії матеріалу для деформацій розтягування-стиску та зсуву?
14. Яким рівнянням визначається динаміка руху балки? Поясніть фізичний зміст окремих доданків рівняння.
15. Охарактеризувати зв'язок між пружностями та коефіцієнтами жорсткості при деформаціях розтягування-стиску та згину.
16. Розрахунок жорсткостей складених балок при послідовному та паралельному з'єднанні частин.
17. Як змінюється частота власного резонансу консольної балки від її довжини при коливаннях згину?
18. Якими параметрами характеризуються мембрани?
19. Яка основна схема інтегральних тензоперетворювачів використовується для вимірювання тиску, прискорення, температури?
20. Скласти узагальнену технологічну послідовність виготовлення інтегральних тензоперетворювачів.
21. Які основні способи одержання суворо заданої товщини мембран використовуються у виробництві?
22. Описати способи двостороннього суміщення при виготовленні ПФВ.
23. Якими засобами забезпечується переміщення роторних секцій у зустрічно-штирбових мікрорезонаторах?

3 МАТЕРІАЛИ ДЛЯ МЕМС ТА НТ

Матеріалознавство є галуззю науки та техніки, що динамічно розвивається та забезпечує прогрес інших галузей науки, техніки, виробництва та всіх сфер життя людського суспільства. У свою чергу воно використовує новітні наукові та технічні досягнення багатьох напрямків природознавства та інших фундаментальних наук.

У виробництві мікросистемної техніки та нанотехнологій використовуються різні види матеріалів. Основними видами технологій МСТ є процеси, залозичені з виробництв напівпровідникових приладів та інтегральних схем, тому й основними матеріалами є групи матеріалів цих технологій: метали, напівпровідники, кераміка, полімери. Крім основних у технології використовуються різні допоміжні матеріали: фоторезисти, м'яючі та травильні розчини та ін.

Поряд із традиційними матеріалами в МСТ і НТ все більшого використання знаходять нові матеріали:

- полімерні наноструктури;
- фотонні кристали;
- фулереноподібні матеріали;
- магнітні наноструктури;
- ДНК-структури;
- нанопористі кераміки;
- конструкторні наноматеріали.

Розглянемо властивості перерахованих груп матеріалів.

3.1. Електричні та механічні властивості кремнію

Кремній — основний напівпровідниковий матеріал, що знайшов найбільше розповсюдження завдяки високим електрофізичним характеристикам приладів на його основі, а також внаслідок широкого поширення в природі. Кремній належить до четвертої групи періодичної системи Менделєєва, до якої входять також інші широко використовувані елементи — германій, титан і вуглець. Більшість напівпровідникових матеріалів є неорганічними

матеріалами, отриманими на основі елементів четвертої групи. Напівпровідникові матеріали також можуть складатися з комбінації елементів або третьої та п'ятої, або другої та шостої груп, наприклад, арсенід галію GaAs і телурид цинку.

Монокристали кремнію мають кубічну ґратку типу алмаза. Положення атомів в алмазній ґратці можна зобразити у вигляді двох частково перетнутих гранецентрованих кубів, початок координат яких зміщено один відносно одного за всіма осями на $1/4$. У результаті кожний атом оточений чотирма симетрично розташованими в просторі сусідніми атомами. Арсенід галію має ґратку, що відрізняється від ґратки алмаза тим, що в її вузлах атоми миш'яку чергуються з атомами галію.

Монокристалічні матеріали мають анізотропію фізичних, електричних і механічних властивостей, тобто розходження цих властивостей у різних кристалографічних площинах і напрямках. Вузли, площини та напрямки в кристалічній ґратці позначаються індексами Міллера. На рис. 3.1 показані позначення кристалографічних площин і напрямків для кристалів з кубічною ґраткою.

Для позначення кристалографічних напрямків індекси беруть у квадратні дужки, наприклад $[111]$; сукупності еквівалентних напрямків — у кутові, наприклад $\langle 111 \rangle$; сімейства еквівалентних площин — у фігурні, наприклад $\{100\}$. У кубічній системі однойменні напрямки й площини взаємно перпендикулярні. Кожна площина має певне число атомів, щільність упакування яких впливає на електрофізичні, фізико-хімічні й механічні властивості матеріалу. Напівпровідникові матеріали вирощують так, щоб їхні осі збігалися з напрямком $[111]$. Як видно з рис. 3.1, з такого

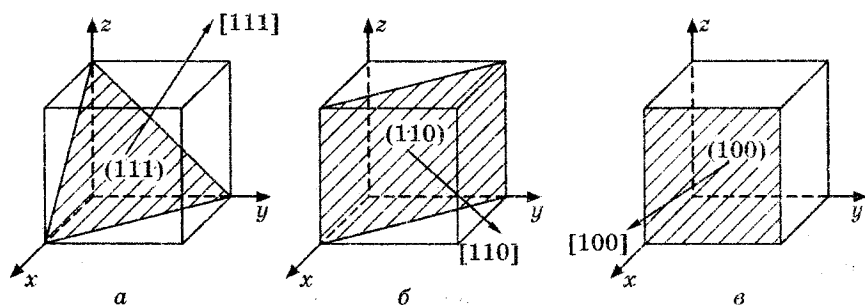


Рис. 3.1. Умовні позначення кристалографічних площин і напрямків для кристалів з кубічною ґраткою: а — площина (111) з напрямком $[111]$; б — площина (110) з напрямком $[110]$; в — площина (100) з напрямком $[100]$

злитка можна вирізати пластини з будь-якою площиною орієнтації. Пластини, орієнтовані в площині (111), мають майже правильну круглу форму (рис. 3.2, а).

Розглядаючи взаємне розташування площин у кристалі (рис. 3.2, б), неважко встановити, що одна із площин (110) є перпендикулярною до площини (111), а інша розташована до неї під кутом близько 35° . Тому пластини з орієнтацією (110), вирізані зі злитка, вирощеного в напрямку [111], мають форму прямокутника або еліпса. Площини (100) перебувають відносно площини (111) під кутом близько 55° (рис. 3.2, в), а пластини з орієнтацією (100) мають еліптичну форму.

Маркування злитка вказується постачальниками в паспортах на злитки. Воно характеризує злиток за типом жорсткості, значенням і розкидом питомого опору, видом легуючої домішки та деякими іншими параметрами. У маркування входять літерні позначення, що відносяться до матеріалу злитка та способу його вирощування, наприклад: К — кремній, вирощений методом Чохральського; БК — кремній, вирощений методом безтигельного зонного витоплення; АГН — арсенід галію, отриманий за допомогою горизонтально спрямованої кристалізації; АГЧ — арсенід галію, вирощений методом Чохральського витягуванням з-під шару флюсу.

Тип провідності позначається літерами Е (електронна, *n*-тип) і Д (діркова, *p*-тип). Наступна буква є початковою в назві легуючого

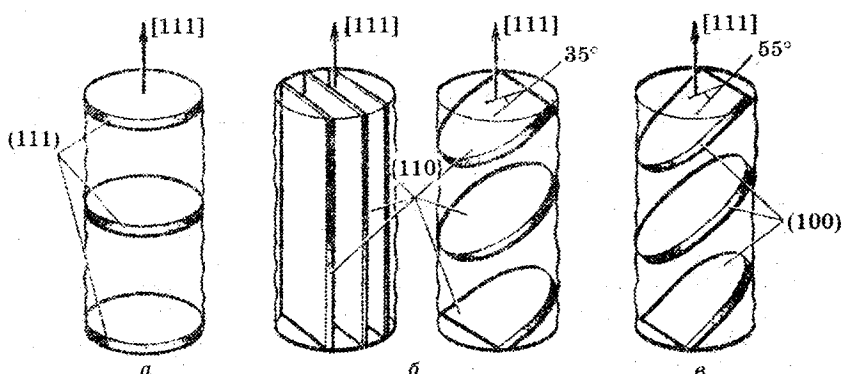


Рис. 3.2. Форма пластин із різною кристалографічною орієнтацією, вирізаних зі злитка, вирощеного в напрямку [111]:
 а — пластини з орієнтацією (111); б — пластини з орієнтацією (110);
 в — пластини з орієнтацією (100)

елемента, наприклад: Ф — фосфор, Б — бор, С — сурма, Г — галій, Т — телур, О — олово, Ц — цинк. Для позначення марок напівізольюючого арсеніду галію використовуються літери П (напівізольюючий) та М (для модуляторів).

У маркуванні кремнію після літерних позначень йде дріб, чисельник якого вказує номінал питомого опору, а знаменник — дифузійну довжину неосновних носіїв заряду або час їхнього життя. Цифри, що стоять після дробу, вказують діаметр злитка.

Змішані цифрові та літерні позначення, що стоять перед позначенням матеріалу, характеризують групи та підгрупи марок, що відрізняються інтервалами діаметрів злитків, орієнтацією при вирощуванні та деякими спеціальними електрофізичними властивостями. Наприклад, маркування 1А56 КДБ 7,5/0,1-76 означає: кремній, вирощений за методом Чохральського, діркової провідності, легований бором, з питомим опором 7,5 Ом·см, з дифузійною довжиною неосновних носіїв заряду 0,1 мм, групи 1А, підгрупи 56, діаметр злитка 76 мм.

У маркуванні арсеніду галію цифри, що стоять після літер, вказують: перша — індекс, що характеризує спеціальні технічні вимоги до матеріалу; друга — номінал концентрації носіїв заряду; наступні — показник ступеня десяткового порядку концентрації носіїв заряду. Наприклад, маркування АГЧЦ-2-19 означає: арсенід галію, виготовлений методом витягування за Чохральським, легований цинком, з технічними вимогами, що відповідають індексу 2, та номінальними значеннями концентрації носіїв заряду 10^{19} см^{-3} .

Напівпровідники, що складаються з однакових елементів, називаються одноелементними (кремній, германій), а ті, що являють собою суміші елементів третьої та п'ятої або другої та шостої груп, називаються складними.

У табл. 3.1 наведено характеристики ґраток низки напівпровідників для температури 27 °С.

Кремній є технологічним матеріалом для МЕМС внаслідок можливості його нанесення у вигляді тонких плівок, високої відтворюваності форми та властивостей напівпровідникових приладів, групових методів обробки, простоти одержання ізоляції шарів, а також хімічного захисту. Корисною властивістю кремнію є залежність швидкості травлення від орієнтації кристалічної ґратки. Вона використовується для одержання різних профілів елементів конструкції.

Таблиця 3.1

Характеристики ґраток напівпровідників

Матеріал	Структура ґратки	Постійна ґратки, Å	Ширина забороненої зони, eВ
Ge	Алмазоподібна	5,66	0,66
Si	Алмазоподібна	5,43	1,12
GaAs	Сфалеритова	5,64	1,44
GaSb	Сфалеритова	6,12	0,78
JnSb	Сфалеритова	6,46	0,18
JnAs	Сфалеритова	6,04	0,33
Jn	Сфалеритова	5,86	1,25
PbSe	Сфалеритова	6,14	0,27
PbTe	Сфалеритова	6,34	0,30

Електричні, механічні та термічні властивості монокристалічного кремнію наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Властивості монокристалічного кремнію

Властивість	Значення
Електричні властивості	
Питомий опір, Ом·см	
(з додаванням Р)	1...50
(з додаванням Sb)	0,005...10
(з додаванням В)	0,005...50
Час життя неосновних носіїв, нс	30...300
Механічні властивості	
Напруження плинності σ_T , Н/м ²	$7 \cdot 10^9$
Модуль Юнга, Н/м ²	$1,45...1,9 \cdot 10^{11}$
Коефіцієнт Пуассона	0,3
Щільність, г/см ³	2,3
Зсув кристалічної структури, см ²	< 5000
Термічні властивості	
Теплопровідність, Вт/см·°С	1,57
Теплове розширення, °С ⁻¹	$2,23 \cdot 10^{-6}$

Багато напівпровідників, включаючи кремній і GaAs, мають кубічну структуру кристалів. Алмаз можна розглядати як напівпровідник з великою шириною забороненої зони (5,5 eВ) і зі структурою, що складається із двох вкладених гранецентрованих

конструкцій, міжатомні відстані в яких не співпадають. У складних напівпровідниках, таких як GaAs, одна конструкція повністю складається з атомів миш'яку. Така кристалічна структура називається сфалеритовою структурою. Докладна інформація з виготовлення напівпровідникових приладів може бути отримана за роботами В. Н. Черняєва і Н. Є. Єфімова.

При виготовленні мікросхем використовуються різні види тонких плівок кремнію:

- оксиди кремнію;
- полікристалічний кремній;
- монокристалічний кремній;
- нітрид і карбід кремнію.

Крім діоксида, діелектриком є карбід і нітрид кремнію (SiC і Si_3N_4). Ці діелектрики використовуються в якості ізоляторів між провідними шарами, масок при напилюванні та імплантації іонів і для захисту мікросистем від забруднень, вологи та подряпин.

Гомогенна кристалічна структура кремнію забезпечує необхідні електричні параметри мікроелектронних схем, а також високі механічні властивості. Кремній твердіший за багато металів, має більшу, ніж сталь, межу лінійності деформацій при розтягуванні та стиску, добре витримує циклічні навантаження.

Полікремній застосовується для утворення електрода затвора в МОН-транзисторах, а також в якості провідникового матеріалу для багаторівневої металізації і матеріалу для контактів у приладах з поверхневими переходами.

Металеві плівки використовуються для низькоомних сполук як у високолегованих n^+/p^+ -зонах, так і в полікремнієвих шарах, а також для одержання випрямляючих (неомічних) контактів у парах метал — напівпровідник.

З урахуванням значення щільностей і молекулярної ваги кремнію та діоксида кремнію можна показати, що для утворення оксидної плівки товщиною x необхідно окислити шар, що дорівнює $0,44x$.

Крім того, слід зазначити, що термоокислення — повільний процес, тому що окисел поверхневого шару ускладнює доступ кисню до внутрішніх шарів. Він забезпечує одержання окислів в одиниці мкм. Товсті шари SiO_2 одержують термоокисленням і наступним осадженням з газової фази.

Монокристалічний кремній знаходить усе більш широке застосування в різноманітних нових виробках завдяки не тільки своїм добре відомим електронним якостям, але й прекрасним механічним властивостям, що викликало зростаючий інтерес до використання

кремнію в якості механічного конструкційного матеріалу. Кінцевою метою при цьому є розробка високоякісних датчиків і перетворювачів, що виготовляються в масових кількостях і добре сполучуються з мікропроцесорами [Исии, 1988].

Кремній революціонував уявлення про електроніку, а тепер цей різнобічний матеріал починає змінювати й уявлення про мініатюрні механічні компоненти та пристрої, що вимагають забезпечення високої точності одержання розмірів елементів.

В якості прикладів можна навести струминні друкуючі головки, кремнієві акселерометри для автомобільної та ракетно-космічної техніки, датчики тиску медичного призначення, високопрецизійні складання для суміщення та зчленування волоконно-оптичних систем зв'язку та ін.

Широке використання кремнію пояснюється наступними його властивостями:

1. Це активний матеріал, дешевий і доступний, а технологія його одержання забезпечує високий ступінь чистоти та досконалості структури.

2. Технологія виготовлення кремнієвих приладів заснована на використанні дуже тонких осаджених плівок, зручних для цілей мініатюризації.

3. Методи фотолітографії, використовувані у виробництві напівпровідникових приладів, забезпечують високу точність.

4. Кремнієві мікроелектронні схеми виготовляються за груповою технологією, що при масовому випуску забезпечує їхню низьку вартість.

Перераховані характеристики кремнію дозволять оптимізувати механічні властивості приладів, що виготовляються з нього, подібно тому як оптимізуються їхні електронні властивості з метою поліпшення характеристик, підвищення надійності та відтворюваності параметрів. Сучасні методи фотолітографії дозволяють створювати різноманітні мініатюрні та високопрецизійні механічні структури.

Крім того, методи високопродуктивної інтегральної технології, інтеграції механічних та електронних пристроїв створюють нові концепції конструювання та виробництва гібридних пристроїв, таких як інтегральні датчики та ін.

При цьому кремнієву мікромеханіку потрібно розглядати як природне та неминуче продовження тенденції до більш складної, різноманітної та корисної інтеграції приладів на основі кремнію.

Кремній міцний, але крихкий матеріал, що порівнюється за показниками зі сталлю та навіть переважає її, але за результатами, які спостерігаються, здається сумнівним.

Це викликано наступними причинами:

- звичайно мають справу із пластинами кремнію товщиною 0,25—0,5 мм і діаметром 50—200 мм. Навіть нержавіюча сталь за таких розмірів зразків легко деформується;
- як монокристалічний матеріал кремній має тенденцію розколюватися вздовж кристалографічних площин, особливо якщо крайові, поверхневі або об'ємні дефекти структури призводять до концентрації та орієнтації напружень уздовж площин відколу;
- розколювання можуть викликати ушкодження країв або поява дефектів при різанні або скрайбуванні;
- високотемпературна обробка та багаторазове нанесення тонких плівок, неминучі при виготовленні ІС, призводять до виникнення внутрішніх напружень, які в поєднанні із крайовими, поверхневими та об'ємними недосконалотями структури можуть призводити до концентрації напружень і наступного розколювання по площині відколу.

Зі сказаного раніше ясно, що хоча високоякісний МКК у принципі є міцним, міцність механічних компонентів або приладів, що спостерігається на практиці, буде залежати від кристалографічної орієнтації та геометрії, від кількості та розміру крайових, поверхневих і об'ємних порушень і від напружень, індукованих і накопичених під час росту, різання, полірування та наступної обробки. Знаючи причини зниження міцності матеріалу, можна взяти заходів до їхнього зниження або виключення, щоб одержувати механічні компоненти, що перевершують за міцністю найякісніші леговані сталі.

Загальні правила, яких варто дотримуватися, можуть бути сформульовані наступним чином:

1. Кремній повинен мати якомога меншу щільність об'ємних, поверхневих і крайових дефектів, щоб число потенційних областей концентрацій напружень було мінімальним.

2. Компоненти, які можуть піддаватися сильному тертю, абразивному впливу або механічним напруженням, повинні мати мінімальні розміри. Від ударів забезпечувати механічною опорою, наприклад, з'єднанням зі склом методом анодного окислювання.

3. Всі процеси механічної обробки виключити, замінивши їх травленням.

4. У випадку різання, шліфування й інших механічних операцій після них варто обтравити краї та поверхню, що піддалися механічним діям.

5. При утворенні гострих кутів, країв під час анізотропного травлення їх необхідно скруглювати наступним ізотропним травленням.

6. Щоб уникнути безпосередніх механічних контактів з Si, варто наносити міцні, тверді, корозійностійкі тонкоплівкові покриття SiC або Si_3N_4 методом хімічного парофазного осадження.

7. Низькотемпературні ТП, наприклад плазмове окислювання, хімічне парофазне осадження при виготовленні мікромеханічних елементів, дозволяють уникнути напружень, викликаних термічною неузгодженістю ТКЛР різних легованих, осаджених шарів і кремнію.

Видаляти фоторезист і відходи травлення, а також залишки протравлювачів у порах матеріалу стає все складніше зі зменшенням пор і елементів. Тому розроблюються спеціальні сполуки м'яких рідин і нові методи очищення. Так, вуглекислий газ при значеннях тиску та температури, що перебувають вище критичної точки, поводить майже як рідина, але зберігає низьку в'язкість. Надкритичний двоокис вуглецю легко проникає під частки забруднень і видаляє їх ефективніше за будь-який рідинний хімікат. Більш того, змішавши його з підходящим розчинником, можна легко видалити фоторезист. А коли промивання завершено, досить понизити тиск до атмосферного, і перегріта рідина випаровується та звітряється, як звичайний газ. Це один з найбільш ефективних методів видалення хімічних забруднень [Ден Хатчесон, 2004].

У значній мірі уникнути несприятливих конструктивних і механічних впливів на МКК можна шляхом осадження тонких пасивувальних плівок. Це надає мікромеханіці більшу гнучкість технології.

Високотемпературне піролітичне осадження та низькотемпературне височастотне осадження дозволяють одержувати тонкі плівки високої твердості, практично безпористі, з високою стійкістю до хімічної корозії та високим опором стиранню. Так, Si_3N_4 уступає за твердістю тільки алмазу.

Пасивація МКК може здійснюватися полімерними плівками (парилен, поліімід).

Утворення утомних тріщин МКК-структур майже завжди починається з поверхні напружених елементів конструкції, ступінь утоми сильно залежить від підготовки поверхні, її морфології та

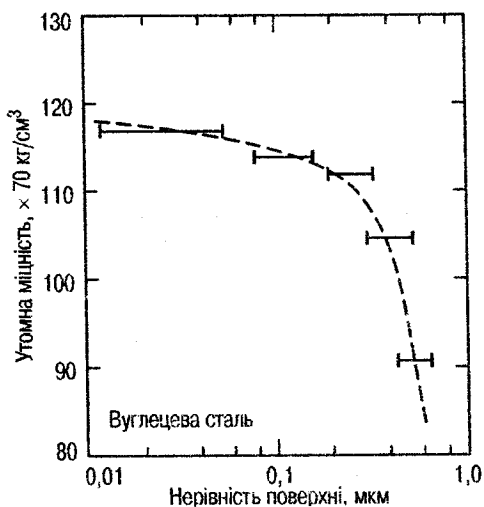


Рис. 3.3. Залежність утомної міцності від шорсткості поверхні

щільності дефектів. Конструктивні елементи з добре полірованими поверхнями мають більш високу утомну міцність, аніж елементи із грубою обробкою поверхні (рис. 3.3).

Висока кристалічна досконалість МКК у поєднанні з високою гладкістю та досконалістю поверхні, що досягаються за допомогою хімічного травлення кремнію, дають можливість одержувати механічні структури з високою утомною міцністю.

Гідростатичний тиск підвищує утомну міцність. Так, плівки Si_3N_4 перебувають на поверхні МКК у стані натягу й тому створюють напруження стиску в поверхні кремнію, що знаходиться під нею, та повинні підвищувати утомну міцність компонентів.

3.2. Вуглецеві форми матеріалів

Низькорозмірні алотропні форми чистого вуглецю включають: графен, графіт, графан, фулерени та тубулени, алмаз [Нейдрієн, 2004].

Графен. Хоча графен є основою одержання інших різних форм вуглецю (рис. Д8.20): вуглецевих нанотрубок, бакиболів, графіту, його відкриття відбулося всього декілька років тому і в цей час вважається, що він дозволить ще глибше зрозуміти фундаментальні закони фізики та знайде більш широке застосування, ніж інші вуглецеві форми [Гейм, 2008].

Первинним елементом графена є комірка із шести атомів вуглецю, об'єднаних міцними хімічними зв'язками в правильний шестикутник, що називається бензолним кільцем. Власне графен представляє двовимірну систему кілець, що утворює лист. Інші графітоутворюючі форми утворюють просторові поверхні зі згорнутих листів графена, обгорнутих навколо куль, витягнутих сфероїдів, циліндрів та ін.

Унікальним матеріалом графен роблять дві його властивості. По-перше, графен відрізняється винятково високою якістю, що поєднує його хімічну чистоту та досконалість структури. Учені дотепер не знайшли в ній жодного дефекту — ні вакансії, ні атома не на своєму місці. Така бездоганність кристалічної структури визначається, вочевидь, міцними, хоча й дуже гнучкими міжатомними зв'язками, що утворюють речовину твердшу за алмаз, площини якої можуть згинатися під дією механічних сил. Ця гнучкість дозволяє структурі сильно деформуватися без перегрупування атомів.

Винятково висока електропровідність графена також обумовлена його ідеальною кристалічною ґраткою. Електрони можуть переміщуватися нею, не підлягаючи розсіюванню на недосконалостях або чужорідних атомах. Навіть відштовхування від навколишніх вуглецевих атомів, якому неминуче підлягають електрони в графені за кімнатної температури, порівняно слабке завдяки великій міцності міжатомних зв'язків.

Друга унікальна властивість графена полягає в тому, що електрони провідності рухаються в ньому набагато швидше, ніж у звичайних металах і напівпровідниках, як коли б вони мали набагато меншу масу. Дійсно, електрони в графені (можливо, вірніше було б називати їх «носіями електричного заряду») — дивні створіння у світі законів релятивістської квантової механіки.

Звичайні електрони в провідному матеріалі рухаються зі швидкостями набагато меншими за швидкість світла. Тому немає необхідності застосовувати до їхнього руху поправки, обумовлені теорією відносності Ейнштейна.

Електрони, що несуть заряд квазічастинки в графені, рухаються з дуже великими постійними швидкостями (~ в 300 разів меншими за швидкість світла). При цьому їхня поведінка близька до релятивістської поведінки нейтрино, що робить звичайну (нерелятивістську) квантову механіку непридатною для опису взаємодій квазічастинок. Необхідне використання релятивістської квантової механіки, що називається квантовою електродинамікою. Релятивістські частки завжди супроводжують їхні двійники — античастинки. Так, античастинка електрона — позитрон має позитивний електричний заряд і точно таку ж масу. Пари частка-античастинка можуть виникати в релятивістських умовах з вакууму (теорія енергії вакууму).

Відповідно до парадокса Клейна релятивістські частки проходять потенційні бар'єри будь-якої висоти та великої ширини зі стовідсотковою ймовірністю. Просто перед бар'єром частки

об'єднуються в пари зі своїми античастинками, для яких світ перевернутий, і бар'єри виявляються впадинами. Пройшовши через таку впадину в антисвіті, з іншого боку бар'єра античастинки знову перетворюються в частки та безперешкодно виходять.

Квазічастинки в графені дозволяють експериментально досліджувати і парадокс Клейна і багато інших незвичайних ефектів, що передбачаються квантовою електродинамікою.

Порошок графена вже зараз можна виробляти в великих кількостях, але одержувати листовий графен поки дуже складно, внаслідок чого він стає найдорожчим матеріалом на планеті.

Перспективними галузями використання графена вважається створення високоміцних композитних матеріалів, автоемісійних катодів, створення надпровідних транзисторів надшвидкодіючих пристроїв і транзисторів зі спіновими клапанами, надчутливих хімічних детекторів, прозорих і провідних покриттів для РК-дисплеїв і сонячних елементів. Використання графенової електроніки дозволить продовжити час дії закону Мура. Виняткова стабільність і електропровідність графена навіть у нанометровому діапазоні дозволяють розраховувати, що можливе створення окремих транзисторів з розмірами менше 10 нм, а можливо, що й у розмірі всього в одне бензольне кільце. У даній перспективі можливе навіть формування інтегральної схеми в межах одного листа графена.

Графан. Приєднанням до кожного атома вуглецю атома водню отримано новий матеріал графан, що володіє такою же кристалічною ґраткою, що й графен, лише з меншими розмірами комірок. Графан є ізолятором. Нагріванням (відпалом) графана відновлюється вихідний матеріал графен.

Модифікація фізичних властивостей графена за допомогою хімічних реакцій відкриває перспективи використання єдиного, універсального матеріалу для одержання будь-яких електронних компонентів. Наприклад, підкладка та міжз'єднання можуть бути з гарного провідного графена, а напівпровідникові компоненти — з його хімічних модифікацій.

Алмаз. Алмаз є другою диморфною формою вуглецю та володіє цілою низкою видатних властивостей.

Природний алмаз найтвердіший, найблискучіший, найкоштовніший... Назва походить від грецького слова «адамас» — непереможний, непереборний внаслідок його великої твердості та стійкості.

Твердість 10. Абсолютна твердість в 150 разів більша за абсолютну твердість корунду. Щільність 3,5. Сингонія кубічна. Характерні форми: {111}, {100}, {110}. Хімічно стійкий. В атмосфері згорає при 850 °С, у кисні — при 720 °С.

Алмаз — найтвердіша з відомих речовин природного походження. Найтвердіші з відомих речовин взагалі — агреговані нанострижні алмазу в 1,11 рази твердіші за монокристали алмазу.

Алмаз проводить тепло краще, ніж будь-який інший твердий матеріал.

Алмаз має високий коефіцієнт заломлення 2,4 у порівнянні з 1,5 для скла.

Чистий алмаз — діелектрик, але при введенні домішок він може стати напівпровідником.

Оскільки енергетичний проміжок (ширина забороненої зони дорівнює 5,5 еВ) між зонами зв'язаних електронів провідності в напівпровідному алмазі великий, він прозорий для ультрафіолетового світла, це дозволяє використовувати його при виробництві УФ-датчиків і світлодіодів.

Широка заборонена зона, яка дозволяє атомам домішки збуджуватися, не доходячи до іонізації, — один із ключів до застосування квантової спінтроники.

Квантові стани домішок в алмазі можуть зберігати свій квантовий характер протягом тривалого часу (близько 1 мс) навіть за кімнатної температури.

Через високу теплопровідність ще однією ефективною сферою застосування алмазів є силова електроніка. Широке використання алмазів в електроніці та, зокрема, спінтрониці, де алмаз може зіграти роль кремнію наших днів, пов'язане із синтетичними алмазами — напівпровідниками.

Досягнення в матеріалознавстві дозволяють синтезувати також алмазні плівки товщиною в декілька десятих мікрметрів і площею в багато квадратних сантиметрів шляхом хімічного осадження з газової фази [Михайлов, 2004]. У цьому процесі газ, що складається із суміші вуглецевих молекул (часто це метан) і водню, розкладається на окремі атоми (потужним мікрохвильовим випромінюванням), дозволяючи атомам вуглецю осаджуватися на кремнієвій підкладці. Отримані таким способом алмази можуть бути дуже чистими, але часто вони являють собою безліч дрібних кристалів, або зернин, з розмірами в межах від нанометрів до мікронів, залежно від технології. Кращими характеристиками звичайно володіють пристрої з монокристалічного алмаза, в якому

характерна тетраедрична ґратка вуглецевих атомів не порушується безладними границями зернин, що погіршують якість матеріалу. Можливість надавати алмазу безліч форм, ймовірно, сильно вплине на звичайну та на квантову електроніку.

Найважливішою властивістю алмазу для квантової електроніки є широка заборонена зона та, отже, більша енергія, що необхідна для вибивання електрона зі зв'язаного стану. В алмазі заборонена зона становить 5,5 еВ, що приблизно вдвічі більше за енергію фотона видимого світла та у п'ять разів більше за заборонену зону кремнію.

При додаванні до алмаза атомів домішки можна створити дискретні стани, що лежать у забороненій зоні, як додаткові тонкі сходи в драбині. Енергетичний проміжок алмазу досить великий, тому світло з оптичною довжиною хвилі може збуджувати електрон атома домішки з одного дискретного стану в інший, не переводячи його в зону провідності. Коли електрон вертається у свій більш низький стан, він випускає фотон із частотою відповідної різниці рівнів енергії, тобто флуоресціює. При безперервному освітленні оптичне порушення та релаксація повторюються знову і знову, і атоми домішки можуть випускати мільйони фотонів за секунду.

Введення в кристалічну ґратку алмаза неоднорідностей у вигляді атома озону та пов'язаної з ним вакансії (дірки) дозволяє зберегти інформацію про стан спіну цієї пари і його можна поляризувати за допомогою світла оптичного діапазону. Квантові властивості центра азот — вакансія (N-V) проявляються навіть за кімнатної температури. Центри N-V вважаються багатообіцяючою технологією для обробки квантової інформації. Зараз інформація зберігається спіном електрона ~ 1 мс, вдалося збільшити час зберігання до 20 мс, декількох секунд, що робить перспективу створення квантових інформаційних пристроїв, що працюють за кімнатної температури, найближчим майбутнім.

Першими спінтронними пристроями промислового масштабу стали накопичувачі на жорстких магнітних дисках, що використовують ефект гігантського магнітного резонансу.

В 2006 р. фірма Motorola створила енергонезалежний пристрій пам'яті з довільним доступом (MRAM), що дозволить виключити в комп'ютерах завантаження при ввімкненні. В MRAM спіни великої кількості електронів вибудовані в одному напрямку (електрони з поляризованим спіном). Виявлено спіновий ефект Холла.

Квантова спітроніка може дати практичний спосіб виконання квантової обробки інформації, за якої 0 і 1 звичайних обчислень замінюються квантовими бітами, або кубітами, здатними мати значення 0 і 1 (квантова суперпозиція). Спітроніка дозволить розшифровувати будь-які сучасні шифрувальні коди, моделювати поведінку речовини в наномасштабі, створювати нові матеріали та ін.

Фулерени. Фулерени як нова форма існування вуглецю в природі поряд з відомими алмазом і графітом були відкриті в 1988 р. при спробах астрофізиків пояснити спектри міжзоряного пилу. Виявилося, що атоми вуглецю можуть утворювати високосиметричну структуру C_{60} . Така молекула складається з 60 атомів вуглецю, розташованих на сфері з діаметром приблизно в один нанометр. Відповідно до теореми Л. Еклера, атоми вуглецю утворюють 12 правильних п'ятикутників і 20 правильних шестикутників. Молекула названа на честь архітектора Р. Фулера, що побудував будинок з п'яти- та шестикутників. Спочатку C_{60} одержували в невеликих кількостях, а в 1990 р. була розроблена технологія їхнього великомасштабного виробництва.

Фулерени — багатогранники з вуглецевих атомів: C_{60} , C_{84} , що поєднуються в сферичні структури «Бакіболи» (рис. Д8.21).

Фулерити. Молекули C_{60} , у свою чергу, можуть утворювати кристал фулерен із гранецентрованою кубічною ґраткою та досить слабкими міжмолекулярними зв'язками. У цьому кристалі є октаедричні та тетраедричні порожнини, у яких можуть перебувати сторонні атоми. Якщо октаедричні порожнини заповнені іонами лужних металів (K — калій, Rb — рубідій, Cs — цезій), то за температур нижчих за кімнатну структура цих речовин перебудовується та утворюється новий полімерний матеріал $1C_{60}$. Якщо заповнити також і октаедричні порожнини, то утвориться надпровідний матеріал $3C_{60}$ із критичною температурою 20—40 К. Існують фулерити й з іншими присадками, що надають матеріалу унікальні властивості. Висока активність у новій галузі хімії призвела до того, що вже до 1997 р. налічувалося більше 9000 фулеренових сполук.

У лабораторії CRISMAT (Франція, Канн) отриманий фулереноподібний оксид, відмінність якого від структурно схожого фулерена C_{84} полягає в тому, що величезні алюмінієві сфери не порожні, а заповнені стронцієм і киснем, які утворюють шари навколо центральної речовини кластера, що нагадує матрицю. Одержання цієї унікальної структури відкриває шлях до синтезу інших складних фулереноїдів зміною розмірів алюмінієвих сфер, заміною

алюмінію іншими елементами або введенням усередину сфери інших катіонів, наприклад кальцію, рубідію, цезію. Це об'єднує величезну різноманітність корисних і незвичайних властивостей, як фізичних, так і хімічних. На рис. Д8.22, Д8.23 наведена структура сфер легуючих матеріалів отриманого оксиду, що вкладаються.

Для складання наноструктур використовуються напівмолекулярні компонувальні блоки. Двома такими наноструктурами є вуглецеві нанотрубки та нанострижні, які можна виготовити із кремнію, інших напівпровідників, металів або навіть діелектриків. Дані нанострижні виробляються з використанням методів хімії розчинів або дугового розряду, а потім вони можуть самозбиратися в більші нанорозмірні структури, наприклад, нанотрубки довжиною в одиниці мкм.

Атоми вуглецю, що зв'язані шестикутною сіткою та утворюють циліндри, називаються вуглецевими нанотрубками. Якщо товщина трубки дорівнює всього одному шару атомів вуглецю, вона називається одношаровою вуглецевою трубкою.

Нанотрубки. Нанотрубки — це одні з перших наноструктур, побудованих на молекулярному рівні, вони мають виняткові фізичні та електричні властивості.

Межа міцності на розтягування вуглецевих трубок може в 10 разів перевищувати значення для високоякісної сталі. Існують твердження, що це найміцніші матеріали з коли-небудь створених і входять до числа найміцніших матеріалів, які взагалі можна створити.

Вони легкі та гнучкі, мають властивості надпровідності або напівпровідників залежно від точних пропорцій трубки та матеріалів, що легують матрицю. Структура багатошарової нанотрубки наведена на рис. 3.4.

До властивостей нанотрубок варто віднести [Ерохин, 2005]:

електричні — нанотрубки можуть бути діелектриками, напівпровідниками та надпровідниками, причому на одному матеріалі, наприклад, вуглеці. При легуванні властивості можуть значно змінюватися як кількісно, так і якісно;

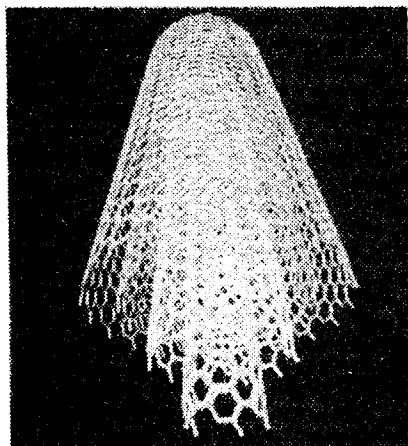


Рис. 3.4. Структура багатошарової нанотрубки

магнітні — від ідеального діаманета до феромагнетика;

механічні — міцність нанотрубок на два порядки вища за міцність кращих сталей, коефіцієнт пружного подовження досягає 16 %, багаторазове згинання (на частотах у сотні ГГц) не призводить до утомного руйнування, у середині закритих наноструктур можуть зберігатися газоподібні речовини під величезними тисками;

теплофізичні — теплопровідність і теплоємність лежать у широкому діапазоні значень від аномально малих до аномально високих;

хімічні — широкий спектр хімічних реакцій з різними речовинами; розчинність у розчинниках; можливість заміни або побудовування в ґратку окремих атомів; можливість побудови наноструктури атом за атомом; видатні абсорбційні властивості;

оптичні — нанотрубки мають електронну емісію, що дозволяє будувати на їхній основі випромінюючі прилади, наприклад, надтонкі дисплеї; при опромінюванні або освітлюванні нанотрубки змінюють свій опір або геометричні розміри, що створює передумови одержання надмалих фотоприйомних пристроїв з високим розрізненням. Виявлена здатність нанотрубок запалюватися при опромінюванні їх видимим світлом;

Комбіновані (наприклад, електромеханічні) — при згинанні нанотрубки змінюють свій омичний опір, а при пропусканні електричного струму — геометричні розміри.

Вуглецеві нанотрубки можна одержати з гігантським числом атомів [Карагусов, 2004]. Наприклад, молекула $C=1000000$ може являти собою одношарову трубку з діаметром близько нанометра та довжиною в декілька десятків мкм. На поверхні трубки атоми вуглецю розташовані у вершинах правильних шестикутників. Кінці трубок закриті за допомогою шести правильних п'ятикутників. Властивості нанотрубок залежать від числа сторін правильних багатокутників, що утворюють двовимірні поверхні атомів вуглецю в тривимірному просторі (рис. Д8.22).

Правильні шестикутники є комірками в плоскому графітовому листі, який можна згорнути в трубки різної хіральності $(m, n)^3$. Правильні п'ятикутники та семикутники є локальними дефектами в графітовому листі, що дозволяють одержати його додатну та від'ємну кривизну. Таким чином, комбінації правильних п'яти-, шести- і семикутників дозволяють одержувати різноманітні форми вуглецевих поверхонь у тривимірному просторі. Геометрія цих наноконструкцій визначає їхні унікальні фізичні та хімічні

властивості та, отже, можливість існування принципово нових матеріалів і технологій їхнього виробництва.

Передбачення фізико-хімічних властивостей нових вуглецевих матеріалів здійснюється як за допомогою квантових моделей, так і розрахунків у рамках молекулярної динаміки. Для виробництва нанотрубок використовуються спеціальні каталізатори.

Надміцні матеріали. Зв'язки між атомами вуглецю в графітовому листі є найдужчими серед відомих, тому бездефектні вуглецеві трубки на два порядки міцніші за сталь і приблизно в чотири рази легші за неї! Одне з найважливіших завдань технології в галузі нових вуглецевих матеріалів полягає в створенні нанотрубок «нескінченної» довжини. З таких трубок можна виготовляти легкі композитні матеріали граничної міцності для потреб техніки нового сторіччя.

Модуль Юнга ВНТ коливається від 1,28 до 1,80 ТПа, а в сталі $E = 0,21$ ТПа, тобто модуль Юнга ВНТ майже в десять разів більший, ніж у сталі. Незважаючи на високу жорсткість, через малу товщину нанотрубки вона дуже пружна при згинанні. Відхилення Δz порожнього циліндричного стрижня довжиною l , із внутрішнім радіусом r_1 і зовнішнім r_0 — під дією сили F , прикладеної до кінця перпендикулярно осі трубки, дорівнює

$$\Delta z = \frac{Fl^3}{3EI}$$

де I — момент інерції перерізу стрижня, що дорівнює $(r_0^4 - r_1^4) \cdot \frac{\pi}{4}$.

Товщина стінки нанотрубки становить приблизно 0,34 нм і $r_0^4 - r_1^4$ дуже мале. ВНТ гнеться легко, але не ламається при згинанні і випрямляється без ушкоджень. Більшість матеріалів ламається при згинанні через присутність дефектів, таких як дислокації та границі зернин. Оскільки стінки ВНТ мають мало структурних дефектів, цього не відбувається. Інша причина того, що вони не ламаються, полягає в тому, що вуглецеві кільця стінок у вигляді майже правильних шестикутників при згинанні змінюють форму, але не рвуться. Це є унікальним наслідком того факту, що вуглець-вуглецеві зв'язки гібридизовані та можуть перегібридизуватися при згинанні. Ступінь змінення та коефіцієнти s - p -змішування залежать від того, наскільки зігнутими є зв'язки [Пул, 2007].

Межа міцності одношарової ВНТ становить 45 ГПа, у той час як сталеві сплави руйнуються за 2 ГПа. У такий спосіб ВНТ приблизно в 20 разів міцніші за сталь. Багатошарові ВНТ теж мають кращі,

ніж у сталі, механічні характеристики, але вони нижчі, ніж в одношарових нанотрубках. Наприклад, багатошарова трубка діаметром 200 нм має межу міцності 7 ГПа та модуль Юнга — 0,6 ТПа.

Надпровідні матеріали. Відомо, що в кристалічному графіті провідність уздовж площини шару найбільш висока серед відомих матеріалів і, навпаки, у напрямку перпендикулярному до листа, мала. Тому очікується, що електричні провідники з нанотрубок, за кімнатної температури будуть мати електропровідність на два порядки вищу, ніж у мідних. Справа за технологією, що дозволяє виробляти трубки достатньої довжини та у достатній кількості, а також способах утворення монтажних сполучень.

Ідеальна нанотрубка являє собою згорнуту в циліндр графітову площину, тобто поверхню, викладену правильними шестикутниками, у вершинах яких розташовані атоми вуглецю. Результат такої операції залежить від кута орієнтації графітової площини відносно осі нанотрубки. Кут орієнтації задає хіральність нанотрубки, що визначає, зокрема, її електричні характеристики.

Нанотрубки бувають двох основних видів: одностінчасті, з одного листа вуглецевої ґратки; і багатостінчасті, коли одна трубка вставлена в іншу, більш широку, а та — у наступну.

Структура нанотрубок описується двома цілими числами (m, n), що вказують координати шестикутника, який у результаті згортання площини повинен збігтися із шестикутником, що перебуває

на початку координат. Деякі з таких шестикутників разом з відповідними позначеннями відзначені на рис. 3.5. Також ці числа можна позначити як параметри так званого хірального вектора, що задається наступною формулою:

$$\vec{c} = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2, \quad (3.1)$$

де \vec{a}_1, \vec{a}_2 — елементарні вектори трансляції графітової площини.

Інший спосіб позначення хіральності полягає у вказуванні кута між напрямком згортання нанотрубки та напрямком, у якому сусідні шестикутники мають спільну сторону.

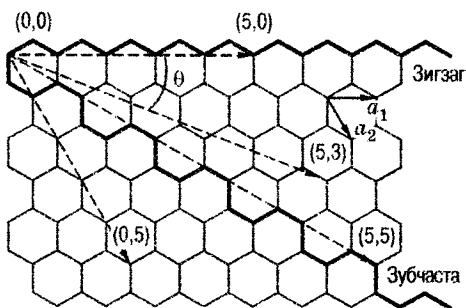


Рис. 3.5. Частина графітової площини, згортання якої в циліндр призводить до утворення одношарової нанотрубки

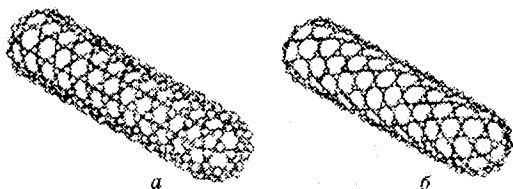


Рис. 3.6. Зубчаста (а) та зигзагоподібна (б) нанотрубки

Одношарові нанотрубки поділяються на наступні підвиди: ВНТ типу «armchair» (n, n), або «зубчасті»; типу «zigzag» ($n, 0$), або «зигзагоподібні»; хіральні (n, m), де $n > m$.

Структури нанотрубок, що відповідають конфігураціям «зубчаста» і «зигзагоподібна», показано на рис. 3.6.

Індекси хіральності одношарової нанотрубки (m, n) однозначним чином визначають її діаметр D . Цей зв'язок має наступний вигляд:

$$D = \sqrt{m^2 + n^2 + mn} \frac{\sqrt{3}d_0}{\pi}, \quad (3.2)$$

де $d_0 = 1,42 \text{ \AA}$ — відстань між сусідніми атомами вуглецю в графітовій площині. Зв'язок між індексами хіральності (m, n) та кутом θ задається співвідношенням:

$$\sin \theta = \frac{3m}{2\sqrt{n^2 + m^2 + mn}}. \quad (3.3)$$

Електронні та коливальні властивості ВНТ істотно залежать від типу трубок.

Якщо різниця $|m - n|$ кратна 3, такі ВНТ мають металеві властивості. Напівметалами є також всі ахіральні трубки типу «armchair». В інших випадках ВНТ показують напівпровідникові властивості.

Багатошарові нанотрубки відрізняються від одношарових значно більш широкою різноманітністю форм і конфігурацій. Різноманітність структур проявляється як у поздовжньому, так і в поперечному напрямку.

Можливі різновиди поперечної структури багатошарових нанотрубок представлено на рис. 3.7. Структура типу мотрійки (russian dolls) (рис. 3.7, а) являє собою сукупність коаксіально вкладених одна в одну одношарових циліндричних нанотрубок. Інший різновид цієї структури (рис. 3.7, б) являє собою сукупність вкладених одна в одну коаксіальних призм. Нарешті, остання з наведених структур (рис. 3.7, в) нагадує згорток (scroll). Для всіх структур на рис. 3.7 характерне значення відстані між сусідніми графітовими шарами, що близьке до величини $3,4 \text{ \AA}$, властивої відстані між сусідніми площинами кристалічного графіту.

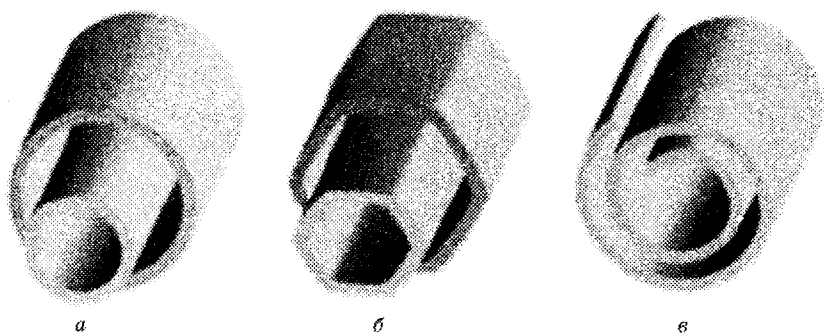


Рис. 3.7. Моделі поперечних структур багатопарових нанотрубок:
 а — мотрійка; б — шестигранна призма; в — згорток

Реалізація тієї або іншої структури багатопарової нанотрубки в конкретній експериментальній ситуації залежить від умов синтезу. Аналіз наявних експериментальних даних вказує, що найбільш типовою структурою багатопарових нанотрубок є структура типу мотрійки, в якій трубки меншого розміру послідовно вкладені в трубки більшого розміру.

Варто відмітити, що багатопарові нанотрубки звертають на себе не меншу увагу, ніж однопарові ВНТ.

Так, наприклад, недавно був розроблений метод, що дозволяє одержати «папір», сплетений із двошарових вуглецевих нанотрубок (рис. 3.8), із чистотою матеріалу 95 %.

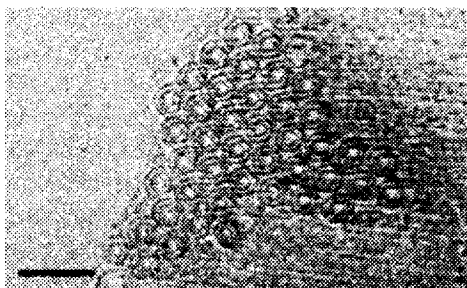


Рис. 3.8. Зображення «паперу», що складається з переплетених двошарових нанотрубок

3.3. Провідникові матеріали

Функції провідникових матеріалів у МЕА, МСТ та НТ різноманітні, а властивості матеріалів у плівкових, лінійних і точкових структурах можуть істотно відрізнятися від властивостей в об'ємному стані.

В якості провідників використовуються різні метали, багатопарові структури металів, силіциди металів, склоемалі, полікристалічний кремній, вуглецеві нанотрубки, полімерні й інші матеріали.

Звичайними для напівпровідникової технології матеріалами є алюміній і золото.

Алюміній використовується для виготовлення провідників і контактних площинок. Це дешевий і технологічний метал: легкий, пластичний, утворює досить міцну сполуку із кремнієм, має високу електропровідність.

Протравлюється алюміній ортофосфорною кислотою або сумішшю ортофосфорних, оцтових, азотної кислот і води [Черняев, 1986]. Застосовуються різні сполуки протравлювачів: для тонких плівок алюмінію (не товще ніж 1,6 мкм) — 45 %-ний розчин ортофосфорної кислоти за 60 °С; для товстих плівок (5...10 мкм) — ортофосфорна кислота (1,73 г/см³), ізопропіловий спирт, вода у відношенні 6:1,5:1 при 60 °С.

При використанні масок із позитивних резистів для травлення алюмінію застосовують кислі протравлювачі складу $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:4$. Під час роботи з негативними фоторезистами можливе використання лужних протравлювачів складу: 1 г їдкого натрію, 88 г фероціаніда, 800 мл води. Травлення протікає при кімнатній температурі.

Для негативних резистів на основі циклокаучука застосовують протравлювач складу $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}=1:4:1$.

Золото використовується в більш відповідальних випадках. Воно має низку переваг у порівнянні з алюмінієм — більш високу електропровідність, інертність до окислювання. Золото протравлюється в розчині трьох об'ємів соляної кислоти та одного об'єму азотної (царська горілка), але кращі результати дає протравлювач, що складається з йодистого калію, йоду та води (4:1:1).

В останні роки алюміній у низці випадків поступається місцем міді, що забезпечує більш високу швидкість [Хатчесон, 2004] і що дозволяє одержати до 6...8 шарів перехресних провідників. Для виключення забруднень міддю міжшарових переходів їх доводиться захищати тонкими провідними бар'єрами. Шари міді наносяться електролітичним осадженням з наступним поліруванням для виключення шорсткості поверхні та підготовки до літографії малюнка.

Мідь і нікель травлять у хлорному залізі, хлорній міді, розведеної азотній кислоті ($\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=2:1$) або в сполуках, аналогічних тим, що використовуються для травлення алюмінію.

За необхідності одержання товстих (десяти мкм і більших) металевих плівок використовують електролітичне осадження або фотолітографію. Електролітичний метод застосовують для

нанесення плівок з нікелю, золота та міді, а для виготовлення 3D мікроелементів з нержавіючої сталі використовується фотолітографія.

Для виробництва МСТ розроблені також спеціальні феромагнітні сплави: CoNiMn — для виготовлення мікроприводів, NiFe (пермалон) — для мікросенсорів та інтегрованих силових перетворювачів, мікродвигунів; плівки TiNi — запам'ятовування форми; TbFe і SmFe — магнітострикційні приводи [Варадан, 2004].

Полікристалічний кремній дозволяє одержати провідникове розведення з відносно високим питомим поверхневим опором ІМС, зокрема в базових матричних кристалах (БМК) і матричних ВІС. Розглянемо технологію багатошарової металізації МаВІС (рис. 3.9).

Формування якісної багатошарової металізації ґрунтується на правильному підборі матеріалів і технологічних процесів для виготовлення закривних електродів 7, контактів 11 до областей джерела 2 та стоку 10, сполучних провідників 5, 9 та ізолюючих шарів 4, 6.

Перший крок процесу металізації при виготовленні МаВІС — формування закривних електродів. В якості матеріалів для закривних електродів використовують полікристалічний кремній (полікремній), силіциди тугоплавких металів (MoSi_2 , WSi_2 , TaSi_2 та ін.) і чисті тугоплавкі метали (Mo, W).

Полікристалічний кремній має такі переваги, як самосполучення електрода закрива та областей джерела та стоку, низька гранична напруга, самопасивація при термічному окислюванні та висока термічна стабільність. Недоліками полікремнієвих закривів є високий питомий опір ($2 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) та підвищені струми витоку.

Полікремнієві закриви у вигляді тонких плівок виготовляють методом хімічного осадження з парової фази при низькому тиску

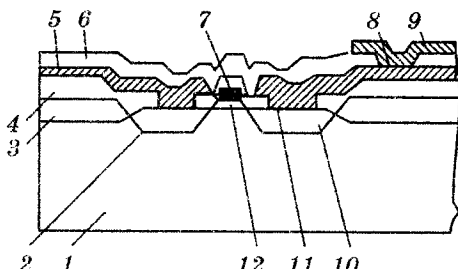


Рис. 3.9. Багатошарова металізація матричних ВІС:

- 1 — кремнієва пластина;
- 2, 10 — області джерела та стоку; 3 — діоксид кремнію;
- 4, 6 — ізолюючий шар;
- 5 — сполучні провідники першого шару металізації; 7 — закривний електрод; 8 — контакт між шарами металізації; 9 — сполучні провідники другого шару металізації; 11 — контакт до області стоку; 12 — підзакривний діелектрик

за допомогою піролізу силану (Si_4) при температурі 620—625 °С. Техніка осадження з парової фази має переваги перед способами фізичного осадження: одержання матеріалів високої чистоти без радіаційних дефектів з високою рівномірністю товщини осадженої плівки, розмір зернин і рівень механічних напружень у якій можна регулювати. Цей технологічний процес має високу продуктивність і низьку вартість. Крім того, плівки, хімічно осаджені з парової фази, покривають поверхню напівпровідникової пластини з високої конформністю. Під конформністю розуміють однакову товщину осадженої плівки по всій поверхні пластини незалежно від її рельєфу.

Полікремній закрива можна осаджувати як на всю поверхню пластини, так і вибірково на необхідні ділянки. Провідниковий матеріал осаджують на термічно вирощену плівку підзакривного діелектрика та заданий малюнок затворного електрода формують реактивним іонним травленням.

Основним обмеженням застосування полікремнієвих плівок для МaВІС із високим ступенем інтеграції є високий питомий опір полікремнію. Типова товщина полікремнієвих доріжок, осаджених на плівку підзакривного діелектрика, становить 400—500 нм із поверхневим опором близько 20—30 Ом/квадрат.

Силіциди тугоплавких металів мають менший питомий електричний опір, ніж полікремній, але не забезпечують відтворюваності електричних характеристик ВІС.

Переваги полікремнієвих і силіцидних матеріалів проявляються при їхньому об'єднанні в полісайдні структури, у яких тонка (близько 0,2 мкм) полікремнієва плівка покривається шаром силіциду тугоплавкого металу. У полісайдній структурі полікремній забезпечує відтворюваність електричних характеристик транзисторів, а силіцид — низький питомий опір закривного електрода. Полісайдні структури мають високу стійкість до високотемпературного відпалу та окислювання. Заданий малюнок полісайдного закривного електрода шириною менше 1 мкм можна одержати без будь-яких дефектів. Крім того, при виготовленні такого електрода цілісність закривного діелектрика не погіршується.

Полісайдні структури виготовляють двома способами. Перший спосіб передбачає самосполучене вирощування плівки силіцидами металу закривного електрода відносно областей джерела та стоку. Технологічний процес виготовлення самосполученого силіциду включає осадження металу, його селективне травлення та відпал.

Силіцид формується тільки в області контактів метал — кремній за рахунок взаємної дифузії елемента під час відпалу структур.

Другий, найпоширеніший, спосіб полягає в наступному. Полісайдні структури виготовляють осадженням півки силіциду металу на поверхню полікремневої півки. Потім із двошарової півки (силіцид металу — полікремній) способами сухого травлення формують малюнок закривного електрода. Поверхню полісайдної структури пасивують шаром двоокису кремнію (SiO_2), вирощеним шляхом сухого або вологого окислювання багатого кремнієм силіциду.

Півки силіцидів тугоплавких металів можна одержати також хімічним осадженням з парової фази при взаємодії силана або дихлорсилана із хлоридом або фторидом металу.

Для закривних електродів застосовують також чисті метали, що володіють відносно низьким питомим опором і здатністю до формування тонкого малюнка. Придатність тугоплавкого металу визначається адгезією до підзакривного діелектрика, взаємодією із кремнієм і його оксидом, низькими механічними напруженнями в осаджених півках. Цим вимогам відповідають повною мірою тільки вольфрам і молібден. Півки молібдену та вольфраму осаджують магнетронним розпиленням. Після формування малюнка закривного електрода півки вольфраму добре тримаються в підшарі діоксиду кремнію (підзакривному діелектрику), у той час як півки молібдену легко сходять із підшару. Таке розходження в поведінці півок відбувається через більш високі розтягувальні напруження у півках молібдену, тобто кращою адгезією до Si_2 володіють півки вольфраму. Півки вольфраму товщиною 350 нм, використовувані в якості закривного електрода і виготовлені магнетронним розпиленням, мають поверхневий опір 0,25—0,3 Ом/квадрат.

Для створення контактів до областей джерела та стоку, виготовлених із кремнію n^+ - або p^+ -типу провідності, застосовують чистий алюміній і його сплави, силіциди напівблагородних (Pt, Pd, Ni) і тугоплавких (Ti, Mo, W) металів, а також чисті тугоплавкі метали (Ti, W).

Алюмінієві півки одержують вакуумним випарюванням або розпиленням на кремнієві пластини. Потім після формування малюнка контактів проводять упікання алюмінієвої металізації в області джерела й та стоку, нагріваючи пластину до 450—500 °C протягом 15—30 хвилин в атмосфері азоту або водню. Питомий опір півок при цьому звичайно збільшується на 5—10 %

у порівнянні з опором масивного матеріалу, що дорівнює $2,7 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$. Контактний опір переходу алюмінію — кремній знаходиться в межах $1\text{—}10 \text{ мкОм}/\text{см}^2$. Характеристики контакту метал — напівпровідник залежать від концентрації домішки на поверхні кремнію, типу провідності джерела та стоку і чистоти поверхні пластини перед нанесенням металу. Опір контактів алюмінію до сильнолегованих n^+ - і p^+ -областей кремнію може бути зменшений за рахунок здібності алюмінію відновлювати оксид кремнію. В процесі відпалу відбувається відновлення тонких оксидних плівок, що знаходяться на поверхні кремнію, до утворення безпосереднього контакту металу з кремнієм. Однак під час випікання алюмінію неконтрольовано дифундує в кремній (рис. 3.10), що призводить до замикання тонких p - n -переходів. Таке явище обумовлене тим, що взаємодія алюмінію металізації 3 з оксидом 5, що покриває кремній 1 джерела чи стоку, відбувається не по всій поверхні контакту, а по окремих каналах 4. Глибина каналу 4 може досягати 1 мкм. Крім того, розміри каналів збільшуються по мірі зменшення розмірів контактних вікон, утворених в діоксиді кремнію 2. З метою зниження впливу взаємодії алюмінію з кремнієм використовують сплави алюмінію з кремнієм. Сплав, що складається з алюмінію з доданням 1 % кремнію, має питомий опір $0,7 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$. Такий сплав виявляється критичним до умов упікання. Порушення оптимального режиму упікання призводить до збільшення контактної опору та ушкодження p - n -переходу. Слід відноситися також з обережністю і до наступних температурних обробок (це стосується і температурних режимів обробки при складанні МаВІС), особливо якщо наступні процеси проводять за більш високої температури, ніж упікання. Сплав $\text{Al}+1\% \text{ Si}$ задовольняє вимоги при глибині p - n -переходу більше $0,35 \text{ мкм}$ і розмірах контактних вікон більше $3 \times 3 \text{ мкм}$.

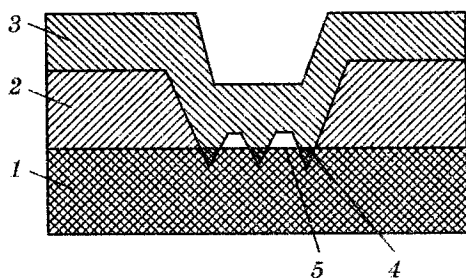


Рис. 3.10. Утворення каналів взаємодії алюмінію із кремнієм:
 1 — кремній джерела або стоку,
 2 — діоксид кремнію, 3 — алюмінієва металізація, 4 — канал взаємодії,
 5 — оксид на поверхні кремнію

якщо наступні процеси проводять за більш високої температури, ніж упікання. Сплав $\text{Al}+1\% \text{ Si}$ задовольняє вимоги при глибині p - n -переходу більше $0,35 \text{ мкм}$ і розмірах контактних вікон більше $3 \times 3 \text{ мкм}$.

Технологія одержання плівок з алюмінію і його сплавів також накладає обмеження на їхнє використання в МаВІС. Плівки, отримані випаруванням або розпиленням, не

конформні, погано покривають вертикальні бічні стінки контактних вікон, що викликає появу тріщин на краю сходинок оксиду та підвищення поверхневого опору. Деяке поліпшення конформності досягається осадженням плівки на нагріту до 200—300 °С пластину. Використання способу хімічного осадження з парової фази дозволяє одержувати конформні плівки, однак такі плівки мають більш грубу поверхню та низький коефіцієнт відбиття в порівнянні із плівками, отриманими випаруванням і розпиленням, що створює певні труднощі при фотолітографічній обробці.

Із силіцидів найбільш широко застосовуються силіциди платини, що дозволяють одержувати контакти до кремнію з питомим опором нижче $5 \cdot 10^{-8}$ Ом/см². Однак силіцид платини має низьку стабільність за високих температур (вище 850 °С). Крім того, при нагріванні вище 350 °С він взаємодіє з алюмінієм.

Силіциди тугоплавких металів мають переваги перед силіцидами напівблагородних металів, оскільки вони мають високу хімічну та термічну стійкість.

Силіцид титану має низький опір і не взаємодіє з алюмінієм за температури до 550 °С, а силіцид вольфраму термостабільний за температури аж до 900 °С.

Із чистих тугоплавких металів, що використовуються для створення контактів до кремнію, перевагу варто надавати вольфраму, що має високу провідність (малий питомий опір), здатний витримувати високу температуру в інертній атмосфері, має температурний коефіцієнт лінійного розширення, близький до температурного коефіцієнта лінійного розширення кремнію, забезпечує низький контактний опір із кремнієм, при травленні добре оброблюється, дозволяючи одержувати малюнок мініатюрних контактів.

Вольфрам осаджують на кремній, використовуючи реакцію відновлення газоподібного гексафториду вольфраму воднем. Плівки вольфраму відразу після осадження мають питомий опір 0,12—0,17 мкОм·см.

В якості матеріалів струмоведучих доріжок при сполученні елементів МaBIC використовують алюміній і його сплави із кремнієм і (або) міддю. Основними недоліками чистого алюмінію і його сплаву із кремнієм при використанні їх для струмоведучих доріжок є утворення на доріжках горбків і порожнеч у процесі впакування, а також руйнування доріжок за рахунок електроміграції. Різниця в температурних коефіцієнтах лінійного розширення алюмінію та матеріалу пластини створює напруження стиску в алюмінієвих плівках. У процесі впакування за температури 400 °С

перерозподіл механічних напружень викликає утворення горбків (алюміній деформується) і порожнеч. Горбки можуть досягати висоти до 2 мкм і бути причиною двох видів дефектів (міжшарові замикання в багатошарової металізації та зміни коефіцієнта відбиття металу, що призводить до ускладнень при виконанні фотолітографічних процесів).

Електроміграція — це перенос маси провідникового матеріалу під дією прохідного по ньому електричного струму високої щільності. Електроміграційні пошкодження проявляються в утворенні порожнеч (у місцях виснаження алюмінію) і горбків (у місцях скупчення атомів алюмінію), що призводить до розриву струмоведучих доріжок у схемах. При збільшенні щільності прохідного по струмоведучих доріжках струму та зменшенні ширини доріжки ймовірність електроміграційних пошкоджень зростає. Крім того, збільшення щільності струму відповідно до закону Джоуля — Ленца веде до збільшення температури провідника, дифузійна здатність атомів підвищується зі зменшенням ширини доріжки або збільшенням щільності струму. Теплота, що виділяється при протіканні струму по провіднику, розсіюється через ізолюючий і пасивуючий верхній шари. При неякісній металізації (наявності дефектів в осаджених плівках, поганій адгезії між провідниковими та ізолюючими плівками) у різних точках схеми буде створюватися перепад температури, тобто на поверхні кристала МаВІС будуть виникати області з різною температурою. У цьому випадку порожнечі в струмоведучих доріжках формуються на ділянках з підвищеною, а горбки — на ділянках зі зниженою температурою.

Електроміграція в тонких струмоведучих доріжках є основним чинником, що визначає надійність МаВІС.

На стійкість провідників до електроміграції впливають розмір зернин і їхня переважна орієнтація в металевих плівках. Руйнування провідників з Al + 1 % Si, що мають розмір зернин 1,7—2,4 мкм, відбувається в 25—30 разів повільніше, ніж провідників із дрібнозернистою структурою, що мають розмір зернин 0,5—0,9 мкм. Збільшення вмісту кремнію в алюмінієвому сплаві викликає зменшення розміру зернин і, отже, прискорене руйнування провідників.

Стійкість струмоведучих доріжок до електроміграції значно підвищується при додаванні в алюмінієвий сплав таких елементів, як мідь, нікель, хром, магній. Складний сплав алюмінію з невеликими добавками міді, магнію й нікелю має найбільший час наросту на відмову, однак присутність магнію знижує корозійну стійкість провідника.

Добавка міді знижує дифузію атомів алюмінію по границях зернин і тим самим перешкоджає утворенню горбків і порожнеч. Вміст міді в сплаві змінюється в межах 0,5—4 %. Питомий опір сплавів алюміній — мідь залишається досить низьким. Кожний відсоток міді, доданої в алюмінієву плівку, збільшує її питомий опір на 0,3 мкОм·см.

До недоліків алюмінієвих плівок з добавками міді відносять складність формування малюнка струмоведучих доріжок способом плазмохімічного травлення. Це відбувається через те, що мідь не утворює легколетючих сполук з елементами газів-реагентів і вони залишаються у вигляді опадів на поверхні пластини.

Плівки сплаву алюмінію з міддю одержують випаром електронним променем, індукційним нагріванням або магнетронним розпленням. Кращою стійкістю до електроміграції володіють металеві плівки, отримані електронно-променевим випаром з осадженням на окислену кремнієву пластину, нагріту до температури 310—330 °С.

Підвищити стійкість струмоведучих доріжок до електроміграції можна, помістивши між двома шарами сплаву Al + 4 % Cu проміжний шар перехідного металу (хрому, титану, танталу, гафнію). Таку багатошарову металеву плівку виготовляють у єдиному технологічному процесі за допомогою електронно-променевого випару. Спочатку осаджують випаром із двох джерел перший шар сплаву Al + 4(2) % Cu товщиною 500 нм, потім осаджують шар перехідного металу, поверх якого знову осаджують шар сплаву алюмінію з міддю товщиною 500 нм.

Після осадження багатошарової металевої плівки й формування малюнка провідників шириною 1—2 мкм пластини нагрівають в інертній атмосфері до 400 °С і витримують протягом 1 год. Така обробка приводить до утворення інтерметалідних сполук (CrAl_7 , TiAl_3 , TaAl_3 , HfAl_3), які забезпечують збільшення в 100 разів часу наробітку на відмову таких плівок у порівнянні із плівками сплаву алюмінію з міддю. Шар інтерметалідної сполуки запобігає утворенню міграційних порожнеч у верхній плівці.

Розглянуті вище матеріали й технологічні процеси їхнього виготовлення дозволяють формувати надійну багатошарову комутаційну структуру на поверхні кристала МаВІС.

У розглянутому технологічному процесі виготовлення багатошарової металізації як ізолюючі плівки використаний діоксид кремнію. На практиці застосовують також і інші матеріали: нітрид

кремнію (Si_3N_4), оксид алюмінію (Al_2O_3), а також полімерний матеріал (поліімід).

Багатошарова металізація — складна структура, тому необхідно обмежувати термічні й силові впливи при виконанні складальних операцій для запобігання ушкодження MaBIC.

У процесі розробки BIC, HBIC, ультра-BIC виникають наступні проблеми:

- сполуки в топології HBIC займають до 80 % площі кристала;
- паразитні індуктивності вузьких, тонких, хоч і не дуже довгих провідників перешкоджають збільшенню швидкодії. Збільшення швидкодії понад 300...500 МГц навряд чи можливе при традиційному способі реалізації міжелементних зв'язків усередині IC;
- площа перерізу сполучних провідників скорочується й наближається до $1 \times 0,2$ мкм, що при струмі в провіднику порядку 10 мА дає щільність струму 50 А/мм^2 . При цьому випадкові тоншення провідника ведуть до інтенсивної електроміграції алюмінію та внаслідок цього росту інтенсивності відмов мікросхем;
- мінімальний об'єм напівпровідника, укладеного, наприклад, в області каналу МОН-транзистора, наближається до $0,01 \times 1 \times 10$ мкм = $10\text{—}13 \text{ см}^3$. При концентрації носіїв $N = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ число зарядів у всій області каналу близько до 10^3 . Традиційний статистичний опис процесів при цьому перестає діяти. Зростають дробовий шум, імовірність перекручувань інформації, викликаних квантами фонового радіаційного випромінювання.

3.4. Феромагнітні рідини

Феромагнітні рідини, вперше отримані в їхній сучасній формі на початку 1960-х років, являють собою колоїди з магнітних наночасток (діаметром близько 10 нм), вкритих поверхово активною речовиною (ПАР) і суспендованих у якому-небудь носії (дисперсійній сфері). ПАР забезпечує стабільність колоїду, а як носій може використовуватися трансформаторне масло, вода або керосин. Наночастки поведуться як повністю незалежні постійні магніти, тому повна намагніченість такої феромагнітної рідини дорівнює нулю доти, поки до неї не прикладене магнітне поле. Поводження колоїду в магнітному полі визначається характером поля. Наприклад, в обертовому магнітному полі наночастки починають

обертатися, втягуючи у свій рух і рідину-носії. Принципова відмінність феромагнітних нанорідин від звичайних рідин полягає в тому, що всередині цих рідин при наявності поля виникають об'ємні й поверхневі сили, а також пов'язані з ними обертаючі моменти, у результаті чого спостерігаються незвичайні гідромеханічні явища [Rosencweig, 2005].

Магнітні рідини типу магнітореологічних суспензій (з більш великими частками, розміром > 100 нм), на відміну від феромагнітних рідин у сильних магнітних полях виявляють тенденцію до «застигання».

У сучасних пристроях феромагнітні рідини використовуються в дуже невеликих кількостях (~ 10 мл), що обумовлено їхньою високою вартістю. Поточні обсяги ринку становлять приблизно 30—60 млн дол.

Магнітне маніпулювання наночастками у феромагнітних рідинах створює унікальну можливість дистанційного регулювання їхніх параметрів (тиску, в'язкості, електро-, теплопровідності та оптичної проникності).

Наномагнітні рідини — зручний об'єкт для експериментальної перевірки існування торсіонних полів і можливості одержання енергії з торсіонних джерел і фізичного вакууму, що є довгостроковим предметом спорів різних наукових шкіл [Шипов, 1997].

Звичайно в якості феромагнітних рідин використовуються частки магнетиту Fe_3O_4 . Феромагнітні рідини вже комерційно використовуються в декількох застосуваннях [Пул, 2007]. Вони слугують герметиком, що перешкоджає проникненню пилу всередину корпусу жорстких дисків персональних комп'ютерів, і вакуумних ущільнювачів обертових осей, що входять у високовакуумні зони.

В останньому випадку рідина використовується для герметизації щілини між обертовим валом та опорою, що його підтримує (рис. 3.11).

Ущільнення між обертовим валом з матеріалу з високою магнітною проникністю та нерухливими полюсами постійного магніта складається з декількох крапель феромагнітної рідини в проміжку між шпинделем і втулкою, у якості якої

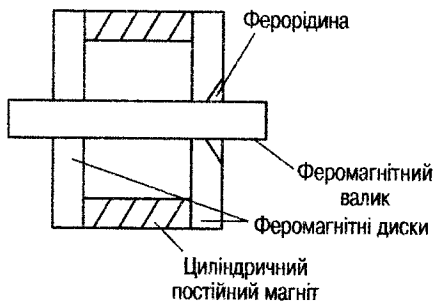


Рис. 3.11. Феромагнітна нанорідина в якості вакуумного закрива

використовується циліндричний постійний магніт. Рідина утворює навколо осі непроникне кільце, що не викликає, однак, суттєвого тертя.

Аналогічні ущільнення використовуються в акустичних динаміках для демпфірування мембрани, в обладнанні для виробництва напівпровідникових кристалів, пристроях для одержання ЯМР-зображення та комп'ютерної скануючої томографії. Анізотропія оптичних властивостей феромагнітних рідин залежить від магнітного поля, що використовується в магнітокерованих оптичних перемикачах і дифракційних решітках.

Коли лінійно поляризоване світло падає на плівку феромагнітної рідини, що перебуває в магнітному полі, воно виходить із іншої сторони плівки еліптично поляризованим. Це називають ефектом Коттона — Мутона. Він може бути покладений в основу оптичних перемикачів.

При поміщенні плівки феромагнітної рідини в досить сильне постійне магнітне поле, спрямоване перпендикулярно до плівки, агреговані в ланцюжки феромагнітні наночастки утворюють рівноважну двовимірну гексагональну ґратку. Така структура може виступати в якості двовимірної оптичної дифракційної ґратки, проходячи крізь яку світло буде дифрагувати, утворюючи кільця світлих і темних ділянок, що чергуються. Ця структура утворюється в результаті дифракції паралельного пучка білого світла на плівці феромагнітної рідини, розміщеної в магнітному полі.

Дифракційна картина визначається рівнянням

$$d \sin \theta = n\lambda,$$

де d — відстань між ланцюжками наночасток; θ — кут між нормаллю до поверхні плівки та пучком світла, що з неї виходить; λ — довжина світлової хвилі; n — ціле число.

Відстань d залежить від напруженості H прикладеного магнітного поля, що дозволяє одержати дифракційну ґратку, що перебуває змінюючись H .

Зараз ведуться розробки пристроїв з феромагнітними рідинами для поліпшення охолодження та електроізоляції силових трансформаторів, охолодження великих населених космічних станцій, змащення й утримання мастила всередині нанорозмірних вала-підшипника, для магнітного регулювання температури малих пристроїв, наприклад електронних компонентів [Уайтсайдс (Кейдер), 2002].

3.5. Фотонні кристали

Фотонні кристали — тривимірні суперґратки або матеріали з фотонною забороненою зоною — тривимірні наносистеми, в яких виявлені квантоворозмірні та інші наноефекти, такі як, наприклад, нелінійна взаємодія між індивідуальними нанокластерами електронної підсистеми. Розроблено технологію виготовлення правильних кубічних упакувань монодисперсних наносфер SiO_2 і заповнення міжсферичного простору напівпровідниками, надпровідниками, оптично посилюючими, феромагнітними й іншими матеріалами [Самойлович, 2004]. Фотонні кристали — це новий клас діелектриків, у яких здійснюється формування та контроль електромагнітних випромінювань на мікроскопічному рівні.

Остання властивість визначається новим фундаментальним оптичним явищем, обумовленим ефектом локалізації оптичних мод, що призводить до запуску спонтанної емісії в певних випадках, формування зонних станів, зниження порогів нелінійних явищ, лазерної генерації.

Застосування опалових матриць в якості підкладок дозволяє збільшити опромінювану поверхню напівпровідникової структури при тому ж об'ємі пристрою. Слід зазначити, що в 1 см^3 опалової матриці з діаметром наносфер SiO_2 , що дорівнює 200 нм, сумарна поверхня становить 10 м^2 . Локалізація світла призводить до придушення спонтанної емісії, формування зонних станів, низькопорогових нелінійних явищ, до низькопорогової перемикаючої дії колективу атомів.

Легований матеріал з фотонною забороненою зоною може бути використаний в якості ультрашвидкого оптичного перемикача й оптичного транзистора. У цьому випадку перехід між режимами поглинання та посилення може керуватися слабким другим лазерним полем (у фазі й у резонансі з основним полем накачування).

Фотонний кристал є надґраткою (crystal super lattice) — середовищем, у якому штучно створене додаткове поле з періодом, що на порядки перевищує період основної ґратки. Для фотонів таке поле одержують періодичною зміною коефіцієнта заломлення середовища — в одному, двох, трьох вимірах (1D, 2D, 3D-фотонні структури відповідно). Якщо період оптичної надґратки порівняний з довжиною електронної хвилі, то поведінка фотонів кардинально відрізняється від їхньої поведінки в ґратці звичайного кристала, вузли якого перебувають один від одного на відстані, багато меншій, ніж довжина хвилі світла. Тому такі ґратки й одержали особливу назву — фотонні кристали.

У фотонних кристалах можлива поява ефекту Вавилова — Черенкова — утворення конусоподібного хвильового фронту світлового випромінювання при русі часток у речовині зі швидкістю, що перевищує швидкість світла в даному середовищі, ефекту негативної рефракції, зверненого ефекту Вавилова — Черенкова та ін.

Фотонні кристали, що не поглинають світло, називаються фотонними ізоляторами; ті, що не поглинають та не пропускають світло — ідеальними дзеркалами; ті, що не поглинають та не відбивають світло — фотонними надпровідниками.

Фотонні кристали звичайної просторової розмірності — одновимірні дифракційні ґратки (1D), двовимірні матриці неоднорідностей — шари (2D) і тривимірні кристали — по суті своїй статичні. Застосування динамічних неоднорідностей у структурі кристала дозволяє додати ще одну розмірність — час. Таким чином, завдання закону зміни в часі оптичних властивостей елементів фотонного кристала дозволяє одержати середовище для фіксації повної просторово-тимчасової передатної функції об'єкта.

Крім того, поведінка в часі оптичних властивостей елементів фотонного кристала може залежати від просторового розподілу електромагнітного поля (світла) у ньому.

У фотонних кристалах, що найчастіше є істотно нелінійними оптичними середовищами, здатні виникати явища самоорганізації структурних неоднорідностей, що може означати принципову можливість функціональної самоорганізації кристала як пристрою.

3.6. Кераміка

Керамічні матеріали мають багато важливих властивостей, що визначають їхню роль у матеріалознавстві та електроніці. Вогнетривкість, зносостійкість, твердість, міцність, іноді й пористість роблять їх незамінними в багатьох застосуваннях.

Керамікою часто є оксиди — структури, у яких один з атомів є киснем. Керамічні матеріали побудовані з декількох типів атомів.

Глина — це переважно оксид алюмінію (Al_2O_3), пісок утворений з діоксиду кремнію (SiO_2), вогнетривка цегла — це оксид силікату магнію ($MgSiO_3$), а оксид кальцію — важливий компонент метлахських плиток (CaO).

Кераміка зазвичай є електроізоляційним матеріалом. При дуже сильному охолодженні деякі керамічні матеріали мають властивості надпровідників.

Кераміка має найбільший потенціал для таких застосувань, як заміна кісток.

Окис берилію BeO — ізоляційний матеріал з високою теплопровідністю (210 Вт/м·град), але потребує спеціального поводження, оскільки може викликати тяжкі захворювання бериліозом різних видів (органів дихання, очей, шкіри та ін.).

Глинозем Al_2O_3 — конструкційний матеріал і досить теплопровідний (7,0 Вт/м·град) широко використовується в якості підкладок і корпусів напівпровідникових, товстоплівкових та мікросистемних схем.

Двоокис кремнію застосовується для виготовлення оптичних волокон. Нанорозмірні металооксидні порошки використовуються для знезаражування бойових отруйних речовин і для захисту військового складу та населення.

Нанопориста кераміка являє собою приклад самоутворених структур на основі оксидів металів. За термінологією НЮПАК, 1972 рік, матеріали з порами менш ніж 2 нм належать до мікропористих, від 2 до 5 нм — до мезопористих, а більш ніж 5 нм — до макропористих структур. Високопористі керамічні матеріали використовуються для протезування кісток, керамічних фільтрів.

Нанофазні керамічні матеріали дозволяють виготовляти гарячим куванням у штампах виробу готової форми з розмірами, обумовленими параметрами штампа, без додаткової механічної обробки. Нанопорошки кераміки та керметів, що випускаються в промисловому масштабі, можуть використовуватися як зносостійкі покриття металообробних інструментів, що наносяться методом термічного напилювання.

У повідомленні про використання біокерамічних фільтрів з пористої кераміки, заселеної бактеріями, відзначається здатність поглинати швидко й у незвичайно великих кількостях уран з води, що просочується крізь кераміку. Поглинається від 86 до 99 % урану. Уран для бактерій не отруйний, тому що в їхніх клітинах є білок, що зв'язує цей важкий метал. Відомі радіаційностійкі види кераміки, вогнетривкі, надтверді, надміцні, з високою теплопровідністю та ін.

Більшість розглянутих вище груп матеріалів, починаючи із кремнію, нітриду кремнію та ін. можуть виконувати функції конструкційних деталей і вузлів МЕМС.

3.7. Полімерні матеріали

Області використання полімерів постійно розширюються. За прогнозами [Кравченко, 2002] незабаром з'являться перші жорсткі диски на полімерах з тепловим записом інформації, а до 2020 року кремній у комп'ютерах буде витиснутий полімерами й біополімерами. Поряд зі склом полімери використовуються у волоконній технології МЕМС [Суховеев, 2004]. ПММА — поліметилметакрилат, матеріал, що входить до складу багатьох сполук фоторезистів, дозволяє одержувати 3D-компоненти на кремнієвих підкладках.

Полімери складаються з великої кількості однотипних молекул — мономерів. Розрізняють природні, штучні та синтетичні полімери [Андреев, 1989]. У свою чергу вони можуть мати різні розміри, обумовлені ступенем полімеризації n — числом ланок у ланцюзі.

Якщо $n = 10 \dots 20$, речовини являють собою легкі масла. Зі збільшенням n підвищується в'язкість, речовина стає воскоподібною. При $n \approx 1000$ утворюється твердий полімер. Ступінь полімеризації необмежений. При $n \approx 500 \dots 1000$ утворюються короткі ланцюжки — олігомери, що мають низьку в'язкість. Часто використовуються для просочення, приклеювання.

Для одержання полімерів використовуються наступні методи: термічна, фотополімеризація, електрохімічна, вакуумна, НВЧ, лазерна, стереополімеризація та ін.

Полімери використовуються в якості фоторезистів, клеїв, а також для просочення, заливання, обволікання, функціональних шарів і корпусів приладів. Крім цих традиційних функцій, розроблені різні аналоги механічних і електричних компонентів на основі полімерів.

Розрізняють два основних методи синтезу полімерів: полімеризація та поліконденсація. При полімеризації молекули просто приєднуються одна до іншої. Мономери в цьому випадку при включенні в полімер зберігають свою первісну структуру. Поліконденсація — процес утворення полімерів, при якому з'єднання вихідних моновимірних молекул супроводжується виділенням простих речовин, таких як HCl , H_2O , NH_3 та ін. У цьому випадку повторювані ланки полімеру та вихідних мономерів не є хімічно ідентичними.

Полімери можуть утворювати короткі ланцюги, довгі ланцюги, довгі розгалужені ланцюги, зоряні структури, сітчасті структури, об'ємні 3D-структури.

Для процесів фотолітографії МЕМС та НТ важливий механізм фотополімеризації [Невлюдов, 2007]. Технологія фотополімеризації має наступні переваги:

- висока швидкість процесу та, отже, його велика продуктивність;
- простота, економічність, можливість автоматизації;
- процес не вимагає високих температур нагрівання;
- низьке споживання енергії;
- екологічність завдяки малим викидам органічних речовин;
- низька вартість обладнання.

Фізико-хімічні процеси фотополімеризації докладно висвітлені в багатьох роботах [Черняев, 1986; Ефимов, 1986]. Там же наведені властивості низки позитивних і негативних фоторезистів на основі поліметилметакрилату (ПММА) та ін.

Спеціальний негативний фоторезист SU-8 розроблений для систем з дуже товстими шарами, що мають високі аспектні відношення (> 20). Фоторезист належить до епоксидних смол. Фоторезист експонується УФ-променями, широко використовується для виготовлення таких мікромеханічних елементів як шестірні, катушки індуктивності, консолі та борозни, мембрани. У поєднанні зі стереолітографією застосовується для одержання 3D-систем з полімерних матеріалів.

SU-8 має чудові адгезійні якості практично до будь-яких підкладок, з нього виготовляють структури великої товщини (до 2 мм).

Сполука SU-8: епоксидна смола EPON-8, органічний розчинник GBL (гамма-бутилореактон), фотоініціатор (10 % від ваги EPON SU-8) — триарилсульфонова сіль. Співвідношення смоли та розчинника визначає в'язкість і, отже, товщину резистивного шару.

Проявлення після експонування УФ здійснюється в оцтовому ефірі метилпропиленгликоля (PGMEA). Матеріал в областях, які не опромінювалися, розчиняється.

Відомості про фоторезисти в термо- і фотоініційованій нанолітографіях наведені в розділі 7.1, що описує наноімпринтинг.

3.8. ДНК

Крім синтетичних, існують біологічні полімери — молекули ДНК, що зберігають генетичну інформацію (ДНК і РНК — нуклеїнові кислоти), білки, вуглеводи та полісахариди.

Існує чотири великих класи біологічних молекул. Перші три — нуклеїнові кислоти, білки та вуглеводи.

Четвертий клас біологічних молекул складається з дуже малих молекул. У їхнє число входить вода, кисень, діоксид вуглецю та оксид азоту. Вода необхідна для функціонування практично всіх біологічних організмів, кисень є основним джерелом енергії, двоокис вуглецю слугує сировиною для побудови рослин, а оксид азоту виконує в біології багато функцій — від забезпечення внутрішньоклітинної системи зв'язку до участі у функції скорочування.

Існують і інші молекули, важливі в біологічних застосуваннях: простий цукор, всі молекули медикаментів. Ліки звичайно діють, зв'язуючись або з білком, або із ДНК і викликаючи зміни у функціях цих структур.

Біологічні клітини містять всередині себе досконалі «молекулярні двигуни» F_1 — АТФази з розмірами менш ніж 10 нм, що є зберігачами та переносниками енергії по біологічних об'єктах.

Із чотирьох основних полімерних біологічних структур: нуклеїнових (ДНК — дезоксирибонуклеїнових і РНК — рибонуклеїнових) кислот, білків, вуглеводів (полісахаридів) і «малих молекул» особливе місце в НТ займають ДНК. ДНК є унікальною молекулою, яка має вигляд подвійної спіралі. Молекули, що їх складають, розташовуються на подвійній спіралі в певному порядку та кодують всі біологічні функції живого організму. Багато які з біологічних процесів протікають на нанорівні.

Низка хімічних процесів, а також біохімічних із ДНК ланцюжками дозволяють створювати інтелектуальні матеріали. Структура матеріалів, що складаються із ДНК, може бути вивірена з молекулярною точністю. Спіраль ДНК діаметром приблизно в 2 нм робить повний оборот (крок спіралі) за 3,5 нм (рис. Д8.24).

Відрізки ДНК можна використовувати для розпізнавання деяких молекул і для каталітичного керування сполукою матеріалів. Розпізнавання — один зі способів створення інтелектуального матеріалу. Він полягає в реагуванні матеріалу тільки на певні умови, наприклад на конкретні хімічні або електромагнітні збурення або подразники. Так звані молекулярні металеві квадрати є одними із найчутливіших сенсорів у світі, здатних виявляти менше 10 молекул шуканої речовини [Ратнер, 2004].

ДНК може мати одну з чотирьох будов (АТ, ТА, ЦГ, ГЦ). Для кожного положення в ланцюзі можна контролювати, яка комплементарна пара присутня, тому що вони утворюються з набору всього чотирьох молекул, які називаються аденином (А), тиміном (Т), гуаніном (Г) і цитозиним (Ц). А й Т підходять тільки один до одного та не підходять ні до Г, ні до Ц. Г і Ц також підходять тільки один до одного та не підходять ні до А, ні до Т. Таким чином, єдиними можливими парами є АТ і ГЦ і протилежні їм — ТА й ЦГ.

Генетичний код — це просто впорядковані комплементарні пари в подвійній спіралі ДНК, і це — код, що зчитується РНК і білками, які використовують цю інформацію для створення білкових біологічних структур, що становлять основу життя.

ДНК ланцюжки можна запрограмувати так, щоб вони самозби-
ралися в необхідні структури. Вони можуть підтримувати елек-
тронні пристрої молекулярних розмірів або використовуватися
для створення матеріалів з точно заданими молекулярними
конфігураціями.

Машини із ДНК можуть виконувати рухи, якими можна керу-
вати хімічним шляхом або за допомогою спеціальних ланцюжків
ДНК (рис. Д8.25).

Наномеханічний В-Z пристрій, що демонструє керований рух,
складається із двох блоків DX (синій і оранжевий), з'єднаних
«валом» з 20 пар основ (фіолетовий). Дві кольорові пофарбовані
молекули (срібні та золоті сфери) виділяють кольором положення
DX-молекул. У стані В (зверху) «вал» — це звичайна правобічна спі-
раль В-ДНК, і обидві DX-молекули перебувають з одного боку від
«вала». Коли до розчину додається гексаїн кобальту, «вал» перетво-
рюється в лівосторонню Z-ДНК і DX-блоки повертаються на 3,5 обо-
роти відносно один одного, виявляючись по різні боки від «вала».

Із ДНК можна будувати тривимірні структури. ДНК керують за
допомогою ферментів розщеплення, що розколюють ДНК у по-
трібних місцях, які каталізують сполучення двох молекул кова-
лентними зв'язками (рис. Д8.26). Синтез виконується засобами
біотехнологічної промисловості.

3.9. Інтелектуальні матеріали

Здатність працювати на атомному та молекулярному рівні дає
можливість створювати нові, «інтелектуальні» матеріали, тобто
матеріали, що володіють у статичному або динамічному режимі
властивостями самовідновлення, розпізнавання, поділу, самореплі-
кації, каталізаторів, нанокомпозитів з декількома особливостями.

Прикладами природних інтелектуальних матеріалів можуть
бути багато які з біологічних об'єктів:

- людська шкіра самовідновлюється після порізів, травм, поранень. Аналогічними властивостями володіють біологічні мембрани;
- біологічні клітини через канали забезпечують переміщення живильних речовин усередину клітини, а відходів у навколишнє середовище (розпізнавання);

- поділ на компоненти пропусканням крізь мікро- та нанопори полімерних і кристалічних матеріалів (ультра- і нанофільтрація).

Інтелектуальними називаються матеріали, які мають яку-небудь із наступних властивостей:

- здатність реагувати тільки на певні умови;
- здатність поділу на компоненти, з яких складений матеріал;
- можливість молекулярного розпізнавання, що дозволяє їм реагувати на певні хімічні або інші збурення або подразнення;
- здатність самовідновлення;
- здатність самоорганізації, розвитку, самоскладання, реплікації, спрямованого інформаційно-хімічного синтезу.

Інтелектуальні матеріали можуть працювати статично або динамічно, тобто постійно зберігаючи певні властивості, або змінюючи їх залежно від зміни навколишнього середовища або впливів на матеріал [Ратнер, 2004].

Так, фторопласт постійно зберігає властивості низького зчеплення (адсорбції та тертя), тобто є статичним інтелектуальним матеріалом, а покриття літаків-невидимок «Стелс» змінює електромагнітні властивості й колір при впливі на нього зовнішнього опромінення, тобто реагуючи динамічно.

Практично всі біологічні структури є інтелектуальними матеріалами, маючи які-небудь властивості самовідновлення, розвитку, самоорганізації, реплікації, метаболізму, розрізнення.

Наноскопічним прикладом самовідновлення може бути біологічна мембрана, що самовідновлюється в наномасштабі. Подібну властивість можна вбудувати в багато матеріалів, наприклад, полімери.

Самовідновлення тіла після порізів, кровноносних судин у біологічних об'єктах може імітуватися й у синтетичних середовищах.

Наприклад, масло на сковорідці. Якщо провести лопаткою по дну сковорідки, масло тимчасово вийде з лінії, проведеною лопаткою. Однак зв'язаність молекул плівки призведе до того, що масло потече назад, гладко заповнюючи розчищений слід. Автомобільні шини, що самовідновлюються, є класичним прикладом, хоча заростання проколів в первинній структурі відбувається на макроскопічному рівні.

Тканина Gore-Tex є інтелектуальним матеріалом із двома функціями: вона дозволяє виходити водяній парі (так що людина, яка одягла одяг із цієї тканини, не пітніє) і не пропускає воду (так що людина не промокає).

Це досягається наявністю в матеріалі нанопор, що пропускають малі молекули пари та не пропускають більші частки рідини.

Група матеріалів, що називаються *сидерофорами*, спеціально спроектовані так, що вони містять певні заряджені частки (атоми азоту, сірки та кисню) для захоплення іонів бажаних металів, тобто діють як наноскопічні «ручки».

Найпоширенішим способом поділу компонентів є пропущення крізь пори. У поділі широко використовуються полімери та кристали з невеликими порами. Процес називається ультрафільтрацією або нанофільтрацією та використовується для очищення стічних вод, виведення токсинів, очищення газів та ін.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які види матеріалів використовуються у виробництві МЕМС та НТ?
2. Чому кремній використовується для виготовлення мікромеханічних вузлів і деталей МЕМС?
3. Які технологічні заходи необхідно забезпечувати при обробці мікромеханічних кремнієвих виробів?
4. Які види протравлювачів використовуються при травленні Si?
5. Які особливості травлення кремнію мають EDP, HNA і KOH?
6. Якими причинами обумовлюється властивість анізотропного травлення кремнію?
7. Якими фізичними явищами пояснюється дія стоп-шару, сильнолегованого бором кремнію?
8. Перелічіть відомі на цей час форми вуглецю, що використовуються в електроніці.
9. Якими властивості має графен?
10. Які фундаментальні положення релятивістської електродинаміки сподіваються перевірити експериментально на графені?
11. Що таке вуглецеві нанотрубки?
12. Як одержують вуглецеві нанотрубки?
13. Що таке хіральність нанотрубок?
14. Який тип нанотрубок має найвищу електропровідність?
15. Що таке фотонні кристали?
16. Які властивості фотонних кристалів?
17. Полімери, що використовують в МЕ, МЕМС, НТ.
18. Структура ДНК, основні властивості.
19. Які перспективи використання ДНК-структур в електроніці?
20. Властивості алмазів, що використовуються в спінтроніці.
21. Які властивості магнітних нанопорошків відрізняють їх від макропорошків?

4 ТЕХНОЛОГІЇ MEMS

У наш час уже визначився ряд типових технологічних методів виготовлення МСТ, які використовують досягнення різних галузей фундаментальної науки. Їх представлено на рис. 4.1. Серед цих методів, у першу чергу, необхідно відзначити поширення традиційної напівпровідникової КМОП-технології на виготовлення мікромеханічних пристроїв на кристалах кремнію з використанням підкладки одночасно в якості як конструкційного матеріалу для механічних деталей і складальних одиниць так і матеріалу для електронних схем. Але якщо у звичайній напівпровідниковій технології структура матеріалу змінюється лише в поверхневому шарі, то для MEMS необхідні тривимірні (3D) структури, які викликають необхідність удосконалювання стандартних процесів. Такі технологічні процеси можна характеризувати як напрямок «вниз» [Вернер, 2005], тобто від більших розмірів до менших за рахунок поліпшень вихідної технології.

Серед технологій цього напрямку необхідно розрізнявати технології об'ємної обробки, технології поверхневої обробки та змішані технології, які використовують операції двох перших технологій, що забезпечують одержання високого аспектного відношення.

До об'ємних технологій належать: LIGA, SLIGA, AMANDA, HARM.

Поверхневі процеси використовуються в MUMPS, SUMMIT, SUMMIT-V, IMEMS, LPCDV.

Змішані технології SCREAM, HARPSS, RIE.

Відомо близько 20 методів виготовлення MEMS-виробів з використанням напівпровідникових технологій та їхня кількість безупинно збільшується. Перелічимо найбільш відомі методи:

LIGA — Lithographic, Galvanoformung, Abformung (німецькі — літографія, гальваніка, формування (лиття));

SLIGA — Sacrificial LIGA, LIGA з жертвним шаром;

MUMPS — Multi User MEMS Process Silicon, універсальні процеси для MEMS;

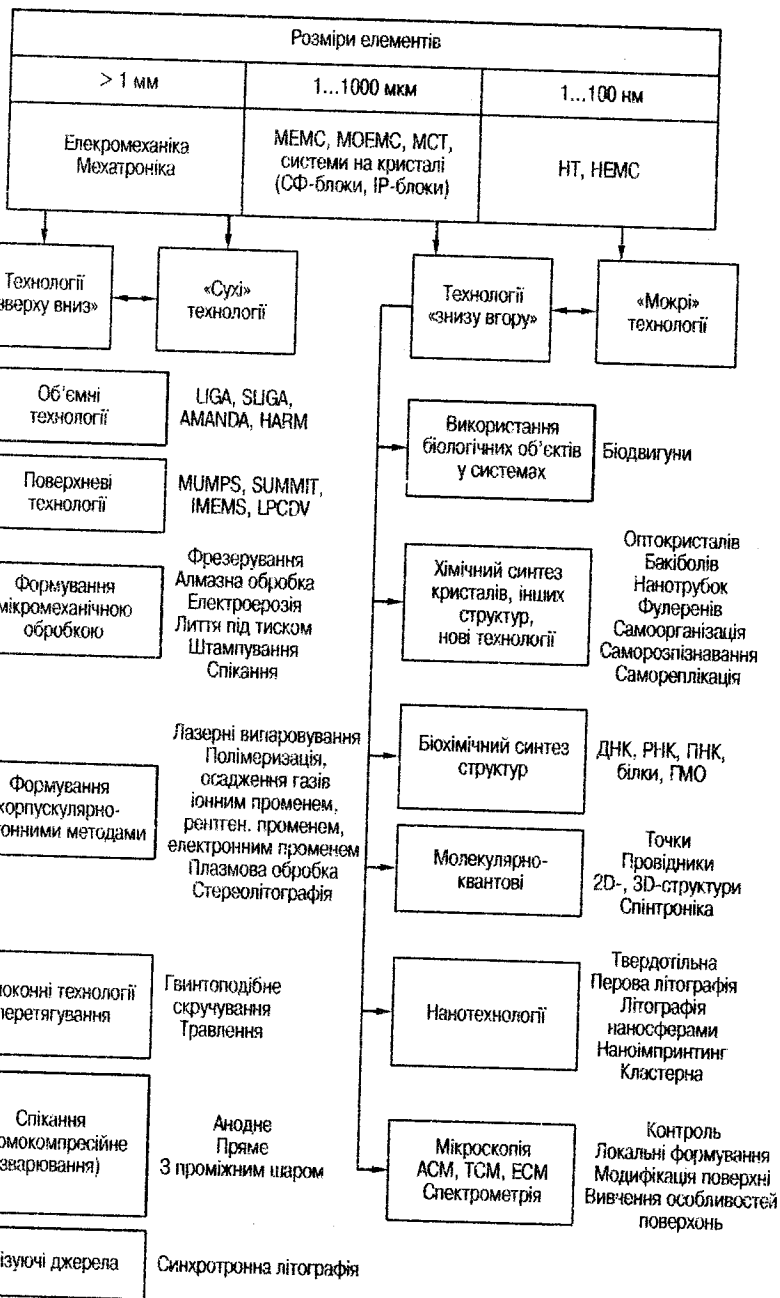


Рис. 4.1. Класифікаційна схема технологій MEMS, НЕМС

SEIMS — Sandia Embedded Integrated, убудовувані інтегровані MEMC фірми Sandia National Laboratory;

SEM — Simultaneously Electroplating Machining (сумісна гальванічна обробка);

SUMMIT — Sandia Ultra-Planar Multi-layer MEMS Technology (технологія багат шарових MEMC з вирівнюванням ф. Sandia);

HARM — High Aspect Ratio Machining, обробка (із забезпеченням високого аспектного відношення глибини до латеральних розмірів);

HARPSS — High Aspect Ratio Polysilicon Silicon, обробка полікремній-кремній структур із забезпеченням високого аспектного відношення;

SCREAM — Single Crystal Reactive Etching and Metallization — вертикальне об'ємне травлення кремнію з металізацією, що є комбінацією анізотропного й ізотропного плазмового травлення;

LPCVD — Laser Processing chemical Vapor Deposition (процес лазерного хімічного парового осадження);

iMEMS — integrated MEMS (система ЧЕ датчиків і схема обробки сигналів виготовляються на одному кристалі);

LIGA+SEB — LIGA плюс Selective Electroplate Bonding складання-монтаж методом селективного електроосадження та складання;

EDM — Electrical Discharge Machining, електроерозійна обробка;

RIE — Reactive Ion Etching (реактивно-іонне травлення);

AMANDA — Abformung, Oberflächen mikromechanik, Membranübertragung (мікрообробка, лиття та переміщення діафрагми). Ця технологія поєднує LIGA-технологію або прецизійну обробку та мікрообробку кремнію.

Звичайні макротехнології механічної обробки: токарські, шліфувальні, свердління, лиття — зручні для одержання 3D-форм та об'єктів в області малих розмірів, придатні для виготовлення деталей порівняно малої складності.

Об'ємна обробка полягає у вибіркового видаленні кремнію з однієї сторони підкладки для формування мембран, борозенок, отворів та інших структур. Існує два види об'ємної мікрообробки кремнію: рідинне травлення та сухе травлення.

Ця технологія застосовується для виробництва більшості датчиків тиску та кремнієвих клапанів і акселерометрів.

За допомогою цієї технології можна одержувати мікроструктури товщиною від часток мікрметра до 200...500 мкм із поперечними розмірами від часток мікрона до величини ширини/довжини самої доріжки.

Поверхневі МЕМС використовують процеси масового виробництва ІС, які включають нанесення або видалення двомірних шарів на підкладки методами літографії та хімічного травлення. У результаті 3D-структура МЕМС виходить за шаблонами 2D-шарів. Додаткові шари виходять у вигляді тонких плівок і монтажних операцій, а також за допомогою травлення (стравлювання) жертвонних (захисних) дистанційовальних шарів. Потенційну складність різних МЕМС, одержуваних додаванням незалежних структурних шарів, показано на рис. Д8.27.

У процесах поверхневої обробки підкладка використовується як основа, на якій щось повинне будуватися. На підкладку (зазвичай кремнієву) наносяться тонкі плівки, які утворюють структурні шари, або слугують для одержання проміжку між елементами конструкції, для чого вони пізніше видаляються, та називаються жертвонними шарами. Отже, у процесі використовуються плівки двох різних матеріалів. Для структурних шарів зазвичай використовують полікристалічний кремній або полікремній, нітрид кремнію або алюміній, для жертвонних шарів, що наносяться або на будь-які відкриті ділянки, або на окремі механічні структури, де необхідно, зазвичай використовується двоокис кремнію.

Ці шари (або тонкі плівки) наносяться та потім травляться сухим способом, після чого остаточно мокрим травленням видаляється жертвонний шар для одержання остаточної структури. Кожен додатковий шар призводить до підвищення рівнів складності та трудомісткості виробництва. На рис. Д8.28 наведено типову схему процесу виготовлення балкового кантилевера з використанням технології поверхневої обробки.

Тут жертвонний шар SiO_2 наноситься на кремнієву підкладку із застосуванням шаблону та фотолітографії. Потім наноситься полікремнієвий шар і через маску виконується його реактивне іонне травлення для одержання балки кантилевера та контактної площинки. Підкладка підлягає травленню мокрим способом для видалення оксиду жертвонного шару в місцях роз'єднання та зі збереженням опори консолі кантилевера на підкладці.

Крім того, для одержання мікромеханічних деталей використовуються наступні методи: мікрообробка фрезеруванням, алмазна та мікроерозійна обробка, методи формування (мікроліття під тиском, штампування, спікання) [Шалобаєв, 2004], волоконна технологія [Суховєєв, 2004], корпускулярно-фотонне формоутворення (осадження з газової фази при низькому тиску — LPCVD, випаровування, фотостимулювання полімеризації, обробка іонним

променем) [Телець, 2004], 3D-MEMS термокомпресійне зварювання [Телець, 2004], використання біологічних об'єктів в якості мікро-механічних деталей, вакуумної технології автоемісійних вуглецевих нанотрубок. Для одержання механічних наноструктур придатні нанотехнології з використанням наноперової літографії [Ратнер, 2004], наноімпринтинга та процесів хімічного розпізнавання, самоорганізації та самоскладання [Уайтсайдс, 2002], створення рухомих компонентів біологічними методами на основі ДНК-структур [Симан, 2004], використання оболонки вуглецевих, кремнієвих нанотрубок і фулереноподібних матеріалів [Алферов, 2003] з їхнім заповненням газами, рідинами, твердими речовинами, фотонних кристалів та ін.

Щодо методів одержання MEMS та NEMS необхідно відзначити перспективність тільки тих з них, які забезпечують групове виготовлення, а для NEMS також самоскладання, самореплікацію, самоорганізацію, розпізнавання, тому що лише ці властивості можуть забезпечити їхнє масове виготовлення та низькі ціни на продукцію.

Методи механічної мікрообробки дають можливість індивідуального виготовлення елементів і можуть використовуватися лише в таких галузях як аерокосмічна, військова, де важливі, насамперед, габаритно-масові характеристики, а не економічні показники. Можливе їхнє застосування для виготовлення інструмента та технологічного оснащення. При виготовленні формувального інструмента за LIGA-технологією можливе одержання багатомісних матриць та, відповідно, забезпечення групового лиття складних тонкостінних деталей з полімерних матеріалів: поліімідів, полібутилентерефталату, полікарбонату, поліетилену, поліметилметакрилату (ПММА), поліоксиметилену, поліпропілену, поліфеніленсульфону, поліефіркетону, поліефірїміду. Гладкі поверхні стінок інструмента забезпечує вилучення відлитої деталі з матриць, які виготовляються без литтєвих ухилів.

Процеси осадження з газової фази та газофазного травлення, засновані на активації хімічних реакцій сфальцьованим електронним або лазерним променем, дозволяють безпосередньо створювати 3D мікрооб'єкти складної форми із субмікронним розрізненням. Процеси хімічного осадження, засновані на використанні лазерного випромінювання в якості джерела енергії, називаються лазеро-хімічними та належать до найбільш керованих і контрольованих.

При виготовленні керамічних деталей з окису алюмінію, окису цирконію, нітриду кремнію, п'езокераміки спочатку виливається

стрічкова заготівка, потім виконується штампування напівфабрикатів, видалення матеріалу зв'язки та кінцева операція — спікання. Недоліками технології є велике усідання та шорсткість поверхні.

Для формування пристроїв мікромеханіки литтям використовують товсті шари резиста ПММА, при обробці яких зазвичай застосовують інтенсивні рентгенівські пучки, одержувані в синхротронних джерелах.

Існує два напрямки корпускулярно-фотонних технологічних процесів (КФТП): *локально-стимульоване нарощування* (осадження або полімеризація) і *локально-стимульоване травлення* внаслідок дії на матеріал концентрованого потоку енергії (світлових, електронних, іонних променів). Основними напрямками стимульованого росту 3D-структур складної конфігурації є лазерне осадження з газової фази та фотополімеризація. Використовуються криптофторові лазери з довжиною хвилі $\lambda = 248$ нм. Тривалість імпульсу — десятки частки наносекунди, частота — близько 2 кГц.

Волоконна технологія розвинулася з технології мікроканалних пластин. До 60—70 % (і навіть 90 %) обсягу полімерних або скляних структур становлять ідентичні циліндричні канали діаметром від одиниць до десятків мікрометрів. Отримані пластини з діаметром каналів і товщиною стінок між ними ~ 33 нм. При цьому щільність каналів становить $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Канали структури можуть бути заповнені різними матеріалами (полімерами, металами, напівпровідниковими, магнітними складами та ін.).

Суть волоконної технології полягає в перетягуванні пучка щільноспечених волокон. Волокна виготовлені із двох марок скла, які значно відрізняються одна від одної розчинністю у водяному розчині HCl. Масштаб перетягування (рис. 4.2 і 4.3) не перевищує співвідношення 1:20 і може повторюватися багаторазово.

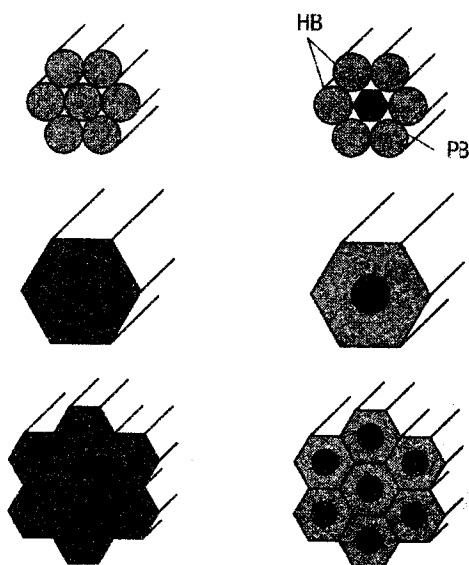


Рис. 4.2. Варіанти впакування волокон у пучок

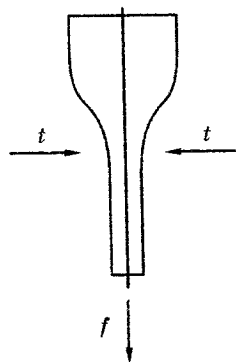


Рис. 4.3.
Перетягування пучка

щень із контрольованим мікрокліматом, не потрібні фахівці високої кваліфікації.

Існують три методи термокомпресійного зварювання кремнієвих пластин для виготовлення 3D-MEMS:

- *анодна термокомпресія* — процес взаємної приповерхневої міграції часток пластин кремнію та пірексу (боросилікатне скло з 3,5 % окису натрію) під дією прикладеної напруги та механічного тиску;
- *пряма термокомпресія* — спікання двох щільноз'єднаних кремнієвих пластин, одна з яких має

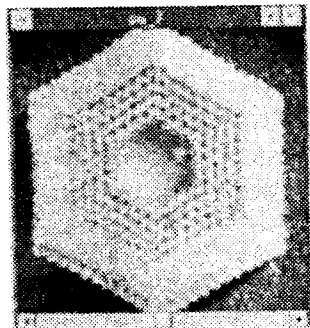


Рис. 4.5. Багатовиткова спіральна обмотка

Технологія волоконних MEMS може забезпечувати перетягування в одному циклі геометрично подібних мікроструктур з безліччю типорозмірів волокон; можливість інтегрального та групового виготовлення виробів одночасно; перетягнутому пучку можна надати складну 3D-геометрію (рис. 4.4 і 4.5).

За цією технологією можуть виготовлятися електродвигуни, літальні апарати, сонячні батареї та безліч інших мікроструктур з високим відношенням об'єму отворів до загального об'єму конструкції.

Волоконна технологія не вимагає примі-

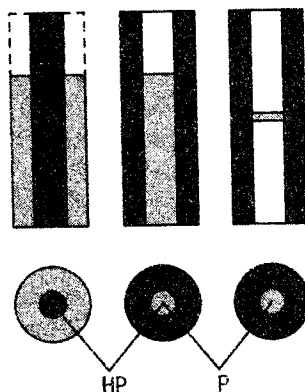


Рис. 4.4. Одержання об'ємних елементів типу «штир», колодка, мембрана

гідрофільну, а друга гідрофобну поверхню, що забезпечує гарний контакт перед високотемпературним спіканням (1000 °C);

- *термокомпресія із проміжним шаром* у вигляді евтектики низькотемпературного скла (температура плавлення 363 °C при вмісті в евтектиці 2,85 % Si та 97,15 % Au).

При застосуванні термокомпресійного зварювання необхідно аналізувати сумісність процесу із серійною технологією виготовлення НВІС, УВІС.

Цей метод відкриває можливості виготовлення гібридних МЕМС і корпусів готових виробів. Зварювання є ключовою операцією виробництва МЕМС в об'ємі кремнію або в приповерхневих шарах полікремнію. Воно надає широкі можливості масового виробництва компонентів МСТ, як мікромеханічних так і електронних. З використанням цієї технології виготовляються сенсори прискорення, резонансні гіроскопи, датчики тиску, у тому числі для автомобільних систем керування подачею палива.

Анодна термокомпресія є процесом взаємної дифузії часток кремнієвої підкладки та пірексу (боросилікатного скла з 3,5 % вмісту окису NaO_2) під дією прикладеної напруги та зовнішнього механічного тиску (рис. 4.6).

Крім того, під дією сильно-го електричного поля іони кисню вивільняються з пірексу та мігрують в область розділу «пірекс — кремній». Окислювання кремнію формує шар SiO_2 , чим і завершується термокомпресія пластин.

Високий негативний потенціал електрода викликає міграцію іонів Na^+ до нього і їхню нейтралізацію. На границі розділу «кремній — пірекс» утворюється область електричного заряду, що визначає силу електричного притягання в усій площі контакту. Нагрівання переходу до $+500^\circ\text{C}$ підсилює міграцію іонів, викликаючи збільшення сили притягання пластин, що зварюються.

Процес термокомпресійного зварювання вимагає прецизійної обробки поверхонь, забезпечення контакту по площині спікання.

Прецизійна обробка поверхонь кремнію (після порізки злитків) і пірексу може включати повний набір операцій шліфування (механічного), полірування (механічного та хімічного), очищення органічними розчинниками, відмивання й т. ін. Це забезпечує видалення механічних дефектів, фізичних ушкоджень шарів, забруднень, а також паралельність поверхонь (частки $\mu\text{км}/\text{см}$ довжини), необхідну товщину пластин.

Метод прямої термокомпресії забезпечує спікання двох попередньо оброблених і щільно з'єднаних кремнієвих пластин. Одна з них має гідрофобну, а інша гідрофільну поверхню, що забезпечує гарний контакт перед високотемпературним спіканням. Гідрофобна поверхня виходить у результаті попередньої високочастотної

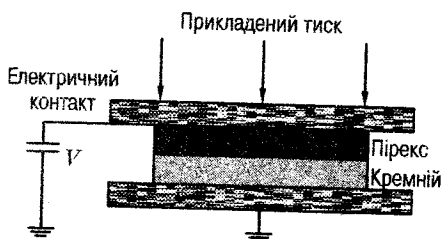


Рис. 4.6. Анодна термокомпресія

обробки, що впорядковує структуру поверхні та забезпечує притягання та контактування пластин.

Присутність гідроксильних радикалів на дзеркально відполірованій кремнієвій поверхні забезпечує надійне схоплювання пластин після контакту. Воно підсилюється додатковим притиском у середній точці однієї з пластин, щоб створити вихідну точку контакту в момент, коли механічні розпірки по краях забезпечують відсутність фізичного контакту між пластинами (рис. 4.7). Видалення бічних механічних розпірок (рис. 4.8) викликає «хвилю схоплювання пластин», що поширюється від середини до країв зі швидкістю, що визначається в'язкістю та тиском навколишнього середовища. Жорстке механічне схоплювання кремнієвих пластин після видалення розпірок важливе і для повного видавлювання повітряних прошарків між ними.



Рис. 4.7. Початкова фаза зварювання

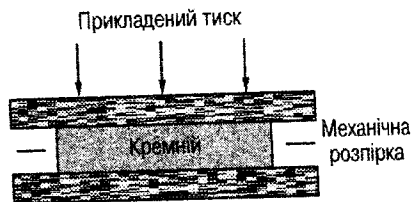


Рис. 4.8. Бічні розпірки видалені

Наступне нагрівання збезводнює поверхню та стимулює низку нових процесів. Гідроксильні групи утворюють молекули води, які у свою чергу викликають окислювання поверхонь спікання кремнієвих пластин та утворення шару Si-O-Si. За температури спікання більшої ніж 1000 °C кисень проникає в кристалічну ґратку, що забезпечує утворення границі розділу, яка не відрізняється за фізико-хімічними властивостями від інших складових всієї кремнієвої структури.

Термокомпресія із проміжним шаром виконується нанесенням на пластини безпосередньо перед спіканням евтектики або скла. Важливим у цьому випадку є контроль рівномірності поверхневої взаємодії компонентів у її початковій стадії та за температури плавлення. Сплав формується на границі розділу компонентів шляхом взаємного проникнення матеріалів і затвердіння після охолодження.

Для забезпечення якісного спікання на всій площі кремнієвих пластин виконується їхня попередня підготовка — видалення

окисних плівок, які можуть заважати проникненню золота в кремній при формуванні евтектичного шару. Після нанесення плівки, яка містить золото (евтектика), безпосередньо перед спіканням поверхню, що утворилася, оброблюють ультрафіолетом, щоб видалити органічні домішки, котрі знижують якість поверхневого контакту.

Як і при анодній та прямій термокомпресії до кремнієвих пластин прикладається зовнішній тиск і створюється необхідний температурний режим. Порівняно низька температура утворення евтектичного шару робить метод термокомпресії з використанням проміжного шару більш привабливим в порівнянні з іншими методами зварювання, але, як і при анодному спіканні, цього ще недостатньо для повної сумісності процесу із серійною технологією виготовлення НВІС.

Цей метод придатний для герметизації та корпусування готового виробу.

Всі перераховані вище методи належать до технологій «зверху вниз», а також, в основному, до «сухих технологій» на противагу хімічним, біохімічним і біологічним процесам, які створюють компоненти, починаючи з атомно-молекулярного рівня, і класифікуються як технології «знизу вгору» і мокрі технології. Хоча такий розподіл і умовний, але має принципові розходження в методах виготовлення та складання. У сучасних промислових технологіях основним є принцип «вниз», але кількість процесів «знизу вгору» буде постійно збільшуватися, беручи до уваги все більшу кількість робіт з молекулярних і нанотехнологій, у яких вирішальну роль відіграють процеси хімічного, біохімічного синтезу, самоорганізації, самоскладання, самовідновлення, саморозпізнавання, самореплікації, спрямованого інформаційно-хімічного синтезу. Принцип «знизу вгору» означає створення приладів і пристроїв зібраних з молекул або атомів.

4.1. Технологія LIGA

Технологія розроблена на початку вісімдесятих років двадцятого століття в дослідницькому центрі фірми IBM в Karlsruhe, Німеччина.

Послідовність операцій ТП наведено на рис. Д8.29. Метод дозволяє одержувати структури глибиною до 2 мм за латеральних розмірів елементів порядку декількох мікронів.

За допомогою LIGA-технології можливе виготовлення складних 3D-структур з високим коефіцієнтом форми (аспектним відношенням) з різних матеріалів з електропровідними, ізоляційними, магнітними, оптичними, п'єзоелектричними та іншими властивостями.

Недоліком LIGA-технології є необхідність використання синхротронного рентгенівського обладнання з енергією накопичувального кільця ~ 2 MeV, тривалий час експонування.

Варіант LIGA-технології, реалізований за рис. Д8.29, дає можливість одержання рухомих мікроелементів, підвишених над підкладкою та з'єднаних механічно та електрично з контактною площиною на підкладці (консольне кріплення). У цьому варіанті жертвним шаром є шар титану. Частіше в якості жертвного шару використовується SiO_2 .

Нижче наведений опис синхротрона.

Основним елементом синхротрона є накопичувальне кільце, що являє собою прискорювач електронів (позитронів). Електрони переміщуються по замкнутій траєкторії зі швидкістю, близькою до швидкості світла, випускаючи при цьому інтенсивні потоки фотонів з різними енергіями. Енергія, що губиться у вигляді синхротронного випромінювання (СВ), за кожен період обертання часток поповнюється спеціальною електромагнітною системою — радіочастотним резонатором. Накопичувальне кільце призначене для підтримки стаціонарного режиму руху електронів, а не для їхнього прискорення. На рис. 4.9 показано схему накопичувального кільця — джерела СВ.

Накопичувач містить камеру з вакуумом 10^{-9} — 10^{-10} Торр. Система магнітних диполів 4 забезпечує кругову орбіту руху. У поворотних магнітах виникає СВ, спрямоване по дотичній до траєкторії

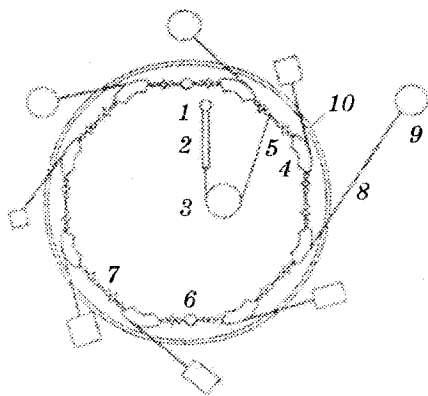


Рис. 4.9. Схема накопичувального кільця: 1 — електронна гармата; 2 — лінійний прискорювач; 3 — кільцевий передприскорювач; 4 — поворотний магніт; 5 — система магнітних ліній; 6 — радіочастотний резонатор; 7 — ділянка камери для вбудованих магнітних пристроїв; 8 — канал; 9 — експериментальна станція; 10 — бетонний захист

руху. Система магнітних лінз 5 служить для фокусування пучка. Електромагнітна система 6 необхідна для відшкодування енергетичних втрат при випускненні СВ. Спеціалізовані магнітні пристрої 7 — ондулятори (unduler — утворюючий хвилі) та віглери (wiggler — змійка) дозволяють одержувати СВ з поліпшеними характеристиками в порівнянні з поворотним магнітом.

Основними параметрами накопичувального кільця — джерела СВ є радіус кільця — R (10—30 м), енергія електронів — E (1—6 ГеВ), магнітна індукція в поворотних магнітах B (1—2 Тл) та електронний струм

$$I = \frac{2\pi \cdot e \cdot Ne \cdot R}{c}, \quad (4.1)$$

де e — заряд електрона; c — швидкість світла; Ne — число електронів у пучку; $R = E/(eB)$.

Інтенсивність СВ характеризується яскравістю (рис. 4.10).

СВ з поворотним магнітом характеризується енергетичним розподілом $10^1 \times 10^5$ еВ та яскравістю, що перевищує яскравість рентгенівських трубок на декілька порядків величини. Віглер підвищує яскравість за рахунок використання магнітів з N полюсами та більш сильним магнітним полем (5×10 Тл). Ондулятор відрізняється від віглера збільшеним числом полюсів і більш

тісним їхнім розташуванням. Параметри ондулятора обираються таким чином, щоб досягти інтерференції від сусідніх ділянок викривленої траєкторії пучка. Інтенсивність гармонік $\sim N^2$ і значно вища за інтенсивність випромінювання як поворотного магніту, так і віглера. Важливою властивістю СВ, що відрізняє його від випромінювання рентгенівських трубок, є його поляризація, тобто існування виділених напрямків вектора електричного поля. СВ має когерентність, причому сучасні джерела СВ наближаються за цією властивістю до лазерів. Нарешті, унікальна властивість СВ полягає в його імпульсній

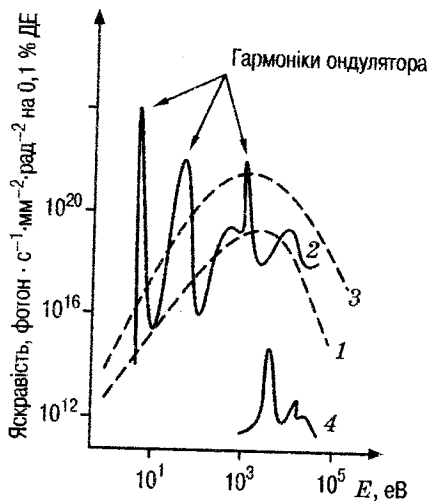


Рис. 4.10. Спектральний розподіл СВ, що генерується поворотним магнітом (1), ондулятором (2) та віглером (3); 4 — спектр рентгенівської трубки

природі. Через релятивістські ефекти потік електронів у накопичувальному кільці розбивається на окремі згустки — банчі (bunch), довжиною кілька сантиметрів. Із цієї причини СВ складається з періодичних імпульсів тривалістю кілька десятків пікосекунд і з наносекундними інтервалами. Цей процес надзвичайно важливий для дослідження швидкого перебігу процесів, електронного переносу, релаксаційних процесів і т. ін., які важливі для поверхні та дослідження нанокластерів.

Послідовність операцій ТП LIGA для лиття мікродеталей наведено на рис. 4.11.

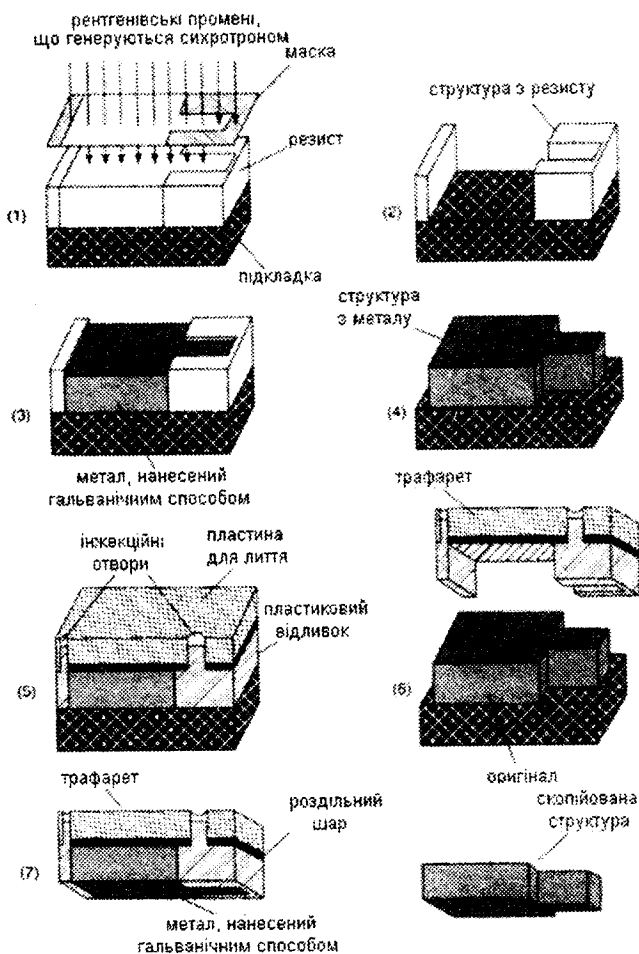


Рис. 4.11. Послідовність операцій технології LIGA

На рис. 4.12 наведено варіант послідовного багаторазового експонування, більш дешевий, що не вимагає дуже жорсткого випромінювання (накопичувальне кільце з енергією електронів - 2 GeV). Такий пучок викликає значну флуоресценцію від підкладки, що послабляє адгезію ПММА та обмежує припустимий час експонування, а, отже, і глибину експонування.

Вихідна структура складається з алюмінієвої підкладки, шару ПММА товщиною 2 мкм і мідною фольгою (9 мкм). Щоб уникнути напружень через розходження коефіцієнтів розширення, багатошарова структура формується за температури не вище 60 °С. За допомогою контактної маски та негативного УФ-фоторезиста (35 мкм) експонуванням/проявленням створюється форма для гальванічного нанесення золота, як абсорбера рентгенівської маски (20 мкм). Особливість запропонованого варіанта — застосування конформної маски з абсорбером, закріпленим на поверхні та знищуваним на кожній підкладці за готовністю мікроструктури; відсутність труднощів роботи з крихкими мембранами, потреби в сполученні послідовних експозицій, достатність меншої товщини абсорбера, і, отже, збільшення точності маски, поліпшення якості переносу зображення (не «працює» дифракція в проміжку між маскою та резистом). Для збереження адгезії абсорбера на

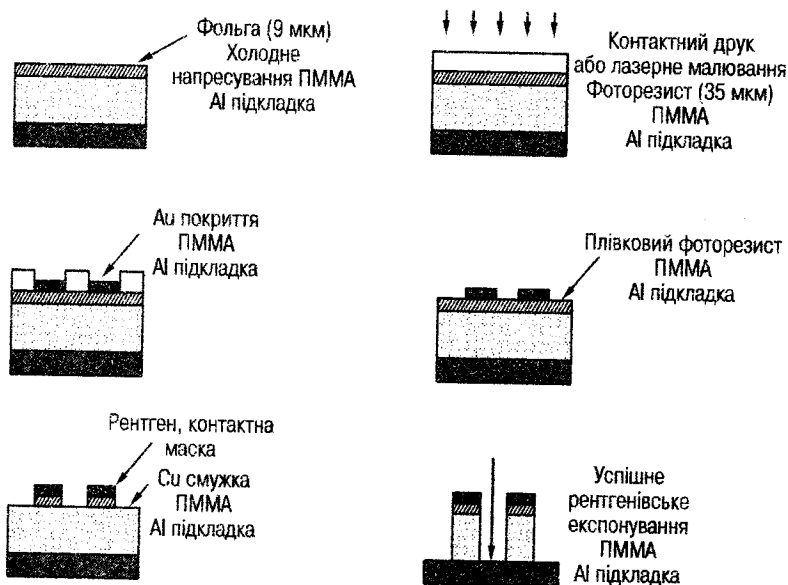


Рис. 4.12. Варіант LIGA-технології

ПММА до останнього проявлення границя не повинна одержувати дозу більше $1/3$ граничної.

Для цього досить 20 мкм золота замість звичайних 27 мкм при одноразовому експонуванні. Додатково підсилити границю вдається, наносячи підшар з міді розпиленням, і додаючи «грунтовий» адгезійний шар, нечутливий до рентгенівського випромінювання, у тому числі — і флуоресценції з міді. Перед другим опромінюванням «другий» рівень поверхні ПММА має пористий характер, що полегшує вихід газів, не викликає «спінювання» і навіть допускає збільшення поверхневої дози до 200 кДж/см^2 , скорочуючи тим самим тривалість наступного проявлення. Порівняльні вимірювання показали, що при трикратному експонуванні за $35 \text{ }^\circ\text{C}$ вдається досягти дворазового скорочення сумарної тривалості проявлення.

Як приклад, виготовлена система щілин шириною 0,1 мм, глибиною 2 мм і довжиною 10 мм. Причому відоме «дифракційне» перекручування верхньої крайки структури виявляється зменшеним втричі (до 0,1 мкм) за рахунок повного відбиття променевого потоку від вертикальної стінки ПММА за краєм абсорбера. І нарешті, перевага алюмінію полягає в можливості додатково закріпити «високу» мікроструктуру на підкладці, підсиливши шорсткість поверхні травленням у соляній кислоті разом з нанесенням захисного шару титану.

4.2. MUMPS-технологія виготовлення мікродвигуна

На рис. Д8.30 наведено послідовність операцій виготовлення мікродвигуна з використанням технології MUMPS.

Успіх процесу поверхневої мікрообробки залежить від можливості успішного видалення всіх жертвних шарів для звільнення структурних елементів і можливості їхнього збудження. Цей етап процесу впливає на вихід придатних і надійних виготовлених МЕМС внаслідок явища прилипання, що полягає в прилипанні структурних елементів до підкладки або настроювальних елементів. Капілярні сили промивальних рідин так само, як і електростатичні та сили Ван-дер-Ваальса, можуть викликати адгезію після сушіння системи.

Для запобігання прилипанню (sticking) розробляються спеціальні (antysticking) хімічні склади, якими після підтравлювання жертвних шарів оброблюються поверхні просторово рознесених шарів. Наприклад, $(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$ — діалкілдіхлорометилсилан для обробки полікремнієвих поверхонь [Kim, 2001].

Розглянемо ТП виготовлення MEMC електростатичного двигуна. Процес починається зі створення дифузійного шару нітриду кремнію та осадження шару полікремнію (Полі 0). Потім наноситься шар Оксид 1 з заглибленнями для наступного утворення виступів на роторі мікродвигуна, що запобігають злипанню ротора та підкладки (шару Полі 0), а також малюнок якоря двигуна та виводів фаз статора (шар Полі 1). Після цього наноситься шар Оксид 2. У центрі системи витравлюється отвір у шарах Оксид 2, Оксид 1 під вісь-опору для обертової частини (якоря) двигуна. Осадження шару Полі 2 утворює нерухому вісь-опору, що центрує вільно посаджений на ній якір, а також розташовані по периферії контакти фаз статора. Остання адитивна операція процесу — нанесення металу на виводи мікродвигуна. Завершується процес видаленням (селективним травленням) жертвних шарів Оксид 2 та Оксид 1.

Виступи знизу ротора запобігають його злипанню з підкладкою.

За технологією MUMPS виготовляються різні планарні елементи МСТ. Полікремній має гарні механічні властивості та достатню електропровідність. Налаштована технологія та методи фотолітографії дозволяють виготовляти сенсорні та актюаторні елементи в одному технологічному процесі з електронними компонентами ІС.

Послідовність і принцип створення структур різного призначення є типовими та придатні для одержання різних функціональних вузлів.

4.3. Технологія SUMMIT і SUMMIT-V

Поверхнева технологія виготовлення MEMS-структур з полікремнію. Придатна для виробництва багатошарових структур до 4 шарів (SUMMIT-V — до 5-ти). Зі збільшенням кількості шарів збільшуються нерівності (рельєфність) кожного наступного шару. Для зменшення цього в процесі виготовлення застосовується хіміко-механічне полірування верхніх шарів полікремнію [Sandia National Laboratories. URL: <http://www.sandia.gov>].

Послідовність операцій виготовлення та параметри шарів наведено в табл. 4.1 (с. 188).

П'ятий шар в SUMMIT-V дозволяє створювати елементи МСТ на рухомій платформі.

Позитивною властивістю SUMMIT-технології, як і інших поверхневих методів, є можливість виготовлення різноманітних елементів MEMC і простота їхньої інтеграції з електронними схемами

на одній підкладці. Але через малі розміри елементів, одержуваних за поверхневою технологією, їхня маса виявляється малою, що в ряді випадків не дає можливості їхнього використання в якості механічних датчиків і приводів.

Таблиця 4.1

Дані про шари структури

Технологічні шари	Товщина, мкм
Оксид кремнію	0,63
Нітрид кремнію	0,80
Полікремній (Полі-0)	0,30
Жертовний шар (Окс-1)	2,00
Полікремній (Полі-1)	1,00
Жертовний (Окс-2)	0,50
Полікремній (Полі-2)	1,50
Жертовний (Окс-3)	2,00
Полікремній (Полі-3)	2,25

Для виготовлення мікросистем за поверхневою технологією потрібні наступні матеріали:

- матеріали для побудови мікроструктур;
- матеріали для побудови захисних шарів;
- реагенти для травлення.

Матеріали для побудови мікроструктур повинні мати відповідні до призначення фізичні та хімічні властивості. До того ж вони повинні задовольняти механічні вимоги: витримувати високі руйнівні напруження, бути стійкими до пластичних деформацій, мати низький рівень повзучості та втоми, бути зносостійкими.

Захисні матеріали також повинні мати гарні механічні характеристики для того, щоб у процесі виготовлення мікросистеми не відбулася поломка її внутрішніх структур. Під механічними характеристиками тут мається на увазі гарна адгезія та низьке залишкове напруження для запобігання деформації мікропристроїв при розшаруванні й/або розколюванні. Травильні реагенти, використовувані для видалення захисних матеріалів, повинні мати відмінну вибірковість, щоб при травленні видаляти тільки захисне покриття, ніяк не впливаючи на матеріал зформованих мікроструктур. У доповнення до цього, травильні реагенти повинні мати відповідну в'язкість і поверхневий натяг. Для побудови мікросистем за поверхневою технологією використовуються ті ж матеріали, що й при виготовленні більшості інтегральних схем:

1. Полікремній/діоксид кремнію. У цьому випадку застосовується хімічне осадження полікремнію з газової фази за низького тиску для побудови мікроструктур і парів оксиду для формування захисних шарів. Розчин HF легко розчиняє оксид, не впливаючи на полікремній. Для електроізоляції разом із цими матеріалами часто використовується нітрид кремнію.

2. Поліімід/алюміній. Тут поліімід застосовується в якості структурного матеріалу, а алюміній — захисного. Для розчинення алюмінієвого захисного шару використовуються кислотні реагенти.

3. Нітрид кремнію/полікремній. Нітрид кремнію відіграє роль структурного матеріалу, а полікремній — захисного. У цій комбінації матеріалів під час проведення анізотропного травлення кремнію для розчинення полікремнію використовуються KOH та EDP.

4. Вольфрам/діоксид кремнію. Тут відбувається осадження парів вольфраму для побудови мікроструктур і парів оксиду для реалізації захисних шарів. Для видалення захисного оксидного шару застосовується розчин HF.

Для побудови мікросистем іноді використовуються карбід кремнію, алмазоподібний вуглець, оксид цинку, золото й інші матеріали, що застосовуються для виготовлення традиційних мікросхем.

Для поверхневої мікрообробки кремнію можуть застосовуватися методи сухого травлення. Переважно використовується плазмове травлення кремнієвої підкладки за допомогою суміші газів на основі SF_6/O_2 й CF_4/H_2 , оскільки при цьому, застосовуючи маскувальні шари з фоторезисту, діоксиду кремнію та алюмінію можна одержати високу селективність травлення. Однак під час плазмового травлення спостерігається високе підтравлювання маскувального шару, що відбувається через атоми фтору, які входять до складу травильних реагентів. Такий метод ізотропного травлення іноді порівнюють із вертикальним травленням, в процесі якого видалення частини матеріалу виконується за рахунок іонного бомбардування. У цьому випадку застосування реактивного іонного травлення полікристалічного кремнію з використанням комбінації хлористих і фтористих газів в якості травильних реагентів і фоторезисту для маскувального шару дозволяє створювати майже вертикальні профілі мікроструктур без підтравлювання маски. Таким чином, застосовуючи метод хлористого/фтористого плазмового травлення, можна створювати прямокутні кремнієві структури глибиною до 30 мкм із полікремнієвих плівок на кремнієвій підкладці.

Кремнієві мікроструктури, отримані за поверхневою технологією, звичайно є планарними (тобто мають два геометричних розміри). Існують методи, що використовують для побудови тривимірних мікросистем тонкоплівкові структури, одержувані за допомогою видалення розміщених нижче захисних шарів. Такі методи дозволяють значно розширити рамки традиційної поверхневої технології.

Тривимірні мікросистеми можна також побудувати, з'єднуючи полікремнієві пластини одна з одною та підкладкою за допомогою спеціальних методів.

Інший підхід до побудови тривимірних мікропристроїв полягає в осадженні структурних і захисних плівок з полікремнію та діоксиду кремнію до заповнення спеціальних заглиблень, попередньо витравлених у кремнієвій підкладці.

4.4. Особливості травлення МКК

Травлення продовжує залишатися найбільш зручним та універсальним методом обробки кремнію. Існують численні хімічні протравлювачі для ізотропного й анізотропного селективного травлення, що визначає вибір того або іншого маскуючого матеріалу, а також інші методи травлення: плазмового, реактивного, іонно-променевого, лазерно-ініційованого.

Особливий інтерес представляють завдяки універсальності три травильних складу: етилендіамін, пірокатехін (ЕДП) і вода; КОН і вода; HF, HNO₃ та оцтова кислота CH₃COOH (ВАК).

Три властивості ЕДП роблять цей протравлювач незамінним для цілей мікрообробки:

- 1) це анізотропний склад, що дозволяє створювати унікальні геометрії, які не можна одержати за допомогою інших методів;
- 2) він високоселективний і допускає маскування різними матеріалами, наприклад SiO₂, Si₃N₄, Cr та Au;
- 3) його дія залежить від присутності легуючої домішки: він має майже нульову швидкість травлення кремнію з високою концентрацією бора.

Дія водяного розчину КОН також залежить від орієнтації: цей протравлювач дає більш високі відношення швидкостей травлення площин (110)-(111), ніж ЕДП. Тому він особливо зручний для травлення канавок на площинах (110) з високим відношенням глибини до латеральних розмірів. Недолік КОН — висока швидкість

травлення SiO_2 , що вимагає в якості маскувального матеріалу для більшого часу травлення використовувати Si_3N_4 .

ВАК — дуже складний протравлювач, швидкості травлення та характеристики якого можуть сильно змінюватися залежно від ступеня легування кремнію, співвідношення компонентів і далі від ступеня перемішування протравлювача. Краще використовувати маски з Si_3N_4 або Au. ВАК — гірше, ніж ЕДП, для глибоких щілин МЕМС.

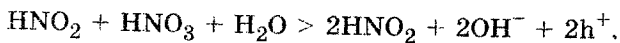
Травлення кремнію складається з 4-х основних етапів:

- 1) інжекції дірок у кремній, що приводить його до стану з більш високим ступенем окислювання Si^+ ;
- 2) приєднання гідроксильних груп OH^- до позитивно заряджених іонів кремнію;
- 3) реакції гідратованих іонів кремнію з комплексоутворювальним агентом у розчині;
- 4) розчинення продуктів у травильному розчині.

Цей процес припускає, що будь-який травильний розчин повинен поставляти як дірки, так і гідроксильні групи, а також містити комплексоутворюючий агент, продукти реакції з яким розчинні в даному протравлювачі.

У системі HNA ефективним джерелом як дірок, так і гідроксильних груп є сильний окислювач HNO_3 , тоді як фтор, що входить до складу HF, утворює розчинне з'єднання H_2SiF_6 .

У цілому реакція є автокаталітичною, оскільки HNO_3 разом зі слідами HNO_2 , що містяться в ній, вступає в реакцію, утворюючи додаткові молекули HNO_2 :



Під час реакції утворюються також дірки, необхідні для підвищення ступеня окислювання кремнію, і додаткові групи OH^- , потрібні для окислювання кремнію.

У системі ЕДП етилендіамін і вода реагують один з одним, утворюючи дірки та гідроксильні групи, тоді як пірокатехін утворює розчинне з'єднання $\text{Si}(\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2)_3$. Безводні суміші етилендіаміну та пірокатехіну не протравлюють кремній.

Оскільки в основі травлення лежить процес переносу заряду, швидкості травлення залежать від типу та концентрації легуючої домішки. Так, сильнолегований кремній травиться швидше, ніж слаболегований, просто за рахунок більшої кількості рухомих носіїв. Так у системі HNA (1:3:8) швидкість травлення становить

1—3 мкм/хв для концентрацій p - або n -домішки понад 10^{18} см^{-3} і практично дорівнює нулю для концентрацій нижче 10^{17} см^{-3} .

Анізотропія травлення кремнію полягає в тому, що поверхні $\langle 111 \rangle$ травляться набагато повільніше, ніж інші кристалографічні площини (відношення швидкостей травлення досягають 10^3).

Варіанти геометрії отворів, витравлюваних за допомогою водних протравлювачів і характерних для МЕМС, наведено на рис. 4.13.

Анізотропні протравлювачі, такі як ЕДП та КОН, при сильному легуванні зразків бором ($\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) втрачають швидкість травлення практично до нуля. Схоже, що при заміщенні в ґратках атома кремнію меншим за радіусом атомом бора створюється локальне напруження розтягування. За високих концентрацій бора (вище $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) сили розтягування стають настільки великими, що через високу міцність зв'язків B-Si енергія, яка необхідна для видалення атомів кремнію з ґратки, стає дуже високою і травлення повністю припиняється.

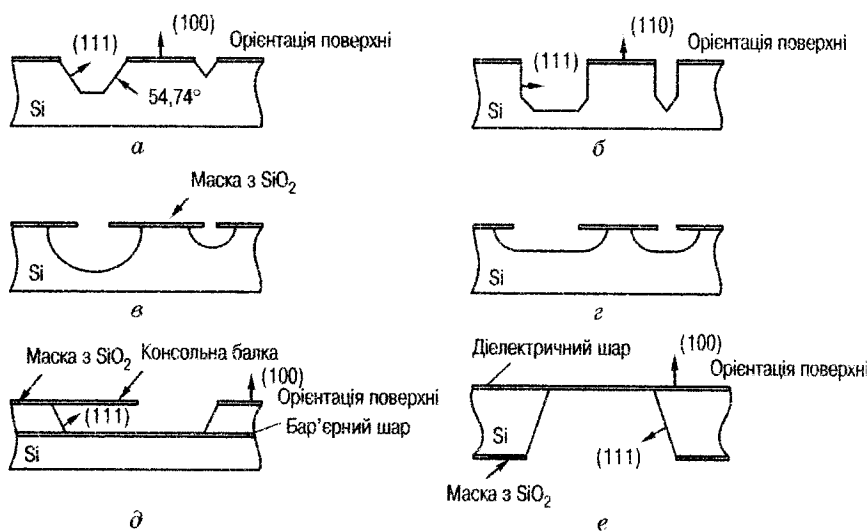


Рис. 4.13. Варіанти геометрії отворів, що витравлюють за допомогою водних протравлювачів, характерних для мікромеханічних пристроїв: *a* — анізотропне травлення поверхонь (100); *б* — анізотропне травлення поверхонь (110); *в* — ізоетропне травлення з перемішуванням; *г* — ізоетропне травлення без перемішування; *д* — анізотропне травлення із внутрішнім бар'єрним шаром; *е* — діелектрична мембрана, отримана за методом об'ємної мікрообробки зі зворотної сторони підкладки

Не пояснений поки механізм анізотропного травлення. Можливими причинами вважаються висока щільність атомів кремнію в площині (111) або екранувальна дія молекул H_2O , що є вищою на більш щільних поверхнях. Іншим фактором анізотропного травлення є енергія, необхідна для видалення атома з поверхні. Оскільки на поверхні (100) атоми мають по два вільних зв'язки, а на поверхні (111) лише один такий зв'язок, варто знов-таки очікувати більш повільного травлення на поверхні (111).

Анізотропне травлення вимагає обліку орієнтації осей кристала та часто використовується під час виготовлення МЕМС-структур.

Крім хімічного, використовуються й інші види травлення: електрохімічне, іонне, плазмове та лазерне. Лазерне травлення через низьку продуктивність можливо застосовувати лише для спеціальної мікромеханічної обробки для одержання складних контурів (практично будь-якої форми поверхні).

На рис. 4.13 показано різні контури впадин травлення під час ізотропного та анізотропного травлення кремнію з різною орієнтацією поверхні. Зокрема під час травлення пластин з орієнтацією (110) виходять впадини з вертикальними стінками практично без підтравлювання вікна, за умови, що границі вікна орієнтовані відповідним чином. Тут площини (111) представляють вертикальні поверхні, стійкі до впливу протравлювача. На поверхні пластин з орієнтацією (110) можливо витравити близько розташовані канавки.

Тільки елементи четвертої групи утворюють ідеально однорідні ковалентні спрямовані зв'язки з низьким координаційним числом, що дорівнює чотирьом. Кремній володіє більш «пухкою», «відкритою» структурою в порівнянні зі своїми найближчими сусідами. Атоми в кристалі кремнію розташовані так просторо, а об'єм міжвузлових порожнин настільки великий (~ 75 %), що під час плавлення відбувається не збільшення об'єму, як в усіх металів, а значне, на 9 %, його зменшення.

Таку ж «пухку» структуру мають і вуглець у формі алмаза, і германій. Однак саме в кремнію відстань між двома сусідніми атомами (0,26 нм) обумовлює оптимальну енергію зв'язку. В алмазі ця відстань набагато менша (0,11 нм), і він проявляє яскраво виражені діелектричні властивості, тоді як германій за властивостями ближчий до металів. Пухка, відкрита структура та досить сильний ковалентний зв'язок — особливості будови кремнію, які пояснюють багато які з його хімічних властивостей, наведених нижче [Андреев, 1989].

1. Оптимальне значення ширини забороненої зони, що обумовила досить низьку концентрацію власних носіїв і високу робочу температуру.

2. Великий діапазон реально досяжних питомих опорів у межах від 10^{-3} Ом·см (вироджений) до $1 \cdot 10^5$ (близький до власного).

3. Високе значення модуля пружності, значна жорсткість (більша, ніж, наприклад, у сталі).

4. Оптимально висока температура плавлення, що впливає з високого значення модуля пружності та енергії зв'язку.

5. Мала щільність ($2,3$ г/см³) і низький ТКЛР $3 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹.

6. Висока теплопровідність (до 140 Вт/К·м, що близько до коефіцієнта теплопровідності заліза).

7. Тензочутливість — істотна зміна питомого опору під час пружної деформації.

8. Висока розчинність домішок, причому домішки незначно спотворюють ґратку кристала.

9. Висока технологічність кремнію.

Завдання глибини травлення може забезпечуватися шляхом створення бар'єрного p^+ шару (легуванням кремнію бором з концентрацією домішки $> 7 \cdot 10^{19}$ см⁻³) або електрохімічним способом шляхом формування усередині підкладки обернено зміщеного p - n -переходу.

Сухе травлення відбувається за рахунок хімічної та фізичної взаємодії між іонами газового травильного реагенту та атомами кремнієвої підкладки. Для сухого ізотропного травлення можна використовувати газоподібні форми наступних реагентів: дифторксенона та суміші галогенів. При цьому вдається домогтися високої селективності травлення для алюмінію, діоксиду кремнію, нітриду кремнію, фоторезисту.

Найпоширенішими методами сухого об'ємного травлення кремнію є плазмове та реактивно іонне травлення (RIE) [Ефимов, 1986; Черняев, 1987], що проводяться в реакційних камерах низького тиску, де для запуску хімічних реакцій потрібне підведення зовнішньої енергії. В якості травильних реагентів можуть застосовуватися газоподібні хлорфторвуглеці, гексафторид сірки, бромовміщуючі суміші та кисень. Анізотропне сухе травлення широко застосовується, оскільки дає можливість формування складних геометричних структур, часто при меншому хімічному забрудненні навколишнього середовища в порівнянні з рідинним травленням. За допомогою анізотропного сухого травлення можливе виготовлення глибоких, довільно орієнтованих кремнієвих структур.

Найглибші кремнієві мікро-структури виходять під час RIE. На рис. 4.14 наведено залежність швидкості травлення від тиску фторовміщуючої ВЧ плазми (13,56 МГц) [Лурье, 2000].

У більшості випадків рідинне травлення виконується зі зворотного боку підкладки, у той час як плазмове — з переднього. Вертикальна об'ємна мікрообробка кремнію, що одержала назву SCREAM (травлення МКК із металізацією), є комбінацією анізотропного та ізотропного плазмового травлення.

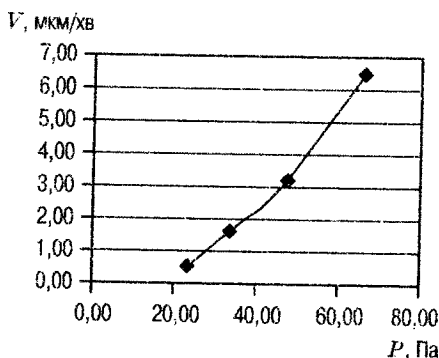


Рис. 4.14. Залежність швидкості травлення від тиску плазмоутворюючого середовища

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які особливості мають технології МСТ у порівнянні з напівпровідниковими технологіями?
2. Чим розрізняються об'ємні та поверхневі технології MEMC?
3. Що таке волоконна технологія і які елементи можна виготовити на її основі?
4. Які методи з'єднання використовують для одержання гібридних виробів МСТ?
5. Призначення технології LIGA.
6. Принцип роботи синхротрона, його характеристики.
7. Описати послідовність LIGA-технології.
8. Можливості поверхневої технології MUMPS.
9. Яким видам дефектів виробів найбільш важко запобігати в поверхневих технологіях?
10. Чим розрізняються технології SUMMIT та SUMMIT-V?
11. Які основні етапи входять в операцію травлення МКК?
12. Назвіть основні універсальні травильні склади для кремнію.
13. Наведіть геометрію отворів, що витравлюють у кремнії з використанням ізотропних та анізотропних протравлювачів.
14. Як можна забезпечити точно задану глибину травлення кремнію?
15. Які основні операції використовуються під час виготовлення MEMC?

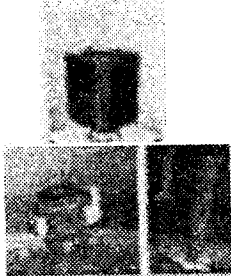
5 МЕМС ПРИЛАДИ

За минулі 15—20 років широким фронтом у різних країнах світу проводилися розробки МЕМС- і НЕМС-компонентів, призначених для використання в більш складних виробках і схемах [Іванов, 2004] (табл. 5.1, 5.2). При цьому області використання виробів МСТ і НТ настільки широкі, що можна говорити про глобальний характер зміни об'єктів техніки протягом найближчих 50 років, існуючі прогнози використання державною програмою США в сфері нанотехнологій [Уайтсайде, 2002] безупинно доповнюються відомостями про нові розробки, можливості, успіхи, масштаби застосування.

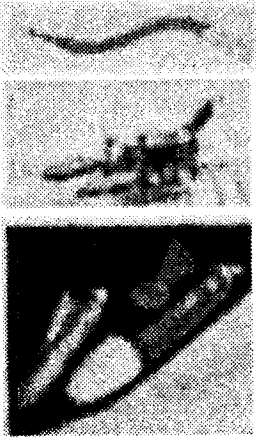
Уже в наш час наноматеріали, сенсори МСТ і НТ завойовують ринки збуту, забезпечуючи випуск якісно більш досконалої продукції.

Таблиця 5.1

Мікросистемна техніка військового призначення

Компоненти та елементи МСТ військового призначення	Функціональні пристрої та апаратура МСТ військового призначення	Мікроробототехнічні системи та комплекси військового призначення
Мініатюрні датчики відео та ІК, УФ-діапазонів і перетворювачі випромінювання (МОЕМС)	Інструментальні системи націлювання в мікромодульному виконанні	Космічні мікро (нано- і піко-) апаратури
МАОЕМС акустичні перетворювачі	Малогабаритні системи нічного бачення	
МЕМС датчики температури, тиску, переміщення та вібрації	Мініатюрні підводні камери акустичних сигналів	

Компоненти та елементи МСТ військового призначення	Функціональні пристрої та апаратура МСТ військового призначення	Мікроробототехнічні системи та комплекси військового призначення
<p>MEMC мікрофони та електроакустичні перетворювачі</p> <p>MEMC гіроскопи, акселерометри, інклінометри та гравіметри</p> <p>MEMC актюатори (приводи та виконавчі механізми)</p> <p>MEMC пристрої для НЖМД (зчитувальні головки)</p> <p>МОЕМС оптичні комутатори, мультиплексори та демультіплексори</p> <p>МОЕМС матриці для пристроїв відображення інформації (дисплеїв і проєкторів)</p> <p>МОЕМС далекоміри та показчики</p> <p>Мікромеханічні генератори та MEMC перетворювачі електричної енергії</p> <p>Адаптивні конструкційні матеріали та «інтелектуальні покриття» на основі MEMC</p> <p>Компоненти та елементи радіоапаратури (фільтри, перемикачі індуктивності, генератори, антени та т. ін.)</p>	<p>Портативні генератори акустичних сигналів</p> <p>Надмінійтурні приймально-передавальні модулі (для бездротових технологій передачі інформації та навігаційної апаратури споживачів)</p> <p>Малогабаритна апаратура для оптичних каналів зв'язку</p> <p>Мінійтурні рушійні пристрої</p> <p>Пристрої запобігання, зведення та забезпечення вибуху (для боєприпасів, військового оснащення ракет, мін і торпед)</p> <p>Переносні компактні пристрої РХБ розвідки</p> <p>Засоби вбудованого контролю для рушійних пристроїв наземної та авіаційної техніки</p> <p>Мінійтурні джерела та перетворювачі електричної енергії</p> <p>Компактні медичні прилади</p> <p>Функціональні модулі для технічних засобів індивідуального екіпірування військовослужбовців</p> <p>Мікромодулі для ГМН</p> <p>Переносні прилади для технологічного діагностування об'єктів ВТ</p>	<p>Мінійтурні літальні апарати (мікро-ЛА)</p>   <p>Наземні роботи</p>    

Компоненти та елементи МСТ військового призначення	Функціональні пристрої та апаратура МСТ військового призначення	Мікроробототехнічні системи та комплекси військового призначення
МРЕМС регуляторні пристрої (мікронасоси, регулятори тиску, клапани та т. ін.) МРЕМС біосенсори та біодетектори Мініатюрні РРД і турбінні мікродеталі	Мініатюрні прилади для виявлення ВР	Підводні мікророботи та мікроапарати
		

Поверхневі покриття, що не змочуються, гідрофобні нанопористі просочення тканин, що змінюють властивості за різних температур, погодних умов, освітленості; креми, лосьйони, оболонки для лікарських препаратів входять у повсякденне життя.

Розглянемо приклади реалізації компонентів і елементів МСТ.

5.1. Елементи сонячних батарей

Пошук нових джерел енергії та підвищення ефективності відомих раніше є актуальним завданням світу, що бурхливо розвивається та споживає все більшу кількість енергії в усіх доступних для використання видах. Особливої уваги заслуговують безпечні, екологічно чисті види енергії. До такої категорії належать перетворювачі сонячного світла в електрику із застосуванням напівпровідникових матеріалів: кремнію, арсеніду галію та ін.

Багатопереходний сонячний елемент із V-подібними канавками на МКК [Петерсен, 1982] схематично показано на рис. 5.1 (с. 201).

На рис. 5.1 показані наступні технологічні етапи виготовлення багатопереходних сонячних елементів з V-подібними канавками: вирощування шару двоокису кремнію, анодне окислювання пластини кремнію для його з'єднання зі склом, витравлювання вікон

Галузі застосування мікросистемної техніки цивільного, військового та спеціального призначення

Напрямок розробок	Призначення	
	Цивільне	Військове, спеціальне
Компоненти та вузли мікромеханіки, мікрооптомеханічних і мікроелектромеханічних систем	Мініатюрна керована елементна база	
	Мініатюрні керовані конденсатори, резистори, дзеркала, модулятори, елементи мікроприводів, мікротурбіни, мікродвигуни, мікрогенератори, оптомеханічні інтегральні схеми, мікромеханічні пристрої енергозабезпечення	
Мініатюрні системи зв'язку, спостереження, навігації, орієнтації та керування рухом	Мікросистеми зв'язку, спостереження, навігації, орієнтації та керування рухом	
	Системи орієнтації на базі мікромеханічних датчиків (акселерометри, мікрогіроскопи, датчики кутової швидкості), системи керування рухом з використанням мікромеханічних пристроїв, сполучені із супутниковими ГЛОНАСС (GPS) системами навігації, модулі контролю положення антенних фазованих решіток, системи катапультування, оптико-мікромеханічні системи спостереження та ін.	
	Автомобільний, авіаційний і залізничний транспорт	Зразки (комплекси, системи) ВТ, засоби керування та зв'язку, засоби бойового, технічного та тилового забезпечення

Напрямок розробок		Призначення	
		Цивільне	Військове, спеціальне
Розподілені мікросистеми збирання даних, прийому, обробки та передачі інформації		Системи охорони та спостереження, системи екологічного моніторингу, системи житлово-комунального господарства, пристрої керування потоками рідини та газу для авіа- та кораблебудування	Розвідувально-сигналізаційні засоби та техніка
Мікроробото-технічні та мікророзмірні системи військового призначення	Технологічні мікросистеми	Мініатюрні аналітико-діагностичні чипи та мікрохімічні реактори	
		Біотехнологія, медицина, нафтохімія, харчова промисловість	Військова медицина, засоби РХВ захисту, засоби виявлення та утилізації радіоактивних, токсичних, вибухонебезпечних речовин і матеріалів
	Мікроінструмент	Мікроманіпулятори, мікротехнологічні пристрої	
		Медицина, мікробіологія, мікроелектроніка	Військова медицина
Мініатюрні робототехнічні системи	Мікророботи для діагностики: медицина, ядерна енергетика, хімічна промисловість	Мікророботи для виконання завдань бойового, технічного та тилового забезпечення	

у двоокису кремнію (рис. 5.1, а); анізотропне травлення кремнію на підкладці зі скла марки 7070, іонне легування нахильних поверхонь для створення на них p^+ і n^+ -областей, відпал після імплантації (рис. 5.1, б); осадження металізації та паяння (рис. 5.1, в).

Покрита шаром SiO_2 пластина кремнію приєднується за допомогою анодного окислювання до пластини зі скла марки 7070, після чого за допомогою анізотропного травлення одержують V-подібні канавки, що проходять по всій довжині пластини та на всю її глибину до скляної підкладки. Потім виконується іонна імплантація по черзі p - та n -домішками граней (111), для чого по черзі змінюють кут падіння іонного променя. На завершення виконується напилювання алюмінію на всю поверхню за нормального падіння, так що нависаюча із країв окисна маска створює розриви в металізації на верхівках структур, тоді як на дні канавок сусідні p - та n -області з'єднуються послідовно. В умовах концентрації сонячного випромінювання та при падінні світла через скляну підкладку така структура повинна мати ККД перетворення сонячного випромінювання понад 20%. Перевагами конструкції є простота виготовлення (одна операція маскування), висока робоча напруга (70 В/см елементів), велика ефективна довжина поглинання світла (і отже, високий ККД) завдяки багаторазовому внутрішньому відбиттю, відсутність будь-якої перешкоджаючої проходженню світла металевої колекторної сітки на освітленій поверхні, а також відмінний захист від зовнішніх впливів і опора, забезпечувані скляною підкладкою. Кремнієві сонячні елементи такого типу набагато кращі за сучасні елементи на основі МКК і згодом можуть стати серійними пристроями.

Полікристалічна форма кристалів кремнію також використовується для створення елементів сонячних батарей. Вони мають

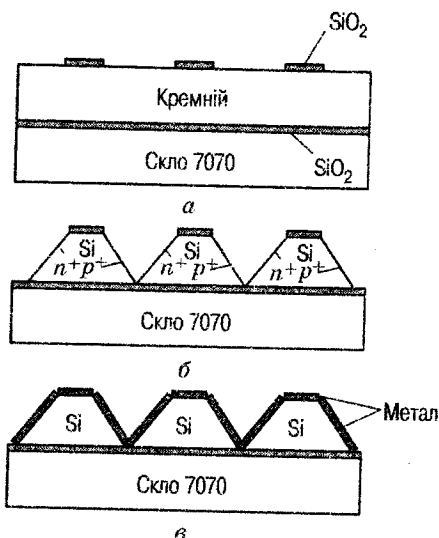


Рис. 5.1. Основні технологічні етапи виготовлення багатопереходних сонячних елементів з V-подібними канавками

ККД нижчий за монокристалічні, але дешевші за технологією, використовують матеріали менш високої чистоти. Струмозбиральні електроди елементів виготовляються за допомогою трафаретного друку з використанням стандартних срібних шин ($\sim 120 \times 10$ мкм), які містять непровідні порожнини та затіняють частину сонячного світла. Технологія більш щільного розміщення електродів (розміром 20×20 мкм) з використанням «мокрого процесу» дозволила розробникам зменшити витрату срібла та збирати більший струм з навколишнього активного матеріалу, пробіг вільних електронів у якому невеликий.

Крім того, поверх провідників і на їхні торці наносяться дзеркальні текстуровані поверхні. Ці дзеркала відбивають падаюче світло під меншим кутом (близько 30°) і в результаті повного внутрішнього відбиття залишаються в кремнієвій пластині, підвищуючи тим самим коефіцієнт перетворення світла в електричну енергію.

Елементи сонячних батарей призначені для виконання трьох основних функцій:

- ефективного поглинання сонячного світла;
- розділення позитивних і негативних зарядів комплексом наноструктур за рахунок поглиненої енергії світла;
- забезпечення рекомбінації позитивних і негативних зарядів з вивільненням кулонівської енергії при замиканні зовнішнього ланцюга струмового навантаження.

Існують перетворювачі сонячної енергії в електричну з низкою проміжних щаблів перетворення. Основний інтерес представляють фотоелектричні елементи, які безпосередньо перетворюють світло в електричну енергію. Дослідження та розробки в сфері фотоелектричного накопичування сонячної енергії сфокусовані в основному на використанні напівпровідників (до 95 % одержуваної цим способом електроенергії). Напівпровідник поглинає енергію, і його збуджені стани дозволяють рознести електрон і дірку по протилежних сторонах елемента в струмознімачі. Різниця їхніх енергій є результатом поглинання енергії джерела світла.

Ефективність сонячних батарей визначається як відношення отриманої величини електричної енергії до кількості вихідної світлової енергії для різних напівпровідників, тобто їхній коефіцієнт корисної дії для сучасних конструкцій лежить у межах 10—40 %. При цьому необхідно враховувати вартість пристроїв, питання експлуатації, токсичності та утилізації відходів.

Істотне підвищення ефективності перетворення сонячної енергії може забезпечити масове виробництво цих джерел енергії, що відбудеться тільки тоді, коли сонячна енергія стане пріоритетною в державній політиці. Значну допомогу в вирішенні проблем можуть надати досягнення в галузі нанотехнологій.

Природний фотосинтез відбувається на молекулярному рівні з використанням наноструктур для поглинання та розділення позитивних і негативних зарядів. Таким чином, створення молекулярних наноструктур, що володіють у порівнянні з напівпровідниковими пристроями малою вагою та розмірами, низькою вартістю, високою ефективністю перетворення, може забезпечити практичне поліпшення перетворення сонячної енергії.

Молекулярні наноструктури, що використовуються із цією метою, належать до декількох різних класів. У найпростішому випадку молекула має одну робочу частину, що у дійсності поглинає енергію світла. У збудженому стані молекула розходиться, електрон направляє до одного електрода, а дірка — до іншого. Подібні структури відносно прості, але часто малоефективні через обмежену поглинаючу здатність або неефективне розділення зарядів на електродах.

Більш складні структури включають діади, тріади або пентади, що мають декілька підодиноць, одна з яких поглинає сонячне світло, а інші полегшують розділення електрона та дірки. Одними з таких гібридних елементів є елементи Гретцеля (Graetzel cell) [Уайтсайдс, 2002]. У них сонячну енергію захоплює пофарбована молекула, що, поглинаючи світло, переходить на більш високий енергетичний рівень. У такому стані ця молекула розділює заряд, передаючи електрон від пофарбованої молекули наночастинці білого кристала діоксиду титану TiO_2 . Розділеним зарядам (позитивний заряд, що залишився на молекулі, і негативний заряд діоксиду титану) потім дозволяють рекомбінувати, використовуючи низку електрохімічних реакцій.

Застосування TiO_2 представлено на рис. Д8.31, Д8.32.

Звичайно колоїдні частинки матеріалів мають розміри від часток до десятків нанометрів і внаслідок цього забезпечують прозорість розчинів [Рэми, 1972; Зимон, 2003]. Багато які з них (CdS , HgSe , PdSe , Cd_5As_2 , SnO_2 , TiO_2 , ZnO , Zn_3P_2 , V_2O_5 , WO_3 та ін.) є напівпровідниками та виявляють чітко виражену залежність від дії світла. До таких ефектів належать: фотозбудження, фотолюмінесценція, фотокаталіз, фотоліз, фотоелектропровідність, які проявляються в колоїдних розчинах і тонких плівках матеріалів.

Одержання колоїдних розчинів часто включає хімічні методи приготування або використання твердих часток у вигляді пористих видів скла або цеолітів. Для запобігання утворенню великих агрегатів синтез виконується в спеціально підібраних захисних середовищах. Так колоїдні частки TiO_2 можуть бути отримані пентизацією соляною кислотою титанової кислоти, осадженої на холоді аміаком [Рэми, 1972]. Зменшенню розмірів часток при розчиненні порошків може сприяти диспергація шляхом накладення ультразвукових коливань.

TiO_2 має декілька кристалічних форм (рутилу, анатазу та ромбічного брукіту) [Рэми, 1972]. Структуру ґраток рутилу ($a = 4,58$; $c = 5,95$; $d = 2,01 \text{ \AA}$) та анатазу ($a = 3,73$; $c = 9,87$; $d = 1,95 \text{ \AA}$) наведено на рис. 5.2, *a* і *б*. Кожний атом Ті у кристалі рутилу оточений двома атомами О на відстані $2,01 \text{ \AA}$ і чотирма атомами О на відстані $1,92 \text{ \AA}$. У кристалі анатазу кожен атом Ті також у вигляді викривленого октаедра, оточений двома атомами О на відстані $d = 1,92 \text{ \AA}$ (на рис. 5.2 вони з'єднані подвійними лініями з тими атомами титану, яким вони належать) і чотирма атомами О на відстані $1,91 \text{ \AA}$. Кристали брукіту мають подібні параметри. У всіх трьох ґратках два із шести атомів кисню, що оточують атом титану, відрізняються від інших тим, що вони розташовані від атома титану далі за чотири інших. У ґратках анатазу лінії зв'язку спрямовані уздовж *C*-осей, у ґратках рутилу — перпендикулярно до них, а в ґратках брукіту

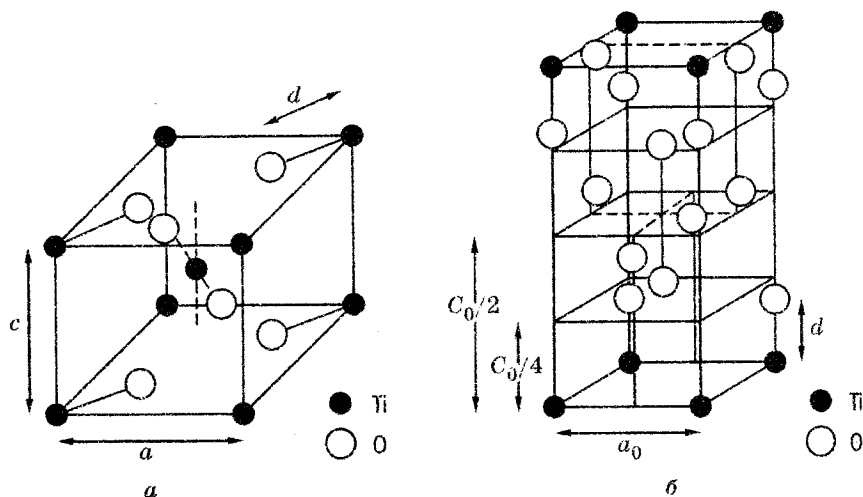


Рис. 5.2. Кристалічні ґратки типу рутилу (*a*) та анатазу (*б*)

обидва атоми O, що найбільш віддалені від атома Ti ($Ti \leftrightarrow O = 1,98 \text{ \AA}$), є єдиними, для яких відстань до атомів Ti точно однакова. Відстані інших чотирьох відрізняються як від вищезазначених, так і між собою.

TiO₂ один із надгідрофільних матеріалів і потужний катализатор [Форбс, 2008]. Під дією ультрафіолетового випромінювання TiO₂ може розкладати воду на водень і кисень. Це розкладання, або фотоліз, є давньою мрією вчених про дешевий спосіб вискоєфективного одержання водню для його використання в якості палива, до того ж такого, що не містить вуглецю.

Тонкі (товщиною від нанометрів до мікрометрів) шари TiO₂ працюють ефективніше, ніж більш великі частки, плівки наномасштабної товщини, активовані УФ-випромінюванням, мають фотокаталітичний ефект, розкладаючи органічні сполуки (зокрема ті, з яких складаються стінки клітин бактерій) на вуглекислий газ і воду [Hoffman, 1995]. Для активації TiO₂ достатньо енергії УФ-фотона з довжиною хвилі близько 388 нм. Поки електрон і дірка, що виникли при цьому, залишаються не зв'язаними, вони можуть взаємодіяти з водою та киснем на поверхні TiO₂, утворюючи аніони — радикали перекису (O₂) і активні радикали гідроксиду (OH), що здатні розкладати органічні сполуки на вуглекислий газ і воду.

Виготовлена з водної суспензії TiO₂ тонка плівка, відпалена при 500 °C, після УФ-опромінювання здобуває виняткову властивість повної — з нульовим крайовим кутом змочування — змочуваності маслом і водою. УФ-випромінювання видаляє з поверхні плівки частину атомів кисню, утворюючи на ній мозаїку нанодоменів з адсорбованими гідроксидами, що забезпечують надгідрофільність. Ділянки поза цими доменами обумовлюють велику спорідненість із маслом. Цей ефект зберігається протягом декількох діб після опромінювання, але в темряві TiO₂ поступово повертається у вихідний стан. Фотокаталітична дія TiO₂ сприяє також дезодоруванню та дезінфекції, розкладає органічні сполуки та вбиває бактерії. Мідкодисперсний TiO₂ використовується в якості катализатора при очищенні води [Hagfeldt, 1995]. Покриття з TiO₂ використовуються для виготовлення самоочисних виробів, у тому числі віконного та спеціального скла. Для одержання активного скла при його виготовленні над склом у процесі охолодження пропускаються пари тетрахлориду титану (TiCl₄), у результаті чого на поверхні утворюється плівка TiO₂ товщиною близько 20 нм. Через те, що звичайна шибка не пропускає УФ-випромінювання, покриття з боку

приміщень менш корисні, ніж зовні. Підвищення ефективності може бути забезпечене легуванням TiO_2 для зменшення ширини забороненої зони, що може активувати фотокаталіз і більш довгохвильовим випромінюванням, використовуваним для освітлення приміщень.

У цей час активно розроблюються матеріали (у вигляді складних плівок) з властивостями, що «перемикаються», гідрофільності та гідрофобності під дією світла з різними довжинами хвиль [Форбс, 2008]. Властивості самоочищення та самознезаражування матеріалів можуть використовуватися для керування мікропристроями типу «лабораторія в чипі».

Розміри гранул кристалічного TiO_2 у плівках сонячних елементів становлять 10...15 мкм [Hagfeldt, 1995]. Таким чином число трансляцій вздовж кожної осі координат кристала становить $n_i = 25...40$ ($\tau_n = n_1\tau_1 + n_2\tau_2 + n_3\tau_3$) і число дозволених енергетичних рівнів $n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \approx (15...64)10^3$. Тут n_i — цілі числа, τ_i — орти осей, i — 1, 2, 3.

Провідність нанофазних плівок TiO_2 за кімнатної температури дуже низька ($\sim 10^{-9}$ Ом·см), але під час опромінювання УФ джерелом сильно зростає, засвідчуючи, що низька провідність у темряві викликана низькою концентрацією зарядів у зоні провідності, а не поганим електричним контактом між частками.

Привабливою властивістю нанокристалічних TiO_2 плівок є високий квантовий вихід (близький до 1) транспортування фотоінжектованих електронів, які проходять через усі границі зерен, що викликало підвищений інтерес до отримання тонких напівпровідникових плівок для фотовольтаїчних пристроїв [Hagfeldt, 1995; Hoffmann, 1995; Патнер, 2004].

У роботі [Hagfeldt, 1995] показана низька ефективність фотозбудження нанокристалічного TiO_2 за рахунок механізмів власного дрейфу та дифузії, оскільки за малих розмірів часток нахил кривої потенціалу зони провідності та валентної зони, створюваних шаром просторового заряду на границях кристал/розчин, безкінечно малий. Відзначимо також, що стохастична модель переносу зарядів при нанорозмірах часток некоректна, у цьому випадку діє квантово-механічний ефект утворення загальної хвильової функції перенесення зарядів крізь увесь напівпровідниковий кластер, і заряди не підлягають дифузійному перенесенню та не вступають у реакції із частками, які присутні на поверхні. Багаторазового підвищення світлочутливості та ефективності перетворення світлової енергії видимого діапазону в електричну можна досягти

адсорбцією молекул неорганічного [Hagfeldt, 1995] або органічного [Юрре, 2003] барвника на кристалах TiO_2 . У плівковій структурі провідник-фарба-електроліт процеси розділення зарядів та їхнє транспортування до зовнішніх електродів відокремлені. В якості електроліту розглянемо склад J^-/J^{-3} .

1-й етап. Молекули фарби, що обволікають кристали TiO_2 , поглинаючи енергію падаючого світла, збуджуються та передають електрони молекулі напівпровідника. Це етап розділення заряду на пару електрон — дірка. Збудження молекул барвника під дією світла відбувається і за енергії світла меншої за ширину забороненої зони.

2-й етап. Інжекція електрона в зону провідності TiO_2 відбувається за час у декілька наносекунд.

3-й етап. У плівковій структурі напівпровідник — барвник має місце й зворотний процес — рекомбінація іонів, швидкість якого значно нижча (~ 1 мкс).

4-й етап. Ще одним рекомбінаційним процесом є відновлення триїодиду в електроліті електроном зони провідності.

5-й етап. Транспортування електронів у нанокристалічних TiO_2 плівках по усіх частках і границях зерен. Процес виконується з високим виходом, що практично дорівнює одиниці, вочевидь, за рахунок тунельного ефекту. Швидкість переносу електронів істотно нижча за швидкість передачі заряду в монолітному монокристалічному TiO_2 . Швидкість цього процесу оцінена [Bjorksten, 1994] вимірюваннями фотоструму після збудження ультрафіолетовим наносекундним імпульсним лазером.

6-й етап. Відновлення триїодиду на протилежному до стоку електронів електроді (електропровідне скло, вкрите каталітичним шаром платини) обмінним струмом щільністю $(10^{-2} \dots 2)10^{-1} \text{A}/\text{cm}^2$.

7-й етап. Відновлення окисленого барвника іодидом зі швидкістю процесу $\sim 10^{-8}$ с. Схему, що демонструє кроки та кінетику перетворення сонячної енергії з комплексами J^-/J^{-3} електроліту наведено на рис. 5.3. На схемі представлені також енергетичні рівні різних фаз процесу для барвника з $\text{RuL}_2(\text{SNC})_2$, адсорбованого на кристалах TiO_2 і окислювально-відновлювальної пари J^-/J^{-3} в електроліті [Hagfeldt, 1995].

Нанорозмірні частки TiO_2 можуть формувати тонкі прозорі пористі плівки товщиною ~ 10 мкм із розвинутою внутрішньою поверхнею. Колоїдні частки являють собою структуру з наноточок або наноточок, які перебувають в електричному контакті одна з одною, утворюючи нанопровідники, і забезпечуючи тим самим

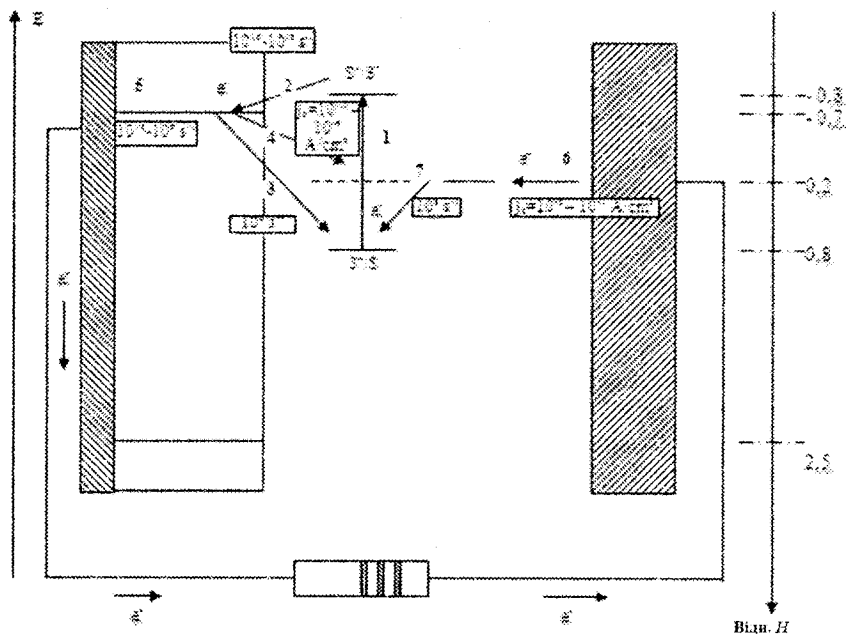


Рис. 5.3. Етапи перетворення сонячної енергії в нанокристалічних частках TiO_2 , зчутливлених барвником і просочених електролітом на основі J^-/J^{2-} і електрохімічні потенціали, що діють на різних етапах

проходження електричних зарядів крізь такі плівки. Конструкцію фотохімічного елемента представлено на рис. Д8.33.

Технологія одержання тонких мезопористих плівок TiO_2 полягає в трафаретному друку на скляних електропровідних підкладках колоїдного розчину напівпровідника та наступної термообробки в автоклаві, що забезпечує заповнення пор плівки електролітом.

Від режимів виконання основних операцій залежить товщина, прозорість, пористість плівки, розміри та дисперсія розмірів часток, а також агрегатний стан TiO_2 (співвідношення форм рутилу та анатазу). Так, оптичні властивості можуть різко змінюватися при зміні температури обробки в автоклаві.

За температури 200°C утворюється прозорий нанокристалічний TiO_2 (100 % анатазу) з відносним розподілом часток близько значення 15 нм. Збільшення температури до 250°C призводить до високого розсіювання плівкою світла. Плівка виходить білою та містить агрегати малих часток і деяку кількість великих часток більших ніж 100 нм, а також деяку кількість рутилу. Для

одержання товщини плівки більшої ніж 5 мкм і рівномірного розподілу в електроліті необхідно включити частки TiO_2 у колоїдну пасту. Зазвичай фотовольтаїчні елементи оброблюються за температури 240...250 °C і товщини плівки ~ 10 мкм. Типове значення пористості плівок близько 50 %. Від в'язкості, реологічних властивостей паст і режимів трафаретного друку залежать товщина плівки, однорідність складу нанесеної плівки.

Найкраща ефективність перетворення світлової енергії в електричну (коефіцієнт корисної дії до 11 %) отримана з зчутливленням TiO_2 барвником на основі рутенію $\text{RuL}_2(\text{SCN})_2$, кристала, що обволікає, та електроліту, що містить J^-/J^{3-} . Рутенієвий комплекс поглинає енергію світла та ініціює передачу електрона молекулі TiO_2 .

Вихідна напруга нанокристалічного сонячного елемента являє собою різницю між рівнем Фермі діоксиду титану при освітлюванні та редокс потенціалом електроліту.

Плівка TiO_2 у фотовольтаїчному елементі виконує таку ж роль як біологічна ліпідна мембрана зеленого листка в природному фотосинтезі, закріплює положення молекул барвника, є акцептором електронів і забезпечує їхнє перенесення на колекторний електрод.

TiO_2 у структурі виконує роль акцептора та провідника електрону. Електрони, інжектовані в зону провідності молекули TiO_2 переносяться через нанокристалічну плівку до провідної скляної підкладки, колектора струму. За схемою рис. 5.3 видно, що для подачі заряду через плівку необхідна рушійна сила близько 0,1 eV. Для безперервності процесу перетворення барвник повинен бути відновлений шляхом передачі електрона від часток електроліту, які у свою чергу відновлюються на протиелектроді елемента. Слід зазначити, що у фотовольтаїчному елементі неосновні носії заряду (дірки) не переміщуються, вони залишаються локалізованими на окисненій молекулі фарби та процес рекомбінації електронів, зворотний процесу їхньої інжекції, може проходити тільки на границі TiO_2 /фарба. Тому бажано підібрати матеріал з високим коефіцієнтом інжекції $K_{\text{інж}}$ і низьким коефіцієнтом рекомбінації $K_{\text{рек}}$. У використовуваних комплексах металу відношення $K_{\text{інж}}/K_{\text{рек}} > 10^3$ і доходить до 10^6 .

Іншою важливою характеристикою фотовольтаїчних елементів є їхня спектральна чутливість у видимому діапазоні світлових хвиль. На рис. 5.4 наведено порівняльні дані для TiO_2 без зчутливлення та з зчутливленням барвниками RuL_3 ($L=2,2'$ — біпіридил — 4,4' — дикарбоксилат) і $\text{RuL}_2(\text{SCN})_2$.

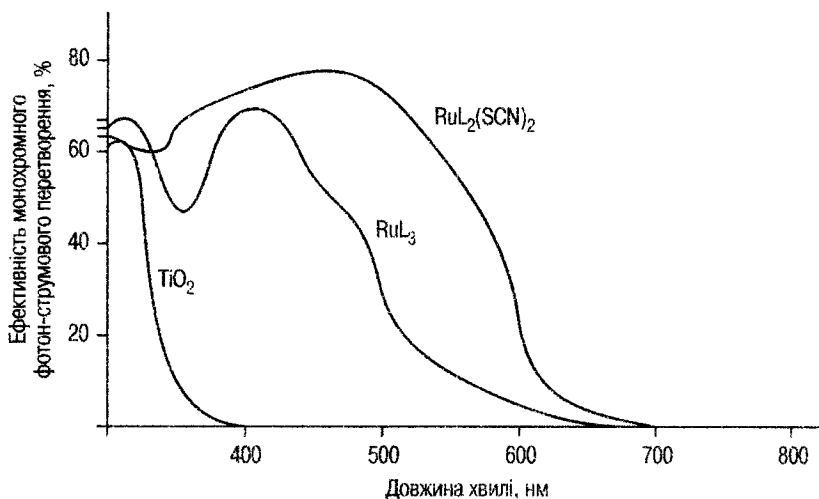


Рис. 5.4. Спектральна чутливість перетворювачів

Найбільш удалим зчутливлювачем TiO_2 дотепер є $\text{RuL}_2(\text{SCN})_2$. Окрім ефективного використання спектра видимого випромінювання обидва наведених зчутливлювача мають високу часову стабільність:

- при безперервному опромінюванні елемента з RuL_3 протягом дев'яти місяців не відзначено погіршення ефективності перетворення;
- при часі опромінення $\text{RuL}_2(\text{SCN})_2$, що відповідає $5 \cdot 10^7$ редокс циклів (~ 10 років безперервного опромінювання сонячним світлом), не відзначено помітного зниження ефективності.

В якості речовини, що поглинає сонячну енергію, можуть використовуватися також різні органічні матеріали [Юрре, 2003]. Найбільш дослідженими органічними матеріалами, що забезпечують високу ефективність фотоелектронного перетворення енергії, є системи, сенсibilізовані барвниками [Юрре, 2003]. Фталоціаніни Pc , пентацени Pn представляють особливий інтерес. Фталоціаніни — найбільш перспективні матеріали, оскільки вони легко синтезуються, нетоксичні та їхні електричні властивості широко досліджені. Використання унікального електронного акцептора C_{60} значно підвищує ефективність перетворення сонячної енергії в електричну. Для створення органічних фотовольтаїчних елементів широко використовуються провідні ароматичні й гетероциклічні полімери: полі-(з-феніл-вінілени) (PPV), поліаніліни

(PANJ), поліпіроли (Ppy) та політіофени (PTh). Органічні фотопровідні матеріали забезпечують високу світлочутливість і низький темновий струм. Завдяки доступності та простоті нанесення вони дозволяють виготовляти відносно дешеві фотовольтаїчні осередки.

Висока ефективність і висока стабільність зчутливлених барвниками нанокристалічних TiO_2 сонячних елементів може бути пояснена сприятливою кінетикою перенесення фотозбудженого електрона барвника в потрібному напрямку. Перенесення заряду крізь колоїдну TiO_2 -плівку, ймовірно, поліпшується також за рахунок заповнення пор у напівпровідниковому матеріалі, тобто проявлення елементами сонячних батарей ефекту фотопровідності.

Головною перевагою сонячних елементів на сьогодні є можливість одержання напівпрозорих фотовольтаїчних елементів і економічні міркування.

Елементи виготовляються з матеріалів низької чистоти з використанням процесів малої вартості.

Нанокристалічний TiO_2 нешкідливий для навколишнього середовища та здоров'я людей. Діоксид титану зустрічається в природі як рутил, анатаз і ромбічний брукіт і використовується в якості білого пігменту та добавки в зубній пасті.

Також і рутеній використовується без шкоди для здоров'я у вигляді добавок для кісткових імплантантів.

Дуже ефективними можуть виявитися TiO_2 нанокристалічні електроди з їхньою надзвичайно високою площею поверхні та можливістю одержання різних оптичних характеристик.

В Tokyo University of Science розроблений новий барвник, що може розширювати спектр чутливості у бік інфрачервоних хвиль. Французькі дослідники намагаються використовувати ацетилен і етилен.

Роботи проводяться й з іншими колоїдними напівпровідниками. Наприклад, с ZnO . Досягнутий коефіцієнт корисності дорівнює 6 %.

5.2. Гальванічні елементи

Швидкість мініатюризації елементів джерел живлення йде приблизно в 50 разів повільніше за зменшення розмірів напівпровідникових приладів. Користуючись новими можливостями нанотехнологій, розробники ДЖ постійного струму прагнуть використовувати мікроелектронні технології для виготовлення

елементів живлення, які б можна було вбудовувати безпосередньо в мікросхемах. У нових батареях розміри електродів зменшені до нанометрових розмірів, а конструкція дозволяє зберігати їх без втрати ємності до 15 років, що дає можливість застосовувати їх для живлення датчиків, що контролюють радіоактивність або накопичення токсичних речовин. Активовані після тривалої бездіяльності батареї можуть розвивати велику ємність. Крім того токсичні речовини, що втримуються в них, нейтралізуються, коли запас енергії закінчується.

У новій нанобатарей, створеній Bell Laboratories і фірмою Phase в 2005 р. (шт. Нью-Джерсі, США), електроліт відділений від електродів наномембраною [Чой, 2006] (рис. Д8.34).

У вихідному стані (рис. Д8.34 вгорі) цинкові аноди та катоди із двоокису марганцю розташовуються на підкладці у вигляді паралельних смуг. Над ними розміщується поршнева стільникова мембрана (діаметр пор 20 мкм) із кремнію та вкрита шаром SiO_2 та фторвуглецевим полімером. На мембрані у спокої підтримується шар рідкого електроліту (розчин хлориду цинку).

Під час активізації (рис. Д8.34 внизу) електроліт просочується через мембрану та заливає аноди і катоди. Внаслідок електрхімічної реакції генерується електрична енергія.

Технологія одержання електрозмочувальної мембрани товщиною 600 нм наступна. Спочатку за допомогою плазмового травлення із кремнієвих пластин, вкритих шаром SiO_2 , створювалися тонкі стільникові структури. Потім за температури 1000 °C у печах проводилося оксидування пор, після чого вся структура покривалася фторвуглецевим полімером.

Фахівці Bell Labs, mPhase та університету Рунгера намагаються адаптувати до наноскопічних пристроїв процеси, що протікають у літєвих елементах живлення цифрових камер і стільникових телефонів. Нанобатарея може стати основою екологічно чистих ДЖ, які будуть містити з'єднання, що зв'язують електроліт. Не виключено, що кремнієві наноструктури вдасться замінити пластиківими та створити гнучкий елемент живлення.

Нанобатарея призначена для спеціальної апаратури, наприклад, для датчиків, що скидаються з літаків. Ввімкнення радіодатчиків може знадобитися лише кілька разів за час роботи, скажімо, для оловіщення про появу токсинів або радіації. Значна потужність, вироблювана елементами, може забезпечити передачу на велику відстань.

У цей час почалися роботи зі створення малих пристроїв з використанням енергії зовнішнього середовища для мікро- та наномасштабних систем, які є наногенераторами [Чжонлинь, 2008]. Створення таких пристроїв дозволить отримати мікро- та нанопристрої, що не потребують заміни батарей живлення: вживлювальні біологічні нанодатчики, стимулятори серцевої діяльності, сенсори контролю стану навколишнього середовища, технічні та військові об'єкти та ін.

Загальна ідея створення таких джерел полягає в перетворенні в електричну енергію різних видів енергії навколишнього середовища, у тому числі тієї, що виділяється людиною, на які раніше не звертали уваги, і вони просто пропадали. До таких видів енергії належать вібрації або коливання, різниці температур, біохімічні фактори, ультразвукові хвилі, акустичні шуми. Так потенційними джерелами в тілі людини є механічна та теплова енергія, хімічна та гідравлічна енергія системи кровообігу. Перетворення навіть малої частини цих видів енергії в електричну може виявитися достатнім для живлення багатьох видів переносних і вбудованих пристроїв, що споживають потужність від нановат до мікровоат.

У Масачусетському технологічному інституті розробили «енергодобувальні» туфлі на основі п'єзоелектричного ефекту, ведуться розробки ДЖ для МЕМС, що потребують менших потужностей для свого функціонування.

У табл. 5.3 наведено кількості енергії, що виробляються людським тілом і орієнтовні кількості енергії, доступні для утилізації.

Таблиця 5.3

Деякі джерела енергії людини

Функція діяльності	Кількість механічної енергії, Вт	
	вироблювана організмом	придатна для добування
Кровоток	0,93	0,16 на один рух
Видих	1,00	0,17
Вдих	0,83	0,14
Рух рук	3,00	0,51 (2,25 Дж на один рух)
Ходьба	67,00	11,39 (18,9 Дж на один крок)
Друкування на клавіатурі	$(6,9...19,0)10^{-3}$	$(1,2...3,2)10^{-3}$

Нещодавно створені мікрогенератори, які використовують енергію вібрацій за допомогою п'єзоелектричних або електромагнітних перетворювачів. В електромагнітному мікрогенераторі масштабу МЕМС використовується рухомий магніт або котушка,

що індуктують змінний електричний струм у ланцюзі. У типовому п'єзоелектричному вібраційному генераторі використовується двошарова (біморфна) консольна балка із цирконату-титанату свинцю із тягарцем на вільному кінці. Коли сила тяжіння згинає консоль донизу, верхній п'єзоелектричний шар підлягає деформації розтягування, а нижній — стиску. У результаті один шар одержує позитивний потенціал, а інший — негативний. При коливаннях маси в поперечних до балки напрямках генерується змінна напруга. Рушійною силою такого генератора є вібрації тягарця.

У світі наномасштабів внаслідок ефекту масштабування («скейлінгу») сила тяжіння стає менш значимою в порівнянні із силами хімічних зв'язків і міжмолекулярної взаємодії, змінюється співвідношення інерційних сил і сил пружності на користь останніх, інерційних сил і поверхневого натягу, динаміка процесів теплопередачі і тертя та т. ін.

Для створення наномасштабного генератора перспективним механізмом перетворення механічних коливань в електричну енергію є п'єзоэффект. Знайдено матеріал, який володіє рідкісною особливістю — поєднанням властивостей п'єзоелектрика та напівпровідника ZnO, що дозволило використовувати його для створення, накопичування зарядів і одержання електроенергії для живлення нанопристроїв.

Наногенератор використовує енергію коливань згинання нанопровідників оксиду цинку діаметром від 30 до 100 нм і довжиною від 1 до 3 мкм під дією вібрацій, пульсу людини або акустичних хвиль. Форма нанопровідників ZnO, отримана з використанням скануючого електронного мікроскопа, а також вихідна напруга окремих провідників наведені на рис. Д8.35.

П'єзоэффект був виявлений при згинанні провідників зондом атомного силового мікроскопа (рис. Д8.36). На розтягнутій стороні формується позитивний потенціал, а негативний на стислій. Коли кінчик зонда сканував верхівки нанопровідників з оксиду цинку в зображенні поля вихідної напруги спостерігалася безліч піків, що відповідають окремим положенням контакту.

Конструкція генератора, котрий працює автономно та безупинно за рахунок перетворення механічної енергії, яка надходить із зовнішнього середовища у вигляді хвиль або вібрацій, складається із системи паралельних нанопровідників з оксиду цинку та вкритого платиною кремнієвого електрода з ребристою поверхнею, що змушує безліч нанопровідників згинатися одночасно. Платинове покриття електрода збільшувало його провідність і надавало йому

властивості діода, що проводить струм тільки в одному напрямку, періодично згинаючи нанопровідники то в одну, то в іншу сторону.

У якості біосумісних підкладок, наприклад для біодатчиків, живильовальних у м'язи або суглоби, або для генераторів, вбудованих у взуття, потенційно можуть знайти застосування провідні полімери.

Для практичного використання наногенератора необхідно багато поліпшити його характеристики: всі нанопровідники повинні генерувати електроенергію одночасно та безупинно, а весь генерований запас повинен збиратися та розподілятися ефективно. Масове вирощування мікропровідників з оксиду цинку може виявитися рентабельним, але необхідно вирощувати повністю однорідні системи провідників, у яких електроенергію виробляє кожен з них, і домогтися збільшення терміну служби (зараз він становить 50 годин).

Процес створення систем нанопровідників містить у собі націлювання на підкладку тонкого шару золота — каталізатора для вирощування провідників. Кристали оксиду цинку утворюють шестигранні стовпчики. Для збільшення міцності зчеплення нанопровідників з підкладкою на неї після закінчення вирощування наноситься тонкий шар полімеру, щоб основи нанопровідників виявилися частково закріпленими в цьому шарі.

Генератор площею 6 мм^2 забезпечив напругу близько 10 мВ і струм 800 нА. Блоки подібних генераторів можна вмикати послідовно для збільшення напруги та паралельно для збільшення струму.

Подібні ДЖ можуть виявитися ефективними для пристроїв, що працюють короткочасно та з малою шпаруватістю (скважністю).

5.3. Струминні друкуючі головки

Цей вид виробів є найуспішнішим практичним застосуванням МЕМС, що перевершує навіть автомобільні датчики прискорень і тиску та медичні датчики тиску. Струминні друкуючі головки використовують низку капілярних отворів для розпилення крапель фарби безпосередньо на друковану заготівку. Залежно від типу головок подача фарби (виприскування) здійснюється різними способами: термічним або п'єзоелектричним.

МЕМС термічна струминна друкуюча головка, винайдена в 1979 р. ф. ІВМ використовує ефект термічного розширення випарів фарби. Усередині друкуючої головки розташований набір мініатюрних резистивних нагрівачів. Ці резистори можуть розігріватися

електричними імпульсами, керує якими мікропроцесор. Тривалість імпульсів — декілька мкс (звичайно менш 3 мкс). Фарба протікає над кожним резистором, що при нагріванні зі швидкістю 10^8 °C/c випаровує фарбу, утворюючи пухирчик. При розширенні пухирчика деяка частина фарби виштовхується з отвору в матриці отворів, і потрапляючи на папір, миттєво твердне. Коли пухирчик лопається, утворюється вакуум, що засмоктує більше фарби в друкуючу головку з ємності в картриджі (рис. Д8.37). Слід зазначити, що в системі немає частин, що рухаються (крім самої фарби), так що не всі МЕМС-пристрої мають рухомі елементи.

П'єзоелектричний елемент також може бути використаний для подачі фарби через отвори (рис. Д8.38). У цьому випадку п'єзоелектричний кристал розміщується за резервуаром з фарбою кожного отвору. На п'єзокристалічний елемент надходить дуже маленький заряд, що викликає його вібрацію. Коли елемент відхиляється всередину об'єму, він створює сили, що виштовхують малу порцію фарби з отвору. При відхиленні елемента у зворотному напрямку він втягує в резервуар небагато фарби для відшкодування розпиленої фарби. Це рішення запатентоване фірмою Epson, але його використовуює більшість провідних в галузі друкування фірм.

Можливості МЕМС забезпечують розміщення все більшої кількості нагрівальних або п'єзоелектричних елементів у друкуючій головці. Перші принтери мали 12 отворів з роздільною здатністю до 92 точок на дюйм. Сучасні принтери мають до 600 отворів, які можуть спрацювати всі одночасно, забезпечивши 1200 точок на дюйм. Epson, Lexmark, Hewlett-Packard, Olivetti, Xerox і Canon використовують у своїх друкувальних струминних принтерах ці МЕМС. В 2000 р. було продано понад 350 млн головок.

5.4. Паливні елементи

Паливні елементи (ПЕ), як і гальванічні батареї, є електрохімічними пристроями, що перетворюють енергію хімічних реакцій в електрику. ПЕ використовують хімічні реагенти, що зберігаються окремо від елемента. Доти поки надходить паливо, ПЕ виробляє електричну енергію. ПЕ працюють довше та мають поліпшені характеристики в порівнянні з гальванічними.

На рис. 5.5 наведено схему ПЕ на основі їдкового калію (КОН).

Примітка: Визначення катода. 1. Негативний електрод в електrolізній ємності. 2. Позитивний вивід елемента батареї.

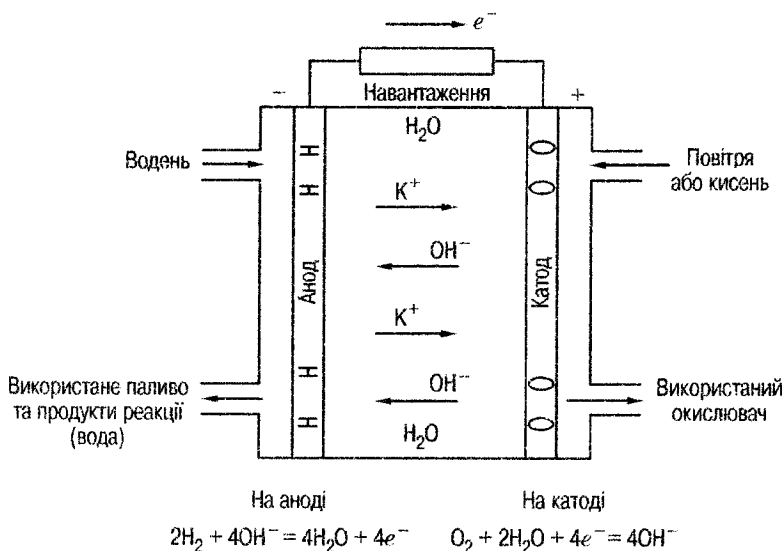


Рис. 5.5. KOH паливний елемент

Одна з найбільш розвинених технологій використовує електрода на основі протонно-обмінних мембран (ПОМ) — матеріалу, названого Nafion, розробленого фірмою DuPont (США). Ціна самого матеріалу ~ 1000 доларів/м².

Електроди ПЕ звичайно покриті або анодовані платиною, яка є катализатором хімічних реакцій, що здорожує конструкцію.

У цей час розробляються малогабаритні повітряно-алюмінієві ПЕ. Низкою фірм США, Канади, Японії, Росії планується серійний випуск автомобілів, що працюють на паливних елементах.

Одним з перспективних напрямків використання вуглецевих нанотрубок вважається зберігання в них водню, що необхідний для живлення ПЕ.

Анод вкритий вуглецевими нанотрубками із сорбованими атомами водню. Водень іонізується, а іони H^+ дифундують до катода через електроліт, де із цих іонів, електронів, що пройшли через навантаження, та кисню утворюються молекули води та іони OH^- .

За існуючими оцінками, для ефективного використання в цьому процесі ВНТ повинна поглинати $\sim 6,5\%$ водню за вагою. У цей час у трубку вдається помістити тільки 4% водню за вагою.

Одним з можливих методів заповнення ВНТ воднем є електрохімічний з використанням елемента, наведеного на рис. 5.6.

Одностінні нанотрубки у формі аркуша паперу складають негативний електрод у розчині КОН, що є електролітом. Інший електрод складається з $\text{Ni}(\text{OH})_2$. Вода електроліту розкладається з утворенням позитивних іонів водню (H^+), що рухаються до негативного електрода з нанотрубок. Наявність зв'язаного в трубках водню визначається за падінням та інтенсивністю раманівського розсіювання, як показано на рис. 5.7, де представлено спектри до заповнення ВНТ і після електрохімічної обробки.

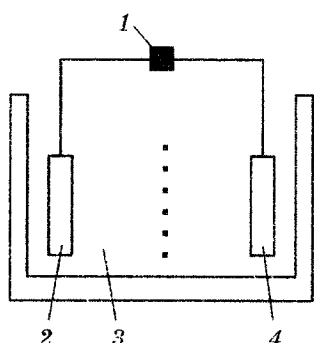


Рис. 5.6. Елемент заповнення ВНТ воднем:

- 1 — джерело живлення;
- 2 — електрод, вкритий ВНТ; 3 — електроліт (водний розчин КОН з концентрацією 6 моль/літр);
- 4 — позитивний електрод

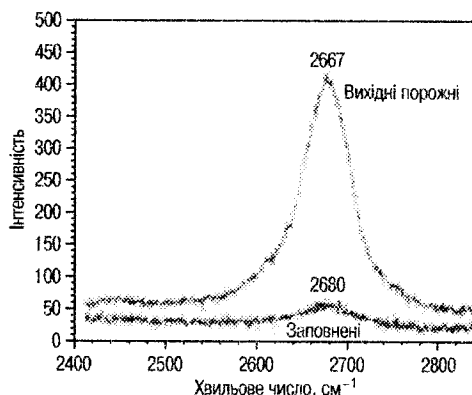


Рис. 5.7. Раманівський спектр вуглецевих нанотрубок з максимумом інтенсивності, що приходить на 2667 см^{-1} , отриманий до обробки (порожні нанотрубки) і після обробки (заповнені воднем нанотрубки) в електрохімічному елементі, показаному на рис. 5.6

5.5. Мікрофон — телефон, слухові апарати

В основі і мікрофона і телефона [Стикс, 2004] лежать коливні мембрани, які в MEMS можуть мати вигляд квадратів зі стороною до 0,5 мм (рис. Д8.39). Коливання мембрани перетворюються в електричну напругу, відповідної частоти та гучності. Поперечний переріз структури наведений на рис. Д8.40.

Всі елементи мікросхеми, включаючи мембрани, виготовляються шляхом створення тонких провідних металевих і ізоляційних шарів із двоокису кремнію на кремнієвій підкладці з наступним їхнім травленням. У ході літографії та травлення, застосовуваних для виготовлення мембран, формується сітка з металевих провідників, простір між ними заповнюється двоокисом кремнію.

Після того як шар за шаром виготовляються інші елементи, сітка виявляється на поверхні. Потім за допомогою газової плазми витравлюється підкладка та утворюється повітряна порожнина, що забезпечує знову створеній структурі можливість коливатися.

Нарешті вся сітка покривається полімером, на чому виготовлення мембрани завершується.

MEMS-мікрофони покликані поліпшити якість звуку, що у багатьох стільникових телефонах залишається низькою, оскільки вони містять лише одну мембрану, розміри якої обираються на основі компромісу між великими розмірами, необхідними для вловлювання слабких звуків, і досить малими для сприйняття високих частот. У випадку MEMS-мікросхеми такий баланс не потрібний. Акустичні телефони-мікрофони першого покоління будуть мати більше 5 мембран. Одні будуть забезпечувати високу чутливість, інші — передачу високих частот. Вихідні імпульси окремих мембран будуть поєднуватися сигнальним процесором, що входить до складу мікросхеми. Така ж гнучкість конструкції дозволить одержати високу якість звуку й у MEMS-телефоні.

5.6. MEMS проектори зображень

Одним із ранніх MEMS пристроїв, використовуваних для застосування у великопанельних дисплеях, є цифровий мікродзеркальний пристрій (DMD) фірми Texas instruments.

Пристрій містить понад мільйон мініатюрних піксель-дзеркал з розмірами 16×16 мкм, здатних повертатися на $\pm 10^\circ$ понад 1000 разів у секунду (рис. Д8.41). Світло від джерела випромінювання потрапляє на лінзи (або дзеркала) і відбивається безпосередньо на проекційний екран. Пристрої DMD використовуються для дисплеїв, для проекторів ПК, телевізорів з високим розрізненням (HDTV's) і величезних екранів, таких, як у цифрових кінотеатрах, де зазвичай рідинно-кристалічні технології неконкурентоспроможні.

MEMS забезпечують можливість розміщення дзеркал усього з 1 мкм рознесенням, збільшуючи площу відбивальної поверхні (до 89 %) MDM, у порівнянні з типовим РКД (від 12 до 50 %). Це зменшує зернистість і забезпечує більш чітке та яскраве зображення. У цей час такі пристрої використовують більш ніж 30 виробників (Kodak найбільший) і продано понад 500 000 систем.

5.7. Акселерометри

Пристрої для вимірювання та контролю прискорення (акселерометри) широко застосовуються в різних рухомих об'єктах: транспортних, космічних, промислових, дослідних та ін. Все більше розповсюдження одержують інтелектуальні сенсори в МЕМС-виконанні, що забезпечують і вимірювання, і перетворення сигналів пропорційних до прискорення. Масове виробництво акселерометрів для автомобільної промисловості забезпечило підвищення надійності швидкодії систем повітряних подушок безпеки, зменшення вартості датчика системи приблизно на два порядки, ГМХ на 2...3 порядки. Ці акселерометри були одним з перших комерційних МЕМС-виробів, що дали значні кошти для робіт в області МСТ.

Зараз це широко розповсюджені інтелектуальні сенсори, реалізовані на одній підкладці, або акселерометри, якими вимірюють швидкість гальмування при зіткненні з перешкодою. Значення прискорення перетворюється в напругу, що керує запуском тригера, який формує імпульс електричного струму через нагрівальну спіраль, розміщену в капсулі з азидом натрію (NaN_3). Миттєве нагрівання призводить до вибухоподібного розкладання вмісту капсули відповідно до реакції $2\text{NaN}_3 \rightarrow 2\text{Na} + 3\text{N}_2$. Газоподібний азот, що виділяється при цьому, надуває подушку безпеки. Пристрої вагою більше кілограма, що коштували раніше сотні доларів, в МЕМС-виконанні за розмірами стали меншими ніж 1 см, їхня вартість знизилася до декількох доларів [Пул, 2007].

МЕМС акселерометри призначені для вимірювання лінійних прискорень і є масово вироблюваними інерційними перетворювачами фізичних величин і компонентами датчиків.

В основу роботи акселерометрів можуть бути покладені різні фізичні ефекти: ємнісний, п'єзорезистивний, п'єзо- та сегнетоелектричний, електромагнітний, оптичний, тунельний. Акселерометр, по суті, є ємнісним або п'єзоелектричним пристроєм, що складається з підвішеної маси жорстких пластин і набору пластин, жорстко закріплених на платі. Прискорення діє на підвішену масу пластин, змінюючи ємність між ними та пластинами, жорстко закріпленими на платі. Зміна ємності залежить від прискорення, що визначає зсув підпружинених пластин.

Сенсори повітряних автомобільних подушок безпеки стали фундаментальним успіхом МЕМС-технології. Більше 100 млн акселерометрів продані та працюють понад 10 років, підтвердивши

надійність їхньої технології. Прикладом успіху в цей час є автомобіль BMW 740, що має більше 70 МЕМС-пристроїв, включаючи антиблокувальну систему гальмування, електроприлади та керуючі навігаційні системи, вимірювання вібрацій, датчики палива, шумозаглушення, індикацію перекидання, натяг ременів безпеки та т. ін. У результаті цього автомобільна промисловість стала головним збудником розвитку МЕМС для інших умов експлуатації.

Акселерометри також знайшли застосування для виявлення землетрусів, у відеоіграх віртуальної реальності, джойстиках, крокомірах, високоякісних приводах дисків, системах озброєння та ін., для вимірювання вузлів нахилу, сил інерції, ударних навантажень і вібрацій. Одним з перспективних застосувань вважаються датчики тиску шин автомобілів із пристроями дистанційного вимірювання. Вони знаходять широке застосування не тільки на транспорті, але й у медицині, у промислових системах вимірювань і керування, в інерційних системах навігації, системах озброєння, для виявлення землетрусів. Акселерометри починають використовуватися в моніторах верстатів і механізмів, роботах, діагностичних системах, у тих місцях, де необхідно вимірювати прискорення, удари, вібрації.

Промисловість випускає багато видів акселерометрів з різними принципами дії, на різні діапазони прискорення, габаритно-масових показників і ців. Провідними виробниками акселерометрів є фірми Analog Devices, Motorola, Sensor Nor, Nippondenco, SNL.

На рис. Д8.42 наведено відомості про перспективні області застосування МЕМС-пристроїв і однієї з перших розробок акселерометра поверхневої конструкції ADXL50 (Analog Device, США). Акселерометр розміщений на одному кристалі й забезпечує вимір прискорень у діапазоні $\pm 50g$ (статичних і динамічних у діапазоні до 1 кГц). Забезпечено температурну компенсацію, формування опорної напруги й самоконтроль датчика.

Весь кристал акселерометра розміром $3,05 \times 3,05$ мм зайнятий головним чином схемами формування сигналу, які оточують мініатюрний ЧЕ датчика розміром 1×1 мм, розташований у його центрі. ЧЕ являє собою диференціальну структуру з можливим діелектриком, обкладини якого витравлені в полікремнієвій плівці товщиною 2 мкм. Нерухомі обкладини цього конденсатора являють собою прості консольні стрижні, розташовані на висоті 1 мкм від поверхні кристала на полікремнієвих опорах — анкерах, приварених до кристала на молекулярному рівні.

Фактично датчик має 54 пари елементів, аналогічних до тих, що наведені на рисунку. Інерційна маса датчика при зміні швидкості переміщення кристала зміщується відносно корпусу кристала. Система штирів утворює рухома обкладину конденсатора змінної ємності. З кожного кінця ця структура опирається на анкери, аналогічні за конструкцією до тримачів нерухомих обкладок. Розтяжки по кінцях інерційної маси, які втримують її у висячому положенні, є пружинами постійної пружності, що обмежують переміщення та повернення рухомої маси у вихідне положення. Таким чином, сила інерції врівноважується силою пружності пружини

$$ma = kx, \quad (5.1)$$

де m — маса; a — прискорення; k — жорсткість пружини; x — зсув маси відносно вихідного стану.

Звідси

$$a = \frac{k}{m} x, \quad (5.2)$$

причому k/m — конструктивний параметр датчика.

Акселерометри можуть виготовлятися методами поверхневої або об'ємної обробки.

Датчики прискорення, реалізовані на дискретних об'ємних мікроконденсаторах, одержали широке розповсюдження завдяки малим габаритно-масовим характеристикам, енергоспоживанню та вартості, високій надійності [Зими́на, 2004], стабільності параметрів, масовості виробництва. На рис. 5.8 [Зими́на, 2004] наведено ЧЕ МЕМС-акселерометр фірми Draper Laboratory (США) у вигляді зустрічно-пластинчастої структури. Монокристалічні гребінки з високою площинністю елементів забезпечують високу

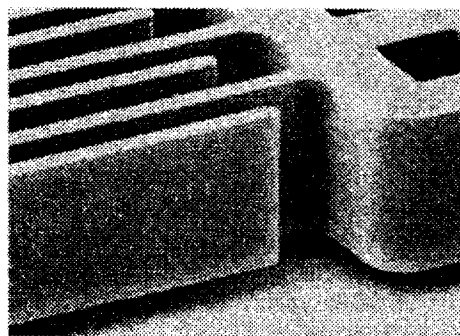


Рис. 5.8. Ємнісний ЧЕ акселерометра

точність перетворення в широкому діапазоні прискорень (до 100g). Під час виготовлення датчика застосовано прецизійне об'ємне травлення підкладки після формування в ній шарів, сильно леггованих бором. Ці шари (стоп-шар) забезпечують зупинку процесу травлення та одержання площинок під металізацію.

Методи поверхневої обробки передбачають осадження тонких п'езорезистивних плівок на підкладку з наступним витравлюванням необхідного малюнка рухомої діафрагми. Проміжок між діафрагмою та поверхнею пластини та, отже, ємність утвореного ними конденсатора залежать від прискорення. Перевагою таких приладів є гнучкість конструкції, можливість побудови датчика прискорення за трьома осями і формування схеми зчитування на одному з них кристалі. Така технологія названа *integrated MEMS* (*iMEMS*).

Як приклад розглянемо акселерометри, виготовлені за поверхневою технологією *iMEMS*, одно- та двокоординатні акселерометри ф. Analog Devise (США) — ADXL 103/ ADXL 203.

Розмір керамічного безвивідного корпусу LCC, мм	— $5 \times 5 \times 2$
Напруга живлення, В	— 5—3
Споживаний струм, мА	— 0,7
Діапазон вимірюваних прискорень, g	$\pm 1,7$
Роздільна здатність за кутом, градус	— 0,1
Витримуване прискорення, g	— 3500
Наробіток на відмову, год	— 10^9

Структурну схему акселерометрів наведено на рис. 5.9.

Обидва акселерометри містять полікремнієвий сенсор, отриманий поверхневою обробкою полікремнієвої структури на кремнієвій підкладці (над видаленим шаром SiO_2). Полікремнієві пружини підтримують штири рухомого електрода конденсатора та створюють пружну протидію силі прискорення (інерції). Зсув рухомої обкладки диференціального конденсатора відносно двох незалежних нерухомих обкладок, на які подається напруга живлення, зрушена по фазі на 180° . Прискорення відхиляє рухомий електрод, розбалансовуючи диференціальний конденсатор, у результаті чого

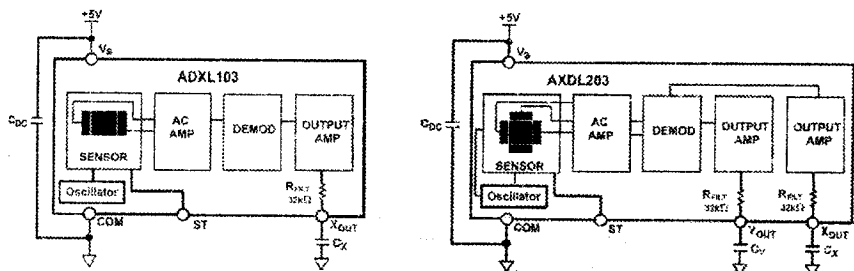


Рис. 5.9. Блок-схема акселерометрів ADXL 103/ADXL 203

виходить вихідна напруга прямокутної форми, амплітуда якої пропорційна до прискорення. Фазочутливий демодулятор випрямляє сигнал для визначення напрямку прискорення. Вихідна напруга демодулятора підсилюється та подається на навантаження через резистор 32 кОм. На виході користувач встановлює начіпний конденсатор, що визначає ширину смуги пропускання датчика. Така фільтрація поліпшує роздільну здатність і запобігає помилковим спрацьовуванням від перешкод.

Залежність вихідної постійної напруги від кута нахилу площини, на якій встановлено датчик, відносно горизонтального напрямку чутливої осі наведено на рис. 5.10, а зовнішній вигляд корпусу акселерометра — на рис. 5.11. Рис. 5.10 показує, що залежність $U_{\text{вих}} = U(\psi)$ нелінійна, нагадує синусоїду. Чутливість акселерометра найбільша поблизу горизонтального положення датчика, мінімальна — за кутів $\pm 90^\circ$.

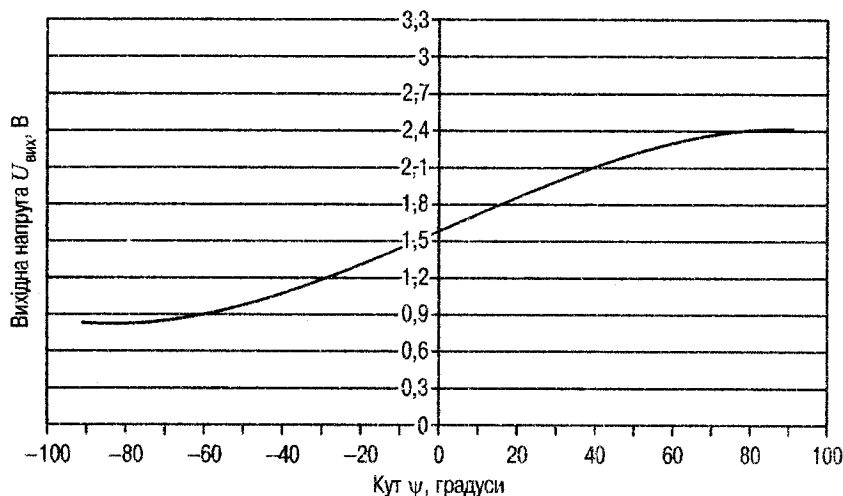
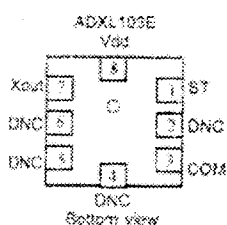


Рис. 5.10. Залежність вихідної напруги від кута нахилу датчика

Розроблено датчики із чутливістю за однією (перша цифра в позначенні), двома та трьома осями.

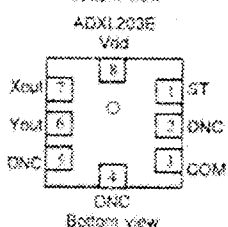
5.8. Мікрогіроскопи

Гіроскопи — це прилади, що дозволяють відрاهовувати напрямки в просторі відносно вихідного заданого напрямку, стабілізувати положення об'єкта в просторі. Вони використовуються для навігації, орієнтації, цілевказання та ін.



ADXL103 PIN DESCRIPTION

Pin	Name	Description
1	ST	Self Test
2	DNC	Do not connect
3	COM	Common
4	DNC	Do not connect
5	DNC	Do not connect
6	DNC	Do not connect
7	Xout	X channel output
8	Vdd	+5V



ADXL203 PIN DESCRIPTION

Pin	Name	Description
1	ST	Self Test
2	DNC	Do not connect
3	COM	Common
4	DNC	Do not connect
5	DNC	Do not connect
6	Yout	Y channel output
7	Xout	X channel output
8	Vdd	+5V

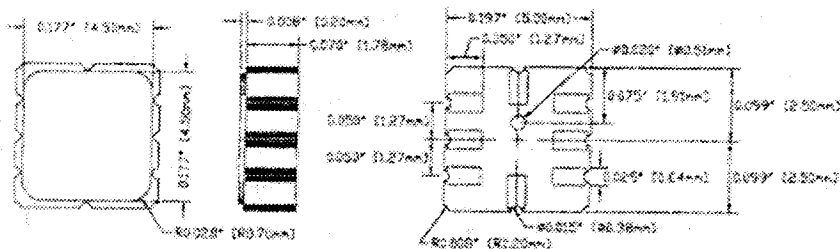


Рис. 5.11. Зовнішній вигляд корпусу акселерометра

Існують різні типи гіроскопів: з обертовою механічною масою, лазерні, мікромеханічні з коливними рамками [Шоґалов, 2000], з віброючим кільцем [Ayazi, 2001].

До переваг мікрогіроскопів коливального типу (МГКТ) можна віднести наступне:

- можливість мікровиконання електронної та механічної підсистем приладу;
- досить високу точність вимірювання кутових параметрів;
- можливість групового виготовлення пристроїв;
- високу надійність, можливість резервування.

Механічні системи мікрогіроскопів коливального типу (рис. 5.12) містять декілька рухомих рамок (2 або 3), які можуть коливатися у взаємноперпендикулярних площинах. Коливання в одній площині є змушеними, визначають вихідний напрямок. Коливання, що наводяться, в інших площинах з'являються тоді, коли гіроскоп повертається відносно вихідного напрямку.

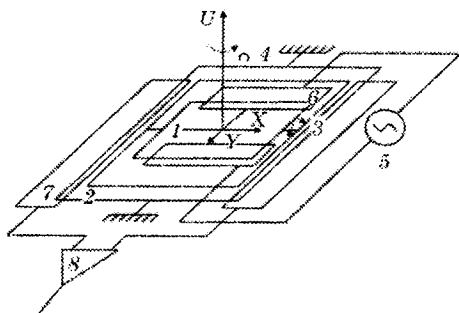


Рис. 5.12. Структурна схема МГКТ

МГКТ містить внутрішню коливальну систему 1 і зовнішню рамку 2. Між собою вони з'єднані за допомогою пружних торсіонів 3. Зовнішня рамка з'єднана з нерухоною опорою за допомогою аналогічних пружних торсіонів 4. Зовнішня рамка та внутрішня коливальна система електрично з'єднані між собою та підключені до нульової шини.

Внутрішня коливальна система може здійснювати змушені коливання відносно осі X під впливом генератора гармонійних коливань 5 і системи обкладин 6, які разом із внутрішньою коливальною системою утворюють плоский конденсатор. У випадку обертання системи навколо осі Z зовнішня рамка буде здійснювати коливання відносно осі Y , амплітуда яких є функцією кутової швидкості Ω та частоти коливань внутрішньої коливальної системи. Інформація про кутову швидкість знімається за допомогою обкладин 7 (що утворюють із зовнішньою рамкою плоский конденсатор) і пристроєм обробки інформації 8.

Приклад технічних характеристик гіроскопа:

Габарити коливальної системи, мм	5—10
Точність виготовлення деталей, мкм	1—2
Довжина торсіона, мкм	50
Висота рамок, мкм	50
Дрейф гіроскопа, угл. град/годе	< 1
Максимальна вимірювана кутова швидкість, угл. град/с	200
Похибка вимірювань кутової швидкості, %	0,05

Конструкцію МГКТ і її конструктивні елементи представлено на рис. 5.13.

Гіроскоп з вібруючим кільцем. Гіроскопам з вібруючим кільцем в останні роки приділяється досить багато уваги через можливість широкого застосування цих мініатюрних пристроїв для різних цілей. Вони можуть використовуватися разом з МЕМС-акселерометрами для одержання інформації керування в інерційній навігації або самостійно для вимірювання параметрів обертання, наприклад, у системах контролю та стабілізації траєкторії,

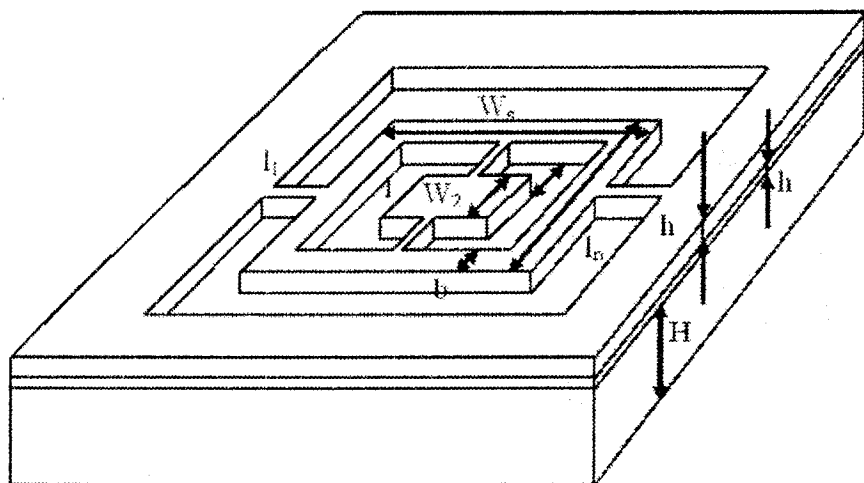


Рис. 5.13. Конструкція МГКТ: l_1 — довжина внутрішньої рамки; W_b — ширина внутрішньої рамки; l_n — довжина зовнішньої рамки; W_s — ширина зовнішньої рамки; h — товщина SiO_2 ; H — товщина базової підкладки; b — товщина; l_2 — довжина торсіона

виявлення перенавантажень. До побутових застосувань можна віднести стабілізацію кадру в цифрових відеокамерах і інерційних «мишах» комп'ютерів, у роботах. Існують великі області використання у військових застосуваннях, таких як супровід космічних апаратів і стабілізація платформ, пристроїв вимірювання крену в автоматичних пристроях з роздільною здатністю та стабільністю на рівні 0,5 град/с. Однак у багатьох застосуваннях потрібні більш досконалі гіроскопи, наприклад, інерційна навігація та супровід космічних апаратів. Досягнення довгострокової стабільності кращої за 1—10 град/год і більш високої точності в широкому діапазоні частот (0—100 Гц) вимагає використання нових технологій для створення гіроскопів, зокрема технологій MEMS.

Гіроскоп з вібруючим кільцем представлено на рис. 5.14 [Ayazi, 2001].

Він складається з кільця, восьми підтримуючих пружин у вигляді півклі і електродів збудження, вимірювання та керування. Міркування симетрії вимагають використання, принаймні, восьми підтримуючих у збалансованому пристрої із двома модами коливань однакової частоти ідентичної еліптичної форми, зсунутих одна відносно іншої на 45° . Як показано на рис. 5.15, антивузли другої коливальної моди (тобто напрямках, у яких амплітуда

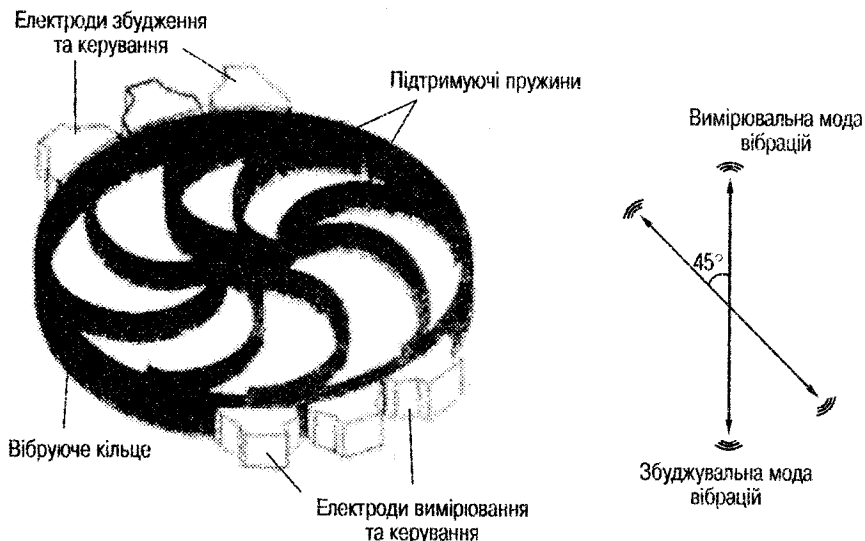


Рис. 5.14. Структура гіроскопа з вібраючим кільцем

коливань найбільша) розміщені у вузлах коливань першої моди. У кільці електростатично збуджуються коливання першої моди з фіксованою амплітудою. Якщо пристрій повертається навколо перпендикулярної осі, сила Кориоліса викликає передачу енергії

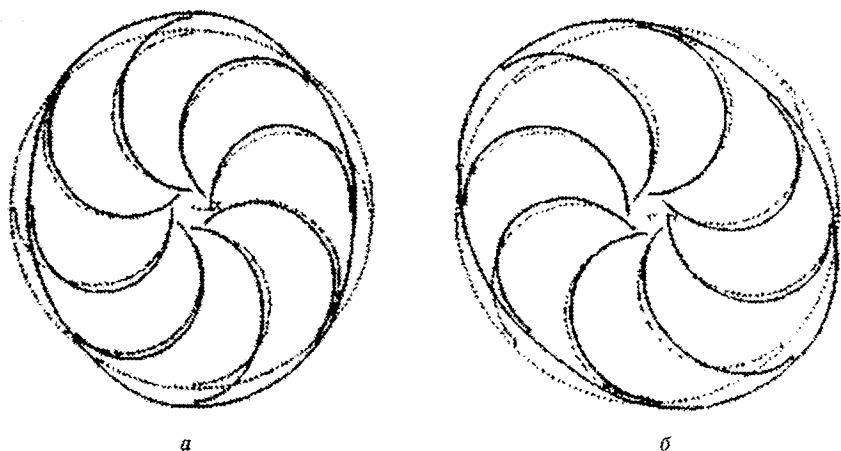


Рис. 5.15. Моди коливань згину, що використовуються для функціонування гіроскопа з вібраючим кільцем: а — перша мода; б — друга мода, зсунута на 45° відносно першої, з однаковими резонансними частотами

від першої моди коливань до другої, розташованої під кутом 45° від першої, викликаючи коливання, амплітуда яких пропорційна до другої моди. Ця структура керується за допомогою емвісного способу. Амплітуда другої моди при розімкнутій петлі (розімкнутому контурі) вимірюваної моди ($q_{\text{вим}}$) пропорційна до кутової швидкості та визначається виразом

$$q_{\text{вим}} = 4A_g \frac{Q}{\omega_0} q_{36} \Omega_z, \quad (5.3)$$

де $A_g \approx 0,37$ — кутовий коефіцієнт кільцевої структури (який залежить від геометрії датчика), коефіцієнт дуже стабільний у відношенні температури та часу життя пристрою; Q — добротність механічної структури; ω_0 — резонансна кругова частота коливань; q_{36} — амплітуда коливань збуджуваної моди; Ω_z — частота обертання.

Вібруюче кільце має низку важливих властивостей у порівнянні з іншими типами вібраційних гіроскопів. Перше, це збалансована симетрична структура, що забезпечує меншу чутливість до випадкових зовнішніх коливань. Тільки якщо кільце має асиметрію маси або жорсткості, зовнішні коливання наводять помилкові коливання системи. Друге, оскільки використовуються ідентичні коливальні структури з рівними резонансними частотами для порушення та виявлення обертання, чутливість датчика збільшується в Q разів. В-третьє, вібруюче кільце менш чутливе до температури, тому що обидві моди коливань підпадають під дію однієї й тієї ж температури. Нарешті, є можливим електронне підстроювання в конструкції. Будь-які розбіжності резонансних частот збудження та вимірювань, викликаних процесами виробництва (розходженням мас або асиметрії жорсткостей), можуть бути скомпенсовані електрично за допомогою використання підстроювальних електродів, які розташовані навколо кільця під різними кутами до збуджувальних електродів.

Гіроскоп може бути виготовлений за допомогою різних методів:

- у товстому шарі фоторезистора ПММА з нікелевими провідними компонентами, розміщеними на кремнієвій підкладці;
- за допомогою реактивно-іонного травлення монокремнієвої підкладки з коливальною системою в ній і зміцнення структури шляхом анодного зварювання зі скляною підтримуючою підкладкою (ф. British Aerospace Systems and Equipment), що забезпечує високу добротність коливальної системи, але має анізотропію модуля Юнга, що властиво для монокремнію,

асиметрію механічних властивостей кільця (модуль Юнга для кремнію змінюється залежно від кристалографічної орієнтації пропорційно $\cos 4\theta$);

- з використанням HARPSS MEMS технологій [Ayazi, 2001].

Відповідно до цієї технології вібруюче кільце та підтримуючі пружини створені додатковим шаром полікремнію, нанесеного на жертвний шар оксиду кремнію, який отриманий за методом LPCVD (осадження з газової фази при низькому тиску).

Кожен із чутливих електродів з острівця монокристалічного кремнію з низьким опором, що захищений з боків глибокими заповненими пазами та від'єднаними на дні від підкладки за допомогою сухого травлення SF_6 , що повністю виконане під час глибокого реактивно-іонного травлення (DRIE). Острівці монокристалічного кремнію повністю закріплені на підтримуючому шарі полікремнію, що прикріплений через нітридний шар до підкладки. Полікремнієве кільце закріплене віссю на підкладці та підтримується за допомогою пружин, розташованих над порожниною, отриманою під час травлення кремнієвої підкладки за допомогою SF_6 , у процесі DRIE.

На рис. 5.16 наведено фотографію полікремнієвого кільцевого гіроскопа з розмірами $1,7 \times 1,7 \text{ мм}^2$, отримана за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Кільце діаметром 1,1 мм, діаметр опори (осі) 120 мкм. Ширина кільця та підтримуючих пружин дорівнює 4 мкм. Шістнадцять електродів розташовані навколо кільця; їхні розміри приблизно 60 мкм за висотою та 150 мкм за довжиною та відділені від кільця емнісним повітряним проміжком

1,4 мкм.

Технологія забезпечує декілька важливих характеристик, що необхідні для MEMS гіроскопів високої якості. По-перше, вона дозволяє одержати полікремнієве кільце та електроди, що його оточують, товщиною в сотні мкм у процесі DRIE. По-друге, оскільки проміжок між кільцем і вимірювальним електродом визначається за товщиною жертвного шару, він може

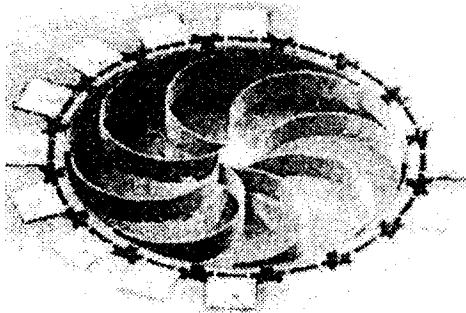


Рис. 5.16. Гіроскоп з вібруючим кільцем $1,7 \times 1,7 \text{ мм}^2$, ширина кільця 80 мкм, діаметр 1,1 мм, діаметр осі-анкера 120 мкм

бути зменшений до субмікронного рівня. Ці два фактори разом будуть істотно збільшувати ємність зв'язку, а отже й вихідний сигнал.

По-третє, конструкційним матеріалом є полікремній, що має високу добротність і незалежний від орієнтації модуль Юнга.

По-четверте, повністю кремнієва технологія поліпшує довгострокову стабільність і температурну чутливість. Ці риси дозволяють поліпшити характеристики гіроскопів з вібруючим кільцем до наступних значень:

Висота монокремнієвих електродів, мкм	60
Ємнісні проміжки, мкм	1,4
Чутливість із розімкнутою петлею ОЗ, $\frac{\text{мкВ}}{\text{град/с}}$	200
Динамічний діапазон, град/с	250
Q	1200
Амплітуда збуджуваних коливань, мкм	0,15
Паразитна ємність вузлів коливань, пФ	2
Роздільна здатність град/с(Гц) ^{0,5}	0,01

Оптоволоконний гіроскоп. Принцип дії гіроскопа заснований на ефекті Саньяка [Grimman], який полягає в тому, що в нерухомому замкнутому оптичному контурі час проходження променів, які поширюються в протилежних напрямках, однаковий, а при обертанні контуру відносно осі, перпендикулярної до його площини, різниця часу проходження протилежно спрямованими променями прямо пропорційна до кутової швидкості Ω . Ця різниця визначається різною довжиною шляху, що викликана зсувом вихідної точки падаючого променя А в напрямку поширення променя 1 і в протилежному напрямку для променя 2 (рис. 5.17).

Імпульс світла надходить до точки А та розщеплюється за допомогою напівпрозорої лінзи Z_1 і дзеркала Z_2 на два промені, що поширюються в протилежних напрямках вздовж оптоволоконного кільця. За допомогою цієї ж оптичної системи промені, що пройшли вздовж кільця, складаються та надходять на вихід. Вимірювання Dt дозволяє розрахувати кутову швидкість.

У разі нерухомого контуру довжина шляху 1-го та 2 променів однакова, однаковий і час проходження їх вздовж кільця:

$$ct = 2\pi R_K.$$

При обертанні контуру шлях одного із променів подовжується, а іншого скорочується:

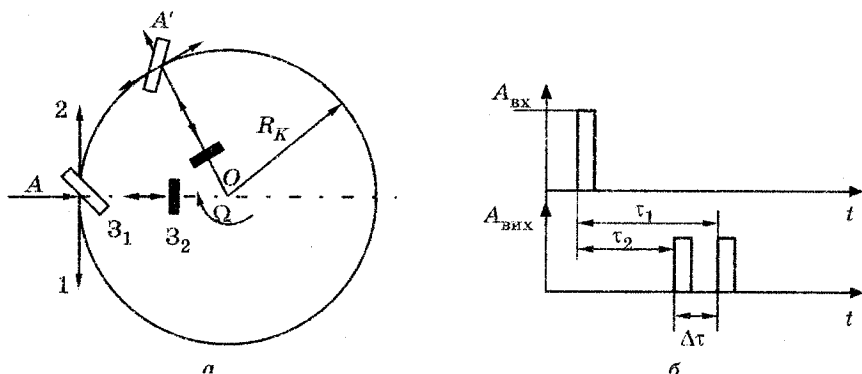


Рис. 5.17. Проходження імпульсу світла при обертанні гіроскопа:
 а — схема проходження променів 1 і 2;
 б — час проходження променів 1 і 2

$$c\tau_1 = 2\pi R_K - R_K\Omega\tau_1,$$

$$c\tau_2 = 2\pi R_K - R_K\Omega\tau_2.$$

Для малих швидкостей $\Omega\tau_1 \ll c$

$$\Delta\tau = \frac{2\pi R_K^2 \Omega}{c^2}.$$

На рис. Д8.43 наведено систему навігації мобільного робота, що брав участь у перегонках «Міцний горішок» (США) в 2004 р. Для вимірювання та компенсації крену, тангажа та ристання машини-робота в ній передбачені три оптоволоконних гіроскопи (два з них видні на рисунку) і три прецизійних приводи [Гиббз, 2004].

5.9. Конденсат Бозе — Ейнштейна

Квантова механіка розглядає всі види матерії як хвилі, але настільки малі, що розрізнити їх неможливо. Крім того, квантово-механічні ефекти зникають під час хаотичної взаємодії великої кількості часток і за температури набагато вищій за абсолютний нуль. Звичним є уявлення про те, що квантові явища пов'язані лише зі світлом елементарних часток.

Сьогодні фізики вчаться зберігати квантові властивості в усе більших об'ємах речовини, що дозволяє спостерігати їх безпосередньо. Так, в 1995 р. був отриманий конденсат Бозе — Ейнштейна (КБЕ), який складається із сотень тисяч атомів, що перебувають у тому самому квантово-механічному стані [Райхель, 2005].

Індивідуальні хвилі часток у точності накладаються одна на одну (повна суперпозиція), а оскільки макроскопічна хвиля, що утворюється, складається з величезної кількості атомів, її можна побачити неозброєним оком.

Фазовий перехід від звичайної атомної пари до конденсату відбувається за надзвичайно низької температури — менше однієї мільйонної градуса вище від позначки абсолютного нуля. Для досягнення необхідного стану атоми повинні бути підвішені у вакуумному магнітному уловлювачі.

Зниження їхньої температури здійснюється шляхом лазерного та випарного охолодження.

Завдяки новим розробкам з'явилася можливість захоплювати атоми в пастку та керувати ними за допомогою мікросхем, що створило передумови практичного застосування КБЕ.

Для цього використовується магнітне поле, створюване струмами, що протікають вздовж мікроскопічних провідників котушок індуктивності мікросхем рис. Д8.44.

У межах 100 мкм від поверхні мікросхеми поле утворює магнітний уловлювач, що втримує хмару атомів у підвішеному стані. Через малі відстані магнітний уловлювач споживає не більше 1 Вт (замість кіловат у традиційному виконанні).

При цьому пастки виходять набагато сильнішими, ніж звичайні, що створюються соленоїдами, і тому КБЕ виникає в них не за півхвилини, а менш ніж за секунду, вакуум може містити більше залишкового газу, що призводить до різкого зменшення всіх деталей пристрою.

Завдяки тому, що атоми газу поглинають випромінювання тільки на певних довжинах хвиль, випромінюване мікросхемою тепло майже не поглинається, всі теплові взаємодії на відстані 100 мкм безкінечно малі та за час експерименту не встигають заподіяти КБЕ ніякої шкоди.

Атоми газу необхідно остудити до температури близької до абсолютного нуля в магнітооптичній пастці (МОП), яка складається із шести лазерних променів, що чинять тиск на атоми з усіх боків (рис. Д8.45, а).

Шляхом створення на мікросхемі поверхні, що відбиває лазерне випромінювання, можливе зменшення числа лазерів до чотирьох (рис. Д8.45, б), а ускладнення форми струмів, що проходять вздовж різних провідників (модуляції струмів), над поверхнею мікросхеми рухається низка потенційних ям, що дозволяють переміщувати КБЕ.

Серце експерименту — невелика скляна комірка, оточена соленоїдами. У ній створюється глибокий вакуум, і вона перетворюється у надефективний термос, у який випускається невелика кількість атомарного газу. В одній точці всередині вакуумної комірки перетинаються шість лазерних променів. За кімнатної температури атоми газу хаотично переміщуються всередині комірки зі швидкістю декількох сотень кілометрів на годину. Коли вони випадково потрапляють в один із променів, лазерний промінь різко охолоджує їх. Крім того, лазерний промінь і слабе магнітне поле підштовхують атоми до точки перетину всіх шести променів МОП з лазерних променів і магнітного поля. МОП, винайдена в 1987 р. Жаном Далібаром (Jean Dalibard) з «Еколь нормаль сюперьєр» у Парижі, забезпечує охолодження парів рубідію, натрію та багатьох інших елементів до температур порядку 1 мК. МОП забезпечують досить низьку щільність: атоми розташовуються занадто далеко один від одного, щоб їхні хвильові функції могли перекриватися. Щоб ще більше охолодити речовину, використовується інший механізм — випарне охолодження, під час якого найенергійніші атоми залишають пастку, тобто відбувається подальше охолодження речовини. Пастки на мікрочіпі створюють сильні поля, які стискають атоми сильніше, ніж звичайні пастки, збільшуючи швидкість охолодження.

У перспективі подібні структури пропонується використовувати для створення надточних авіаційних датчиків і квантових комп'ютерів.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які МЕМС-вироби знайшли широке застосування до теперішнього часу?
2. Які функції повинні виконувати елементи сонячних батарей?
3. Як можна підвищити ефективність перетворення сонячної енергії в електричну при створенні елементів батарей?
4. Описати послідовність і зміст етапів перетворення сонячної енергії в колоїдних кристалах TiO_2 і обволікаючому їх барвнику.
5. Яку різницю потенціалів може забезпечити одиничний елемент сонячних батарей на TiO_2 ?
6. У чому привабливість TiO_2 в якості матеріалу для елементів сонячних батарей?
7. Навести криву спектральної чутливості елементів сонячних батарей на TiO_2 .

8. Які напрямки мікромініатюризації гальванічних елементів розвиваються в цей час?
9. Якими особливостями володіє ZnO ?
10. Які види енергії можна використовувати в нано- та мікрогенераторах для перетворення в електричну?
11. Описати різновиди струминних друкуєчих головок.
12. У чому переваги паливних елементів в порівнянні з гальванічними джерелами енергії?
13. MEMS-акселерометри як приклад ефективного впровадження виробів у нову техніку.
14. Описати блок-схему акселерометра з ємнісним ЧЕ.
15. Описати функціонування гіроскопа з вібруючим кільцем. Які характеристики він забезпечує?
16. Описати технологію HARPSS при виготовленні гіроскопів.
17. Пояснити принцип роботи оптоволоконного мікрогіроскопа.
18. Властивості конденсату Бозе — Ейнштейна та спосіб одержання конденсату з MEMS-виробами.

6

МІНІ-, МІКРО- ТА НАНОРОБОТИ

Дослідження в галузі мікроробототехніки ведуться в усіх розвинених країнах світу. За оцінками фахівців у промисловому виробництві та медицині 21 століття мікророботи будуть відігравати провідну роль. Аналіз фахівців NASA показує, що застосування MEMS дозволяє приблизно на порядок зменшити ГМХ та споживання енергії аерокосмічних систем. Як приклади успішного застосування MEMS у космічній техніці відзначаються кремнієві гіроскопи, акселерометри, датчики тиску, клапани, мікроджерела енергії, системи хімічного та біологічного аналізу, високочастотні оптичні та механічні фільтри, високочастотні ключі. Національною нанотехнологічною ініціативою США передбачається зниження ГМХ роботів на порядок. Приводи та двигуни, виготовлені за технологією MEMS, будуть здатні забезпечити значні сили та крутильні моменти. Вони замінюють звичайні механізми. Такі технології будуть використовуватися при створенні мікросупутників, мікрозондів та мікропланетоходів.

Технологія MEMS у наш час є технологічною основою, на якій будується вся закордонна мікро- та мініробототехніка. В основі розвитку та практичного використання технологій мікросистемної техніки лежать техніко-економічні фактори (очікувані в майбутньому переваги).

Перспективним, а також використовуваним уже в наш час, є застосування міні- та мікророботів у військовій техніці. Вони забезпечують нові форми ведення бойових, розвідувальних дій за допомогою мікромініатюрних засобів прихованого спостереження, надійних та малоуразливих засобів розвідки, висвітлення обстановки, зв'язку, навігації, цілевказання, керування зброєю, радіозаглушення, охорони [Іванов, 2004].

Найбільш інтенсивні роботи спостерігаються в США по лінії проектного агентства перспективних оборонних досліджень DARPA. Виконання проектів по програмі здійснюють близько 50 фірм та університетів США.

Першими результатами реалізації даної програми є створення та прийняття на озброєння окремих пристроїв на основі МСТ для авіаційно-космічної техніки та ракетно-артилерійського озброєння. У ході антитерористичної операції на території Афганістану спецпідрозділи армії США активно використовували малогабаритні мобільні переносні роботи «Hermes» для проведення загальної розвідки, пошуку та знешкодження протипіхотних мін. Основні роботи в галузі військової мікро- та мініробототехніки проводяться за трьома програмами [Поляков, 2007]:

- керовані біологічні системи (Controlled Biological Systems);
- біоподібні системи (Biomimetic Systems);
- розподілені робототехнічні системи (Distributed Systems).

Живі біологічні системи мають складні й унікальні здатності та взаємодіють із навколишнім середовищем, що може бути успішно використане у військовій області. Роботи зі створення мікророботів на основі природних біологічних організмів (переважно комах) ведуться в інтересах Міністерства оборони США вже протягом тривалого часу.

Метою програми керованих біологічних систем є створення прототипів біосистем як платформи для розробки перспективних біосистем пошуку, виявлення, ідентифікації, вимірів. У військових цілях планується організація досліджень по керуванню біологічними об'єктами біотичними методами через фізичне, теплове, нейронне, хімічне стимулювання, впровадження керуючих матеріалів і/або пристроїв. На природні біоорганізми передбачається покласти функції охорони та пошуку цілей в умовах невідомого навколишнього середовища, дрібних істот можна запустити в руїни будинків у пошуках жертв стихійних лих, пустити по трубах з мікрокамерами для їхнього обстеження і т. ін.

Розвиток біоподібних мікророботів дозволить створити роботи більш гнучкі та стійкі за сучасні пристрої, в умовах невизначеного зовнішнього середовища, а також розробляти та досліджувати нові матеріали, промислові технології, датчики та приводи. Практичні застосування будуть включати розвідку, розмінування, доставку корисних вантажів, збір інформації, раннє виявлення радіаційних, хімічних, бактеріологічних забруднень та ін.

На рис. 6.1 та 6.2 (с. 238) наведено приклади роботів — «біогібридів» та біоподібних роботів.

Проект мікромеханічної літаючої комахи, що виконується в університеті Берклі, США, передбачає створення пристроїв з розмахом крил 10—25 мм, здатних здійснювати автономний політ.

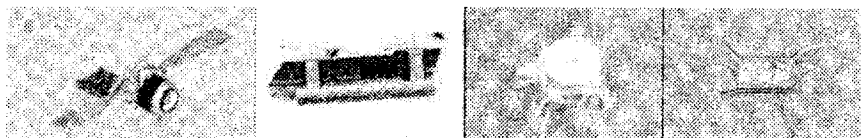


Рис. 6.1. Біологічні роботи



Рис. 6.2. Біоподібні роботи

Аналіз конструкції показав здатність п'єзоелектричних двигунів (мають коефіцієнт корисної дії до 90—95 %) забезпечити необхідні значення щільності енергії та можливість одержання необхідної для польоту потужності за допомогою сонячних батарей. Для літаючих мікророботів — аналогів природних комах — досить потужності порядку 10 мВт, що вже в наш час дає можливість практичного виготовлення необхідних крил і джерел живлення. Проблемним залишається створення необхідної СК.

Основна перевага подібних роботів — неможливість виявити їх за допомогою засобів ПВО. Утруднена також боротьба з ними. Можливе цивільне застосування з метою контролю навколишнього середовища.

Рядом університетів США розроблюються біоподібні крокуючі мікроробототехнічні системи, алгоритми розпізнавання елементів навколишнього середовища, СК та елементи штучного інтелекту.

Роботи повинні бути обладнані високоефективними резонансними п'єзоелектричними приводами, містити мікровідеокамеру та датчики звуку або температури, забезпечувати непомітний пошук цілей, взаємодію з командним пунктом.

Розробки систем, що імітують поведінку безхребетних, виконуються з метою інтеграції в схеми високого рівня керування рефлексів низького рівня. Проекти, подібні «Скорпіон» (Scorpion Project), роботи для складних інспекційних завдань «Snake 2» є ідеальними для інспекційних, диверсійно-розвідувальних систем у вузьких порожнинах, коробах, каналізаційних колекторах

і трубах, чим пояснюється значний інтерес, що проявляється до них в усьому світі.

Міні-робот «Snake 2», побудований в 1999 р., має 12 коліс навколо кожної секції тулуба, крутний момент > 12 Нм для будь-якої ланки, може рухатися зі швидкістю 0,1 м/с. Структурно мініробот може включати в себе до 15 уніфікованих секцій. У кожній секції встановлено по 3 двигуни. Сусідні секції з'єднані універсальним шарніром. У кожній секції є 6 інфрачервоних дистанційних датчиків, 3 моментних датчика, 1 датчик нахилу, 2 кутових датчика для вимірювання положення шарніра.

Відеокамера, розташована в головній секції робота, призначена для передачі відеозображення на віддалений монітор. Ультразвукові датчики, встановлені на голові робота, використовуються для виявлення перешкод. Живлення здійснюється або по кабелю, або за рахунок енергії батарей, розташованих у хвостовому сегменті. У повністю автоматному режимі міні-робот може працювати до 30 хвилин.

Підводні: восьминогий крокуючий пристрій подібний до омара та плаваючий, спроектований подібно до міноги, дозволяють проводити спільні дослідження дна та товщини води. Обидва пристрої володіють робастними властивостями стосовно рельєфу дна, що змінюється, та широтно-висотного керування.

Розподілені робототехнічні системи

Роботи в цій галузі ведуться за наступними основними напрямками:

- зменшення ГМХ (міні-, мікро-, нанороботи);
- роботи з динамічно змінюваною структурою;
- системи роботів;
- біоробототехнічні системи;
- пошук нових технічних методів керування роботами (нові способи зв'язку, елементи штучного інтелекту).

Велика увага приділяється оптимальному балансу між індивідуальними можливостями окремого мікро- або міні-робота та можливостями всієї робототехнічної системи в цілому, між інтелектуальними властивостями окремого робота та всієї системи.

Розподілені РТС мають унікальні можливості по виконанню дій в умовах дистанційного керування, що сприяють вирішенню поставлених завдань з мінімальним ризиком людей. Паралельна спільна робота численних мікро- або міні-роботів зможе значно скоротити строки виконання необхідної роботи. Крім того,

застосування інтегрованої РТС значно дешевше за використання комплексних роботів.

Відома концепція «експонентного складання» (Сорр. Zyvex, Техас, США), у якій розроблюються механічні системи для складання пристроїв мікронного, субмікронного та молекулярного масштабу. На мікронному рівні, використовуючи вже наявні МЕМС-технології, проектується проста роботизована рука «взяти та покласти», здатна маніпулювати складними планарними деталями мікронного масштабу, виготовленими за допомогою літографії. З деталей збирається роботизована рука, здатна маніпулювати спеціально розробленими МЕМС-деталлями. Складання починається з однієї роботизованої руки на кремнієвій пластині, що потім збирає інші роботизовані руки, беручи деталі, заздалегідь покладені на підкладці в точно визначених місцях. Кількість зібраних у такий спосіб роботизованих рук може зростати експоненційно та обмежується запасами підготованих деталей і подачею енергії. Відсутність кожного із цих компонентів призводить до зупинки процесу.

Одним із характерних прикладів (рис. 6.3), що ілюструють військове застосування розподіленої робототехнічної системи, є проект Robart III (розпочатий у 1992 р.), роботи з якого виконуються в Центрі космічних і військово-морських робототехнічних систем у Сан-Дієго, Каліфорнія (SSC San Diego — Robotics at Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, CA). За цим проектом розроблюється перспективна роботизована платформа, малоуразливого бійця, призначена для проведення розвідувальних, охоронних та антитерористичних спецоперацій. У рамках проекту опрацьовуються можливості з координації рефлексивного телекерування та питання взаємодії між основним бойовим роботом типу «Robart III» та сімейством допоміжних міні-роботів (що вирішують завдання розвідки та навігації) типу «Hexapod II».

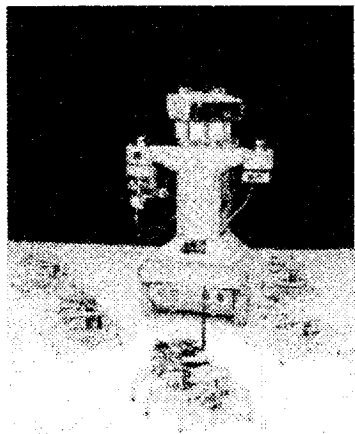


Рис. 6.3. Розподілена робототехнічна система

Технічний аналіз змістовної частини представлених сучасних закордонних програм та основних проектів в галузі військової мікро- та міні-робототехніки дає підставу ввести в розгляд комплексну розмірну класифікацію нового класу робототехнічних систем спеціального призначення (табл. 6.1).

Класифікація сучасної закордонної мікро- та міні-робототехніки спеціального призначення

Параметр	Мікророботи	Міні-роботи	Звичайні роботи (малі)
Характерний розмір	2—5 см	10—25 см	Понад 50 см
Споживана потужність	5 мВт — 1 Вт	5—100 Вт	Понад 100 Вт
Маса	0,1—10 г	1—10 кг	Понад 20 кг

Як випливає з наведеної класифікації, військові міні-роботи є логічним розвитком малого класу звичайних роботів (зразків тактичної робототехніки). За рахунок застосування елементів технологій МЕМС розробникам вдалося знизити масогабаритні показники прототипів. Комплексний же перехід до технологій МЕМС не тільки дає можливість реалізувати діючі механічні мікророботи в розмірах природних комах, але й породжує практичне створення біомікроробототехнічних систем військового призначення.

Незважаючи на свої надмалі розміри, військові мікро- та міні-роботи будуть мати досить розвинений інтелект. На думку західних розробників, це клас автономних адаптивних роботів (інтелектуальних систем) третього покоління. Виходячи з поставленої зовнішньої мети, вони зможуть самі планувати свою діяльність у невідомому навколишньому середовищі; вбудовані алгоритми забезпечать можливість самонавчання. Інформаційна насиченість забезпечується за рахунок власної розвинутої сенсорної системи.

Перспективні військові мікро- та міні-роботи є принципово новим класом робототехнічних систем. У силу характерних для них низької собівартості, високої скритності, вкрай малого енергоспоживання вони плануються до застосування в рамках нових специфічних завдань.

Основою їхнього практичного використання в інтересах збройних сил, на думку західних військових аналітиків, повинна стати концепція масованого застосування великого числа однотипних інтелектуальних механічних або біологічних мікросистем, що виконують загальне глобальне завдання в умовах тісної інформаційної взаємодії як між окремими мікросистемами, так і між ними та людиною.

Розвиток мікроробототехніки в першу чергу мав потребу у створенні відповідних мікроприводів [Юревич, 2005]. Для цього поряд із традиційними принципами дії та конструкціями,

створеними в рамках традиційного точного машинобудування, були розроблені зовсім нові приводи для мікропереміщень, засновані на використанні керованих гнучких деформацій. Одним з таких перспективних типів мікроприводів є п'єзоприводи. На рис. 6.4, а показано схему основного елемента такого привода — п'єзоперетворювача електричної енергії в енергію механічного переміщення. Він являє собою пакет з п'єзокерамічних шайб 1 з нанесеними на торці срібними електродами, на які паралельно подається електрична напруга. При цьому за рахунок зворотного п'єзоелектричного ефекту відбувається збільшення або зменшення товщини шайб залежно від полярності прикладеної напруги. На рис. 6.4, б показано інший тип таких перетворювачів, заснований на згинальних деформаціях багатощарових пластин з п'єзоелектричних і пасивних металевих або полімерних шарів. Такі перетворювачі мають більший хід, ніж ті, що використовують деформацію розтягування-стиск, але гірші точнісні та силові параметри.

Максимальні величини переміщення на виході таких електро-механічних перетворювачів (хід) — до десятих часток мм; швидкість — до 1—2 м/с, погрішність керованого позиціонування — частки мкм, зусилля — сотні Н, потужність — десятки Вт. З таких перетворювачів створюються триступеневі мікроманіпуляційні системи. Вони часто комбінуються зі звичайними електромеханічними маніпуляційними системами, що забезпечують переміщення в десятки мм із погрішністю, що перебивається мікроманіпуляційною системою. Виходить маніпулятор, що складається з послідовно з'єднаних систем грубого та точного позиціонування, робочий хід якого визначається першою системою, а точність — другою.

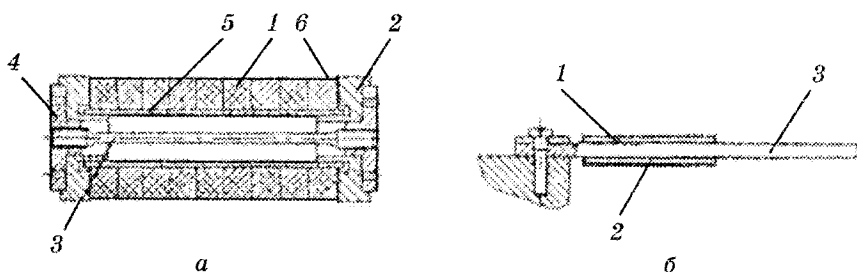


Рис. 6.4. П'єзоелектричні перетворювачі мікроприводів:

а — з поступальною деформацією розтягування-стиск: 1 — секція п'єзокерамічних шайб; 2 — фланець; 3 — шпилька; 4 — гайка; 5 — пластмасова втулка; б — слюдяна шайба; б — зі згинальною деформацією: 1, 2 — п'єзоелектричні пластини; 3 — металева ресора

Крім п'єзоелектричних існують мікроприводи й інших типів — п'єзомагнітні, електро- та магніострикційні, біметалічні, на ефекті пам'яті форми, електростатичні, пневматичні, гідравлічні.

З мікроприводів інших типів найбільш широке поширення одержали електростатичні. Такі мікроприводи використовують енергію електричного поля для здійснення руху.

Електростатичний привід використовується як мікроперемикачі НВЧ-сигналів, перспективних для використання в космічних системах зв'язку, побудованих з пікосупутників. Ці перемикачі мають такі переваги, як низькі внесені втрати, висока добротність, низька споживана потужність, гарна ізоляція на високій частоті та низька вартість. Можливість виготовлення електромеханічних перемикачів на одному кристалі з мікроелектронними компонентами відкриває перспективу створення систем з більш високою функціональністю.

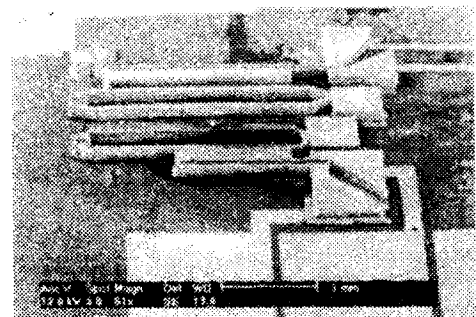
Перспективним є застосування мікродзеркал в оптичних приладах. Масиви мікродзеркал, орієнтація яких може керовано змінюватися, використовуються в якості мікромініатюрних просторових модуляторів світла. Мікродзеркала можуть модулювати або амплітуду, або фазу падаючого світлового сигналу за рахунок зміни напрямку або довжини оптичного шляху променя. Одним з ефективних способів керування положенням мікродзеркал, що забезпечують мінімальну масу виробу, є використання електростатичного привода. Використовуваний у техніці блочно-модульний принцип побудови систем у МЕМС-виконанні буде реалізовуватися у вигляді інтегрованих у єдине ціле паралельних і розподілених мініатюрних адаптивних та інтелектуальних комірок типу «сенсор — процесор — актюатор». Такі комірки з єдиним принципом побудови повинні мати специфічні особливості, обумовлені їхнім призначенням, тобто відрізнятися набором сенсорів, актюаторів, а також використовуваними складними функціональними (СФ) блоками або системами на кристалі (СНК), мікропроцесорами. Використання таких уніфікованих комірок дозволить істотно розширити функціональні можливості існуючих виробів космічної техніки, а також створити принципово нові типи піко- та наносупутників, планетоходів, пристроїв і приладів космічного призначення. У наш час розроблено мікрореактивні двигуни, що мають розміри порядку $12 \times 15 \times 2,5$ мм та розвивають потужність до 10 Н, пікосупутники зв'язку масою до 250 г, нанопланетоходи масою декілька кг і т. ін.

Для мобільних мікророботів, призначених для пересування у вузьких порожнинах (тонкі трубопроводи, шлунково-кишковий тракт, кровоносні судини людини і т. п.), розроблені спеціальні мікрорушії, що реалізують спосіб пересування, подібний використуваному гусеницями та хробаками. Варіант такої системи пересування на п'єзоприводах складається з декількох п'єзоелектричних сегментів, з'єднаних центральним стрижнем з того ж матеріалу. Сегменти попарно розширюються за рахунок п'єзо-ефекту та виконують функції фіксаторів, а поступальне переміщення здійснюється шляхом подовження центрального стрижня. Частота імпульсів руху — 10—20 МГц.

Існують аналогічні системи, що побудовані на пневматиці. На передньому та задньому кінцях такого мікроробота є пневмофіксатори, які поперемінно закріплюються на стінках порожнини. При цьому корпус робота також поперемінно подовжується при закріпленому задньому та скорочується при закріпленому передньому кінці. Для пересування подібних роботів використовується також кероване зовнішнє силове магнітне поле.

Основні галузі застосування мікроприводів і побудованих на них мікрomanipуляторів та мікророботів — це мікрообробка, складання, зварювання, біологічні та фармакологічні технології, медицина (ендоскопія, доставляння ліків до певних органів, хірургічні операції).

MEMS технології дозволяють виготовляти мікрomanipулятори, розташовані над поверхнею плати. Найбільш часто в пристроях МСТ, що містять і електронну і механічну частину, використовуються гібридні конструкції, тобто механіка й електроніка виготовляються на роздільних підкладках, хоча технологічні процеси для одержання кожної частини можуть бути подібними або мати ряд однакових операцій, а потім об'єднуються в єдине ціле з використан-



ням процесів зварювання; анодної, прямої, із проміжним шаром [Телець, 2004] або селективним гальванічним осадженням і монтажем [Бескоровайний, 2005].

На рис. 6.5 наведено загальний вигляд плати із двома кліщами, піднятими над платою. Довжина кліщів 2700 мкм, ширина 40 мкм,

Рис. 6.5. Об'ємна конструкція кліщів

товщина 200 мкм. Приводяться в дію за допомогою електротермічного впливу. За допомогою селективного процесу монтажу контактні площинки приєднуються до площинки, але мікрокліщі переміщуються над підкладкою вільно. Для виключення небезпеки коротких замикань на корпус зазор між захватом та корпусом повинен бути більше 20 мкм.

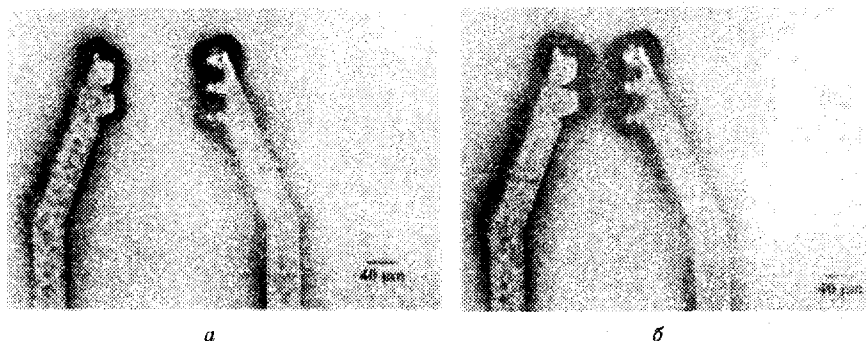


Рис. 6.6. Кліщі в розтиснутому (а) та стиснутому (б) стані

На рис. 6.6 представлено кліщі у стиснутому та розтиснутому стані. Для виключення нагрівання зони кліща біметалічний штовхач винесений у віддалену зону (рис. 6.7).

Перетворення крутильного моменту є найважливішим принципом механіки, що використовується у приводах, вузлах, пристроях та системах мікромеханіки. Цей принцип використовується й у багатьох механічних системах, з метою зниження вимог до потужності двигуна, джерела живлення.

Вищим досягненням у класі двигунів з конфігурацією [Шевченко,

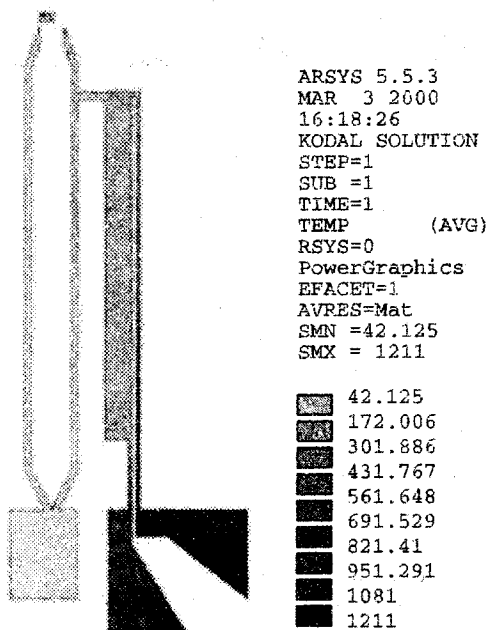


Рис. 6.7. Розподіл температур при вхідному струмі 1,6 А

2004] робочої поверхні у вигляді гребінок є сили порядку 25 мкН. У більшості практичних випадків потрібні значення сили на рівні одиниць Н. Для рішення проблеми обертання передається через редуктор з необхідним коефіцієнтом передачі. Приклади тришарових кремнієвих структур із гребінчастими рейками та зубчастими передачами, розроблені лабораторією SNL, США, наведено на рис. 6.8.

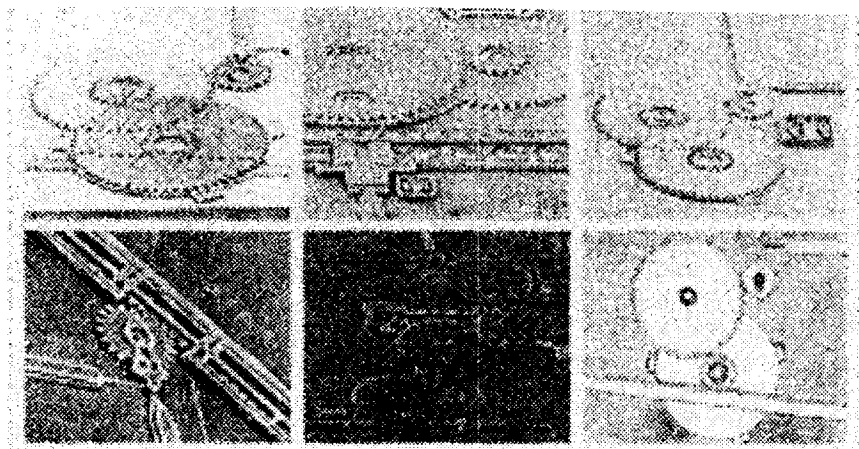


Рис. 6.8. Типові конструкції механізмів гребінчастих мікродвигунів MEMS та пристрою на їхній основі

Конструкції елементів передачі наведено на рис. 6.9. Зубці шестірні на валу двигуна мають діаметр менше людського волосу, кут тиску в зачепі дорівнює 20 град. Зубчасті колеса повинні мати високу площинність для забезпечення наступного виготовлення механізмів верхнього рівня. Типова товщина робочих кремнієвих шарів конструкції дорівнює 4 мкм.

До стандартних елементів кремнієвої MEMS відносяться зубчасті мікродвигуни, що забезпечують прецизійні повороти (обертання) елементів пристроїв на задані значення.

Мікродвигуни призначені для контролю точності обертання механічних елементів MEMS та забезпечують частоту обертання від 1 до 200 переміщень «зуба» у секунду (1 крок за 5 мс).

Мініатюрні роботи, оснащені датчиками, можуть знайти застосування в багатьох галузях промисловості, охорони здоров'я, науки.

Так, створено значну кількість мікророботів, що працюють у струмопровідних рідинах. У Лінкопінгському університеті,

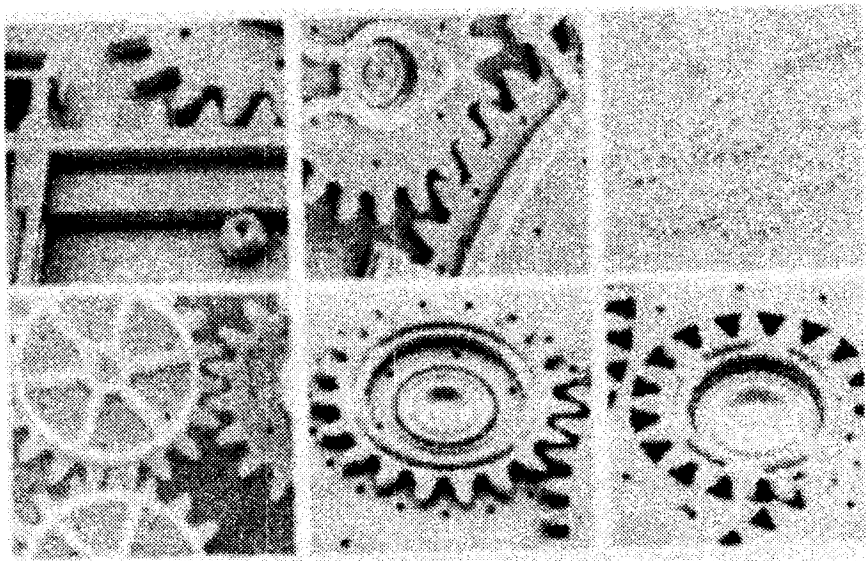


Рис. 6.9. Конструкції зубчастих елементів гребінчастих мікродвигунів МЕМС

Швеція, розроблено мікроробот з розмірами $670 \times 170 \times 240$ мкм для роботи в крові, урині та інших середовищах. Електронна начинка робота захищена тонким шаром поліпіролу. Деталі, виконані з поліпіролу, здатні скорочуватися подібно мускулам при проходженні через них електричного струму, що використано в маніпуляторі, який може працювати навіть із окремими клітинами. Обладнаний сенсорним блоком мікроробот перетворюється в мікролабораторію, що самостійно переміщується та проводить аналізи всередині живого організму. Виготовлено 140 екземплярів таких роботів. Продемонстровано їхню можливість переміщення мікрооб'єктів груповими зусиллями. Роботи можуть відігравати роль хірургічного інструмента для безкровних операцій — як великих, у ході яких ціла група буде діяти спільно, так і локальних, на клітинному рівні.

У Китаї створений плаваючий мікроробот довжиною 3 мм, що у майбутньому буде зменшений до 1 мм, а потім до 0,1 мм, і буде доставляти лікарські препарати в різні частини тіла. Переміщується робот під дією зовнішнього магнітного поля, що управляє його мікроскопічними плавцями.

Дуже важливим напрямком використання MEMS мікророботів і маніпуляторів є їхнє застосування в якості пристроїв мікропозиціонування та інструментальних засобів вивчення та модифікації поверхні в нанотехнологічних процесах [Уайтсайдс, 2002]. Це такі пристрої, як кантилевери тунелюючих скануючих мікроскопів та атомних силових мікроскопів, матриці зондів «міліпеди», многозондові пуансони в процесах нанодруківальної літографії («наноімпринтинга»), сканерів і зондів у перовій літографії, з використанням скануючих зондових мікроскопів є можливість одержувати карти розподілу цілого ряду фізичних та фізико-хімічних характеристик поверхні, таких як топографія, розподіл приповерхніх електростатичних, магнітних, електродинамічних сил, сил тертя, теплових полів, теплопровідності, електропровідності з високим просторовим розрізненням аж до атомного, завдяки створенню зондів спеціальних типів, а також розвитку апаратних засобів та програмного забезпечення.

Зондами в СЗМ є гострі голки. У тунельних мікроскопах — це спеціальним чином заточені металеві або напівпровідникові провідні голки, у близькопільній оптичній мікроскопії — загострені світлові волокна, у скануючій силовій мікроскопії — голки, закріплені на пружних балках. Завдяки тому, що розрізняюча здатність мікроскопів залежить від кута заточення та радіуса скруглення зонда, голки виконуються з мінімально досяжним радіусом (3 нм) (рис. 6.10).

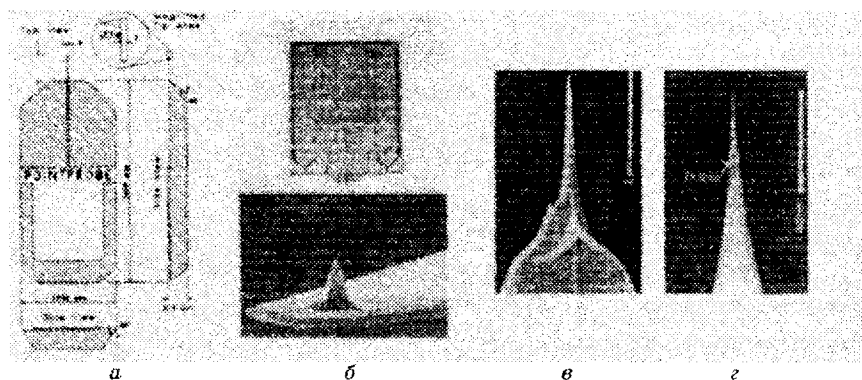


Рис. 6.10. Промислові кантилевери фірми «NanoSensor» (Німеччина):
a — конструкція; *б* — електронно-мікроскопічна фотографія кремнієвого кантилевера в оправленні; *в* — загострена кремнієва голка на кінці кремнієвого кантилевера;
г — кінчик загостреної кремнієвої голки

Кут нахилу балки в процесі сканування реєструється або пере-
раховується в рельєф — при цьому сила в процесі сканування буде
змінюватися, або підтримуватися постійною вертикальним пере-
міщенням кантилевера. Такий режим вимірювання рельєфу називається контактним скануванням. У процесі контактного сканування між зразком і кінчиком кантилевера з однієї сторони діють ван-дер-ваальсові сили відштовхування, що експоненційно зростають зі зменшенням відстані, а з боку пружно деформованої балки кантилевера — сила пружності, і у випадку вимірювань в повітряному середовищі — капілярні сили (як правило, це сили притягування). Саме останніми визначаються мінімальні сили в процесі контактного сканування. Діапазон цих сил $1...5 \cdot 10^{-9}$ Н. У випадку, якщо радіус кривизни кантилевера менше 10 нм, у системі зонд-поверхня розвивається тиск більше $1,5 \cdot 10^8$ Па (1500 атм), що призводить до пластичних деформацій більшості органічних матеріалів.

Існує можливість значно (до 1000 разів) знизити тиск на зразок. Для цього реєструють не зміну кута нахилу балки кантилевера, а зміну амплітуди її резонансних коливань. Такий режим називають напівконтактним або «тепінгом» (постукуванням) режимом сканування. При цьому поверхню обстукують коливним зондом у режимі малих резонансних коливань консолі, порушуваних п'єзоакустичним елементом 5 (рис. 6.11). Амплітуду коливань голки встановлюють у діапазоні 1—50 нм та зчитують фотодіодом 4 як суму змінних сигналів у секціях. Висока чутливість скануючих тунелюючих мікроскопів досягається за рахунок того, що тунельний струм збільшується на порядок і більше при зміні відстані на величину атома.

Об'єднання групи індивідуально керованих кантилеверів у матрицю (наприклад, $32 \times 32 = 1024$ зондів) дозволяє здійснити групову обробку ділянки поверхні заготовки або записи-зчитування інформації на жорсткі диски [Вернер, 2005]. Зображення такого пристрою в перспективі наведено на рис. Д8.46.

Кантилевери та мілішеде виготовляються за груповими методами. Цикл виготовлення пасивних кремнієвих кантилеверів включає:

- формування кремнієвих стовпчиків, з яких наступним загостренням будуть виконані голки;
- формування консолі;
- нанесення відбивного покриття;
- поділ пластини на окремі чипи.

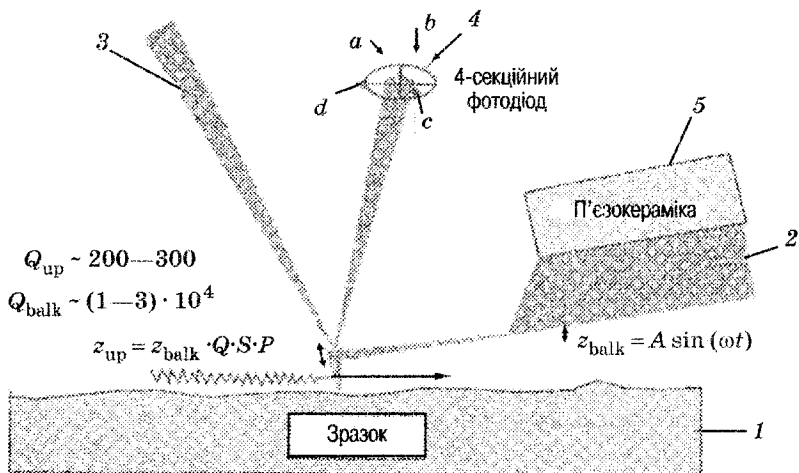


Рис. 6.11. Принцип роботи скануючого зондового мікроскопа з оптико-позидійною схемою реєстрації положення кантилевера: 1 — зразок; 2 — кантилевер; 3 — лазерний промінь реєструвальної системи; 4 — 4-секційний фотодіод (*a, b, c, d* — секції фотодіода) для реєстрації переміщення відбитого від кантилевера променя лазера; 5 — п'єзокерамічний вібратор, що збуджує коливання кантилевера; z_{balk} — миттєве значення амплітуди коливання чипа кантилевера; z_{up} — миттєве значення амплітуди коливань кінця балки кантилевера; Q — добротність кантилевера на частоті збудження

Фізично сучасні кантилевери виготовлюються у вигляді чипів шириною $1,6 \pm 0,1$ мм, довжиною 3,5—4 мм, товщиною 0,35—4 мм. Кантилевери характеризуються жорсткістю, резонансною частотою з гострими голками на вільних кінцях або без них, добротністю, формою голки, радіусом кривизни зонда, типом покриття поверхні голки (магніточутливі шари, провідні шари, діелектричні, тверді покриття).

Механічно властивості найпростішого безголчастого кантилевера у вигляді паралелепіпеда довжиною L , товщиною h та шириною b (рис. 6.12) визначають коливання під дією періодичного розгойдування утримувача уздовж осі Z ($Z = a \cos \omega t$) та за малих величин деформації $U(x, t)$ диференціальним рівнянням другого порядку:

$$M \frac{d^2 u}{dt^2} + H \frac{du}{dt} + K[U - a \cos(\omega t)] = 0, \quad (6.1)$$

де M — ефективна маса кантилевера; H — загасання в середовищі, демпфування, втрати; K — жорсткість.

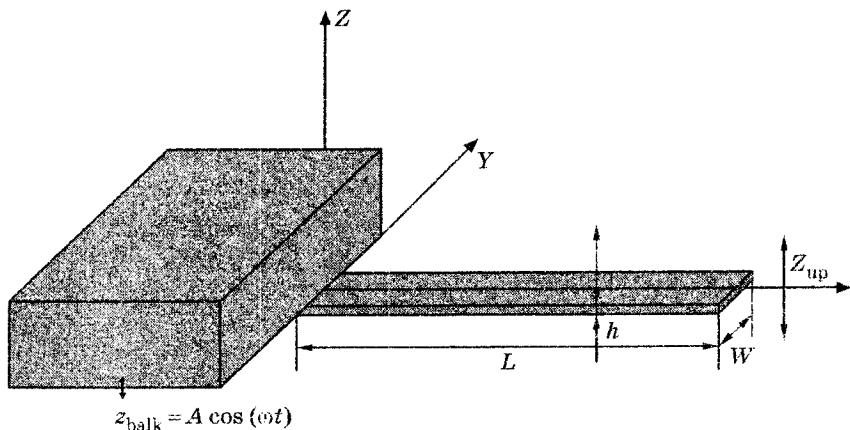


Рис. 6.12. Кантилевер у вигляді прямокутної балки

Тоді, якщо амплітуда коливань балки при $x = 0$ дорівнює a , то відповідно до (6.1) амплітуда коливань вільного кінця балки буде визначатися за виразом

$$U(\omega) = \frac{a}{\left| 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{i}{Q} \cdot \frac{\omega}{\omega_0} \right|} = \frac{a}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{1}{Q^2} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}}, \quad (6.2)$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$ — перша резонансна частота балки; $Q = \frac{k}{H\omega_0}$ — добротність коливань балки.

Жорсткість кантилеверів K_z , і резонансна частота f_R для балки у формі паралелепіпеда пов'язані з їхніми геометричними параметрами та пружними константами матеріалу балки наступними співвідношеннями:

$$K_z = \frac{E \cdot h^3 \cdot w}{4 \cdot L^3}, \quad (6.3)$$

$$f_R = 0,162 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (6.4)$$

а його торсіонна жорсткість

$$k_\psi = \frac{E \cdot h^3 \cdot w}{6(1+\mu) \cdot L \cdot l}, \quad (6.5)$$

де h — товщина; w — ширина; L — довжина кантилевера; E — модуль пружності (для кремнію $E = 1,45 \cdot 10^{11}$ Н/м²); ρ — щільність

матеріалу балки (для кремнію $\rho = 2330 \text{ кг/м}^3$); l — довжина голки; μ — відношення Пуассона (0,3).

Для кантилеверів з V-подібними балками

$$f_R = a \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (6.6)$$

де $a = 0,194—0,284$ залежно від конкретної геометрії балки, а силова константа k_z^Δ при цьому визначається за виразом

$$k_z^\Delta = \frac{E \cdot h^3 \cdot w}{2 \cdot L^3}. \quad (6.7)$$

Модель автономного робота MARV (Miniature Autonomous Robotic Vehicle, ф. SNL, США) має вигляд близько 1-дюймового куба. Він виготовлений цілком з комерційно доступних компонентів, до 2000 р. розміри зменшені в 4 рази. Робот у полімерному каркасі, на гусеничному ході, має два електродвигуни, процесор з 8 кБ пам'яті, датчик температури, мікрофон, відеокамеру, хімічний сенсор і три батареї від годинника. Саме елементи живлення перешкодили зробити пристрій ще більш мініатюрним. Роботи плануються обладнати системою бездротового зв'язку, після чого група роботів зможе об'єднуватися для спільного рішення завдань під керуванням центрального процесора. Основною сферою використання таких роботів може стати пошук і знешкодження мін та бомб, небезпечних біологічних та хімічних матеріалів. Завдяки малим розмірам та високій прохідності мікророботи є дуже перспективними для рішення розвідувальних завдань.

Дійсно, такі роботи активно використовувалися при рятувальних операціях у Нью-Йорку після руйнування будинків торгового центру 11 вересня 2001 р., проникаючи в ущелини до 12 м. Однак, ємність сучасних батарей дуже мала, її вистачає лише на подолання одного-двох десятків метрів.

Є численні публікації про створення роботів не тільки в мікрометровому діапазоні розмірів але й у нанорозмірній області, зокрема, з використанням нанотрубок та ДНК-структур. З мікро- та нанороботами (так званими асемблерами) пов'язуються надії на вирішення питань одного з видів складання нанопристроїв у масовому виробництві [Дрекслер, 1986]. Далека перспектива розвитку робототехніки це створення асемблерів, інтелектуальних машин, що самовідтворюються, призначених для виконання певного виду складальних робіт, а також дисасемблерів, які дозволять

розібрати будь-який об'єкт на складові елементи, для живих організмів зберегти генетичний код та знову відтворити їх. Блискучі перспективи, якщо людський розум виявиться сильнішим за зло! Ряд вчених ставляться до цих перспектив скептично.

Порівняно новим напрямком розвитку в робототехніці є створення пристроїв побутового призначення. Білл Гейтс [Гейтс, 2007] вважає, що саме цей напрямок приведе до стрімкого зростання робототехніки, яка зараз перебуває в стані мікроелектроніки та ЕОМ 70—80-х років минулого століття. Технічною базою зростання повинні стати принципи багатопроцесорної паралельної обробки інформації та поділ завдань за підсистемами та часом обробки. Ці принципи названі:

1) concurrency and coordination runtime (CCR) — координації та розподілу часу;

2) decentralized software services (DSS) — децентралізації обслуговування програмного забезпечення.

Розробкою базових принципів фірма Microsoft займається вже ряд років.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Навести класифікацію роботів за ступенями мініатюризації.
2. Описати програму використання біологічних об'єктів з метою створення міні-, мікро- та нанороботів.
3. Розподілені робототехнічні системи військового призначення — описати функції, структуру.
4. Типи мікроприводів, розповсюджених у мініатюрних роботах.
5. Актюатори МЕМС — інструмент для НТ.
6. У чому особливість функціонування теплових та механічних актюаторів?
7. Чи можливо одержання більших вихідних потужностей за допомогою МЕМС-актюаторів?
8. Як виготовити голки-зонди ТСМ, АСМ?
9. Які режими роботи кантилеверів використовуються в ТСМ?
10. Як визначити резонансну частоту кантилевера?

7 НАНОТЕХНОЛОГІЇ

Якщо вже сталевий кубик або кристалик солі, складений з однакових атомів, може виявляти цікаві властивості; якщо вода — прості крапельки, що не відрізняються одна від одної та покривають мілья за мільєю поверхню Землі, — здатна породжувати хвилі та піну, грім прибою та дивні візерунки на граніті набережної; якщо це все багатство життя вод — усього лише властивість згустків атомів, то скільки ж ще в них приховано можливостей? Якщо замість того, щоб вишикувати атоми по ранжиру, стрій за строем, колонку за колонкою, навіть замість того, щоб споруджувати з них мудрі молекули аромату фіалок, якщо замість усього цього розташовувати їх щораз по-новому, різноманітючи їхню мозаїку, не повторюючи того, що вже було, — уявляєте, скільки незвичайного, несподіваного може виникнути в їхній поведінці.

Р. П. Фейнман

Нанотехнології використовувалися людиною здавна. Так, кольори скла, знайденого у древніх гончарних виробках, пояснюються відмінністю наноскопічних і макроскопічних властивостей матеріалів. Наночастинки золота, включені до складу скла, можуть бути жовтогарячими, пурпурними, червоними або зеленуватими залежно від їхнього розміру. Очевидно, що для одержання видів скла різного кольору необхідно було диспергувати золото до часток різних розмірів і розподіляти їх в об'ємі скла, тобто у виробництві невідомо використовувались елементи нанотехнологій.

З 91 хімічного елемента, що зустрічаються в природі, багато які фігурують у біології. Більше 95 % загальної маси більшості рослин і тварин складається з атомів чотирьох речовин: водню, кисню, азоту та вуглецю. Ці елементи також переважають у більшості синтетичних матеріалів і можуть утворювати безліч типів зв'язків, створюючи різноманіття складних наноструктур. Вихідні наноструктури, взаємодіючи між собою, утворюють більш складні асоціації, кластери, ансамблі, агломерати, полімерні структури та т. ін.

Масових промислових нанотехнологій поки що небагато, досвід виготовлення нанопристроїв обмежений моделями, що працюють у діапазоні розмірів > 100 нм, але існує створений природою великий клас внутрішньоклітинних технологій.

Все живе навколо нас і ми самі є результатом функціонування цих нанотехнологій. Як технологічні процеси внутрішньоклітинні технології мають низку надзвичайно цінних переваг [Дудников, 1992] у порівнянні з іншими:

- екологічну чистоту;
- необмежені самовідновлювальні джерела сировини;
- використання в якості зовнішнього джерела енергії — енергії Сонця;
- безпеку функціонування;
- процеси протікають за фізіологічних температур, атмосферного тиску, практично в нейтральних розчинах.

Такого роду технології вже в достатній мірі вивчені, і цей досвід може бути використаний при створенні промислових варіантів технологій.

Тому можливо, що першими масовими промисловими нанотехнологіями буде виробництво біополімерів, насамперед синтез білків, що являють велику цінність для людства.

Процеси фотосинтезу, перетворення сонячного світла в різні види енергії, нанороботи, сенсори для вимірювання різних фізичних величин, різноманітні матеріали з унікальними властивостями, що не зустрічаються в природі, можливість конструювання матеріалів з необхідними електрофізичними параметрами, а також створення нанокомпонентів, що виконують електричні, механічні, хімічні та біологічні функції дають упевненість у тому, що використання НТ зробить революційний переворот у багатьох галузях виробництва, науки, культури, освіти, військової галузі, умовах життя людей.

Зміна розмірів використовуваних «компонентів» до нано- та молекулярних розмірів викликає необхідність переходу від

класичної фізики до квантової механіки, обліку синергетичних принципів. У нанорозмірній зоні все в більшій мірі проявляються такі квантово-механічні ефекти як розмірне, зарядне й енергетичне квантування, нерівномірний розподіл атомів домішок у напівпровіднику, тунелювання, інтерференція, хвильовий зв'язок і передача між шарами, а також домінуючий вплив поверхневих (гетерогенних) процесів.

Властивості речовин і матеріалів, утворених структурними елементами з розмірами в нанометровому інтервалі (10^{-9} — 10^{-7} м), в об'ємній фазі не визначаються однозначно. Керуючи розмірами та формами наноструктур, таким матеріалам можна надавати зовсім нові функціональні характеристики, що різко відрізняються від характеристик звичайних матеріалів.

До числа вже відомих наноструктур належать вуглецеві нанотрубки, білки, ДНК і функціонуючі за кімнатних температур «одноелектронні» транзистори. Так, вуглецеві нанотрубки на порядок (за іншими джерелами — на два порядки) міцніші за сталь, маючи в 6 разів меншу питому вагу.

Нанотехнологія повинна принципово змінити методи виготовлення і матеріалів і пристроїв. Можливість синтезувати наноструктури з точно регульованими розмірами та складом, які будуть використовуватися для складання більш великих структур, яким властиві унікальні характеристики, спричинить якісні зміни у виробництві матеріалів.

Нанонаука займається фундаментальними дослідженнями властивостей наноматеріалів і явищ у нанометровому масштабі.

Нанотехнологія є міждисциплінарною галуззю науки, у якій використовуються закономірності фізико-хімічних процесів у просторових областях нанометрових розмірів з метою керування окремими атомами, молекулами, молекулярними системами при створенні нових молекул, наноструктур, нанопристроїв і матеріалів зі спеціальними фізичними, хімічними та біологічними властивостями.

Наноінженерія здійснює пошук та ефективне використання наноматеріалів і пристроїв.

Необхідно зупинитися на визначенні нанотехнологій як міждисциплінарної галузі.

Можна із упевненістю говорити, що розвиток нанотехнологій та наслідки їхнього використання мають глобальний характер, зачіпають усі без винятку галузі техніки, економіки, освіти, умови життя людей, це перехід на якісно новий рівень взаємодії людства

із природою, матеріальним світом, інформаційної забезпеченості, можливостей науки у вивченні фундаментальних законів мікро- (нано-) та макросвіту, минулого, сьогодення та майбутнього всесвіту, міжпланетних космічних польотів, відтворення живих істот, у тому числі людини та т. ін. і т. п.

Прогрес НТ буде результатом досягнень у найрізноманітніших галузях науки (біології, хімії, фізики та математики, механіки та електроніки, суспільних дисциплін), а також освіти та культури. Саме в діапазоні розмірів 1...100 нм відкриваються нові властивості речовини. Ніде так близько не сходяться фізика, хімія та біологія.

Широкі можливості, які представляють НТ, можуть обернутися для людей і великим лихом при безконтрольності, використанні у військових або зловмисних цілях групами людей або держав.

Нанотехнології доступні для розробки, використання та виробництва виробів невеликими колективами людей або навіть окремими особистостями, що збільшує можливості їхнього використання не тільки на благо людства, але й на лихо (створення біологічних, хімічних і інших видів зброї, терористичних акцій, підпорядкування волі інших людей задумам екстремістів, помилки та втрата керування над «самовідтворюваними» об'єктами, одержання речовин і об'єктів, що володіють побічними, небезпечними для біосфери властивостями).

Щоб забезпечити прогрес НТ, а також уникнути багатьох труднощів і неприємностей на цьому шляху, необхідна розробка приладів і методів досліджень закономірностей наносвіту, принципів, що визначають фізико-хімічні властивості наноматеріалів, методів виготовлення нанооб'єктів, прогнозування та регулювання властивостей одержуваних об'єктів.

Наноструктури фундаментально відрізняються від макроструктур: їхні характеристики, особливо електричні та магнітні — переважно описуються законами квантової фізики. Наноструктури можна вважати унікальним станом речовини, особливо перспективним для створення нових, потенційно дуже корисних матеріалів, виробів.

Не можна вважати нанотехнології зовсім новим, несподіваним напрямком робіт. З об'єктами нанометрового діапазону традиційно працювали фахівці низки напрямків — хімії, біології, медицини, фізики, виробничих галузей, не відносячи ці роботи до нанотехнологій. Тепер і результати цих робіт, і самі галузі досліджень та використання належать до нанотехнологій.

7.1. Наноімпринтинг або нанодрукowana літографія (НДЛ)

У цьому методі зображення утворюється в основному за рахунок механічної деформації резиста пресформою (штампом), а не за рахунок модифікації хімічної структури резиста опроміненням, як у звичайній літографії. Ця принципова відмінність усуває обмеження та недоліки, пов'язані зі стандартними методами літографії (довжиною хвилі, дифузиею, розсіюванням, відбиттям і підтравлюваннями). У результаті за допомогою НДЛ можна недорого та з високим виходом одержати структури розміром менше 10 нм на великих площах, що недоступно для інших існуючих методів літографії.

Ключовою операцією у виробництві мікроелектронних пристроїв є фотолітографія. При розмірах елементів пристроїв не менше 2 мкм у масовому виробництві основними були методи оптичної літографії [Ефимов, 1987].

З переходом до елементів субмікронного діапазону виникає низка обмежень у використанні цих методів [Варадан, 2004]. Основними з них можна вважати дифракцію світлових хвиль, розсіювання у фоторезисті, відбиття від підкладки, сильний вплив дефектів фотошаблонів і їхнє швидке зношування, труднощі автоматизації операцій суміщення, малу глибину різкості оптико-механічних пристроїв, а також високі вимоги до чистоти експонованого матеріалу та його площинності. Деякі з цих обмежень пов'язані з довжиною хвилі джерела експонування, для їхнього зменшення необхідний перехід до менших довжин хвиль, електронної літографії та жорсткого ультрафіолетового діапазону («м'якого» рентгеновського $\lambda = 5$ нм), рис. 7.1.

У процесі експонування резистів електронним пучком поряд зі зменшенням впливу на роздільну здатність дифракції з'являються додаткові ефекти, що обмежують досягнення менших розмірів елементів: гальмування електронів у шарі резисту, пружне та непружне відбиття електронів від підкладки, вторинна електронна емісія, рентгеновське та ультрафіолетове випромінювання. Внески цих явищ у зміну властивостей резисту та можливості одержання елементів мікросхем різні в залежності від початкової енергії пучка, атомного номера z матеріалу мішені, її товщини t , кута падіння первинного пучка та ін. У цілому електронорезисти мають бути нечутливими до видимого та ультрафіолетового світла, стійкими до електронного бомбардування та відповідних розчинників. При використанні замість органічних електронорезистів металевих

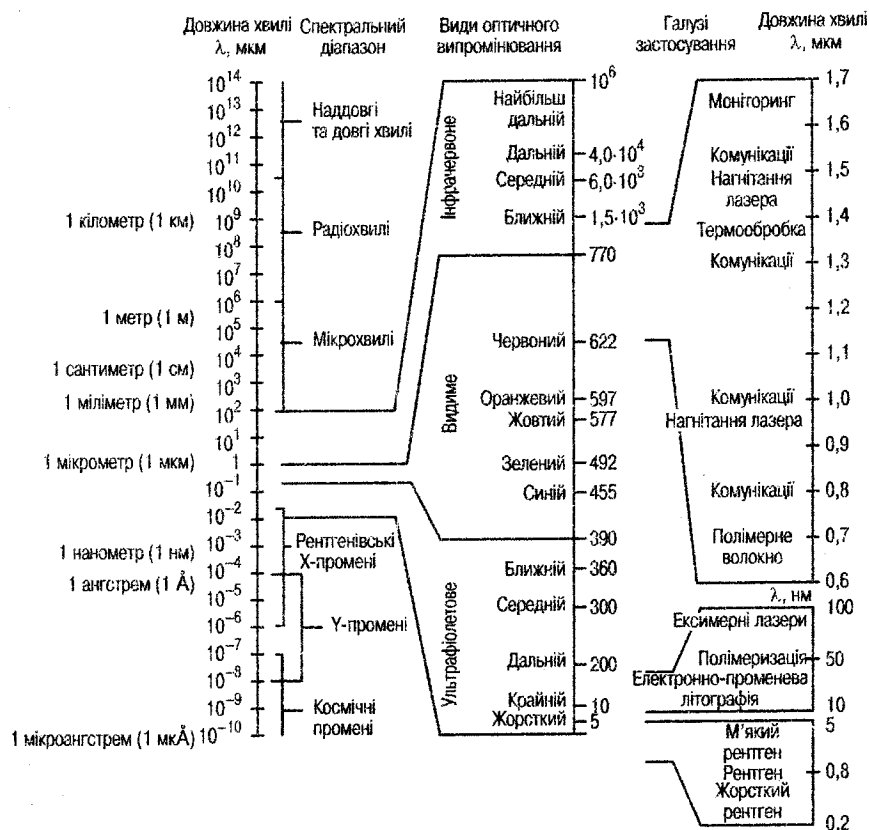


Рис. 7.1. Діапазони електромагнітних хвиль

плівок, покритих шаром вуглецю товщиною 10 нм, виходять лінії товщиною 8 нм за величини діаметра променя 0,5 нм. Але продуктивність процесу літографії обернено пропорційна до діаметру променя, тобто різко знижується.

Пристрої транспортування та керування потоками вимагають вакууму порядку 10^{-8} Па, а при використанні автоемісійних емітерів необхідно підтримувати тиск на рівні 10^{-7} Па та забезпечувати відсутність вуглеводнів у залишковому середовищі («безмасляний вакуум»).

У порівнянні зі світлооптичними методами електронно-променева літографія забезпечує зменшення розмірів елементів в 10—100 разів, але висока складність і вартість електронно-променевих пристроїв для літографії, необхідність високовакуумних

систем, недостатня продуктивність процесу обмежують його використання. У серійному виробництві із застосуванням електронної літографії випускаються надвеликі інтегральні схеми (НВІС), ЗП на ЦМД, криогенні пристрої на ефекті Джозефсона, прилади акустоелектроніки та мікропроцесори.

Маски для прецизійної рентгенівської літографії виготовляють на основі тонких кремнієвих мембран. Спосіб їхнього одержання полягає в сильному легуванні поверхні кремнію, напилюванні золота на передню сторону підкладки, травленні золота за допомогою стандартного фотолітографічного або електронно-променевого метода з метою одержання шаблону для рентгенолітографії та, нарешті, підтравлюванні більшої частини кремнієвої підкладки зі зворотної поверхні ЕДП-протравлювачем (залишаються тільки носійні сітки золота на легованій носійній мембрані, товщина якої залежить від глибини дифузії бору, що зазвичай становить 1—5 мкм). Частина, що залишилася, виходить ніби сильно розтягнутою та має гладку рівну поверхню без складок, тріщин і прогинів. Рентгенівське випромінювання сильно послаблюється шарами золота та не послаблюється кремнієвою мембраною, що залишилася тонкою.

Скориставшись плазмою для наскрізного протравлювання тонких областей кремнію p^+ -типу, що залишаються непокритими золотом, можна застосувати двошарову структуру Au—Si, яка утворилася, в якості маски для безконтактної електронно-променевої літографії. Такий підшар під час електронної променевої літографії виключає розширення ліній фоторезисту внаслідок зворотного розсіювання електронів від підкладки та слугує для одержання ліній з дуже високим розрізненням і створення високопрозорих рентгенолітографічних масок.

Альтернативним процесом електронно-променевої літографії є рентгенолітографія, що дозволяє одержувати при значно менших витратах субмікронні розміри елементів схем.

Перспективним джерелом рентгенівського випромінювання в технології мікромеханічних систем для формування 3D-елементів є кільцевий накопичувач електронів — синхротрон [Суздаєв, 2006].

Раніше вважалося, що літографія не підходить для виготовлення елементів схем з розмірами меншими за довжину хвилі, використовуваних для експонування світла. Але зараз за рахунок використання проекційної електронолітографії зі зменшенням зображення, методу корекції мікропроміжків, масок з фазовим зсувом

і ексімерних лазерів при довжині хвилі 248 нм можна одержати елементи з розмірами ~ 70 нм. У перших наночипах [Хатчесон, 2004], при довжині хвилі 193 нм, виготовлялися елементи транзисторів не більші за 50 нм. Суть методу полягає в наступному. Коли розмір елементів структури менший за довжину хвилі, викривлення, що виникають внаслідок оптичної дифракції по краях зображення, можна заздалегідь розрахувати та урахувати. Потім необхідно сформуванати маску такої форми, щоб з урахуванням дифракції вона дозволяла одержувати на кремнієвій заготівлі потрібне зображення. Наприклад, якби маска була просто прямокутною, дифракція викликала б сильне округлення кутів. Але якщо шаблон виконаний у вигляді «кістки», то його проекція буде дуже схожою на прямокутник (рис. Д8.47). Перехід до використання світла з ще меншою довжиною хвилі може забезпечити ще більш високу розрізняючу здатність.

Застосування літографії із жорстким ультрафіолетом дозволяє зменшити розміри елементів на порядок, але це пов'язано з великими труднощами. Дослідні зразки технологічних систем, що розраховані на довжину хвилі 13 нм, являють собою справжнє чудо техніки.

Оскільки всі матеріали сильно поглинають у далекій ультрафіолетовій області, у проекційних камерах не можна використовувати лінзи, які в цьому випадку виявляються практично непрозорими. Замість них доводиться застосовувати дзеркала складної форми. Не підходять також звичайні скляні фотонаблони, які замінюють масками, що поглинають і відбивають жорстке ультрафіолетове випромінювання. У процесі їхнього виготовлення використовуються багат шарові дзеркала, що складаються з десятків шарів молібдену та кремнію товщиною всього в декілька нанометрів кожний. Отримана відбиваюча поверхня покривається хромом, що у потрібних місцях поглинає світло. Для фокусування жорсткого ультрафіолетового випромінювання плазми та зменшення розмірів зображення, що проєціюється з маски, застосовуються багат шарові дзеркала (рис. Д8.48).

Одержання бездефектної літографічної маски являє собою складну інженерну проблему, вирішенням якої займається велика кількість учених та інженерів.

Після проектування літографічної маски на плівку фоторезисту потрібно видалити експоновані ділянки фоторезисту, витравити незахищений матеріал підкладки та видалити фоторезист і залишки продуктів травлення. Зі зменшенням розмірів елементів

традиційні промивні рідини виявляються занадто в'язкими, ускладнене їхнє проникнення у вузькі щілини, можливе також руйнування крихких нанорозмірних щілин. Найкращі результати в процесі відмивання отримані під час використання перегрітих рідин, наприклад вуглекислого газу при значеннях тиску та температури, які перебувають вище так званої критичної точки, що поводить майже як рідина, але зберігає низьку в'язкість. Надкритичний двоокис вуглецю легко проникає під частки та видаляє їх ефективніше за будь-який рідкий хімікат. Більше того, змішавши її з підходящим розчинником, можна легко видалити фоторезист. А коли промивання завершено, досить понизити тиск до атмосферного та перегріта рідина відразу випаровується та звітряється, як звичайний газ.

Наведений огляд методів променевої літографії показує можливість їхнього використання для одержання латеральних розмірів елементів порядку 10 нм. Причому одночасно зі зменшенням розмірів зменшується точність їхнього виготовлення, обмежуються розміри плати, збільшується час і вартість обробки.

Для одержання малюнка шарів схем у нанотехнологіях відоме невелике число методів: перова літографія, літографія наносферами, наноімпринтинг, 3D-голографічна літографія та літографічно індуковане самоскладання [Поляков, 2007]. З *наноімпринтингом* пов'язують можливість одержання інтегральних наносхем, а також розвитку наукових напрямків у біології, хімії та матеріалознавстві. Наноімпринтинг, або NIL-наноімпринтигова літографія, є дешевою та високопродуктивною технологією одержання малюнка, що забезпечує високий вихід придатних схем з роздільною здатністю менше 10 нм на підкладках з розмірами сторін ~10 см (навіть 20 см) [Невлюдов, 2007].

Розробками матеріалів, технологічних процесів і технологічного обладнання для наноімпринтинга займається багато фірм і університетів в різних країнах світу [Nanonex Corp., USA; University of Taiwan; SUSS+MicroTec].

Технологія NIL має декілька різновидів:

1. Гаряче тиснення, пресування, Hot embossing, T-NIL-Thermal nanoimprinting lithography — термічна наноімпринтигова літографія.

2. УФ-стимуляція, UV curing, фотостимульована літографія (P-NIL — photocuring NIL).

3. Зворотний наноімпринтинг — Reversal imprinting.

4. Наноконтактний друк — Nanocontact printing.

5. Мікроконтактний друк — contact printing (μCP).

6. Нанодрук переносом — Nanotransfer printing.

Технологічний процес *наноімпринтинга* гарячим пресуванням (рис. Д8.49, *a*) вимагає нагрівання фоторезисту до температури вищої за температуру його полімеризації. Штамп-матриця деформує шар фоторезисту, залишаючи на ньому рельєф малюнка матриці. У процесі T-NIL, як правило, використовується один шар фоторезисту (PMMA, SU-8 NX), а тиск прикладається довше часу нагрівання. Температурно-часовий графік обробки наведено на рис. 7.2, *a*; час прикладення тиску — на рис. 7.2, *б*.

Наступна операція реактивно-іонного травлення (РІТ) киснем забезпечує видалення залишків резисту в поглибленнях відбитка.

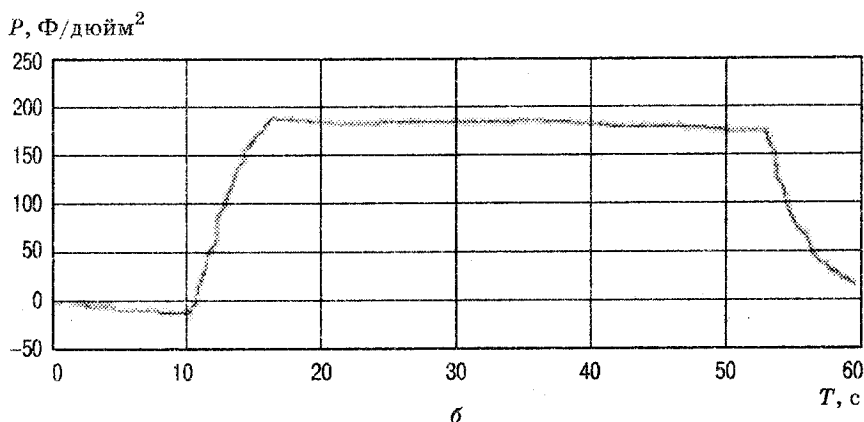
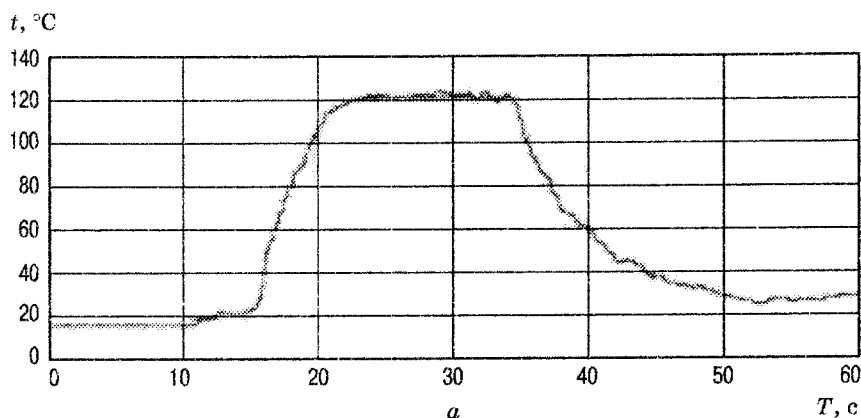


Рис. 7.2. Часові графіки: *a* — зміни температури; *б* — прикладення тиску

Типові режими гарячого тиснення: температура — 120 °С, тиск P — 2,5 МПа, час — 1 хв. Можливе використання методу у виробництві фотонних кристалів, нанорідинних МЕМС та ін.

В *P-NIL* процесі використовується два шари фоторезисту. Тиск штампа-матриці на верхній шар фоторезисту прикладається за кімнатної температури. Експонування УФ-випромінюванням необхідне для взаємного зв'язку двох мономерів. Після зняття тиску відбиток малюнка матриці утворюється на верхньому шарі фоточутливого резисту. Далі виконуються два етапи реактивно-іонного травлення (протравлювач на фоторезистивній основі, потім кисневе РІТ), що використовується для видалення залишків фотополімеризованого резисту верхнього шару та передає малюнок розташованому нижче шару резисту. Відбитки на резисті, отримані за допомогою або *T-NIL*, або *P-NIL*, можуть використовуватися для наступних адитивно-субтрактивних процесів.

Наведемо більш детальний опис *P-NIL* технології (рис. Д8.49, б). Підкладка товщиною 0,5 мм зі сторонами 10 см, виготовлена зі скла Pyrex 7740, покривається товстим шаром окисла (100 нм) за допомогою удосконаленого плазмохімічного осадження з парової фази (PECVD — plasma enhanced chemical vapor deposition). Малюнок на поверхні штампа-матриці отримується під час літографії з високою розрізняючою здатністю (електронно-променевої літографії, синхротронної літографії, *NIL*, інтерференційної літографії і т. ін.) і переносу на PECVD оксиду відшаруванням і РІТ на фоторезистивній основі. Поверхня штампа пасивується одним моношаром перфторалкілхлоросилану для полегшення рознімання форми. Виступаюча частина на штампі-матриці близько 60 нм.

Друк здійснюється на підкладках 0,5 × 100 × 100 мм. Спочатку підкладка просочується $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) при 75 °С протягом 15 хв, а потім відмивається деіонізованою водою, протягом 5 хв. Після сушіння струменем очищеного азоту поверхня підкладки, нагріта до 200 °С, очищується струменем CO_2 під високим тиском. І нижній шар резисту і фоточутливий резист, застосовувані для імпринтингу підкладок, наносяться із застосуванням стандартного методу центрифугування, що забезпечує високу однорідність шару резисту (краще за 5 % на всій 100 мм підкладці), малу тривалість циклу та високий вихід виробів.

У першу чергу наноситься на кремнієву підкладку резист підшару Nanonex NXR-3010 центрифугуванням, потім потрібне сушіння при температурі 90 °С протягом 25 хв. Необхідна товщина

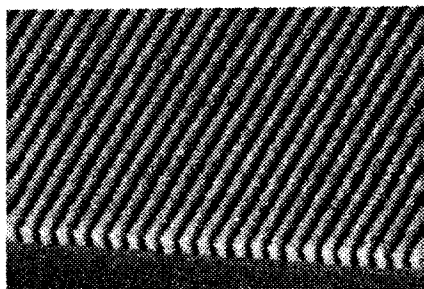
плівки — близько 200 нм. Фоточутливий резист Nanonex NXR-2010 також наноситься центрифугуванням із забезпеченням товщини шару ~ 70 нм і залишається в рідкому стані до моменту схоплювання шарів.

Скляний штамп, наприклад зі скла Pirex 7740, давить на двошаровий резист на оброблюваній підкладці. Тиск по всій чотиридюймовій підкладці зазвичай 15...50 фунтів на дюйм квадратний (10...35 Н/см²).

NXR-3010-резист буде схоплюватися під дією УФ випромінювання, що проходить через скляний шаблон-матрицю. Поріг схоплювання NXR-3010 резисту дорівнює 40 мДж/см² і час експозиції на пристрої NXR-2000 для нанодруку — близько 5 с. Після видалення штампа-матриці малюнок на його поверхні друкується у фоточутливому резисті. Реактивно-іонне травлення, що складається із двох щаблів, використовується для остаточного переносу зображення на обидва шари резисту.

У процесі наноімпринтингу використовується пресування з повітряною прокладкою (air cushion press — АСР), що забезпечує однаковий тиск на всій поверхні підкладки. Така однорідність тиску недосяжна в процесах, що залежать від паралельності поверхонь підкладки та штампа-матриці. У цьому процесі досягається однорідність тиску навіть під час друку на криволінійних поверхнях. Збільшується також довговічність штампа-матриці. Не потрібна надвисока площинність підкладки, як під час пресування з малими тисками та на паралельних площинах.

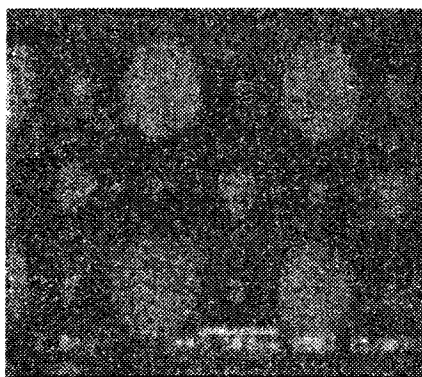
Пресування з повітряною прокладкою розроблене та запатентоване фірмою Nanonex і використовується в багатьох пристроях наноімпринтинга NX-1000, NX-2000, NX-3000. Це обладнання призначене для T-NIL і P-NIL із пристроєм суміщення та без нього. Пресування з повітряною подушкою забезпечує однаковий тиск на підкладках з розмірами сторін до 200 мм. Крім подачі та знімання плат, всі операції виконуються за програмою, автоматично. Розрізняюча здатність друку пристроєм NX-2000 краща за 10 нм. Поперечний переріз і вид зверху на фоторезист у процесі P-NIL наведено на рис. 7.3.



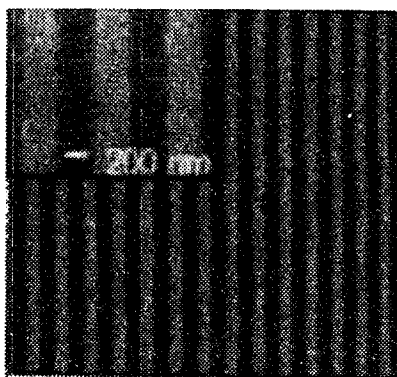
200 нм

Рис. 7.3. Зразок системи провідників, отриманих у процесі P-NIL

Наноконтактний друк — аналог офсетного макродруку. На виступи наноштампу (штемпеля) наноситься фарба або каталітичний шар, що переноситься на підкладку та слугує маскою для травлення (субтрактивний процес) або підшаром для гальванічного осадження металу (адитивний процес). Послідовність операцій наведено на рис. Д8.50, а елементи, отримані за допомогою цього способу, — на рис. 7.4.



500 мкм



2 мкм

Рис. 7.4. Зразки елементів, отриманих за допомогою наноконтактного друку

Розрізняюча здатність 65 нм, аспектне відношення — до 8. Матеріали для друку — аminosилан, полі-*l*-лізин (poly-*l*-lysine). Метод може використовуватися в НЕМС, біопристроях.

Низька вартість і висока продуктивність методу НДЛ дозволяє організовувати комерційне виробництво наноструктур і зробити їх загальнодоступними матеріалами. Можливо, що із НДЛ буде пов'язаний розвиток не тільки технологій ІС, але й цілих наукових напрямків, зокрема біології, хімії, медицини та матеріалознавства [Лучко, 2004].

Процес гарячого пресування та мікроконтактного друку полідиметилсилоксану (ПДМС)

На кремнієвій підкладці над шаром металізації наноситься шар полімеру ПДМС. Пластик нагрівається до температури, що перевищує температуру склування, і в нього вдавлюється матриця. Після рознімання форми на шарі ПДМС залишається репліка малюнка матриці. В процесі реактивно-іонного травлення видаляється залишковий шар ПДМС, оголюються металеві контактні

площинки. Гальванічним способом осаджується метал, що утворює дзеркальне відображення матриці. Виконується травлення металу основи. ПДМС — оптично прозорий, гнучкий, міцний, хімічно інертний, нетоксичний і дешевий матеріал.

Використання ПДМС-реплікацій і процесу переносу малюнка дозволяє одержувати 3D-компоненти, мікроструктури, МЕМС-компоненти на схемі.

Процес лиття полідиметилсилоксану є низькотемпературним (полімеризація при 65 °С — 4 години, 100 °С — 1 година), для одержання форм (матриць), які використовуються при гальванічному нанесенні електропровідних елементів, що не вимагають дорогого технологічного обладнання.

У якості майстер-форм застосовують нікелеві форми. Полімер RTV615A і активатор ПДМС RTV615B використовується в пропорції 10:1, наноситься на майстер-форму центрифугуванням. Для мінімізації товщини шару ПДМС над майстер-формою використовуються притиски або складені форми.

Послідовність операцій і приклади матриць і реплік наведено на рис. Д8.51—8.53.

Зворотний імпринтинг — літографія, що дозволяє виготовляти гнучкі електронні пристрої, багатоканальні структури та ін.

На штамп-матрицю із кремнію наноситься фоторезист (наприклад, ПММА) шаром, що перевищує висоту елементів малюнка на матриці, потім виконується перенос фоторезисту з Si-матриці на підкладку за методом друку при нагріванні та відповідному тиску. Далі виконується травлення. Нижче наведена схема технологічного процесу та одержувані за допомогою цього методу компоненти (рис. Д8.54, 7.5).

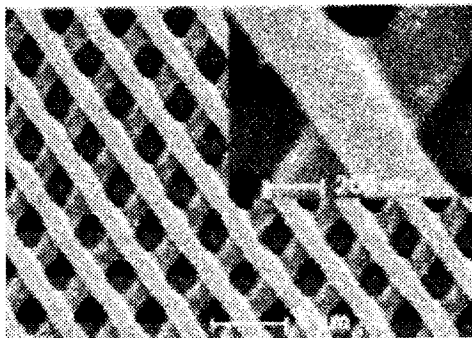


Рис. 7.5. Зразок, отриманий у процесі переносу

7.2. Нанотехнології самоскладання

Самоскладання стає одним з основних нанотехнологічних методів. І очевидно, що цінним результатом буде реалізація самоскладання хоча б на одній або групі операцій технологічного процесу. Самоскладальна фотолітографія [Стикс, 2004] дозволяє

одержати регулярну структуру наноточок на підкладці, що надалі може використовуватися для побудови більш складних наноточкових структур.

Два полімери — полістирол і поліметилметакрилат (плексиглас) з'єднані у двоблочний сополімер з хімічними зв'язками. При нанесенні такого фоторезисту на обертову кремнієву підкладку компоненти сегрегують, як масло та вода, але зв'язки між ними зберігаються. Наступна термообробка підсилює цей процес, і в результаті утворюються маленькі циліндри із плексигласу, оточені з усіх боків полістиролом. Таким чином, двоблочний сополімер сам по собі формує готовий сотоподібний шаблон (рис. Д8.55)

ПММА видаляється органічним травлячим розчином, і в полімерному покритті з'являються пори діаметром 20 нм. Наступний етап селективного травлення переносить стільниковий малюнок на підкладку із двоокису кремнію. Потім на плату наноситься шар аморфного кремнію. За допомогою травлячого газу кремній видаляється звідусюди, крім пор. Таким чином, залишаються тільки нанокристалічні циліндри, оточені двоокисом кремнію. На останньому етапі поверх отриманої структури наноситься ізолюючий шар і кремнієвий блок, що працює як закрив польового транзистора. Така структура може бути використана для виробництва флеш-пам'яті (рис. Д8.56). Інформація втримується в конденсаторах, утворених нанокристалічними циліндрами.

З використанням звичайних методів літографії та нанесення дуже складно створити близько розташовані отвори для мікросхеми флеш-пам'яті. Отримані з їхньою допомогою нанокристали мають різні розміри та розташовані хаотично. Метод самоскладання дозволяє розташувати їх рівномірно та витримати однакові розміри.

У результаті збільшується термін служби пристрою та тривалість збереження заряду навіть в процесі використання нанокристалів діаметром меншим за 20 нм.

За допомогою такої технології можна створити додаткові отвори в кремнієвій підкладці та сформувати розв'язувальні конденсатори, що згладжують флуктуації напруги живлення. Застосування полімеру, що самоскладається, також дозволяє розмістити на підкладці тонкі циліндричні кремнієві виступи. Кожний з них являє собою канал транзистора, по якому струм тече не уздовж чипа, як у сучасних пристроях, а перпендикулярно до поверхні. Закрив виконується у вигляді кільця, що оточує канал. Така конструкція перешкоджає витоку електронів у підкладку, що неминучий при скороченні розмірів пристрою.

У технології самоскладання величезний потенціал. Головне, що вона вже вийшла з лабораторій у виробництво.

7.3. Методи дослідження в нанотехнологіях

Швидкий розвиток нанотехнології в останні роки пов'язаний головним чином з новими можливостями вимірювань і варіювання характеристик окремих структур у нанометровому масштабі [Уайтсайдс, 2002]. Нові вимірювальні пристрої та пов'язані з ними методики (скануючі зонди, «оптичні пінцети», електронні мікроскопи високого розрізнення та ін.) дозволили вченим і технологам створити нові структури, виявити та досліджувати нові ефекти і явища, знайти для них нові застосування.

Різноманітність властивостей і застосувань нанооб'єктів призвела до розвитку відомих і появи нових методів досліджень. Це насамперед методи, засновані на реєстрації електронів: дифракція електронів, польова електронна та іонна спектроскопія, різні види електронної мікроскопії, електронна РФС-, УФС- та Оже-спектроскопія, дифракція рентгенівського випромінювання із застосуванням синхротронного випромінювання, методи EXAFS, XANS, методи оптичної, ІК- і спектроскопії комбінаційного розсіювання, месбауерівської спектроскопії, методи ЯМР і ЕПР радіоспектроскопії [Суздаєв, 2006].

Прогрес у створенні MEMS і нанооб'єктів визначається головним чином розвитком методів формування наноструктур, а також їхнім дослідженням з використанням сучасних аналітичних приладів поверхневої та структурної об'ємної діагностики, з атомною розрізняючою здатністю. У цьому зв'язку, зокрема, не можна уявити розвиток нанотехнології без мікроелектромеханічних систем позиціонування та обробки, а можливо й складання.

У цей час існує обмежене число методів, що дозволяють формувати малорозмірні структури, серед яких варто виділити методи прецизійної літографії: наноперової, наноімпринтинга, наносферами, рентгенівської (синхротронної обробки з енергією променю ~ 2 MeV), УФ і жорсткої УФ літографії, методи атомного складання з самоорганізацією, самореplikацією.

Оптична літографія з масками не застосовна в нанолітографії через велику довжину хвилі (~ 400 нм) у порівнянні з розмірами елементів.

Одним зі способів нанолітографії є перова нанолітографія, аналогічна до письма пір'яною ручкою [Ратнер, 2004]. Схему процесу

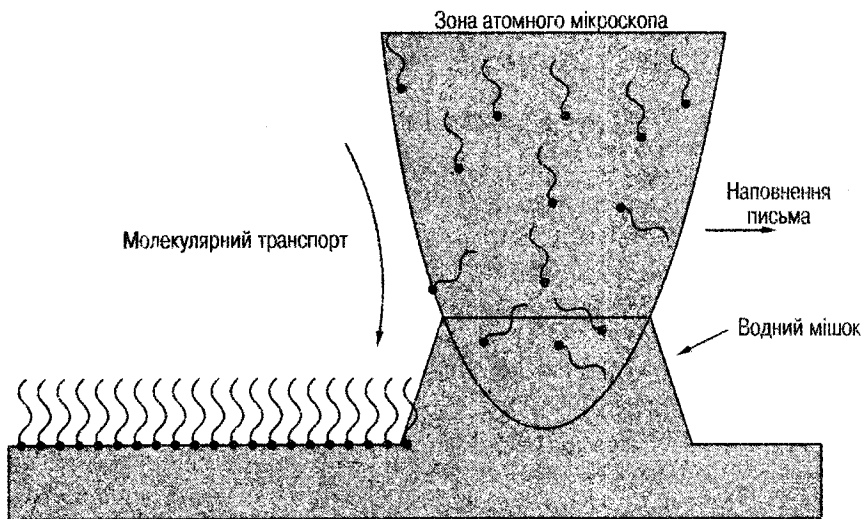


Рис. 7.6. Схематичне зображення процесу перової літографії; хвилясті лінії — це молекулярні «чорнила»

наведено на рис. 7.6. Нанесений на заготівлю матеріал зберігається на кінчику скануючого зонда, що переміщується поверхнею, залишаючи за собою малюнок.

Перевагами перової нанолітографії є:

- можливість використання в якості «наночорнил» майже будь-якого матеріалу, а писати можна практично на будь-якій поверхні;
- одержувати можна практично будь-яку структуру з довільною деталізацією або складністю, оскільки зондами атомного силового мікроскопа легко маніпулювати.

Даний факт робить перову нанолітографію найкращою технікою під час створення нових і складних структур невеликими партіями.

Недоліком процесу є мала продуктивність.

Літографія за допомогою наносфер використовується для одержання наноточок на різних підкладках з різних матеріалів [Ратнер, 2004].

Послідовність операцій полягає в нанесенні на підкладку наносфер матеріалу, що утворює на ній одношарове покриття. Крізь це покриття (проміжки між сферами) наноситься бажаний матеріал для утворення наноточок, у тому числі різних матеріалів для утворення багатошарових структур. Сфери, що слугують

фотошаблоном, після цього видаляються (рис. 7.7), залишаючи безліч ізольованих точок. Метод є груповим. Одночасно можливе виготовлення правильного великого масиву наноточок.

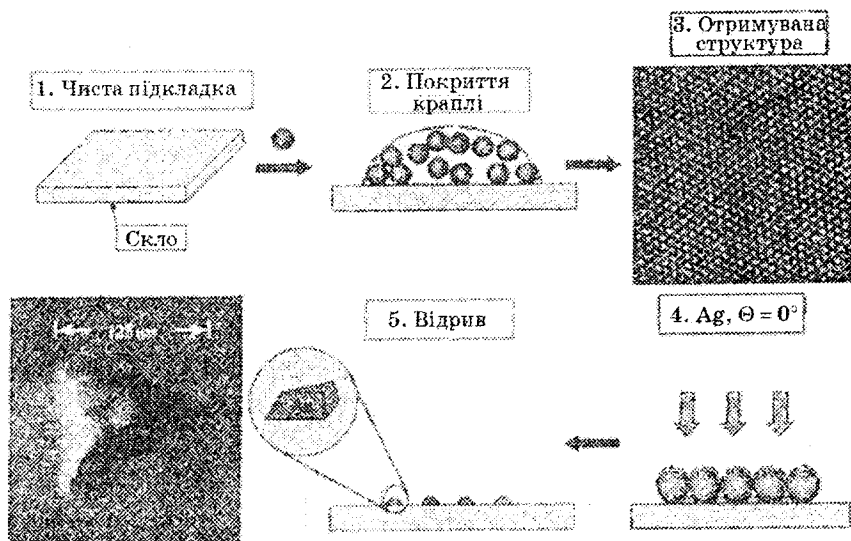


Рис. 7.7. Схема процесу літографії наносферами

Тунелююча скануюча мікроскопія

Фізичною основою TSM є тунелювання електронів через вакуум. Прикладена до металів електрична напруга призводить до різних енергетичних рівнів Фермі E_{F1} та E_{F2} . Це забезпечує вільні енергетичні стани в одному з металів (праворуч рис. 7.8) для тунелювання електронів з іншого металу (ліворуч рис. 7.8).

Виниклий при цьому тунельний струм приблизно описується за виразом

$$I = f(v) \exp(-\bar{\phi}^{1/2} S), \quad (7.1)$$

де $f(v)$ враховує зважену локальну щільність станів для металів; $\bar{\phi}$ — усереднене значення висоти бар'єра, eB; S — відстань між металами, Å.

Усереднену висоту бар'єра $\bar{\phi}$ та $f(v)$ можна визначити експериментально, вимірявши $d \ln I / dv$ та $d \ln I / dS$.

Тунелювання між атомом на поверхні, що відрізняється від навколишніх за станом, дозволяє робити локальну спектроскопію «колірного» атома за величиною тунельного внеску в струм.

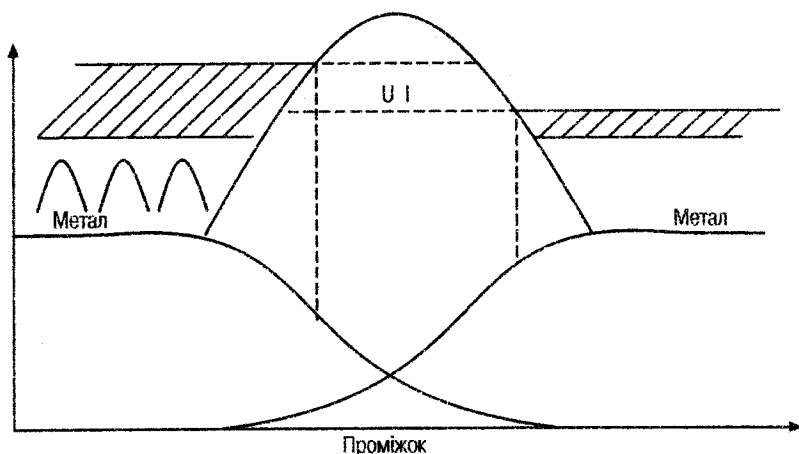


Рис. 7.8. Тунельний струм за різниці напруг між металами

Через експонентну залежність тунельної провідності від відстані між металами (рис. 7.8) забезпечується можливість досягнення високої чутливості відносних переміщень металів Z . У вакуумі провідність зменшується в 10 разів при збільшенні відстані на 1 Å.

Коли один з металів має форму вістря, струм протікає практично тільки між крайніми атомами вістря та поверхні, а в ідеальному випадку — між орбітальною атома на верхівці вістря та зразком. Це забезпечує малу площу (ширину) каналу протікання струму, а значить — поперечне розрізнення порядку атомних розмірів. Причому, через поруч розташований виступаючий атом, але віддалений усього на два атоми далі, протікає тунельний струм у мільйон разів менший. Тому для успіху тунельної мікроскопії надзвичайно важливий стан поверхні вістря.

Довгі та тонкі вістря або нитковидні кристали чутливі до вібрацій і змін температури. Для їхнього виготовлення застосовується травлення, випаровування в електричному полі. Електричні міжатомні сили, що діють між вістрями і зразком, не деформують округлене вістря та жорстко закріпленний зразок.

Виходячи з формули (7.1), за постійної локальної щільності станів $f(v)$ і середньої висоти бар'єра $\bar{\phi}$ можливі два режими сканування провідної поверхні:

- за постійного тунельного струму, підтримуваного на фіксованому рівні за рахунок зміни вертикального положення вістря залежно від напруги зворотного зв'язка $V_{з.з.}$. При цьому голка

буде перебувати на постійній відстані S від поверхні сканування;

- за постійного середнього положення вістря вздовж осі Z . Такі струмові зображення отримуються набагато швидше, ніж при $I_T = \text{const}$, але для визначення значень Z необхідний розрахунок $\ln I_T$.

Таким чином, залежність (7.1) тунельного струму від відстані визначає атомне розрізнення мікроскопа як вздовж осі Z , так і по осях X , Y . Але для практичного досягнення цих параметрів необхідно виключити теплові флуктуації довжини зразка та голки, а також вібрації на ангстремному рівні.

Голки-зонди ТСМ виготовляються з різних матеріалів і за допомогою різних методів: сколювання, електрохімічного травлення. Для металевих голок досить стабільні характеристики забезпечує електрохімічне травлення.

Автоелектронні емітери (голки) повинні мати високу температуру плавлення та низький питомий опір. Матеріалами для голок можуть слугувати наступні (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

Матеріали для голок

Матеріал	Плавлення, °С	Питомий електричний опір 10^{-6} Ом·см
Іридій (Ir)	2450	4,58
Молібден (Mo)	2620	5,17
Ніобій (Nb)	2500	15,24
Нікель (Ni)	1453	6,05
Платина (Pt)	1769	9,81
Родій (R)	1960	4,30
Рутеній (Ru)	2250	7,60
Вольфрам (W)	3410	4,91

Автоматичне електрохімічне травлення відбувається в краплі електроліту, у місці перетравлювання утвориться шийка. Коли радіус шийки досягає граничного значення, рівного r_0 , нижня частина дроту відривається під дією ваги, і процес травлення автоматично припиняється. Радіус закруглення вістря, що утворилося в момент відриву можна оцінити по формулі

$$r_0 = d \sqrt{\frac{DL}{4\sigma_{вр}}}, \quad (7.2)$$

де d — діаметр дроту; D — питома вага її матеріалу; L — довжина частини, що відірвалася; r_0 — граничний радіус шийки; $\sigma_{вр}$ — питома міцність матеріалу на розрив.

Наприклад, для вольфраму ($d = 0,1$ мм, $D = 1,89 \cdot 10^{-4}$ Н/мм³, $L = 10$ мм, $\sigma_{вр} = 4100$ Н/мм²) найменший радіус закруглення вістря $r_0 = 34,0$ нм = 340 Å.

Технологічний процес травлення, що забезпечує можливість одержання вістрь з радіусом закруглення до 10 Å, полягає в поетапному електрохімічному травленні вістрь з W в $2H$ — розчині KOH або $NaOH$ за напруги між електродами 12...15 В. При цьому на кожному етапі зменшується діаметр стравлюваної частини голки, що забезпечує одержання діаметра вістря в момент відриву нижньої частини голки $d = 0,01$ — $0,02$ мм (на кожному етапі стравлювана частина голки l_i зменшується шляхом підняття голки з електроліту $l_1 = 1$ мм, $l_2 = 0,8$ мм, $l_3 = 0,72$ мм, $l_4 = 0,68$ мм). Час травлення ($t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \approx (8 + 6 + 5 + 4)$ хв).

Маніпулятор грубих переміщень виконаний на біморфних елементах п'езокераміки. Одним з недоліків використання п'езокераміки є велика прикладена напруга (при 900 В переміщення досягає ~ 2 мкм). Біморфні пластини дозволяють істотно знизити напругу живлення та збільшити хід механізму переміщень.

Біморфні пластини виготовлялися шляхом склеювання п'езокерамічних пластин клеєм ВК-9 на епоксидній основі. Схему

склеювання залежно від поляризації пластин і їхнього переміщення показано на рис. 7.9.

Використана п'езокераміка типу ЦТС-НВ. Величини відхилень вільного кінця балки при консольному кріпленні та прогині центра балки у випадку двостороннього кріплення з гумовими прокладками наведено в табл. 7.2.

При використанні біморфних пластин залежність відхилення пластин від напруги нелінійна, можливе одержання

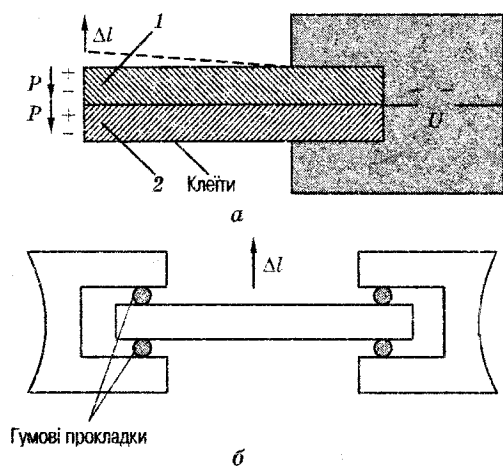


Рис. 7.9. Способи кріплення біморфних пластин: а — жорстке кріплення; б — кріплення з амортизацією

більших переміщень при менших керуючих напругах, ніж у випадку використання п'єзокерамічних монопластин.

Таблиця 7.2

Залежності зсуву від прикладеної напруги

Спосіб кріплення	Розміри плат, мм	Прикладена напруга, В	
		60	300
Консольне	20 × 2	0,042	0,266
	20 × 4	0,030	0,156
Двостороннє з гумовими прокладками	20 × 2	0,010	0,045
	20 × 4	0,007	0,028

Атомно-силова та магнітно-силова мікроскопія (АСМ)

Як і в ТСМ, в АСМ є різка залежність сили взаємодії молекул від відстані R між ними (ван-дер-ваальсові взаємодії) [Суздалев, 2006]:

$$F = \frac{C_1}{R^{13}} - \frac{C_2}{R^7}, \quad (7.3)$$

де C_1 і C_2 — константи. Перший член у рівнянні (7.3) відповідає короткодійним силам відштовхування. А другий — силам притягання. Одним із взаємодіючих тіл є зонд (голка 1 на плоскій пружині 2, що носять назву кантилевер), другим — досліджувана поверхня 3 (рис. 7.10).

Підведення зонда на необхідні відстані до поверхні та сканування на ній здійснюється так само, як і в ТСМ, за допомогою п'єзокерамічного XYZ транслятора 6, причому вертикальні переміщення зонда реєструються або за допомогою оптичної системи, за якої лазерний промінь відбивається від дзеркала 4 і потрапляє на фотодіод 5 (рис. 7.10, а), або за допомогою тунельного зонда 7,

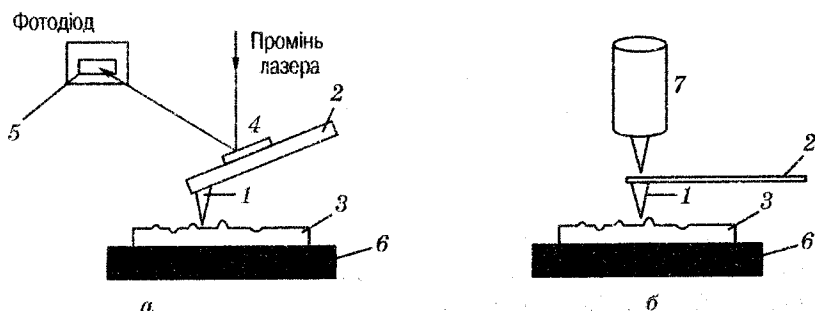


Рис. 7.10. Схема атомно-силового мікроскопа (позначення в тексті): а — контактне сканування; б — «постукування»

змонтованого над пружиною (рис. 7.10, б). Робота АСМ можлива у двох режимах.

1. Безконтактна взаємодія — сили притягання зонда до досліджуваної поверхні більші за сили відштовхування. За допомогою п'єзокристала кантилевер коливається із частотою, близькою до коливання пружини ν_r , і амплітудою 2 нм (відстань між голкою та поверхнею повинна бути більшою). У цьому випадку сила притягання визначається за виразом

$$\frac{dF(R)}{dR} = 2k \frac{\Delta\nu}{\nu_r}, \quad (7.4)$$

де $\Delta\nu = \nu - \nu_r$ — зміна частоти коливань, викликана притяганням зонда до поверхні; k — константа пружності пружини. Величина $\Delta\nu$ визначається за зміною амплітуди коливань у процесі сканування голки по поверхні зразка, зображення сили формується у вигляді залежності сили від XY-координат зонда.

2. Контактна взаємодія — на малих відстанях переважають сили відштовхування. У найпростішому випадку зонд діє як грамофонна голка і її коливання по вертикалі відображають рельєф поверхні. В іншому варіанті голка та пружина коливаються за досить великої частоти в декілька сотень герц із амплітудою 0,5—2,0 нм. Зменшення амплітуди коливань голки за рахунок взаємодії зонда із шорсткістю поверхні пропорційне до висоти її рельєфу.

Атомна силова мікроскопія (AFM або АСМ) використовує гостру голку, встановлену на кінчику кантилевера, яким сканують поверхню матеріалу на невеликій висоті, вимірюючи прогин кантилевера. Кантилевери виготовляють за допомогою фотолітографічних методів із кремнію, діоксиду кремнію та нітриду кремнію. Їхні типові розміри — 100 мкм у довжину та близько 1 мкм у товщину, а жорсткість — від 0,1 до 1,0 Н/м. Високої чутливості та розрізнення можна домогтися, працюючи в режимі квазиконтакту голки з поверхнею. При цьому вимірюють зміну амплітуди зсувів кінчика кантилевера, осцилюючого поблизу частоти резонансу, за легкого торкання поверхні зондом. Єдина складність полягає в тому, що якщо поверхня занадто тверда, торкання може зламати голку. Група з Rice University показала, що використання в якості матеріалу голки вуглецевих нанотрубок може стати рішенням даної проблеми. Нанотрубка прикріплювалася до голки звичайного кремнієвого кантилевера збоку за допомогою м'якого акрилового клею, як показано на рис. 7.11. Якщо під час удару нанотрубки

об поверхню виникає сила більша, ніж критична сила поздовжнього вигину, виникає нестійкість Ейлера; нанотрубка згинається, а не ламається та потім вертається у вихідний стан. Схильність нанотрубок до складання замість руйнування робить ушкодження кінчика малоімовірним. Нанотрубка, використовувана як зонд для АФМ, має ще одну корисну властивість: вона слугує в якості демпфера, що пом'якшує удар під час кожного торкання поверхні. Такий зонд може бути застосований і в контактних режимах вимірювання нормального та латерального компонента сил взаємодії з поверхнею. Завдяки малому поперечному перерізу та великому відношенню довжини до діаметра такого зонда, він може проникати в глибокі канавки на поверхні, які є недоступними для звичайних зондів. Електропровідні нанотрубки можуть використовуватися і як зонди для скануючої тунельної мікроскопії.

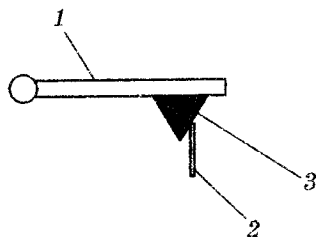


Рис. 7.11. Схема розміщення одношарової ННТ на кантилевері АСМ: 1 — кантилевер; 2 — ННТ; 3 — вістря

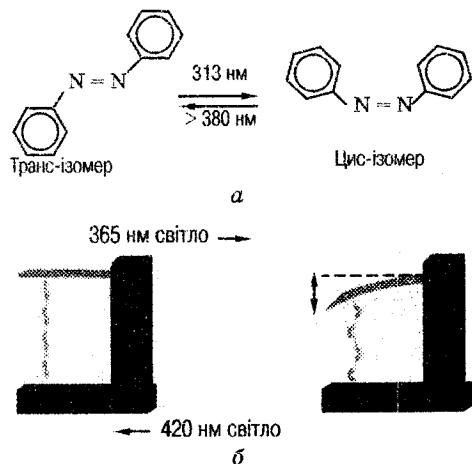


Рис. 7.12. Деформація азобензолу під дією світла: *а* — індукована ультрафіолетовим світлом цис-транс ізомеризація азобензолу; *б* — молекулярна машина, заснована на індукованих світлом ізомерних перетвореннях азобензольного полімеру, що скорочується під час переходу в цис-форму, викликаючи згинання кантилевера

Молекула азобензолу, яку зображено на рис. 7.12, *а*, під час опромінення світлом з довжиною хвилі 313 нм може змінити свою конфігурацію із транс-ізомерної на цис-ізомерну. Ізомери — це молекули, що складаються з однакових атомів і мають ту ж саму кількість зв'язків, але різну рівноважну конфігурацію. Опромінюючи цис-ізомер світлом з довжиною хвилі більш ніж 380 нм, можна повернути цис-форму в первісну транс-форму. Ці дві форми розрізняються оптичним спектром поглинання. Відмітимо, що цис-

ізомер коротший за транс-ізомер. Азобензол можна полімеризувати, і в полімерній формі він також може піддаватися транс-цис перетворенню під дією 365-нанометрового випромінювання. Коли це відбувається, довжина полімерного ланцюжка зменшується. Група з Мюнхенського Університету побудувала молекулярну машину, засновану на фотоізомеризації азобензольного полімеру. Вони прикріпили молекулу полімеру в транс-формі до кантилеверу в атомному силовому мікроскопі, як показано на рис. 7.12, б, а потім опромінили його світлом з довжиною хвилі 365 нм, змусивши полімер стиснутися та зігнути балку. Опромінення світлом з довжиною хвилі 420 нм повертає полімер у транс-форму, дозволяючи балці повернутися у вихідне положення. При почерговому опроміненні полімеру імпульсами світла 420 і 365 нм балка буде здійснювати коливання. Це — перша демонстрація штучної одномолекулярної машини, що перетворює енергію світла у фізичну роботу.

Магнітно-силовий мікроскоп (МСМ) використовує, крім вандер-ваальсових сил, магнітні дипольні сили. При віддаленні на 10—50 нм на зонд впливають практично лише магнітні сили.

У цьому випадку відхилення зонда від прямолінійного руху пов'язане саме з магнітною взаємодією (рис. 7.13).

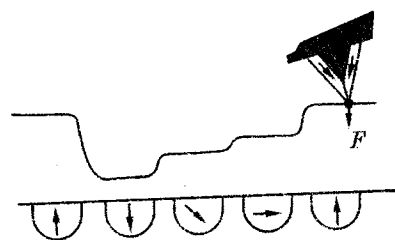


Рис. 7.13. Схема дії магнітно-силового мікроскопа.

Стрілки показують орієнтацію магнітних доменів на поверхні зразка

У силу малих розмірів голку МСМ можна апроксимувати магнітним диполем. Сила F , що діє на голку, визначається співвідношенням

$$F = m_0 \text{grad } H, \quad (7.5)$$

де m_0 — магнітний момент голки; H — напруженість магнітного поля.

Магнітний кластер на поверхні буде викривляти навколо себе магнітне поле, напруженість якого на відстані R від нього дорівнює

$$H(R) = \frac{3r(rm) - m}{R^3}, \quad (7.6)$$

де r — одиничний радіус-вектор уздовж обраного напрямку; m — магнітний момент кластера.

Таким чином, сила взаємодії між голкою МСМ і магнітним кластером дорівнює

$$F = \text{grad} \left[\frac{3(m_0)^2 - mm_0}{R^3} \right]. \quad (7.7)$$

Для дипольних моментів вздовж осі z сила взаємодії між голкою та кластером дорівнює

$$F_z = -\frac{6m_0 m}{z^4},$$

а величина градієнта силового поля

$$\frac{dF}{dz} = \frac{24m_0 m}{z^4}$$

Наприклад, для двох кластерів заліза діаметром 10 нм ($m_0 = m = 9 \cdot 10^{-29} \text{ А} \cdot \text{м}^2$), розташованих на відстані 10 нм, значення магнітної сили взаємодії становить $\sim 4,9 \cdot 10^{-11} \text{ Н}$, а градієнт сили — $\sim 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$. Такі величини й реєструє МСМ. Чутливість за магнітним потоком становить 10^{-4} Тл .

Схему механічної системи МСМ показано на рис. 7.14. Кантилевер розміщується над зразком, при цьому магнітна сила F , що діє на зразок, призводить до вигинання кантилевера та вертикального

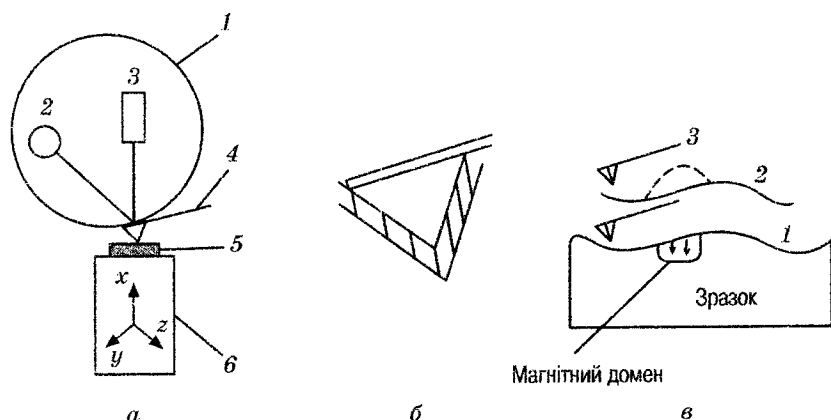


Рис. 7.14. Схема механічної системи МС (а), голка кантилевера з ферромагнітним покриттям (б), траєкторія руху мікрівістря (в): а — 1 — датчик малих переміщень; 2 — фотодетектор; 3 — лазер; 4 — кантилевер; 5 — зразок; 6 — п'єзосканер; в — 1 — траєкторія під час реєстрації профілю поверхні; 2 — траєкторія під час запису магнітного профілю; 3 — відхилення від обраної траєкторії в результаті взаємодії мікрівістря з магнітним доменом зразка

переміщення голки. Відповідно до закону Гука це переміщення визначається механічною жорсткістю кантилевера зі значеннями 0,1—10 Н/м. Згин кантилевера фіксується за допомогою датчика малих переміщень. Найпоширеніший оптичний датчик реєструє кутові переміщення світлового променя, відбитого від поверхні кантилевера, а змінене положення відбитого променя, що свідчить про згинання кантилевера, визначається за допомогою двосекційного фотодетектора за різницевою схемою. Результати вимірювань після комп'ютерної обробки являють тривимірне зображення поверхні.

В процесі сканування поверхні з частками, що перебувають на ній, необхідно відокремити геометричний фактор рельєфу від магнітного. Для цього під час сканування зонд проходить по тому ж самому місцю двічі. Перший раз він рухається по поверхні зразка в контакт з нею, при цьому запам'ятовується траєкторія його руху. Другий раз голка проходить по запам'ятованій траєкторії над тією ж ділянкою поверхні, не торкаючись до неї. Під час повторного руху на зонд діють уже не контактні сили, а далекодіючі. Відхилення зонда від заздалегідь обумовленої траєкторії буде визначатися магнітними властивостями поверхні (рис. 7.14, в).

МСМ застосовується для дослідження тонких плівок, нанокластерів, нанокомпозитів і наноструктур, магнітних носіїв інформації, використовується при оптимізації магнітного запису. Метод дозволяє побачити окремі магнітні області та домени з розмірами від декількох одиниць до декількох десятків нанометрів.

7.4. Біотехнології

Нанотехнологія дозволяє вивчати явища в галузі біології та медицини на клітинному та молекулярному рівні. В ХХІ столітті ці дослідження приведуть до нових біотехнологічних виробничих процесів, а також до принципових змін у методах медицини. Біологічні молекули та системи мають низку особливостей, що роблять їх надзвичайно придатними для нанотехнологічних застосувань. Наприклад, білки можуть утворювати тривимірні структури з точно визначеною формою, а молекули нуклеїнових кислот поєднуються в ансамблі за добре відомими правилами.

Одним з перспективних напрямків досліджень в області НТ є вивчення будови та механізмів роботи живих клітин, розміри яких лежать між ~ 10 мкм (типові розміри великих живих клітин) і ~ 5 нм (білкові молекули) [Уайтсайдс, 2002]. Успіхи в дослідженні

поведінки клітин дозволяють вести роботи зі створення штучних біологічних тканин, які являють собою конструкції, утворені клітинами та молекулами, що входять до їх складу. Такі конструкції призначені для компенсації втрачених організмом функцій.

В 1998 р. два перших продукти тканинної інженерії, що являють собою замітники тканини шкіри, пройшли атестацію Управління США з харчових і лікарських препаратів і надійшли в продаж. Крім того, на різних стадіях розробки та клінічної перевірки перебувають численні зразки тканин інших типів.

Процес лазерно-спрямованого переносу окремих клітин [Уайтсайдс, 2002] спинного мозку вздовж порожнього оптичного волокна (діаметр клітки 9 мкм) дозволяє осадити клітини на поверхні, створивши з них необхідну конфігурацію, тобто здійснити нарощування тканини. Процес «лазерно-спрямованого прямого запису» забезпечує рух нано- та мікрочастинок (живі клітини, бактерії та частки колоїдного золота розміром ~ 100 нм) і осадження їх у довільних точках тривимірної структури.

Одним з напрямків досліджень структур, що самоскладаються, є їхнє використання для відновлення частин людського організму, під час їхньої втрати або патологій.

Прикладами біоструктур можуть бути штучна кістка, штучне серце, печінка й т. ін.

Наприклад, молекули кістки можуть бути спроектовані таким чином, щоб вони створили певну форму, мали достатню міцність, були сумісними з імунною системою людини.

Ефективність застосування ліків може бути істотно підвищена шляхом їхньої доставки безпосередньо до того органа, для якого вони призначені. Наприклад, в якості ліків можуть використовуватися малі молекули ДНК, які поєднуються в клітині із чужорідними патогенними ДНК. Щоб зробити ці ДНК-ліки доступними в клітині, потрібно провести їх крізь мембрану, покривши ДНК холестерином, що легко проходить через масляну клітинну мембрану.

У фотодинамічній терапії частка міститься в тілі (людини) і висвітлюється світлом ззовні від лампочки або лазера. Світло поглинається, нагріваючи точку та її околицю або використовується для виробництва молекул з більшими енергіями, які можуть вступати в реакції з більшістю розташованих поруч органічних молекул, включаючи пухлини, і в такий спосіб знищувати їх.

Молекулярні мотори були відкриті при вивченні АТФ (аденозинтрифосфата) натрію/калію, відповідального за виробіток і перетворення енергії, що втримується в АТФ, і діє як мотор:

центральний елемент якого обертається навколо осі, а зовнішня частина нанокластера по-різному взаємодіє з хімічними групами на периферії. Молекулярні мотори також відповідають за перенос сигналу в людському вусі.

У більш віддаленій перспективі передбачається можливим створення нейроелектричних інтерфейсів, що дозволяють з'єднувати комп'ютери з нервовою системою [Ратнер, 2004].

Можна також створювати штучні білки, розташовуючи 20 природних амінокислот у потрібні довгі ланцюжки. Білкова інженерія — це наука про створення штучних білків для наступного їхнього використання в медицині та інших сферах, наприклад, в синтезі продуктів. Модифікація ДНК виконується з використанням низки хімічних реакцій, що дозволяє будувати білкові фабрики для одержання практично будь-якого обраного протеїну.

Роботи в галузі створення синтетичних полімерних матеріалів відкривають нові можливості в лікуванні багатьох хвороб, висувають нові гіпотези зародження життя на Землі [Нилсон, 2009].

Генетичною основою життя є нуклеїнові кислоти ДНК і РНК, а будівельним матеріалом — кодовані ними білки. Інформація, закладена в молекулі ДНК, «переписується» на мову РНК-нуклеотидів, а потім переводиться на мову амінокислот, що складають білки. У цьому полягає суть так званої догми молекулярної біології.

Учені прагнуть з'ясувати, який мінімальний набір компонентів необхідний для виникнення життя, його підтримки, тобто яка комбінація молекул буде здатна до самоорганізації, метаболізму (за наявності джерела енергії), росту, відтворення та еволюції. В процесі пошуків підходів до лікування захворювань шляхом впливу на специфічні гени блокування або посилення їхньої експресії (тобто виробітку відповідних білків), була синтезована пептид-нуклеїнова кислота (ПНК). Така структура є сховищем генетичної інформації, подібно ДНК і РНК, але має білковоподібний ост, набагато більш простий, з повторюваних одиниць, і більш міцний, ніж цукрофосфатний ост молекули ДНК. До кожної одиниці приєднувалася звичайна азотиста основа (А, Т, G або С) або її модифікований варіант. Відстань між основами вздовж молекули ПНК близька до такої для ДНК і РНК, тому короткі її сегменти (ПНК-олігомери) можуть утворювати стабільні дуплекси з одноланцюжковими сегментами ДНК або РНК або з іншими сегментами ПНК.

ПНК-олігомери можуть пригамовувати або ініціювати транскрипцію, реплікацію та репарацію генів, зв'язуючись із ДНК

різними способами, тобто ПНК може одночасно слугувати сховищем для генетичної інформації штучної клітини та виконувати функції катализатора подібно до багатьох білків природних клітин. Саме така подвійність молекули ПНК поряд з іншими її властивостями привертає увагу біологів, що займаються створенням штучного життя.

Багато хто з біологів думає, що найперші форми життя на Землі використовували в якості носія генетичної інформації ПНК або якісь інші, міцні та стабільні молекули на відміну від хімічно вразливих РНК, котрі мають однією зі складових частин остова молекулу цукор-рибози, що не могла існувати досить довго, щоб відігравати ключову роль на початкових етапах хімічної еволюції.

Багато досліджуваних медициною біологічних об'єктів менші за мікромметр. Наприклад, пептиди мають розмір 1 нм, білки — від 10 до 100 нм, ДНК людської клітини в довжину досягає 1,5 м, але в «упакованому» стані її поперечник становить лише 100 нм. Приблизно такі ж розміри мають антитіла, віруси, органели, а клітини та бактерії належать уже до мікросвіту (рис. 7.15).

Рання діагностика пухлин можлива з використанням магнітних наночастинок, що містять кристалічне ядро з оксиду заліза [Ткачук, 2009]. Подібна діагностика гарна тим, що в організмі немає магнітних часток, а присутнє залізо, яке входить до складу гемоглобіну та перебуває у вигляді окремих іонів, котрі практично не мають магнітних властивостей. При введенні в організм суспензії з магнітних наночастинок, кожна з яких, будучи стороннім предметом, захоплюється макрофагом (спеціалізовані захисні клітини, які поглинають бактерії та інші чужорідні речовини), що у результаті стає «міченим». Оскільки переварити неорганічну частку він не може, то продовжує рухатися разом з нею далі. Якщо

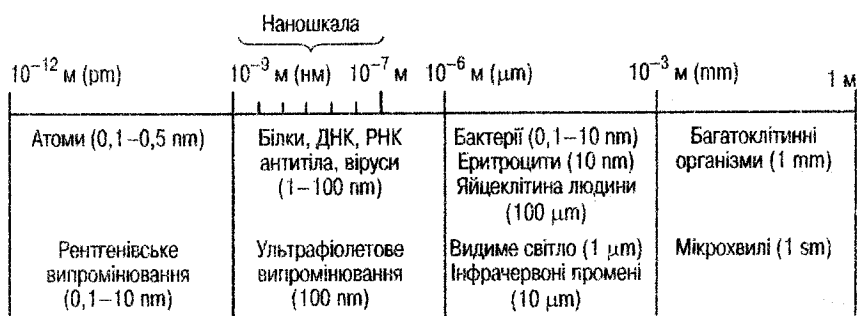


Рис. 7.15. Шкала розмірів біологічних об'єктів

десь є пухлина або протікає запальний процес, мікрофаги спрямовуються туди, щоб боротися з інфекціями, вірусами, бактеріями, і скопичуються там протягом певного часу. Використовуючи магнітно-резонансний томограф, можна легко виявити області підвищеної концентрації магнітних наночасток, і в такий спосіб визначити осередки запалення на самій ранній стадії їхнього виникнення.

На цей час навчилися виготовляти «суспензії» із квантових точок певного розміру та маючих колір, якого немає в організмі (наприклад, зеленого). Їх можна ввести в судини та після їхнього розподілу по кровоносній системі буде видно мережу кровотоку. Під час ушкодження навіть малих судин це буде помітно за невеликими розривами в зеленій сітці судин. Такий сигнал дуже виразний, оскільки в тканинах людського організму зеленого кольору немає.

Уже розшифрований геном людини, що складається з 30 тисяч генів. Це приблизно 3 млрд нуклеотидів, що грають роль своєрідних літер в процесі запису спадкової інформації. Також відомо, у якій частині ДНК записаний кожен ген. Більшість хвороб провокується «збоями», які викликані мутаціями в генах, багато з яких має спадковий характер, що викликає схильність до яких-небудь захворювань.

У цей час «збої» виявляються за допомогою мікрочипів, на кожному квадратному міліметрі якого нанесено приблизно 100 квантових точок, до кожної з яких пришитий свій зонд, здатний специфічно зв'язуватися з певним фрагментом ДНК і в такий спосіб тестувати його.

Зараз уже створені мікрочипи, що містять десятки тисяч осередків з індикацією на певний фрагмент людської ДНК. Але навіть за такої інтеграції для повної генетичної діагностики людини будуть потрібні мільйони спеціалізованих мікрочипів. Якщо освоїти технологію виготовлення наночипів з розмірами комірки близько 100 нм і менше, можна буде збільшити інформативність у мільйони разів. Наночипова технологія дозволить зробити діагностику людини за всіма генами та мутаціями при розмірі чипа всього 1 см² і використовуючи лише одну краплю крові.

Створення спеціалізованих біосенсорів дозволить проводити спостереження клітинного метаболізму різних хімічних елементів, оцінювати ефективність дії лікувальних препаратів, протікання хвороби, причинно-наслідкові зв'язки різних процесів в організмі.

7.5. Нанобіологічні структури

Наноактюатор (складова частина МЕМС) — це пристрій, що перетворює енергію в керований рух. Наноактюатори мають розміри від декількох квадратних нанометрів до декількох квадратних мікрометрів. Потенційний діапазон застосування наноактюаторів надзвичайно широкий і різний. Вони можуть використовуватися в робототехніці, у керуючих пристроях, у космічній галузі, у біомедицині, дозиметрії, у вимірювальних приладах, у технології розваг, автомобілебудуванні та у домашньому господарстві.

Найбільший інтерес у застосуванні наноактюаторів (наномоторів) являє використання їх у наноробототехніці. Створення нанороботів є наступним кроком для нанотехнологій. Вони покликані стати як цільовими об'єктами виробництва так і обладнанням для виробництва наноконструкцій [Шарковский, 2006].

Однією з перешкод, що обмежують розміри МЕМС-пристроїв, є те, що дотепер немає працездатного мініатюрного мотора з розмірами близько 500—100 нанометрів. У цей час існують і активно розвиваються кілька проектів подібних нанодвигунів.

Так дослідники з ССС, США, використовуючи методи молекулярної динаміки, створили симуляційну модель пуску наномотора з вуглецю, що активується двома лазерами. Як вони стверджують, це перша подібна модель із джерелами когерентного випромінювання. Наномотор складається із двох концентричних графітових циліндрів (на зразок двох нанотрубок, одна з яких розташована всередині іншої) — ротора та статора. При цьому до ротора діаметрально протилежно приєднані два електричних заряди. Рух здійснюється завдяки змінному випромінюванню двох лазерів (рис. Д8.57).

Під час симуляційного пуску наномотора видно маятниковоподібні обертові рухи ротора (доступна анімація пуску). Час виходу на синхронну швидкість залежить від розміру наномотора, частоти когерентного випромінювання та від величини й розташування зарядів. Можлива модель із використанням одного лазера, але, як показали розрахунки, дволазерна система більш стабільна та швидше виходить на синхронну швидкість — усього за 40 пікосекунд.

У свою чергу дослідники з University of Wisconsin провели ряд експериментів з обертання скляних стрижнів діаметром 250 нм та довжиною 2—5 мкм за допомогою світлових пучків. На основі цих експериментів була розроблена математична модель

поляризаційного електростатичного нанодвигуна, яким керує лазерний промінь.

Дослідники з University of California, Berkeley, на чолі з Алексом Зеттлом сконструювали діючий електростатичний наномотор розміром в 500 нм (рис. Д8.58).

Ротор наномотора виконаний із золота та закріплений на багатошаровій нанотрубці. Підшипники утворили дві нанотрубки, вставлені менша в більшу. Товщина ротора — 5—10 нм. Два заряджених статори, які теж виготовлені із золота, розташовані на кремнієвій поверхні. Однією з несподіваних складностей, що встали перед дослідниками, була неможливість точно виміряти швидкість обертання наномотора. За даними електронної мікроскопії, швидкість обертання наномотора не менша ніж 30 обертів у секунду. Дослідники вважають, що частоту обертання наномотора можна підвищити, збільшивши частоту напруги, поданої на електроди статора. Золотий ротор і електроди статора були нанесені за допомогою електронно-променевої літографії. Далі був видалений шар кремнію під ротором — і наномотор був сконструйований. Коли подавалася постійна напруга в 50 В на електроди, ротор відхилився на 20 градусів, коли подавалася змінна напруга, ротор робив маятниковоподібні рухи, працюючи як осцилятор. Цікавим феноменом був рух мотора якийсь час після того, як напруга була знята.

До використання подібних «неорганічних» моторів у мікро- та наносистемах ще далеко — їх складно виготовити, а інтегрувати в готовий МЕМС-пристрій ще складніше. Сьогодні багато дослідників наполягають на тому, що біологічні мотори зіграють не останню роль у якості актюаторів у МЕМС-пристроях. Тим більше, що можна налагодити їхнє масове виробництво за методами генної інженерії та біотехнологій уже зараз. Та й технічні характеристики (співвідношення розміру, маси, генерованого механічного моменту та споживаної енергії) біологічних моторів досить непогані. Деякі дослідники зацікавлені у використанні бактеріальних джгутикових моторів у якості актюаторів для наноробототехніки.

Цікаве також і те, що різні типи біологічних моторів відповідають деяким макроскопічним машинам за принципом дії. Майкл Маєр, професор хіміко-біологічного відділення з Мічиганського університету, після вивчення молекули кінезину сказав: «Ці штуки — справжні машини! Було б чудово штучно побудувати одну з них».

Бізим АТФаза та деякі джгутикові мотори, наприклад, працюють аналогічно до звичайного електродвигуна: ротор обертається

всередині нерухомого статора. Молекула кінезину, переміщуючись уздовж мікротрубок цитоскелету, нагадує лінійний двигун. А актуатор бактеріофага ϕ 29, що викидає віральну ДНК із капсули усередину клітини-хазяїна, працює за принципом двигуна внутрішнього згоряння з декількома робочими циліндрами.

Ензим АТФ-синтаза призначений для синтезу або гідролізу молекул АТФ, а також для переносу протонів (H^+) через мембрану клітини, чим забезпечує стабільний внутрішньоклітинний рН цитоплазми. Вчені встановили, що в процесі гідролізу АТФ одна із частин ензиму робить обертовий рух. Тоді в дослідників-наовтехнологів і виник інтерес до цього незвичайного ензиму.

АТФаза складається із двох окремих частин: F_0 , гідрофобної частини, пов'язаної з мембраною, відповідальної за транспорт протонів, і F_1 , гідрофільної частини, відповідальної за синтез і гідроліз АТФ (рис. Д8.59).

По мірі того як протони протікають через F_0 частину ензиму, γ -субодиниця частини F_1 -АТФази обертається за годинниковою стрілкою та відбувається синтез АТФ. Гідроліз АТФ відбувається при обертанні γ -субодиниці проти годинникової стрілки; при цьому напрямком протікання протонів змінюється на зворотній. Субодиниці a , b , і c частини F_0 -АТФази формують канал переносу протонів через клітинну мембрану. Місця каталізу та приєднання нуклеотидів були виявлені дослідниками на трьох a та трьох b субодиницях частини F_1 -АТФази. γ -субодиниця розташована в центрі гексамеру $\alpha_3\beta_3$ і обертається під час синтезу або гідролізу АТФ.

Найдивніше полягає в тому, що АТФаза являє собою повну аналогію макроскопічних моторів, зроблених людиною, які теж складаються з ротора та статора.

Група дослідників з Корнелльського університету на чолі з Карло Монтеманьйо спробувала інтегрувати цей природний наномотор у НЕМС. Дослідникам вдалося виміряти радіальне відхилення мікросфери при обертанні субодиниці, коли вони приєднали флуоресцентну мікросферу діаметром 1 мкм до γ -субодиниці АТФази (рис. Д8.60).

При додаванні до набору наномоторів, що вийшли, 2 мМ Na_2ATP та за присутності в розчині 4 мМ $MgCl_2$ диференціальним інтерферометром спостерігалось обертання мікросфери, що становить 9,5—10,5 Гц, або 3—4 об/сек. Причому обертання являло собою дискретні зміни кута, утвореного γ -субодиницею та $\alpha_3\beta_3$ -комплексом, щораз на 120° .

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення інженерних властивостей мотора та його продуктивності. Це необхідно для подальшої розробки функціонуючих наномеханічних пристроїв, що приводяться в рух F_1 -АТФазою. Потрібно, наприклад, визначити залежність продуктивності мотора як узагальнену функцію від тепловіддачі, виходу протонів, рН, завантаження ензиму молекулами АТФ. Більш того, необхідно вивчити взаємодію між субодиницями $\alpha_3\beta_3\gamma$, щоб у майбутньому за допомогою методів протеїнової інженерії поліпшити продуктивність мотора, якщо це буде можливо.

АТФсинтаза є свого роду рекордсменом серед молекулярних моторів своєї «вагової категорії». За ефективністю роботи та силою, що розвивається нею, вона істотно перевершує всі відомі в природі молекулярні мотори. Так, наприклад, молекула АТФсинтази приблизно в 10 разів сильніша за актоміозиновий комплекс — молекулярну машину, що спеціалізується в клітинах м'язів і різних органів на «професійному» виконанні механічної роботи. Таким чином, за сотні мільйонів років до того, як з'явилася людина, що винайшла колесо, переваги обертального характеру руху були успішно реалізовані Природою на молекулярному рівні.

Уже існують перші проекти інтеграції моторів на основі АТФази в майбутню наноробототехніку. Доктор Костянтин Мавродис із Рутгерського університету запропонував «блокову схему» одного з найпростіших нанороботів, що використовує саме такий мотор (рис. Д8.61). Тіло наноробота складається з нанотрубки, маніпулятори виконані у вигляді складних пептидних ланцюгів. Пропелер (що, правда, за останніми даними математичного моделювання, пропелерні системи актуації в нано- та мікророзмірних в'язких середовищах неефективні), що забезпечує пересування у в'язких середовищах, розташований на АТФазі. Як стверджує автор, подібні гібридні пристрої можуть з'явитися вже через 10 років. Правда, Костянтин не акцентує уваги на системах керування такими пристроями, що саме по собі являє більш складне завдання, ніж приведення його в рух.

Інший не менш відомий біологічний мотор, що теж буде корисний для нанотехнологів, — молекула білка кінезину. Це представник іншого класу лінійних моторів. Серед механохімічних перетворювачів енергії, розповсюджених у живій природі, вони відіграють важливу роль. Ці білкові машини рухаються вздовж полімерних ниток, використовуючи в якості «палива» молекули

АТФ. До таких моторів належать білки актоміозинового комплексу, що входить до складу скорочувального апарату м'язів. Рух мікрорсорсинок (джгутиків та війок бактерій і найпростіших) визначається взаємодією іншої пари моторних білків — динеїну та тубуліну. Зсув головок динеїну відносно тубулінових мікротрубочок білків забезпечує хвилеподібні рухи мікрорсорсинок. Серед великої кількості моторних білків міозин кістякових м'язів і кінезин із клітин мозку є найбільш вивченими молекулярними моторами. Незважаючи на те, що функції міозину та кінезину в клітині відрізняються, вони на диво схожі за своєю будовою та механізмами дії.

Разом з мікротрубками цитоскелету молекула кінезину виконує транспорт речовин усередині клітини та переміщення везикул. Якщо провести аналогію з макросвітом, то мікротрубки відіграють роль рейок, якими переміщуються молекули білків кінезину (вагони), несучи на собі корисний вантаж. Один кінець цієї молекули прикріплюється до везикули, яку необхідно транспортувати, а інший — до мікротрубки, що спрямовує рух. Молекули кінезину виконують роботу практично в усіх рослинах і тваринах (рис. 7.16).

Молекула кінезину являє собою димер, утворений двома однаковими поліпептидними ланцюгами. Подібно до молекули міозину, з однієї сторони кожного поліпептидного ланцюга кінезину формується глобулярна головка, з'єднана з порівняно довгим хвостом. Лінійні розміри голівки порівняно невеликі, вони становлять $7,5 \times 4,5 \times 4,5$ нм. Довжина молекули — 50 нанометрів. Хвости двох мономерних ланцюгів сплетені разом, а нахилені в різні сторони голівки утворюють своєрідну рогатину, що безпосередньо взаємодіє із глобулярними мономерами мікротрубочки, вздовж якої переміщується кінезин.

Цікаво те, що молекула «крокує» вздовж мікротрубки (рис. Д8.62), здійснюючи 8-нанометрові кроки. На рисунку кінезиновий комплекс переміщує органелу меланосому (відповідальну за синтез меланіну) вздовж

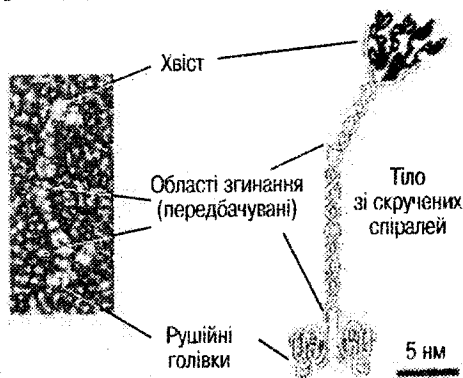


Рис. 7.16. Будова молекули кінезину

мікротрубки. Для того, щоб зробити такий крок, молекула використовує в якості палива 1 молекулу АТФ. При цьому сила, що розвивається однією молекулою кінезину, становить величину 6 пН. Якби таку потужність в розрахунку на одиницю маси мали автомобільні мотори, то вони могли б легко розганяти машини до швидкостей, що істотно перевищують швидкість звуку. Коефіцієнт корисної дії кінезинового мотора також великий — приблизно 50 %.

У процесі «ходьби» молекула кінезину може розщепити за одну секунду до 100 молекул АТФ, перемістившись на 800 нанометрів. Працюючи в якості індивідуального молекулярного візника, кінезин може здійснювати переміщення на дуже великі відстані (до 1 мм).

Вчені з інституту ім. Макса Планка спробували «приручити» кінезин поза клітиною. Для цього вони вкрили молекулами кінезину гладку скляну поверхню, створивши щось на зразок килима, ворсинки якого являли собою молекули кінезину. Потім дослідники розмістили на цій поверхні низку мікротрубок і мікросфер. Дослідники додали до середовища розчин АТФ — і вийшов величезний «трубковий» конвеєр. Якщо в клітині кінезин крокує вздовж мікротрубки сам, то в штучній системі молекула була жорстко закріплена, і вільні кінці молекул «крокували» по мікротрубках, пересуваючи їх. Рухи мікротрубок можна побачити за допомогою оптичного мікроскопа (рис. Д8.63).

Надалі команда планує створити мікрочипи з убудованими конвеєрами, що працюють у різних напрямках. Це, звичайно, буде великим плюсом для майбутніх систем наноскладання, тому що НЕМС-конвеєри поки зробити досить складно. Напевно такі транспортні системи будуть корисними й у лабораторії-на-чипі.

Як ми вже бачили, біологічні системи ще раніше за людину використовували обертовий рух у молекулярних машинах. Ще один варіант наномотора — віральний мотор на основі РНК-гексамера. РНК-гексамер — це комплекс, що складається із шести окремих РНК-мономерів.

Вірус-бактеріофаг phi29 використовує гексамер молекул РНК для викиду молекули ДНК із капсули вірусу (рис. Д8.64). При цьому сам процес роботи мотора схожий на роботу двигуна внутрішнього згоряння автомобіля. Роль камери згоряння грає портал — утворення всередині капсули вірусу, зайняте молекулами РНК і ротором. Мономери молекули РНК, подібно до поршнів, по черзі

штовхають центральний п'ятисторонній ротор, змушуючи його обертатися. Кожний РНК-мономер штовхає ротор усього на 12° , споживаючи одну молекулу АТФ. Таким чином, за один цикл портал повертається на 72° , витративши 6 молекул (рис. Д8.65).

У центрі ротора перебуває молекула ДНК. По мірі того, як ротор обертається, молекула переміщується з капсули вірусу в зовнішній простір.

Дослідники ще не змогли штучно відтворити з молекул РНК основу мотора. Поки вони зібрали «кільця», «трикутники» та «стрижні». Вони вважають, що ці структури можна інтегрувати з нанотранзисторами, нанопровідниками, нанотрубками, біосенсорами та іншими вже існуючими наноструктурами, щоб одержати складні НЕМС-системи.

Дайтер Молл, дослідник із групи Гу, говорить, що «самоскладання молекул РНК дозволить значно зменшити вартість майбутніх РНК-НЕМС».

Бактерія *Escherichia Coli* (*E. Coli*) — мрія нанотехнологів. Це майже готова «база» для майбутніх нанобіороботів. Щоб плавати, вона за допомогою спеціальних біологічних електромоторів обертає свої джгутики. Коли джгутики починають синхронно обертатися проти годинникової стрілки, вони сплітаються в єдиний пучок, що утворює своєрідний пропелер. Обертання пропелера створює силу, що змушує бактерію рухатися майже вздовж прямої лінії. Після того як напрямком обертання джгутиків змінюється на протилежний, пучок розплітається та бактерія зупиняється, замість поступального руху вона починає хаотично обертатися, її орієнтація змінюється.

Як і протонні АТФсинтази, електромотори бактерій є пристроями, що у якості джерела енергії використовують різницю протонних потенціалів на цитоплазматичній мембрані. Принципи роботи АТФсинтази та бактеріального мотора однакові, хоча самі ці конструкції відрізняються за своїми розмірами та будовою (рис. Д8.66, Д8.67). Можна із упевненістю сказати, що бактеріальний мотор — аналог машини постійного струму, створеної людиною.

Електромотори бактерій працюють дуже ефективно. Бактерії плавають із середньою швидкістю близько 25 мкм/с, але деякі види можуть рухатися поступально зі швидкістю більше 100 мкм/с. Це означає, що за одну секунду бактерія переміщується на відстань, що у десять або більше разів перевищує її власну довжину.

Цікаво провести аналогію з рухом систем макроскопічних розмірів. Наприклад, якби плавці долали за одну секунду відстань, що на порядок перевищує їхній власний зріст, то стометрову доріжку плавального басейну вони б пропливали приблизно за 5 с. Звичайно електромотор бактерій обертається зі швидкістю, що сягає 50—100 обертів на секунду, однак у деяких видів бактерій швидкість обертання перевищує 1000 обертів на секунду. Електромотори, які можуть так швидко обертати джгутики бактерій, дуже економічні — вони споживають не більше 1% енергетичних ресурсів бактеріальної клітини.

Роберт Фрайтас і Адріано Кавальканти, одні із провідних світових учених в області наномедицини, неодноразово заявляли, що саме подібні джгутикові мотори будуть найбільш ефективними в нанороботехніці.

Для побудови перших примітивних наносистем достатньо і цих готових «цеглинок», які впродовж мільйонів років ефективно працюють у природі. Але, як тільки можна буде конструювати довільні структури з алмазоїду з атомарною точністю, для багатьох нанопристроїв такі мотори будуть непридатними.

В усіх розглянутих вище біологічних моторів є низка недоліків. Найважливіший недолік — малий ступінь керованості. Тобто, якщо ви захочете використовувати той же АТФазний мотор для керування наноманіпулятором, задати переміщення ротора в 10—20° буде практично неможливо, оскільки дискретність роботи мотора — 120°. Звичайно, можна скористатися редукторами та іншими перетворювачами руху, але це ускладнить конструкцію та збільшить розмір пристрою. Також один з недоліків біомоторів — умова роботи в рідинному середовищі, що істотно обмежує їхнє коло застосування.

Як показують попередні оцінки, механічні системи в остаточному підсумку зможуть забезпечити більш високі швидкості роботи та більшу ефективність керування нанороботом, ніж системи біологічні. Однак важливою перевагою останніх є те, що найчастіше їхні функціональні компоненти можна частково або повністю брати із уже наявних природних живих систем, тим самим істотно скорочуючи час розробки конкретної технології.

Але все-таки всі перераховані вище мотори якнайкраще підходять за характеристиками для сучасних досліджень в галузі нанотехнологій та нановиробництва. Так що протягом наступних 10—15 років для них не передбачається альтернативи.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які приставки до основної одиниці використовуються для позначень кратних одиниць: 10^{-9} , 10^{-12} , ..., 10^{-24} ?
2. Які ефекти починають діяти при зменшенні розмірів часток до $100 \dots 1,0$ нм?
3. Які переваги мають внутрішньоклітинні біотехнології в порівнянні із промисловими технологіями?
4. Визначити завдання нанонауки, нанотехнології, наноінженерії.
5. Які види наноімпринтингу можуть використовуватися для виробництва наноелектронних структур?
6. За допомогою яких методів виходять еталонні форми для наноімпринтингу?
7. Чому в процесі одержання літографічних масок лінзові оптичні системи замінюють на дзеркальні?
8. Як здійснюється складання нанопристроїв?
9. Описати принципи самоскладання, експонентного самоскладання.
10. Які розроблені основні методи досліджень нанооб'єктів і наноструктур?
11. Описати принцип дії TSM, AСM.
12. Яку інформацію можна одержати за допомогою спектральних методів?
13. Які характеристики зразків можна одержати за допомогою TSM?
14. Які перелективи використання НТ у медицині?
15. Освітити концепцію «лабораторія на чипі».
16. Описати досягнення у вивченні ДНК, РНК, ПНК.
17. Нанооб'єкти: наноточки, нанопровідники — описати властивості.
18. Нанобіомотори.

ВИСНОВКИ

Мікросистемна техніка у світі досягла досить високого рівня, а саме:

- ряд фірм розробили досконалі та повні комплекти програм для автоматизованого проектування та моделювання широкої номенклатури МЕМС-пристроїв (SPICE, Coventor Ware, Tanner Pro);
- створені механічні, оптомеханічні, акустичні, рідинні елементи МЕМС, які можна обирати подібно до елементної бази електронних пристроїв разом із технологією їхнього виготовлення;
- відпрацьовані різні види поверхневої та об'ємної технології, що дозволяють одержувати 3D-структури;
- відпрацьовані технологічні процеси корпусування структур зі зрощуванням частин на атомно-молекулярному рівні та ін.;
- освоєне масове виробництво ряду виробів, що довели високу техніко-економічну ефективність (медичні датчики тиску, акселерометри, термо- та п'єзо-струминні друкуючі головки, мікродзеркальні пристрої);
- створені численні МЕМС-сенсори;
- розроблене спеціалізоване технологічне обладнання для виробництва МЕМС;
- швидкими темпами МЕМС проникають у різні сфери техніки, особливо у військову та мікроробототехніку;
- мікроманіпулятори використовуються в якості інструментів дослідження мікро- та наноструктур.

Напрямок нанотехнологій є глобальним у ряді областей використання результатів:

- кардинальна зміна матеріалознавства, що дозволяє створювати матеріали з унікальними властивостями, інтелектуальні матеріали для різних областей застосування (ВНТ, графен, графан, фулерени, сенсори – металеві квадрати, фотонні кристали, магнітні рідини, мікропористі кераміки, ДНК-структури та багато інших);
- дія в діапазоні нанорозмірів квантовомеханічних принципів: розмірна, зарядна, енергетична дискретизація, нерівномірність розподілу домішок у напівпровідниках, тунельний ефект, хвильовий зв'язок та передача, зростання ролі гетерогенних процесів, синергетична зміна властивостей наноструктур та ін.;

- взаємопроникнення властивостей живої та неживої природи, зближення фундаментальних наук у вивченні нанооб'єктів та структур (фізики, хімії, біології, математики);
- доступність нанотехнологій для досліджень, розробки та виробництва невеликими колективами та навіть окремими особистостями, що вимагає створення контролю за роботами з метою недопущення використання НТ для створення нових видів зброї, нанесення шкоди біосфері, екології, недопущення тероризму, фатальних помилок при створенні нових нанооб'єктів, виходу процесів з-під контролю.

Першими рукотворними нанооб'єктами, що знайшли промислове застосування, є наноматеріали та в, першу чергу, у вигляді добавок до традиційних матеріалів для поліпшення або додання їм нових властивостей (добавки у лаки, фарби, креми, лосьйони, мастила, просочення тканин, поліпшення каталізу та ін.). Для створення нанопристроїв, забезпечення їхнього масового виробництва є перспективними інтелектуальні наноматеріали, що забезпечують самоорганізацію, самоскладання, цілеспрямований інформаційно-хімічний синтез, самовідновлення. З огляду на наявність природних внутрішньоклітинних технологій, які мають ряд цінних переваг над штучними, успіхів біології та біохімії у вивченні ДНК та РНК, можна чекати, що першими промисловими нанотехнологіями буде виробництво біополімерів та насамперед синтез білків через їхню велику значимість для природи та людського суспільства [Дудников, 1992].

Майбутні застосування нанотехнологій: нове покоління хімічних та біологічних сенсорів з мономолекулярними покриттями; нанорозмірні електронні компоненти, зокрема, перемикачі, що дозволяють збільшити пам'ять комп'ютерів у мільйони разів; мініатюрні нанороботи, медичні зонди, що не ушкоджують тканини організму; принципово нова система введення ліків і навіть генів у живі організми, діагностика з використанням лабораторій на кристали, ремонт і відновлення втрачених органів, створення керамічних, полімерних, металевих та інших матеріалів, у т. ч. інтелектуальних з наноструктурою, що значно підвищує їхні механічні характеристики, зміцнення полімерів наночастками, що дозволяє різко знизити вагу деталей, що виготовляються з них; створення наноструктурних силікатів та полімерів, що абсорбують багато речовин, які забруднюють навколишнє середовище.

Розвиток наноелектронних технологій тісно пов'язаний із забезпеченням дефектостійкості. Архітектура кросбара ідеально підходить для виявлення та обходу дефектних елементів та використання теорії кодування для їхньої компенсації. Наносхеми майбутнього можуть виявитися навіть більш надійними за сучасні ІС: надмірність ресурсів зробить їх стійкими до впливу факторів, що викликають катастрофічні відмови традиційних схем (наприклад, до радіації), забезпечуючи лише плавне погіршення характеристик.

Перспективні амбіційні програми розвитку космічної апаратури ставлять метою зниження ГМХ у $10^3 \dots 10^4$ разів, енергоспоживання при одночасному підвищенні функціональної складності, надійності, довговічності, швидкодії, точності вимірів, захисту від впливу дестабілізуючих факторів.

Військові програми передбачають розширення арсеналу автоматичних засобів, що беруть участь в оперативному, тактичному та стратегічному протистоянні супротивникові, переозброєння армій, перегляд функцій особового складу у воєнних діях з метою його збереження та заміни міні- і мікророботами, глобальну інформатизацію про стан певних територій супротивника з використанням мікро- і наносенсорів, створення нових видів зброї та захисту від неї.

Нижче наведений короткий перелік областей досліджень та перспективних напрямків робіт у мікросистемній техніці та нанотехнологіях (далеко не повний) та можливих сфер застосування:

- нові матеріали з унікальними властивостями;
- вуглецеві нанотрубки, графен, графан, фулерени, штучні алмази;
- інтелектуальні матеріали (молекулярне розпізнавання, самоскладання, самовідновлення, самореплікація, самоподіл (нанofільтрація), каталіз);
- навокомпозити;
- біоструктури (зародження життя, нові форми, ремонт втрачених органів);
- полімерні матеріали;
- ефективні оптоволоконні структури;
- феромагнітні рідини;
- сенсори механічні, електромагнітні, температури, газові;
- оптичні інфрачервоні датчики;

- датчики потоків рідини та газів;
- лабораторії на кристалі; електронні «носи»;
- молекулярні сенсори – аналоги біологічним;
- елементи сонячних батарей;
- гальванічні елементи;
- паливні елементи;
- перетворення енергії шумів, вібрацій, звукових та електромагнітних хвиль, енергії, що втрачається людиною, тваринами та рослинами в електричну;
- механічні перемикачі, клапани, вентилі, розподільники потоків;
- органічні світлодіоди;
- органічні молекули як кристали транзисторів;
- об'ємні лазерні та спінові ЗП;
- зонди АСМ, ТСМ, МСМ;
- молекулярні мотори;
- оптичні та електричні з'єднувачі;
- аморфні обчислення;
- квантові комп'ютери;
- спітроніка;
- ефективне перетворення електрики у світло;
- доставка ліків;
- фотодинамічна терапія;
- нейроелектричні інтерфейси, що з'єднують комп'ютери з нервовою системою;
- виробництво білків;
- нанолітографія (наноімпринтинг);
- керована літографія зі зворотним зв'язком.

Темпи розвитку МСТ та НТ у світі залишаються високими. За даними інформаційної компанії «Scientifica» три роки тому близько 70 світових фірм-виробників виготовляло ВНТ в кількості приблизно трьохсот тон на рік. Зараз у світі виготовляють тисячі тон на рік, окремі компанії – сотні тон. У Європі нанотрубки німецька фірма «Bayer Materials» виробляє й продає близько 50 тон на рік, США та Японія – до декількох тисяч тон на рік. На світовому ринку, як правило, продаються низькоякісні нанотрубки китайського та корейського виробництв.

В Росії ринку нанотрубок поки що немає, але є їх виробники. Це низка науково-дослідних хіміко-фізичних інститутів, науково-

технічна та виробнича база у складі Тамбовського державного технічного університету та заводу «Комсомолец» ім. Н. С. Артема з потужністю виробництва до двох тон нанотрубок на рік [Гурьянов, 2010]. Отримані принципово нові ВНТ, зокрема, нанотрубки малого (8—15 нм) діаметра та довжиною 100 мкм на основі різних каталізаторів і вуглецевмісних компонентів синтезу.

Для розвитку вітчизняних мікросистемної техніки та нанотехнологій актуальним є запозичення сучасних закордонних зразків технологічного обладнання, програм розробки та моделювання МЕМС, матеріалів, пошук ефективних областей застосування виробів МСТ та НТ, створення кооперації навчальних, науково-дослідних та промислових організацій для розробки, виготовлення експериментальних зразків та серійного виробництва, створення технопарків з високим рівнем оснащення науково-дослідними приладами, підготовка молодих науковців, орієнтованих на рішення проблем МСТ та НТ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Алферов Ж. И. Наноматериалы и нанотехнологии [Текст] / Ж. И. Алферов, А. Л. Асеев, С. В. Гапонов и др. // Микросистемная техника. — 2003. — № 8. — С. 3—13.
2. Алфимов С. М. Развитие в России работ в области нанотехнологий [Текст] / С. М. Алфимов, В. А. Быков, С. П. Желудева и др. // Микросистемная техника. — 2004. — № 8. — С. 2—8.
3. Материалы микроэлектронной техники [Текст] : учеб. пособ. для вузов / В. М. Андреев, М. Н. Брогулева, С. Н. Дацко, Л. В. Яманова. — М. : Радиосвязь, 1989. — 352 с.
4. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] / В. И. Анурьев. — М. : Машиностроение, 2001. — 864 с.
5. Барсуков А. П. Компоненты и решения для создания роботов и робототехнических систем [Текст] : ежеквартальный справочник. Вып. 1 / А. П. Барсуков. — М. : ДМК-пресс, 2005. — 128 с.
6. Беклемишев В. В. Интегральный преобразователь давления на основе тензочувствительных схем на биполярных тензотранзисторах и тензорезисторах [Текст] / В. В. Беклемишев, В. И. Ваганов, В. В. Воробьева // Электронная техника, сер. 10. — 1980. — Вып. 4. — С. 78—85.
7. Беляев Н. М. Сопротивление материалов [Текст] / Н. М. Беляев. — М. : Наука, 1976. — 608 с.
8. Бескоровайный И. М. Технологические поколения современной электроники [Текст] / И. М. Бескоровайный // Нано и микросистемная техника. — 2005. — № 1. — С. 22—30.
9. Березин Г. Н. Оптические основы контактной фотолитографии [Текст] / Г. Н. Березин, А. В. Никитин, Р. А. Сурис. — М. : Радио и связь, 1982. — 104 с.
10. Блинов Г. А. Гибридные интегральные функциональные устройства [Текст] : учеб. пособ. для студ. вузов / Г. А. Блинов ; под ред. Л. А. Коледова. — М. : Высшая школа, 1987. — 111 с.
11. Блэкфорд Б. Л. Растровый туннельный микроскоп с высокой стабильностью на основе биморфных пьезоэлементов [Текст] / Б. Л. Блэкфорд, Д. К. Дон, М. Н. Джеринд // Приборы для научных исследований. — 1987. — № 8. — С. 3—9.
12. Бобров Д. О трении, графите и нанотехнологиях [Текст] / Д. Бобров // Наука и жизнь. — 2008. — № 4. — С. 97—100.
13. Бондарев В. П. Основы минералогии и кристаллографии с элементами петрографии [Текст] : учеб. для биол. и

- хим. спец. пед. вузов / В. П. Бондарев. — М. : Высшая школа, 1986. — 287 с.
14. Борисенко А. И. Векторный анализ и начала тензорного исчисления [Текст] / А. И. Борисенко, И. Е. Тарапов. — Х. : Вища школа, 1986. — 216 с.
 15. Борн М. Основы оптики [Текст] : пер. с англ. / М. Борн, Э. Вольф. — М. : Наука, 1970. — 855 с.
 16. Бурдун Г. Д. Единицы физических величин [Текст] : справочник / Г. Д. Бурдун, В. А. Базакуца. — Х. : Вища школа, 1984. — 208 с.
 17. Быков В. А. Зондовая микроскопия для биологии и медицины [Текст] / В. А. Быков // Сенсорные системы. — 1998. — Т. 12, № 1. — С. 101—124.
 18. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи [Текст] / В. И. Ваганов. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 136 с.
 19. Ваганов В. И. Интегральный транзисторный преобразователь давления [Текст] / В. И. Ваганов, П. П. Поливазов // Электронная техника, сер. II. — 1975. — Вып. 4. — С. 89—92.
 20. Ваганов В. И. Классификация структур интегральных механоэлектрических преобразователей [Текст] / В. И. Ваганов // Измерительная техника. — 1980. — № 3. — С. 27—29.
 21. Ваганов В. И. Особенности технологии изготовления интегральных тензопреобразователей [Текст] / В. И. Ваганов, Н. И. Гончарова // Приборы и системы управления. — 1981. — № 7. — С. 30—32.
 22. Варадан В. Высокочастотные МЭМС и их применение [Текст] : пер. с англ. / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе. — М. : Техносфера, 2004. — 528 с.
 23. Балдин А. М. Физический энциклопедический словарь [Текст]. Т. 5. Спектр — Яркость / А. М. Балдин, Б. А. Введенский ; гл. ред. Б. А. Введенский. — М. : Советская энциклопедия, 1966. — 576 с.
 24. Вендик О. Г. Корпускулярно-фотонная технология [Текст] : учеб. для вузов / О. Г. Вендик, Ю. Н. Горин, В. Ф. Попов. — М. : Высшая школа, 1984. — 240 с.
 25. Вернер В. Д. Синергетика, микроминиатюризация, микроэлектронная техника, наноэлектроника [Текст] / В. Д. Вернер // Микросистемная техника. — 2004. — № 7. — С. 23—29.
 26. Вернер В. Д. Технология миниатюризации «сверху вниз» или «снизу вверх» [Текст] / В. Д. Вернер, П. П. Мальцев, А. Н. Сауров, Ю. А. Чаплыгин // Нано- и микросистемная техника. — 2005. — № 1. — С. 5—9.

27. Вишнева Т. И. Применение анизотропного травления полупроводников в технологии микроэлектроники [Текст] // Сб. научных трудов по проблемам микроэлектроники. — М. : МИЭТ, 1976. — Вып. 24. — С. 169—174.
28. Справочник по приемникам оптического излучения [Текст] / В. А. Волков, В. К. Вялов, Л. Г. Гассанов, Л. С. Кременчугский и др. ; под. ред. Л. З. Криксунова и Л. С. Кременчугского. — К. : Техніка, 1985. — 216 с.
29. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц [Текст] / Ф. Р. Гантмахер. — М. : Наука, 1988. — 552 с.
30. Гейм А. Углерод — страна чудес [Текст] / А. Гейм, Ф. Ким // В мире чудес. — 2008. — № 7. — С. 30—37.
31. Гейтс Б. Механическое будущее [Текст] / Б. Гейтс // В мире науки. — 2007. — № 5. — С. 37—43.
32. Губкин А. Н. Электреты [Текст] / А. Н. Губкин. — М. : Изд. АН СССР, 1961. — 141 с.
33. Гудинаф Ф. Интегральные акселерометры [Текст] / Ф. Гудинаф // Электроника. — 1993. — № 7—8. — С. 50—57.
- 33а. Гурьянов А. Трубки завтрашнего дня [Текст] / А. Гурьянов // Наука и жизнь. — 2010. — № 2. — С. 16—21.
34. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения [Текст] / М. Де Гроот. — М. : Мир, 1974. — 492 с.
35. Делимарский Ю. К. Неорганическая химия (избранные главы) [Текст] / Ю. К. Делимарский. — К. : Вища школа, 1973. — 196 с.
36. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования с приложением таблиц, составленных Р. Гершелем [Текст] / Г. Деч. — М. : Наука, 1971. — 288 с.
37. Дрекслер К. Э. Машины созидания [Текст] / К. Э. Дрекслер. — Энкор Букс, 1986. — 386 с.
38. Дудников Е. Г. О проблемах измерения, моделирования, контроля и управления в нанотехнологиях [Текст] / Е. Г. Дудников // Автоматизация и современные технологии. — 1992. — № 6. — С. 34—39.
39. Дудников Е. Г. Проблемы контроля и управления в нанотехнологиях [Текст] / Е. Г. Дудников // Приборы и системы управления. — 1999. — № 5. — С. 20—22.
40. Еленин Г. Г. Нанотехнологии, наноматериалы, наноустройства [Текст] / Г. Г. Еленин // Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячелетие. — М. : Наука, 2002. — 478 с.

41. Ерохин В. В. Элементная база систем на кристалле: процессоры [Текст] / В. В. Ерохин // Нано- и микросистемная техника. — 2005. — № 1. — С. 35—44.
42. Ефимов Н. Е. Микроэлектроника: физические и технологические основы, надежность [Текст] : учеб. пособ. для приборостроит. спец. вузов / Н. Е. Ефимов, Н. Я. Козырев, Ю. Н. Горбунов. — М. : Высшая школа, 1986. — 404 с.
43. Ефимов Н. Е. Микроэлектроника: Проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника [Текст] : учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов / Н. Е. Ефимов, Н. Я. Козырев, Ю. Н. Горбунов. — М. : Высшая школа, 1987. — 416 с.
44. Зимина Т. Оксидные «бакиболы» [Текст] / Т. Зимина // Наука и жизнь. — 2004. — № 10. — С. 34—36.
45. Зимон А. Д. Коллоидная химия [Текст] / А. Д. Зимон. — М. : Агар, 2003. — 320 с.
46. Иванов А. А. Микросистемная техника — основа научно-технической революции в военном деле [Текст] / А. А. Иванов, П. П. Мальцев // Микросистемная техника. — 2004. — № 10. — С. 2—6.
47. Иванов-Есипович Н. К. Технология микросхем [Текст] / Н. К. Иванов-Есипович. — М. : Высшая школа, 1972. — 256 с.
48. Мехатроника [Текст] / Т. Исии, И. Симояма, Х. Иноуэ, Н. Накадзима. — М. : Мир, 1988. — 318 с.
49. Калантаров П. К. Теоретические основы электротехники [Текст] : учеб. для электроэнергет. вузов / П. К. Калантаров, П. Р. Нейман. — М., Л. : ГЭИ, 1951. — 464 с.
50. Каллер Д. Сенсорные сети [Текст] / Д. Каллер, Х. Мадлер // В мире науки. — 2004. — № 10. — С. 36—43.
51. Карагусов В. И. Нанокриогенные технологии [Текст] / В. И. Карагусов // Микросистемная техника. — 2004. — № 10. — С. 15—23.
52. Колешко В. М. Поликристаллические пленки полупроводников в микроэлектронике [Текст] / В. М. Колешко, А. А. Ковалевский. — Минск : Наука и техника, 1978. — 344 с.
53. Конюхов Н. Е. Оптоэлектронные контрольно-измерительные устройства [Текст] / Н. Е. Конюхов, А. А. Плют, П. И. Марков. — М. : Энергоиздат, 1985. — 152 с.
54. Кравченко С. Фантастическое сегодня. Нанотехнологии: реалии и перспективы [Текст] / С. Кравченко // Chip. Компьютеры и коммуникации. Украина. — 2002. — № 7. — С. 20—23.

55. Куприянов И. П. Технологический микроклимат [Текст] / И. П. Куприянов. — М. : Советское радио, 1976. — 176 с.
56. Кьюкс Ф. Кроссбар-наноконпьютеры [Текст] / Ф. Кьюкс, Г. Снайдер, С. Уильямс // В мире науки. — 2006. — № 3. — С. 66—73.
57. Левин В. Г. Курс теоретической физики [Текст]. Т. 1. Теория электромагнитного поля. Теория относительности. Статистическая физика. Электромагнитные процессы в веществе / В. Г. Левин. — М. : Наука, 1969. — 912 с.
58. Ловин Д. Создаем робота-андроида своими руками [Текст] : пер. с англ. / Д. Ловин. — М. : ДМК-пресс, 2007. — 312 с.
59. Лойцянский Л. Г. Курс теоретической механики в 2-х томах [Текст] / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. — М. : Наука, 1982. — 352 с.
60. Лурье М. С. Реактивное ионно-плазменное травление в технологии микроэлектромеханических систем [Текст] / М. С. Лурье, Е. Н. Пятнышев // Петербургский журнал электроники. — 2000. — № 3—4. — С. 114—117.
61. Лучинин В. В. Научно-технический прорыв на микроуровне [Текст] / В. В. Лучинин // Петербургский журнал электроники. — 2000. — № 3—4. — С. 4—11.
62. Лучко В. А. МЭМС-технология переворачивает представление о технике инфракрасного видения [Текст] / В. А. Лучко // Микросистемная техника. — 2004. — № 2. — С. 6—7.
63. Лысенко И. Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники [Текст] / И. Е. Лысенко. — Таганрог : Изд. ТРТУ, 2005. — 103 с.
64. Мазель С. З. Планарная технология кремниевых приборов [Текст] / С. З. Мазель, Ф. П. Пресс. — М. : Энергия, 1974. — 384 с.
65. Мальцев П. П. Технологии и изделия микроэлектромеханики [Текст] / П. П. Мальцев, В. А. Телец, А. Ю. Никифоров // Микросистемная техника. — 2001. — № 10. — С. 18—24.
66. Михайлов П. Г. Исследования по созданию высокотемпературных сенсорных элементов и структур [Текст] / П. Г. Михайлов // Микросистемная техника. — 2004. — № 8. — С. 38—44.
67. Мюллер С. Ремонт и модернизация персональных компьютеров [Текст] / С. Мюллер. — М., СПб., К., 2005. — 1238 с.
68. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов [Текст] : справочник / В. И. Мясенков,

- В. П. Мальцев, В. П. Майборода и др. — М. : Машиностроение, 1989. — 520 с.
69. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц [Текст] : пер. с англ. / Дж. Най. — М. : Изд-во иностранной литературы. — 1960. — 385 с.
70. Невлюдов И. Ш. Классификация технологий микроэлектромеханических систем [Текст]: тез. докл. 2-й МРФ «Прикладная радиоэлектроника: Состояние и перспективы развития» / И. Ш. Невлюдов, В. М. Свищ, В. А. Палагин // МРФ-2005. Сб. научн. тр. — Х. АН ПРЭ, ХНУРЭ. — 2005. — Т. 1. — С. 111—114.
71. Невлюдов И. Ш. Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии [Текст] / И. Ш. Невлюдов, А. А. Андрусевич, В. А. Палагин. — Х. : Коллегиум, 2007. — 268 с.
72. Невлюдов И. Ш. Нанолитография-наноимпринтинг [Текст] / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Фризюк, О. Г. Шинкаренко // Радиотехніка. — 2007. — № 150. — С. 151—158.
73. Невлюдов И. Ш. Элементы солнечных батарей на основе коллоидного нанокристаллического полупроводника TiO_2 [Текст] / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, В. И. Степаненко и др. // Технология приборостроения. — 2008. — № 2. — С. 7—10.
74. Багатозондовий контактний пристрій [Текст] : пат. України № 82405: МПК H05 1/00 / І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, В. В. Сем енець та ін. ; заявник та власник ХНУРЕ. Дата подання 15.05.2006 : опубл. 10.04.2008, Бюл. № 7. — 4 с.
75. Невлюдов И. Ш. Математическая модель балки МЭМС [Текст] / И. Ш. Невлюдов, С. П. Новоселов, В. А. Палагин // Сб. науч. тр. 2-й МНК «Электронная компонентная база. Состояние и перспектива развития», 30 сент. — 3 окт. 2009 г. — Харьков — Кацивели, 2009. — С. 53—56.
76. Нилсон П. Новая молекула жизни? [Текст] / П. Нилсон // В мире науки. — 2009. — № 3. — С. 34—41.
77. Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия [Текст] : пер. с англ. / под ред. Р. М. Бургера и Р. П. Донована. — М. : Мир, 1969. — 451 с.
78. Палагин В. А. Уточнение модели емкостных элементов МЭМС [Текст] / В. А. Палагин, Е. И. Грицкевич, Е. А. Фризюк // Нано- и микросистемная техника. — 2007. — № 4. — С. 48—50.
79. Палатник А. С. Эпитаксиальные пленки [Текст] / А. С. Палатник, И. И. Папиров. — М. : Наука, 1971. — 237 с.

80. Парфенов О. Д. Технология микросхем [Текст] / О. Д. Парфенов. — М. : Высшая школа, 1977. — 256 с.
81. Петерсен К. Э. Кремний как механический материал [Текст] / К. Э. Петерсен // ТИИЭИР. — 1982. — Т. 70, № 5. — С. 5—49.
82. Погалов А. И. Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла [Текст] / А. И. Погалов, В. П. Тимошенко, С. П. Тимошенко, Ю. А. Чаплыгин // Микросистемная техника. — 2000. — № 3. — С. 36—41.
83. Поляков П. Ф. Микросистемная техника [Текст] / П. Ф. Поляков, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин и др. // Радиотехника и компьютерные системы. — 2006. — № 4. — С. 21—30.
84. Поляков П. Ф. Мини-, микро- и нанороботы [Текст] / П. Ф. Поляков, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. — 2007. — Вып. 35. — С. 104—113.
85. Поляков П. Ф. Элементы и устройства функциональной микроэлектроники [Текст] / П. Ф. Поляков, А. В. Бородин, В. А. Палагин и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. — 2007. — Вып. 36. — С. 49—59.
86. Пул Ч. Нанотехнологии [Текст] / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. — М. : Техносфера, 2007. — 376 с.
87. Райхель Я. Атомные микросхемы [Текст] / Я. Райхель // В мире науки. — 2005. — № 5. — С. 34—42.
88. Ратнер М. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи [Текст] / М. Ратнер. — М. : ИД «Вильямс», 2004. — 240 с.
89. Реньян В. Р. Технология полупроводникового кремния [Текст] : пер. с англ. — М. : Металлургия, 1969. — 336 с.
90. Рубцов И. В. Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника [Текст] / И. В. Рубцов, В. Е. Нестеров, В. И. Рубцов // Микросистемная техника. — 2000. — № 5. — С. 70—79.
91. Рэми Г. Курс неорганической химии. [Текст]. Т. 2 / Г. Рэми. — М. : Мир, 1966. — 836 с.
92. Рэми Г. Курс неорганической химии. [Текст]. Т. 1 / Г. Рэми. — М. : Мир, 1972. — 824 с.
93. Самойлович М. И. Трехмерные наноконпозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема [Текст] / М. И. Самойлович, С. М. Клещев, А. Ф. Белянин и др. // Микросистемная техника. — 2004. — № 6-8. — С. 9—17.

94. Технология межсоединений электронной аппаратуры [Текст] : учеб. для вузов / В. В. Семенец, Дж. Кратц, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин. — Х. : Компания «СМИТ», 2005. — 432 с.
95. Симон Н. Нанотехнология и двойная спираль ДНК [Текст] / Н. Симон // В мире науки. — 2004. — № 9. — С. 22—31.
96. Синхронный 3-фазный двигатель [Электронный ресурс] / ООО «ТОСС» (Технология, оборудование, стеклянные структуры). — Режим доступа: www.tegs.ru/toss.htm/ — 2005. — Загл. с экрана.
97. Собенников А. С. Фемтосекундная реализационная динамика фемтовозбужденных нанокристаллов TiO_2 в водных суспензиях [Текст] / А. С. Собенников, В. А. Надточенко, Ю. Е. Лозовик, О. М. Саркисов // Химическая физика. — 2005. — Т. 24, вып. 4. — С. 9—13.
98. Солин С. Субмикронные магнитные сенсоры [Текст] / С. Солин // В мире науки. — 2004. — № 11. — С. 44—51.
99. Степаненко В. И. Исследование возможности изготовления лакофольговых диэлектриков повышенной точности для изготовления МЭМС устройств [Текст]. Т. 3 / В. И. Степаненко, К. Ю. Харенко, В. А. Палагин, Е. А. Фризык // Сб. науч. тр. 1-й МНТК «Элементная компонентная база. Состояние и перспективы развития» в рамках 3-го МРФ «Прикладная РЭ. Состояние и перспективы развития», 30 сент. — 3 окт. 2008 г. Харьков — Судак. — С. 219—221.
100. Степанов Ю. А. Краткий политехнический словарь [Текст] / Ю. А. Степанов. — М. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1955. — 1136 с.
101. Степанов Ю. И. Применение технологий МЭМС и МСТ в автомобильной технике [Текст] / Ю. И. Степанов // Микросистемная техника. — 2003. — № 12. — С. 22—28.
102. Стикс Г. Микромеханические телефоны [Текст] / Г. Стикс // В мире науки. — 2004. — № 5. — С. 24—25.
103. Стикс Г. Нанорисование [Текст] / Г. Стикс // В мире науки. — 2004. — № 6. — С. 22—23.
104. Стикс Г. Нанотрубки в чистой комнате [Текст] / Г. Стикс // В мире науки. — 2005. — № 5. — С. 70—73.
105. Суздаев И. П. Нанотехнология. Физико-химия нанокластеров (Синергетика: от прошлого к будущему) [Текст] / И. П. Суздаев. — М. : Ком. книга, 2006. — 592 с.

106. Суховеев С. П. Волоконные МЭМС и НЭМС [Текст] / С. П. Суховеев // Микросистемная техника. — 2004. — № 1. — С. 2—11.
107. Телец В. А. Изготовление трехмерных МЭМС методами термокомпрессионной сварки [Текст] / В. А. Телец, Ю. С. Негина, А. А. Орлов // Микросистемная техника. — 2004. — № 3. — С. 2—6.
108. Телец В. А. Микроэлектромеханические инерционные преобразователи физических величин: типовые варианты исполнения [Текст] / В. А. Телец // Микросистемная техника. — 2004. — № 2. — С. 2—5.
109. Ткачук В. А. Нанотехнологии в медицине: успехи и перспективы [Текст] / В. А. Ткачук // В мире науки. — 2009. — № 2 — С. 72—77.
110. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований. [Текст] : пер. с англ. / Дж. Уайтсайде, Д. Эйлер, Р. Андерс и др. ; под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса. — М. : Мир, 2002. — 292 с.
111. Ульяновков А. Г. Оборудование для исследований в нано- и микроэлектронике [Текст] / А. Г. Ульяновков. // Дополнение 1 в книге Пул Ч. «Нанотехнологии». — М. : Техносфера, 2007. — 376 с.
112. Ферри Д. Электроника ультрабольших интегральных схем [Текст] : пер. с англ. / Д. Ферри, Л. Эйкерс, Э. Гринич. — М. : Мир, 1991. — 327 с.
113. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов [Текст] : учеб. для вузов / В. И. Феодосьев. — М. : Наука, 1986. — 512 с.
114. Филипенко А. И. Использование автосвертки распределения оптического поля для идентификации положения сердцевины оптических волокон при их соединении [Текст] / А. И. Филипенко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — Х. : ХНУРЭ. — 2003, вып. 132. — С. 109—114.
115. Филипенко А. И. Исследование метода позиционирования фотонно-кристаллических волокон при их соединении [Текст] / А. И. Филипенко, О. В. Сычева // Сб. науч. трудов 2-й Международной НК «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития». Харьков — Кацивели. 30 сент. — 3 окт. 2009. — С. 187—190.
116. Форбс П. Самоочищающиеся материалы [Текст] / П. Форбс // В мире науки. — 2008. — № 10. — С. 48—55.

117. Хатчесон Д. Первые наночипы [Текст] / Д. Хатчесон // В мире науки. — 2004. — № 7. — С. 46—53.
118. Храмов Ю. А. Физики: Биографический справочник [Текст] / Ю. А. Храмов ; под ред. А. И. Ахиезера. — М. : Наука, 1983. — 346 с.
119. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем [Текст] / В. Н. Черняев. — М. : Энергия, 1977. — 375 с.
120. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров [Текст] : учеб. для вузов / В. Н. Черняев. — М. : Радио и связь, 1987. — 464 с.
121. Чжонлинь В. Нанустройства с автоподзаводом [Текст] / В. Чжонлинь // В мире науки. — 2008. — № 4. — С. 46—51.
122. Чой Ч. Миниатюризация источников энергии [Текст] / Ч. Чой // В мире науки. — 2006. — № 7. — С. 70—73.
123. Шалобаев Е. В. Технология изготовления зубчатых колес и передач МЭМС. Технологии индивидуального формообразования микромеханики [Текст] / Е. В. Шалобаев, Ю. С. Монахов, В. Е. Стражинский, С. А. Шалько // Микросистемная техника. — 2004. — № 8. — С. 24—28.
124. Шарковский В. Ю. Биологические актюаторы и их использование в МЭМС [Текст] / В. Ю. Шарковский // Тез. докл. 10-го Междунар. молод. юб. форума «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке». — Х. : ХНУРЭ. — 2006. — С. 189.
125. Шевченко В. Я. О терминологии: наночастицы, наносистемы, нанотехнологии [Текст] / В. Я. Шевченко // Микросистемная техника. — 2004. — № 9. — С. 2—4.
126. Шелепин Н. А. Основные принципы создания SPICE-моделей микроэлектромеханических систем [Текст] / Н. А. Шелепин // Микросистемная техника. — 2004. — № 9. — С. 30—35.
127. Шипов Г. И. Теория физического вакуума [Текст] / Г. И. Шипов. — М. : Наука, 1997. — 450 с.
128. Эшли С. Солнечные дни для кремния [Текст] / С. Эшли // В мире науки. — 2009. — № 1. — С. 12—13.
129. Юревич Е. Ю. Основы робототехники [Текст] : учеб. пособ. / Е. Ю. Юревич. — СПб. : БХВ Петербург, 2005. — 416 с.
130. Юрре Т. А. Органические материалы для фотовольтаических элементов. [Текст] / Т. А. Юрре, Л. И. Рудая, Н. В. Климова, В. В. Шаланин // Физика и техника полупроводников. — 2003. — Т. 37, вып. 7. — С. 835—844.

131. Ayazi F. A HARPPSS Polysilicon vibrating ring gyroscope [Text] / F. Ayazi, K. Najafi // *Microelectromechanical Systems*. — 2001. — Vol. 10, № 2. — P. 169—179.
132. Bjorksten, U. Book of Abstracts [Text] / U. Bjorksten, A. Hagfeldt, J. Mozer, M. Gratzel // *10th International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy*. JPS-10 July 24—29, 1994. Interlaken, Switzerland. — P. 209—210.
133. Bosnell J. R. Dielectric isolation techniques for integrated circuits [Text] / J. R. Bosnell // *Microelectronics and Reliability*. — 1976. — Vol. 15, № 2. — P. 113—122.
134. Clark J. V. MEMS Simulation Using SUGAR V.05 [Electronic source] / J. V. Clark, N. Zhou, K. S. F. Pister; Berkely Sensor and Actuator Center University of California at Berkely. — Режим доступа:
www.bzac.berkely.edu/cadtools/sugar/Paper/hh1998.pdf/ — 1998. — Загл. с экрана.
135. Dorey A. P. A high sensitivity semiconductor strain sensitive circuit [Text] / A. P. Dorey // *Solid-state Electronics*. — 1975. — Vol. 18, № 4. — P. 295—299.
136. Filipenko A. I. Some solutions for manufacturing microdevices [Text] / A. I. Filipenko, I. Sh. Nevlyudov, V. A. Palagin // *Сб. науч. тр. 1-й МНТК «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития» в рамках 3-го МРФ «Прикладная РЭ. Состояние и перспективы развития»* 30 сент. — 3 окт. 2008. Харьков — Судак. Т. III. — С. 195—197.
137. Grumman N. Navigation Systems [Electronic source] / N. Grumman. — Режим доступа:
<http://www.nsd.es.northropgrumman.com/> — 2009. — Загл. с экрана.
138. Hagfeldt A. Light-Indused Reactions in Nanocrystalline Systems [Text] / A. Hagfeldt, M. Gratzel // *Chemical Review*. — 1995. — Vol. 95, № 1. — P. 49—68.
139. Hoffmann W. Applications of Semiconductor Photocatalysis [Text] / W. Hoffmann, W. Choi, T. Scot et al. // *Chemical Review*. — 1995. — Vol. 95, № 1. — P. 69—96.
140. Kim B. H. Anew Organic Modifier for Anti-Sticktion [Text] / B. H. Kim, T. D. Chung, C. H. Oh, K. Chum // *J. MEMS (JMIYET)*. — 2001. — Vol. 10, № 1. — P. 33—40.
141. Li M. Four-inch curable nanoimprint lithography using NX-2000 nanoimpritor [Electronic source] / M. Li, Nanonex

- Corporation. — Режим доступа: <http://mtli.nanonex.com/> — 2009. — Загл. с экрана.
142. Nevliudov I. Sh. Nanolithography-nanoimprinting [Electronic source] / I. Sh. Nevliudov, V. A. Palagin, E. A. Friziuk // Intern. Workshop «Optics-2007» 20-22 June 2007, Kharkov, Ukraine. — Режим доступа: http://photonics.kture.kharkov.ua/opt/optann1_en.html/ — 2009. — Загл. с экрана.
143. Pan L.-W. Batch Transfer of LIGA Microstructures by Selective Electroplating and Bonding [Text] / L.-W. Pan, L. Lin // J. MEMS. — March 2001. — V. 10, № 1. — P. 25—32.
144. Rosensweig R. E. Ferrohydrodynamics [Text] / R. E. Rosensweig. — New-York : Cambridge University Press, 1985. — 344 p.
145. Stoller A. I. A new technique for etch thinning silicon wafers [Text] / A. I. Stoller, R. F. Speers, S. Opresko // RCA Review. — 1970. — № 6. — P. 265—270.

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ

Алотропні форми — поліморфізм хімічних елементів, тобто речовина одного хімічного складу утворює мінерали з різними структурами (графіт, графен, фулерени, алмаз, ВНТ).

Аспектне відношення — відношення глибини елемента схеми до латерального (бічного) розміру. Високі аспектні відношення забезпечують реактивно-іонне травлення, LIGA-технологія.

Бозе-конденсація — ситуація, за якої всі бозони при зниженні температури займають найнижчий енергетичний рівень. При цьому довжина хвилі кожного бозона однакова, їхні хвилі складаються, утворюючи конденсат, макроскопічний субстрат.

Бозон — атомна частка із цілим спіном (на противагу ферміону — частці з напівцілим спіном), бозони не мають обмежень по кількості, що може перебувати на одному енергетичному рівні (у ферміона — електрона на одному рівні можуть перебувати не більше двох електронів, спіни яких протилежно спрямовані).

Відновлення (хім.) — процес приєднання електронів. Речовина при цьому є окислювачем і сама при цьому відновлюється.

Віскер — гострозаточений зонд, встановлений на кінці кантилевера та призначений для зондування поверхні об'єктів. Радіус загострення $r \sim 3$ нм (щонайменше — один атом).

Гетерогенний — поверхневий, пов'язаний з поверхнею.

Графан — матеріал, у якому до кожного атома вуглецю приєднаний атом водню.

Графен — моноатомний шар вуглецю, що утворює при складанні з такими ж шарами графіт; графен має дуже високу електропровідність, надзвичайно міцний та твердий, має досконалу плоску шестигранну структуру.

ДНК — дезоксирибонуклеїнова кислота.

Екситон — зв'язана електрон-діркова пара в об'ємному напівпровіднику, що може переміщуватися по кристалу.

Електрет — постійно наелектризований діелектрик, що несе на одній стороні позитивний, на інший негативний заряд і здатний створювати електричне поле в оточуючому його просторі, електричний аналог постійного магніту.

Електрострикція — механічна деформація матеріалу під дією електричного поля.

Згортання тензорів — підсумовування компонент тензора по двох яких-небудь індексах. При згортанні по двох індексах тензора рангу n виходить тензор рангу $n - 2$. Тензор парного рангу може бути згорнутий до скаляра, а непарного рангу — тільки до вектора.

Імерсійна рідина — рідина, що має однакові або близькі коефіцієнти заломлення із зануреними в них об'єктами, що дозволяє виявити внутрішні дефекти об'єктів (наприклад, кристалів, дорогоцінних каменів).

Інтерколяція — розташування між шарами графіту інших атомів (інтерколяція графіту атомами калію робить кристал графіту надпровідним при температурах, що становлять декілька десятих Кельвіна); легування (K_2C_{60}) дає надпровідність при температурах 18 К.

Каптілевер — консольна балка мікрометрових або субмікронних розмірів, здатна згинатися під дією різних сил або полів (механічних, електромагнітних, теплових та ін.).

Квазичастки — елементарні частки, що володіють властивостями, відмінними від звичайних часток даного виду. Наприклад, електрони в графені переміщуються з дуже високою швидкістю (в 300 разів меншою за швидкість світла), тобто поводяться подібно нейтрино, хоча мають електричний заряд, тобто начебто мають масу нейтрино.

Квантові точки — при зменшенні розміру кристала менше 100 нм утворені пари дірка-електрон не можуть рекомбінувати внаслідок хвильової природи електрона та неможливості його локалізації в об'ємі простору меншому за довжину його хвилі. Електрон, що володіє невеликою енергією, не може ні віддалитися від дірки, ні власти на неї. Електрон має деякий можливий спектр енергій. Спектр випромінювання квантової точки можна регулювати, змінюючи її розміри. Тому Ж. І. Алфьоров назвав квантові точки штучними атомами, властивостями яких можна управляти.

Конденсат Бозе — Ейнштейна — квантово-механічний стан речовини, коли хвилі великої кількості атомів складаються у фазі (повна суперпозиція), утворюючи макроскопічну хвилю, яку можна побачити й неозброєним оком. При температурі близькій до абсолютного нуля хвилі «застигають» і став суперпозиції легше досягається. Але ефект спостерігається і при кімнатній

температурі завдяки магнітним властивостям деяких біологічних часток, поверхневому натягу та ін.

Конформні відображення — метод теорії функцій комплексних змінних взаємо-однозначних відображень одних областей простору на інші.

Кубіти — біти інформації в молекулярних комп'ютерах, спінтроніці, можуть одночасно перебувати в стані 0 і 1 із різною ймовірністю.

Латеральний — бічний, паралельний поверхні.

Люмінесценція — світіння, що представляє надлишок над температурним випромінюванням, із тривалістю, що значно перевищує період світлових коливань (С. І. Вавилов).

Магніострикція — зміна лінійних розмірів магнітопроводу під дією магнітного поля.

Метаболізм — обмін речовин, у більш вузькому значенні перетворення певних речовин усередині клітин з моменту їхнього надходження до утворення кінцевих продуктів (наприклад, метаболізм білків, глюкози, лікарських препаратів).

Мицела — молекула (частка), що має розміри більші за колоїдні, що включає атом або молекулу (кристал) — ядро, оточене адсорбованими на його поверхні частками іншої речовини (протионами).

Окислення — полягає у віддачі електронів. Якщо речовина втрачає електрони, вона є відновлювачем, і сама при цьому окислюється.

Пептизація — процес утворення золя дією дуже невеликих концентрацій електронів на осадки необоротних колоїдів.

Поліконденсація — процес утворення полімерів, при якому сполука вихідних мономерних молекул супроводжується виділенням простих речовин, таких як HCl , H_2O , NH_3 .

Полімеризація — процес приєднання молекул мономера одна до іншої під дією ініціюючого фактора (температури, УФ-випромінювання, лазерного випромінювання та ін.).

Редокс — reduction-oxidation, окислювально-відновлювальні процеси, пов'язані з високою рухливістю валентних електронів, що обумовлюють хімічні зв'язки в молекулах сполук. Процес окислення полягає у віддачі електронів, а процес відновлення — у їхньому приєднанні. Якщо речовина втрачає електрони, вона є відновлювачем і сама при цьому окислюється. Навпаки, якщо

о речовина приєднує електрони, вока є окислювачем, а сама при цьому відновлюється. Реакції окислювання та відновлення зливаються в єдиний редокс-процес: $o_1 + v_2 \leftrightarrow o_2 + v_1$ ($Fe^{III} + e \leftrightarrow Fe^{II}$).

Реологія — наука про течію рідин під дією зовнішніх сил. Реологічні властивості — залежність в'язкості η від швидкості v зсуву часток речовини одна відносно до другої.

Ротаксан — матеріал, що змінює опір у результаті електрохімічного перемикання (у кросбарах).

Симетрія — сукупність всіх перетворень, поворотів на деякий кут навколо якої-небудь осі, дзеркального відбиття в деякій площині, паралельного переносу (трансляції), які зберігають відстані між всіма парами точок тіла та суміщають тіло із самим собою. Класифікація енергетичних рівнів електрона в кристалі пов'язана із симетрією поля в кристалі. Елементи симетрії: площина — P , вісь — L , центр — C . Існує 32 класи симетрій.

Синергетика — нелінійність залежності властивостей від розмірів об'єкта (часток матеріалу, кількості людей у колективі, юрбі).

Синергія — дія, спрямована у бік основної дії, що сприяє основній дії.

Сингонія — група видів симетрії, що володіють одним або декількома однаковими елементами симетрії та мають однакове розташування кристалографічних осей.

Скейлінг (scaling) — ефекти зміни впливів різних процесів (факторів) на функціонування, властивості MEMS-пристроїв через пропорційне зменшення розмірів елементів.

Сорбція — властивість захоплювати атоми або молекули іншої речовини, розрізняють поверхневу сорбцію — адсорбцію, об'ємну — абсорбцію, хімічні зв'язки — хемосорбція.

Спінтроніка — враховує не тільки електричний заряд електронів, але й їхній спін (кутовий момент обертання) — властивість, завдяки якій електрони поведуться як елементарні стрижневі магніти. Накопичувач на жорсткому диску, що використовує ефект гігантського магнітного резонансу — спінтронний пристрій. Алмаз є ефективним матеріалом спінтронних пристроїв майбутнього. В 2006 р. з'явилася спінтронна пам'ять із довільним доступом (MRAM) (ф. Motorola).

Тензор — величина, що вимагає для свого опису більше трьох компонент 3^0 — скаляр, 3^1 — вектор (тензор першого рангу), $3^2 \dots 3^n$ — тензори 2... n -го рангу.

Трансляції — паралельне перенесення, один з видів симетрії в теорії груп та її фізичних застосувань (наприклад, до кристалів).

Фонон — носій енергії механічних коливань атомів у кристалічній ґратці. Їхній енергетичний спектр безперервний.

Фотон — квант енергії випромінювання із частотою ν , $p = h\nu$.

Хиральність — хиральність нанотрубок позначається числами (m, n) , що вказують координати шестикутника, що при згортанні площини графіту повинен збігтися із шестикутником, що перебуває на початку координат. Інший спосіб позначення хиральності пов'язаний з позначенням кута згортання α .

Щільність станів — кількість енергетичних рівнів у заданому інтервалі енергій.

Періодична система елементів Д. І. Менделєєва

№ гр. (Z)	ГРУПИ ЕЛЕМЕНТІВ									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		X
1	1 H 1,00797 ВОДОЇН									H He 4,0026 ГЕЛІЙ
2	2 Li 6,939 ЛІТІЙ	4 Be 9,0122 БЕРИЛІЙ	5 B 10,811 БОР	6 C 12,01115 ВУГЛЕЦЬ	7 N 14,0067 АЗОТ	8 O 15,9994 КИСЕЛЬ	9 F 18,9984 ФТОР			Ne 20,183 НЕОН
3	3 Na 22,989 НАТРІЙ	4 Mg 24,312 МАГНІЙ	5 Al 26,9815 АЛЮМІНІЙ	6 Si 28,086 КРЕМІЙ	7 P 30,9715 ФОСФОР	8 S 32,064 СІРКА	9 Cl 35,453 ХЛОР			Ar 39,948 АРГОН
4	4 K 39,102 КАЛІЙ	20 Ca 40,08 КАЛЬЦІЙ	21 Sc 44,956 СКАНДІЙ	22 Ti 47,88 ТИТАН	23 V 50,942 ВАНАДІЙ	24 Cr 51,996 ХРОМ	25 Mn 54,938 МАРГАНЕЦЬ	26 Fe 55,847 ЖАЛІЗО	27 Co 58,9332 КОБАЛЬТ	28 Ni 58,71 НІКЕЛЬ
5	5 Rb 85,47 РУБІДІЙ	38 Sr 87,62 СТРОНЦІЙ	39 Y 88,905 ІТРИЙ	40 Zr 91,224 ЦРКОНІЙ	41 Nb 92,906 НИОБІЙ	42 Mo 95,94 МОЛИБДЕН	43 Tc [99] ТЕХНІЦІЙ	44 Ru 101,07 РУТИЦІЙ	45 Rh 102,905 РОДИЙ	46 Pd 106,4 ПАЛАДІЙ
6	6 Cs 132,905 ЦЕЗІЙ	56 Ba 137,34 БАРИЙ	57 La 138,905 ЛАНТАНИ	72 Hf 178,49 ГАФНІЙ	73 Ta 180,948 ТАНТАЛ	74 W 183,85 ВОЛЬФРАМ	75 Re 186,2 РЕНІЙ	76 Os 190,2 ОСМІЙ	77 Ir 192,22 ІРІДИЙ	78 Pt 195,084 ПЛАТІНА
7	7 Fr [223] ФРАНЦІЙ	88 Ra [226] РАДІЙ	89 Ac [227] АКТИНІЙ	104 Ku [293] КУРЧАТОВІЙ	105 Nh [286] НІХОНІЙ	106 Fl [289] ФЛУОРИНІЙ	107 Mc [288] МОНТАНІЙ	108 Lv [293] ЛІВЕРМОРІЙ	109 Ts [294] ТЕННІСІЙ	110 Og [294] ОГАНЕСІЙ
*ЛАНТАНОЇДИ										
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	71
Ce 140,12 ЦЕРІЙ	Pr 140,907 ПРАКЕДИЙ	Nd 144,24 НЕОДИМ	Pm [145] ПРОМІТІЙ	Sm 150,36 САМАРІЙ	Eu 151,96 ЄВРОПІЙ	Gd 157,25 ГАДОЛІНІЙ	Tb 158,925 ТЕРБИЙ	Dy 162,50 ДИСПРОЗІЙ	Ho 164,930 ГОЛЬМІЙ	Lu 174,967 ЛУЦЕТИЙ
*АКТИНОЇДИ										
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	103
Th 232,038 ТОРИЙ	Pa [231] ПРОТАКТИНИЙ	U 238,028 УРАН	Np [237] НЕПУТІНІЙ	Pu [244] ПУТООНІЙ	Am [243] АМЕРИЦІЙ	Cm [247] КЮРИЙ	Bk [247] БЕРКЕЛІЙ	Cf [251] КАЛЬФОРНІЙ	Es [252] ЕІНСТАЙНІЙ	Lr [260] ЛОРЕНСІЙ

Види деформацій мікромеханічних елементів. Основні розрахункові формули

Під час функціонування мікромеханічні елементи піддаються дії зовнішніх корисних навантажень, середовища, а також сил взаємодії деталей, власної ваги, інерції, електричних і магнітних сил та інших. Розрізняють сили зосереджені та розподілені, постійні, змінні, статичні та динамічні.

З урахуванням дії на кожний елемент конструкції сил реакції вузлів кріплення кожний елемент конструкції перебуває в рівновазі під впливом всіх прикладених до нього сил.

Але під дією цих сил як елементи конструкції так і конструкція в цілому змінюють свою форму та розміри, тобто деформуються. Величина та характер деформації можуть бути пружними або залицьковими, що залежить від конструктивних параметрів елементів і властивостей використаних матеріалів.

Дія сил на елементи створює напружений стан матеріалів, що залежить від точки та напрямку проведення перерізу. Напруження позначаються буквами p , σ , τ :

p — при довільному нахилі напруження до площинки, що розглядається;

σ — позначає напруження нормальні до площинки;

τ — ті, які лежать у її площині, дотичні.

Залежно від напрямку дії сил і моментів сил розрізняють такі види деформацій елементів конструкції: розтягування (стиск), крутіння, згин, зсув, переріз, зминання. Для розрахунку напружень необхідно визначати такі перерізи елементів, у яких напруження максимальні. Ці перерізи називаються *небезпечними*.

При центральному (уздовж осі стрижня, балки) розтягуванні (стиску) виникають напруження перпендикулярні перерізу та паралельні осі, тобто нормальні напруження:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (\text{Д2.1})$$

де F — сила, що розтягує (стискає), Н; S — площа поперечного перерізу, м².

Під дією сили F довжина стрижня l змінюється на величину Δl . Відповідно до закону Гука, що виконується в області пружних деформацій:

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES}, \quad (D2.2)$$

де E — модуль пружності Юнга матеріалу стрижня, Н/м^2 .

Умова міцності стрижня [Беляев, Феодосьев],

$$\sigma < [\sigma], \quad (D2.3)$$

тобто нормальні напруження повинні бути меншими за припустимі $[\sigma]$, які для різних матеріалів можна знайти в джерелах [Беляев, Феодосьев], або в довідниках.

Позначивши відносну зміну довжини стрижня через ε

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (D2.4)$$

одержуємо

$$\sigma = \varepsilon E. \quad (D2.5)$$

При розтягуванні вздовж осі стрижня збільшується його довжина, але зменшується ширина b по обох перпендикулярних до осі напрямках. Позначимо

$$\varepsilon_1 = -\frac{\Delta b}{b}. \quad (D2.6)$$

Тоді абсолютна величина відношення відносної поперечної деформації ε_1 до відносної поздовжньої ε називається *коефіцієнтом поперечної деформації* або *коефіцієнтом Пуассона* μ :

$$\mu = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}. \quad (D2.7)$$

Для більшості матеріалів $\mu = 0,25 \dots 0,3$.

При розгляді плоского або об'ємного напруженого стану розраховуються сумарні напруження від сил, що діють у всіх взаємно перпендикулярних напрямках.

Виразимо відносну деформацію в напрямку осі X від дії сил (напружень), спрямованих уздовж осей x, y, z (рис. D2.1):

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}; \quad (D2.8)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_y}{E}; \quad (D2.9)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_z}{E}. \quad (D2.10)$$

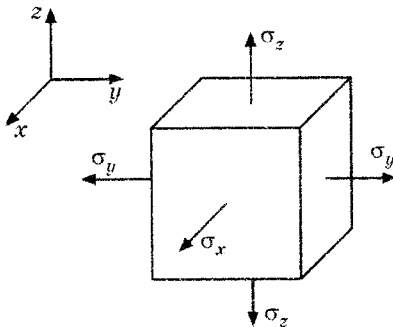


Рис. D2.1. Об'ємний напружений стан

У межах пружних деформацій сумарна відносна деформація уздовж кожної осі дорівнює

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]. \end{aligned} \quad (Д2.11)$$

Деформація крутіння зумовлюється парами сил, які лежать у площинах, перпендикулярних до осі вала. Деформації крутіння піддаються осі та вали передач, пружини.

Провідний шків 1 з'єднує двигун з валом, а шків 2 передає момент M_2 наступній ланці механізму (рис. Д2.2).

$$M_1 = M_2 = M_{кр}, \quad (Д2.12)$$

тобто

$$\begin{aligned} (T_1 - t_1)R_1 &= (T_2 - t_2)R_2 = \\ &= M_{кр}. \end{aligned} \quad (Д2.13)$$

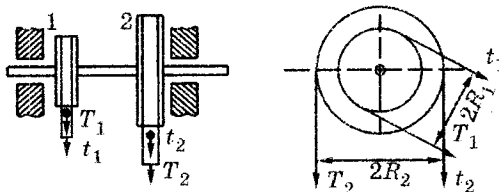


Рис. Д2.2. Передача крутного моменту

У більш складних випадках на валу розміщується ряд шківів: один приводний, інші приведені. Кожний шків передає валу (відбирає) свій момент, при рівномірному обертанні $\Sigma M_T = 0$ (рис. Д2.3).

Момент крутіння $M_{кр}$ в кожному поперечному перерізі вала дорівнює сумі моментів, які діють на вал або справа, або зліва від розглянутого перерізу. Знак моменту крутіння прийнято обирати відповідно до знака зовнішніх моментів, які діють зліва від

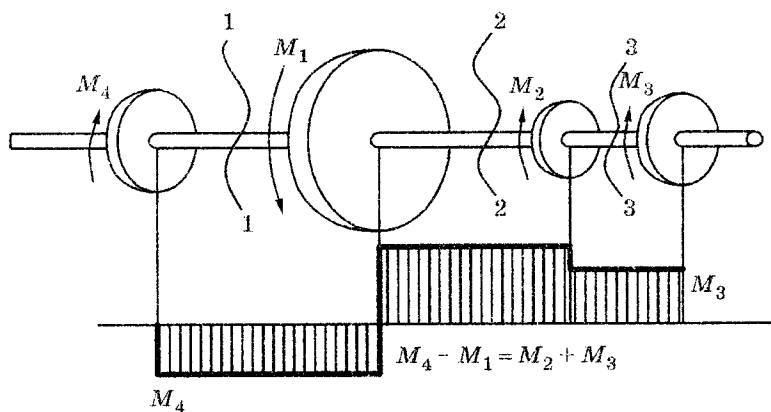


Рис. Д2.3. Епюра крутних моментів вала

перерізу, тобто при спостереженні зліва уздовж осі вала момент, що спрямований за годинниковою стрілкою, вважається додатним.

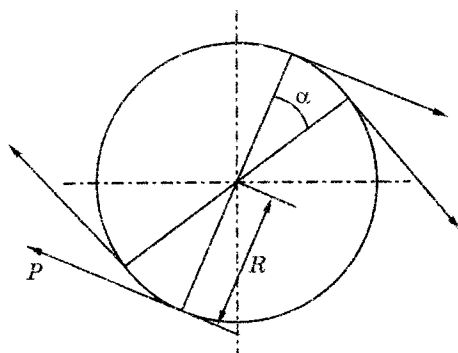


Рис. Д2.4. Робота пари сил

При повороті шківів на кут α кожна сила пари пройде шлях $R\alpha$, а вся пара виконає роботу

$$A = 2PR\alpha = M\alpha. \quad (\text{Д2.14})$$

Таким чином, робота пари сил при повороті на кут α дорівнює моменту пари помноженому на кут повороту в [рад]. Якщо n — число обертів вала за хвилину, то робота дорівнює потужності

$$A = N = 2\pi \frac{n}{60} M. \quad (\text{Д2.15})$$

$$M = \frac{60N}{2\pi n}. \quad (\text{Д2.16})$$

Визначивши переріз вала з найбільшим моментом крутіння, розрахуємо необхідні розміри вала.

Експериментально встановлено, що всі твірні вала повертаються на той самий куту, його величина пропорційна M та відстані між перерізами. Торцеві перерізи залишаються плоскими, контури всіх перерізів не спотворюються, радіуси поперечних перерізів після деформації не викривляються. Відстані між суміжними перерізами не змінюються. Тобто має місце деформація зсуву.

Момент крутіння в кожному перерізі врівноважується парами сил, які лежать у площині перпендикулярній осі вала. Тобто сили, які врівноважують M та відповідні до них напруження, є дотичними для перерізу та перпендикулярними до осі вала.

Закон Гука для деформації зсуву

$$\tau = G\gamma, \quad (Д2.17)$$

де

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (Д2.18)$$

G називається модулем пружності при зсуві.

Кут γ характеризує величину деформації (рис. Д2.5).

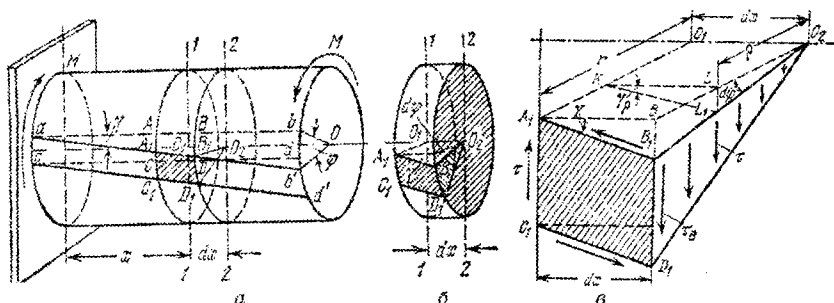


Рис. Д2.5. Деформація крутіння:

a — вал, що скручується; b — елемент валу довжиною dx ;
 c — сектор елемента для пояснення зсуву

Розподіл дотичних напружень залежно від відстаней ρ від осі наведено на рис. Д2.6.

$$\tau = \frac{M_{кр}}{I_\rho} \rho, \quad I_\rho = \int_S \rho^2 dS, \quad (Д2.19)$$

де I_ρ — полярний момент інерції перерізу валів.

$$\tau_{\max} \Big|_{\rho=\rho_{\max}=r} = \frac{M_{кр} r}{I_\rho} = \frac{M_{кр}}{W_\rho}. \quad (Д2.20)$$

Відношення $W_\rho = I_\rho / r$ називається моментом опору при крутінні. I_ρ має розмірність $[м^4]$, а W_ρ вимірюється в $[м^3]$.

Для суцільних валів

$$I_\rho = \frac{\pi r^4}{2} \approx 0,1d^4; \quad W_\rho = \frac{\pi r^3}{2} \approx 0,2d^3. \quad (Д2.21)$$

Для трубчастих валів

$$I_\rho = \frac{\pi}{2}(R^4 - r^4) \approx 0,1(D^4 - d^4); \quad W_\rho = \frac{\pi(R^4 - r^4)}{2R} \approx 0,2d^3. \quad (Д2.22)$$

Умова міцності при крутінні

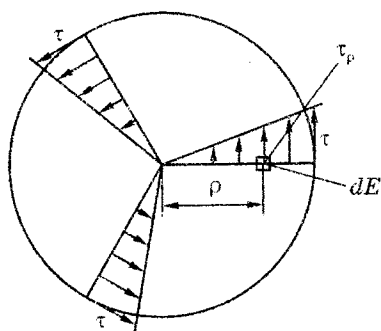


Рис. Д2.6. Розподіл дотичних напружень

$$\tau_{\max} \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\rho}} \leq [\tau]. \quad (\text{Д2.23})$$

Тоді за відомими $M_{\text{кр}}$ і $[\tau]$ можна визначити необхідний W_{ρ} перерізу, а потім і необхідний d вала. Зазвичай $[\tau] \approx 0,5 \dots 0,6[\sigma]$.

Деформація вала (торсіона) довжиною l визначається за формулою аналогічною закону Гука:

$$\varphi = \frac{M_{\text{кр}} l}{GI_{\rho}}, \quad (\text{Д2.24})$$

GI_{ρ} називається жорсткістю при крутінні. Кут φ тим менший, чим більша жорсткість.

Практикою експлуатації макровалів встановлені припустимі значення $[\varphi]$, які не рекомендується перевищувати:

- для звичайних умов $[\varphi] = 0,3^{\circ}$ до 1 м довжини вала;
- для змінних навантажень $[\varphi] = 0,25^{\circ}$;
- для ударних $[\varphi] = 0,15^{\circ}$.

Тоді розміри вала необхідно визначати не тільки за умовами міцності (Д2.21), але й за умовами жорсткості

$$\varphi \leq \frac{M_{\text{кр}} l}{GI_{\rho}} \leq [\varphi]. \quad (\text{Д2.25})$$

Звідки

$$r \geq \sqrt[4]{\frac{2M_{\text{кр}} l}{\pi G [\varphi]}}. \quad (\text{Д2.26})$$

Деформація згину балки (стрижня) із прямою віссю відбувається, якщо до нього прикладені в площинах, які проходять через вісь стрижня, пари сил або сили, перпендикулярні до його осі. На балку діють прикладені сили та реакції опор.

Для розрахунку реакцій опор необхідно розглянути їхню структуру. Вони бувають (рис. Д2.7, с. 322):

- із шарнірно-нерухомими опорами (опора А);
- із шарнірно-рухомими опорами (опора В);
- із затисненим кінцем.

Для визначення реакцій опор користуються трьома рівняннями рівноваги $\sum P_x = 0$; $\sum M_A = 0$ та $\sum M_B = 0$.

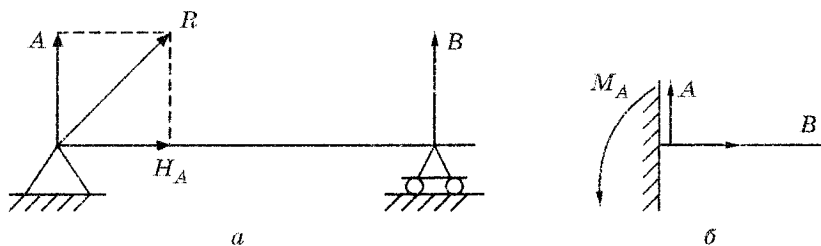


Рис. Д2.7. Типи опор: *a* — із шарнірно-нерухомими опорами (опора А); із шарнірно-рухомими опорами (опора В);
б — із затисненим кінцем

Умова $\sum P_y = 0$ використовується для перевірки правильності розрахунків. Для визначення небезпечного перерізу одержимо формули розрахунків напружень σ та τ у довільному перерізі. Для цього відкинемо одну частину балки та замінимо її дію на частину, що залишилася, уявними напруженнями, а зовнішні сили та моменти, які діють на цю частину балки, приводяться до стандартної форми у вигляді сили, що прикладена в центрі ваги перерізу, що розглядається, та пари сил, які прикладені до перерізу та опори, тобто пари сил із плечем x (рис. Д2.8). При цьому для лівої частини балки додатним напрямком вважається: для сили — вгору, а для моменту — за годинниковою стрілкою; а для правої частини балки навпаки: для сили — донизу, для моментів — проти годинникової стрілки.

Щоб одержати для σ і τ загальні формули, придатні за будь-якого X , зручно щоб система зовнішніх сил, які діють на частину, що залишилася, була завжди стандартного, одноманітного виду. Для цього всі сили та моменти, що діють на частину балки, приводяться

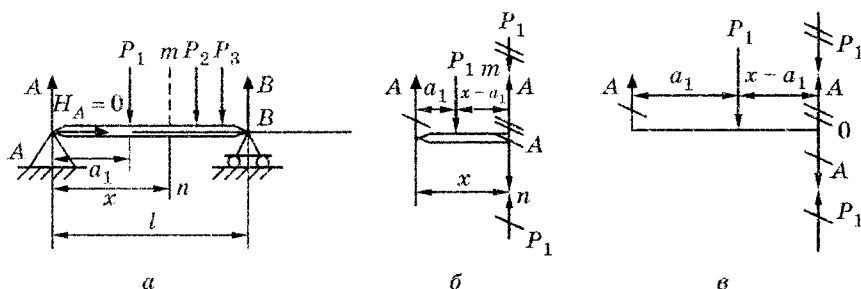


Рис. Д2.8. Стандартний вид зовнішніх впливів на балку:
a — вихідна балка; *б* — заміна опорів і відкинutoї частини балки реакціями; *в* — приведення до стандартного вигляду

до сили, прикладеної в центрі ваги перерізу, що розглядається, і пари сил, прикладених до перерізу та сили реакції опори, тобто пари сил із плечем X (рис. Д2.8, *а, б, в*).

$$M = Fx - P_1(x - a_1), \quad (\text{Д2.27})$$

$$Q = A - P_1. \quad (\text{Д2.28})$$

Момент пари M , прикладений до частини балки, що залишилася, називається згинальним моментом в обраному перерізі. Він дорівнює сумі моментів всіх зовнішніх сил, які прикладені до розглянутої частини балки відносно центра ваги перерізу. Сила Q , що прагне зрушити частину балки, що залишилася, відносно відкинутої частини, називається поперечною силою в даному перерізі. Вона дорівнює сумі проєкцій всіх зовнішніх сил, прикладених до частини балки, що залишилася, на нормаль до її осі.

Знаки M і Q можна зв'язати з характером деформації балки під дією зовнішніх сил. Якщо у перерізі m момент M додатний, то балка в цьому перерізі згинається опуклістю вниз, а якщо від'ємний, то балка згинається опуклістю догори (рис. Д2.9, *а*). У перерізі, у якому $M = 0$, кривизна балки змінює свій напрям, тобто вісь балки в цьому перерізі має точку перегину.

Поперечна сила Q вважається додатною, якщо зовнішні сили, які лежать лівише за проведений переріз, спрямовані вгору, а праворуч від нього — вниз. Відповідно до цього правила напрямок Q збігається з напрямком дотичних напружень τ , з яких складається поперечна сила. На рис. Д2.9, *б* представлено деформації в перерізі m під дією додатних та від'ємних поперечних сил.

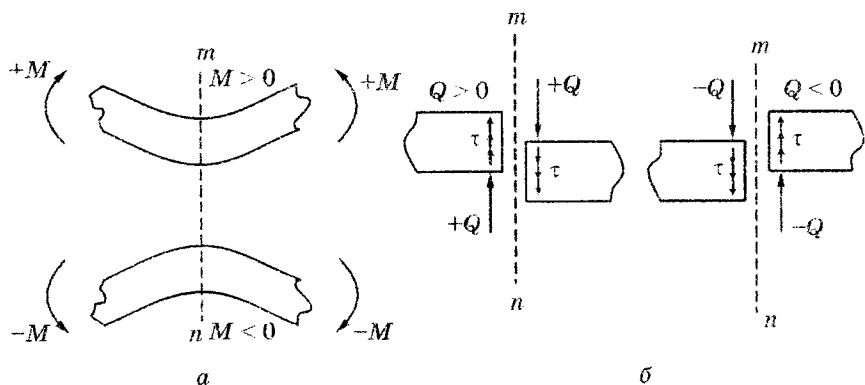


Рис. Д2.9. Знаки згинальних моментів та поперечних сил:
а — визначення знаків моментів; *б* — визначення поперечних сил

Розглянемо рис. Д2.10. Нормальні напруження σ не можуть зрівноважити силу Q , тому що спрямовані перпендикулярно до неї.

Але вони можуть скластися в пару, що зрівноважує момент M , тому що спрямована паралельно до площини симетрії балки, у якій лежить M . Таким чином, σ залежить тільки від M . З іншого боку, дотичні напруження τ не можуть зрівноважити пару M , тому що вони

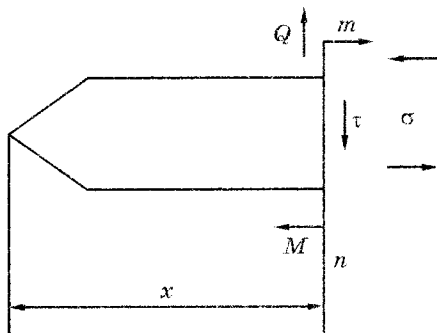


Рис. Д2.10. Напруження, що виникають у балці

лежать у площині mn , що перпендикулярна до площини дії згинального моменту, силу ж Q вони можуть зрівноважувати, тому що лежать у тій же самій площині mn , що й вона. Таким чином, Q зрівноважується тільки τ , сума яких повинна бути рівною та протилежно спрямованою до сили Q . Тобто, $\sigma = f_2(M)$; $\tau = f_2(Q)$.

Експериментальними дослідженнями згину прямокутних балок підтверджений ряд допущень:

1. При чистому згині поперечні перерізи, які були плоскими до деформації, залишаються плоскими й під час деформації.
2. Поздовжні волокна не тиснуть одне на одне, а під дією нормальних напружень піддаються простому лінійному розтягуванню або стиску.
3. Деформації волокон не залежать від їхнього положення по ширині перерізу, нормальні напруження змінюються по висоті перерізу, а по ширині залишаються однаковими.

Розглянемо цей найпростіший випадок чистого згину (рис. Д2.11).

У кожній точці поперечного перерізу діють нормальні напруження σ . Виділимо навколо якої-небудь точки з координатами x і z елементарну площинку d та позначимо силу, що діє на неї, як $dN = \sigma dF$. Частина балки, що розглядається, перебуває в рівновазі під дією зовнішніх сил, що утворюють пару M , та нормальних сил d , які замінюють відкинуту частину балки. Для рівноваги ця система повинна задовольняти шести рівнянням статyki:

$$\sum X = 0; \sum Y = 0; \sum Z = 0;$$

$$\sum M_x = 0; \sum M_y = 0; \sum M_z = 0.$$

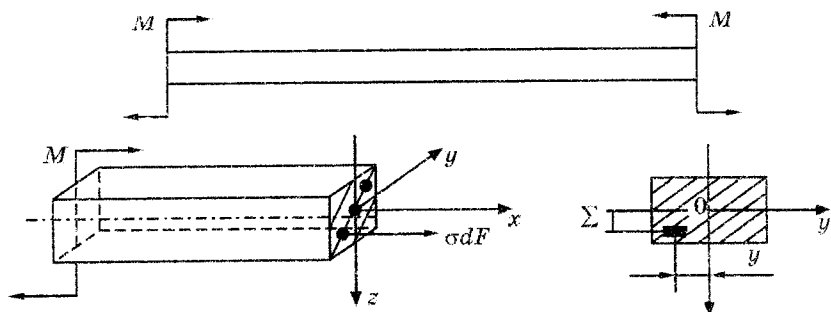


Рис. Д2.11. Дія чистого згину балки

$$\int_F \sigma dF = dN = 0, \text{ проектується на осі } O_y \text{ та } O_z \text{ у точку.}$$

Пара M лежить у площині O_z і тому моментів відносно осей O_x та O_z не утворює.

$\sum M_x = 0$ перетворюється в тотожність, бо сили $dN = \sigma dF$ паралельні до осі O_x .

$$\sum M_y = 0; M - \sum dNZ = 0 \text{ або } M - \int_F \sigma dFZ = 0. \quad (\text{Д2.29})$$

$$M = \int_F \sigma Z dF. \quad (\text{Д2.30})$$

$$\sum M_x = 0; \sum M_x = 0 \text{ або } \sum M_x = 0. \quad (\text{Д2.31})$$

Таким чином, можна використовувати тільки три рівняння із шести.

$$\sum M_x = 0 \text{ або } \sum M_x = 0. \quad (\text{Д2.32})$$

$$\sum M_x = 0 \text{ або } \sum M_x = 0. \quad (\text{Д2.33})$$

$$\sum M_x = 0 \text{ або } \sum M_x = 0. \quad (\text{Д2.34})$$

Але поки ще невідомий закон зміни σ від відстані z площинки d від нейтральної осі. Невідомо й положення самої нейтральної осі.

Виділимо на балці, що згинається, елемент довжиною dx . Видгляд цього елемента після деформації зображено на рис. Д2.12. Знайдемо збільшення довжини волокна AB , що розташоване на відстані z від нейтрального шару та розтягнуте напруженнями σ .

$$dx = \overset{\sim}{0}_1 0_2 = \rho da. \quad (\text{Д2.35})$$

$$\overset{\sim}{AB} = (\rho + z) da. \quad (\text{Д2.36})$$

$$\Delta l = (\rho + z)da - \rho da = z da. \quad (D2.37)$$

Відносне подовження дорівнює

$$\varepsilon = \frac{z da}{\rho da} = \frac{z}{\rho}, \quad (D2.38)$$

де ρ — радіус кривизни нейтрального шару балки.

Вважаючи, що при згині волокна не тиснуть одне на одне, приходимо до висновку, що волокна піддаються простому лінійному розтягуванню або стиску і для його визначення можна скористатися законом Гука

$$\sigma = \varepsilon E \text{ або } \sigma = \frac{Ez}{\rho}. \quad (D2.39)$$

Останнє рівняння свідчить про лінійну залежність нормальних напружень від відстані точки до нейтрального шару z . На нейтральній осі $z = 0$ і $\sigma = 0$, при переході в зону стиску (вище нейтральної осі) σ разом з z змінює знак на мінус і збільшується за абсолютним значенням у міру віддалення від нейтральної осі (рис. D2.13).

Підставивши значення в рівняння

$$\sum x = 0 \text{ або } \int \frac{F}{\rho} z dF = 0, \quad (D2.40)$$

знаходимо

$$\int z dF = 0, \text{ тому що } \frac{F}{\rho} = \text{const} \neq 0. \quad (D2.41)$$

Цей інтеграл є *статичним моментом площі* перерізу відносно нейтральної осі, що перетворюється в нуль тільки тоді, коли вісь проходить через центр ваги перерізу. Центр ваги перерізу лежить на осі симетрії O_z та осі O_x стрижня. Таким чином, ми визначили положення нейтральної осі та нейтрального шару.

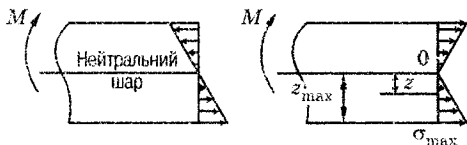


Рис. D2.13. Розподіл нормальних напружень по висоті балки

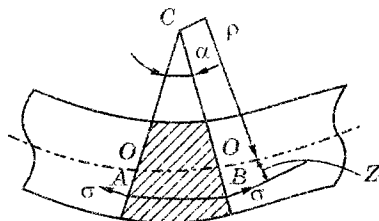
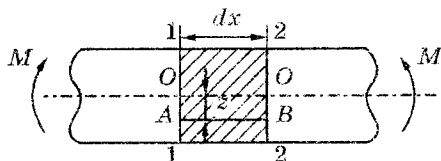


Рис. D2.12. Згин елемента балки

Скориставшись умовою

$$\sum M_z = 0; \int_F \frac{E}{\rho} zy dF = 0 \text{ або } \frac{E}{\rho} \int_F zy dF = 0, \quad (\text{Д2.42})$$

знаходимо

$$\int_F zy dF = 0. \quad (\text{Д2.43})$$

Цей інтеграл є відцентровим моментом інерції відносно осей y і z . Для симетричних відносно осі перерізів він дорівнює нулю. При виконанні цієї умови деформація згину буде плоскою.

Нарешті

$$\sum M_y = 0; \int_F \frac{E}{\rho} z^2 dF = M \text{ або } M = \frac{E}{\rho} \int_F z^2 dF. \quad (\text{Д2.44})$$

$$I_y = \int_F z^2 dF. \quad (\text{Д2.45})$$

Для балки прямокутного перерізу

$$I_y = 2 \int_F z^2 dF = \int_0^{h/2} z^2 b dz = \frac{bh^3}{12}. \quad (\text{Д2.46})$$

Цей інтеграл, тобто сума добутоків площ елементарних площинок на квадрати відстаней від нейтральної осі, називається вісним або екваторіальним моментом інерції перерізу відносно осі I_y .

Тоді

$$\frac{EI_y}{\rho} = M \text{ або } \frac{E}{\rho} = \frac{M}{I_y}. \quad (\text{Д2.47})$$

$$\sigma = \frac{Mz}{I_y}. \quad (\text{Д2.48})$$

Добуток EI_y називається жорсткістю при згині.

Таким чином, нормальні напруження в довільній точці перерізу прямо пропорційні згинальному моменту та відстані точки від нейтральної осі та обернено пропорційні вісному моменту інерції перерізу відносно нейтральної осі.

Для перевірки міцності балки за нормальними напруженнями необхідно знайти найбільш напружені на розтягування та стиск перерізи та підставити в них M_{\max} і Z_{\max} .

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} Z_{\max}}{I_y} \quad (\text{Д2.49})$$

або

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{(I_y/Z_{\max})} = \frac{M_{\max}}{W}, \quad (\text{Д2.50})$$

де $W = I_y/Z_{\max}$ — вісний момент опору перерізу (рис. Д2.14).

Умова міцності

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma]. \quad (\text{Д2.51})$$

Тоді

$$W \geq \frac{M_{\max}}{[\sigma]}. \quad (\text{Д2.52})$$

При симетричному перерізі бай-
дуже, яку міцність перевіряти для
розтягнутих або стислих волокон, тому що для тих і інших W один
і той самий.

За гіпотезою Журавського напрямком всіх τ , які діють на пло-
щинках d , що перебувають на
тій самій відстані z від ней-
тральної осі y , рівні між со-
бою. Відповідно до власти-
вості парності τ необхідно
очікувати появи таких же τ'
вдovж осі x , $\tau = \tau'$
(рис. Д2.15).

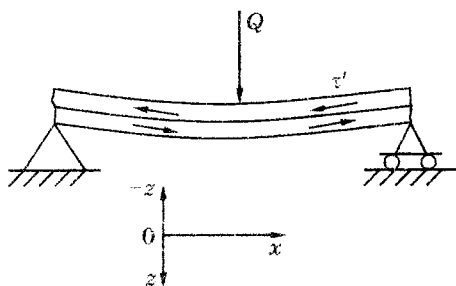


Рис. Д2.15. Парність моменту
напружень

Нормальні напруження, які діють у перерізі (вдovж осі x)

$$\sigma = \frac{Mz_1}{I_y},$$

$$dN_1 = \frac{Mz_1}{I_y} dF.$$

На всю грань ABCD буде діяти сила N_1 (рис. Д2.16):

$$N_1 = \int_{F_1} \frac{Mz_1}{I_y} dF = \frac{M}{I_y} \int_{F_1} z_1 dF. \quad (\text{Д2.53})$$

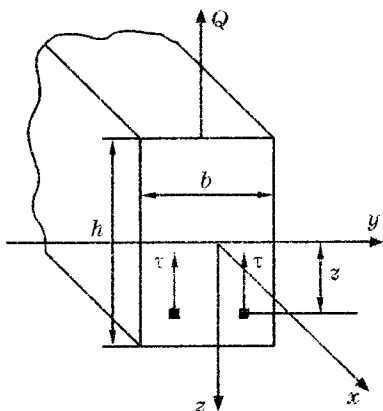


Рис Д2.14. До розрахунку
осевого моменту опору

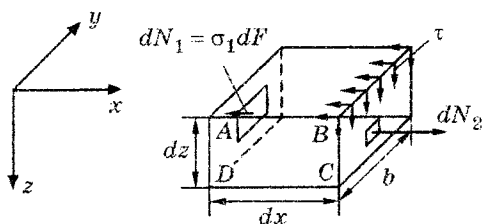


Рис. Д2.16. Складання нормальних напружень

$S(z) = \int_{F_1} z_1 dF$ — статичний момент щодо нейтральної осі у частині площі перерізу від z до $h/2$ (рис. Д2.17).

Тоді

$$N_1 = \frac{Ms(z)}{I_y}$$

Площа GFAD дорівнює $b \left(\frac{h}{2} - z \right)$.

$$Z_k = \left(\frac{\frac{h}{2} - z}{2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2} + z \right). \quad (Д2.54)$$

$$S_y = b \left(\frac{h}{2} - z \right) \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2} + z \right) = \frac{bh^2}{8} \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right). \quad (Д2.55)$$

Аналогічно на грань BC діє сила

$$N_2 = \frac{(M + dM)S_y}{I_y}. \quad (Д2.56)$$

Різниця нормальних сил

$$N_2 - N_1 = \frac{dMS_y}{I_y} \quad (Д2.57)$$

зрівноважується при проектуванні на вісь дотичною силою dT (рис. Д2.18).

Тоді

$$\tau = \frac{dMS_y}{dx I_y}. \quad (Д2.58)$$

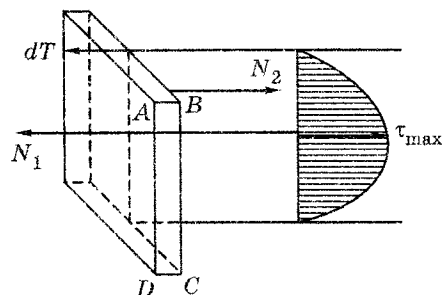


Рис. Д2.18. Розподіл дотичних напружень по висоті балки

Але $\frac{dM}{dx} = Q$, тому

$$\tau = \frac{QS_y}{I_y b}. \quad (Д2.59)$$

Цією же формулою визначаються також дотичні напруження на відстані z по перерізу, перпендикулярному до осі балки.

Для прямокутного перерізу балки

$$I_y = \frac{bh^3}{12},$$

тоді

$$\tau = \frac{Qbh^2}{bbh^3} \frac{12}{8} \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right) = \frac{3Q}{2bh} \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right).$$

Таким чином, дотичні напруження τ змінюються по висоті прямокутного перерізу за параболічним законом. Максимум досягається за $z = 0$:

$$\tau = \frac{3Q}{2bh}$$

Тобто, найбільші дотичні напруження при прямокутному профілі балки в 1,5 рази більші за середні.

Умови міцності балки на згин визначаються рівняннями:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma],$$

а також за найбільшими дотичними напруженнями

$$\tau_{\max} = \frac{Q_{\max} S_{\max}}{W} \leq [\tau].$$

Фундаментальні константи

Числові значення констант наведені відповідно до ГСС СДП-76 «Фундаментальні фізичні константи» (табл. Д3.1). Число в дужках після числового значення величини відповідає стандартному відхиленню цього значення для останніх зазначених значущих цифр.

Таблиця Д3.1

Значення фундаментальних фізичних констант

Константа	Позначення	Числове значення
Гравітаційна постійна	G	$6,6720 (41) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Швидкість світла у вакуумі	c_0	$299\,792\,458 (1,2) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Магнітна постійна	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1} = 1,256\,637\,06144 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Електрична постійна	ϵ_0	$8,854\,187\,82 (7) \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Постійна Планка	h	$6,626\,176 (36) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{Гц}^{-1}$
	$h/2\pi$	$1,054\,588\,7 (57) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Маса спокою електрона	m_e	$5,485\,802\,6 (21) \cdot 10^{-4} \text{ а. о. м.}$
		$9,109\,534 (47) \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Маса спокою протона	m_p	$1,672\,648\,5 (86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
		$1,007\,276\,470 (11) \text{ а. о. м.}$
Маса спокою нейтрона	m_n	$1,674\,954\,3 (86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
		$1,008\,665\,012 (37) \text{ а. о. м.}$
Маса спокою мюона	m_μ	$1,883\,566 (11) \cdot 10^{-28} \text{ кг}$ $0,113\,429\,20 (26) \text{ а. о. м.}$
Відношення маси протона до маси електрона	m_p/m_e	$1\,836,151\,52 (70)$
Відношення маси мюона до маси електрона	m_μ/m_e	$206,768\,65 (47)$
Елементарний заряд	e	$1,602\,189\,2 (46) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Відношення заряду електрона до його маси	e/m_e	$1,758\,804\,7 (49) \cdot 10^{11} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$
Магнетон Бору	$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_e}$	$9,274\,078 (36) \cdot 10^{-21} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$

Константа	Позначення	Числове значення
Ядерний магнетон	$\mu_N = \frac{eh}{4\pi m_p}$	$5,050\ 824\ (20) \cdot 10^{-27}$ Дж·Тл ⁻¹
Магнітний момент електрона	μ_e	$9,284\ 832\ (36) \cdot 10^{-24}$ Дж·Тл ⁻¹
Магнітний момент протона	μ_p	$1,410\ 617\ 1\ (55) \cdot 10^{-26}$ Дж·Тл ⁻¹
Магнітний момент мюона	μ_μ	$4,490\ 474\ (18) \cdot 10^{-26}$ Дж·Тл ⁻¹
Магнітний момент протона в магнетонах Бору	μ_p/μ_B	0,001 521 032 209 (16)
Магнітний момент протона в ядерних магнетонах	μ_p/μ_N	2,792 845 6 (11)
Відношення магнітного моменту електрона до магнітного моменту протона	μ_e/μ_p	658,210 688 0 (66)
Відношення магнітного моменту мюона до магнітного моменту протона	μ_μ/μ_p	3,183 340 2 (72)
g-фактор вільного електрона	$g_e = 2 \frac{\mu_e}{\mu_B}$	2·1,001 159 656 7 (35)
g-фактор вільного мюона	g_μ	2·1,001 166 16 (31)
Гіромагнітне відношення протона	γ_p	$2,675\ 198\ 7\ (75) \cdot 10^8$ с ⁻¹ ·Тл ⁻¹
Постійна діаманітного екранування (Н ₂ O, сферичний зразок)	$1 + \sigma(\text{H}_2\text{O})$	1,000 025 637 (67)
Магнітний момент протона в ядерних магнетонах (Н ₂ ПРО, сферичний зразок, без поправки на діаманетизм)	μ'_p/μ_N	2,792 774 0 (11)
Гіромагнітне відношення протона (Н ₂ ПРО, сферичний зразок, без поправки на діаманетизм)	γ'_p $\gamma'_p/2\pi$	$2,675\ 130\ 1\ (75) \cdot 10^8$ с ⁻¹ ·Тл ⁻¹ 42,576 02 (12) МГц·Тл ⁻¹
Маси атомів в а. о. м.:		
Протон	ρ	1,007 276 470 (11)
Водень	^1H	1,007 825 036 (11)
Дейтерій	^2H	2,014 101 795 (21)
Гелій	^4He	4,002 603 267 (48)

Константа	Позначення	Числове значення
Постійна Авогадро	N_A	$6,022\,045\,(31) \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Постійна Фарадея	F	$96\,484,56\,(27)$ Кл · моль ⁻¹
Універсальна газова постійна	R	$8,314\,41\,(26)$ Дж · моль ⁻¹ · К ⁻¹
Об'єм грам-молекули ідеального газу при нормальних умовах (101 325 Па, $T_0 = 273,15$ К)	$V_m = \frac{RT_0}{P_0}$	$22,413\,83\,(70) \cdot 10^{-3}$ м ³ · моль ⁻¹
Постійна Больцмана	$k = R/N_A$	$1,380\,662\,(44) \cdot 10^{-23}$ Дж · К ⁻¹
Постійна Стефана — Больцмана	σ	$5,670\,32\,(71) \cdot 10^{-8}$ Вт · м ⁻² · К ⁻⁴
Перша постійна випромінювання	$c_1 = 2\pi h c^2$	$3,741\,832\,(20) \cdot 10^{-16}$ Вт · м ²
Друга постійна випромінювання	$c_2 = hc/k$	$0,014\,387\,86\,(45)$ м · К
Постійна тонкої структури	$\alpha = \frac{\mu_0 c e^2}{2h}$ α^{-1}	$0,007\,297\,350\,6\,(60)$ $137,036\,04\,(11)$
Постійна Ридберга	R_∞	$10\,972\,731,77\,(83)$ м ⁻¹
Радіус Бора	$a_0 = \frac{\alpha}{4\pi R_\infty}$	$0,529\,177\,06\,(44) \cdot 10^{-10}$ м
Класичний радіус електрона	$r_e = \frac{\alpha \lambda_c}{2\pi}$	$2,817\,938\,0\,(70) \cdot 10^{-15}$ м
Відношення Джозефсона	$2e/h$	$483,593\,9\,(13)$ ТГц · В ⁻¹
Квант магнітного потоку	$\Phi_0 = h/2e$	$2,067\,850\,6\,(54) \cdot 10^{-15}$ Вб
Квант циркуляції	$h/2m_e$	$3,636\,945\,5\,(60) \cdot 10^{-4}$ Дж · с · кг ⁻¹
Комптонівська довжина хвилі електрона	$\lambda_c = \alpha^2/2R_\infty$ $\frac{\lambda_c}{2\pi} = \alpha a_0$	$2,426\,308\,9\,(40) \cdot 10^{-12}$ м $0,386\,159\,05\,(64) \cdot 10^{-12}$ м
Комптонівська довжина хвилі протона	$\lambda_{c,p} = \frac{h}{m_p c}$	$1,321\,409\,9\,(22) \cdot 10^{-15}$ м
Комптонівська довжина хвилі нейтрона	$\lambda_{c,n} = \frac{h}{m_n c}$	$1,319\,590\,9\,(22) \cdot 10^{-15}$ м

Тензори однорідних напруг та деформацій 4-го рангу

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{ij} \text{ та } \varepsilon_{ij} = s_{ijkl} \sigma_{ij}$$

$$\varepsilon_{11} = s_{1111} \sigma_{11} + s_{1112} \sigma_{12} + s_{1113} \sigma_{13} + s_{1121} \sigma_{21} + s_{1122} \sigma_{22} +$$

$$+ s_{1123} \sigma_{23} + s_{1131} \sigma_{31} + s_{1132} \sigma_{32} + s_{1133} \sigma_{33}$$

$$\varepsilon_{12} = s_{1211} \sigma_{11} + s_{1212} \sigma_{12} + s_{1213} \sigma_{13} + s_{1221} \sigma_{21} + s_{1222} \sigma_{22} +$$

$$+ s_{1223} \sigma_{23} + s_{1231} \sigma_{31} + s_{1232} \sigma_{32} + s_{1233} \sigma_{33}$$

.....

$$\varepsilon_{33} = s_{3311} \sigma_{11} + s_{3312} \sigma_{12} + s_{3313} \sigma_{13} + s_{3321} \sigma_{21} + s_{3322} \sigma_{22} +$$

$$+ s_{3323} \sigma_{23} + s_{3331} \sigma_{31} + s_{3332} \sigma_{32} + s_{3333} \sigma_{33}$$

Рішення цих систем рівнянь відносно σ_{ij} дає значення коефіцієнтів c_{ijkl} та s_{ijkl} , виражених один через одиний.

Таблиця Д4.1

Індекси коефіцієнтів c_{ijkl} , s_{ijkl}

	σ_{11}	σ_{12}	σ_{13}	σ_{21}	σ_{22}	σ_{23}	σ_{31}	σ_{32}	σ_{33}
ε_{11}	1111	1112	1113	1121	1122	1123	1131	1132	1133
ε_{12}	1211	1212	1213	1221	1222	1223	1231	1232	1233
ε_{13}	1311	1312	1313	1321	1322	1323	1331	1332	1333
ε_{21}	2111	2112	2113	2121	2122	2123	2131	2132	2133
ε_{22}	2211	2212	2213	2221	2222	2223	2231	2232	2233
ε_{23}	2311	2312	2313	2321	2322	2323	2331	2332	2333
ε_{31}	3111	3112	3113	3121	3122	3123	3131	3132	3133
ε_{32}	3211	3212	3213	3221	3222	3223	3231	3232	3233
ε_{33}	3311	3312	3313	3321	3322	3323	3331	3332	3333

Через симетрію тензорів напруг і деформацій по першій парі індексів ij , а також другій парі — kl однаковими виявляються коефіцієнти 12 та 21, 13 та 31, 23 та 32 рядів по першій парі індексів, тобто $9 \times 3 = 27$ коефіцієнтів, а також коефіцієнти 12 та 21, 13 та 31, 23 та 32 стовпців другої пари індексів, тобто $6 \times 3 = 18$ коефіцієнтів.

Разом, незалежних коефіцієнтів у тензорах залишається $81 - 27 - 18 = 36$.

Завдяки симетричності s_{ijkl} та c_{ijkl} по перших двох та останніх двох індексах компоненти напруг та компоненти деформацій записуються з одним індексом, що пробігає значення від 1 до 6:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{31} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_6 & \sigma_5 \\ \sigma_6 & \sigma_2 & \sigma_4 \\ \sigma_5 & \sigma_4 & \sigma_3 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{23} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & \frac{1}{2}\varepsilon_6 & \frac{1}{2}\varepsilon_5 \\ \frac{1}{2}\varepsilon_6 & \varepsilon_2 & \frac{1}{2}\varepsilon_4 \\ \frac{1}{2}\varepsilon_5 & \frac{1}{2}\varepsilon_4 & \varepsilon_3 \end{bmatrix}. \quad (\text{Д 4.1})$$

В s_{ijkl} та c_{ijkl} два перших індекси можна об'єднати в один, що пробігає значення від 1 до 6; два останніх можна об'єднати тим же способом; у підсумку виходить наступна схема заміни індексів:

тензорні позначення: 11 22 33 23, 32 31, 13 12, 21;
матричні позначення: 1 2 3 4 5 6.

При цьому вводяться множники 2 та 4 у такий спосіб:

$s_{ijkl} = s_{mn}$, коли m та n дорівнюють 1, 2 або 3;

$2s_{ijkl} = s_{mn}$, коли або m або n дорівнюють 4, 5 або 6;

$4s_{ijkl} = s_{mn}$, коли i та j дорівнюють 4, 5 або 6.

Рівняння деформацій для ε_{11} та ε_{23} записані в розгорнутому вигляді

$$\begin{array}{l} \varepsilon_{11} = s_{1111}\sigma_{11} + s_{1112}\sigma_{12} + \\ + s_{1122}\sigma_{22} + s_{1113}\sigma_{13} + \\ + s_{1121}\sigma_{21} + s_{1123}\sigma_{23} + \\ + s_{1131}\sigma_{31} + s_{1132}\sigma_{32} + \\ + s_{1133}\sigma_{33} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \varepsilon_{23} = s_{2311}\sigma_{11} + s_{2312}\sigma_{12} + \\ + s_{2313}\sigma_{13} + s_{2321}\sigma_{21} + \\ + s_{2322}\sigma_{22} + s_{2323}\sigma_{23} + \\ + s_{2331}\sigma_{31} + s_{2332}\sigma_{32} + \\ + s_{2333}\sigma_{33}. \end{array} \right.$$

У матричному позначенні ці два рівняння приймають вигляд

$$\begin{array}{l} \varepsilon_1 = s_{11}\sigma_1 + \frac{1}{2}s_{16}\sigma_6 + \frac{1}{2}s_{15}\sigma_5 + \\ + \frac{1}{2}s_{16}\sigma_6 + s_{12}\sigma_2 + \frac{1}{2}s_{14}\sigma_4 + \\ + \frac{1}{2}s_{15}\sigma_5 + \frac{1}{2}s_{14}\sigma_4 + s_{13}\sigma_3, \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \frac{1}{2}\varepsilon_4 = \frac{1}{2}s_{41}\sigma_1 + \frac{1}{4}s_{46}\sigma_6 + \frac{1}{4}s_{45}\sigma_5 + \\ + \frac{1}{4}s_{46}\sigma_6 + \frac{1}{2}s_{42}\sigma_2 + \frac{1}{4}s_{44}\sigma_4 + \\ + \frac{1}{4}s_{45}\sigma_5 + \frac{1}{4}s_{44}\sigma_4 + \frac{1}{2}s_{43}\sigma_3. \end{array} \right.$$

або

$$\varepsilon_1 = s_{1j}\sigma_j \text{ та } \varepsilon_4 = s_{4j}\sigma_j$$

Отже, у загальному випадку рівняння деформацій можна записати більш коротко таким чином:

$$\varepsilon_i = s_{ij}\sigma_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6). \quad (\text{Д } 4.2)$$

Множники 2 та 4 уводяться у визначення s_{ij} тому, що таким шляхом вдається уникнути появи цих множників у рівнянні деформацій та його можна записати в компактній формі.

Для c_{ijkl} множники 2 та 4 вводити не потрібно. Тому запишемо просто

$$c_{ijkl} = c_{mn} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3; \quad m, n = 1, 2, \dots, 6)$$

та

$$\sigma_i = c_{ij}\varepsilon_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6). \quad (\text{Д } 4.3)$$

Таблиці s_{ij} та c_{ij} , записані у вигляді квадратів

$$\left(\begin{array}{cccccc} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{array} \right) \quad \text{і} \quad \left(\begin{array}{cccccc} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{array} \right), \quad (\text{Д } 4.4)$$

утворюють матриці (s_{ij}) та (c_{ij}) . Помітимо, що тут s_{ij} та c_{ij} , незважаючи на наявність двох індексів, не є компонентами тензора другого рангу і тому не перетворюються подібно таким компонентам. Для перетворення їх до інших осей координат необхідно повернутися до тензорних позначень.

Латинський і грецький алфавіти

Латинський алфавіт

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n
o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z		

Грецький алфавіт

Αα	Ββ	Γγ	Δδ	Εε	Ζζ	Ηη
альфа	бета	гама	дельта	епсилон	дзета	ета
Θθ	Ιι	Κκ	Λλ	Μμ	Νν	Ξξ
тета	йота	капа	лямбда	мю	ню	ксі
Οο	Ππ	Ρρ	Σσ	Ττ	Υυ	
омікрон	пі	ро	сигма	тау	іпсилон	
Φφ	Χχ	Ψψ	Ωω			
фі	хі	псі	омега			

Проектування елементів мікросистемної техніки

Д6.1. Мова опису елементів мікросистем VHDL-AMS

Розширення стандарту мови VHDL (VHDL-AMS — Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language Analog-Mixed Signals) призначене для опису та моделювання як цифрових, так і аналогових приладів, причому таких, що використовують не тільки електричні сигнали, але також оптичні, хімічні, механічні та ін. Це є важливим кроком на шляху створення універсальних САПР, що здійснюють автоматичну компіляцію проектних рішень на основі високорівневих текстових описів елементів ІС та компонентів МСТ.

Основна мова VHDL-1076-1993 розроблена організацією IEEE для опису та моделювання цифрових швидкодіючих електронних систем. Однак розвиток мікросистемної техніки викликав необхідність прийняття IEEE нового стандарту — VHDL Std 1076.1-1999, який прийнято неформально називати VHDL-AMS.

Цей стандарт основної мови та розширень призначений для опису та моделювання схем та систем:

- консервативних та неконсервативних;
- безперервних та безперервно-дискретних;
- цифрових, аналогових та цифро-аналогових;
- електричних та неелектричних;
- у часовому, частотному та операторному поданнях з урахуванням характеристик шуму.

Перераховані можливості важливі при моделюванні багатьох компонентів МСТ, що являють собою змішано-сигнальні електронні або змішані електричні/неелектричні системи.

Особливості мови VHDL-AMS Std 1076.1-1999:

1) розширена структурна семантика мови передбачає: консервативність у моделях фізичних систем та допускає неконсервативність для абстрактних моделей; сполучення цифрових та аналогових портів, тобто змішано-сигнальних інтерфейсів;

2) у моделююче ядро додані: нова імітаційна модель, що підтримує безперервну поведінку на основі диференційно-алгебраїчних рівнянь (ДАУ); підсистема моделювання аналогових схем; передбачена оптимальність вирішення систем ДАУ аналоговим моделюючим ядром;

3) мова підтримує моделювання малосигнального режиму в частотному поданні, статистичне моделювання, побудову шумових моделей та їхню імітацію;

4) у порівнянні зі стандартом мови VHDL уведені нові положення в поведінковий опис схем та систем; нові інтерфейсні об'єкти та нові типи об'єктів; цикл імітації підтримує змішаний режим, а середовище моделювання доповнене новими атрибутами.

Мова VHDL-AMS підтримує всі типи даних, визначених у мові VHDL. Ці типи можна використовувати в VHDL-AMS без будь-яких додаткових посилань:

- *real* — дійсні числа;
- *integer* — цілі числа;
- *natural* — невід'ємні цілі числа;
- *positiv* — додатні цілі числа;
- *bit* — бітовий тип {'0', '1'};
- *boolean* — логічний тип даних {false, true};
- *vector* — масив типу *real*;
- *bitvector* — масив типу *bit*;
- *time* — фізичний тип «час».

Крім того, для моделювання аналогових систем в VHDL-AMS передбачені додаткові типи даних, що описують різні фізичні параметри (*domain*): *electricalsystems*; *mechanicalsystems*; *fluidicsystems*; *radiantsystems*; *thermalsystems*; *chemicalsystems*.

Додаткові типи даних розташовуються в окремих пакетах.

У мові VHDL-AMS визначені наступні класи даних.

1. *Constant* — константи. Значення константи визначається при її оголошенні та не може бути змінене. Константи можуть мати будь-який з підтримуваних типів даних, включаючи користувальницькі.

2. *Variable* — змінні. Значення змінної змінюється стільки разів, скільки зустрічається присвоювання даної змінної. Змінні можуть мати будь-які з підтримуваних типів даних.

3. *Signal* — сигнали. Сигнали представляють значення, що передаються по провідниках та визначаються присвоєнням сигналів (відмінним від присвоєння змінних).

4. *Quantity* — невідомі. Значення невідомим привласнюються в результаті рішення диференціальних та алгебраїчних рівнянь. Система моделювання аналогової частини схеми виконує попередньо для всіх залежних від часу невідомих у різних рівняннях диференціальної частини ДАУ початкове перетворення їх у специфічні величини часу, використовуючи придатні методи дискретизації.

Quantity можуть мати тільки скалярний тип із плаваючою точкою. Розглянемо характеристики *quantity*. Характеристики складових *quantity* є просто сукупністю характеристик своїх скалярних субелементів. Поведінка кожного скалярного субелемента не залежить від інших.

Невідомі можуть бути оголошені там же, де може оголошуватися сигнал, за винятком пакетів. *Quantity* можуть також бути оголошені як елементи інтерфейсу в списку портів. Інтерфейсним елементом *quantity* називається порт *quantity*, аналогічний до сигнальних портів. Інтерфейсні *quantity* мають режим, подібний до режиму сигналу інтерфейсу (IN, OUT, INOUT).

Додатково визначені наступні *quantity*:

Q'dot — похідна *quantity* *Q* за часом;

Q'integ — інтеграл від *quantity* *Q* за часом від нуля до теперішнього моменту;

Q'delayed (*t*) — значення *quantity* *Q* у попередній момент часу, що віддалений від теперішнього на фіксований інтервал (ідеальна затримка $\tau \geq 0$);

ANOW — подання поточного часу моделювання;

Q'slew (*maxrisingslope*, *maxfallingslope*) — *quantity* *Q*, похідна за часом якого (крутість фронтів) обмежена зверху вказаними значеннями;

Q'ltf (*num*, *den*) — функція інтегрального перетворення Лапласа від скалярного *quantity* *Q* як функції часу. Тут *num* — константа типу REALVECTOR, що є коефіцієнтом полінома чисельника; *den* — константа типу REALVECTOR, що є коефіцієнтом полінома знаменника. Функція перетворення Лапласа ставить у відповідність функції часу *Q* функцію частоти у вигляді відношення поліномів по ступенях операторної змінної *s*. У тимчасовій області це відповідає ДАУ з постійними коефіцієнтами. У розширенні мови функція перетворення Лапласа визначена як атрибут *quantity*, подібний до атрибутів *Q'Dot* або *Q'integ*;

Q'zoh (*T*, *initial_delay*) — дискретний еквівалент *quantity* *Q*. Тип результату збігається з типом *Q*. *T* — додатне значення дійсного типу, що задає період дискретизації; *initial_delay* — невід'ємне значення дійсного типу, що задає початковий момент дискретизації в секундах (за умовчанням встановлюється значення 0.0);

S'ramp (*tr*, *tf*) — *quantity*, що повторює сигнал *S*, але із заданими тривалостями переднього та заднього фронтів;

$S'slew (max_rising_slope, max_falling_slope)$ — quantity, що повторює сигнал S , але з похідними за часом (крутістю фронтів), обмеженими зверху вказаними значеннями;

$Q'ztf (num, den, T, initial_delay)$ — функція інтегрального Z -перетворення quantity Q як функції часу. Тут num — константа типу REAL_VECTOR, що є коефіцієнтом полінома чисельника; den — константа типу REAL_VECTOR, що є коефіцієнтом полінома знаменника; T — додатня константа типу real, що задає період дискретизації; $initial_delay$ — невід'ємна константа типу real, що визначає затримку початку дискретизації (за умовчанням встановлюється 0.0). Функція Z -перетворення ставить у відповідність функції часу Q із затримкою на константу T відношення двох поліномів від змінної $1/z$. Подібно функції перетворення Лапласа, функція Z -перетворення визначений як атрибут quantity. Перший скалярний елемент масиву знаменника повинен бути ненульовим. Тип чисельника та знаменника визначений у пакеті STANDARD як необмежений масив з натуральним індексом.

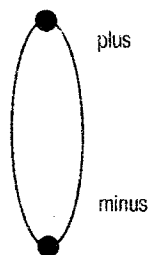
5. Terminal (термінал) описує змінні складних типів nature зі скалярними елементами, для яких повинні виконуватися закони консервативності. Branchquantity (невідома гілки) оголошується між двома терміналами.

Кожний простий тип nature представляється як певні фізичні параметри — electricalsystems, mechanicalsystems і т. д.

Існує два типи branchquantity:

- across quantity — вплив, подібний, наприклад, напрузі, температурі або тиску;
- through quantity — потоковий вплив, подібний, наприклад, струму, потоку тепла або потоку рідини.

Простий тип nature визначає властивість терміналу бути представленим парою скалярних типів із плаваючою точкою (рис. Д6.1). Наприклад:



```

SUBTYPE voltage IS real;
SUBTYPE current IS real;
NATURE electrical IS voltage ACROSS; current
THROUGH;
TERMINAL plus, minus: electrical;
QUANTITY v ACROSS i1, i2 THROUGH plus TO
minus;

```

Рис. Д6.1.
Тип nature
electrical

(v — across-величина представляє різницю напруг на терміналах $t1$ і $t2$: $v = vt1 - vt2$; $i1, i2$ —

through-величини, представляють струми у двох паралельних гілках, що течуть від *plus* до *minus*).

Наведений опис повідомляє:

- два підтипи — підтип *voltage* (напряга) та підтип *current* (струм);
- простий тип *nature electrical*;
- два термінали типу *nature electrical* та два *quantity across* і *through* між двома терміналами.

Across quantity представляють різницю потенціалів між двома терміналами, а *quantity through* описують різні паралельні гілки зі струмом (струми течуть від терміналу *plus* до терміналу *minus*).

Тип *branch_quantity* явно не оголошений. Найчастіше він відображає *nature* її терміналів. Він може бути складеним типом. У прикладі *quantity across v* — тип напруги, а тип *quantity through i1* і *i2* — струм. Як і у випадку скалярного *quantity*, характеристики складеного є поіменованим агрегатом характеристик його скалярних елементів. Термінали повинні мати елементи того ж простого типу *nature* та повинні бути узгоджені в інших специфічних особливостях. Термінали *quantity* характеризують термінал «плюс» і термінал «мінус» та напрямок гілки від плюса до мінуса (в електричній системі цей напрямок додатного протікання струму).

Термінал може бути оголошений там же, де допущене оголошення сигналів. У конкретному випадку термінал може бути елементом інтерфейсу в списку оголошення портів. Тоді він називається термінальним портом:

PORT (TERMINAL anode, cathode: electrical);

Зв'язування термінальних портів використовується для створення вузлів в ієрархічних описах.

Оголошення простого типу *nature* створює так званий опорний термінал, що поширюється на всі термінали з елементами цієї простої *nature*.

Опорний термінал *T* природи *N* визначений як *N'Reference*. Саме оголошення *T* створює два *quantity* (рис. Д6.2):

- еталонна величина *T'Reference* є *quantity across* між плюсовим терміналом *T* природи *N* та мінусовим терміналом *N'Reference* (тобто потенціалом відносно «землі»);
- сумарне *quantity T'Contribution* є *quantity through*, величина якої дорівнює сумі всіх *through quantity*, прикладених до *T* (з відповідним знаком). Якщо термінал *T* з'являється як фактичний, то сумарні *branch_quantity* відповідної природи додаються до суми.

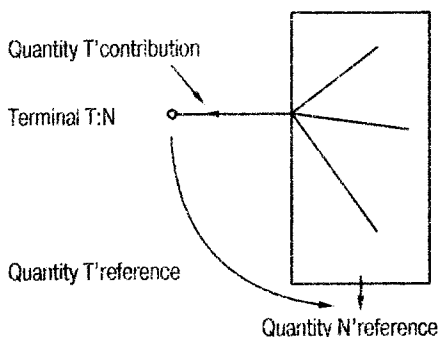


Рис. Д6.2. Опорний термінал

опорні *quantity* терміналів вузла обмежені та рівні між собою, а сумарне *quantity* термінала в корені дерева дорівнює нулю.

З наведеного вище витікає, що змінні класу *quantity* можуть бути як «вільними» змінними, тобто не пов'язаними безпосередньо з терміналами (портами та вузлами) схеми, так і змінними стану схеми (*branch_quantity*), тобто в електричному контексті — струмами та напругами гілок схеми. Для *branch_quantity* повинні виконуватися закони консервативності схеми (закони Кірхгофа).

У розділі операторів архітектурного тіла VHDL-AMS опису можуть бути присутні два типи паралельних операторів: *simultaneous_statement* і *concurrent_statement*.

Оператори *simultaneous_statement* з'явилися лише в останній версії мови та призначені спеціально для опису аналогової частини моделі.

Сукупність всіх *simultaneous_statement* — це система алгебраїчних та диференціальних рівнянь, можливо з керуючими операторами. Невідомими цієї системи є змінні класу *quantity*. Система повинна бути сумісною: число рівнянь, розв'язуваних у кожний момент часу моделювання, повинно дорівнювати числу невідомих змінних класу *quantity*. Крім рівнянь, явно записаних у розділі операторів архітектурного тіла, існують неявні рівняння, що підтримують закони консервативності системи. Ці рівняння формуються автоматично при трансляції VHDL-AMS опису для змінних класів *terminal*.

У розділі операторів опису *architecture_body* припустимо використовувати наступні типи *simultaneous_statement*.

1. Оператори *simple_simultaneous_statement* — це прості рівняння, у правій та лівій частині яких записуються вирази. Операндами виразів можуть бути змінні класів *quantity* або *signal*,

Як *T'Reference*, так і *T'Contribution* є складеними, якщо *T* складений. У цьому випадку правила відносяться до кожного скалярного елемента *T*.

Величина кожного скаляра *across quantity* обмежена різницею опорних (*reference quantity*) своїх терміналів. Вузол є комплектом скалярних терміналів, створених деревом термінальних з'єднань. Всі

константи, декларовані в архітектурному тілі, або в області видимості архітектурного тіла, а також функції та атрибути змінних. Всі операнди виразів, що входять в *simple_simultaneous_statement*, повинні мати базовий тип *real* або *integer*. Операторами в цих виразах можуть бути звичайні арифметичні оператори: +, -, *, /, **. Для зміни порядку виконання дій у виразах можна застосовувати круглі дужки.

2. Оператори *simultaneous_if_statement* і *simultaneous_case_statement* застосовуються для модифікації системи рівнянь залежно від значень керуючих змінних в умовах. У якості керуючих змінних можуть використовуватися як змінні класу *quantity*, так і *signal*. Це відкриває можливість впливу цифрової частини моделі на її аналогову частину та навпаки.

Concurrent_statement призначені для опису цифрової частини моделі. Вони слугують для формування значень дискретних сигналів та для формування ієрархічних описів. Також оператори *concurrent_statement* є засобом взаємодії аналогової та цифрової частин моделі.

До *concurrent_statement* належать наступні оператори.

Оператор процесу (*process*) визначає незалежний послідовний процес, що представляє поведінку деякої частини моделі цифро-аналогового пристрою. Виконання оператора процесу складається з повторного виконання послідовності операторів, записаних у ньому.

Оператор *selected_signal_assignment* є одним з операторів, у якому аналогові змінні впливають на цифрові сигнали. Основним способом зміни значення цифрового сигналу залежно від значення аналогової змінної є використання атрибута *'ABOVE*. Значення атрибута *q'ABOVE(v)* змінної *q* класу *quantity* являє собою неявний сигнал типу *boolean*, що приймає значення *TRUE*, якщо $q > v$, і *FALSE*, якщо $q < v$, де *v* — постійне значення.

Оператор *concurrent_break_statement* також є засобом взаємодії аналогової та цифрової частин моделі.

Мова VHDL-AMS підтримує два стилі опису моделей компонентів мікросистемної техніки:

1. Структурне моделювання (*structural modeling*) безперервних систем проводиться за допомогою змінних складених типів *nature*, причому кожний простий тип *nature* представляється як певні фізичні параметри — *electrical_systems*, *mechanical_systems* і т. д. При структурному описі модель представляється у вигляді ієрархії

пов'язаних компонентів, у якій кожний компонент являє собою певний фізичний параметр.

Поведінкове моделювання (*behavioral modeling*) безперервних систем проводиться за допомогою наборів ДАУ, що описують взаємозв'язок різних фізичних параметрів. Поведінковий опис моделі дозволяє розробнику уникнути операції декомпозиції моделі за фізичними параметрами і зосередити основну увагу на одній фізичній величині.

Д6.2. Проектування елементів МСТ у САПР Tanner Pro

Система автоматизованого проектування Tanner Pro призначена для проектування інтегральних схем та компонентів мікросистемної техніки.

До складу САПР Tanner Pro входять наступні підсистеми:

MEMSLib — бібліотека компонентів мікросистемної техніки;

S-Edit — схемний редактор;

L-Edit — топологічний редактор;

T-Spice — підсистема схемотехнічного моделювання проектів.

Бібліотека MEMSLib. Бібліотека компонентів МСТ MEMSLib містить у собі описи технологій виготовлення інтегральної електроніки та мікросистемної техніки, різні типи рухомих мікромеханічних елементів, електромеханічних перетворювачів та структурних властивостей матеріалів, а також їхні схемотехнічні моделі. У даний пакет входять елементи мікросистемної техніки, створені фірмами: MCNC-MUMPs, MOSIS-NIST, Analog Devices, CMP-Tina і т. д. У бібліотеку MEMSLib також входить пакет макромоделей елементів МСТ, які називають макросами. На рис. Д6.3 представлено схему взаємодії бібліотеки MEMSLib з підсистемами Tanner Pro.

Макроси елементів МСТ представляються у двох форматах: *.c та *.dll з вбудованими функціями редактора топології L-Edit і підсистеми схемотехнічного моделювання T-Spice. Розходження у поданні макросів у цих форматах полягає тільки у швидкості завантаження та виконання, оскільки файл у форматі *.c повинен бути спочатку інтерпретований убудованим у САПР Tanner Pro інтерпретатором мови C. У той час як макрос формату *.dll прямо завантажується в пам'ять.

На рис. Д8.68 представлено вікно бібліотеки макросів у редакторі L-Edit.

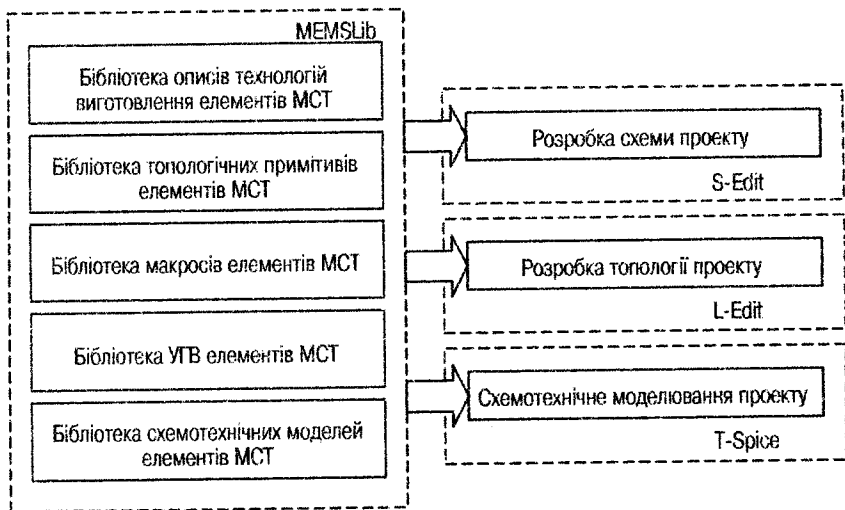


Рис. Д6.3. Взаємодія MEMSLib з підсистемами Tanner Pro

Для створення макросу у форматі *.c необхідний текстовий редактор, а для створення макросу у форматі *.dll необхідно використовувати компілятор C/C++.

Схемний редактор S-Edit дозволяє для кожного проекту сенсорного та актуаторного компонента МСТ або логічного елемента ІС створювати ієрархічну структуру, верхнім рівнем якої є файл проекту. Файл проекту містить модулі, які можуть бути двох типів: примітиви та посилання на інші модулі.

Маршрут проектування елементів МСТ у підсистемі S-Edit представлено на рис. Д6.4.

Кожний файл проекту редактори S-Edit містить проектну та установчу інформацію. У проектній частині розташовується безпосередній опис схемного рішення, а в установчій — параметри середовища розробки проекту.

Розробка схемного рішення проекту може проводитися у двох режимах: схемному та символному. У символному режимі розробник створює тільки умовне графічне відображення (УГВ) компонента МСТ, а в схемному режимі — формує міжз'єднання компонентів проекту.

Одним з важливих атрибутів УГВ компонента є його порти та властивості. Порти необхідні для завдання точок з'єднання компонентів проекту. Властивості визначають спосіб експортування компонента у файл списку зв'язків. Властивості можуть описувати

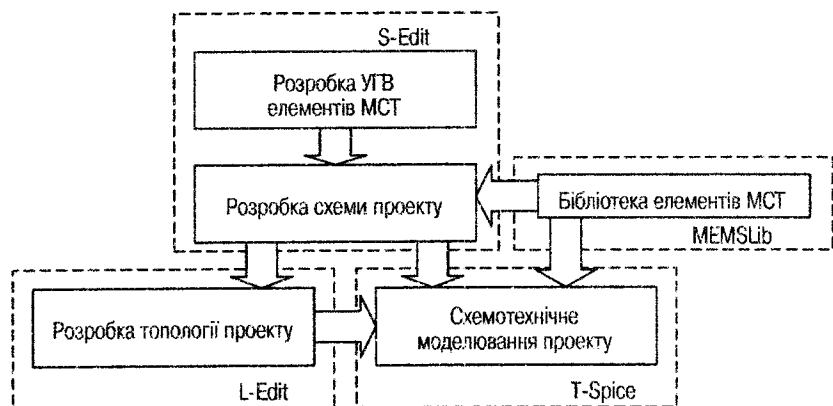


Рис. Д6.4. Маршрут проектування елементів МСТ у САПР Tanner Pro з використанням редактора S-Edit

фізичні (довжина, ширина та ін.), нефізичні параметри (тип приладу, коментарі та т. п.), а також формат виведення рядка, що описує компонент, в експортований файл списку зв'язків.

На рис. Д6.5 представлено робоче вікно редактора S-Edit із фрагментів схеми мікроелектромеханічної системи, що розробляється.

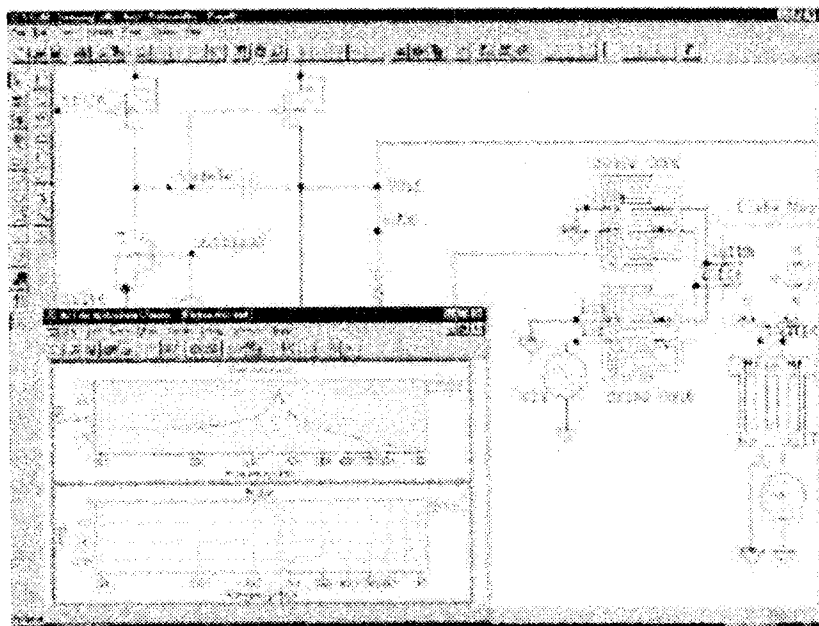


Рис. Д6.5. Робоче вікно схемного редактора S-Edit

Редактор S-Edit дозволяє експортувати схеми проекту в наступні формати:

SPICE формат (*.sp) — файл даного типу призначений для виконання схемотехнічного моделювання проекту програмами сімейства Spice, що включає у себе підсистему T-Spice САПР Tanner Pro;

TPR File (*.tpr) — файл даного формату містить список зв'язків та призначений для передачі та виконання процедури трасування й розміщення проекту в підсистемі L-Edit САПР Tanner Pro;

EDIF Netlist (*.edn) — файл даного формату містить список зв'язків і призначений для передачі проекту програми NetTran САПР Tanner Pro;

NetTran Macro File (*.mac) — файл даного формату призначений для передачі проекту програмі NetTran САПР Tanner Pro. У цей час даний тип файлу експорту використовується тільки під час роботи підсистеми S-Edit з підсистемами САПР Tanner Pro більш пізніх версій;

EDIF Schematic (*.eds) — файл даного типу містить інформацію про схему проекту; список зв'язків компонентів, ієрархію проекту та властивості всіх його компонентів. Даний тип файлу експорту дозволяє передавати проекти, розроблені в підсистемі S-Edit САПР Tanner Pro, іншим програмам автоматизованого проектування;

VHDL File (*.vhd) — даний тип файлу експорту дозволяє представити проект, розроблений у підсистемі S-Edit, у вигляді VHDL-опису.

Редактор топології L-Edit дозволяє швидко та зручно розробляти, редагувати та перевіряти на відповідність нормам обраної технології виготовлення топології елементів МСТ та інтегральних схем. Даний редактор дозволяє користувачеві підключати з бібліотеки MEMSLib або створювати самому технологічні файли, що містять інформацію про структурні та жертвовні шари, їхні електричні властивості.

Маршрут проектування елементів МСТ із використанням L-Edit у САПР Tanner Pro представлено на рис. Дб.6.

Розроблювач може створювати ієрархічну структуру проекту, верхнім рівнем якої є топологія проекту. Схема проекту, створена в схемному редакторі S-Edit, може бути експортована в редактор L-Edit. Дана підсистема САПР Tanner Pro дозволяє також виконувати синтез топології на основі списку зв'язків проекту у форматі EDIF.

Для проведення схемотехнічного моделювання проекту елемента МСТ редактор L-Edit дозволяє експортувати список зв'язків

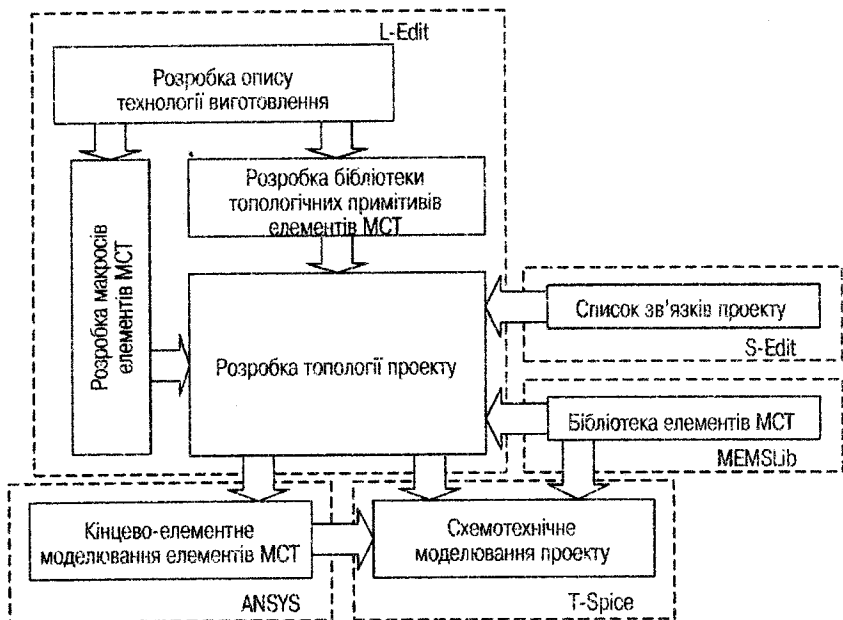


Рис. Д6.6. Маршрут проектування елементів МСТ у САПР Tanner Pro з використанням редактора L-Edit

проекту в підсистему T-Spice. Необхідною умовою є наявність необхідних бібліотек елементів МСТ у програмі T-Spice.

Для проведення кінцево-елементного моделювання елементів МСТ може бути використана зовнішня програма чисельного моделювання напружено-деформованого стану ANSYS.

Підсистема схемотехнічного моделювання T-Spice. Для визначення функціональних та експлуатаційних характеристик проектних рішень створюваних елементів МСТ, САПР Tanner Pro має убудовану підсистему схемотехнічного моделювання T-Spice.

Вихідними даними для даної підсистеми є:

- математичні моделі елементів МСТ;
- параметри моделей елементів МСТ;
- схема з'єднань елементів МСТ.

Підсистема T-Spice має гарний графічний інтерфейс, що дозволяє швидко та зручно переглядати результати моделювання та редагувати завдання на моделювання елементів МСТ. Підсистема має ряд методів, за допомогою яких досягається збіжність для проектів елементів, що не доступні в інших Spice-програмах.

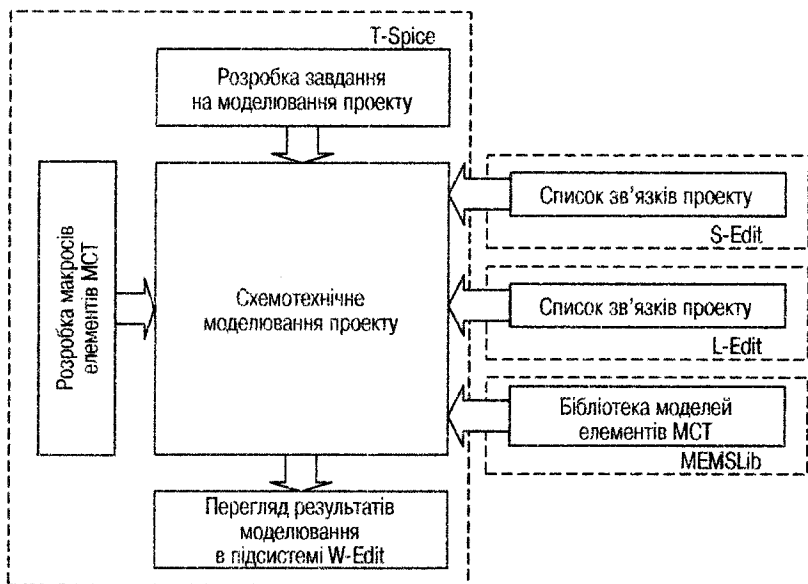


Рис. Д6.7. Маршрут проектування елементів МСТ у САПР Tanner Pro з використанням підсистеми T-Spice

На рис. Д6.7 представлено маршрут проектування мікросистем у САПР Tanner Pro з використанням підсистеми T-Spice.

Бібліотека математичних моделей елементів в T-Spice, так само як і бібліотека мікрофрагментів у редакторі L-Edit, представляється у форматах *.c і *.dll. Підключення необхідних моделей здійснюється за допомогою директиви .model. Директива .model має наступну структуру:

```
.model <ім'я_моделі> external <ім'я_параметра> =
«<ім'я_файлу>», де <ім'я_моделі> — ім'я моделі елемента МСТ;
<ім'я_файлу> — ім'я файлу, що містить модель використовуваного елемента у форматі *.c або *.dll; <ім'я_параметра> — параметр, що залежить від використаної операційної системи.
```

У випадку, коли файл моделі елемента МСТ представляється у вихідному коді 3 (*.c), необхідно підключити бібліотеки, що містять функції мови C та редактора L-Edit. Підключення бібліотек здійснюється з використанням директиви .options:

```
.options cpath=<шлях>,
```

де <шлях> — шлях до директорії, що містить бібліотеки мови C та редактора L-Edit.

Після проведення схемотехнічного моделювання здійснюється автоматичний запуск програми перегляду тимчасових діаграм W-Edit Waveform Viewer. У робочому вікні програми W-Edit автоматично відображаються діаграми сигналів, отримані в результаті моделювання проекту. Під час виведення тимчасових діаграм за умовчанням всі діаграми виводяться згрупованими в одному графічному вікні (рис. Д6.8).

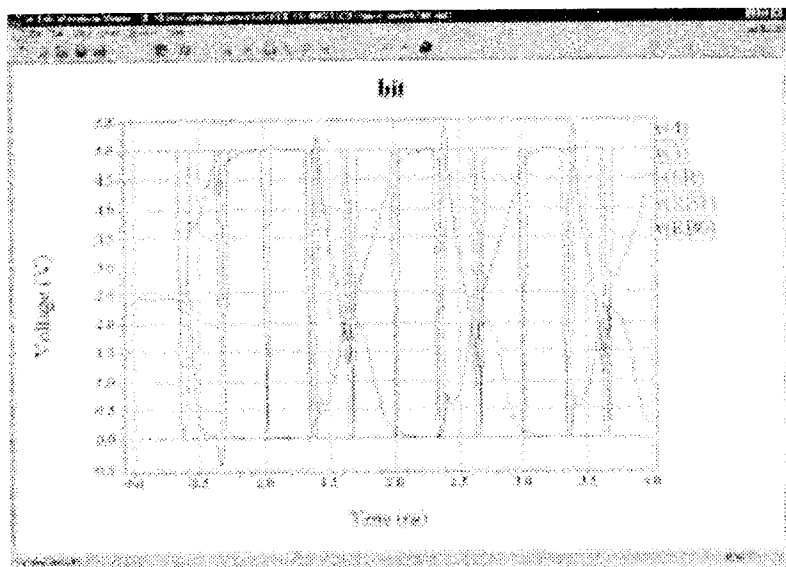


Рис. Д6.8. Робоче вікно програми W-Edit САПР Tanner Pro

Д6.3. Проектування елементів МСТ у САПР CoventorWare

Система автоматизованого проектування CoventorWare дозволяє виконувати проектування мікроелектромеханічних систем двома способами: знизу догори та зверху вниз.

При проектуванні зверху вниз спочатку виробляється загальна концепція майбутнього пристрою та створюється його структурна схема на основі поведінкових моделей підсистем, що входять до складу пристрою. Потім виробляється уточнене рішення для реалізації використовуваних підсистем, виконується їхня оптимізація, після чого по їхніх підсумках проводиться ітераційний цикл уточнення параметрів всієї системи в цілому. Далі виконується електромагнітне та електромеханічне моделювання розробленої мікроелектромеханічної системи, і проект мікросистеми передається на виробництво для технологічного опрацювання. У цьому

випадку середній час проектування елементів мікрооптико-електромеханічних систем (МОЕМС) становить біля одного тижня.

Шлях проектування знизу вгору є більш повним і дозволяє створювати моделі підсистем розроблюваної мікросистеми, відсутніх у бібліотеках поведінкових моделей пакета CoventorWare. При даному способі проектування спочатку задається специфікація пристрою найнижчого рівня, виробляється проект його топології, електромагнітне та електромеханічне моделювання. Ітераційний цикл оптимізації таких пристроїв може тривати від декількох годин до декількох днів. Далі оптимізовані пристрої групуються в більш складні інтегровані мікросистеми, які також аналізуються та оптимізуються. Після чого проект МОЕМС передається на виробництво. При такому підході проектування мікросистем середній час становить біля трьох місяців.

Пакет CoventorWare складається із чотирьох основних програм, що забезпечують розробника всім необхідним інструментарієм для проектування мікросистем: Architect, Designer, Analyser, System Builder.

Програма Architect забезпечує розробку проектів мікроелектромеханічних та мікрорідинних пристроїв на основі поведінкових моделей, тобто шляхом проектування зверху вниз.

На рис. Д6.9 представлено маршрут проектування мікросистем, що використовується програмою Architect у САІР CoventorWare.

Перший модуль програми Architect дозволяє розробляти структурні та принципіві схеми на основі поведінкових моделей електромеханічних, оптичних, надвисокочастотних та рідинних пристроїв, а також типових радіоелементів.

Другий модуль виконує моделювання створених мікросистем та цифрових схем керування за допомогою Spice-подібних програм.

Третій модуль програми Architect виконує генерацію поширеного опису топології розробленої мікросистеми з використанням повністю параметризованих топологічних моделей, що потім може бути передане у форматах GDSII, CIF у програму Designer, яка також входить до складу пакета CoventorWare.

Програма Designer надає розробникам усі необхідні засоби для двох- та тривимірного (2D, 3D) проектування мікроелектромеханічних систем. Вона містить три модулі:

- редактор двовимірних топологій;
- модуль створення тривимірної моделі мікросистеми на основі двовимірної топології;
- емулятор технологічного процесу.

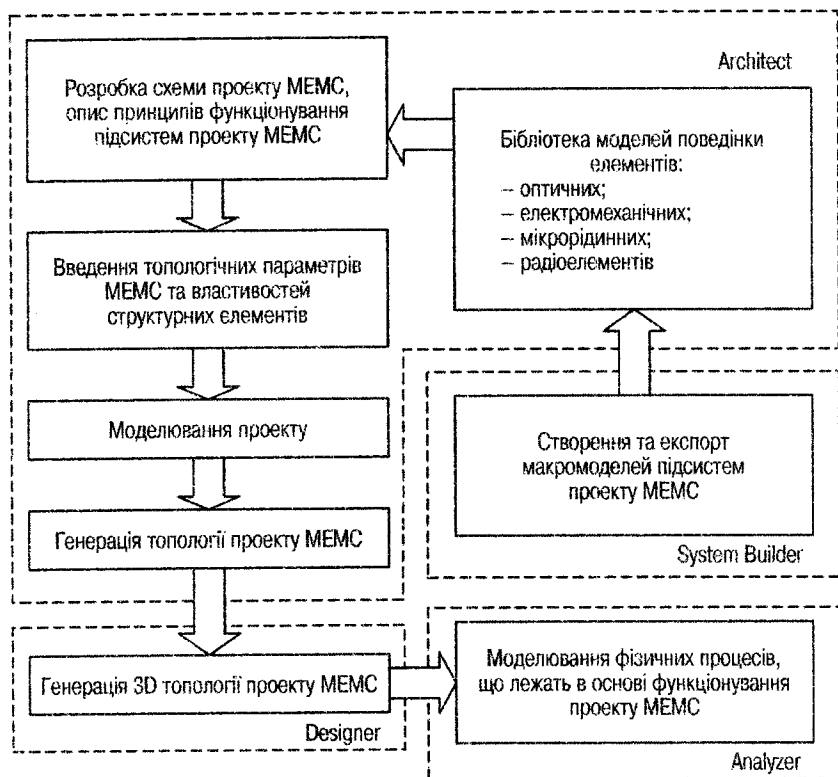


Рис. Д6.9. Маршрут проектування мікросистем, що використовується програмою Architect у САПР CoventorWare

На рис. Д6.10 (с. 354) представлено маршрут проектування мікросистем, що використовується програмою Designer у САПР CoventorWare.

Програма *System Builder* пакета *CoventorWare* являє собою систему екстракції поведінкових моделей з мікросистем, розроблених за допомогою програми *Designer* та промодельованих програмою *Analyzer*, і передачі їх у відповідну бібліотеку програми *Architect*. Наявність цього модуля в пакеті дає можливість ефективно використовувати підсистеми мікроелектромеханічних систем, спроектованих за принципом «знизу вгору».

Програма *Analyzer* є ключовою ланкою пакета *CoventorWare*, тому що дає можливість робити комплексне моделювання всіх фізичних процесів, покладених в основу функціонування розроблюваної мікросистеми.

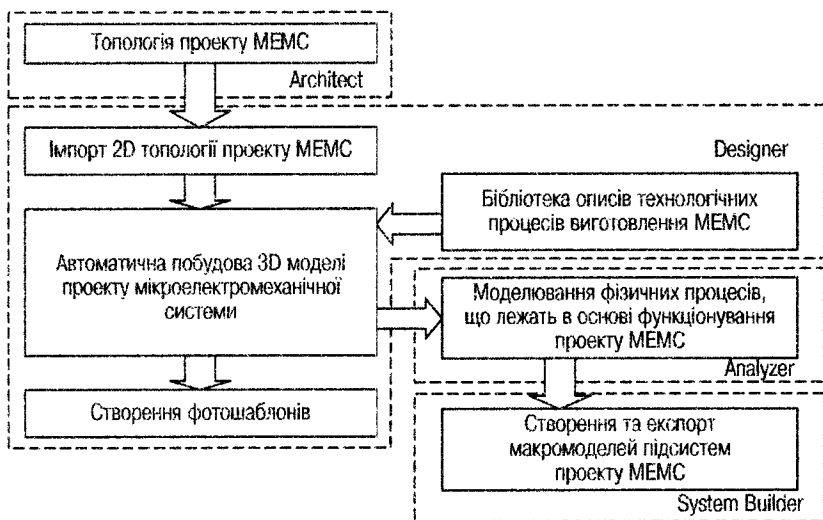


Рис. Д6.10. Маршрут проектування мікросистем, що використовується програмою Designer у САПР CoventorWare

На рис. Д6.11 представлено маршрут проектування мікросистем, що використовується програмою Analyzer у САПР CoventorWare.

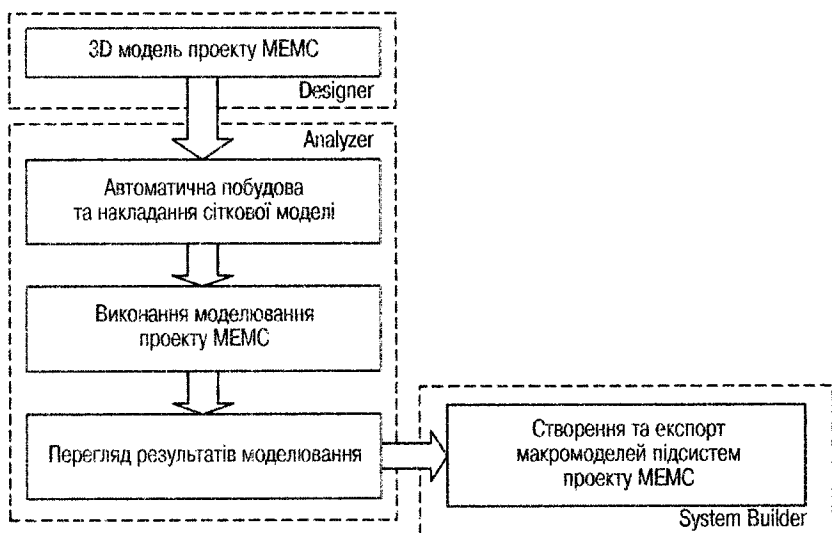


Рис. Д6.11. Маршрут проектування мікросистем, що використовується програмою Analyzer у САПР CoventorWare

Конфігурація цієї програми надзвичайно гнучка та дозволяє використовувати широкий набір обчислювальних модулів, спеціалізованих для рішення конкретного завдання, наприклад, моделювання оптичних, теплових, п'єзорезистивних ефектів.

У табл. Д6.1 наведено повний список модулів програми Analyser із вказівкою областей їхніх можливих застосувань.

Таблиця Д6.1

Модулі програми Analyser і області їхнього застосування

Модуль	Опис	Оптичні пристрої	ВЧ МОЕМС	Біосенсори	Мікродіагностичні пристрої	Сенсори
MemCap	Аналіз електростатичних ефектів		+	+	+	
MemOptics	Аналіз дифракцій плоских хвиль та гаусових променів					
Co-Solve EM	Аналіз ефектів, зв'язаних з електромеханічним гістерезисом		+			+
MemMech	Аналіз структурних, модальних, гармонійних та сталих термомеханічних параметрів		+	+	+	+
MemTrans	Аналіз термомеханічних перехідних процесів	+	+	+	+	+
MemETherm	Аналіз теплових деформацій у механічних структурах	+	+		+	+
MemPZR	Розрахунок механічних опорів та рівноважних потенціалів			+		+
MemHnrgy	Аналіз частотно-залежних опорів та індуктивностей		+			
AutoSpring	Аналіз пружних ефектів	+	+			+
MemPackage	Аналіз ефектів, пов'язаних з корпусуванням МОЕМС	+	+	+	+	+
MemCFD	Аналіз загальних завдань гідродинаміки			+	+	
FSI	Повний тривимірний аналіз рідинних структур			+	+	

Модуль	Опис	Оптичні пристрої	ВЧ МОЕМС	Біосенсори	Мікродіодні пристрої	Сенсори
NetFlow	Аналіз рідинних потоків та ефектів переносу хімічних речовин в електроосмотичному, електрофоретичному та змішаних електрокінетичних системах			+	+	
SwithSim	Розрахунок електрокінетичних характеристик рідинних комутаторів			+	+	
DropSim	Тривимірне моделювання процесів утворення крапель, їхнього переміщення та зіткнення	+		+	+	
ReactSim	Повне тривимірне моделювання структур, що включають різні ефекти: потоки рідини, передачу тепла, дифузію, електрокінетичну взаємодію			+	+	
BubbleSim	Тривимірне моделювання процесів переміщення пухирців газу в рідинах та мікроканалах	+		+	+	

Д6.4. Програма кінцево-елементного моделювання ANSYS

Програмний комплекс ANSYS являє собою багатоцільовий пакет для рішення складних проблем фізики та механіки. Багатоцільова спрямованість програми (тобто можливість оцінки впливів різної фізичної природи на досліджуваний стан конструкції, наприклад, на її міцність) дозволяє використовувати ту саму модель для рішення таких зв'язаних завдань, як міцність при тепловому навантаженні, вплив магнітних полів на міцність конструкції, тепломасопередачу в електромагнітному полі та ін.

Програма має у своєму розпорядженні широкий перелік розрахункових засобів, які можуть урахувати різноманітні конструктивні нелінійності; дають можливість вирішити найзагальніший випадок контактного завдання для поверхонь; допускають наявність більших (кінцевих) деформацій та кутів повороту; дозволяють виконати інтерактивну оптимізацію та аналіз впливу електромагнітних полів, одержати рішення завдань гідроаеродинаміки та багато чого іншого — разом з параметричним моделюванням, адаптивним перебудуванням сітки та великих можливостей створення макрокоманд за допомогою мови параметричного програмування (APDL).

Засоби твердотілого моделювання містять у собі подання геометрії конструкції, побудоване на використанні сплайн-технології, геометричних примітивів та операцій булевої алгебри.

Багатоцільові функції комплексу ANSYS забезпечуються наявністю в ньому численого сімейства окремих спеціалізованих програм, що мають багато загальних функцій, однак математичне забезпечення яких розраховано на вирішення окремих класів завдань.

До складу програмного комплексу ANSYS входять:

- ANSYS/Multiphysics — програма для широкого кола інженерних дисциплін, що дозволяє проводити розрахунки в області міцності, поширення тепла, механіки рідин та газів, електромагнетизму, а також вирішувати зв'язані завдання;
- ANSYS/Mechanical — програма для виконання проектних розробок, аналізу та оптимізації: рішення складних завдань міцності конструкцій, теплопередачі та акустики. Ця програма дозволяє визначати переміщення, напруги, зусилля, температури, тиски та інші параметри, важливі для оцінки механічної поведінки матеріалів та міцності конструкції. Дана програма є підмножиною ANSYS/Multiphysics;
- ANSYS/Structural виконує складний міцнісний аналіз конструкцій з обліком різноманітних нелінійностей, серед яких геометрична та фізична нелінійності, нелінійна поведінка кінцевих елементів та втрата стійкості. Використовується для точного моделювання поведінки великих та складних розрахункових моделей. Дана програма є підмножиною ANSYS/Mechanical;
- ANSYS/Thermal — це окрема програма, виділена з пакета ANSYS/Mechanical, для рішення теплових стаціонарних та нестаціонарних завдань;

- ANSYS/LS-DYNA — програма, призначена для рішення міцнісних завдань динаміки при більших нелінійностях. Ця програма може використовуватися для чисельного моделювання процесів формоутворення матеріалів, аналізу аварійних зіткнень та ударів при кінцевих деформаціях, включаючи пробивання, нелінійну поведінку матеріалу та контактну взаємодію елементів конструкції;
- ANSYS/ED являє собою програму, що володіє можливостями ANSYS/Multiphysics, але має обмеження за розмірами розрахункової моделі. Ця програма призначена для учбових цілей.

Режими роботи програми ANSYS. Програма допускає два режими роботи: пакетний (Batch) та інтерактивний (Interactive).

Пакетний режим — робота ANSYS-програми задається програмою користувача. Перший рядок у файлі повинен бути /batch, що позначає пакетний режим роботи. Цей режим особливо ефективний при вирішенні завдань, що не вимагають постійного зв'язку з комп'ютером.

Інтерактивний режим припускає постійну взаємодію з комп'ютером: запуск команди користувачем, виконання її програмою; завдання іншої команди користувачем та виконання її програмою і т. д. Якщо ви помилитеся, можна виправити помилку, повторно правильно набравши команду. Даний режим дозволяє використовувати найбільш придатні властивості графічного режиму, порядкової підказки, системного меню та графічного набору.

Маршрут моделювання елементів МСТ за допомогою програми ANSYS складається із трьох етапів: препроцесорна підготовка (Preprocessing), одержання рішення (Solving the equation) та постпроцесорна обробка результатів (Postprocessing).

На стадії препроцесорної підготовки виконується вибір типу розрахунку, побудова моделі та прикладення навантажень (включаючи граничні умови). На даному етапі задаються необхідні для рішення вихідні дані. Користувач вибирає координатні системи та типи кінцевих елементів, вказує пружні постійні та фізико-механічні властивості матеріалу, будує твердотільну модель та сітку кінцевих елементів, виконує необхідні дії з вузлами та елементами сітки, задає рівняння зв'язку та обмеження. Можна також використовувати модуль статичного обліку для оцінки очікуваних розмірів файлів та витрат ресурсів пам'яті.

На рис. Д8.69 представлено фрагмент кінцево-елементної моделі елемента МСТ.

Етап прикладення навантажень та одержання рішення містить у собі завдання виду аналізу та його опцій, навантажень, кроку рішення та закінчується запуском на рахунок кінцево-елементного завдання.

Програма ANSYS передбачає два методи рішення завдань, пов'язаних з розрахунком конструкцій (Structural problems): *h*-метод і *p*-метод. Перший може застосовуватися при будь-якому типі розрахунків (статичний, динамічний, тепловий і т. п.), а другий — тільки в лінійному статичному аналізі. Крім того, *h*-метод вимагає більше частішої сітки, чим *p*-метод.

На етапі постпроцесорної обробки користувач може звернутися до результатів вирішення та інтерпретувати їх потрібним чином.

Результати вирішення включають значення переміщень, температур, напруг, деформацій, швидкостей та теплових потоків.

Підсумком роботи програми на постпроцесорній стадії є графічне та (або) табличне подання результатів.

Науково-дослідні прилади для МЕМС та НТ

А. Г. Ульяновков

В якості доповнення до фундаментальної роботи, виконаної авторами, хотілося б трохи розповісти про сучасне обладнання, що дозволяє проводити дослідження, а також здійснювати різні експерименти в області мікро- та наноелектроніки та нанотехнологій у цілому. Але на початку — невеликий екскурс в історію.

Традиційно склалося, що «законодавицею мод» у багатьох нанотехнологічних напрямках є Німеччина.

Незважаючи на те, що подібні дослідження проводилися в усіх розвинених країнах, Німеччина стала першою країною, у якій у 1998 р. нанотехнологічному проекту був наданий статус національного та стратегічного. Протягом наступних 4 років Німеччина залишалася єдиною країною, де глобальний нанотехнологічний проект був закріплений законодавчо.

Така моторність була обґрунтована феноменальним обсягом відкриттів, пов'язаних з дослідженнями речовини на атомарному та нанорівнях в усіх областях фундаментальної науки.

Крім того, стало очевидним, що багато найважливіших секторів німецької промисловості належать до галузей, на які нанотехнології чинять максимальний вплив: автомобілебудування, інформаційні технології, хімія, фармацевтика, оптика та напівпровідникова промисловість.

На підтвердження вищезгаданого на державному рівні були встановлені напрямки розвитку німецької промисловості, серед яких виділялися NanoMobil (автомобілебудування), NanoLux (оптика), NanoforLife (фармацевтика та медицина) та NanoFab (електроніка).

У законодавство були внесені доповнення та зміни, що заохочують розробки в рамках прийнятих програм і гарантують полегшене та пріоритетне патентування та впровадження отриманих розробок у виробництво. Природно, у рамках національної програми пріоритет, якщо не сказати ексклюзив, був наданий національним виробникам.

Звернемо увагу — раніше чи пізніше кожна із країн, що проводять глобальні нанотехнологічні дослідження, включаючи Росію, приходила до необхідності використання німецької моделі.

Таким чином, стратегічний крок, зроблений Німеччиною в 1998 р., ознаменував початок нового етапу розвитку світового співтовариства — нанотехнологічної революції.

Одним із залучених у проект великих німецьких промислових підприємств став концерн Carl Zeiss — легендарний «Цейсс», устаткування якого добре відоме і російським фахівцям.

Ім'я «Цейсс» практично в кожного асоціюється з оптикою та давно вже стало загальним символом відмінної якості.

Але мало хто знає, що з 30-х рр. минулого сторіччя на «Цейссі» почалися розробки в галузі електронної мікроскопії і перший дослідний зразок (ІЦДМ) випробовувався вже в 1939 р.

Через післявоєнний поділ підприємства на східну (Carl Zeiss Jena) та західну (Carl Zeiss Oberkochen) частини, та пов'язану із цим торгівельну політику Радянського Союзу, продукція Carl Zeiss Oberkochen на території соціалістичних країн мала маркування Opton.

Об'єднання Німеччини ознаменувало також об'єднання Zeiss у єдиний концерн.

Сьогодні серед 6 основних підрозділів концерну найбільший інтерес для фахівців в області нанотехнологій представляє Carl Zeiss SMT, до складу якого входить підрозділ Carl Zeiss NTS. SMT означає semiconductor and metrology technologies, NTS — nanotechnology systems.

Обладнання, вироблене цими підрозділами, — це оптичні літографічні об'єктиви для промислових систем, таких як, наприклад, літографи ASML, системи імпринтигу, основні компоненти електронних літографів, устаткування для виробництва та корекції шаблонів, а також увесь спектр електронних мікроскопів.

Саме на електронній мікроскопії для нанотехнологій ми й зупинимось докладніше.

Найбільшою популярністю серед розроблювачів мікро- та наоелектронних пристроїв та, відповідно, попитом користуються інспекційні автоемісійні електронні мікроскопи, побудовані на базі електронної колони GEMINI[®] (рис. Д8.70).

Створена біля двадцяти років тому електронно-оптична колона GEMINI[®] дотепер не має собі рівних при використанні в галузях загального матеріалознавства, металознавства та у напівпровідникових дослідженнях.

Її основними особливостями є ахроматичний об'єктив (рис. Д8.71.), що забезпечує крім іншого відсутність вторинних (створюваних прохідним пучком) магнітних полів на полюсних

кінцевиках, безконденсорна проєкційна система та найвища стабільність електроніки та встановлених параметрів електронного пучка.

Завдяки такій унікальній конструкції GEMINI® є єдиною у світі електронно-оптичною колоною, що дозволяє проведення досліджень навіть сильно намагнічених зразків без будь-яких спостережуваних спотворень на зображенні.

Реалізація безконденсорної системи фокусування дозволила одержувати приголомшливі якісні характеристики пучка — наприклад, просторове розрізнення, паспортизується та гарантується навіть при 100 В (~ 4 нм).

Варто відзначити, що режим низьких прискорень, до яких належать згадані вище 100 В, є серйозно затребуваним при проведенні робіт з електронними резистами. Цей режим дозволяє налаштуватися на зразок з мінімальним засвічуванням резиста в точках фокусування, а також уникати небажаного експонування робочих областей зразка.

У режимах високих розрізень (діапазон 5000—30 000 В) GEMINI® дозволяє одержувати розрізнення до 0,8 нм.

Сьогодні в Росії та за кордоном широко використовуються серії ПЕМ з колоною GEMINI® Supra та Ultra (рис. Д8.72 та рис. Д8.73).

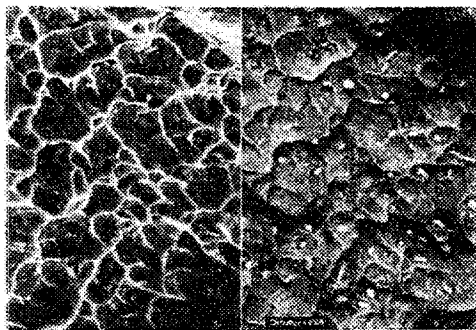


Рис. Д7.1. Зображення у вторинних (ліворуч) та відбитих (праворуч) електронах

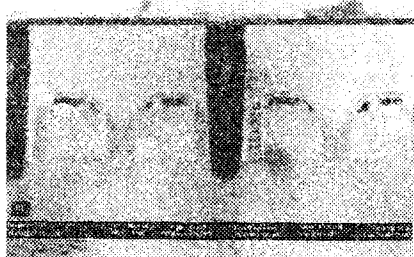


Рис. Д7.2. Вивчення взаємодії матеріалів на нанорівні

Ultra являє собою найостаннішу модифікацію колони, у якій одержують розрізнення (рис. Д7.1 та рис. Д7.2) у вторинних та в зворотньо розсіяних електронах порядку 1 нм, що є абсолютним рекордом для зворотньо-розсіяних електронів, що випромінюються з більш глибоких приповерхніх шарів та мають більш високі енергії виходу.

Таким чином, зі створенням серії Ultra стало можливим одержання як топологічної інформації про поверхню, так і інформації про хімічний склад поверхні за тих самих граничних розрізненнях.

В оснащенні з рентгенівською спектрометрією (наприклад, енергодисперсійним спектрометром) одержують на диво наочні картини розподілу хімічних елементів по поверхні зразка (рис. Д8.74).

Давній партнер концерну — німецька фірма Raith GmbH, штаб-квартира якої розташована в технопарку м. Дормунд, використовує GEMINI[®] для виробництва електронних літографів дослідницького класу e-Line (для роботи із пластинами 100 мм у діаметрі) та Raith 150 (для роботи із пластинами до 150 мм у діаметрі).

Ряд інститутів системи РАН уже декілька років використовує це обладнання для створення унікальних вітчизняних розробок у електроніці.

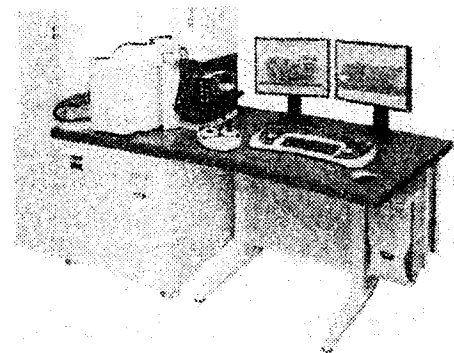


Рис. Д7.3. NVision

Унікальними інструментами для нанотехнологій з насправді небувалими досі можливостями є двопроменеві мікроскопи Zeiss 1540Es та NVision (рис. Д7.3).

Поняття «двопроменеві» означає, що крім GEMINI[®] кожний такий мікроскоп оснащується ще й іонною колоною (рис. Д8.75).

Комбінація двох технологій (електронної та іонної) в одному приладі дозволяє заглянути всередину зразка, одержати та зіставити сигнали іонного та електронного пучків, відтворити точні тривимірні образи об'єктів.

Іонні технології у цих машинах використовуються і для маніпулювання зі зразками на нанорівні, наприклад:

- стравлювання наношарів;
- осадження наношарів;
- одержання поперечних зрізів у площинах, що задаються довільно (рис. Д7.4);
- наноманіпулювання та наноконструювання (рис. Д7.5);
- одержання надтонких пластинчастих секцій для наступного вивчення методами високорозрізняючої просвічувальної мікроскопії (рис. Д7.6. та рис. Д7.7).

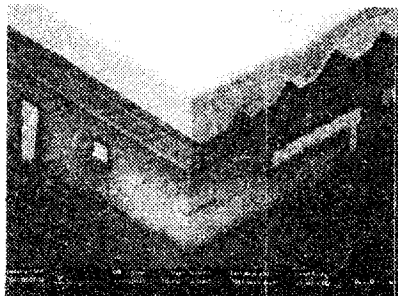


Рис. Д7.4. Поперечний зріз напівпровідникового пристрою у двох площинах, отриманий за допомогою CrossBeam 1540

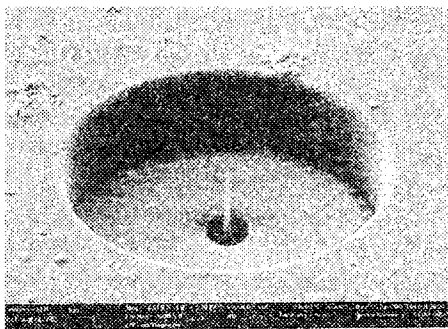


Рис. Д7.5. Літографічні роботи з використанням двопроменевих систем

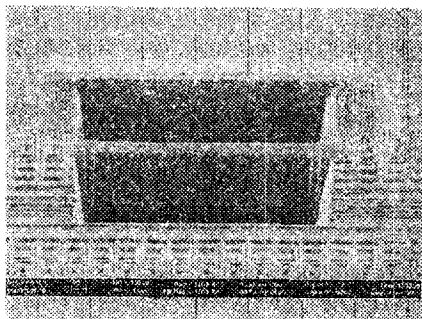


Рис. Д7.6. Процес підготовки надтонкої секції

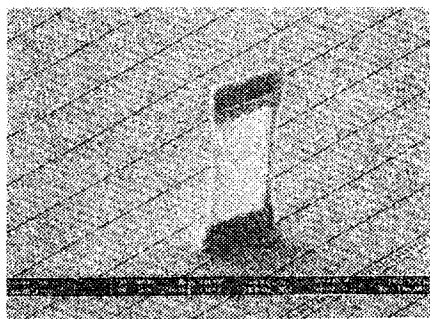


Рис. Д7.7. Отримана надтонка секція для подальшого дослідження методами ПЕМ

Тільки за допомогою таких двопроменевих систем можна навіть спостерігати багато ефектів взаємодії різних компонентів зразка — наприклад, дифузію матеріалів у зонах товщиною всього декілька нанометрів, дефекти кристалічних структур і т. п.

Активний розвиток у цій галузі дозволив розробити та інтегрувати в дослідницькі комплекси наноманіпулятори для робіт зі зразками. За їхньої допомоги можливий контрольований візуально прямий вплив на структури, що мають розміри порядку 30—50 нм, а в ряді випадків і менше — переміщення, накладання, нагрівання, подача потенціалу — тобто проведення дійсно унікальних та значущих експериментів.

Багато результатів нанотехнологічної революції, уже реалізованих в новітніх продуктах або отриманих в ряді початкових

експериментів, так чи інакше пов'язні з використанням двопромених систем на базі GEMINI®.

Як приклад можна навести винахід балістичного транзистора вченими Рочестера, розробку перших очних біоімплантантів для незрячих людей, розробку біочипів для експрес-діагностики захворювань, розробку матеріалів із надвластивостями і т. п.

Достатньо подивитися на короткий список користувачів даних систем, щоб зрозуміти наскільки значимі результати, які можна одержати з їхньою допомогою. Це корпорації AMD, ASML, BOSCH, LG, Infineon, Samsung, Applied Materials, Texas Instruments, Hitachi global Storage Technologies, Cirrus Logic та багато інших.

За свою унікальність двопроменеві системи Zeiss неодноразово одержували головні призи на заходах світового масштабу для виробників та розробників мікро- та наноелектроніки (рис. Д7.8 та рис. Д7.9).

Для досліджень на атомарному рівні Zeiss розробив і пропонує замовникам унікальні просвічувальні мікроскопи серії Libra.

Принциповою відмінністю цих приладів від кожного з наявних аналогів є наявність спектрометра характеристичних втрат електронів (Омега-фільтр), що дозволяє розпізнавати спектр, що пройшов зразок, із точністю до 0,5 еВ, а також реалізувати принцип освітлювання зразка (відповідно до технології



Рис. Д7.8. Приз SEMI

проф. Августа Кюлера) строго паралельним пучком по всьому його полю та незалежно від поточного освітлення чи збільшення.

У комбінації з вбудованим монохроматором та унікальним коректором це дає вихідний пучок з нульовими аберраціями (1).

Перші комерційні надрозрізнавальні системи SATEM (Sub-Angstrom Transmission Electron Microscope) та SESAM (Sub-Electron Sub-Angstrom Microscope) дозволили одержати пряме розрізнення 0,7 ангстрема, що дотепер є рекордом в електронній мікроскопії.



Рис. Д7.9. Приз Eurosemi

У системі SESAM був застосований і новий тип спектрометра характеристичних втрат електронів — Mandoline-Фільтр, що дозволив одержати спектральне розрізнення 0,2 eV.

Щоб було більш зрозуміло, який ефект досягається при використанні обладнання з такими характеристиками, наведемо приклад.

Одним із завдань, що стояли перед розробниками новітніх синтетичних покриттів, було завдання спостереження за розподілом наночасток одного полімеру в матриці з того ж полімеру, але такого, що пройшов додаткову, теплову обробку, тобто потрібно було побачити ізоморфізм структур з однакою хімічним складом.

Єдиним приладом, що вирішує це завдання, став Libra.

У напівпровідникових дослідженнях подібні завдання виникають досить часто та бувають набагато більш складними, оскільки розходження доводиться шукати на атомарному рівні в структурах, що чергуються, із практично однаковою кристалічною решіткою.

Цікаво буде довідатися, що концерн Carl Zeiss на початку 2007 року одержав спеціальний приз асоціації німецьких промислових підприємств «За розробку та впровадження Інновацій».

Концерном щорічно реєструється порядку 220 патентів — тобто практично по одному в кожний робочий день року. Багато які з них впроваджуються у власне виробництво.

Як результат настільки серйозної та плідної роботи компанії в серпні 2007 р. світові був представлений абсолютно новий нанотехнологічний прилад.

Це гелієво-іонний мікроскоп (HeM) Zeiss Orion — унікальний нанодослідницький комплекс, що об'єднує у собі всі зручності растрової мікроскопії та дозволяє одержати характеристики просвічувальної мікроскопії.

Вже перші експерименти з дослідною моделлю HeM показали приголомшливий результат — розробникам приладу вдалося домогтися розрізнення в 2,5 ангстрем, що є абсолютним рекордом у класичній скануючій мікроскопії. Другим відкриттям виявилася унікальна чутливість приладу до складу досліджуваної поверхні.

Раніше, незважаючи на серйозні досягнення в розробці дослідницьких систем на основі електронно- або іонно-променевих методів, незважаючи на можливість чіткого спостереження наноб'єктів, вчені зіштовхувалися із серйозними обмеженнями в інтерпретації результатів, оскільки в наномасштабах взаємодії електронів з речовиною є більш складними, ніж це здається на перший погляд.

Розміри електронів забезпечують їм глибоке проникнення (на мікрони) під поверхню зразка. У процесі проникнення відбуваються взаємодії цих часток з ядрами та електронами речовини зразка (що умовно називають глибинними ефектами), які вносять свій внесок у картину, що спостерігається

Глибинні ефекти істотно обмежували можливість спостереження та вивчення надтонких структур, наприклад наноплівки, оскільки електрони або іони легко проходили крізь шар плівки, і їхня взаємодія з підкладкою впливала на одержуване зображення, приховуючи тим самим дійсну картину поверхні.

Використовувані сьогодні іонні комплекси на важких іонах також не дозволяють одержувати надвисокі розрізнення в силу більших діаметрів іонного зонда.

На відміну від електронного променя при взаємодії гелієво-іонного зонда не виникає зони утворення зворотно-розсіяних електронів (та, як наслідок, відсутні спостережувані глибинні ефекти), та одержуване зображення формується або вторинними електронами із приповерхніх шарів товщиною всього в декілька Ангстрем, або вторинними іонами. Діаметр гелієво-іонного зонда становить величину порядку 2—2,5 ангстрем, і в такий спосіб є одним з головних факторів, що визначають просторове розрізнення приладу.

Завдяки своїм унікальним можливостям лабораторії на базі Orion будуть першими у світі лабораторіями, атестованими для нанометрології, та дозволять ученим та розробникам одержувати інформацію про дійсну структуру речовини.

Кольорові ілюстрації

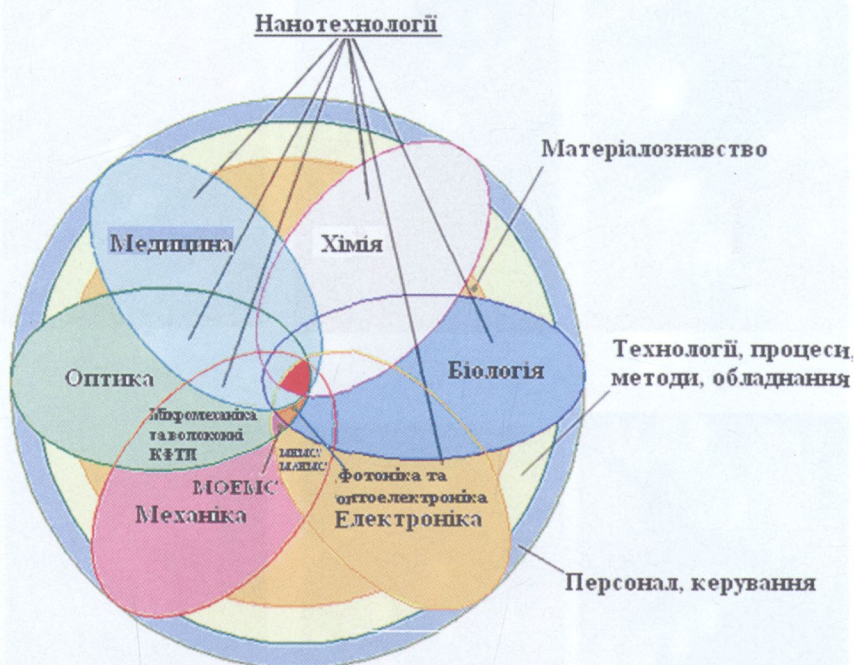


Рис. Д8.1. Класифікація мікросистемних та нанотехнологій

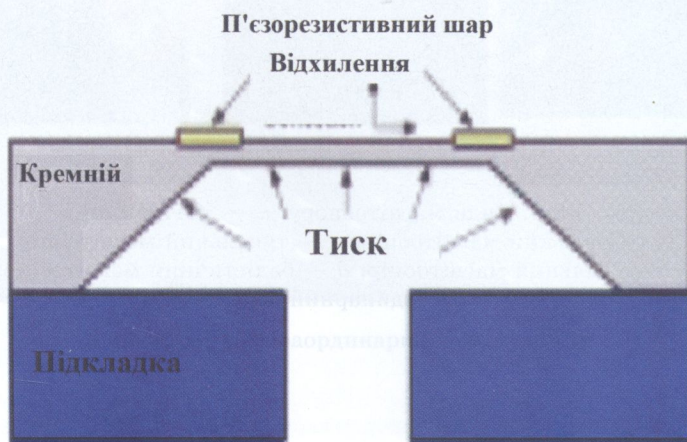
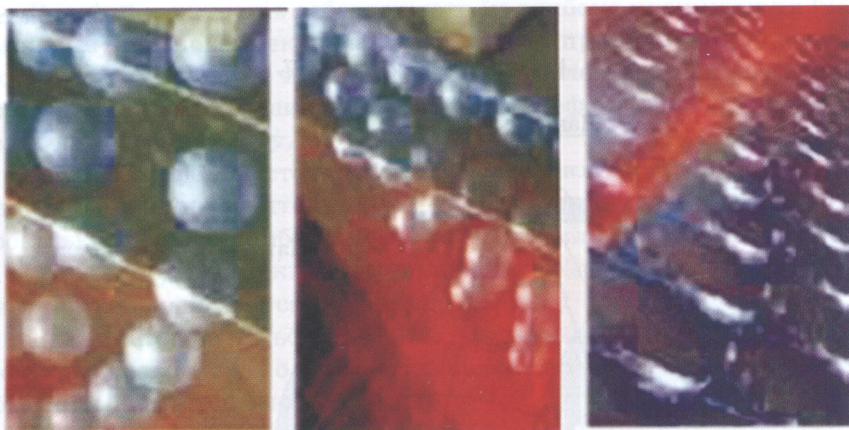


Рис. Д8.2. Розріз п'єзорезистивного датчика тиску



a

б

в



г

д

е

Рис. Д8.3. Види магнітоопору: *a* — магнітоопір; *б* — гігантський магнітоопір; *в* — тунельний магнітоопір; *г* — колосальний магнітоопір; *д* — балістичний магнітоопір; *е* — екстраординарний магнітоопір

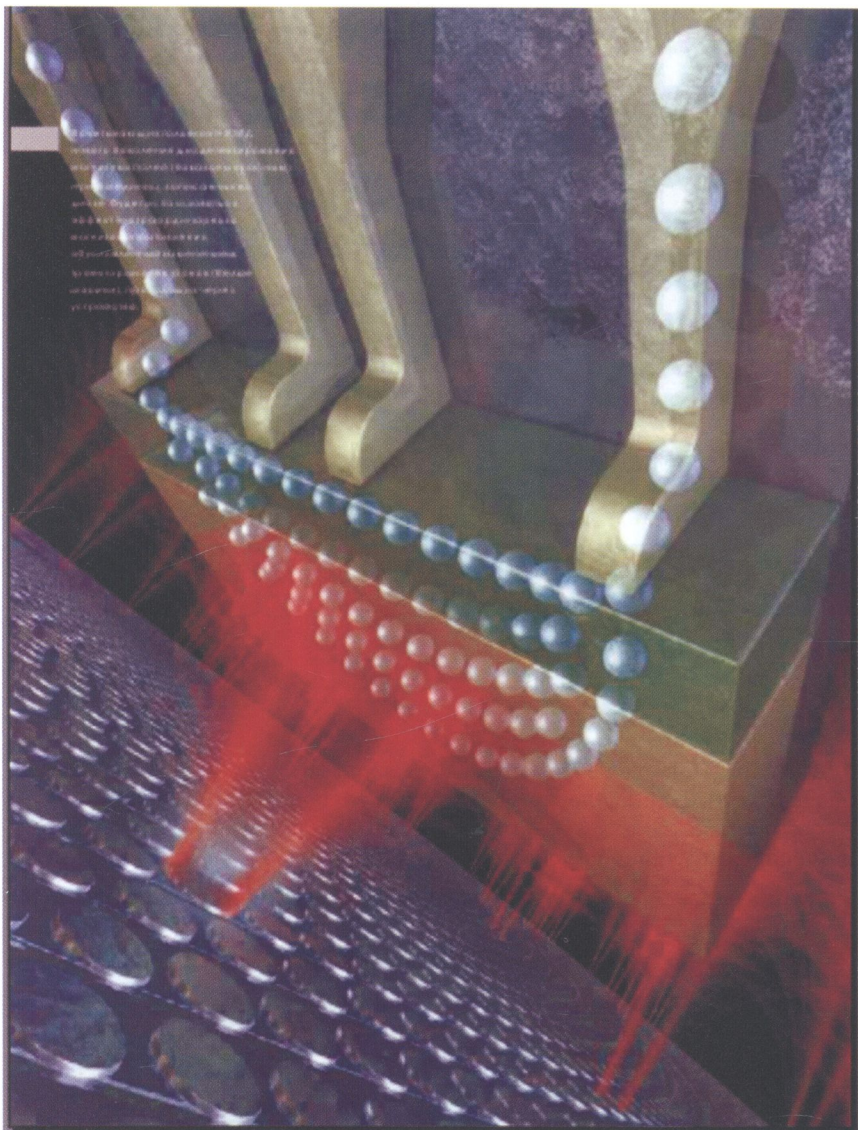


Рис. Д8.4. Екстраординарний магнітоопір

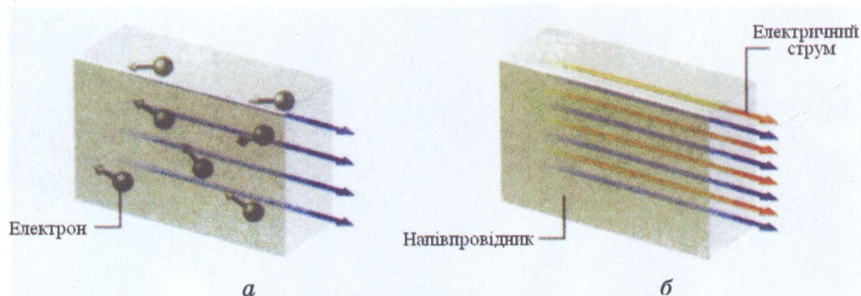


Рис. Д8.5. Струм у напівпровіднику: *а* — дрейф електронів; *б* — потік електричного струму через підкладку протилежно напрямку дрейфу електронів

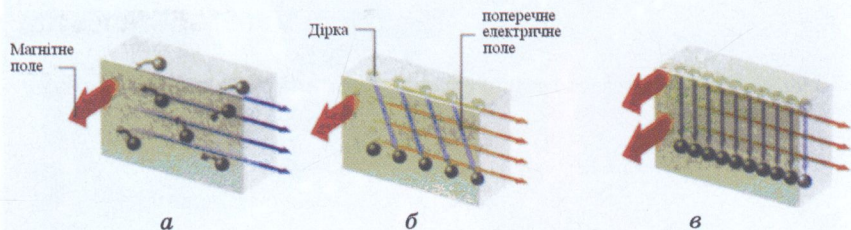


Рис. Д8.6. Поперечне магнітне поле: *а* — магнітне поле, спрямоване перпендикулярно електричному; *б* — нагромадження електронів у нижній, а дірок у верхній частині підкладки; *в* — потік струму перпендикулярно силовим лініям поздовжнього магнітного поля

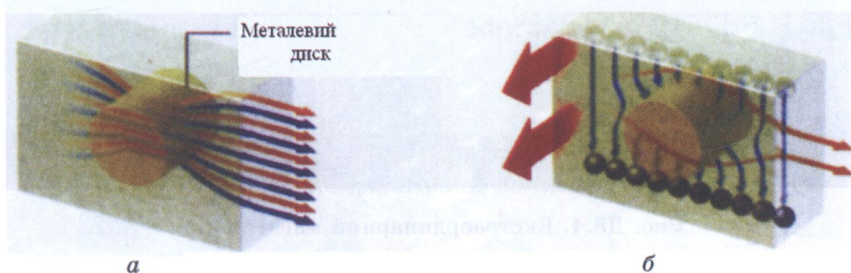


Рис. Д8.7. Екстраординарний магнітоопір: *а* — металевий диск усередині напівпровідника; *б* — витиснення струму поперечним електричним полем

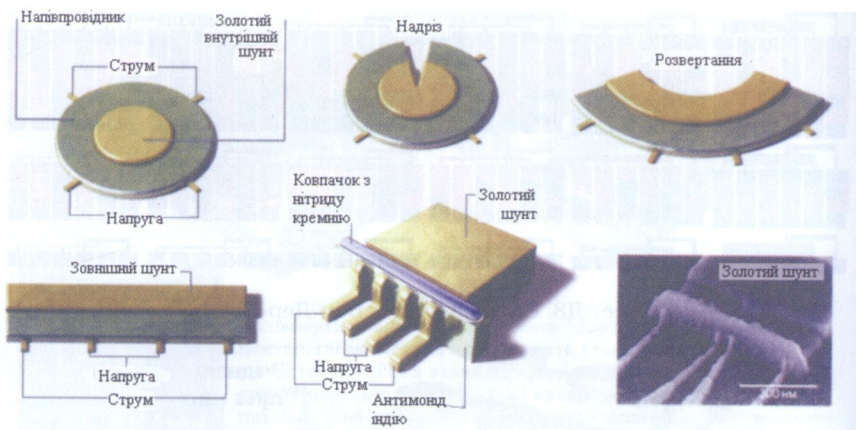


Рис. Д8.8. Конформне відображення кругової структури із золотим шунтом у лінійну

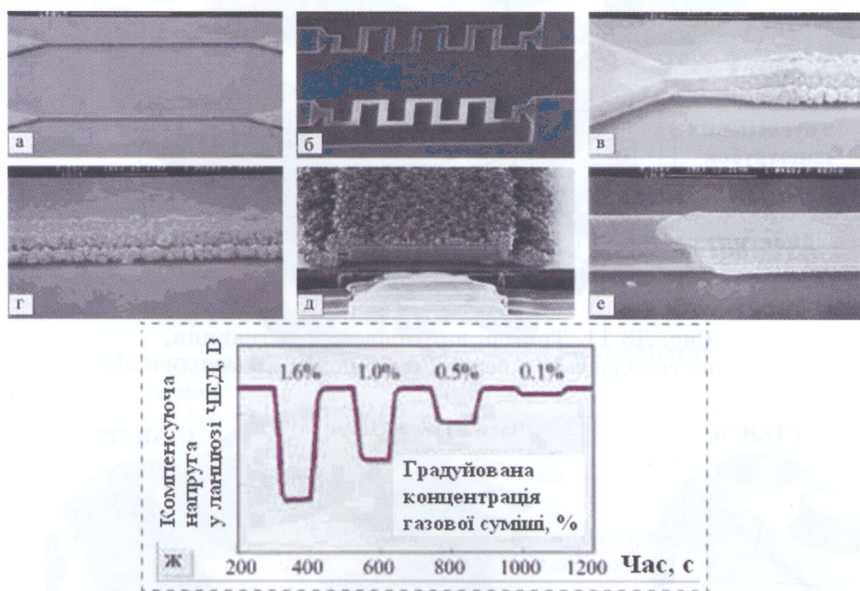


Рис. Д8.9. Датчик концентрації водню та метану:
a — полікремнієві нитки; *б* — ЧЕД з покриттям тонкою платиновою плівкою; *в–е* — продукти горіння горючегазової суміші на поверхні ниток ЧЕД; *ж* — приклад градуювальної характеристики для визначення концентрації газової суміші за залежністю компенсуючої напруги у ланцюзі ЧЕД від часу горіння суміші

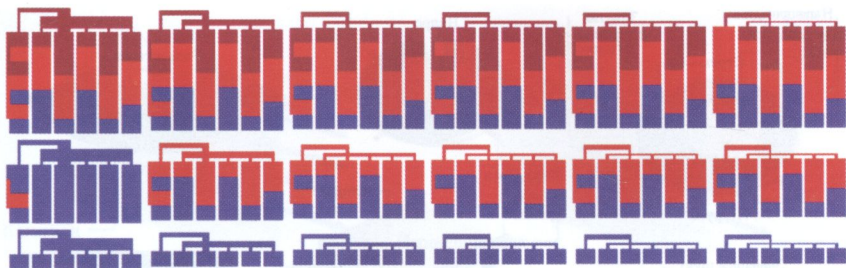


Рис. Д8.10. Структури Ван-Дер-Пау

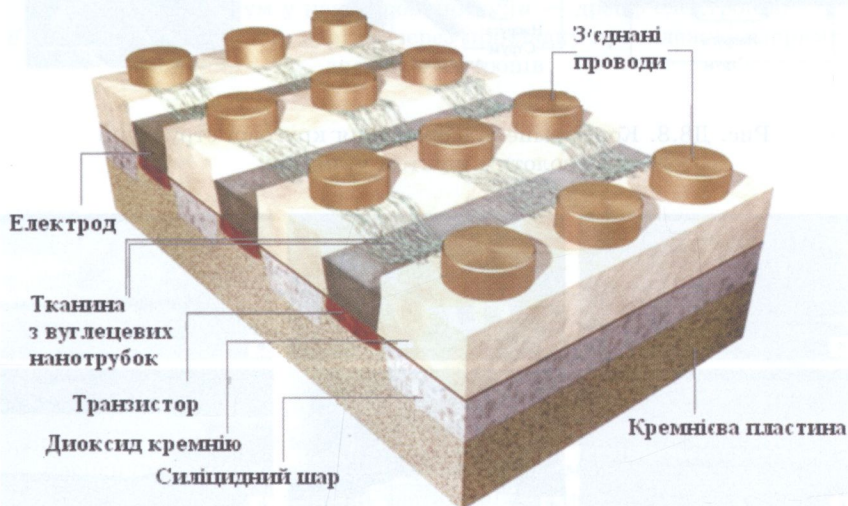


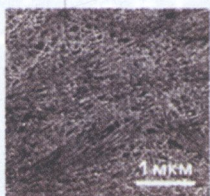
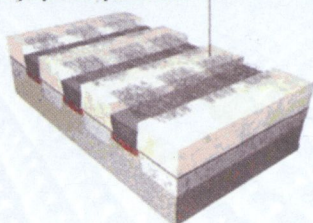
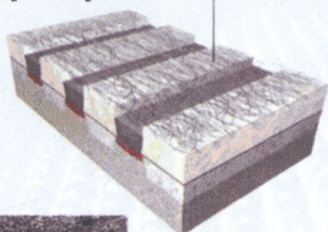
Рис. Д8.11. Тригер, виготовлений із тканини, що складається з безлічі вуглецевих нанотрубок



Рис. Д8.12. Провисаючі та розпрямлені нанотрубки представляють стани «1» та «0» ланок оперативної пам'яті нового типу

Шар нанотрубок на
поверхні мікросхеми

Мікросхема після
літографії та травлення



На поверхню мікročипа наносять шар нанотрубок (зліва та в центрі), після чого його обробляють стандартною літографією, що застосовується в технології напівпровідників, та травленням (зправа). Подальші кроки (вони не показані) потрібні, щоб завершити виробництво чіпа

Рис. Д8.13. Процес виробництва чіпа

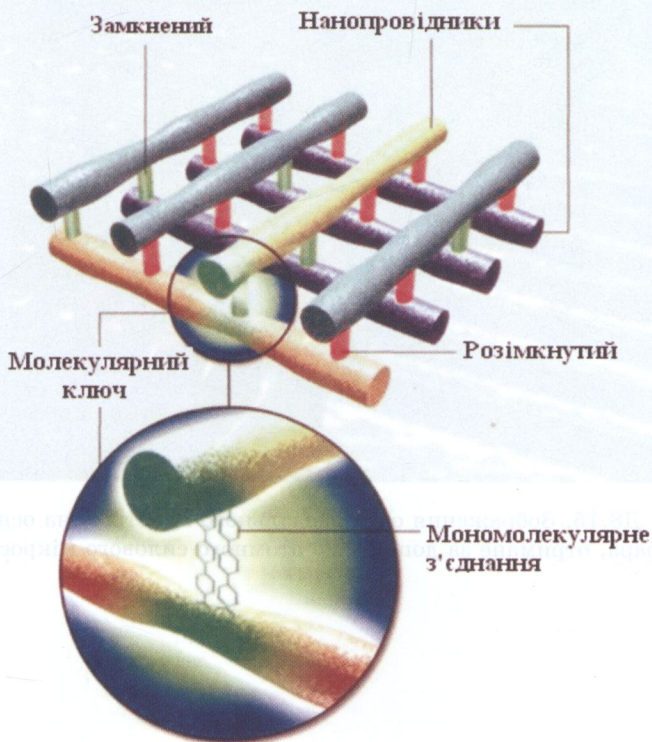


Рис. Д8.14. Фрагмент, що показує, як схрещені системи

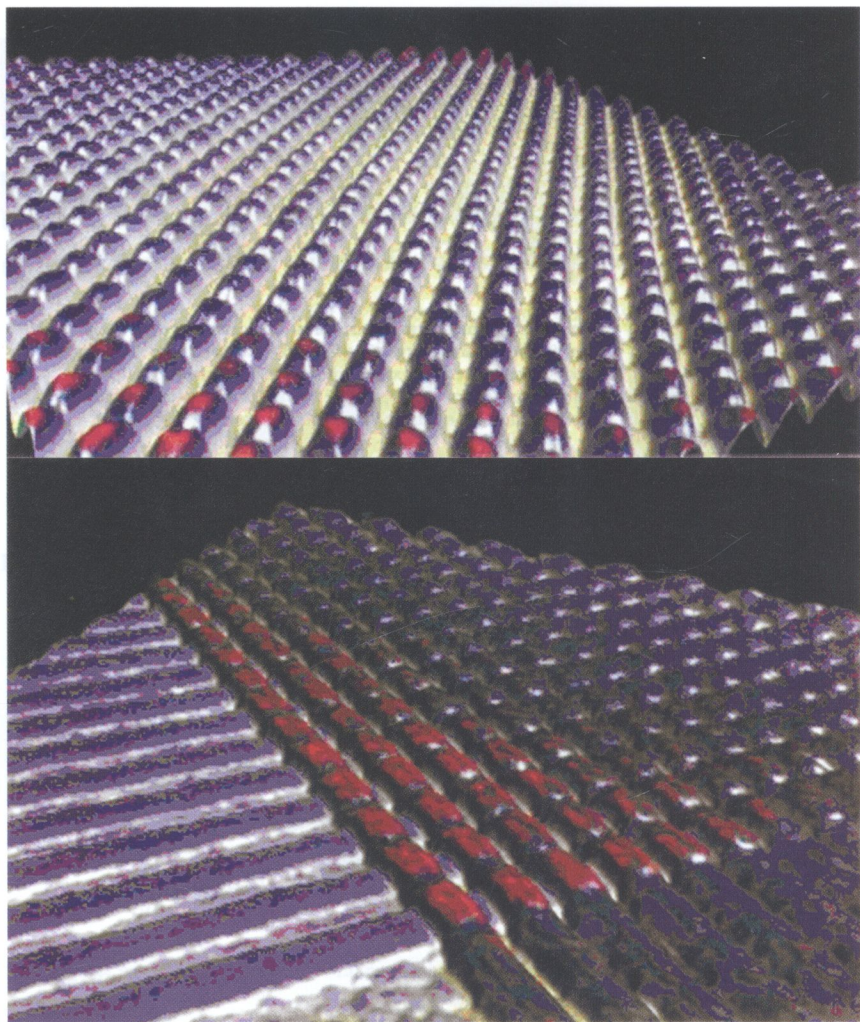


Рис. Д8.15. Зображення обчислювального пристрою на основі кросбара, отримане за допомогою атомного силового мікроскопа

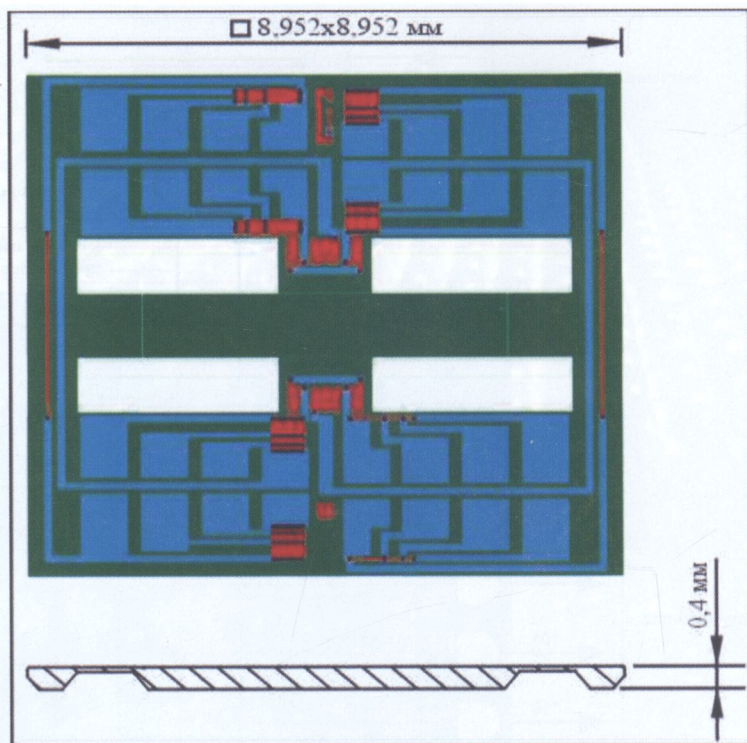


Рис. Д8.17. Топологічний ескіз кремнієвого інтегрального перетворювача

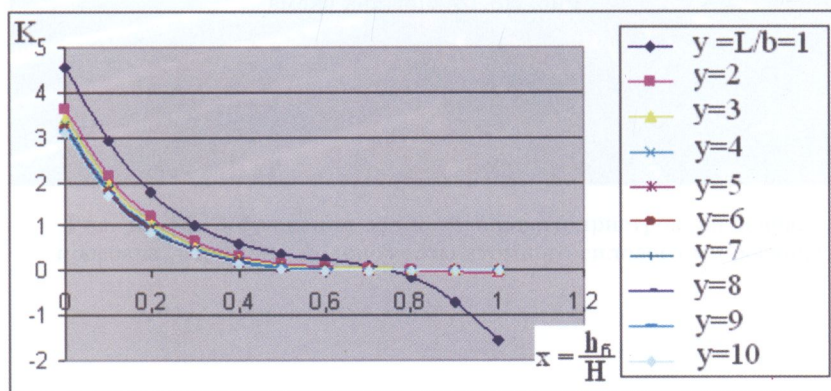


Рис. Д8.18. Залежність конструктивного коефіцієнта мембранно-балкового пружного елемента від співвідношень геометричних параметрів

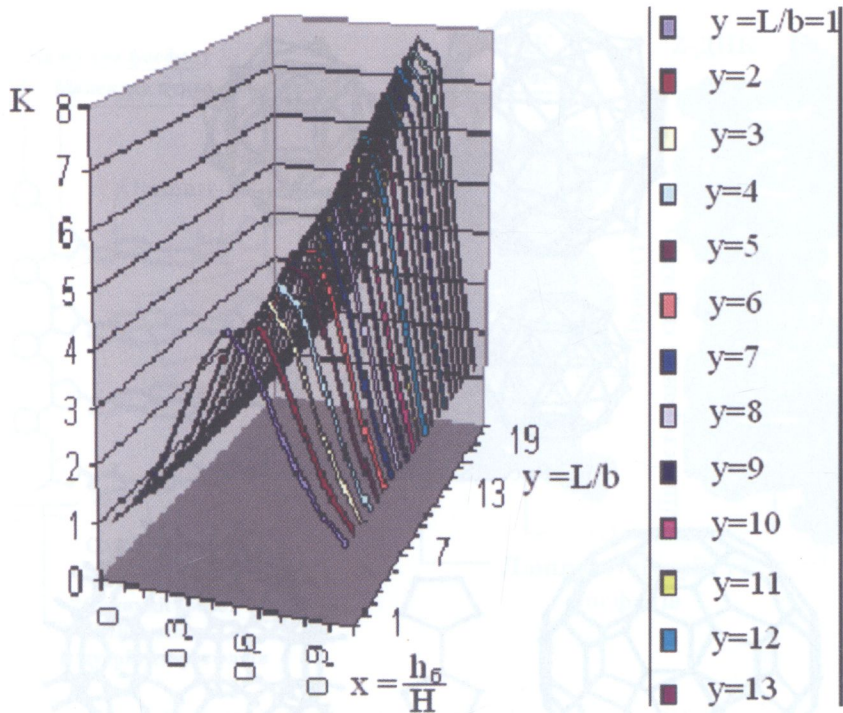


Рис. Д8.19. Область оптимальних значень співвідношень геометричних параметрів елементів конструкції мембранно-балкового пружного елемента

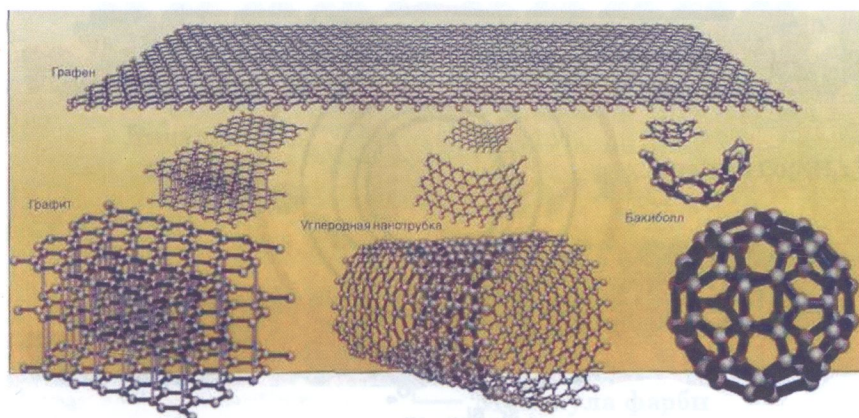


Рис. Д8.20. Алотропні форми вуглецю

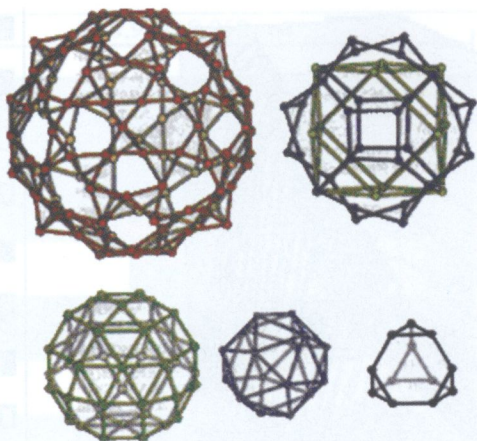


Рис. Д8.21. Бакиболи

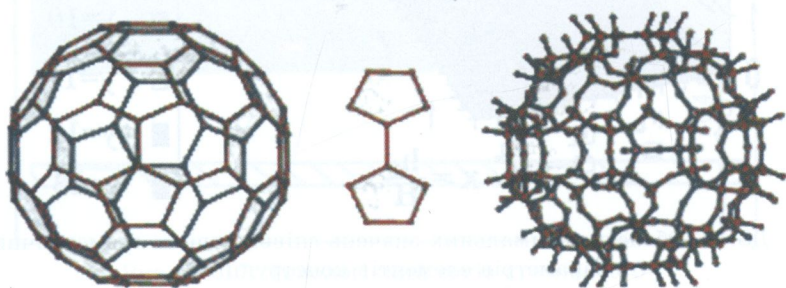


Рис. Д8.22. Фулерити

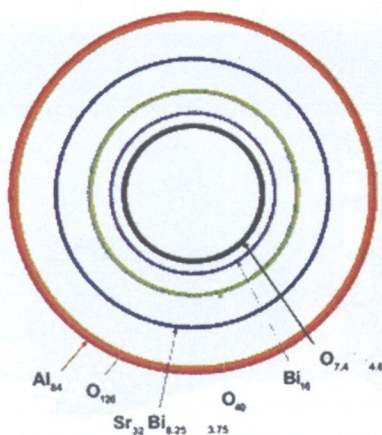


Рис. Д8.23. Сфери легуючих елементів, що вкладаються

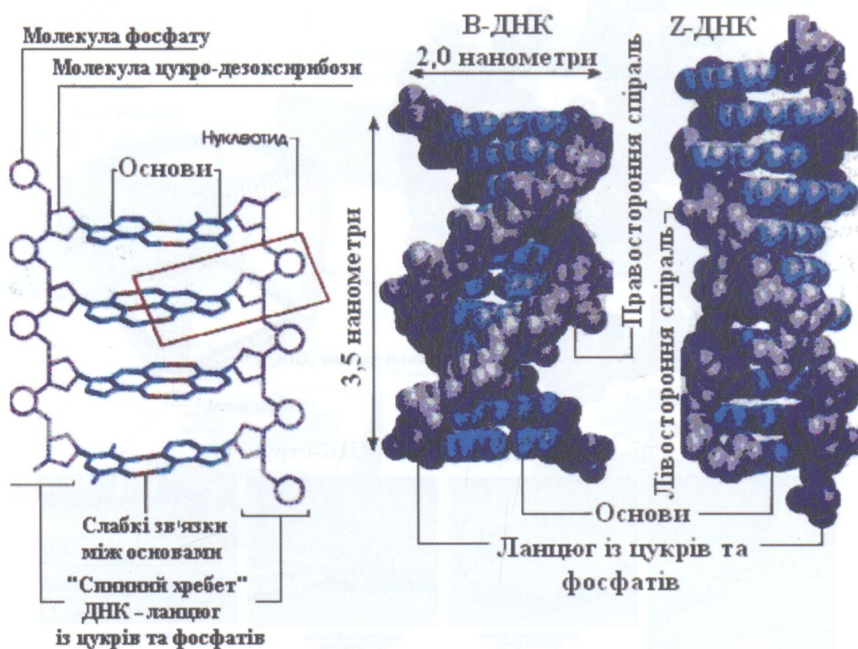


Рис. Д8.24. Подвійна спіраль структури ДНК

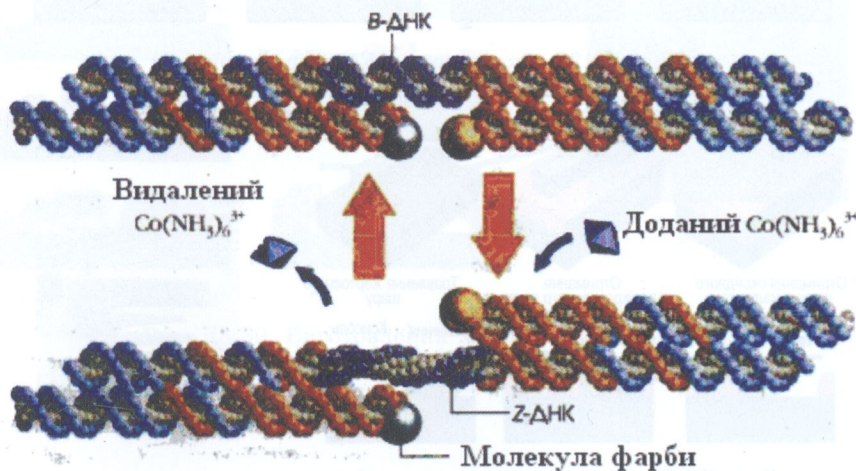


Рис. Д8.25. Машини із ДНК, що виконують рухи

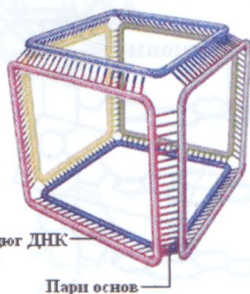
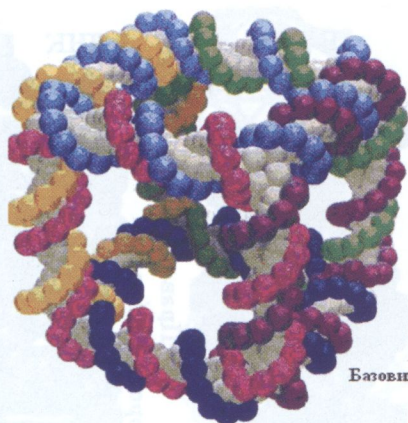
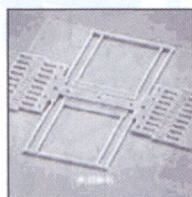


Рис. Д8.26. Тривимірна ДНК-структура



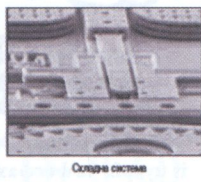
Простий датчик



Високошвидкісний датчик
Простий привід



Високошвидкісний привід
Проста система



Складна система

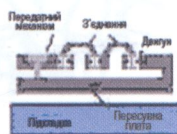
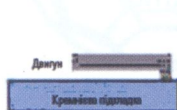
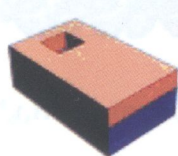
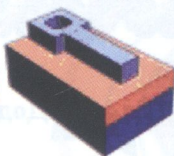


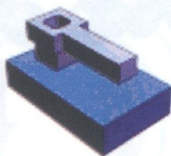
Рис. Д8.27. Складність MEMS-пристроїв, обумовлена структурними шарами



Отримання оксидного шару з малюнком



Отримання полікремнієвого шару з малюнком



Травлення жертвового шару

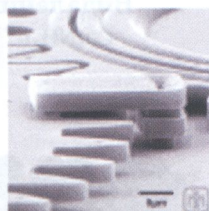
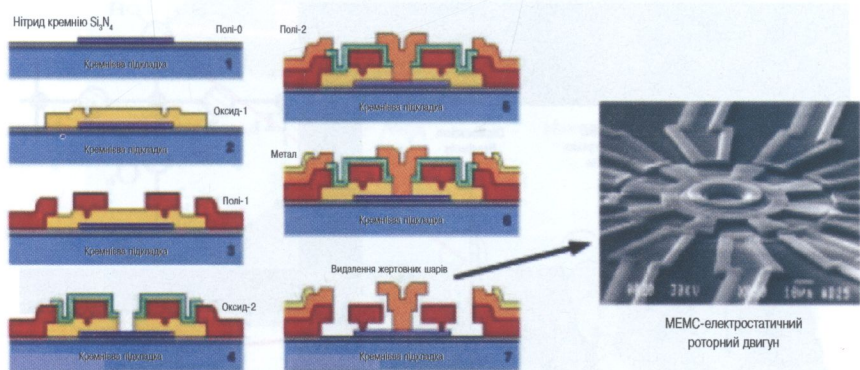
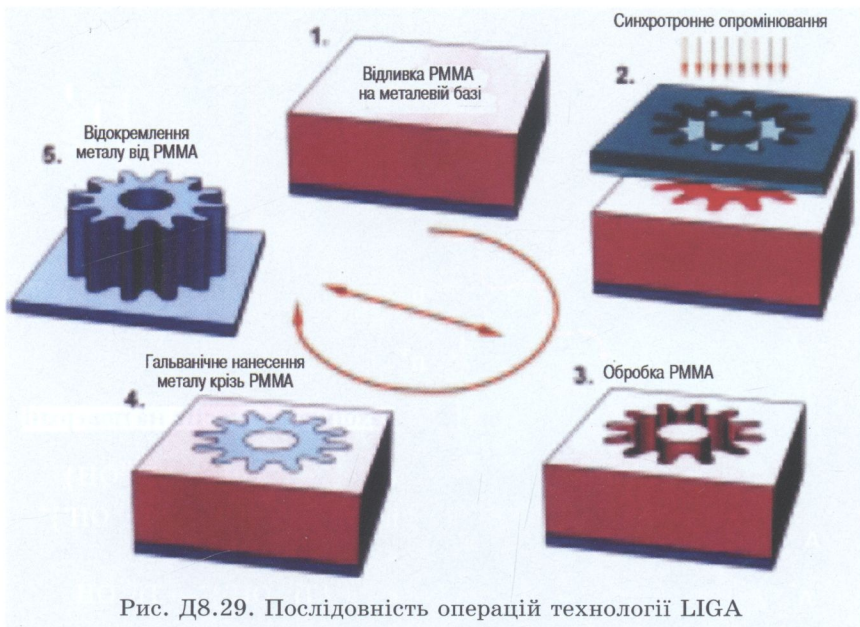


Рис. Д8.28. Процес виготовлення балкового кантилевера з використанням жертвового шару



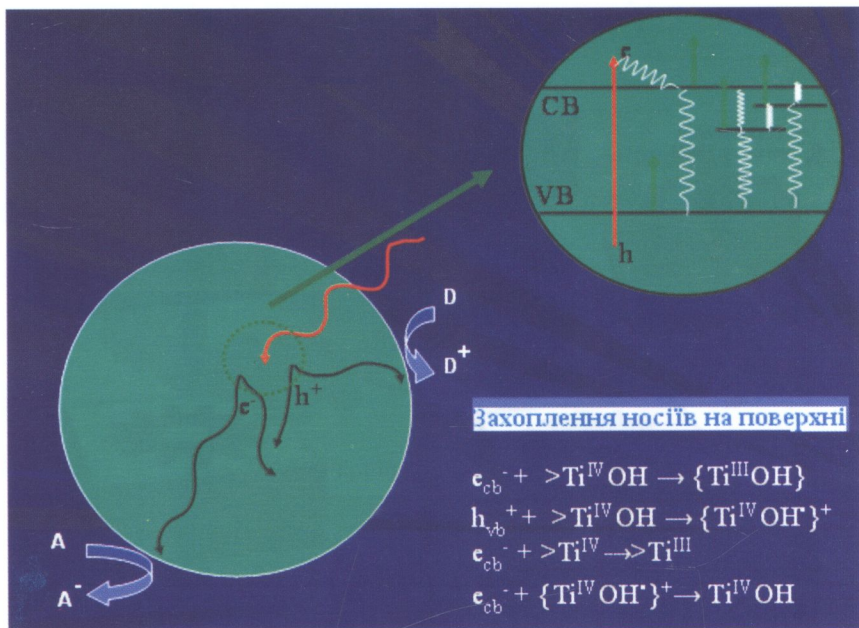


Рис. Д8.31. Процеси, що ініціюються фотозбудженням

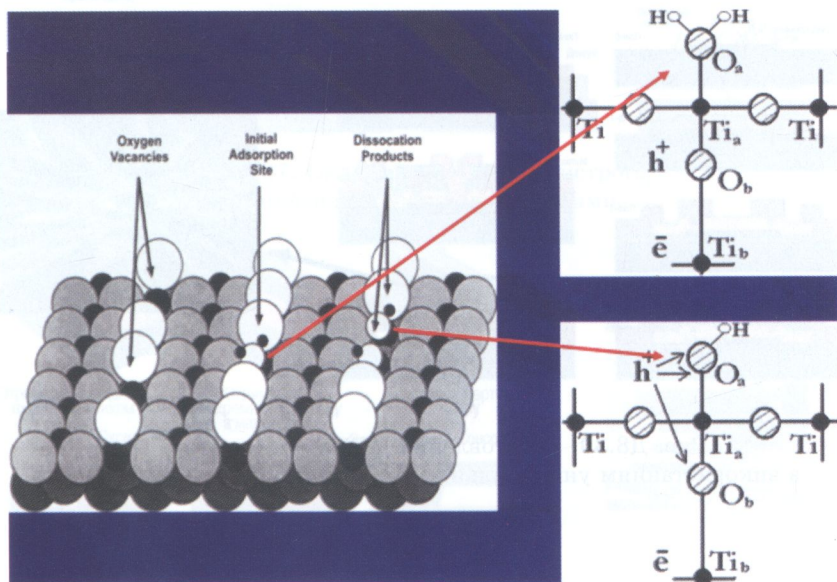


Рис. Д8.32. Поверхневі дефекти

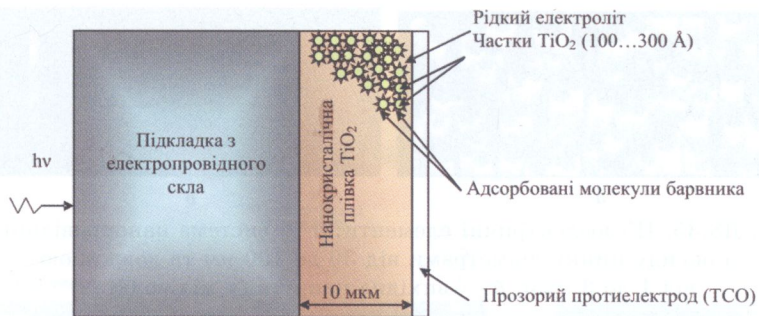


Рис. Д8.33. Фотохімічний елемент Гретцеля з оптичним збудженням заряджених молекул барвника

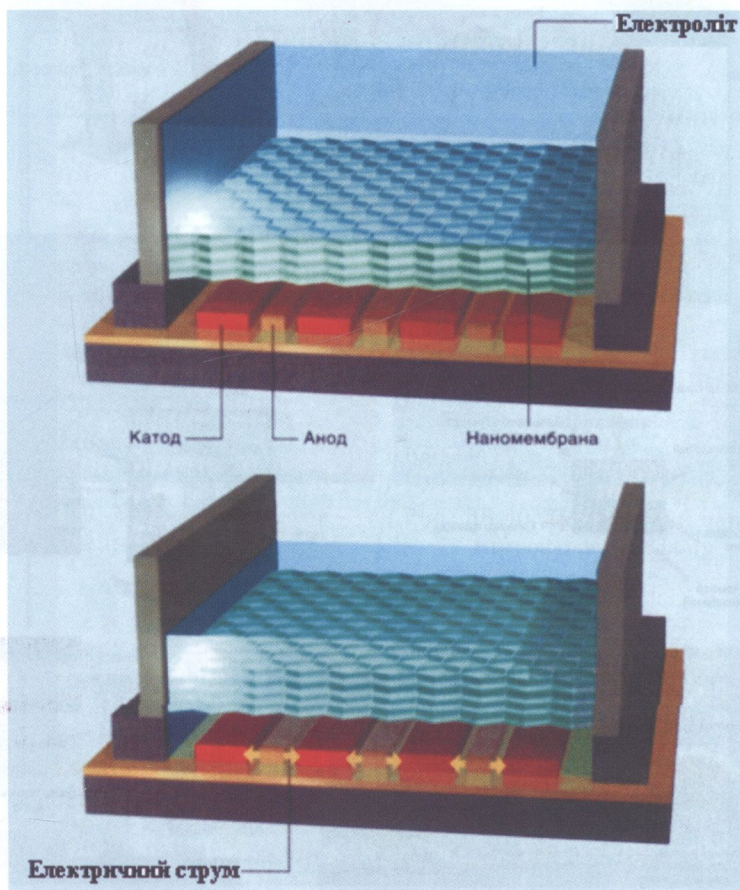
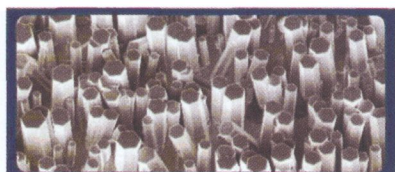
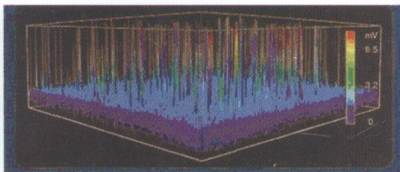


Рис. Д8.34. Гальванічне джерело з наномембраною



а



б

Рис. Д8.35. П'єзоелектричні елементи: а — система нанопровідників з оксиду цинку діаметрами від 30 до 100 нм та довжиною від 1 до 3 мкм; б — вихідна напруга (у мілівольтах)

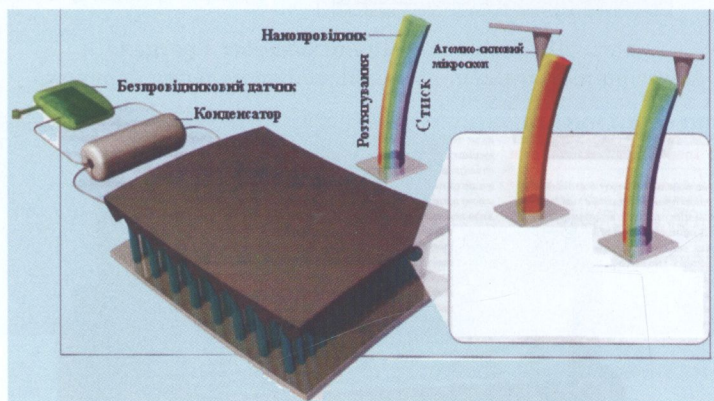


Рис. Д8.36. Блок генератора напруги

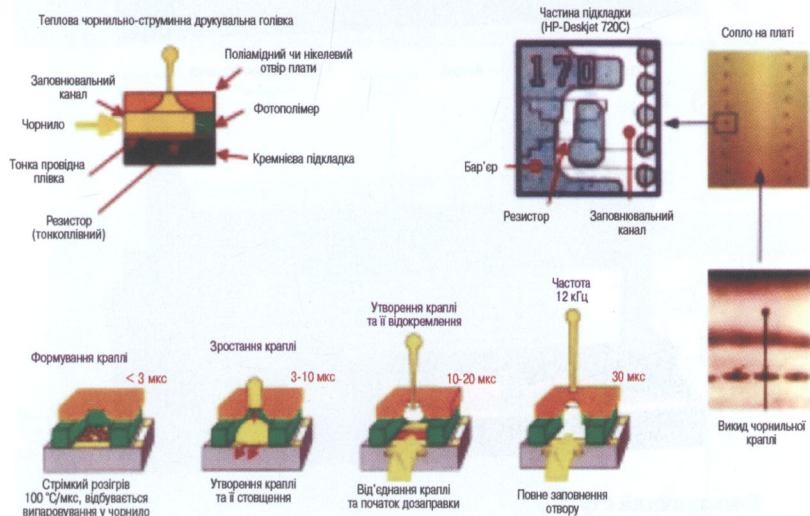


Рис. Д8.37. Будова та принцип дії струминної термодрукуючої голівки

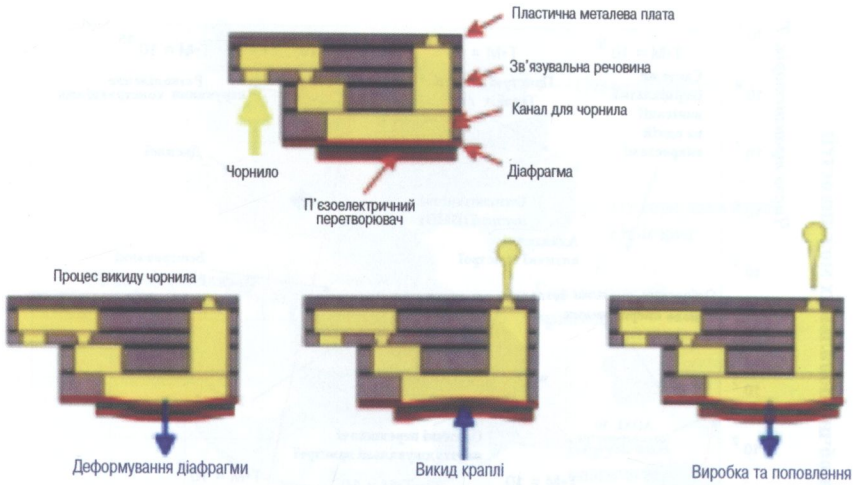


Рис. Д8.38. Будава та принцип дії п'єзоелектричної струминної друкувальної голівки

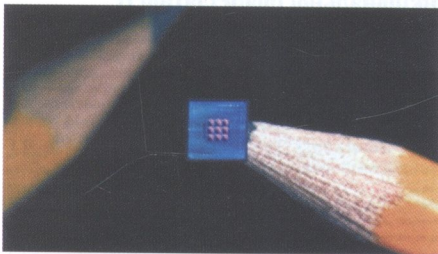


Рис. Д8.39. Мікрофон-телефон на кінчику олівця

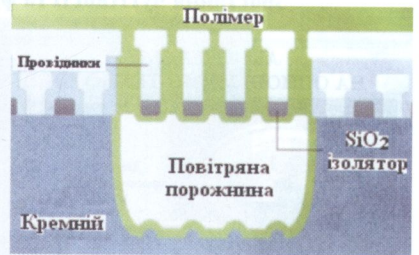


Рис. Д8.40. Поперечний переріз мікрофона-телефону

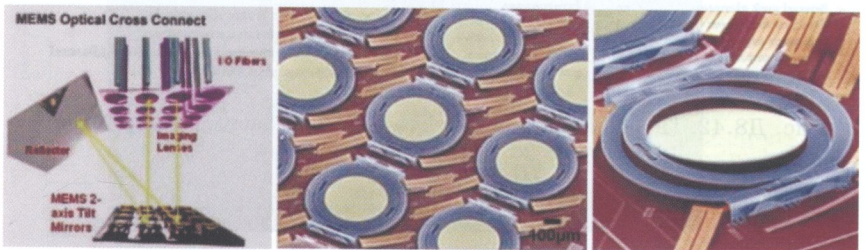
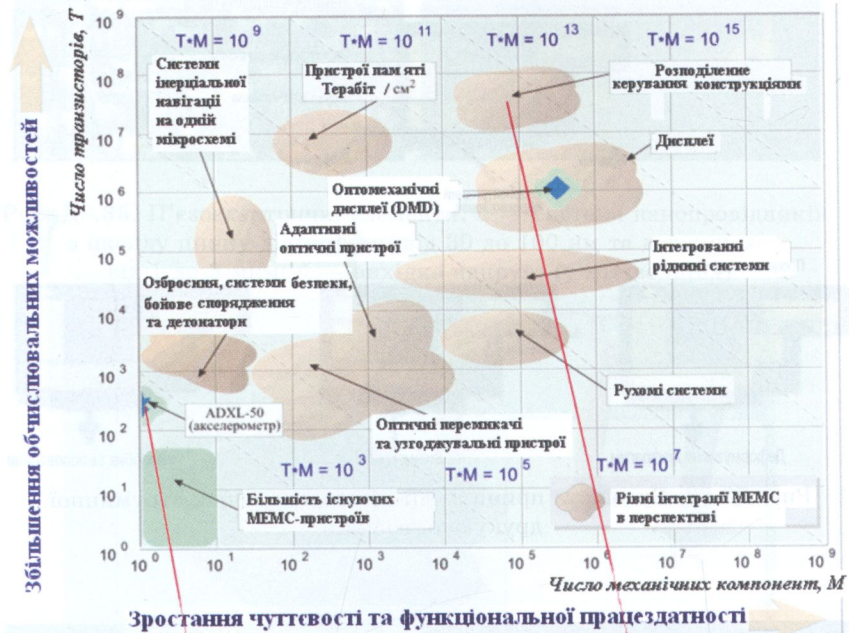


Рис. Д8.41. Цифровий мікродзеркальний пристрій



Зростання чутливості та функціональної працездатності

АКСЕЛЕРОМЕТР НА ОСНОВІ MEMS-ТЕХНОЛОГІЙ



- Двоєксісний діапазон
- Частота висхідного сигналу
- Гранічне перевантаження
- Напруга живлення
- 200 транзисторів
- +/- 50g
- 1 кГц
- 200g
- 5 В
- Інтегрована система самонагріву, автокалібрування та перетворення сигналів

УДОСКОНАЛЕНЕ АЕРОДИНАМІЧНЕ КЕРУВАННЯ

Розподілені датчики та виконавчі елементи (актуатори) на основі MEMS-технологій для зміни структури (режимів) аеродинамічного обтікання літального апарата



- Літальні апарати з малогабаритними дискретними системами керування
- Підвищення маневреності, збільшення відйомної сили, зменшення аеродинамічного опору

Рис. Д8.42. Перспективні області та можливі застосування MEMS



Рис. Д8.43. Оптоволоконні гіроскопи, вбудовані в систему навігації мобільного робота

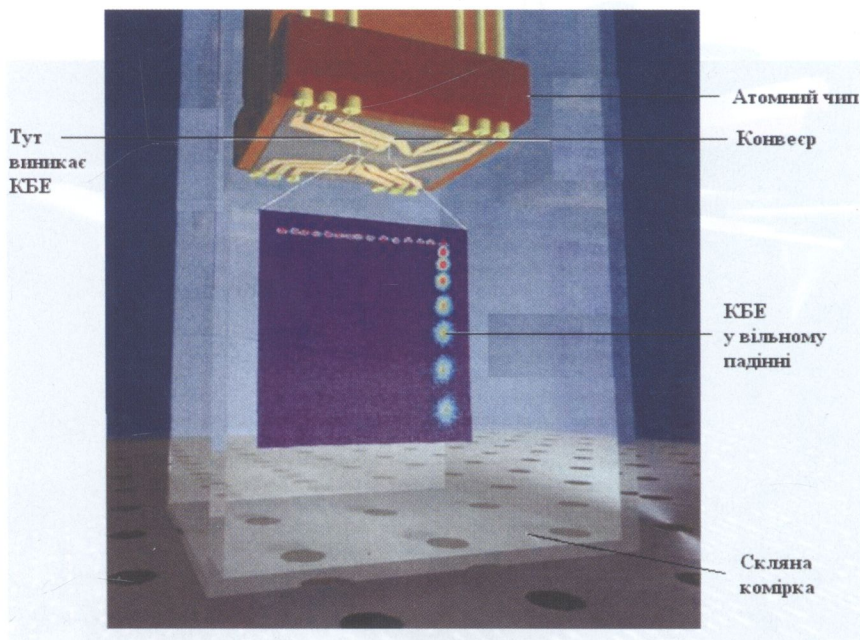
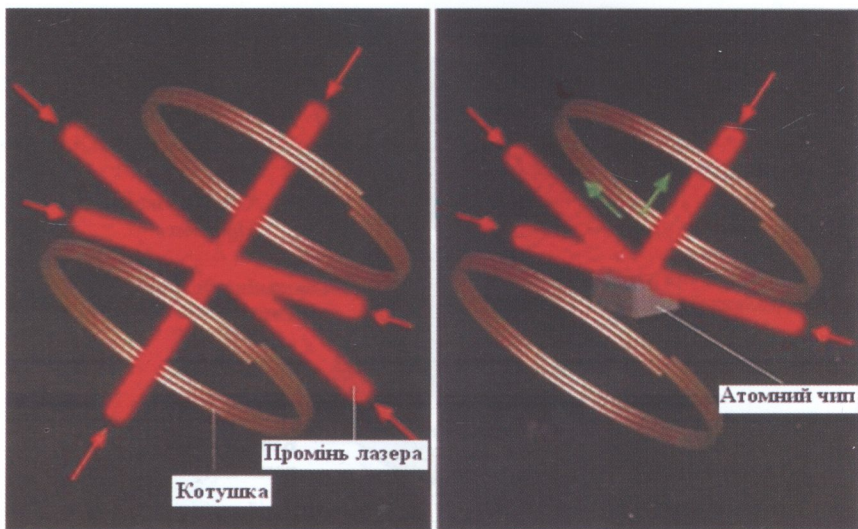


Рис. Д8.44. Активний конверср одержання КБЕ



a *b*

Рис. Д8.45. Магнітооптична пастка: *a* — із шістьма лазерами; *b* — із чотирма лазерами

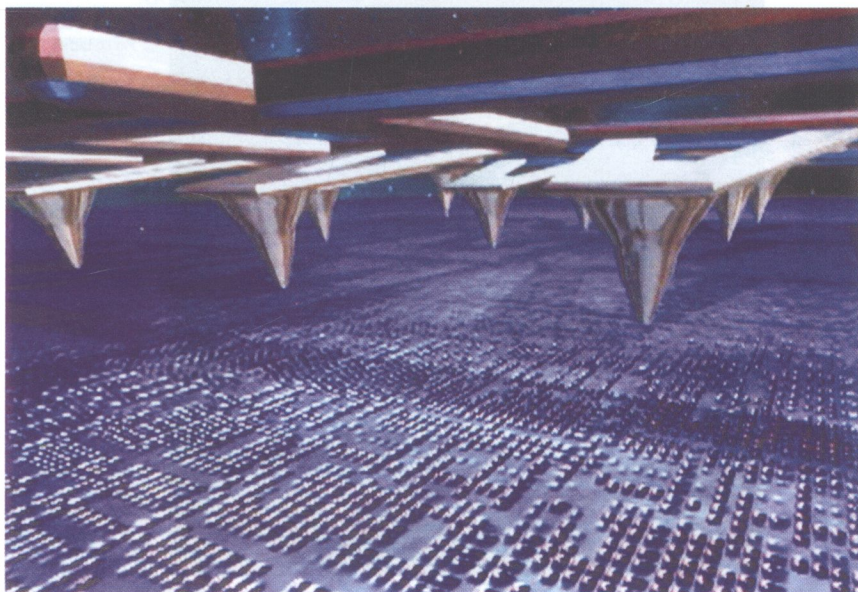


Рис. Д8.46. Міліпеди над жорстким диском

Зображення на масці



Зображення на підкладці

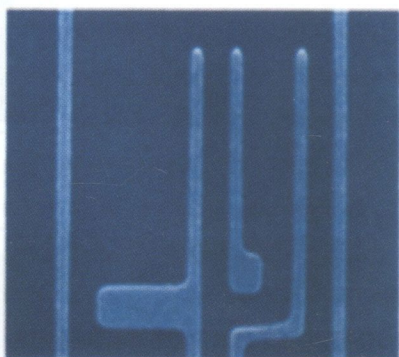


Рис. Д8.47. Корекція перекручування малюнка за рахунок дифракції



Рис. Д8.48. Система проектування із дзеркалами (діапазон жорсткого УФ)

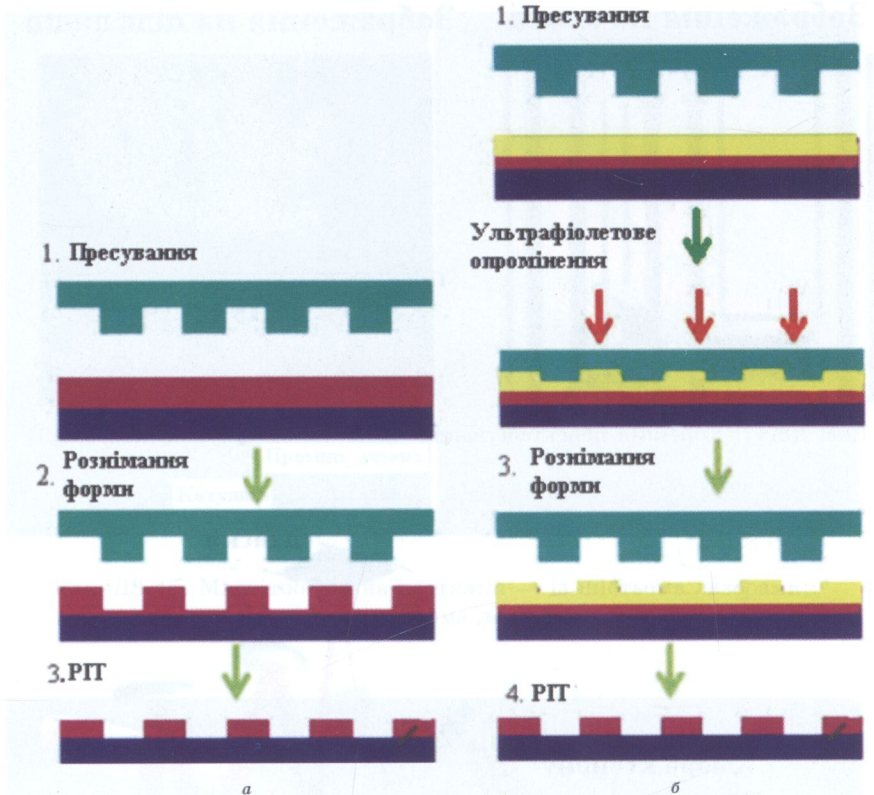


Рис. Д8.49. Наноімпринтинг: *a* — термічний; *б* — фотостимульований

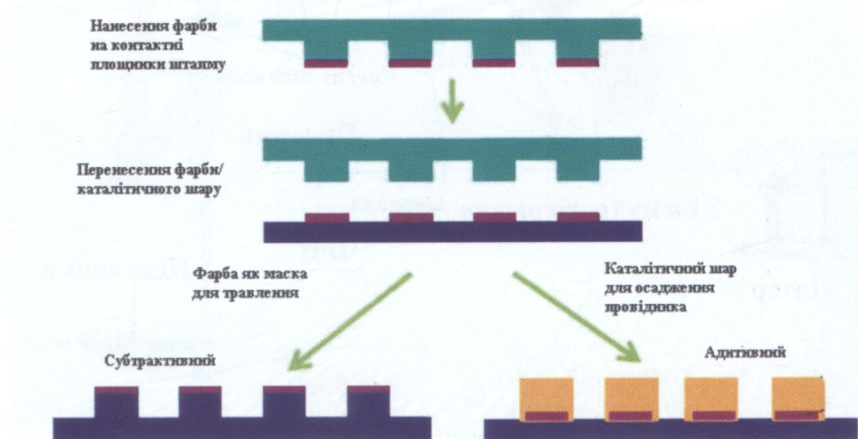


Рис. Д8.50. Наноконтактний друк

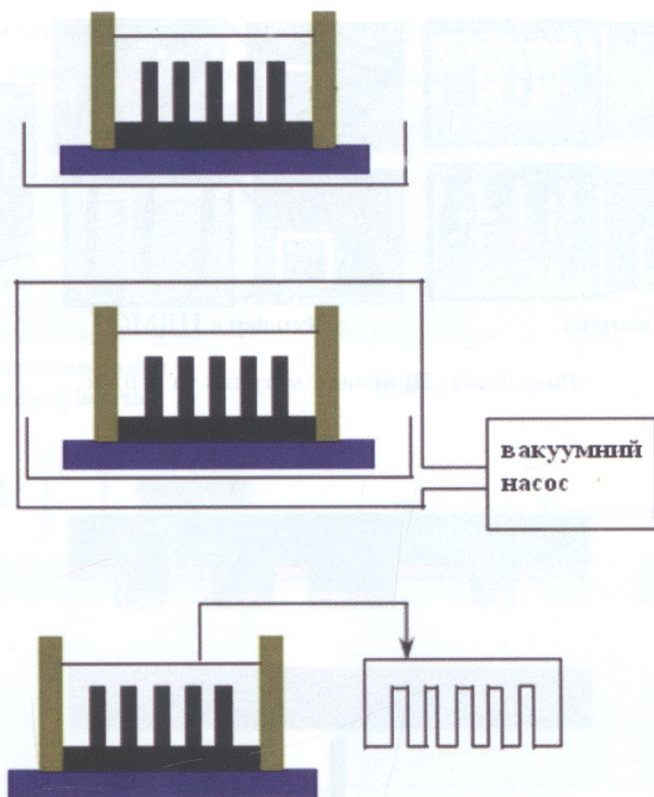


Рис. Д8.51. Процес пресування ПДМС

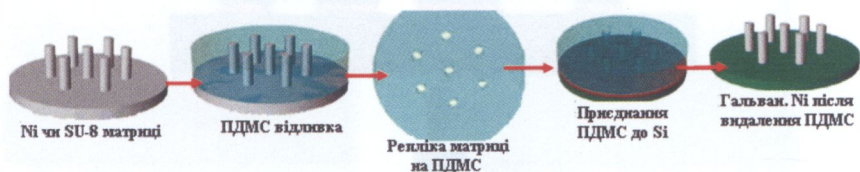
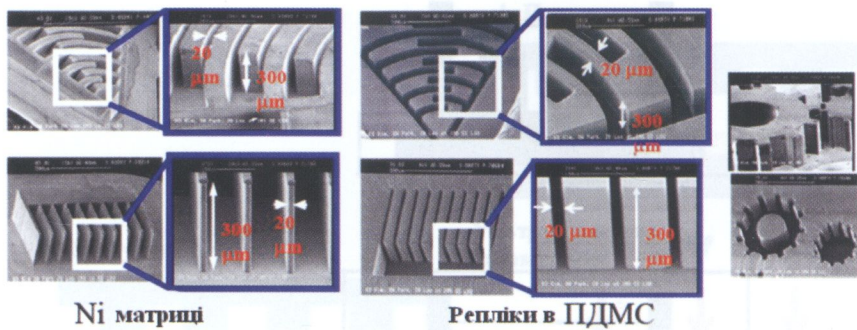


Рис. Д8.52. Послідовність операцій лиття ПДМС



Ni матриці

Репліки в ПДМС

Рис. Д8.53. Приклади матриць та реплік

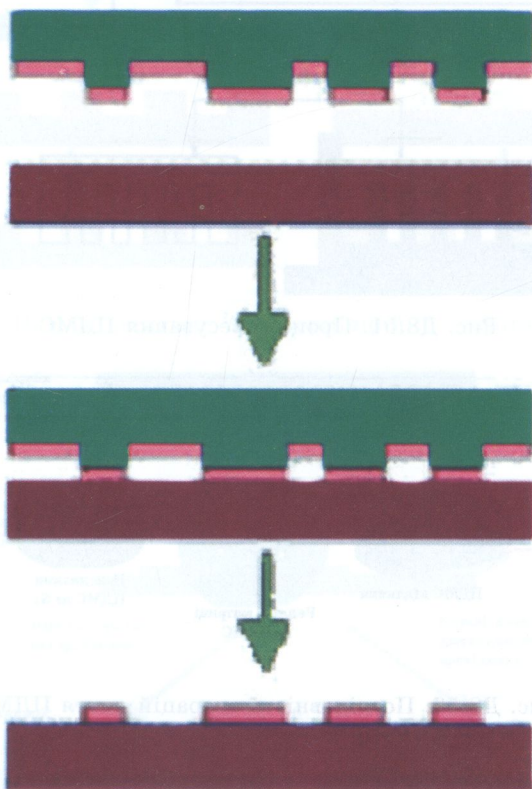
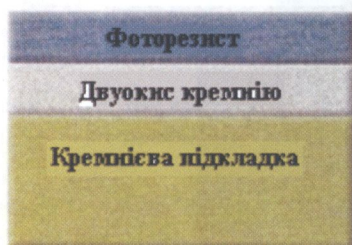


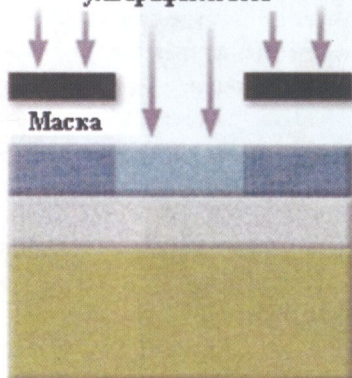
Рис. Д8.54. Процес переносу зображень

ЗВИЧАЙНА ЛІТОГРАФІЯ

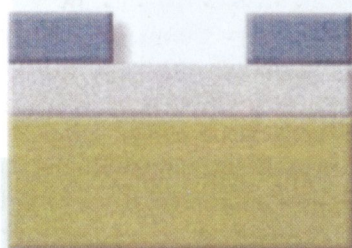
1 Нанесення матеріалів



2 Опромінювання ультрафіолетом

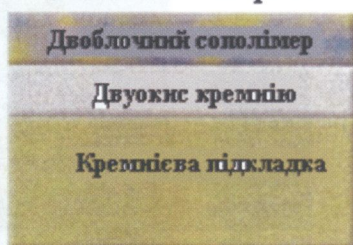


3 Проявлення резисту



САМОСКЛАДАЛЬНА ЛІТОГРАФІЯ

1 Нанесення матеріалів



2 Теплова обробка



3 Видалення плексигласу

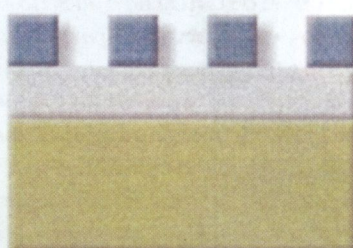


Рис. Д8.55. Послідовність операцій звичайної та самоскладальної літографії

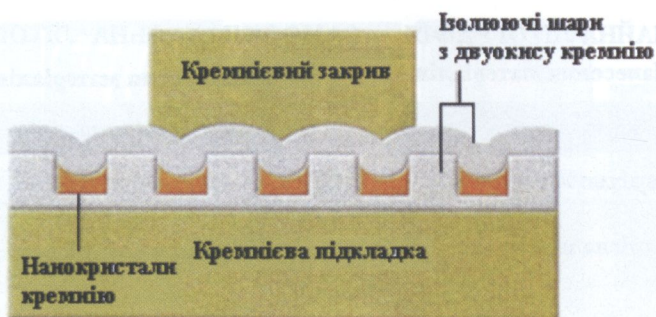


Рис. Д8.56. Флеш-пам'ять

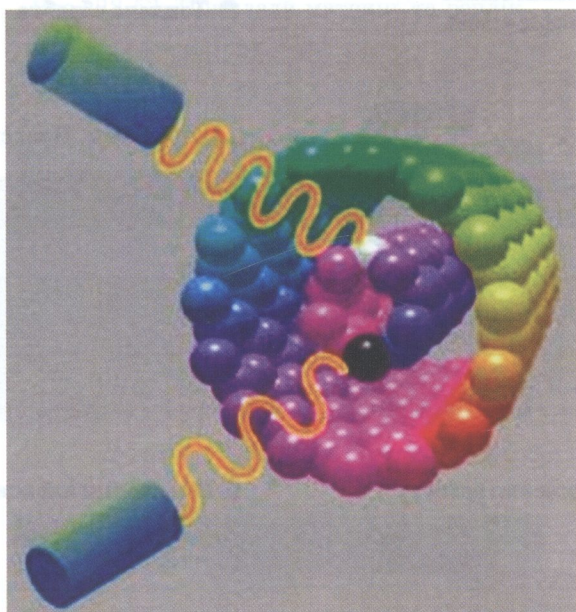


Рис. Д8.57. Модель наномотора, що приводиться в рух світлом

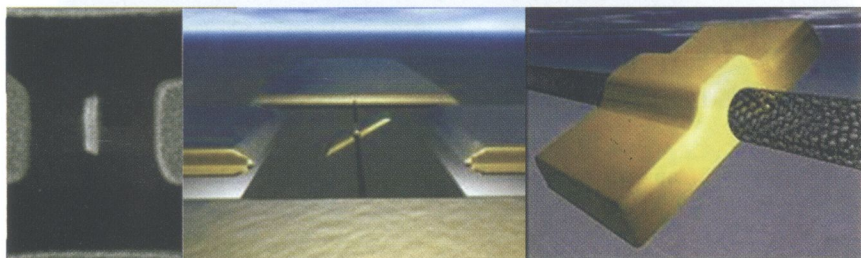


Рис. Д8.58. Мікрофотографія наномотора та його схематичне подання

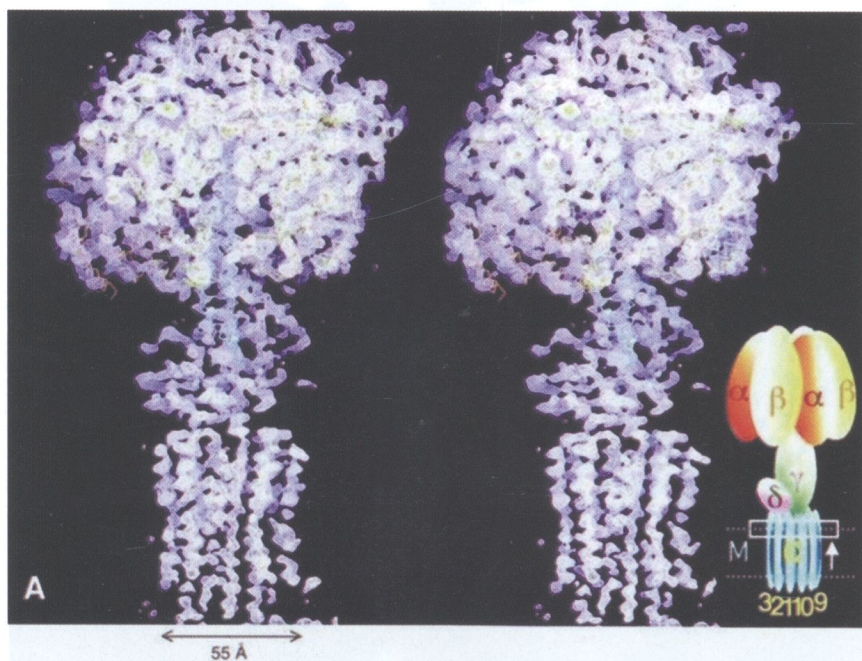
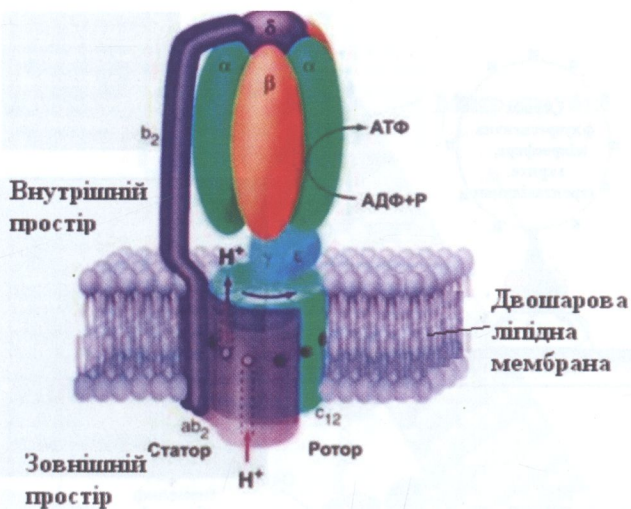


Рис. Д8.59. Будова та модель ензиму АТФаза

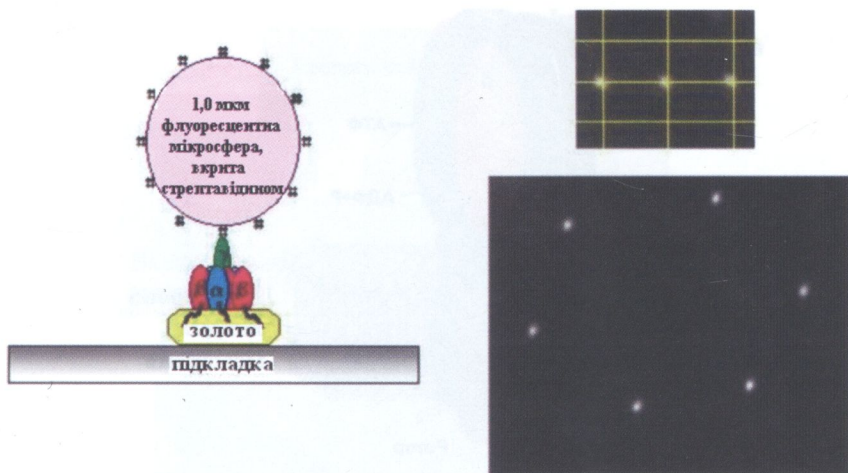


Рис. Д8.60. Будова наномотора та мікрофотографії радіального відхилення мікросфери

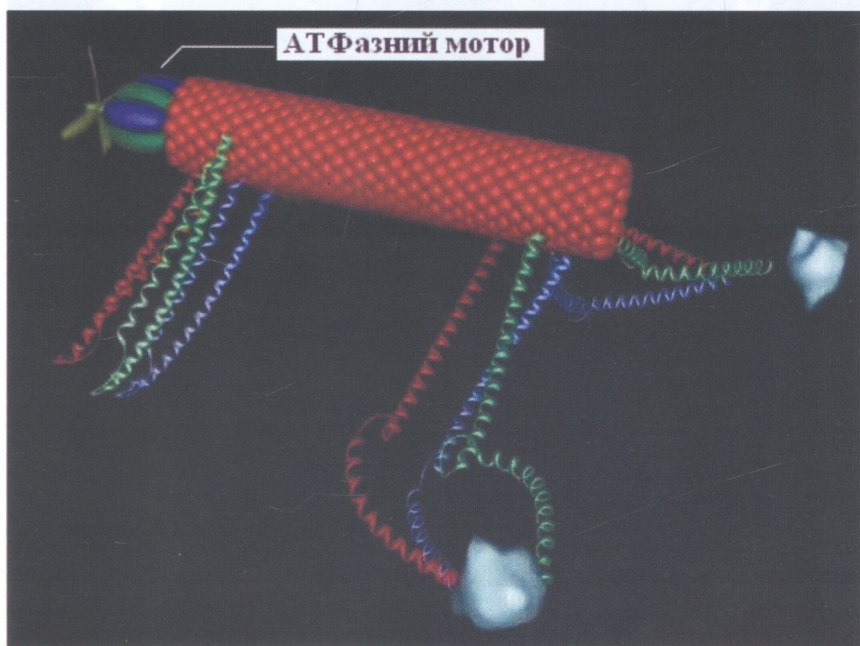


Рис. Д8.61. Наноробот із пропелером на АТФазі

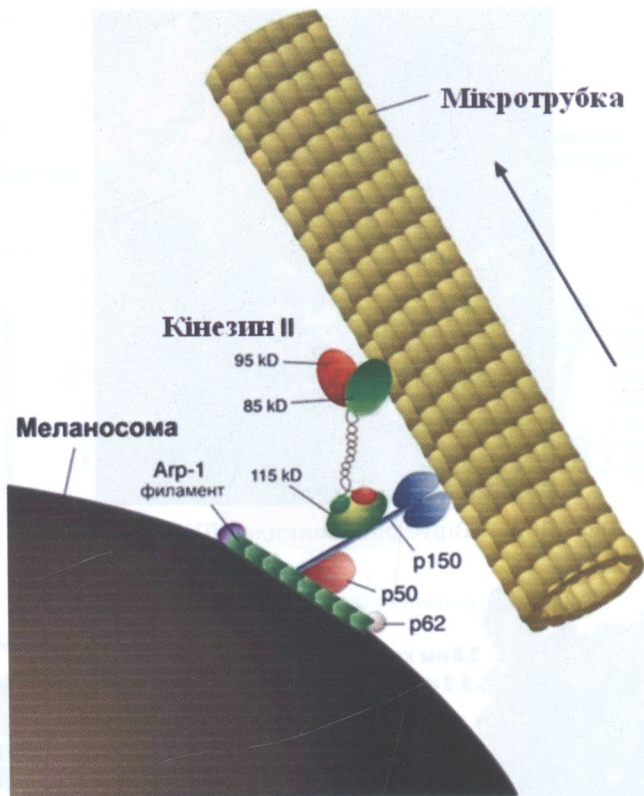


Рис. Д8.62. Переміщення кінезином меланосоми (клітинної органели) уздовж мікротрубки

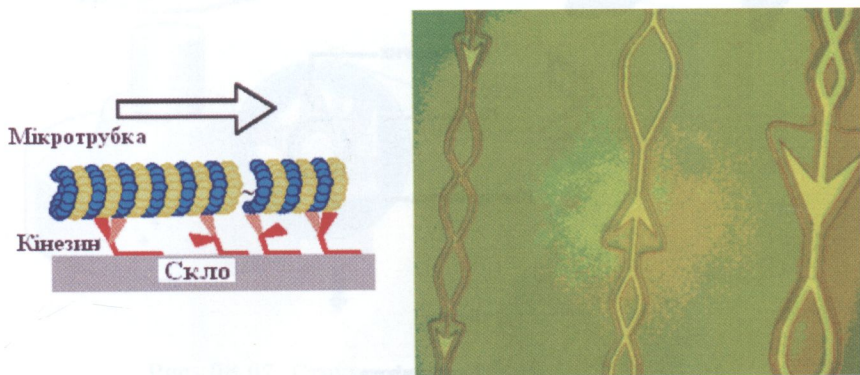


Рис. Д8.63 Кінезиновий наноконверс

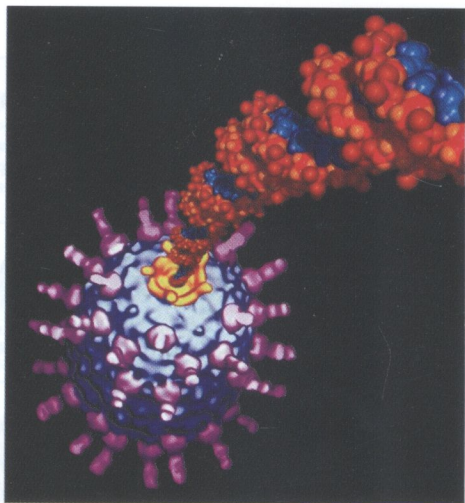


Рис. Д8.64. Вірус phi29 викидає ДНК із капсида

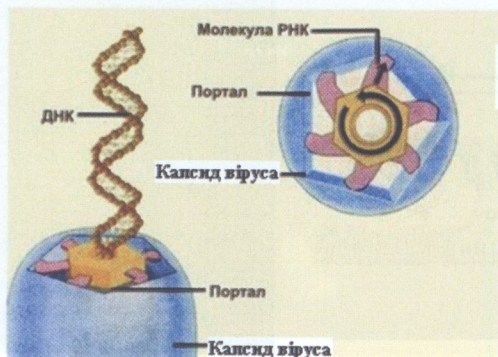
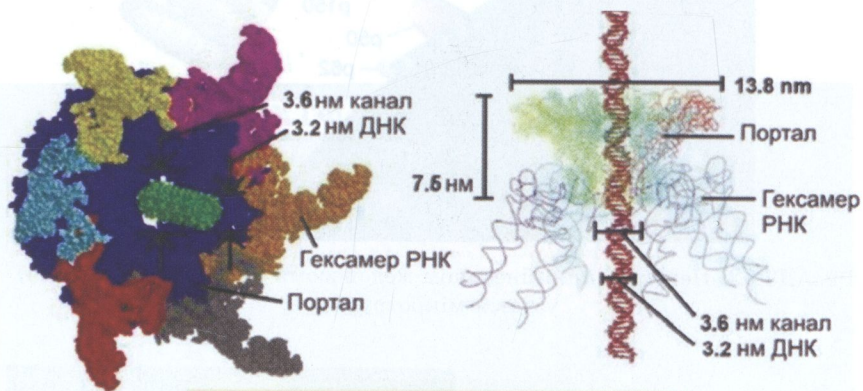


Рис. Д8.65. Структура та модель вірального мотора

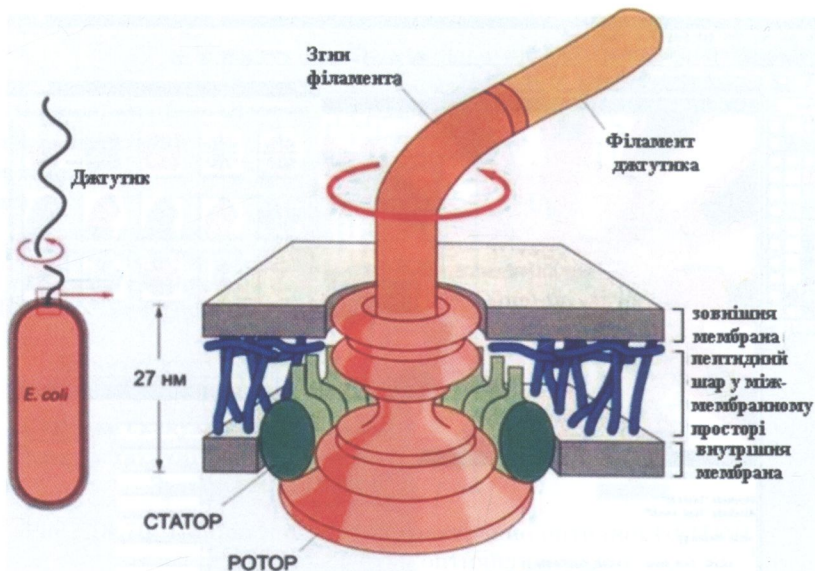


Рис. Д8.66. Будова джгутикового мотора

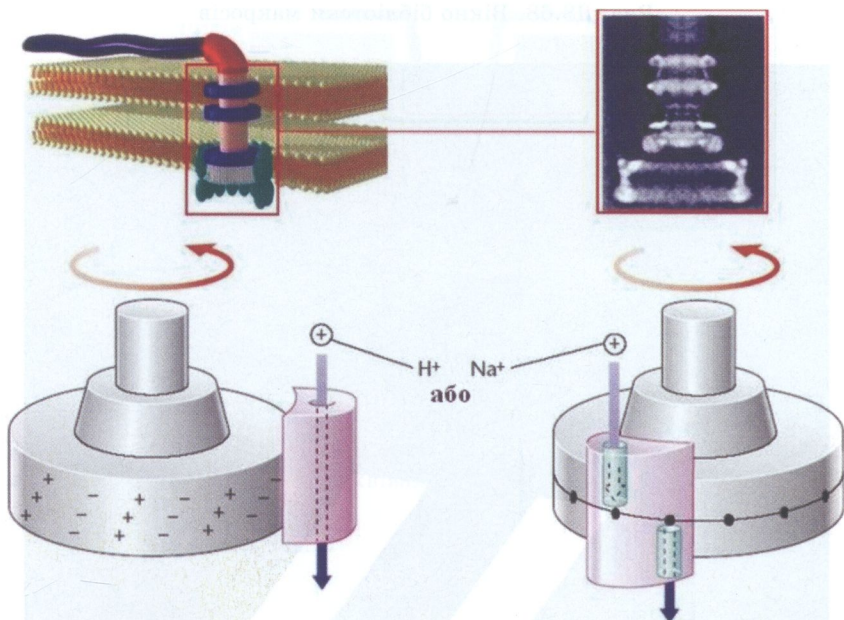


Рис. Д8.67. Структурна модель, принцип роботи та мікрофотографія джгутикового мотора

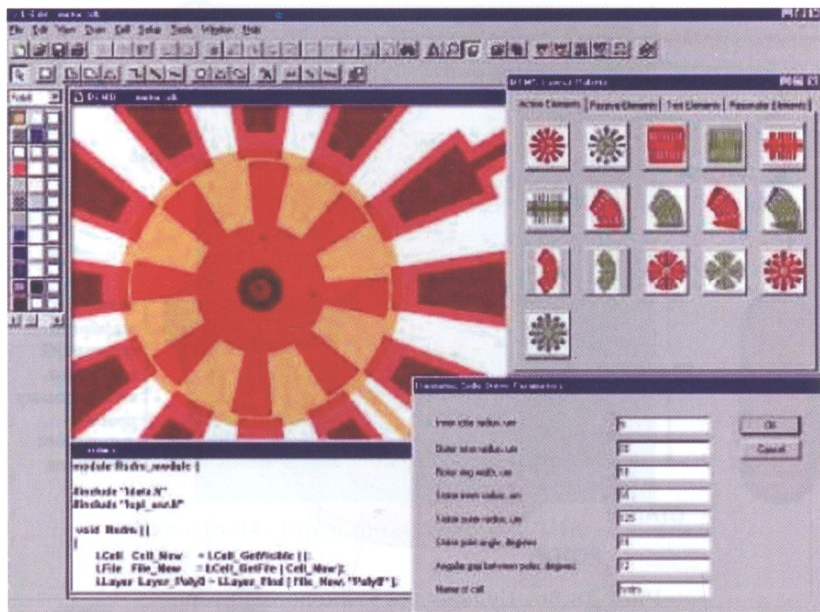


Рис. Д8.68. Вікно бібліотеки макросів

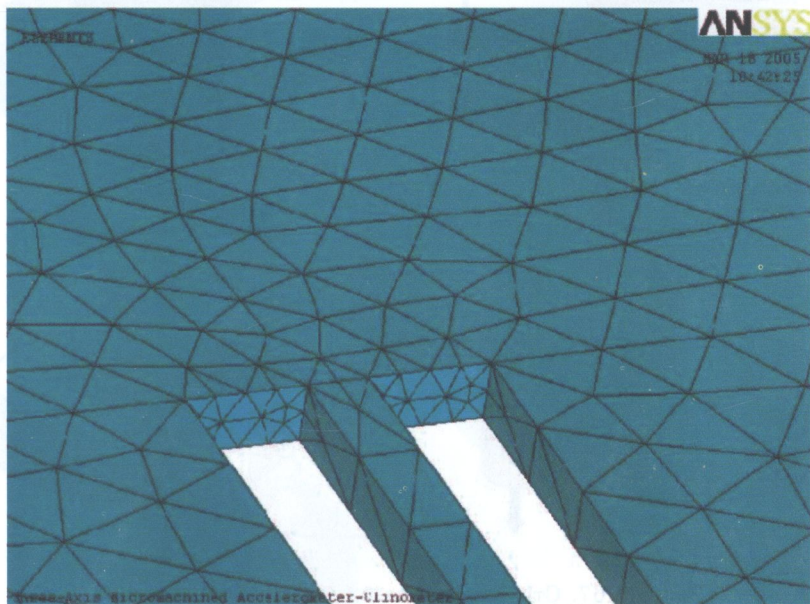


Рис. Д8.69. Кінцево-елементна модель елемента МСТ

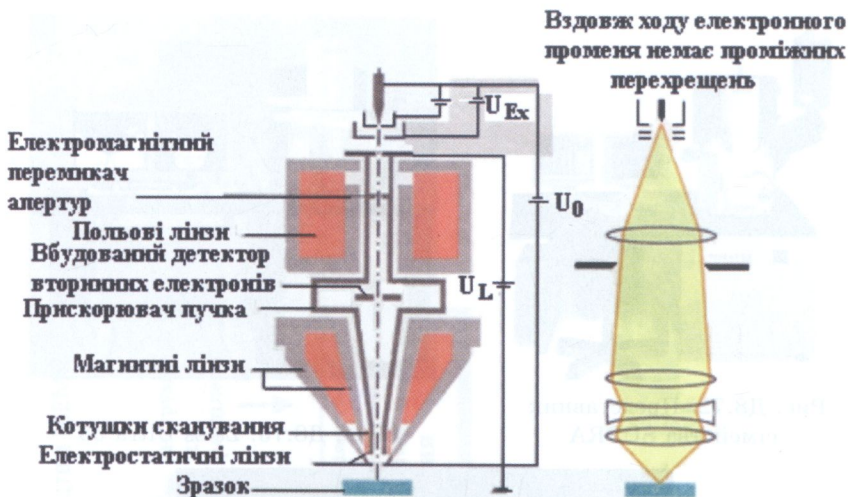


Рис. Д8.70. Принципова схема електронно-оптичної GEMINI[®] та її еквівалентна оптична схема

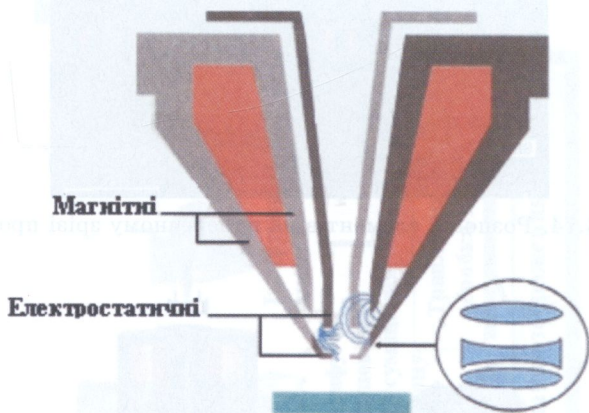


Рис. Д8.71. Принцип компування магнітних та електростатичних лінз об'єктива на прикладі еквівалентної оптичної схеми (ахромат)



Рис. Д8.72. Представник сімейства SUPRA

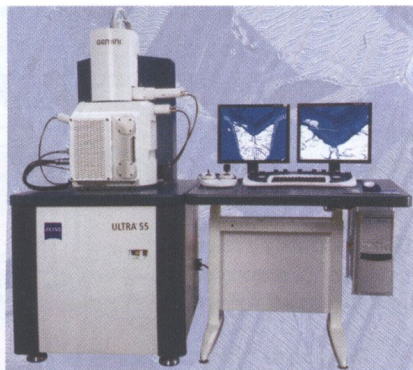


Рис. Д8.73. Zeiss Ultra 55

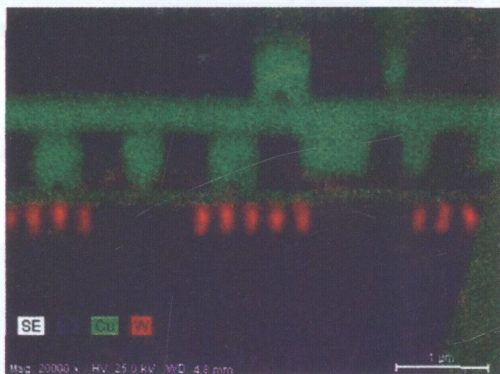


Рис. Д8.74. Розподіл елементів на поперечному зрізі процесора

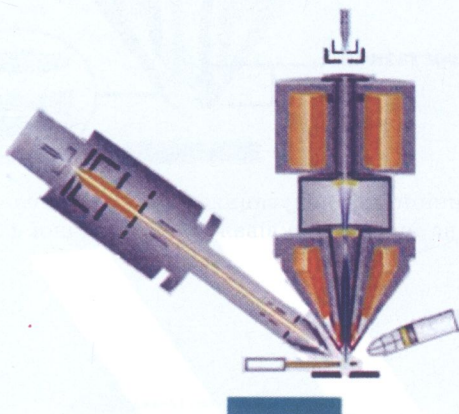


Рис. Д8.75. Принципова схема двопробеневого комплексу

Технологічне обладнання для виробництва MEMS

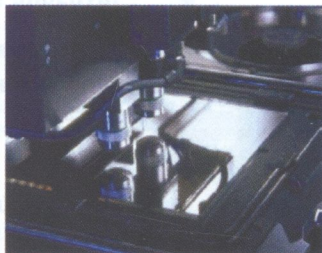
Типовий ТП MEMS



Устаткування, що пропонується для використання у ТП



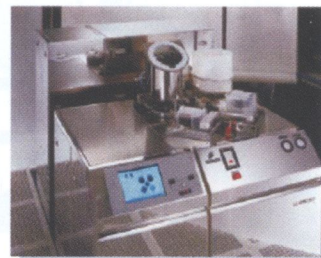
Центрифуга для нанесення



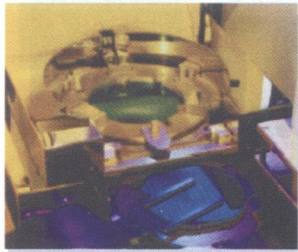
Експонування



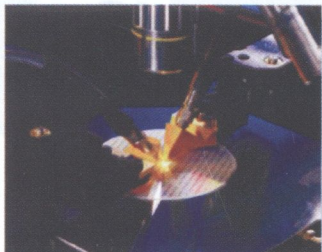
Контроль



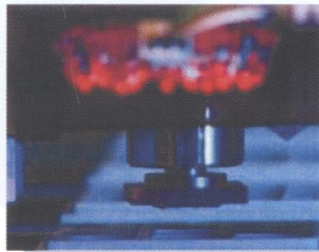
Травлення, зняття, очистка



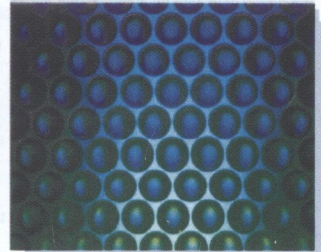
Монтажні підкладки



Контроль



Монтажні пристрої
з фліп-чип



SUSS обслуговування

Технологічне обладнання для наноімпринтинга

**NX-1000, T-NIL на нанопідкладці**

- NIL на нанопідкладці
- Пресування з повітряною прокладкою
- Високий вихід
- Інтелектуальний тримач зразка
- Застосування в оптоелектроніці, дисплеях

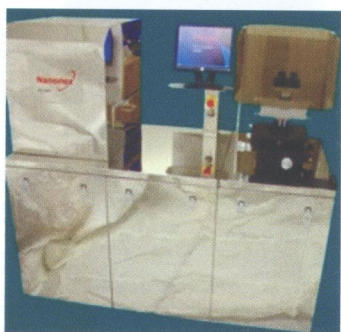
**NX-2000, Універсальний пристрій NGL**

- Підкладки до 8 дюймів
- Пресування з повітряною прокладкою
- Всі види наноімпринтинга
- Високий вихід завдяки однорідності тиску преса
- Поліпшене суміщення за замовленням
- Інтелектуальний тримач зразка
- Застосування в оптоелектроніці, дисплеях



NX-2500, Full-Wafer Imprinter with Alignment

- Підкладки до 8 дюймів
- Пресування з повітряною прокладкою
- Субмікронна точність сполучення по всьому полю
- Інтелектуальний тримач зразка
- Застосування в оптоелектроніці, дисплеях



NX-3000, Step-and-Repeat Nanoimprinter With Alignment

- Покроковий друк
- Субмікронне суміщення
- Досягнуто поліпшене пресування з повітряною прокладкою T-NIL
- Друк за час < 70 с
- Напівпровідникова підкладка до 8 дюймів
- Застосування в напівпровідниковому матеріалознавстві

Позначення на рис. Д10.1:

- 0 — Кімната скануючих електронних мікроскопів
- 0-1 — СЕМ — скануючий електронний мікроскоп ф. FEI
- 0-2 — СЕМ ф. Hitachi
- 1 — Ділянка вакуумного напилювання/травлення
- 1-1 — Напилювання структур, плівок, випарна установка
- 1-2 — ІС процеси: травлення та напилення (ф. Unaxis VLR)
- 2 — Ділянка вакуумного травлення
- 2-1 — Пристрій травлення MEMC (ф. Bosh, Unaxis SLR)
- 2-2 — Пристрій реактивно-іонного травлення (PIT) № 3 (MRC)
- 2-3 — Пристрій реактивно-іонного травлення № 2 (MRC)
- 2-4 — Пристрій реактивно-іонного травлення № 1 (покупна)
- 2-5 — Пристрій травлення з комп'ютерним керуванням (ф. Panasonic)
- 2-6 — Пристрій реактивно-іонного травлення № 5
- 3 — Ділянка вакуумного напилення
- 3-1 — PECVD — пристрій поліпшений плазмо-хімічного осадження з газової фази (Unaxis 790)
- 3-2 — Напилювач ф. Liesker
- 3-3 — Напилювальний пристрій, напилювання плівок
- 3-4 — Напилювання припою

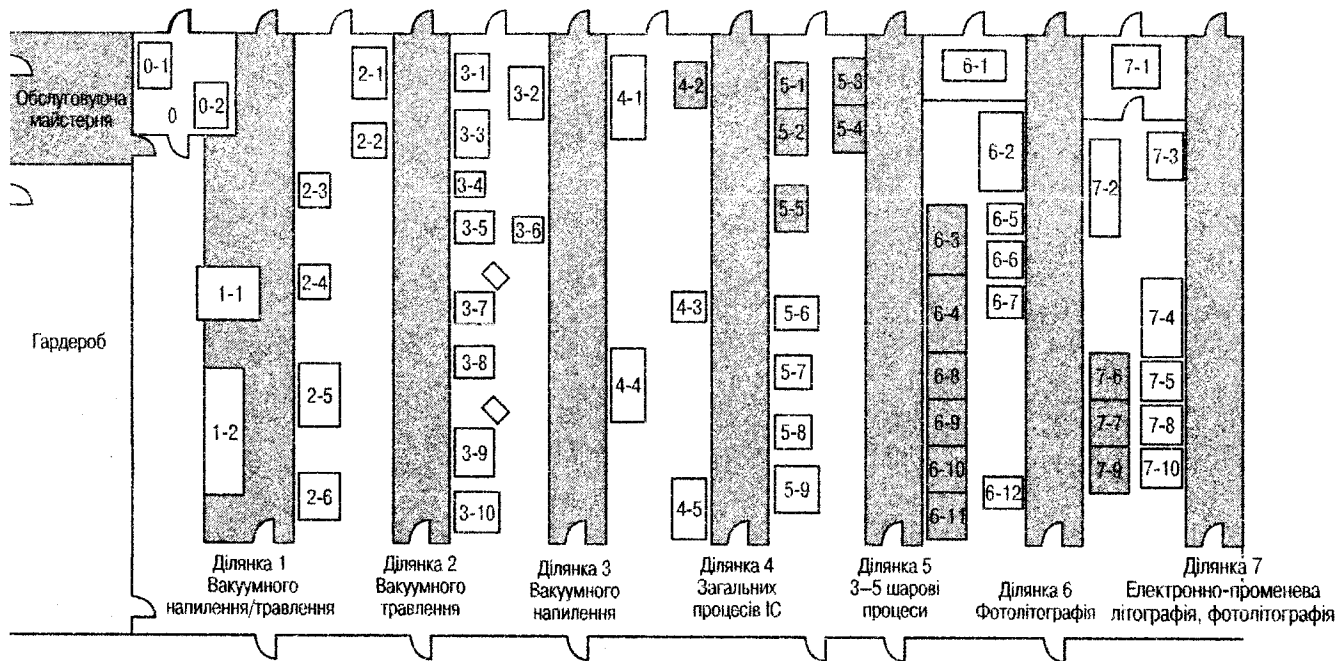


Рис. Д 10.1. Планування науково-виробничого підрозділу МСТ та НТ

- 3-5 — Термічне напилення
- 3-6 — Гнучкі шлейфи
- 3-7 — ЕПП № 2
- 3-8 — ЕПП № 4
- 3-9 — ЕПП № 3
- 3-10 — ЕПП № 1
- 4 — Ділянка загальних процесів ІС
- 4-1 — Трьохтрубна піч ф. Tustar
- 4-2 — Робоче місце рідинного травлення, мокре травлення
- 4-3 — Атомний силовий мікроскоп ф. Veeco
- 4-4 — Іонно-променеве напилення (ф. Veeco, Nexus)
- 4-5 — Вакуумна піч спікання підкладок
- 5 — Ділянка обробки 5-тирівневих структур
- 5-1 — Робоче місце ВЧ-обробки
- 5-2 — Робоче місце ВЧ-обробки
- 5-3 — Робоче місце рідинного травлення
- 5-4 — Робоче місце рідинного травлення
- 5-5 — Робоче місце відмивання від розчинників
- 5-6 — Відпал стрічки
- 5-7 — Сушіння за критичної температури
- 5-8 — RTA AET
- 5-9 — Термопроцесор Ga
- 6 — Ділянка фотолітографії
- 6-1 — Пристрій голографічної літографії
- 6-2 — Фотоповторювач DCA, автоматичний крок 200
- 6-3 — Робоче місце нанесення резиста центрифугуванням
- 6-4 — Робоче місце нанесення резиста центрифугуванням
- 6-5 — Робоче місце сполучення (позиціонування) (Suss, MJB-3)
- 6-6 — Робоче місце сполучення в інфрачервоному випромінюванні
(Suss, MJB-3 IR)
- 6-7 — Робоче місце сполучення (Suss, MJB-3)
- 6-8 — Робоче місце травлення
- 6-9 — Робоче місце травлення
- 6-10 — Робоче місце відмивання, зняття
- 6-11 — Робоче місце відмивання, зняття
- 6-12 — Установка фотолітографії
- 7 — Ділянка електронно-променевої літографії, фотолітографії
- 7-1 — Електронна голівка
- 7-2 — Електронна стійка
- 7-3 — Консоль (пульт керування)
- 7-4 — Фотоповторювач GCA 5X
- 7-5 — Установка сполучення (Suss MA-6)
- 7-6 — Робоче місце нанесення ФР на підкладки
- 7-7 — Робоче місце проявлення
- 7-8 — Установник (bonder) (Suss BA-6)
- 7-9 — Пристрій зняття, розчинення
- 7-10 — Установка наноімпринтінгової літографії (Nanonex)

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

- Абсорбція 147, 187, 314
- Аденозинтрифосфат (натрію/калію) 284
- Адсорбція 314
- Акселерометри 116, 220
 - ADXL, ф. AD 223
 - емвісні 223
 - об'ємні 222
 - п'єзоелектричні 220
 - ф. Motorola 91, 221
- Активний 258
- Актuator 26, 40
- Алотропні форми 140, 311
- Алмаз 142
 - властивості 143
- Аналогії
 - електромеханічні 32, 37—38
 - ізоморфізму 93
- Аспектне відношення 311
- Аспекти розвитку MEMS, NEMS
 - негативні 257
 - позитивні 257

Б

- Бачіболи 145
- Балка 95, 116, 321
 - консольна 96
 - моделювання 101
- Бар'єр енергетичний 272
- Бар'єрний шар 78
- Батареї
 - гальванічні 211
 - сонячні 198
 - паливні 216
- Біморфний 274
- Біодвигуни 281
- Біологічні структури 282, 285
- Біополімери 255
- Біфуркації 284
- Бозе — Ейнштейна конденсат 232
- Бозон 311

В

- Віглер 183
- Відновлення 311
- Відображення конформне 372
- Волоконна технологія (перетягування волокон) 177
- Втома 28, 30, 139
- Вуглецеві нанотрубки 146

Г

- Гетерогенний 256
 - поверхневий, пов'язаний з поверхнею 31
- Гідрофільність 179, 206
- Гідрофобність 179, 206
- Гіроскоп 220
 - з вібруючим кільцем 226
 - волоконно-оптичний 231
 - з прямокутними рамками 225
- Голівка друкувального пристрою 137, 215
 - п'єзоелектрична 216, 238, 242
 - термічна 215
- Графан 311
- Графен 311
- Гретцеля елемент 203

Д

- Датчики
 - високотемпературні 143
 - газів 64—66, 372
 - кута 223
 - магнітні субмікронні 59—63
 - медичні 54
 - прискорення 220
 - тензорезистивні 56
 - тиску 107
- Дезоксирибонуклеїнова кислота (ДНК) 167, 281
- Деформації
 - звуву 96, 320
 - розтягування 316

Друкуючі голівки струминні
137, 215
- п'єзоелектричні 216, 238, 242, 274
- термодрукуючі 215

Е

Евтектичний
- припій 77
- шар 78
Електростатичні
- перетворювачі 51
- приводи 243
Елементи
- гальванічні 211
- сонячні 198
- паливні 216
Енергія потенціальна 96, 103
- деформації 103
- переміщення 103
Ензим 286
Ефекти
- квантово-механічні 32, 40
- масштабні 24—32, 40

Ж

Жертовний шар 186, 189

З

Закон Кастильяно 96, 103

І

Ізоморфізм 93
- властивостей матеріалів 131
- моделей 93—95
Інваріант пружного елемента 120
- балкового 121
- мембранного 121
- мембранно-балкового 125
Індуктивний чутливий елемент
49—51
Інтеграція розробки та виробництва
85

К

Кабелі на поліімідній плівці 67—71

Кантилевер 248
Карбід кремнію 136
Кераміка 164
Класифікація технологій МЕМС
та НТ 173
Колоїди 203
Конденсат Бозе — Ейнштейна 232
Константи 25, 331
Контроль багатошарових
комутаційних плат 77—79
Корпускулярно-фотонні
технології 173, 177
Коефіцієнти
- жорсткості при згинанні 102
- жорсткості при крутінні 251
- жорсткості при послідовному та
паралельному з'єднанні ділянок
балок 104, 105, 128
- жорсткості при розтягуванні-
стиску 102

Кремній 131
- анізотропне травлення 190
- властивості 131, 134, 137
- - електричні 132, 135
- - механічні 135, 137, 193
- - технологічні 133, 190—195
- кристалографічні площини 132
Кристал
- анізотропія властивостей
132, 138

- орієнтація 132
- симетрія 132
- фотонний 163
Кросбари 74

Л

Лабораторія на кристалі 206
Лазер 207
- ексимірний (димірний) 261
Латеральний (бічний) 311
Лінії зв'язку 71
Літографія 258
- гаряче тиснення, пресування
260, 266

- зворотний наноімпринтинг 262
- мікроконтактний друк 263
- наноконтактний друк 262, 266
- нанодрук переносом 263
- наносферами 232, 262
- перова 262, 269
- фотостимульована 262
- Люмінесценція 203

М

- Магнітоопір 59
 - балістичний 61, 63
 - гігантський 60, 63
 - екстраординарний 61—63
 - колосальний 61, 63
 - тунельний 61, 63
- Маніпулятори
 - кантилевери 248
 - міліпеде 248
- Матеріали МЕМС та НТ
 - АТФ 284
 - бакіболи 278
 - ВНТ 146
 - ДНК 167, 281
 - інтелектуальні 169
 - керамічні 164
 - колоїди 203
 - кремній, полікремній, двоокис, карбід, нітрид кремнію 131—137
 - ПММА 176, 185
 - ПНК 168, 282
 - полімід 139
 - рідини феромагнітні 160
 - РНК 167
 - ротаксани 76
 - SU-8 167
 - фталоціаніни 210
- Матриці
 - коефіцієнтів демпфування 104
 - коефіцієнтів жорсткості балки складної конфігурації 103
- Матричні виводи
 - кулькові (BGA) 77—79
 - стовпчикові 77—79

- штифтові 77—79
- Матричні рівняння рівноважного стану 102—104
- Міжз'єднання 71
 - з ВНТ 72
 - кросбари 74
 - оптичні 72
 - поліімідними кабелями та шлейфами 67—71
- Методи досліджень у НТ 269
- Мехатроніка 15
- Мікроскопія 271
- Мікроскопи
 - атомний силовий 270, 275—277
 - електронний 360
 - тунельний скануючий 21, 248
- Мікрофон 218
- Мова VHDL 88, 338
- Моделі
 - балок 95—107
 - електростатичних ЧЕ 51
 - ємнісних ЧЕ 42—49
 - зустрічно-штирьових резонаторів 127—129
 - мембран 119—127
 - напівпровідникових датчиків 54
 - резистивних ЧЕ 56—59
- Моделювання
 - математичне 83, 107
 - пакети програм Converter, SPICE, Tappet Pro, Sugar 42, 87
 - сигналу в перерізі оптоволокна 80
- Молекулярний квадрат 65

Н

- Наноінженерія 256
- Нанонаука 256
- Наноструктури 256
- Нанотехнології 256, 267
- Нанотрибологія 31
- Нанотрубки 146, 256
 - багаточарові 146
 - властивості 14
 - вуглецеві 148—151

– зигзагоподібні 150
– зубчасті 150
– одношарові 149
Нанопристрої 72, 213, 252
Напруження
– дотичні 321, 329
– нормальні 316, 327
Нітрид кремнію 136

О

Оксид кремнію 136
Ондулятор 183

П

Піддатливість 99, 102
Полікремній 136, 153, 160
Полімери 166, 255
Поліметилметакрилат (ПММА)
167, 177
Позиціонер волоконно-оптичний 80
Перетворювачі фізичних величин
– електростатичні 51, 243
– емнісні 42
– індуктивні 49—51
– магнітні 59—63
– резистивні 54, 107

Принципи

– адитивності сил 97, 98
– електромеханічних аналогій
32, 37
– ізоморфізму 93
– квантово-механічні 32

Процесори

– CISC 92
– RISC 90

Процеси

– гетерогенні 31
– зверху вниз 172
– знизу вгору 76, 123, 180
– одержання ВНТ 146
– технологічні «важкокеровані» 78
Пружність 33, 100, 102

Р

Рідина

– імерсійна 312

– ферромагнітна 160

Розрахунки

– балки 35, 116, 321
– електростатичного ЧЕ 51
– емнісного ЧЕ 42
– магнітоелектричного ЧЕ 50
– мас, що рухаються, ЧЕ 37
– мембрани 120
Резонанс 39
– балки 95
– зустрічно-штирьових систем 129
– мембран 120
– механічних систем 39, 120
Рекомендації по обробці кремнію
в МЕМС 136
Роботи 236
– біоподібні 237
– керовані біологічні 237
– міні 236
– мікро 236
– нано 236, 285
– перспективи розвитку 252
– розподілені РТС 239
Ротаксан 76

С

Самовідновлення 169
Самоорганізація 169
Самореплікація 169
Самоскладання 267, 281
Сенсори 41
– концентрації газів 64, 372
– кута 42, 220, 223, 231
– прискорення 42, 220
– тиску медичні 107
– швидкості 226
Синергетика 32, 256, 314
Синергія 32, 314
Синхротрон 182, 260
Система на кристалі 243
Опір 33—39
– активний та реактивний 34—39
– механічний 33
Спінтроніка 144

- Структури
– біологічні 170
– датчиків тиску 107
– ДНК 168
– магнітні 59
– нанорозмірні 285
– полімерні 166

Т

- Телефон 218
Тензори
– деформації 334
– напруг 334
– симетрія коефіцієнтів 334
Термокомпресія 244
– анодна 244
– пряма 244
– із проміжним шаром 244
Тертя 28---31
– внутрішнє 33
– ковзання 33
– котіння 33
Технології
– зверху вниз 76, 173
– знизу вгору 76, 173, 180
– інтегральних тензоперетворювачів 107
– контролю якості 77
– мокрі 173
– сухі 173
– AMANDA 172
– HARPSS 174
– IMEMS 172
– LIGA, SLIGA 84, 172, 181
– MUMPS 172, 186

- SUMMIT 172, 187
Торсіон 47
Травлення
– алюмінію 68
– анізотропне 192
Транзистор
– нано-польовий 268
– на ВНТ 66

Ф

- Фонон 200
Фотовольтаїчний елемент 203, 210
Фотолітографія 251
Фотон 200
Фотонний кристал 163
Фоторезисти 167, 177
Фотосинтез 203
Фталоціаніни 210
Фулерени 145
Фулерити 145

Х

- Хіральність 147, 149

Ч

- Частота власного резонансу 39, 120
Числа характеристичні
– Вебера 25
– Коші 25
– Рейнольдса 26
– Фруда 26
– Фур'є 25
Чутливість
– датчиків 119
– мембранно-балкової системи 119
– по переміщенню 123

Навчальне видання

СЕМЕНЕЦЬ Валерій Васильович
НЕВЛЮДОВ Ігор Шакирович
ПАЛАГІН Віктор Андрійович

ВВЕДЕННЯ В МІКРОСИСТЕМНУ ТЕХНІКУ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ

Підручник

Коректор *Л. Ф. Зінченко*
Комп'ютерне верстання — *І. Г. П'ятигорська*
Дизайн обкладинки — *О. Л. Герасименюк*

Формат 60 × 90 $\frac{1}{16}$. Умов. друк. арк. 26,0. Тираж 500 прим.
Зам. № 178

ТОВ «Компанія СМІТ»
61166, м. Харків, просп. Леніна, 14
Тел./факс: (057) 702-13-07
E-mail: book@smit.com.ua
www.smit-book.com

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 435 від 26.04.2001

Друк — ФОП Васильєва Н. В.
61166, м. Харків, просп. Леніна, 14
Тел.: (057) 702-08-16