



6.4. Основи Електроніки

6.4.1. Елементи зонної теорії твердих тіл. Статистика Фермі-Дірака та Бозе-Ейнштейна

6.4.2. Провідники, діелектрики та напівпровідники

6.4.3. Електропровідність напівпровідників



6.4.4. Напівпровідникові прилади

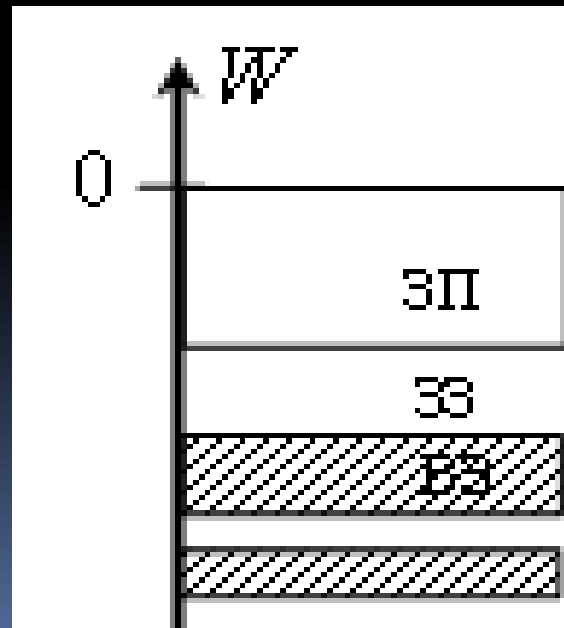
6.4.1. Елементи зонної теорії твердих тіл

Зонна теорія твердих тіл базується на застосуванні **рівняння Шредінгера** до електрона в *періодичній потенціальній «ямі»* кристалу (адіабатичне одноелектронне наближення).

Розв'язок його дає серії дозволених енергетичних рівнів, які можна об'єднати в *енергетичні зони дозволених рівнів* (виділені прямокутниками на рисунку) та *заборонених рівнів* (проміжки між ними) *енергетичних зон*.

Заповнені електронами зони заштриховані, незаповнені зони – не мають штрихування.

На енергетичній зонній структурі завжди відмічають рівень "0" потенціальної енергії (рівень вакууму)



6.4.1. Статистика Фермі-Дірака та Бозе-Ейнштейна

Фермі - Дірак

Застосовна лише до *ферміонів* – частинок з напівцілим спіном:

$$S = 1/2; 3/2; \dots$$

(ферміони – складають речовину)

Визначає *ймовірність* заповнення енергетичних станів електронами в залежності від їх енергії W .

$$f_{\text{ФД}} = \frac{1}{e^{\frac{W-\mu}{kT}} + 1}$$

Бозе - Ейнштейн

Застосовна лише до *бозонів* – частинок з цілим спіном:

$$S = 0; 1; 2; \dots$$

(бозони – відповідають за взаємодію)

Визначає *ймовірність* заповнення енергетичних станів бозонами (наприклад, фотонами).

$$f_{\text{БЕ}} = \frac{1}{e^{\frac{W-\mu}{kT}} - 1}$$

Символом μ позначено *енергію Фермі* – найбільшу енергію, яку в даному кристалі матиме електрон при температурі $T = 0 \text{ K}$.

6.4.1. Рівень Фермі

Має два означення.

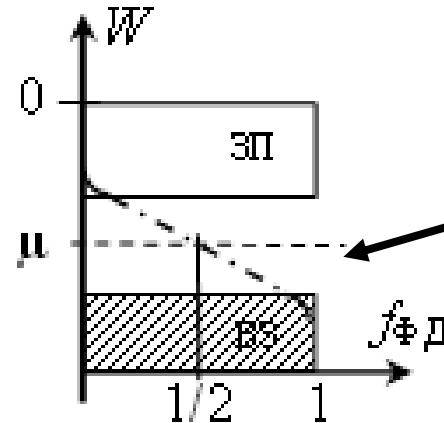
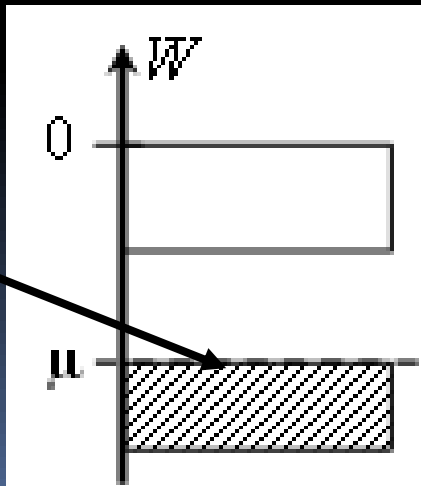
1. **Найвищий** енергетичний рівень, зайнятий електронами при абсолютному нулі температури $T = 0 \text{ K}$.

Так як абсолютний нуль температури є недосяжним, то при будь-якій температурі, відмінній від $T = 0 \text{ K}$, рівень Фермі визначають інакше.

2. Це рівень, *ймовірність заповнення* якого (відповідно до статистики Фермі-Дірака) дорівнює $1/2$.

Тому у напівпровідників з власною провідністю цей рівень знаходиться в різних місцях в залежності від температури.

При $T = 0 \text{ K}$
це верх
валентної
зони



При $T \neq 0 \text{ K}$ –
посередині між
ВЗ і ЗП

6.4.1. Температура виродження

Температура, вище якої до електронів в твердих тілах можна застосовувати класичну статистику.

Визначається з умови:

$$kT_{\text{вир}} = \mu$$

Тобто при $T \geq T_{\text{вир}}$ замість статистики Фермі - Дірака:

$$f_{\text{ФД}} = \frac{1}{e^{\frac{W-\mu}{kT}} + 1}$$

застосовна статистика Маквелла - Больцмана

$$f_{\text{МБ}} = e^{-\frac{W}{kT}}$$

6.4.1. Заповнення енергетичних зон

Заповнення електронами *дозволених рівнів* в енергетичних зонах визначається їхньою *кількістю* та тією обставиною, що електрон є *ферміоном*.

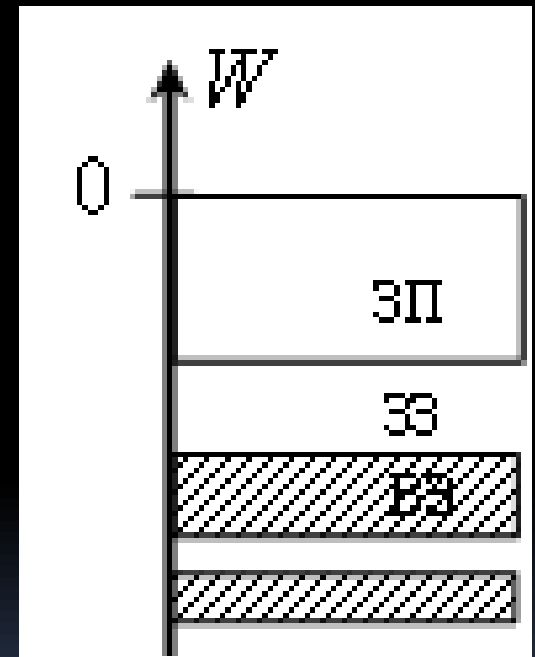
Тому розподіл електронів по енергії в зоні визначає статистика Фермі-Дірака.

За характером розподілу розрізняють:

1. *Зону провідності* (ЗП) – найвищу *незаповнену* (або *заповнену частково*) зону дозволених енергетичних рівнів вільних електронів;

2. *Валентну зону* (ВЗ) – найвищу *повністю заповнену* (або *заповнену частково*) зону дозволених рівнів, в якій переважно знаходяться валентні електрони;

3. *Заборонену зону* (ЗЗ) – діапазон енергій між ЗП та ВЗ, де немає дозволених енергетичних рівнів.



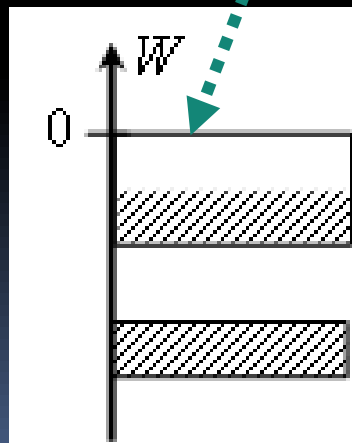
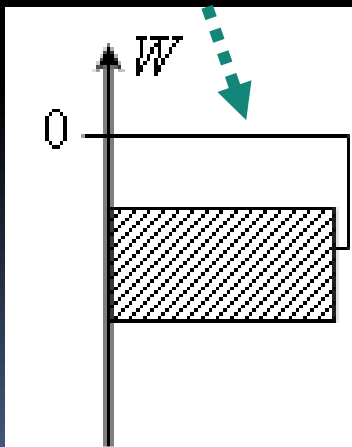
Зауважимо, що частково заповнена верхня зона є одночасно і зоною провідності (її так і називають), і валентною зоною. При цьому заборонена зона відсутня.

6.4.2. Провідники, діелектрики та напівпровідники

Провідники

Матеріали, висока провідність яких забезпечується переносом *вільних електронів в зоні провідності*.

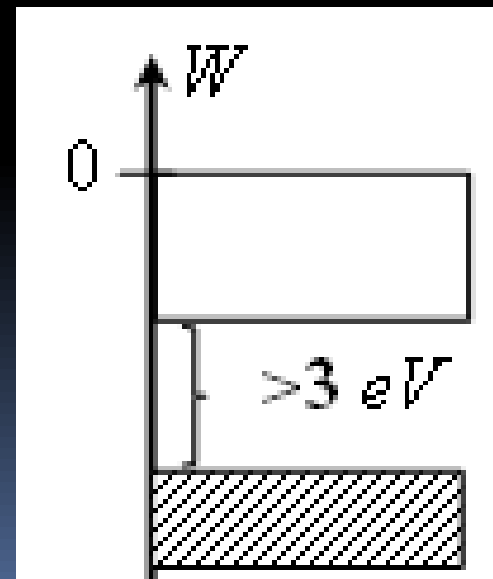
Такий тип провідності реалізується двома типами зонної структури: *гібридизації зон* та *частково заповненою зоною* провідності.



Діелектрики

Матеріали, провідність яких в звичайних умовах, фактично, **відсутня**.

Тобто **ЗП** повністю *вільна від електронів* та *ширина ЗЗ більша*, ніж у провідників та напівпровідників



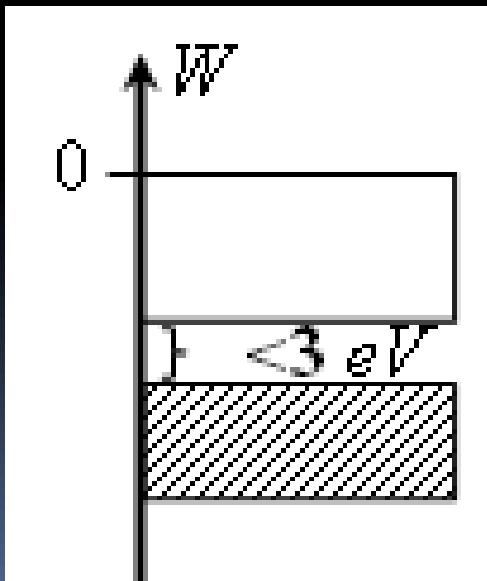
Напівпровідники

Матеріали, провідність яких в звичайних умовах (за кімнатних температур) дуже мала.

Особливістю напівпровідників є два способи переносу заряду:

- вільними електронами в зоні провідності (провідність **електронна**, або ***n*-типу**)
- зв'язаними електронами у валентній зоні (**діркова** провідність, або провідність ***p*-типу**).

Таку властивість мають деякі матеріали 4 групи таблиці Менделєєва та інтерметалеві сполуки з різних груп таблиці, середня валентність яких дорівнює 4.



ПЕРИОД	РЯД	ГРУППА ЕЛЕМЕНТОВ															
		A I	B A	II B	A III	B A	IV B	A V	B A	VI B	A VII	B					
I	1	H водород														He гелій	
II	2	Li літій		Be берилій		B бор		C вуглець		N азот		O кисень		F фтор		Ne неон	
III	3	Na натрій		Mg магній		Al алюміній		Si кремній		P фосфор		S сірка		Cl хлор		Ar аргон	
IV	4	K калій		Ca кальцій			Sc скандій		Ti титан		V ванадій		Cr хром		Mn марганець		
	5		Cu мідь		Zn цинк		Ga галій		Ge германій		As арсен		Se селен		Br бром		
V	6	Rb рубідій		Sr стронцій			Y іттрій		Zr цірконій		Nb ніобій		Mo молибден		Tc технецій		
	7		Ag срібло		Cd кадмій		In індій		Sn олово		Sb сурьма		Te телури		I йод		
6		Cs цезій		Ba барій			La лантан		Hf hafnium		Ta тантал		W вольфрам		Re реній		

Електропровідність напівпровідників

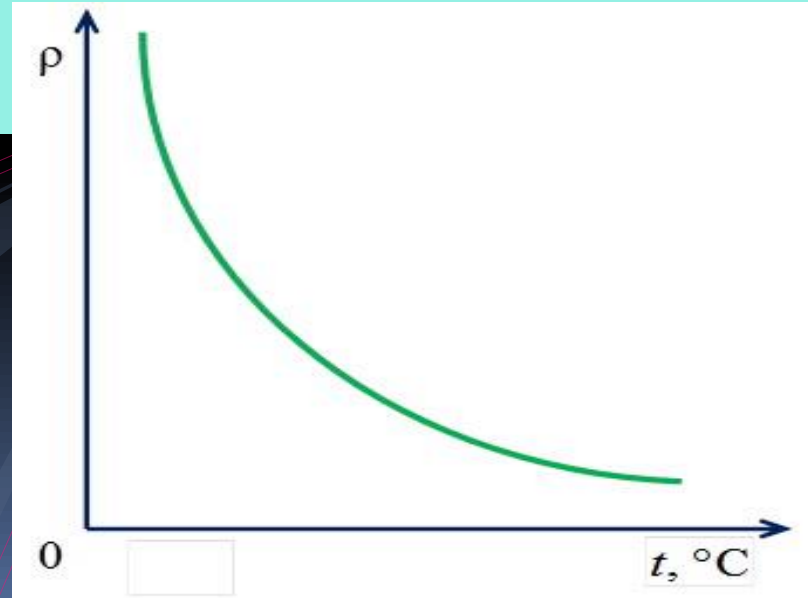
Інакше її називають *власною провідністю* напівпровідників.

Здійснюється двома типами носіїв: *n*-типу – електронами зони провідності – та *p*-типу – зв'язаними електронами валентної зони.

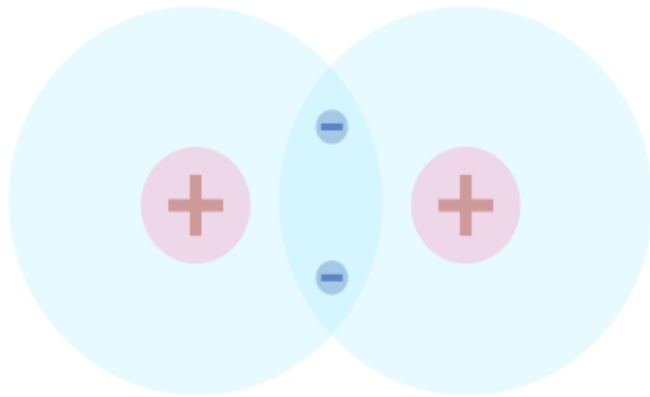
Концентрація носіїв заряду зростає з підвищенням температури за експоненціальним законом.

Тому *питомий опір* напівпровідників з власною провідністю швидко зменшується при зростанні температури

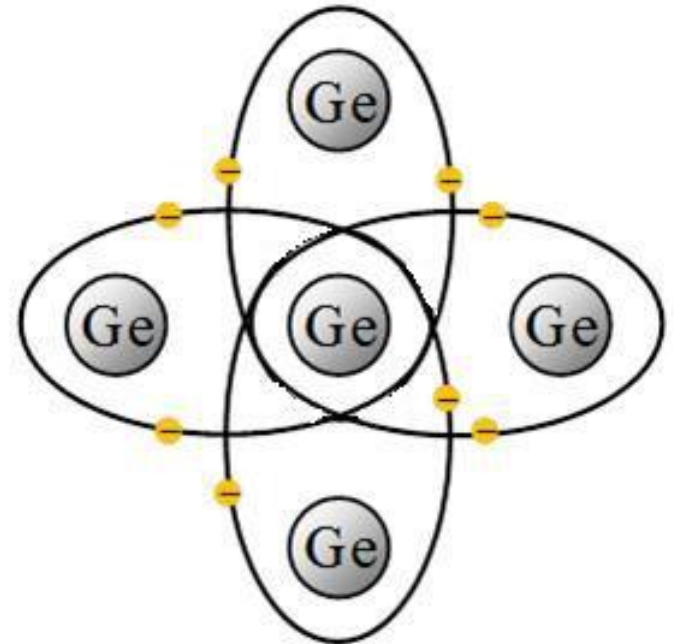
$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{\Delta W_{33}}{2kT}}$$



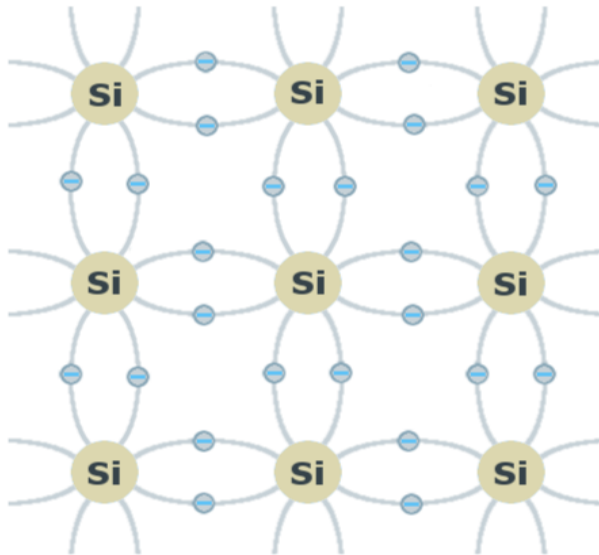
Чисті напівпровідники



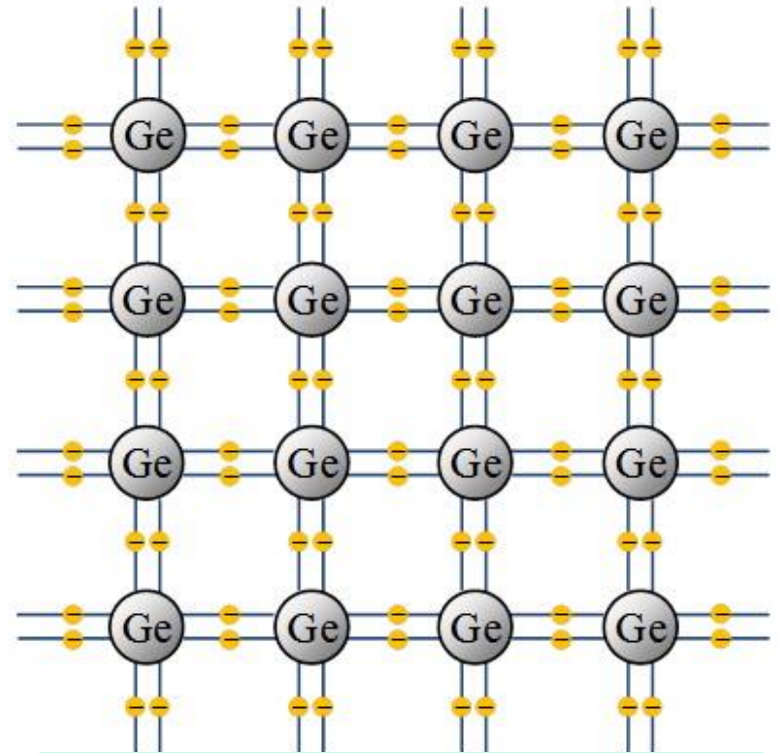
Ковалентний зв'язок



Кристалічні решітки чистих напівпровідників

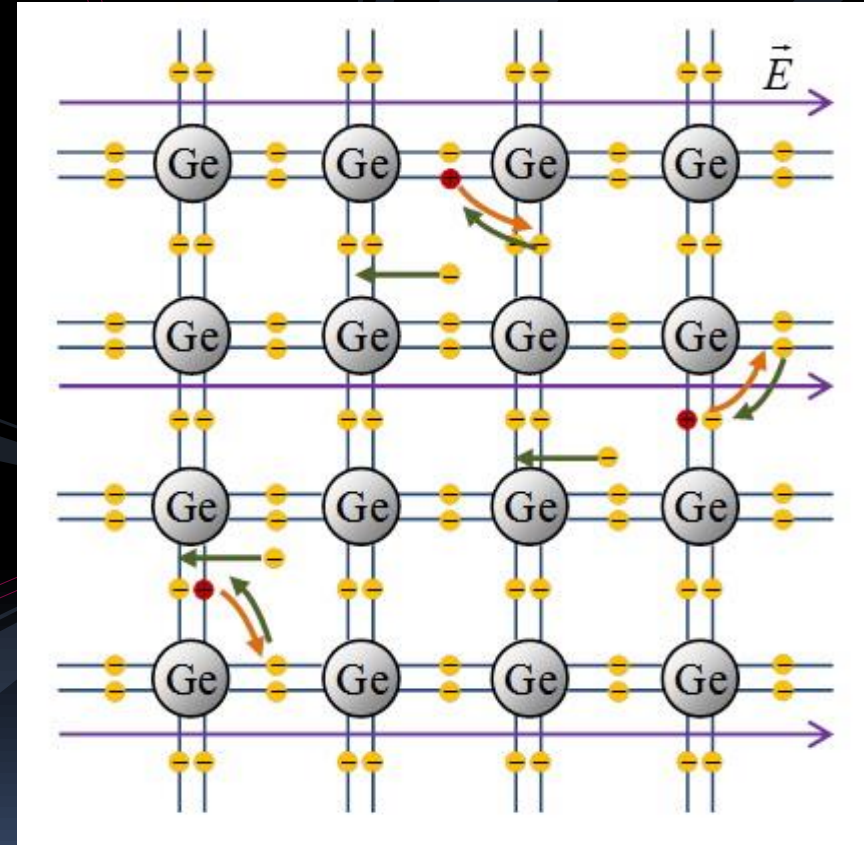
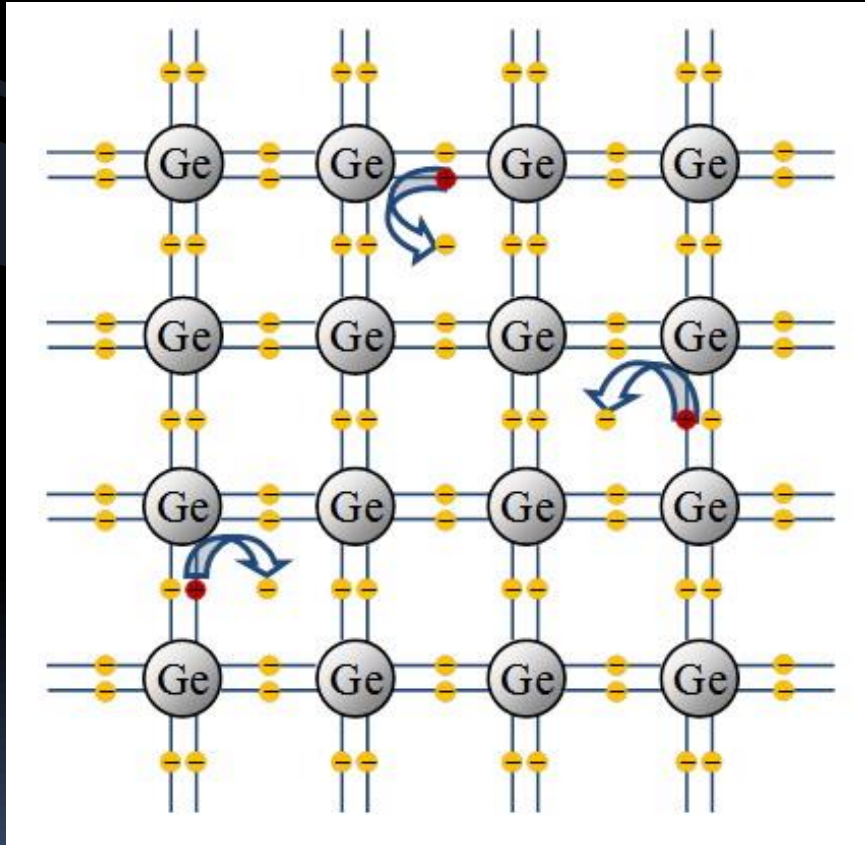


Кремній

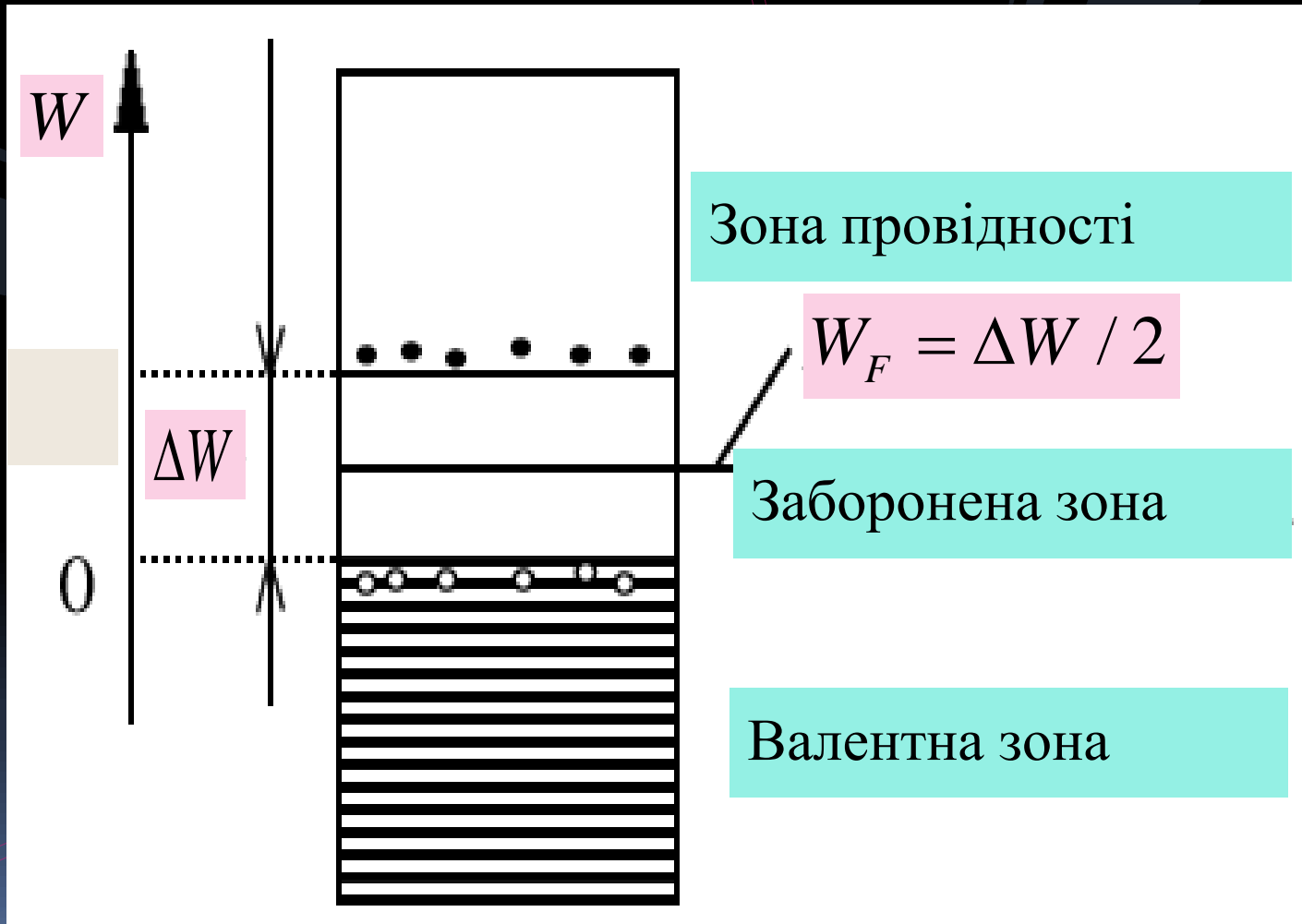


Германій

Власна провідність

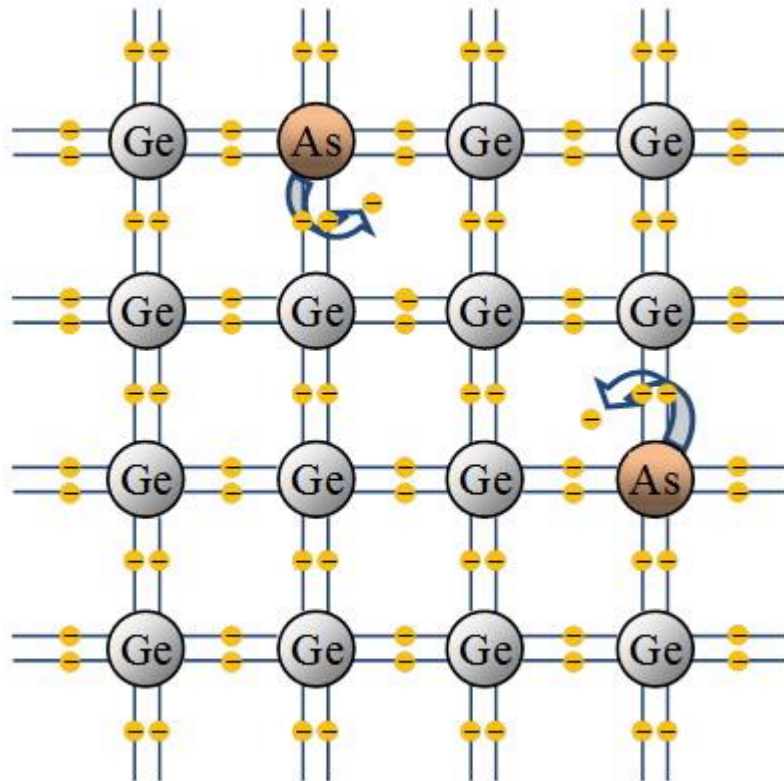


Енергетичні зони чистих напівпровідників



Домішкова провідність напівпровідників

Донорна
(n-тип)

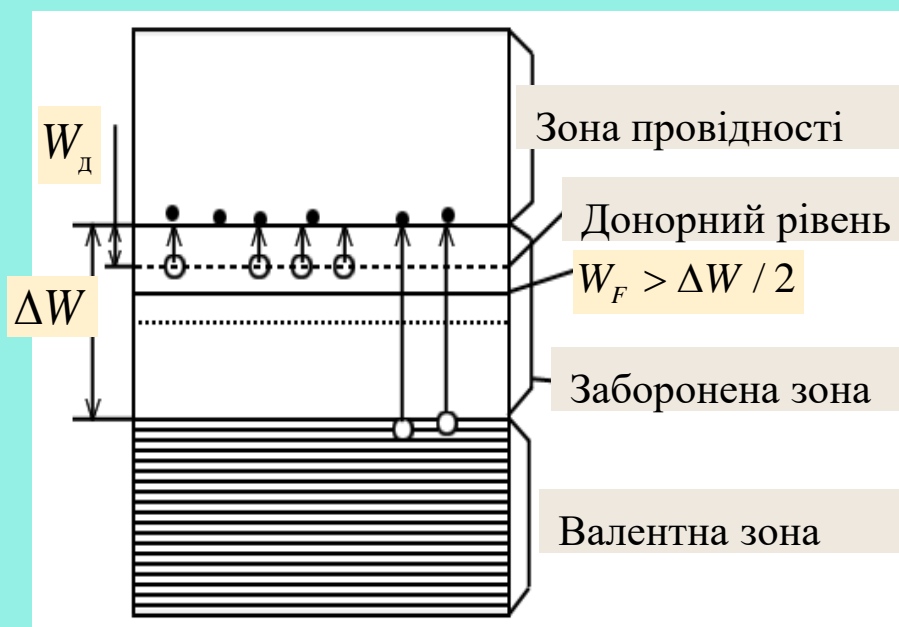


Донорна провідність напівпровідників

Донорна провідність напівпровідників (вона ж *електронна*, вона ж провідність *n*-типу) – провідність напівпровідників, де основним типом носіїв заряду є *вільні електрони* зони провідності.

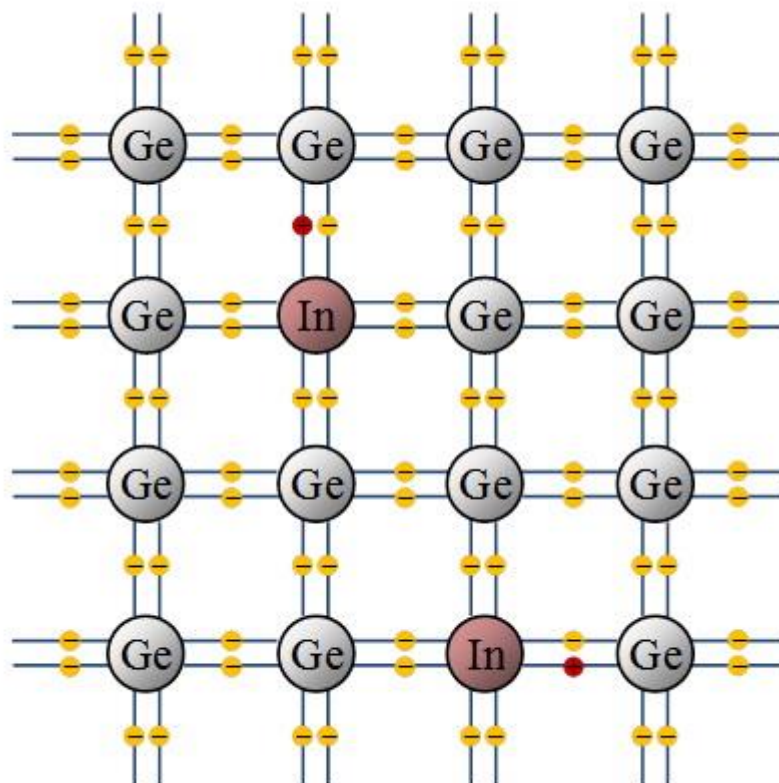
Їх висока концентрація обумовлена *домішкою* в напівпровідниках (валентність **IV**) атомів з **V** групи таблиці Менделєєва, у яких п'ятий електрон легко відривається та попадає в зону провідності.

Рівень Фермі лежить ближче до зони провідності.



Домішкова провідність напівпровідників

Акцепторна
(р-тип)

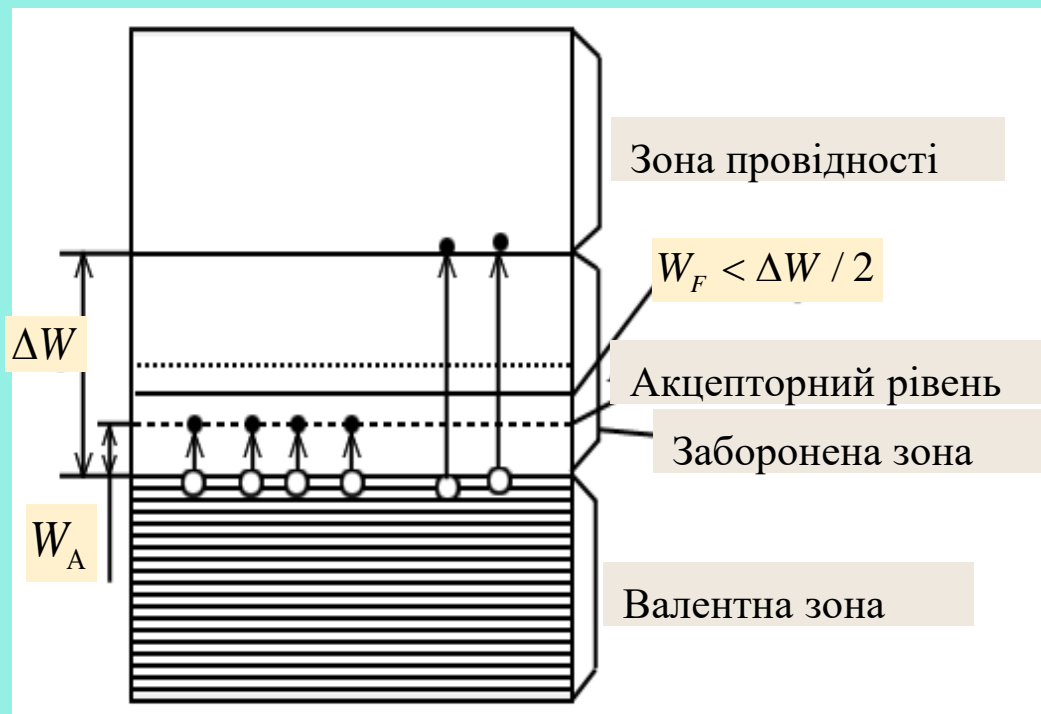


Акцепторна провідність напівпровідників

Акцепторна провідність напівпровідників (вона ж *діркова*, вона ж провідність *p*-типу) – провідність напівпровідників, де основним типом носіїв заряду є *зв'язані електрони* валентної зони (дірки).

Їхня висока концентрація обумовлена *домішкою* в напівпровідниках (валентність **IV**) атомів з **III групи** таблиці Менделєєва, які відбирають у сусідніх атомів напівпровідника один електрон (формують відсутній електрон або дірку у валентній зоні).

Рівень Фермі лежить ближче до валентної зони



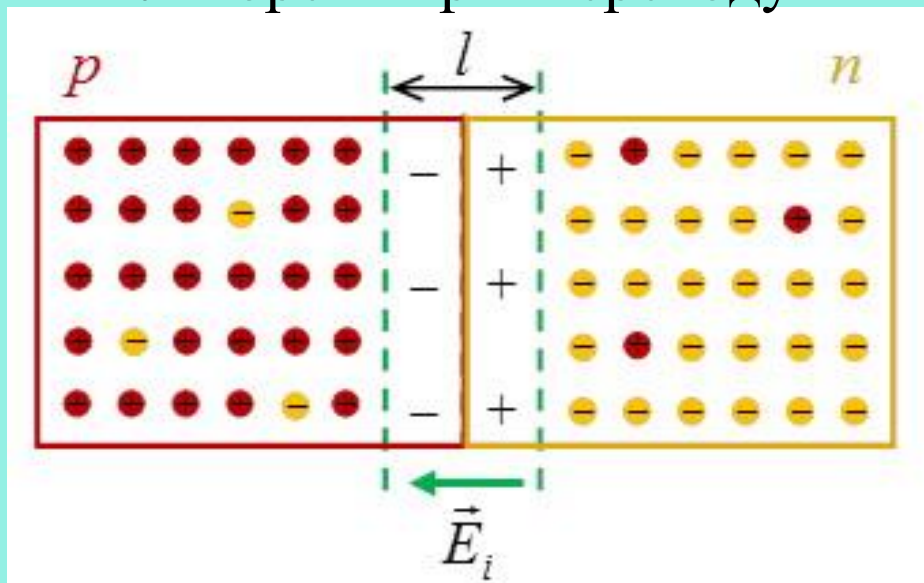
6.4.4. Напівпровідникові прилади

Контакт напівпровідників *n*- та *p*-типу завжди супроводжується процесами *дифузії* та *рекомбінації* основних носіїв заряду.

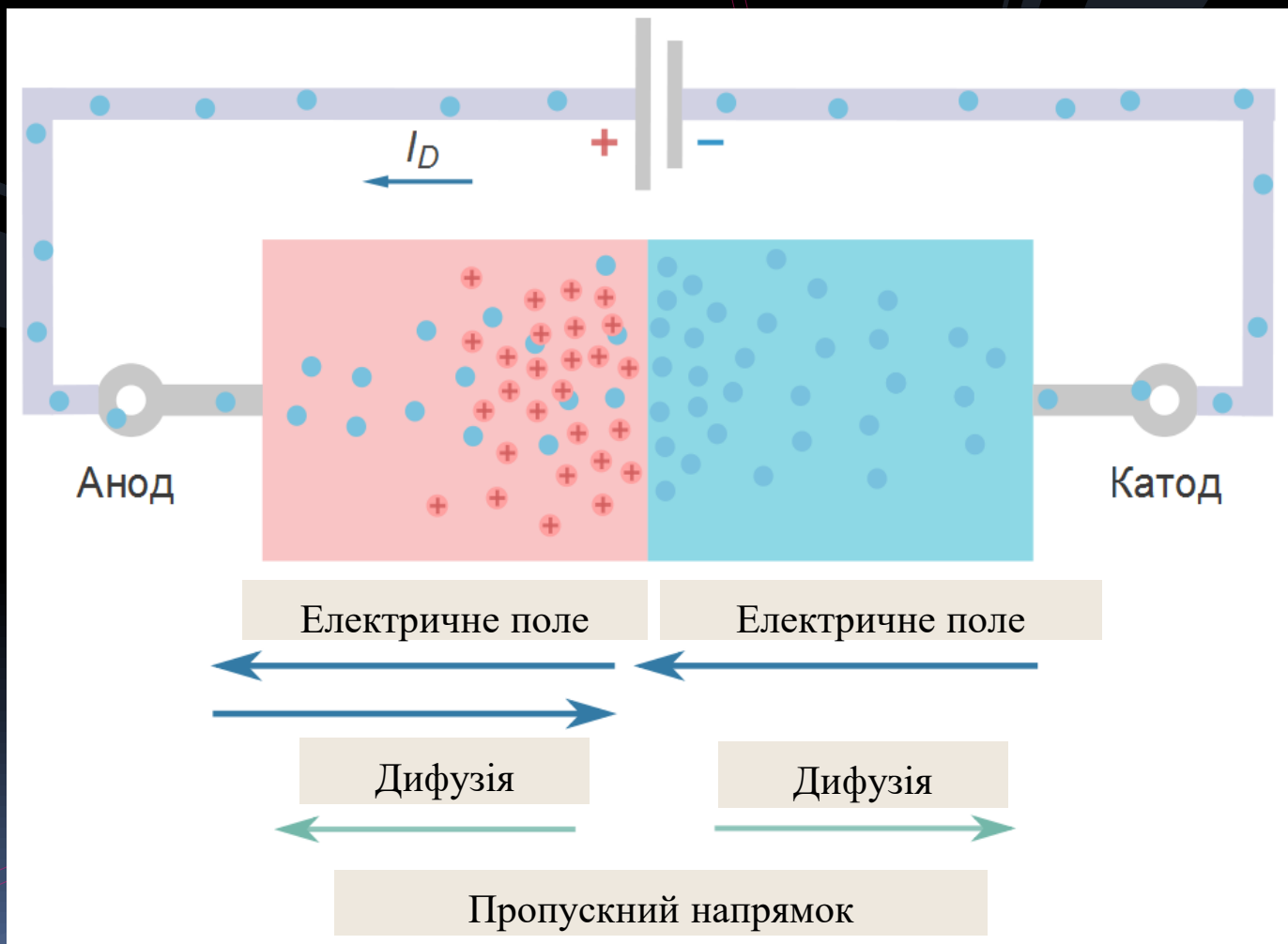
Внаслідок виникає контактна область, збіднена основними носіями заряду: *запірний прошарок* або *потенціальний бар'єр*.

Такий контакт завжди має односторонню провідність, що використовується в напівпровідникових діодах.

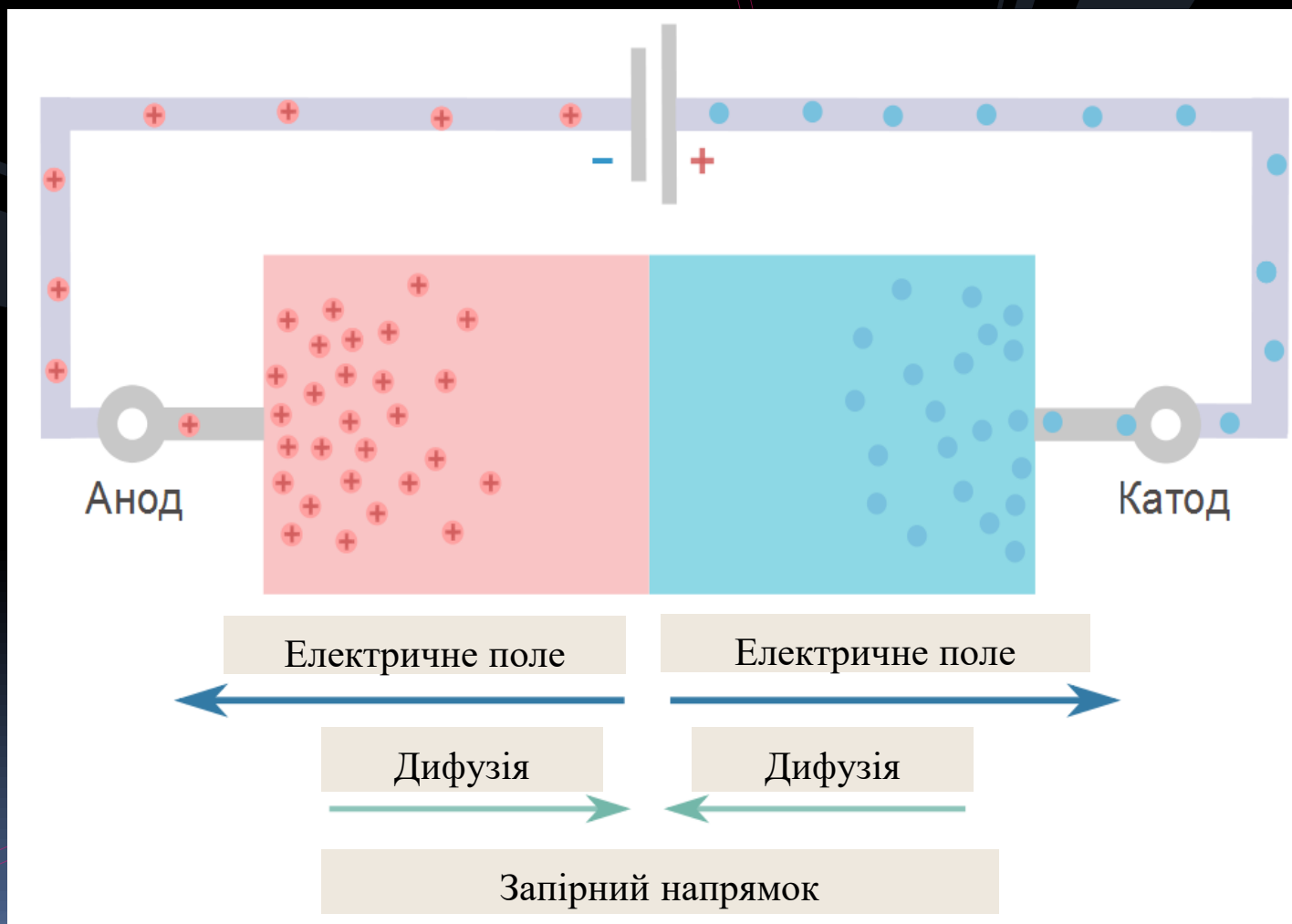
Утворення *p-n* переходу



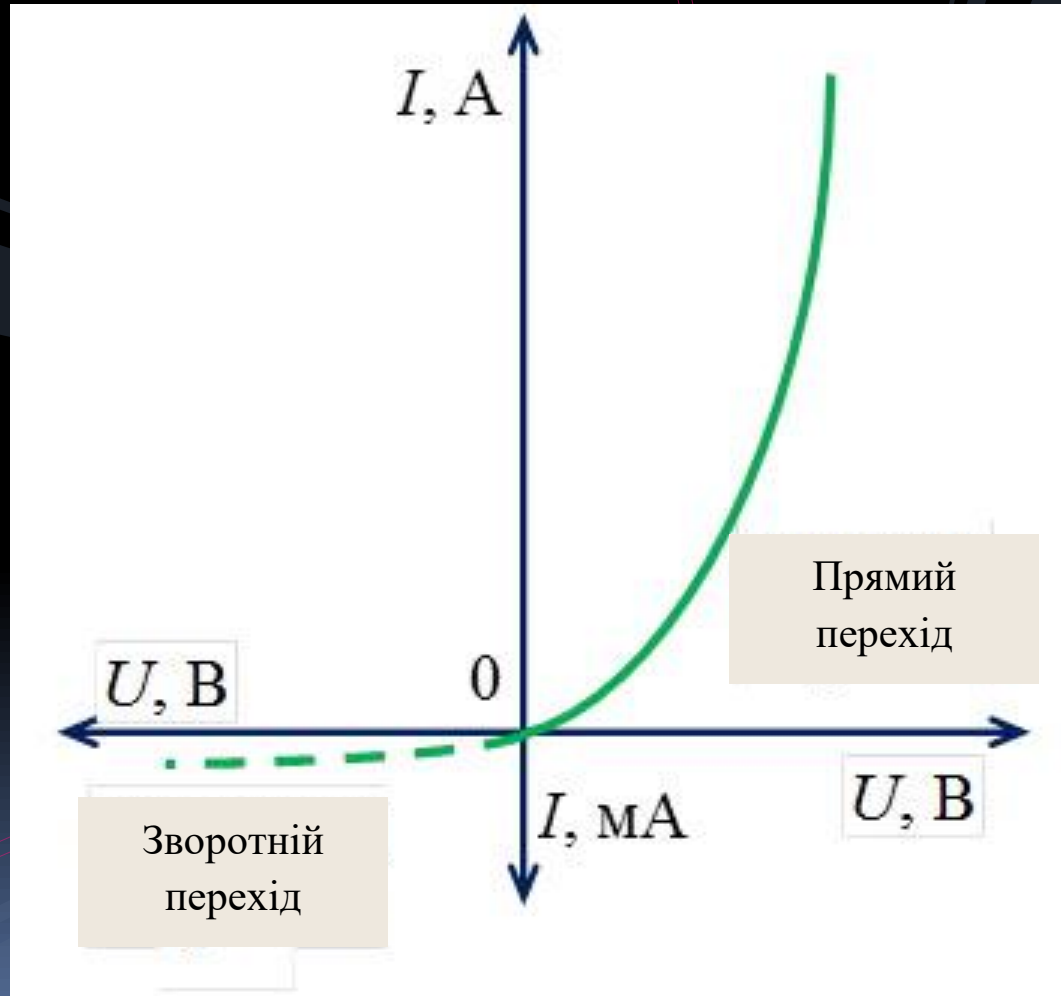
Робота у прямому напрямку



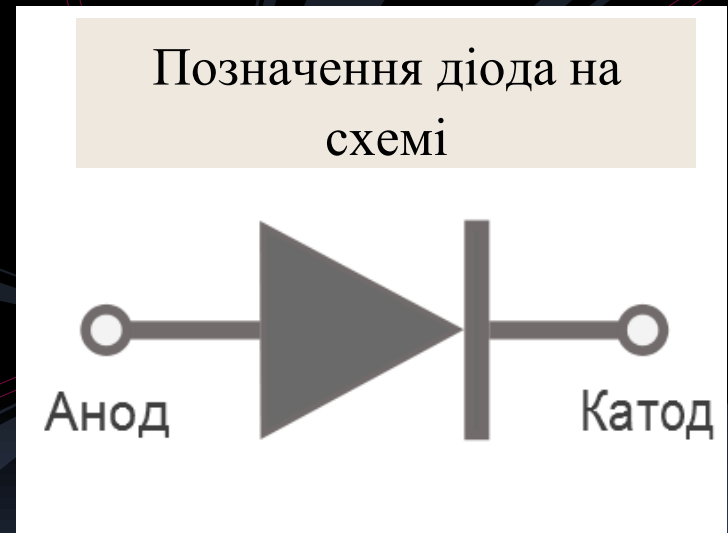
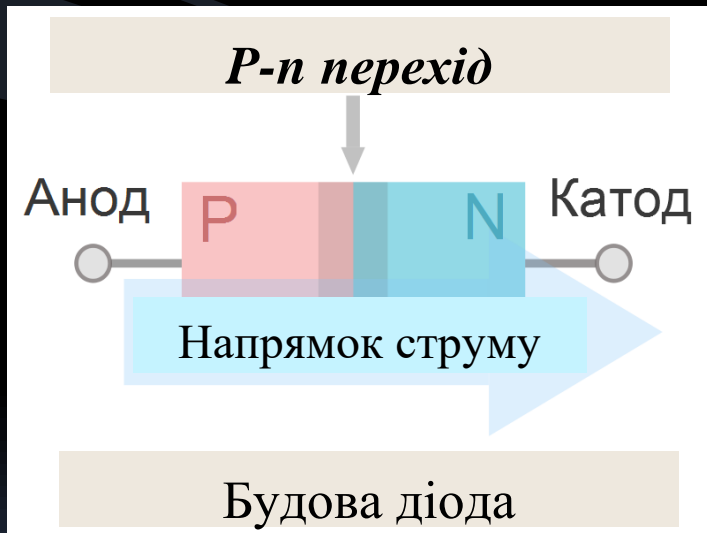
Робота у зворотному напрямку



ВАХ напівпровідникового діода



Контакт двох напівпровідників



Напівпровідникові прилади

Електронні компоненти схем, які виготовлені з *напівпровідникових* матеріалів.

Найпростіші з них:

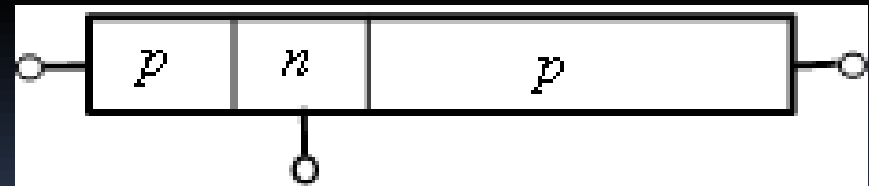
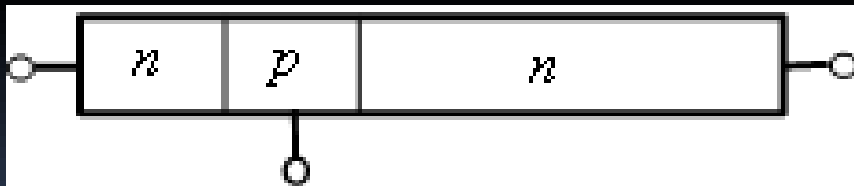
- 1) терморезистор (**термістор**) – резистор, виготовлений з напівпровідника, опір якого з ростом температури спадає;
- 2) напівпровідникові **діоди** та **діоди Шотткі** – елементи з односторонньою провідністю, виготовлені на основі контактів *p-n* та *M-n*, *M-p*;
- 3) **уні-** та **біполярні транзистори**;
- 4) **фоторезистор** – напівпровідниковий резистор, опір якого зменшується при освітленні за рахунок **внутрішнього фотоефекту**;
- 5) **фотодіод** – напівпровідниковий **діод** з відкритою областю *p-n* контакту, темновий струм якого лінійно зростає при освітленні за рахунок **внутрішнього фотоефекту**;
- 6) **фотоелемент** – система з двох напівпровідникових **діодів**, включених назустріч, один з яких є фотодіодом. На основі фотоелементів виготовляють **оптрони** та **сонячні батареї**;
- 7) **світлодіоди** та **напівпровідникові лазери** – **діоди**, які при включенні в прямому режимі дають потік некогерентного (**діоди**) чи когерентного (**лазери**) випромінювання в досить широкому діапазові (від ГЧ до УФ);
- 8) **інтегральні схеми** та **спеціальні прилади** – широка область сучасної мікро- та наноелектроніки.

Біполярні транзистори

Біполярний транзистор - триелектродний напівпровідниковий пристрій, призначений для використання в схемах підсилення електричних сигналів.

В цих транзисторах використано **контакти напівпровідників двох** (звідси приставка **бі-**) **різних типів** (*n*-типу та *p*-типу).

Структурно-технологічні схеми таких транзисторів представлені на рисунках.



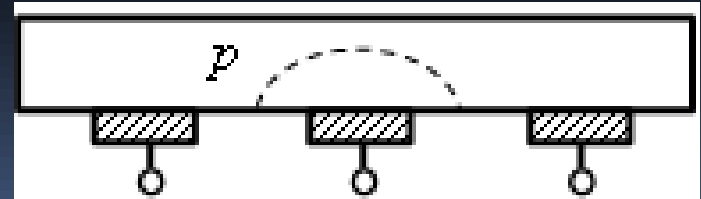
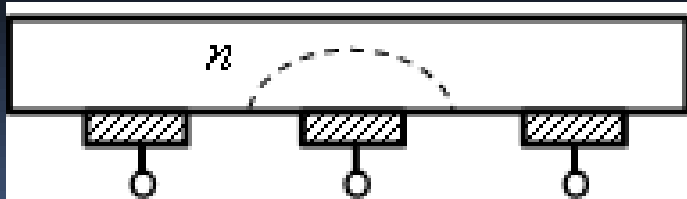
Уніполярні транзистори

Уніполярний транзистор - триелектродний напівпровідниковий пристрій, призначений для використання в схемах підсилення електричних сигналів.

Транзистори, в яких використано напівпровідник лише з **одним типом провідності** (уні) та **властивості контактів напівпровідників з металами**.

Структурно-технологічні схеми таких транзисторів представлені на рисунках.

Обов'язкова умова: метал для середнього контакту (**затвор**) підбирають так, щоб у взятому за основу напівпровіднику виникав **запірний прошарок** (штрих-пунктирна лінія на рисунках).



Застосування напівпровідникових діодів

термістори



фоторезистори



світлодіоди

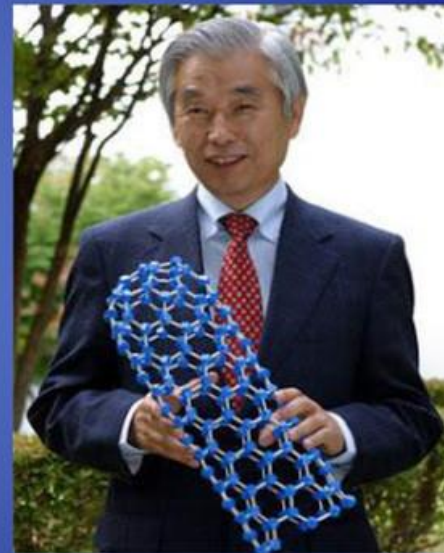


Основи мікро- та наноелектроніки

- Різні етапи розвитку *електроніки* в напрямку *мініатюризації*.
- Стадія мікроелектроніки характеризувалась створенням *інтегральних мікросхем*, характерний розмір активних елементів яких був меншим за **10 мкм**.
- Нинішній стан – *наноелектроніка* – характеризується створенням інтегральних схем, розміри активних елементів яких менше **100 нм**.
- Успіх став можливим завдяки *інтерференційним методам еталонування* та вимірювання довжин, точність яких **1 нм**.

Коротка історична довідка

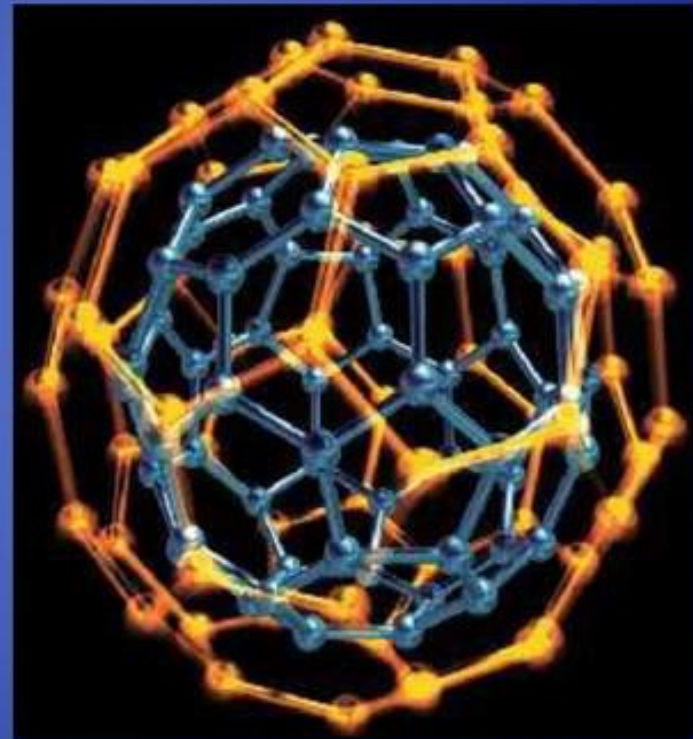
- Вперше запропонував досліджувати фізичні тіла на атомарному рівні Ісаак Ньютон у 1704 році
- Основи нанотехнології заклав американський фізик Річард Фейнман (1959 р.)
- Термін «нанотехнологія» ввів у 1974 році японський фізик Норіо Танігуті.



Основи мікро- та наноелектроніки

Хімічні відкриття, що вплинули на нанотехнології

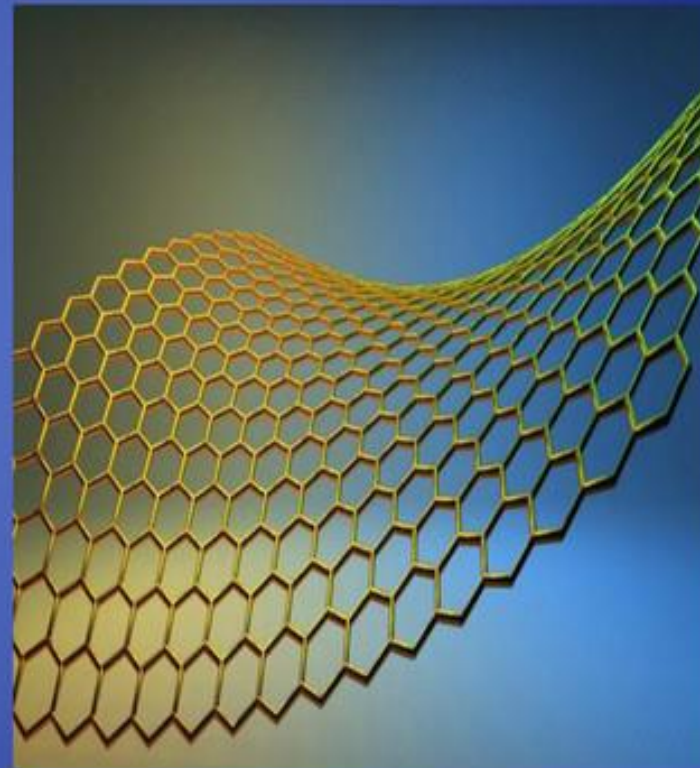
- Розвиток нанотехнологій став можливим після відкриття фулеренів – нової алотропної модифікації атома Карбону (1985 р.). Властивість Карбону утворювати надтонкі матеріали і стало основою сучасних нанотехнологій.



Основи мікро- та наноелектроніки

Приклад наноматеріалу

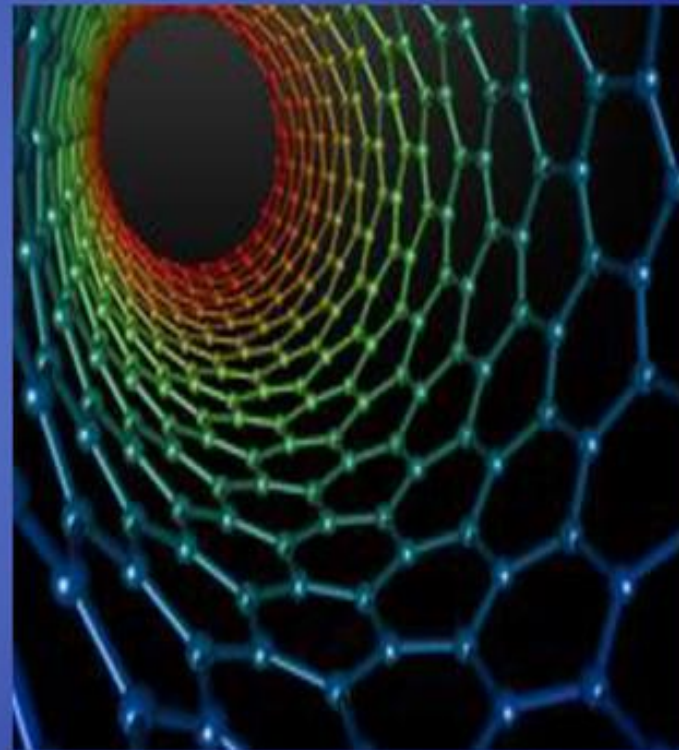
- Графен – штучно отримана гексагональна модифікація (2004 р.) з одноатомного шару Карбону. Його міцність на порядок вища за міцність будь-якої відомої науці речовини. Має надзвичайну електропровідність.



Основи мікро- та наноелектроніки

Галузі нанотехнологій

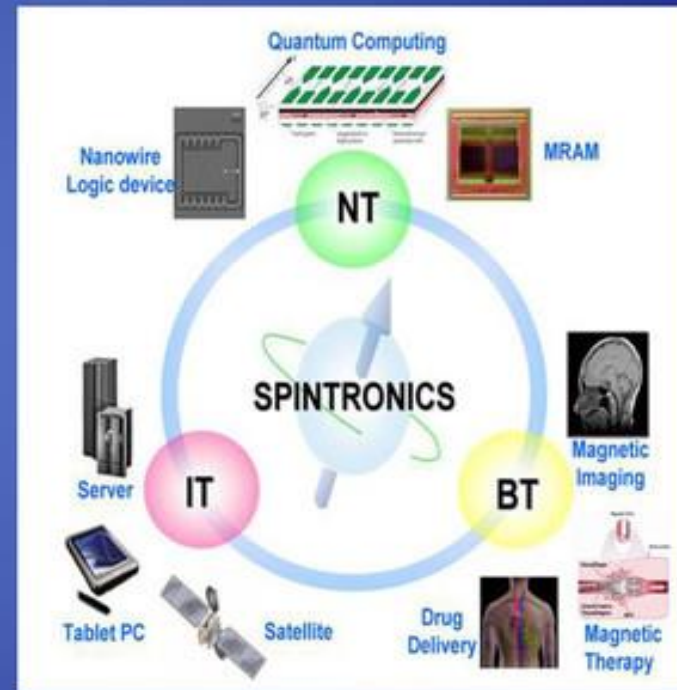
- Наноелектроніка
- Наномеханіка
- Спінтроніка
- Нанооптика
- Наносенсорика
- Нанобіологія
- Наномедицина



Основи мікро- та наноелектроніки

Спінтроніка

- Це галузь електроніки, що використовує квантові властивості спіну електронів, що характеризуються двома квантовими станами. Пристрої для запам'ятовування інформації, генератори змінної напруги, транзистори на ефекті поля – це приклади застосування спінтроніки.



Квантові комп'ютери та квантова запутаність

[\(1058\) Квантові ефекти, запутування частинок та квантова телепортація – YouTube](#)