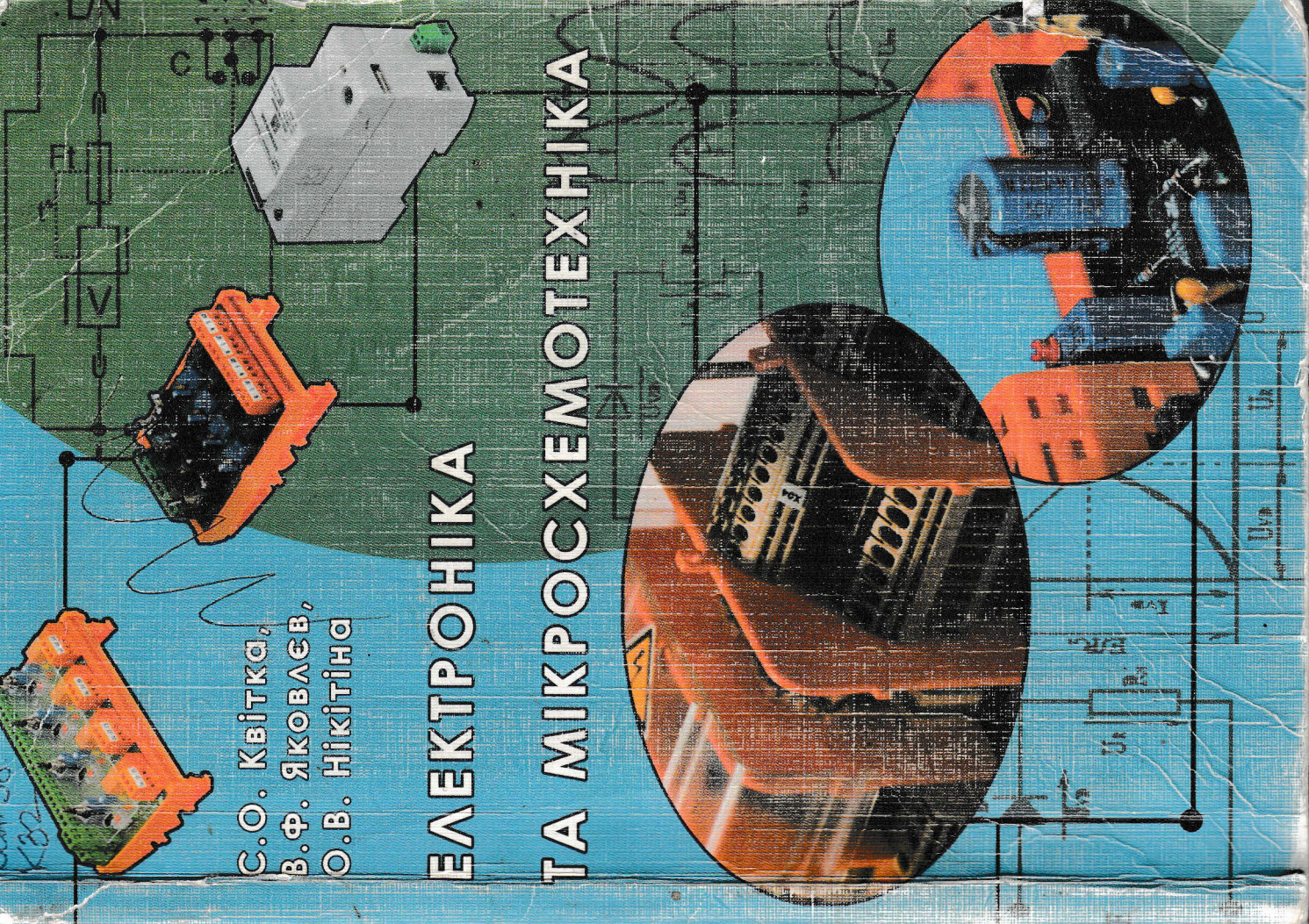
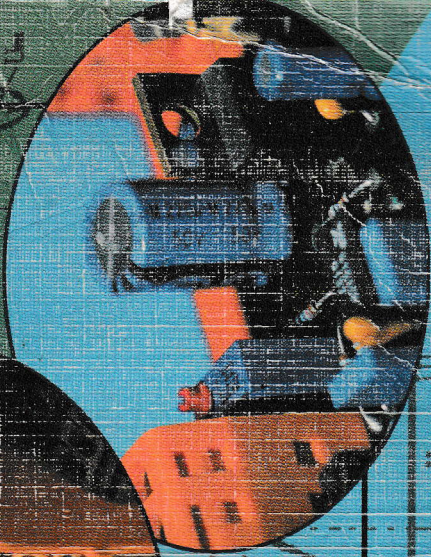
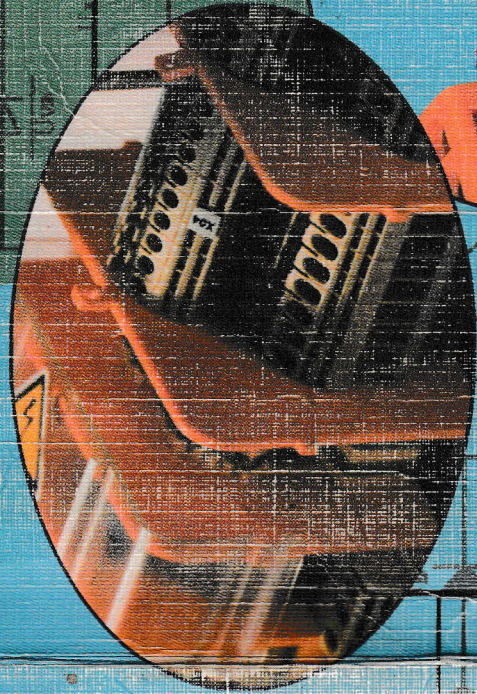




С.О. Квітка,  
В.Ф. Яковлев,  
О.В. Нікітіна

ЕЛЕКТРОНІКА

ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА





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

# **ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА**

## **НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

Рекомендовано Міністерством аграрної політики України як навчальний посібник для студентів аграрних вищих навчальних закладів I–IV рівнів акредитації зі спеціальності 5.10010102

“Монтаж, обслуговування та ремонт електротехнічного устаткування в агропромисловому комплексі” та напряму 6.100101 “Енергетика та електротехнічні системи в АПК”



Київ

“Аграрна освіта”

2010

## Укладачі:

**Квітка С.О.**, доцент, **Яковлев В.Ф.**, професор  
Таврійського ДАТУ  
**Нікітіна О.В.**, викладач ВСП «Мелітопольський  
коледж Таврійського ДАТУ»

## Рецензенти:

**Дюрлів В.Т.**, професор, завідувач кафедри  
Таврійського ДАТУ;  
**Самойленко П.Г.**, викладач ВП НУБіП України  
«Немішаєвський агротехнічний коледж»;  
**Захарчук О.С.**, викладач Східноукраїнського  
національного університету ім. В.Даля;  
**Черенков О.Д.**, професор, доктор технічних наук  
Харківського НТУСГ ім. П. Василенка;  
**Труфанов І.Д.**, професор, доктор технічних наук  
Запорізького національного технічного університету

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

**Електроніка та мікросхемотехніка:** Навчальний посібник / За ред.  
проф. В.Ф. Яковлева. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 329 с.

ISBN 978-966-7906-71-9

Розглянуто будову, принцип дії, параметри, характеристики і застосування 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, згладжувальних фільтрів, стабілізаторів напруги, керованих випрямлячів, автономних і ведених мережею інверторів, конверторів.

ISBN 978-966-7906-71-9

© С.О. Квітка, В.Ф. Яковлев,  
О.В. Нікітіна, 2010

## ЗМІСТ

Передмова.....	8
<b>1. Фізичні основи напівпровідникових приладів.....</b>	<b>9</b>
1.1. Напівпровідникові матеріали.....	9
1.2. Електронно-дірковий перехід ( <i>p-n</i> -перехід).....	14
<b>2. Напівпровідникові резистори.....</b>	<b>22</b>
2.1. Варистори.....	23
2.2. Терморезистори.....	24
2.3. Тензорезистори.....	27
<b>3. Напівпровідникові діоди.....</b>	<b>29</b>
3.1. Випрямні діоди.....	31
3.2. Стабілітрони.....	35
3.3. Тунельні й обернені діоди.....	37
3.4. Варикаси.....	39
3.5. Розрахунок електричних кіл з напівпровідниковими діодами.....	40
<b>4. Перемикальні прилади.....</b>	<b>46</b>
4.1. Двоелектродні тиристори (диністори).....	46
4.2. Триелектродні тиристори (триністори).....	48
4.3. Симетричні тиристори (симістори).....	50
4.4. Одноперехідні транзистори.....	52
4.5. Застосування перемикальних приладів.....	53
<b>5. Біполярні транзистори.....</b>	<b>58</b>
5.1. Будова і принцип дії.....	58
5.2. Схеми вмикання біполярних транзисторів.....	62
5.3. Статичні характеристики біполярних транзисторів.....	63
5.4. Основні параметри біполярних транзисторів.....	65
5.5. Режим роботи біполярних транзисторів.....	67
5.6. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі.....	67
5.7. Розрахунок електричних кіл з біполярними транзисторами.....	69
<b>6. Польові транзистори.....</b>	<b>74</b>
6.1. Польові транзистори з керуючим <i>p-n</i> -переходом.....	74
6.2. Польові транзистори з ізольованим затвором.....	78
6.3. Схеми вмикання польових транзисторів.....	82
6.4. Підсилювальний каскад на польових транзисторах.....	83
6.5. Розрахунок електричних кіл з польовими транзисторами.....	85
<b>7. Силові напівпровідникові прилади.....</b>	<b>90</b>
7.1. IGBT-біполярний транзистор з ізольованим затвором.....	90
7.2. SIT-транзистор із статичною індукцією.....	95



7.3. Порівняльна характеристика силових напівпровідникових приладів .....	98
<b>8. Напівпровідникові джерела та приймачі оптичного випромінювання</b> .....	100
8.1. Світлодіоди .....	100
8.2. Фоторезистори .....	103
8.3. Фотодиоди .....	104
8.4. Фототранзистори і фототриоди .....	107
8.5. Оптонари (оптрони) .....	110
<b>9. Інтегральні мікросхеми (ІМС)</b> .....	113
9.1. Гібридні ІМС .....	114
9.2. Напівпровідникові ІМС .....	114
9.3. Цифрові та аналогові (лінійні) ІМС .....	115
<b>10. Підсилювачі електричних сигналів</b> .....	116
10.1. Загальні відомості про підсилювачі .....	116
10.2. Принципи побудови підсилювальних каскадів .....	119
10.3. Підсилювачі на біполярних транзисторах .....	121
10.3.1. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі за схемою зі спільним емітером (СЕ) .....	122
10.3.2. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі за схемою зі спільним колектором (СК) (емітерний повторювач) .....	125
10.3.3. Режими роботи підсилювачів на біполярних транзисторах .....	126
10.3.4. Способи забезпечення режиму спокою .....	127
10.4. Підсилювачі на польових транзисторах .....	129
10.4.1. Підсилювальний каскад на польовому транзисторі з керуванням $p-n$ -переходом .....	129
10.4.2. Підсилювальний каскад на польовому МДН-транзисторі з індуктивним каналом .....	132
10.4.3. Підсилювальний каскад на польовому МДН-транзисторі з вбудованим каналом .....	134
10.5. Багатокаскадні підсилювачі .....	134
10.6. Зворотні зв'язки (ЗЗ) у підсилювачах .....	135
10.6.1. Види зворотних зв'язків у підсилювачах .....	135
10.6.2. Вплив зворотного зв'язку на коефіцієнт підсилення і вхідний опір підсилювального каскаду .....	136
10.7. Підсилювачі потужності .....	138
10.7.1. Підсилювальний каскад з трансформаторним увімкненням навантаження .....	139
10.7.2. Основні параметри підсилювачів потужності .....	141

10.8. Підсилювачі постійного струму (ППС) .....	142
10.8.1. Підсилювачі постійного струму на транзисторах .....	144
10.8.2. Операційні підсилювачі (ОП) .....	146
<b>11. Генератори синусоїдальних коливань</b> .....	160
11.1. Структурна схема генератора синусоїдальних коливань .....	161
11.2. LC-генератори .....	161
11.3. RC-генератори .....	163
<b>12. Імпульсні пристрої</b> .....	170
12.1. Види та параметри імпульсних сигналів .....	170
12.2. Ключовий режим роботи біполярних транзисторів .....	172
12.3. Формування імпульсів RC-колами .....	174
12.3.1. Диференційовальні RC-кола .....	174
12.3.2. Інтегрувальні кола .....	175
12.4. Логічні елементи .....	176
12.4.1. Основні логічні перетворення імпульсних сигналів .....	177
12.4.2. Логічні елементи .....	177
12.4.3. Логічні елементи в інтегральному виконанні .....	181
12.4.4. Основні параметри логічних елементів .....	181
12.5. Тригери .....	181
12.5.1. Класифікація тригерів .....	181
12.5.2. Асинхронні R-S-тригери .....	182
12.5.3. D-тригери .....	184
12.5.4. T-тригери .....	186
12.5.5. Універсальні JK-тригери .....	187
12.6. Компаратори .....	188
12.6.1. Компаратор на операційному підсилювачі .....	188
12.6.2. Компаратор з додатним зворотним зв'язком (тригер Шмітта) .....	189
12.7. Автоколебальні мультивібратори .....	191
12.8. Оновібратори .....	195
<b>13. Пристрої для регулювання та перетворення електричної енергії</b> .....	204
13.1. Однофазні випрямлячі змінного струму .....	204
13.1.1. Однофазний однонапівперіодний випрямляч .....	205
13.1.2. Однофазний двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом .....	207
13.1.3. Однофазний мостовий випрямляч .....	208
13.2. Згладжувальні фільтри .....	209
13.2.1. Класифікація згладжувальних фільтрів .....	209
13.2.2. Ємнісний фільтр .....	210



13.2.3. Індуктивний фільтр .....	212
13.2.4. Г-подібні фільтри .....	212
13.2.5. Л-подібні фільтри.....	213
13.2.6. Електронні згладжувальні фільтри на транзисторах .....	213
13.3. Випрямлячі з множенням напруги .....	214
13.4. Стабілізатори напруги.....	216
13.4.1. Класифікація стабілізаторів напруги.....	216
13.4.2. Параметричні стабілізатори напруги.....	216
13.4.3. Компенсаційні стабілізатори напруги (КСН).....	218
13.4.4. Інтегральні стабілізатори напруги (ІСН).....	222
13.4.5. Основні параметри стабілізаторів напруги.....	224
13.5. Трифазні випрямлячі.....	224
13.5.1. Трифазний однонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом .....	225
13.5.2. Трифазний двонапівперіодний мостовий випрямляч .....	227
13.6. Керовані випрямлячі .....	230
13.6.1. Методи регулювання величини напруги постійного струму .....	230
13.6.2. Однофазний двонапівперіодний керований випрямляч з нульовим виводом трансформатора .....	234
13.7. Системи імпульсно-фазового керування (СІФК) .....	236
13.7.1. Загальні положення .....	236
13.7.2. СІФК з горизонтальним керуванням .....	237
13.7.3. СІФК з вертикальним керуванням.....	239
13.8. Побудова типових вузлів СІФК з вертикальним керуванням.....	242
13.8.1. Генератор лінійно змінюваної напруги (ГЛН) .....	242
13.8.2. Вузол порівняння .....	245
13.8.3. Імпульсний підсилювач потужності .....	246
13.8.4. Приклади реалізації СІФК .....	247
13.9. СІФК з цифровим керуванням .....	250
<b>14. Інвертори та конвертори .....</b>	<b>259</b>
14.1. Автономні інвертори.....	259
14.1.1. Призначення та класифікація.....	259
14.2. Інвертори, ведені мережею .....	261
14.3. Конвертори.....	263
<b>15. Приклади розрахунку електронних пристроїв.....</b>	<b>268</b>
15.1. Розрахунок підсилювального каскаду на біполярному транзисторі .....	268

15.2. Розрахунок підсилювального каскаду на польовому транзисторі .....	278
15.3. Розрахунок балансного каскаду підсилювача постійного струму (ПНС) .....	287
15.4. Розрахунок однофазного мостового випрямляча, що працює на ємнісне навантаження .....	303
15.5. Розрахунок згладжувальних фільтрів.....	309
15.6. Розрахунок компенсаційного стабілізатора напруги на транзисторах .....	314
<b>Додатки .....</b>	<b>321</b>
<b>Список використаних джерел .....</b>	<b>327</b>



## 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 основі.

Електроніка має важливе значення у вирішенні сучасних завдань енергетики в сільськогосподарському виробництві. Вона посідає одне з перших місць під час контролю технологічних параметрів, управління різноманітними технологічними процесами, технічними системами з електронприводами, прийняття 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-вимірвальної техніки, а також пристроїв автоматики, у мікровиконанні — у вигляді інтегральних мікросхем.

Питаннями побудови електронних пристроїв на інтегральних мікросхемах займається мікросхемотехніка.

Електронні елементи сучасних електронних пристроїв є двох видів: 1) у вигляді окремих дискретних компонентів (діодів, транзисторів, тиристорів та ін.); 2) у вигляді мікросхем (інтегральних схем), в яких в одному корпусі в один функціональний вузол об'єднано низку 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 малострумкових ланках для узгодження окремих мікросхем, корегування характеристик деяких пристроїв та ін.

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

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

## 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 —  $\rho = 10^{-4} - 10^{10}$  Ом·см, діелектриків —  $\rho = 10^{10}$  Ом·см і вище.

Для виготовлення напівпровідникових приладів нині 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. 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 у них пов'язаний з сусідніми двома електронами — по одному від кожного атома.

Схематичне зображення кристала германію на площині показано на рис. 1.1.

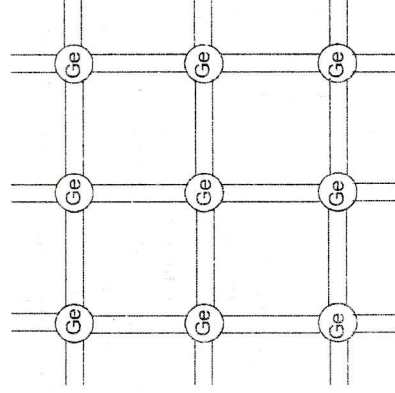


Рис. 1.1. Кристалічна решітка кристала германію



Кожен атом у монокристалі германію оточений чотирма сусідніми атомами, з якими він зв'язаний парноелектронними зв'язками. У 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 у 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 у кристалічній решітці напівпровідника називається діркою. Дірка має позитивний заряд, за абсолютною величиною рівний заряду електрона, отже, є носієм позитивного заряду.

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

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

Нааявність носіїв зарядів у 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 діркового  $I_p$ , тобто

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

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

Щільність дрейфового струму визначає питому електропровідність напівпровідників  $\sigma$ . Так, для германію питома електропровідність

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

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

а для кремнію

$$\text{тобто } \sigma_{Ge} \gg \sigma_{Si}.$$

З підвищенням температури питома електропровідність збільшується за експоненціальним законом.

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

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

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 (рис. 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 участі. Тому він виявляється слабо зв'язаним зі своїм атомом і може бути легко відірваний від нього. У результаті він перетворюється на вільний електрон, який може вільно переміщатися в об'ємі напівпровідника, створюючи електронну провідність.



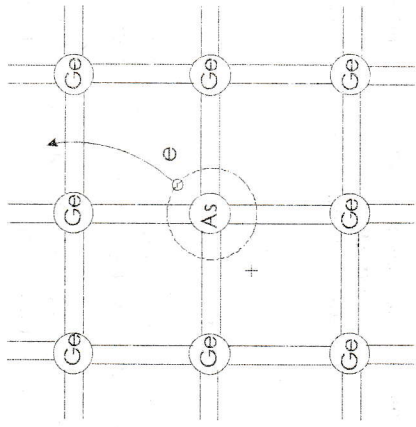


Рис. 1.2. Виникнення вільного електрона в кристалі напівпровідника *n*-типу

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 у цьому напівпровіднику переважає, називаються *основними носіями зарядів*.

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 тривалентні електрони, наприклад індій, утворюють три парноелектронні зв'язки з сусідніми атомами германію. У 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 (рис. 1.3). Захоплений атомом індію, четвертий електрон утворює парноелектронний зв'язок і міцно утримується атомом індію. Атом індію стає при цьому нерухомим негативним іоном.

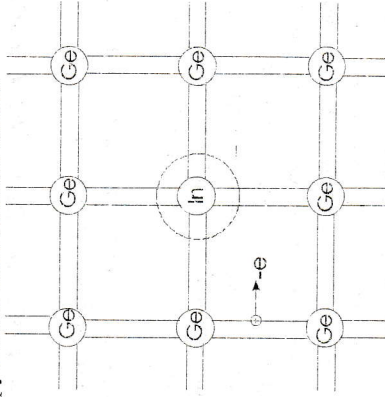


Рис. 1.3. Виникнення дірки в кристалі напівпровідника *p*-типу

Домішки, які створюють у 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 у 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 у 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 — *дифузцією (дифузійний рух)*. Нерівномірність концентрації зарядів у якій-небудь частині напівпро-



відника може виникнути під дією світла, тепла, електричного поля та 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 у кожному напівпровіднику здійснюють хаотичний 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 (рис. 1.4, а). У результаті дифузії носіїв зарядів по обидва боки 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.

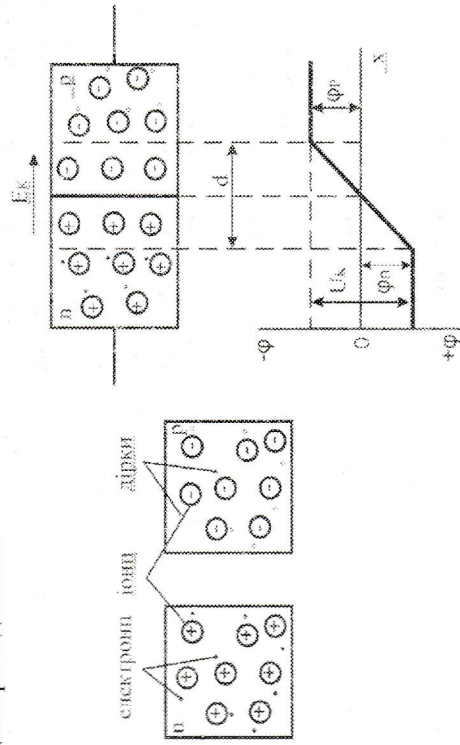


Рис. 1.4. Електронно-дірковий перехід за відсутності зовнішньої напруги

Між об'ємними зарядами, що утворилися, виникають потенціальні різниці 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'єра рівна контактній різниці потенціалів і складає десять частки вольта. Висота потенційного бар'єра зростає при збільшенні концентрації домішок у відповідних областях, при цьому товщина p-n-переходу  $d$  зменшується. Для германію, наприклад, за середньої 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'єра зменшується.

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

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

Під час утворення контактної різниці потенціалів по обидва боки межі розділу напівпровідників утворюється шар із зниженою концентрацією основних носіїв зарядів. Він має підвищений опір і називається запірним 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" до n-області), то утворене зовнішнє електричне поле  $E_{пр}$  виявляється направленим назустріч електричному полю p-n-переходу  $-E_k$  (рис. 1.5). У результаті цього висота потенційного бар'єра знижується на величину зовнішньої напруги. Одночасно зменшується товщина запірного шару ( $d_{пр} < d$ ) і його опір у напрямку напруги стає малим. Оскільки висота потенційного бар'єра 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 теплових швидкостей на p-n-перехід з p- і n-областей.



За прямої напруги  $I_{др\phi} > I_{др}$  і тому повний струм через перехід, тобто прямий струм, вже не рівний нулю:

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

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*.

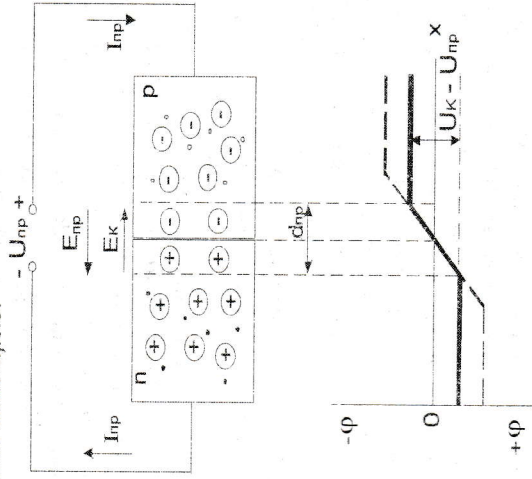


Рис. 1.5. Електронно-дірковий перехід за наявності зовнішньої прямої напруги

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  $I_{зв}$  (рис. 1.6). Це пояснюється наступним: поле, що створюється зворотною напругою  $E_{зв}$ , складається з полем контактної різниці потенціалів  $E_k$ . У результаті цього потенціальний бар'єр підвищується, а товщина запертого шару збільшується ( $d_{зв} > d$ ). Цей шар ще сильніше збільшується 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 в зворотної напруги, рівній  $U_{зв} = 0,2$  В, струм дифузії через перехід припиняється, тобто  $I_{др\phi} = 0$ , оскільки власні швидкості носіїв недостатні для подолання потенційного бар'єра. 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. Вичислене електричне поле, що створюється зворотною напругою, перекидає через  $p$ - $n$ -перехід будь-який неосновний носій заряду, що знається в цьому полі.

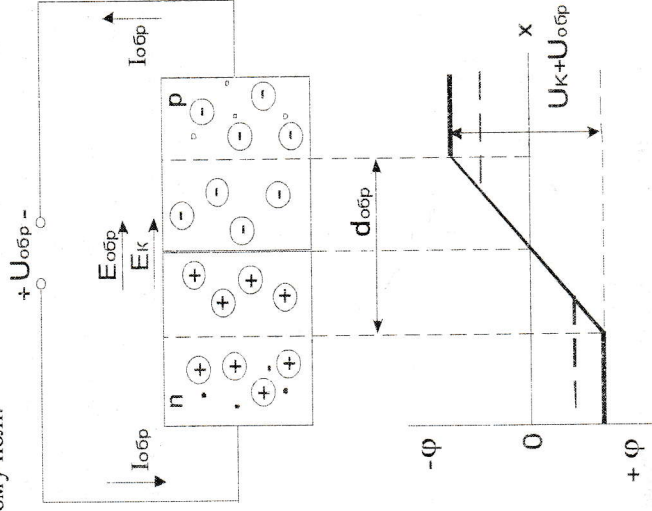


Рис. 1.6. Електронно-дірковий перехід за наявності зовнішньої зворотної напруги

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



- 16 Усатенко С.Г. и др. Выполнение эл. схем по ЕСКД. Справочник. – М.: Из-во стандартов, 1989. – 325 с.
- 17 Резисторы: Справочник / В.В. Дубровский, Д.М. Иванов, Н.Я. Прагусевич и др.; Под ред. И.И. Четверикова и В.М. Терехова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
- 18 Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Граевский М.Н. и др. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник / Под ред. Г.С. Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с.
- 19 Аксенов А.И., Нефедов А.В. Отечественные полупроводниковые приборы / 5-е изд., доп. и испр. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 584 с.
- 20 Нефедов А.В., Аксенов А.И. Транзисторы для бытовой, промышленной и специальной аппаратуры. Справочное пособие. – М.: СОЛОН-Пресс, 2006. – 600 с.
- 21 Якубовский С.В., Ниссельсон Л.И., Кулешова В.И. и др. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / Под ред. С.В. Якубовского. – М.: Радио и связь, 1989. – 496 с.

Навчальне видання

Сергій Олексійович Квітка  
Валерій Федорович Яковлев  
Олександр Василівна Нікітіна

## ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА

Навчальний посібник

Українською мовою

Відповідальний за випуск М. Гач  
Редактор С. Світельська  
Комп'ютерна верстка Ю. Величко, Т. Кудін

Підписано до друку 28.09.2010 р.  
Умов. друк арк. 13,7  
Наклад 1500 прим. Зам. № 436

Редакційно-видавничий відділ  
Наукометодцентру  
Міністерства аграрної політики України  
Технікуміська, 1, смт Немішасве  
Борodianського Київської  
тел. 04577-41-2-69

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру  
суб'єкта видавничої справи ДК № 2435