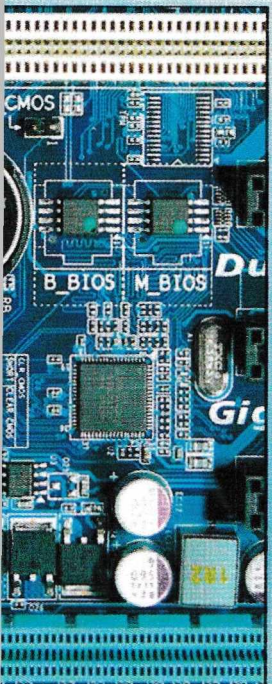


ЕЛЕКТРОНИКА ТА МИКРОСХЕМОТЕХНИКА

Квiтка С.О. ЯКОВЛЕВ В.Ф.



С.О. Квітка, В.Ф. Яковлев, О.В. Нікітіна

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для підготовки студентів аграрних
вищих навчальних закладів III – IV рівнів акредитації
зі спеціальності 6.100101 «Енергетика та електротехнічні системи
в агропромисловому комплексі»*

За загальною редакцією професора В.Ф. Яковлева

**Суми
«Сумський національний аграрний університет»
2012**

УДК 621.38 (075.8)

ББК32.85я73

К32

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України
(лист № 1/11-2460 від 25.03.11)*

Рецензенти:

Захарчук О.С., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання Східноукраїнського національного університету імені В. Даля;

Черенков О.Д., доктор технічних наук, професор Харківського національного технічного університету ім. П. Василенка;

Труфанов І.Д., доктор технічних наук, професор Запорізького національного технічного університету

Квітка С.О.,

К32

Електроніка та мікросхемотехніка: навчальний посібник/ Квітка С.О., Яковлев В.Ф., Нікітіна О.В.; за ред. проф. Яковлева В.Ф. – Суми: «Сумський національний аграрний університет», 2012. – 285 с.

ISBN 978-617-593-020-5

У посібнику розглянуто будову, принцип дії, параметри і характеристики напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем; будову та роботу електронних пристроїв інформаційної електроніки: підсилювачів електричних сигналів змінного та постійного струмів, генераторів гармонійних коливань та імпульсних сигналів, імпульсних і цифрових пристроїв, виконаних на базі напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем; пристроїв енергетичної електроніки: випрямлячів, згладжуючих фільтрів, стабілізаторів напруги, керованих випрямлячів, автономних і ведених мережею інверторів, конверторів; наведено методику та приклади розрахунку основних вузлів електронних пристроїв, що використовуються в системах енергетики і автоматизованих системах управління технологічними процесами сільськогосподарського виробництва.

УДК 621.38 (075.8)

ББК32.85я73

К32

ISBN 978-617-593-020-5

© Квітка С.О., 2012

© Яковлев В.Ф., 2012

© Нікітіна О.В., 2012

© «Сумський національний аграрний університет», 2012

ЗМІСТ

Передмова	8
1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ	10
1.1 Напівпровідникові матеріали	10
1.2 Електронно-дірковий перехід (<i>p-n</i> -перехід)	14
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	20
<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	20
2. НАПІВПРОВІДНИКОВІ РЕЗИСТОРИ	21
2.1 Варистори	21
2.2 Терморезистори	23
2.3 Тензорезистори	25
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	26
<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	26
3. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ	27
3.1 Випрямні діоди	27
3.2 Стабілітрони	32
3.3 Тунельні й обернені діоди	33
3.4 Варикапи	35
3.5 Розрахунок електричних кіл з напівпровідниковими діодами	36
<i>Приклади до розділу</i>	40
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	40
<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	41
4. ПЕРЕМІКАЮЧІ ПРИЛАДИ	42
4.1 Диністори	42
4.2 Триністори	43
4.3 Симістори	45
4.4 Одноперехідні транзистори	46
<i>Приклади до розділу</i>	49
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	49
<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	49
5. БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ	50
5.1 Будова та принцип дії	50
5.2 Схеми вмикання біполярних транзисторів	53
5.3 Статичні характеристики біполярних транзисторів	54
5.4 Основні параметри біполярних транзисторів	56
5.5 Режими роботи біполярних транзисторів	57
5.6 Підсилувальний каскад на біполярному транзисторі	58
5.7 Розрахунок електричних кіл з біполярними транзисторами	59
<i>Приклади до розділу</i>	61
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	62
<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	62

6. ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ	64
6.1 Польові транзистори з керуючим <i>p-n</i> -переходом	64
6.2 Польові транзистори з ізолюваним затвором	67
6.3 Схеми вмикання польових транзисторів	71
6.4 Підсилювальний каскад на польовому транзисторі	72
6.5 Розрахунок електричних кіл з польовими транзисторами	74
<i>Приклади до розділу</i>	75
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	75
<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	76
7. СИЛОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИБАДИ	78
7.1 IGBT - біполярний транзистор з ізолюваним затвором	78
7.2 SIT - транзистор із статичною індукцією	82
7.3 Порівняльна характеристика силових напівпровідникових приладів	84
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	85
8. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДЖЕРЕЛА ТА ПРИЙМАЧІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	86
8.1 Світлодіоди	86
8.2 Фоторезистори	88
8.3 Фотодіоди	90
8.4 Фототранзистори і фототиристри	92
8.5 Оптопари (оптрони)	94
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	96
<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	96
9. ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ (ІМС)	97
9.1 Гібридні ІМС	98
9.2 Напівпровідникові ІМС	98
9.3 Цифрові та аналогові ІМС	98
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	99
10. ПІДСИЛЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ	100
10.1 Загальні відомості про підсилювачі	100
10.2 Принципи побудови підсилювальних каскадів	103
10.3 Підсилювачі на біполярних транзисторах	104
10.3.1 Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі за схемою із спільним емітером	105
10.3.2 Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі за схемою із спільним колектором (емітерний повторювач)	108
10.3.3 Режими роботи підсилювачів на біполярних транзисторах	109
10.3.4 Способи забезпечення режиму спокою	110
10.4 Підсилювачі на польових транзисторах	112
10.4.1 Підсилювальний каскад на польовому транзисторі	

з керуючим $p-n$ -переходом	112
10.4.2 Підсилювальний каскад на польовому МДН - транзисторі з індукованим каналом	115
10.4.3 Підсилювальний каскад на польовому МДН - транзисторі з вбудованим каналом	116
10.5 Багатокаскадні підсилювачі	116
10.6 Зворотні зв'язки (ЗЗ) у підсилювачах	117
10.6.1 Види зворотних зв'язків у підсилювачах	117
10.6.2 Вплив зворотного зв'язку на коефіцієнт підсилення та вхідний опір підсилювального каскаду	118
10.7 Підсилювачі потужності	119
10.7.1 Підсилювальний каскад з трансформаторним увімкненням навантаження	120
10.7.2 Основні параметри підсилювачів потужності	122
10.8 Підсилювачі постійного струму (ППС)	123
10.8.1 Підсилювачі постійного струму на транзисторах	124
10.8.2 Операційні підсилювачі (ОП)	126
<i>Приклади до розділу</i>	132
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	135
<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	136
11. ГЕНЕРАТОРИ СИНУСОЇДАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ	139
11.1 Структурна схема генератора синусоїдальних коливань	139
11.2 LC - генератори	140
11.3 RC - генератори	141
<i>Приклади до розділу</i>	144
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	145
<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	146
12. ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ	147
12.1 Види і параметри імпульсних сигналів	147
12.2 Ключовий режим роботи біполярних транзисторів	148
12.3 Формування імпульсів RC - колами	150
12.3.1 Диференціюючі RC - кола	151
12.3.2 Інтегруючі RC - кола	151
12.4 Логічні елементи	152
12.4.1 Основні логічні перетворення імпульсних сигналів	152
12.4.2 Логічні елементи	153
12.4.3 Логічні елементи в інтегральному виконанні	156
12.4.4 Основні параметри логічних елементів	156
12.5 Тригери	157
12.5.1 Класифікація тригерів	157
12.5.2 Асинхронні RS - тригери	158
12.5.3 D - тригери	159
12.5.4 T - тригери	160
12.5.5 Універсальні JK - тригери	161

12.6	Компаратори	162
12.6.1	Компаратор на операційному підсилювачі	162
12.6.2	Компаратор з додатним зворотним зв'язком (тригер Шмітта)	162
12.7	Автоколивальні мультивібратори	164
12.8	Одновібратори	168
	<i>Приклади до розділу</i>	169
	<i>Контрольні запитання до розділу</i>	172
	<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	173
13.	ПРИСТРОЇ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	176
13.1	Однофазні випрямлячі змінного струму	176
13.1.1	Однофазний однонапівперіодний випрямляч	177
13.1.2	Однофазний двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом	178
13.1.3	Однофазний мостовий випрямляч	180
13.2	Згладжувальні фільтри	181
13.2.1	Класифікація згладжувальних фільтрів	181
13.2.2	Ємнісний фільтр	181
13.2.3	Індуктивний фільтр	182
13.2.4	G - подібні фільтри	183
13.2.5	L - подібні фільтри	184
13.2.6	Електронні згладжувальні фільтри на транзисторах	184
13.3	Випрямлячі з множенням напруги	185
13.4	Стабілізатори напруги	186
13.4.1	Класифікація стабілізаторів напруги	186
13.4.2	Параметричні стабілізатори напруги	187
13.4.3	Компенсаційні стабілізатори напруги (КСН)	188
13.4.4	Інтегральні стабілізатори напруги (ІСН)	191
13.4.5	Основні параметри стабілізаторів напруги	193
13.5	Трифазні випрямлячі	193
13.5.1	Трифазний однонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом	193
13.5.2	Трифазний двонапівперіодний мостовий випрямляч	196
13.6	Керовані випрямлячі	198
13.6.1	Методи регулювання величини напруги постійного струму	198
13.6.2	Однофазний двонапівперіодний керований випрямляч з нульовим виводом трансформатора	201
13.7	Системи імпульсно-фазового керування (СІФК)	203
13.7.1	Загальні положення	203
13.7.2	СІФК з горизонтальним керуванням	204
13.7.3	СІФК з вертикальним керуванням	206
13.8	Побудова типових вузлів СІФК з вертикальним	

керуванням	208
13.8.1 Генератор лінійно змінюваної напруги (ГЛН)	208
13.8.2 Вузол порівняння	211
13.8.3 Імпульсний підсилювач потужності	211
13.8.4 Приклади реалізації СІФК	212
13.9 СІФК з цифровим керуванням	215
<i>Приклади до розділу</i>	217
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	220
<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	221
14. ІНВЕРТОРИ ТА КОНВЕРТОРИ	224
14.1 Автономні інвертори	224
14.1.1 Призначення та класифікація	224
14.2 Інвертори, ведені мережею	225
14.3 Конвертори	227
<i>Приклади до розділу</i>	229
<i>Контрольні запитання до розділу</i>	230
<i>Задачі на самостійне опрацювання</i>	230
15. ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ	231
15.1 Розрахунок підсилювального каскаду на біполярному транзисторі	231
15.2 Розрахунок підсилювального каскаду на польовому транзисторі	239
15.3 Розрахунок балансного каскаду підсилювача постійного струму (ППС)	247
15.4 Розрахунок однофазного мостового випрямляча, що працює на ємнісне навантаження	261
15.5 Розрахунок згладжувальних фільтрів	266
15.6 Розрахунок компенсаційного стабілізатора напруги на транзисторах	270
Додатки	276
Список літератури	284

ПЕРЕДМОВА

Електроніка – це галузь науки і техніки, що вивчає фізичні явища в напівпровідникових елементах, електричні характеристики та параметри напівпровідникових приладів, властивості пристроїв і систем, які побудовані на їх базі.

Електроніка має важливе значення у вирішенні сучасних завдань енергетики в сільськогосподарському виробництві. Вона посідає одне з перших місць при контролі технологічних параметрів, управлінні різноманітними технологічними процесами, управлінні технічними системами з електроприводами, прийнятті і передачі інформації.

Розвиток сучасної електроніки нерозривно пов'язаний з досягненнями мікроелектроніки, яка, в свою чергу, базується на інтегральній технології. Остання дозволила отримувати вузли електронних пристроїв, перш за все електронно-обчислювальної та інформаційно-вимірювальної техніки, а також пристроїв автоматики, в мікрвиконанні – у вигляді інтегральних мікросхем.

Питаннями побудови електронних пристроїв на інтегральних мікросхемах займається мікросхемотехніка.

Електронні елементи сучасних електронних пристроїв виготовляються промисловістю двох видів: 1) у вигляді окремих дискретних компонентів (діодів, транзисторів, тиристорів та ін.); 2) у вигляді мікросхем (інтегральних схем), в яких з одному корпусі в один функціональний вузол об'єднано ряд окремих елементів, виконаних, як правило, на одному кристалі напівпровідника.

Елементи першого виду використовуються переважно в силових ланках автоматики, які менш складні за схемотехнікою, а також у малострумівих ланках для узгодження окремих мікросхем, коректування характеристик деяких пристроїв та ін.

Сфера використання елементів другого виду – складні функції логічного, арифметичного та аналітичного типу. До елементів цього виду належать прості логічні мікросхеми, тригери, регістри, шифратори і дешифратори, лічильники, цифроаналогові та аналоговоцифрові перетворювачі, мікропроцесори, мікроконтролери однокристалного типу та ін.

У даному підручнику розглянуто: фізичні основи, будова, принцип дії, характеристики, параметри та область застосування напівпровідникових приладів; побудова, принцип дії, параметри, характеристики та область застосування електронних пристроїв на базі напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем: підсилювачів електричних сигналів, підсилювачів постійного струму, генераторів гармонійних коливань, імпульсних пристроїв, перетворювальних пристроїв. Крім того, викладено матеріал з можливістю безпосереднього практичного використання основних теоретичних положень при розрахунку вузлів електронних пристроїв.

З метою кращого засвоєння навчального матеріалу посібник містить приклади задач практичного скерування. Кожний його розділ доповнено задачами для самостійного опрацювання, що важливо для самостійної роботи студента.

Автори сподіваються, що наведений матеріал допоможе студентам краще засвоїти курс дисципліни «Електроніка та мікросхемотехніка», набуті практичних навичок з розрахунку основних вузлів електронних пристроїв, зрозуміти особливості застосування основних теоретичних положень та успішно їх використовувати.

1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

1.1 Напівпровідникові матеріали

Всі тверді речовини за своїми електричними властивостями розділяють на провідники, напівпровідники та діелектрики.

Напівпровідники займають за електропровідністю проміжне положення між металами (провідниками електричного струму) і діелектриками. Питомий електричний опір провідників складає $\rho = 10^{-4}$ Ом · см, напівпровідників – $\rho = 10^{-4} \dots 10^{10}$ Ом · см, діелектриків – $\rho = 10^{10}$ Ом · см і вище.

Для виготовлення напівпровідникових приладів в даний час використовують крім германію і кремнію деякі хімічні сполуки, наприклад арсенід галію, окисел титану, антимонід індію, фосфід індію та ін. Найчастіше застосовують кремній і германій.

Германій і кремній – елементи четвертої групи періодичної системи Д.І. Менделєєва, тобто є чотиривалентними елементами. У валентній зоні кожного атома германію і кремнію є по чотири валентні електрони. Германій і кремній мають атомні кристалічні решітки. Зв'язок між атомами в таких решітках парноелектронний або ковалентний. Кожен атом в них пов'язаний з сусіднім двома електронами – по одному від кожного атома.

Схематичне зображення кристала германію на площині показано на рисунку 1.1.

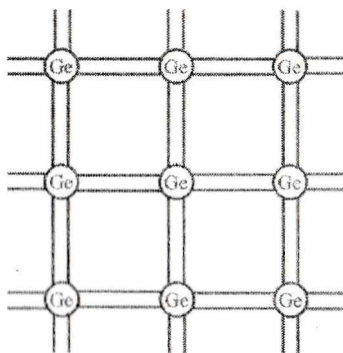


Рисунок 1.1 – Кристалічна решітка кристала германію

Кожен атом в монокристалі германію оточений чотирма сусідніми атомами, з якими він зв'язаний парноелектронними зв'язками. В результаті валентна оболонка кожного атома має вісім електронів, тобто виявляється повністю заповненою. У такому кристалі всі валентні електрони зв'язані між собою міцними парноелектронними зв'язками. Вільних електронів, які могли б брати участь в перенесенні зарядів, немає.

Чисті напівпровідники при нулі абсолютної температури ($T = 0$ К) є ідеальними діелектриками. Проте в нормальних умовах, при кімнатній температурі, деякі валентні електрони кристалічної решітки отримують енергію, достатню

для розриву ковалентного зв'язку, тобто для переходу електрона з валентної зони в зону провідності. Внаслідок розриву одного парноелектронного зв'язку утворюються два носії заряду: електрон і дірка. Незаповнений електронний зв'язок в кристалічній решітці напівпровідника називається діркою. Дірка має позитивний заряд, по абсолютній величині рівний заряду електрона, і, отже, є носієм позитивного заряду.

Дірка може бути заповнена електроном, що відірвався від сусіднього атома. Процес заповнення електронем дірки називається рекомбінацією. При цьому в сусідньому атомі на місці електрона, що відірвався, утворюється нова дірка.

В звичайних умовах, тобто при кімнатній температурі, процес виникнення пари електрон-дірка і рекомбінація відбуваються безперервно. В результаті встановлюється динамічна рівновага, при якій в чистому напівпровіднику концентрація електронів рівна концентрації дірок.

Наявність носіїв зарядів в напівпровіднику пояснює його провідність. Провідність чистого напівпровідника, яка обумовлена електронами і дірками, що виникають тільки в результаті розриву парноелектронних зв'язків, називається власною провідністю.

За відсутності зовнішнього електричного поля електрони і дірки переміщуються в об'ємі напівпровідника безладно. Якщо ж до напівпровідника прикласти напругу, то в ньому виникає впорядкований рух електронів в одному напрямку і дірок в іншому – протилежному напрямку. Через напівпровідник протікає струм, який рівний сумі струмів електронного I_n і дірчастого I_p , тобто

$$I = I_n + I_p. \quad (1.1)$$

Струм, що протікає в напівпровіднику при рівноважній концентрації носіїв зарядів (електронів і дірок), називається дрейфовим струмом або струмом провідності.

Щільність дрейфового струму визначає питому електропровідність напівпровідників σ . Так, для германію питома електропровідність

$$\sigma_{Ge} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1},$$

а для кремнію

$$\sigma_{Si} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1},$$

тобто $\sigma_{Ge} \gg \sigma_{Si}$.

З підвищенням температури питома електропровідність збільшується по експоненціальному закону.

Напівпровідник без домішок називають власним напівпровідником або напівпровідником *i*-типу. Він характеризується власною електропровідністю, яка, як було показано, складається з електронної і дірчастої електропровідності.

Якщо в напівпровіднику є домішки інших речовин, то додатково до власної електропровідності з'являється ще домішкова електропровідність, яка залежно від роду домішки може бути електронною або дірчастою.

Для отримання напівпровідника з електронною електропровідністю в чистий напівпровідник – германій або кремній – вводять невелику кількість елементу п'ятої групи періодичної системи елементів: сурми (Sb), миш'яку (As), фосфору (P). Їх атоми взаємодіють з атомами германію тільки чотирма своїми електронами (рисунок 1.2) утворюючи міцні парноелектронні зв'язки з чотирма сусідніми атомами германію. П'ятий валентний електрон, наприклад атома миш'яку, в утворенні парноелектронного зв'язку не бере участь. Тому він виявляється слабо зв'язаним зі своїм атомом і може бути легко відірваний від нього. В результаті він перетворюється на вільний електрон, який може вільно переміщатися в об'ємі напівпровідника, створюючи електронну провідність.

Атом миш'яку, що втратив один електрон, перетворюється на позитивний іон, який виявляється нерухомим, оскільки він міцно утримується у вузлі кристалічної решітки парноелектронними зв'язками.

Рухомі носії зарядів, концентрація яких в даному напівпровіднику переважає, називаються основними носіями зарядів.

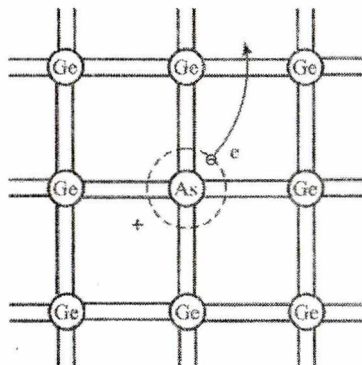


Рисунок 1.2 – Виникнення вільного електрона в кристалі напівпровідника *n*-типу

Хімічні елементи, атоми яких віддають свої електрони, створюючи в напівпровіднику надлишок вільних електронів, називають донорами.

Зазвичай донорами для германію є миш'як і сурма, а для кремнію – фосфор і сурма.

У напівпровіднику з донорними домішками електрони є основними носіями зарядів, а дірки – не основними.

Провідність, яка обумовлена наявністю в напівпровіднику надмірних вільних електронів, називається електронною провідністю.

Напівпровідник, в якому основними носіями зарядів є електрони, називається електронним напівпровідником або напівпровідником *n*-типу.

Для отримання напівпровідника з дірчастою електропровідністю в кристал чистого германію вводять домішки тривалентних елементів: індій (In) і галій (Ga) для германію; бір (B) і алюміній (Al) для кремнію. При цьому три ва-

легтні електрони, наприклад індію, утворюють три парноелектронні зв'язки з сусідніми атомами германію. В результаті теплового руху електрон одного з сусідніх атомів германію може перейти в незаповнений зв'язок атома індію. В атомі германію з'явиться один незаповнений зв'язок – дірка (рисунок 1.3). Захоплений атомом індію, четвертий електрон утворює парноелектронний зв'язок і міцно утримується атомом індію. Атом індію стає при цьому нерухомим негативним іоном.

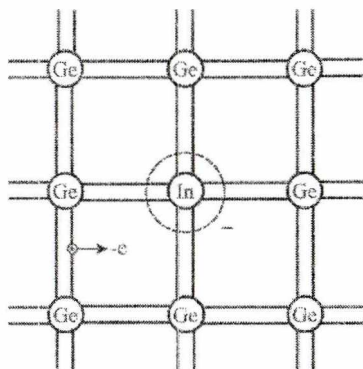


Рисунок 1.3 – Виникнення дірки в кристалі напівпровідника *p*-типу

Домішки, які створюють в напівпровіднику надлишок дірок називають акцепторними або акцепторами.

Провідність, яка обумовлена наявністю в напівпровіднику надлишку рухомих дірок, тобто перевищенням їх концентрації над концентрацією електронів, називається дірчастою провідністю або провідністю *p*-типу.

Основними носіями зарядів в напівпровіднику з акцепторною домішкою є дірки, а не основними – електрони.

Напівпровідники, в яких основними носіями зарядів є дірки, називаються дірчастими напівпровідниками або напівпровідниками *p*-типу.

Електричний струм в напівпровіднику може бути викликаний двома причинами:

- дією зовнішнього електричного поля;
- нерівномірним розподілом концентрації носіїв зарядів за об'ємом напівпровідника.

Направлений рух рухомих носіїв зарядів під впливом електричного поля називають дрейфом (дрейфовий рух), а під впливом різниці концентрацій носіїв зарядів – дифузією (дифузійний рух). Нерівномірність концентрації зарядів в якійсь-небудь частині напівпровідника може виникнути під дією світла, тепла електричного поля і ін.

Залежно від характеру руху носіїв зарядів розрізняють відповідно дрейфовий і дифузійний струми в напівпровідниках.

1.2 Електронно - дірковий перехід (*p-n*-перехід)

Область на межі розділу двох напівпровідників з різними типами електропровідності називається електронно - дірковим переходом або *p-n*-переходом.

Розглянемо випадок, якщо зовнішня напруга на переході відсутня. Оскільки носії зарядів в кожному напівпровіднику здійснюють безладний тепловий рух, то відбувається їх дифузія з одного напівпровідника в інший. З напівпровідника *n*-типу в напівпровідник *p*-типу дифундують електрони, а у зворотному напрямку з напівпровідника *p*-типу в напівпровідник *n*-типу дифундують дірки (рисунок 1.4, б). В результаті дифузії носіїв зарядів по обидві сторони межі розділу двох напівпровідників з різним типом електропровідності створюються об'ємні заряди різних знаків. В області *n* виникає позитивний об'ємний заряд, який утворений позитивно зарядженими атомами донорної домішки. Подібно до цього в області *p* виникає негативний об'ємний заряд, який утворений негативно зарядженими атомами акцепторної домішки.

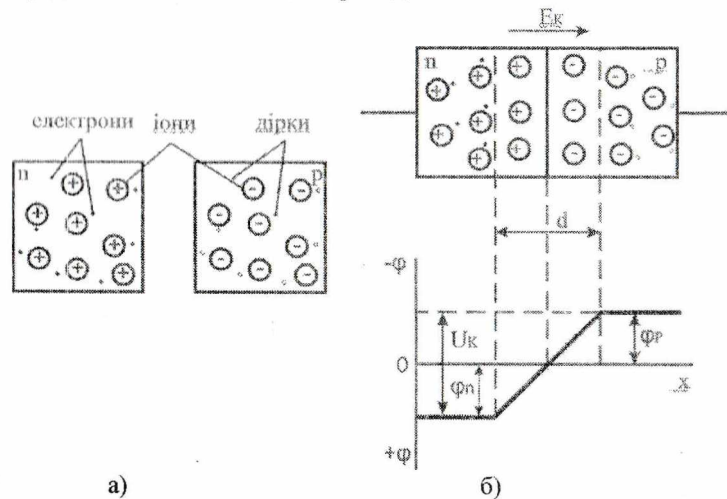


Рисунок 1.4 – Електронно-дірковий перехід при відсутності зовнішньої напруги

Між об'ємними зарядами, що утворилися, виникають контактна різниця потенціалів: $u_k = \phi_n - \phi_p$ і електричне поле, яке направлене від *n*-області до *p*-області.

Як видно, в *p-n*-переході виникає потенційний бар'єр, який перешкоджає дифузії основних носіїв зарядів.

Висота потенційного бар'єру рівна контактній різниці потенціалів і зазвичай складає десяті долі вольта. Висота потенційного бар'єру зростає при збільшенні концентрації домішок у відповідних областях, при цьому товщина *p-n*-переходу *d* зменшується. Для германію, наприклад, при середній концентрації домішок – $u_k = 0,3...0,4$ В і $d = 10^{-4}...10^{-5}$ см, а при великих концентраціях –

$u_k \approx 0,7$ В і $d = 10^{-6}$ см. Із збільшенням температури висота потенційного бар'єру зменшується.

Одночасно з дифузійним переміщенням основних носіїв через межу розділу відбувається і зворотне переміщення носіїв під дією електричного поля контактної різниці потенціалів. Таке переміщення неосновних носіїв зарядів називається дрейфовим.

За відсутності зовнішнього електричного поля через *p-n*-перехід протікають два струми: струм дифузії і струм дрейфу.

Струм дифузії і струм дрейфу через *p-n*-перехід протікають назустріч один одному і взаємно компенсуються. Сумарний струм через *p-n*-перехід рівний нулю.

При утворенні контактної різниці потенціалів по обидві сторони межі розділу напівпровідників утворюється шар із зниженою концентрацією основних носіїв зарядів. Він має підвищений опір і називається запираючим шаром. Товщина його декілька мікрон.

Зовнішня напруга *U*, яка прикладена плюсом до *p*-області *p-n*-переходу, а мінусом до *n*-області, називається прямою напругою $U_{пр}$.

Якщо до *p-n*-переходу прикладена зовнішня пряма напруга $U_{пр}$ (зовнішня напруга, яка прикладена "плюсом" джерела живлення до *p*-області *p-n*-переходу, а "мінусом" до *n*-області), то утворюване їм зовнішнє електричне поле $E_{пр}$ виявляється направленим назустріч електричному полю *p-n*-переходу – E_k (рисунок 1.5). В результаті цього висота потенційного бар'єру знижується на величину зовнішньої напруги. Одночасно зменшується товщина запираючого шару ($d_{пр} < d$) і його опір в прямому напрямку стає малим. Оскільки висота потенційного бар'єру знижується, зростає дифузійний струм (оскільки більша кількість носіїв зарядів може подолати знижений бар'єр). Струм дрейфу при цьому майже не змінюється, оскільки він залежить головним чином від кількості неосновних носіїв, що потрапляють за рахунок своїх теплових швидкостей на *p-n*-перехід з *p*- і *n*-областей.

При прямій напрузі $I_{диф} > I_{др}$ і тому повний струм через перехід тобто прямий струм, вже не рівний нулю:

$$I_{пр} = I_{диф} - I_{др} > 0. \quad (1.2)$$

Струм, що протікає через *p-n*-перехід під дією прикладеної до нього прямої зовнішньої напруги, називається прямим струмом (направлений з *p*-області в *n*-область).

Введення носіїв зарядів через *p-n*-перехід при дії прямої зовнішньої напруги в область напівпровідника, де ці носії є неосновними, називається інжекцією.

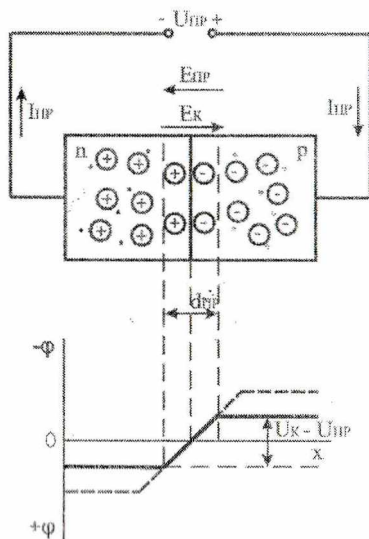


Рисунок 1.5 – Електронно-дірковий перехід при наявності зовнішньої прямої напруги

Під дією зворотної напруги $U_{зв}$ (зовнішня напруга, яка прикладена “плюсом” джерела живлення до n -області p - n -переходу, а “мінусом” до p -області) через p - n -перехід протікає дуже невеликий зворотний струм $I_{зв}$ (рисунок 1.6). Це пояснюється наступним: поле, що створюється зворотною напругою $E_{зв}$, складається з полем контактної різниці потенціалів E_k . В результаті цього потенційний бар'єр підвищується, а товщина самого запираючого шару збільшується ($d_{зв} > d$). Цей шар ще сильніше обідняється носіями, і його опір значно зростає, тобто $R_{зв} \gg R_{пр}$.

Зовнішнє поле відтягує основні носії зарядів від p - n -переходу. Переміщення вільних носіїв зарядів через p - n -перехід зменшується, і при зворотній напрузі, рівній $U_{зв} = 0,2$ В, струм дифузії через перехід припиняється, тобто $I_{диф} = 0$, оскільки власні швидкості носіїв недостатні для подолання потенційного бар'єру. Проте неосновні носії переміщатимуться через p - n -перехід, створюючи струм, що протікає з n -області в p -область (зворотний струм $I_{зв}$). Він є дрейфовим струмом (струмом провідності) неосновних носіїв зарядів через p - n -перехід. Значне електричне поле, що створюється зворотною напругою, перекидає через p - n -перехід будь-який неосновний носій заряду, що з'явився в цьому полі.

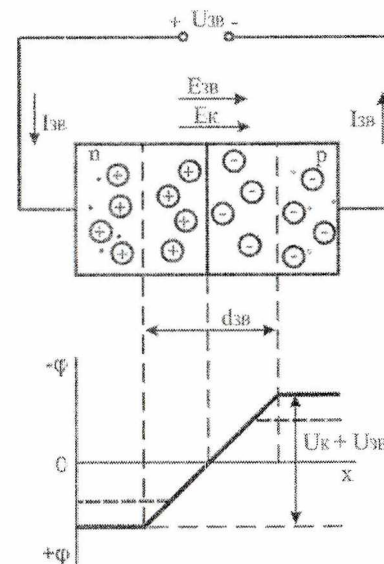


Рисунок 1.6 – Електронно-дірковий перехід при наявності зовнішньої зворотної напруги

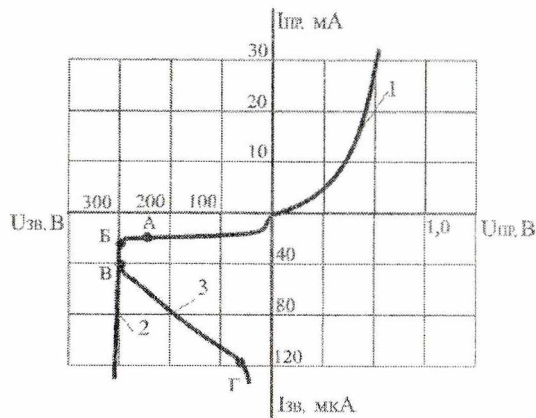
Виведення неосновних носіїв через p - n -перехід електричним полем, яке створене зворотною напругою, називають екстракцією носіїв зарядів.

Таким чином, p - n -перехід пропускає струм в одному напрямку – прямому, і не пропускає струм в іншому напрямку – зворотному, що визначає вентильні властивості p - n -переходу.

Вольт-амперною характеристикою (ВАХ) p - n -переходу називається залежність струму, що протікає через p - n -перехід від прикладеної зовнішньої напруги $I = f(U)$ (рисунок 1.7).

Прямую 1 і зворотню 2 гілку ВАХ зображають в різному масштабі, оскільки в нормальному режимі роботи p - n -переходу зворотний струм на декілька порядків менше прямого.

При досягненні зворотною напругою деякої критичної величини $U_{проб}$ відбувається різке зменшення опору p - n -переходу. Це явище називається пробоем p - n -переходу, а відповідна йому напруга – напругою пробоя. Розрізняють електричний і тепловий пробій. Електричний пробій (ділянка АБВ характеристики) є оборотним, тобто при цьому пробі в переході не відбувається необоротних змін (руйнування структури речовини). Можуть існувати два види електричного пробоя: лавинний і тунельний.



1 – пряма гілка; 2 – зворотна гілка при лавинному пробію;
3 – зворотна гілка при тепловому пробію

Рисунок 1.7 – Вольт-амперна характеристика *p-n*-переходу

Лавинний пробій пояснюється лавинним розмноженням носіїв за рахунок ударної іонізації і за рахунок виривання електронів з атомів сильним електричним полем. Цей пробій характерний для *p-n*-переходів великої товщини, які отримують при порівняно малій концентрації домішок в напівпровідниках. Пробивна напруга для лавинного пробію складає десятки або сотні вольт.

Явище ударної іонізації полягає в тому, що при більш великій зворотній напрузі електрони набувають великої швидкості і, ударяючи в атоми кристалічної решітки, вибивають з них нові електрони, які, в свою чергу, розганяються полем і також вибивають з атомів електрони. Такий процес посилюється з підвищенням напруги.

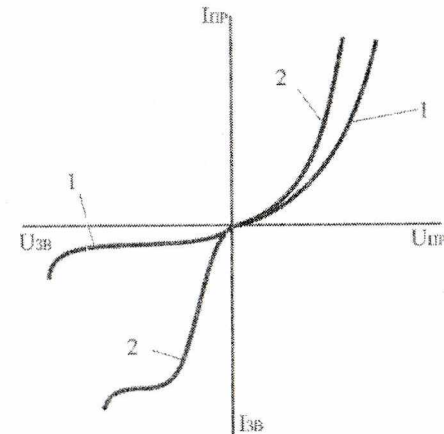
Тунельний пробій пояснюється явищем тунельного ефекту. Суть останнього полягає в тому, що при електричному полі з напруженістю більш 10^5 В/см, яке діє в *p-n*-переході малої товщини, деякі електрони проникають через перехід без зміни своєї енергії. Тонкі переходи, в яких можливий тунельний ефект, отримують при високій концентрації домішок. Напруга, що відповідає тунельному пробію, зазвичай не перевищує одиниць вольт.

Області теплового пробію відповідає на рисунку 1.7 ділянка ВГ. Тепловий пробій необоротний, оскільки він супроводжується руйнуванням структури речовини в місці *p-n*-переходу. Причиною теплового пробію є порушення стійкості теплового режиму *p-n*-переходу. Це означає, що кількість теплоти, що виділяється в переході від нагріву його зворотним струмом, перевищує кількість теплоти, що відводиться від переходу. В результаті температура переходу зростає, опір його зменшується і струм збільшується, що приводить до перегріву переходу і його теплового руйнування.

На електропровідність напівпровідників суттєво впливає температура (рисунок 1.8). При підвищенні температури посилюється генерація пар носіїв

парядів, тобто збільшується концентрація носіїв і провідність росте. При підвищенні температури прямий і зворотний струм зростають.

Для *p-n*-переходів на основі германію зворотний струм зростає приблизно в 2 рази при підвищенні температури на кожні 10°C ; на основі кремнію – при нагріві на кожні 10°C зворотний струм збільшується приблизно в 2,5 рази. Прямий струм при нагріві *p-n*-переходу зростає не так суттєво, як зворотний. Це пояснюється тим, що прямий струм виникає головним чином за рахунок домішкової провідності, а концентрація домішок не залежить від температури.



1 – при 20°C ; 2 – при 50°C

Рисунок 1.8 – Вольт-амперна характеристика *p-n*-переходу

Бар'єрна (зарядна) і дифузійна ємність *p-n*-переходу

Запираючий шар має високий опір і відіграє роль діелектрика, а по обидві його сторони розташовані два різнойменні об'ємні заряди $+Q_{зв}$ і $-Q_{зв}$, що створені іонізованими атомами донорної і акцепторної домішки. Тому *p-n*-перехід має ємність. Цю ємність називають бар'єрною.

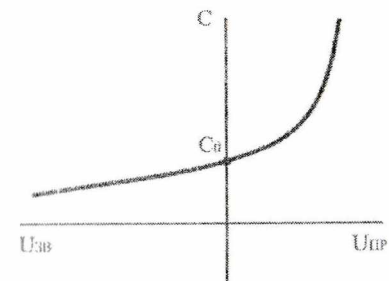
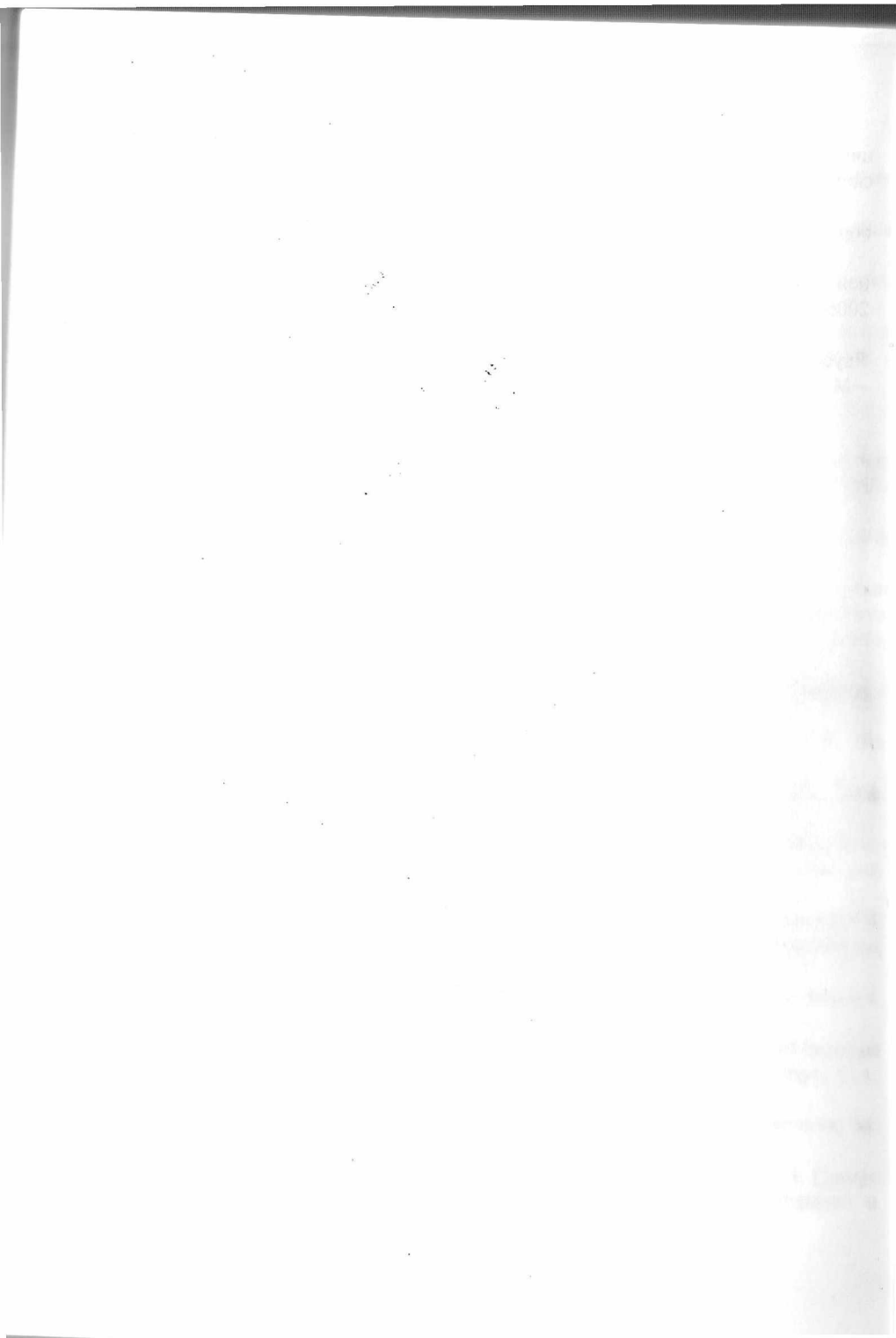


Рисунок 1.9 – Залежність ємності *p-n*-переходу від прикладеної напруги



Навчальне видання

Квітка Сергій Олексійович
Яковлев Валерій Федорович
Нікітіна Олександра Василівна

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА

Навчальний посібник

За редакцією професора Яковлева В.Ф.

Підписано до друку: 15.02.2012 р. Зам. №13.

Формат 60×90/16. Гарнітура Times.

Обл. вид. арк. 10,63. Ум. друк. арк. 10,44

Тираж: 300 пр.

Видавець і виготовлювач

Сумський національний аграрний університет

м. Суми, вул. Кірова, 160

тел. 0542 222 448, e-mail: admin@sau.sumy.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 832 від 28.02.2002р.