

§ 23. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У НАПІВПРОВІДНИКАХ

?! Коли ви дивитеся телевизор, працюєте з мікрокалькулятором або комп'ютером, розмовляєте по мобільному телефону, то навряд чи замислюєтесь, як улаштовані ці пристрої. Усі ці тепер звичні пристрої не були б створені, якби вчені не дослідили, а техніки не навчилися використовувати напівпровідники (рис. 23.1). З цього параграфу ви дізнаєтесь про особливості провідності напівпровідників.



Рис. 23.1. Дія багатьох сучасних електричних пристроїв ґрунтується на використанні напівпровідників

1 Згадуємо, що таке напівпровідники

Напівпровідники, як це й виходить з їхньої назви, за своєю провідністю посідають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Якщо значення питомого електричного опору провідників становить приблизно 10^{-8} Ом·м, а діелектриків — від 10^{12} до 10^{20} Ом·м, то напівпровідників — від 10^{-4} до 10^7 Ом·м. З точки зору мікроструктури речовини це означає, що концентрація вільних заряджених частинок у напівпровідниках набагато менша, ніж у провідниках, і набагато більша, ніж у діелектриках. Наприклад, дуже поширений у техніці напівпровідник германій при кімнатній температурі має приблизно 10^{20} вільних заряджених частинок у 1 м^3 речовини. Здавалося б, велика кількість? Але це в 10 млрд разів менше, ніж у металах.

У процесі вивчення фізичних властивостей напівпровідників, зокрема провідності, виявилось, що в напівпровідників залежність провідності від зовнішніх чинників значно відрізняється від тієї, що спостерігається в металах.

По-перше, якщо опір металів із підвищенням температури збільшується, то опір напівпровідників, навпаки, зменшується. По-друге, опір напівпровідників падає зі збільшенням освітленості, тоді як опір металів від освітленості практично не залежить. По-третє, якщо за наявності домішок метали гірше проводять струм, то введення домішок у напівпровідники, навпаки, різко зменшує опір останніх. Існують і інші, не менш важливі й цікаві відмінності, але про них ви дізнаєтесь пізніше.

2 Знайомимось з особливостями внутрішньої будови напівпровідників

З'ясуємо, які частинки є носіями заряду в напівпровідниках, за яких умов концентрація цих частинок збільшується і звідки вони з'являються. Для цього розглянемо будову чистих (без домішок) напівпровідників на прикладі силіцію.

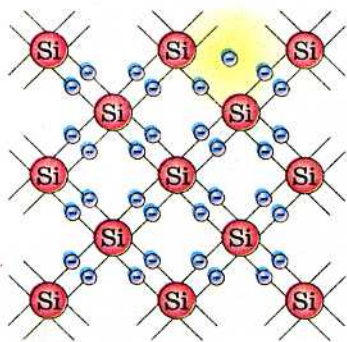


Рис. 23.2. Схематичне зображення ковалентного зв'язку силіцію

У Періодичній системі елементів Д. І. Менделєєва бачимо, що Силіцій — це хімічний елемент, який має порядковий номер 14 і розташований у IV групі. Як і всі елементи цієї групи, Силіцій має чотири валентні електрони. Саме ці валентні електрони відповідають за зв'язок між сусідніми атомами. У твердому стані для силіцію характерна кристалічна ґратка, в якій кожний атом має чотирьох найближчих «сусідів».

Атом Силіцію ніби «позичає» своїм сусідам по одному валентному електрону. Сусіди, у свою чергу, «позичають» йому свої валентні електрони «для спільного користування». У результаті між кожними двома атомами Силіцію завжди є електронна пара, що на даний момент спільна для обох атомів. Такий зв'язок, як вам відомо з курсу хімії, називають *ковалентним* (рис. 23.2).

3 Пояснюємо механізм власної провідності напівпровідників

У напівпровідниковому кристалі серед валентних електронів обов'язково є електрони, кінетична енергія яких настільки велика, що вони можуть залишити зв'язок і стати вільними.

Якщо напівпровідниковий кристал помістити в електричне поле, то вільні електрони почнуть рухатися до позитивного полюса джерела струму і в напівпровіднику виникне електричний струм.

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

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

Коли електрон залишає ковалентний зв'язок одного з атомів, точніше — однієї пари атомів, то цей зв'язок у парі лишається незайнятим — вільним. Цей вільний зв'язок прийнято називати *діркою*. Природно, що *дірці приписують позитивний заряд*.

На вакантне місце може «перестрибнути» електрон від сусіднього зв'язку, і там, у свою чергу, утвориться дірка. У результаті послідовності таких «стрибків» дірка ніби переміщується по кристалу. (Насправді ж, як ви бачите на рис. 23.3, переміщуються — у зворотному напрямку! — зв'язані валентні електрони.)

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

У чистому напівпровіднику електричний струм створює однакова кількість вільних електронів і дірок. Таку провідність називають *власною провідністю напівпровідників*.

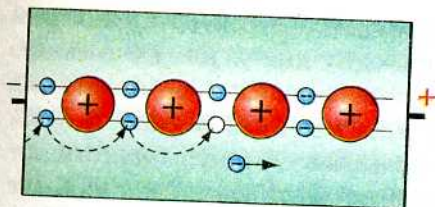


Рис. 23.3. Механізм діркової провідності в напівпровідниках. Червоні кружечки — йони кристалічної ґратки; сині кружечки — зв'язані електрони; білий кружечок — вакантне місце (дірка). Під дією електричного поля зв'язаний електрон переміщується в напрямку до позитивного полюса джерела струму — на вакантне місце біля сусіднього атома. Це виглядає так, начебто дірка переміщується в напрямку до негативного полюса

4 Вивчаємо домішкову провідність напівпровідників

До цього було розглянуто електричний струм у чистих напівпровідниках. У таких напівпровідниках кількість вільних електронів і дірок є однаковою. Проте якщо в чистий напівпровідник додати невелику кількість домішки, то картина дещо зміниться.

Наприклад, якщо в чистий розплавлений силіцій додати трохи арсену, то після кристалізації утвориться звичайна кристалічна ґратка силіцію, однак у деяких її вузлах замість атомів Силіцію перебуватимуть атоми Арсену (рис. 23.4). 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, при цьому він буде так слабо пов'язаний з атомом Арсену, що легко стане вільним. У результаті *кожний атом домішки дасть один вільний електрон*, а вакантне місце (дірка) при цьому не утвориться. Домішки, атоми яких легко віддають електрони, називаються *донорними домішками* (від латин. *donare* — дарувати, жертвувати).

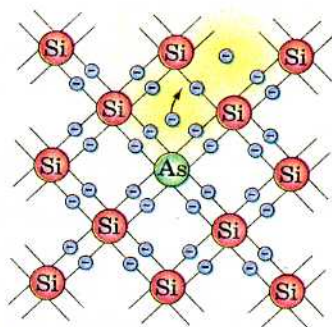


Рис. 23.4. Схема будови кристала силіцію із введеними атомами Арсену. П'ятий валентний електрон Арсену не бере участі в ковалентному зв'язку і стає вільним

Нагадаємо, що крім вільних електронів, які надаються домішками, у напівпровідниках є електрони й дірки, наявність яких спричинена власною провідністю напівпровідників. Отже, у напівпровідниках з донорними домішками кількість вільних електронів значно більша, ніж кількість дірок. Таким чином, основними носіями зарядів у таких напівпровідниках є негативні частинки. Тому напівпровідники з донорними домішками називають напівпровідниками *n-типу* (від латин. *negativus* — негативний).

Якщо в силіцій додати невелику кількість тривалентного елементу, наприклад Індію, то характер провідності напівпровідника зміниться. Оскільки атом Індію має три валентні електрони, то він може встановити ковалентний зв'язок тільки з трьома сусідніми атомами Силіцію (рис. 23.5). Для встановлення зв'язку з четвертим атомом електрона не вистачить, і цей відсутній електрон Індій «запозичить»

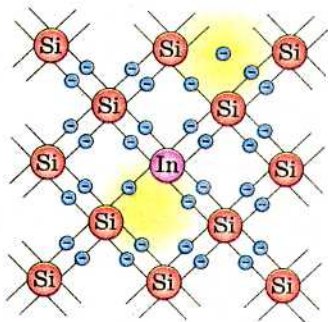


Рис. 23.5. Схема будови кристала силіцію із введеними атомами Індію. Кожний атом Індію створює одну дірку

у сусідніх атомів Силіцію. У результаті кожний атом Індію створює одну дірку. Домішки такого роду називаються *акцепторними домішками* (від латин. *acceptor* — той, що приймає).

У напівпровідниках з акцепторними домішками основними носіями заряду є дірки. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками *p-типу* (від латин. *positivus* — позитивний).

Оскільки при наявності домішок кількість вільних заряджених частинок збільшується (кожний атом домішки дає вільний електрон або дірку), то провідність напівпровідників з домішками набагато краща, ніж провідність чистих напівпровідників.

5 Застосовуємо напівпровідники

Широке застосування напівпровідників зумовлене кількома чинниками.

По-перше, властивостями *p-n-переходу* — місця контакту двох напівпровідників — *p*- і *n*-типу. Саме тут спостерігається ряд цікавих явищ. Наприклад, через такий контакт електричний струм добре проходить в одному напрямку і практично не проходить у протилежному. Це явище отримало назву *однобічної провідності*.

Властивості *p-n*-переходу використовують для виготовлення напівпровідникових діодів і транзисторів, без яких не обходиться жодний сучасний електронний пристрій (рис. 23.6), а також у сонячних батареях — приладах для безпосереднього перетворення енергії випромінювання Сонця на електричну енергію.

Слід додати, що застосування напівпровідників у техніці майже на 99 % зумовлене саме властивостями *p-n*-переходу і що докладніше з цими властивостями ви познайомитеся під час подальшого вивчення фізики.

По-друге, опір напівпровідників зменшується зі збільшенням температури, і навпаки. Цю залежність використовують у спеціальних

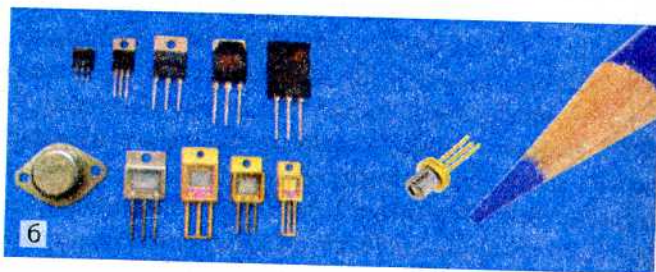
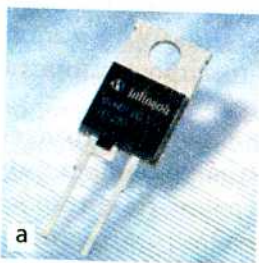


Рис. 23.6. Будь-який сучасний електронний пристрій містить мініатюрні напівпровідникові діоди (а), транзистори (б)

приладах — *терморезисторах*, або *термісторах*, які застосовують для вимірювання температури, підтримування сталої температури в автоматичних пристроях (рис. 23.7).

По-третє, напівпровідники мають властивість змінювати свій опір залежно від освітленості. Ця властивість використовується у напівпровідникових приладах, які називають *фоторезисторами* і застосовують для вимірювання освітленості, контролю якості поверхні та ін. (рис. 23.8).

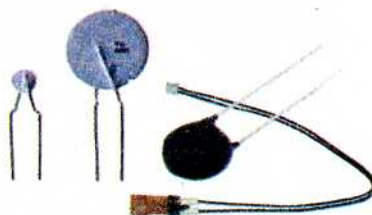


Рис. 23.7. Зовнішній вигляд деяких терморезисторів

! Підбиваємо підсумки

Провідність напівпровідників зумовлена рухом вільних електронів (електронна провідність) і рухом дірок (діркова провідність). У чистому напівпровіднику електричний струм створює однакова кількість вільних електронів і дірок. Таку провідність називають власною провідністю напівпровідників.

За наявності домішок провідність напівпровідників різко збільшується. У разі введення в напівпровідник домішки з більшою валентністю (донорної домішки) вільних електронів стає в багато разів більше, ніж дірок. Такі напівпровідники називають напівпровідниками *n*-типу.

У випадку введення в напівпровідник домішки з меншою валентністю (акцепторної домішки) дірок стає більше, ніж вільних електронів. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками *p*-типу.

Напівпровідники широко використовують у техніці, наприклад для виготовлення напівпровідникових діодів і транзисторів, фотоелементів, термісторів, фоторезисторів тощо.



Рис. 23.8. Деякі фоторезистори, застосовувані на практиці

? Контрольні запитання

1. Чим напівпровідники відрізняються від металів?
2. Який зв'язок називають ковалентним?
3. Як у чистих напівпровідниках з'являються вільні електрони?
4. Поясніть механізм діркової провідності.
5. У чому полягає власна провідність напівпровідників?
6. Чому опір напівпровідників дуже залежить від наявності домішок?
7. Яка домішка називається донорною?
8. Назвіть основні носії зарядів у напівпровідниках *n*-типу.
9. Чи є в напівпровідниках *n*-типу дірки?
10. Яку домішку потрібно ввести, щоб одержати напівпровідник *p*-типу?
11. Якими чинниками зумовлене широке застосування напівпровідників?
12. Де застосовують напівпровідники?