

Б. М. Гончаренко  
К. В. Коновалов

# Електроніка та мікросхемо- техніка



УДК 21.382:004.31

*Гриф надано Міністерством  
освіти і науки України  
(лист від 18.06.2003 р.  
№ 14/18.2-1050)*

**Р е ц е н з е н т и:**

професор кафедри автоматизації і комп'ютерних систем Національного університету технології та дизайну, д-р техн. наук *Ю.О. Скрипник*

заступник генерального директора з наукової роботи НВК "КІА", д-р техн. наук, проф. *І.М. Богаєнко*

**Гончаренко Б.М., Коновалов К.В.** Електроніка і мікросхемотехніка: Навч. посіб. — К.: НУХТ, 2006. — 565 с.  
ISBN 966-612-058-5

Викладено фізичні та схемотехнічні основи побудови сучасних мікроелектронних функціональних вузлів, фізичні основи, принцип дії і характеристики напівпровідникових дискретних приладів та інтегральних мікросхем.

У першій частині розглянуто основи схемотехніки аналогових блоків і джерел їх живлення, види міжкаскадних і зворотних зв'язків.

У другій частині наведено аналіз схем логічних елементів в інтегральному виконанні, методи побудови цифрових функціональних вузлів на їхній основі та особливості схемотехніки цифрових запам'ятовувальних і функціональних модулів. Викладено перспективи розвитку електроніки.

Для студентів вищих навчальних закладів, може бути корисним і для аспірантів та інженерно-технічних працівників.

УДК 21.382:004.31

ISBN 966-612-058-5

© Б.М. Гончаренко,  
К.В. Коновалов, 2006  
© НУХТ, 2006

“І хоча я вважаю, що твір цей недостойний з’явитися перед Вами, однак ж вірю, що від своєї поблажливості Ви удостоїте прийняти його, знаючи, що не в моїх силах є піднести Вам дарунок більший, ніж засіб в найкоротший час осягнути те, що сам я пізнавав ціною багатьох небезпек та клопотань”.

*Н. Макіавеллі  
“Володар”*

## ПЕРЕДМОВА

Підручники та інша література з електроніки орієнтовані здебільшого на певну предметну царину, написані фахівцями з освітою в галузі електроніки і стосуються проектування, виробництва та експлуатації електронних пристроїв. Вони не відображають особливостей фаху спеціалістів з автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій, яких готують у Національному університеті харчових технологій. Цей фах передбачає використання комп’ютерних і мікропроцесорних засобів автоматизації та експлуатацію їх насамперед у харчових технологіях. Тому виникла проблема через брак навчальної літератури, особливо у зв’язку з інтенсифікацією навчання студентів за новими навчальними планами, що передбачають збільшення обсягу самостійної роботи студентів.

Зміст посібника відповідає затвердженій Міністерством освіти і науки України програмі дисципліни “Електроніка та мікросхемотехніка” і відображає той матеріал, який протягом ряду років читали на кафедрі автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій НУХТ студентам, фахово орієнтованим на автоматизацію процесів і виробництв та на їх комп’ютерну інтеграцію.

Майбутні фахівці з автоматизації харчових виробництв стикнуться з проектуванням та експлуатацією обчислювальних систем різної складності на базі комп'ютерних та мікропроцесорних засобів на рівні апаратної і програмної частин, що вимагає відповідної підготовки як з аналогової, так і з цифрової електроніки. Ці вимоги має задовольнити пропонований посібник.

Посібник може стати в нагоді також студентам суміжних спеціальностей, яким читають курси дисциплін “Схемотехніка ЕОМ” або “Промислова електроніка”. Він містить дві відносно самостійні частини, що стосуються аналогової та цифрової електроніки. Аналогова частина є схемною основою реалізації цифрових елементів, які використовуються в комп'ютерній та мікропроцесорній техніці, а також слугує для поєднання та узгодження аналогових і цифрових пристроїв між собою. Цифрову частину та приклади схемного застосування основних вузлів цифрової схемотехніки поєднано так, як вони використовуються в складі комп'ютерних і мікропроцесорних засобів автоматики.

До кожного розділу наведено контрольні запитання, які будуть корисними студентам для самоконтролю засвоєння знань, а також під час перевірки цих знань викладачем.

У складі дисципліни “Електроніка та мікросхемотехніка” невід'ємною частиною є практичні (сумірні за об'ємом з лекційними) та лабораторні заняття. Лабораторний практикум реалізовано в комп'ютерному класі кафедри АКТ на основі моделювальної електронної програми Electronics Work Bench і має своє методичне забезпечення, видане окремо.

Першу частину посібника та більшість розділів другої частини написав професор Б.М. Гончаренко; розділи 26 і 28 другої частини — асистент К.В. Коновалов; розділ 27 автори написали сумісно.

## ВСТУП

Електроніка — галузь науки і техніки, що стосується фізичних явищ в електровакуумних та напівпровідникових приладах (включаючи їхні електричні характеристики і параметри) та властивостей функційних схем і пристроїв (схемотехніки), які побудовані на цих приладах (підсилювачів, генераторів, випрямлячів, логічних елементів). Ці пристрої входять частинами до складних електронних систем, наприклад електронних мікропроцесорних контролерів (регуляторів) та комп'ютерів.

Зародження електроніки готувалося всім ходом технічного розвитку в кінці XIX — на початку XX ст., коли основною енергією промисловості стала електрика. Створення електричних засобів вимірювання, контролю та керування зумовлювало подальший поступ, зростання продуктивності праці. Крім того, виникла потреба швидкої передачі на великі відстані різномірної інформації.

Витоком електроніки слід вважати винахід О.М. Лодигіна — лампочку розжарювання (1872 р.), яка створила матеріальну базу розвитку електровакуумної техніки. Відкриття Т.А. Едісоном явища термоелектронної емісії (1883 р.), О.Г. Столетовим — фотоефекту (1888 р.) стало основою використання електронних явищ у техніці.

Вирішальним у розвитку електроніки стали винайдення О.С. Поповим радіо (1895 р.), Дж. А. Флемінгом — лампового детектора-діода (1904 р.), Лі де Форестом — тріода (1907 р.) як удосконалення лампи Флемінга. Тріод здатний був генерувати й підсилювати електричні коливання. З'ясувалося, що електронним вимірюванням доступні струми порядку  $10^{-17}$  А, а напруги —  $10^{-10}$  В.

Бурхливий розвиток радіоелектроніки, зокрема електровакуумної техніки, припадає на початок ХХ ст. В 20–30-х роках розвивалися радіозв'язок, телебачення, імпульсний багатоканальний зв'язок, радіолокація і вимірювальна техніка.

Можливість генерації та підсилення електроколивань за допомогою напівпровідникових приладів показав О.В. Лосєв (1922 р.), але на той час напівпровідникові прилади через недосконалість не були конкурентоспроможними порівняно з електронними лампами.

Лише у 30-х роках минулого століття почалося систематичне дослідження напівпровідників під керівництвом академіка А.Ф. Іоффе. Було створено чітку теорію напівпровідників і з'ясовано можливості технічного застосування їх на основі діркової і електронної домішкових провідностей на  $p$ - $n$ -переході.

З 30–40-х років в електронних пристроях почали застосовувати величезну кількість ламп. Складність апаратури зростала кожні п'ять років приблизно в 10 разів. Тоді і з'ясувалося, що електронна лампа має дуже обмежений термін роботи, значні габаритні розміри і масу і споживає багато енергії. Якщо пристрій мав, наприклад, 2000 ламп, то при гарантованому терміні кожної лампи 500 год він міг працювати лише приблизно 15 хв.

У кінці 1948 р. У. Браттейн, Дж. Бардін і У. Шоклі відкрили транзисторний ефект (що відмічено Нобелівською премією). З 1949 р. розроблено вітчизняні напівпровідникові транзистори (А.В. Красиков, С.Г. Надоян), що сприяло розвитку нового напрямку в електроніці завдяки таким перевагам їх, як малі габаритні розміри, маса та енергоспоживання, а головне — висока надійність. Застосування напівпровідників допомогло здійснити мініатюризацію пристроїв на основі плівкових та напівпровідникових інтегральних схем. Вищезгадане дає змогу виділити у розвитку електроніки три основні етапи: 1) лампову електроніку; 2) напівпровідникову електроніку; 3) мікроелектроніку.

Перші інтегральні схеми створені в 1958 р. в США Д. Кілбі та Р. Ностсом і промислово випускаються з 1962 р.

Застосування мікросхем дає змогу ще підвищити надійність і швидкодію електронних пристроїв, знизити енергоспоживання. У разі розміщення в схемі 500 транзисторів можна створи-

ти наручний електронний годинник, а 2000 транзисторів — мікрокалькулятор.

Разючий прогрес в електроніці пов'язаний зі створенням великих інтегральних схем (ВІС), де кількість елементів досягає декількох сотень тисяч, а їхні мінімальні розміри — 2...3 мкм. Швидкодія сягає мільярдних часток секунди. На основі ВІС створено програмовані ВІС-мікропроцесори, які завдяки можливості програмування мають універсальний характер. Застосування мікропроцесорів дало можливість створити мікропроцесорні контролери та персональні комп'ютери, які набули нині значного поширення.

До 2000 р. створено електронні пристрої, що мають на порядок більший ступінь інтеграції, ніж великі інтегральні схеми. В них використана не технологічна інтеграція, як у ВІС, а фізична, яка реалізується завдяки атомарним, міжмолекулярним та іншим ефектам. Вона є основою так званої наноелектроніки, за розробку якої академіка Жореса Алфєрова на початку нового століття відзначено Нобелівською премією.

# **Частина 1**

## **АНАЛОГОВА ЕЛЕКТРОНІКА**

### **1. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ**

#### **1.1. Фізичні основи електронних явищ**

Атоми всіх речовин складаються з ядра та електронної оболонки, що з ним взаємодіє. Кількість електронів на зовнішній орбіті визначає валентність речовини. Найстійкішою є структура з восьми електронів.

У нормальному стані атом електронейтральний, і кожній електронній оболонці відповідає свій енергетичний рівень. Одержуючи енергію, електрони переходять на більш високий дозволений енергетичний рівень, а віддаючи її, вони переходять на нижчий рівень з випромінюванням фотона, або кванта. Порції енергії точно визначені, з чим пов'язані поняття про дозволені та заборонені енергетичні рівні.

Електрон, що отримав додаткову енергію, стає збудженим або гранично вільним. Атом, втрачаючи чи отримуючи електрони, стає, відповідно, позитивним або негативним іоном. Вільні електрони всередині речовини рухаються хаотично, а в разі наявності зовнішнього електричного поля — упорядковано, створюючи електричний струм.

## 1.2. Електропровідність твердого тіла

Кількістю вільних електронів у речовині за однакових умов визначається її електропровідність, за значенням якої тверді тіла поділяють на провідники з провідністю від  $10^4$  до  $10^3$  См/м, напівпровідники — від  $10^2$  до  $10^{-8}$  та діелектрики — до  $10^{-12}$  См/м.

Енергетичні рівні електронів на енергетичній зонній діаграмі (рис. 1.1) створюють дозволені зони, які можуть розділятися забороненими зонами, значень енергії яких електрони не можуть мати за своєю фізичною природою ні за яких умов.

Дозволені зони бувають заповненими, в яких при температурі абсолютного нуля всі енергетичні рівні зайняті електронами, і вільними, в яких за тих же умов електронів немає, але за інших умов вони можуть бути.

Верхню із заповнених зон атомів (на рисунку — нижню) називають *валентною* (ВЗ); верхній її межі (стелі) відповідає енергетичний рівень  $\phi_v$ . Енергетичну вільну зону називають *зоною провідності* (ЗП). В ній електрони можуть з'являтися за відповідних умов, забезпечуючи електропровідність речовини. Нижній межі (дну) ЗП відповідає енергетичний рівень  $\phi_c$ .

Між ЗП і ВЗ може існувати *заборонена зона* (ЗЗ). Ширина цієї зони визначає електропровідність речовини, їй відповідає енергетична різниця  $\Delta\phi_{ЗЗ} = \phi_c - \phi_v$ , яку електронам треба здолати, щоб залишити валентну зону і потрапити в зону провідності.

Середині забороненої зони відповідає рівень енергії електростатичного потенціалу  $\phi_e$ , який для провідників та ідеальних напівпровідників збігається з рівнем Фермі  $\phi_f$ , тобто таким, імовірність заповнення якого становить 0,5.

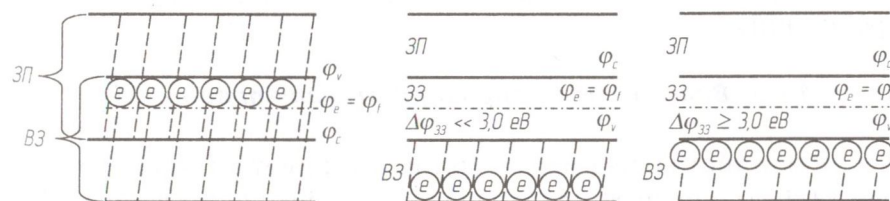


Рис. 1.1. Зонні енергетичні діаграми твердих тіл

Енергетична структура твердих тіл відповідає поділу їх на провідники, напівпровідники і діелектрики (рис. 1.1). На рисунку заповнені енергетичні зони заштриховані.

У провідників забороненої зони не існує, а зони провідності і валентна перекриваються, тому електрони за енергетичним рівнем одночасно перебувають у них обох. У напівпровідниках ці зони розділені не дуже широкою забороненою зоною ( $\Delta\varphi_{\text{зз}} = 0,5 \dots 3,0$  еВ) і електрони в разі змінення рівня своєї енергії більш ніж на  $\Delta\varphi_{\text{зз}}$  під дією зовнішніх факторів (тепло та світло, електричне поле тощо) переходять з валентної зони до зони провідності. В діелектриках заборонена зона досить широка ( $\Delta\varphi_{\text{зз}} > 3$  еВ) і для її переходу електронам треба отримати значну енергію. Провідність діелектриків стає помітною лише при температурі  $400 \dots 800$  °С або в сильному електрополі, коли відбувається пробій напівпровідника.

### 1.3. Електропровідність напівпровідників

До напівпровідників належать речовини з шириною забороненої зони  $\Delta\varphi_{\text{зз}} < 3$  еВ. Для них характерне зменшення електричного опору із зростанням температури. Найбільш застосовуваними в напівпровідниковій техніці є чотиривалентні германій ( $\Delta\varphi_{\text{зз}} = 0,67$  еВ) та силіцій ( $\Delta\varphi_{\text{зз}} = 1,1$  еВ).

Напівпровідники — це тверді речовини, що мають регулярні кристалічні ґратки з кроком  $0,25$  нм між атомами. Атоми поєднані ковалентними зв'язками, створеними попарним об'єднанням двох валентних електронів, яких у кожному атомі у зв'язках стає вісім.

Розрізняють власну і домішкову електропровідності напівпровідників.

#### 1.3.1. Власна електропровідність напівпровідників

Зовнішня орбіта атома силіцію в кристалічних ґратках (рис. 1.2, а) виходить заповненою і має вісім електронів, тому в ідеальному напівпровіднику при абсолютному нулі в зоні провід-

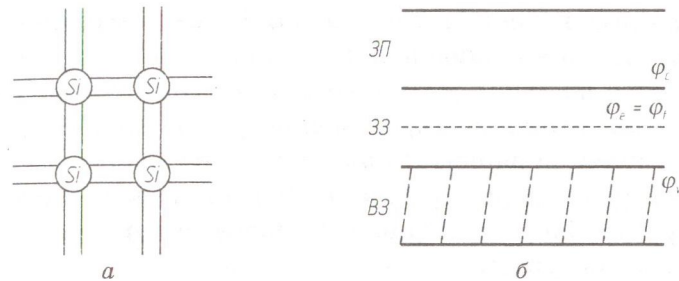


Рис. 1.2. Ковалентні зв'язки в кристалічних ґратках силіцію (а) і його зонна діаграма (б)

ності немає вільних носіїв заряду (електронів) і напівпровідник є ізолятором, має заповненою лише валентну зону, а зона провідності вільна (рис. 1.2, б).

При зовнішньому енергетичному діянні порушується ковалентний зв'язок у деяких атомів із створенням вільних електронів (рис. 1.3, а), які, одержавши більшу за ширину забороненої зони енергію, можуть переходити із валентної зони в зону провідності. У кристалі германію при кімнатній температурі є лише  $1 \cdot 10^{-7} \%$  вільних електронів, тому його провідність незначна, а силіцію ще менша.

У разі переходу електрона  $-e$  в зону провідності у валентній зоні виникає вільний енергетичний рівень  $+e$ , не заповнений електроном (рис. 1.3, б). Його називають *діркою провідності*.

Процес утворення пар носіїв заряду (електронів у зоні провідності та дірок у валентній зоні) називають *термогенерацією* заря-

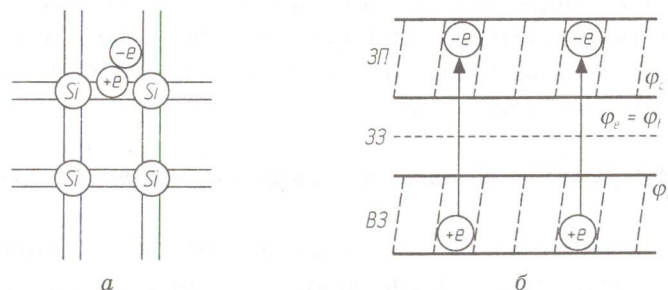


Рис. 1.3. Порушення ковалентного зв'язку

дів (завжди створюється пара носіїв). Дірка з часом (що визначає час її життя) може заповнюватися електроном із сусіднього атома, у якого на місці залишеного зв'язку виникає нова дірка, отже, вона, рухаючись протилежно рухові електрона, переносить позитивний заряд. Після ряду переміщень дірка рекомбінує з одним із вільних електронів. Час життя та рухливість дірок і електронів різні. Інтенсивність генерації пари носіїв визначається температурою.

Внаслідок генерації носіїв електрони в зоні провідності переміщуються вільно, а дірки у валентній зоні — лише від атома до атома, проте з іншою, ніж електрони, швидкістю. Інтенсивністю руху електронів і дірок у напівпровіднику визначається його електропровідність.

Електропровідність бездомішкового (власного) напівпровідника містить електронну ( $n$ ) та діркову ( $p$ ) складові, і її називають *власною провідністю*. При ній концентрація різнотипних носіїв заряду однакова ( $n_i = p_i$ ). Власна провідність визначається однаковою наявністю електронів у зоні провідності та дірок у валентній зоні. Очевидно, що концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику, а отже, і його провідність зростають з підвищенням температури і зменшуються з ростом ширини забороненої зони. До того ж концентрація носіїв зарядів менша у силіцію, ніж у германію.

Термогенерація пар носіїв заряду відбувається безперервно, але одночасно супроводжується рекомбінацією їх з виділенням енергії і відновленням порушених ковалентних зв'язків. Встановлюється рівноважна концентрація носіїв заряду, пропорційна температурі. З підвищенням температури електропровідність напівпровідника зростає, а не падає, як у металів. При власній провідності напівпровідника заборонена зона завжди залишається вільною.

### **1.3.2. Домішкова електропровідність напівпровідників**

Коли ідеальність кристалічних ґраток напівпровідника порушується (наприклад, внаслідок додавання домішок), у забороненій зоні можуть розміщуватися місцеві енергетичні так звані

домішкові зони (ДЗ). Залежно від типу домішки ці зони можуть лежати в забороненій зоні як поблизу валентної зони, так і поблизу зони провідності. Зазвичай використовують п'ятивалентні домішки (стибій, фосфор, арсен), що дають надлишковий електрон відносно чотиривалентних силіцію або германію і тому є для них донорами електронів, або тривалентні (індій, галій, алюміній), що поглинають електрон з ковалентних зв'язків і тому є для них акцепторами електронів. Останні створюють додаткові дірки в напівпровіднику. Зонні діаграми тоді мають вигляд, показаний на рис. 1.4.

Якщо домішка донорна (п'ятивалентна) (рис. 1.4, а), то ДЗ виникає поблизу зони провідності. Електрон домішки може переходити із ДЗ в ЗП з меншими енергетичними витратами (наприклад,  $\Delta\varphi_d = 0,0006$  еВ для стибію), ніж на подолання забороненої

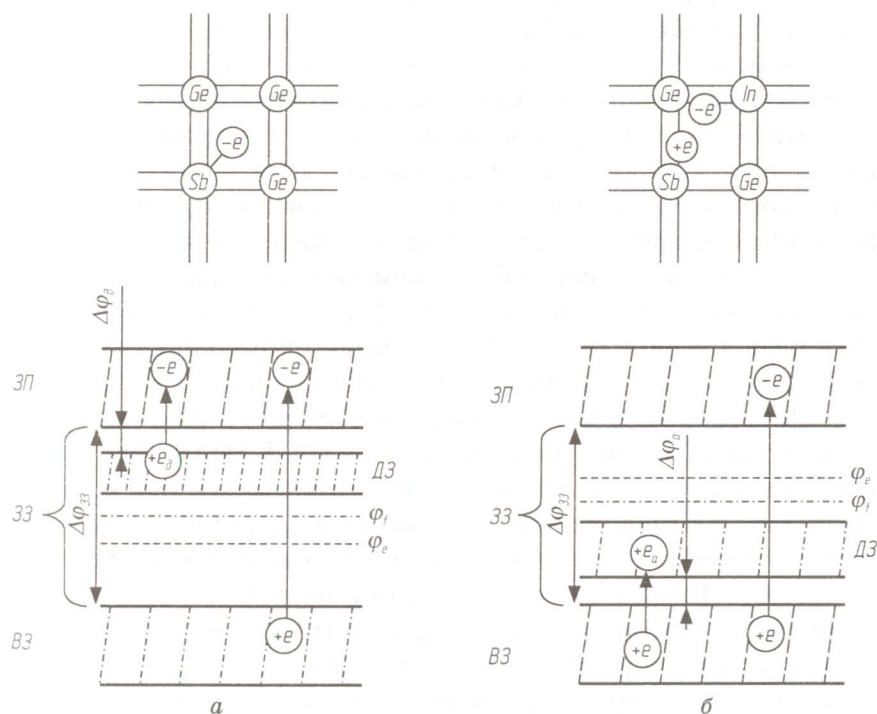


Рис. 1.4. Зонні діаграми напівпровідників з домішками:  
а — донорною; б — акцепторною

зони електроном напівпровідника (наприклад,  $\Delta\phi_{33} = 0,67$  eV для германію). При цьому в зоні провідності утворюється електрон провідності ( $-e$ ), а в кристалічних ґратках домішкової зони — нерухомий позитивний іон домішки ( $+e_d$ ) без виникнення у валентній зоні рухливої дірки. Цей тип провідності називається *домішковим*, бо визначається наявністю електронів домішки у зоні провідності. Одночасно і паралельно відбувається термогенерація пар носіїв заряду, як при власній провідності. Рівень Фермі  $\phi_f$  в цьому разі зміщується до зони провідності.

Фізично при введенні донорної домішки її атоми (наприклад, стибію на *рис. 1.4, а*) заміщують деякі атоми вихідного напівпровідника (наприклад, германію) у кристалічних ґратках. З п'яти лише чотири валентних електрони атома домішки створюють ковалентні зв'язки, а п'ятий, надлишковий електрон ( $-e$ ) виявляється зв'язаним зі своїм атомом слабкіше, ніж у ковалентному зв'язку. Тому, щоб перетворити його у вільний, тобто щоб він перейшов у зону провідності, потрібно витратити значно менше енергії, ніж на порушення ковалентного зв'язку при термогенерації ( $\Delta\phi_d \ll \Delta\phi_{33}$ ). Атом домішки стає нерухомим позитивним іоном ( $+e_d$ ) у кристалічних ґратках. При достатній концентрації домішки концентрація вільних електронів у зоні провідності виходить значною, як і кількість позитивних іонів. Доки електрони не покидають об'єму кристала напівпровідника, він залишається електронейтральним. Але у разі виходу з будь-яких причин електронів з кристала позитивні іони можуть створювати у ньому некомпенсований позитивний об'ємний заряд.

Якщо домішка акцепторна (тривалентна), то домішкова зона виникає поблизу валентної зони (*рис. 1.4, б*). Домішка може захоплювати електрон із валентної зони, затративши лише незначну енергію  $\Delta\phi_a \ll \Delta\phi_{33}$  (наприклад, для індію  $\Delta\phi_a = 0,012$  eV), і переносити у незайняту домішкову зону з виникненням у валентній зоні дірки ( $+e$ ) провідності та негативного іона домішки ( $-e_a$ ) в кристалічних ґратках (в ДЗ) без переходу електрона в зону провідності. Цей тип провідності також називається *домішковим*, але визначається наявністю дірок у валентній зоні. При цьому паралельно відбувається термогенерація пар носіїв, як при власній провідності. Рівень Фермі  $\phi_f$  зміщений в цьому разі до валентної зони.

Замість деяких атомів у кристалічних ґратках напівпровідника (наприклад, германію) атом тривалентної домішки (наприклад, індію на *рис. 1.4, б*) створює лише три заповнені ковалентні зв'язки з сусідніми атомами вихідного чотиривалентного напівпровідника, а четвертий зв'язок заповнюється за рахунок сусідніх атомів германію в ґратках при витраті незначної енергії  $\Delta\varphi_a < \Delta\varphi_{33}$ . Внаслідок такого переходу електрона з валентної зони до домішкової у валентній зоні утворюється дірка ( $+e$ ) в ковалентному зв'язку сусіднього атома германію і атом домішки індію перетворюється в нерухомий негативний іон ( $-e_a$ ). Так домішки при достатній їх концентрації сприяють підвищенню концентрації дірок у валентній зоні, хоча в кристалі зберігається зарядна нейтральність. Але якщо в його об'єм з будь-яких причин потрапляють електрони, які внаслідок рекомбінації заповнюють дефекти ковалентних зв'язків, тобто позитивні дірки, то в шарі напівпровідника з'являється некомпенсований негативний об'ємний заряд іонів акцепторної домішки.

Домішкова електропровідність напівпровідника визначається носіями заряду або в зоні провідності (електронів), або у валентній зоні (дірок) завдяки іонізації атомів донорної чи акцепторної домішок. Домішкова провідність діє одночасно і паралельно з власною. В разі домішкової провідності донорна домішка сприяє створенню, крім нерухомих іонів домішок, лише електронів провідності в зоні провідності, а акцепторна — тільки дірок провідності у валентній зоні, без створення парного носія заряду в зоні провідності, як при власній провідності, коли генеруються пари носіїв. Якщо діють одночасно власна (пара носіїв) і домішкова провідності, то завжди за концентрацією переважають носії заряду якогось одного типу, які і називаються *основними*, а решта (з меншою концентрацією) — *неосновними*. Тому домішкова провідність залежно від типу основних носіїв може бути електронною (*n*-типу) або дірковою (*p*-типу).

Оскільки енергія активації домішок дуже низька, то навіть при кімнатній температурі всі атоми домішки іонізовані й провідність напівпровідника є переважно домішковою. З підвищенням температури домішкова складова провідності залишається незмінною, а частка власної зростає.

У домішкових напівпровідниках концентрація основних носіїв суттєво (на два–три порядки) перевищує концентрацію неосновних носіїв. Питома провідність домішкового напівпровідника зростає в сотні тисяч разів порівняно з чистим (ідеальним) напівпровідником з власною провідністю.

Для домішкових напівпровідників добуток концентрацій основних і неосновних носіїв заряду для певної температури є сталою величиною

$$n_n p_n = p_p n_p = n_i p_i = A^2 e^{-\frac{\Delta\phi_{33}}{2kT}}, \quad (1.1)$$

де  $n_n, p_n$  — концентрації електронів і дірок у напівпровіднику  $n$ -типу;  $n_p, p_p$  — те саме,  $p$ -типу;  $n_i, p_i$  — те саме, у власному напівпровіднику.

З (1.1) видно, що концентрація неосновних носіїв у домішкових напівпровідниках менша, ніж концентрація власних носіїв у чистому напівпровіднику, бо із збільшенням кількості основних носіїв зростає кількість рекомбінацій, від чого кількість неосновних носіїв зменшується. Рівновага настає лише за умов, що відповідають рівнянню (1.1).

Залежність концентрації носіїв заряду від температури обмежує діапазон застосування напівпровідникових приладів, оскільки з підвищенням температури зростає питомий вклад процесу термогенерації в електропровідність. При значному нагріванні концентрація носіїв і електропровідність напівпровідника визначаються не концентрацією домішок, а концентрацією власних (від термогенерації) носіїв заряду, і домішковий напівпровідник вироджується у власний. Для германію це відбувається приблизно при 75...85 °С, а для силіцію — при 150...170 °С. При низьких температурах (–55...60) °С зменшується кількість іонізованих атомів домішки, а відтак і концентрація основних носіїв заряду, що також порушує роботу напівпровідникових приладів.

Якщо в прошарку кристала напівпровідника, наприклад  $n$ -типу, створена якимось чином початкова концентрація дірок  $\Delta p(0)$ , що перевищує рівноважну, то спад її з часом  $\Delta p(t)$  буде експоненціальним із сталою часу  $\tau_p$  — *часом життя дірок*.

Для діркового напівпровідника нерівноважна концентрація електронів  $\Delta n(t)$  спадає аналогічно, але характеристичну

сталу  $\tau_n$  у цьому разі називають *часом життя електронів*. Звичайно значення  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  лежать у межах  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  с. Їх зменшення впливає на зростання швидкодії напівпровідникових приладів і досягається технологічним створенням так званих пасток у забороненій зоні, здатних переводити електрони у валентну зону.

Якщо немає електричного поля і концентрація носіїв у кристалі однакова, то вони перебувають у хаотичному тепловому русі, тому електричний струм не виникає. Наявність поля або нерівномірність концентрації носіїв зумовлюють виникнення струму. Рух носіїв заряду під дією електричного поля називають *дрейфом* носіїв, а від різниці концентрацій — *дифузією*.

Сумарна густина дрейфового струму через напівпровідник враховує обидві складові, тобто

$$J = J_{n \text{ др}} + J_{p \text{ др}}. \quad (1.2)$$

Дифузійний рух носіїв виникає при різниці концентрацій їх у сусідніх прошарках напівпровідника, а густина дифузійного потоку залежить від градієнта концентрацій вздовж осі  $x$ :

$$J_{n \text{ диф}} = e D_n \frac{dn}{dx}, \quad J_{p \text{ диф}} = e D_p \frac{dp}{dx}, \quad (1.3)$$

де  $e$  — основа натурального логарифма;  $D_n$ ,  $D_p$  — коефіцієнти дифузії електронів і дірок відповідно.

Відстань, на якій надлишкова концентрація носіїв заряду зменшується в  $e$  разів, називають *дифузійною довжиною*  $L_n$ ,  $L_p$ . На цю відстань носій може переміститися за час свого життя:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p}. \quad (1.4)$$

#### 1.4. Ефект поля в напівпровідниках

*Ефектом поля* в напівпровіднику (позначають напівпровідник літерою П — від рос. полупроводник) називають змінення концентрації носіїв (а отже, і провідності) у приповерхневому шарі його під дією електричного поля. Підвищення концентрації називають *збагаченням*, а зниження — *збідненням*, самі

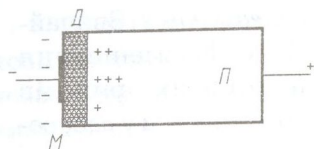


Рис. 1.5. Система МДП

шари — відповідно *збагаченим* або *збідненим*. У системі метал—діелектрик—напівпровідник (МДП) (рис. 1.5) струму немає. Але як і на конденсаторі, на напівпровідниковій обкладинці наводиться такий же заряд, як і на металевій. На відміну від металу цей заряд не зосереджується на поверхні, а поширюється в глиб об'єму напівпровідника. Знак заряду в напівпровіднику визначається полярністю прикладеної напруги. При негативній напрузі на металі заряд позитивний. В *p*-напівпровіднику заряд зумовлюється дірками, що притяглися до поверхні (збагачення), а в *n*-напівпровідниках — іонами донорів, від яких відштовхнулись електрони (збіднення). При позитивній полярності напруги — навпаки. В *n*-напівпровідниках має місце збагачення приповерхневого шару електронами, а в *p*-напівпровідниках — збіднення дірками та оголення негативних акцепторних іонів. Приповерхневий шар власного напівпровідника при обох полярностях напруги на металі збагачений або електронами, або дірками.

Особливістю ефекту поля в домішкових напівпровідниках є можливість утворення як збагачених, так і збіднених шарів, а також змінення типу провідності — одержання *інверсійного* шару.

Режим збагачення настає при такій полярності на металі, коли основні носії притягуються до поверхні напівпровідника, а режим збіднення — коли вони відштовхуються від поверхні.

У режимі збіднення із зростанням прикладеної напруги основні носії продовжують відштовхуватись від поверхні, а збіднений шар — розширюватись, але одночасно до поверхні притягуються неосновні носії. Коли заряд неосновних носіїв, що зростає, перевищить заряд тих основних носіїв, що залишилися, і зміниться тип провідності приповерхневого шару, настає *інверсія* типу провідності з виникненням інверсійного шару. З подальшим зростанням прикладеної зовнішньої напруги концентрація інверсійних носіїв може зрости настільки, що приповерхневий шар перетвориться в напівметал.

Описане явище ефекту поля лежить в основі роботи одного з типів напівпровідникових уніполярних транзисторів — МДП з індукованим каналом, що нині мають найширше застосування.

**Контрольні запитання і завдання**

- 1.1. Поясніть фізичні основи електронних явищ.
- 1.2. Що таке енергетичний рівень електрона? Що таке енергетична зона?
- 1.3. Що відображає енергетична або зонна діаграма?
- 1.4. Чому енергетичні зони можуть називатися зоною провідності, зоною валентною або забороненою зоною? Чому вони можуть бути вільними або заповненими?
- 1.5. Які критерії поділу твердих тіл на провідники, напівпровідники і діелектрики (ізолятори)?
- 1.6. Який вигляд мають енергетичні зонні діаграми провідників, напівпровідників та ізоляторів?
- 1.7. Що таке ковалентний зв'язок атомів у кристалічних ґратках? Які елементи за валентністю використовують у напівпровідниках? Чому? Наведіть вигляд ковалентних зв'язків у кристалічних ґратках силіцію або германію.
- 1.8. Наведіть зонну діаграму ідеального напівпровідника при абсолютному нулі. Які зони вільні, а які заповнені?
- 1.9. Які причини порушення ковалентних зв'язків? Як називають порушення ковалентного зв'язку? Які його властивості?
- 1.10. Наведіть зонну діаграму ідеального напівпровідника при термогенерації носіїв заряду. Які зони вільні, які заповнені?
- 1.11. Які типи та властивості носіїв електричного заряду? Яке співвідношення часу їхнього життя та дифузійної довжини?
- 1.12. Чим зумовлена власна електропровідність напівпровідника? Що таке термогенерація та рекомбінація носіїв зарядів?
- 1.13. Як залежить власна електропровідність напівпровідника від температури?
- 1.14. Як співвідносяться концентрації носіїв різнотипних зарядів при власній електропровідності напівпровідника?
- 1.15. Якої валентності домішки використовують у напівпровідниках? Чому? Як їх використовують?
- 1.16. Який вигляд зонної діаграми напівпровідника з донорною домішкою?
- 1.17. Який вигляд зонної діаграми напівпровідника з акцепторною домішкою?
- 1.18. Що таке основні та неосновні носії заряду?
- 1.19. Чим визначається тип напівпровідника і яким він може бути при домішкній провідності? Що таке електронна та діркова провідності напівпровідника?
- 1.20. Яке співвідношення між власною і домішковою провідностями напівпровідника?
- 1.21. Як співвідносяться концентрації носіїв при домішкній провідності напівпровідника?
- 1.22. Що таке дрейф носіїв зарядів у напівпровіднику?
- 1.23. Що таке дифузія носіїв зарядів? Від чого залежить густина дифузійного струму?
- 1.24. Що таке дифузійна довжина і час життя носія заряду?
- 1.25. Поясніть сенс ефекту поля в напівпровідниках.
- 1.26. Поясніть сенс режимів збагачення або збіднення носіями шару напівпровідника.
- 1.27. Що таке інверсійний шар у напівпровіднику і як він виникає?
- 1.28. Чи може виникати інверсійний шар у власних напівпровідниках? Чому?