

62.38(076)
E50



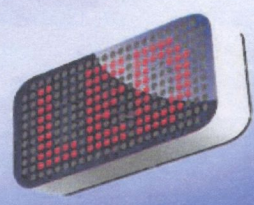
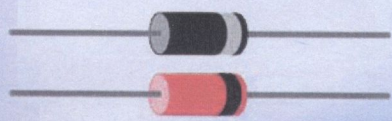
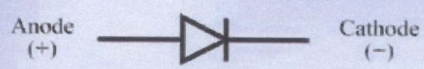
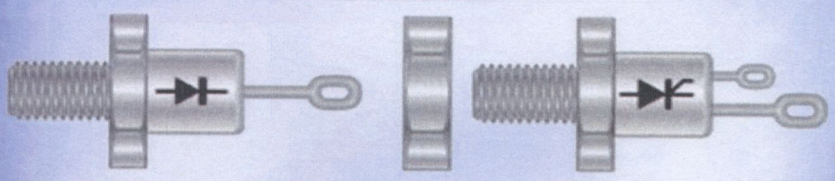
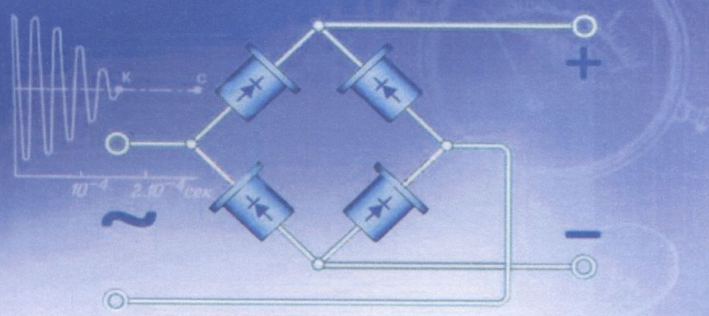
$$J = J_{p0} + J_{n0}$$

дифузионные токи

ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

ЧАСТИНА III

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ ТА ТИРИСТОРИ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

621.38(075)

E50

**Елементна база електронних апаратів
Частина III**

**Напівпровідникові діоди
та тиристори**

Навчальний посібник

НТБ ВНТУ



475154

621.38(075) E50 2016

Елементна база електронних апаратів

Вінниця
ВНТУ
2016

УДК 621.382 (075)

ББК 32.85

Е50

Автори:

Філінюк М. А., Лазарєв О. О., Войцеховська О. В., Фурса С. Є.,
Ткачук Я. С., Чехмєструк Р. Ю.

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного
технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол
№ 9 від 25 лютого 2016 р.)

Рецензенти:

С. М. Злепко, доктор технічних наук, професор

Л. Б. Ліщинська, доктор технічних наук, професор

К. В. Огородник, кандидат технічних наук, доцент

Е50 Елементна база електронних апаратів. Частина III. Напів-
провідникові діоди та тиристоры : навчальний посібник /
[Філінюк М. А., Лазарєв О. О., Войцеховська О. В. та ін.] ; під загаль-
ною редакцією М. А. Філінока, О. О. Лазарєва. – Вінниця : ВНТУ,
2016. – 92 с.

Навчальний посібник присвячений ознайомленню студентів з принципом
роботи, основними параметрами та характеристиками напівпровідникових діодів та
тиристорів при вивченні дисциплін «Елементна база радіоелектронних апаратів
та електронні прилади», «Елементна база телекомунікаційних систем», «Технічна
електроніка» студентами напряму підготовки «Радіоелектронні апарати», «Телеко-
мунікації». Може бути корисним студентам інших спеціальностей, науковим спів-
робітникам і аспірантам, які цікавляться проблемами елементної бази електронної
апаратури.

УДК 621.382 (075)

ББК 32.85



© М. Філінюк, О. Лазарєв, С. Фурса, О. Войцеховська,
Я. Ткачук, Р. Чехмєструк, 2016

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ВИЗНАЧЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ, УМОВНЕ ГРАФІЧНЕ ПОЗНАЧЕННЯ ТА МАРКУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДЮДІВ..	5
2 ВИПРЯМНІ ДЮДИ	15
3 ІМПУЛЬСНІ ДЮДИ. ДЮД ШОТТКІ	22
3.1 Імпульсні діоди	22
3.2 Діод Шотткі	27
4 СТАБІЛІТРОНИ. СТАБІСТОРИ	31
4.1 Стабілітрон	31
4.2 Стабістор.....	36
5 ВАРИКАПИ	39
6 ВИСОКОЧАСТОТНІ ДЮДИ	43
7 ТУНЕЛЬНИЙ ДЮД.....	46
8 НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ДЮДИ.....	52
8.1 Діод Ганна	52
8.2 Лавинопролітні діоди	57
8.3 Інжекційно-пролітний діод.....	65
8.4 Р-і-п-діод.....	67
9 ТИРИСТОРИ	73
9.1 Диністори.....	73
9.2 Триністори.....	77
9.3 Симітори	83
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	88
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	90

ВСТУП

Напівпровідникові прилади (діоди і транзистори) завдяки малим габаритам і масі, незначному споживанню електроенергії, високій надійності та довговічності широко застосовуються в різній радіоелектронній апаратурі. На сьогодні майже вся побутова радіоелектронна техніка, зокрема телевізори, приймачі, магнітофони та інші, працює на напівпровідникових приладах та мікросхемах. Застосування напівпровідникових приладів в електронних обчислювальних машинах дозволило вирішити проблему досягнення високих експлуатаційних параметрів при забезпеченні необхідної надійності. Для конструювання надійних схем на діодах, тобто для правильного вибору типу діода, грамотного розрахунку схем, вибору оптимального теплового та електричного режимів необхідно знати експлуатаційні властивості діодів. Дана частина навчального посібника присвячена опису діодів та особливостям їх застосування в різних схемах.

У першому розділі посібника надається інформація, необхідна для формування загального уявлення про напівпровідникові діоди. Наводяться відомості про класифікацію напівпровідникових діодів за декількома ознаками, умовні графічні позначення різних типів діодів, а також основні системи маркування діодів: вітчизняна, європейська, американська та японська.

У посібнику подана детальна інформація про фізичні основи роботи напівпровідникових діодів та тиристорів, описані основні фізичні ефекти, які використовуються для надання напівпровідниковим діодам та тиристорам різних властивостей.

Відносно кожного типу діода надані довідникові відомості, подається опис всіх основних параметрів та характеристик, а також їх призначення. У кожному розділі наводяться еквівалентні схеми та типові схеми включення, подається інформація щодо основних видів конструкцій та креслення корпусів.

1 ВИЗНАЧЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ, УМОВНЕ ГРАФІЧНЕ ПОЗНАЧЕННЯ ТА МАРКУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ

Напівпровідниковий діод – двоелектродний прилад, принцип дії якого базується на використанні явищ, що виникають між частинами монокристала напівпровідника з провідностями р- і n-типу.

Промисловість випускає різноманітні напівпровідникові діоди, які відрізняються властивостями, конструкцією та призначенням. Тому застосування діодів неможливе без знання їх класифікації, згідно з якою напівпровідникові діоди поділяють на такі групи (рис. 1):



Рисунок 1 – Класифікація напівпровідникових діодів

Як відомо, основна властивість р-п-переходу – одностороння провідність: від області *p* (анод) до області *n* (катод). Це наочно передає і умовне графічне позначення напівпровідникового діода: трикутник (символ анода) разом з лінією електричного зв'язку, яка перетинає його, утворюють стрілку, що вказує напрямком провідності. Перпендикулярна цій стрілці риска символізує катод. На основі базового символу побудовані і умовні графічні позначення напівпровідникових діодів з особливими властивостями, що зображені в табл. 1.

Таблиця 1 – Умовні графічні позначення напівпровідникових діодів згідно з ГОСТ 2.730–73

Графічне позначення	Назва
	Загальне позначення діода (випрямні, універсальні, імпульсні)
	Стабілітрон односторонній
	Стабілітрон двосторонній
	Зворотний діод
	Тунельний діод
	Діод Шоттки
	Обмежувач напруги односторонній
	Обмежувач напруги двосторонній
	Варикап
	Світлодіод
	Фотодіод
	Диністор
	Незапірний тиристор з керуванням по аноду
	Запірний тиристор з керуванням по катоду
	Запірний тиристор з керуванням по аноду
	Запірний тиристор з керуванням по катоду

Інформація про призначення, основні електричні параметри, тип вихідного напівпровідникового матеріалу, конструктивно-технологічні особливості і т. п., як правило, вноситься до умовного позначення (маркування) напівпровідникових діодів у вигляді коду, що містить літери та цифри.

Системи позначення діодів

Система позначень сучасних напівпровідникових діодів малої потужності встановлена галузевим стандартом ОСТ 336.919–81.

Позначення складається з п'яти елементів.

Перший елемент – літера або цифра – вказує напівпровідниковий матеріал, з якого виготовлений прилад:

1 або Г – германій або сполуки германію;

2 або К – кремній або сполуки кремнію;

3 або А – сполуки галію;

4 або І – сполуки індію.

Другий елемент – літера – позначає підклас (або групу) приладу:

Д – діоди випрямні, імпульсні, діодні перетворювачі (магнітодіоди, термодіоди та ін.);

Ц – випрямні стовпи і блоки;

В – варикапи;

І – діоди тунельні й зворотні;

А – діоди НВЧ;

Ж – стабілізатори струму;

С – стабілізатори напруги (стабілітрони, стабістори, обмежувачі напруги);

Г – генератори шуму;

Л – випромінювальні оптоелектронні прилади;

О – оптопарі;

Н – диністори;

У – триністори.

Третій елемент – цифра – визначає призначення або принцип дії приладу.

Діоди:

1 – випрямні із середнім значенням прямого струму $I_{пр ср} < 0,3 \text{ А}$;

2 – випрямні із середнім значенням прямого струму $I_{пр ср} > 0,3 \text{ А}$;

3 – діодні перетворювачі.

Діоди імпульсні:

4 – з часом відновлення зворотного опору більшим, ніж 500 нс;

5 – з часом відновлення зворотного опору від 150 до 500 нс;

6 – з часом відновлення зворотного опору від 30 до 150 нс;

7 – з часом відновлення зворотного опору від 5 до 30 нс;

8 – з часом відновлення зворотного опору від 1 до 5 нс;

9 – з ефективним часом життя неосновних носіїв заряду 1 нс.

Випрямні стовпи:

- 1 – із середнім значенням прямого струму не більшим 0,3 А;
- 2 – із середнім значенням прямого струму від 0,3 до 10 А.

Випрямні блоки:

- 1 – з середнім значенням прямого струму не більшим 0,3 А;
- 2 – із середнім значенням прямого струму більшим 0,3 А.

Варикапи:

- 1 – підстроювальні;
- 2 – помножувальні.

Діоди тунельні і обернені:

- 1 – підсилювальні;
- 2 – генераторні;
- 3 – перемикальні;
- 4 – зворотні.

Діоди надвисокочастотні:

- 1 – змішувальні;
- 2 – детекторні;
- 3 – підсилювальні;
- 4 – параметричні;
- 5 – перемикальні та обмежувальні;
- 6 – помножувальні та настроювальні;
- 7 – генераторні;
- 8 – імпульсні;
- 9 – випрямні.

**Стабілізатори напруги (стабілітрони, стабістори, обмежувачі напруги):
потужність не більша 0,3 Вт:**

- 1 – з напругою стабілізації (обмеження) меншою 10 В;
- 2 – з напругою стабілізації (обмеження) від 10 до 100 В;
- 3 – з напругою стабілізації (обмеження) більшою 100 В;

потужність від 0,3 до 5 Вт:

- 4 – з напругою стабілізації (обмеження) меншою 10 В;
- 5 – з напругою стабілізації (обмеження) від 10 до 100 В;
- 6 – з напругою стабілізації (обмеження) більшою 100 В;

потужність понад 5 Вт, але не більша 10 Вт:

- 7 – з напругою стабілізації (обмеження) меншою 10 В;
- 8 – з напругою стабілізації (обмеження) від 10 до 100 В;
- 9 – з напругою стабілізації (обмеження) більшою 100 В.

Генератори шуму:

- 1 – низькочастотні;
- 2 – високочастотні.

Випромінювальні оптоелектронні прилади:

- 1 – випромінювальні діоди інфрачервоного випромінювання;
- 2 – випромінювальні модулі інфрачервоного випромінювання;

- 3 – світловопроміньовальні діоди візуального подання інформації;
- 4 – знакові індикатори;
- 5 – знакові табло;
- 6 – шкали;
- 7 – екрани.

Четвертий елемент – двознакові числа від 01 до 99 – вказують порядковий номер розробки. Дозволяється використання трізнакових чисел від 101 до 999 за умови, що порядковий номер розробки перевищує число 99.

П'ятий елемент – літера – визначає класифікацію приладів, виготовлених за єдиною технологією. Як класифікаційні літери застосовуються літери російського алфавіту (за виключенням З, О, Ч, Ы, Ш, Щ, Ю, Я, Ъ, Ы, Э).

Додатковими елементами позначення можуть бути такі символи.

Цифри 1–9 – для позначення модифікацій приладу, які приводять до зміни його конструкції або електричних параметрів.

Буква «С» після третього елемента позначення – для розташованих в одному корпусі однотипних приладів, з'єднаних електрично або однойменними виводами.

Цифра, яка написана через дефіс після п'ятого елемента позначення (для безкорпусних приладів):

- 1 – з гнучкими виводами без підкладки;
- 2 – з гнучкими виводами на підкладці;
- 3 – з жорсткими виводами без підкладки;
- 4 – з жорсткими виводами на підкладці;
- 5 – з контактними площадками без підкладки та без виводів (кристал);
- 6 – з контактними площадками на підкладці та без виводів (кристал на підкладці).

Літера, написана через дефіс після останнього елемента позначення:

- Р – з парним підбором;
- Т – з підбором в трійки;
- Г – з підбором у четвірки;
- К – з підбором в шістки;
- Н – з підбором у вісімки.

Система позначень потужних силових діодів відмінна від наведених вище систем позначення малопотужних приладів. ГОСТ 20859–79 встановлює уніфіковане позначення силових напівпровідникових приладів з таких шести елементів.

Перший елемент – літера, що позначає підклас (вид) приладу:

- Д – випрямний діод;
- Л – лавинний діод.

Другий елемент – літера, що визначає функціональне призначення приладу:

Ч – високочастотний діод, для діодів з часом зворотного відновлення меншим, ніж 5 мкс (для низькочастотних приладів додаткове літерне позначення не застосовується).

И – імпульсний діод з часом включення меншим, ніж 4 мкс.

Третій елемент – цифра від 1 до 9, що визначає порядковий номер модифікації приладу.

Четвертий елемент – цифра від 1 до 9, яка вказує тип (розмір) корпусу.

П'ятий елемент – цифра від 1 до 5 – конструктивне виконання корпусу приладу:

- 1 – голчасте з гнучкими виводами;
- 2 – голчасте з жорсткими виводами;
- 3 – таблеткове;
- 4 – під запресування;
- 5 – фланцеве.

Шостий елемент – цифри, які вказують значення максимально допустимого середнього струму або імпульсного струму в амперах. Перед позначенням струму ставиться дефіс.

Додаткові елементи позначення можуть бути:

- буква «X» – позначає прилади зі зворотною полярністю (катодом є основа);

- клас за напругою – числа, що відповідають сотням вольт (1 – 100 В, 2 – 200 В, 3 – 300 В, 13 – 1300 В, 20 – 2000 В, 50 – 5000 В);

- група за часом зворотного відновлення – цифри від 1 до 9, які позначають, відповідно, не більше, ніж 5; 4; 3,2; 2,5; 2; 1,6; 1; 0,63; 0,4 мкс (для високочастотних та імпульсних діодів).

Приклад умовного позначення за ГОСТ 20859–79: Д161-200X-8 – діод першої модифікації, розмір шестигранника під ключ 32 мм штирьової конструкції з гнучкими виводами, максимально допустимий середній струм 200 А, зворотної полярності, повторювана зворотна напруга 800 В.

Європейська система Pro Electron

У Європі широко застосовується система, за якою позначення напівпровідниковим приладам надаються організацією Association International Pro Electron. За цією системою прилади для побутової апаратури широкого застосування позначаються двома літерами та трьома цифрами, для промислової та спеціальної апаратури – трьома літерами та двома цифрами. Так, у приладів широкого застосування після двох букв стоїть тризначний порядковий номер від 100 до 999. У приладів, що застосовуються в промисловості та спеціальній апаратурі, третій знак – літера (літери використовуються у зворотному алфавітному порядку: Z, Y, X і т. п.), за якою йде порядковий номер від 10 до 99. Умовні позначення, прийняті в системі Pro Electron подано в табл. 2.

Таблиця 2 – Маркування напівпровідникових приладів в системі Pro Elecrton

1-й елемент	2-й елемент	3-й елемент	4-й елемент
<p>Літера – код матеріалу: А – германій В – кремній С – арсенід галію D – антимонід індію R – інші матеріали</p>	<p>Літера – тип приладу: А – детекторний, змішувальний діод В – варикап С – малопотужний низькочастотний транзистор D – потужний низькочастотний транзистор Е – тунельний діод F – малопотужний високочастотний транзистор G – декілька приладів в одному корпусі Н – магнітодіод К – генератори Холла L – потужний високочастотний транзистор М – модулятори та помножувачі Холла Р – фотодіод, фототранзистор Q – випромінювальні прилади R – прилад, що працює в області пробою S – малопотужний перемикальний транзистор Т – потужний регульований або перемикальний прилад U – потужний перемикальний транзистор Х – помножувальний діод Y – потужний випрямний діод Z – стабілітрон</p>	<p>Серійний номер: 100-999 прилади загального застосування Z10...A99 прилади для промислового та спеціального застосування</p>	<p>Літера: модифікації приладу</p>

Якщо в одному корпусі є декілька однакових приладів, то позначення проводиться відповідно до коду (маркування) для одинарних дискретних приладів. При наявності в одному корпусі декількох різних приладів як друга буква позначення використовується літера G. До основного позначення може додаватись літера, яка вказує на відмінність приладу від основного типу за деякими параметрами або корпусом. Перша літера вказує допуск: А – 1%, В – 2%, С – 5%, D – 10%, Е – 15%. Після літери в додатковому коді йде номінальна напруга в вольтах. Якщо це не ціле число, то замість коми ставиться літера V. Наприклад, BZ85-C6V8 – це кремнієвий стабілітрон спеціального призначення з реєстраційним номером 85, напругою стабілізації 6,8 В та допуском на напругу $\pm 5\%$.

Система Pro Electron широко застосовується в Німеччині, Франції, Італії та інших країнах. Вона замінила стару європейську систему, за якою після початкової букви O йшли букви, які вказували на основний клас приладів: А – діод, AP – фотодіод, AZ – стабілітрон, С – транзистор, RP – фотопровідний елемент.

Кольорове маркування напівпровідникових діодів за Європейською системою Pro Electron наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Кольорове маркування напівпровідникових діодів за Європейською системою Pro Electron

Колір смужки	Тип діода			
	1-а широка смужка	2-а широка смужка	3-а вузька смужка	4-а вузька смужка
Чорний	AA	X	0	0
Червоний			1	1
Чорний	BA		2	2
Помаранчевий		S	3	3
Жовтий		T	4	4
Темний синій		V	5	5
Синій		W	6	6
Фіолетовий			7	7
Сірий		Y	8	8
Білий		Z	9	9

Примітка. Катод розміщений біля широких смужок.

Американська система JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council)

Найпоширенішою є система позначень JEDEC, яка прийнята об'єднаною технічною радою з електронних приладів США. За цією системою прилади позначаються індексом (кодом, маркуванням), в якому перша цифра відповідає кількості р-п переходів, за нею йде літера N та серійний номер, який реєструється асоціацією підприємств електронної

промисловості (EIA). За номером можуть стояти одна або декілька літер, які вказують на поділення приладів одного типу на типомінали за різними характеристиками. Однак цифри серійного номера не визначають тип початкового матеріалу, частотний діапазон, потужність розсіювання та галузь застосування. Символьне та кольорове маркування напівпровідникових діодів наведено в табл. 4 і табл. 5.

Таблиця 4 – Маркування напівпровідникових діодів в системі JEDEC

1-й елемент	2-й елемент	3-й елемент	4-й елемент
Кількість р-п переходів: 1 – діод 2 – транзистор 3 – тиристор 4 – оптопара	Літера: N	Серійний номер приладу: (100-9999)	Літера: Модифікації приладу

Таблиця 5 – Кольорове маркування напівпровідникових діодів за системою JEDEC

Колір смужки	Чорний	Червоний	Чорний	Помаранчевий	Жовтий	Темний синій	Синій	Фіолетовий	Сірий	Білий
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Літера	-	A	B	C	D	E	F	G	H	J

Примітки:

1. Перша цифра 1 та друга літера N в кольоровому маркуванні пропущені;
2. Номери з двох цифр позначаються одною чорною смужкою та двома кольоровими; додаткова четверта смужка – літера;
3. Номери з трьох цифр позначаються трьома кольоровими смужками; додаткова четверта смужка – літера;
4. Номери з чотирьох цифр позначаються чотирма кольоровими смужками та п'ятою чорною чи кольоровою, яка позначає букву;
5. Кольорові смужки знаходяться ближче до катода або перша від катода – широка;
6. Тип діода читається від катода.

Японська система JIS (Japanese Industrial Standard)

За існуючою на цей час в Японії системою стандартних позначень (стандарт JIS-C-7012, який прийнятий асоціацією EIAJ-Electronic Industries Association of Japan) можна визначити клас приладу, його призначення, тип провідності. Вид напівпровідникового матеріалу в цій системі не відображається. Умовне позначення наведено у табл. 6 і складається з п'яти елементів.

Таблиця 6 – Маркування напівпровідникових приладів в системі JIS

1-й елемент	2-й елемент	3-й елемент	4-й елемент	5-й елемент
<p>Цифра: 0 – фотодіод, фототранзистор 1 – діод 2 – транзистор 3 – тиристор</p>	<p>Літера: S</p>	<p>Літера - тип приладу: A – високочастотний р-р-р- транзистор B – низькочастотний р-р-р- транзистор C – високочастотний п-р-п- транзистор D – низькочастотний п-р-п- транзистор E – діод Есакі (чотиришаровий діод р-п-р-п) F – тиристор G – діод Гана (чотиришаровий діод п-р-п-р) H – одноперехідний транзистор J – польовий транзистор з п-каналом K – польовий транзистор з р-каналом M – симетричний тиристор (симістор) Q – випромінювальний діод R – випрямний діод S – малосигнальний діод T – лавинний діод V – варикап Z – стабілітрон</p>	<p>Серійний номер: 10-9999</p>	<p>Одна або дві літери: модифікації приладу</p>

Примітка. У фототранзисторів та фотодіодів третій елемент маркування відсутній.

Приклад: 2SB646, 2SC733.

Після маркування можуть бути додаткові індекси (N, M, S), які відображають вимоги спеціальних стандартів.

Крім наведених систем стандартних позначень виробники приладів широко застосовують внутрішні (фірмові) позначення. У цьому випадку за основу позначення найчастіше береться принцип скороченої назви фірми, коди матеріалу та галузі застосування.

2 ВИПРЯМНІ ДІОДИ

Випрямні діоди – це діоди, призначені для перетворення змінної напруги промислової частоти (50, 60, 400 Гц) на постійну напругу.

Принцип роботи

Робота випрямного діода пояснюється властивостями електричного р-п-переходу.

Поблизу границі двох напівпровідників утворюється шар, позбавлений рухомих носіїв заряду (через рекомбінацію), який має високий електричний опір, – так званий запірний шар. Цей шар визначає контактну різницю потенціалів (потенціальний бар'єр).

Якщо до р-п-переходу прикласти зовнішню напругу, яка створює електричне поле в напрямі, що є протилежним полю електричного шару, то товщина цього шару зменшиться і при напрузі 0,4 – 0,6 В запірний шар зникне, а струм істотно зросте (цей струм називають прямим).

При підключенні зовнішньої напруги іншої полярності запірний шар збільшиться і опір р-п-переходу зросте, а струм, обумовлений рухом неосновних носіїв заряду, буде незначним навіть при досить великих напругах.

Прямий струм діода створюється основними, а зворотний – неосновними носіями заряду. Прямий струм діод пропускає в напрямку від анода до катода.

Основні характеристики

Основною характеристикою випрямних діодів є вольт-амперна характеристика (ВАХ). ВАХ германієвих і кремнієвих діодів однакової конструкції відмінні одна від одної. Оскільки ширина забороненої зони у кремнію більша, ніж у германію, зворотний струм кремнієвих діодів значно менший. Крім того, зворотна гілка характеристики кремнієвих діодів не має явно вираженої ділянки насичення, що обумовлено генерацією носіїв заряду в р-п-переході і струмами витоку на поверхні кристала.

Германієві діоди. Електронно-діркові переходи більшості германієвих площинних діодів формують шляхом виплавляння індію в германій з електропровідністю n-типу.

Температурна залежність прямого спаду напруги на германієвих діодах може бути різною при малих і при великих прямих струмах (рис. 2). При малих прямих струмах, коли майже вся зовнішня напруга прикладена до р-п переходу, прямий спад напруги зменшується зі збільшенням температури через зменшення висоти потенціального бар'єра і з перерозподілом носіїв за енергіями. Тому прямий спад напруги зменшується зі збільшенням температури.

При великих для даного діода прямих струмах прямий спад напруги може залежати від опору бази, який збільшується із збільшенням температури через зменшення рухливості носіїв заряду. Тому при великих прямих струмах прямий спад напруги на діоді може зростати.

Зворотна гілка ВАХ германієвих площинних діодів має ділянку насичення, оскільки зворотні струми германієвих діодів пов'язані, в основному, з процесом екстракції неосновних носіїв з бази. Максимальна допустима зворотна напруга не перевищує 400 В. Пробій германієвих діодів має тепловий характер. Тому пробивна напруга зменшується із підвищенням температури.

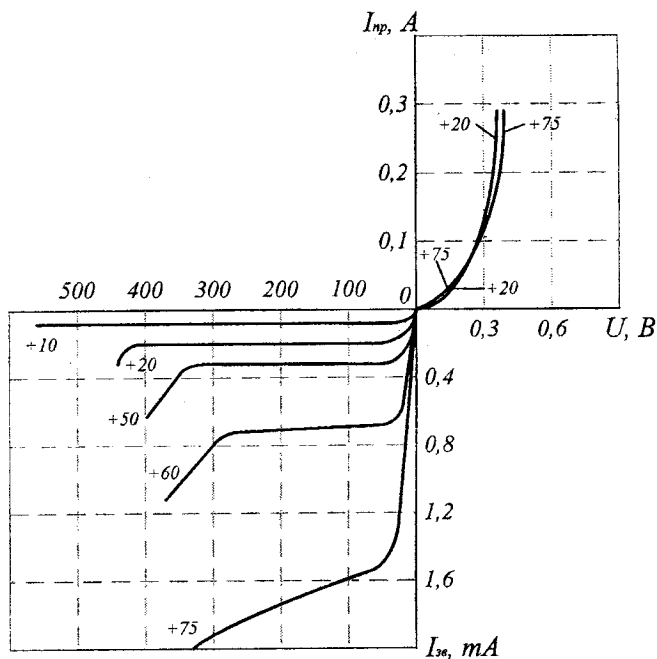


Рисунок 2 – Вольт-амперні характеристики германієвого діода при різних температурах навколишнього середовища

Верхня межа діапазону робочих температур германієвих діодів (75–85 °C) визначається різким погіршенням випрямлення через зростання зворотного струму внаслідок збільшення теплової іонізації атомів германію. Нижня межа діапазону робочих температур (–60 °C) обумовлена різницею температурних коефіцієнтів розширення германію та індію: при низьких температурах виникають механічні напруження, які можуть призвести до розтріскування монокристала германію.

Істотним недоліком германієвих діодів є те, що вони погано витримують навіть дуже короткочасні імпульсні перевантаження. Визначається це механізмом пробію германієвих діодів – тепловим пробієм, що відбувається з виділенням великої питомої потужності в місці пробію.

Кремнієві діоди. Різні типи кремнієвих випрямних діодів з технологічної точки зору є або сплавними, або дифузійними. Сплавні р-п-переходи кремнієвих діодів формують у монокристалічних пластинках кремнію з електропровідністю п-типу вплавленням алюмінію; в пластинках кремнію з електропровідністю р-типу – вплавленням сплаву золота з сурмою. Дифузійні р-п переходи формують дифузиею алюмінію або бору в пластини кремнію з електропровідністю п-типу і дифузиею фосфору в пластини кремнію з електропровідністю р-типу.

Типові ВАХ кремнієвого випрямного діода наведені на рис. 3.

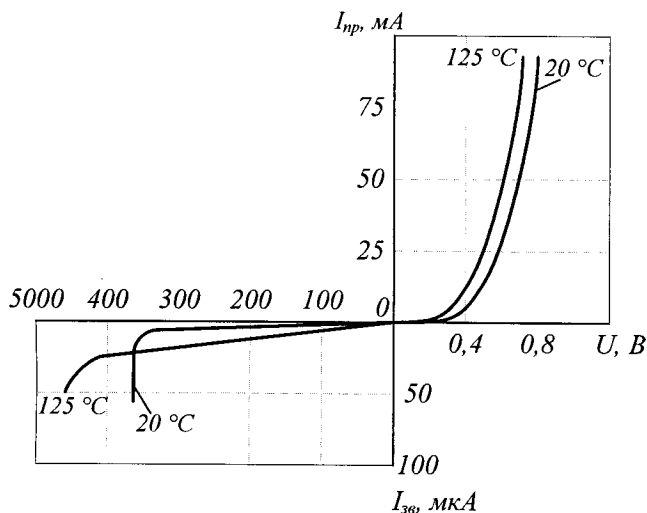


Рисунок 3 – Вольт-амперні характеристики кремнієвого випрямного діода при різних температурах навколишнього середовища

Зі збільшенням температури кремнієвого діода прямий спад напруги зменшується, що пов'язано із зменшенням висоти потенціального бар'єра і з перерозподілом носіїв заряду за енергіями.

Зворотна гілка ВАХ кремнієвих діодів не має ділянки насичення зворотного струму, оскільки зворотний струм в кремнієвих діодах викликаний, в основному, процесом генерації носіїв у р-п переході. Максимальна допустима зворотна напруга кремнієвих діодів (до 1600 В) значно перевищує аналогічний параметр германієвих діодів. Пробій кремнієвих діодів має лавинний характер. Тому із збільшенням температури пробивна напруга збільшується.

Верхня межа діапазону робочих температур кремнієвих діодів (приблизно 175°C) виявляється меншою, ніж у германієвих діодів, оскільки



ширина забороненої зони кремнію перевищує ширину забороненої зони германію. Тому теплова генерація носіїв заряду в результаті іонізації власних атомів напівпровідника (власна електропровідність) у кремнієвих діодах починає проявлятися при великих температурах.

Промисловість випускає кремнієві випрямні діоди малої, середньої та великої потужностей, розраховані на максимальний допустимий прямий струм до декількох сотень ампер.

Основні параметри

Основними параметрами, що характеризують випрямні діоди, є параметри, які показано на рис. 4:

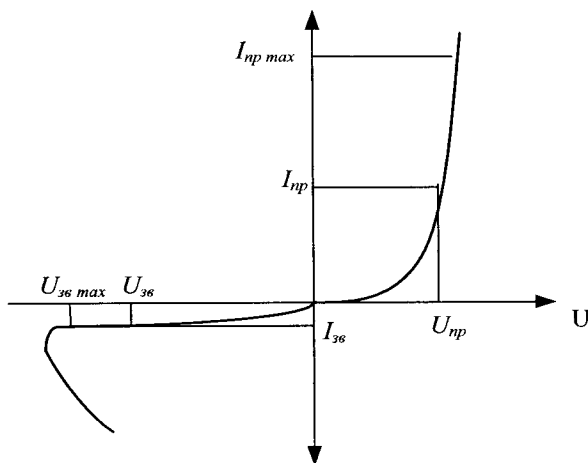


Рисунок 4 – ВАХ випрямного діода з позначеними основними параметрами

1. *Максимальний прямий струм $I_{np max}$* – струм, при якому діод може тривалий час працювати, зберігаючи свої параметри.

2. *Пряма напруга* – спад напруги на діоді при заданому значенні прямого струму I_{np} ($U_{np} \approx 0,3 \dots 0,7$ В для германієвих діодів і $U_{np} \approx 0,8 \dots 1,2$ В – для кремнієвих).

3. *Максимально допустима постійна зворотна напруга діода $U_{36 max}$* .

4. *Зворотний струм I_{36}* при заданій зворотній напрузі U_{36} (значення зворотного струму германієвих діодів на два-три порядки більше, ніж у кремнієвих).

5. *Бар'єрна ємність діода* при поданні на нього зворотної напруги певної величини.

6. *Діапазон частот*, у якому можлива робота діода без суттєвого зниження випрямленого струму.

7. *Робочий діапазон температур* (германієві діоди працюють у діапазоні $-60 \dots +70$ °С, кремнієві – у діапазоні $-60 \dots +150$ °С).

Еквівалентна схема

Малосигнальну еквівалентну схему діода подано на рис. 5.

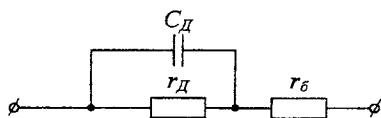


Рисунок 5 – Еквівалентна малосигнальна схема випрямного діода

На схемі позначено: C_D – ємність р-п-переходу, r_D – диференційний опір р-п-переходу, $r_б$ – омичний опір базової області діода.

Типові схеми включення

У випрямному пристрої енергія змінного струму перетворюється на енергію постійного струму за рахунок односторонньої провідності діодів.

На рис. 6 наведена схема однопівперіодного випрямляча.

Працює випрямляч таким чином. Якщо генератор виробляє синусоїдальну напругу $e(t) = E_m \sin(\omega t)$, то протягом позитивного (+) півперіоду напруга для діода є прямою, його опір малий, і через резистор проходить струм, що створює на резисторі R_H спад напруги $U_{вих}$, який повторює вхідну напругу $e(t)$. У наступний, негативний (-) півперіод, напруга для діода є зворотною, опір діода великий, струм практично відсутній і, отже, $U_{вих} = 0$. Таким чином, через діод і R_H протікає пульсуючий випрямлений струм. Він створює на резисторі R_H пульсуючу випрямлену напругу $U_{вих}$.

Корисною частиною випрямленої напруги є її середнє значення $U_{сеп}$:

$$U_{сеп} = U_{max} / \pi = 0,318 U_{max}$$

Таким чином, $U_{сеп}$ становить близько 30% від максимального значення. Кращі параметри мають схеми двопівперіодного та мостового випрямлячів.

Випрямлена напруга використовується як напруга живлення електричних та електронних схем.

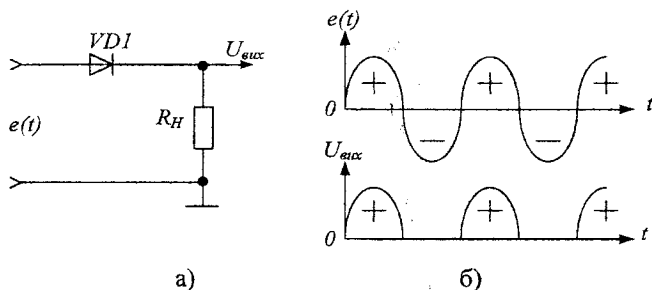


Рисунок 6 – Схема однопівперіодного випрямляча (а) та часові діаграми його роботи (б)

Конструкція випрямного діода

Конструкції випрямних діодів можуть бути найрізноманітнішими. Корпус діодів великої та середньої потужності, як правило, передбачає кріплення до тепловідводу, оскільки тепло, яке виділяється діодом, не може бути розсіяне самим корпусом. На рис. 7 наведені найбільш поширені конструкції виконання діодів.

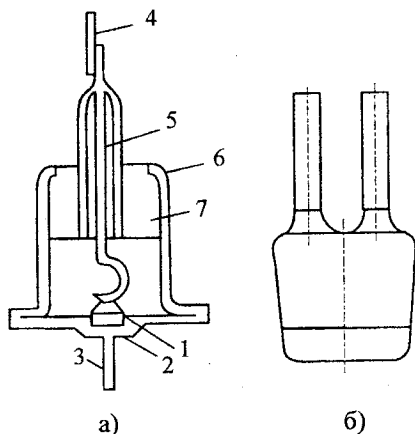


Рисунок 7 – Конструкції випрямних діодів:
а) малопотужний діод у металевому корпусі;
б) малопотужний діод в пластмасовому корпусі

На рис. 7, а) показано переріз діода ГД 101. У цьому діоді пластинка кристалу з р-n-переходом 1 розташована на металевій основі 2, до якої приварено катодний вивід 3. Анодний вивід 4 з'єднаний з пластинкою кристала за допомогою проводу 5. Корпус 6 складається із металевих балонів, зварених з основою та ізолювальною скляною шайбою 7.

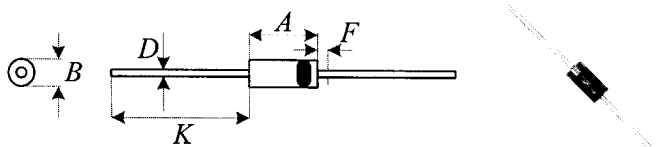
На рис. 7, б) показано площинний діод у пластмасовому корпусі КД513А.

Приклади серійних випрямних діодів

Діоди серії 1N40XX – одні з найстаріших і найвідоміших випрямних діодів. Це пояснюється доступністю, дешевизною і прийнятними для більшості випадків параметрами (середній прямий струм 1 А, в імпульсі – до 30 А, прямий спад напруги – 1,1 В). Всередині серії діоди відрізняються практично лише зворотною напругою: від 50 В для 1N4001 до 1000 В для 1N4007. Таким чином, за необхідності будь-який з діодів цієї серії може бути замінений більш високовольтним. Діоди випускаються в корпусі DO-41, з боку катода нанесене світле кільце.

Вітчизняними аналогами діодів 1N40XX є діоди серії КД243, відповідно від КД243А (зворотна напруга 50 В) до КД243Ж (1000 В).

Зовнішній вигляд діода 1N4003 наведено на рис. 8, а основні його параметри – у табл. 7.



A, мм		B, мм		D, мм		F, мм		K, мм	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
4,07	5,2	2,04	2,71	0,71	0,86	-	1,27	27,94	-

Рисунок 8 – Зовнішній вигляд випрямного діода 1N4003

Таблиця 7 – Основні технічні параметри випрямного діода 1N4003

Матеріал	Кремній
Максимальна постійна зворотна напруга, В	200
Максимальна імпульсна зворотна напруга, В	240
Максимальний прямий (випрямлений за півперіод) струм, А	1
Максимально допустимий прямий імпульсний струм, А	30
Максимальний зворотний струм, мкА при T = 25 °C	5
Максимальна пряма напруга, В при T = 25 °C	1,1
при I_{np} , А	1
Робоча температура, °C	-65...+150
Спосіб монтажу	У отвір
Корпус	DO204AL

3 ІМПУЛЬСНІ ДЮДИ. ДЮД ШОТТКІ

3.1 Імпульсні діоди

Імпульсний напівпровідниковий діод – це напівпровідниковий діод, який має малу тривалість перехідних процесів та призначений для застосування у імпульсних режимах роботи.

За способом виготовлення р-п-переходу імпульсні діоди поділяються на точкові, сплавні, зварні та дифузійні.

Призначення

Основне призначення імпульсних діодів – використання як комутувальних елементів електронних обчислювальних машин. Крім того, імпульсні діоди широко застосовують в радіоелектроніці для детектування високочастотних сигналів та для інших цілей. Умови роботи імпульсних діодів зазвичай відповідають високому рівню інжекції, тобто відносно великим прямим струмам. Тому властивості і параметри імпульсних діодів визначаються перехідними процесами.

Принцип роботи

Під впливом вхідного імпульсу позитивної полярності (рис. 9) через діод протікає прямий струм, величина якого визначається амплітудою імпульсу, опором навантаження та опором відкритого діода. Якщо на діод, через який протікає прямий струм, подати зворотну напругу так, щоб його закрити, то діод запирається не миттєво (рис. 10). У перший момент спостерігається різке збільшення зворотного струму I_1 через діод і лише поступово з часом він зменшується і досягає сталого значення I_{36} . Зазначене явище пов'язане зі специфікою роботи р-п-переходу і являє собою проявлення так званого ефекту накопичення.

Цей ефект полягає в тому, що при протіканні прямого струму через р-п-перехід відбувається інжекція носіїв. У результаті інжекції в безпосередній близькості до переходу створюється концентрація неосновних не-рівноважних носіїв, що у багато разів перевищує концентрацію рівноважних неосновних носіїв в області р-п-переходу: чим більша концентрація неосновних носіїв, тим більший зворотний струм. Час життя нерівноважних носіїв обмежений – поступово їхня концентрація зменшується як за рахунок рекомбінації, так і за рахунок розсмоктування через р-п-перехід. Тому через певний час (τ_e на рис. 10) нерівноважні неосновні носії зникнуть; зворотний струм відновиться до нормального значення I_{36} .

Основні характеристики

Основною характеристикою імпульсних діодів є перехідна характеристика, яка показує процес відновлення зворотного струму і зворотного опору діода при впливі на нього імпульсної напруги зворотної полярності (рис. 10).

При перемиканні діода з прямого напрямку на зворотний, у початковий момент часу через діод проходить великий зворотний струм, обмежений об'ємним опором бази (при ідеальному генераторі напруги). З часом накопичені в базі неосновні носії заряду рекомбінують або виходять з бази через р-п-перехід, після чого зворотний струм зменшується до свого стаціонарного значення (рис. 11).

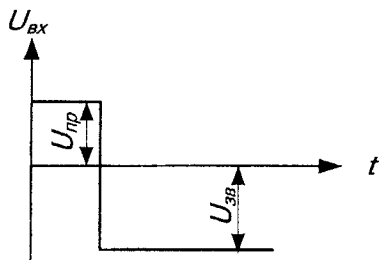


Рисунок 9 – Осцилограма напруги на імпульсному діоді

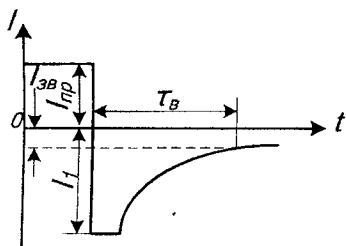


Рисунок 10 – Осцилограма струму через імпульсний діод

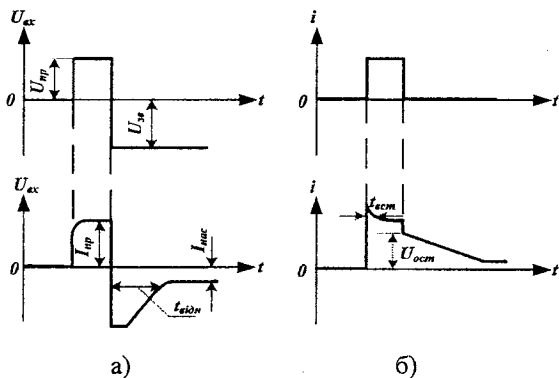


Рисунок 11 – Осцилограми струмів та напруг імпульсного діода при його роботі в схемах з генератором напруги (а) та з генератором струму (б)

Перехідний процес, протягом якого зворотний опір напівпровідникового діода відновлюється до постійного значення після швидкого перемицання з прямого напрямку на зворотний, називають відновленням зворотного опору діода.

Відповідно до осцилограми струмів та напруг імпульсного напівпровідникового діода, виділяють такі його параметри.

Основні параметри

1. *Час відновлення зворотного опору* τ_a – інтервал часу від моменту проходження струму через нуль після переключення діода з прямого стану в зворотний стан до моменту досягнення зворотним струмом заданого низького значення. За значенням цього параметра всі імпульсні діоди поділяють на 6 груп, які характеризуються часом відновлення зворотного опору: більше 500 нс, 150...500 нс, 30...150 нс, 5...30 нс, 1...5 нс та менше 1 нс.

При пропусканні імпульсу струму в прямому напрямку через діод спостерігається викид напруги в перший момент часу після включення. Це викликано підвищеним рівнем напруги до тих пір, поки не відбудеться накопичення неосновних носіїв заряду на базі діода (діяння р-n-переходу, у яку відбувається інжекція носіїв заряду) у результаті інжекції та не зменшиться об'ємний опір бази. Перехідний процес, протягом якого прямий опір напівпровідникового діода встановлюється до постійного значення після швидкого включення діода в прямому напрямку, називають встановленням прямого опору діода.

2. *Час встановлення прямої напруги діода* $t_{всм}$ – це час, який дорівнює інтервалу часу від моменту подачі імпульсу прямого струму на діод (при нульовій початковій напрузі зміщення) до досягнення заданого значення прямої напруги на діоді. Значення цих параметрів (τ_a та $t_{всм}$) залежать від структури діода, від часу життя неосновних носіїв заряду в базі діода, а також від умов вимірювання.

3. *Заряд переключення* $Q_{пк}$ – частина накопиченого заряду, що потрапляє в зовнішнє коло при зміні напрямку струму з прямого на зворотний.

4. *Загальна ємність* C_{Σ} – ємність, яка виміряна між выводами діода при заданих напрузі зсуву та частоті.

5. *Імпульсна пряма напруга* $U_{пр. i}$ – пікове значення прямої напруги на діоді при заданому імпульсі прямого струму.

6. *Імпульсний прямий струм* $I_{пр. i}$ – пікове значення імпульсу прямого струму при заданій тривалості, шпаруватості та формі.

Для імпульсних діодів вказують також величину постійної прямої напруги $U_{пр}$ при протіканні постійного струму $I_{пр}$ і величину зворотного струму $I_{зв}$ при заданій величині зворотної напруги $U_{зв}$. Граничні режими визначаються величиною максимально допустимої постійної зворотної напруги $U_{зв. max}$, максимально допустимою величиною імпульсної зворотної напруги $U_{зв. i. max}$, а також величинами максимально допустимого постійного прямого струму $I_{пр. max}$ і максимально допустимого імпульсного прямого струму $I_{пр. i. max}$.

Типова схема включення

Найпростіша схема включення імпульсного діода наведена на рис. 12.

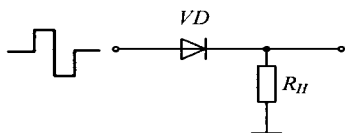


Рисунок 12 – Типова схема включення імпульсного напівпровідникового діода

На вхід цієї схеми подається імпульсний сигнал (див. рис. 9).

Конструкція імпульсного діода

Однією з перших було розроблено конструкцію точкового імпульсного діода. Точковий діод складається з кристала германію, припаяного до кристалотримача, контактної електрода у вигляді тонкої проволочки та скляного балона.

Точковий р-п-перехід в таких діодах може бути сформований за допомогою імпульсного струму, при проходженні якого потужність, що виділяється, розігріває область напівпровідника під точковим контактом.

На рис. 13 наведено два основні варіанти конструкції імпульсного діода.

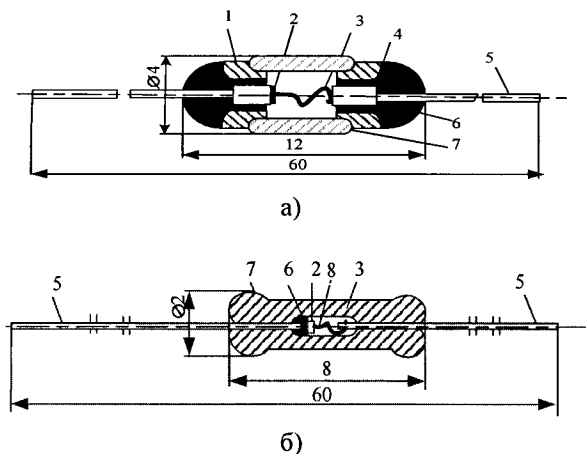


Рисунок 13 – Конструкції імпульсних діодів:
а) металоскляна (типу Д219, Д223); б) скляна (типу Д9)

На рис. 13 позначено:

- 1 – кристалотримач;
- 2 – кристал;
- 3 – контактна пружина (голка);
- 4 – коварова втулка;

- 5 – зовнішній вивід;
- 6 – припой;
- 7 – скляний корпус;
- 8 – залужений індієм кінчик голки.

Приклади серійних імпульсних діодів

Кремнієвий діод 1N4148 має такі параметри: прямий струм – не менший 150 мА, зворотна напруга 100 В і висока швидкість перемикання – не більша 4 нс. Ці параметри, а також дешевизна і відносно невеликий корпус DO-35 дозволили стати йому одним з найпоширеніших імпульсних діодів. Мітка у вигляді чорного кільця нанесена з боку катода.

Діод випускається багатьма десятками, якщо не сотнями фірм-виробників. Вітчизняним аналогом 1N4148 є діод КД522Б, причому найчастіше в маркетингових цілях і наші виробники маркують свою продукцію як 1N4148.

Зовнішній вигляд діода 1N4148 наведено на рис. 14, а основні його параметри – у табл. 8.

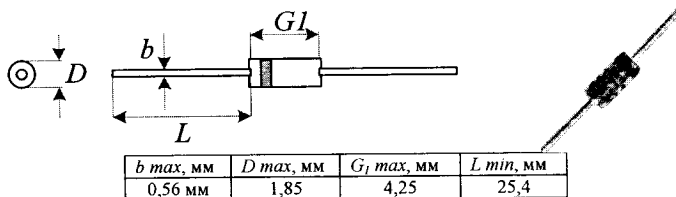


Рисунок 14 – Зовнішній вигляд імпульсного діода 1N4148

Таблиця 8 – Основні технічні параметри імпульсного діода 1N4148

Матеріал	Кремній
Максимальна постійна зворотна напруга, В	75
Максимальна імпульсна зворотна напруга, В	120
Максимальний прямий (випрямлений за напівперіод) струм, А	0,2
Максимально допустимий прямий імпульсний струм, А	0,45
Максимальний зворотний струм, мкА при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	5
Максимальна пряма напруга, В при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	1
при I_{np} , А	0,01
Максимальний час зворотного відновлення, мкс	0,004
Загальна ємність C_o , пФ	4
Робоча температура, $^{\circ}\text{C}$	-65...+150
Спосіб монтажу	у отвір
Корпус	DO35

3.2 Діод Шотткі

Діод Шотткі – це напівпровідниковий прилад, випрямні властивості якого ґрунтуються на використанні випрямного електричного переходу між металом та напівпровідником.

Призначення

Діоди Шотткі застосовуються як детекторні і змішувальні діоди аж до міліметрового і субміліметрового діапазонів хвиль. Також діоди з бар'єром Шотткі можуть бути використані для помноження і перетворення частот сигналів. Знаходять вони своє використання і у перемикальних схемах, а також у випрямлячах великих струмів і в логарифмувальних пристроях.

Принцип роботи

При утворенні контакту метал–напівпровідник електрони переходять з матеріалу з меншою роботою виходу в матеріал з більшою роботою виходу, в результаті чого рівні Фермі металу і напівпровідника вирівнюються. При цьому напівпровідник стає зарядженим позитивно, а внутрішнє електричне поле, що виникло, перешкоджає переходу електронів в метал. Між металом і напівпровідником виникає контактна різниця потенціалів U_k .

Завдяки різниці робіт виходу металу і напівпровідника між ними відбувається обмін електронами. Електрони з напівпровідника, що має меншу роботу виходу, переходять в метал з більшою роботою виходу. У рівноважному стані метал заряджається негативно, в результаті чого виникає електричне поле, яке припиняє однорідний перехід електронів.

Через різке розходження концентрацій вільних електронів по обидві сторони від контакту практично весь спад напруги припадає на приконтактну область напівпровідника. Прикладена зовнішня напруга змінює висоту бар'єра лише з боку напівпровідника. Створюється збіднений шар зі зниженою концентрацією рухомих носіїв. Близько контакту внаслідок вигину границь зон напівпровідник p-типу переходить у напівпровідник r-типу.

При прямому зсуві потенційний бар'єр з боку напівпровідника знижується і кількість переходів електронів у метал збільшується. При зворотному зсуві, навпаки, струм з напівпровідника зменшується, прямуючи до нуля із зростанням напруги. Струм електронів з металу весь час залишається незмінним. Роль його незначна: при проходженні прямого струму, ним же обумовлений струм витоку при зворотному зміщенні. Величина цього зворотного струму у приладах з бар'єром Шотткі порядку одиниць мікроампер. Зміна висоти бар'єра Шотткі приводить до зміни протікання струму через прилад. Найголовніша особливість діодів Шотткі – це низький рівень спаду прямої напруги переходу, відсутність заряду зворотного відновлення. На основі бар'єра Шотткі виготовляють зокрема швидкодійні й ультрашвидкі діоди, які використовуються, головним чином, як НВЧ діоди різного призначення.

Основні характеристики

ВАХ діода Шотткі нагадує характеристику звичайних р-п-переходів, відмінність полягає в тому, що пряма гілка в межах 8–10 декад напруги являє собою майже ідеальну експоненційну криву, а зворотні струми досить малі – 10^{-10} ... 10^{-9} А. ВАХ діода Шотткі зображена на рис. 15.

У діоді Шотткі відсутні явища накопичення й розсмоктування основних носіїв, тому вони дуже швидкодійні й можуть працювати на частотах до десятків гігагерц. Пряма напруга становить $\sim 0,4$ В, прямий допустимий струм може досягати сотні ампер, а зворотна напруга – сотень вольт.

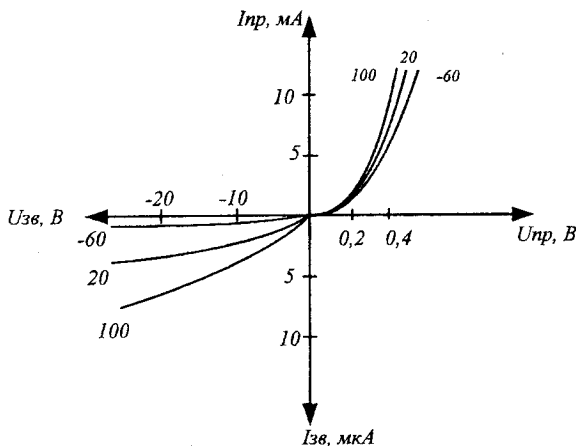


Рисунок 15 – ВАХ діода Шотткі при різних температурах

Основні параметри

До основних параметрів діодів Шотткі відносять такі.

1. Максимально допустима зворотна напруга, яку діод може витримати без втрати його роботоздатності.
2. Максимальний середній випрямлений струм.
3. Максимальне пікове значення імпульсу струму при заданих максимальній тривалості, шпаруватості та формі імпульсу.
4. Середня пряма напруга діода при заданому середньому значенні прямого струму.
5. Максимальна середня за період потужність, що розсіюється діодом при протіканні струму в прямому і зворотному напрямках.
6. Диференціальний опір діода в прямому включенні.
7. Час перемикання.

Еквівалентна схема

Імпульсні властивості діодів Шотткі визначаються їх граничною робочою частотою: $f_p = 1/2\pi r_c C_\delta$, де r_c – опір переходу, C_δ – бар'єрна ємність.

У діодах Шотткі гранична частота значно вища, ніж у діодів на р-n-переходах. Це досягається як за рахунок технології виготовлення діодів, так і вибору оптимальної конструкції.

Еквівалентна схема діода Шотткі подана на рис. 16.

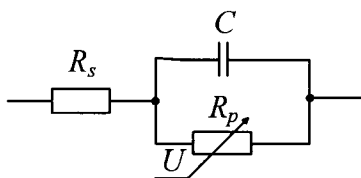


Рисунок 16 – Еквівалентна схема діода Шотткі

Резистор R_s являє собою опір об'єму напівпровідника (опір бази), а R_p – нелінійний опір переходу Шотткі, що залежить від прикладеної напруги.

Конструкція діода Шотткі

Конструктивно діоди Шотткі виконують у вигляді пластини з низькоомного кремнію, на яку нанесена високоомна епітаксialьна плівка з електропровідністю того ж типу. На поверхню плівки вакуумним напиленням нанесений шар металу (рис. 17).

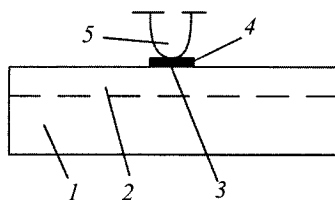


Рисунок 17 – Конструкція діода Шотткі

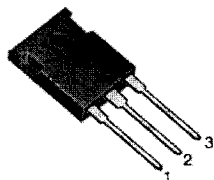
Структура діода містить такі елементи: 1 – напівпровідникова підкладка, 2 – епітаксialьна плівка, 3 – контакт метал–напівпровідник, 4 – металева плівка, 5 – зовнішній контакт.

Приклади серійних діодів Шотткі

Діоди Шотткі SBL3040PT–E3/45 забезпечують високі швидкості перемикання. Зниження втрат забезпечується за рахунок надзвичайно низької прямої напруги. Ці діоди ідеально підходять для використання в країнах з низьковольтними, високочастотними електромережами. Дані діоди застосовуються у високочастотних джерелах живлення, DC–DC перетворювачах, для захисту від зворотної полярності напруги живлення. Особливостями діодів SBL3040PT–E3/45 є їхній захист від перенавантаження, зниження втрат потужності, висока ефективність, низький спад напруги

та високий струм (до 30 А) у прямому напрямку, висока швидкість наростання напруги в прямому напрямку, а також висока робоча частота.

Зовнішній вигляд подвійного діода SBL3040PT-E3/45 наведено на рис. 18, а основні його параметри – у табл. 9.



1 – анод першого діода, 2 – спільний катод, 3 – анод другого діода

Рисунок 18 – Зовнішній вигляд діода Шоттки SBL3040PT-E3/45

Таблиця 9 – Основні технічні параметри діода Шоттки SBL3040PT-E3/45

Максимальна допустима зворотна напруга, В	40
Максимально допустимий прямий струм, А	30
Спад напруги в прямому напрямку при прямому струмі 15 А, мВ	550
Максимальний зворотний струм втрат при зворотній напрузі 40 В, мА	1
Час перемикання при $I > 200\text{мА}$, нс	500
Температурний діапазон, °С	-40 ÷ +125
Конфігурація	Подвійний зі спільним катодом
Тип монтажу	Через отвори
Корпус	ТО-3P-3, ТО-247-3

4 СТАБІЛІТРОНИ. СТАБІСТОРИ

4.1 Стабілітрон

Стабілітрон – це спеціальний напівпровідниковий діод, при роботі якого використовується зворотна гілка вольт-амперної характеристики в режимі електричного пробую.

Призначення

Основна галузь застосування стабілітрона – стабілізація постійної напруги джерел живлення. У найпростішій схемі лінійного параметричного стабілізатора стабілітрон виступає одночасно і джерелом опорної напруги, і силовим регульовальним елементом. У складніших схемах стабілітрону відводиться тільки функція джерела опорної напруги, а регульовальним елементом слугує зовнішній силовий транзистор.

Принцип роботи

Принцип роботи стабілітрона полягає в його електричному пробі при певній напрузі. Наприклад, коли напруга на стабілітроні різко збільшується, перевищуючи поріг, стабілізувальний діод відкривається і за рахунок опору формує напругу потрібної величини. Як тільки напруга знижується до значення менше порогового, він закривається і далі не бере участь в роботі електричного кола. Пробій р-п-переходу стабілітрона не призводить до виходу приладу з ладу, якщо при цьому струм, що проходить через нього, не перевищує максимально допустимого значення.

У стабілітроні, до якого прикладено зворотну напругу, можливі три механізми пробую: тунельний пробій, лавинний пробій і пробій внаслідок теплової нестійкості – катастрофічного саморозігрівання струмами втрат. Стабілітрони проектуються і виготовляються таким чином, що або тунельний, або лавинний пробій, або обидва ці явища разом виникають задовго до того, як в кристалі діода виникнуть передумови до теплового пробую.

Напруга пробую стабілітрона визначається концентраціями акцепторів та донорів, а також профілем легування області р-п-переходу. Чим вищі концентрації домішок і чим більший їх градієнт в переході, тим більша напруженість електричного поля в області просторового заряду при однаковій зворотній напрузі, і тим менша зворотна напруга, при якій виникає пробій.

Тунельний, або зернівський, пробій виникає в напівпровіднику тільки тоді, коли напруженість електричного поля в р-п-переході досягає рівня в 10^6 В/см. Такі рівні напруженості можливі тільки в високолегованих діодах (структурах р⁺-п⁺-типу провідності) з напругою пробую не більшою шестикратною ширини забороненої зони (6,7 В), при цьому в діапазоні 4,5 ... 6,7 В тунельний пробій співіснує з лавинним, а при напрузі пробую меншій 4,5 В повністю витісняє його. Зі зростанням температури переходу ширина забороненої зони, а разом з нею і напруга пробую, зменшується: низьковольтні

стабілітрони з переважанням тунельного пробію мають негативний температурний коефіцієнт напруги (ТКН).

У діодах з меншими рівнями легування, або меншими градієнтами легувальних домішок, і, як наслідок, великими напругами пробію спостерігається лавинний механізм пробію. При напругах пробію 7,2 В лавинний механізм пробію повністю витісняє тунельний механізм пробію. Напруга, при якій виникає лавинний пробій, із зростанням температури зростає, а найбільша величина ТКН пробію спостерігається в низьколегованих переходах.

Основні характеристики

Стабілітрон у своїй роботі використовує зворотну гілку вольт-амперної характеристики. На рис. 19 показано ВАХ стабілітрона.

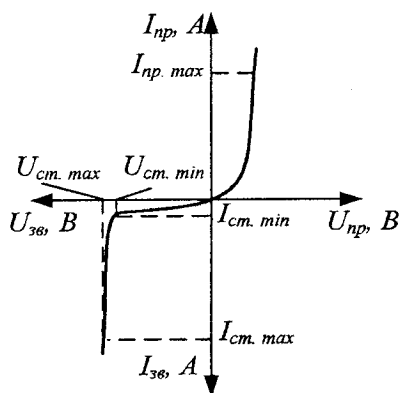


Рисунок 19 – ВАХ стабілітрона

При значних змінах сили зворотного струму через діод напруга на ньому практично не змінюється (стабільна). Якщо паралельно стабілітрону підключити навантаження, то напруга на ньому теж не буде змінюватися. Стабілітрони виготовляються з кремнію і називаються іноді опорними діодами. У них до настання пробію зворотний струм дуже малий, а в режимі пробію прирівнюється до прямого струму.

Основні параметри

Стабілітрон характеризується такими основними параметрами.

1. Мінімальний і максимальний струми стабілізації.
2. Напруга стабілізації при заданому струмі стабілізації.
3. Диференціальний опір.
4. Температурний коефіцієнт напруги стабілізації.
5. Максимальна допустима потужність, що розсіюється в стабілітроні.

Диференціальний опір – це відношення зміни напруги стабілізації до зміни сили струму стабілізації. Зміну струму потрібно вибирати якомога меншою, щоб можна було вказати значення опору для певного струму стабілізації. Із зменшенням струму стабілізації диференціальний опір стабілітрона збільшується. Мінімальне значення струму стабілізації визначається допустимим збільшенням диференціального опору стабілітрона.

Диференціальний опір стабілітронів становить одиниці і десятки ом. Для ідеального стабілітрона диференціальний опір дорівнює нулю і робочу (зворотну) гілку ВАХ можна апроксимувати двома відрізками прямих. При напрузі, меншій напруги стабілізації, струм через стабілітрон дорівнює нулю. При напрузі, яка дорівнює напрузі стабілізації, зміна струму через стабілітрон не приводить до зміни напруги на ньому.

Диференціальний опір стабілітрона (опір за змінним струмом) не слід плутати з його статичним опором (опором за постійним струмом), який у багато разів більший диференціального.

Максимальний струм стабілізації стабілітрона визначається допустимою потужністю розсіювання.

Температурний коефіцієнт напруги стабілізації показує відносну зміну напруги стабілізації при зміні температури на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$TKH = \frac{\Delta U_{cm}}{U_{cm} \Delta T}$$

Часто ТКН виражають у відсотках.

ТКН стабілізації може бути негативним (у напівпровідниках з великою концентрацією домішок, малою товщиною переходу, де пробій відбувається за рахунок тунельного ефекту) і позитивним (в напівпровідниках з меншою концентрацією домішок, більшою товщиною р-п-переходу, де пробій виникає при більш високих напругах і є лавинним). У деяких стабілітронів ТКН стабілізації змінює знак при зміні величини струму через стабілітрон.

Значення струму через стабілітрон, при якому змінюється знак ТКН стабілізації, визначає так звану *термостабільну точку стабілітрона*. Знання такої точки важливе при проектуванні високостабільних стабілізаторів постійної напруги.

Еквівалентна схема

Еквівалентна схема стабілітрона наведена на рис. 20.

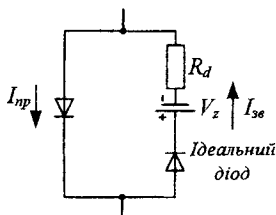


Рисунок 20 – Еквівалентна схема стабілітрона

У зворотному напрямку еквівалентна схема стабілітрона містить у собі «батарею» (V_z), яка перешкоджає протіканню зворотного струму до напруги стабілізації. Еквівалентна схема не є достатньо точною, оскільки зворотний опір залежить від температури. У більшості практичних випадків величиною опору в режимі пробою можна знехтувати і при розрахунках враховується тільки напруга стабілізації.

Типова схема включення

Схему включення стабілітрона наведено на рис. 21. Ця схема називається параметричним стабілізатором напруги і, незважаючи на свою простоту, використовується досить широко. Така схема дозволяє отримати струм у навантаженні в кілька міліампер.

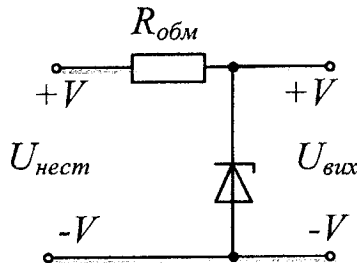


Рисунок 21 – Схема включення стабілітрона

Навантаження включене паралельно стабілітрону, тому в режимі стабілізації, коли напруга на стабілітроні постійна, така ж напруга буде і на навантаженні. Усі зміни вхідної напруги будуть поглинатися резистором $R_{обм}$, який ще називають баластним. Він задає струм через стабілітрон таким чином, щоб величина струму була близькою до середнього значення між мінімальним струмом стабілізації та максимальним його значенням. Таке значення струму називається номінальним струмом стабілізації. Якщо вхідна напруга буде змінюватися, то буде змінюватися струм стабілітрона, але напруга на ньому, а отже і на навантаженні, буде залишатися сталою.

Слід зазначити, що якщо мають місце пульсації вхідної напруги, то стабілітрон непогано згладжує їх. Це пояснюється тим, що стабілітрон має малий опір змінному струму. Цей опір зазвичай у багато разів менший за опір $R_{обм}$, тому основна частина пульсацій поглинається в цьому резисторі, а на стабілітроні і в навантаженні виділяється лише незначна їх частина.

Серійні стабілітрони виготовляються з кремнію. Відомі також перспективні розробки стабілітронів з карбїду кремнію і арсенїду галїю.

Конструкція стабілітрона

Конструкція стабілітрона показана на рис. 22.

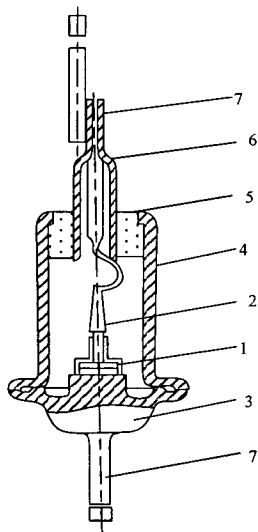


Рисунок 22 – Конструкція малопотужного стабілітрона

Кристал 1 з р-п-переходом з'єднується з зовнішніми виводами через внутрішній вивід 2 та кристалотримач 3. Кристал поміщено в герметизований металевий корпус 4. Внутрішній вивід 2 через ізолятор 5 та трубку 6 з'єднаний із зовнішнім виводом 7. Для забезпечення герметичності при складанні корпусів використовують метод «холодного» зварювання.

Приклади серійних стабілітронів

Стабілітрони серії BZV55 – це кремнієві стабілітрони потужністю 0,5 Вт для поверхневого монтажу. Фактично, ці стабілітрони є SMD аналогами стабілітронів серії BZX55. Діапазон стабілізації напруги зазвичай становить від 2,4 В до 75 В, хоча деякі виробники випускають стабілітрони з напругою стабілізації до 200 В. Пікова потужність розсіювання становить 30 Вт, у деяких виробників заявлена потужність навіть 40 Вт.

Зовнішній вигляд діода BZV55C12 наведено на рис. 23, а основні його параметри – у табл. 10.

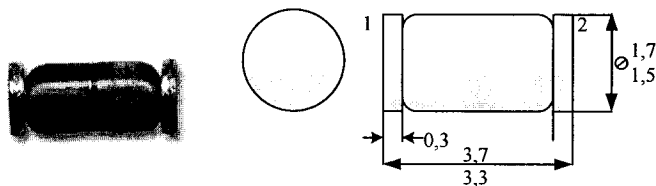


Рисунок 23 – Зовнішній вигляд стабілітрона BZV55C12

Таблиця 10 – Основні технічні параметри стабілітрона BZV55C12

Потужність розсіювання, Вт	0,5
Мінімальна напруга стабілізації, В	11,4
Номінальна напруга стабілізації, В	12
Максимальна напруга стабілізації, В	12,7
Диференційний опір R_{cm} , Ом	20
при струмі I_{cm} , мА	5
Робоча температура, °С	-55...+200
Спосіб монтажу	SMD
Корпус	DL35

4.2 Стабістор

Стабістор – це напівпровідниковий діод, напруга на якому в області прямого зміщення слабо залежить від струму в заданому діапазоні і який призначений для стабілізації напруги.

Призначення

Відмінною рисою стабісторів порівняно зі стабілітронами є менша напруга стабілізації, яка визначається прямим спадом напруги на діоді, і становить приблизно 0,7 В. Послідовне з'єднання двох чи трьох стабісторів дає можливість отримати подвоєне або потроєне значення напруги стабілізації. Таким чином, стабістори мають призначення, аналогічне призначенню стабілітронів.

Принцип роботи

Стабістори мають від'ємний температурний коефіцієнт напруги стабілізації, тобто напруга на стабісторі при незмінному струмі зменшується зі зростанням температури. Це пов'язано, по-перше, із зменшенням висоти потенційного бар'єра на р-п-переході при зростанні температури і, по-друге, з перерозподілом носіїв заряду за енергіями, що із зростанням температури приводить до переходу через потенціальний бар'єр більшої кількості носіїв. Через від'ємний температурний коефіцієнт напруги та нелінійність ВАХ, яка забезпечує стабілізацію напруги, стабістори використовують для температурної компенсації стабілітронів з додатним температурним коефіцієнтом напруги стабілізації. Для цього послідовно зі стабілітроном необхідно включити один або декілька стабісторів.

Основна частина стабісторів – це кремнієві діоди, які відрізняються від звичайних випрямних діодів тим, що р-п-переходи для стабісторів формують в низькоомному кремнії. Це необхідно для меншого об'ємного опору бази і відповідно меншого диференційного опору стабістора. Окрім кремнієвих стабісторів промисловість випускає також селенові полікристалічні стабістори, які відрізняються простотою виготовлення, а отже, і меншою вартістю. Однак селенові стабістори мають менший гарантований термін роботи (1000 год) та вузький діапазон робочих температур (-25...+60 °С).

Основні характеристики

На відміну від стабілітрона, стабістори в своїй роботі використовують пряму гілку вольт-амперної характеристики. Стабілізацію постійної напруги можна отримати при використанні діода, включеного в пряму напрямку, використовуючи для цього круту ділянку прямої гілки ВАХ (рис. 24).

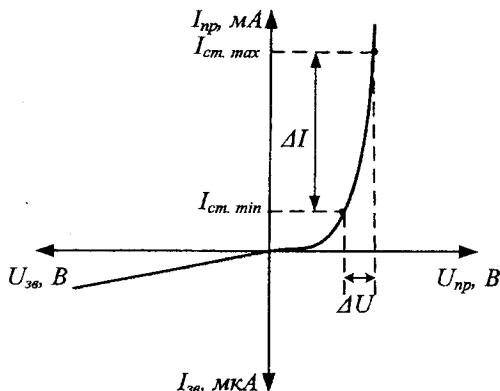


Рисунок 24 – Вольт-амперна характеристика стабістора

В області прямого зміщення р-п-переходу напруга на ньому має значення 0,7 ... 2 В і мало залежить від струму. Через це стабістори дозволяють стабілізувати лише малі напруги (не більше 2 В). Для обмеження струму через стабістор послідовно з ним включають опір. На відміну від стабілітронів, при збільшенні температури напруга на стабістори зменшується, оскільки пряма напруга на діоди має від'ємний ТКН.

Основні параметри

Стабістори характеризуються такими ж параметрами, що і стабілітрони.

Типова схема включення

Основна відмінність у схемі включення стабістора від схеми включення стабілітрона – використання прямої гілки ВАХ, через що полярність включення стабістора є прямою (рис. 25):

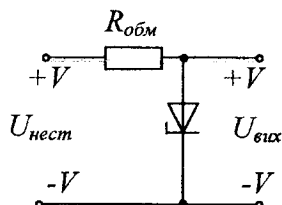


Рисунок 25 – Схема включення стабістора

Опір струмообмежувального або баластного резистора розраховується за формулою:

$$R_{обм} = (U_{нест} - U_{вих}) / (I_{стаб} + I_{нав}),$$

де $U_{нест}$ – нестабілізована напруга;

$U_{вих}$ – напруга на виході (стабілізована);

$I_{стаб}$ – струм стабілізації стабілітрона;

$I_{нав}$ – струм, споживаний навантаженням.

Для нормальної роботи такого стабілізатора необхідно, щоб струм $I_{ст}$, що протікає через стабістор, не був меншим за $I_{ст.мін}$ і більшим за $I_{ст.макс}$. При зміні струму, що протікає через стабістор в цих межах, на ньому і на підключеному паралельно йому навантаженні R_n напруга, що є напругою стабілізації $U_{ст}$ стабістора, буде залишатися постійною.

Якщо напруга $U_{вх}$, що надходить на вхід стабілізатора, у процесі роботи може змінюватися від деякого найменшого значення $U_{вх.мін}$ до найбільшого $U_{вх.макс}$, то при незмінній напрузі на стабілітроні всі зміни вхідної напруги повинні поглинатися на резисторі $R_{обм}$. Тому резистор $R_{обм}$ називають баластним. Щоб при цій зміні напруги на вході струм, що протікає через стабістор, не виходив за межі, обмежені значеннями $I_{ст.мін}$ і $I_{ст.макс}$, потрібно правильно розрахувати опір резистора $R_{обм}$.

Приклади серійних стабісторів

Стабістори кремнієві мікросплавні Д219С призначені для стабілізації постійної та імпульсної напруги і обмеження імпульсів напруги. Випускаються в металоскляному корпусі з гнучкими виводами. Маса стабістора не перевищує 0,5 г.

Зовнішній вигляд діода Д219С наведено на рис. 26, а основні його параметри – у табл. 11.

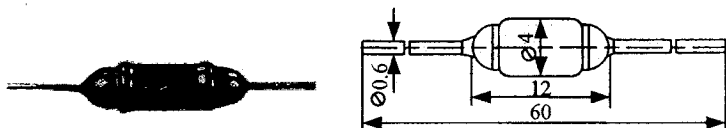


Рисунок 26 – Зовнішній вигляд стабістора Д219С

Таблиця 11 – Основні технічні параметри стабістора Д219С

Значення параметрів при $T=25^{\circ}C$						
$U_{ст.ном.}, В$	$I_{ст.ном.}, мА$	$P_{макс.}, мВт$	$U_{ст.макс.}, В$	$r_{ст.}, Ом$	$I_{ст.макс.}, мА$	$T_{к.макс.} (T_n), C$
0,57	1,0	50	1	8,8	50	120

5 ВАРИКАПИ

Варикап – напівпровідниковий елемент, у якому використовується властивість електронно-діркового переходу змінювати свою ємність залежно від прикладеної напруги.

Призначення

Варикапи призначені для використання як керована напругою електрична ємність. Працює при зворотній напрузі на р-п-переході. Варикап використовується в схемах автоматики, інформаційно-вимірювальної техніки, у радіотехніці.

Принцип роботи

При відсутності зовнішньої напруги в р-п-переході існує потенціальний бар'єр і внутрішнє електричне поле. Якщо до діода прикласти зворотну напругу, то висота цього потенціального бар'єра збільшиться. Зовнішня зворотна напруга відштовхує електрони вглиб п-області, у результаті чого відбувається розширення збідненої області р-п-переходу, яку можна подати як найпростіший плоский конденсатор, у якому обкладинками є межі області. У такому випадку зі зростанням відстані між обкладинками (викликані зростанням значення зворотної напруги) ємність р-п-переходу буде зменшуватися. Це зменшення обмежене лише товщиною бази, далі якої перехід розширюватися не може. Після досягнення цього мінімуму із зростанням зворотної напруги ємність не змінюється.

Основні характеристики

До основних характеристик варикапа відносять його вольт-фарядну характеристику, зображену на рис. 27.

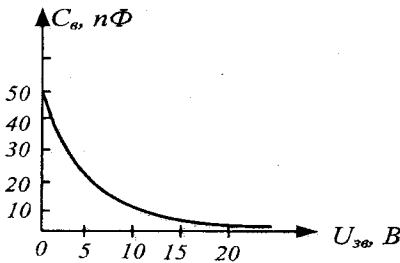


Рисунок 27 – Залежність ємності варикапа від зворотної напруги

З графіка видно, що чим більша зворотна напруга, тим менша ємність варикапа.

Основні параметри

1. Номінальна ємність $C_{ном}$ (при напрузі -4 В).
2. Максимальна ємність C_{max} (при максимально допустимій зворотній напрузі).

3. *Мінімальна ємність C_{\min}* (при добротності $Q = 1$).

4. *Коефіцієнт перекриття за ємністю* – відношення максимальної ємності C_{\max} варикапа до його мінімальної ємності C_{\min} :

$$K_c = \frac{C_{\max}}{C_{\min}}.$$

5. *Добротність* – визначається відношенням реактивної потужності варикапа P_p до активної потужності P_a або як відношення реактивного опору варикапа на заданій частоті до опору втрат при заданому значенні ємності або зворотної напруги.

6. *Постійний зворотний струм* – постійний струм, що протікає через варикап при заданій зворотній напрузі.

7. *Максимально допустима постійна зворотна напруга.*

8. *Максимально допустима розсіявана потужність.*

9. *Температурні коефіцієнти ємності і добротності* – відношення відносно зміни ємності (добротності) варикапа до абсолютної зміни температури, що викликала її. У загальному випадку ці коефіцієнти залежать від значення зворотної напруги, прикладеної до варикапа.

$$\alpha = \frac{\Delta C}{C \Delta T}.$$

10. *Гранична частота варикапа* – значення частоти, на якій реактивна складова провідності варикапа дорівнює активній складовій. Вимірювання граничної частоти виконується при заданих зворотній напрузі та температурі, які в свою чергу залежать від типу варикапа:

$$f_{gp} = \frac{1}{2\pi R_n C},$$

де R_n – послідовний опір втрат;

C – ємність варикапа.

Еквівалентна схема

Поведінка варикапа визначається параметрами еквівалентної схеми приладу, яка у спрощеному вигляді, без урахування індуктивностей виводів і ємності корпусу, наведена на рис. 28. Р-п-перехід представлений $r_{\text{диф}}$ і C_6 , які характеризують роботу варикапів на низьких частотах. На високих частотах роботу приладу визначає опір r_s , включений послідовно, який є омичним опором варикапа і складається з опору омичних контактів і розподіленого опору бази r_6 . Останній визначається питомим опором вихідного матеріалу ρ і геометричними розмірами бази: $r_6 = \rho\omega/S$, де ω – товщина бази; S – площа переходу.

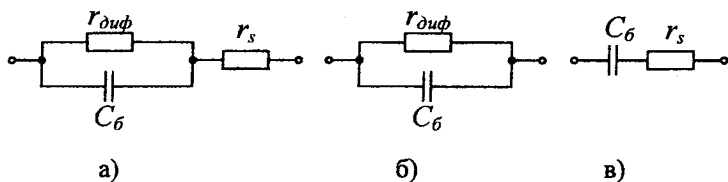


Рисунок 28 – Еквівалентна схема варикапа:

а) повна спрощена схема варикапа; б) еквівалентна схема варикапів для низьких частот, в) еквівалентна схема варикапів для високих частот

Величина r_s визначає добротність варикапів Q в діапазоні робочих частот. Добротність Q характеризує якість ємності діода, вона визначається як відношення повного реактивного опору до повного активного опору діода на заданій частоті.

Типова схема включення

Типова схема включення варикапів в коливальний контур наведена на рис. 29.

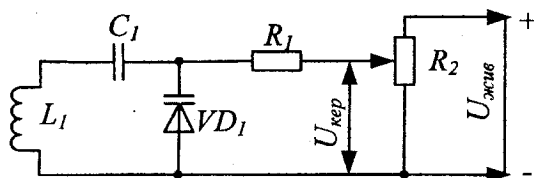


Рисунок 29 – Схема включення варикапа

На схемі на R_2 подається стабілізована напруга $U_{жив}$. Напруга керування варикапа $U_{кер}$ формується за допомогою змінного резистора R_2 . Змінюючи напругу керування $U_{кер}$ за допомогою резистора R_2 , змінюємо ємність варикапа. Це, в свою чергу, приводить до зміни резонансної частоти коливального контуру.

Конструкція варикапа

Головна складність при конструюванні варикапів полягає в тому, щоб отримати високу добротність Q при достатньо великому коефіцієнті перекриття ємності K_C (високій напрузі пробою, і, отже, високому питомому опорі ρ). Отже, необхідно отримати малу величину опору варикапа, використавши вихідний матеріал з високим питомим опором ρ і забезпечити мінімальну товщину бази ω . При конструюванні варикапів вибирають матеріал з такою мінімально можливою величиною ρ , яка дозволяє забезпечувати необхідну напругу пробою. Один з варіантів конструкції показаний на рис. 30.

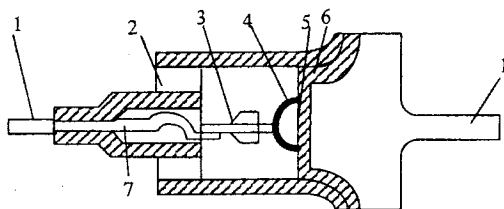


Рисунок 30 – Конструкція варикапа

У кристал кремнію 4 з одного боку втиснений у вакуумі алюмінієвий стовп 3 для отримання р-п-переходу, а з іншого боку – сплав золото–сурма для отримання омичного контакту 5. Ця структура вплавляється у вакуумі в позолочений кристалотримач 6. До алюмінієвого стовпа прикріплений внутрішній вивід 7. З'єднання зовнішнього виводу 1 з балоном здійснюється через скляний ізолятор 2.

Варикапи випускаються в металоскляних та пластмасових корпусах з гнучкими водрами. Тип варикапів і схема з'єднання електродів з виводами наводяться на корпусі.

Приклади серійних варикапів

Варикап кремнієвий епітаксіально-дифузійний KB107A випускається в металоскляному корпусі з гнучкими виводами. Анодний вивід маркується червоною точкою. Маса даного варикапа не більша 1 г.

Зовнішній вигляд KB107A наведено на рис. 31, а основні його параметри – у табл. 12.

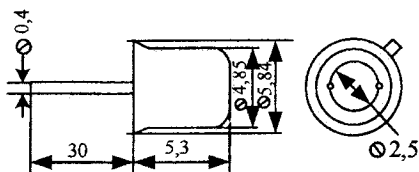


Рисунок 31 – Зовнішній вигляд варикапа KB107A

Таблиця 12 – Основні технічні параметри варикапа KB107A

Значення параметрів при $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$						
$C_{ном}$ пФ	K_c	Q	При f , МГц	$U_{звор. макс.}$ В	$I_{звор.}$ мкА	$P_{макс}$ Вт
5	1,5	20	10	16	100	0,1

6 ВИСОКОЧАСТОТНІ ДІОДИ

Високочастотні діоди – прилади універсального призначення, які можуть бути використані для випрямлення, детектування і інших нелінійних перетворень електричних сигналів у діапазоні високих частот (до 300 МГц). Високочастотні діоди виготовляються, як правило, з германію чи кремнію і мають точкову структуру.

Призначення

Напівпровідникові високочастотні діоди застосовують в різноманітній радіоелектронній апаратурі та вимірювальній техніці для модуляції, детектування та інших нелінійних перетворень.

Принцип роботи

Для одержання р-п-переходу діод у процесі виготовлення піддають струмовому формуванню. З цієї метою через нього в прямому напрямку пропускається короткочасний імпульс струму величиною до 400 мА. У результаті тонкий шар напівпровідника, що примикає до вістря, набуває діркової провідності, а на границі між цим шаром і основною масою пластинки виникає р-п-перехід. Така конструкція діода забезпечує невелику величину ємності р-п-переходу (не більше 1 пФ), що дозволяє ефективно використовувати діод на високих частотах. Однак мала площа контакту між частинами напівпровідника з провідністю типу *n* і *p* не дозволяє розсіювати в області р-п-переходу значну потужність. Тому точкові діоди менш потужні, ніж площинні, і не використовуються у випрямлячах, які розраховані на великі напруги і струми. Вони застосовуються, головним чином, у схемах радіоприймальної і вимірювальної апаратури, що працює на високих частотах, а також у випрямлячах при напругах, не вищих декількох десятків вольт, при струмі порядку десятків міліампер.

Основні характеристики

Типова вольт-амперна характеристика точкового діода показана на рис. 32. Зворотна гілка характеристики точкового діода значно відрізняється від відповідної ділянки характеристики площинного діода. Через малу площу р-п-переходу зворотний струм діода малий, ділянка насичення невелика і не так різко виражена. При збільшенні зворотної напруги зворотний струм збільшується майже рівномірно.

Вплив температури на величину зворотного струму позначається слабше, ніж у площинних діодах. Подвоєння зворотного струму відбувається при збільшенні температури на 15–20 °С.

Основні параметри

До основних параметрів діода відносяться параметри еквівалентної схеми (рис. 33) і деякі інші загальні параметри, до яких належать:

1. *Загальна ємність діода* C_d – ємність, яка виміряна між выводами діода при заданих напрузі та частоті;
2. *Диференціальний опір* $r_{диф}$ – відношення приросту напруги на діоді до малого приросту струму, що викликав це збільшення;

3. Діапазон частот Δf – різниця граничних значень частот, при яких середній випрямлений струм діода не менший заданої частки його значення на нижчій частоті;

4.

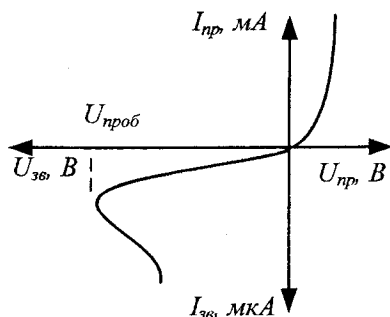


Рисунок 32 – Вольт-амперна характеристика точкового діода

Еквівалентна схема

Еквівалентна схема високочастотного діода показана на рис. 33, де штриховою лінією виділена напівпровідникова пластина.

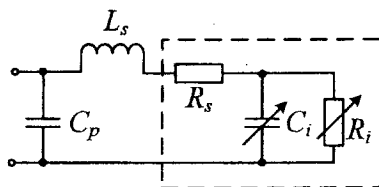


Рисунок 33 – Еквівалентна схема високочастотного діода

Відмінність еквівалентних схем різних типів діодів, в основному, визначається характером і величинами ємності і опору переходу. Ємність переходу C_i може бути постійною або змінною, змінюючись залежно від величини прикладених постійних і змінних напруг; опір переходу R_i також може змінюватися від величини прикладених постійних і змінних напруг.

Конструкція високочастотних діодів

Високочастотні діоди виготовляють з малою робочою поверхнею точкового переходу (завдяки чому вони мають малу (менше 1 пФ) бар'єрну ємність) і дуже малим питомим опором бази (приблизно 0,01 – 0,001 Ом·см), унаслідок чого досягається малий час життя неосновних носіїв заряду. У результаті діоди можуть ефективно працювати в діапазоні високих частот.

Приклади серійних високочастотних діодів

Діод 2Д401А – кремнієвий мікросплавний діод, призначений для детектування високочастотних сигналів. Випускається в металоскляному корпусі з гнучкими виводами. Тип діода і схема з'єднання електродів з виводами наводяться на корпусі. Маса діода не більша 0,53 г.

Зовнішній вигляд діода 2Д401А наведено на рис. 34, а основні його параметри – у табл. 13.

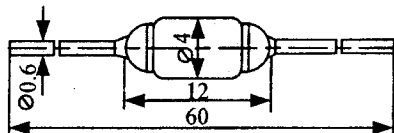


Рисунок 34 – Зовнішній вигляд високочастотного діода 2Д401А

Таблиця 13 – Основні технічні параметри високочастотного діода 2Д401А

Максимально допустима постійна ($U_{зв}$) або імпульсна ($U_{имп}$) зворотна напруга, В	75
Максимально допустимий постійний ($I_{пр}$) або імпульсний ($I_{имп}$) прямий струм, мА	30/90
Максимальний спад напруги ($U_{пр}$) на діоді при заданому прямому струмі ($I_{пр}$), В/мА	1,0/5
Ємність діода (C_d) і напруга на діоді (U_d), при якому вона вимірюється, пФ/В	1,0/5
Зворотний струм діода при граничній зворотній напрузі, мкА	5/75
Максимальна робоча частота діода, МГц	100

Тунельний діод – це напівпровідниковий діод, у якому завдяки використанню високої концентрації домішок виникає дуже вузький бар'єр і спостерігається тунельний механізм перенесення зарядів через р-п-перехід.

Призначення

Тунельні діоди застосовуються як активні елементи в надвисокочастотних (НВЧ) генераторах і підсилювачах, а також як швидкодійні елементи перемикачів (час перемикання менше 1 нс) у бістабільних пристроях. Залежно від застосування тунельні діоди поділяються на підсилювальні, генераторні та перемикальні.

Принцип роботи

Тунельний перехід електронів через р-п-перехід можливий, якщо товщина переходу мала і енергетичним рівням, заповненим електронами однієї області, відповідають такі ж вільні дозволені енергетичні рівні в сусідній області. Ці умови виконуються в р-п-переходах, утворених напівпровідниками з високою концентрацією домішок ($10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$). При цих умовах ширина р-п-переходу має порядок 10^{-6} см, що обумовлює високу напруженість електричного поля в переході і ймовірність тунельного проходження електронів через його потенціальний бар'єр. У напівпровідниках з такою концентрацією домішок атоми домішки взаємодіють між собою і їх рівні розщеплюються в зони, які примикають у напівпровіднику р-типу до валентної зони, а в напівпровіднику п-типу – до зони провідності. Такі напівпровідники називають *виродженими*. У них рівні Фермі розташовані в зоні провідності п-області і в валентній зоні р-області.

Основні характеристики

Вигляд вольт-амперної характеристики тунельного діода може бути пояснений за допомогою енергетичних діаграм (рис. 35), при побудові яких передбачається, що в зоні провідності п-області всі рівні від W_n до W_{fn} зайняті електронами, а рівні, розташовані вище, вільні.

У валентній зоні р-області всі рівні від W_v до W_{fp} вільні, а рівні, нижчі W_{fp} , зайняті електронами (ці рівні заштриховано). Ці припущення ідеалізують картину, але дозволяють спростити вивчення процесів проходження струму, що припустимо при розгляді принципу роботи діода.

При відсутності зовнішньої напруги ($U = 0$, рис. 35, д) рівень Фермі по всій системі однаковий ($W_{fn} = W_{fp}$) і напроти зайнятих електронами рівнів р-області розташовуються зайняті рівні п-області. Тунельний перехід електронів неможливий, і струм дорівнює нулю.

При подачі прямої напруги рівні Фермі зміщуються на певну величину (рис. 35, а) і напроти частини енергетичних рівнів, зайнятих електронами в п-області, виявляються вільні рівні в р-області.

У результаті відбувається тунельний перехід електронів з n-області в р-область і проходить прямий тунельний струм, який пропорційний площі перекриття вільних дозволених енергетичних рівнів валентної зони р-області і заповнених енергетичних рівнів зони провідності n-області.

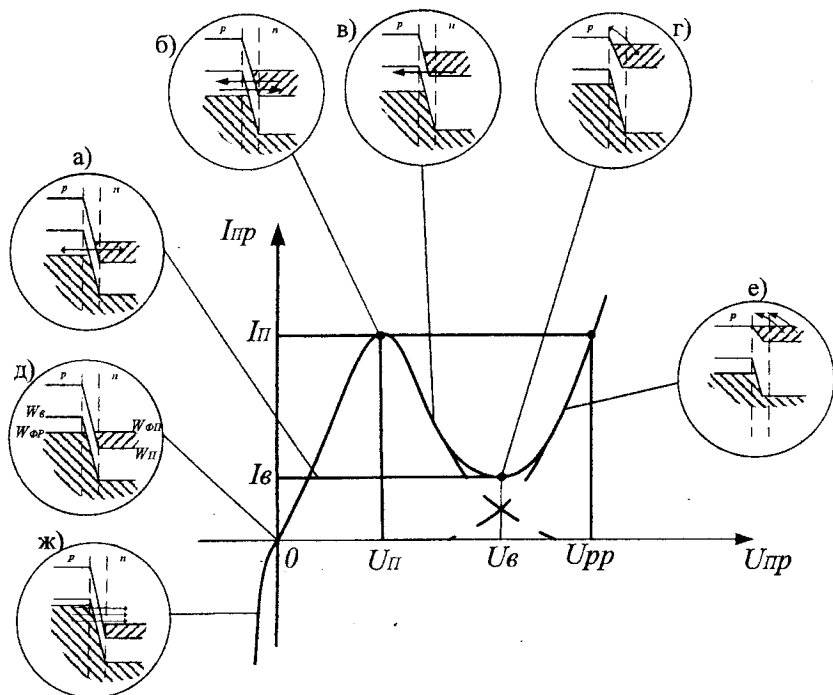


Рисунок 35 – Вольт-амперна характеристика тунельного діода

Тунельний струм буде збільшуватися до тих пір, поки перекриття не стане максимальним (рис. 35, б). При подальшому збільшенні прямої напруги площа перекриття відповідних рівнів і тунельний струм зменшуються (рис. 35, в). При деякій прямій напрузі зайняті електронами енергетичні рівні зони провідності n-області виявляться повністю розташованими напроти енергетичних рівнів забороненої зони р-області. Тунельний перехід електронів в цьому випадку виявиться неможливим, і тунельний струм припиниться (рис. 35, г).

Поряд із тунельним переходом електронів при прямих напругах у діоді має місце інжекція електронів з n-області в р-область і інжекція дірок з р-області в n-область, що викликає проходження дифузійного струму, як й у звичайних напівпровідникових діодах. Тому струм тунельного діода при $U_{пр} = U_v$ має дві складові: тунельну і дифузійну.

Подальше збільшення $U_{пр}$ призводить до зростання дифузійного струму (рис. 35, е).

Якщо діод включається в зворотному напрямку, то рівні Фермі зміщуються так, як показано на рис. 35, ж), і з'являється можливість тунельного переходу електронів з заповнених рівнів валентної зони р-області на вільні рівні зони провідності п-області. Це приводить до появи великого зворотного тунельного струму.

Оскільки для виготовлення тунельних діодів використовуються вирожені напівпровідники, за характером провідності які наближаються до металів, робоча температура цих діодів досягає 400 °С.

Недоліком тунельних діодів є мала потужність через низьку напругу (десяті частки вольт) і малу площу переходу.

Основні параметри

До основних параметрів тунельного діода належать:

1. *Піковий струм* I_n – прямий струм у точці максимуму ВАХ (рис. 35, б);

2. *Струм западини* I_a – прямий струм у точці мінімуму ВАХ;

3. *Напруга піка* U_n – пряма напруга, що відповідає піковому струму;

4. *Напруга западини* U_a – пряма напруга, що відповідає мінімальному струму;

5. *Напруга розчину* U_p – пряма напруга на другій східній ділянці ВАХ при струмі, який дорівнює піковому;

6. *Ємність діода* C_d – сумарна ємність переходу і корпусу діода при заданій напрузі зсуву;

7. *Від'ємна провідність* – провідність, яка визначається на середині спадної ділянки ВАХ. Від'ємна провідність характеризує крутість ділянки спаду на ВАХ приладу та має значення при використанні тунельних діодів у різних режимах роботи;

8. *Гранична резистивна частота* f_r – значення частоти, на якій активна від'ємна складова повного опору тунельного діода перетворюється на 0. Значення резистивної частоти визначається за формулою:

$$f_r = \frac{|g_{пер}|}{2\pi C_d} \sqrt{\frac{1}{|g_{пер}| r_n} - 1},$$

де r_n – опір втрат діода;

$g_{пер}$ – від'ємна провідність діода.

Еквівалентна схема

Еквівалентна схема тунельного діода зображена на рис. 36.

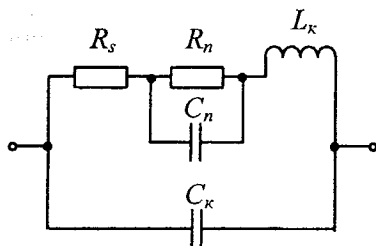


Рисунок 36 – Еквівалентна схема тунельного діода

На цій схемі: C_n – ємність р-п-переходу; R_s – омичний опір втрат; L_k – власна індуктивність корпусу; C_k – ємність корпусу; R_n – диференціальний опір р-п-переходу.

Опір втрат R_s сучасних тунельних діодів, в основному, зосереджений в об'ємі напівпровідника, що прилягає до р-п-переходу, і визначається питомою провідністю матеріалу і геометричними розмірами мезаструктури, отриманої в процесі травлення. Параметри L_k і C_k визначаються конструкцією діода.

Типова схема включення

Типову схему включення тунельного діода наведено на рис. 37. На спадній ділянці вольт-амперної характеристики тунельний діод може бути еквівалентно замінений певними від'ємними опором та ємністю.

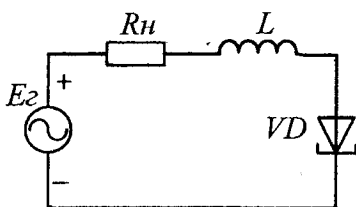


Рисунок 37 – Схема включення тунельного діода

Залежно від значення параметрів елементів схеми можлива робота в таких режимах: підсилення електричних сигналів, нелінійні перетворення, генерація гармонічних та релаксаційних коливань, перемикання. Таким чином, тунельних діод є багатофункціональним приладом та відноситься до R-негатронів – приладів, що мають від'ємне значення активного опору.

Конструкція тунельного діода

Тунельні діоди, як і всі надвисокочастотні діоди, мають конструкцію, що розрахована на включення в коаксіальний або хвилевідний тракт. За зовнішнім конструктивним виконанням розрізняють циліндричні діоди патронного типу (рис. 38, а) та коаксіальні (рис. 38, б).

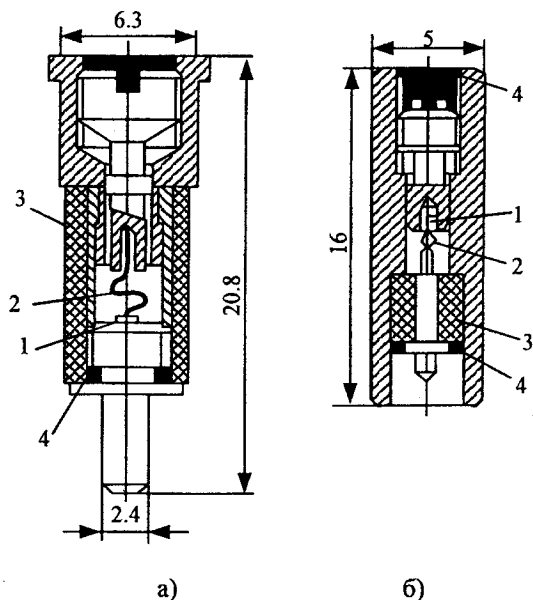


Рисунок 38 – Конструкція деяких типів НВЧ-діодів патронного (а) та коаксіального (б) типів

На рисунку позначено: 1 – кристал напівпровідника; 2 – контактна пружина; 3 – керамічна втулка; 4 – герметизувальна заливка.

Діоди з патронною конструкцією корпусу, яка складається з керамічної втулки та латунних фланців або ніпелів, призначені для використання в деци- та сантиметровому діапазонах довжин хвиль, тобто на частотах близько 12 ГГц. Діоди з коаксіальною конструкцією корпусу застосовують у діапазоні коротких сантиметрових хвиль до частот близько 30 ГГц. У міліметровому діапазоні хвиль використовують переважно діоди хвилеводної конструкції, тобто хвилевідні вставки, які і є корпусами НВЧ-діодів. Для смугових ліній та для інтегральних НВЧ-мікросхем використовують або діоди в мініатюрних корпусах, або безкорпусні НВЧ-діоди, поверхня напівпровідникового кристалу яких захищена лише плівкою діоксида.

Тунельні діоди можуть виготовлятися у металоскляному і металокерамічному корпусах з гнучкими виводами, а також в корпусах патронного та таблеткового типів. Приклади конструкції тунельних діодів зображені на рис. 39.

На рисунку позначено: 1 – напівпровідниковий кристал; 2 – р-п-перехід; 3 – з'єднувальний електрод; 4 – корпус; 5, 6 – виводи; 7 – втулка корпусу; 8 – кришка.

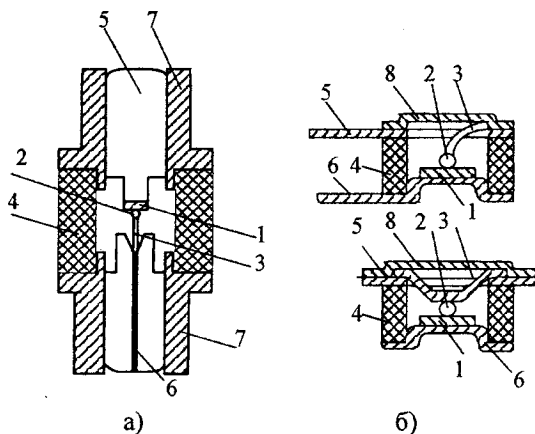


Рисунок 39 – Конструкції тунельних діодів:
а) патронного типу; б) таблеткові

Приклад серійних тунельних діодів

Діод ЗІЗ06Г – арсенідогалісвий, тунельний, перемикальний. Призначений для застосування в перемикальних пристроях. Випускається в металокерамічному корпусі з гнучкими виводами. Маса діода не більша 0,15 г.

Зовнішній вигляд діода ЗІЗ06Г наведено на рис. 40, а основні його параметри – у табл. 14.

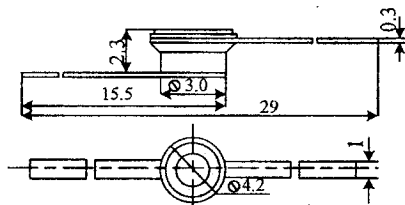


Рисунок 40 – Зовнішній вигляд тунельного діода ЗІЗ06Г

Таблиця 14 – Основні технічні параметри тунельного діода ЗІЗ06Г

Значення параметрів при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$						Максимально допустимі значення параметрів при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	
$I_{n.}$ мА	$U_{n.}$ мВ	$C_{d.}$ пФ	$U_{p.}$ В	$r_{n.}$ Ом	$I_{n.}/I_{с.}$	$I_{np.}$, мА	$I_{ср.}$, мА
2,0	170	<8,0	0,8	-	8,0	1,0	4,0

8 НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ДІОДИ

До надвисокочастотних діодів відносяться деякі спеціальні типи діодів, зокрема діоди Ганна, лавинно-пролітні діоди, інжекційно-пролітні діоди та р-і-п діоди.

8.1 Діод Ганна

Діод Ганна – це тип напівпровідникових діодів, що використовується для генерації та перетворення коливань у діапазоні НВЧ. Даний діод вивчено відомим фізиком Джоном Ганном в 1963 році. На відміну від інших типів діодів, принцип дії діода Ганна полягає в тому, що використовуються не властивості р-п переходів, а власні об'ємні властивості напівпровідника.

Призначення

Діоди Ганна широко застосовуються для генерації, підсилення та перетворення електричних сигналів у діапазоні НВЧ на частотах від 1 до 200 ГГц з потужностями від декількох міліват до декількох ват.

Принцип роботи

В основі принципу дії діода Ганна використовується явище переходу носіїв з «центральної» енергетичної долини в «бічну», де вони характеризуються більшою ефективною масою m_2 і малою рухливістю μ_2 , при цьому середня дрейфова швидкість електронів зменшується із зростанням поля E .

При досить сильному електричному полі частина електронів набуває енергії, порівнянної з енергією міждолинного переходу ΔW , і переходить з нижньої у верхню долину. Тут їх ефективна маса m_2 становить приблизно 0,35 маси вільного електрона, тобто електрони у верхній долині «важкі» і їх рухливість зменшується до $\mu_2 = 100 - 200 \text{ см}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$, а концентрація дорівнює N_2 (рис. 41).

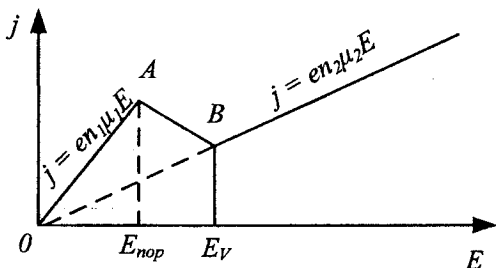


Рисунок 41 – Залежність густини струму провідності від напруженості електричного поля

Велика різниця в рухливості електронів для верхньої та нижньої долин призводить до того, що, починаючи з деякого значення критичного поля $E_{пор}$, середня дрейфова швидкість електронів в однорідному зразку починає зменшуватися із зростанням електричного поля. При цьому густина струму в зразку на ділянці АВ (рис. 41):

$$j = e (N_1\mu_1 + N_2\mu_2) E.$$

Нарешті, при дуже великих полях ($E = E_v$) всі електрони перейдуть у верхню долину і густина струму через зразок (ділянка ВС рис. 41) стане:

$$j = eN_2\mu_2E.$$

Прикладене зовнішнє поле згідно із законом Кірхгофа розподіляється по зразку напівпровідника пропорційно опору його окремих ділянок, тому при підвищенні напруги порогова напруженість поля досягається в області певної неоднорідності, де є підвищений опір напівпровідника. Тут виникає підвищення концентрації «важких» і зменшення «легких» електронів (рис. 42).

Середня швидкість електронів стане зменшуватись, що призводить до подальшого збільшення опору ділянки і підвищення напруженості поля в ньому.

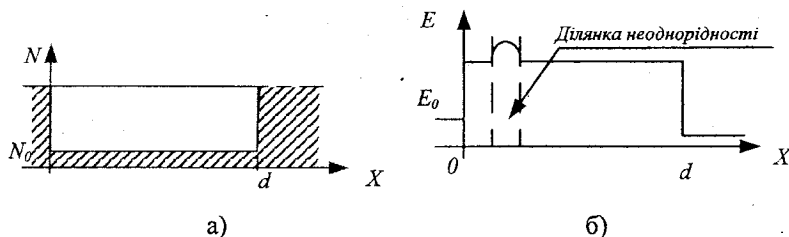


Рисунок 42 – Ідеалізований профіль легування діода (а); початковий розподіл напруженості електричного поля (б)

Одночасно, оскільки загальна напруга, прикладена до пластинки напівпровідника, є постійною, поле по обидві сторони від даної ділянки буде спадати. Виникаючий згусток «важких» електронів під дією поля переміщується зліва направо. Його будуть наздоганяти «легкі» електрони, що рухаються позаду, а «легкі» електрони, що рухаються попереду, навпаки будуть віддалятися від нього. У результаті виникає рухоме утворення у вигляді згустку електронів, перед яким створюється область з їх зниженою концентрацією. Його називають доменом сильного поля (рис. 43).

Завдяки наростанню поля всередині згустку його швидкість збільшується до стану насичення, а завдяки зменшенню поля поза ним швидкості

«легких» електронів зменшуються і відбувається їх вирівнювання, після чого домен рухається з постійною швидкістю до зникнення на аноді.

Описаний вище процес формування домену відбувається за дуже малий час τ_{ϕ} . Сформований домен має форму розмитого трикутника (рис. 43, а) і складається з шару накопичення заряду, в якому концентрація електронів N перевищує загальну концентрацію електронів в зоні провідності N_0 в десятки разів, і шару об'єднання, де $N < N_0$ (рис. 43, б).

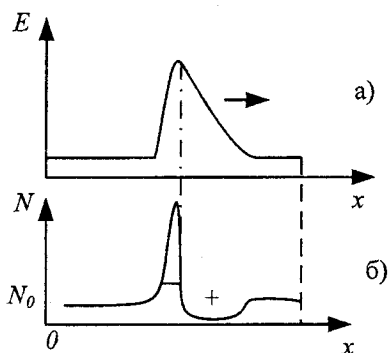


Рисунок 43 – Утворення домену сильного поля

Слід зазначити, що поки домен не зникне, поле у зразку буде меншим порогового значення, й утворення нового домену відбудеться тільки після зникнення першого. Тому струм у зовнішньому колі буде являти собою послідовність імпульсів (рис. 44), розділених часом прольоту:

$$\tau_{np} = d / v_{np},$$

де d – довжина пластини;
 v_{np} – швидкість прольоту.

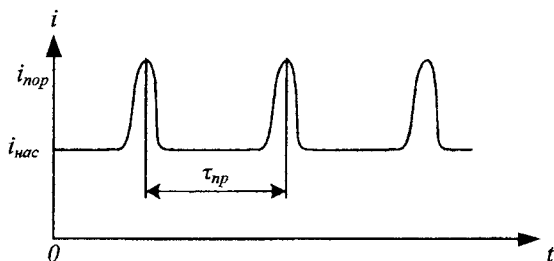


Рисунок 44 – Струм у зовнішньому колі діода Ганна

Основні характеристики

На рис. 45 наведено ВАХ діода Ганна (ДГ). При напруженості поля, вищій порогового значення $E_{пор}$, вольт-амперна характеристика ДГ має спадну ділянку, на якій диференціальна провідність ДГ негативна

$$G_{ДГ} = \Delta j / \Delta E < 0.$$

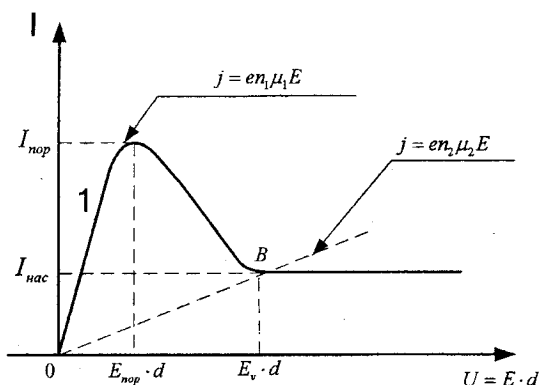


Рисунок 45 — ВАХ діода Ганна

Відзначимо, що за рахунок взаємодії електронів з кристалічною ґраткою напівпровідника швидкість електронів не перевищує $\sim 10^7$ см/с, тобто має місце явище «насичення» при великих напруженостях поля, і струм досягає деякого постійного значення $I_{нас}$.

В області від'ємної диференціальної провідності рівномірний розподіл заряду і поля в об'ємі напівпровідника нестійкий, і в ньому можуть виникнути утворення, які називаються доменами.

Унаслідок наявності від'ємного активного опору діод Ганна відноситься до R-негатронів.

Основні параметри

1. Робочий діапазон частот, ГГц.
2. Вихідна потужність в робочому діапазоні частот $P_{вих}$, мВт.
3. Постійний робочий струм I_r , А.
4. Постійна робоча напруга U_r , В.

Еквівалентна схема

Еквівалентна схема діода Ганна наведена на рис. 46. У загальному випадку вона містить два RC-кола, які враховують відповідно повний опір домену (R_d, C_d) та іншої частини напівпровідника поза доменної області (R_0, C_0). Окрім цього, на НВЧ враховуються паразитні параметри конструкції діода: активний опір r_s та індуктивність L_s виводів, ємність C_s між виводами. У такому вигляді еквівалентна схема досить добре відображає основні характеристики діода Ганна у доменному режимі.

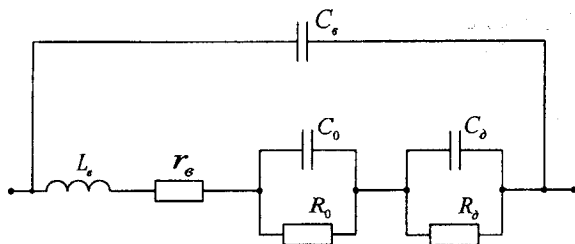


Рисунок 46 – Еквівалентна схема діода Ганна

Конструкція діода Ганна

Діоди Ганна виготовляються в декількох конструктивних варіантах, які зводяться до двох основних різновидів: типу «сендвіч» і планарний.

Для захисту від впливу навколишнього середовища кристал діода Ганна поміщають у стандартний металокерамічний корпус. На частотах вищих 30 ГГц кераміка замінюється кварцом, а сам корпус виконується мініатюрним.

Конструкцію діода Ганна подано на рис. 47.

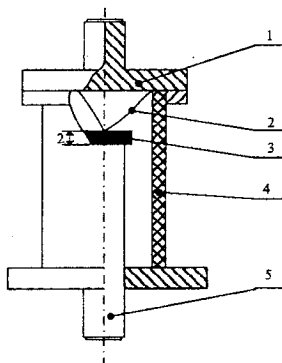


Рисунок 47 – Конструкція діода Ганна: 1 – катодний вивід; 2 – катодні струмопровідні проволочки, припаяні до омичного контакту кристала; 3 – кристал однорідного напівпровідника GaAs, що за формою схожий на таблетку; 4 – керамічний патрон; 5 – анодний стрижень, до якого припаяна таблетка кристала, що виконує роль тепловідводу

Приклади серійних діодів Ганна

3A721A – арсенідогалієвий, мезаепітаксіальний генераторний діод на ефекті Ганна призначений для застосування в широкосмугових генераторах сантиметрового діапазону довжин хвиль. Випускаються в металокерамічному корпусі типу КД-109 з жорсткими виводами і в безкорпусному виконанні у вигляді кристала з гнучкими виводами на кристалотримачі.

Зовнішній вигляд діода 3A721A наведено на рис. 48, а основні його параметри – у табл. 15.

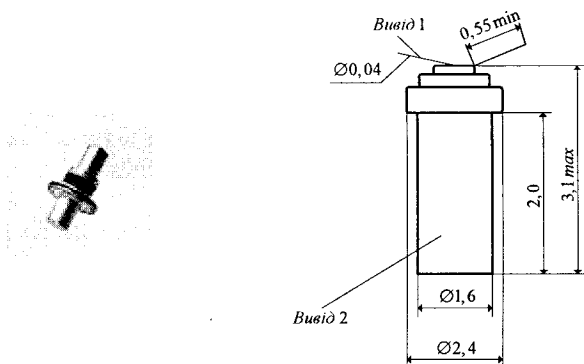


Рисунок 48 – Зовнішній вигляд діода Ганна 3A721A

Таблиця 15 – Основні технічні параметри діода Ганна 3A721A

Робочий діапазон частот, ГГц	Вихідна безперервна потужність в робочому діапазоні частот $P_{вих}$, мВт		Постійний робочий струм I_p , А		Постійна робоча напруга U_p , В
	мін.	тип	макс.	тип	
3,86 – 5,96	10	25	0,37	0,3	9 – 12

8.2 Лавинопролітні діоди

Лавинопролітні діоди (ЛПД) – напівпровідникові діоди, які працюють у режимі лавинного множення носіїв заряду при зворотному зміщенні електронного переходу.

Призначення

Лавинопролітні діоди на даний час широко використовуються як генератори та підсилювачі сигналів НВЧ. Вони забезпечують вихідну потужність до десятків ват у безперервному режимі і до кіловата у імпульсному режимі. Ці діоди на частоті $f \approx 100$ ГГц в безперервному режимі генерують сигнали потужністю у сотні міліват. Коефіцієнт корисної дії ЛПД досягає 50...60% на частоті біля 1 ГГц (у високоефективному режимі) та понад 10% (у пролітному режимі) на частоті 55 ГГц. За потужністю, що генерується, та коефіцієнтами корисної дії ЛПД на даний час знаходяться поза конкуренцією серед інших напівпровідникових генераторів НВЧ.

Принцип роботи

В основі принципу дії ЛПД у пролітному режимі лежить процес ударної іонізації, який полягає у тому, що вільні носії заряду в сильних електричних

полях набувають енергії, достатньої, щоб при співударі з атомом напівпровідника провести відрив від нього електрона та тим самим створити нову пару електрон – дірка. Ударна іонізація виникає тим частіше, чим вища напруженість електричного поля. Частота, з якою створюються нові пари електрон – дірка, характеризується коефіцієнтом ударної іонізації – кількістю пар електрон – дірка, які утворилися при пробігу одним вільним електроном відстані, що дорівнює 1 см. При напруженостях, менших ніж 10^6 В/м, цей коефіцієнт дуже малий, і можна вважати з достатнім ступенем точності, що при таких напруженостях створення пар електрон – дірка практично не відбувається.

Ознайомлення з принципом дії ЛПД проведемо на прикладі Si- ЛПД з р-п-переходом та з базою n-типу.

Ударна іонізація в шарі розмноження приводить до появи лавинної (пробивної) ділянки на зворотній гілці ВАХ. Розглянемо причини виникнення цієї ділянки. Для спрощення будемо вважати: 1) швидкості руху електронів і дірок в шарі розмноження приблизно однаковими; 2) коефіцієнт ударної іонізації електронами значно вищий коефіцієнта іонізації дірками. Два ці припущення обґрунтовані експериментальними даними.

Нехай під дією прикладеної $U_{зюр}$ через структуру діода проходить струм, який дорівнює I . Тоді сумарна концентрація n_0 електронів і дірок у будь-якому місці структури є величиною сталою

$$n_0 = n + p.$$

Конкретне значення n_0 залежить від I та швидкості руху (дрейфу) носіїв заряду.

Дрейфуючі електрони в результаті ударної іонізації вибивають усе нові електронно-діркові пари, дірки з цих пар рухаються в бік р⁺-області, практично не проводячи ударної іонізації, а знову утворені електрони, які рухаються в сторону n-області, створюють нові електронно-діркові пари. У результаті розподіл концентрацій електронів і дірок стає таким, як показано на рис. 49.

Якщо б не було ударної іонізації, то щільність електронів в усій n-області дорівнювала б n_S та проходив би зворотний струм I_S . Значення I_S дуже мале, набагато менше 1 мкА (це звичайний зворотний струм р-п-переходу). Відповідно мале і значення n_S . При виникненні ударної іонізації в площині $x = 0$ концентрація електронів залишається n_S . Отже, при $x = 0$ значення p відрізняється від значення n_0 тільки на n_S . Можна записати, що p при $x = 0$ пов'язано з n_0 рівністю $p = n_0 \cdot \Phi$, де коефіцієнт Φ менший від одиниці, але чим ближче до одиниці, тим інтенсивніше проходить процес ударної іонізації.

$$n_0 = n_S / (1 - \Phi),$$

$$I = I_S / (1 - \Phi).$$

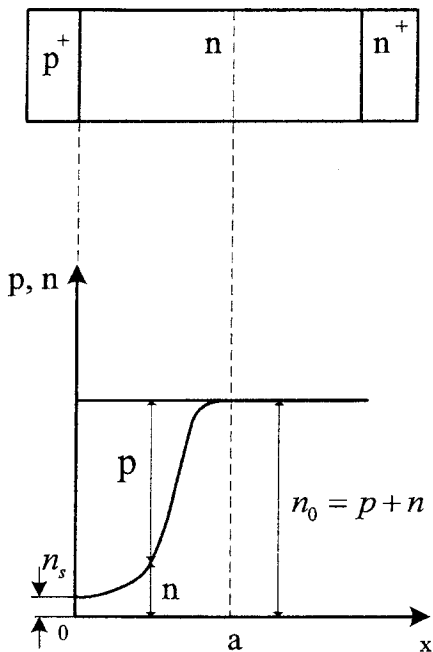


Рисунок 49 – Концентрації електронів і дірок в шарі розмноження

Оскільки струм пропорційний щільності носіїв заряду, то коли Φ наближається до одиниці, I збільшується і з'являється пробивна ділянка зворотної гілки ВАХ.

Для описання процесу множення носіїв заряду використовують терміни «лавинне множення» та «лавинний струм», що створюється носіями заряду, утвореними при лавинному множенні.

Розглянемо тепер роботу цієї діодної структури, коли прикладені постійна зворотна напруга та відносно мала змінна напруга з амплітудою U_m (рис. 50, а). Значення постійної зворотної напруги відповідає в точці А на ВАХ (рис. 51).

Коефіцієнт Φ змінюється через зміну коефіцієнта іонізації під дією змінної напруги, що приводить до появи змінної складової Δn в концентраціях електронів (і дірок) в шарі розмноження.

Для розвитку лавини потрібен певний час, і тому зміна кількості утворених пар електрон-дірка відбувається з деяким запізненням відносно U_m . Це запізнення призводить до того, що $n(t)$ (рис. 50, б) відстає за фазою на 90° від $U_m(t)$ (рис. 50, а).

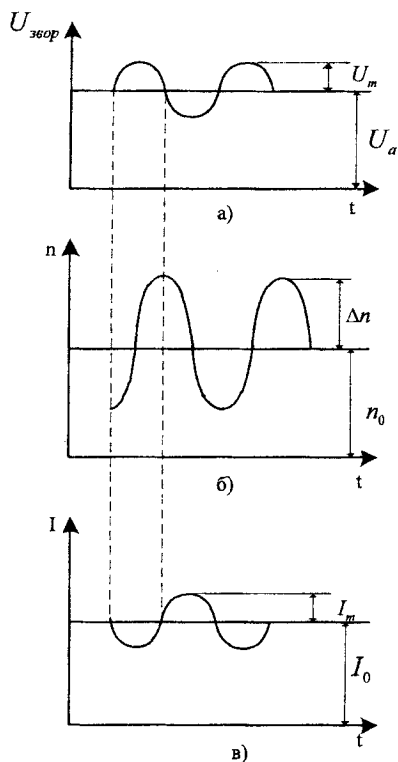


Рисунок 50 – Залежності $U_{звор}$, n та I від часу

Дірки від знову утворених електронно-діркових пар відразу ж виходять у p^+ -область, яка безпосередньо примикає до шару розмноження, а електрони, щоб потрапити в n^+ -область, повинні пройти через пролітний простір. Поки носії заряду дрейфують через пролітний простір, в колі діода наводиться струм, який складається із суми постійної складової I_0 і змінної з амплітудою I_m та частотою прикладеної змінної напруги.

Фаза змінної складової струму залежить від довжини пролітного простору. Частково, якщо довжина пролітного простору така, що для його проходження електрони повинні витратити час (час прольоту), який дорівнює півперіоду частоти прикладеної напруги, то струм відстає за фазою на 90° (рис. 50, в) порівняно з фазою змінної складової напруги (рис. 50, б). Порівнюючи $I(t)$ з $U(t)$, бачимо, що ці дві синусоїди знаходяться у протифазі, іншими словами, коли напруга збільшується, то струм зменшується і навпаки. Ця обставина дозволяє говорити про динамічний від'ємний опір лавинопролітного діода.

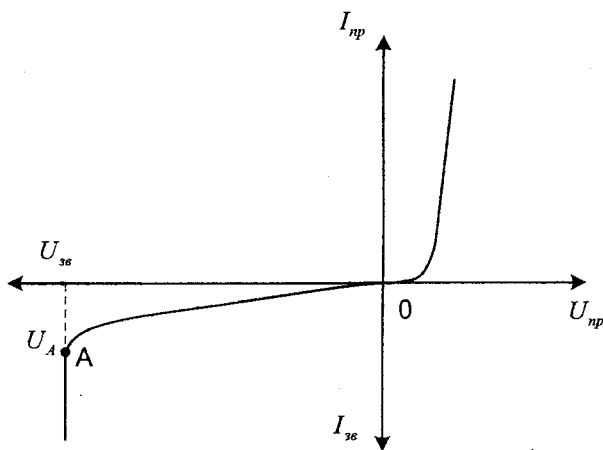


Рисунок 51 – Вольт-амперна характеристика ЛПД

Причиною виникнення динамічного від'ємного опору є запізнення лавинного струму відносно змінної напруги на час, який дорівнює половині тривалості періоду цієї напруги; запізнення відбувається через інертність процесу створення лавини і визначається часом проходження носіїв заряду через простір прольоту.

Основні характеристики

Основною характеристикою є ВАХ (рис. 51). Лавинопролітні діоди працюють при напрузі зворотного зміщення $U_{зв}$. На зворотній гілці ВАХ ЛПД є ділянка (робоча) різкого збільшення зворотного струму при зворотній напрузі, яка перевищує $U_{проб}$.

Точка А відповідає робочому режиму. В ЛПД використовуються структури з р-п-переходом чи з переходом Шоттки. Напівпровідникові матеріали – Si або GaAs.

Основні параметри

До основних параметрів ЛПД відносяться: генерувальна потужність електромагнітних коливань в безперервному $P_{внх}$ і імпульсному P_I режимах; максимальна частота генерації (підсилення) f ; ККД – η ; коефіцієнт підсилення (для режиму підсилення потужності P); смуга пропускання в підсилювальному режимі $\Delta f/f$; коефіцієнт шуму $F_{ш}$ або рівень АМ і ЧМ шумів; надійність.

Технічний рівень існуючих промислових і експериментальних ЛПД характеризується такими даними.

1. *Частота і потужність.* Серед напівпровідникових НВЧ приладів тільки ЛПД і діоди Ганна мають найбільші потенційні можливості роботи

у міліметровому і субміліметровому діапазонах. Створено багато типів ЛПД, які працюють на частотах до 400 ГГц. Найбільш високочастотними ЛПД є ІМРАТТ-діоди, які розроблені японськими фірмами NTT і Hitachi.

2. *ККД*. Останнім часом розробниками ЛПД для підвищення ККД і вихідної потужності цих приладів було запропоновано багато різних конструктивно-технологічних рішень, наприклад, таких як використання двопролітних структур з новими геометричними формами, застосування паралельного чи послідовного з'єднання декількох діодів у одному корпусі, використання нових матеріалів і конструкцій тепловідводів та ін. Максимальні значення ККД при роботі ЛПД в імпульсному режимі становлять близько 30% на $f = 1...3$ ГГц, 25% – на $f = 8...10$ ГГц, 12% – на $f = 50$ ГГц і 8,5% – на $f \approx 100$ ГГц.

3. *Коефіцієнт підсилення*. ЛПД, як і діоди Ганна, забезпечують порівняно невелике підсилення, яке з урахуванням необхідного запасу стійкості роботи складає всього 5...9 дБ. При необхідності отримання більш високого коефіцієнта підсилення застосовується каскадне включення декількох ЛПД.

4. *Смуга пропускання*. На відміну від діодів Ганна, ЛПД мають меншу ширину смуги пропускання. Підсилювальні ЛПД забезпечують підсилення у невеликій смузі частот, що зазвичай не перевищує 10%. Ширина смуги пропускання залежить від вихідної потужності і коефіцієнта підсилення. За даними фірми Hughes робоча смуга ЛПД міліметрового діапазону з $P_{вих} = 250...500$ мВт становить 8,5% при $K_n = 5$ дБ і 4% при $K_n = 10$ дБ.

5. *Коефіцієнт шуму*. ЛПД за коефіцієнтом шуму поступаються діодам Ганна та іншим напівпровідниковим НВЧ діодам і транзисторам. Значення коефіцієнта шуму залежить від конструкції, напівпровідникового матеріалу та режиму роботи ЛПД.

6. *АМ і ЧМ шуми*. Дослідження шумів генераторних ЛПД на GaAs в діапазоні частот 26...35 ГГц при $P_{вих} = 10...100$ мВт показали, що рівень АМ шумів визначається густиною вхідного струму діода й практично не залежить від добротності коливальної системи.

7. *Надійність*. Механізм відмов напівпровідникових діодів безпосередньо пов'язаний з температурою переходу та визначається головним чином процесами електроміграції і короткими замиканнями. Надійність ЛПД майже не залежить від робочої частоти, оскільки температура переходу з ростом частоти підвищується незначним чином.

Еквівалентна схема

Еквівалентна схема ЛПД зображена на рис. 52. На схемі прийняті такі позначення: R_{np} та X_{np} – еквівалентні параметри, які характеризують генераторні властивості ЛПД; R_{np} – величина від'ємна при $\omega > \omega_r$ і $0 < \theta < 2\pi$, при цьому X_{np} носить індуктивний характер; R_s – опір розтікання діода; $C_{зар}$ – зарядова ємність діода; L_n та C_n – параметри патрона, у який вставляється діод.

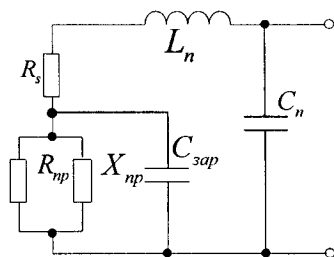


Рисунок 52 – Еквівалентна схема ЛПД

Оскільки визначити всі параметри еквівалентної схеми досить складно, то переважним є подання імпедансу ЛПД у вигляді характеристик на площині провідностей при різній частоті та амплітуді сигналу.

Конструкція лавинопротітного діода

До конструкції і технології ЛПД висуваються дуже жорсткі вимоги, оскільки в структурі діода в малих об'ємах розсіюються значні потужності. З іншої сторони є широкий вибір типів структур діодів для ЛПД і широкий асортимент технологічних прийомів виготовлення діодів. На даний час випускаються однопролітні діоди з р-n-переходом і з базою n- або р-типу ($p^+ - n - n^+$ - і $n^+ - p - p^+$ -структури). Випускаються однопролітні діоди Шотткі Pt-n- n^+ -типу, двопротітні діоди $n^+ - n - p - p^+$, а також діоди Pt-p-n- n^+ -типів. Використовуються і складніші типи структур діода. Для виготовлення ЛПД застосовують найчастіше Si чи GaAs.

Сучасні конструкції ЛПД мають порівняно невеликі габаритні розміри. Конструкція та розміри одного із стандартних корпусів ЛПД наведені на рис. 53.

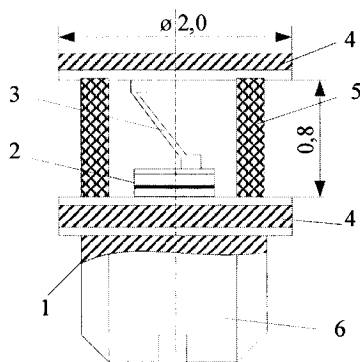


Рисунок 53 – Конструкція одного із типових ЛПД для частот до 18 ГГц (усі з'єднані поверхні металізовані під паяння)

На даній схемі: 1 – основа для кріплення структури; 2 – напівпровідникова структура; 3 – з'єднувач; 4 – коваровий диск; 5 – керамічний циліндр; 6 – мідний штифт з різьбою.

ЛПД знаходять своє застосування у різних регенеративних підсилювачах, підсилювачах потужності та помножувачах частоти.

Приклади серійних ЛПД

Кремнієвий, мезадифузійний, лавинопролітний, генераторний діод 2A706A призначений для застосування в генераторах сантиметрового діапазону довжин хвиль. Випускається в металокерамічному корпусі типу КДЮ-109 з жорсткими виводами.

Діоди маркуються кольоровою точкою на торці виводу катода (2): 2A706A – червоною, 2A706Б – білою, 2A706В – чорною, 2A706Г – синьою. Маса діода становить не більше 0,2 г.

Зовнішній вигляд діода 2A706A наведено на рис. 54, а основні його параметри – у табл. 16.

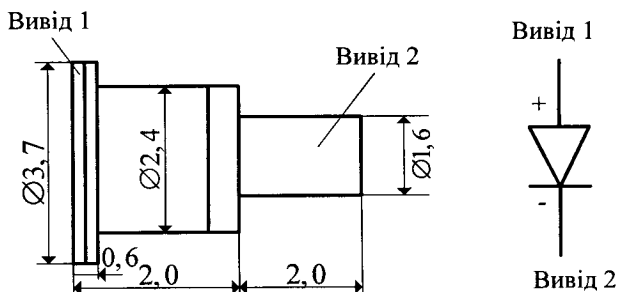


Рисунок 54 – Зовнішній вигляд лавинопролітного діода 2A706A

Таблиця 16 – Основні технічні параметри лавинопролітного діода 2A706A

Робочий діапазон частот, ГГц	Мінімальна вихідна безперервна потужність у робочому діапазоні частот $P_{вих}$, мВт	Постійний робочий струм I_p , мА		Постійна робоча напруга U_p , В	Пробивна напруга, В	Загальна ємність діода при пробивній напрузі, пФ
		мін.	макс.			
8,5 – 10	100	30	60	70 – 120	60-120	0,4 – 0,6

8.3 Інжекційно-пролітний діод

Інжекційно-пролітний діод (ІПД) – це напівпровідниковий діод з від'ємним активним опором у діапазоні НВЧ, що працює в режимі інжекції неосновних носіїв заряду через прямозміщений напівпровідниковий перехід (р-п-перехід або бар'єр Шоттки) у пролітний простір замикального шару (область дрейфу).

Призначення

ІПД призначений, головним чином, для генерування НВЧ коливань у діапазоні частот до 10 ГГц. Досить часто ІПД використовуються в підсилювачах, що працюють при високих потужностях, і отже, великих густинах струму. Також ІПД застосовуються як гетеродини приймачів НВЧ-діапазону і працюють при великому сигналі.

Принцип роботи

Розглянемо фізичні основи роботи ІПД. Коли носії рухаються в напрямку, у якому їх переміщає електричне поле, то воно здійснює роботу над носіями і при цьому віддає їм енергію. Коли носії рухаються в напрямку, протилежному тому, у якому прагне переміщати їх електричне поле, то носії віддають енергію електричному полю. Основне явище, що використовується в ІПД, полягає в тому, що в діоді створюються умови, коли постійне поле переміщає носії в напрямку, протилежному тому, у якому їх переміщає змінне поле, тобто енергія, що віддається постійним полем, поглинається полем змінного струму.

Робота ІПД при подачі постійної і змінної напруг показана на рис. 55, а). Після змикання переходів інжектовані електрони створюють струм $I_e(t)$ (рис. 55, б). При низьких напруженостях полів, коли швидкість носіїв пропорційна напруженості, залежність результувального струму I_f від t має форму трикутника (рис. 55, в). Якщо ж дрейф відбувається із швидкістю насичення, то на виході форма струму $I_f'(t)$ виходить майже прямокутною (рис. 55, г). В обох випадках струм зсунутий за фазою відносно напруги. Відповідним вибором ширини бази зсув фаз може бути заданий таким, щоб значна частина струму відрізнялася за фазою на 180° від напруги, що дозволило б потужності виділятися в навантаженні.

За своїми шумовими характеристиками ІПД значно кращі за ЛІПД і порівнянні з діодами Ганна.

Дробові шуми в ІПД з'являються в результаті інжекції неосновних носіїв із прямозміщеного переходу в збіднений шар. При наявності об'ємного заряду неосновних носіїв дробовий шум послаблюється і стає трохи меншим на частоті 11,8 ГГц. У смузі частот 30 МГц і при струмі 20 мА, потужність шуму $0,2 \cdot 10^{-12}$ Вт. Відношення сигнал–шум у смузі 1 МГц дорівнює 99 дБ. Остання величина практично порівнянна із шумами відбивного клістрона, у якому відношення сигнал–шум змінюється від 96 до 90 дБ.

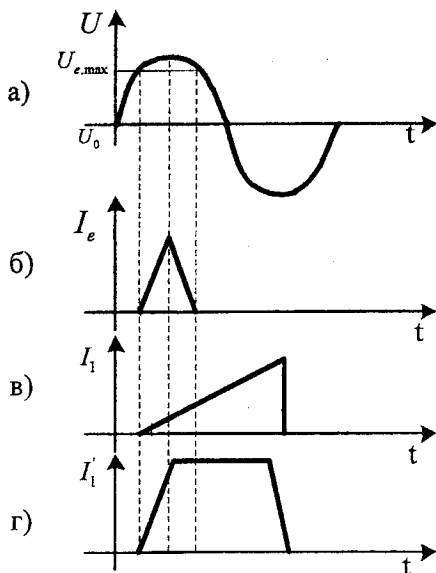


Рисунок 55 – Залежності напруги U (а), струму електронів I_e (б) і результувального струму I_1 і I'_1 (в, г) від часу

Крім дробових шумів, викликаних інжекцією неосновних носіїв з прямозміщеного переходу, у ПД існують дифузійні шуми, що виникають через флуктуацію струму завдяки розподілу носіїв за швидкостями. Дифузійний шум може бути порівняним з дробовим і навіть може перевищити його при великій густині постійного струму.

Основні характеристики

Для аналізу роботи ПД розглянемо рис. 56.

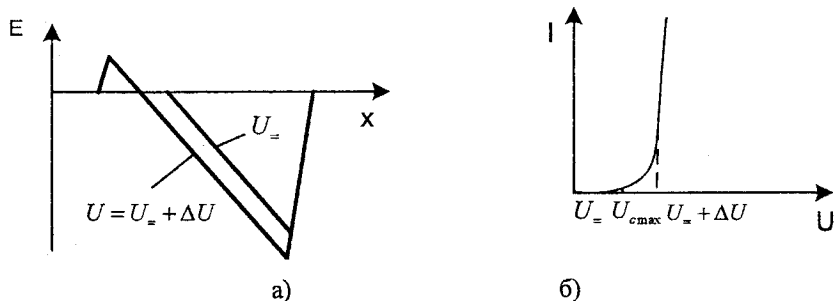


Рисунок 56 – Розподіл напруженості поля ПД n^+ - p - n^+ -типу (а) та ВАХ (б)

На ППД подана напруга, трохи менша за напругу змикання $U_{\text{змик}}$. Напруженість поля показана на рис. 56, а). Середній шар у ППД можна назвати базою. Припустимо, що постійна напруга U_- подається на ППД із такою полярністю, що правий перехід зміщається в зворотному напрямку, а лівий – у прямому. Напруга U_- така, що база збіднюється не повністю, тобто збіднені шари переходів не змикаються. Концентрація домішок зазвичай вибирається з розрахунку, щоб змикання відбулося швидше, ніж наступить лавинне множення. У цьому випадку струм, що протікає через ППД, значно менший 1 мкА і дорівнює струму зворотно зміщеного переходу. Припустимо, що напруга збільшується на ΔU і конфігурація поля змінюється (рис. 56, а).

База повністю збіднюється носіями, і відбувається змикання переходів. Електрони, інжектвані лівим переходом, потрапляють відразу в збіднену область, дрейфують і збираються правим переходом. У цьому випадку через ППД протікає значний струм. Як видно з рис. 56, б), вольт-амперна характеристика ППД після змикання переходів різко нелінійна.

Зазвичай ППД являє собою кремнієву структуру типу р-п-р з двома включеними назустріч один одному переходами. У робочому режимі області просторових зарядів переходів змикаються. Виникнення негативного опору в ППД пов'язано з часовим запізненням носіїв заряду (кінцевим часом інжекції носіїв заряду і їх прольоту через область дрейфу), що призводить до зсуву фаз між струмом і напругою на виводах приладу.

Порівняно з лавинопролітним діодом ППД має нижчий рівень шумів, що пов'язано з відсутністю в ньому ударної іонізації і лавинного множення носіїв заряду. У той же час рівень НВЧ потужності і ККД у ньому значно нижчий, ніж у ЛПД. Так, найбільша вихідна потужність в короткохвильовій області сантиметрового діапазону становить в ППД від декількох десятків до сотень міліват при максимумі ККД до 5%. ППД використовуються, головним чином, як гетеродини в малощумних підсилювачах і генераторних пристроях.

8.4 Р-і-п діод

Р-і-п діод – різновид діода, у якому між областями електронної (n) і діркової (p) провідності знаходиться чистий напівпровідник. Р- та п-області, як правило, легуються сильно, оскільки вони часто використовуються для омичного контакту до металу.

При прямому зсуві р-і-п-структура являє собою активний опір. При зворотному зміщенні її можна уявити у вигляді послідовно з'єднаних опору та ємності. Різка зміна імпедансу напівпровідникової структури р-і-п-діода і, отже, імпедансу модулятора відбувається поблизу точки нульового зсуву. При прямому зсуві, починаючи з деякої величини I_{np} , імпеданс слабо залежить від струму. У зворотнозміщеному стані ємність бази діода на одиницю площі відносно мала і не залежить від напруги зсуву.

Призначення

Останнім часом р-і-n-діод став основним елементом напівпровідникових високошвидкісних НВЧ-модуляторів. Це пов'язано з низкою переваг порівняно з раніше існуючими варакторними діодами. Також широко використовуються як НВЧ атенуатори, перемикачі, обмежувачі, фотодетектори.

Діоди прості конструктивно, мають малі габаритні розміри і масу, споживають невелику енергію, мають високу швидкодію і порівняно недорого.

Принцип роботи

Напівпровідникова структура в р-і-n-діода показана на рис. 57.

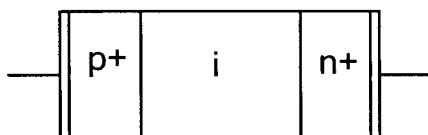


Рисунок 57 – Напівпровідникова структура р-і-n-діода

Високоомна внутрішня *i*-область діода має товщину від одиниць до сотень мікрометрів, а концентрація носіїв заряду в ній становить приблизно 10^{13} см^{-3} . При прямому зміщенні в центральну область інjektуються електрони з *n*-шару та дірки з *p*-шару. При цьому концентрація інjektованих носіїв буде становити від 10^{16} до 10^{17} см^{-3} . Оскільки концентрація інjektованих носіїв пропорційна прямому струму, то постійний прямий струм $I_{пр}$ через структуру буде значний (біля 10 А/см^2) та *i*-область буде мати високу провідність.

При зворотному зміщенні кількість носіїв через явища екстракції в *i*-області буде зменшуватися відносно рівноважного значення приблизно на порядок. Таким чином, кількість носіїв в *i*-області при переході від режиму прямого зміщення до режиму зворотного зміщення змінюється на декілька порядків. Зменшення концентрації призводить до збільшення опору *i*-області. Тому для р-і-n-діода властиве дуже велике відношення прямого та зворотного опорів, що важливо при використанні його в перемикальному режимі. Внаслідок великої *i*-області бар'єрна ємність діода дуже мала.

При роботі на НВЧ сигналі виявляється значна інерційність накопиченого в *i*-області заряду. Тому для НВЧ сигналу р-і-n-діод можна розглядати як електрично керований змінний резистор, опір якого залежить від значення прямого струму. Опір обернено пропорційний постійному прямому струму через р-і-n-діод. Таким чином, можна змінювати значення опору в широких межах – від 0,1 Ом до 10 кОм, змінюючи постійну складову прямого струму.

Основні характеристики

Основними характеристиками р-і-п-діода є вольт-амперна (рис. 58) та ом-амперна (рис. 59) характеристики.

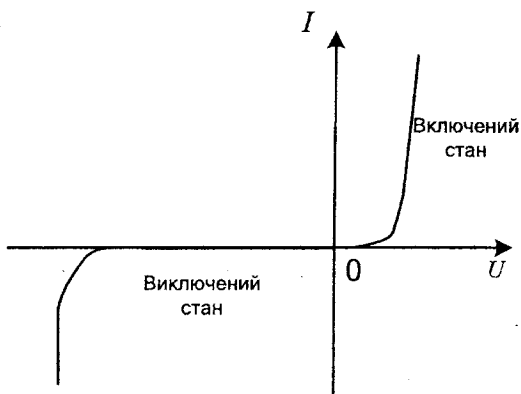


Рисунок 58 – ВАХ р-і-п-діода

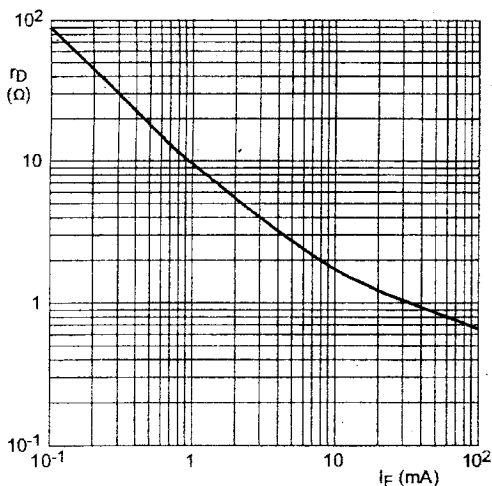


Рисунок 59 – Ом-амперна характеристика р-і-п-діода (залежність опору діода від значення постійного прямого струму)

Основні параметри

До основних параметрів р-і-п-діодів відносять:

1. *Втрати затирання L_z та втрати пропускання L_{np} .* Для будь-якого перемикального діода властиві два основних режими роботи. Перший

режим – це такий стан діода, коли сигнал, який він комутує, вільно проходить через коло комутації (режим пропускання). Другий режим полягає у блокуванні діодом комутувального кола на частоті комутованого сигналу (режим запирання). Комутація відбувається шляхом зміни опору діода на робочій частоті. Для опису основних властивостей діодного комутатора використовують величину, яка дорівнює відношенню потужності НВЧ сигналу, що підводиться до комутаційного пристрою, до потужності, яка проходить через цей пристрій. Таке співвідношення для режиму запирання називається втратами запирання, а для режиму пропускання – втратами пропускання;

2. *Якість діода (K)*. Якість діода не залежить від схеми його включення у лінію, хвилевого опору і т. п., і визначається виразом:

$$K = \frac{\sqrt{L_s} - 1}{\sqrt{L_{np}} - 1};$$

3. *Критична частота ($f_{кр}$)*. Критичною частотою називається така частота вхідного сигналу, при якій (при поступовому підвищенні частоти) ємнісний опір структури діода дорівнює середньому геометричному значенню його активного опору при прямому струмі та зворотному зміщенні. Критична частота напряму пов'язана з якістю діода, яка може бути обчислена для робочого сигналу з частотою f за формулою $K = (f_{кр}/f)^2$;

4. Загальна ємність діода C_d [пФ];

5. Накопичувальний заряд $Q_{нк}$ [нКл] при заданому значенні прямого струму [мА];

6. Час відновлення опору при зміні полярності прикладеної напруги [мкс];

7. Прямий опір R_{np} [Ом] при заданому значенні прямого струму I_{np} [мА];

8. Напруга пробоя U [В];

9. Максимальна розсіювана потужність P [Вт].

Еквівалентна схема

Еквівалентна схема р-і-п-діода (корпусного і безкорпусного) на НВЧ має вигляд, що зображений на рис. 60. На цій схемі C – ємність р-і-п-структури, r_s – опір втрат у сильнолегованих областях, омичних контактах і виводах діода, L – індуктивність виводів діода, R_i – опір і-шару, C_k – ємність керамічного або скляного корпусу діода.

Опір r_s становить від десятих часток до декількох ом і зменшується в режимі зворотного зсуву зі зростанням напруги зсуву.

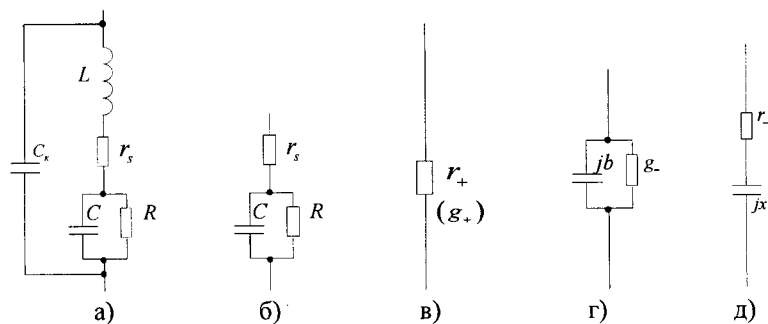


Рисунок 60 – Еквівалентна схема р-і-п-діода: а) корпусний; б) безкорпусний; в) безкорпусний в режимі прямого зміщення; г) безкорпусний у режимі зворотного зміщення (паралельна схема); д) безкорпусний у режимі зворотного зміщення (послідовна схема)

Конструкція р-і-п-діода

Для високошвидкісної модуляції НВЧ використовуються як корпусні, так і безкорпусні конструкції р-і-п-діодів (рис. 61). Монтаж діодів у кварцовий і металокерамічний корпуси зазвичай застосовують для діапазону частот до 55 ГГц. На цих частотах можуть бути використані і металосапфірові корпуси. Для вищих частот діоди зазвичай монтують на штифті з однією або двома металізованими кварцовими опорами.

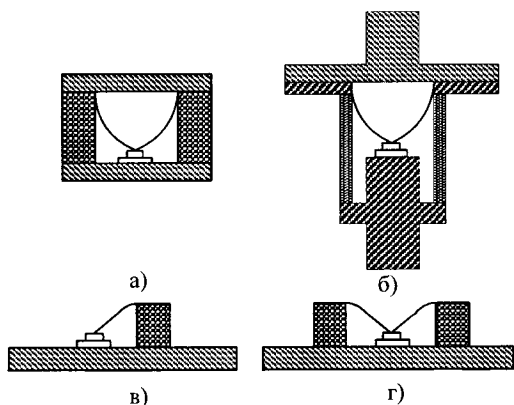


Рисунок 61 – Конструкції р-і-п-діодів: а) кварцовий корпус; б) металокерамічний корпус; в) на штифтах з однією металізованою опорою; г) на штифтах з двома металізованими опорами

Для оптимізації параметрів НВЧ-модуляторів в кожному інтервалі частот потрібні повністю визначені величини C_K і L_S . Ємність C_K можна

регулювати в широких межах вибором геометричних розмірів корпусу. Індуктивність L_S також можна варіювати зміною довжини.

Приклади серійних p-i-n-діодів

НВЧ перемикальний p-i-n-діод 1N5719 призначений для сантиметрового, дециметрового та метрового діапазонів; застосовується в перемикальних пристроях, модуляторах, фазообертачах, атенуаторах.

Зовнішній вигляд діода 1N5719 наведено на рис. 62, а основні його параметри – у табл. 17.

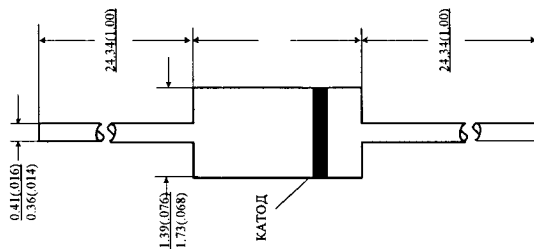


Рисунок 62 – Зовнішній вигляд p-i-n-діода 1N5719

Таблиця 17 – Основні технічні параметри p-i-n-діода 1N5719

Максимальний прямий струм, мА	Пробивна напруга, В	Розсіювана потужність P , Вт	Загальна ємність C_d , пФ	Час відновлення опору, мкс	Прямий опір R_{np} при I_n
100	150	0,25	0,3	100	1,25 Ом при 100 мА

9 ТИРИСТОРИ

Тиристор – це напівпровідниковий прилад з двома стійкими станами, що має три або більше електронних переходи, який може перемикатися із закритого стану в відкритий та навпаки. Структура тиристора складається з чотирьох шарів напівпровідника р-п-р-п-типу. За кількістю виводів тиристори поділяються на прилади з двома виводами – діодні тиристори (диністори), та прилади з трьома виводами – тріодні тиристори (триністори та симістори).

9.1 Диністори

Диністром або діодним тиристором, називають перемикальний компонент з двома виводами, що переходить у відкритий стан при перевищенні певної напруги, яку прикладають між його виводами.

Призначення

Диністори застосовують у регуляторах і перемикачах, чутливих до змін напруг. Також диністори часто застосовують для запуску люмінесцентних ламп.

Принцип роботи

Диністори містять три електронно-діркових переходи. Схематичне зображення структури диністора подано на рис. 63.

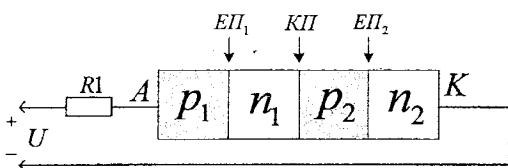


Рисунок 63 – Чотиришарова структура діодного тиристора

Вивід від зовнішньої зони n_2 називають катодом, а від зони p_1 – анодом. Зони n_1 і p_2 носять назву баз диністора. Перехід між зонами p_1 , n_1 і p_2 , n_2 називають емітерним, а між зонами n_1 і p_2 – колекторним переходом.

Якщо від джерела живлення до анода диністора прикласти невелику негативну напругу, а до катода позитивну напругу, то центральний колекторний перехід буде відкритий, а крайні емітерні переходи стануть закритими. Зони n_1 і p_2 не можуть подолати основні носії зарядів, що надходять з анода і катода, а, отже, вони не досягнуть бази диністора. В результаті через диністор протікає невеликий зворотний струм, обумовлений неосновними носіями заряду, і диністор закритий.

Якщо від джерела живлення до анода диністора прикладемо невелику позитивну напругу, а до катода незначну негативну напругу, то колектор-

ний перехід буде закритий, а емітерні переходи стануть відкритими. Носії зарядів надходять з області катода n_2 в зону p_2 (електрони), а з області анода p_1 в зону n_1 (дірки). У зазначених зонах баз носії заряду вже стануть неосновними, і в результаті в цих зонах виникає рекомбінація носіїв зарядів, через неї концентрації вільних носіїв зарядів стануть меншими. Поле колекторного переходу буде прискорювальним для носіїв заряду, що стали неосновними, які завдяки інжекції його долають і виявляються в зонах, де вони знову будуть основними. В областях p_1 і n_2 ці носії зарядів знову стануть неосновними і знову рекомбінують. З причини рекомбінацій носіїв зарядів провідність диністора на ділянці IV (рис. 63) мала і зворотний струм, який протікає через нього, також малий.

Якщо збільшувати постійну напругу, що прикладена до диністора у прямому включенні, то зростає ширина колекторного переходу і швидкість носіїв заряду, стають меншими інтенсивності рекомбінацій, а прямиий струм через диністор повільно зростає. Чим більшою буде пряма напруга, тим інтенсивнішою стане ударна іонізація, яка породжує нові носії заряду, що при певній напрузі включення призведе до лавинного пробію колекторного переходу. Пробій супроводжує різке збільшення провідності диністора у прямому включенні. Диністор відкривається, і на ньому буде спадати невелика залишкова напруга.

Основні характеристики

Якщо до анода диністора прикласти дуже велику негативну напругу, а до катода – високу позитивну напругу, то відбудеться лавинний пробій, що видно на вольт-амперній характеристиці диністора, показаній на рис. 64.

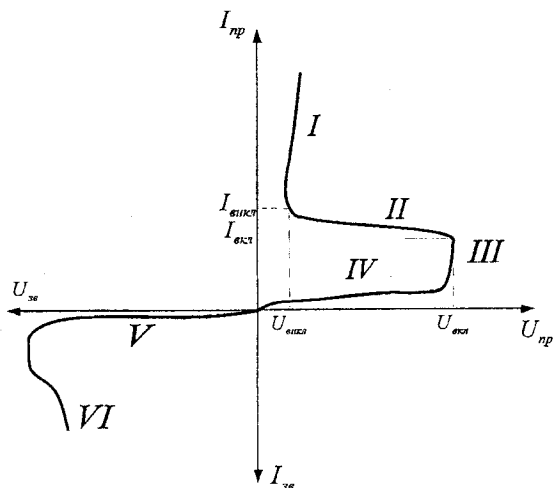


Рисунок 64 – Вольт-амперна характеристика диністора

На даній ВАХ:

I – ділянка відкритого стану диністора, на якому його провідність висока;

II – ділянка негативного опору;

III – ділянка пробою колекторного переходу;

IV – ділянка в прямому включенні, на якій диністор закритий, і прикладена до його виводів напруга менша, ніж необхідно для виникнення пробою;

V – ділянка зворотного включення диністора;

VI – ділянка лавинного пробою.

Основні параметри

Основні параметри диністорів:

1. *Напруга включення* $U_{вкл}$ – основна напруга в точці включення диністора (напруга, при якій струм через прилад починає різко зростати);

2. *Струм включення* $I_{вкл}$ – основний струм у точці включення (струм, що протікає через прилад при прикладеній до нього напрузі включення);

3. *Струм утримання* $I_{ут}$ – мінімальний основний струм, що необхідний для підтримання диністора у відкритому стані при певному режимі в колі керувального електрода;

4. *Напруга у відкритому стані* $U_{відкр}$ – основна напруга при певному струмі у відкритому стані диністора;

5. *Струм у закритому стані* $I_{закр}$ – основний струм при певній напрузі в закритому стані, при певному режимі в колі керувального електрода;

6. *Зворотний струм* $I_{звор}$ – анодний струм при певній зворотній напрузі.

Еквівалентна схема

На рис. 65 наведено еквівалентну схему диністора.

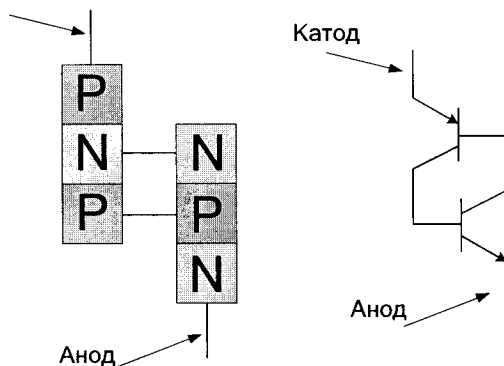


Рисунок 65 – Еквівалентна схема диністора

Диністор можна подати як два взаємопов'язані біполярні транзистори: один р-п-р-типу, а інший – п-р-п-типу.

Типові схеми включення

Типова схема включення та різні способи виключення диністора наведено на рис. 66.

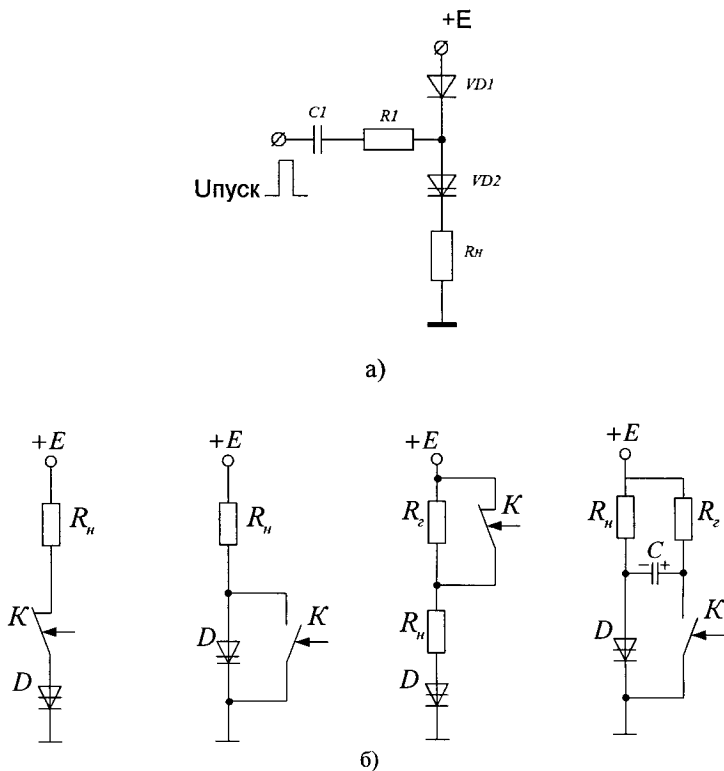


Рисунок 66 – Типова схема включення (а)
та схеми виключення диністора (б)

У першій схемі переривається струм в колі диністора. У другій схемі напруга на диністорі стає рівною нулю. У третій схемі струм диністора знижується до $I_{\text{виск}}$ включенням додаткового резистора R_0 . У четвертій схемі для виключення диністора подають зворотну напругу.

Конструкція диністорів

Конструкція диністора показана на рис. 67.

Диністор має два виводи (чим і відрізняється від тиристора), перемикається у відкритий стан імпульсами напруги заданої величини, прикладеної до його виводів.

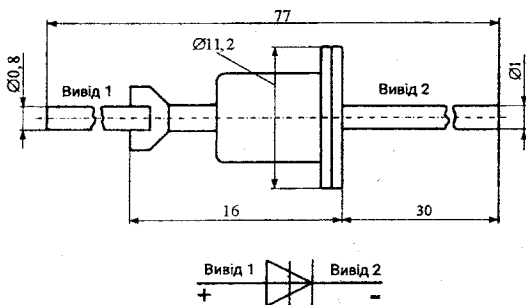


Рисунок 67 – Конструкція диністора

Приклади серійних диністорів

Зовнішній вигляд диністора DB3 наведено на рис. 68, а основні його параметри – у табл. 18.

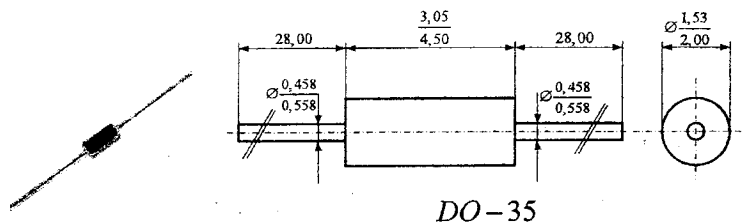


Рисунок 68 – Зовнішній вигляд диністора DB3

Таблиця 18 – Основні технічні параметри диністора DB3

Напруга у відкритому стані ($I_{відкр} 0,2 \text{ А}$), В	1,5
Максимально допустимий середній струм у відкритому стані, А	0,3
Максимально допустимий імпульсний струм у відкритому стані ($t_i < 10 \text{ мс}$), А	2
Максимальна напруга в закритому стані, В	32
Постійний струм в закритому стані, мкА	10
Час перемикання, мкс	2
Діапазон робочих температур, °С	-40...+70

9.2 Триністори

Триністором називають прилад з трьома електронно-дірковими переходами, і трьома виводами – анодом, катодом і керувальним електродом. Триністори мають структуру, аналогічну структурі диністора, а відмінність

полягає в наявності електрода керування – додаткового виводу, підключеного до однієї з баз.

Призначення

Триністори зазвичай використовують у перетворювальній техніці як електронні ключі. Триністори широко застосовують у регуляторах потужності, контакторах, ключових перетворювачах, інверторах і т. ін.

Принцип роботи

Якщо через електрод керування триністора пропустити струм відпирання, то триністор перейде у відкритий стан. Залежно від того, до якої саме з баз буде присланий електрод керування, можна реалізувати включення триністора при прикладенні напруги відпирання між електродом керування і або анодом, або катодом. Вольт-амперна характеристика триністора схожа на вольт-амперну характеристику диністора. Однак відмикання триністора зазвичай відбувається при істотно нижчій прямій напрузі, ніж необхідно для диністора, і до відкривання тиристорної структури приводить протікання струму через електрод керування. Чим більший струм електрода керування, тим при більш низькій прямій напрузі тиристор перейде у відкритий стан.

Коли через електрод керування протікає струм відпирання, зростає швидкість носіїв заряду, які інжектуються через колекторний перехід, що викликає примусове відмикання тиристора. Після включення незапірний триністор не реагує на зміну сили струму електрода керування. Щоб закрити тиристор, необхідно зменшити силу струму, що протікає по аноду та катоду, нижче струму утримання, або змінити полярність напруги, прикладеної між анодом і катодом. Якщо електрод керування триністора знеструмлений, то тиристор функціонує абсолютно так само, як диністор. У незапірних триністорах керувальний електрод займає невелику ділянку кристала напівпровідника, орієнтовно в декілька відсотків.

Запірні триністори, на відміну від триністорів, які були розглянуті раніше, – це повністю керовані компоненти, і під впливом струму керувального електрода вони можуть переходити із закритого стану у відкритий стан, і навпаки. Щоб вимкнути запірний триністор потрібно пропустити через керувальний електрод струм протилежної полярності, ніж полярність, що викликала відмикання компонента. Для закриття спочатку відкритого запірного триністора необхідно зменшити суму коефіцієнтів передачі емітерних струмів нижче одиниці і збіднити бази носіями зарядів, для чого структура електрода керування повинна бути розподілена по напівпровідникових кристалах. Важливим параметром розглянутих триністорів виступає коефіцієнт замикання, що дорівнює відношенню струму анода до необхідного для виключення компонента зворотного струму електрода керування.

Основні характеристики

Принцип дії тиристорів відображається на його вольт-амперній характеристиці, зображеній на рис. 69.

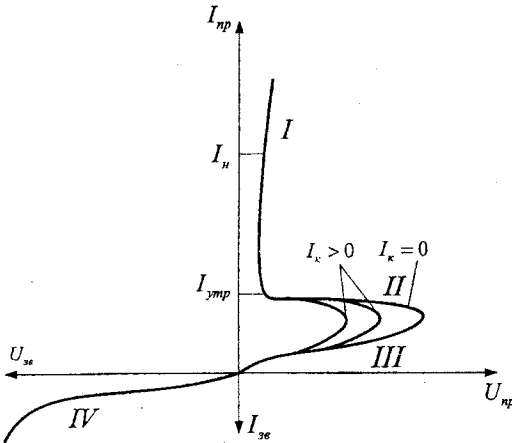


Рисунок 69 – Вольт-амперна характеристика тиристора

На рисунку позначено:

- I* – ділянка, на якій тиристор відкритий;
- II* – ділянки негативного опору і пробією колекторного переходу;
- III* – ділянка замкненого стану тиристора в прямому включенні;
- IV* – ділянка зворотного включення тиристора.

Основні параметри

1. Загальна ємність $C_{заг}$ – ємність між основними електродами тиристора при певній напрузі в закритому стані.
2. Постійний струм відмикання керувального електрода $I_{кер.від}$ – мінімальне значення постійного струму керувального електрода, що забезпечує переключення тиристора з закритого стану у відкритий при певних режимах в колах основного і керувального електродів.
3. Імпульсний струм відмикання керувального електрода $I_{кер.від.і}$ – мінімальне значення амплітуди імпульсу струму керувального електрода, що забезпечує переключення тиристора з закритого стану у відкритий при певних режимах у колах основного й керувального електродів.
4. Постійна напруга відмикання на керувальному електроді $U_{кер.від}$ – напруга на керувальному електроді тиристора, яка відповідає постійному струму відмикального керувального електрода.
5. Імпульсна напруга відмикання на керувальному електроді $U_{кер.від.і}$ – значення амплітуди імпульсу напруги на керувальному електроді тиристора, що відповідає імпульсному струму відмикального керувального електрода.

6. Імпульсна напруга невідмикання $U_{невід.і}$ – максимальне значення амплітуди імпульсу основної напруги з певною тривалістю переднього фронту, переключення триністора із закритого стану у відкритий.

7. Імпульсна напруга відмикання $U_{від.і}$ – мінімальне значення амплітуди імпульсу основної напруги з певною тривалістю фронту, що забезпечує переключення триністора з закритого стану в відкритий.

8. Час вмикання $t_{вкл}$ – інтервал часу між моментом на початку відмикального імпульсу, відповідним 0,1 його амплітуди, і моментом, коли основна напруга спадає до 0,1 значення різниці напруг у закритому і відкритому стані триністора.

9. Час вимкання $t_{вим}$ – час, протягом якого основний струм зменшується до нуля при переключенні триністора по колу основних електродів з відкритого стану в закритий.

10. Максимально допустимий постійний струм у відкритому стані $I_{відкр.мах}$.

11. Максимально допустимий імпульсний струм у відкритому стані $I_{відкр.мах}$.

12. Максимально допустима пряма постійна напруга в закритому стані $U_{відкр. екр. мах}$.

Еквівалентна схема

Еквівалентній схемі триністора відповідає електрична схема з'єднання транзисторів VT1 і VT2 (рис. 70). Оскільки концентрація основних носіїв заряду в структурі триністора різна, транзистор VT1 характеризується коефіцієнтом передачі струму a_1 , а транзистор VT2 – коефіцієнтом a_2 .

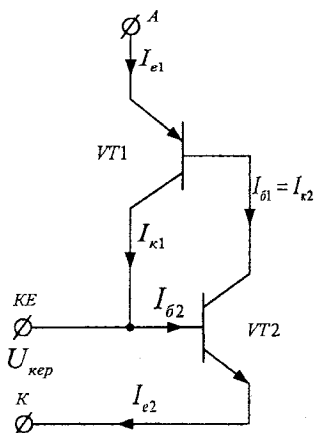


Рисунок 70 – Еквівалентна схема триністора

Напруга керування позитивної полярності, що надходить на електрод керування тиристора (базу транзистора VT2), є відмикальною для транзистора VT2. Під дією $U_{кер}$ через нього протікає струм бази $I_{б2}$, що супрово-

джується відкриттям транзистора $VT2$ і збільшенням струмів емітера I_{e2} і колектора $I_{k2} = \beta_2 I_{e2}$ цього транзистора.

У свою чергу, струм колектора I_{k2} транзистора $VT2$ є струмом бази транзистора $VT1$. Аналогічне збільшення струму I_{b1} приводить до утворення струму емітера I_{e1} транзистора $VT1$, що є анодним струмом тиристора, а також струму колектора I_{k1} .

Типова схема включення

Схему включення триністора наведено на рис. 71. Включення відбувається не миттєво, оскільки повинні відбутися складні фізичні процеси, пов'язані з накопиченням носіїв зарядів в середніх шарах і розширенням провідного каналу від електрода керування по всьому об'єму. Для кількісної оцінки процес включення розбивається на ряд інтервалів. Час включення тиристора $t_{BKЛ}$ – це час від моменту подачі керувального імпульсу до моменту спаду напруги на тиристорі до 0,1 початкового значення. Час включення становить декілька мікросекунд.

$$t_{BKЛ} = t_3 + t_H,$$

де t_3 – час затримки (час від моменту подачі керувального імпульсу до моменту спаду напруги на тиристорі до 0,9 початкового значення);

t_H – час наростання (час зміни напруги на тиристорі від 0,9 до 0,1 початкового значення або наростання струму від 0,1 до 0,9 установленого значення).

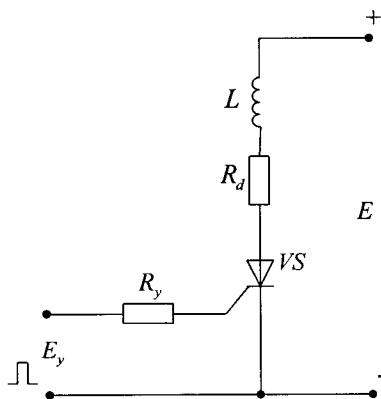


Рисунок 71 – Типова схема включення триністора

Однак після закінчення часу включення триністор ще не повністю включається і напруга на ньому продовжує спадати до установленого значення. Час спадання напруги на тиристорі від 0,1 початкового до сталого значення називається часом встановлення $t_{вст}$ (становить 10 ... 500 мкс).

Конструкція тиристора

Конструкція тиристора показана на рис. 72.

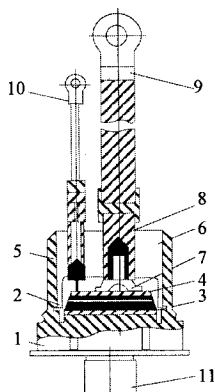


Рисунок 72 – Конструкція тріодного тиристора

На рисунку позначено: 1 – мідна основа корпусу; 2 – чотиришарова напівпровідникова структура; 3, 4 – вольфрамові диски, припаяні до напівпровідникової пластини; 5 – мідний корпус кришки; 6 – склоізолятор; 7 – гнучкий силовий провід; 8 – втулка катода; 9 – вивід катода; 10 – електрод керування; 11 – вивід анода.

Приклади серійних тиристорів

Тиристори – кремнієві структури р-п-р-п планарно-дифузійні, тріодні, незапірні типу 2У202И призначені для застосування як перемикальні елементи пристроїв комутації напруги малими керувальними сигналами. Випускаються в металоскляному корпусі з жорсткими виводами. Тип тиристора наводиться на корпусі. Маса тиристора не більше 14 г, з комплектуючими деталями – не більше 18 г.

Зовнішній вигляд тиристора 2У202И наведено на рис. 73, а основні його параметри – у табл. 19.

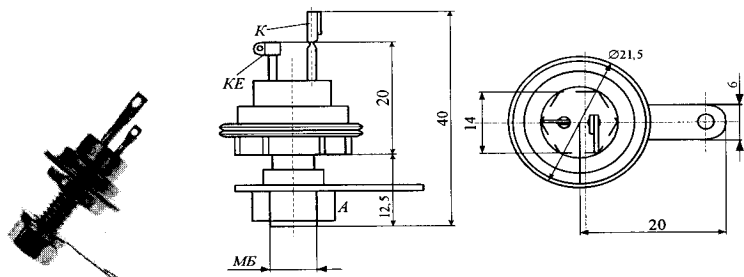


Рисунок 73 – Зовнішній вигляд тріодного тиристора 2У202И

Таблиця 19 – Основні технічні параметри триністора 2У202И

Напруга у відкритому стані ($I_{відкр} 10A$), В	1,5
Максимально допустимий середній струм у відкритому стані, А	10
Імпульсний струм у відкритому стані ($t_i < 10$ мс), А	30
Максимальна напруга в закритому стані, В	200
Постійний струм в закритому стані, мА	4
Струм утримання, мА	300
Відпірний постійний струм керування, мА	200
Час вмикання, мкс	10
Час вимикання, мкс	150
Загальна ємність, пФ	800
Максимальна середня потужність розсіювання, Вт	20
Діапазон робочих температур, °С	-60...75

9.3 Симістори

Симістор (симетричний тріодний тиристор) – це напівпровідниковий прилад, що є різновидом тиристорів і використовується для комутації в колах змінного струму.

Призначення

Симістори використовуються як перемикачі змінного струму або для керування величиною потужності змінного струму, що подається в навантаження. Симістори здатні передати в навантаження повну потужність.

Принцип роботи

У закритому стані провідність симістора відсутня, навантаження вимкнено. При подачі на керувальний електрод сигналу відмикання між основними електродами симістора виникає провідність, навантаження виявляється включеним. Характерно, що симістор у відкритому стані проводить струм в обох напрямках. Іншою особливістю симістора, як і інших тиристорів, є те, що для його утримання у відкритому стані відсутня необхідність постійно подавати сигнал на керувальний електрод. Симістор залишається відкритим, поки струм, що протікає через основні виводи, перевищує певну величину, яка називається струмом утримання. Звідси випливає, що вимикання навантаження в колі змінного струму відбувається поблизу моментів часу, коли струм через основні електроди симістора змінює напрям (зазвичай це збігається за часом зі зміною полярності напруги в мережі).

Для відмикання симістора на його електрод керування подається напруга керування відносно умовного катода. Полярність напруги керування, як правило, повинна бути або негативною, або повинна збігатися з полярністю напруги на умовному аноді. Тому часто використовується такий метод

керування симістором, при якому сигнал на керувальний електрод подається з умовного анода через струмообмежувальні резистор і вимикач. Керувати симістором часто зручно, задаючи певну силу струму електрода керування, достатню для відмикання. Деякі типи симісторов (так звані чотириквADRантні симістори) можуть відпиратися сигналом будь-якої полярності, хоча при цьому може знадобитися більший струм керування (а саме, більший струм керування потрібен у четвертому квадранті, тобто коли напруга на умовному аноді має негативну полярність, а на електроді керування – позитивну).

Основні характеристики

Принцип роботи симістора відображається на його вольт-амперній характеристиці (рис. 74).

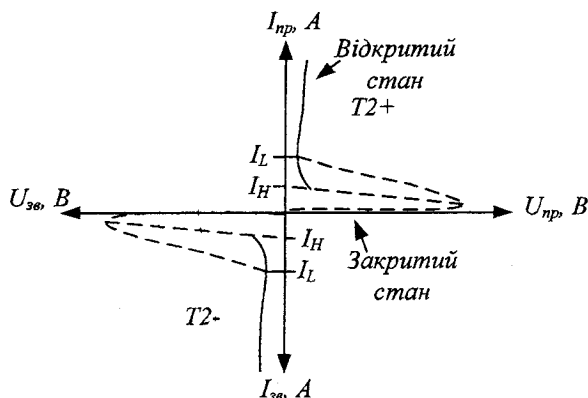


Рисунок 74 – ВАХ симістора

При використанні симістора накладаються обмеження, зокрема при індуктивному навантаженні. Обмеження стосуються швидкості зміни напруги (dU/dt) між основними електродами симістора і швидкості зміни робочого струму di/dt . Перевищення швидкості зміни напруги на симісторі (через наявність його внутрішньої ємності), а також величини цієї напруги, можуть призводити до небажаного відкриття симістора. Перевищення швидкості наростання струму між основними електродами, а також величини цього струму, може призвести до пошкодження симістора. Існують і інші параметри, на які накладаються обмеження відповідно до гранично-допустимих режимів експлуатації. До таких параметрів належать струм і напруга керувального електрода, температура корпусу, потужність, що розсіюється приладом і ін.

Небезпека перевищення за швидкістю наростання струму полягає в тому, що завдяки глибокому позитивному зворотному зв'язку перехід симі-

стора у відкритий стан відбувається лавиноподібно, але, незважаючи на це, процес відмикання може тривати до декількох мікросекунд, протягом яких на симісторі спостерігаються великі значення струму і напруги. Тому, навіть незважаючи на те, що спад напруги на повністю відкритому симісторі невеликий, миттєва потужність під час відкривання симістора може досягти значної величини. Це супроводжується виділенням теплової енергії, яка не встигає розсіятися і може призвести до перегріву і пошкодження кристала.

Одним із способів захисту симістора від викидів напруги при роботі з індуктивним навантаженням є включення варистора паралельно до основних виводів симістора. Для захисту симістора від перевищення швидкості зміни напруги застосовують так зване снабберне коло (RC-коло), що підключається аналогічно.

Основні параметри

1. Максимальна допустима постійна розсіювана потужність $P_{\text{макс}}$
2. Максимальний допустимий середній постійний струм у відкритому стані $I_{\text{вс.макс}}$
3. Максимальна напруга в закритому стані $U_{\text{зс.макс}}$
4. Постійний струм включення $I_{\text{в}}$
5. Напруга керування $U_{\text{кер}}$
6. Час включення $t_{\text{вкл}}$
7. Максимально допустимий струм у відкритому стані $I_{\text{макс}}$
8. Струм спрацьовування $I_{\text{спр}}$
9. Струм утримання $I_{\text{ум}}$

Еквівалентна схема

Симістор має п'ятишарову структуру напівпровідника. Спрощено симістор можна подати у вигляді еквівалентної схеми (рис. 75).

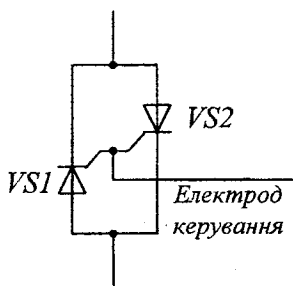


Рисунок 75 – Еквівалентна схема симістора

У такому вигляді симістор поданий як два тріодних тиристори, включених зустрічно-паралельно. Виводи входу і виходу позначаються $VS1$ і $VS2$. Ці виводи з'єднані з р-п-переходами на протилежних кінцях пристрою. Вивід $VS1$ являє собою опорну точку, відносно якої вимірюються напруга і струм на керувальному електроді. Керувальний електрод з'єднаний з р-п-

переходом на тому ж кінці пристрою, що і *VS1*. Від виводу *VS1* до виводу *VS2* сигнал повинен пройти через послідовність шарів n-p-n-p або p-n-p-n.

Типова схема включення

Як типову схему включення симістора наведемо схему пристрою керування яскравістю лампочки розжарювання (рис. 76).

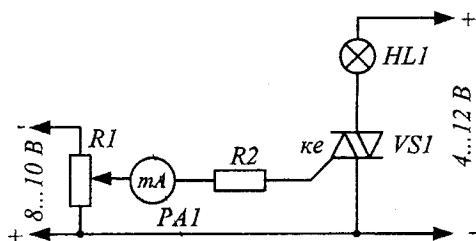


Рисунок 76 – Типова схема включення симістора

Ця схема включення симістора забезпечує пилкоподібну форму напруги на навантаженні. Ця нескладна схема здатна не тільки пояснити принципи роботи симістора, але і зможе керувати яскравістю лампи розжарювання або температурою нагрівання паяльника.

Конструкція симістора

Зовнішній вигляд сучасного симістора показано на рис. 77. На тепловідвідному металевому фланці приладу виштампувана літера «У» напроти виводу керування і цифра «1» напроти основного виводу 1.

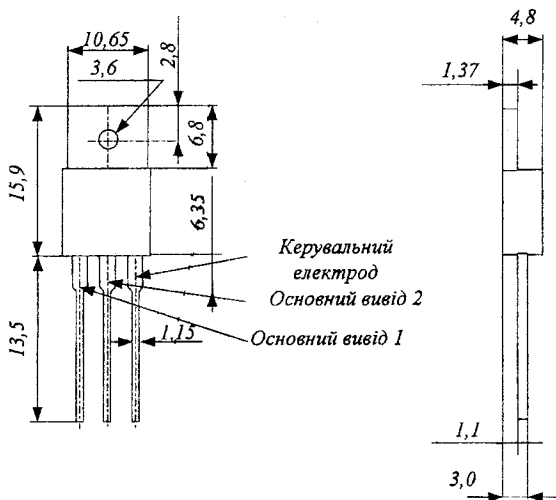


Рисунок 77 – Конструкція симістора

Зауважимо, що вказане тут найменування виводів симістора відповідає заводській технічній документації на відміну від багатьох довідників, в яких вивід 1 позначений літерою «к», а вивід 2 – «а».

Приклади серійних тиристорів

BT139-800E – симістори (симетричні тиристори) середньої потужності в корпусі ТО-220. Фланець корпусу симістора серії BT139 з'єднаний з виводом А2.

Зовнішній вигляд симістора BT139-800E наведено на рис. 78, а основні його параметри – у табл. 20.

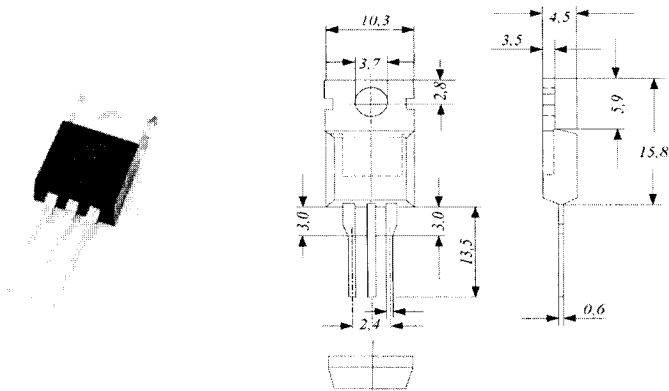


Рисунок 78 – Зовнішній вигляд симістора BT139-800E

Таблиця 20 – Основні технічні параметри симістора BT139-800E

Максимальна зворотна напруга в закритому стані $U_{зв}$, В	800
Максимально допустиме середнє за період значення струму у відкритому стані $I_{ср.макс}$, А	16
Максимально допустимий короточасний імпульсний струм у відкритому стані $I_{i.макс}$, А	140
Максимальна напруга у відкритому стані $U_{від.макс}$, В	1,6
Найменший постійний струм керувального електрода, необхідний для включення симістора $I_{к.мін}$, А	0,1
Відпірна напруга керування, яка відповідає мінімальному постійному струму відпирання $U_{к.мін}$, В	1,5
Критична швидкість наростання напруги в закритому стані $dU_{зв}/dt$, В/мкс	20
Критична швидкість наростання струму у відкритому стані dI/dt , А/мкс	20
Час включення $t_{вкл}$, мкс	2
Робоча температура, °С	-40...+125

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Який прилад називається напівпровідниковим діодом?
2. Які типи діодів ви знаєте?
3. За якими ознаками класифікують напівпровідникові діоди?
4. Які системи маркування діодів ви знаєте?
5. Яке призначення випрямних діодів?
6. Нарисуйте вольт-амперну характеристику діода.
7. Що називається прямим і зворотним струмом діода?
8. Що називається прямою та зворотною напругою діода?
9. Як змінюється опір діода при зміні полярності прикладеної напруги?
10. Нарисуйте схему найпростішого однопівперіодного випрямляча.
11. Наведіть типи та умовне графічне позначення імпульсних діодів.
12. Яке маркування імпульсних діодів?
13. Поясніть процес перемикання імпульсних діодів.
14. У чому полягає особливість діодів Шоттки, їх переваги й галузь застосування.
15. Яке явище називається пробоем діода?
16. Які види пробою ви знаєте?
17. Поясніть призначення стабілітронів, їх відмінність від випрямних діодів.
18. Порівняйте ВАХ стабілітрона і випрямного діода.
19. Зобразіть ВАХ стабістора.
20. У чому відмінність стабістора від стабілітрона?
21. Які основні параметри та характеристики стабілітронів?
22. Які напівпровідникові діоди називають варикапами?
23. Яке призначення варикапів? Поясніть принцип його роботи.
24. Перерахуйте основні параметри варикапів.
25. Як зміниться ємність варикапа при збільшенні зворотної напруги?
26. Що таке добротність, як вона визначається для варикапа?
27. У чому полягає суть тунельного ефекту?
28. Чим відрізняються звичайний і тунельний напівпровідниковий діоди?
29. У чому полягають особливості вольт-амперної характеристики тунельного діода в прямому і зворотному включеннях?
30. Порівняйте принцип роботи та вольт-амперні характеристики звичайного і тунельного напівпровідникових діодів і поясніть відмінності.
31. Поясніть принцип роботи діода Ганна.
32. Що таке домен в діоді Ганна?
33. Які умови виникнення негативної провідності в діоді Ганна?
34. Назвіть основні параметри діода Ганна.
35. Поясніть принцип дії і структуру лавинопролітних діодів.

36. Поясніть процес лавинного наростання струму в ЛПД і його гальмування високочастотним полем.
37. Які основні параметри генераторів на ЛПД?
38. Які характеристики генераторів і підсилювачів на ЛПД?
39. Яке застосування ЛПД?
40. У чому полягає особливість р-і-п діодів перед звичайними діодами?
41. Якими параметрами характеризуються р-і-п діоди?
42. Які особливості еквівалентної схеми р-і-п діода у відкритому та закритому стані?
43. Яке призначення диністорів і тиристорів та чим вони відрізняються від випрямних діодів?
44. Чим симістори відрізняються від диністорів і тиристорів?
45. Чим відрізняються ВАХ диністорів і тиристорів від ВАХ випрямних діодів?
46. Як використовуються тиристори?
47. Які способи керування вмиканням і вимиканням тиристорів на постійному струмі?
48. Які способи керування відкриттям тиристорів і симісторів на змінному струмі?
49. У чому відмінність тиристора й симістора як елементів регулювання потужності передачі?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ровдо А. А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами : справочное издание / Ровдо А. А. – М. : Лайт Лтд., 2000. – 288 с.
2. Основы промышленной электроники : учеб. для неэлектротех. спец. вузов / [под ред. В. Г. Герасимова]. – М. : Высш. шк., 1991. – 337 с.
3. Изъюрова Г. И. Приборы и устройства промышленной электроники : учеб. пособие / Г. И. Изъюрова, М. С. Кауфман. – М. : Высшая школа, 1975. – 201 с.
4. Миклашевский С. П. Промышленная электроника : учеб. пособие / Миклашевский С. П. – М. : Высшая школа, 1973. – 352 с.
5. Горбачев Г. Н. Промышленная электроника : учеб. пособие / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин. – М. : Высшая школа, 1988. – 320 с.
6. Гершунский В. С. Основы электроники : учебник для ВУЗов / Гершунский В. С. – К. : Вища школа, 1982. – 424 с.
7. Жеребцов И. П. Основы электроники / Жеребцов И. П. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 464 с.
8. Нагорский В. Д. Электроника и электрооборудование : учеб. пособие для неэлектротехн. спец. вузов. / Нагорский В. Д. – М. : Высшая школа, 1986. – 158 с.
9. Диоды : [справочник] / О. П. Григорьев, В. Я. Замятин, Б. В. Кондратьев, С. Л. Пожидаев. – М. : Радио и связь, 1990. – 336 с.
10. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы : учеб. для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – [9-е изд., стер.]. – СПб. : Лань, 2009. – 480 с.
11. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. / Зи С. М. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
12. Tsuchida H. 20V-400A SiC Zener Diodes with Excellent Temperature Coefficient / H. Tsuchida, K. Nakayama, Y. Sugawara // Power Semiconductor Devices and IC's. – 2007 (ISPSD '07). – P. 277–280.
13. Гранитов Г. И. Физика полупроводников и полупроводниковые приборы / Гранитов Г. И. – М. : Сов. радио, 1977. – 184 с.
14. Борисов В. Г. Юный радиолобитель / Борисов В. Г. – [6-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Энергия, 1979. – 435 с.
15. Галкин В. И. Промышленная электроника : учеб. пособие / Галкин В. И. – Мн. : Выш. шк., 1989. – 336 с.
16. Галкин В. И. Начинающему радиолобителю : справ. пособие / Галкин В. И. – Мн. : Беларусь, 1983. – 223 с.
17. Мала гірничча енциклопедія : у 3-х т. / [за ред. В. С. Білецького]. – Донецьк : Донбас, 2004.
18. Диоды и тиристоры / [Чернышев А. А., Иванов В. И., Галахов В. Д. и др.]; под общ. ред. А. А. Чернышева. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Энергия, 1980. – 176 с.

19. Чернышова Т. И. Электронные компоненты РЭС : лаб. практикум / Т. И. Чернышова, Н. Г. Чернышов. – [3-е изд., стер.]. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2005. – 28 с.
20. Овечкин Ю. А. Полупроводниковые приборы / Овечкин Ю. А. – М. : Высшая школа, 1974. – 279 с.
21. Проектування інтегральних приладів НВЧ : довідник / [Єфремов Ю. Г., Конін В. В., Солганік Б. Д. та ін.]. – К. : Техніка, 1990. – 159 с.
22. Бодров Е. А. Исследование характеристик диода ганна и генератора на его основе : методические указания по выполнению лабораторной работы / Е. А. Бодров, Ю. М. Карпец. – Хабаровск : Центр дистанционного образования, 2009. – 25 с.
23. Куликовский А. А. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Куликовский А. А. – М. : Энергия, 1977. – 568 с.
24. Бурин Л. И. Справочник по радиоэлектронным устройствам. Т. 1. / Бурин Л. И., Васильев В. П., Катаной В. И. – М. : Радиосвязь, 1978. – 440 с.
25. Філінюк М. А. Основи негatronіки. Т. 1. Теоретичні і фізичні основи негatronіки / Філінюк М. А. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 456 с.
26. Воскресенский Д. И. Антенны и устройства СВЧ : учеб. пособие для вузов / Воскресенский Д. И. – М. : Радиосвязь, 1994. – 592 с.
27. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ : учеб. для радиотехнич. спец. вузов / Сазонов Д. М. – М. : Высшая школа, 1988. – 434 с.
28. Хижа Г. С. СВЧ фазовращатели и переключатели. Особенности создания на р-і-п-диодах в интегральном исполнении / Хижа Г. С., Вендик И. Б., Серебрякова Е. А. – М. : Радио и связь, 1984. – 184 с.
29. Удалов Н. П. Полупроводниковые датчики / Удалов Н. П. – М. : Энергия, 1965. – 235 с.
30. Москатов Е. А. Электронная техника. Начало / Москатов Е. А. – Таганрог, 2004. – 121 с.
31. Рекус Г. Г. Электрооборудование производств / Рекус Г. Г. – М. : Высшая школа, 2007. – 709 с.

Навчальне видання

**Філінюк Микола Антонович
Лазарев Олександр Олександрович
Войцеховська Олена Валеріївна
Фурса Світлана Євгеніївна
Ткачук Яна Сергіївна
Чехмestрук Роман Юрійович**

**Елементна база електронних апаратів
Частина III
Напівпровідникові діоди
та тиристори**

Навчальний посібник

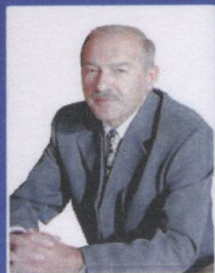
Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено О. Лазаревим

Підписано до друку 25.07.2016 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 5,8.
Наклад 50 пр. Зам. № 2016-149.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке посе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
21021, м. Вінниця, Хмельницьке посе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.



Філінюк Микола Антонович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Проектування комп'ютерної і телекомунікаційної апаратури" Вінницького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України, Академік Академії інженерних наук України. Підготував 4 докторів, 15 кандидатів технічних наук і 15 магістрів. Автор більше 700 наукових та науково-методичних робіт, у тому числі 32 монографій, посібників та навчальних посібників та більше 100 авторських свідоцтв та патентів на винаходи.



кандидат технічних наук, доцент кафедри ПКТА. Автор понад 250 наукових та методичних праць. Сфера наукових інтересів: розробка та дослідження електронних пристроїв на базі R-, L-, C- негатронів.

Войцеховська Олена Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри ПКТА Вінницького національного технічного університету. Автор понад 70 наукових і навчально методичних публікацій. Сфера наукових інтересів: розробка та дослідження імітансних інформаційних пристроїв.



Лазарев Олександр Олександрович кандидат технічних наук, доцент кафедри ПКТА. Автор понад 250 наукових та методичних праць. Сфера наукових інтересів: розробка та дослідження електронних пристроїв на базі R-, L-, C- негатронів.



Чехмestрук Роман Юрійович – аспірант кафедри ПКТА, Вінницького національного технічного університету. Автор 7 патентів на корисну модель, 13 статей у фахових виданнях України, апробовано результати наукових досліджень на 15 міжнародних науково-технічних конференціях. Сфера наукових інтересів: Вимірювання параметрів імітансних логічних елементів.



кандидат технічних наук, доцент кафедри ПКТА. В 2007 році захистила дисертацію кандидата технічних наук на тему "Елементи та пристрої автоматики на основі транзисторних оптонегатронів". На кафедрі працює з 2005р. Автор 30 наукових робіт і 9 патентів України.

Ткачук Яна Сергіївна аспірант кафедри ПКТА. Автор понад 40 наукових праць, в тому числі 11 статей у фахових виданнях України, декількох закордонних публікацій, а також понад 10 авторських свідоцтв та патентів на винаходи. Сфера наукових інтересів: радіочастотні давачі на базі динамічних негатронів.

