

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

І.П. Гаркуша

Елементи фізики напівпровідників

(полегшений варіант)

Навчальний посібник

Дніпро
2022

УДК 53(075.4)

Г 45

Рекомендовано Вченою радою НТУ «Дніпровська політехніка» як навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Протокол № XX від XXX

Гаркуша І.П.

Г 45 Елементи фізики напівпровідників (полегшений варіант) (Текст): навчальний посібник:– Д.: Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» , 2022.– XX с.

Навчальний посібник призначений для самостійної роботи студентів технічних спеціальностей університетів. Посібник містить виклад основних уявлень фізики напівпровідників. Розглянуто електронно-діркові переходи, випрямлення та посилення змінних струмів за допомогою *p-n*- переходів, принцип дії напівпровідникових пристроїв – випрямного діода, транзистора, світлодіода, сонячного елемента.

Строгий виклад електронної теорії твердотільних напівпровідників можливий лише на основі квантових уявлень. Проте, в умовах дуже обмеженого навчального часу, що відводиться навчальними планами багатьох спеціальностей технічного університету на вивчення дисципліни «Фізика», полегшений варіант цього розділу програми є необхідним.

Навчальний посібник може бути використаний як доповнення до існуючих підручників, розрахований на студентів денної та заочної форми навчання, може бути також корисним викладачам кафедр фізики технічних університетів.

Для фундаментального вивчення цього розділу програми рекомендується підручник Птащенко О.О. «Фізичні засади твердотільної електроніки», Одеса, 2011.

ЗМІСТ

§ 1. Вступ. Електронна будова металів, діелектриків та напівпровідників.....	4
§ 2. Напівпровідники. Власна провідність напівпровідників.....	6
§ 3. Домішкова провідність напівпровідників.....	10
§ 4. Контакт p - та n - напівпровідників. Властивості p - n - переходу.....	12
§ 5. Пряме та зворотне зміщення p - n - переходу.....	14
§ 6. Випрямлення змінних струмів за допомогою p - n - переходу. Напівпровідниковий випрямний діод.....	17
§ 7. Світловипромінювальний діод.....	21
§ 8. Підсилення змінних струмів за допомогою p - n - переходів. Транзистор	24
§ 9. Сонячні елементи.....	26
Рекомендована література.....	29

§ 1. Вступ. Електронна будова металів, діелектриків та напівпровідників

Властивості напівпровідників можна описати на основі електронної будови твердих кристалічних тіл.

Тверде тіло є сукупністю окремих атомів, хімічні зв'язки між якими об'єднують їх у кристалічну решітку. За типами зв'язку тверді тіла діляться на кілька класів, кожен з яких характеризується певним просторовим розподілом електронів.

При утворенні кристалічних ґрат *металу* частина валентних електронів відривається від своїх атомів. Електрони, як заведено говорити, узагальнюються, вони не належать тепер жодному конкретному іону металу і можуть вільно переміщатися під дією зовнішнього електричного поля, утворюючи електричний струм.

Кристалічні ґрати металу утворені не нейтральними атомами, а позитивно зарядженими іонами (рис.1). Метал можна уявити собі у вигляді регулярної просторової решітки з позитивних атомних залишків, яка занурена в «електронний газ» негативних електронів провідності.

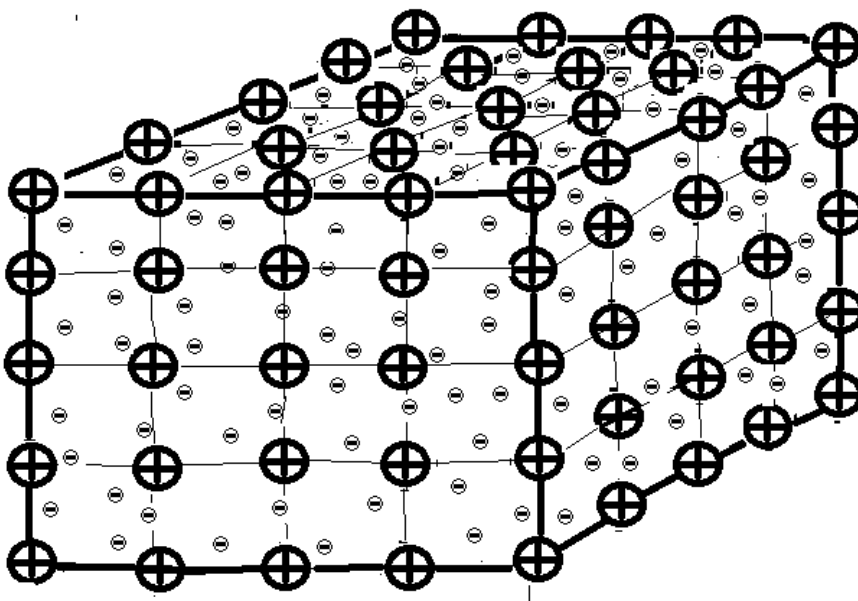


Рис. 1.

приблизно 10^{22} вільних електронів.

Велика кількість вільних електронів провідності зумовлює такі специфічні властивості металів, як високу електро- і тепло провідність, блиск, відбиття електромагнітних хвиль, ковкість тощо.

Використовуючи термін «вільний електрон», необхідно пам'ятати, що по справжньому вільний електрон може бути тільки у вакуумі. Якщо на нього не діє електричне поле, він не відчуває жодних зовнішніх впливів. Під дією зовнішнього електричного поля напруженістю E вільний електрон у вакуумі рухається із постійним прискоренням $a = eE/m$. У кристалі ж електрон у результаті

Цей газ вільних електронів заповнює кристалічну решітку та компенсує сили взаємного електростатичного відштовхування позитивних іонів і цим пов'язує їх у тверде тіло.

Наявність вільних електронів у металах підтверджується явищами провідності електричного струму та електронної емісії. У кожному кубічному сантиметрі металу міститься

частих зіткнень навіть у дуже сильних електричних полях рухається проти поля зі швидкістю, що не перевищує $(1\div 3)\cdot 10^5$ м/с. Отже термін «вільний електрон» використовується у сенсі його здатності спрямовано рухатися під впливом електричного поля, обумовлюючи електричний струм.

Зовсім інший характер зв'язків між атомами, що утворюють кристали *діелектрика* та *напівпровідника*. Кристалічна ґратка діелектрика і напівпровідника утворена нейтральними атомами. Оскільки в кристалі атоми зближені на відстань порядку розмірів самого атома, то електронні оболонки атомів сильно перекриваються і відбувається безперервний перехід валентних електронів від одного атома до іншого.

Як приклад розглянемо кристалічну решітку Силіцію, схематично зображену на рис. 2. Чотири електрони з восьми, що утворюють замкнуту електронну оболонку деякого атома Силіцію (довільно обраний атом виділено на схемі), належать самому атому, решта чотири – від сусідніх у кристалічній решітці атомів. Але атом Силіцію не відбирає ці електрони у сусідів: вони проводять біля виділеного нами атома лише частину часу, іншу частину вони проводять біля «свого» атома. З іншого боку, валентні електрони атома, що розглядається, тепер проводять біля нього лише частину часу, іншу частину – біля сусідніх атомів. Такий електронний обмін призводить до утворення міцного *ковалентного зв'язку*.

Щоб розірвати електронні зв'язки між атомами та створити таким чином вільні електрони, необхідно витратити енергію. Електронні зв'язки можуть бути розірвані за рахунок теплових коливань ґрат, за рахунок опромінення фотонами відповідної частоти та іншими способами. Але за досить низької температури такий кристал є ідеальним ізолятором (діелектриком).

Енергію, необхідну для розриву електронного зв'язку, позначають символом

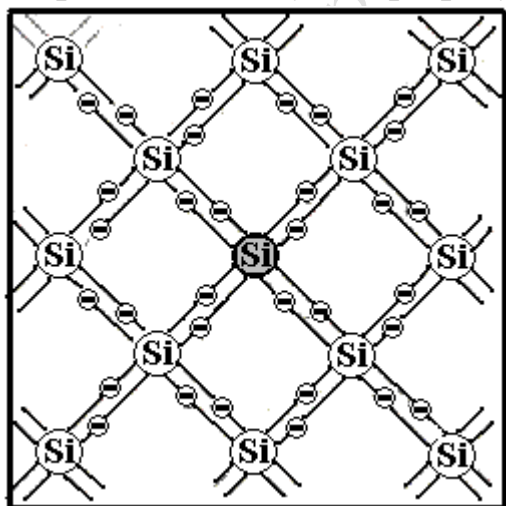


Рис. 2.

E_g . Для різних кристалів вона змінюється в межах від нуля до десятка електрон-вольт.

У *металах* концентрація електронів не залежить від температури. Навіть за температури

$T = 0$ К всі електрони залишаються вільними і зберігають здатність проводити струм.

У типовому *діелектрику* з великим значенням E_g (> 3 еВ), наприклад, кварці, алмазі та ін, тепловий рух не здатний розірвати електронні зв'язки і збільшити концентрацію електронів.

У матеріалах із невеликим значенням E_g нагрівання навіть до не дуже високої температури призведе до розриву великої кількості електронних зв'язків і появи вільних електронів. Концентрація вільних носіїв струму дуже різко залежатиме від температури. Цей клас речовин називається *напівпровідниками*.

Значення E_g для типових напівпровідників становить ≈ 1 еВ. Так, для антимоніду індію (InSb) значення $E_g = 0,18$ еВ, для Германію (Ge) $E_g = 0,67$ еВ, для Силіцію (Si) $E_g = 1,1$ еВ, Арсеніду галію (GaAs) $E_g = 1,4$ еВ. У потрібному

напівпровідниковому з'єднанні GaAlAs, що є матеріалом для світлодіодів та лазерів, E_g лежить у межах від 1,4 еВ до 2,17 еВ.

§ 2. Напівпровідники. Власна провідність напівпровідників

Нагадаємо, що *питома електропровідність* (або часто кажуть просто електропровідність) σ – це фізична величина, яка характеризує перенесення зарядів у речовині під дією зовнішнього електричного поля. Числове значення електропровідності обернено до питомого електричного опору:

$$\sigma = 1/\rho.$$

Якщо *питомий опір* ρ вимірюється в Ом·м («омометрах»), то електропровідність вимірюється в Ом⁻¹ м⁻¹. Для зручності в електротехніці вводять величину, обернену Ом⁻¹, та називають її на честь відомого електротехніка Сименс (См = 1/Ом).

Отже, електропровідність вимірюють у Сименсах на метр ($[\sigma] = \text{См/м}$).

За величиною електропровідності прийнято поділяти тверді тіла на три основні класи (рис. 3):

- діелектрики (або ізолятори), для яких питома електропровідність $\sigma < 10^{-12}$ См/м
- напівпровідники - $10^5 > \sigma > 10^{-12}$ См/м ;
- метали - $\sigma > 10^5$ См/м.

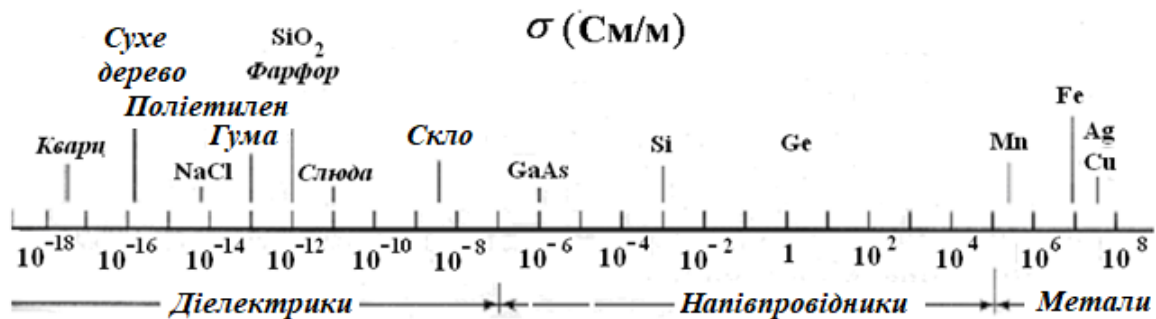


Рис. 3.

Напівпровідники, таким чином, представляють проміжний за електропровідністю клас речовин дуже різноманітної хімічної природи між металами та діелектриками. До них відносяться передусім *атомарні*, або елементарні напівпровідники (Германій - Ge, Силіцій (або кремній) - Si, Селен - Se, Телур - Te), *хімічні сполуки* або інтерметаліди (GaAs - арсенід галію, CdS – сульфід кадмію і т.д.); так звані *тверді розчини* ($\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}$, Sb , $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}$ Te и т.п.); ряд органічних з'єднань і ін.

Проте характерною особливістю напівпровідників є зростання їхньої електропровідності, а отже і концентрації носіїв струму зі зростанням температури. З підвищенням температури T питома електропровідність $\sigma = 1/\rho$ напівпровідників різко зростає за експоненціальним законом

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g/2kT} \quad (1)$$

де E_g – так звана енергія активації власної провідності (у зонній теорії провідності - ширина забороненої зони), k – стала Больцмана, σ_0 – деякий коефіцієнт.

В металах навпаки з підвищенням температури зростає електричний опір, а отже, зменшується електропровідність. У цьому полягає важлива відмінність напівпровідників від металів.

Електропровідність напівпровідників сильно змінюється також під дією світла, електричних та магнітних полів, додавання малої кількості домішок та інших факторів. Можливість в широких межах керувати електропровідністю напівпровідників зміною температури, введенням домішок і т.д. є основою їх численних застосувань.

За високих температур напівпровідники по електропровідності наближаються до металів, а за низьких температур є хорошими ізоляторами.

У природі напівпровідники існують у вигляді **елементів**, наприклад, Силіцій (або Кремній) Si, Германій Ge, Арсен As, Галій Ga, Індій In, α -Sn (сіре олово), Селен Se, Телур Te та ін., та **хімічних сполук**, наприклад сульфід кадмію CdS, сульфід свинцю PbS, арсенід галію GaAs та ін.

Елемент Германій став першим застосовуватися в напівпровідниковій техніці. **Германій** $^{74}_{32}\text{Ge}$ - дуже розсіяний в земній корі. Зазвичай з'єднання Германію входять до складу інших мінералів як домішка у невеликих кількостях.

Добувається із золи кам'яного вугілля та відходів виробництва кольорових металів. Густина Германію $5,33 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, температура плавлення $937 \text{ }^\circ\text{C}$.

В теперішній час германієві діоди та транзистори практично повністю витіснені силіцієвими, в електроніці Германій використовується більше як складова частина структур SiGe.

Напівпровідник **Силіцій** ($^{28}_{14}\text{Si}$) (від латинського *silex* – кремін) – на противагу Германію, це один з найпоширеніших елементів земної кори (29,5%). Однак у вільному стані він у природі не зустрічається, а присутній лише у вигляді кремнезему SiO_2 (звичайний пісок) – найпоширенішої сполуки на Землі – і силікатів (глина, шпати, сланці). Пісок та глина, утворюють мінеральну частину ґрунту,

Силіцій у чистому вигляді одержують прожарюванням дешевої та доступної сировини – піску - з кам'яновугільним коксом ($\text{SiO}_2 + 2 \text{ C} = 2 \text{ CO} + \text{ Si}$). Потім в електричних печах з розплаву вирощують кристали Силіцію. Густина Силіцію $2,33 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, температура плавлення $1417 \text{ }^\circ\text{C}$.

Нині Силіцій є основним матеріалом напівпровідникової електроніки.

Розрізняють бездомішкові напівпровідники з власною провідністю (**власні напівпровідники**) та леговані напівпровідники з домішковою провідністю (**домішкові напівпровідники**).

Власними напівпровідниками є хімічно чисті (концентрація домішок чужорідних атомів близько 0,001%) напівпровідники. У них концентрація вільних носіїв струму визначається лише температурою і власною, властивою лише даному напівпровіднику енергією активації E_g .

Розглянемо для конкретності практично найважливіший напівпровідник – Силіцій. Атоми Силіцію належать до IV групи періодичної системи елементів

Менделєєва. Вони мають чотири електрони у наполовину заповненій зовнішній електронній оболонці. У твердому стані атоми Si утворюють кристалічну решітку, в якій кожен атом пов'язаний ковалентними (парно-електронними) зв'язками з чотирма сусідніми атомами (тетрагональна структура алмазу, рис. 4).

Взаємне розташування атомів Силіцію можна уявити у вигляді двовимірної структури, зображеної на рис. 5. Кружечки з написом "Si" позначають атоми Силіцію, кружечки зі знаком "-" позначають валентні електрони, подвійні лінії - ковалентні зв'язки.

Поблизу абсолютного нуля температури у кристалі Силіцію всі електрони зайняті в утворенні зв'язків. Такий кристал електричного струму не проводить. За досить високої температури тепловий рух може розірвати окремі пари, звільнивши один електрон.

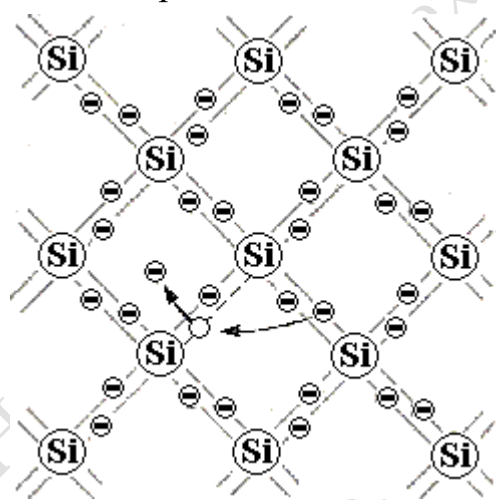


Рис. 5.

Тоді в кристалі виникнуть *вільні електрони* - електрони провідності, здатні спрямовано рухатися під дією електричного поля, утворюючи електричний струм.

Залишене електроном місце перестає бути нейтральним, в його околиці виникає надлишковий позитивний заряд $+e$. Таке «порожнє» місце з відсутнім електроном зв'язку отримало назву «*дірки*» - квазічастинки з позитивним зарядом $+e$ (вона зображена на рис. 5 білим кружком).

На місце дірки може перескочити електрон однієї із сусідніх пар. В результаті дірка переміщується в протилежний бік і починає також хаотично переміщатися по кристалу, як

і електрон, що звільнився.

На рис. 6 зображена схема послідовного (зверху вниз) положення ряду атомів у кристалі. Кружком з плюсом позначений атом Силіцію, в околиці якого виникає позитивний заряд внаслідок втрати електрона. Вигнута стрілка показує перехід електрона від сусіднього атому. Послідовність таких переходів призводить до руху вздовж кристалу вільного, не зайнятого електроном стану - ніби дірка (позитивний заряд) переміщується в кристалі.

Якщо до кристалу прикласти зовнішнє електричне поле (позначено літерою E на рис.6), то як відомо з електростатики, електрони ($-e$) починають рухатись проти поля, а дірки ($+e$) - вздовж поля.

Обидва рухи призводять до перенесення заряду вздовж кристала, тобто, до виникнення струму.

Слід підкреслити, що електрон - це реальна ча-

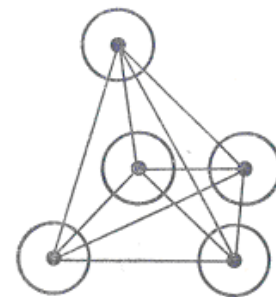


Рис. 4.

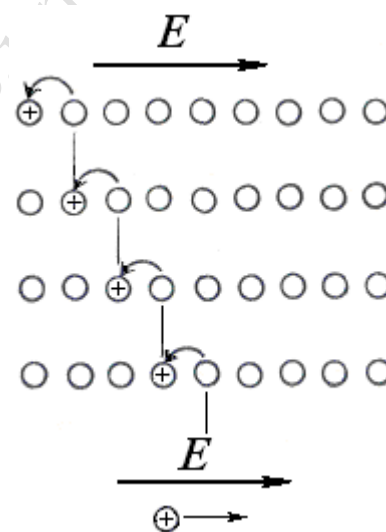


Рис. 6.

стинка, а дірка – це фіктивна частинка (*квазічастинка*). Електрон можна видалити з напівпровідника назовні (наприклад, за допомогою фотоєфекту), дірка ж може існувати тільки всередині напівпровідника.

Якщо вільний електрон зустрінеться з діркою, вони **рекомбінують** (з'єднуються). Це означає, що електрон нейтралізує надлишковий позитивний заряд, що є в околу дірки, і втрачає свободу пересування доти, поки знову не отримає від кристалічної решітки енергію, достатню для свого звільнення. **Рекомбінація** призводить до **одночасного зникнення вільного електрона та дірки**. При цьому надлишок енергії може виділятися як випромінювання. Можлива також безвипромінювальна рекомбінація, за якої енергія передається кристалічній решітці або рухомих носіям заряду.

У напівпровіднику йдуть одночасно два процеси: *народження* попарно вільних електронів і дірок і *рекомбінація*, що призводить до попарного зникнення електронів і дірок. Кожній температурі відповідає певна рівноважна концентрація електронів і дірок.

Таким чином, **власна електропровідність** обумовлюється носіями зарядів двох знаків - *негативними (електронами) і позитивними (дірками)*.

Провідність власних напівпровідників, **обумовлена електронами**, називається **електронною провідністю** або **провідністю *n*-типу** (від лат. negative – негативний).

Провідність власних напівпровідників, **обумовлена квазічастинками - дірками**, називається **дірковою провідністю** або **провідністю *p*-типу** (від лат. positive - позитивний).

Підсумовуючи можна сказати, що **провідність чистих напівпровідників є провідністю змішаного типу – електронно-дірковою**.

Вільні електрони та «дірки» з'являються в процесі іонізації атомів, з яких побудований весь кристал. Власний напівпровідник містить електрони та дірки в однаковій кількості.

Контрольні питання

1. Що таке власна провідність напівпровідника? Як змінюється електропровідність напівпровідника зі зростанням температури?
2. У чому зміст поняття "дірка" як носія струму у напівпровіднику? Як утворюються дірки у напівпровіднику? Які їхні властивості? Чи існують дірки поза напівпровідником?
3. Чому дорівнює найменша енергія e_{\min} утворення пари електрон - дірка у власному напівпровіднику, провідність якого зростає в $\mu = 2,01$ разів з підвищенням температури від $T_1 = 300$ К до $T_2 = 310$ К?
4. Чим відрізняються механізми електропровідності металів (за класичною електронною теорією) та напівпровідників?
5. Чи однаково поводить себе питомий опір провідників і напівпровідників з зростанням температури?

§ 3. Домішкова провідність напівпровідників

Домішкова провідність виникає, якщо деякі атоми даного напівпровідника замінити у вузлах кристалічних ґрат атомами, валентність яких відрізняється на одиницю від валентності основних атомів. Таке контрольоване введення у напівпровідник невеликих кількостей матеріалів з відомими властивостями називають *легуванням*. Воно досягається сплавленням, дифузією, іонною імплантацією та іншими способами.

Нехай *валентність домішки на одиницю більша*, ніж валентність основних атомів. Такою домішкою в Силіції можуть бути, наприклад, Фосфор (*P*), Арсен (*As*) або Сурма (*Sb*).

На рис. 7 умовно зображені двовимірні ґрати Силіцію, в якій один з атомів 4-валентного Силіцію замінений атомом 5-валентного Фосфору.

Атом Фосфору містить у зовнішній оболонці зайвий у порівнянні з Силіцієм електрон. Чотири із п'яти валентних електронів атома Фосфору утворюють ковалентний зв'язок з найближчими атомами Силіцію.

Отже, п'ятий валентний електрон виявляється зайвим і легко відщеплюється від атома за рахунок енергії теплового руху, утворюючи мандруючий вільний електрон – електрон провідності.

Енергія ΔE_i , яка потрібна щоб розірвати зв'язок п'ятого електрона з атомом фосфору і перетворити його на вільний електрон становить приблизно 0,01 еВ. Це набагато менше, ніж енергія $\Delta E = 1,1$ еВ, яку потрібно витратити, щоб розірвати зв'язок між атомами основної речовини - Силіцію - та утворити електронно-діркову пару. Тому майже всі п'ятивалентні домішкові атоми фосфору будуть всі іонізовані і віддадуть «зайвий» електрон.

Поява вільних електронів не пов'язана з утворенням дірок. Якщо все ж таки десь і розірветься за рахунок теплового руху зв'язок в основній решітці кристала силіцію, то електрони, що утворилися з пар «електрон-дірка», поповнять і без того велику кількість вільних електронів, а дірки, що утворилися, будуть у меншості. Дірки у даному разі називають *неосновними* носіями струму, а електрони – *основними*.

Концентрація основних носіїв струму – електронів у цьому зразку може на кілька порядків перевищувати концентрацію неосновних носіїв – дірок.

Наприклад, у Силіції *n*-типу за кімнатної температури та концентрації електронів 10^{15} 1/см³ концентрація дірок становить лише $\sim 10^5$ 1/см³.

Порівняємо власну концентрацію електронів та концентрацію електронів, створену атомами домішки.

Хімічно чистою називають речовину, в якій міститься один сторонній атом на 1000 власних (тобто концентрація домішок $\sim 0,1\%$). Нагадаємо, що в одному кубічному сантиметрі кристалічної речовини міститься $\sim 10^{22}$ атомів. Тоді навіть у разі концентрації домішок 0,001% у кожному кубічному сантиметрі речовини утримуватиметься близько 10^{17} сторонніх атомів. Оскільки домі-

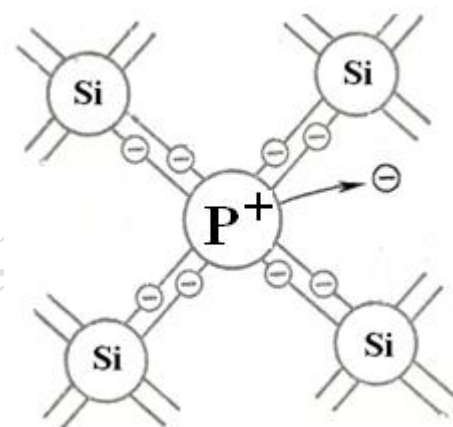


Рис. 7.

шкові атоми порівняно легко віддають електрони, то, як показують розрахунки, при кімнатній температурі Германій міститиме створених домішкою електронів приблизно в $4 \cdot 10^3$ разів більше, ніж власних, Силіцій - у 10^7 разів більше, фосфід Галію - в 10^{17} разів більше.

Таким чином, число електронів з електронно-діркових пар, які народжуються під дією теплового руху, є дуже малим в порівнянні з числом електронів від домішкових атомів. Інакше кажучи, *домішкова електронна провідність виявляється домінуючою у порівнянні з власною* (електронною і дірковою).

У вузлі, який займає атом фосфору, утворюється результуючий позитивний заряд. Цей позитивний заряд пов'язаний з іоном фосфору і переміщатися ґратами не може. Завдяки цьому заряду атом фосфору може захопити електрон, що наблизився до нього, але зв'язок захопленого електрона з атомом буде неміцним і легко порушується знову за рахунок теплових коливань решітки.

Атоми домішки, що постачають електрони провідності, називаються **донорами** (тобто такими, що віддають електрон). Напівпровідник, в який введена донорна домішка і в якому як носії заряду переважають електрони, називають **електронним** або **напівпровідником n-типу**.

Припустимо тепер, що у решітку Силіцію (Si) введено домішковий атом, валентність якого **на одиницю менша**, ніж валентність основних атомів. Це можуть бути атоми Бору (B), Алюмінію (Al), Галію (Ga) або Індію (In) з трьома валентними електронами (рис. 8).

Трьох валентних електронів, наприклад, атома бору недостатньо для утворення зв'язків з усіма чотирма сусідами. Тому один із ковалентних зв'язків виявиться незавершеним і буде місцем, здатним захопити електрон.

Щоб електрон від сусіднього атома Силіцію перейшов до атома бору, необхідно йому надати енергію - енергію активації, яка для атома бору в Si становить $\sim 0,045$ еВ. Якщо теплові коливання решітки нададуть електрону цю енергію, то електрон із сусіднього атома Силіцію перейде до атому бору.

При цьому утворюється порожній зв'язок у атома Силіцію і виникає дірка - вільний носій позитивного заряду.

На рис. 8 суцільними стрілками показано реальний рух електрона, а штриховою стрілкою - рух дірки.

У той же час надлишковий негативний заряд, який виникає поблизу атома бору, що приєднав електрон (негативного іона бору), пов'язаний з іоном бору і ґратами переміщатися не може.

Атоми домішки, що спричиняють виникнення дірок, називаються **акцепторами** (тобто такими, що приєднують електрон).

Напівпровідник з акцепторною домішкою має **діркову провідність** або є **напівпровідником p-типу**.

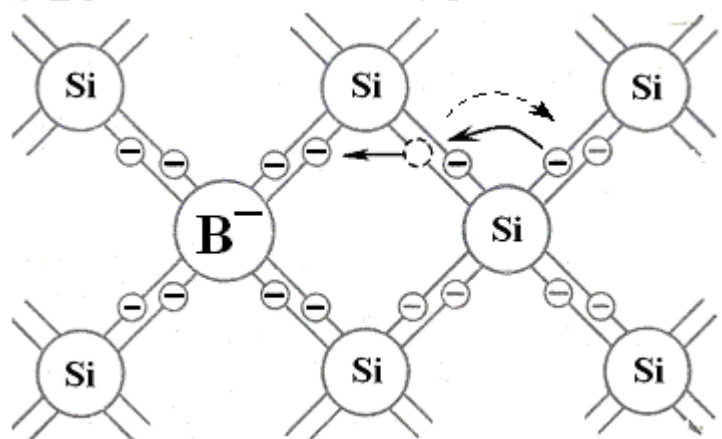


Рис.8.

Так само, як і у випадку напівпровідників *n*-типу, за рахунок розриву ковалентного зв'язку, можуть народжуватися пари носіїв струму. Тому в напівпровіднику *p*-типу з'являються також вільні електрони. Дірки, концентрація яких у даному випадку більше, є основними носіями струму, а електрони - неосновними.

Контрольні питання

1. Навіщо до напівпровідника додають домішки? Якою є головна властивість домішкового напівпровідника?
2. У кристал германію введені домішки. Електропровідність якого типу (*p*- або *n*-) матиме отриманий кристал, якщо введені домішки: а) індія; б) сурми?
3. Як змінюється внесок власної та домішкової електропровідності в повну електропровідність напівпровідника з підвищенням температури?
4. Які елементи додають до напівпровідника для підвищення концентрації електронів? Дірок?

§ 4. Контакт *p*- та *n*- напівпровідників. Властивості *p*- *n*- переходу

Контакт двох домішкових напівпровідників із провідністю різних типів називають електронно-дірковим переходом або *p* – *n* – переходом. Це основний структурний елемент напівпровідникових приладів. На властивостях таких переходів заснований принцип дії численних напівпровідникових приладів, які широко застосовуються у обчислювальній, електро- та радіотехніці та електроніці.

Розглянемо в загальних рисах фізичні процеси, які відбуваються у *p* – *n* – переході.

Нехай дві ділянки напівпровідника з провідностями різного типу розділяє плоска межа (рис. 9): ліворуч розміщений напівпровідник *p*-типу, праворуч – напівпровідник *n*-типу.

У *p*-області іони акцепторної домішки (наприклад, іони бору B^- з попереднього прикладу) позначені кружком зі знаком мінус, поруч білою точкою позначена дірка.

Відповідно, в *n*-області іони донорної домішки (наприклад, іони фосфору P^+ з попереднього прикладу) поз-

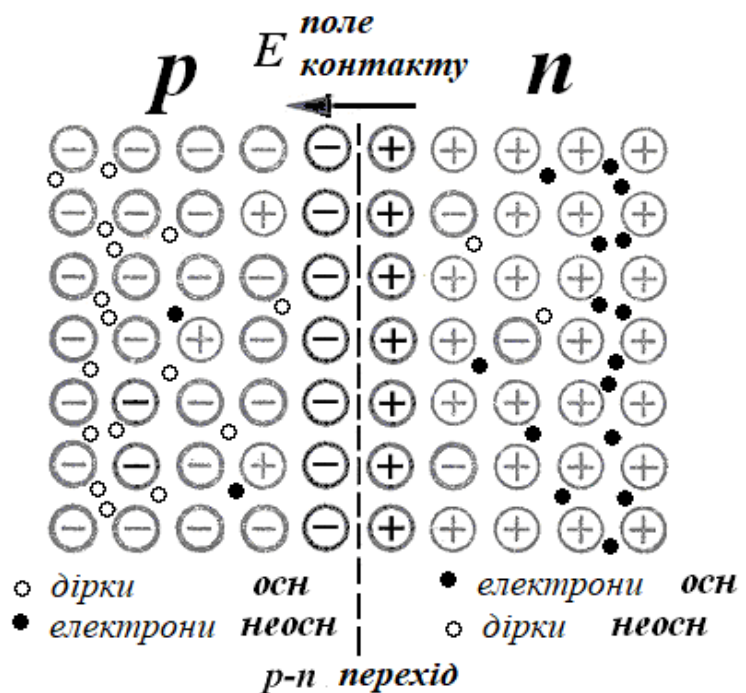


Рис. 9

начені кружком зі знаком плюс, поруч чорною точкою позначений електрон.

Іони домішок містяться у вузлах кристалічних ґрат (фіксовані), а дірки та електрони можуть переміщатися по кристалу.

Носії заряду, концентрація яких у даному напівпровіднику більша, називають *основними*, а носії, концентрація яких менша – *неосновними*. Концентрація основних носіїв набагато більша, ніж концентрація неосновних носіїв (приблизно в 10^6 разів).

У *p*- області основними носіями струму є дірки. Проте, у цій області є також невелика кількість неосновних носіїв – електронів.

Відповідно, в *n*- області основні носії заряду - електрони, а неосновні носії - невелика кількість дірок.

Внаслідок значної відмінності в концентрації електронів та дірок по різні боки від переходу відбувається *дифузія* – потік носіїв з області з більшою концентрацією в область із меншою концентрацією.

Дірки з *p*- області, де їх концентрація вища, дифундують (інжектуються) в *n*-область, де концентрація дірок нижча. Електрони дифундують у протилежному напрямку – у напрямку $n \rightarrow p$.

Дифундуючи у зустрічних напрямках через прикордонний шар, дірки та електрони рекомбінують (з'єднуються) один з одним у приконтатній області.

Дірки, інжектовані в *n*-область, інтенсивно рекомбінують з електронами, концентрація яких у *n*-області є великою. Внаслідок цього нові дірки можуть входити з *p*- в *n*- область.

Те саме має місце для електронів, які інжектуються з *n*- області в *p*- область.

Рекомбінація призводить до зникнення пари електрон провідності - дірка.

Такий зустрічний процес дифузії заряджених частинок еквівалентний електричному струму $I_{\text{осн}}$ через *p-n*- перехід, який проходить з *p*- області в *n*- область. Цей **струм основних носіїв заряду називається дифузійним**.

Дифузійний потік дірок призводить до збіднення дірками області *p*- напівпровідника, що прилягає до переходу (рис. 9). У *p*- області після відходу дірок поблизу межі розділу залишаються нерухомі негативні іони акцепторної домішки, заряд яких тепер не компенсується дірками. Вони утворюють шар негативно заряджених іонів (рис. 9).

Дифузійний потік електронів призводить до збіднення електронами області *n* - напівпровідника, що прилягає до переходу. У *n*-області внаслідок відходу електронів поблизу межі розділу залишаються нерухомі позитивні донорні іони, заряд яких тепер не компенсується електронами. Вони утворюють шар позитивно заряджених іонів, який прилегає до шару негативних іонів (рис. 9).

Таким чином, в *p-n*- переході виникає **подвійний електричний шар** просторового заряду. Електричне поле переходу направлено від позитивних зарядів до негативних, тобто. із шару *n* до шару *p*. Контактне електричне поле створює потенціальний бар'єр – так звану **контактну різницю потенціалів** між суміжними шарами.

Контактна різниця потенціалів $\Delta\phi$ зазвичай становить десяті частки вольта. Для германієвого переходу $\Delta\phi \approx 0,4$ В, для кремнієвого переходу $\Delta\phi \approx 0,6$ В

Напруженість електричного поля подвійного шару контакту E направлена від n - до p - напівпровіднику (рис. 9). Це поле відштовхуватиме дірки p - області вліво від межі поділу напівпровідників, а електрони n - області - вправо від цієї межі. **Контактне поле** перешкоджає подальшому переходу дірок – праворуч, а електронів – ліворуч, тобто. **перешкоджає дифузійному струму основних носіїв струму.**

Зате подвійний електричний шар у p - n - переході **сприяє** зустрічному **руху неосновних носіїв** заряду – дірок з n - області та електронів із p - області. Такий «дрейф» заряджених частинок через перехід є електричним струмом неосновних носіїв $I_{\text{неосн}}$, який спрямований протилежно дифузійному струму і називається **дрейфовим.**

У результаті двох процесів, що діють у протилежні сторони - дифузії та руху зарядів в електричному полі - встановлюється стаціонарний (який не залежить від часу) стан.

В умовах термодинамічної рівноваги, яка встановлюється в p - n - переході, якщо до нього не прикладена зовнішня різниця потенціалів, дифузійний струм $I_{\text{осн}}$ за величиною точно дорівнює дрейфовому $I_{\text{неосн}}$, обидва струми компенсують один одного і **повний струм через перехід дорівнює нулю.**

Область p - n - переходу збіднена рухомими носіями заряду, оскільки тут завдяки зустрічному потоку електронів і дірок відбувається їх інтенсивна рекомбінація. З цієї причини область p - n - переходу має набагато більший питомий електричний опір, ніж весь кристал напівпровідника, і тому називається «**запірним шаром**».

Товщина шару p – n - переходу становить близько одного мікрметра, а контактна різниця потенціалів – десятки частки вольт.

Контрольні питання

1. Що називають основними та неосновними носіями заряду?
2. Як діє електричне поле контакту на основні та неосновні носії заряду?
3. Які два конкуруючі процеси компенсують дію один на одного в p - n - переході в стані рівноваги?
4. Як утворюється дифузійний струм? Дрейфовий струм?
5. Чому p - n - перехід називають запірним шаром?

§ 5. Пряме та зворотне зміщення p - n - переходу

Опір запірного шару можна змінити за допомогою зовнішнього електричного поля. При цьому можливі два варіанти.

1. **Пряме зміщення.** Прикладемо до p - n - переходу зовнішню напругу так, щоб позитивний полюс джерела напруги (+) був поданий на p - область, а негативний полюс джерела (-) був подано на n - область (**режим прямого зміщення**, рис. 10).

При цьому зовнішнє електричне поле $E_{\text{зовн}}$, яке створюється джерелом в кристалі, буде спрямоване протилежно до поля контактного запірнього шару $E_{\text{конт}}$. Зовнішнє поле викличе рух дірок з області p - напівпровідника та електронів з області n - напівпровідника до межі $p-n$ - переходу (рис. 10).

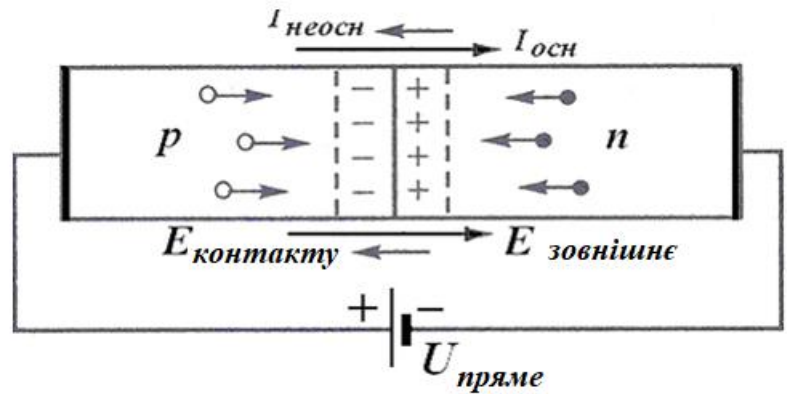


Рис. 10

Як тільки основні носії пройдуть електронно-дірковий перехід, вони стають неосновними. Тому концентрація неосновних носіїв з обох сторін переходу збільшується. Відбувається так звана інжекція неосновних носіїв від латинського *injicio* (вкидаю)

Одночасно у p - і n - області через бічні металеві контакти від джерела струму входять рівні кількості основних носіїв, які рекомбінують з інжекованими носіями. В результаті з'являється відмінний від нуля струм через перехід, який зі зростанням напруги експоненційно зростає.

Струм на всіх ділянках кола забезпечується основними носіями, сам $p-n$ - перехід збагачений носіями струму. Електричне поле «підтискає» основні носії до межі між областями, внаслідок чого ширина перехідного шару, збідненого носіями, зменшується. Відповідно зменшується і опір переходу, причому тим сильніше, чим більше напруга.

Струм же неосновних носіїв (дрейфовий) залишиться практично без зміни.

Зменшення контактної різниці потенціалів (зниження потенціального бар'єру) буде пропорційним прикладеній напрузі.

Таким чином у напрямку від p - області до n - області $p-n$ - перехід пропускає струм, сила якого *швидко зростає* при збільшенні прикладеної напруги. Ця напруга називається **прямою** (або пропускною), а напрям струму - **прямим**.

2. Зворотнє зміщення. Тепер прикладемо до $p-n$ - переходу напругу протилежного напрямку, щоб «+» був підключений до n - області, а «-» був підключений до p - області (**режим зворотного зміщення**, рис. 11).

При цьому напрям зовнішнього електричного поля $E_{\text{зовн}}$ співпадатиме з напрямом контактного поля $E_{\text{конт}}$ (рис. 11).

У цьому випадку зовнішнє поле посилюватиме поле контактного шару і обумовить рух електронів і дірок від межі $p-n$ - переходу в протилежних напрямках. Поле, що виникає в кристалі при накладанні зворотної напруги, «відтягує» основні носії від межі між областями. На межі ро-

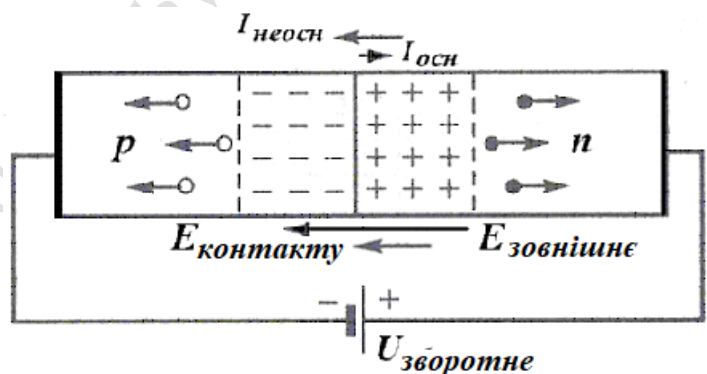


Рис. 11

зділу областей у результаті не залишиться основних носіїв струму.

Це призводить до зростання ширини перехідного шару, збідненого носіями. Відповідно збільшується і опір переходу. Отже, $p - n$ - перехід має у зворотному напрямку набагато більший опір, ніж у прямому.

В даному випадку через $p - n$ - перехід протікає тільки невеликий струм (він називається **зворотним**), цілком зумовлений неосновними носіями. Струм неосновних носіїв не залежить від величини контактного поля, так як для них потенціального бар'єру не існує. Потоки неосновних носіїв визначаються швидкістю теплової генерації електронно-діркових пар. Ці пари дифундують до переходу та поділяються його полем. В результаті через перехід проходить струм (струм насичення), який зазвичай малий і майже не залежить від напруги.

На рис.12 зображено залежність струму, який проходить через $p-n$ - перехід, від прикладеної напруги – так звану *вольт-амперну характеристику* при прямому та зворотному включенні.

З рисунку видно, що при прямому зміщенні ($U > 0$) опір переходу незначний і струм різко (експоненційно) зростає. При зворотному зміщенні ($U < 0$) опір великий і зворотний струм швидко перестає залежати від U , тобто сягає насичення. Струм I_n практично лишається незмінним до деякого значення зворотної напруги U_0 , при якому струм різко зростає у зворотному напрямі. Це обумовлено електричним пробоем переходу. Така напруга U_0 називається *пробивною*.

У строгій теорії напівпровідників доводиться, що повний струм (струм основних і неосновних носіїв) через $p-n$ - перехід визначається виразом

$$I = I_n \left[\exp\left(\pm \frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (2)$$

Тут I_n - максимальний зворотний струм, U - прикладена зовнішня напруга, I - результуючий дірковий струм, що проходить в n - область. Знак плюс відповідає напрузі U , прикладеній в прямому напрямі, а знак мінус – у зворотному.

Приклад 1. За кімнатної температури ($T = 300$ К) і незначній напрузі $U = 5$ В, прямий струм становить $I_{пр} = I_n e^{20}$, а при напрузі $U = -0,5$ В зворотний струм перебуває в стані насичення $I_{зв} = I_n$, тобто в цьому інтервалі напруг прямий струм крізь $p-n$ - перехід перевищує зворотний приблизно в 10^9 разів. Отже, $p-n$ - перехід має практичну однобічну провідність.

З формули (2) видно, що у відсутності зовнішнього поля ($U = 0$) струм I дорівнює нулю. Прямий струм ($U > 0$) на кілька порядків перевищує зворотний струм ($U < 0$). При збільшенні від'ємної напруги (так, що $|eU|$ становить кілька величин kT) струм через перехід насичується:

$$\exp(-eU/kT) \rightarrow 0, I \approx -I_n.$$

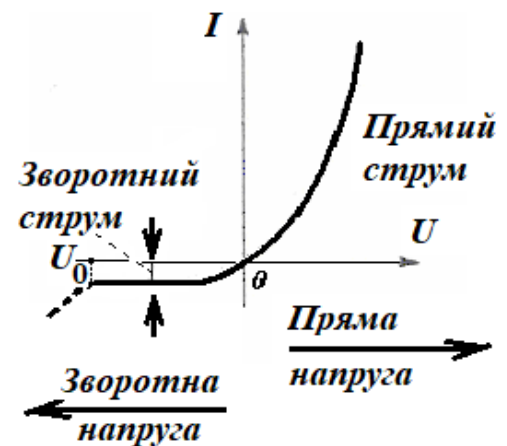


Рис. 12.

Приклад 2. Опір p - n - переходу за температури 0°C і прямої напруги $U = 0,1$ В дорівнює $R_{\text{прям}} = 10$ Ом. Яким буде опір переходу $R_{\text{зворот}}$, якщо змінити полярність напруги.

Відповідно до закону Ома та формули (2), опір переходу обернено пропорційний до величини $(\exp(eU/kT) - 1)$. Тому відношення опорів у зворотному і прямому напрямку дорівнює (врахуємо, що при зміні напруги на зворотну, струм через перехід змінює знак)

$$\frac{R_{\text{звор}}}{R_{\text{прям}}} = - \frac{(\exp(eU/kT) - 1)}{(\exp(eU/kT) - 1)}$$

Окремо обчислимо показник експоненти:

$$\frac{eU}{kT} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 273} = 4,25.$$

Тоді

$$\frac{R_{\text{звор}}}{R_{\text{прям}}} = - \frac{(\exp(4,247) - 1)}{(\exp(-4,247) - 1)} = 69,873.$$

Звідси $R_{\text{зворот}} \approx 699$ Ом.

Контрольні питання

1. Чим відрізняються режими прямого та зворотного зміщення?
 2. Що означає термін "інжекція неосновних носіїв"?
 3. Який механізм поповнення кількості дірок у p - області прямозміщеного $p - n$ - переходу?
- 10.7. При некотором напряженні сила прямого тока сквозь p - n -переход $I_{\text{пр}} = 2,02$ мА, а обратного $I_{\text{обр}} = 20$ мкА. Найти по этим данным силу тока насыщения I_0 для p - n - перехода.

§ 6. Випрямлення змінних струмів за допомогою p - n - переходу. Напівпровідниковий випрямний діод

Електронно-дірковий перехід знаходить різноманітні застосування, будучи основою різних напівпровідникових приладів.

Для перетворення змінного струму в постійний (випрямлення струму) використовують напівпровідниковий діод.

Як відомо, генератори електростанцій виробляють електроенергію у формі змінної напруги так званої промислової частоти (50 Гц). У той же час багато приладів, машин і промислових установок потребують живлення постійним струмом. Наприклад, постійним струмом живляться всі види транспорту на електричній тязі: трамваї, тролейбуси, електропоїзди. Щоб забезпечити роботу електротранспорту, необхідно перетворити змінну напругу на постійну. Необхідність у випрямленні струму існує і в радіотехніці (живлення радіоприймачів і телевізорів), техніці НВЧ і т.д.

Напівпровідниковий **діод** - це напівпровідниковий прилад з одним p - n -переходом та двома електродами. Конструкція приладу визначила його назву. Діод у перекладі з грецької – «два шляхи». Цей електронний прилад має різну провідність в залежності від напрямку електричного струму.

На схемах напівпровідниковий діод позначається як показано на рис. 13 (літери p і n на схемах, звичайно, не ставляться, тут вони проставлені для пояснення).

Стрілка показує напрям, у якому діод проводить струм.

Прямий (пропускний) напрям струму виходить, якщо «+» подавати на p - область, а «-» подавати на n - область. Протилежне підключення діода (показано у дужках) називається **зворотним (запінним).**



Рис. 13.

Легування – це така обробка твердих тіл (твердих розчинів), за якої різними шляхами - термічною обробкою, іонною імплантацією та ін. - в твердий розчин по всьому об'єму зразка, чи тільки з його поверхні додаються контрольовані домішки інших хімічних сполук..

$P - n$ - переходи, що використовуються на практиці, є різко несиметричними. Одна з областей, що утворюють перехід, значно сильніше легується, ніж інша.

В результаті концентрація носіїв, які сильно легована область здатна інжектувати в слабо леговану, може стати в багато разів більше, ніж вихідна концентрація носіїв у слабо легованій області.

Тому сильно леговану область діода називають *емітером* (від латинського *emitto* - випускаю). Слабо леговану область діода називають *базою*.

Найпростіший випрямляч на діоді – однопівперіодний.

Скористуємося схемою підключення діода, зображеною на рис. 14. Якщо на вхід подати синусоїдальний сигнал $U_{вхід}$, то через перехід буде проходити

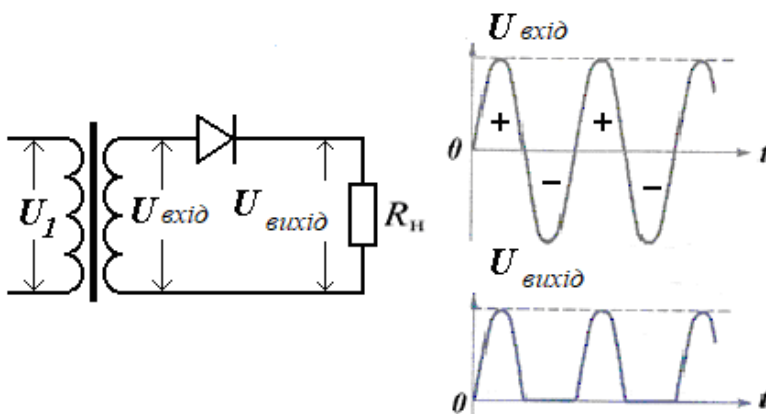


Рис. 14.

струм (прямий) тільки в ті половини періоду, коли на p - область подається «плюс» від джерела напруги. У другу половину періоду, коли на p - область подається «мінус», струм спадає практично до нуля, діод закритий.

Таким чином, діод "пропустить" тільки додатні півхвилі синусоїди. На опорі навантаження R_n (на виході)

сигнал матиме вигляд пульсуючої напруги $U_{вихід}$ (рис. 14). Щоб згладити пульсації і отримати обвідну сигналу, використовують додатковий конденсатор, включений паралельно навантаженню. Протягом часу, коли через діод проходить струм, конденсатор заряджається, а решту часу розряджається через навантаження. Напруга в навантаження подається тільки із

зарядженого у попередній напівперіод конденсатора. Заряджаючись і розряджаючись, такий фільтр згладить гострі півхвилі (рис. 15).

За такою схемою працюють найпростіші випрямлячі напруги – пристрої, що перетворюють змінний струм у постійний.

З порівняння графіків вихідної напруги

рис.14 та рис.15 видно, що пульсації напруги на навантаженні R_H вирівнюються. Чим більшим є опір навантаження, тим меншим є струм розряду конденсатора, тим повільніше спадає на ньому напруга і тим краще вирівнюються пульсації.

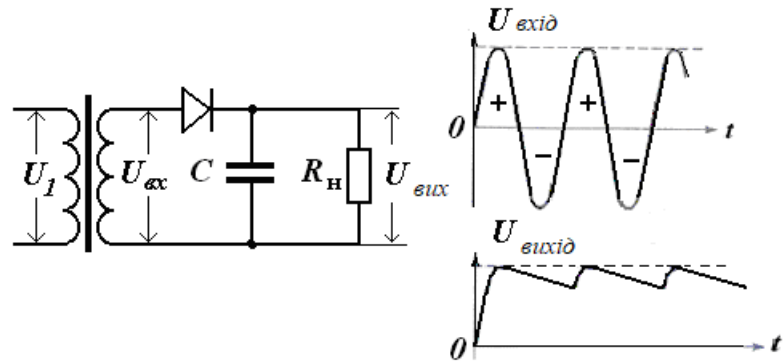


Рис. 15.

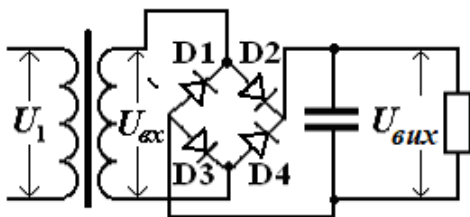
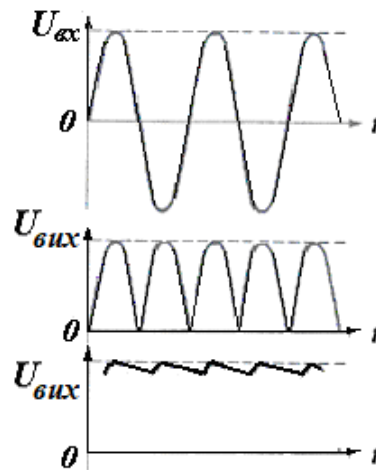


Рис. 16.



Чотири діоди, зібрані як вказано на рис. 16, утворюють так званий **міст**.

Принципова схема випрямляча та осцилограми напруги наведені на рис.16.

Нехай у **першу половину**

періоду на верхній вивід вторинної обмотки трансформатора поступає «+», на нижній кінець поступає «-». Тоді струм проходить вздовж такого кола: верхній вивід вторинної обмотки – діод D_2 – верхній вивід навантаження - навантаження – нижній вивід навантаження - діод D_3 – нижній вивід вторинної обмотки – обмотка.

У **другу половину періоду** на верхній вивід вторинної обмотки трансформатора поступає «-», на нижній кінець поступає «+». Струм проходить вздовж наступного кола: нижній вивід вторинної обмотки – діод D_4 – верхній вивід навантаження - навантаження – нижній вивід навантаження - діод D_1 – верхній вивід вторинної обмотки – обмотка.

Як бачимо, в обох випадках напрям струму крізь навантаження є однаковим. У порівнянні з однопівперіодною схемою мостова схема має у 2 рази менший рівень пульсацій.

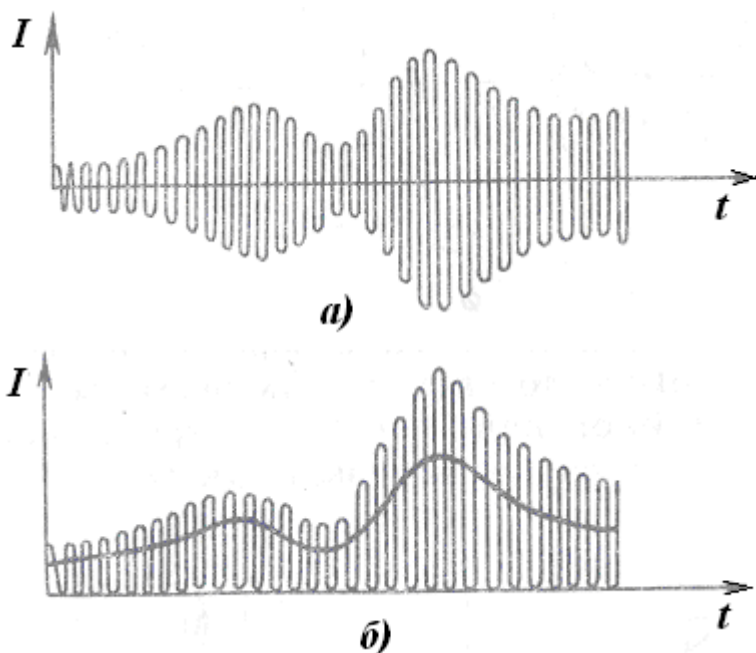


Рис. 17.

модуляція коливань. Переносником сигналу є синусоїдні коливання великої частоти. Їх амплітуда (за амплітудної модуляції) модулюється сигналом, що передається. Коливання сили струму, які модульовані за амплітудою, показані на рис. 17, а).

У радіоприймачі для отримання коливань звукової частоти необхідно виконати демодуляцію. Таке детектування в більшості випадків здійснюється за допомогою діодів. Графік коливань сили струму в колі діоду має вигляд рис. 17, б).

Далі струм звукової частоти (вказаний жирною лінією) відокремлюється від високочастотного і пропускається крізь пристрій, який відтворює звук.

Контрольні питання

1. На чому заснована дія випрямляльного діоду?
2. З якою метою у випрямлячу вмикають конденсатор паралельно навантаженню?
3. Який вигляд буде мати напруга на резисторі у схемі рис. 14, якщо діод підключити навпаки?
4. Чи можна електромагнітні коливання, які прийняті радіоприймачем та підсилені подати безпосередньо на динамік?
5. Чому під час радіоприйому необхідно відокремлювати високочастотні коливання від низькочастотних? Як це здійснюється?
6. Де застосовуються випрямляючі напівпровідникові діоди?

Діодний випрямляч або діодний міст є основним компонентом блоків живлення практично всіх електронних пристроїв. Напівпровідникові діоди за відповідного охолодження використовують навіть за дуже великих струмів - близько 1000 А.

Іншим важливим практичним застосуванням діоду є **детектування** (або **демодуляція**).

Для передачі інформації за допомогою радіохвиль застосовується

§ 7. Світловипромінювальний діод

Якщо включити p - n - перехід у прямому напрямі (рис. 18), то зовнішня напруга зменшує контактне поле на межі поділу p і n частин діоду. В n - область інжуються надлишкові дірки, а в p - область – електрони, які потім рекомбінують з носіями протилежного знаку.

Частина носіїв **рекомбінуює з випромінюванням фотонів**. Так виникає світло, яке народжується проходженням через p - n - перехід прямого струму.

Це явище отримало назву *інжекційної електролюмінесценції*, на основі якого створений напівпровідниковий прилад, що перетворює електричну енергію в енергію оптичного випромінювання – **світлодіод (світловипромінювальний діод)**.

Процес рекомбінації не обов'язково має супроводжуватись випромінюванням.

Частина енергії, яка виділяється під час рекомбінації, може витрачатися на нагрівання кристалу, а інша може випромінюватися у вигляді квантів світла. Дефекти кристалічних ґраток також призводять до поглинання енергії рекомбінації, внаслідок чого рекомбінація не супроводжується випромінюванням.

В залежності від енергії, яка виділяється при рекомбінації електронів та дірок, у напівпровіднику випускаються кванти електромагнітного випромінювання тієї чи іншої частоти – від інфрачервоного до ультрафіолетового випромінювання. Довжина хвилі λ випромінювання визначається енергією фотона

$$\varepsilon_{\text{ф}} = h\nu = hc/\lambda.$$

У більшості випадків енергія фотона є близькою до енергії активації E_g (в зонній теорії – до так званої ширини забороненої зони ΔE), звідки довжина хвилі

$$\lambda = hc/E_g. \quad (3)$$

У таблиці представлені значення E_g деяких світлодіодів та довжина хвилі світла, що ними випромінюється.

Таблиця .

Напівпровідник	Енергія активації E_g , eВ	Довжина хвилі λ , мкм, колір світла
AgI	2,8	0,44, синій
ZnSe	2,7	0,46, синій
CdS	2,4	0,52, зелений
GaP	2,3	0,54, зелений
CdSe	1,7	0,73, червоний
GaAsP	1,6	0,78, червоний
GaAs	1,43	0,87, інфрачервоний

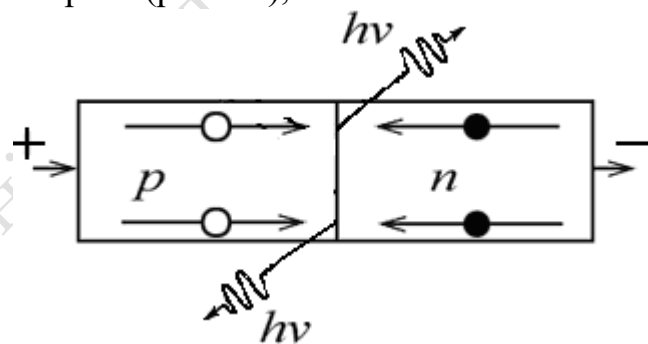


Рис. 18.

Для виготовлення світлодіодів придатні тільки такі матеріали, у яких ймовірність випромінювальної рекомбінації є високою. Германій і Силіцій такий вимозі не відповідають. В них переважна частка електронів і дірок рекомбінують без випромінювання.

Зате в арсеніді галію GaAs та потрійних напівпровідникових з'єднаннях на його основі GaAsP та GaAlAs ймовірність випромінювальної рекомбінації близька до одиниці.

Колір (довжина хвилі) світіння при інжекційній електролюмінесценції залежить від матеріалу основи і природи домішок. Широке поширення отримали світлодіоди з інжекційною електролюмінесценцією на *гетероструктурах* (гетероструктура - вирощена на підкладці шарувата структура з різних напівпровідників, що дозволяє конструювати потрібну енергію активації).

Світлодіоди на основі твердих розчинів AlGaInN дають свічення у зеленому, синьому, фіолетовому та ближньому ультрафіолетовому діапазонах спектра.

На основі InGaN створені світлодіоди високої яскравості, що дають синє, зелене та ультрафіолетове випромінювання, на основі AlGaInP – жовте, оранжеве та червоне, на основі AlGaAs – червоне та інфрачервоне.

Основою світлодіодів білого кольору світіння є структура InGaN, що випромінює на довжині хвилі 470 нм (синій колір) і нанесений зверху на неї люмінофор - жовтий фосфор, що випромінює в широкому діапазоні видимого спектру і має максимум у його жовтій частині. Людське око комбінацію такого роду сприймає як білий колір.

Четверне напівпровідникове з'єднання GaInAsP дозволяє створити інфрачервоні світлодіоди з довжиною хвилі $\lambda \sim 1 \div 1.3$ мкм, які широко застосовуються у волоконно-оптичних лініях зв'язку.

Найпоширеніша *конструкція світлодіода* включає напівпровідниковий кристал з *p-n*- переходом, рамку із зовнішніми виводами, на якій розміщений кристал, і герметизуючу епоксидну смолу, яка оточує і захищає кристал, а також розсіює світло (рис. 19).

У світлодіодах найбільші втрати енергії відбуваються на повне внутрішнє відбивання випромінювання. У зв'язку з великою відмінністю показників заломлення напівпровідника $n_{\text{напів}}$ і повітря $n_{\text{пов}}$ частка випромінювання, що виходить, визначається значенням граничного кута повного внутрішнього відбивання – кута між напрямком світлового променя і нормаллю до поверхні. Випромінювання, що падає на поверхню розділу напівпровідник - повітря під кутом, меншим граничного, виводиться з кристала, а під кутом, більшим за граничний, зазнає повного внутрішнього відбивання.

Для напівпровідників GaAs і GaP значення показника заломлення становлять відповідно 3,54 і 3,3, а значення граничного кута іпр дорівнюють приблизно 16° і 18° . З метою зниження втрат на повне внутрішнє відбивання для розсіювача вибирають напівсферичну форму.

Світлодіоди мають високий ККД, що досягає 80%; ККД кращих ламп накаливання на порядок нижче.

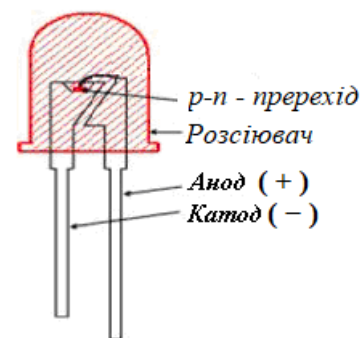


Рис.19.

Світлодіоди довговічні і надійні, тому що не містять ниток розжарювання, катодів та інших вузлів, що швидко зношуються, як, наприклад, лампи розжарювання або газорозрядні лампи.

З інших переваг світлодіодних джерел світла слід зазначити такі:

- випромінювання світлодіодів близьке до монохроматичного. Це дозволяє їх використовувати без світлофільтрів; наприклад, у світлофорах, автомобільних сигнальних вогнях;

- світлодіод стійкий до механічних впливів і працює у широкому діапазоні температур;

- світлодіод не має екологічно шкідливих компонентів (наприклад, ртуті у люмінесцентних лампах);

- не має скляних балонів, що розбиваються, необхідних в лампах накаливання, виділяє дуже мало тепла і має безпечне електроживлення;

- світлодіодні світильники не бояться кидків напруги і не мають стробоскопічного ефекту.

Зараз практично немає областей промисловості, де б не використовувалися світлодіоди. Вони використовуються в якості різних індикаторів у побутових та промислових пристроях, цифрових індикаторів, у пристроях для підсвічування РК екранів та моніторів, для освітлення приміщень, для зовнішньої реклами, в іграшках тощо.

На закінчення наведемо умовне позначення світлодіода на електричних схемах (рис. 20).



Рис. 20.

Контрольні питання

1. На чому ґрунтується дія світлодіодів? Які їх переваги в порівнянні з іншими джерелами світла? Які напівпровідникові матеріали використовують для виготовлення світлодіодів?

2. Від чого залежить колір випромінювання світлодіоду?

3. Якою має бути енергія активації напівпровідника, з якого виготовлений світлодіод, що світиться зеленим світлом ($\lambda = 500$ нм)?

4. Використовуючи таблицю, визначте довжину хвилі випромінювання світлодіода, виготовленого з арсеніду галію GaAs, фосфіду галію GaP (без домішок),

5. Якого кольору випромінювання світлодіода, виготовленого з карбонату кремнію α -SiC з енергією активації 3,12 еВ?

6. Чим відрізняються світлодіоди від теплових джерел світла? Які їхні переваги, порівняно з іншими джерелами світла?

7. Чим зумовлена напівсферична конструкція світлодіода?

8. За виконанням яких умов рекомбінація електронів і дірок супроводжується випускненням квантів випромінювання?

§ 8. Підсилення змінних струмів за допомогою *p-n*- переходів. Транзистор

Одне з найважливіших застосувань напівпровідників полягає в їх використанні для підсилення та генерації електричних коливань. Напівпровідниковий **транзистор** – прилад, здатний підсилювати сигнали, струми та напруги.

Одним з типів напівпровідникових підсилювачів, що використовують явище інжекції, є **біполярний транзистор** (рис. 21). Він складається з пластинки монокристалічного напівпровідника, в якій шляхом відповідного розподілу домішок створені **два** близько розташованих *p-n*- переходи.

Область між обома переходами називають **базою**, прилеглі області – **емітером та колектором**. До кожної з областей підведені провідні контакти.

Термін «біполярний» підкреслює той факт, що принцип роботи приладу полягає у взаємодії носіїв заряду, що мають як позитивний, так і негативний електричний заряд, з електричним полем.

Залежно від типу провідності емітера, колектора і бази розрізняють ***p-n-p***

та ***n-p-n*** транзистори. В транзисторі типу ***p-n-p*** емітер і колектор легуються акцепторами а база — донорами. В транзисторі типу ***n-p-n*** — навпаки.

Для визначеності розглянемо ***p-n-p*** транзистор, у випадку транзистора ***n-p-n*** всі фізичні процеси аналогічні

Одна з можливих схем включення, в якій базовий електрод є спільним для обох кіл – емітера та колектора (**схема із загальною базою**), показано на рис. 21.

Між емітером і базою прикладена невелика напруга $U_{ЕМБ}$, у прямому напрямі, а між базою і колектором – напруга $U_{КолБ}$ у зворотному напрямі.

Дірки як основні носії струму в *p*- області легко проходять через відкритий лівий *p-n*- перехід. Відбувається **інжекція дірок** в область бази.

Далі дірки дифундують до колектора. Частина цих дірок рекомбінує з основними носіями заряду в базі (електронами). Проте, базу роблять дуже тонкою (порядку мікрметра) та порівняно слабо легованою, щоб носії заряду не встигли прорекомбінувати.

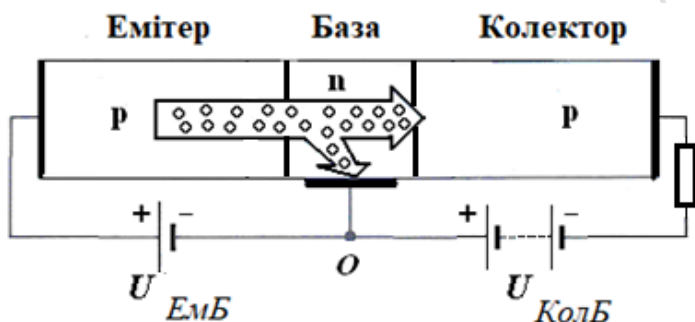


Рис.22.

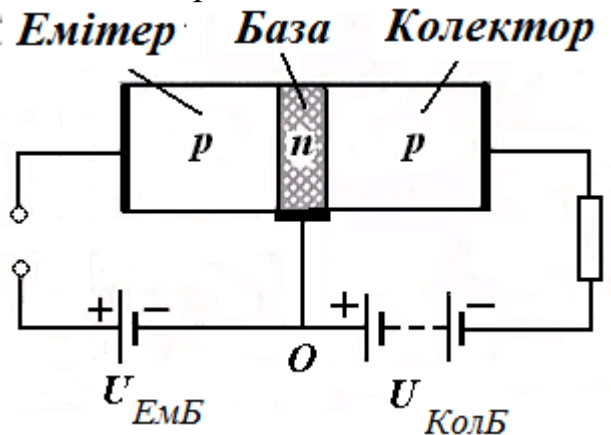


Рис. 21.

Дифузійною довжиною L_p називають відстань, на якій надмірна концентрація нерівноважних носіїв заряду в процесі дифузії зменшується внаслідок рекомбінації в e разів.

Товщину бази w оцінюють по її відношенню до дифузійної

довжини дірок в базі L_p .

У транзисторах базу роблять дуже тонкою:

$$w \ll L_p. \quad (4)$$

За такої умови кожна дірка, інжектвана в базу, буде перебувати від колекторного переходу на відстані, меншій, ніж їхня дифузійна довжина.

Тому більшість дірок, інжектваних з емітера, не встигнувши рекомбінувати з електронами, «проскакує» в область колектора.

Для цих цілей концентрацію носіїв в емітері і колекторі, тобто в дірковій області, підбирають набагато більшою, ніж концентрацію носіїв у межах бази, тобто в електронній області.

Сильне електричне поле обернено зміщеного колекторного переходу захоплює дірки (нагадаємо, що в базі вони - неосновні носії, тому для них перехід відкритий), і затягує їх в колекторну область.

Обидва кола пов'язані один з одним за допомогою інжекції дірок.

Будь-яка зміна струму в колі емітера призводить до зміни кількості дірок, що проникають в колектор, і, отже, до майже такої ж зміни струму в колі колектора. Струм колектора, таким чином, практично дорівнює струму емітера (рис. 22), за винятком невеликої втрати на рекомбінацію в базі, яка і утворює струм бази:

$$I_E = I_B + I_K. \quad (5)$$

Чим тонша база, тим більшу частку дірок, що входять в базу, захоплює колектор. Частку дірок, що переносяться завдяки процесу дифузії через базу від емітера до колектора, характеризують коефіцієнтом перенесення α :

$$\alpha = \left| \frac{I_K}{I_E} \right| \quad (6)$$

Для різних транзисторів α може лежати в межах від $\sim 0,9$ до $\sim 0,999$.

Здається, описаний пристрій як підсилювач є марним. Справді, зміни сили струму в колі колектора приблизно рівні змінам сили струму в колі емітера

$$I_K \approx \alpha I_E. \quad (7)$$

Однак треба врахувати, що правий p - n - перехід включений у зворотному напрямі і тому має набагато більший опір, ніж лівий (декілька МОм).

Тому при однакових змінах струмів зміни напруги в колі колектора будуть у багато разів більше, ніж у колі емітера. Після проходження струму через навантаження великого опору виходить значне посилення за напругою і потужністю.

Отже, транзистор, включений за схемою із загальною базою, **підсилює напруги та потужності**. Підвищена потужність, що знімається з транзистора, з'являється за рахунок використання енергії джерела постійної напруги $U_{\text{КолБ}}$, включеного в коло колектора. Посилення за напругою може досягати 10 000.

Прикладаючи між емітером і базою змінну напругу, отримаємо в колі колектора змінний струм, а на вихідному опорі - змінну напругу. При цьому інжекція дірок відбувається в такт зміни вхідної напруги, отже, форма посиленого сигналу на виході буде зберігатися.

Умовне позначення транзистора в електрон-

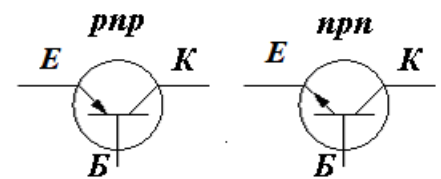


Рис. 23.

них схемах (рис. 23) – три риси, укладені в кружечок. Рисочка, в яку впираються дві інші, позначає базу. Похила рисочка без стрілки – колектор, похилена зі стрілкою – емітер. Стрілка емітера вказує напрям струму, який проходить через нього. Якщо стрілка звернена убік бази – транзистор типу $p-n-p$, якщо від бази – $n-p-n$.

Підсумуючи, можна сказати, що призначення транзистора просте - він дозволяє за допомогою слабкого сигналу керувати набагато сильнішим.

Контрольні питання

1. За аналогією з наведеним описом роботи транзистора $p-n-p$ - типу опишіть роботу транзистора $n-p-n$ -типу.
2. Чому частина електронів, які інжектуються в $n-p-n$ -транзисторі з емітера в базу, приходять до $p-n$ - переходу база-колектор, не встигнувши рекомбінувати з дірками? Яке фізичне явище зумовлює рух електронів у базі?
3. Які вимоги пред'являються до бази в $p-n-p$ - транзисторі?
4. За рахунок якого джерела енергії відбувається збільшення потужності сигналу у транзисторі?

§ 9. Сонячні елементи

Принцип роботи так званого **сонячного напівпровідникового елемента** пояснює схема на рис. 24.

На ній зображено $p-n$ – перехід, у якому формується електричне поле контакту. P - кристал заряджається у місці контакту негативно, n - кристал – позитивно (див. § 4).

Розглянемо, які процеси відбуваються під дією світла окремо в p - області та в n - області.

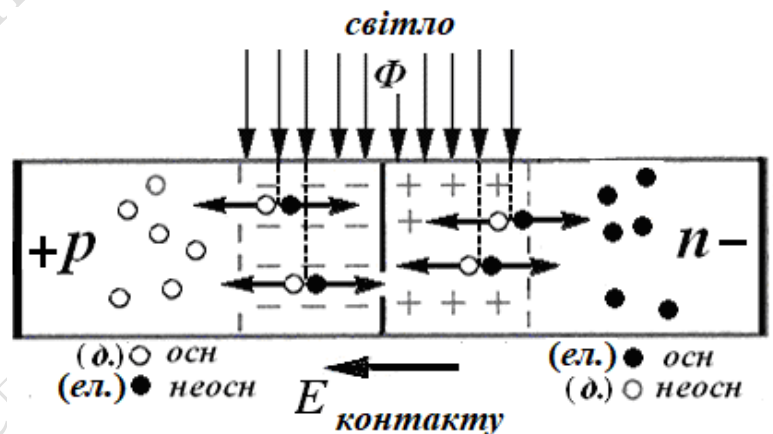


Рис. 24.

В p - області фотони народжують пару електрон-дірка. По суті, фотон поглинається якимось з електронів ковалентного зв'язку. Внаслідок збільшення енергії цей електрон може покинути ковалентний зв'язок, тобто при цьому народжується пара носіїв струму – «вільний електрон» та «дірка».

Нагадаємо, як поведуть себе основні та неосновні носії струму. Поле $p-n$ -контакту відштовхує основні і пропускає неосновні носії.

Дірки в p - області є основними носіями, тому поле $p-n$ - переходу їх відштовхуватиме від межі розділу, і вони залишаються у своїй області. А ось вільні електрони, що утворилися, будучи в p - області неосновними носіями, легко

проходять через перехід. Електрони перекидаються полем через межу розділу в n - область, де вони є основними.

В n - області фотони також народжують пару електрон –дірка. Аналогічно, в n - області з носіїв, що утворилися, тільки дірки, будучи неосновними носіями, будуть перекинуті через межу поділу в p - область, а вільні електрони, що утворилися, тільки поповнять кількість основних носіїв в n - області, збільшивши їх концентрацію .

У результаті в p - області накопичується, надлишковий позитивний заряд, а n - області— надлишковий негативний заряд. Це призводить до виникнення різниці потенціалів між p - областю та n - областю. Цю різницю потенціалів називають **фотоЕРС**.

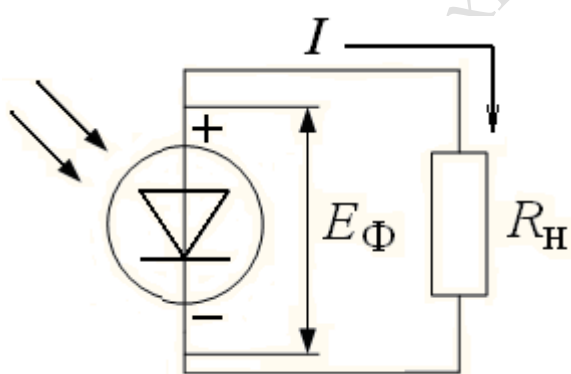


Рис. 25.

Якщо тепер підключити такий сонячний елемент до зовнішнього навантаження, то через навантаження R_n буде проходити струм навіть за відсутності прикладеної напруги (рис. 25).

Доцільно освітлювати не обидві області напівпровідника, а лише одну, зате дуже тонку, наприклад, n - область (рис. 26). Ширину n - області роблять такою (кілька мікрометрів), щоб дірки не встигали рекомбінувати до переходу в p - область.

Зазвичай площина p - n - переходу розміщується на відстані в кілька десятих часток мікрометра від поверхні.

Тоді практично всі неосновні носії, що утворилися під дією освітлення, будуть розділені p - n - переходом.

Напівпровідникові сонячні елементи зазвичай виготовляють у вигляді пластини напівпровідника p -типу, на яку нанесений тонкий прозорий шар металу, який можна вважати напівпровідником n -типу; потім на шар металу наносять прозорі захисні покриття (рис. 26). Світлові кванти, пройшовши ці покриття та тонкий шар металу, поглинаються в області p - n – переходу. Струм відводять від напівпровідникової пластини та від тонкого металевого покриття (рис. 26). Такий елемент забезпечує напругу порядку часток вольтів і струм порядку кількох міліампер. Зазвичай елементи з'єднують у батарею (сонячна батарея), використовуючи послідовне та паралельне з'єднання елементів.

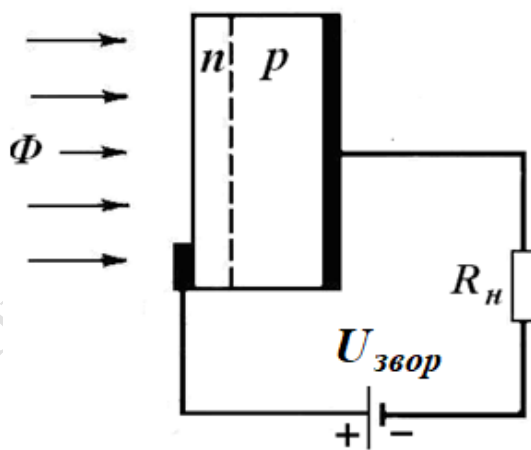


Рис. 26.

В даний час все більшого значення набуває технологія вироблення екологічно чистої електроенергії. Сонячні батареї — одне з екологічно чистих джерел енергії з високим ККД.

Потужність потоку сонячного випромінювання на вході в атмосферу Землі становить близько 1366 ват на квадратний метр. В Європі навіть в дуже хмарну погоду питома потужність сонячного випромінювання становить близько 100 Вт/м².

За допомогою сонячних батарей можна перетворити цю енергію в електрику з ефективністю до 25 %. У 2019 р. собівартість електрики, що генерується промисловими сонячними станціями, досягла 0,068 USD за кВт-год.

Незважаючи на те, що ціна виробленої сонячною електростанцією енергії поки що в кілька разів вища за ту, що дають теплові та атомні електростанції, сонячна електростанція має велике майбутнє. Сонячне світло можна віднести до невичерпних ресурсів енергії. І головна перевага альтернативних джерел енергії, починаючи від вітряної електростанції і закінчуючи сонячною, полягає в тому, що вони є екологічно чистими.

Нікопольська СЕС у нашій області входить до п'ятірки найпотужніших у Європі сонячних станцій. Вона має потужність приблизно 220 МВт. Панелі займають площу 400 гектарів – це майже 560 футбольних полів. Станція розташована на рекультивованих землях відпрацьованого кар'єру з видобутку марганцевої руди.

Така одна сонячна електростанція дозволить Україні скоротити викиди вуглекислого газу до 80 тисяч тонн на рік.

Сонячні батареї використовуються як джерела енергії на космічних кораблях і супутниках.

Сонячні елементи у комплекті з конденсаторами надвеликої ємності та яскравими світлодіодами використовуються для освітлення територій. Вдень конденсатор накопичує енергію, в темний час доби - віддає.

Контрольні питання

1. Поясніть механізм генерації електронно-діркових пар під дією світла.
2. Чим обумовлений просторовий поділ збуджених пар носіїв заряду?
3. Інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні Землі дорівнює приблизно 1,37 кВт/ м². Якою має бути площа сонячної батареї з ККД = 15 %, щоб створити струм потужністю 100 Вт?

Рекомендована література

1. І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик. Загальний курс фізики. У 3 т. Т.2. Електрика і магнетизм. – К. : Техніка. 2006. – 452 с.
2. О.О. Птащенко. «Фізичні засади твердотільної електроніки», Одеса, ОНУ, 2011.