

621.38(045.8)
X68

Ю. М. Ховерко, І. П. Островський, А. О. Дружинін

ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗІНТЕГРОВАНИХ СХЕМ МІКРО- ТА НАНОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ



621.38(075.8)
X68

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

Ю. М. Ховерко, І. П. Островський, А. О. Дружинін

ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗІНТЕГРОВАНИХ СХЕМ МІКРО- ТА НАНОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ

Навчальний посібник

*Рекомендувала Навчально-методична рада
Національного університету "Львівська політехніка"*



Львів
Видавництво Львівської політехніки
2018

Рецензенти:

Павлик Б. В., доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри сенсорної та напівпровідникової електроніки Львівського національного університету імені Івана Франка;

Григорчак І. І., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства Національного університету “Львівська політехніка”;

Стахіра П. Й., доктор технічних наук, професор кафедри електронних приладів Національного університету “Львівська політехніка”;

Когут І. Т., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп’ютерної інженерії та електроніки Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника

*Рекомендувала Навчально-методична рада
Національного університету “Львівська політехніка” як навчальний посібник
для студентів спеціальності “Мікро- та наносистемна техніка”
(протокол № 33 від 13.12.2017 р.)*

Ховерко Ю. М. 484825
X 67 Технологія елементів зінтегованих схем мікро- та наносистемної техніки: навч. посібник / Ю. М. Ховерко, І. П. Островський, А. О. Дружинін. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 172 с.

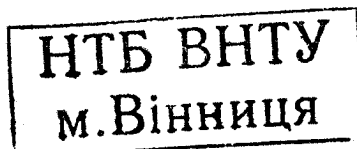
ISBN 978-966-941-219-5

Проаналізовано сучасні методи отримання зінтегованих схем. Розглянуто фізичні процеси і властивості основних технологічних процесів під час створення зінтегованих схем. Детально проаналізовано фізику формування мікроструктур із наперед заданими властивостями $p-n$ переходів, отриманих дифузцією або іонним впровадженням домішки в матеріал. Значну увагу приділено процесам окиснення в технології створення зінтегованих схем, а також створення плівкових мікроструктур, зокрема структур кремній-на-ізоляторі.

У посібнику розглянуто низку проблемних питань, що пов’язані з технологією створення елементів ЗІС у галузі мікро- та наносистемної техніки.

Для студентів, які навчаються за спеціальністю 153 “Мікро- та наносистемна техніка”, а також для наукових, інженерно-технічних працівників та широкого загалу спеціалістів у галузі твердотільної електроніки.

УДК 621.315.592



ISBN 978-966-941-219-5

© Ховерко Ю. М., Островський І. П.,
Дружинін А. О., 2018

© Національний університет
“Львівська політехніка”, 2018

ЗМІСТ

Список скорочень.....	5
Вступ.....	7
Розділ 1. Новітні розробки у технології виготовлення зінтегрованих схем	9
1.1. Кремнієві мікроструктури в приладах твердотільної електроніки.....	9
1.2. Використання кремнієвих мікроструктур у наноелектроніці.....	19
1.3. Комбіновані мікро- та наноструктури у приладах наноелектроніки.....	23
1.4. Загальні підходи щодо створення мікро- та наноструктур для використання у технології зінтегрованих схем.....	26
Контрольні питання.....	36
Розділ 2. Загальна характеристика технологічного маршруту промислового виготовлення зінтегрованих мікросхем	38
2.1. Технологія напівпровідникового виробництва. Основні поняття і визначення.....	38
2.2. Типи структур ЗІС.....	43
2.2.1. Дифузійно-планарна структура.....	44
2.2.2. Епітаксійно-планарна структура.....	46
2.2.3. Епітаксійно-планарна структура з прихованим шаром.....	47
2.2.4. МДН-структура.....	48
2.3. Технологічний маршрут виготовлення мікроелектронних ЗІС.....	49
2.4. Особливості виробництва ЗІС.....	51
2.5. Оцінювання параметрів і характеристик кристалів.....	52
Контрольні питання.....	53
Розділ 3. Дифузія в технології виготовлення зінтегрованих схем	54
3.1. Закони дифузії Фіка.....	56
3.2. Дифузійні параметри. Дифузія домішки з необмеженого джерела.....	57
3.3. Дифузія домішки з обмеженого джерела.....	59
3.4. Формування біполярного транзистора за допомогою дифузії.....	62
3.5. Вплив електричного поля на дифузію домішок.....	64
3.6. Фактори, що впливають на швидкість дифузії.....	65
3.7. Матеріали для дифузії домішок.....	66
3.8. Методи контролю та обладнання дифузійних процесів.....	67
Контрольні питання.....	68
Розділ 4. Процеси епітаксії в технології виготовлення зінтегрованих схем. Осадження полікристалічного кремнію	70
4.1. Особливості технології розділення імплантованим киснем.....	71
4.2. Комбіновані методи отримання структур кремній-на-ізоляторі.....	76
4.3. Процеси нарощування плівок під час формування структур кремній-на-ізоляторі.....	78
4.4. Метод щільного з'єднання підкладок під час формування структур кремній-на-ізоляторі.....	82

4.5. Рекристалізовані структури кремній-на-ізоляторі	84
4.5.1. Метод зонної плавки	85
4.5.2. Мікрозонна лазерна рекристалізація полікремнію в структурах кремній-на-ізоляторі	99
Контрольні питання	100
Розділ 5. Іонна імплантація в технології виготовлення зінтегрованих схем	101
5.1. Пробіги іонів під час іонного впровадження домішки. Основні поняття теорії Ліндхарда – Шарфа-Шіотта	103
5.2. Профілі розподілу концентрації впроваджених іонів	106
5.3. Відпал легованих шарів при іонному впровадженні домішки	108
5.4. Дифузія домішок із шару, легованого іонами, при іонному впровадженні	110
5.5. Ядерне (трансмутаційне) легування кремнію	111
5.6. Методи контролю іонно-імплантованих шарів	113
Контрольні питання	115
Розділ 6. Процеси окиснення в технології виготовлення зінтегрованих схем	117
6.1. Методи та обладнання для формування плівок у технології ЗІС	117
6.2. Термічне окиснення монокристалічного кремнію. Модель Діла – Гроува	121
6.3. Термічне окиснення кремнію в парах води	123
6.4. Термічне окиснення кремнію в сухому кисні	124
6.5. Фактори, що впливають на швидкість росту плівок SiO ₂	125
6.6. Хімічне осадження шарів оксиду	127
Контрольні питання	128
Розділ 7. Конструктивно-технологічні особливості виготовлення зінтегрованих схем	129
7.1. Конструктивні особливості ЗІС. Рівні проектування. Класифікація	129
7.2. Конструювання і розрахунок параметрів елементів ЗІС на біполярних транзисторах	132
7.2.1. Конструювання і розрахунок параметрів резисторів	132
7.2.2. Конструювання і розрахунок параметрів конденсаторів	139
7.2.3. Конструкція інтегральних діодів	141
7.2.4. Параметри транзисторів типу <i>n-p-n</i>	143
7.2.5. Конструктивні особливості між'єднань і контактних площадок ..	144
7.2.6. Топологія фігур суміщення	146
7.3. Топологічні графи електричних кіл	147
7.4. Топологічні матриці	153
7.5. Розроблення топології ЗІС	156
7.6. Правила проектування топології напівпровідникової ЗІС	158
7.7. Рекомендації щодо розроблення ескізу топології	161
Контрольні питання	162
Список літератури	164

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

- ЗІС** – зінтегрована схема;
- НВІС** – надвеликі зінтегровані схеми;
- УВЗІС** – ультравеликі зінтегровані схеми;
- КНІ** – кремній-на-ізоляторі;
- КМОН (CMOS)** – комплементарний метал-оксид-напівпровідник;
- FDSOI transistor (fully depleted semiconductor on insulator)** – повністю збіднений транзистор;
- FinFET transistor (fin field-effect transistor)** – об’ємний польовий транзистор;
- MOSFET (metal – oxide – semiconductor field-effect transistor)** – метал-оксид-напівпровідник польовий транзистор;
- МЕМС** – мікроелектромеханічні системи;
- НЕМС** – наноелектромеханічні системи;
- UTBB (ultra thin body buried)** – ультратонкий шар прихованого оксиду (напр. Ultra-Thin Body and Buried Oxide (*UTBB*) Fully Depleted Silicon-On-Insulator (*FDSOI*) technology);
- SCE (short channel effects)** – короткоканальні ефекти;
- SRAM (static random access memory)** – напівпровідникова оперативна пам’ять з довільним доступом;
- IPG (in-plan-gate)** – транзистори з планарним затвором;
- DG (doublegate)** – транзистори з подвійним затвором;
- T-Gate (TriGate)** – транзистори з потрійним затвором;
- GAA (gate-all-around)** – транзистори, що використовують технологію охоплюючого затвора для мінімізації наслідків накопичення заряду в прихованому оксиді, зокрема так звані “вертикальні” нано-транзистори;
- СЕМ** – сканувальний електронний мікроскоп;
- TCAD** – технологія автоматизації проектування;

SIMOX (Separation by Implantation of Oxygen) – розділення імплантованим киснем;

BOX (Buried Oxide) – прихований шар оксиду;

BESOI (bond and etch-back SOI) – з'єднання та травлення підкладок КНІ-структур;

FIPOS (Full Isolation by Porous Oxidized Silicon) – острівки монокристалічного кремнію, оточені окисненим пористим кремнієм;

ELTRAN (Epitaxial Layer TRANSfer) – епітаксійне передавання шару;

EPE – електрорадіоелементи;

SC (Smart Cut) – метод щільного з'єднання підкладок під час формування структур кремній-на-ізоляторі;

ZMR (zone melt recrystalization) – рекристалізація розплавленою зоною;

LPCVD (Low pressure chemical vaipor deposition) – хімічне осадження з газової фази за низьких тисків;

CVD (Chemical vaipor deposition) – хімічне парове осадження;

SCS (single crystal silicon) – монокристалічний кремній;

VLS (vapor-liquid solid) – пара – рідина кристал;

ЛШШ – теорія Ліндхарда – Шарфа – Шіотта;

ДР – дифузійний резистор;

ЕР – епітаксійний резистор;

КП – контактна площадка.

ВСТУП

Сучасний розвиток науки і техніки потребує високого рівня мікросистемних пристроїв для вимірювання, контролю та управління фізичними процесами, що використовують у виробництві, екології, медицині, космічній техніці тощо. Створення таких приладів неможливе без розроблення та впровадження сучасних конструктивно-технологічних методів і прийомів у технології зінтегрованих схем. У наш час мікроелектроніка сформувалась як генеральний схемотехнічний і конструктивно-технологічний напрям у створенні засобів електронної техніки, радіотехніки і автоматики. Технологія напівпровідникового виробництва ґрунтується на таких складних прицевійних процесах оброблення, як фото- і електронографія, окиснення, іонна імплантація, дифузія, термічне оброблення. Для використання більшості технологічних операцій використовують унікальне обладнання: оптико-механічне, термічне, іонно-променеве. Всі процеси проводять у спеціальних чистих приміщеннях із заданими значеннями вологості й температури.

На сучасному етапі розвитку здебільшого мікросистемні пристрої проектують як спеціалізовану і, в цьому разі, як конструктивно-технологічну базу для їх створення використовують КМОН-технології та їх модифікації. Проте істотними недоліками таких пристроїв є обмежені можливості міжелементної ізоляції, конструювання нових інтегральних приладних структур, особливо з тривимірними конструкціями чутливих і транзисторних елементів, ступінь інтеграції, швидкодія, енергоспоживання, обмежений температурний інтервал, стійкість до зовнішніх впливів. Тому для

створення нової елементної бази для цих типів пристроїв шукають нові матеріали і технології. Одними із них є структури кремній-на-ізоляторі, які завдяки діелектричній ізоляції приладного шару від підкладки є перспективнішими як інженерно-конструкційний матеріал і за перевагами характеристик приладів.

Тому, враховуючи сучасні тенденції зменшення топологічних розмірів елементів до субмікрометрових і нанометрових, видаються доцільними і перспективними технологічні підходи до формування локальних, “прив’язаних” до конкретної топології приладів на основі КНІ-структур безпосередньо на вихідній кремнієвій пластині, без порушень її поверхневого активного шару.

Очевидно, що вирішення таких проблем загалом вимагає комплексного підходу, що передбачає використання нових функціональних матеріалів і структур, нових ідей і конкурентоспроможних методів та принципів побудови пристроїв і охоплює фундаментальні дослідження, використання новітніх методів і технологій виробництва.

У навчальному посібнику проаналізовано сучасні методи отримання зінтегрованих схем. Розглянуто фізичні процеси і властивості основних технологічних процесів під час створення зінтегрованих схем. Детально проаналізовано фізику формування мікроструктур із наперед заданими властивостями *p-n* переходів, отриманих дифузією або іонним впровадженням домішки в матеріал. Значну увагу приділено процесам окиснення в технології створення зінтегрованих схем, а також створенню плівкових мікроструктур, зокрема структур кремній-на-ізоляторі.

Навчальний посібник повністю охоплює низку проблемних питань, що пов’язані з технологією створення елементів ЗІС У галузі мікро- та наносистемної техніки. Призначений для наукових, інженерно-технічних працівників та студентів, які навчаються за напрямом “Мікро- та наносистемна техніка”, а також широкого загалу спеціалістів у галузі твердотільної електроніки.

Розділ 1

НОВІТНІ РОЗРОБКИ У ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗІНТЕГРОВАНИХ СХЕМ

1.1. Кремнієві мікроструктури в приладах твердотільної електроніки

Сьогодні мікро- та наноструктури кремнію поширені у приладах і пристроях твердотільної електроніки. Це насамперед структури кремній-на ізоляторі як елементна база ЗІС і ультра-великих зінтегрованих схем (УВЗІС) як повністю збіднених транзисторів (FDSOI) із латеральним затвором [1, 2], повністю збіднених транзисторів із вертикальним затвором (FinFET) [1, 3–5], що забезпечує найбільші переваги у створенні надшвидких транзисторів (наприклад, 3,3 ТГц у варіанті ІВМ) [5].

Сучасні тенденції розвитку і вдосконалення КНІ-структур

Розвиток мікроелектроніки розпочався з виготовлення мікросхем, що містять кілька десятків компонентів з мінімальними розмірами 25 мкм – сьогодні ця цифра згідно із законом Мура становить мільярди компонентів розміром близько 22 нм. У зв'язку зі стрімким розвитком мікросхемотехніки покращуються такі показники мікросхем, як швидкість перемикання, щільність інтеграції, можливість реалізації систем на кристалі та ін.

Сьогодні фізичної межі щодо геометричних розмірів КМОН-технології практично досягнуто [4]. У результаті з'явилися такі три альтернативні напрями розвитку досліджень і розробок напівпровідникових пристроїв:

“Більше Мура” (More Moore): продовження розвитку сучасних КМОН-технологій до фізичних і технологічних меж проектування відповідно до закону Мура. До його особливостей належать:

- збільшення складності техпроцесів;
- застосування нових матеріалів, зокрема діелектриків з низькою і високою діелектричною сталою (low-k і high-k);
- розроблення нових архітектур пристроїв;
- освоєння нових методів схемотехніки (боротьба з розкидом характеристик і статичними витоками);
- впровадження нових архітектур на системному рівні (підвищення надійності, надмірності).

“Більше, ніж Мур” (More than Moore): об’єднання в одній мікросхемі не тільки КМОН-компонентів, але і елементів, що виконують нестандартні функції, наприклад, створення мікроелектромеханічних систем (МЕМС), наноелектромеханічних систем (НЕМС), сенсорних систем, систем на кристалі.

Згідно з цим напрямом розвитку електроніки, в одній мікросхемі або корпусі необхідно інтегрувати значно більше елементів, ніж просто КМОН-компоненти. Багато додатків, такі як радіочастотні пристрої, підсистеми управління потужністю, пасивні компоненти, біочипи, сенсори, виконавчі механізми та МЕМС, виконують важливу роль у сучасних електронних пристроях. Інтеграція аналогових функцій у спеціалізовані КМОН-мікросхеми дає змогу реалізовувати оптимізовані за вартістю системні рішення.

Пристрої More than Moore – це комплекс систем на кристалі з такими варіантами інтегрованих елементів: КМОН-логіка, вбудована оперативна пам’ять, аналогові інтерфейси, незалежна пам’ять, процесорні мікроядра МЕМС, НЕМС, сенсори. Інтегральні системи та гетерогенні системи цього типу відкривають нові перспективи для систем безпеки (датчики руху, системи сигналізації) і комунікації (бездротові системи зв’язку, мобільні системи), медичного обладнання, засобів розумного будинку (інтелектуальні системи управління: клімат-контроль, управління освітленням і електроживленням, прибудинкова інфраструктура) та енергетики (альтернативні методи отримання енергії) та ін.

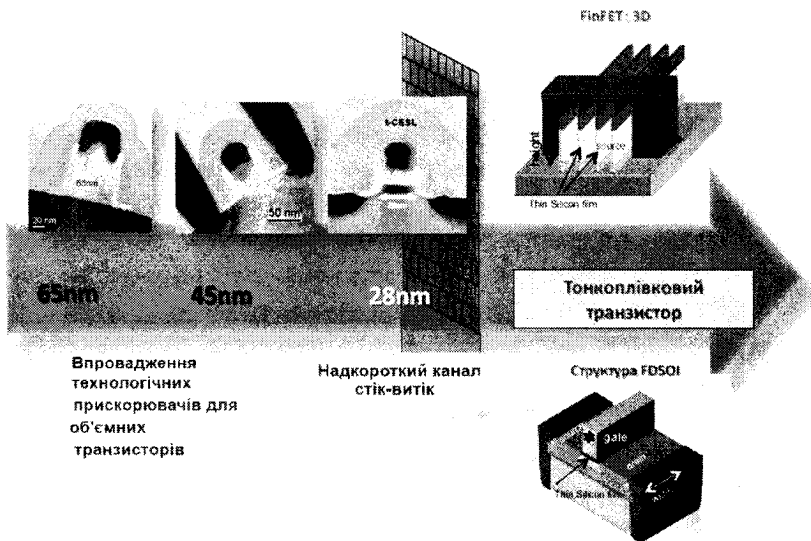


Рис. 1.1. Розвиток сучасних технологій побудови транзисторів [5]

“За межами КМОП” (Beyond CMOS): освоєння нанотехнологій, нових матеріалів [2, 6].

На рис. 1.1 зображено розвиток технології в напрямку зменшення геометричних розмірів транзистора, а також появу нових транзисторів, побудованих на структурі повністю збідненого кремнію на ізоляторі, а також “fin” польового транзистора (багато-затворного), які досконаліші й дешевші, ніж попередні. Ці технології розвиваються і поступово надходять у масове виробництво:



65 нм – техпроцес, що відповідає рівню технології, досягнутому до 2004 року провідними компаніями-виробниками мікросхем. Відповідає лінійному вирішенню літографічного обладнання, що приблизно дорівнює 65–70 нм.

45 нм – техпроцес, що відповідає рівню технології, досягнутому до 2006–2007 рр. провідними компаніями-виробниками мікросхем. Відповідає лінійному вирішенню літографічного обладнання, що приблизно дорівнює 45 нм. Для мікроелектронної промисловості став революційним, оскільки це був перший техпроцес, що використовує технологію high-k/метал воріт (HfSiON/TaNv технології компанії Intel).

32 нм – техпроцес, що відповідає рівню технології, досягнутому до 2009–2010 рр. провідними компаніями-виробниками мікросхем. Відповідає лінійному вирішенню літографічного обладнання, що приблизно дорівнює 32 нм.

28 нм. У третьому кварталі 2010 року на нових потужностях розташованій на Тайвані фабрики Fab 12 компанії TSMC розпочали серійний випуск продукції за 28-нанометровою технологією.

- Багатоядерні процесори Snapdragon фірми Qualcomm.

У травні 2011 за технологією 28 нм фірма Altera випустила найбільшу у світі мікросхему, що складається з 3,9 млрд транзисторів.

22 нм – техпроцес, що відповідає рівню технології, досягнутому до 2009–2012 рр. провідними компаніями-виробниками мікросхем. Відповідає лінійному вирішенню літографічного обладнання, що приблизно дорівнює 22 нм. 22-нм елементи формуються під час літографії експонуванням маски світлом довжиною хвилі 193 нм.

У 2008 році, на щорічній виставці високих технологій International Electron Devicesy Сан-Франциско технологічний альянс компаній IBM, AMD і Toshiba продемонстрував комірку пам'яті SRAM, виконану за 22-нм техпроцесом з транзисторів типу FinFET, які, своєю чергою, виконано за прогресивною технологією high-k/метал воріт (затвори транзистора виготовляють не з кремнію, а з гафнію), площею лише 0,128 мкм² (0,58×0,22 мкм). Також про розроблення комірки пам'яті типу SRAM площею 0,1 мкм², створену за техпроцесом 22 нм, оголосили IBM і AMD.

Перші дієздатні тестові зразки регулярних структур (SRAM) представила публіці компанія Intel у 2009 році. 22-нм тестові мікро-

схеми являють собою пам'ять SRAM і логічні модулі. SRAM-комірки розміром 0,108 і 0,092 мкм² функціонують у складі масивів по 364 млн бітів. Комірка площею 0,108 мкм² оптимізована для роботи в низьковольтному середовищі, а комірка площею 0,092 мкм² є найбільш мініатюрною з відомих сьогодні комірок SRAM.

Виробляють процесори за такою технологією від початку 2012 року.

14 нм (0014 мкм). Будувати завод за назвою Fab42 в американському штаті Арізона розпочали в середині 2011 року, а в експлуатацію здали в 2013 році. За заявою Intel, це найсучасніший завод із масового випуску комп'ютерних процесорів – Intel випускатиме тут продукцію за 14-нанометровою технологією на основі 300-міліметрових кремнієвих пластин. Завод також є першим масовим виробництвом, сумісним з 450 мм пластинами. У будівництво вкладено понад \$ 5 млрд. На час запуску Fab 42 став одним із найбільш передових у світі заводів з випуску напівпровідникової продукції у великих обсягах.

10 нм. Було передбачено зменшення технології до 10 нм у 2016 р. Цими нововведеннями займаються чимало лабораторій у таких країнах, як США, Китай, Тайвань, європейські держави (серед них і Україна) та ін.

Структури кремній-на-ізоляторі для інтегральної технології.

Технічну перевагу повністю збіднених КНІ-транзисторів добре розуміють і значною мірою обговорюють у наукових колах. Транзистори, побудовані за технологією повністю збіднених КНІ-структур, долають перешкоди, які не спроможна вирішити технологія об'ємних транзисторів.

Як бачимо з рис. 1.2, технологія повністю збідненого кремнію-на-ізоляторі істотно простіша, бо на відміну від технології об'ємного транзистора не потребує глибоко прихованого шару, імплантованого каналу, також не потребує травлення для виводів стоку і витоку, також у КНІ-структурі менший шар ізоляції, що також суттєво спрощує його виготовлення.

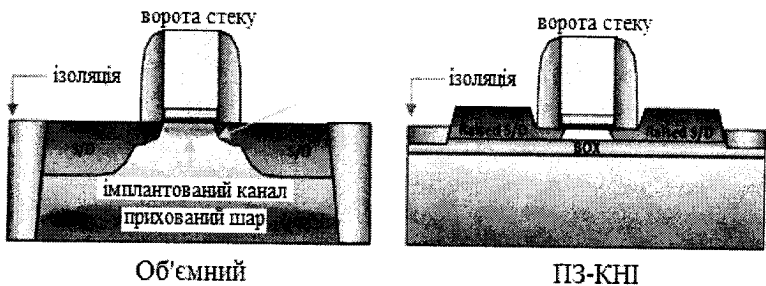


Рис. 1.2. Структури повністю збідненого КНІ-транзистора і об'ємного транзистора [36]

Недоліки об'ємних транзисторів:

- Слабкий процес компенсації.
- Низький процес оптимізації.
- Висока вартість технологічного процесу.
- Джерело витоку струмів.
- Невелика швидкодія, більші енерговитрати.
- Висока мінливість за флуктуацій домішок.

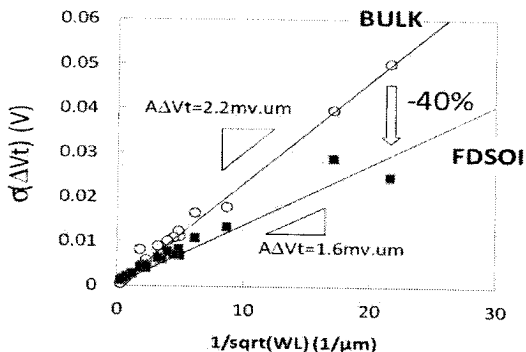
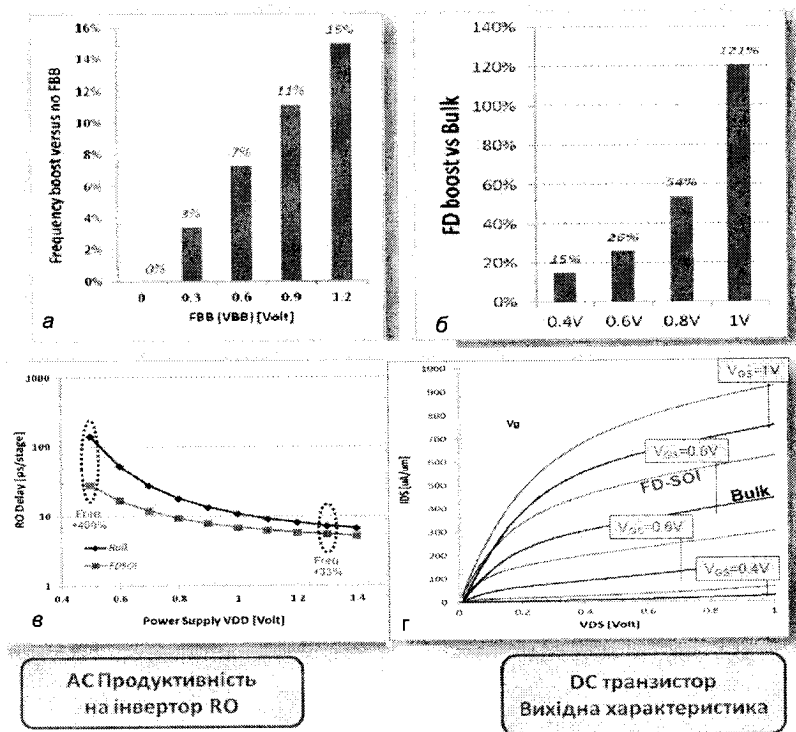


Рис. 1.3. Графічне зображення зменшення споживання енергії на 40 % на FDSOI-транзисторах (повністю збіднений кремній-на-ізоляторі) порівняно з bulk-транзисторами (об'ємними) [3]

На рис. 1.3 зображено енергоспоживання транзисторів, побудованих за різними технологіями. Бачимо переваги технології 28-нм повністю збудненого кремнію-на-ізоляторі порівняно з 28 нм-об'ємними, зокрема:

- + 30 % продуктивності за тієї самої напруги V_{dd} (1В);
- або на 40 % нижче енергоспоживання за тієї самої продуктивності;
- краща технологічність (враховуючи приріст SRAM) з FD-SOI/UTBB (з верхньою товщиною кремнію 7 нм і товщиною оксидного шару 25-нм).



АС Продуктивність
на інвертор RO

DC транзистор
Вихідна характеристика

Рис. 1.4. Графічне порівняння динамічних та статичних характеристик повністю збуднених КНІ-транзисторів та об'ємних транзисторів [4]

Наведено результати дослідження впливу зворотного зміщення на поведінку транспорту носіїв заряду (рис. 1.4, а) в ультратонкому прихованому оксиді повністю збідненого КНІ МОН-транзистора та його вплив на продуктивність пристрою. На графіку можна побачити, яким є приріст швидкодії на сучасному повністю збідненому КНІ-транзисторі порівняно з об'ємним транзистором. Вольт-амперна характеристика транзистора, побудованого за технологією повністю збідненого кремнію-на-ізоляторі (рис. 1.4, з), свідчить про зменшення споживання енергії, або приріст продуктивності за тієї самої напруги, що дуже важливо для сучасної техніки.

Показано, що на повністю збідненому КНІ-транзисторі (рис. 1.5) час затримки в 4 рази менший, ніж на об'ємному транзисторі за напруги 0,5 В і на 33 % менший за напруги 1,3 В, приріст частоти порівняно з відсутністю зворотного зміщення (згори зліва).

Покращення цих властивостей дає змогу створювати удосконаленіші пристрої з меншим споживанням енергії і більшою швидкодією.

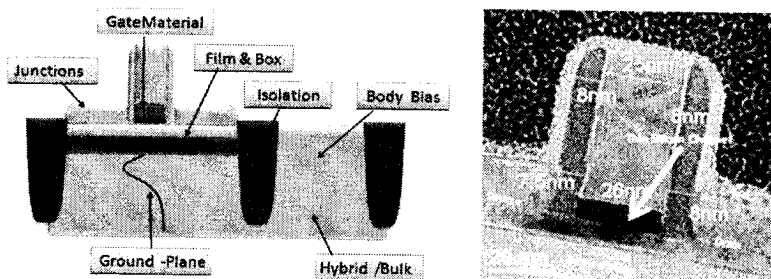


Рис. 1.5. Структура повністю збідненого транзистора на основі структур кремній-на-ізоляторі з надтонким прихованим оксидним шаром (FD-SOIUTBV)

Переваги сучасної технології повністю збіднених структур кремній-на-ізоляторі над об'ємними [7–9] (рис. 1.6):

Повна діелектрична ізоляція:

- нижчі стокові/витоківі ємності;
- менше стокових/витоківих виходів;
- захист від замикань.

Швидкість охолодження транзистора:

- ультратонкий прихований оксидний шар (TSi~1/3LG).
- відмінний захист каналу:
- низький короткоканальний ефект (SCE), пониження потенційного бар'єру, зумовленого стоком;
- герметичність.

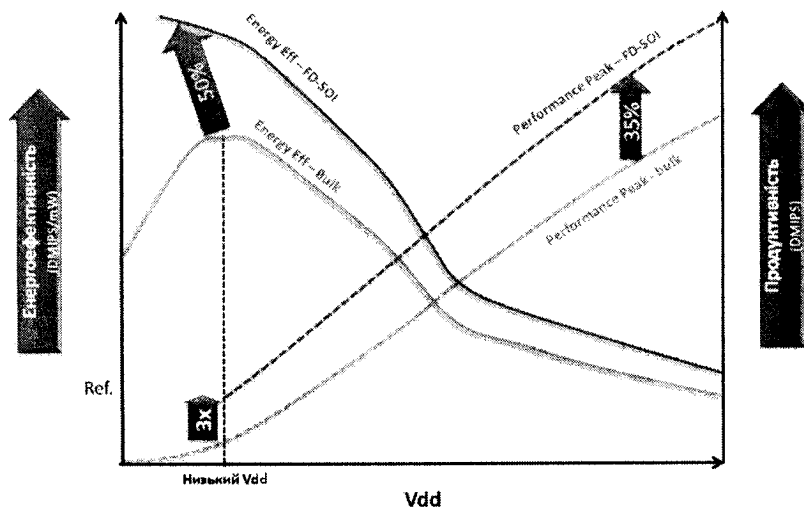


Рис. 1.6. Приріст продуктивності та енергозбереження повністю збіднених KPI-транзисторів порівняно з об'ємними транзисторами

Плоскі повністю збіднені транзистори побудовані на ультратонкій структурі кремній-на-ізоляторі (FDSOI), а FinFETs будують на ультразвукових плавниках, які висічено в об'ємній підкладці кремнію або підкладці кремнію на ізоляторі, як показано на рис. 1.7, б і в відповідно [3, с. 10–11].

ЗІС промисловість стоїть перед вибором КМОН-архітектури: перейти до еволюційного шляху масштабування, використовуючи плоскі повністю збіднені KPI-транзистори, або вводити 3D-транзистори, відомі як FinFET або TriGate. Будь-який вибір приводить нас до нових проблем і рішень. Про компроміси і проблеми FinFETs і плоских повністю збіднених KPI-транзисторів згадано у [1, 4].

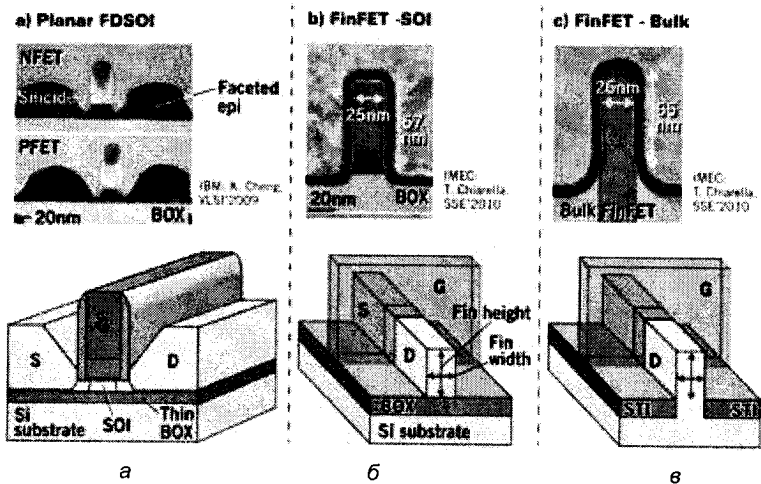


Рис. 1.7. Архітурні варіанти: а – плоских ПЗ-КНІ (FDSOI); б – FinFET КНІ; в – FinFET об'ємні

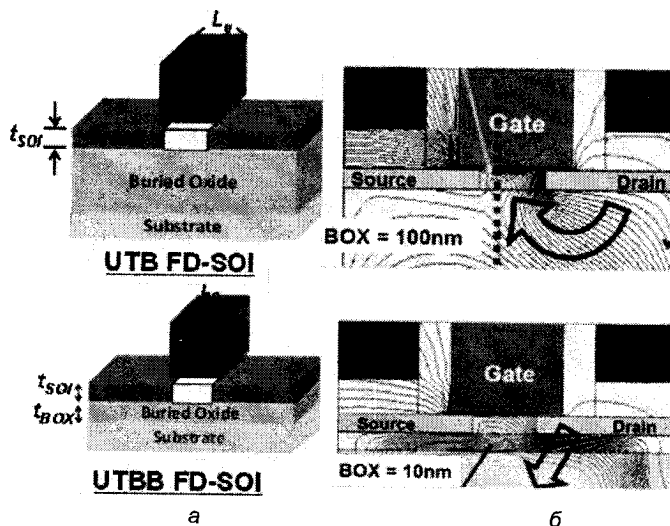


Рис. 1.8. (ліворуч) Схематичне зображення FD-SOI MOSFET з ультратонким прихованим оксидним шаром на пластині КНІ (а); TCAD (технологія автоматизації проектування) моделює електричне поле на транзисторі в стані ВІКЛ; тонка структура вікна показує зниження з'єднання стоку/витоку із каналом (б) [4]

У таких структурах прихований оксидний шар може бути додатково зменшений до близько 10 нм, щоб зменшити бічні стоківі/витоківі електричні з'єднання. Тому було створено МОН-транзистор з ультратонким прихованим оксидним шаром на підкладці повністю збідненого кремнію-на-ізоляторі (UTBBFD-SOIMOSFET), як показано на рис. 1.8, б.

Рівномірність товщини є ключовим параметром для управління зміною напруги і короткоканальним ефектом плоского FDSOI пристрою. Загальної зміни товщини шару досягають у нанометровому або субнанометровому діапазоні для шару кремнієвої пластини. Технологія SmartCut оптимізувала процес, продемонструвала загальну зміну товщини шару у $\pm 0,5$ нм і повністю сумісна з найвимогливішими FD-технологіями (рис. 1.9). За сучасною технологією FD товщину оксидного шару можна зменшити до 10 нм і навіть нижче з нанометровою рівномірністю товщини без погіршення основних електричних властивостей пристрою.

1.2. Використання кремнієвих мікроструктур у наноелектроніці

Одними із найперспективніших структур для нанотранзисторів вважають структури кремній-на-ізоляторі (КНІ). У світі розроблено декілька варіантів конструкцій КМОН нанотранзисторів на основі структур кремній-на-ізоляторі. Це класичні транзистори з планарним полікремнієвим затвором, транзистори на ультратонких (до 10 нм) шарах кремнію (UT SOI MOSFET), транзистори з планарним затвором (in-plan-gate – IPG), транзистори з подвійним затвором (doublegate – DG), а також транзистори, в яких використано технологію охоплюючого затвора (gate-all-around – GAA) для мінімізації наслідків накопичення заряду в прихованому оксиді, – так звані “вертикальні” нанотранзистори.

Структури кремній-на-ізоляторі в технології нанотранзисторів.

Із використанням структур кремній-на-ізоляторі можна зменшувати довжину каналу МОН-транзистора до 15 нм, а дизайн подвійного затвора дає змогу досягти довжини каналу 5–6 нм [1, 12]. У транзисторі типу кремній-на-ізоляторі вкладки квантових ефектів не є домінуючими, і нанотранзистор функціонує аналогічно до класичного субмікронного КМОН-транзистора кремнієвої мікроелектроніки. Цей підхід випробували в Інституті фізики напівпровідників (м. Київ) з використанням стандартної оптичної літографії і плазмохімії для досягнення розмірів, менших за 100 нм. Розроблено, виготовлено і досліджено характеристики тестових польових транзисторів типу кремній-на-ізоляторі та логічних елементів з розмірами близько 100 нм. Транзисторам властиві класичні характеристики з крутістю близько 100 і 120 мВ/дек для *n*- і *p*-каналних транзисторів відповідно без помітних “kink”-ефектів. Струми витоків транзисторів істотно менші за 10 А за ширини каналу 20 мкм. Іншим варіантом є перехід до неklasичних конструкцій нанотранзисторів (рис. 1.9) [13]. За цим напрямом в Інституті фізики напівпровідників розроблено, виготовлено і досліджено характеристики польових нанотранзисторів типу кремній-на-ізоляторі з латеральними затворами і розмірами елементів у нанометровому діапазоні [14, 15]. За товщини відсіченого шару кремнію 5–50 нм довжина каналу транзистора зменшувалася до 40–50 нм. Електронною літографією сфокусованим електронним променем із використанням високомолекулярного поліметилметакрилату як резиста виготовлено планарні кремнієві (КНІ) польові транзистори чотирьох конструкцій.

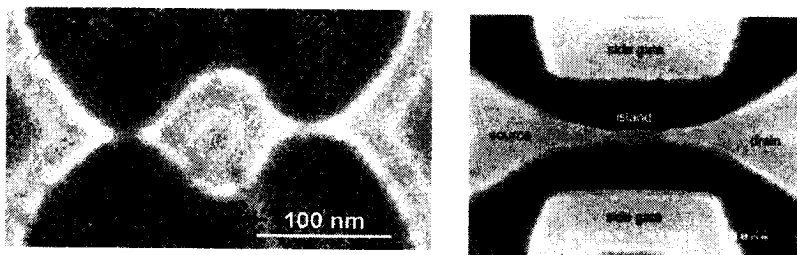


Рис. 1.9. Зображення із сканувального електронного мікроскопа (СЕМ) єдиного одноелектронного транзистора КНІ-структури. Пристрій містить великий острівцець, пов'язаний із іншими через маленькі квантові точки

Виготовлено нанотранзистори на легovanому шарі кремнію з одним та двома розщепленими латеральними затворами з мінімальними розмірами елементів до 20 нм і на нелегованому каналі з додатковими затворами з титану або полікремнію, що лежать над каналом над підзатворним оксидом завтовшки 10 нм. Створення додаткових затворів знадобилося внаслідок надзвичайно низької ємності латеральних затворів за використання як ізолятора двооксиду кремнію. Прилади з латеральним затвором мають прекрасні високочастотні характеристики, однак для модуляції сильнолегованих каналів потрібні напруги на затворі в десятки і сотні вольт. Альтернативним варіантом для літографічної роздільної здатності 10–20 нм є застосування як ізолятора діелектриків з великою діелектричною сталою (наприклад, SrBaTiO_3).

Структури кремній-на-ізоляторі в екстремальній електроніці.

Зацікавлення структурами кремній-на-ізоляторі зумовлене не тільки перспективністю цього матеріалу для мініатюризації зінтегрованих схем і можливістю переходу до нанотехнологій. Структури кремній-на-ізоляторі забезпечують повну електричну ізоляцію, як було згадано, окремих приладів на чипі (рис. 1.10). Це забезпечує низку переваг: збільшення швидкодії, зниження енергоспоживання, можливість створення радіаційно стійких схем і схем, що працюють за високих температур (аж до 350 °C) [16].

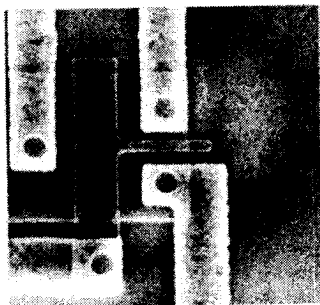


Рис. 1.10. Мікрофотографія МОН-транзистора структури кремній-на-ізоляторі на острівці кремнію розміром 7×9 мкм у сканувальному електронному мікроскопі

Поряд з цим, основними причинами деградації КМОН надвеликих зінтегрованих схем за радіаційних впливів є поверхневі й міжшарові іонізаційні ефекти, пов'язані з накопиченням заряду в підзатворних та ізолюючих діелектриках, а також на межі поділу Si/SiO_2 . Ці ефекти найбільше впливають на характеристики транзис-

торів метал – оксид – напівпровідник у КМОН ультравеликих зінтегованих схемах, обмежуючи їх працездатність на рівні до 10^3 Гр.

Істотного збільшення – до 5×10^5 Гр – досягла французька фірма TEMIC з переходом на структури кремній-на-ізоляторі, виготовлені за SIMOX-технологією і за спеціальною технологією БіКМОН на пластинах типу кремній-на-ізоляторі (Durci Mixtte Isolant Logico Lineaire – DMILL) [17]. Отже, перехід на структури кремній-на-ізоляторі дуже ефективний. Ця технологія забезпечує працездатність КМОН зінтегрованої схеми за доз понад 10^5 Гр.

В Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України виготовлено пластини типу кремній-на-ізоляторі методом SmartCut і на їх основі субмікронні (0,5–0,2 мкм) КМОН-транзистори, елементи логіки. Випробування цих транзисторів на радіаційну стійкість показали, що чутливість до гамма-радіації у них значно нижча (до 10^5 Гр), ніж у радіаційно стійких КМОН-приладів (до 10^3 Гр), виготовлених на масивному кремнії. Крім того, елементарні транзистори структури метал – діелектрик – напівпровідник зберігали свої електричні параметри аж до температур 250–300 °С [18, 19].

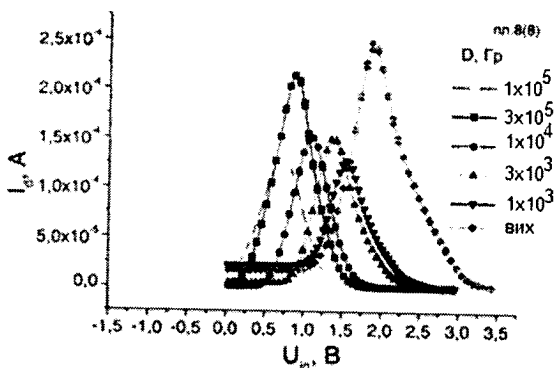


Рис. 1.11. Зміна статичних характеристик інвертора під час гамма-опромінення до доз 10^5 Гр

Досліджено процеси деградації фізичних і приладових властивостей пристроїв на структурах типу кремній-на-ізоляторі за спе-

ціального впливу до доз 10^5 Гр. Дослідження показали, що в КНІ-структурах під впливом опромінення відбувається накопичення позитивного заряду, значення якого більше, ніж заряду у структурі типу метал – оксид – напівпровідник з тими самими товщиною діелектрика і дозою опромінення. Зміни щільності пасток у структурі кремній-на-ізоляторі під час опромінення електронними і гамма-квантами практично не спостерігається аж до доз 10^5 Гр. Поріг р-канальних транзисторів зростає доволі незначно, що не призводить до їх замикання і виходу схем з ладу. Інвертори також залишаються дієздатними до доз, близьких до 10^5 Гр, для схем із тонким підзатворним оксидом (рис. 1.11) [20].

Зінтегровані схеми із повністю ізольованими транзисторами мають імунітет до впливу електромагнітного імпульсу й одно-разового впливу сильно іонізуючих часток. У них відсутній ефект замикання. Ці переваги роблять зінтегровані схеми зі структурами кремній-на-ізоляторі перспективними для використання в бортових системах військової та космічної техніки.

1.3. Комбіновані мікро- та наноструктури у приладах наноелектроніки

Унікальні електричні, механічні та оптичні властивості нанокристалів зробили їх надзвичайно перспективними для різних пристроїв [21]. Однак суттєвою перешкодою у використанні цих наноструктур були труднощі в обробці та їх інтеграції в мікроелектроніці для формування цілісної системи [22] синтезом кремнієвих нанокристалів у заздалегідь заданому місці, усуваючи потребу в подальшому процесі складання.

Типовим прикладом такої системи є МЕМС-структури (мікроелектромеханічні системи). На рис. 1.12, *a–e* зображено процес виготовлення МЕМС-структури. Типова товщина мостів 2 мкм для виробництва полікристалічного кремнію мікроструктур і 20 мкм для мікроструктур SCS (single crystal silicon). Впродовж вологого хімічного процесу травлення оксиду, природно, створюються лунки

під електричними контактами у такий спосіб, що подальші маски меншого процесу осадження каталізатора на рис. 1.12, б не можуть спричинити короткого замикання. Як обумовлено в VLS (vario-liquid solid) механізмі, шар каталізатора приблизно у 5 нм від 60% золота – 40% паладію (AuPd), суміш першого напилюється на поверхню мікроструктури (рис.1.12, з).

Після прикріплення до плати (рис. 1.12, д) мікроструктури було поміщено у вакуумну камеру за кімнатної температури. На рис. 1.13 зображено експериментальне обладнання. Остаточну структуру MEMC зображено на рис. 1.12, е.

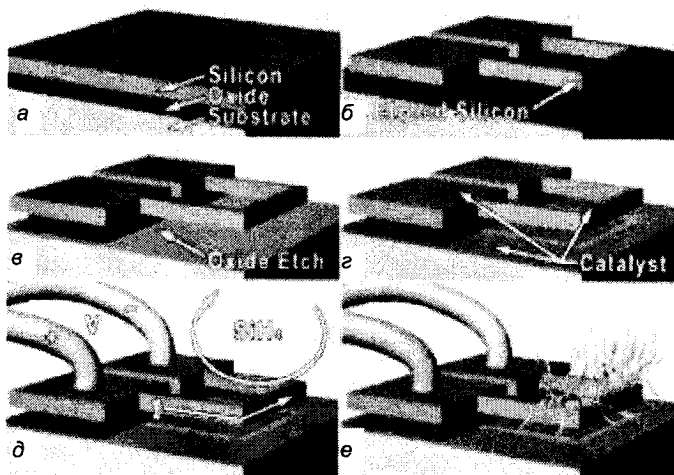


Рис. 1.12. Технологічний процес виготовлення KHI- мікроструктур та обладнання для синтезу нанокристалів

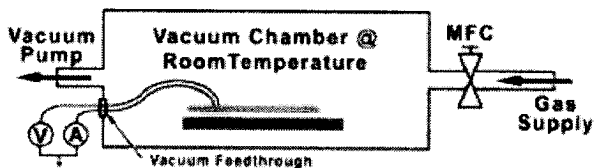


Рис. 1.13. Схема експериментального обладнання в камері

Вважають, що процес синтезу може відбуватися тільки за певних експериментальних умов температури, тиску газу і відпо-

відного каталізатора. VLS-механізм вперше запропоновано в 1960-ті рр. для опису росту ниткоподібних кристалів [21]. Кремній дифундує в шар каталізатора; за досягнення евтектичної точки сплав стає рідким. Різні металеві каталізатори (Ni, Fe, Ti, Zn, Au і AuPd) ефективно сприяли цій реакції. Рідкий сплав продовжує поглинати кремній, поки не стане перенасиченим, а кремній не почне осідати на межі розділу рідина – тверде тіло. Нанокристали утворюються в результаті цього процесу осьовим осадженням. Ініціювання реакції залежить від температури, температури евтектики і температури для розкладання силану необхідно досягти для перебігу реакції.

Гігантським є п'єзорезистивний ефект у комбінованих мікрота наноструктурах на основі кремнієвих нанопровідників.

Ефект п'єзоопору в кремнії, широко використовуваний у механічних датчиках, і дотепер активно вивчають. У вуглецевих нанотрубках спостерігалися цікаві електромеханічні властивості. Кремнієві ниткоподібні нанокристали мають незвично великий п'єзоопір порівняно з масивними провідниками. Наприклад, коефіцієнт поздовжнього п'єзоопору вздовж напрямку (111) збільшується зі зменшення діаметра кремнієвого нанопровідника р-типу, досягаючи $3,550 \times 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, тоді як для об'ємного провідника це значення становить $-94 \times 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$. Встановлено, що деформаційні зміни рухливості носіїв заряду і модифікації поверхні помітно впливають на коефіцієнти п'єзоопору [23].

На рис. 1.14, а зображено нанопровідник з напрямком росту (111) зі з'єднуючим каналом, обмеженим вертикальною поверхнею (111) на КНІ-підкладці, орієнтованій напрямом (110) [24]. На бічних стінках чергуються паралельні лінії різного контрасту. Ці лінії сформовані під час глибокого реактивного іонного травлення. На рис. 1.14, б зображено загальну морфологію мостового нанопровідника, який виріс з лівої бічної стінки вздовж напрямку (111). Рис. 1.14, в, д – це зображення електронної мікроскопії для двох з'єднань між нанопровідником і каналом бічних стінок. На рис. 1.14, г зображення електронної мікроскопії з високою роздільною здатністю підтверджує ріст у напрямку (111) і виявляє тонкий оксидний шар на поверхні нанопровідників. Масштабна шкала а–е: 2, 500, 100, 3 і 100 нм відповідно.

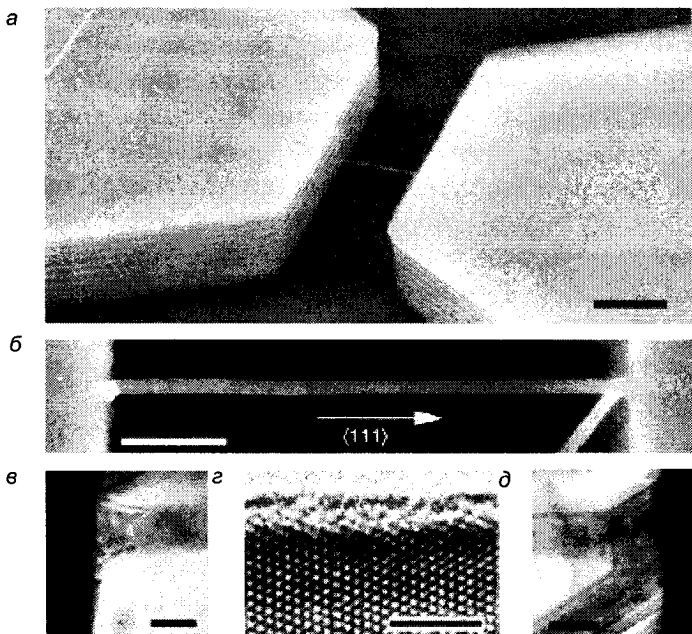


Рис. 1.14. Мости кремнієвих нанониток, орієнтованих напрямком $\langle 111 \rangle$ на KHI-підкладці

Кремнієві нанопровідники р-типу виявляють незвично великі значення коефіцієнтів поздовжнього п'єзоопору. Підвищений коефіцієнт п'єзоопору може знайти застосування в кремнієвих нанотехнологіях, а також у наноелектромеханічних системах [25]. Зокрема, внутрішні напруження можуть існувати в багатьох нанорозмірних матеріалах і бути основною проблемою продуктивності електроніки на основі цих наноструктур.

1.4. Загальні підходи щодо створення мікрота наноструктур для використання у технології зінтегрованих схем

Аналіз сучасної конструктивно-технологічної та елементної бази сенсорних пристроїв показує, що для їх створення як елементну базу, особливо для схем спряження з чутливими елементами, зазвичай

використовують біполярні та комплементарні метал – оксид – напівпровідник (КМОН)-технології, приладні структури та їх модифікації, реалізовані в об'ємному кремнії, і базовим напрямом розвитку залишається сьогодні інтеграція нових типів сенсорних елементів з КМОН-структурами. Проте це не завжди задовольняє підвищені експлуатаційні вимоги, особливо щодо розширення граничних умов, та обмежує можливості створення нових приладних структур через їх планарну, одношарову інтеграцію, технологічні складнощі, наприклад, виготовлення мембранних елементів двосторонньою літографією тощо. Тому сьогодні провідні фірми використовують нові матеріали і структури, зокрема, структури кремній-на-ізоляторі, оскільки інтегральні елементи на їх основі мають істотно кращі параметри порівняно з аналогічними на об'ємному кремнії щодо швидкодії, інтеграції, температурного інтервалу, радіаційної стійкості, енергоспоживання і надають ширші можливості для реалізації інтегрованої елементної бази сенсорів, яка складається із різноманітних актуаторних і чутливих елементів та схем обробки інформації. Структури кремній-на-ізоляторі мають також істотні переваги щодо реалізації тривимірних і багатошарових приладних архітектур. Проте чинниками, що обмежують широке використання КНІ-структур, є їхня висока вартість порівняно зі стандартними кремнієвими пластинами внаслідок складних і дорогих технологічних операцій, забезпечення кристалічної досконалості плівки тощо.

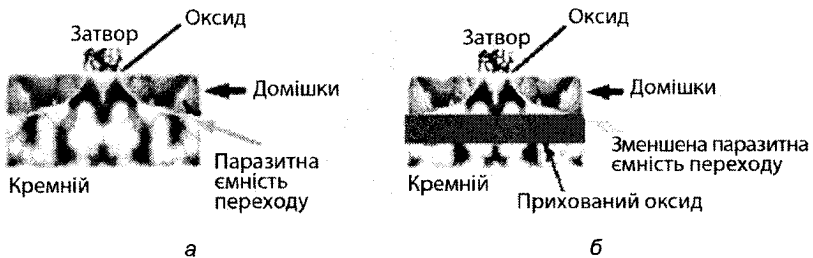
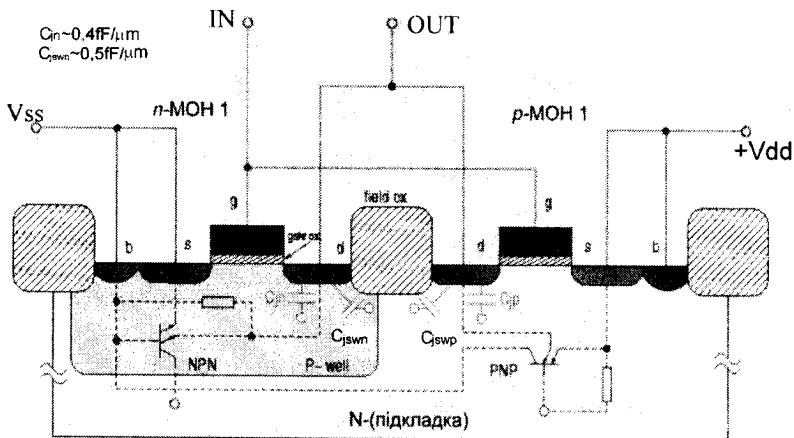


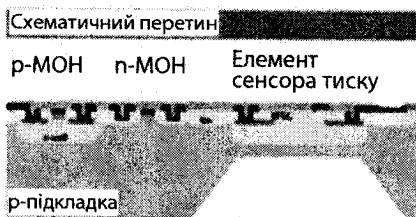
Рис. 1.15. Структури об'ємного МОН (а) і КНІ МОН (б) транзисторів

У технології виготовлення структур кремній-на-ізоляторі, на відміну від традиційної мікроелектроніки, замість монолітних пластин кремнію (рис. 1.15, а) вихідним матеріалом є напівпровідникові пластини, в яких прихований в їх об'ємі діелектричний шар відділяє

від підкладки тонкий шар кремнію (рис. 1.15, б). Прихованим шаром діелектрика слугують зазвичай шари діоксиду або оксинітриду кремнію [26]. Характерні значення товщин відділеного приладного шару кремнію і прихованого шару діелектрика становлять 0,05–0,2 і 0,2–1,0 мкм, відповідно.



а



б

Рис. 1.16. Структура КМОП-інвертора та його паразитна біполярна схема (а) та структура чутливого мембранного елемента тиску, монолітно інтегрованого з КМОП-транзисторами (б)

Базова приладна КМОП-структура інвертора (рис. 1.16, а) розміщується на стандартній кремнієвій підкладці, яка також виконує роль четвертого електрода для транзистора p-MOH 1. Підкладка з'єднана також з витоком цього транзистора, на який подається напруга +Vdd. Другий транзистор сформований у спеціальній

кишені p -типу для його електричної ізоляції від підкладки n -типу. Витік і четвертий електрод цього транзистора з'єднані й перебувають під напругою V_{ss} .

Електричну схему і топологію інвертора зображено на рис. 1.17, *а, в*; а КНІ-інвертора, відповідно – на рис. 1.17, *б, г*. Фактично, протилежні типи МОН-транзисторів ізольовані p - n -переходом між кишеною p -типу та підкладкою n -типу, а також ділянками діоксиду кремнію, нанесеними на поверхню кристала.

Проте наявність цього p - n -переходу в структурі КМОН-інвертора спричиняє неідеальності його поведінки. По-перше, смність цього переходу достатньо велика, що зменшує швидкодію інвертора, і, по-друге, струмом втрат через цей p - n -перехід не можна знехтувати, особливо якщо мікросхема призначена для низькопотужних та низьковольтних застосувань.

Особливостями топологій об'ємних і КНІ КМОН-приладів є те, що в загальному випадку обов'язковими елементами топології об'ємного КМОН інвертора є: p - або n -кишеня, стоп-канали та охоронні кільця (на рис. 1.17 не зображені), області додаткового легування підкладки n^+ - і p^+ -кишені для омичних контактів, двох контактів до n^+ - і p^+ -областей, що утворюють вихід інвертора. Мінімальна кількість контактних вікон – 6. І, як зрозуміло з рис. 1.17, *б*, відсутність “кишені” і можливість мати прямий контакт між n^+ - і p^+ -областями стоку і витоків n - і p -канального транзисторів зі спільним контактним вікном дають змогу істотно, в 1.5–2 рази підвищити густину інтеграції елементів, а зменшена від 6 до 4 мінімальна кількість контактних вікон покращує надійність і вихід придатних приладів.

Структурна схема, що зображена на рис. 1.18, *а*, містить два паразитні біполярні транзистори. Оскільки МОН-технологія є симетричною, кожен з двох біполярних транзисторів двоємітерний. Очевидно, що біполярна схема також утворює простий паразитний тиристор. Цей тиристор під'єднаний безпосередньо між V_{ss} та V_{dd} і може бути увімкнений випадковим негативним імпульсом на контакті “OUT”. Потім вмикається n - p - n -транзистор, який створює послідовний зворотний зв'язок для p - n - p -транзистора. Так можна спостерігати стійку тенденцію зростання струму через шини V_{dd}

навіть після того, як імпульс на контакті “OUT” більше не повторюватиметься. Отже, в цій структурі виникатиме тиристорний ефект, і ця схема інвертора може бути пошкоджена високим струмом або напругою живлення. Щоб запобігти цьому, необхідно розробляти додаткові технологічні процеси, щоб зменшити негативний вплив паразитних елементів.

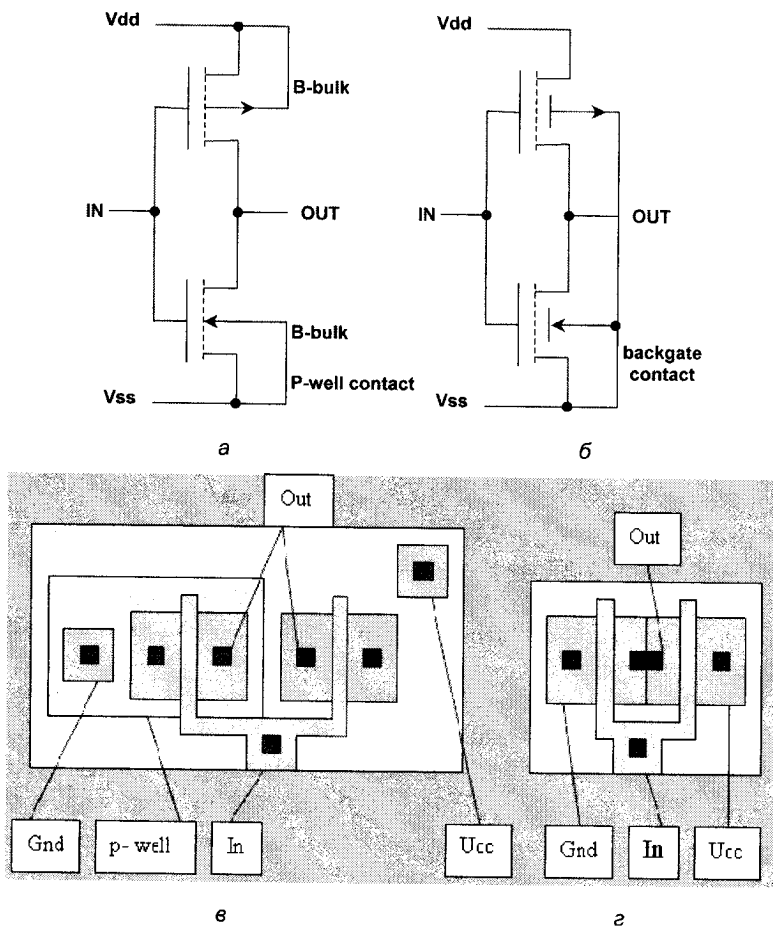
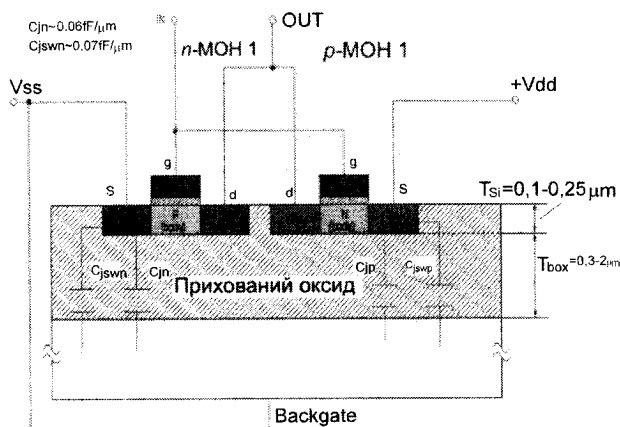


Рис. 1.17. Електричні схеми стандартного (а) та КНІ КМОП-інверторів (б) та відповідні їхні типові схематичні топології (в, г)

У технології виготовлення структур кремній-на-ізоляторі всі елементи розміщують в об'ємі тонкої монокристалічної півки T_{Si} над ізоляційним шаром (рис. 1.18, а). У цій структурі кожен транзистор розміщений на окремому острівці півки й ізолюваний від інших шаром оксиду. Кремнієва підкладка відділяється від поверхневої півки кремнію порівняно товстим шаром оксиду T_{Box} .



а



б

Рис. 1.18. Структури КНІ КМОН-інвертора і його паразитні ємності (а); монолітно інтегрованого транзисторного і чутливого газового елементів (б)

Електрод, що з'єднує V_{ss} та кремнієву пластину, називається зворотним затвором, і є спільним для всієї мікросхеми. У класичній МОН-технології кожен елемент мав би власний електрод для з'єднання з підкладкою. Це також зрозуміло зі схем (рис. 1.4). У КНІ-структурах можна уникнути багатьох паразитних явищ. Ємності підкладки та окремих елементів є набагато меншими.

Як видно з рис. 1.18–1.19, паразитні ємності p - n -переходів КНІ МОН-транзисторних структур порівняно із аналогічними об'ємними істотно, на порядок, менші. Для об'ємних МОН-приладів паразитні ємності переходів C_{n1} і C_{n2} утворюють дифузійна ємність p - n -переходу і підкладки C_{n1} , і дифузійна ємність з охоронним кільцем C_{n2} . Для КНІ МОН вертикальна дифузійна ємність між переходом і підканальною областю транзистора C_{n3} істотно менша внаслідок зменшеної площі й, очевидно, істотно менші ємності C_{n4} і C_{n5} внаслідок діелектричної складової.

У приладах на основі КНІ-структур паразитна ємність створюється стоковою областю транзистора і підкладкою: фактично це послідовне з'єднання конденсаторів, а саме ємності прихованого оксиду та ємності збідненої області: $1/C_{нар.кні} = 1/C_{ок.} + 1/C_{збід.}$

Очевидно, що максимальне значення $C_{нар.}$ – це значення ємності прихованого оксиду, пропорційне до діелектричної константи матеріалу підкладки ($\epsilon_{SiO_2} = 3.9 \epsilon_0$, $\epsilon_{Si} = 11.7 \epsilon_0$), що втричі менша за константу кремнію.

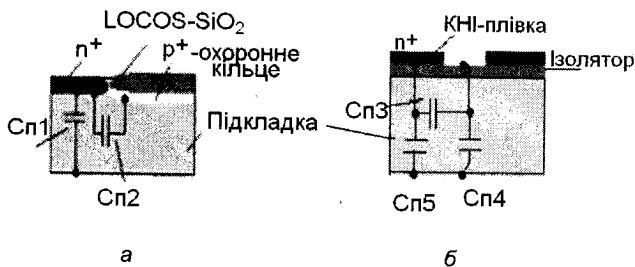


Рис. 1.19. Паразитні ємності p - n -переходів об'ємних (а) і КНІ МОН-структур (б)

Товщина прихованого оксиду не потребує збільшення, яке необхідне для приладів з малими розмірами, і тому паразитні ємності фактично не зростають з тенденціями зменшення розмірів, на відміну від об'ємних приладів. Окрім цього, слабколеговані *p*-типу підкладки фактично виконують роль механічної опори, і шар збіднення, що утворюється під оксидом, зменшує загальну паразитну ємність перехід – підкладка.

Типові паразитні ємності приладів на основі об'ємних та КНІ-структур для 1 мкм-технології з двома металізаціями відносно підкладки наведено в табл. 1.1 [27].

Таблиця 1.1

Паразитні ємності об'ємних і КНІ-структур, пФ/мкм²

Тип ємності, пФ/мкм ²	Об'ємні структури	КНІ-структури	Співвідношення: об'ємні – КНІ
Затвор	1,3	1,3	1
<i>p-n</i> -перехід	0,2–0,35	0,05	4–7
Полікремній	0,1	0,01	2,5
Метал 1-й шар	0,05	0,027	1,85
Метал 2-й шар	0,021	0,018	1,16

Як зрозуміло з табл. 1.1, окрім зменшення паразитних ємностей переходів, важливою перевагою приладів на основі КНІ-структур є також зменшення приблизно в 1,5 разу паразитних ємностей між підкладкою і полікремнієвими шинами першого та другого рівнів металізації. Таке зменшення паразитних ємностей істотно покращує швидкодію мікросхем на основі КНІ-структур. Отже, вища швидкодія КНІ-структур зумовлена ефективним усуненням вертикальної та бічної паразитних ємностей. В основній МОН-структурі домінують паразитні ємності затвора та стоку і затвора та витоку. Для КНІ МОН-приладів поведінка ємності затвора подібна до поведінки для МОН (незважаючи на деякі відмінності, пов'язані з тілом транзистора, що плаває, та зворотними ефектами у затворі). У КНІ-структурах бічна ($C^{jswn, p}$), як і вертикальна ($C^{n, p}$) ємності, істотно зменшені завдяки введенню товстого шару оксиду між кремнієвою підкладкою та кремнієвою плівкою.

Також зменшені ємності стоку та витокую приводять до зменшення часу затримки; наприклад, для цього інвертора час затримки становить лише 8 пс [28, 29].

Стійкість до жорстких умов експлуатації, а саме стійкість до впливу радіації – одна з найважливіших характеристик надійності зінтегрованих схем. Відомо, що іонізуюча радіація генерує в опромінюваних кристалах надлишкові електрони і дірки. У разі великих інтенсивностей впливу радіаційно індукований струм може істотно погіршувати або навіть повністю порушувати нормальне функціонування приладу. Якщо ж елементи приладу розмістити в активному шарі КНІ-структури, кількість радіаційно індукованих носіїв заряду порівняно з таким самим приладом на об'ємному кремнії буде в стільки само разів меншою, наскільки товщина шару кремнію d менша від дифузійної довжини L носіїв у об'ємному кремнії (типові значення $d = 0,1$, $L = 100$ мкм, $L/d = 10^3$).

Зауважимо, що технологія КНІ-структур забезпечує мікроелектронним приладам, окрім зазначених, ще цілу низку інших важливих переваг порівняно з їх об'ємними аналогами. Завдяки діелектричній ізоляції значно придушуються паразитні струми в підкладку, які виникають через підвищення температури в процесі експлуатації приладів. Як наслідок, робоча температура приладів на 100–150 °С вища, ніж у аналогів, виготовлених за об'ємною технологією. Мала товщина відокремленого шару кремнію забезпечує різке зменшення ємностей p - n -переходів приладів. Результатом цього є істотне підвищення їх швидкодії, а зменшення ємності p - n -переходів і зменшення струмів втрат у товщу підкладки, разом з великою крутістю передатної характеристики у підпороговій області ВАХ, дають змогу помітно зменшити напругу живлення зінтегрованих схем на основі КНІ-структур.

Формування чутливих елементів мембранного типу, інтегрованих в КМОН- і КНІ-структури (див. рис. 1.16, б і 1.18, б), пов'язане в обох випадках із використанням двосторонньої літографії, проте КНІ-структури є вигіднішими, оскільки вбудований оксидний шар є добрим стоп-шаром, порівняно зі стандартним КМОН-процесом і дифузійними стоп-шарами, під час витравлювання мембранних елементів. Порівняльні характеристики КМОН- і КНІ-структур наведено в табл. 1.2.

Характеристики об'ємних КМОН- і КНІ-структур

Характеристика	КМОН-структури	КНІ-структури
Ізоляція елементів	<i>p-n</i> -переходом	Діелектрична
Густина елементів	Невисока	істотно більша
Спар. <i>p-n</i> -переходів	Великі	на порядок менші
Стійкість до зовн. впливів	Незначна	Висока
Температурний інтервал	Мінус 60–+125 °С	мінус 200–+350 °С
Тиристорний ефект	Існує	Відсутній
Ефект плаваючого тіла	Відсутній	Наявний
Швидкодія	Добра	Висока
Енергоспоживання	Мале	Істотно менше
Можливості тривимірної і багатопшарової інтеграції	Відсутні	Добрі
Вартість	Помірна	Висока
Проектування	КМОН -стандартне	спеціальні топологічні і констр.-технологічні підходи

Яскравою ілюстрацією згаданих переваг технології КНІ-структур є реалізація провідними зарубіжними фірмами розробок і виробництва мікропроцесорів гігагерцового діапазону і НВІС пам'яті.

Цілком природно, що згадані можливості технології КНІ-структур привертають все більшу увагу також і розробників чутливих елементів датчиків. Так, фірма “Honeywell” (США) розробила і налагодила виробництво датчиків тиску на основі КНІ-структур, які характеризуються підвищеною робочою температурою до 225 °С [7].

У роботі [7] повідомлено, що польовий МОН-транзистор на основі КНІ-структур із розщепленим стоком можна використати як високотемпературний (до 300 °С) перетворювач магнітного поля. Окрім цього, можливості поліпшення характеристик перетворювачів магнітного поля, завдяки використанню технології КНІ-структур, значно ширші, ніж лише підвищення робочої температури, а на прикладі сенсорного елемента Холла можна поєднати можливості традиційних датчиків Холла і МОН-транзисторів.

Отже, прилади, сформовані на основі структур кремній-на-ізоляторі, порівняно з їх об'ємними аналогами, мають такі основні переваги (див. також табл. 1.2):

- відсутність тиристорного ефекту в КНІ КМОН зінтегрованих схемах;
- зменшення паразитних ємностей стік-витокових областей, полікремнієвих і металевих шин;
- простота формування мілких переходів і контактів до них;
- зменшення площі кристала;
- зменшення кількості контактів і шин у топології для реалізації еквівалентних функцій порівняно з їх аналогами в об'ємному кремнії.

Отже, вказані переваги відкривають значно ширші можливості створення елементної бази КМОН зінтегрованих схем зі структурою кремній-на-ізоляторі, їх монолітної інтеграції з чутливими елементами сенсорних та мікросистемних пристроїв та забезпечення покращених характеристик приладів порівняно з їх аналогами на об'ємному кремнії.

Контрольні питання

1. У чому полягає закон "More than Moore"?
2. Охарактеризуйте, що таке структура кремній-на-ізоляторі.
3. Поясніть, що охоплюють визначенням МЕМС і НЕМС.
4. У чому основні відмінності між повністю збідненими транзисторами на основі структур кремній-на-ізоляторі порівняно з об'ємними транзисторами?
5. Які переваги повністю збіднених транзисторів на основі структур кремній-на-ізоляторі порівняно з об'ємними транзисторами?
6. Які тенденції розвитку щодо вдосконалення сучасних техпроцесів виготовлення ЗІС?
7. Завдяки чому зменшується споживання енергії транзисторів на основі структур кремній-на-ізоляторі порівняно з об'ємними транзисторами?
8. Дайте визначення, що таке 3D- або T-Gate транзистор.

9. Як можна зменшити довжину каналу в сучасних МОН-транзисторах?
10. Які межі радіаційної стійкості сучасних транзисторних структур на основі кремній-на-ізоляторі?
11. Як реалізують комбіновані мікро- та наноструктури у сучасних зінтегрованих схемах на основі МЕМС- або НЕМС-технологій?
12. Які типи паразитних ємностей існують у мікро- та наноструктурах на основі КМОН-технології та КНІ-технологій?
13. На що впливають паразитні ємності приладів на основі структур кремній-на-ізоляторі порівняно з приладами, створеними за об'ємними КМОН-технологіями?
14. Який максимальний температурний діапазон роботи приладів на основі КНІ-структур?
15. На основі яких структур можливо досягти вищої густини упаковки приладів? Розкрийте поняття "багатошарові структури". Які прийоми і методи використовують під час створення таких структур?

Розділ 2

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО МАРШРУТУ ПРОМИСЛОВОГО ВИГОТОВЛЕННЯ ЗІНТЕГРОВАНИХ МІКРОСХЕМ

2.1. Технологія напівпровідникового виробництва. Основні поняття і визначення

Напівпровідникова зінтегрована схема – це функціональний електронний вузол, елементи і з'єднання якого є конструктивно нероздільними та виготовляються одночасно в єдиному технологічному процесі в об'ємі й на поверхні спільного кристала. В першому наближенні процес створення напівпровідникової зінтегрованої схеми зводиться до формування в приповерхневому шарі пластини елементів (транзисторів, діодів, резисторів) і до подальшого їх об'єднання у функціональну схему плівковими провідниками по поверхні пластини (міжз'єднання). Для характеристики типу транзисторів, а також технологічних методів їх виготовлення користуються поняттями *структура ЗІС*. Загалом структура ЗІС визначає послідовність шарів у складі мікросхеми по нормалі до поверхні кристала, які відрізняються за матеріалом, товщиною і електрофізичними властивостями. Задана структура ЗІС дає змогу встановити склад і послідовність технологічних методів обробки пластини і визначити технологічні режими кожного методу.

Технологічний маршрут – це послідовність технологічних операцій обробки напівпровідникових пластин, що використо-

вуються для виготовлення цього типу ЗІС. Документом, що містить опис маршруту, є *маршрутна карта*. Вона дає змогу робити висновок про переміщення приладу, що виготовляється за всіма операціями, вказує обладнання, матеріали, трудові нормативи і засоби контролю. Проведення кожної технологічної операції регламентують *операційною картою*, що містить вказівки технологічних режимів виготовлення структури і технологічного оснащення. Що таке інтегральна технологія? [30, 31].

Інтегральна технологія являє собою сукупність методів обробки, яка дає змогу за наявності структурної подібності (технологічної сумісності) різних елементів ЗІС формувати їх одночасно в єдиному технологічному процесі.

Можна виділити спільні технологічні операції і приблизно однакову їх послідовність (рис. 2.1).

1. Підготовка пластин

Вихідні напівпровідникові пластини – епітаксійні структури, наприклад $n-n^+$ -типу, чи монокристалічні підкладки з провідністю n - чи p -типу, отримані як напівфабрикат із заводу, очищають, промивають, травлять з метою видалення з поверхні пластини забруднень та частинок пилу. Шар з провідністю n -типу, наприклад, в епітаксійній $n-n^+$ -структурі, становитиме в майбутніх транзисторах колекторну область (рис. 2.1, *a*).

2. Створення топологічного рисунка

Щоб в епітаксійній структурі сформувати області з електропровідністю p -типу, необхідно забезпечити проведення локальної дифузії через вікна-отвори в захисному шарі. Розміри цих вікон задано за допомогою процесу фотолітографії. Маскою, що перешкоджає дифузії, є плівка діоксиду кремнію. Вирощення її є необхідною стадією планарного процесу. Тобто топологія мікросхеми – це креслення, яке визначає форму, розміри і взаєморозміщення елементів і з'єднань ЗІС у площині, паралельній до площини кристала. Оскільки елементи і з'єднання формуються послідовним утворенням окремих шарів, розрізняють загальну і пошарову топологію. Наприклад, за кресленням базового шару можна розробити фотошаблон, за допомогою якого створюють оксидну маску для вибіркової дифузії домішки.

Плівка діоксиду кремнію SiO_2 завтовшки 0,3–1,0 мкм надійно захищає від впливу зовнішніх чинників і дифузії домішок. На плівку наносять шар *фоторезисту* – фотоемульсії, яку експонують ультрафіолетовим світлом через фотошаблон, який містить багато ідентичних зображень без транзисторів із заданою конфігурацією і розмірами. Засвічені ділянки фоторезиста проявляють, і плівку SiO_2 , що відкрилась, видаляють. Вікно, відкрите за базової дифузії, показано на рис. 2.1, б.

3. Отримання переходу база – колектор

Для прецизійного дозування кількості введеної в кристал домішки – атомів бору – під час створення області *p*-бази використовують процес іонної імплантації, що полягає у введенні розігнаних іонів до поверхні кристала. Шар фоторезисту в цьому разі є захисною маскою, оскільки іони, які ввійшли в фоторезист, не досягають поверхні діоксиду. Щоб сформувати базову область і *p-n*-перехід колектор – база на необхідній глибині, використовують наступну дифузійну розгонку атомів бору. Її проводять в окисненому середовищі за високих температур. У результаті формується область бази з глибиною 2–3 мкм, а на поверхні бази нарощується плівка SiO_2 завтовшки 0,3–0,5 мкм (рис. 2.1, в).

4. Отримання *p-n*-переходу емітер – база

Спочатку формують топологічний рисунок емітерних областей, використовуючи процес фотолітографії по плівці SiO_2 над базовою областю. Одночасна відкривають вікна, що задають конфігурацію колекторних контактів. Фоторезист видаляють і проводять дифузійну фосфору з високою концентрацією на малу глибину (до 1–1,5 мкм) (рис. 2.1, г).

5. Контактна металізація

Для під'єднання до областей емітера, бази, колектора електричних виводів необхідно покрити металом поверхні контактів.

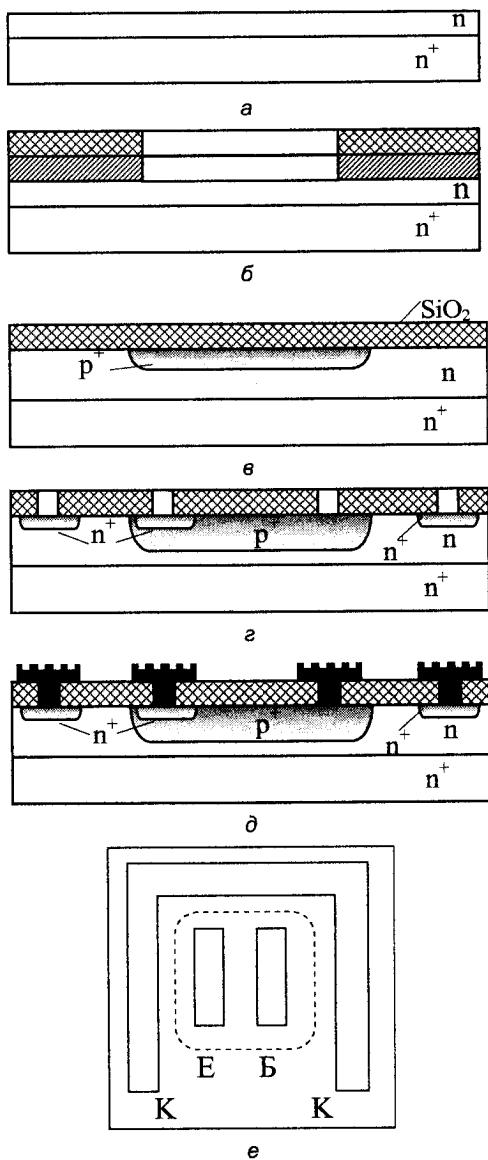


Рис. 2.1. Основні технологічні операції виготовлення *n-p-n-транзистора*

Попередньо проводять фотолітографічну обробку для видалення плівки діоксиду кремнію з необхідних ділянок. Потім за допомогою термічного випаровування в вакуумі на всю поверхню пластини напилюють шар металу (наприклад, алюмінію) завтовшки близько 1 мкм, по якому проводять ще один процес фотолітографії для видалення залишків металу між областями контактів. Структуру з контактною металізацією показано на рис. 2.1, *д*.

6. Корпусування

Пластина містить від декількох сотень до десятків тисяч окремих елементів. Її розрізають на окремі структури, що називають кристалами.

Загальний вигляд транзистора (топология) зображено на рис. 2.1, *е*.

7. Випробовування приладів

Для оцінювання параметрів і надійності приладів проводять електричні, кліматичні, механічні випробування. Однак, кожну технологічну операцію супроводжують контролем якості, наприклад, товщини епітаксійного шару, питомого чи поверхневого опору. Після створення *p-n*-переходів контролюють електричні параметри, а саме – напруги пробую, струмів втрат, ємності.

Застосування напівпровідникових ЗІС обмежене низкою причин. Одна з них полягає в тому, що виробництво напівпровідникових ЗІС виявляється доцільним у багатосерійному і масовому виробництві, коли стають економічно виправданими значні затрати на підготовку виробництва. Тому поруч з напівпровідниковими ЗІС розробляють і випускають гібридні інтегровані схеми. Технологічною основою таких ЗІС є процеси нанесення елементів у вигляді плівок на діелектричну пасивну підкладку. Активні елементи виготовляють за відомою напівпровідниковою технологією і монтують на загальну підкладку.

Гібридна плівкова зінтегрована мікросхема – поряд з плівковими елементами, отриманими за допомогою інтегральної технології, містить компоненти, які мають самостійне конструктивне

оформлення. Залежно від методу нанесення плівкових елементів розрізняють тонкоплівкові (нанесення у вакуумі) й товстоплівкові (трафаретний друк) гібридні ЗІС. Гібридні ЗІС мають гірші показники (розмір, масу, швидкодію, надійність), ніж напівпровідникові. Водночас вони дають змогу реалізувати широкий клас функціональних електронних схем, будучи при цьому економічно доцільними в умовах серійного і дрібносерійного виробництва.

Суміщена зінтегрована мікросхема – це комбінована напівпровідникова мікросхема, в якій елементи (зазвичай пасивні)носять на поверхню пластини за методами плівкової технології. При цьому до пасивних елементів висувають підвищені вимоги щодо точності та температурної стабільності.

Ступінь інтеграції – це показник ступеня складності ЗІС, яка характеризується кількістю елементів, отриманих за допомогою інтегральної технології на спільному кристалі. Для характеристики ступеня інтеграції використовують показник $K = \lg N$, де N – кількість елементів ЗІС. Залежно від значень K умовно розрізняють ЗІС малого ступеня інтеграції ($K = 2$), середнього ступеня інтеграції ($K = 3$), великі зінтегровані схеми ($K = 4$) і надвеликі зінтегровані схеми ($K=5$).

2.2. Типи структур ЗІС

За порівняльного оцінювання різних типів структур доцільно враховувати низку конструктивно-технологічних показників:

- якість міжелементної ізоляції, яку можна характеризувати питомою ємністю ($\text{пф}/\mu\text{м}^2$);
- площа, яку займає типовий елемент – ЗІС-вентиль;
- кількість циклів вибіркового легування;
- кількість циклів фотолітографії.

За цими критеріями можна оцінити типи структур ЗІС.

2.2.1. Дифузійно-планарна структура

Серед планарних структур, в яких використано біполярні транзистори, історично першою є дифузійно-планарна структура. Функційно ізоляції виконують в ній $p-n$ -переходи, які обмежують області окремих елементів і зміщені у зворотному напрямку. Для отримання зворотного зміщення в області підкладки, що розділяє елементи, формується омичний контакт, зв'язаний з найнижчим потенціалом джерела живлення, а до ізолювальних областей резистора за допомогою контактів підводиться високий потенціал.

У дифузійно-планарній структурі як вихідну заготовку використовують пластину монокристалічного кремнію, рівномірно леговану акцепторною домішкою (діркова електропровідність, наприклад, бор). Після того, як на заготовку нанесли шар оксиду кремнію SiO_2 , за методом фотолітографії у цьому шарі вибірково витравлюють ділянки прямокутної форми і через утворені вікна за допомогою термічної дифузії вводять атоми домішки-донора. Процес дифузії суміщають із термічним окисненням кремнію, в результаті якого на поверхні знову утворюється суцільний шар оксиду. Отже, одночасно утворюються колекторні області всіх транзисторів, а також ізолюючі області всіх діодів і резисторів для всіх кристалів пластини.

Повторне відкривання вікон менших розмірів в оксиді з подальшою дифузиею домішки-акцептора формують p -області, які виконують роль базових областей транзисторів, анодів діодів та резисторів. У результаті чергового (третього) циклу фотолітографії, дифузії та окиснення отримують області емітерів, катоди діодів, а також високолеговані області для подальшого створення омичних контактів до високоомних колекторних та ізолювальних областей.

Для створення міжелементних зв'язків у шарі оксиду знову витравлюють вікна і площину пластини покривають суцільною металевою плівкою (зазвичай алюмінієвою). При цьому в місцях, вільних від оксиду, утворюється контакт з відповідними ділянками кремнію. Завершальний цикл фотолітографії (по плівці алюмінію) дає змогу створити систему міжз'єднань, а також контакти по периферії кристалів. Ці контакти буде використано для комутації кристалів із зовнішніми виводами корпусу.

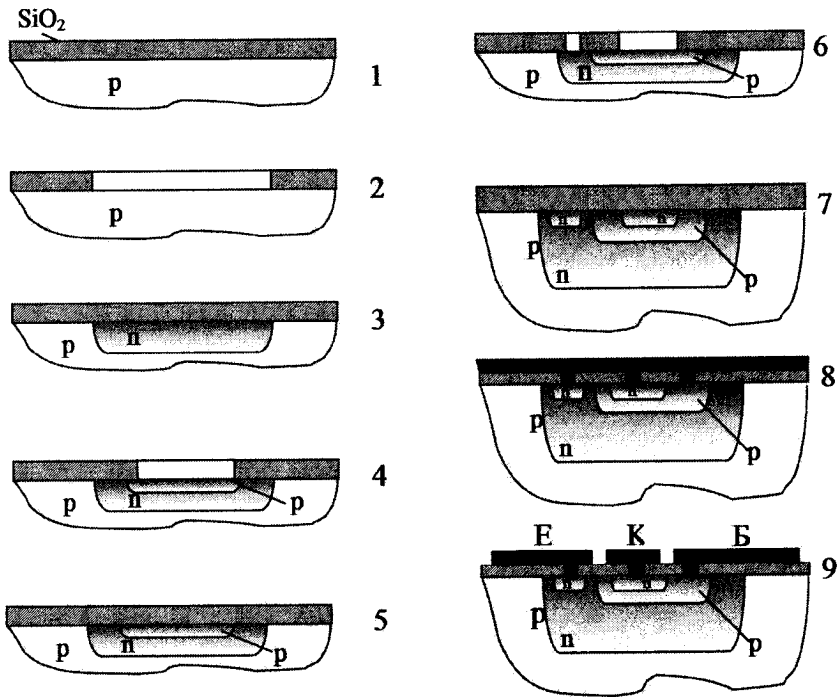


Рис. 2.2. Послідовність формування дифузійно-планарної структури:
 1 – вихідна пастина; 2, 4, 6 – відкривання вікон в оксиді перед дифузією колекторної, базової та емітерної області; 3, 5, 7 – дифузія домішки базової, емітерної, колекторної області відповідно та окиснення поверхні;
 8 – відкривання вікон під контакти до дифузійних областей; 9 – металізація поверхні й вибіркове травлення металевої плівки для утворення між'єднань

Планарний транзистор (незалежно від типу структури) має колекторний контакт в одній площині з базовим та емітерним контактами. Внаслідок цього колекторний струм протікає вздовж протяжної горизонтальної ділянки дна колекторної області (під дном бази), який має поперечні області. В дифузійному колекторі концентрацію активної домішки розподілено за глибиною нерівномірно: вона максимальна на поверхні та дорівнює нулю на дні колектора, тому шар колектора під базою має високий опір, що збільшує напругу насичення і час перемикування транзистора.

2.2.2. Епітаксійно-планарна структура

Рівномірний розподіл домішки за товщиною колектора можна отримати за допомогою епітаксійного нарощування кремнію з дозованою кількістю донорної домішки. Такий процес застосовують для створення епітаксійно-планарної структури. Щоб отримати найпростішу епітаксійно-планарну структуру, як заготовку також використовують монокристалічну пластину кремнію, рівномірно леговану акцепторною домішкою.

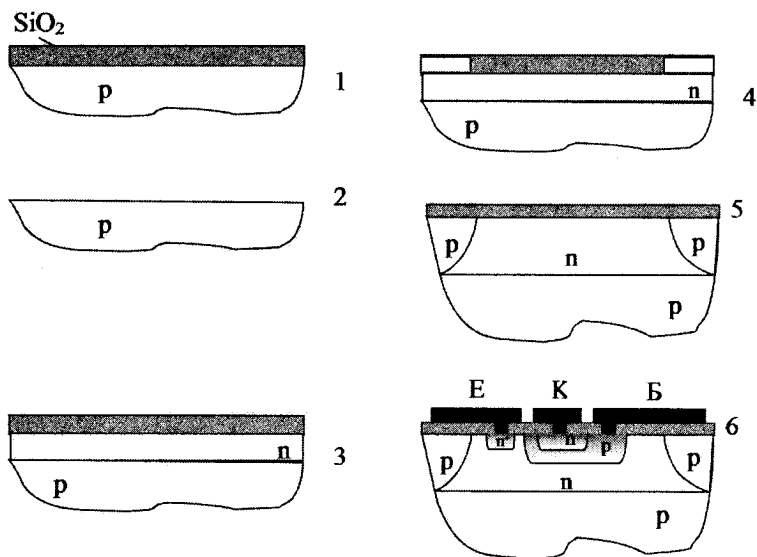


Рис. 2.3. Послідовність формування епітаксійно-планарної структури:
1 – вихідна пластина; 2 – стравлювання оксиду, підготовка поверхні;
3 – епітаксійне нарощування *n*-шару, окиснення;
4 – відкриття вікон в оксиді для ізолювальної (розділяючої) дифузії домішки;
5 – дифузія домішки (акцепторної), окиснення;
6 – готова структура після формування дифузійних базових та емітерних областей, а також отримання між'єднань

Для нанесення епітаксійного шару на одну із сторін пластини її звільняють від оксиду і ретельно очищають, після чого проводять осадження монокристалічного шару кремнію *n*-типу.

Потім поверхню пластини окиснюють і за методом фотолітографії відкривають вікна у вигляді вузьких замкнутих доріжок, які відповідають контуру колекторних та ізолювальних областей ЗІС. Проводячи через вікна дифузію акцепторної домішки до змикання її з p -областю, отримують ізольовані один від одного острівки рівномірно легованого епітаксійного n -кремнію. Процес дифузії називають ізолювальною, або розділяючою дифузією. В отриманій на цій стадії заготовці потім формують базові та емітерні області (за дифузійним методом), а також контакти та міжз'єднання, як у планарно-дифузійній структурі.

Концентрація легуючої домішки в епітаксійних плівках може змінюватись у широких межах, однак із підвищенням концентрації домішки в епітаксійному колекторі знижується пробивна напруга база – колектор.

2.2.3. Епітаксійно-планарна структура з прихованим шаром

Компромісне рішення щодо цього недоліку отримують завдяки епітаксійно-планарної структури з прихованим шаром. Тут епітаксійний колектор легують середньо (необхідну концентрацію розраховують із умови пробую база – колектор), а малий опір колектора забезпечують паралельно ввімкненим прихованим шаром (n^+), який має високу концентрацію домішки.

Початкові стадії технологічного процесу отримання епітаксійно-планарної структури з прихованим шаром зображено на рис. 2.4 (1–6). У поверхнево-оксидному шарі пластини p -типу відкриваються вікна, крізь які проводять дифузію домішки з високою концентрацією. Для того, щоб запобігти значному проникненню в епітаксійний колектор, під час подальших циклів високотемпературної обробки підбирають домішку з малим коефіцієнтом дифузії (наприклад, миш'як). Потім поверхню звільняють від оксиду і нарощують епітаксійний шар n -типу. Після окиснення поверхні процес обробки проходить за тією самою схемою, що і для структури без прихованого шару. У дифузійно- та епітаксійно-планарних структурах міжелементну ізоляцію забезпечують зворотно зміщеними p - n -переходами. Напруги зміщення є невеликими і обмежені одиницями вольт (напруга живлення). Такі переходи мають великі струми втрат і ємності. В результаті зменшується швидкодія схеми, а відстані між еле-

ментами доводиться робити значними. Найкращу електричну розв'язку елементів забезпечує структура з діелектричною ізоляцією.

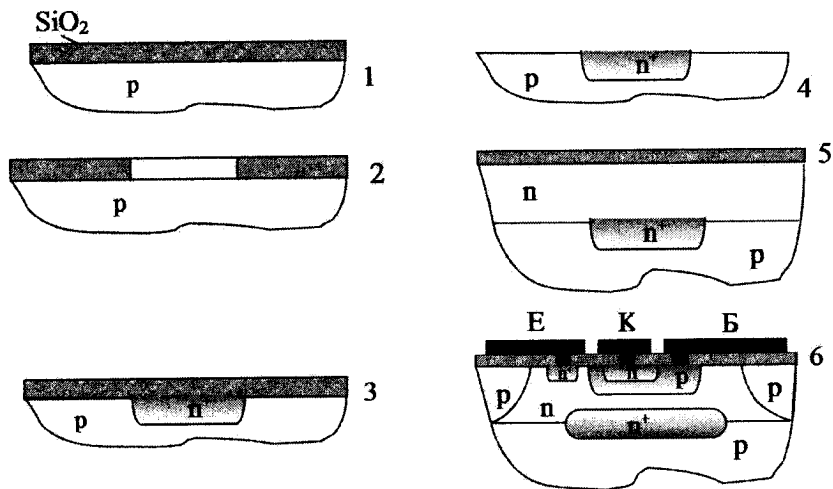


Рис. 2.4. Технологічний процес отримання епітаксійно-планарної структури з прихованим шаром: 1 – вихідна пластина; 2 – відкриття вікон в оксиді; для дифузії прихованого шару; 3 – дифузія домішки (донорної) окислення; 4 – травлювання оксиду, підготовка поверхні; 5 – епітаксійне нарощування *n*-шару, окиснення; 6 – готова структура після формування дифузійних базових та емітерних областей, а також отримання мікз'єднень

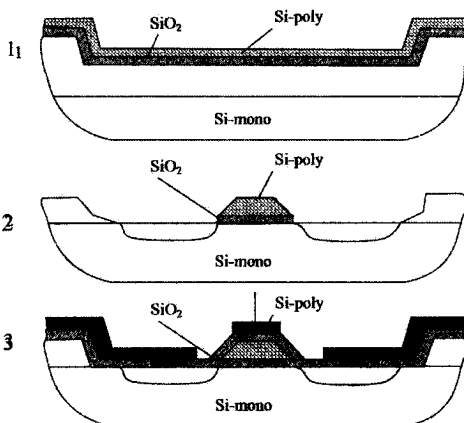
2.2.4. МДН-структура

Суттєвого зменшення площі під вентиль з одночасним спрощенням технології досягають з використанням структур “метал – діелектрик – напівпровідник” (МДН-структура). Основним елементом функціональних схем на МДН-структурах є МДН-транзистор з індукованим каналом *n*- або *p*-типу.

МДН-транзистор має симетричну структуру, яка містить області витоків і стоку та ізольований затвор, за допомогою якого можна індукувати канал і керувати його провідністю. Оскільки переходи, що обмежують області витоків і стоків, завжди зміщено в зворотному напрямку, і перенесення основних зарядів відбувається в тонкому приповерхневому шарі напівпровідника між витоків і стоком кожного

транзистора, додаткових заходів для взаємної ізоляції приладів з одноіменним типом провідності каналу не потрібно.

Рис. 2.5. Основні етапи виготовлення МДН-транзистора з кремнієвим затвором:
1 – отримання локальних ділянок тонкого оксиду і осадження полікристалічного кремнію; 2 – формування кремнієвого затвору і дифузія домішки; 3 – окиснення, формування вікон під контакти формування міжз'єднань

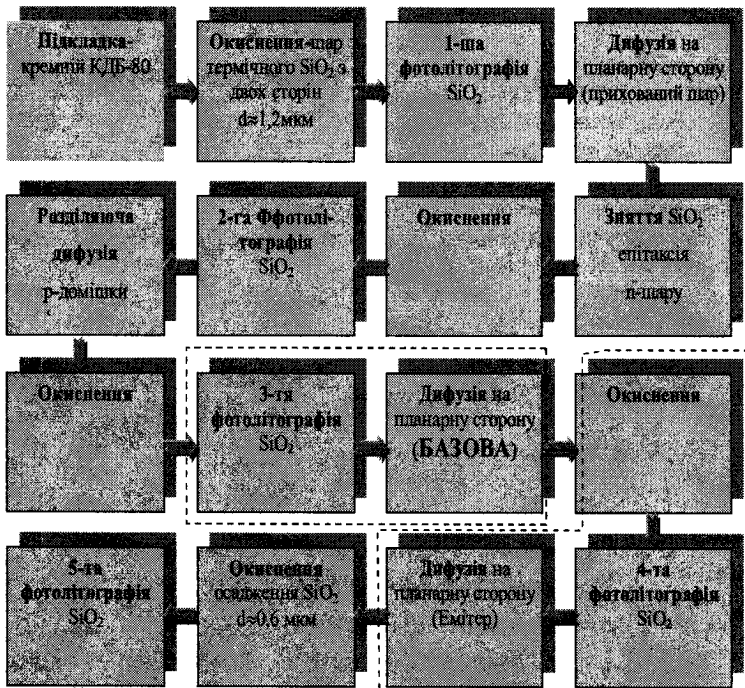


2.3. Технологічний маршрут виготовлення мікроелектронних ЗІС

Вище було визначено, що таке технологічний маршрут, операційна карта. Розглянемо приклад структурної схеми техпроцесу виробництва ЗІС на прикладі епітаксійно-планарного транзистора з прихованим шаром.

На рис. 2.5 зображено схему типового технологічного маршруту виготовлення епітаксійно-планарного транзистора з прихованим шаром. Окремі етапи технологічного процесу – фотолітографія, дифузія, контроль та випробовування – передбачають від 3 до 10 операцій. Наприклад, кожний етап дифузії складається з таких: початковий етап дифузії в приповерхневий шар, травлення шару діоксиду кремнію, вимірювання поперечного опору, перерозподіл домішки з одночасним окисненням, контроль вольт-амперних характеристик *p-n*-переходів. Тобто загальна кількість операцій може досягати 200, а тривалість – 100 годин. За своїм призначенням і місцем у загальному процесі виробництва ЗІС всі операції об'єднуються в самостійні (часткові) технологічні процеси, які, своєю чергою, можна поділити на три групи.

Групова обробка



Індивідуальна обробка



Рис. 2.6. Основні етапи технологічного процесу створення мікроелектронних ЗІС на прикладі епітаксійно-планарної структури з прихованим шаром

До *першої групи* входять заготівельні процеси, метою яких є отримання монокристалічних напівпровідникових злитків певного типу електропровідності із заданим питомим опором, розрізання злитка на пластини, обробка їх поверхонь із заданою мікро- і макрометриєю, а також якість поверхневого шару.

Друга група – оброблювальна – об'єднує всі операції, необхідні для формування структур ЗІС у пластинах та їх контролю та функціонування.

Процеси: окиснення, дифузії, епітаксії, іонної імплантації, вакуумного наплення, фотолітографії.

Третя група процесів – складально-контрольна; розділення пластин на окремі кристали, монтаж кристалів у корпусах, проварювання виводів, герметизація, контроль. Характер і послідовність операцій, що становлять процеси другої групи, повністю визначаються типом структури ЗІС.

2.4. Особливості виробництва ЗІС

Перший принцип виробництва ЗІС і найважливіший – принцип сумісності елементів ЗІС із найскладнішим елементом, яким є транзистор. Структура інших елементів (діодів, резисторів, конденсаторів) має містити тільки ті області, на основі яких сформовано транзистор. Характер і послідовність операцій обробки кристала визначають структурою транзистора – інші елементи формуються попутно.

Другий принцип – групової обробки, яка повинна охоплювати якомога більшу кількість операцій. У результаті отримання великої кількості ЗІС підвищується відтворюваність характеристик і значно зменшується трудомісткість ЗІС.

Третій принцип – універсальності процесу обробки. Для виробництва різних за своїми функціями ЗІС застосовують ідентичні за фізичною суттю процеси з однаковими технологічними режимами.

Четвертий принцип – принцип уніфікації пластин-заготовок, які містять максимальну кількість мікросхем, високої чистоти

технологічних середовищ, в яких здійснюється обробка, є загальною вимогою радіоелектронного виробництва. У виробництві ЗІС ця вимога набуває принципу високої чистоти виробництва. Наприклад, газ, використовуваний в процесах епітаксії, дифузії, не повинні містити домішок понад 0,001 % (об). Це впливає на процент виходу придатних ЗІС. Необхідної чистоти процесів обробки досягають чистотою робочої атмосфери. Запиленість оцінюють за кількістю частинок розміром $\approx 0,5$ мкм. Залежно від допустимої запиленості приміщення поділяють на чотири класи:

3, 4-й клас – різання злитків напівпровідникового матеріалу;

2-й клас – хімічна обробка пластин, складання мікросхем, контроль електричних параметрів;

1-й клас – найвідповідальніший – фотолітографія, дифузія, вакуумне напилення.

2.5. Оцінювання параметрів і характеристик кристалів

Оцінювання параметрів і якості кремнієвих кристалів полягає у вимірюванні їх питомого опору. Найчастіше виявляють мікротріщини у полірованих підкладках (заготовках) і підкладках, де сформовані напівпровідникові прилади (травник – 49 % HF із хромовою кислотою 1:1). Питомий опір вимірюють за чотиризондовим методом (рис. 2.7).

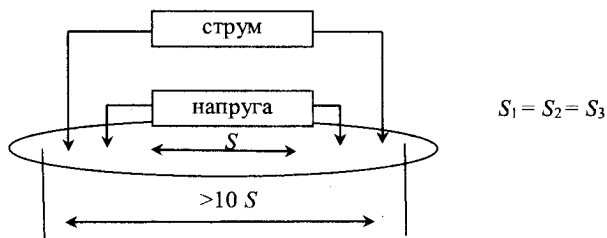


Рис. 2.7. Схематичне зображення вимірювання питомого опору за чотиризондовим методом

Струм I (мА) пропускають між зовнішніми зондами і вимірюють спад напруги U (мВ) між внутрішніми зондами. Виміряну величину опору (V/I) переводять у питомий опір за співвідношення

$$\rho = ((V/I)2\pi S,$$

де S – відстань між зондами в сантиметрах.

Для доброї відтворюваності результатів струм завжди треба підбирати таким, щоб напруга залишалась на рівні 2–20 мВ. Значно впливає на питомий опір зразка температура (для Si з $\rho = 10$ Ом·см за 23 °С зміна питомого опору становить 1 % за зростання температури на 1 °С).

Контрольні питання

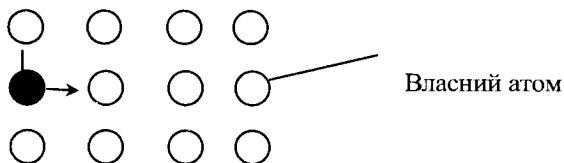
1. Що являє собою мікросхема?
2. Що визначає структура ЗІС?
3. Що являє собою топологія інтегральної мікросхеми?
4. Чим визначається ступінь інтеграції?
5. Чим відрізняються структури основних типів зінтегрованих мікрохем?
6. Якими є основні етапи виготовлення дифузійно-планарної структури?
7. Якими є основні етапи виготовлення епітаксійно-планарної структури?
8. Якими є основні етапи виготовлення МДН-структури?
9. Що являє собою технологічний маршрут виробництва зінтегрованих мікросхем; маршрутна, операційна карта?
10. Пояснити схему технологічного процесу виробництва ЗІС на прикладі епітаксійно-планарної структури із прихованим шаром.
11. Для чого застосовують розділяючу дифузію в технології виготовлення зінтегрованих схем?
12. У чому полягають особливості виробництва ЗІС? Охарактеризуйте основні принципи, на яких ґрунтується технологія виготовлення ЗІС.
13. Якими є вимоги до чистоти виробництва ЗІС?
14. Які технологічні процеси належать до групової обробки, а які до індивідуальних процесів обробки зінтегрованих схем?
15. У чому полягає оцінювання параметрів і характеристик кристалів?

Розділ 3

ДИFUЗИЯ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗІНТЕГРОВАНИХ СХЕМ

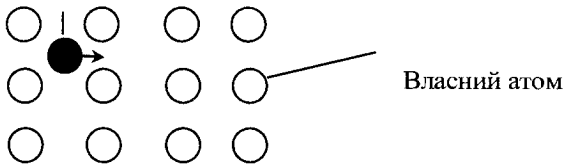
Метою проведення дифузії є впровадження атомів легуючого елемента в кристалічну ґратку напівпровідника для утворення області з протилежним типом провідності відносно вихідного матеріалу. При цьому новоутворена область обмежена p - n -переходом. Кількість введеної домішки повинна бути достатньою для компенсації впливу домішки у вихідному матеріалі й для створення надлишку домішки, щоб забезпечити електропровідність протилежного типу. Значення провідності дифузійної області визначається концентрацією надлишкової (нескомпенсованої) домішки. Концентрація введеної домішки монотонно спадає в напрямку від поверхні вглиб кристала. Перехід утворюється на глибині X_j , де концентрація введеної домішки дорівнює концентрації вихідної домішки пластини. Дифузія відбувається за рахунок вакансій або міжвузля атомів.

Механізм дифузії, за якого сусідній атом (домішковий чи власний) мігрує на місце вакансії, називають вакансійним.

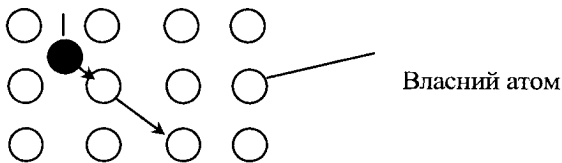


Якщо мігруючий атом є власним атомом, то процес є самодифузією, якщо домішковий – домішковою дифузією (дифузією заміщення).

Механізм, за якого атом переходить з одного положення в інше, не потрапляючи при цьому до вузлів, є механізмом прямого переміщення по міжвузлях (дифузія впровадження).



Механізм непрямого переміщення по міжвузлях, або естафетний механізм: міжвузельний атом витісняє атом ґратки і заміщує його.



З останнім безпосередньо пов'язаний краудіонний механізм, за якого міжвузельний атом, розміщений посередині між двома вузлами ґратки, переміщується і заміщує одного з них.

Для того, щоб уможливити будь-який з елементарних актів переміщення, необхідно надати домішковому атому достатньо вільної енергії, яку називають енергією активації процесу дифузії. Найпоширеніший вакансійний механізм (для більшості, наприклад, домішкових елементів у кремнії), для якого е.а. становить 3,5–4,3 еВ. Вакансії в матеріалі можуть виникати у результаті поверхневого випаровування атомів кремнію, утворення пустих вузлів і дифузії їх вглиб кристала внаслідок зустрічної самодифузії (дефекти за Шотткі). Інша причина утворення вакансії – зміщення атомів кремнію у міжвузля й утворення пар вакансія-атом у міжвузлі (дефекти за Френкелем). В обидвох випадках утворюється вакансія внаслідок суттєвого перевищення енергією атому середнього значення енергії атомів за цієї температури. За температури дифузії 900–1000 °С концентрація вакансій 10^{21} см^{-3} за густини пакування $5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ – 1 вакансія на 50 вузлів ґратки.

3.1. Закони дифузії Фіка

Закони дифузії окреслюють динаміку процесу впровадження домішки в матеріал, тобто атоми легуючої речовини рухаються з областей з високою концентрацією в область з нижчою концентрацією. Потік атомів припиняється, коли зникає градієнт концентрації.

Перший закон Фіка встановлює зв'язок між густиною потоку і градієнтом концентрації речовини, тобто за відсутності конвекції перенесення атомів через майданчик одиничної площі за одиницірного напрямку потоку можна описати:

$$J = -D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x}, \quad (3.1)$$

де J – швидкість перенесення атомів домішки через переріз одиничної площі або дифузійний потік [$\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$] і C – концентрація атомів домішки яка залежить від x і t [см^{-3}]; x – вісь координат, яка збігається з напрямком потоку речовини [см]; t – час дифузії [с]; D – коефіцієнт дифузії [$\text{см}^2/\text{с}$].

Знак <мінус> у правій частині рівняння означає, що процес перенесення відбувається у напрямку зменшення концентрації. Коефіцієнт дифузії визначає величину густини потоку речовини за заданого градієнта концентрації. Оскільки дифузійний потік атомів речовини йде у напрямку вирівнювання перепаду концентрацій, то коефіцієнт D є мірою швидкості, з якою система здатна за заданих умов вирівняти різницю концентрацій. Ця швидкість залежить від рухливості дифундуючих атомів у ґратці. Зміна коефіцієнта дифузії описується рівнянням Ареніуса:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3.2)$$

де $k = 8,63 \cdot 10^5$ еВ/К k – стала Больцмана; T – температура процесу [K] E_a – енергія активації [eV]; D_0 – коефіцієнт, що залежить від роду напівпровідника і дифундуючої домішки, від кристалографічного напрямку та від концентрації вихідної домішки.

3.2. Дифузійні параметри. Дифузія домішки з необмеженого джерела

	$\text{cm}^2/\text{c } D (1200 \text{ }^\circ\text{C})$	$D_0 \text{ cm}^2/\text{c}$	$E_a, \text{ eB}$
B	$2,8 \cdot 10^{-12}$	5–10,4	3,5–3,6
P	$2,8 \cdot 10^{-12}$	10,5	3,66–3,88
As	$2,7 \cdot 10^{-13}$	0,32	3,54–4,20

Щоб розрахувати режими процесу дифузії, необхідно знати закон розподілу домішки за глибиною дифузійної області.

Розглянемо майданчик 1 cm^2 завтовшки δx . За законом збереження речовини зміна концентрації атомів домішки з часом повинна дорівнювати зменшенню дифузійного потоку у тому самому об'ємі, де змінилася концентрація

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \quad (3.3)$$

Знак мінус вказує на те, що накопичуються домішки лише за зменшення густини потоку в напрямку x . За першим законом Фіка отримаємо *друге рівняння Фіка*:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (3.4)$$

Цей закон відображає швидкість накопичення домішки, тобто відображає динаміку процесу.

Закон розподілу домішки як функцію координати і часу можна отримати розв'язанням другого рівняння Фіка за певних умов проведення процесу.

Розв'язуючи *друге рівняння Фіка*, отримуємо для стадії загонки (дифузія з необмеженого джерела) рівняння для розподілу домішки.

$$C(x,t) = C_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (3.5)$$

Для допустимого спрощення замість *erfc* функції можна використовувати апроксимацію.

$$\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \approx \exp\left[-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + 0,3\right)^2\right]. \quad (3.6)$$

Для цього випадку глибина залягання p - n -переходу:

$$X_J = 2\sqrt{Dt} \left\{ \ln \frac{C_a}{C_B} - 0,3 \right\}. \quad (3.7)$$

Графік розподілу концентрації легуючої домішки з необмеженого джерела подано на рис. 3.1.

Глибину залягання p - n -переходу розраховують переважно для стадії розгонки.

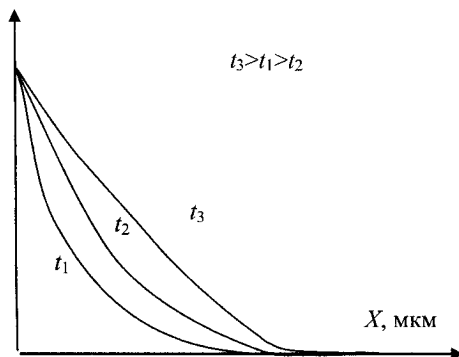


Рис. 3.1. Розподіл концентрації легуючої домішки з необмеженого джерела

З виразу для розподілу концентрації (5) випливає, що заданий розподіл домішки за глибиною можна отримати за різних сполучень D і t . Крім того, зменшення температурного впливу D - t визначає (за сталої концентрації домішки на поверхні) дозу легування.

Дозу легування Q , тобто кількість атомів домішки, введену в кристал через поверхню, площею 1 см^2 за весь час дифузії, можна отримати на основі першого закону Фіка. Підставляючи C_3 (5) і інтегруючи, отримуємо:

$$N = Q = \int_0^{\infty} C(x) dx = \int_0^{\infty} C_{01} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} dx = 2C_{01} \sqrt{D_1 t_1 / \pi},$$

де C_{01} – поверхнева концентрація домішки.

Дифузія з необмеженого джерела відповідає першому етапу дифузії, завданням якого є введення в кристал у приповерхневу область певної кількості домішки. Для зменшення температурного впливу (зниження фактора Dt) поверхневу концентрацію вибирають максимальною, тобто такою, що відповідає граничній розчинності за заданої температури дифузії. В результаті утворюється тонкий приповерхневий шар, насичений домішкою. У виробництві – це загонка. Процеси ізолювальної та емітерної дифузії підпорядковуються розподілу домішки з необмеженого джерела.

3.3. Дифузія домішки з обмеженого джерела

Для остаточного формування дифузійної області введено на першому етапі домішку передають перерозподілу. Цей етап – розгонка – відповідає дифузії з обмеженого джерела. В цьому випадку домішка дифундує з поверхневого шару кременію вглиб, а надходження домішки з навколишнього середовища немає ($Q, N = \text{const}$).

Розв'язок другого закону Фіка має вигляд:

$$C(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right),$$

де Q – густина атомів домішки під одиницею площі поверхні та незмінна в будь-який момент дифузії [$\text{АТ}/\text{см}^2$] – доза легування; x – глибина, що відповідає цій концентрації, см; D – коефіцієнт дифузії домішки, $\text{см}^2/\text{с}$; t – час дифузії, с.

Глибина залягання p - n -переходу:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \sqrt{eh(C_o / C_B)},$$

де
$$C_o = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}$$

для багатьох практичних випадків

$$x_j = 6\sqrt{Dt}.$$

Для розподілу $C(x, t)$ треба врахувати Q або N , введені у стадії загонки

$$C(x, t) = \frac{2C_0}{\pi} \sqrt{D_1 t_1 / D_2 t_2} \exp\left[-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right].$$

У технології ЗІС дифузія домішки здійснюється багаторазово. За однакових умов проведення дифузії зростає фактор Dt

$$Dt = \sum_1^n D_i t_i.$$

Графік розподілу $C(x, t)$.

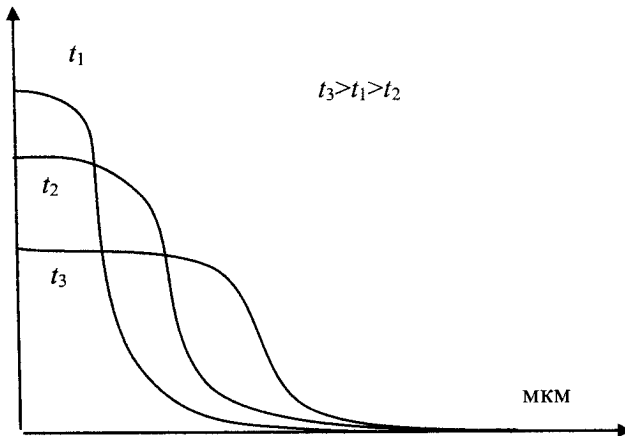


Рис. 3.2. Розподіл концентрації легуючої домішки з обмеженого джерела

Приклад: побудувати профіль розподілення домішки і розрахувати глибину залягання p - n -переходу у разі двостадійної дифузії фосфору в кремній з питомим опором $\rho = 10$ Ом-см, що проводилось в режимах:

Стадія загонки $T_l = 1050$ °С, час проведення $t = 10$ хв.

Стадія розгонки $T_l = 1150$ °С, час проведення $t = 2$ год.

1. Стадія загонки (розподіл домішки):

$$C(x,t) = C_{o1} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}},$$

визначаємо C_{o1} з довідника (для ρ , яке визначено в умові задачі) (рисунок граничної розчинності домішок у кремнії залежно від температури), тобто максимальна кількість домішок, яка може ввійти у кремній $C_{o1} = 1,2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Знаходимо коефіцієнт дифузії D_1 з довідника про залежності коефіцієнта дифузії домішок у кремнії від температури:

$$D_1 = 2,5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Профіль розподілу домішки після загонки має вигляд:

$$C(x,t) = 1,2 \cdot 10^{21} \operatorname{erfc} \frac{x}{7,75 \cdot 10^6}$$

2. Для стадії розгонки:

$$C(x,t) = \frac{Q \text{ або } N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right)$$

визначаємо N або Q :

$$Q = 2C_{o1} \sqrt{D_1 t_1 / \pi} = 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{21} \sqrt{2,5 \cdot 10^{-14} \cdot 10 \cdot 60 / 3,14} = 5,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2},$$

визначаємо коефіцієнт дифузії D_2 для температури $T = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ з довідника $D_2 = 4 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$.

Розподіл домішки має вигляд:

$$\begin{aligned} C(x,t) &= \frac{5,2 \cdot 10^{15}}{\sqrt{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}} \exp\left(\frac{x^2}{4 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}\right) = \\ &= 5,5 \cdot 10^{19} \exp\left(-\frac{x^2}{1,5 \cdot 10^{-8}}\right) \end{aligned}$$

3. Глибина залягання p - n -переходу:

$$x_j = 2\sqrt{D_2 t_2} \sqrt{\ln\left(\frac{C_{o2}}{C_B}\right)}, \quad C_{o2} = \frac{N_1}{\sqrt{\pi D_1 t_1}};$$

$$C_{o2} = \frac{5,2 \cdot 10^{15}}{\sqrt{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60}} = \frac{5,2 \cdot 10^{15}}{\sqrt{9,509 \cdot 10^{-5}}} = 5,5 \cdot 10^{19};$$

$$C_B = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ для } \rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см};$$

$$x_j = 2\sqrt{4 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60} \sqrt{\ln \frac{5,5 \cdot 10^{19}}{1,2 \cdot 10^{15}}} = 3 \text{ мкм}.$$

3.4. Формування біполярного транзистора за допомогою дифузії

Під час формування структури біполярного транзистора необхідно створити два p - n -переходи. Схему такого транзистора зображено на рис. 3.3, а сформований він за стандартною епітаксійно-планарною технологією [32, 33].

Такий транзистор можна сформувати, якщо у кремнієвий епітаксійний шар n -типу спочатку ввести акцепторну домішку, а потім донорну домішку. Базову дифузію здійснюють у дві стадії (загонка і розгонка). Стадія загонки враховує, що максимальна поверхнева концентрація не може перевищувати граничної розчинності домішки у кремнії. Розподіл домішки описується $erfc$ -функцією:

$$C_a(x, t) = C_{oa} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{a1}t_1}}\right),$$

де C_{oa} – поверхнева концентрація акцепторів; D_{a1} – коефіцієнт дифузії акцепторів за температури T_1 проведення загонки акцепторів; t_1 – час загонки.

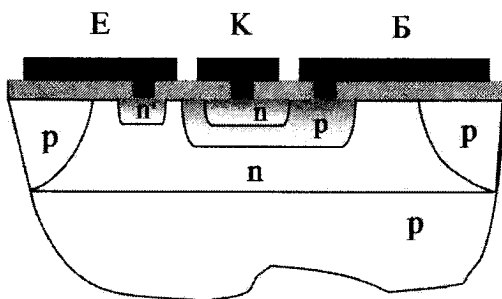


Рис. 3.3. Структура біполярного транзистора, сформованого за епітаксійно-планарною технологією

Кількість акцепторної домішки, яка проникла у кристал через поверхню:

$$Q_a = 2C_{oa} \sqrt{\frac{D_{a1} \cdot t_1}{\pi}}$$

Другу стадію проводять впродовж довгого часу, а розподіл домішки при цьому є експоненційним:

$$C_a(x, t) = \frac{Q_a}{\sqrt{\pi D_{a2} t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_{a2} t_2}\right).$$

Глибина залягання колекторного p - n -переходу:

$$x_{jk} = 2 \sqrt{D_{a2} \cdot t_2 \ln \frac{Q_a}{\sqrt{\pi \cdot D_{a2} t_2} C_B}}$$

Дифузію емітерної області зазвичай проводять з джерела безкінечної потужності (erf -функція):

$$C_g = C_{og} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_g \cdot t_3}}$$

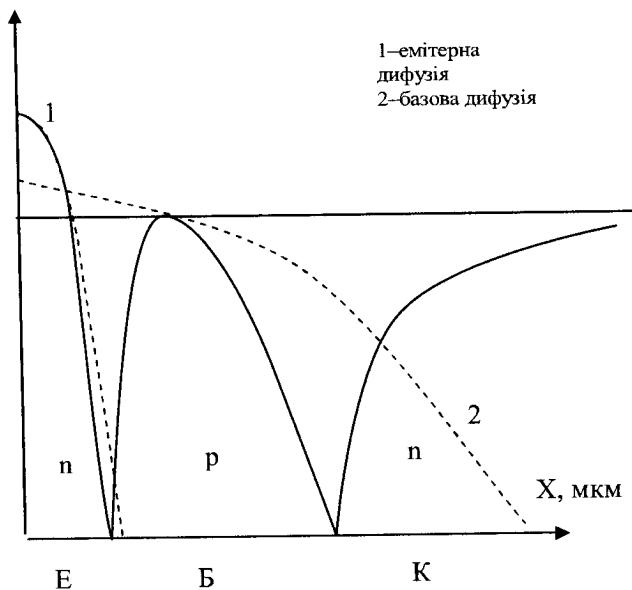


Рис. 3.4. Розподіл домішки в біполярному транзисторі, що сформований за епітаксійно-планарною технологією

Глибина залягання емітерного p - n -переходу визначається точкою інверсії типу провідності. При розрахунку розподілу концентрації акцепторної домішки необхідно врахувати перерозподіл домішки в базовій області при дифузії емітерної домішки:

$$C_a(x,t) = \frac{Q_a}{\sqrt{\pi(D_{a2} \cdot t_2 + D_{a3} t_3)}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(D_{a2} \cdot t_2 + D_{a3} \cdot t_3)}\right),$$

де D_{a3} – коефіцієнт дифузії акцепторів за температури проведення процесу загонки донорів T_3 і t_3 – час проведення загонки донорів.

Сумарний розподіл домішок у транзисторній структурі зображено на рис. 3.4.

3.5. Вплив електричного поля на дифузію домішок

Тоді як домішкові атоми є іонізованими за певної температури дифузії, між ними і утвореними електронами і дірками виникає електричне поле – локальне. За температури дифузії вільні електрони дифундують всередину напівпровідника, і швидкість їх дифузії більша від швидкості домішкових атомів. Градієнт концентрації таких іонізованих атомів домішки створює внутрішнє електричне поле, яке підвищує коефіцієнт дифузії іонізованих домішкових атомів:

$$D_c = D \left[1 + \frac{C}{\sqrt{4n_i^2 + c^2}} \right],$$

де n_i – власна концентрація; C – концентрація іонізованих домішок.

Якщо $n_i \ll C$, то $D_c = 2D$, якщо $n_i \gg C$, то $D_c = D$.

Для кремнію $n_i^2 = 1,66 \cdot 10^3 T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$, тоді

$$E_g = 1,17 - \frac{4,73 \cdot 10^{-4} T^2}{635 + T} - \text{ширина забороненої зони.}$$

3.6. Фактори, що впливають на швидкість дифузії

На швидкість дифузії впливають такі фактори, як температура; тип домішкових атомів і середовище, в якому вони дифундують; наявність дефектів кристалічної ґратки; концентрація введеної домішки і концентрація домішки, вже наявної в пластині. З підвищенням температури швидкість дифузії зростає, оскільки збільшується вірогідність перескакування домішкового атома з одного положення в інше, причому залежність ця приблизно експоненційна. Тип атомів також впливає на швидкість дифузії, оскільки для різних атомів різні енергії активації дифузії і, що важливіше, може бути різний і сам механізм дифузії. Як уже зазначалося, домішкові атоми, що дифундують за вакансійним механізмом, мають значно нижчий коефіцієнт дифузії, ніж атоми, що дифундують за міжвузлями.

Вплив дефектів кристалічної структури на швидкість дифузії домішкових атомів зумовлений тим, що дефекти створюють навколо себе механічні напружки, що сприяють утворенню вакансій. Це, своєю чергою, збільшує швидкість дифузії атомів, що переміщуються за вакансійним механізмом. Вплив концентрації домішкових атомів (вводяться в пластину або вже є в ній) зумовлений тим, що за високих температур фактично всі вони перебувають в іонізованому стані: донори стають позитивно зарядженими іонами, акцептори – негативно зарядженими. Якщо, наприклад, пластина була легована донорами, а в неї вводять акцептори, то внаслідок додаткового впливу електричного поля донорів іони-акцептори дифундуватимуть швидше. Якщо ж пластину було леговано донорами, а в неї вводять їх ще, то швидкість їхньої дифузії через електричне поле буде меншою.

На швидкість дифузії впливає і концентрація самої домішки, що вводиться в пластину, причому цей вплив помітний лише за умови, що концентрація введеної домішки перевищує власну концентрацію вільних носіїв заряду в напівпровіднику. Якщо, наприклад, вводяться донори, то, як вже зазначалося, в кристалічній ґратці вони іонізуються з утворенням вільних електронів і позитивно заряджених іонів-донорів. Електрони є значно рухливішими час-

тинками, тому вони швидко дифундують вглиб кристала і створюють електричне поле, що діє на іони-донори. В результаті ефективний коефіцієнт дифузії донорних домішкових атомів зростає. Зрозуміло, цей ефект помітний лише тоді, коли додаткове збільшення вільних електронів у кристалі перевищує кількість власних носіїв.

3.7. Матеріали для дифузії домішок

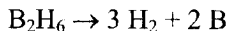
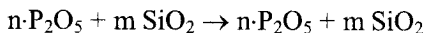
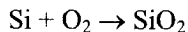
Дифузанти, які використовують для формування легованих шарів *n*- і *p*-типів у технології є сполуками домішки з воднем, галогеном, киснем. Поділяються на газоподібні, рідкі, тверді. Залежно від стану спосіб його доставки до підкладок різний.

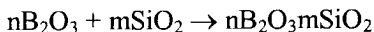
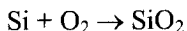
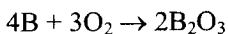
Газоподібні дифузанти B_2H_6 , PH_3 , AsH_3 зазвичай додають у газ-носій у заданій пропорції. Для рідких дифузантів (BBr_3 , $POCl_3$, PCl_3) застосовують барботування газу-носія через дифузонт, внаслідок чого газ-носій насичується парами дифузанта. Тверді джерела дифузії наносять у вигляді плівок на поверхню напівпровідника.

Зазвичай їх використовують у вигляді скла: фосфоросилікатного-ФСС, боросилікатного-БСС і ареносилікатного-АСС. Всі дифузанти токсичні. Газоподібні дифузанти постачають у розведеному вигляді в газових балонах, в яких концентрація дифузанта не більша за 5 %. Рідкі дифузанти в чистому вигляді постачають у спеціальній тарі.

Типові хімічні процеси, що відбуваються на поверхні підкладки для газоподібних і рідких дифузантів

На поверхні напівпровідникової пластини утворюється шар діоксиду кремнію, який містить дифузонт заданої концентрації:





Ці реакції показують, що за будь-якого джерела дифузія йде із плівки скла, утвореного діоксидом кремнію і, відповідно, оксидом дифузанта. Тому широко розпочали використовувати плівкові дифузанти з погляду відтворюваності, оскільки такі плівки можна наносити з великою точністю за товщиною і концентрацією дифузанта.

3.8. Методи контролю та обладнання дифузійних процесів

Під час дифузії пластини кремнію поміщають у кварцову трубу, яка нагрівається однозонною пічкою, в яких середовище нагріто до температури 1200 °С і підтримується з точністю 0,2–0,3 °С. Через трубу пропускається потік газу-носія (азот чи аргон у суміші з киснем). Кисень може вводитись впродовж всього процесу. Якщо пропускати через реактор тільки дифузанта у потоці інертного газу, то на поверхні кремнію може проходити процес травлення. На межі кремнію з діоксидом проходить реакція виділення домішки, яка дифундує в напівпровідник.

Перша стадія процесу легування: пропускається інертний газ через всю систему – стадія промивання. Після цього продувають суміш азоту з киснем, але без дифузанта, щоб отримати тонку плівку SiO_2 , яка захищає поверхню кремнію. Впродовж другої стадії формується шар SiO_2 із заданою концентрацією дифузанта. За цю стадію відбувається реакція дифузанта із Si і виділення домішки. Це загонка. У третій стадії здійснюється дифузія в глибину – розгонка. Класичними донорною і акцепторною домішками є фосфор і бор.

Методи контролю дифузійних шарів

Контролюють дифузійні шари, вимірюючи глибину $p-n$ -переходу, поверхневий опір та оцінюючи поверхню.

Глибина $p-n$ -переходу. Зручним методом контролю глибини залягання $p-n$ -переходу є забарвлення шліфа. Сферичний шліф

формують притисканнями сталеві кулі ($d = 35\text{--}100$ мм) та її обертанням. У місця стику подають абразивну суспензію. Межу p - n -переходу виявляють за забарвленням (потемнінням) p -області внаслідок окиснення в травнику: 49 % HF з невеликою добавкою (0,05–0,1 %) HNO_3 . Вимірюючи більший та менший діаметри забарвленої області, обчислюють глибину залягання p - n -переходу:

$$x_i = (d_1^2 - d_2^2) / 4D,$$

де D – діаметр кулі; d_1 і d_2 – діаметри p - і n -областей відповідно.

Поширеним методом поверхневого опору R_s є чотиризондовий метод (рис. 2.7). За даними вимірювань глибини залягання та питомого опору визначають поверхневу концентрацію домішки і розраховують розподіл концентрації домішки. Для певного дифузійного профілю середня величина питомого опору $\rho = R_s x_j$ є однозначно пов'язаною з поверхневою концентрацією дифузійного шару і рівнем легування підкладки. Існують розраховані криві Ірвіна, що пов'язують поверхневу концентрацію і середній питомий опір.

Контрольні питання

1. Які існують механізми дифузії домішок?
2. Які закони покладено в основу розрахунку розподілу домішки у дифузійних процесах?
3. Чим визначається і від яких параметрів процесу залежить коефіцієнт дифузії?
4. З якою метою проводять дифузію з безмежного джерела; якою функцією описують розподіл концентрації домішки?
5. Яким фактором обмежується значення поверхневої концентрації домішки у разі дифузії з необмеженого джерела?
6. Чим визначається доза впровадженої домішки у разі дифузії з обмеженого джерела?
7. З якою метою проводять дифузію з обмеженого джерела; якою функцією описують розподіл концентрації домішки?
8. Як змінюється поверхнева концентрація домішки у разі дифузії з обмеженого джерела?
9. Як впливає термічна обробка на дифузійний розподіл домішки?

10. Як електричне поле впливає на дифузію домішок?
11. Порівняти режими проведення дифузійних процесів з безмежного та з обмеженого джерел.
12. Порівняти глибини розповсюдження домішки під час дифузії з безмежного та обмеженого джерел.
13. Які дифузанти використовують для формування легованих шарів p - і n -типів?
14. Як відбуваються дифузійні процеси під час формування транзисторних структур?
15. Які методи контролю використовують для оцінювання проведених дифузійних процесів?

Розділ 4

ПРОЦЕСИ ЕПІТАКСІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗІНТЕГРОВАНИХ СХЕМ. ОСАДЖЕННЯ ПОЛІКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ

Напівпровідникові пластини зі структурою кремній-на-ізоляторі є складними підкладками з активним верхнім шаром кремнію, який відділений від решти підкладки шаром діелектрика, і призначеними, здебільшого, для підвищення швидкодії транзисторів. Технологія КНІ-структур у провідних фірмах світу стає все більше відпрацьованою і дає змогу створювати частково чи повністю збіднені транзистори з високою швидкодією, зменшеними струмами втрат і потужністю споживання, а також придатними як до низьковольтних, так і високовольтних архітектур [34]. Складні підкладки мають переваги для мобільних використань з батарейним живленням. Вони є значно стійкішими до радіаційних впливів і відкривають більші перспективи конструктивно-технологічних інтеграцій і створення монолітно інтегрованих мікросистемних та сенсорних пристроїв, оскільки мікромеханічні датчики та актюатори, створені на складних підкладках, досягають високих значень чутливості та точності. Щодо біомедичних використань – КНІ-структури відкривають кращі можливості для створення різноманітних медичних вимірювальних приладів, зокрема біоімпланти, які матимуть переваги в безпеці та надійності.

На сучасному етапі розвитку мікроелектронної індустрії якість, вартість і доступність матеріалів для КНІ-структур пере-

шкоджають їх широкому впровадженню. Такі матеріали повинні мати тонкий кремнієвий шар без дефектів і високу однорідність товщини шару та високоякісний захований оксид. Напівпровідникова промисловість орієнтується на вихідний матеріал, сумісний із більшістю технологічних операцій для стандартної, об'ємної напівпровідникової технології [35]. Найбільш відпрацьованими з комерційним застосуванням стають технології SIMOX, Unibond® (також відомий як SmartCut® чи IonCut®), і ELTRAN® – три основні методи у виробництві напівпровідникових пластин зі структурою кремній-на-ізоляторі.

4.1. Особливості технології розділення імплантованим киснем

SIMOX (Separation by Implantation of Oxygen – “розділення імплантованим киснем”) – це технологія створення напівпровідникових структур, що складаються з тонкого шару кремнію, ізольованого від підкладки тонким шаром SiO_2 . Принцип формування напівпровідникових пластин за цим методом (рис. 4.1) полягає у формуванні захovanого шару SiO_2 за допомогою імплантації іонів кисню під поверхнею кремнієвої пластини.

Основні стадії формування SIMOX-структур:

- глибока імплантація великої дози кисню у кремнієву пластину (10^{18} см^{-2} з енергією $\geq 150 \text{ keV}$) синтезує захovanу область SiO_2 завтовшки 0,2–0,4 мкм під поверхнею тонкої кремнієвої плівки;
- відпал за відносно низької температури (1150–1200 °C) створює неоднорідну кремнієву плівку, в якій тільки верхня 0,1 мкм область має добрі параметри. Нижня межа розділу на цій стадії ще невпорядкована і містить багато дефектів;
- високотемпературний відпал при 1250–1405 °C покращує і спрощує вертикальну структуру: утворюється високоякісний активний шар, що простягається по всій плівці з формуванням чітких меж поділу.

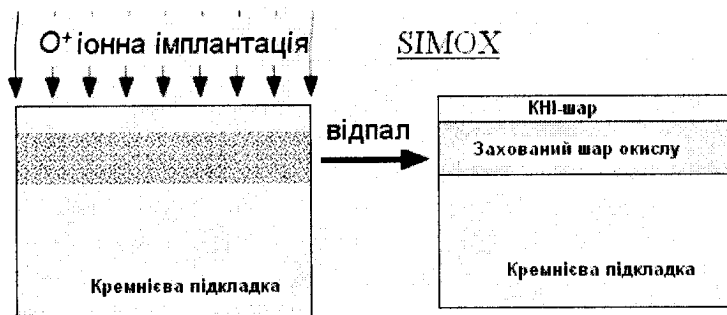


Рис. 4.1. Принцип формування КНІ-структур за методом SIMOX

Велика доза іонів кисню, яка імплантується в Si, спричиняє різні дефекти, які залежать від дози імплантації. У разі SIMOX доза імплантації, що дає змогу створити захований шар оксиду, в 200–500 разів більша, ніж найбільші дози, що використовують для легування в мікроелектронних процесах [34]. У процесі відпалу підкладки після імплантації “малої дози” преципітати оксидів формуються на глибині максимальної концентрації кисню і при цьому неперервний шар SiO_2 не формується. Стандартні дози, які використовують за більшістю методів – $1,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, що є достатнім для одержання шару оксиду завтовшки 400 нм. Якщо доза досягає $1,2\text{--}1,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, формується шар SiO_2 (66 ат% кисню на 33 ат% Si), і подальша імплантація розширює загальний профіль (тобто захований шар оксиду стає товстішим). Доза, за якої захований шар оксиду починає формуватись, називається “критичною дозою” і становить $1,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Варто зазначити, що дуже велика кількість кисню, яку вводять до Si, спричиняє короблення підкладки, утворення дефектів, що є недоліком цієї технології.

Сучасна технологія отримання SIMOX-структур складається з двох стадій імплантації. На першій формують шар основного захovanого оксиду. Доза імплантації при цьому становить $1\text{--}5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ за енергії іонів 150–220 кеВ та температури пластини 350–500 °С. Другу стадію проводять за нижчої температури, енергія потоку іонів залишається такою самою, як і на першій, доза імплантації становить 10^{15} см^{-2} . Метою другої стадії імплантації є створення

пошкоджень, які покращують дифузію кисню крізь поверхню кремнію і прискорюють внутрішню оксидацію, збільшують товщину захованого оксиду протягом відпалу. Ці дві стадії імплантації в поєднанні з відпалом за температур, вищих за 1300 °С в атмосфері аргону, збагаченій киснем, створюють високоякісний стехіометричний захований оксид завтовшки 150 нм і активний шар кремнію завтовшки 50–90 нм. Кисень, введений в атмосферу аргону, створює на поверхні пластини захисну оксидну плівку, яку після процесу відпалу можна легко усунути [36].

Раніше було встановлено, що кількість дефектів можна суттєво мінімізувати, якщо доза імплантації залишається нижчою за порогове значення $4 \cdot 10^{17}$ іон/см² (за 150 кеВ). Цей поріг є, на жаль, субкритичним, так що безперервний захований оксид не може формуватись під час відпалу. Якщо процеси імплантації і відпалу повторити 2 і 3 рази (так, щоб загальна доза становила $1,2 \cdot 10^{18}$ ат/см²), то можна отримувати високоякісні напівпровідникові пластини зі структурою кремній-на-ізоляторі без генерації значної кількості дислокацій у кремнієвому шарі (густина дислокацій менша, ніж 10^3 см⁻²). Крім того, отримується також атомарна гладка межа поділу Si-SiO₂ і вільне від кремнієвих острівців “дно” захованого оксиду.

Отже, в результаті SIMOX-технології, яку вперше продемонстровано Ізумі та ін. у 1978 р., і яка стала сьогодні однією з домінантних технологій КНІ-структур, має типові режими формування: імплантована доза кисню становить 2×10^{18} см⁻², що у 1000 разів перевищує імплантацію стік-витоккових областей МОН-транзисторів, температура відпалу 1250–1400 °С, товщина захованого шару оксиду – 500 нм, товщина активного шару кремнію – 200 нм. Характеристики промислових імплантерів на прикладі I2000 (IBIS, США) наведено в табл. 4.1 [7].

Сучасні дослідження SIMOX-матеріалів орієнтуються на виробництво тонких плівок кремнію з використанням низькоенергетичної імплантації і малих доз, що має значні переваги. По-перше, стійкість до загальної дози тонкого захованого оксиду краща, ніж для товстого. По-друге, виготовлення відразу тонких кремнієвих

плівок технічно доцільніше для використання в тонкоплівкових приладах (замість зменшення товщини плівок після одержання грубшої). І врешті, вартість виробництва SIMOX підкладок пропорційна як до енергії пучка, так і до дози імплантації. Відомо, що імплантація субкритичних доз енергії в інтервалі між 30 і 80 кеВ і наступний високотемпературний відпал дають змогу одержувати тонкі та неперервні приховані оксидні шари і тонкі кремнієві покриття з низькою густиною дефектів.

Таблиця 4.1

Характеристики імплантера I2000 (IBIS, США)

Параметр	Значення
Струм променя	80 мА (E>130 кеВ)
Робочий струм променя	45 мА (130 кеВ < E < 65 кеВ)
Енергія імплантації	65–230 кеВ
Похибка стабільності променя	< +/-5 % за понад 4-годинного режиму роботи, не враховуючи 20-хвилинний вихід на температурні режими і охолодження
Стабільність енергії імплантації	< +/-1 % за понад 4-годинного режиму роботи
Температуру підігріву пластин	300–450 °С (нагрівання кварцовими лампами)
Температурна похибка	< +/-3 %
Похибка дози імплантації	< +/-2 %
Кут імпланатації	0- 10 0 tilt
Система управління	Windows NT/2000, Ethernet
Діаметр лотків для пластин	до 300 мм

Додаткова перевага цього методу – зменшення забруднення плівок, оскільки вводять домішки (вуглець, важкі метали) пропорційно до дози імплантованого кисню. Основні переваги приладів, побудованих на SIMOX-структурах, порівняно з об'ємним та епітаксійним кремнієм та можливі галузі їх застосування наведено в табл. 4.2.

Переваги SIMOX-структур порівняно з об'ємними аналогами

Параметри	Переваги КНІ-структур (SIMOX) порівняно з об'ємними	Можливі галузі застосування
Швидкодія	За однакових робочих напруг КНІ-схемотехніка є на 30 % швидшою.	Робочі станції, настільні комп'ютери, мікрохвильові пристрої зв'язку
Енергоспоживання	Понижене до 80 %	Портативні комп'ютерні пристрої і стільникові телефони, пристрої навігації
Низька робоча напруга	Рівень напруги може бути значно понижений без значної втрати швидкодії	Високоякісні прилади: пам'ять, мікропроцесори для роботи за низьких напруг живлення
Робоча температура	Прилади на SIMOX-структурах можуть працювати за температур до 350 °С, об'ємні та епітаксійні і обмежені 150 °С	Автомобільна електроніка, сенсорна техніка, воєнна і аерокосмічна промисловість
Радіаційна стійкість	Прилади на SIMOX-структурах менш чутливі до проникаючого α -випромінювання та інших радіаційних ефектів	Комерційна пам'ять, супутникові системи, аерокосмічна і воєнна проми-словість
Кількість стадій технологічного процесу	Зменшена до 30 %. Процеси виготовлення схем на SIMOX-структурах є сумісними з об'ємними технологіями	Більшість схем сумісні з кремнієвою об'ємною технологією
Вартість	Менші розміри кристалів і спрощений процес виготовлення зменшують вартість та капіталовкладення в організації виробництва	Більшість схем сумісні з кремнієвою об'ємною технологією
Площа кристала	Може бути зменшена до 50 %	Схеми пам'яті, процесорні ІС

4.2. Комбіновані методи отримання структур кремній-на-ізоляторі

BESOI (bond and etch-back SOI) – з'єднання та травлення підкладок КНІ-структур. Суть методу полягає в тому, що дві окиснені пластини (рис. 4.2) у процесі термокомпресії зрощують і відпалюють, після чого одну із них поліруванням і травленням стоншують, отримуючи в результаті напівпровідникову пластину із сформованою КНІ-структурою.

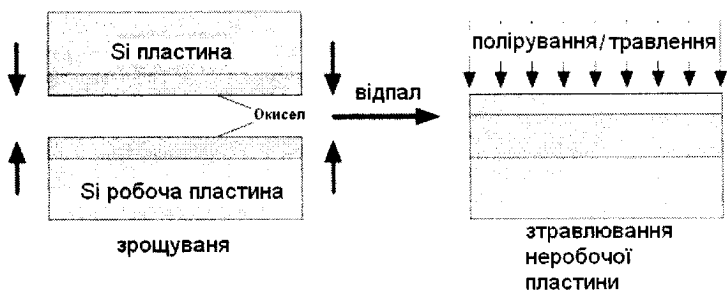


Рис. 4.2. Схематичне зображення BESOI-методу отримання структур кремній-на-ізоляторі

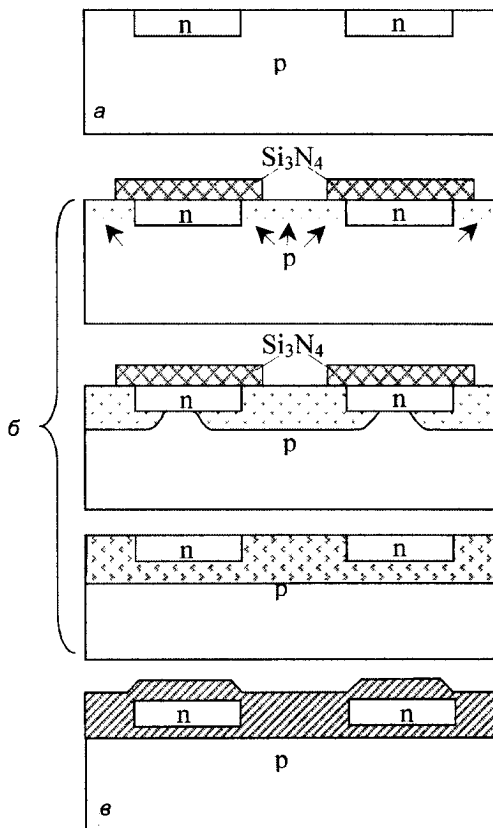
Характеристики активного шару задають вихідною пластину, яка підлягає механічному і хімічному поліруванню. Товщина захованого шару оксиду визначається сумарною товщиною оксиду на поверхнях двох пластин.

FIPOS-метод (Full Asolation by Porous Oxidized Silicon) є перспективною технологією, яка дає змогу формувати острівки монокристалічного кремнію, оточені окисненим пористим кремнієм. Вона ґрунтується на таких положеннях [37]:

- монокристалічний кремній можна перетворити на пористий за допомогою анодного травлення;
- швидкість утворення пористого кремнію *p*-типу провідності набагато більша ніж *n*-типу;
- пористий кремній утворюється у напрямку протікання струму, який спричиняє реакцію анодного травлення;

- зміни об'єму пористого кремнію в процесі окиснення відносно невеликі;
- швидкість його окиснення достатня для одержання товстих ізолюючих шарів.

На рис. 4.3 схематично зображено послідовність операцій за FIPOS-методом.



За допомогою дифузії чи іонного легування змінюють провідність окремих областей кремнієвої пластини з *p*-типу на *n*-тип, а потім маскують шаром нітриду кремнію. Після цього в результаті електрохімічної обробки в плавиковій кислоті області кремнію *p*-типу з боків і безпосередньо під областями *n*-типу перетворюються на пористий кремній.

Швидкості окиснення пористого і монокристалічного кремнію відрізняються на порядок, тому за подальшого високотемпературного окиснення ($T=1073\text{--}1373\text{ K}$; 30–60 хв) пористий кремній швидко окиснюється, що приводить до повної діелектричної ізоляції острівців *n*-типу.

4.3. Процеси нарощування плівок під час формування структур кремній-на-ізоляторі

ELTRAN (Epitaxial Layer TRANSfer – епітаксійне передавання шару) пластини були одними з перших виготовлених і комерційно доступних напівпровідникових пластин зі структурою кремній-на-ізоляторі, сформованих з'єднанням і травленням пористого кремнію з подальшим водневим відпалом. Найновіша технологія, створена для виробництва пластин, – високовідтворюване водяне розщеплення в пористому кремнієвому шарі, який дає змогу пластину-зародок використати декілька разів для здешевлення ціни виробничого процесу (рис. 4.4).

Цей метод передбачає комбінування BESOI-процесу епітаксійного вирощування пористого кремнію, який може бути стравлений з надвисокою селективністю, і поверхневого вирівнювання за допомогою водневого відпалу. Особливістю методу також є те, що об'єднана пластинка під час технологічного процесу розколюється по шару пористого кремнію на дві пластини, одна з яких стає ELTRAN-пластиною, а іншу можна використати повторно [38].

Ця технологія містить декілька підпроцесів, що поєднують такі специфічні властивості пористого кремнію, а саме:

- відпал пористого кремнію в атмосфері водню ущільнює його поверхневі пори і вирівнює поверхню, що дає змогу формувати високоякісний епітаксійний кремнієвий шар на гладкій поверхні пористого кремнію;

- велика поверхнева площа пористого кремнію сприяє надзвичайно високій селективності травлення;

- площину розщеплення можна визначити, контролюючи внутрішнє напруження пористого кремнію.

Анодування передбачає пропускання струму крізь розчин HF і етанолу з монокристалічною кремнієвою пластиною, яка є анодом. Цей процес створює мікроскопічні пори діаметром у кілька нм і густиною розміщення 10^{11} см^{-2} .

Реакція, яка відбувається на поверхні пластини, створює пори, які поступово витягуються в товщу пластини під час процесу травлення. Змінюючи густину струму, легко створити пористий кремній, який має багат шарову структуру. На рис. 4.5 зображено два шари пористого кремнію, отримані за різних густин струму. Співвідношення пор у діаметрі становить до 3 разів.

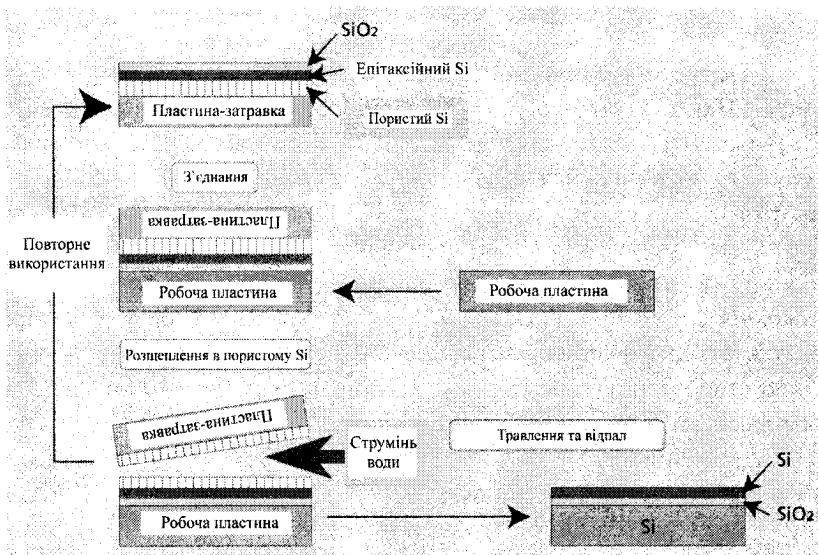


Рис. 4.4. ELTRAN-метод із повторним використанням пластини-зародка

Суше окисдування пористого кремнію проводять за температури до 400 °С, у результаті чого утворюються внутрішні пористі стінки завтовшки 1–3 нм, які захищають структуру пористого кремнію від змін під час високотемпературної обробки.

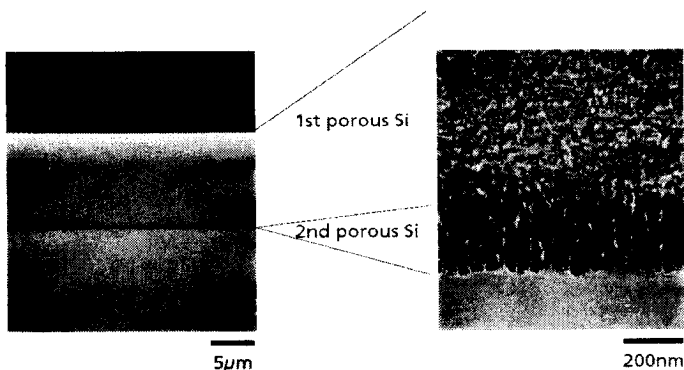


Рис. 4.5. Мікрофотографії двошарового пористого кремнію, сформованого анодним струмом

Пористий кремній надалі відпалюється за температури 1000–1100 °С в атмосфері H_2 (хімічне осадження з парової фази) у CVD-реакторі. Встановлено, що попередній відпал підсилює поверхневу дифузію, яка спричиняє ліквідацію пор на поверхні пористого кремнію. При цьому їх щільність зменшується від 10^{11} см^{-2} до 10^4 см^{-2} , і поверхня кремнію вирівнюється. Під час попереднього відпалу в атмосфері водню відбувається так звана попередня інжекція осадження додаткової кількості кремнію з газової фази. В результаті цього отримуємо поверхню з густиною дефектів 10^1 см^{-2} . Після попередньої інжекції епітаксійне вирощування проводять за температури 900–1000 °С. Наступна стадія – термічне окиснення для утворення шару SiO_2 на поверхні епітаксії. Цей оксид після з'єднання пластин стає захованим оксидом (BOX) на КНІ-пластині [7]. Поверхні термічно вирощеної оксидної плівки і кремнієвої утримувальної пластини очищують і з'єднують за кімнатної температури. Потім за допомогою сил Ван-дер-Ваальса проводять

термічну обробку, формуючи ковалентні зв'язки для з'єднання двох поверхонь.

Пористий кремнієвий шар у об'єднаній пластині має двошарову структуру. Для розщеплення отриманої пластини паралельно до її поверхні поблизу поверхні поділу між двома шарами пористого кремнію використовують метод “водяного розщеплення” (Water Jet) (рис. 4.6).

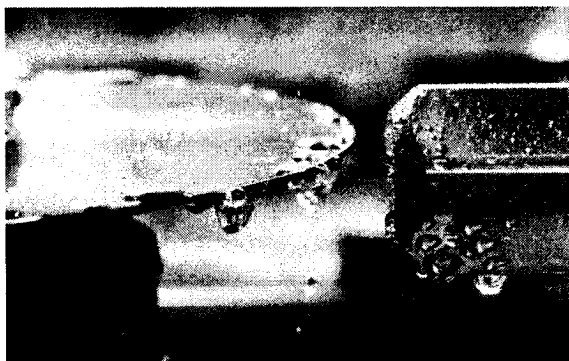


Рис. 4.6. Процес водяного розщеплення

Розщеплення проводять струменем води діаметром 0,1 мм під тиском 20–60 мПа. Ці параметри струменя недостатні для різання монокристалічної кремнієвої пластини, але достатні для розщеплення пористого кремнію. Після розщеплення перший пористий кремнієвий шар залишається на утримувальній пластині. Цей шар має однорідну товщину по всій поверхні пластини. Утримувальну підкладку травлять у розчині HF , H_2O_2 , і H_2O . Селективність цього травлення надзвичайно висока, що означає відсутність якої-небудь деградації однорідності товщини КНІ-шару. Травник проникає в пористий кремній завдяки капілярним явищам і витравлює його стінки.

Описані технологічні процеси дають змогу отримати високоякісні КНІ-пластини з добрими характеристиками. ELTRAN-пластини вільні від COPs (Crystal-originated Particles – частинки кристалічного походження) дефектів. Захований оксид не містить порожнин. Вони також мають надзвичайно низьку густину HF -

дефектів. КНІ-шари, отримані за цією технологією, характеризуються високою однорідністю. Досконалість технологічного процесу дає змогу отримувати КНІ-структури завтовшки 10 нм з неоднорідністю товщини, меншою ніж $\pm 5\%$ [39].

4.4. Метод щільного з'єднання підкладок під час формування структур кремній-на-ізоляторі

Smart Cut – запатентована послідовність технологічних операцій (фірми Soitec, Франція) для створення технологічно складних пластин (рис. 4.7). Першу серію продуктів фірми Soitec називали Unibond – лінія КНІ-пластин, створених згідно з технологічним процесом Smart Cut [40].

Unibond належить до технологій “з’єднаних” матеріалів. Проте механічно-хімічне полірування та недоліки Unibond усунуто процесами Smart Cut. Основним фізичним явищем, яке використано в цій технології, є блістерінг. Це видимий макроскопічний ефект, давно відомий, що індукується високою дозою імплантації інертних газів чи іонів водню в матеріал. Цей макроскопічний ефект є результатом мікроскопічних ефектів, індукованих на глибині залягання часток. Мікроскопічні ефекти імплантації інертних газів чи водню такі: утворення мікропорожнин, мікробудуття, мікробульбашки. Ці мікропорожнини посилюють поширення міжпорожнинних тріщин, де їхня густина досягає порогу протікання. Це приводить до формування локальних кластерів, де всі мікропорожнини з’єднуються зоною розщеплення. Рушійна сила цього механізму – тиск газу в мікропорожнинах і напруження в шарі. Утворення пухирців призводить до того, що тонка плівка відщеплюється від вихідного матеріалу. Товщина плівки, по суті, дорівнює глибині проникнення часток газу.

Явище утворення пухирців, яке переважно спричинене високодозованою імплантацією (зазвичай близько $1,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$), за температури навколишнього середовища може також бути спричинене імплантацією з дозою близько $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ за допомогою

термічної активації за температури декілька сотень °С. Отже, основними операціями цього процесу є:

- імплантація атомів водню в пластину А (доза в діапазоні від $3,5 \times 10^{16}$ до 1×10^{17} см⁻²). Енергію імплантації можна підібрати згідно з вимогами до товщини поверхневого шару кремнію. В цьому разі пластина А є кремнієм, що покритий термічно вирошеним SiO₂;

- з'єднання поверхонь окиснених пластин з осадженим товстим оксидом або гідрофільним з'єднанням за кімнатної температури пластин А і В;

- розділення гарячою обробкою у дві фази двох з'єднаних пластин. Під час першої фази (400–600 °С) імплантовані атоми водню зростаються в мікробульбашки. Оскільки мікробульбашки розростаються, тиск всередині їх зростає доти, доки не розділить кремнієву пластину. Після розділення проводять високотемпературний відпал за температури 1100 °С впродовж двох годин для видалення силанолових груп з поверхні з'єднання;

- остаточне полірування поверхні для усунення мікрошорсткостей.

Після розділення використовують лише дуже тонкий (менший за 1 мкм) шар пластини А, а частину, що залишилася, використовують повторно для наступного з'єднання з новою пластиною В [7]. Цей процес демонструє декілька переваг порівняно з іншими процесами, які використовують для виготовлення КНІ-пластин. Імплантація забезпечує високий рівень однорідності поверхні верхнього кремнієвого шару з малою кількістю дефектів, низьку концентрацію дислокацій, відмінні електричні властивості та добру якість межі Si/SiO₂.

Під час операції з'єднання пластин зберігається якість об'ємного кремнію. Товщина термічно вирошеного прихованого оксиду може варіювати з високою точністю. Загальна товщина (кремнію та оксиду кремнію) пов'язана з енергією іонів через співвідношення між глибиною максимальної концентрації водню та енергією імплантації (приріст товщини близько 8 нм/кеВ в кремнії) без будь-яких ефектів дозування. Окрім того, ці операції сумісні з будь-якими розмірами пластин. Основні недоліки SmartCut КНІ-

технології такі: вирівнювання при з'єднанні, недостатня адгезія під час перенесення шару, термомеханічні напруження, які утворюються під час термічної обробки.

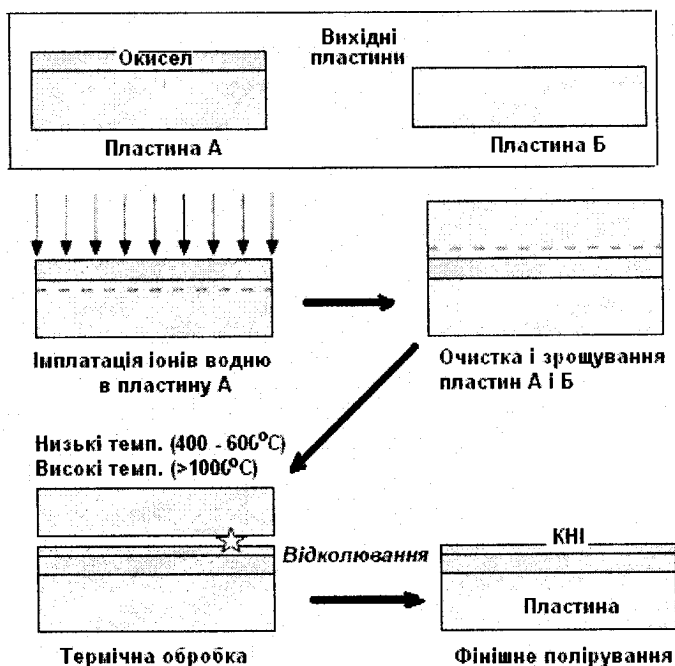


Рис. 4.7. Технологія виготовлення структур кремній-на-ізоляторі за методом Smart Cut

4.5. Рекристалізовані структури кремній-на-ізоляторі

Мікроелектронні прилади можна виготовляти у шарі полікремнію, осадженому на окиснених кремнієвих підкладках [41–43], проте присутність границь зерен приводить до низької рухливості носіїв заряду (порядку $10 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) і високої порогової напруги (декілька вольт). Границі зерен містять обірвані зв'язки, які є

пастками для носіїв заряду. При заповненні пасток утворюється потенційний бар'єр, який обмежує протікання носіїв заряду від витoku до стоку. Негативний вплив обірваних зв'язків можна зменшити, витримуючи підкладки у водневій плазмі. Під час такої обробки атоми водню проникають крізь границі зерен і насичують обірвані зв'язки, в результаті чого підвищується рухливість і зменшується порогова напруга. Однак, вимоги до якості матеріалу у разі застосування в ІС примушують шукати методи для покращення властивостей КНІ-структур з метою усунення границь зерен з кремнієвої плівки. Одним із таких перспективних методів є рекристалізація [44].

4.5.1. Метод зонної плавки

За методом рекристалізації полікремнієвого шару розплавленою зоною (рис. 4.8) по всій поверхні пластини (ZMR-zone melt recrystallization) на окиснену кремнієву пластину за LPCVD-технологією (Low pressure chemical vapor deposition) осаджують аморфну або полікремнієву плівку, після чого її рекристалізують переміщенням розплавленої зони полікремнію, яку утворюють від нагрітої до температури плавлення полікремнієвого шару 1420 °С вузькою смужкою за всім діаметром пластини графітовим нагрівачем, електронним, світловим або лазерним променем.

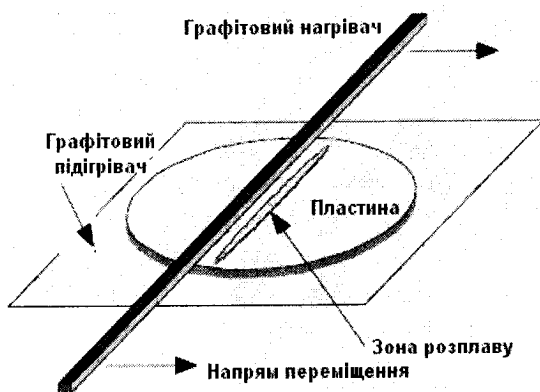


Рис. 4.8. Схематичне зображення методу ZMR

Під час зонної плавки пластину підігрівають до температури 1200 °С на графітовому підігрівачі. Висока температура підігрівання підкладки та імовірність її підплавлення в процесі рекристалізації є істотними недоліками цього методу.

Вперше проводити зонну рекристалізацію плівок переміщенням вузької зони розплаву вздовж плівки запропонував Лейтц [45]. Орієнтовний ріст у такій плівці забезпечувався тим, що спочатку в плівці утворювалися невеликі плями розплаву, які потім у міру руху зони розширяли її в смужку. Розплавлена зона створювалась випромінюванням тонкої нагрітої платинової дротини. Цей процес було використано для вирощування монокристалічних плівок люмінесцентних матеріалів на ізолювальних підкладках.

Раніше з'явилось багато публікацій про зонну плавку тонких плівок, переважно легких напівпровідників, таких як Ge [45, 46] і InSb [47]. У цих роботах, на відмінну від дослідів Лейтца, для створення розплавленої зони використовували переважно електронний промінь. Така техніка виявилась ефективною для створення сильних градієнтів температури, необхідних для керування комірковою структурою плівок і для отримання монофазних плівок сполук.

Це були перші дослідження, скеровані на отримання монокристалічних плівок на довільних (скляних, керамічних, графітових металічних та ін.) підкладках. До суттєвого успіху вони не привели, можливо через те, що тоді не було ефективних методів керування орієнтацією плівок, що росли. Але водночас було отримано важливі результати, котрі сприяли прогресу зонної плавки плівок.

По-перше, спостерігалось сильне збільшення розмірів зерен під час зонної плавки. Так, свіжо осаджені (до перекристалізації) плівки германію склалися з дрібних кристалітів з розмірами від 0,1 до 1 мкм (залежно від температури підкладки в процесі осадження). За плавлення і кристалізації розміри кристалітів збільшуються, і в процесі руху розплавленої зони вони діяли як зародок. У результаті геометричного відбору виживали лише грубі кристаліти з певною орієнтацією. Такий процес зображено на рис. 4.9.

Переважно в результаті одного проходження зони утворились кристаліти завширшки приблизно міліметр і завдовжки декілька

міліметрів і навіть порядку сантиметра. Ці кристаліти проростали на всю довжину плівки (переважно від 1 до 10 мкм), відповідно відношення лінійних розмірів кристалітів до їх товщини становило 10^2-10^3 , тобто, для зонної плавки плівок характерні утворення кристалітів пластинчастого типу.

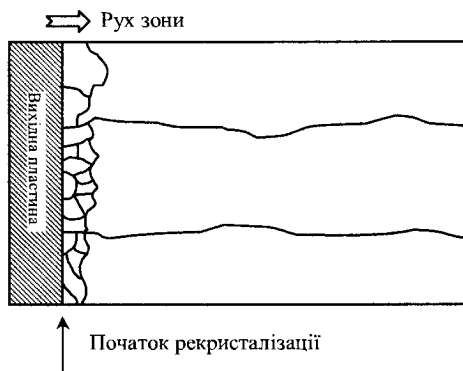


Рис. 4.9. Схематичне утворення великих кристалітів

Як було показано в [48], кристаліти германію з орієнтацією в площині плівки (111) росли в напрямку $\langle 112 \rangle$ вздовж руху зони. В роботах інших авторів із рекристалізації плівок германію також виявилась орієнтація (111), хоча деколи спостерігались плівки з орієнтацією (100). Такі переваги орієнтації (111) є для германію як матеріалу, що кристалізується в алмазній ґратці. Але в деяких роботах із зонною плавленням плівок кремнію (а також германію), покритих шаром SiO_2 , домінувала орієнтація (100).

Ця різниця пояснюється тим, що впродовж попередніх досліджень на плівках відсутні які-небудь покриття, і адгезія до підкладок була значно слабшою, ніж у кремнію до SiO_2 . Інакше кажучи, в цих експериментах по зонній плавці германію вільні енергії границь поділу ближчі до значень, характерних для германію в контакт з власною парою, що сприяє обмеженню площинами {111}.

Пінізотто [49, 50] одним із перших виявив субграниці в рекристалізованих плівках, запропонував модель утворення цих дефектів, зумовлених напруженнями, що розвиваються через розширен-

ня кремнію у разі твердіння крапельок, захоплених твердою матрицею (як відомо, під час твердіння кремнію його об'єм збільшується на 10 %). Внаслідок цих напруг виникають дислокації, які потім об'єднуються з утворенням субграниці. Безперечно, що в плівках можуть виникати напруги різної природи і від тих напруг можуть розвиватися різні дислокації – як поодинокі, так і у вигляді скупчень і смужок. Але така спрощена модель не може пояснити дуже важливі закономірності, наприклад, залежність ширини субзерен (тобто віддаль між субграницями) від швидкості руху зони, від термічних градієнтів, товщини плівок тощо. Окрім цього, в межах цієї моделі важко зрозуміти, чому субграниці доволі упорядковано розташовано, чому вони паралельні одна до однієї і віддаль між ними однакова.

Іншу модель утворення субграниці запропонували Геїс та ін. [51]. Ці автори за спеціальною методикою демаркації спостерігали пилкоподібний (комірчастий) фронт кристалізації, при чому субграниці у вирощених плівках закінчувались на внутрішніх або вхідних (“задніх”) кутах такого ограненого фронту. Взнявши за основу такі спостереження, вони запропонували модель, згідно з якою зародження нових кристалічних шарів відбувається в таких вхідних кутах (рис. 4.10), що тут виникають дислокації, з яких формуються субграниці. Ця модель вказує на закономірності утворення субграниці залежно від параметрів процесу кристалізації. Окрім того, результати кристалізації шарів з періодичним тепловим рельєфом (за відомого розподілу максимумів і мінімумів) свідчать, що зародження у цих внутрішніх кутах малоімовірне.

Правдоподібнішою є модель утворення субграниць, яку запропонували Лімі та ін. [52]. Ця модель пов'язує субграниці з комірчастою структурою, яка утворюється на фронті кристалізації. Інакше кажучи, субмежі в плівках, вирощені безпосередньо зонною плавкою, являють собою квазідвовимірний варіант комірчастої структури, яка характерна для масивних кристалів, вирощених напрямленим затвердінням розплаву (наприклад, за методом Бріджмена або Чохральського, зонною плавкою злитку та ін.). Загальну морфологію субграниць у плівках можна уявити, якщо розрізати монокристалічний злиток вздовж осі його росту на тонкі смужки.

Механізм утворення субграниць можна зрозуміти, згадавши механізм утворення комірчастої структури в масивних кристалах. А власне, субграниці утворюються в результаті нестійкості фронту кристалізації, які виникають внаслідок концентраційного переохолодження.

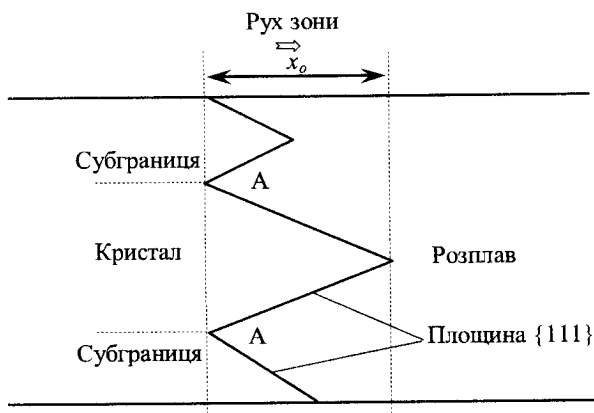


Рис. 4.10. Схема утворення субграниць за Гейсом [51]

Як відомо, концентраційне переохолодження під час кристалізації з розплаву виникає внаслідок нагромадження домішки перед фронтом кристалізації. Характеристики концентраційного переохолодження (наприклад, глибина x_0) залежать за певних однакових умов від швидкості росту кристала: що вища швидкість, то більше домішки нагромаджується перед фронтом і то більше переохолодження. Другий важливий параметр, що впливає на переохолодження, – це градієнт температури в розплаві: що більший градієнт, то менше переохолодження.

Тепловідведення від зони залежить від товщини перекристалізованої плівки (це полікремній) та ізолювального шару (це SiO_2). Що товстіша плівка полі-Si, то більша теплопровідність такої плівки і то менший в ній градієнт температури. Гейс [51] дослідив, що віддаль між субмежами за зонної плавки з графітовим нагрівачем збільшується із збільшенням товщини плівки полікремнію. Аналогічний результат отримав Тілак [53] при ЗП з використанням

лінійних (галогенних ламп): віддаль між субмежами збільшувалась приблизно від 10 до 80 мкм із зміною товщини плівки полі-Si від 0,5 до 10 мкм (швидкість руху зони при цьому становила 0,2 мм/с) або від 100 до 200 мкм при зміні товщини плівки від 4 до 10 мкм (для швидкості руху зони 1 мм/с). Автори роботи [54] зазначили, що із зміною товщини шару полі-Si від 0,5 до 50 мкм у зонній плавці з графітовим нагрівачем віддаль між субграницями збільшувалась приблизно від 10 до 150 мкм.

Було встановлено: якщо розплавлена зона переміщується вздовж смужкових затравок, то ріст без субграниць простягається на віддалі 30–50 мкм від затравкових вікон, за межами яких фронт кристалізації розбивається на комірки з утворенням субграниць. Цей факт пояснюють тим, що близько затравочних вікон виникають великі градієнти температури завдяки сильному тепловідведенню через ці вікна (як відомо, теплопровідність Si на порядок більша, ніж SiO₂). Градієнт температури в границях затравкових вікон становить $5 \cdot 10^3$ °C/см, а в зоні розплаву близько 10^3 °C/см [55]. Це значно більше, ніж критичне значення (близько 300 °C/см) розраховане для таких умов (див. рис. 4.10), звідси легко пояснити відсутність субграниць близько вікон.

Завершуючи розгляд утворення субграниць, зазначимо таке. Гейс [51], заперечуючи модель концентраційного переохолодження, вказує, що за швидкостей руху зони від 0,1 до 0,2 мм/с, переважно використаних в їх роботі, концентраційне переохолодження дуже мале, щоби бути істотним, але тим не менше субграниці утворювалися. Ці автори не враховують того, що субграниці можуть у принципі утворюватися за дії не лише концентраційного, але і звичайного (теплого) переохолодження [56]. В конкретному випадку зонної плавки кремнію за дії випромінювання спостерігається специфічне явище – зміна відбивальних властивостей зони, яка складається з кристалічної та рідкої фаз. Це явище призводить до виникнення на фронті кристалізації теплового переохолодження.

Шари кремнію за зонної плавки ростуть так, що напрямок {100} паралельний до напрямку руху зони. Так, діагоналі квадратів – фігур анізотропного травлення плівки (100) – збігаються з

напрямок руху зони [51]. Отже, фронт кристалізації обмежений щільноупакованими площинами $\{111\}$, що дуже повільно ростуть. Така структура підтверджується як прямими спостереженнями за процесом кристалізації, так і результатами молекулярно-динамічного моделювання процесу. Істотно, що за такої конфігурації фронту кристалізації грані $\{111\}$ утворюють з підкладкою або із захисним покриттям деякий вхідний кут (в ідеальному випадку 55°) – це полегшує зародження нових кристалічних шарів. Обидві точки зародження шарів – виступи і вхідні кути фронту кристалізації – приблизно еквівалентні та сприяють росту кристалів.

Чому утворюються субграниці? Для того, щоб відповісти на це запитання, необхідно конкретизувати механізми виникнення і розвитку субграниць, а також пов'язаних з ними недосконалостей за зонної плавки шарів кремнію. Модель концентраційного переохолодження дасть змогу конкретизувати: основна особливість цієї моделі – нагромадження домішок на границях комірок та їх захоплення шаром кремнію, що кристалізується. Надалі ці домішки зумовлюють напругу в кристалічній ґратці, і якщо температурні умови, в яких перебуває ґратка, допускають її пластичну деформацію, то напруга релаксує з утворенням недовершеності – дислокацій, субмеж, мікродвійників тощо.

Вище згадували модель Пінізотто, в якій розглядався випадок напруг, спричинених захопленням крапельок кремнію. В інших роботах також звертались до напруг, що виникають у плівках (внаслідок наявних там градієнтів температури), що приводять до утворення субграниць та інших недосконалостей. Переважно формується структура шарів кремнію під час зонної плавки поблизу точки плавлення кристалізуючого матеріалу (а у разі кремнію здатність до пластичної деформації зберігається навіть за 500°C), тому механізм утворення недосконалостей за допомогою механічних напруг може бути чинним.

Зробимо деякі зауваження про розміри і морфологію кристалітів. Переважно вони мають подовжену прямокутну форму. В типовому разі (0,5 мкм плівка Si на теплоізолювальній підкладці) ширина кристаліту в площині плівки приблизно 3 мкм. Часто це не

окремі кристаліти, а їхні комбінації доволі складної форми з багатьма згинами, стиками і т. д. [57, 58]. Важливо, що згини утворюють кути 90° , вказуючи на основну орієнтацію $\{100\}$ для тонких плівок (завтовшки приблизно 1 мкм). Щоб пояснити таку орієнтацію, Бігелсен [58] провів нескладний термодинамічний аналіз стану кристаліту Si, що знаходиться в контакті з підкладкою SiO_2 (а також із захисною плівкою SiO_2) і дійшли висновку, що така орієнтація визначається анізотропією вільної енергії границі Si – SiO_2 , причому ця енергія мінімальна для граней $\{100\}$ в зв'язку з орієнтацією і текстурами в таких плівках.

Орієнтації і текстури в шарах кремнію, сформованих зонною плавкою. Вищевикладене характерне переважно для зони розплаву. Якщо зони переміщуються вздовж шару кремнію, то картина істотно змінюється, і ця динамічна поведінка визначає структуру вищого шару – її орієнтацію або текстуру.

Дані експериментів за зонною плавкою тонких плівок на аморфних підкладках за відсутності будь-яких керівних факторів (таких, як топографічний або тепловий рельєф) вказують на те, що рекристалізовані шари кремнію мають переважно орієнтацію (100), див. [51, 52, 57]. На перший погляд це дивно, оскільки кремній як матеріал, що кристалізується в ґратці алмазу, має обмежуватися переважно площинами $\{111\}$, і перші досліди із штучної епітаксії кремнію показали, що це насправді так [39].

Ці розбіжності стають зрозумілими, якщо врахувати різні умови початкових експериментів із штучної епітаксії і експериментів із зонною плавкою шарів кремнію. В першому випадку одна з поверхонь плівки, що росте, вільна (контактує із власною парою або із паровою фазою), відповідно, переважно розвиватимуться грані $\{111\}$, що характеризуються мінімальною вільною енергією. В другому випадку під час зонного плавлення переважно завжди використовують захисні покриття, щоби запобігти розбиттю рідкої плівки на крапельки. Якщо рекристалізуюча плівка достатньо тонка (а це найтипівіший випадок), то утворені в процесі зонного плавлення кристаліти контактують з тим покриттям або з підкладкою, причому і покриття, і підкладка являють собою SiO_2 . В

дослідах Бігелсена [58] за товщини плівки в межах 0,5 мкм кристаліти Si в розплаві Si були завширшки близько 3 мкм. Оскільки Si належить до кристалів з кубічною ґраткою, його рівноважна форма (як і форма росту) приблизно ізометрична, відповідно, товщина кристаліту повинна становити близько 3 мкм. Але товщина плівки значно менша, тому кристаліт (найімовірніше кубооктаедр) виявляється затисненим між двома взаємно паралельними поверхнями (підкладка і покриття), тобто кожен має пластинчасту, а не ізотермічну форму. Як зазначалось вище, поверхня поділу (100) Si/SiO₂, за оцінкою Бігелсена, характеризується найменшою вільною енергією, відповідно, найбільш розвинені грані пластинчастих кристалітів, які контактують із покриттям і підкладкою, повинні бути гранями {100}. Якщо це так, можна зробити деякі висновки стосовно бокових граней кристалітів. Як показав Воронков [59], вільні енергії граней {111} і {100} кремнію контактують з власним розплавом у точці плавлення і становлять відповідно 300 і 315 ерг/см², тобто приблизно однакові. В цьому разі розвиватимуться переважно ті бокові грані, площі яких менші, тобто грані {100}. Це підтверджується експериментами: за зонного плавлення шарів кремнію вони ростуть так, що бокові грані {100} кристалітів паралельні до напрямку руху зони.

Проведений вище аналіз домінуючої орієнтації оснований на термодинамічних уявленнях. Кінетичні фактори також сприяють утворенню під час зонного плавлення плівок Si з орієнтацією (100). В цьому аспекті важливу роль виконує перехідна область, де кристаліти, які існують в розплаві, дають початок росту шару кремнію. Було запропоновано, що в полікристалічній плівці Si, призначеній для зонного плавлення, спочатку плавляться кристаліти з орієнтаціями, що відрізняються від (100), тобто в частково розплавленій зоні зберігаються в основному (або винятково) кристаліти з орієнтацією (100). Фізична причина виживання таких кристалітів з орієнтацією (100) поки залишається невідомою, і експериментальні дані вказують, що це насправді так. Якщо тепер розплавлену зону переміщати вздовж плівки, то наявні в перехідній області кристаліти (100) стають зародками і, розвиваючись, визначають орієнтацію

плівки, що росте. Крім того, було показано: якщо поруч з кристалітом-зародком з орієнтацією (111), виникаючої від монокристала-підкладки з орієнтацією (111) крізь отвір в оксидному шарі (як за бокової епітаксії), і обидва ці кристаліти контактують з одним і тим самим розплавом, то ріст від кристаліту (100) придушує ріст від кристаліту (111).

4.5.2. Мікрозонна лазерна рекристалізація полікремнію в структурах кремній-на-ізоляторі

За використання імпульсного лазера процес рекристалізації полікремнію розпочинається в області затравки кремній-полікремній у проміжках між завчасно сформованими острівками SiO_2 (рис. 4.11) і перебігає в напрямку градієнта температур, що виникає після опромінювання між острівками SiO_2 . В результаті утворюється плівка монокристалічного кремнію на відстані 1–2 мкм від країв оксиду.

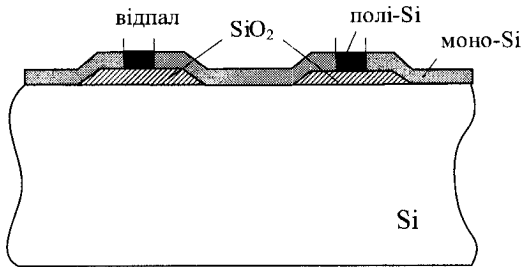


Рис. 4.11. Поперечний переріз КНІ-структури, отриманої за допомогою імпульсного лазерного відпалу [60]

Для отримання великих областей монокристалічного кремнію використовувати імпульсні лазери недоцільно, тому основну увагу дослідники спрямовують на подальше вдосконалення методу рекристалізації за допомогою сканувальних неперервних лазерів [61]. Однак кремнієві плівки не можна безпосередньо нагріти такими лазерами через проблему капсулювання і випаровування кремнію.

Тому полікремнієві плівки покривають SiO_2 і рекристалізують непрямим нагріванням CO_2 -лазером [62]. Такий лазер має перевагу за вихідною потужністю (> 100 Вт) і дає широкий промінь у вигляді еліпсу. Але маніпуляції з таким променем складні, оскільки CO_2 -інфрачервоне випромінювання шкідливе для людських очей. CO_2 -лазер також є непрактичним для створення тривимірних інтегрованих схем, оскільки в цьому разі необхідно прогрівати лише поверхню кремнію.

З іншого боку, неперервний Ar -лазер випромінює дві основні спектральні лінії за $\lambda = 488,0$ нм (голуба) і $\lambda = 541,5$ нм (зелена) і може досягти вихідної потужності 25 Вт. До того ж коефіцієнт відбивання Si для таких довжин хвиль різко зростає під час його плавлення. Цей ефект дуже вигідний, оскільки діє як від'ємний зворотний зв'язок на потужність поглинання і захищає кремній від перегрівання вище точки плавлення. Таке "напівобмежене" поглинання збільшує гнучкість процесу рекристалізації. В результаті цієї переваги основні експерименти із одержання КНІ за допомогою лазерної рекристалізації проводять із застосуванням Ar -лазера.

Затравки. Полікремнієві плівки, рекристалізовані на аморфних (SiO_2) поверхнях підкладок, мають зазвичай хаотичну кристалічну орієнтацію. Рентгенівська дифракція таких шлівок показала наявність кристалітів з орієнтаціями (111), (220), (311), (400), (331), (110) і (100) [63], що дають різні швидкості росту підзатворного діелектрика, а, отже, істотно погіршують якість МОН приладів. Ідеальною є однорідна орієнтація (100) всіх кристалітів. Для цього в ізоляторі відкривають вікна для затравкових областей, створюючи так контакт між кремнієвою підкладкою і полікремнієвим шаром. За бокової епітаксії рекристалізований кремній також має орієнтацію (100). Однак, така орієнтація може простягатися менше ніж на 100 мкм від затравки, згодом з'являються дефекти, зумовлені втратою орієнтації (100).

Захисні покриття для рекристалізації. Як зазначено вище, для непрямого нагрівання при рекристалізації і захисту від випаровування полікремнієву плівку покривають шаром SiO_2 або Si_3N_4 . Проте SiO_2 -покриття є надто м'яким, щоб запобігти утворенню

хвилеподібної поверхні. З іншого боку, з використанням Si_3N_4 -покриття азот мігрує у напрямі прихованого шару ізолятора і утворює велику густину станів на межі поділу [63, 64].

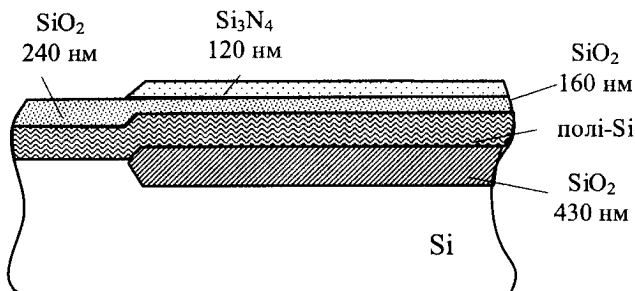


Рис. 4.12. Поперечний переріз зразка КНІ-структури з локально змінюваною товщиною антивідбивального покриття

Найкращих результатів одержують за комбінування SiO_2 і Si_3N_4 , причому товщини цих плівок вибирають такими, щоб максимальне оптичне відбивання було на ділянці ізолювального оксиду, а мінімальне – в місцях затравки. Для цього полікремнієву поверхню КНІ-матеріалу термічно окиснюють для отримання SiO_2 завтовшки ~ 160 мкм. Потім у локальних місцях осаджують плівку Si_3N_4 і пластини додатково підкиснюють до ≈ 240 нм (рис. 4.12). У такій структурі 95 % падаючої потужності досягає полі-Si на затравці та лише 50 % потрапляє на ділянки, що не містять затравок.

Здійснюючи контроль за ефективністю поглинання опромінюваною структурою за допомогою антивідбивальних покриттів, можна керувати температурним профілем процесу [42, 43] (рис. 4.13). Крім того, застосування антивідбивальних покриттів запобігає розтіканню розплавленого матеріалу, яке негативно впливає на орієнтації плівки.

Схематичний вигляд структури з використанням у процесі рекристалізації антивідбивального покриття для створення заданого просторового розподілу температури в шарі полікремнію наведено на рис. 4.13.

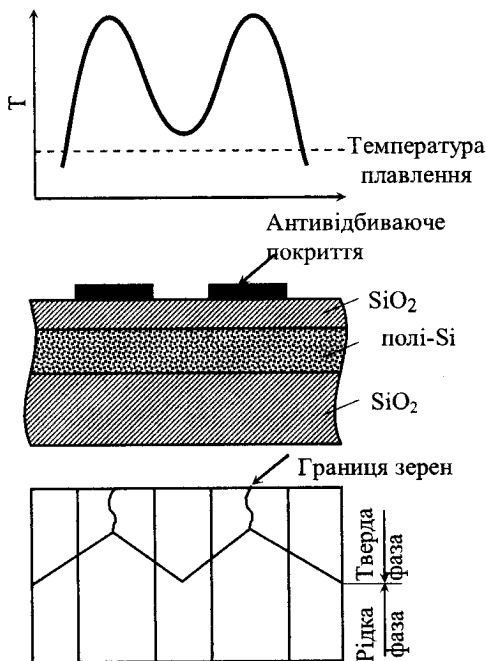


Рис. 4.13. Модуляція температурного профілю в зоні розплаву в процесі рекристалізації полікремнієвого шару на діелектричних підкладках за наявності антивідбивального покриття [41]

Для утворення зони розплаву в роботі [41] використовували ІАГ: Nd⁺-лазер неперервної дії з гауссовим розподілом потужності випромінювання. Під час сканування вздовж смуг Si_3N_4 лазерний промінь створював періодичний тепловий профіль, який локально підвищував температуру в шарі полікремнію, розміщеного під смугами. Зародкоутворення кристалів починалося в ділянках шару полікремнію з мінімальною температурою, тобто, між Si_3N_4 . Фронт кристалізації поширювався від цих ділянок до областей полікремнію з вищою температурою, що лежали під смугами. Під час зустрічі фронтів кристалізації утворювалися субграниці зерен, для яких характерним є як нагромадження домішок, відтиснутих зростаю-

чими кристалітами, так і мала флуктуація орієнтації кристалітів на суміжних ділянках. Через наявність періодичного температурного профілю виникнення субграниць в цьому разі не має випадкового характеру, оскільки вони зазвичай локалізуються в областях розташування максимумів теплового профілю, і їх місцезнаходження, а також розміщення границь зерен можна наперед задати топологією схеми. За допомогою цього методу можна отримувати монокристалічні області розміром порядку 20×400 мкм. Інший метод отримання повністю монокристалічного кремнію на SiO_2 [65, 66] ґрунтується на різниці теплопровідності тонких і товстих ділянок захованої плівки SiO_2 (рис. 4.14, а). Встановлено, що найкращим є результат, коли різниця товщини шарів становить 350–500 нм. У такій структурі завдяки ввігнутому профілю температури ріст монокремнію відбувається від центральної області до периферії (навіть за великої потужності опромінювання), оскільки в центрі ефективніше розсіювання тепла.

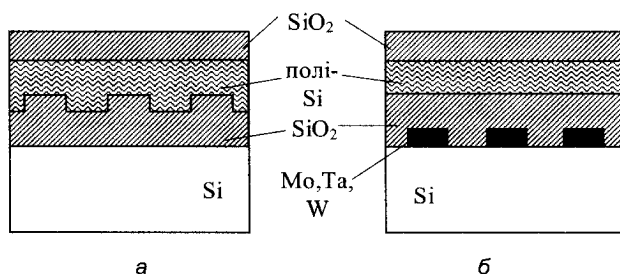


Рис. 4.14. Локальна зміна характеристик тепловіддачі внаслідок зміни товщини прихованого оксиду (а), застосування смужок тугоплавкого металу (б)

У структурі, зображеній на рис. 4.14, б, створення періодичного температурного профілю в розплавленій зоні забезпечується підвищенням ефективності дії лазерного випромінювання за допомогою смужок тугоплавкого металу (тантал, молібден, вольфрам). Такий метод ефективний за використання ІЧ-лазерного випромінювання, яке не повністю поглинається тонким шаром полікремнію. У цьому разі непоглинута частина випромінювання від-

бивається від межі поділу кремній – метал і знову направляється в розплав, де остаточно поглинається. В результаті цього над металевими смужками відбувається локальне підвищення температури.

Проаналізувавши технологічні аспекти створення сучасних структур кремній-на-ізоляторі для створення елементної бази давачів та мікросистем, можна говорити, що до комерційних технологій належать SIMOX, ELTRAN, SmartCut, Unibond, BESOI. У цих технологіях формування КНІ-структур пов'язане насамперед із порушеннями поверхні та кристалічної досконалості вихідної кремнієвої пластини високодозовим та високоенергетичним легуванням іонами кисню з подальшою оптимізацією сформованого КНІ-приладного шару (SIMOX), “розумним” сколом після водневого легування тонкого шару кремнію з однієї пластини і перенесенням на іншу (ELTRAN, SmartCut), з'єднання окиснених пластин і зошліфовування та полірування однієї з них (BESOI, ICEMOS), рекристалізацією полікремнієвого шару ZMR по всій поверхні пластини, що передбачає комплекс необхідних оптимізацій для забезпечення монокристалічної активної плівки. Отже, ці методи можна вважати універсальними з погляду виробника, однак вони є дорогими, складними, окремими технологіями, які у вітчизняній промисловості не були освоєні, вимагають спеціального технологічного обладнання і спрямовані на однотипні приладні елементи зінтегрованих схем або сенсорів. Висока вартість таких пластин через складність КНІ-технології є серйозним стримувальним фактором їх поширення.

Водночас метод мікрозонної лазерної рекристалізації є відносно доступним і дешевим, і з цього погляду придатним, зокрема наукових і експериментальних досліджень. Цей метод є багатобічним для створення багатошарових і тривимірних елементів інтегрованих схем та мікросистем. Враховуючи той факт, що в реальних інтегрованих схемах активні площі елементів є суттєво меншими за площі кристалів, за таким методом було б доцільно формувати локальні високоякісні КНІ-структури в місцях активних приладних елементів, а ділянки рекристалізованого полікремнію з більшою дефектністю відводити для міжприладних ізоляційних областей або локалізації дефектів.

Отже, результати розгляду методів створення структур кремній-на-ізоляторі підтверджують, що лазерна рекристалізація – один із найперспективніших методів створення структур кремній-на-ізоляторі для застосування в давачах фізичних величин. Із зменшенням кількості дефектів структури за лазерної рекристалізації вихідного полікремнію можна значно підвищити рухливість носіїв заряду в шарі, що робить можливим створення на основі КНІ-структур мікроелектронних приладів з високою швидкодією, підвищеним ступенем інтеграції та радіаційної стійкості, а також створити інтегровані схеми з тривимірною інтеграцією елементів для обробки сигналів у пристроях мікро- та наносистемної техніки.

Контрольні питання

1. Які методи використовують для створення структур кремній-на-ізоляторі?
2. Що являє собою технологія SIMOX?
3. Охарактеризуйте технологічні методи ELTRAN.
4. Які особливості технології SmartCut?
5. Що являє собою технологія Unibond, BESOI?
6. Яке обладнання забезпечує процеси осадження полікристалічного кремнію?
7. Які переваги мають плазмохімічні методи осадження плівок?
8. Які процеси використовують для осадження полікристалічного кремнію?
9. Як впливають режими осадження на структуру осаджених плівок кремнію?
10. Які є методи легування полікристалічного кремнію і як впливає структура осадженого матеріалу на його провідність?
11. Яка мета вирощування полікристалічних епітаксійних шарів; які основні переваги епітаксійних шарів відносно матеріалу підкладки?
12. Як поділяють епітаксійні процеси за природою взаємодії епітаксійний шар – підкладка; за хімічним складом вихідної фази; за агрегатним станом вихідної фази?
13. Які критерії вибору температури для проведення процесу епітаксії полікремнію?
14. Які процеси впливають на профіль концентрації домішки за рекристалізації полікремнієвих епітаксійних шарів?
15. Чим зумовлена поява дефектів у епітаксійних шарах?

Розділ 5

ІОННА ІМПЛАНТАЦІЯ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗІНТЕГРОВАНИХ СХЕМ

Іонною імплантацією називають процес впровадження мішень іонізованих атомів з енергією, достатньою для проникнення в її приповерхневі області. Іонне легування – поширений метод, що є альтернативою дифузії [67, 68]. Застосовують у тих випадках, коли концентрацію домішки необхідно отримати на глибині, меншій за 1 мкм. Процес містить іонізацію атомів домішки та їх прискорення до високих енергій в електричному полі.

Переваги процесу:

- універсальність, тобто введення будь-якої домішки;
- низькотемпературність порівняно з дифузією;
- можливість гнучкого керування розподілом домішки зміною енергії іонів;
- можливість строго керувати дозою домішки (точний контроль густини іонізованого пучка і часу опромінення);
- чистота впроваджуваної домішки (електромагнітна сепарація і вакуумні умови);
- висока однорідність і відтворюваність результатів через діелектричні та металеві покриття.

Недоліки процесу:

- на шляху іона до його зупинки виникають пошкодження кристалічної ґратки, які усувають відпалом при $T = 450\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- обладнання є громіздким, складним і дорогим.

Більшість впроваджених іонів знаходяться в міжвузлях, де вони не є електрично активними. Для переведення їх у вузли і відновлення кристалічної ґратки проводять відпал, при чому відбуваються розпад і анігіляція радіаційних дефектів (ефект за Фенкелем – вакансія і міжвузловий атом), а впроваджені атоми займають вакантні вузли.

Найчастіше впроваджують за цим методом іони бору, фосфору, миш'яку, оскільки вони за кімнатної температури не є газами. Для отримання іонів бору використовують (BF_3BCl_3) ; (PH_3PF_3) ; (AsH_3AsF_3) .

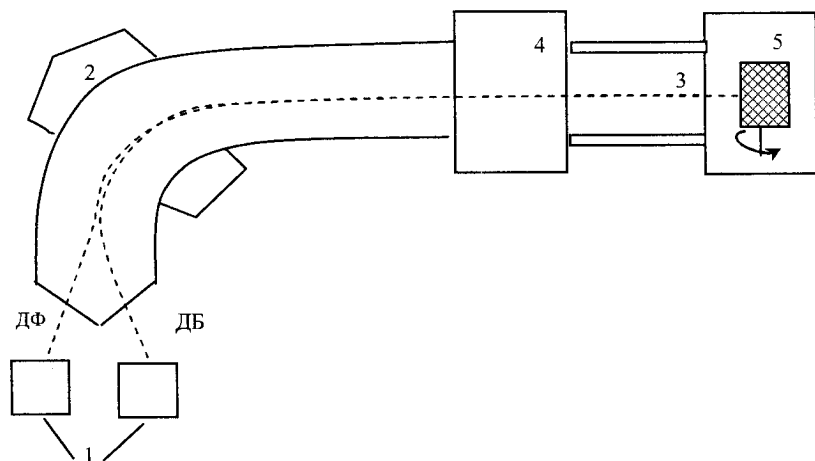


Рис. 5.1. Схематичне зображення установки для іонного впровадження, що складається з джерела іонів (1), магнітного мас-аналізатора, який віддаляє небажані іони від пучка (2), прискорювача іонів (3), системи фокусування (4), мішені (5)

Особливістю цієї структурної схеми є мас-аналізатор (іонний сепаратор). Він призначений для розділення пучка іонів відповідно до їхньої маси і заряду, оскільки за дії сили Лоренца в області дії магнітного поля сепаратора іони рухаються круговими траєкторіями, радіуси яких залежать від їхньої маси:

$$R = \frac{1}{B} \left(\frac{2M_1 U}{g} \right),$$

де B – індукція магнітного поля; U – прискорювальна напруга; g – заряд іона; M_1 – маса іона.

Тобто сепарування іонів зумовлює високу частоту легування. У вакуумній системі підтримується тиск: $5 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Кількість іонів на одиницю площі називають іонною дозою Q . Вона є в інтервалі 10^{11} до 10^{16} ат/см²:

$$Q = \frac{It}{gA},$$

де $g = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл для одновалентних іонів; I – струм пучка; t – час опромінення; A – площа перерізу пучка.

Проведенням процесу з величиною струму іонного пучка в декілька міліамперів протягом 100 с отримують концентрацію легувальної домішки $10^{20} - 10^{21}$ см⁻³, що відповідає межі розчинності домішок у кремнії.

5.1. Пробіги іонів під час іонного впровадження домішки. Основні поняття теорії Ліндхарда – Шарфа – Шіотта

Загальну траєкторію руху іона називають довжиною пробігу R , а відстань, яку проходить впроваджувальний іон до повної зупинки в напрямку, перпендикулярному до поверхні мішені, проєктованою довжиною пробігу R_p . Кількість зіткнень, яку зазнають впроваджені іони, на певній ділянці траєкторії в мішені, статично є різною, тому різною є проєктована довжина пробігу окремих іонів до зупинки. Флукутації, або розсіяння величини проєктованого пробігу позначимо через ΔR_p . Розподіл концентрації іонів визначають проєкцією повної довжини пробігу R_p та її нормальним розсіюванням ΔR_p . Для обчислення цих величин необхідно знати механізми втрати енергії впроваджувальними іонами; втрати енергії відбуваються за взаємодії:

- 1) іон – електрон мішені;
- 2) іон – ядро атома мішені.

При визначенні середньої довжини пробігу вважають, що ці два механізми діють одночасно і незалежно:

$$R(E) = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)},$$

де $S_n(E)$ і $S_e(E)$ – ядерна та електронна гальмівна здатність; N – густина атомів мішені; E_0 – початкова енергія іона.

Це рівняння описує теорію Ліндхарда – Шарфа – Шіотта. За різних припущень розв'язання задачі розрахунку спрощується, якщо перейти до безрозмірних величин:

$\rho = RL$ – приведена довжина пробігу;

$\varepsilon = FE$ – приведена енергія.

Для визначення довжини пробігу:

$L = \pi a^2 J N [cm^{-1}]$ – нормувальний множник пробігу;

N – власна концентрація мішені;

$a = \frac{4,7 \cdot 10^9}{(z_1^2 + z_2^2)^{1/2}} [cm]$ – радіус екранування заряду ядра атомними

електронами;

z_1 – заряд ядра іона; z_2 – заряд ядра атома мішені;

$J = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)}$ – коефіцієнт передавання максимальної

енергії від іона масою M_1 до атома M_2 .

Для визначення енергії:

$F = \frac{6,9 \cdot 10^6 a M_2}{z_1 z_2 (M_1 + M_2)}$ – нормувальний множник енергії [1/eV].

Зв'язок між безрозмірними величинами ε і ρ описують виразом

$$\rho = \frac{2}{k} \varepsilon^2 \left(1 + \frac{\varepsilon k}{3\beta} \right) - \frac{2c/k}{k\sqrt{c/k+d}} \arctg \sqrt{\frac{\varepsilon}{c/k+d}},$$

де $k = 2.47 \cdot 10^{11} z_1^2 \sqrt{\frac{z_2}{M_2} \left[a^2 \left(1 + \frac{M_2}{M_1} \right)^2 \right]}$ – коефіцієнт, який враховує

гальмування іона внаслідок електронної взаємодії; $\beta = 6,16 \cdot 10^3 z_2 M_1 F$.

Значення c і d враховують гальмування іона завдяки ядерній взаємодії і вибирають $c = 0,45$ і $d = 0,3$ для $(0,1 < \varepsilon < 7,5)$; $c = 0,23$, $d = 0,1$ ($0,003 < \varepsilon < 0,1$); $c = 0,32$, $d = -2,45$ ($7,5 < \varepsilon < 40$).

Зв'язок між повною довжиною пробігу R і проектованою довжиною пробігу R_p виражають співвідношенням

$$R_p = fR,$$

де $f = \left(1 + \frac{1}{3} \frac{M_2}{M_1} \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon}} \right)^{-1}$ – корегувальна поправка, зумовлена

пружним розсіюванням іона; $\varepsilon_n = \frac{c}{k} \ln \left(1 + \frac{\varepsilon}{c/k+d} \right)$ – повна енергія, затрачена на пружне розсіяння іона.

Нормальне розсіяння ΔR_p пов'язане з проекцією повної довжини пробігу R_p співвідношенням

$$\Delta R_p = R_p \sqrt{\frac{\rho}{g\varepsilon} (\gamma + \mu) S_n(\varepsilon)},$$

де $\mu = \frac{M_2}{M_1}$.

Ядерна гальмівна здатність $S_n(\varepsilon)$ в теорії ЛШШ не має аналітичної форми і може бути апроксимованою залежно від енергії

$$S_n(\varepsilon) = \frac{c\varepsilon^{\frac{1}{2}}}{d + \varepsilon}, \varepsilon \leq 10; S_n(\varepsilon) = \frac{\ln(1,29\varepsilon)}{2\varepsilon}, \varepsilon \geq 10.$$

Таблиця 5.1

Тип іонів	Енергія, кеВ									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
В R_p	714				3275					5588
В ΔR_p	276				726					1004
Р R_p	255				1228					2514
Р ΔR_p	90				350					603

5.2. Профілі розподілу концентрації впроваджених іонів

Розподіл, або профіль іонів за глибиною можна оцінити за допомогою симетричної функції розподілу Гаусса (рис. 5.2).

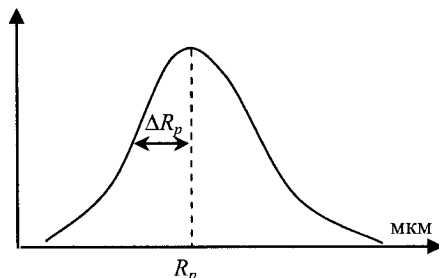


Рис. 5.2. Розподіл іонів за глибиною під час іонного впровадження домішки

Концентрацію впроваджених іонів залежно від глибини визначають за виразом

$$C(x) = C_{\max} \exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right],$$

де C_{\max} – максимальна концентрація впроваджених іонів, що відповідає концентрації на відстані $x=R_p$; ΔR_p – середньоквадратичне відхилення.

Максимальну концентрацію можна визначити за дозою імплантації Q

$$C_{\max} = \frac{Q}{\sqrt{d\pi} \cdot \Delta R_p}.$$

Максимальна концентрація домішки (за відмінності від випадку введення за методом дифузії) залягає не на поверхні, а на глибині, що дорівнює середньому нормальному пробігу $x = R_p$.

Глибину залягання p - n -переходу визначають за умови:

$$Cx = CB$$

$$x_j = R_p + \Delta R_p \cdot L,$$

де

$$L = \left(2 \ln \frac{Q}{\sqrt{\pi \Delta R_p C_B}} \right)^{1/2}.$$

Поверхнева концентрація за іонного легування C_o

$$C_o = C_{\max} \exp \left[-\frac{R_p^2}{2 \cdot \Delta R_p^2} \right].$$

Оскільки максимум концентрації домішки залягає в глибині під поверхневим шаром, то можливе одночасне утворення двох p - n -переходів, розміщених на різній глибині у підкладці. Середній пробіг іонів з енергією 100 кеВ – 0,1 мкм, тобто домішка зосереджується в дуже тонкому приповерхневому шарі.

Особливості пробігів іонів у монокристалах

Експериментально доведено, що у монокристалічних підкладках пробіги іонів сильно залежать від орієнтації кристала відносно руху іона і можуть бути значно більшими, ніж у тій самій речовині з аморфною структурою внаслідок ефекту каналювання. Під каналюванням розуміють явище, за якого траєкторія руху частинок, які проходять поблизу середини міжвузлових просторів вздовж головних осей кристала – каналів, може мати певну стабільність протягом всього пробігу. Розрізняють міжосьове і міжплощинне каналювання. Міжосьове – рух вздовж атомних рядів по осі кристала; міжплощинне – рух вздовж атомних площин. Вздовж каналу кути зіткнень не перевищують 1–5°, при цьому атомні ряди діють як фокусувальні лінзи. Найбільший кут, за якого іон залишає канал – критичний кут каналювання:

$$\phi_{\text{крит}} = \left(\frac{2z_1 z_2 \sigma^2}{E d_a} \right)^{1/2},$$

де d_a – відстань між сусідніми атомами у ряді; для $P_{50 \text{ кеВ}} - \phi_{\text{крит}} = 5,9^\circ$, для $B_{50 \text{ кеВ}} - \phi_{\text{крит}} = 4,8^\circ$.

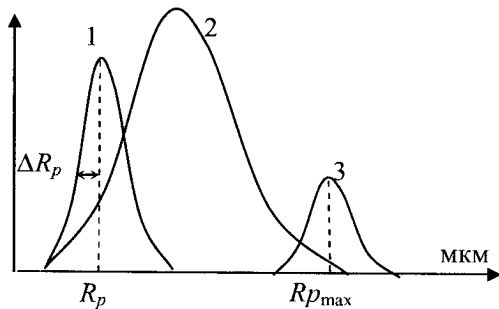


Рис. 5.3. Розподіл іонів за глибиною під час іонного впровадження домішки: крива 1 зумовлена розсіюванням на атомах ґратки; крива 2 є наслідком виходу іонів з каналу – деканалювання під впливом розсіювання на недосконалості ґратки; крива 3 – іони прийшли в канал

Зі збільшенням дози і маси імплантованих іонів температура відпалу збільшується, оскільки в структурах накопичується більша кількість радіаційних дефектів, здатних об'єднуватись в потужні кластери і перешкоджати процесу кристалізації.

5.3. Відпал легованих шарів при іонному впровадженні домішки

За технологією інтегрованих схем отримали дві групи процесів іонної імплантації: імплантація для безпосереднього створення структури та імплантація як стадія загонки для подальшої дифузійної розгонки з метою реалізації необхідної структури. У першому випадку проводять відпал, завданням якого є усунення радіаційних порушень і забезпечення електричної активації домішкових атомів.

Домішкові атоми можуть займати положення впровадження або заміщення (в останньому випадку вони є електрично активними і впливають на провідність).

Під час відпалу (збільшення температури) рухливість дефектів зростає, і кристалічна ґратка повертається до впорядкованого стану,

оскільки вакансії і міжвузлові атоми рекомбінують. Більша частина дефектів відпалюється за $T < 600$ °С. Виділяють два режими відпалу:

– доза опромінення є малою $T < 260$ °С (кластери порушень не перекриваються). Відпал у цьому разі супроводжується вивільненням вакансії із кластерів і утворенням нових дефектів (вакансія – домішка); доза опромінення є великою $T > 570$ °С. Відпал є епітаксійною твердофазною рекристалізацією аморфного шару, де роль затравки виконує монокристалічна підкладка.

Поверхнева концентрація за іонного впровадження:

$$C_o = C_{\max} \exp \left[-\frac{R_p^2}{2\Delta R_p^2} \right].$$

Оскільки максимум концентрації домішки залягає в глибині під приповерхневим шаром, то можливе одночасне утворення двох $p-n$ -переходів, розміщених на різній глибині в підкладці.

Утворення радіаційних дефектів

Процес іонної імплантації супроводжується виникненням радіаційних дефектів. Водночас із найпростішими точковими дефектами Френкеля можуть утворюватися складніші у вигляді комплексів точкових дефектів, лінійні й площинні дефекти (дислокації, дефекти пакування). Іони, рухаючись у кристалічній ґратці, зіштовхуються з атомами, залишають слід від зміщених атомів:

$$\text{Кількість зміщених атомів} - N(E) = E_o / (2E_d),$$

де E_o – енергія іона; E_d – ефективна порогова енергія зміщення атомів. Розподіл домішок і вакансій зображено на рис. 5.4.

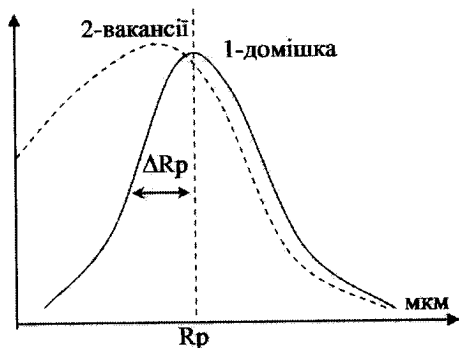


Рис. 5.4. Розподіл домішок і вакансій за глибиною під час іонного впровадження домішки

Виникнення під час бомбардування іонами двох просторово-розділених областей з високою концентрацією радіаційних дефектів і високою концентрацією домішки спричинене відокремленням від поверхні зразка високоомним аморфним шаром. Подальший відпал такої структури призводить до зміщення профілю домішки в бік до поверхні через дифузію імплантованих атомів в область з найбільшою концентрацією вакансій. Процеси рекристалізації починаються за температури 870–970 К.

Межа між поняттям “відпал” та “дифузія” виникає за температури 1000 °С. У разі нижчої температури дифузійними процесами можна знехтувати. Перехід впроваджуваних атомів у вузли кристалічної ґратки, де вони проявляють донорні або акцепторні властивості, для більшості легуючих домішок починається за температури 300 °С. За температури 400–500 °С наявність кластерів та неповне відновлення ґратки визначають низьке значення рухливості носіїв заряду та сильну температурну залежність концентрації донорів і акцепторів у імплантованому шарі. Якщо впровадження відбувалось великими дозами (приповерхневий шар став аморфним), то за 500–600 °С відбувається різке зростання носіїв заряду. Відпал у цьому діапазоні крім усунення радіаційних дефектів ґратки сприяє зменшенню відмінності між фізичним і електрично активним профілями розподілу концентрації домішки. Із зростанням температури відношення прямує до 1, що свідчить про перехід атомів домішки із стану впровадження у стан заміщення. Електричну активність легованого іонами шару оцінюють за значенням ефективної поверхневої концентрації, яка характеризує кількість носіїв заряду у шарі під одиничною площею поверхні. Якщо кожен впроваджений атом стає після відпалу електрично активним, ця величина дорівнює дозі опромінення.

5.4. Дифузія домішок із шару, легованого іонами, при іонному впровадженні

Одним із найпоширеніших методів є поєднання іонної імплантації і дифузії. Іонну імплантацію використовують для загонки, дифузію – для розгонки. Дифузія домішок з шару, легованого

іонами, відбувається з джерела обмеженої потужності з урахуванням попереднього розподілу домішки:

$$C(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi(\Delta R_p^2 + 2Dt)}} \exp\left[\frac{-(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2 + 4Dt}\right].$$

Розподіл домішок за глибиною під час дифузії домішок з шару, легованого іонами, при іонному впровадженні зображено на рис. 5.5.

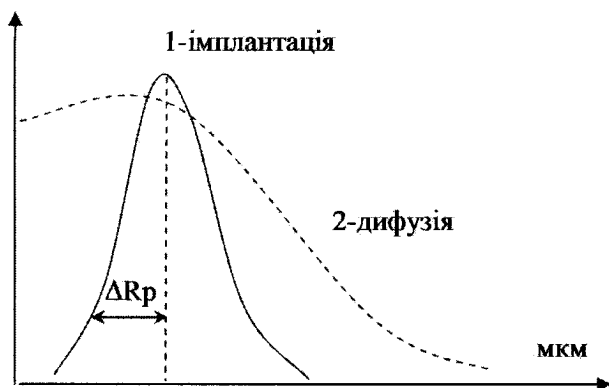


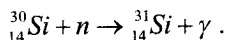
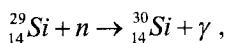
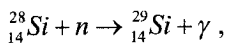
Рис. 5.5. Розподіл домішок за глибиною під час дифузії домішок з шару, легованого іонами при іонному впровадженні

Під час дифузії відбувається термічне розмивання профілю розподілу легуючої домішки. Порівняно невеликий спад у приповерхневій зоні та різкіший у глибину спостерігається за високих доз опромінення, коли у поверхневому шарі утворюється велика кількість радіаційних дефектів, а нагрівання підкладки – потік надлишкових вакансій.

5.5. Ядерне (трансмутаційне) легування кремнію

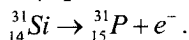
Суть методу ядерного, або трансмутаційного, легування кремнію полягає в тому, що під впливом нейтронного опромінення чистого монокристалічного злитка кремнію з високим питомим

опором відбувається конвертація його в гомогенний рівномірно легований фосфором матеріал *n*-типу. Для реалізації цього методу монокристалічний злиток кремнію поміщають в реактор, де відбувається його опромінення потоком теплових нейтронів з енергією приблизно 0,025 еВ. Теплові нейтрони дуже слабо взаємодіють з речовиною, тому їх проникна здатність дуже велика. Проникаючи в кристал, вони захоплюються ядрами кремнію, що призводить до ланцюжка ядерних перетворень:

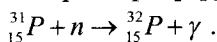


У результаті перших двох реакцій утворюються ізотопи кремнію ${}^{29}\text{Si}$ і ${}^{30}\text{Si}$, причому ці ядра перебуватимуть у збудженому стані. Їх перехід в основний стан супроводжується випусканням γ -квантів. Отже, перші дві реакції не призводять до ядерного легування – вони лише дещо перерозподіляють вихідну концентрацію ізотопів кремнію.

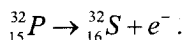
У результаті третьої реакції утворюється нестабільний ізотоп кремнію ${}^{31}\text{Si}$, який піддається β -розпаду:



У результаті розпаду утворюється ізотоп фосфору та електрон. Період напіврозпаду цієї реакції становить 2,6 год. Отже, частина атомів кремнію в результаті захоплення їх ядрами теплових нейтронів перетворилася на атоми фосфору, які є для кремнію донорною домішкою. Крім цих основних реакцій відбуваються побічні ядерні реакції, зумовлені захопленням ядрами фосфору теплових нейтронів:



Утворений у результаті цієї реакції ізотоп фосфору нестабільний і піддається β -розпаду з періодом напіврозпаду, що приблизно дорівнює 14,3 дня:



Останні дві ядерні реакції є небажаними, оскільки супроводжуються зменшенням концентрації атомів фосфору в кремнії. Проте істотного впливу на процес легування ці реакції не мають.

Під час вищевказаних реакцій у вихідному монокристалі кремнію поряд з донорною домішкою фосфору виникають радіаційні дефекти. Використовувати такий монокристал для виготовлення будь-яких напівпровідникових приладів не можна. Тому після ядерного легування монокристал кремнію необхідно відпалити, щоб відновити його вихідну кристалічну структуру.

Ядерне легування сьогодні є добре відпрацьованим методом рівномірного введення атомів фосфору до бездомішкового кремнію з метою отримання матеріалу *n*-типу. Легований таким способом кремній особливо необхідний як вихідний матеріал для проектування і виготовлення потужних напівпровідникових приладів, де потрібно прецизійне управління величиною напруги пробою *p-n*-переходу і однорідний розподіл електричного струму, що протікає через *p-n*-перехід. Крім цього, цей метод можна використовувати для виготовлення лавинних та інфрачервоних детекторів, для яких потрібен матеріал з високим питомим опором.

Крім рівномірного розподілу домішки по кристалу цей метод легування має ще низку переваг: відсутність в обробленому злитку неконтрольованої домішки, відсутність сегрегації легуючої домішки на кордонах зерен у полікристалічному кремнії. Разом з цим є і деякі обмеження, зокрема, цей метод дає змогу отримувати кремній тільки *n*-типу провідності. Крім того, на відміну від дифузії або іонної імплантації за цим методом неможливо здійснити селективне легування.

5.6. Методи контролю іонно-імплантованих шарів

Дослідження розподілу концентрації носіїв заряду за глибиною легovanого шару

Це дослідження проводять вимірюванням коефіцієнта Холла і усуненням тонких шарів матеріалу. Усунення відбувається за допомогою анодного оксидування та травлення SiO_2 у плавиковій кислоті.

Шари характеризуються поверхневим коефіцієнтом Холла R_{Hs} , який враховує усереднення напруги Холла за товщиною всього шару x_j . Добуток середньої концентрації C на товщину шару дорівнює кількості носіїв, що міститься під одиницею площі. Цю величину називають ефективною поверхневою концентрацією носіїв заряду:

$$C_s = \bar{C} \cdot x_j.$$

Свою чергою, поверхневий коефіцієнт Холла R_{Hs} пов'язаний з C_s виразом

$$C_s = \frac{\Gamma}{\rho \cdot R_{Hs}},$$

де $\Gamma = \frac{\mu_H}{\mu}$ – фактор Холла, тобто відношення холлівської та дрейфової чутливості; ρ – заряд електрона.

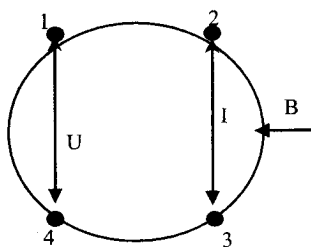


Рис. 5.6. Схематичне зображення процесу вимірювання поверхневого коефіцієнта Холла R_{Hs}

Оскільки точне значення фактора Холла невідоме, вважають, що воно дорівнює 1. Це може призвести до помилки в розрахунках C_s на 20–30 % у бік заниження дійсних значень для електронів і завищення для дірок.

Поверхневу сталу Холла R_{Hs} визначають за даними вимірювань напруги ΔU_{13} за протікання струму I_{24} в полі $\perp B$ (рис. 5.6):

$$R_{Hs} = \frac{10^4 \cdot \Delta U_{13}}{B \cdot I_{24}}.$$

Визначивши коефіцієнт Холла, розраховують ефективну поверхневу концентрацію C_s :

$$C_s = \frac{6,25 \cdot 10^{18}}{R_{Hs}}.$$

Потім усувають тонкий шар легованого кремнію і знову вимірюють C_s . Після багаторазової процедури концентрацію носіїв в

i -му віддаленому шарі C_i завтовшки Δx обчислюють за співвідношенням,

$$\rho \cdot C_i \cdot \mu_i \cdot \Delta x = \delta_{si} - \delta_{s(i+1)};$$

$$C_i = \frac{\Delta \delta_{si}}{\rho \mu_s \Delta x}.$$

Мас-спектроскопія вторинних іонів

Зразок неперервно розпилюють пучком іонів аргону. Вторинні іони домішкових атомів проходять через мас-сепаратор. Іонний струм пропорційний до концентрації домішки в атомному шарі напівпровідника, що розпилюється, а час розпилювання є пропорційним до глибини, тому часова залежність $I(t)$ є пропорційною до залежності концентрації за товщиною шару $C(x)$. Чутливість методу: 10^{16} см^{-3} .

Спектроскопія оже-електронів (бомбардування електронами)

За значенням енергії, що відповідає піку оже-електронів, що випускаються, ідентифікують елемент, а за інтенсивністю випускання – концентрацію атомів, що піддаються аналізу.

Чутливість на рівні 10^{18} см^{-3} .

Високе розділення зумовлене виходом оже-електронів з глибини 1–5 атомних шарів (0,5–3 нм).

Контрольні питання

1. За допомогою чого під час іонної імплантації в технології ЗіС відбувається прискорення іонізованих атомів?
2. Від яких факторів залежить значення проектованої величини пробігу та середньоквадратичного відхилення проектованої довжини пробігу іона в матеріалі?
3. Чи залежить значення проектованої величини пробігу від дози впроваджуваних іонів?
4. Як розподіляється домішка при іонному впровадженні?
5. У чому відмінність розподілу домішки при іонному впровадженні від дифузійного розподілу?

6. На якій відстані від поверхні пластини зосереджується максимум концентрації впровадження іонів?
7. Чи може поверхнева концентрація впроваджених іонів дорівнювати нулю; не дорівнювати нулю?
8. Від яких факторів залежить величина максимальної концентрації імплантованих іонів?
9. Чи можливим є утворення двох p - n -переходів при іонній імплантації домішки в кремній із протилежним типом провідності?
10. Як впливає дифузія на перерозподіл домішки після іонного впровадження?
11. Чим зумовлений ефект каналювання і як він впливає на розподіл домішки в орієнтованих мішенях?
12. Яка причина утворення радіаційних дефектів?
13. З якою метою проводять відпал радіаційних дефектів?
14. У чому полягає відмінність між відпалом імплантованих шарів та дифузією після іонної імплантації?
15. Які методи контролю використовують для оцінки шарів, легованих іонами?

Розділ 6

ПРОЦЕСИ ОКИСНЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗІНТЕГРОВАНИХ СХЕМ

6.1. Методи та обладнання для формування плівок у технології ЗІС

Осадження плівок широко використовують під час виробництва ЗІС [69]. Вони формують провідні ділянки всередині схеми, виконують роль електричної ізоляції між металами, захищають поверхню від впливу навколишнього середовища. Плівки: SiO_2 , Si_3N_4 , SiN .

Методи:

Осадження з парогазових сумішей. Традиційно плівки осаджують (термічно, плазмохімічно) за атмосферного тиску в реакторі. Однак ці реактори мають низьку продуктивність і забезпечують малу ($\pm 10\%$) відтворюваність за товщиною плівки, тому використовують реактори, що працюють за пониженого тиску – так звані реактори з гарячою стінкою. Плазмохімічне осадження у таких реакторах використовують, коли потрібна низька температура процесу.

Переваги плазмохімічного осадження: однорідність покриття, прецизійне керування складом, висока швидкість осадження, низька температура процесу.

Обладнання:

1. Найпростіший *реактор із гарячими стінками за пониженого тиску* складається з кварцової труби.

Параметри: тиск – від 30 до 250 Па, температура 300–900 °С, розхід газу 100–1000 см³/хв (рис. 6.1).

Одночасно можна обробляти до 50–200 підкладок. Однорідність плівок $\pm 5\%$ за товщиною.

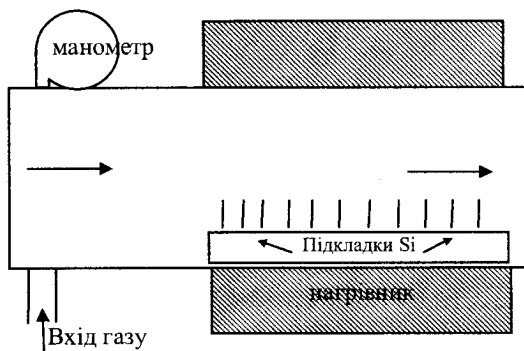


Рис. 6.1. Схематичне зображення реактора з гарячими стінками за пониженого тиску

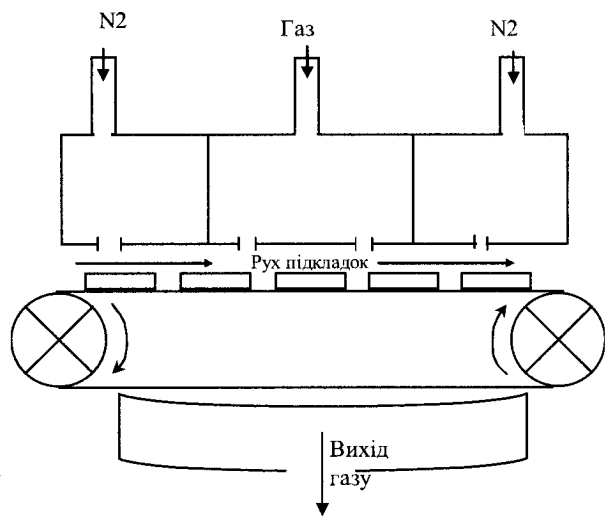


Рис. 6.2. Схематичне зображення реактора неперервної дії за атмосферного тиску

Переваги: добра однорідність на підкладках плівок за товщиною, великий об'єм завантаження і можливість обробляти підкладки великого діаметра.

Недоліки: низька швидкість осадження, використання отруйних, легкозаймистих газів.

Використання: SiO_2 , полікремній, Si_3N_4 .

2. *Реактор неперервної дії* (за атмосферного тиску).

Використовують для осадження діоксиду кремнію.

Переваги: висока пропускна здатність, однорідність плівок, можливість обробляти підкладки великого діаметра.

Недоліки: велика витрата газу, часте очищення.

3. *Плазмохімічний реактор* із радіальним розподілом газового потоку: височастотна напруга подається на верхній електрод і створює тліючий розряд між двома пластинами-електродами. Схематично зображено плазмохімічний реактор із радіальним розподілом газового потоку на рис. 6.3.

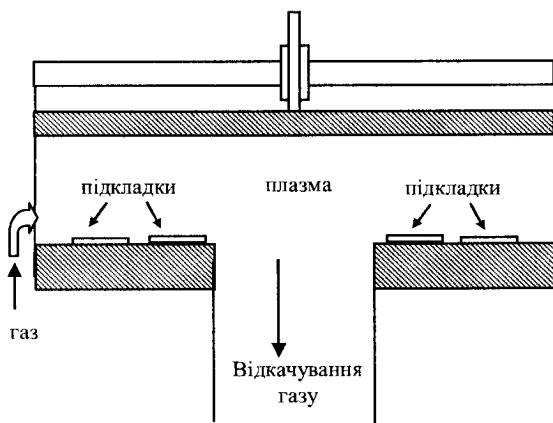


Рис. 6.3. Схематичне зображення плазмохімічного реактора з радіальним розподілом газового потоку

Нижній електрод нагрівається до 100–400 °С. Головні переваги – низьку температуру процесу – супроводжують недоліки:

- ємність реактора обмежена;
- підкладки завантажують вручну;
- забруднення пухким осадом з ненагрітих частин камери.

4. Плазмохімічний реактор з гарячими стінками має змінні графітові електроди. У камері застосовують тліючий розряд між електродами. Схематично зображено плазмохімічний реактор із гарячими стінками на рис. 6.4.

Переваги:

велика ємність;
 низькі температури.

Недоліки:

забруднення;
 ручне завантаження.

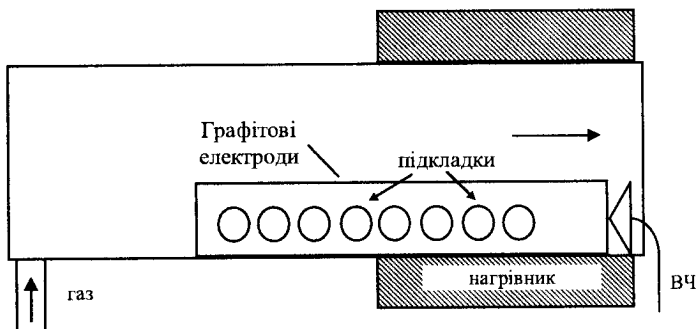


Рис. 6.4. Схематичне зображення плазмохімічного реактора з гарячими стінками

Полікристалічний кремній

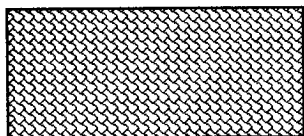


Рис. 6.5. Схематичне зображення морфології полікристалічного кремнію

Полікремній використовують як затвор у МОН-приладах, як дифузійне джерело під час створення дрібних $p-n$ -переходів для формування високоомних резисторів, для забезпечення непрямої контактів до монокремнію. Осаджується піролізом моноси-

лану за температури 600–650 °С у реакторах, що працюють за пониженого тиску: $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$.

Для отримання полікристалічних плівок використовують два види процесів осадження за пониженого тиску:

1. 100 % силан за тиску 25–130 Па.
2. 20–30 % суміш силану з азотом за тиску 25–130 Па.

Обробляють одночасно до 200 підкладок. Швидкість осадження 10–20 нм/хв.

Кремній, що осаджується за температури, нижчої за 575 °С, є аморфним. Переважно у полікремнії присутні зерна діаметром від 0,03 до 0,3 мкм (рис. 6.5).

Під час легування полікремнію питомий опір залежить від дози, температури і відпалу. Дуже великий питомий опір полікремнію зумовлений захопленням носіїв заряду на границях зерен. Густина полікремнію становить 2,3 г/см³, термічний коефіцієнт лінійного розширення $2 \cdot 10^{-6}$ см/°С і температурний коефіцієнт опору $\text{TKO} = 1 \cdot 10^{-3}$ °С⁻¹.

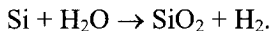
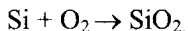
Діоксид кремнію

SiO_2 використовують як ізолюючі плівки між багаторівневою металізацією, як маскувальні чи захисні покриття.

SiO_2 , леговані фосфором, використовують як ізолятор між металевими шарами, як пасивуючі покриття вже сформованих приладів, як дифузійні джерела.

6.2. Термічне окиснення монокристалічного кремнію. Модель Діла – Гроува

Хімічні реакції, що описують процес термічного окиснення кремнію в кисні або в парах води, мають вигляд:



Переважає процес окиснення відбувається відповідно до діаграми (модель Діла – Гроува), що подана на рис. 6.6.

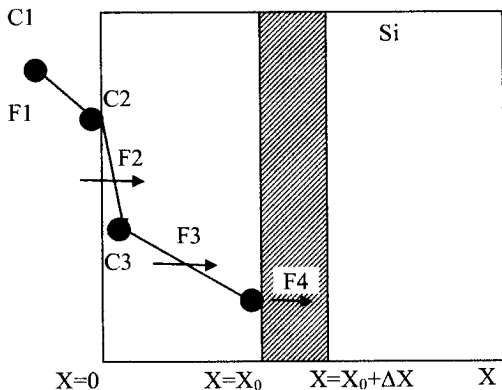


Рис. 6.6. Схематичне зображення процесу термічного окиснення монокристалічного кремнію

Потік F_1 відповідає газофазному масоперенесенню окислювача до поверхні підкладки і дорівнює: $F_1 = h(C_1 - C_2)$, h – коефіцієнт перенесення з газової фази.

Потік F_2 – відповідає різниці між концентраціями окислювача в газовій фазі, що адсорбувались на поверхні підкладки і окиснювача, що розчинився в твердій фазі й дорівнює: $F_2 = \delta(C_2 - C_3)$, де δ – константа швидкості процесу розчинення окиснювача в шарі оксиду.

Потік F_3 відповідає дифузії від межі розділу газова фаза – оксид до оксид – підкладка і за законом Фіка дорівнює:

$$F_3 = D \frac{C_3 - C_4}{x_o},$$

де D – коефіцієнт дифузії окиснювача в оксиді; x_o – товщина оксиду.

Потік F_4 описують виразом

$$F_4 = kC_4,$$

де k – константа швидкості поверхневої реакції окиснення кремнію; C_1 – рівноважна концентрація окиснювача в газовій фазі; C_2 – концентрація окиснювача біля поверхні оксиду; C_3 – концентрація окиснювача в шарі оксиду на границі з газовою фазою; C_4 – концентрація окиснювача на границі SiO₂- Si.

Враховуючи умови стаціонарності, що всі потоки однакові ($F_1 = F_2 = F_3 = F_4$), і розраховуючи швидкість росту оксиду, товщину оксиду, за час процесу отримуємо:

$$x_o(T) = \frac{A}{2} \left(1 + \frac{t}{A^2/4B} \right)^{1/2} - 1,$$

де $A = 2D \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{h} \right)$ – константа; $B = \frac{2DC_1}{N}$ – константа.

Тоді для двох граничних випадків:

$$1) \quad t - \text{ час процесу окиснення } \gg \frac{A^2}{4B} - x_o^2 = Bt;$$

$$2) \quad t - \text{ час процесу окиснення } \ll \frac{A^2}{4B} - x_o = \frac{B}{A}t,$$

де B – це параболічна константа і B/A – лінійна константа процесу окиснення.

Параболічна константа B визначає загалом процес реакції за високих температур і в товстих шарах оксидів, а лінійна константа B/A визначає процес окиснення в початкові моменти часу, коли шар ще тонкий.

6.3. Термічне окиснення кремнію в парах води

Для отримання SiO_2 використовують термічне окиснення в парах води високої чистоти (10–20 мОм/см). За температур окиснення, більших ніж 1100 °С, шар оксиду утворюється за параболічним законом $x^2 = Bt$. За температур процесу, нижчих ніж 1100 °С, процес набуває лінійного характеру. Лінійний характер росту SiO_2 спостерігається в парах води високого тиску ($2,5 \cdot 10^5$ – $4 \cdot 10^7$ Па) за температур 500–800 °С.

Тобто,

по-перше, згідно з рівнянням для V залежність V від температури є аналогічною до температурної залежності коефіцієнта дифузії D (V експоненційно зростає з підвищенням температури);

по-друге, ріст плівки за лінійним законом відбувається в тому разі, коли швидкість росту обмежена швидкістю реакції на границі $\text{Si} - \text{SiO}_2$. На ділянці лінійного росту швидкість реакції залежить від кількості вільних зв'язків атомів Si , які можуть реагувати з молекулами води на межі $\text{Si} - \text{SiO}_2$.

Температура окиснення, °C	A, мкм	Параболічна константа швидкості окиснення V , мкм ² /год	Лінійна константа швидкості окиснення V/A , мкм/год
1200	0,05	0,720	14,40
1100	0,11	0,510	4,64
1000	0,226	0,287	1,27
920	0,5	0,203	0,406

6.4. Термічне окиснення кремнію в сухому кисні

Відмінною ознакою від попереднього випадку є те, що речовина, яка дифундує крізь плівку SiO_2 , що росте, є іонами кисню, а не водою. Необхідно зауважити, що коефіцієнт дифузії кисню в SiO_2 ($2,8 \cdot 10^{-14}$ см²/с) за 1050 °C значно менший, ніж у водню і води за тих самих умов. Тому швидкість росту SiO_2 в сухому кисні менша, ніж у парах води. Для V добуток рівноважної концентрації на коефіцієнт дифузії є меншою величиною, ніж для води, тому параболічна і лінійна константи є меншими величинами.

Як і під час окиснення в парах води, кінетика окиснення в області низьких температур визначається швидкістю реакції на межі $\text{Si} - \text{SiO}_2$. Відхилення закону росту у бік лінійності виникає за температур, нижчих ніж 1000 °C. За вищих температур кінетика росту визначається дифузією окиснювача і його рівноважною концентрацією, ріст плівки відбувається за параболічним законом.

Температура окиснення, °С	A, мкм	Параболічна константа швидкості окиснення B, мкм ² /год	Лінійна константа швидкості окиснення B/A, мкм/год	τ _p , год
1200	0,040	0,045	1,12	0,027
1100	0,090	0,027	0,30	0,076
1000	0,165	0,0117	0,071	0,37
920	0,235	0,0049	0,0208	1,4

6.5. Фактори, що впливають на швидкість росту плівок SiO₂

Крім температури і окиснювального середовища, на швидкість росту шару SiO₂ впливає тиск газу-окиснювача. З підвищенням тиску збільшується концентрація молекул окислювача, розчинених у приповерхневому шарі, отже, збільшуються градієнт концентрації молекул у шарі SiO₂ і швидкість дифузії. Окиснення за підвищеного тиску водяної пари (прискорене гідротермальне окиснення) дає змогу отримувати оксидні плівки завтовшки 2–3 мкм, що особливо важливо за формування ізопланарних структур, приладів із зарядним зв'язком тощо. Недоліком методу є необхідність використання герметичних і високомісних реакторів замість технологічних проточних систем.

На швидкість росту шару SiO₂ впливає кристалографічна орієнтація кремнієвої пластини. Окиснення на пластині з орієнтацією (111) відбувається швидше, ніж з орієнтацією (100). Вплив орієнтації особливо помітний за відносно низьких температур. Так, наприклад, за T= 700 °С відмінність у швидкості окиснення становить 40 %, а за T= 1200 °С – лише 2 %. Залежність швидкості окиснення від кристалографічної орієнтації пояснюється тим, що різним кристалографічним напрямкам пластини відповідає різна кількість зв'язків Si – Si.

Значно впливає на швидкість росту шару SiO₂ концентрація легуючої домішки у вихідній пластині кремнію. Цей вплив зумов-

лений явищем сегрегації домішки на межі поділу $\text{SiO}_2 - \text{Si}$. Для одних домішкових атомів розчинність у Si вища, ніж у SiO_2 , тому під час термічного окиснення зростаючий оксид відтісняє домішкові атоми вглиб пластини кремнію. У результаті оксидний шар збіднюється на ці домішкові атоми. Так, зокрема, поведуться атоми фосфору, миш'яку, сурми. А такі атоми, як бор, навпаки, краще розчиняються в SiO_2 , ніж в Si , тому за окиснення шар SiO_2 збагачений на атоми бору. Наявність домішкових атомів у шарі SiO_2 створює в ньому механічні напруги і ніби "розпушує" його, що збільшує швидкість дифузії молекул окиснювача крізь зростаючий шар оксиду. Атоми фосфору, миш'яку та сурми впливають тільки на швидкість хімічної реакції. Тому їх вплив істотний тільки на ранній стадії процесу окиснення, коли товщина шару невелика, і загальна швидкість окиснення визначається швидкістю хімічної реакції. Атоми бору, навпаки, впливають і за відносно товстих шарів SiO_2 .

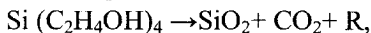
Істотного прогресу в технології термічного окиснення було досягнуто із додаванням до окиснювального середовища хлору і хлорвмісних компонентів. Додавання хлору дало змогу збільшити швидкість окиснення, поліпшити стабільність електричних характеристик і підвищити пробивну напругу оксидних шарів. Збільшення швидкості окиснення зумовлено утворенням механічної напруги в зростаючому шарі оксиду, що сприяє збільшенню швидкості дифузії молекул окиснювача. Поліпшення якості оксидних шарів зумовлено тим, що іони хлору здатні зв'язувати іони натрію і калію, які дуже негативно впливають на характеристики оксиду. Ці іони в шарі SiO_2 можуть з'явитися на більш ранній стадії технологічного процесу, наприклад, при видаленні фоторезисту лужними розчинами на основі NaOH і KOH . Потрапивши в шар SiO_2 , вони здатні переміщуватися в ньому за дії електричного поля, що різко знижує електричну міцність оксидного шару. Особливо важливо це для подзатворного шару діелектрика в МДН-транзисторах.

Незважаючи на те, що метод термічного окиснення дає змогу отримувати якісні шари SiO_2 , він має один серйозний недолік, а саме, за його допомогою складно отримувати "товсті" шари. За товщини порядку 1–2 мкм швидкість росту шару SiO_2 фактично

дорівнює нулю. Для багатьох завдань (створення маскує покриття під час фотолітографії або подзатворного шару діелектрика в МДН-структурах) така товщина і не потрібна. Проте існують завдання, для виконання яких необхідно вирощувати шари SiO_2 завтовшки кілька мікрометрів. Це вимагає застосування інших методів формування оксидних шарів, зокрема, методу хімічного осадження.

6.6. Хімічне осадження шарів оксиду

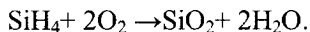
Існує кілька методів осадження шарів SiO_2 , з них найбільшого поширення набули піроліз кремнійорганічних сполук (наприклад, тетраетоксілана $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_4$) і окиснення силану SiH_4 . В основу першого методу покладено реакцію



де R – органічні радикали, типу C_2H_5 , CH_3 та ін. Процес проводять за температури 700–750 °С. Швидкість росту доволі висока, що дає змогу за кілька десятків хвилин отримувати шари завтовшки кілька мікрометрів. Зазвичай цю реакцію реалізують за допомогою потоку газу-носія (Ar , N_2 , H_2 , $\text{Ar} + \text{O}_2$), що містить пари тетраетоксілана.

Піроліз тетраетоксілана за $T < 700$ °С буде неповним, а зростаючий шар SiO_2 виявиться забрудненим проміжними продуктами розкладання $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_4$. За температури понад 750 °С шар SiO_2 забруднюється вуглецем, карбідом кремнію SiC і смоляними продуктами піролізу. Для поліпшення якості шарів іноді процес проводять не у відкритій трубі в потоці газу-носія, а у вакуумній системі, наповненій після відкачування парами тетраетоксілана. Процес безпечний, що відрізняє його від реакцій з використанням окиснення силану.

В основу другого методу покладено реакцію



Реакція проходить за температур 250–400 °С. Цей метод порівняно з піролізом тетраетоксілана має низку переваг. По-перше, виходять чистіші плівки без залишків органічних сполук, вуглецю,

карбіду кремнію та інших. По-друге, процес відбувається за нижчих температур. По-третє, окиснення силану легко узгоджується з епітаксією кремнію, тобто можна здійснювати процес в одному реакторі, що дуже важливо у разі нанесення захисних покриттів на епітаксії структури. Недолік методу – токсичність і пірофорність (самоzapалюваність) силану. Тому реагенти вводять в реактор із сильно розведеним аргоном, що дає змогу регулювати швидкість росту оксидних шарів. Швидкість зростання SiO_2 зростає приблизно лінійно зі збільшенням витрати силану і лімітується витратою кисню, тобто лінійна ділянка переходить у насичення, якщо недостатньо кисню. Швидкість росту SiO_2 може досягати десятків нанометрів на хвилину.

Контрольні питання

1. Які методи використовують для осадження окисних плівок?
2. Порівняти властивості плівок діоксиду кремнію, осаджених за різними методами.
3. На яких припущеннях основана модель Діла – Гроува?
4. У чому полягає механізм термічного окиснення кремнію?
5. Яка стадія перебігання процесу є лімітуючою за окиснення протягом тривалого часу та високих температур; в початкові моменти часу і за низьких температур?
6. Чому окиснення кремнію в парах води відбувається швидше, ніж у сухому кисні?
7. Які параметри процесу визначають параболічну константу швидкості окиснення; лінійну константу швидкості окиснення?
8. Чому швидкість окиснення кремнію з ростом оксиду зменшується?
9. Порівняти процес окиснення у сухому кисні та у парах води.
10. Як легуючі домішки впливають на швидкість окиснення кремнію?
11. Як орієнтація підкладки впливає на швидкість росту оксидного шару?
12. Як впливає парціальний тиск окиснювача на ріст плівок оксиду кремнію?
13. У чому полягає перевага дво- і тристадійних процесів окиснення?
14. Як здійснити процес окиснення кремнію для отримання товстих шарів оксиду кремнію за низьких температур?
15. За яких умов необхідно вирощувати оксид кремнію для використання як підзатворного діелектрика?

Розділ 7

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗІНТЕГРОВАНИХ СХЕМ

7.1. Конструктивні особливості ЗІС. Рівні проектування. Класифікація

Зінтегрована схема – це конструктивний виріб електронної техніки, що виконує певну функцію перетворення інформації та містить сукупність електрично пов'язаних між собою електрорадіо-елементів (ЕРЕ), виготовлених в єдиному технологічному циклі [70].

Термін “зінтегрована схема” відображає: об'єднання великої кількості транзисторів, діодів, конденсаторів, резисторів і з'єднаних провідників в єдину конструкцію (конструктивна інтеграція); виконання схемою функцій перетворення інформації, складніших порівняно з функціями окремих ЕРЕ (схемотехнічна інформація); виконання в єдиному технологічному циклі одночасно всіх ЕРЕ схеми і міжз'єднань і одночасним формуванням за груповим методом великої кількості однакових ЗІС (технологічна інтеграція).

За способом виготовлення розрізняють напівпровідникові й плівкові ЗІС. У напівпровідникових ЗІС всі ЕРЕ і частина міжз'єднань сформовані в приповерхневому шарі напівпровідникової підкладки. В плівкових ЗІС пасивні ЕРЕ виготовлено у вигляді сукупності тонких (менше від 1 мкм) або товстих (10–50 мкм) плівок, нанесених на діелектричну підкладку. Гібридні ЗІС (ГІС) являють собою комбінацію плівкових пасивних ЕРЕ з мініатюрними безкорпусними дискретними активними приладами (напівпровід-

никові ЗІС, транзисторами, діодами), розміщеними на спільній діелектричній підкладці. Електрорадіоелементи, які є невід'ємною складовою ЗІС і не можуть бути виділені з неї як самостійний виріб, називають елементами ЗІС, а дискретні активні ЕРЕ ГІС – навісними компонентами (або просто компонентами), підкреслюючи тим самим, що їх виготовляють окремо у вигляді самостійних приладів, які можуть бути придбані як покупні вироби. На відміну від дискретних компонентів, елементи ЗІС називають інтегральними (інтегральний резистор, інтегральний діод).

У суміщених ЗІС активні ЕРЕ виконані в приповерхневому шарі напівпровідникового кристала (як у напівпровідниковій ЗІС), а пасивні нанесені у вигляді плівок на покриту діелектриком поверхню того самого кристала (як у плівковій ЗІС).

Перерахуємо особливості ЗІС як нового типу виробів електронної техніки:

а) ЗІС самостійно виконує завершену, часто доволі складну функцію. Вона може бути підсилювачем, запам'ятовувальним пристроєм, генератором, детектором і т. д. Жоден ЕРЕ самостійно таких функцій виконувати не може – для цього його необхідно з'єднати з іншими дискретними ЕРЕ за окремою схемою;

б) випуск і застосування ЗІС супроводжуються істотним зменшенням маси, габаритів і вартості радіоелектронної апаратури, зниженням потрібної потужності та підвищенням надійності;

в) елементи ЗІС розміщуються в межах однаєї підкладки на порівняно невеликих відстанях один від одного і формуються одночасно; це зумовлює малий технологічний розкид їхніх параметрів. Особливо висока точність виконання співвідношення параметрів декількох елементів (наприклад, відношення опорів). Ця точність зберігається із зміною температури навколишнього середовища, оскільки всі елементи ЗІС працюють фактично за однієї температури, і термічні коефіцієнти параметрів елементів однієї і тієї ЗІС приблизно однакові. Цю особливість ЗІС часто використовують для створення пристроїв, мало чутливих до впливу технологічного розкиду параметрів елементів і до зміни температури;

г) під час розроблення напівпровідникових ЗІС намагаються вибрати схемні розв'язки з мінімальною кількістю пасивних елементів. Резистори і конденсатори займають значну площу ЗІС; технологічні можливості створення цих елементів з достатньою точністю в широкому діапазоні номіналів обмежені.

Рівні проектування:

- Логічний рівень – логічна схема (логічні інвертори, елементи АБО-НЕ, І-НЕ і т. д.).
- Схемо- і системотехнічний рівень – схемо- і системотехнічні схеми (тригери, компаратори, шифратори, дешифратори, АЛУ і т. д.).
- Електричний рівень – принципова електрична схема (транзистори, конденсатори, резистори і т. д.).
- Фізичний рівень – методи реалізації одного транзистора (або невеликої групи) у вигляді легованих зон на кристалі.
- Топологічний рівень – топологічні фотошаблони для виробництва.
- Програмний рівень дає змогу програмісту програмувати (для ПЛІС, мікроконтролерів і мікропроцесорів) розроблену модель, використовуючи віртуальну схему.

Сьогодні більшу частину інтегрованих схем проектують за допомогою спеціалізованих систем автоматизованого проектування, які дають змогу автоматизувати і значно прискорити виробничі процеси, наприклад, отримання топологічних фотошаблонів.

КЛАСИФІКАЦІЯ

Ступінь інтеграції

Залежно від ступеня інтеграції використовують такі назви інтегральних схем:

- мала інтегральна схема (МІС) – до 100 елементів у кристалі;
- середня інтегральна схема (СІС) – до 1000 елементів у кристалі;
- велика інтегральна схема (ВІС) – до 10 000 елементів у кристалі;
- надвелика інтегральна схема (НВІС) – більше від 10 тисяч елементів у кристалі.

Раніше використовували також застарілі тепер назви: ультра-велика інтегральна схема (УВІС) – до 1 млрд елементів у кристалі та гігавелика інтегральна схема (ГВІС) – понад 1 млрд елементів у кристалі, тепер назви (УВІС) і (ГВІС) фактично не використовують, і всі мікросхеми з кількістю елементів понад 10 тисяч зараховують до класу НВІС.

7.2. Конструювання і розрахунок параметрів елементів ЗІС на біполярних транзисторах

Переважно під час розроблення ЗІС розраховують геометрію пасивних елементів біполярних ЗІС (резисторів і конденсаторів), а конструкції транзисторів і діодів вибирають з бази даних за цими елементами, що знаходяться на цьому підприємстві, стосовно до однієї (або декількох) базових технологій. У разі дотримання режимів базової технології вертикальну структуру елементів можна вважати заданою. Отже, розрахунок резисторів і конденсаторів прив'язаний до базової технології (задані поверхневі концентрації, глибини залягання p - n -переходів та ін.).

7.2.1. Конструювання і розрахунок параметрів резисторів

Вихідними даними для розрахунку геометричних розмірів інтегральних напівпровідникових резисторів такі: задане в принциповій електричній схемі номінальне значення опору R і допуск на нього ΔR ; поверхневі опори легованого шару ρ_s , на основі якого формується резистор; середнє значення потужності P і максимально допустима питома потужність розсіяння P_o ; основні технологічні та конструктивні обмеження.

Топологію інтегральних напівпровідникових резисторів наведено на рис 7.1. Характеристики резисторів залежать від того, який шар транзисторної структури використано як резистивний (див. табл. 7.1).

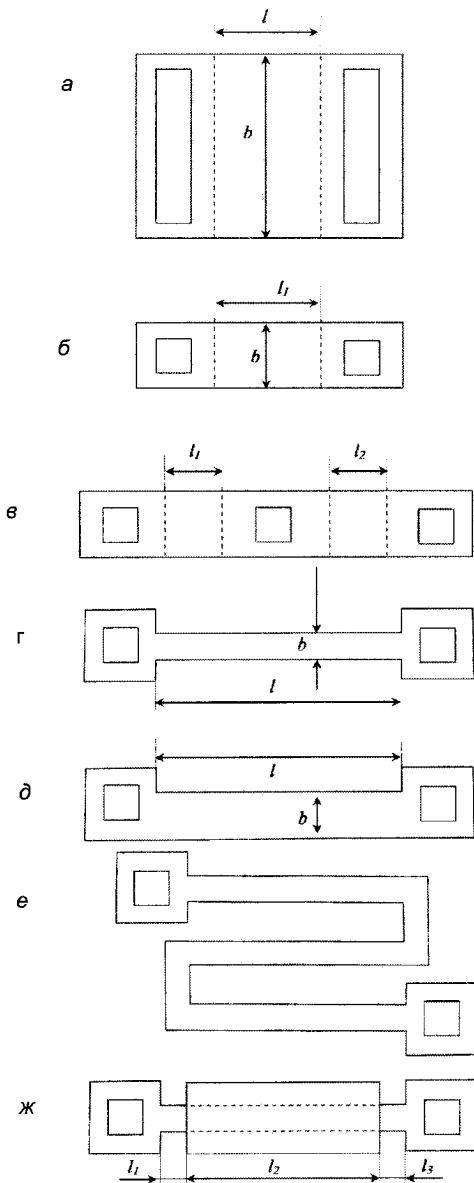


Рис. 7.1. Варіанти топологій інтегральних резисторів

Характеристики інтегральних резисторів

Тип резистора	Товщина шару, $\mu\text{м}$	Поверхнєві опори ρ_s , Ом/□	Допуск, %	ТКО (α_R), $1/^\circ\text{C}$	Паразитна ємність, пФ/мм ²
Дифузійний резистор на основі базової області	2,5–3,5	100–300	$\pm(5-20)$	$\pm(0,5-3)\cdot 10^{-3}$	150–350
Пінч-резистор	0,5–1,0	$(2-15)\cdot 10^3$	± 50	$\pm(1,5-3)\cdot 10^{-3}$	1000–1500
Дифузійний резистор на основі емітерної області	1,5–2,5	1–10	± 20	$\pm(1-5)\cdot 10^{-4}$	1000–1500
Епітаксійний резистор	7–1,0	$(0,5-5)\cdot 10^3$	$\pm(15-25)$	$\pm(2-4)\cdot 10^{-3}$	80–100
Іонно-легований резистор n -типу	0,1–0,2	$(5-10)\cdot 10^2$	± 50	$\pm(1,5-5)\cdot 10^{-3}$	200–350

Інтегральні резистори. Резистори ЗІС формують у будь-якому з дифузійних шарів транзисторної структури (емітерна і базова області), в епітаксійному шарі (колекторна область) і за допомогою іонного легування.

Розглянемо різновидності інтегральних резисторів.

Дифузійні резистори. Дифузійні резистори (ДР) виготовляють одночасно з базою або емітерною областю. Опір ДР являє собою об'ємний опір ділянки дифузійного шару, обмеженого p - n -переходом. Він визначається геометричними розмірами резистивної області і розподілом домішок у глибині дифузійного шару, який є питомим поверхневим опором ρ_s . Значення ρ_s є конструктивним параметром резистора, що залежить від технологічних факторів (режиму дифузії). Під час створення ЗІС параметри дифузійних шарів оптимізують з метою отримання якнайкращих характеристик транзисторів типу n - p - n , тому параметри ДР покращують не технологічними режимами, а вибором конфігурації і геометричних розмірів резистора. Конфігурації дифузійних резисторів показано на рис. 7.1. Низькоомні (десятки Ом)

резистори (рис. 7.1, а) мають мале відношення l/b . Форму і розміри контактів до них вибирають такими, щоб опір приконтактних областей був значно менший від опору основної області резистора. Резистори з опором від сотень Ом до одиниць кілоом у плані мають вигляд, як на рис. 7.1, б, в. Тут довжина і ширина приконтактної області дорівнюють ширині резистора. Топологію, показану на рис. 7.1, з, д, використовують для створення високоомних резисторів (до 20 кОм). Ці резистори мають порівняно малу ширину, розміри приконтактних областей визначаються можливостями технології створення надійного контакту провідних алюмінієвих смужок із напівпровідниковим матеріалом. Більш високоомні резистори (до 60 кОм) мають форму меандра (рис. 7.1, е) або виготовляються в донній частині базової області (пінч-резистори, рис. 7.1, ж). Максимальний опір дифузійних резисторів на основі базової області приблизно дорівнює 60 кОм, якщо площа, відведена під резистор, не дуже велика (не більша за 15 % від площі кристала).

На основі емітерної області формують резистори невеликих номіналів (3–100 Ом з $\text{TKO} = (1 \div 2) \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$), оскільки значення ρ_s емітерного шару невелике (див. табл. 7.1).

Пінч-резистори. За необхідності створення в ЗІС резисторів з опором понад 60 кОм використовують пінч-резистори (синоніми: каналні, стиснуті, закриті резистори). Їх формують на основі донної, слаблегованої базової області, яка має більший опір і меншу площу перетину (рис. 7.2).

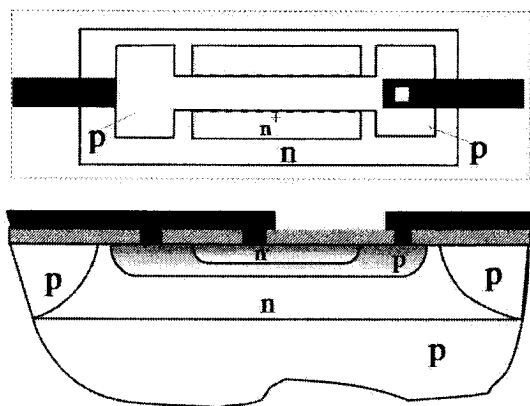


Рис. 7.2. Конструкція пінч-резистора

Максимальний опір таких резисторів становить 200–300 кОм за простої смужкової конфігурації, $\rho_s = 2 \div 5$ кОм/□. Пінч-резистори мають великий розкид номіналів (до 50 %) через важкість отримання точних значень товщини донної частини p -шару, великого $\text{TKO} = (3 \div 5) \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$ внаслідок меншого ступеня легування донної частини. В пінч-резисторі n^+ і p -шари закорочено металізацією (див. рис. 7.2) і з'єднано з виводом резистора, що знаходиться під великим додатним потенціалом, ніж інші області структури. Таке з'єднання забезпечує зворотне зміщення на всіх переходах пінч-резистора.

Епітаксійні резистори. Серед трьох областей транзистора колекторна має найменшу концентрацію легуючої домішки і максимальне значення ρ_s (500–5000 Ом/□). Оскільки епітаксійний шар легований однорідно, провідність епітаксійного резистора (ЕР) постійна за всім його перерізом, на відміну від ДР.

Розрахунок геометричних розмірів інтегрального напівпровідникового резистора починають від визначення його ширини. За розрахункову ширину $b_{розр.}$ резистора приймають значення, які не менші за найбільше значення однієї з трьох величин: $b_{техн.}$, $b_{точн.}$, b_p , тобто $b_{розр.} \geq \max \{b_{техн.}, b_{точн.}, b_p\}$, де $b_{техн.}$ – мінімальна ширина резистора, що визначають роздільною здатністю технологічних процесів; $b_{точн.}$ – мінімальна ширина резистора, за якої забезпечують задані помилки геометричних розмірів; b_p – мінімальна ширина резистора, яку визначають за максимально допустимої потужності розсіювання.

Величину $b_{техн.}$ знаходять за переліком технологічних обмежень вибраної технології (наприклад, для планарно-епітаксійної технології $b_{техн.} = 5$ мкм).

Ширину $b_{точн.}$ визначають за виразом

$$b_{точн.} = (\Delta b + \Delta l / K_\phi) K_\phi / \Delta K_\phi,$$

де Δb і Δl – абсолютні похибки ширини і довжини резистивної смужки, зумовлені технологічними процесами.

Для типових технологічних процесів ($\Delta b = \Delta l = 0,05 \div 0,1$ мкм)

$$\Delta l / K_\phi / K_\phi = \Delta R / R - \Delta \rho_s / \rho_s - \alpha_R \Delta T.$$

Ширину b_p визначають за виразом

$$b_p = \sqrt{\frac{P_{ps}}{\rho_o R}} = \sqrt{\frac{P}{\rho_o K_\phi}},$$

де P_o – максимально допустима питома потужність розсіяння, яку вибирають залежно від типу корпусу мікросхеми та умов її експлуатації в межах 0,5–4,5 Вт/мм².

Опори резисторів можна розрахувати за спрощеними формулами з урахуванням конфігурації контактних областей. Допускають, що в тонкому дифузійному шарі бази (товщина 2–3 мкм) питомий об'ємний опір однаковий:

$$\rho_s = \frac{\rho v}{d}.$$

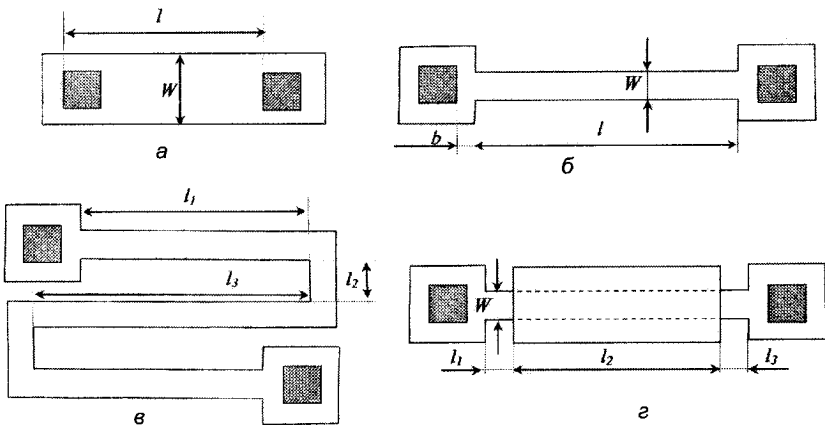


Рис. 7.3. Топологія епітаксійних резисторів різної конструкції

Опір резисторів із топологією рис. 7.3, а (використовують емітерну область структури) розраховують за формулою

$$R = \rho_s \left(\frac{l}{w} + 2k_1 \right),$$

де ρ_s – поверхневий опір; w – ширина резистора; $k_1 = 0,07$ – коефіцієнт форми контактів.

Опір резисторів із топологією рис. 7.3, б (використовують базову область структури) визначають за співвідношенням

$$R = \rho_s \left(\frac{l}{w} + 2k_2 \right),$$

де $k_2 = 0,65$ (за мінімальної віддалі від контактної області до краю дифузійної області резистора). Якщо резистор має форму змійки (рис. 7.3, в), його опір визначають за виразом

$$R = \rho_s \left(\frac{l_\Sigma}{w} + 2k_2 + 0,55n \right),$$

де l_Σ – сумарна довжина лінійних ділянок; n – кількість вигинів резистора на 90° .

Опір пінч-резистора (рис. 7.3, г) знаходять так:

$$R = \rho_s \frac{l_2}{w} + \rho_s \left(\frac{l_1 + l_3}{w} + 2k_2 \right),$$

де ρ_s – поверхневі опори бази під емітером; ρ_s – поверхневий опір бази.

Таблиця 7.2

Параметри інтегральних резисторів

Тип дифузійного шару	ρ_s , Ом/кв	Розкид R , %	ТКС, $1/^\circ\text{C}$
Емітер	2–3	± 20	$1 \div 5 \cdot 10^{-4}$
База	100–300	± 5 – 20	$1,5 \div 3 \cdot 10^{-3}$
Пінч-резистор	$5 \div 10 \cdot 10^{-3}$	± 30 – 50	$3 \div 5 \cdot 10^{-3}$
Колектор	$5 \cdot 10^{-3}$	± 30	$5 \div 5,5 \cdot 10^{-3}$

У реальних дифузійних шарах напівпровідника опір максимальний у глибині напівпровідника і мінімальний біля його поверхні, що відповідає нерівномірному розподілу домішок у процесі дифузії. Для такого випадку враховують середнє значення опору ρ_n шару напівпровідника:

$$\rho_n = \frac{1}{q\mu Nd},$$

де q – заряд електрона; μ – середнє значення рухливості в дифузійному шарі; N – середня концентрація основної домішки; d – товщина резистивного шару.

7.2.2. Конструювання і розрахунок параметрів конденсаторів

Вихідними даними для розрахунку конденсатора є: необхідне значення ємності C і допуск на нього ΔC ; робоча напруга U , V ; інтервал робочих температур ΔT °C; робоча частота f , Гц; основні технологічні та конструктивні обмеження. Для розрахунку необхідно вибрати тип і конструкцію конденсатора, визначити його геометричні розміри, займану площу.

На рис. 7.4 зображено структури конденсаторів напівпровідникових ЗІС, а їхні характеристики подано в табл. 7.3.

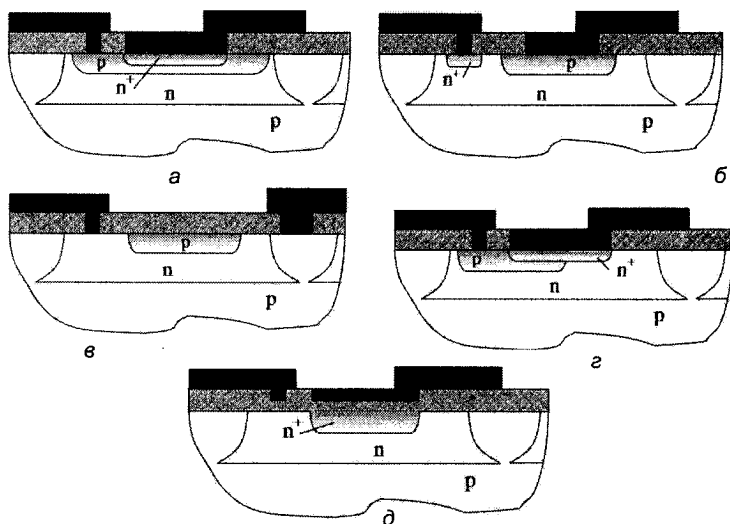


Рис. 7.4. Структури конденсаторів напівпровідникових ЗІС на основі переходів Є-Б (а), К-Б (б), К-Н (в), паралельно ввімкнутих переходів Є-Б і К-Б (г), МДН- конденсатора (д)

Ємність дифузійного конденсатора прямокутної форми на основі зворотно зміщеного $p-n$ -переходу можна оцінити за

$$C = C_{\text{донн}} + C_{\text{бок}} = C_o \alpha b + C_{ob} (\alpha + b) x_j$$

де C_o і C_{ob} – питомі ємності донної та бокової частини $p-n$ -переходу; α , b і x_j – геометричні розміри $p-n$ -переходу.

Співвідношення доданків залежить від відношення α/b . Оптимальним є відношення $\alpha/b = 1$, причому частка “бокової” ємності залишається мінімальною. Для курсового проектування достатньо визначити C_o і C_{ob} за табл. 7.3.

Таблиця 7.3

Параметри інтегральних конденсаторів

Тип конденсатора	Питома ємність C_o , пФ/мм	Максимальна ємність $C_{\text{макс}}$, пФ	Допуск δ , %	ТКО (α_C) $\times 10^{-3}$ 1/°C	Пробивна напруга $U_{пр}$, В	Добротність*
ДК на переходах:						
Б – К	150 (350)**	300	$\pm 15 \div 20$	-1,0	30–70	50–100
Є – Б	600(1000)**	1200	± 20	-1,0	7–8	1–20
К – П	100(250)**	–	$\pm 15 \div 20$	–	35–70	–
МДН з діелектриком:						
SiO ₂	400–600	500	± 20	0,015	30–50	25–80
Si ₃ N ₄	800–1600	1200	± 20	0,01	50	20–100
Тонкоплівкові з діелектриком:						
SiO ₂	500–800	650	± 20	$\div 3$	20–40	10–100
Si ₃ N ₄	3000–5500	4500	± 20	2–5	20	10–100

* Для ДК на частоті 1 МГц, для МДН і тонкоплівкових конденсаторів на частоті 10 МГц.

** У дужках вказано значення C_o для вертикальних (бокових) стінок $p-n$ -переходу.

За заданими значеннями C , C_o , $C_{об}$, x_j знаходять геометричні розміри конденсатора квадратної форми; якщо для топології ІМС необхідний конденсатор прямокутної форми, то один із розмірів прямокутника вибирають із конструктивних міркувань. Розрахунок спрощується, якщо значенням $C_{бок}$ знехтувати. Для розрахунку ΔC необхідно врахувати похибки технології при виконанні геометричних розмірів дифузійних шарів і відхилення ємності від номінального значення внаслідок зміни температури.

Ємність МДН-конденсатора визначають за виразом

$$C = 0,0885 \epsilon S/d = C_o S,$$

де ϵ і d – відносна діелектрична проникність (для SiO_2 $\epsilon = 4$) і товщина діелектрика; C_o – питома ємність (див. табл. 7.3); S – площа верхньої обкладки конденсатора.

Характерною особливістю кремнієвих інтегральних структур, створених епітаксійно-дифузійним способом, є велика різниця концентрацій домішок (2–3 порядку) з двох боків p - n -переходу. З цієї причини об'ємний заряд p - n -переходу поширюється фактично тільки в бік високоомної області. Такого типу p - n -перехід є одностороннім. Розраховувати його питому ємність можна за формулою, отриманою для ступінчатого переходу:

$$C_o = \left[\frac{q \epsilon_r \epsilon_o N}{2(U_{зсп} + U_k)} \right]^{1/2},$$

де N – результуюча концентрація домішок на слабколегованому боці напівпровідника; $U_{зсп}$ – напруга зворотного зміщення, прикладена до p - n -переходу; U_k – контактна різниця потенціалів на p - n -переході.

7.2.3. Конструкція інтегральних діодів

Будь-який з p - n -переходів планарно-епітаксійної структури може бути використаний для формування діодів, але тільки переходи база – емітер і база – колектор насправді придатні для схемних застосувань. П'ять можливих варіантів діодного ввімкнення інтегрального транзистора показано на рис. 7.5.

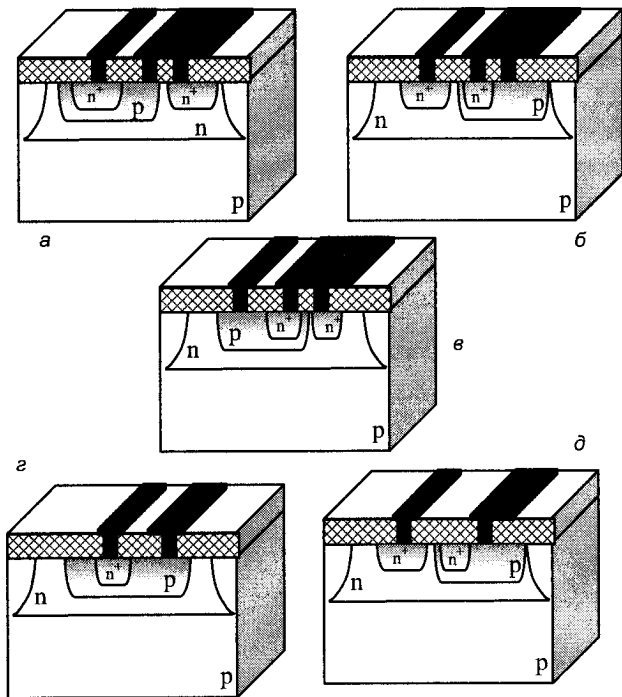


Рис. 7.5. Конструкція інтегральних діодів: а – перехід база – емітер з колектором, закороченим на базу; б – перехід колектор – база з емітером, закороченим на базу; в – паралельне ввімкнення двох переходів; г – перехід база – емітер з розімкнутим ланцюгом колектора; д – перехід база – колектор з розімкнутим ланцюгом емітера

Параметри інтегральних діодів наведено в табл. 7.4.

Таблиця 7.4

Параметри інтегральних діодів

Варіант ввімкнення	Значення параметрів				
	Пробивна напруга U_{np} , В	Зворотний струм $I_{зв}$, нА	Ємність діода C_d , пФ	Паразитна ємність на підкладку C_o , пФ	Час відновлення зворотного струму $t_{в}$, нс
1	2	3	4	5	6
БК – Е	7–8	0,5–1,0	0,5	3	10

1	2	3	4	5	6
БЕ – К	40–50	15–30	0,7	3	50
Б – ЕК	7–8	20–40	1,2	3	100
Б – Е	7–8	0,5–1,0	0,5	1,2	50
Б – К	40–50	15–30	0,7	3	75

Примітка: для позначення варіантів діодного ввімкнення транзистора прийнято такі скорочення: ліворуч від тире вказують позначення анода, праворуч – катода; якщо дві області транзистора з'єднані, то пишуть разом.

7.2.4. Параметри транзисторів типу $n-p-n$

Біполярний транзистор типу $n-p-n$ є основним схемним елементом напівпровідникових ЗІС. Він має кращі характеристики, ніж транзистор типу $p-n-p$, а технологія його виготовлення простіша. Решту елементи ЗІС вибирають і конструюють так, щоб вони зміщувались зі структурою транзистора $n-p-n$ -типу. Їх виготовляють одночасно з транзистором типу $n-p-n$ на основі будь-якої з його областей. Отже, вибір фізичної структури транзистора типу $n-p-n$ визначає основні електричні параметри решти елементів мікросхеми.

Таблиця 7.5

Параметри областей інтегрального транзистора $n-p-n$ типу

Назва області	Концентрація домішки N , см^{-3}	Товщина шару d , мкм	Питомий об'ємний опір матеріалу ρ , Ом·см	Питомий поверхневий опір шару ρ_s , Ом/□
1	2	3	4	5
Підкладка p -типу	$1,5 \cdot 10^{15}$	200–400	10	–
Прихований n^+ -шар	–	2,5– 10	–	10– 30
Колекторна n -область	10^{16}	2,5–10	1,5–5,0	–

1	2	3	4	5
Базова р-область	$5 \cdot 10^{18}$	1,5–2,5	–	100–300
Емітерна n-область	–	0,5–2,0	–	2–15
Ізолююча область	–	3,5–12	–	6–10
Плівка оксиду кремнію	–	0,3–0,6	–	–
Металева плівка (алюміній)		0,6–1,0	$1,7 \cdot 10^{-6}$	0,06–0,1

Примітка: N – об'ємна концентрація домішки для підкладки і колекторної області та поверхнева концентрація домішки для емітерної та базової областей.

7.2.5. Конструктивні особливості між'єднань і контактних площадок

З'єднання. Елементи ЗІС електрично з'єднані між собою за допомогою алюмінієвої розводки завтовшки до 0,8 мкм. Якщо в одношаровій розводці не вдається уникнути перетинів, то застосовують дифузійні перемички (рис. 7.6).

Йдеться про ізоляцію двох взаємно перпендикулярних провідників, перший з яких розміщений згори захисного оксиду, другий – у вигляді ділянки n^+ -шару. Ця ділянка має помітний опір (3–5 Ом), вносить додаткову паразитну ємність і займає порівняно велику площу, тому дифузійною перемичкою користуються у виняткових випадках. Дифузійні перемички не застосовують у колах живлення, в яких протікають великі струми.

Контактні площадки. Контактні площадки (КП), розміщені переважно по периферії напівпровідникового кристала, слугують для створення з'єднань напівпровідникової схеми з виводами корпусу за допомогою золотих або алюмінієвих дротинок за методом термокомпресії. Для КП використовують той самий матеріал, що і для створення розводки (алюміній); КП формують одночасно зі створенням розводки. Для запобігання замиканню КП

на підкладку у разі порушення цілісності оксиду під час термокомпресії під кожною КП формують ізольовану область (за винятком КП, з'єднаних із провідниками, що мають контакт з підкладкою). Конструкцію КП наведено на рис. 7.7.

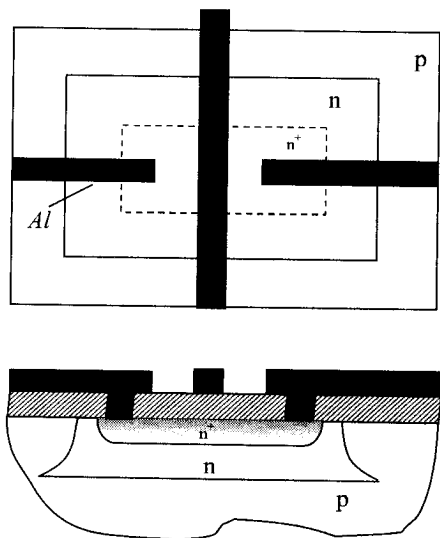


Рис. 7.6. Конструкція дифузійної перемички

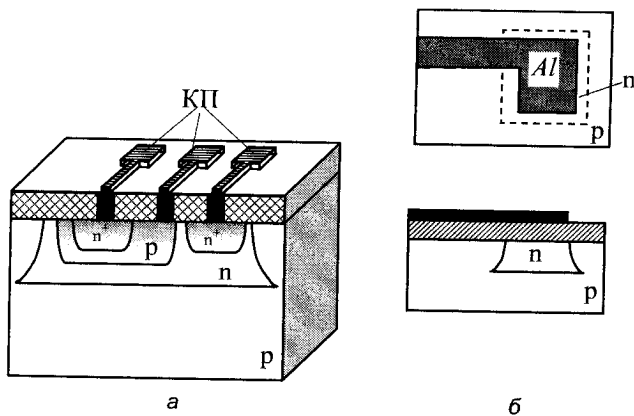


Рис. 7.7. Конструкція міжз'єднань (а) і контактної площадки (б) ЗІС

7.2.6. Топологія фігур суміщення

Фігури зміщення належать до допоміжних елементів ЗІС, необхідних для точного виконання операції суміщення рисунка фотошаблону при фотолітографії з рисунком раніше створених шарів. Кількість фігур суміщення на одиницю менша від кількості операцій фотолітографії, використаних для виготовлення ЗІС (рис. 7.8). Фігури суміщення можуть мати різну форму (рис. 7.9).

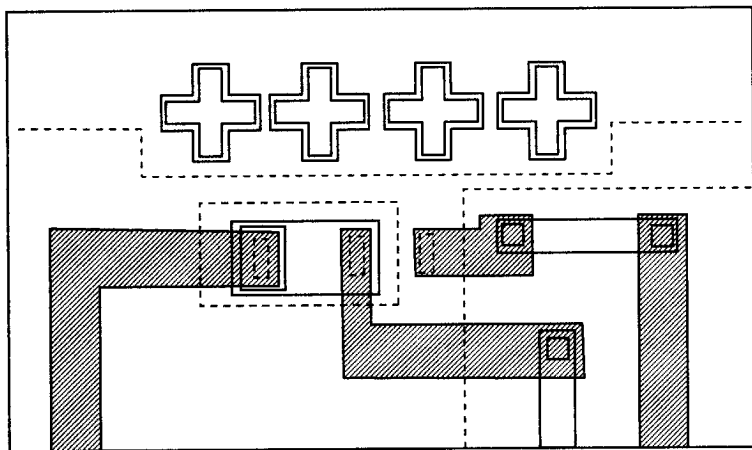


Рис. 7.8. Фрагмент топології ЗІС із фігурами суміщення

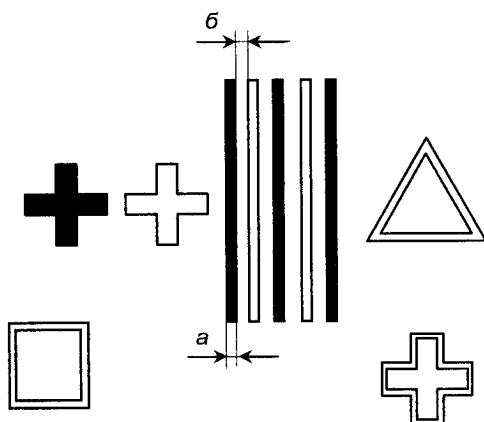


Рис. 7.9. Варіанти фігур суміщення

7.3. Топологічні графи електричних кіл

Для побудови топології електричних схем застосовують метод аналізу топологічних графів, що описують електричне коло. Загалом граф – це сукупність відрізків довільної довжини і форми так званих гілок (ребер), а точки їх з'єднання називають вузлами (вершинами). В теорії електричних кіл переважно застосовують напрямлені, або орієнтовані графи, в яких кожному ребру відповідає певний напрямок, позначений стрілкою. Розрізняють напрямлені топологічні графи і напрямлені графи проходження сигналів. Направлений топологічний граф є спрощеною моделлю електричного кола, що відображає тільки її топологічні (структурні) властивості. Направлений граф проходження сигналів являє собою наочне графічне зображення системи рівнянь, що описує процеси в електричному колі. Надалі називатимемо напрямлений граф проходження сигналів сигнальним графом, а напрямлений топологічний граф – просто графом кола.

Граф електричного кола складають за її еквівалентною схемою. Кожну гілку кола замінюють при цьому відрізком довільної довжини і форми – гілкою графу, а кожний вузол кола перетворюють на вузол графу. На гілках графу стрілками вказують на їх напрямки, який збігається з додатним напрямком струмів, які протікають по відповідним

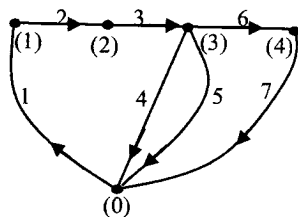
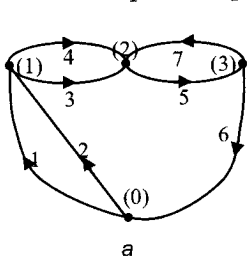


Рис. 7.10. Топологічний граф електричного кола

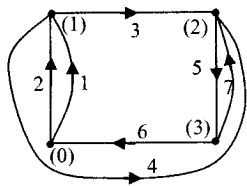
гілкам кола. Нумерація гілок і вузлів графу така, як і нумерація гілок і вузлів схеми. Топологічному опису будь-якого електричного кола ЗІС (див. рис. 7.10) відповідає топологічний граф кола.

Властивості графу не залежать від форми і довжини гілок, а також від взаємного розташування вузлів графу на площині та визначаються тільки кількістю гілок p , кількістю вузлів q і способом з'єднання гілок між собою. Графи, які мають однакові кількості вузлів і гілок, з'єднаних між собою однаково, називають ізоморф-

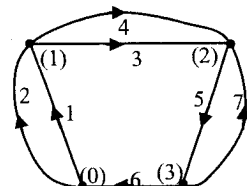
ними (рис. 7.11). Змінюючи довжину і форму гілок, а також взаємне розміщення вузлів графу на площині, можна отримати безмежну кількість вузлів графів, ізоморфних вихідним. Такі перетворення графу називають ізоморфними перетвореннями. Кожний з варіантів зображення графу, отриманих такими перетвореннями, називається його геометричною реалізацією.



а



б



в

Рис. 7.11. Ізоморфні графи

Якщо вузол i є кінцем гілки j , то говорять, що вони інцидентні (від англ. *incidence* – сфера дії, захват). Кожна гілка графу інцидентна двом вузлам. Частина графу, яка поряд із деякою підмножиною гілок графу містить і всі інцидентні їм вузли, називають підграфом.

Ступенем вузла називають кількість гілок графу, інцидентних певному вузлу. На рис. 7.11, а вузли (1) і (4) мають другий ступінь, вузли (0) і (3) – четвертий.

Матриця інцидентності графу – це матриця, значення елементів якої характеризуються інцидентністю відповідних вершин графу (по вертикалі) та його ребер (по горизонталі). Для неорієнтованого графу елемент набуває значення 1, якщо відповідна йому вершина і ребро інцидентні. Для орієнтованого графу елемент набуває значення 1, якщо інцидентна вершина є початком ребра, значення -1, якщо інцидентна вершина є кінцем ребра; у решті випадків (зокрема для петель) значенню елемента присвоюється 0.

Графи, ізоморфні з точністю до вузлів другого ступеня, називають гомеоморфними. Після видалення із гомеоморфних графів вузлів другого ступеня і об'єднання інцидентних цим вершинам гілок гомеоморфні графи стають ізоморфними.

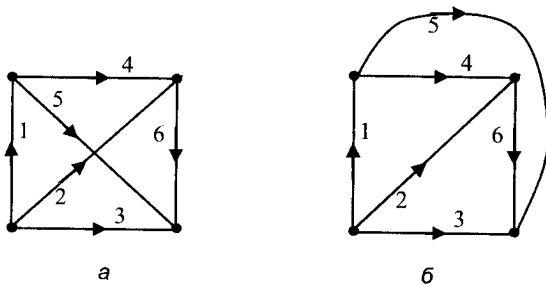


Рис. 7.12. Видалення перетинів гілок графу за допомогою ізоморфних перетворень

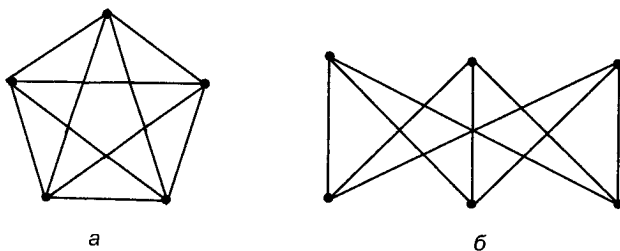


Рис. 7.13. Графи Понтрягіна–Кураторського: а – повний п'ятикутник; б – дводольний

Планарним (плоским) називають такий граф, який у результаті ізоморфних перетворень можна зобразити на площині без перетину гілок. Так, граф, зображений на рис. 7.12, а, містить дві гілки, які перетинаються, але він є планарним, оскільки існує ізоморфний йому граф, в якому гілки не перетинаються (рис. 7.12, б). Можна переконатися, що всі графи, що містять не більше від чотирьох вузлів, є планарними.

Непланарний (об'ємний) граф не можна зобразити на площині без перетину гілок (рис. 7.13). У разі видалення із зображених на рисунку графів будь-якої гілки вони стають планарними. Повний п'ятикутник і дводольний граф (рис. 7.13) називають також графами Понтрягіна–Кураторського [71]. Доведено, що довільний граф є планарним тоді і тільки тоді, коли він не містить підграфів, гомеоморфних одному з графів Понтрягіна–Кураторського. Елект-

ричну схему, якій відповідає планарний граф, також називають планарною. Непланарній схемі відповідає непланарний граф. Так вводять поняття планарних і непланарних ідеалізованих електричних кіл.

Планарний граф ділить площину, на якій його зображено, на зовнішню і внутрішню області. Внутрішні області, обмежені гілками графу, називають комірками, або вікнами графу. Зовнішню відносно графу частину площини називають базисною коміркою.

Шлях – це підграф послідовно з'єднаних між собою гілок, вибраних так, що кожному вузлу (за винятком двох граничних вузлів) інцидентні дві гілки, а граничним вузлам інцидентні по одній гілці (рис. 7.14). Кожна гілка і вузол трапляються на шляху тільки один раз.

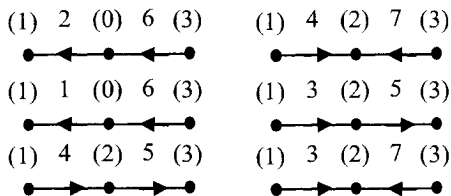


Рис. 7.14. Різні шляхи між вершинами (1) і (3) графу, зображеного на рис. 7.11

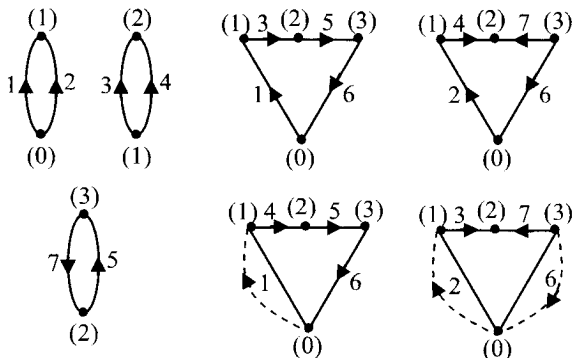


Рис. 7.15. Деякі з контурів графу, зображеного на рис. 7.11

Замкнутий шлях, тобто шлях, в якому початкові та кінцеві вузли збігаються, називають контуром (рис. 7.15). Кожному з вузлів контура інцидентні дві гілки. Очевидно, що між контурами графу і контурами вихідного кола існують взаємно однозначні відповідності.

Зв'язаний граф – це граф між будь-якими двома вузлами, що мають один шлях (див. рис. 7.10–7.13).

Деревом зв'язаного графу називають зв'язаний підграф, що містить всі вузли графу, але не містить жодного контура. Гілки графу, що входять до дерева, називають ребрами; гілки, що не входять до дерева, називають хордами. Кожному графу може відповідати декілька дерев, що відрізняються між собою кількістю гілок дерева (рис. 7.16). Кожне з дерев графу містить p гілок і q вузлів, має $m=q-1$ ребра і $n=p-q+1$ хорд. При побудові дерев графів електричних кіл до гілок дерева обов'язково вносять гілки, що відповідають ідеалізованим джерелам напруги. Гілки графу, що відповідають гілкам кола, що містять ідеалізовані джерела струму, до гілок дерева не вносять.

Нормальним деревом графу називають таке дерево, до якого гілки графу входять з таким пріоритетом: спочатку гілки E , потім гілки S і далі гілки R, L, J .

Гілки можуть бути такими: $K - C$ – ємнісне ребро; $K - S$ – ємнісна хорда; $K - R$ – резистивна хорда; $K - r$ – резистивне ребро; $K - L$ – індуктивна хорда; $K - \Gamma$ – індуктивне ребро; $K - E$ – ребро джерела живлення; $K - J$ – хорда джерела струму.

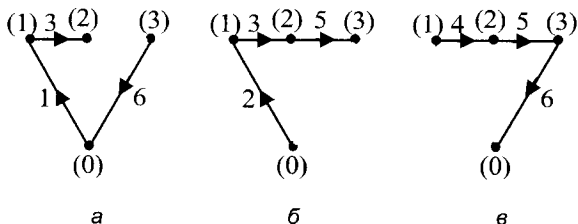


Рис. 7.16. Деякі з дерев графу, зображені на рис. 7.11

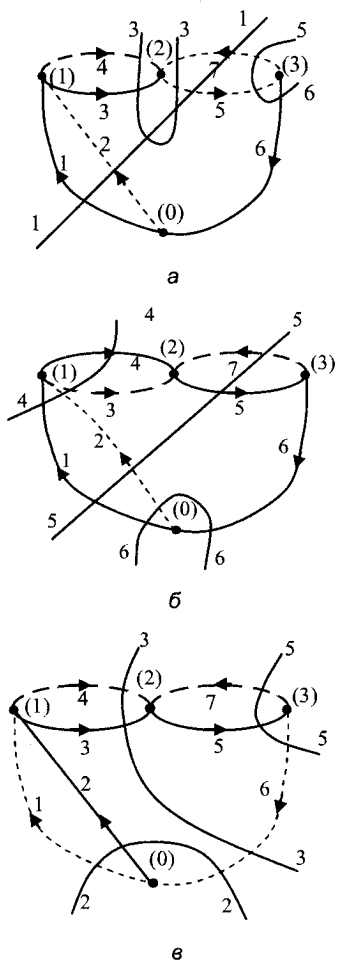


Рис. 7.17. Головні перерізи графу, наведені на рис.7.11, що відповідають деревам на: а – рис. 7.16, а; б – рис. 7.16, б; в – рис. 7.16, в

і приписують орієнтацію, яка збігається з номером відповідної гілки дерева та її орієнтацією відносно лінії перетину.

Додавання до дерева графу будь-якої хорди утворює контур. Контури, утворені по черговим додаванням до дерева графу його хорди, називають головними контурами. Отже, головний контур складається з гілок дерева і однієї хорди. Кожному дереву відповідає своя система з $n=p-q+1$ головних контурів, що відповідають певному дереву, відрізняються один від одного однією гілкою, хордою, яка входить в кожен із головних контурів. Кожному головному контуру присвоюють номер і приписують орієнтацію, яка збігається з номером і орієнтацією відповідної хорди, оскільки з видаленням цих гілок граф розпадається більш ніж на дві частини.

Головним перерізом графу називають такий, до якого входить тільки одна гілка вибраного дерева. Решта гілок, що входять до головного перерізу, є зв'язками (рис. 7.17). Кількість головних перерізів дорівнює кількості гілок дерева, тобто $m=q-1$. Кожному дереву має відповідати своя система головних перерізів, причому головні перерізи, що відповідають вибраному дереву, відрізняються один від одного однією гілкою – гілкою дерева, яка входить до кожного перерізу. Головним перерізам графу присвоюють номери

Якщо одна з частин, на які граф ділиться лінією перерізу, являє собою ізольований вузол, то відповідний переріз називають канонічним (переріз 3 і 6 на першому з графів, зображених на рис. 7.17).

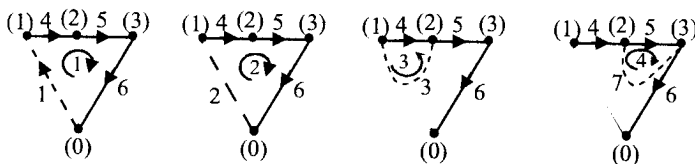


Рис. 7.18. Головні контури графу (рис. 7.11), що відповідають дереву (рис. 7.16, в)

Перерізом графу називають сукупність гілок зв'язаного графу, що перетинаються замкнутою лінією (лінією перерізу) або замкнутою поверхнею (поверхнею перерізу), що поділяє граф на дві частини, причому жодна з гілок графу не перетинається двічі. Якщо видалити зі зв'язаного графу гілки, що утворюють переріз, вони розпадуться на дві частини, одна з яких може бути ізольованим вузлом.

7.4. Топологічні матриці

Для спрощеного запису рівнянь за законами Кірхгофа використовують так звані топологічні матриці M і A .

M – матриця контурів, порядок якої $n_{xx} \times n_p$; її стовпці відповідають ребрам, а рядки – хордам;

A – матриця перерізів $n_p \times n_x$, її стовпці відповідають хордам, а рядки – ребрам.

Матриці A і M зв'язані $A = M^t M^t$ – транспонована M -матриця.

Запис рівняння за законом Кірхгофа для напруг у матричній формі такий:

$$U_x = -MU_p,$$

де U_x і U_p – відповідно вектори напруг хорд і ребер.

Рівняння Кірхгофа для струмів у матричній формі:

$$I_p = A \cdot I_x,$$

де I_p і I_x – вектори струмів відповідно ребер і хорд. Тоді співвідношення для I_p має вигляд:

$$I_p = M^t \cdot I_x.$$

Правила побудови M-матриці:

По горизонталі вказують спочатку ребра, які відповідають джерелам напруги E , потім ємностям C , опорам r і нарешті індуктивності L . По вертикалі вказують спочатку хорди, які відповідають ємностям S , опорам R , індуктивностям L і нарешті джерелам струму J .

M -матриці будують на основі аналізу напрямків напруг у контурах. Якщо при обході контура напруги на ребрах напрямлені в той самий бік, що й напруга на хорді, беремо $+1$, якщо назустріч, то -1 , для всіх інших ребер буде 0 .

Запишемо топологічну M -матрицю.

X/P	E1	E2	E3	C1	C2	C3	R1	R4	R5
R2	•	•	•	-1	•	•	•	•	•
R3	+1	-1	•	+1	•	•	+1	•	•
R6	+1	•	•	+1	•	+1	+1	•	+1
R7	•	•	•	•	-1	•	•	•	•
R8	•	•	•	•	•	-1	•	•	•
R9	•	•	-1	•	+1	-1	•	+1	-1
I1	•	•	•	•	-1	•	•	•	•
I2	•	•	•	•	•	-1	•	•	•
I3	•	•	•	•	+1	-1	•	•	•

Отже, рівняння напруг за законом Кірхгофа для $lx = 9$ мають вигляд:

$$1. U_{R_2} = U_{C_1},$$

$$2. U_{R_3} = -U_{E_1} + U_{E_2} - U_{C_1} - U_{R_1},$$

$$3. U_{R_6} = U_{E_1} - U_{C_1} - U_{C_3} - U_{R_1} - U_{R_5},$$

4. $U_{R_7} = U_{C_2}$,
5. $U_{R_8} = U_{C_3}$,
6. $U_{R_9} = U_{E_3} - U_{C_2} + U_{C_3} - U_{R_4} + U_{R_5}$,
7. $U_{I_1} = U_{C_2}$,
8. $U_{I_2} = U_{C_3}$,
9. $U_{I_3} = -U_{C_2} + U_{C_3}$.

Слід зазначити, що ця система рівнянь є лінійно незалежною.

Правила побудови А-матриці:

По горизонталі вказують спочатку хорди, які відповідають ємностям S , опорам R , індуктивностям L і нарешті джерелам струму J . По вертикалі вказують спочатку ребра, які відповідають джерелам напруги E , потім ємностям C , опорам R і нарешті індуктивностям L .

А-матриці будують на основі аналізу напрямків струмів у перерізах. Якщо струми хорди напрямлені відносно перерізу в той самий бік, що й струм ребра, беремо -1 , якщо в протилежні напрямки, то $+1$. Для всіх інших хорд буде 0 .

Матриця А

P/X	R2	R3	R6	R7	R8	R9	I1	I2	I3
E1	•	+1	+1	•	•	•	•	•	•
E2	•	-1	•	•	•	•	•	•	•
E3	•	•	•	•	•	-1	•	•	•
C1	-1	+1	+1	•	•	•	•	•	•
C2	•	•	•	-1	•	+1	-1	•	+1
C3	•	•	+1	•	-1	-1	•	-1	-1
R1	•	+1	+1	•	•	•	•	•	•
R4	•	•	•	•	•	+1	•	•	•
R5	•	•	+1	•	•	-1	•	•	•

Отже, рівняння для струмів за законом Кірхгофа для $np = 9$ перерізів мають вигляд:

1. $I_{E_1} = I_{R_3} + I_{R_6}$,
2. $I_{E_2} = -I_{R_3}$,
3. $I_{E_3} = -I_{R_9}$,
4. $I_C = -I_{R_2} + I_{R_3} + I_{R_6}$,
5. $I_{C_2} = -I_{R_7} + I_{R_9} - I_{I_1} + I_{I_3}$,
6. $I_{C_3} = I_{R_6} - I_{R_8} - I_{R_9} - I_{I_2} - I_{I_3}$,
7. $I_{R_1} = I_{R_3} + I_{R_6}$,
8. $I_{R_4} = I_{R_9}$,
9. $I_{R_5} = I_{R_6} - I_{R_9}$.

Слід зазначити, що ця система рівнянь також є лінійно незалежною.

Загалом M -матриця складається із 16 підматриць, в позначеннях яких індекси вказують, між якими гілками підматриця відображає топологічні зв'язки:

$$M = \begin{bmatrix} M_{SE} & M_{SC} & M_{Sr} & M_{SF} \\ M_{RE} & M_{RC} & M_{Rr} & M_{RF} \\ M_{LE} & M_{LC} & M_{Lr} & M_{LF} \\ M_{JE} & M_{JC} & M_{Jr} & M_{JF} \end{bmatrix}$$

Якщо матрицю складають на основі нормального дерева, то підматриці M_{Sr} , M_{SF} , M_{Rr} завжди дорівнюють нулю.

7.5. Розроблення топології ЗІС

Основою для розроблення топології напівпровідникової ЗІС є електрична схема, вимоги до електричних параметрів і до параметрів активних і пасивних елементів, конструктивно-технологічні вимоги і обмеження.

Розроблення рисунка топології має такі етапи: вибір конструкції і розрахунок активних і пасивних елементів ЗІС; розміщення елементів

на поверхні і в об'ємі підкладки і створення рисунка розводки (комутації) між елементами; розроблення попереднього варіанта топології; оцінювання якості топології та її оптимізацію; розроблення кінцевого варіанта топології. Метою роботи конструктора при розробленні топології є мінімізація сумарної довжини розводки і кількості перетинів в ній.

Важливою технологічною характеристикою, що визначає горизонтальні розміри областей транзисторів та інших елементів ЗІС, є мінімальний геометричний розмір, який може бути сформований за заданого рівня технології, наприклад, мінімальна ширина вікна в оксиді кремнію, мінімальна ширина провідника, мінімальна відстань між провідниками, мінімальна відстань між краями емітерної та базової областей і т. д. Нехай мінімальний розмір, який може забезпечити технологія, дорівнює d . Тоді розміри активних областей і самого транзистора за мінімальної його площі визначають величинами, наведеними на рис. 7.19. Відстань між областю, що займає транзистор, та іншими елементами ЗІС більша від мінімального розміру d на величину бічної дифузії під оксид, яка за роздільної дифузії приблизно дорівнює товщині епітаксійного шару d_a . Отже, за мінімального розміру 10 мкм мінімальна довжина транзистора $\approx 130\text{ мкм}$. За досягнутого в цей час рівня технології, що характеризується мінімальним розміром 4 мкм , мінімальна довжина транзистора $\approx 60\text{ мкм}$. За мінімального розміру $1,5\text{--}2\text{ мкм}$, граничного для оптичної фотолітографії, розмір транзистора за $d=3\text{ мкм}$ становить $\approx 28\text{ мкм}$.

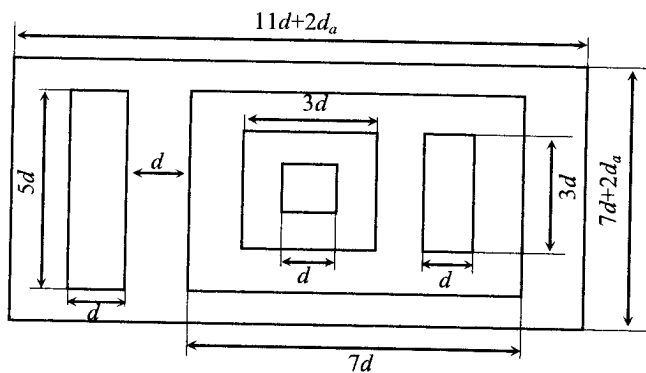


Рис. 7.19. Співвідношення розмірів областей транзистора зі стандартним розміром d

7.6. Правила проектування топології напівпровідникової ЗІС

Розроблення топології ЗІС – творчий процес, і його результати істотно залежать від індивідуальних властивостей розробника, його навичок і знань. Сутність роботи із створення топології ЗІС зводиться до знаходження такого оптимального варіанта взаємного розміщення елементів схеми, за якого забезпечують високі показники ефективності виробництва і якості ЗІС: низький рівень бракованих виробів, низка вартість, матеріалоємність, висока надійність, відповідність отриманих електричних параметрів, які задавали. Наведені тут правила проектування є узагальненням досвіду проектування ЗІС на біполярних транзисторах.

Розроблення топології розпочинають після того, як кількість, типи і геометричну форму ЗІС визначено.

Правила проектування ізольованих областей. Кількість і розміри ізольованих областей впливають на характеристики ЗІС, тому:

1) сумарна площа ізолювальних p - n -переходів повинна бути мінімальною, їхня сміст є паразитною. Мінімальні розміри ізольованої області визначаються геометричними розмірами елементів, що знаходяться в ній, і щілинами, які необхідно витримувати між краєм ізольованої області та елементами і між самими елементами, розташованими в одній ізольованій області;

2) до ізольованих p - n -переходів завжди прикладається напруга зворотного зміщення, що здійснюється приєднанням підкладки p -типу, або області роздільної дифузії p -типу, до точки схеми з найбільш від'ємним потенціалом. При цьому сумарна зворотна напруга, прикладена до ізолюючого p - n -переходу, не повинна перевищувати напругу пробою;

3) дифузійні резистори, що формуються на основі базового шару, можна розмістити в одній ізольованій області, яка під'єднується до точки схеми з найбільшим додатним потенціалом. Переважно такою точкою є контактна площадка ЗІС, на яку подається напруга зміщення від колекторного джерела живлення;

4) резистори на основі емітерного і колекторного шарів необхідно розміщувати в окремих ізольованих областях;

5) транзистори типу $n-p-n$, колектори яких під'єднано до джерела живлення, потрібно розміщувати в одній ізольованій області разом з резисторами;

6) транзистори типу $n-p-n$, які ввімкнено за схемою зі спільним колектором, можна розміщати в одній ізольованій області;

7) всі інші транзистори, крім згаданих у п. 5 і 6, необхідно розміщувати в окремих ізольованих областях, тобто всі колекторні області, що мають різні потенціали, повинні бути ізольованими;

8) для зменшення паразитної ємності між контактними площадками і підкладкою, а також для захисту від короткого замикання у разі порушення цілісності плівки оксиду під ними внаслідок приварювання дротяних виводів під кожною контактною площадкою створюють ізольовану область, за винятком контактних площадок із найбільшим від'ємним потенціалом;

9) кількість ізольованих областей для діодів може значно змінюватися залежно від типу діодів і способів їх ввімкнення. Якщо як діоди використовують переходи база – колектор, то для кожного діода необхідна окрема ізольована область, оскільки кожний катод (колекторна область n -типу) повинен мати окремий вивід. Якщо як діоди використовують переходи емітер – база, то всі діоди можна помістити в одній ізольованій області. При цьому всі катоди діодів (емітерні області) сформовані окремо в загальному аноді (базова область). Аноди діодів за допомогою з'єднувальної металізації закорочують на ізольовану (колекторну) область;

10) для дифузійних конденсаторів необхідні окремі ізольовані області. Винятком є випадки, коли один із виводів конденсатора є спільним з іншою ізольованою областю;

11) для дифузійних перемичок завжди необхідні окремі ізольовані області.

Правила розташування елементів ЗІС на площі кристала. Після визначення кількості ізольованих областей їх розміщують у потрібній послідовності, розміщують елементи, з'єднують їх між собою і з контактними площадками за такими правилами:

1) під час розміщення елементів ЗІС і виконання щілин між ними необхідно строго дотримуватися обмежень, що відповідають типовому технологічному процесу;

2) резистори, в яких потрібно точно витримувати відношення номіналів, повинні мати однакову ширину і конфігурацію і розміщуватися поруч один з одним. Це стосується й інших елементів ЗІС, яким необхідно забезпечити точне співвідношення їх характеристик;

3) резистори з великою потужністю не потрібно розміщувати поблизу активних елементів;

4) дифузійні резистори можна перетинати провідною доріжкою поверх шару оксиду кремнію, що покриває резистор;

5) форма і місце розташування конденсаторів не є критичними;

6) з'єднання, що використовують для живлення, заземлення, вхідні і вихідні виводи необхідно виконувати у вигляді широких і коротких смужок, що зменшує паразитні опори;

7) для покращання розв'язки між ізольованими областями контакт до підкладки необхідно розміщати поруч з потужним транзистором або ближче до входу або виходу схеми;

8) кількість зовнішніх виводів у схемі, а також порядок розміщення і позначення контактних площадок виводів ЗІС на кристалі повинні відповідати виводам корпусу;

9) комутація в ЗІС повинна мати мінімальну кількість перетинів і мінімальну довжину провідних доріжок. Якщо повністю уникнути перетинів не вдається, їх можна здійснити, використовуючи обкладки конденсаторів, формуючи додаткові контакти до колекторних областей транзисторів, застосовуючи дифузійні перемички, створюючи додатковий шар ізоляції між провідниками, що перетинаються;

10) першу контактну площадку розміщують в нижньому лівому куті кристала і відокремлюють від решти за її положенням відносно фігур зміщення. Інші контактні площадки нумерують проти годинникової стрілки. Контактні площадки розміщують залежно від типу вибраного корпусу за периметром кристала або за двома протилежними його сторонами;

11) фігури суміщення розміщують однією–двома групами на будь-якому вільному місті кристала;

12) під час розроблення аналогових ЗІС елементи вхідних диференційних каскадів повинні мати однакову топологію і бути однаково орієнтованими в площині кристала; для зменшення теплового зв'язку вхідні та вихідні каскади повинні бути максимально видаленими; для зменшення високочастотного зв'язку через підкладку контакт необхідно здійснювати в двох точках – поблизу вхідних і вихідних каскадів.

7.7. Рекомендації щодо розроблення ескізу топології

На етапі ескізного проектування топології необхідно передбачити виконання таких завдань: розмістити якомога більше резисторів в одній ізольованій області; подати найбільший потенціал на ізольовану область, де розміщені резистори; подати найбільший від'ємний потенціал на підкладку поблизу потужного транзистора вихідного каскаду; розосередити елементи, на яких розсіюються великі потужності, розмістити елементи з найменшими розмірами і з найменшими запасами на суміщення в центрі ескізу топології; зменшити кількість ізольованих областей і зменшити периметр кожної ізольованої області.

У разі, якщо принципова електрична схема містить особливі групи або періодично повторюються групи елементів, з'єднаних в одно ціле з погляду виконання ними функцій, розроблення рекомендують починати від створення ескізів топології для окремих груп елементів, потім об'єднати ці ескізи в один, що відповідає всій схемі.

Під час проектування шару металізації розміри контактних площадок і провідників необхідно брати мінімально допустимими, а віддалі між ними – максимально можливими. Після вибору розташування елементів і контактних площадок, створення рисунка розводки необхідно розмістити на топології фігури суміщення, тестові елементи (транзистори, резистори і т. д. – прилади,

призначені для заміру електричних параметрів окремих елементів схеми), реперні знаки. Фігури суміщення можуть мати будь-яку форму з наведених на рис. 7.9 (переважно квадрат або хрест), при тому необхідно врахувати, що на кожному фотошаблоні, крім першого і останнього, є дві фігури, розміщені поруч одна з однією. Менша фігура призначена для суміщення з попередньою технологічною операцією, а більша – з наступною. На першому фотошаблоні розміщено тільки велику фігуру, а на останньому – тільки малу.

Розробляючи топологію, важливо отримати мінімальну площу кристала ЗІС. Це дасть змогу збільшити виробництво, знизити матеріалоємність і підвищити вихід придатних ЗІС, оскільки на одній напівпровідниковій пластині можна розмістити велику кількість кристалів і зменшити ймовірність потрапляння дефектів на кристал. За розмірів сторони кристала до 1 мм її величину вибирають кратною 0,05 мм, а за розмірів сторони кристала 1–2 мм – кратною 0,1 мм.

Якщо після щільного розміщення всіх елементів на кристалі вибраного розміру залишилась незайнята площа, рекомендують перейти на менший розмір кристала. Якщо цей перехід неможливий, то незайману площу кристала можна використати для внесення в топологію змін, скерованих на зниження вимог до технології виготовлення напівпровідникової ЗІС. Наприклад, можна збільшити розміри контактних площадок і віддалі між контактними площадками, ширину провідників і віддалі між ними, за можливості випрямити елементи розводки, резистори, границі ізольованих областей.

Наприкінці проводять контрольні перевірені розрахунки отриманої топології мікросхеми, що містить оцінку теплового режиму і паразитних зв'язків.

Контрольні питання

1. Перелічіть основні рівні проектування топології ЗІС.
2. Які особливості ЗІС як окремого типу виробів мікросистемної техніки?

3. Опишіть основні правила проектування топології напівпровідникової ЗІС.
4. Що таке інтегральний резистор, діод, конденсатор? Основні типи та методи створення.
5. Охарактеризуйте топологічні графи електричних кіл.
6. Дайте визначення топологічної матриці.
7. Скільки ребер та хорд містить дерево графу з 11 вузлів і 19 гілок?
8. Яку мінімальну ширину повинен мати інтегральний резистор, якщо мінімальна ширина резистора, що визначається роздільною здатністю технологічних процесів 4 мкм, мінімальна ширина резистора, за якої забезпечується задана похибка геометричних розмірів, – 3 мкм, а мінімальна ширина резистора, що визначається максимально допустимою розсіюваною потужністю, – 2 мкм?
9. Визначити ширину найпростішого інтегрального резистора завдовжки 100 мкм, якщо його номінальний опір 30 кОм, а питомий поверхневий опір матеріалу – 3 Ом/□
10. Визначити питомий поверхневий опір матеріалу інтегрального резистора з коефіцієнтом форми контактів k_1 номіналом 600 Ом завдовжки 50 мкм і завширшки 10 мкм.
11. Визначити ємність дифузійного конденсатора інтегральної схеми розміром 35×35 мкм, якщо p - n -перехід залягає на глибині 600 нм, а питомі ємності його донної і бічної частини становлять 100 та 250 пФ/мм².
12. Визначити довжину інтегрального резистора з коефіцієнтом форми контактів k_1 завширшки 5 мкм, якщо його номінальний опір становить 20 Ом, а питомий поверхневий опір матеріалу – 3 Ом/□.
13. Визначити довжину під емітером інтегрального резистора з коефіцієнтом форми контактів k_2 завширшки 5 мкм, якщо його номінальний опір 80 кОм, сумарна довжина резистора не під емітером – 200 Ом/□ і 5 кОм/□, відповідно.
14. Визначити ємність дифузійного конденсатора інтегральної схеми розміром 20×25 мкм, якщо p - n -перехід залягає на глибині 100 нм, а питомі ємності його донної і бічної частин становлять 600 та 1000 пФ/мм², відповідно.
15. Визначити ширину інтегрального резистора з довжинами $l_1=l_3=5$ мкм, $l_2=50$ мкм, якщо його номінальний опір становить 1,5 кОм, питомі поверхневі опори бази і бази під емітером 150 Ом/□ і 5 кОм/□, відповідно.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Celler G. K., Cristoloveanu S. Frontiers of silicon-on-insulator // J. of Applied Physics. – 2003. – Vol. 93, No. 9. – P. 4955–4978.
2. Fenouillet-Beranger C., Richard E., Perreau P., et al. CMOS performance enhancement with FDSOI technology // 2nd French-Ukrainian seminar Kiev 8–11 April 2013. – P. 22–23.
3. Cesana Giorgio. 28 & 20nm FDSOI Technology Platforms// Technology R&D – 2013. – P. 40.
4. Nuo Xu, François Andrieu, Byron Ho, Bich-Yen Nguyen, et al. Impact of Back Biasing on Carrier Transport in Ultra-Thin-Body and BOX (UTBB) Fully Depleted SOI MOSFETs // Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers – 2012. – P. 113–114.
5. Алферов Ж. И. Полупроводниковая электроника в России. Состояние и перспективы развития / Ж. И. Алферов // Электроника: НТБ. – 2005. – № 4. – С. 5–9.
6. Cui Y., and Lieber C. M. Functional nanoscale electronic devices assembled using silicon Nanowire building blocks // Science, 291, 851–853 (2000).
7. Sensor Technology Handbook. Editor-in-Chief Jon.S. Wilson, Elsevier Inc. 2005. – 703 p.
8. Silicon – on – Insulator Technology: materials to VLSI / Collinge J.-P. Edition, by Kluwer Academic Publishers, 1997.
9. Etienne Sicard, Sonia Delmas Bendhia. Advanced CMOS cell design. McGraw-Hill, New-York. – 2007. – 383 c.
10. Kerry Bernstein, Norman J. Rochler. SOI circuit design. Kluwer Academic Press, New York. – 2002. – 321 c.

11. Kamins T. I. and Marcoux P. J. // IEEE Electron Device Letters. – 1980. – Vol. EDL – 1. – P. 159.
12. Вербицкий В. Г. Ионные нанотехнологии в электронике: монография / В. Г. Вербицкий. – К.: “МП Леся”, 2002. – 376 с.
13. Старков В. В., Аристов В. В., Желтиков А. М., Магницкий А. А., Тарасищин А. В. Создание фотонных кристаллов методами глубокого анодного травления кремния // Микросистемная техника. – 2001. – № 9. – С.37–411.
14. Настаушев Ю. В., Гаврилова Т. А., Асеев А. Л., Колосанов В. А., Качанова М. М., Ненашева Л. А., Антонова И. В., Наумова О. В., Попов В. П. Применение электронной литографии для изготовления кремниевых (КНИ) устройств нанoeлектроники // Микроэлектроника.
15. Vishwas Jaju. Silicon-on-Insulator Technology // Advances in MOSFETs. – 2004. – EE 530.
16. Kawamura S., Sasaki N., Iwai T. // Silicon – in – insulator: Ith Technology and Application/ ed. dy S. Furukawa, Dordrecht: Reidel. – P. 87–84.
17. International Technology Roadmaps for Semiconductors (ITRS-01), November 2001, Santa-Clara, Calif., USA, 2001.
18. Stengl R., Gösele U. Method for bubble-free bonding of silicon wafers // U. S. Patent N US5024723 from 11/1989.
19. Radiation // TEMIC Semiconductors. June 1999. P. 1–5.
20. Артамонов А. С., Никифоров А. Ю., Сокоян А. В., Французов А. А., Попов В. П. Экспериментальное исследование радиационного поведения SMART-CUT КНИ-структур // ВАИТ, Научно-технический сборник “Радиационная стойкость электронных систем” (“Стойкость-2001”). – 2001. – Вып. 4. – С. 37–38.
21. Ongi Englander, Dane Christensen, Mu Chiao, Jongbaeg Kim and Liwei Lin. Localized synthesis of silicon nanowires // Berkeley Sensor and Actuator Center/ TRANSDUCERS’03 The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, June 8–12, 2003. – P. 186–189.
22. Y. Cui, and C. M. Lieber, “Functional nanoscale electronic devices assembled using silicon Nanowire building blocks”, Science, 291, 851–853 (2000).
23. Rongrui He and Peidong Yang. Giant piezoresistance effect in silicon nanowires // Department of Chemistry, University of California, Materials Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley,

California 94720, USA Published online: 4 October 2006;
doi:10.1038/nnano.2006.53

24. Wee, K. W. et al. Novel electrical detection of label-free disease marker proteins using piezoresistive self-sensing micro-cantilevers. *Biosens. Bioelectron.* 20, 1932–1938 (2005).
25. Lee M. L., Fitzgerald E. A., Bulsara M. T., Currie M. T. & Lochtefeld, A. Strained Si, SiGe and Ge channels for high-mobility metal-oxide – semiconductor field-effect transistors. *J. Appl. Phys.* 97, 011101 (2005).
26. Зими́на М. М. Микросистемна́я техника и проблемы биомедицинского анализа / М. М. Зими́на, В. В. Лучини́н, Е. В. Крапивина, А. С. Ресин // Микросистемна́я техника. – 2000. – № 3. – С. 18–30.
27. Бочаров Л. Ю. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом / Л. Ю. Бочаров, П. П. Мальцев // Микросистемна́я техника. – 1999. – № 1. – С. 41–46.
28. Engelsen Daniel Den. The templetion of field emitter displays // *Physics procedia*. – 2008. – No. 1. – P. 355–365.
29. Новосядлий С. П. Суб- і наномікронна технологія структур великих інтегральних схем / С. П. Новосядлий. – Ів-Франківськ: МістоНВ, 2010. – 455 с.
30. Курносов А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. И. Курносов, В. В. Юдин. – М.: Высшая школа, 1986.
31. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров / В. Н. Черняев. – М.: Радио и связь, 1987.
32. Броудай И. Физические основы микротехнологии / И. Броудай, Дж. Мерей. – М.: Мир, 1985.
33. Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводниках / Б. И. Болтакс. – М.: Физматгиз, 1961.
34. Шелепин Н. А. Кремниевые микросенсоры и микросистемы: от бытовой техники до авиационных приборов / Н. А. Шелепин // Микросистемна́я техника. – 2000. – № 1. – С. 41–43.
35. Дружинін А. О. Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів: навч. посібник / А. О. Дружинін. – Львів: Видавництво Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2009. – 332 с.
36. Spindt C. A. // *J. Appl. Phys.* – 1968. – Vol. 39. – P. 3504–3505.
37. Farooqui M. M., Evans A. G. A polysilicon diaphragm-based pressure sensor technology // *J. Phys. Instrum.* – 1987. – Vol. 20. – P. 1469–1471.

38. Старков В. В. Создание фотонных кристаллов методами глубокого анодного травления кремния / В. В. Старков, В. В. Аристов, А. М. Желтиков, А. А. Магницкий, А. В. Тарасишин // Микросистемная техника. – 2001. – № 9. – С. 37–411.
39. Fa C. H. and Jew T. T. // IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED – 13, 1996, p. 290.
40. Kamins T. I., and Marcoux P. J. // IEEE Electron Device Letters, 1980. – Vol. EDL – 1. – P. 159.
41. Дружинін А. О., Когут І. Т., Ховерко Ю. М. Структури кремній-наізоляторі для сенсорної електроніки: монографія / А. О. Дружинін, І. Т. Когут, Ю. М. Ховерко. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 236 с.
42. A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Yu. Khoverko, S. Nychkalo, Iu. Kogut Impedance spectroscopy of polysilicon in SOI structures // Physica Status Solidi C. – Vol. 11, No. (1). – 2014. – P. 156–159.
43. A. Druzhinin, Yu. Khoverko, I. Kogut, R. Koretskii Properties of low-dimensional polysilicon in SOI structures for low temperature sensors // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 854. – P. 49–55.
44. Anatoly Druzhinin, Igor Ostrovskii, Igor Kogut, Yuriy Khoverko, Roman Koretskii, Iurii Kogut Magneto-transport properties of poly-silicon in SOI structures at low temperatures // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2015. – Vol. 31. – P. 19–26.
45. Leitz E. Enhanced zone-melting recrystallization for crystalline silicon // Brit. Patent № 691355. – 1950.
46. Maserjian J. Single-crystal germanium films by microzone melting // Sol. St. Electron. – 1963. – Vol. 6, No. 5. – P. 477–484.
47. Weider H. H. Crystallization and properties of InSb film grown from nonstoichiometric liquid // Sol. St. Commun. – 1965. – Vol. 3, No. 2. – P. 159–160.
48. Патмалниекс А. А. О возможности кристаллизации тонких слоев кремния методом зонной плавки / А. А. Патмалниекс // Изв. Ан. Латв. / Сер. Физ и техн. наук. – 1970. – No. 3. – С. 38–42.
49. Pinizzotto R. F., Lam H. W., Vaandrager B. L. Subgrain boundaries in laterally seeded silicon-on-oxide formed by graphite strip heater recrystallization // Appl. Phys. Lett. – 1982. – Vol. 40, No. 5. – P. 388–390.

50. Pinizzotto R. F. Microstructural defects in laser recrystallized, graphite strip heater recrystallized an buried oxide silicon-on-insulator systems: a status report // *J. Cryst. Growth.* – 1963. – Vol. 63, No. 3. – P. 559–582.
51. Geis M. W., Smith H. I., Tsaur B.-Y. // Zone – melting recrystallization of Si films with a moveable- srip – heater oven // *J. Electrochem. Soc.* – 1982. – Vol.129, No. 12. – P. 2812–2818.
52. Leamy H. J., Chang C. C. et al Cellular growth in micro-zone melted silicon // *Mater. Lett.* – 1982. – Vol.1, No. 1. – P. 33–36.
53. Tillack B., Mosck P. et al. Thick monocrystalline silicon on oxidized silicon wafers produced by a zone-melting process using a scanning halogen lamp // *Phys. Stat Sol.* – 1986. – Vol. 94 a, No. 2. – P. 871–876.
54. Atwater H. A., Smith H. I., Thompson C. V. Zone-melting recrystallisation of thick silicon on insulator films // *Mater. Lett.* – 1984. – Vol. 2, No. 4a. – P. 269–273.
55. Lee E.-H., Extended growth of subgrain-boundary – free SOI via thermal gradient variation // *Appl. Phys Lett.* 1984. – Vol. 44, No. 10. – P. 959–961.
56. Smith H. I., Thompson C. V., Geis M. W. The mechanism of orientation in Si graphoepitaxy by laser or strip heater recrystallisation// *J. Electrochem. Soc.* – 1983. – Vol. 130, No. 10. – P. 2050–2053.
57. Jackson K. A., Kurtize D. A. Instability in radiatively melted silicon films // *J. Cryst.Growth.* – 1985. – Vol. 71, No. 2. – P. 385–390.
58. Biegelsen D. K., Fennel L. E., Zesch J. C. Origin of oriented crystal growth of radiantly melted silicon on SiO₂ // *Appl. Phys. Lett.* – 1984. – Vol. 45, No. 5. – P. 546–548.
59. Воронков В. В. Процессы на границе фронта кристаллизации / В. В. Воронков // *Кристаллография.* – 1975. – Т.19, No. 5. – 922–928.
60. Farooqui M. M., Evans A. G. A polysilicon diaphragm-based pressure sensor technology // *J. Phys. Instrum.* – 1987. – Vol. 20. – P. 1469–1471.
61. Colinge J. P. Silicon-on-insulator technology: materials to VLSI // Kluwer Academic Publishers. – 1991. – 230 c.
62. Johnson N. M., Biegelsen D. K., Tuan H. C., Moyer M. D. and Fennel E. // *IEEE Electron Dev. Lett.*, 1982. – Vol. EDL – 3. – P. 369.
63. Le H. P. and Lam H. W. // *Ext. Abstr. of Electrochem. Soc. Spring Meeting*, 1982. – Vol. 82. – 1. – P. 240.
64. Holota V., Kogut I., Druzhinin A., Khoverko Y. High sensitive active MOS photo detector on the local 3D SOI-structure // *Advanced Materials Research.* – 2014. – Vol. 854. – P. 45–47.

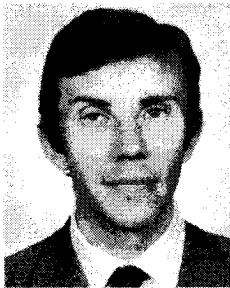
65. International Technology Roadmaps for Semiconductors (ITRS-01), November 2001, Santa-Clara, Calif., USA, 2001.
66. Артамонов А. С. Экспериментальное исследование радиационного поведения SMART-CUT КНИ-структур / А. С. Артамонов, А. Ю. Никифоров, А. В. Согоян, А. А. Французов, В. П. Попов // ВАНТ: Научно-технический сборник "Радиационная стойкость электронных систем" ("Стойкость-2001"). – 2001. – Вып. 4. – С. 37, 38.
67. Нашельский А. Я. Технология полупроводниковых материалов / А. Я. Нашельский. – М.: Металлургия, 1987.
68. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы: материалы, приборы, изготовление. – М: Мир, 1985.
69. Основи технології напівпровідникових матеріалів [Текст]: навч. посіб. / І. В. Курило, С. К. Губа ; Нац. ун-т "Львівська політехніка". – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2012. – 239 с.
70. Технология СБИС: в 2-х кн. / под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986.
71. Ахо А., Хопкрофт В., Ульман Дж. Структуры данных и алгоритмы. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 384 с.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ



ХОВЕРКО Юрій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету “Львівська політехніка”.

Сфера наукових інтересів: фізика і технологія напівпровідникових приладів, мікро- і наноелектронні структури та сенсорна електроніка. Автор понад 250 наукових праць, зокрема трьох монографій. Має 11 патентів України.



ОСТРОВСЬКИЙ Ігор Петрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету “Львівська політехніка”.

Сфера наукових інтересів: фізика та технологія створення наноструктур, приладів і пристроїв мікрота наносистемної техніки. Автор понад 350 наукових праць, зокрема двох монографій. Має 25 патентів України. Член комісії з акредитації вишів МОН України.



ДРУЖИНІН Анатолій Олександрович – доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, завідувач кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету “Львівська політехніка”.

Сфера наукових інтересів: фізика і технологія напівпровідникових приладів, мікро- і наноелектронні структури, сенсорна електроніка. Автор понад 600 наукових праць, має понад 40 авторських свідоцтв на винаходи та патенти України.

Опублікував сім монографій та 6 навчальних посібників у галузі сенсорної електроніки, а також понад 30 навчально-методичних робіт. Директор НДЦ “Кристал” Львівської політехніки та науковий керівник науково-дослідної лабораторії сенсорної електроніки, в якій виконуються роботи за міжнародними та національними науково-технічними програмами. Підготував 5 докторів та понад 10 кандидатів наук.

КНИГИ ДЛЯ НАВЧАННЯ І РОБОТИ!

Савицький В. К., Федоришин Р. М.

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Навчальний посібник. – 2018. – 292 с.

ISBN 978-966-941-182-2

Навчальний посібник призначений для студентів бакалаврського рівня навчання спеціальності “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Розглянуто принципи побудови автоматичних регуляторів різних систем, а також основні засади побудови систем автоматичного регулювання. Викладено будову та принципи роботи електричних, пневматичних, гідравлічних та мікропроцесорних регуляторів, а також виконавчих механізмів і пристроїв дистанційного керування. Наведено їхні технічні характеристики і класифікацію, а також розглянуто метрологічні характеристики та питання надійності автоматичних систем.



Матвійків М. Д. та ін.

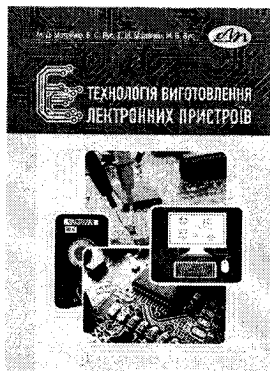
ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Підручник. – 2017. – 400 с.

ISBN 978-966-941-092-4

Викладено основні відомості про сучасні та перспективні технології виготовлення функціональних та функціонально-програмованих електронних пристроїв. Розглянуто технології складових частин електронних пристроїв: електронних модулів, механічних компонентів та ін. Також викладено основні вимоги до складання, програмування, тестування, регулювання, налаштування та операційного контролю електронних пристроїв.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом “Електронні апарати”, та фахівців, які проєктують, виготовляють або обслуговують різноманітну електронну техніку в галузях авіоніки, біомедицини і побутової техніки тощо.



Видавництво Львівської політехніки

вул. Ф. Копессі, 4, корп. 23А, м. Львів, 79013

тел. +380 32 2582146, факс +380 32 2582136, <http://vip.com.ua>, vmr@vip.com.ua



НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Ховерко Юрій Миколайович
Островський Ігор Петрович
Дружинін Анатолій Олександрович

**ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕМЕНТІВ
ЗІНТЕГРОВАНИХ СХЕМ
МІКРО- ТА НАНОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ**

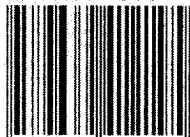
Редактор *Ольга Дорошенко*
Коректор *Наталія Колтун*
Технічний редактор *Лілія Саламін*
Комп'ютерне верстання *Наталії Максимюк*
Художник-дизайнер *Анна Христонько*

Здано у видавництво 08.02.2018. Підписано до друку 28.09.2018.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Папір офсетний. Друк офсетний.
Умовн. друк. арк. 9,9. Обл.-вид. арк. 9,1.
Наклад 100 прим. Зам. 180155.

Видавець і виготівник: Видавництво Львівської політехніки.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4459 від 27.12.2012 р.

вул. Ф. Колесси, 4, Львів, 79013
тел. + 380 32 2582146, факс + 380 32 2582136
vlp.com.ua, ел. пошта: vnr@vlp.com.ua

ISBN 978-966-941-219-5



9 789669 412195 >