

§ 16. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ ТА ЇЇ ВИДИ. ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВИЙ ПЕРЕХІД І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ



Технічна можливість створення невеликих за габаритами та масою електронних приладів (радіоприймачі, плеєри, мобільні телефони тощо) з'явилася завдяки розробкам у галузі напівпровідників. Із матеріалу цього параграфа ви з'ясуєте, як пов'язана конструкція цих пристроїв з «провідністю напівпровідників».



Що таке напівпровідники

Напівпровідники, як це випливає з їхньої назви, за своєю провідністю посідають проміжне місце між провід-

никами та діелектриками. Якщо значення питомого електричного опору провідників становить приблизно 10^{-8} Ом · м, діелектриків — $10^{12} \dots 10^{20}$ Ом · м, то напівпровідників — $10^{-4} \dots 10^7$ Ом · м. Це означає, що концентрація вільних заряджених частинок у напівпровідниках набагато менша, ніж у провідниках, і набагато більша, ніж у діелектриках.

У процесі вивчення залежності провідності напівпровідників від зовнішніх чинників виявилось, що ця залежність у напівпровідників значно відрізняється від тієї, що спостерігається в металах.

По-перше, *з підвищенням температури питомий опір напівпровідників зменшується* (рис. 16.1), а питомий опір металів, навпаки, збільшується. По-друге, *питомий опір деяких напівпровідників знижується зі збільшенням освітленості*, тоді як опір металів від освітленості практично не залежить. По-третє, *введення домішок може різко зменшити питомий опір напівпровідників*, тоді як метали за наявності домішок зазвичай гірше проводять струм.

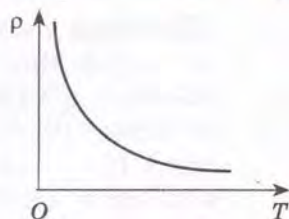


Рис. 16.1. Схематичний графік залежності питомого опору напівпровідників від температури

2

Яким є механізм власної провідності напівпровідників

З'ясуємо, які частинки є носіями зарядів у напівпровідниках, за яких умов концентрація цих частинок збільшується і звідки вони з'являються. Для цього розглянемо будову чистих (без домішок) напівпровідників на прикладі силіцію. Силіцій має чотири валентні електрони, які «відповідають» за зв'язок між сусідніми атомами. У кристалі силіцію кожен атом Силіцію ніби «позичає» своїм сусідам по одному валентному електрону. Сусіди, у свою чергу, «позичають» йому свої валентні електрони. У результаті між кожними двома атомами Силіцію утворюється електронна пара «для спільного користування» (рис. 16.2, а).

У напівпровідниковому кристалі серед валентних електронів обов'язково є електрони, кінетична енергія яких настільки велика, що вони можуть покинути зв'язок і стати вільними. Один такий електрон показаний на жовтому полі рис. 16.2, а. Якщо напівпровідниковий кристал помістити в електричне поле, то вільні електрони почнуть рухатися до позитивного полюса джерела струму і в напівпровіднику виникне електричний струм.

Провідність напівпровідників, зумовлену наявністю в них вільних електронів, називають **електронною провідністю**, а вільні електрони — **електронами провідності**.

Ще раз звернемося до рис. 16.2, а. Після того як електрон «покинув» валентний зв'язок, його місце виявиться «пустим», — фізики

таке місце називають *діркою*. Природно, що *дірці* приписують *позитивний заряд*. На вакантне місце (у дірку) може «перестрибнути» електрон від сусіднього зв'язку. Тоді дірка з'явиться біля сусіднього атома. Послідовність таких «стрибків» збоку виглядає так, ніби дірка (або позитивний заряд) переміщується в кристалі. Хоча насправді в кристалі — у зворотному напрямку — переміщуються електрони.

Провідність напівпровідників, зумовлену переміщенням дірок, називають **дірковою провідністю**.

У напівпровіднику з малою кількістю домішок електричний струм створює однакова кількість вільних електронів і дірок. Таку провідність називають *власною провідністю напівпровідників*.

Зі збільшенням температури середня кінетична енергія електронів збільшується, в результаті чого дедалі більше електронів стають вільними. Тому, незважаючи на те що йони внаслідок коливального руху ще більше заважають рухові вільних електронів, опір напівпровідника зменшується.

3 Яким є вплив домішок на провідність напівпровідників

Якщо до чистого напівпровідника додати невелику кількість домішки, то механізм провідності різко зміниться. Ці зміни легко простежити на прикладі силіцію з невеликою кількістю домішок арсену. У новому кристалі частина атомів Силіцію буде заміщена атомами Арсену (рис. 16.2, б). Арсен, як відомо, — п'ятивалентний елемент. Чотири валентні електрони атома Арсену утворюють парні електронні зв'язки із сусідніми атомами Силіцію. П'ятому ж валентному електрону зв'язку не вистачить, й оскільки він слабо зв'язаний із атомом Арсену, то легко стане вільним. У результаті значна кількість атомів домішки дасть вільні електрони. Зверніть увагу на те, що домішки типу арсену привносять у кристал тільки електрони, а вакантні місця (дірки) при цьому не утворюються. Домішки, атоми яких відносно легко віддають електрони, називають *донорними домішками* (від латин. *donare* — дарувати, жертвувати).

У напівпровідників у більшості випадків концентрація вільних електронів, які надаються

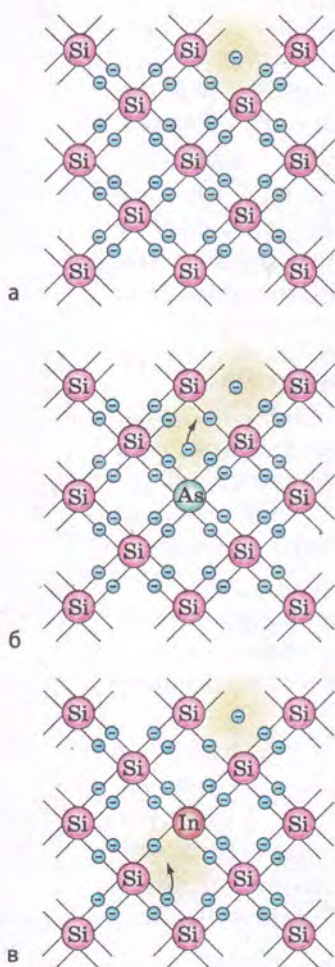


Рис. 16.2. Схематичне зображення кристалічної ґратки Силіцію: без домішок (а); з домішками Арсену (б); з домішкою Індію (в)

домішками, є значно вищою, ніж концентрація власних електронів та дірок. Отже, основні носії зарядів у напівпровідниках з донорними домішками — негативні частинки. Тому такі напівпровідники називають *напівпровідниками n -типу* (від латин. *negativus* — негативний).

На рис. 16.2, б показано кристалічну ґратку з частковою заміною чотиривалентного Силіцію на п'ятивалентний Арсен. Розглянемо тепер зворотню ситуацію — додамо в Силіцій як домішку тривалентний елемент, наприклад Індій (рис. 16.2, в). Оскільки атом Індію має три валентні електрони, то він може «встановити зв'язки» тільки з трьома сусідніми атомами Силіцію. Щоб утримати структуру кристалічної ґратки, відсутній (четвертий) електрон треба «запозичити» в сусідніх атомах Силіцію. У результаті кожний атом Індію стає джерелом створення дірок. Домішки такого роду називаються *акцепторними домішками* (від латин. *acceptor* — той, що приймає). У напівпровідників із акцепторними домішками основні носії заряду — дірки. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають *напівпровідниками p -типу* (від латин. *positivus* — позитивний).

Оскільки за наявності домішок кількість вільних заряджених частинок збільшується (кожний атом домішки дає вільний електрон або дірку), то провідність напівпровідників із домішками є набагато кращою, ніж провідність чистих напівпровідників.

4

Що таке n - p -перехід

Електронно-дірковий перехід (або n - p -перехід) — це ділянка контакту двох напівпровідників із різними типами провідності.

Електронно-дірковий перехід утворюється в напівпровідниковому кристалі, в якому є контакт між ділянкою з електронною провідністю та ділянкою з дірковою провідністю. Розглянемо явища, які відбуваються в такому кристалі. Якщо електричне поле відсутнє, то вільні електрони та дірки хаотично рухаються в кристалі, проникаючи в тому числі в ділянки з домінуванням протилежного типу провідності (пригадайте процес дифузії).

Електрони, переходячи із зони з провідністю n -типу, несуть із собою негативний заряд, тому в кристалі на межі n - p -переходу ця ділянка заряджається позитивно, а граничний шар зони з провідністю p -типу — негативно. Дірки приносять позитивний заряд до зони з провідністю n -типу, а в результаті їхнього переходу зона з провідністю p -типу одержує додатковий негативний заряд. Таким чином, на межі напівпровідників утворюється подвійний *запірний шар*, електричне поле якого перешкоджає подальшій дифузії електронів і дірок назустріч одне одному.

Якщо кристал із сформованим у ньому n - p -переходом підключити до джерела струму так, щоб p -ділянка була з'єднана з позитивним полюсом джерела, а n -ділянка — з негативним, то товщина запирного

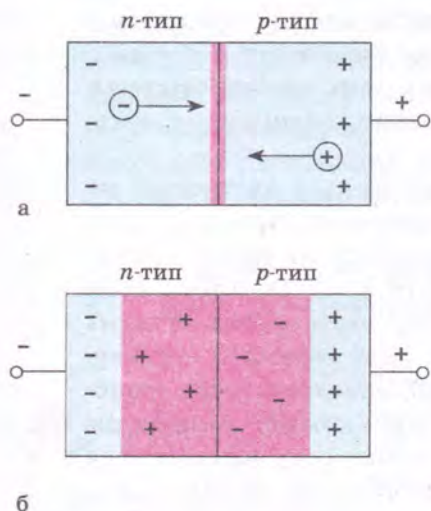


Рис. 16.3. Схематичне зображення р-п-переходу при прямому (а) та зворотному (б) включенні. Запірний шар зафарбовано рожевим кольором

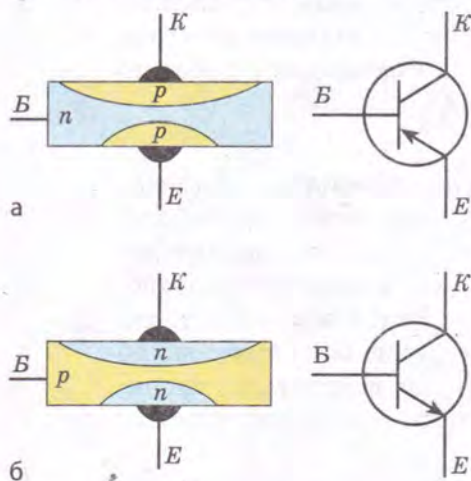


Рис. 16.4. Будова та схематичне позначення транзисторів р-п-р-типу (а); п-р-п-типу (б)

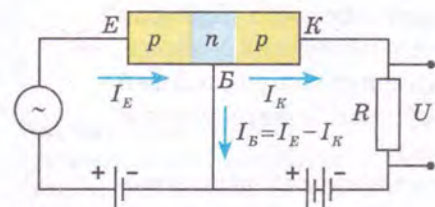


Рис. 16.5. Включення в електричне коло транзистора р-п-р-типу

шару зменшується і з'являється рух основних носіїв зарядів через місце контакту напівпровідників. Цей спосіб підключення називають *прямим* (рис. 16.3, а).

Якщо кристал з *п-р-переходом* підключити до джерела струму так, щоб *р-ділянка* була з'єднана з негативним полюсом джерела, а *п-ділянка* — з позитивним, то рух основних носіїв зарядів через місце контакту припиниться й спостерігатиметься тільки рух неосновних носіїв зарядів. Цей спосіб підключення називають *зворотним* (рис. 16.3, б).

★ 5 Як працює транзистор

Транзистори — напівпровідникові прилади з двома *п-р-переходами*.

Головний елемент транзистора являє собою напівпровідниковий кристал, наприклад германій, з уведеними в нього донорними та акцепторними домішками. Домішки розподілені так, що між напівпровідниками з однаковою домішкою (їх називають *емітер* і *колектор*) залишається тонкий прошарок германію з домішкою іншого типу — цей прошарок називають *базою*.

Транзистори бувають двох типів: *р-п-р-транзистори* та *п-р-п-транзистори* (рис. 16.4). (Зверніть увагу, що на рисунку літерами позначено: *Б* — база, *К* — колектор, *Е* — емітер.) Якщо в емітері та колекторі дірок істотно більше, ніж електронів (ці ділянки мають провідність *р-типу*), а в базі більше електронів (провідність *п-типу*), — це транзистор *р-п-р-типу* (рис. 16.4, а). Якщо в емітері та колекторі електронів більше, ніж дірок, а в базі більше електронів, — це транзистор *п-р-п-типу* (рис. 16.4, б).

Розглянемо роботу транзистора *р-п-р-типу*. Три виводи транзистора з ділянок із різними типами провідності включають у коло так, як показано на рис. 16.5. Якщо коло емітера відключене,

то струму в колі колектора немає, тому що перехід «база — колектор» ($n-p$) закритий для основних носіїв зарядів. Якщо замкнути коло емітера, дірки — основні носії заряду в емітері — переходять із нього до бази, створюючи в цьому колі струм I_e . У цьому випадку для дірок, які потрапили до бази з емітера, $n-p$ -перехід у колі колектора відкритий. Більшість дірок захоплюється полем цього переходу та проникає до колектора, створюючи струм I_k . Щоб струм колектора практично дорівнював струму емітера, базу транзистора роблять у вигляді дуже тонкого шару. Сила струму в колі емітера практично дорівнює силі струму в колі колектора.

Якщо в коло емітера включене джерело змінної напруги, то на резисторі з опором R , включеному в коло колектора, також виникає змінна напруга. Якщо опір R великий, то амплітуда напруги в колі колектора може в багато разів перевищувати амплітуду вхідного сигналу. Отже, *транзистор виконує роль підсилювача змінної напруги.*★

6 Як застосовують особливості провідності напівпровідників

Зараз напівпровідникові пристрої набувають винятково широкого застосування в радіоелектроніці. Зокрема, особливості залежності електропровідності напівпровідників від температури (див. рис. 16.1) дають змогу застосовувати їх у спеціальних приладах — *термісторах*.

Термістор — напівпровідниковий терморезистор (від грец. *therme* — тепло, жар і латин. *resisto* — опираюся), *електричний опір якого істотно змінюється з підвищенням температури*.

Термістори застосовують як термометри для вимірювання температури навколишнього середовища. Вони більш чутливі, ніж термометри опору, які виготовляють з металу.

У багатьох напівпровідників зв'язок між електронами й атомами настільки незначний, що достатньо опромінити кристали світлом, щоб в них виникла додаткова кількість вільних носіїв зарядів. Тож коли такий кристал підключений до електричного кола, його провідність буде змінюватися залежно від того, опромінюється він світлом чи ні.

Напівпровідниковий пристрій, в якому використовується властивість провідника змінювати свій опір залежно від зміни освітлення, називають фоторезистором. Фоторезистори застосовують у системах сигналізації та автоматики, дистанційного керування виробничими процесами, сортування виробів. За їхньою допомогою запобігають нещасним випадкам і аваріям, автоматично зупиняючи машини в разі порушення ходу процесу.

Слід, однак, зазначити, що широке застосування напівпровідників у техніці здебільшого зумовлене використанням властивостей електронно-діркового переходу.

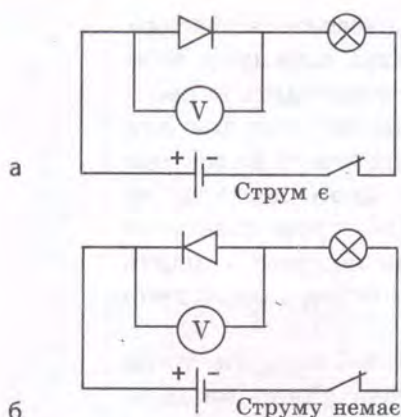


Рис. 16.6. Пряме (а) і зворотне (б) включення напівпровідникового діода в електричне коло

Так, *p-n*-перехід дозволяє створювати *напівпровідникові діоди* — прилади, які мають *однобічну провідність* (рис. 16.6). За допомогою таких пристроїв можна перетворити змінний струм на постійний.

Інша можливість виникає в разі застосування потрібного переходу. Такий складний перехід дозволяє створити пристрій для підсилення електричного сигналу. Назва цього пристрою — *напівпровідниковий триод*, або *транзистор*. Причому на відміну від свого вакуумного аналога напівпровідниковий пристрій має значно менші габарити та масу.

Відразу після своєї появи в 1960-х рр. напівпровідникові діоди та транзистори зробили справжню технічну революцію.

Замість важких вакуумних електронних ламп з'явилися пристрої масою декілька грамів та розміром декілька міліметрів. Тож були створені порівняно невеликі переносні радіоприймачі — вагою в декілька кілограмів та розміром зі шкільний рюкзак. Сучасні технології дозволяють виготовляти діоди, транзистори, напівпровідникові фотоприймачі та інші пристрої розміром у кілька мікрометрів. Тож замість одного радіоприймача рюкзак сучасного учня може вміщати ноутбук, мобільний телефон, плеєр тощо.



7

Булева алгебра — основа роботи комп'ютера

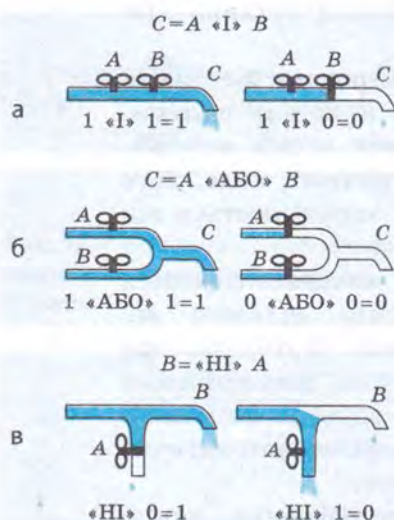


Рис. 16.7. «Водопровідна модель» операцій булевої алгебри

«Серце» сучасного комп'ютера — його центральний процесор. Основна функція процесора — обробка інформації, а оскільки дані в сучасних електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ) подаються у двійковому вигляді, то й операції з ними здійснюються на основі бінарної логіки, або так званої *булевої алгебри*. Булева алгебра розглядає величини, які набувають тільки двох значень — 0 або 1. Значення булевої величини можна подати як хибність або істинність будь-якого твердження (0 — хибне, 1 — істинне). Тому з такими величинами можна здійснювати різні операції — так само, як ми оперуємо твердженнями під час міркувань. Основні операції: «І», «АБО», «НІ».

Виконання логічних операцій можна проілюструвати на наочній фізичній моделі «водопроводу». Уявімо твердження, над якими

здійснюються операції, у вигляді вентилів на трубах (відкритий вентиль — твердження істинне, закритий — хибне). Результат операції уявимо у вигляді крана, з якого вода може або текти (істина), або не текти (хиба). На рис. 16.7 зображено системи труб, які реалізують основні логічні операції. Наприклад, розглянемо операцію «І»: $C = A \text{ «І» } B$ (рис. 16.7, а). Вентилі A і B встановлені на трубі послідовно, тому вода з крана C тече, тільки якщо вони обидва відкриті. Якщо ж установити вентилі на дві паралельні труби, що з'єднуються в одну, то така система виконуватиме операцію «АБО»: якщо хоча б один із вентилів (A або B) відкритий, вода з крана C потече, тобто $C = A \text{ «АБО» } B$ (рис. 16.7, б). На рис. 16.7, в показано систему, що виконує операцію «НІ»: якщо вентиль A закритий, то вода тече із крана B , якщо ж вентиль A відкритий, то вся вода тече з крана A , не доходячи до крана B , тобто $B = \text{«НІ» } A$.

В електроніці роль «електронних вентилів» виконує транзистор.★

★ 8 Що таке інтегральна мікросхема

Якісно новий етап розвитку електронної техніки розпочався з появою так званих *інтегральних мікросхем*. Ці складні системи прийшли на зміну величезним блокам перших ЕОМ.

Інтегральна мікросхема (інша назва — *мікрочип*) — це мікроелектронний пристрій з електронною схемою довільної складності, виготовлений на напівпровідниковому кристалі або плівці.

Сучасна інтегральна мікросхема об'єднує на декількох квадратних міліметрах тисячі транзисторів, діодів та інших напівпровідникових пристроїв.

Залежно від функціонального призначення інтегральні мікросхеми поділяють на *аналогові* та *цифрові*.

Аналогові мікросхеми призначені для перетворення та обробки сигналів, що змінюються за законом безперервної функції. Основним елементом аналогових мікросхем є транзистор. Аналогові інтегральні мікросхеми виконують функції підсилення, детектування, модуляції, генерації, фільтрації, перетворення аналогових сигналів і використовуються в аналого-цифрових вимірювальних приладах, підсилювачах низької і високої частот, відеопідсилювачах, генераторах, змішувачах та інших пристроях.

За допомогою *цифрових мікросхем* перетворюються та обробляються сигнали, що змінюються за законом дискретної функції. Окремим випадком цифрових мікросхем є логічні мікросхеми, що виконують операції з двійковим кодом, які описуються законами логічної алгебри. У цифрових інтегральних мікросхемах активні елементи працюють у ключовому режимі. Здебільшого їх застосовують в обчислювальних машинах.★

! Підбиваємо підсумки

Провідність напівпровідників зумовлена рухом вільних електронів (електронна провідність) і рухом дірок (діркова провідність). У чистому напівпровіднику електричний струм створюється однаковою

кількістю вільних електронів і дірок. Таку провідність називають власною провідністю напівпровідників.

У разі введення в напівпровідник домішки з більшою валентністю (донорної домішки) вільних електронів стає в багато разів більше, ніж дірок. Напівпровідники з переважно електронною провідністю називають напівпровідниками *n*-типу. У разі введення в напівпровідник домішки з меншою валентністю (акцепторної домішки) дірок стає більше, ніж вільних електронів. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками *p*-типу.

Якщо напівпровідник має дві зони з різними типами провідності, то на межі цих зон утворюється *n-p*-перехід, який має односторонню провідність електричного струму. Здатність *n-p*-переходу пропускати струм практично тільки в одному напрямку використовують у пристроях, які називаються напівпровідниковими діодами.

Напівпровідники широко використовують у техніці, наприклад для виготовлення термісторів і фоторезисторів.

Напівпровідникові прилади з двома *n-p*-переходами називають транзисторами. Особливості будови транзистора дозволяють використовувати його як підсилювач сигналів і електронний ключ.



Контрольні запитання

1. Чим напівпровідники відрізняються від металів? 2. Як у чистих напівпровідників з'являються вільні електрони? 3. Поясніть механізм діркової провідності.
4. У чому полягає власна провідність напівпровідників? 5. Чому опір напівпровідників дуже залежить від наявності домішок? 6. Яку домішку називають донорною? 7. Назвіть основні носії зарядів у напівпровідниках *n*-типу. 8. Яку домішку потрібно ввести, щоб одержати напівпровідник *p*-типу? 9. Як можна виготовити кристал з електронно-дірковим переходом? 10. Чому кристал напівпровідника з *n-p*-переходом має односторонню провідність? ★ 11. Дайте визначення транзистора. 12. Які типи транзисторів ви знаєте? 13. Чому база транзистора має бути вузькою? Чому сила струму в колекторі приблизно дорівнює силі струму в емітері? ★ 14. Де застосовують напівпровідники? ★ 15. Яку роль відіграють транзистори в роботі ЕОМ? ★ 16. Що таке інтегральна мікросхема?