

§ 9. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У НАПІВПРОВІДНИКАХ



Кожен із вас добре знає, як виглядає звичайна лампа розжарювання. Приблизно такий самий розмір мають і вакуумні лампи — діоди і тріоди. А тепер уявіть, що у вашому смартфоні, мікросхема процесора якого містить кілька мільярдів мікротранзисторів, замість транзисторів використали тріоди... Уявили собі розмір такого смартфона? Кілька багатоповерхових будинків! Тепер ви розумієте, чому поява в 1960-х рр. напівпровідникових пристроїв спричинила справжню технічну революцію. Про напівпровідникові пристрої та електричний струм у напівпровідниках ітиметься в цьому параграфі.

1 Якими є особливості провідності напівпровідників

Напівпровідники, як це впливає з їхньої назви, за своєю провідністю посідають проміжне місце між провідниками і діелектриками (рис. 9.1).

У ході вивчення залежності провідності напівпровідників від зовнішніх чинників виявилось:

- 1) на відміну від металевих провідників *питомий опір напівпровідників зазвичай зменшується з підвищенням температури* (рис. 9.2);
- 2) *питомий опір більшості напівпровідників зменшується зі збільшенням освітленості*;
- 3) *різко зменшити питомий опір напівпровідників може введення домішок*.

Саме ці властивості забезпечили широке застосування напівпровідників.

2 Власна провідність напівпровідників

Розглянемо будову чистих (без домішок) напівпровідників на прикладі силіцію (рис. 9.3). У кристалі силіцію кожен атом Силіцію має чотири валентні електрони, які «відповідають» за зв'язок між сусідніми атомами: атом Силіцію ніби «позичає» своїм сусідам по одному валентному електрону; сусідні атоми, у свою чергу, «позичають» йому свої валентні електрони. У результаті між кожними двома атомами Силіцію утворюється електронна пара «для спільного користування». Такий зв'язок називають ковалентним.

Серед валентних електронів обов'язково є електрони, кінетична енергія яких



Рис. 9.1. Порядок питомого опору матеріалів. Стрілками показано напрям збільшення концентрації вільних заряджених частинок (напрямок збільшення провідності)

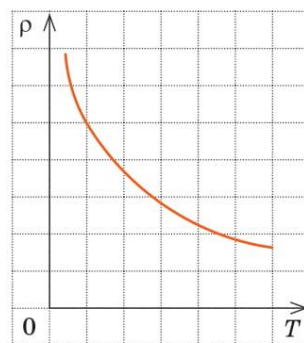


Рис. 9.2. Графік залежності питомого опору ρ напівпровідників від температури T

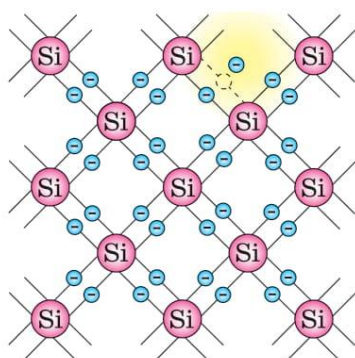


Рис. 9.3. Схематичне зображення ковалентного зв'язку силіцію

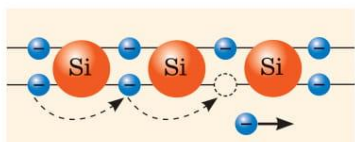


Рис. 9.4. Механізм діркової провідності напівпровідників

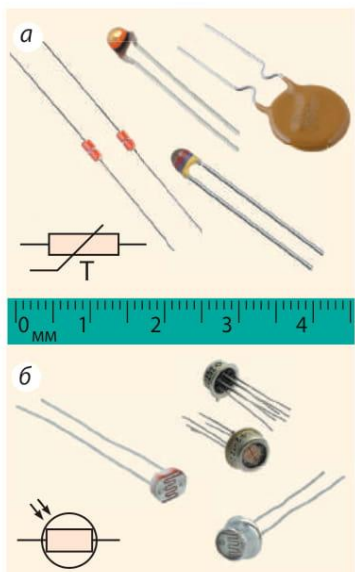


Рис. 9.5. Вигляд і схематичне позначення: термісторів — напівпровідникових терморезисторів (а); фоторезисторів (б)

є достатньою, щоб покинути зв'язки і стати вільними. Один такий електрон показаний на жовтому полі рис. 9.3. 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**.

Ще раз звернемося до рис. 9.3. Після того як електрон «залишив» валентний зв'язок, його місце виявиться «порожнім» — таке місце фізики називають **діркою**. Зрозуміло, що дірці приписують позитивний заряд. На вакантне місце (в дірку) може «перестрибнути» електрон від сусіднього зв'язку. Тоді дірка з'явиться біля сусіднього атома. Послідовність таких «стрибків» виглядає так, ніби дірка (позитивний заряд) переміщується в кристалі (рис. 9.4).

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**.

Якщо напівпровідник нагріти або опромінити світлом, кількість вільних електронів і дірок збільшиться, відповідно збільшиться і провідність напівпровідника.

На залежності провідності напівпровідників від температури ґрунтується дія **термісторів** (рис. 9.5, а), які застосовують для контролю та вимірювання температури, а також у колах захисту електричних пристроїв від перегріву.

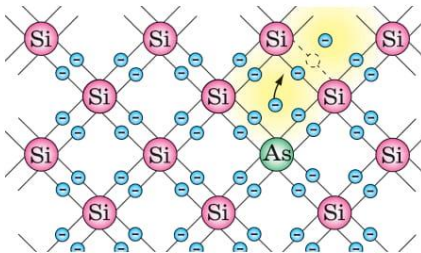
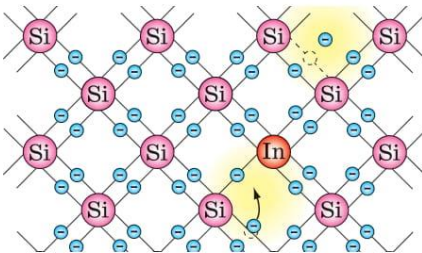
На залежності провідності напівпровідників від освітленості ґрунтується дія **фоторезисторів** (рис. 9.5, б), які застосовують для вимірювання освітленості, у системах сигналізації та автоматики, для сортування виробів тощо. За допомогою фоторезисторів запобігають нещасним випадкам і аваріям, автоматично зупиняючи роботу обладнання в разі порушення процесу.

❓ Як, на вашу думку, працює фоторезистор у пристрої для аварійного вимкнення (або ввімкнення) електричного кола? Де б ви застосували такий пристрій?

3 Чому на провідність напівпровідників впливають домішки

Якщо до чистого напівпровідника додати невелику кількість певної домішки, то механізм його провідності зміниться. Це легко простежити на прикладі силіцію з невеликою кількістю домішки більшої або меншої валентності (Силіцій є чотиривалентним елементом).

Домішкова провідність напівпровідників

Донорні домішки	Акцепторні домішки
Додамо у кристал силіцію домішку п'ятивалентного елемента, наприклад Арсену. Частина атомів Силіцію буде заміщена атомами Арсену. Чотири валентні електрони атома Арсену утворюють парні електронні зв'язки із сусідніми атомами Силіцію; п'ятому валентному електрону зв'язку не вистачить, тому він легко може стати вільним. У результаті майже кожен атом домішки дасть вільний електрон.  Домішки, атоми яких відносно легко віддають електрони, називають донорними домішками (від латин. <i>donare</i> — дарувати, жертвувати). Бачимо, що донорні домішки додають до кристала тільки електрони, а додаткові дірки не утворюються, тому <i>в напівпровідниках із донорними домішками концентрація вільних електронів є значно вищою, ніж концентрація дірок</i>. Напівпровідники з переважно електронною провідністю називають напівпровідниками n-типу (від латин. <i>negativus</i> — негативний).	Додамо у кристал силіцію домішку тривалентного елемента, наприклад Індію. Атом Індію має три валентні електрони, тому він може «встановити зв'язки» тільки з трьома атомами Силіцію. Щоб утримати структуру кристалічної ґратки, відсутній електрон (четвертий) Індій «запозичує» в атомів Силіцію. У результаті кожен атом Індію спричиняє утворення дірки.  Домішки, атоми яких «запозичують» електрони, називають акцепторними домішками (від латин. <i>acceptor</i> — той, що приймає). Бачимо, що акцепторні домішки додають до напівпровідникового кристала тільки дірки, а додаткові вільні електрони не утворюються. <i>У напівпровідниках із акцепторними домішками основні носії струму — дірки</i>. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками p-типу (від латин. <i>positivus</i> — позитивний).

Оскільки за наявності домішок кількість носіїв струму збільшується (кожен атом домішки дає вільний електрон або дірку), провідність напівпровідників із домішками є набагато кращою, ніж провідність чистих напівпровідників.

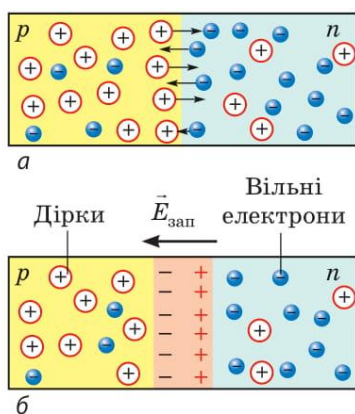
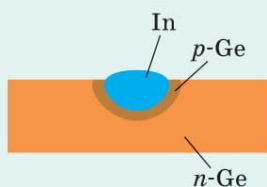


Рис. 9.6. Формування p - n -переходу

Отримання кристалів із p - n -переходом

Щоб отримати p - n -перехід, у напівпровідниковому кристалі слід утворити дві контактні ділянки з різними типами провідності. **Сплавний метод.** На пластинку монокристала з донорною домішкою, наприклад на германій (n -Ge), кладуть шматочок індію і нагрівають до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сплавляючись, германій та індій утворюють тонкий шар напівпровідника p -типу (p -Ge).



Дифузний метод. Кристал з акцепторною домішкою, наприклад силіцій (p -Si), нагрівають до температури близько $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ і спрямовують на його поверхню випари арсену. Атоми Арсену, дифундуючи в поверхневий шар кристалу, утворюють напівпровідник n -типу (n -Si).

4 Як утворюється p - n -перехід

Електронно-дірковий перехід (p - n -перехід) — це ділянка контакту двох напівпровідників із різними типами провідності — дірковою (напівпровідник p -типу) та електронною (напівпровідник n -типу).

Розглянемо процеси, які відбуваються в місці контакту. Відразу після того як відбувся контакт двох напівпровідників із різними типами провідності, починається процес дифузії електронів і дірок. Електрони дифундують у напівпровідник p -типу, і деякі з них рекомбінують із дірками; дірки «дифундують» у напівпровідник n -типу, і деякі з них рекомбінують із вільними електронами. Тобто відбуваються процеси відновлення зв'язків (рис. 9.6, а). Унаслідок цих процесів:

1) у прилеглих до місця контакту ділянках напівпровідників зменшується концентрація вільних носіїв струму (n -ділянка втрачає вільні електрони, p -ділянка — дірки), тому опір ділянки біля місця контакту істотно збільшується;

2) прилегла до місця контакту n -ділянка набуває позитивного заряду; прилегла до місця контакту p -ділянка набуває негативного заряду.

Таким чином, навколо місця контакту формується подвійний *запірний шар* (p - n -перехід), електричне поле якого ($\vec{E}_{\text{зап}}$) перешкоджає подальшій дифузії електронів і дірок (рис. 9.6, б).

5 Чому напівпровідниковий діод має односторонню провідність

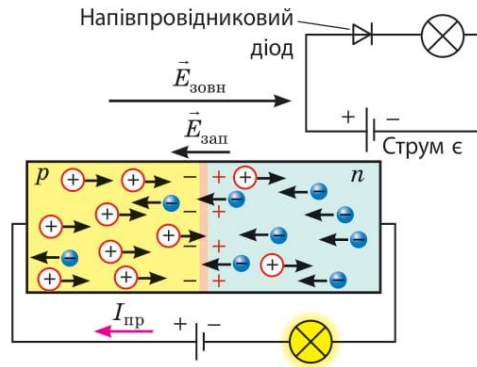
Напівпровідниковий пристрій, у внутрішній будові якого сформований один p - n -перехід, називають **напівпровідниковим діодом**.

Будь-який напівпровідниковий діод складається з двох контактних напівпровідникових ділянок із різними типами провідності — електронною (n -ділянка) і дірковою (p -ділянка); до кожної ділянки приєднано виводи. *Основна властивість напівпровідникового діода — пропускати електричний струм переважно в одному напрямку.* З'ясуємо, чому p - n -перехід має односторонню провідність.

Увімкнення напівпровідникового діода в електричне коло

Пряме увімкнення

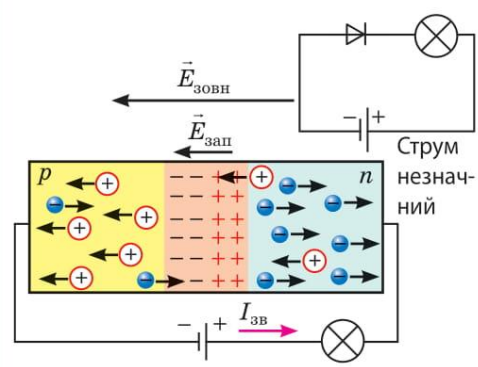
Підключимо кристал із сформованим у ньому p - n -переходом до джерела струму так, щоб p -ділянка була з'єднана з позитивним полюсом джерела, а n -ділянка — з негативним.



Електрони почнуть рух до позитивного полюсу джерела струму, а дірки — до негативного. Запірний шар поповниться вільними електронами і дірками, тому його опір зменшиться. Оскільки через місце контакту рухаються основні носії струму (електрони з n -ділянки, дірки з p -ділянки), яких багато, то в колі існує помітний електричний струм.

Зворотне увімкнення

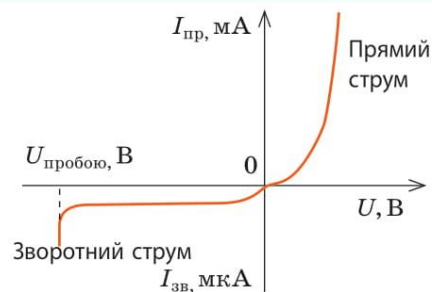
Підключимо кристал із сформованим у ньому p - n -переходом до джерела струму так, щоб p -ділянка була з'єднана з негативним полюсом джерела, а n -ділянка — з позитивним.



Електрони почнуть рух до позитивного полюса джерела струму, дірки — до негативного. Запірний шар розшириться, і його опір збільшиться. Через місце контакту рухаються тільки неосновні носії струму (вільні електрони з p -ділянки, дірки з n -ділянки), яких дуже мало, тому сила зворотного струму незрівнянно менша від прямого.

Зверніть увагу!

1. Напруга запирного шару становить 0,3–0,7 В (залежно від складу напівпровідників), тому в разі прямого увімкнення і за напруги на діоді меншої від цього значення рух основних носіїв струму через p - n -перехід не відбуватиметься.
2. Якщо при зворотному увімкненні напруга на діоді перевищить певне максимальне значення, діод вийде з ладу (відбудеться пробій запирного шару), а його відновлення є неможливим.



Вольт-амперна характеристика (ВАХ) напівпровідникового діода

Оскільки напівпровідникові діоди пропускають електричний струм переважно в одному напрямку, їх, як і лампові (вакуумні) діоди, використовують для випрямлення змінного струму. Напівпровідникові діоди мають низку переваг перед ламповими: вони мініатюрні, їх легше виготовити, а отже, вони дешевші; для їх роботи не потрібно витрачати енергію на нагрівання. Тому в сучасній радіoeлектроніці використовують саме напівпровідникові діоди.



Підбиваємо підсумки

- Провідність напівпровідників зумовлена рухом вільних і зв'язаних електронів (електронна і діркова провідності). У чистому напівпровіднику електричний струм створюється однаковою кількістю вільних електронів і дірок. Таку провідність називають власною провідністю напівпровідників.
 - У разі введення в чистий 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 чистий напівпровідник домішки з меншою валентністю (акцепторної домішки) дірок стає в багато разів більше, ніж вільних електронів. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками *p*-типу.
 - Якщо напівпровідник містить дві дотичні ділянки з різними типами провідності, то на межі дотику утворюється *p-n*-перехід, який має однобічну провідність. Пристрій, у внутрішній будові якого сформований один *p-n*-перехід, називають напівпровідниковим діодом.



Контрольні запитання

1. Якими є основні властивості напівпровідників?
2. Поясніть механізм власної провідності напівпровідників.
3. Як зміниться опір чистого напівпровідника, якщо додати домішку?
4. Яку домішку називають донорною?
5. Яку домішку потрібно ввести, щоб одержати напівпровідник *p*-типу?
6. Як можна виготовити кристал із електронно-дірковим переходом?
7. Чому напівпровідниковий кристал із *p-n*-переходом має однобічну провідність?
8. Що таке напівпровідниковий діод? Наведіть його позначення на електричній схемі.



Вправа № 9

1. Які з наведених тверджень є істинними?
 - А Напівпровідник з акцепторною домішкою є напівпровідником *p*-типу.
 - Б Провідність напівпровідників збільшується зі збільшенням освітленості.
 - В Опір *p-n*-переходу залежить від напрямку струму.
2. На рис. 1 наведено схему прямого ввімкнення напівпровідника з *p-n*-переходом у коло постійного струму. Якою є полярність підключення джерела струму до клем А і В?
3. Електричне коло (рис. 2) складається з п'яти однакових резисторів опором 2 Ом, двох ідеальних діодів та ідеального джерела струму (опори діодів і джерела струму дорівнюють нулю). Визначте: 1) загальний опір кола; 2) відношення сили струму в колі до сили струму після зміни полярності підключення джерела струму.
4. Електрична схема, зображена на рис. 3, має назву *діодний міст*. Дізнайтесь, як «працює» ця схема і для чого вона призначена.

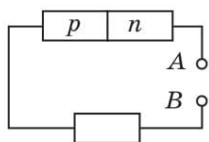


Рис. 1

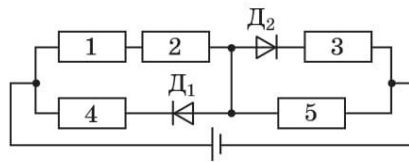


Рис. 2

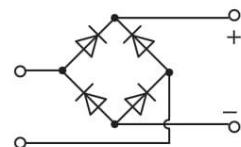


Рис. 3