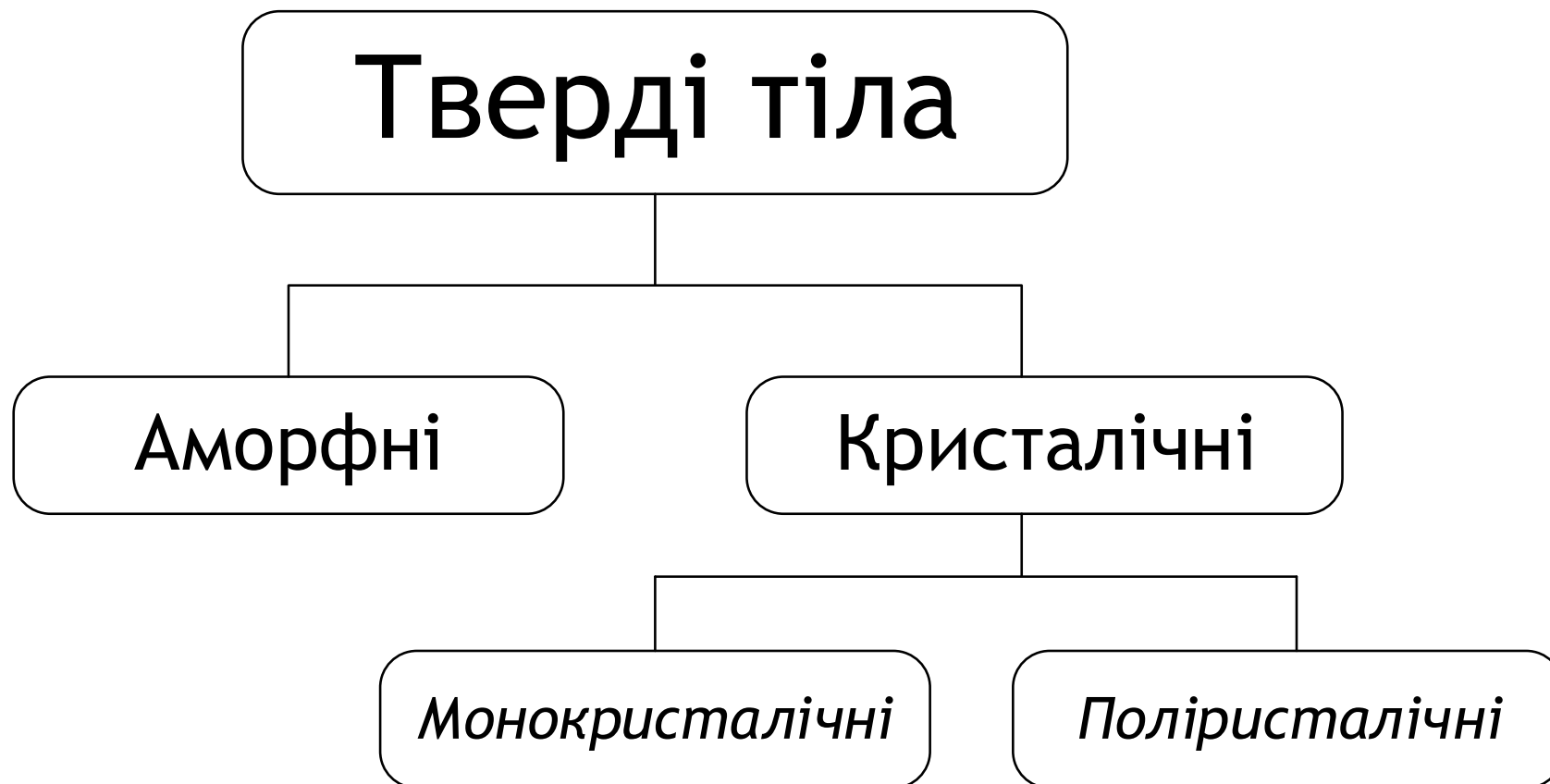


Модуль 4 - Фізика другої половини ХХ - початку ХХІ ст.

Лекція 13

Основи фізики твердого тіла





Тверді тіла

```
graph TD; A[Тверді тіла] --- B[Ізотропні: фізичні властивості не залежать від напрямку дії (метали, кераміка)]; A --- C[Анізотропні: фізичні властивості залежать від напрямку дії (кристали)];
```

Ізотропні:

фізичні властивості не залежать від напрямку дії (метали, кераміка)

Анізотропні:

фізичні властивості залежать від напрямку дії (кристали)

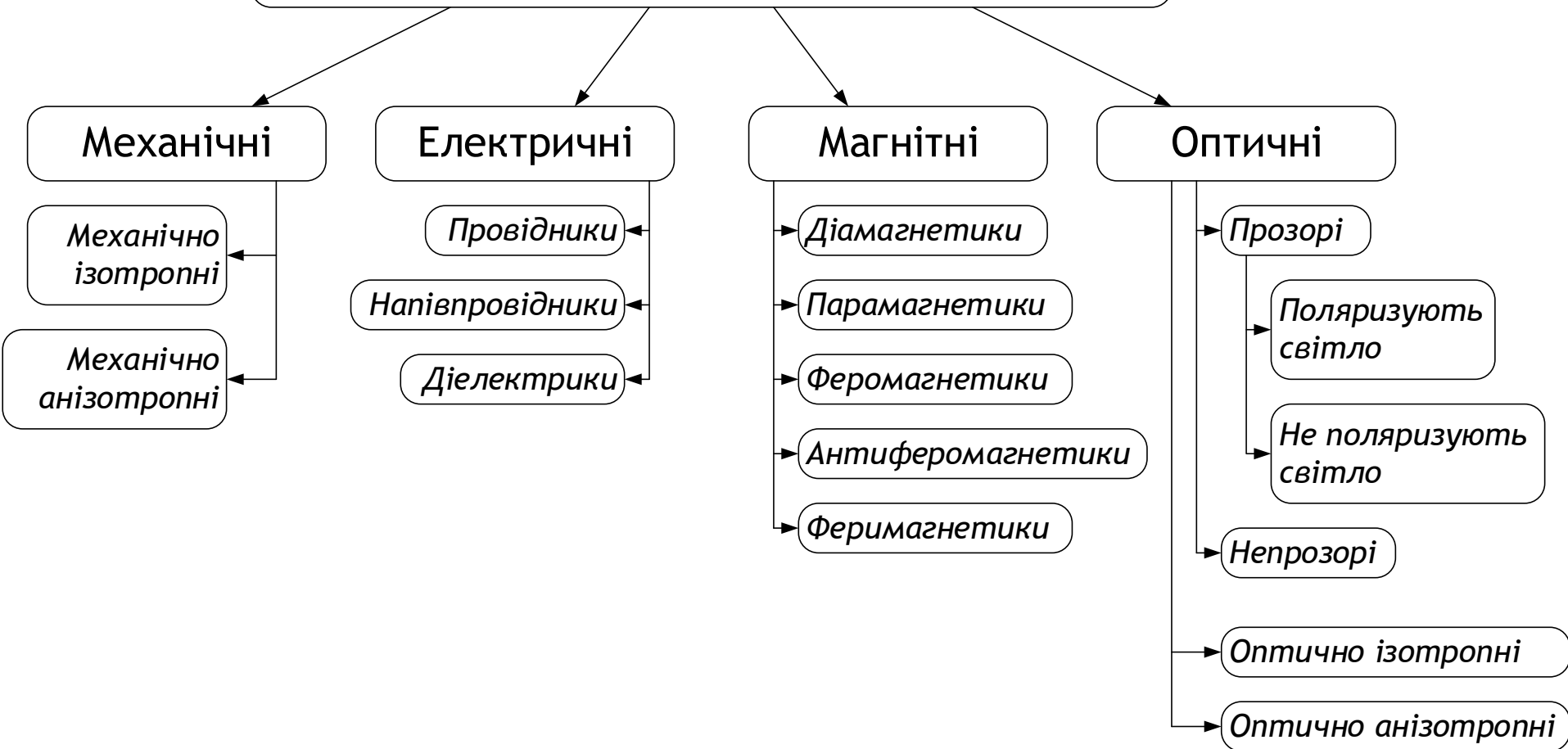
Тверді тіла – це фізичні тіла, що зберігають форму та об'єм. Тверді тіла поділяються на аморфні та кристалічні. В аморфних тілах якийсь помітний порядок в розміщенні атомів/молекул відсутній, а у кристалічних – наявний. В свою чергу кристалічні поділяються на монокристалічні та полікристалічні. Основна відмінність між ними полягає у тому, що в монокристалічних тілах зберігається строгий дальній порядок (тобто на відстані сотень і тисяч міжатомних відстаней структура розміщення атомів у кристалічній ґратці буде точно такою ж самою), а в полікристалічних – не зберігається (тобто кристалічна ґратка може бути трохи повернута або деформована).

Фізичні властивості твердих тіл значною мірою обумовлені будовою кристалічної ґратки.

Сучасна фізика твердого тіла вивчає механічні, електричні, магнітні та оптичні властивості твердих тіл.

Механічні властивості (густина, твердість, деформації) були розглянуті раніше, в темі «Речовина». Оптичні властивості (коефіцієнт заломлення, поляризація) розглядалися у темі «Оптика». Тому далі ми розглянемо лише електричні та магнітні властивості, а також прозорість.

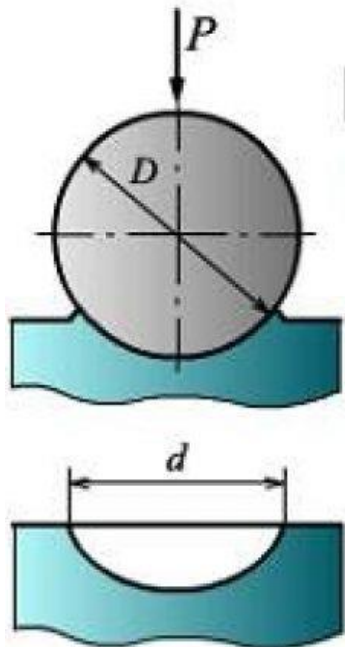
Властивості твердих тіл



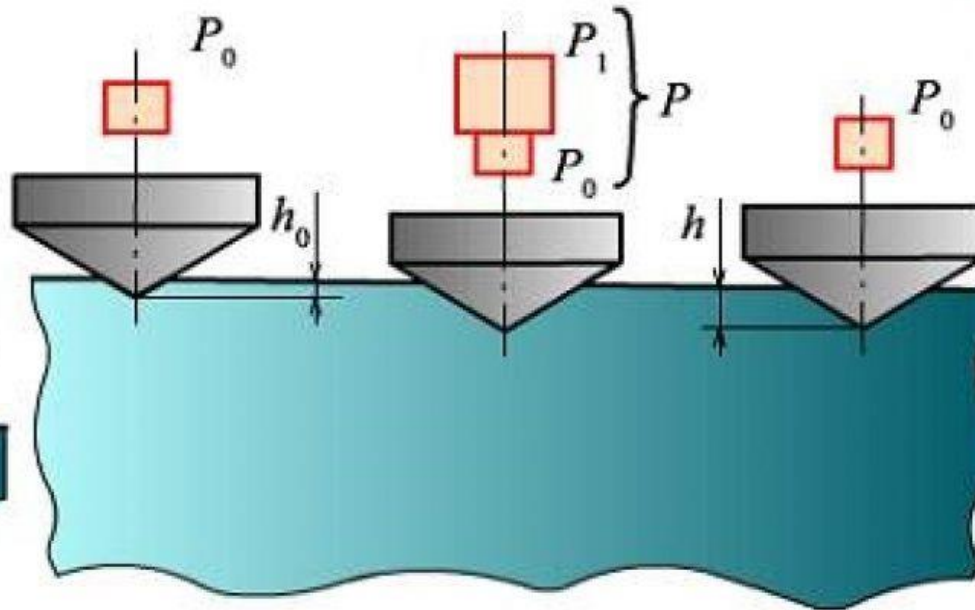
Механічні властивості твердих тіл

Вимірювання твердості

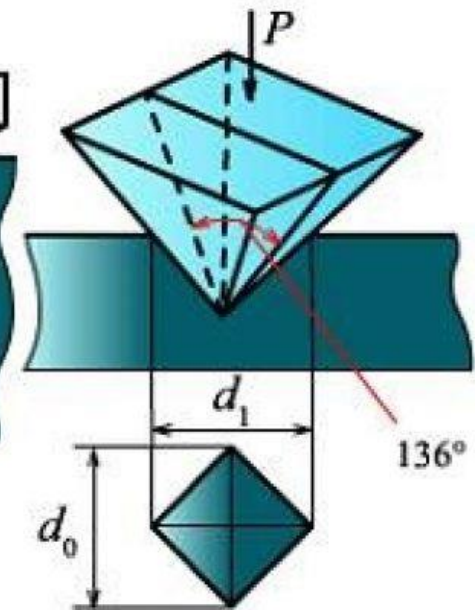
Метод Бріннеля
(вдавлювання
металевої
кульки)



Метод Роквелла
(вдавлювання алмазного конуса)



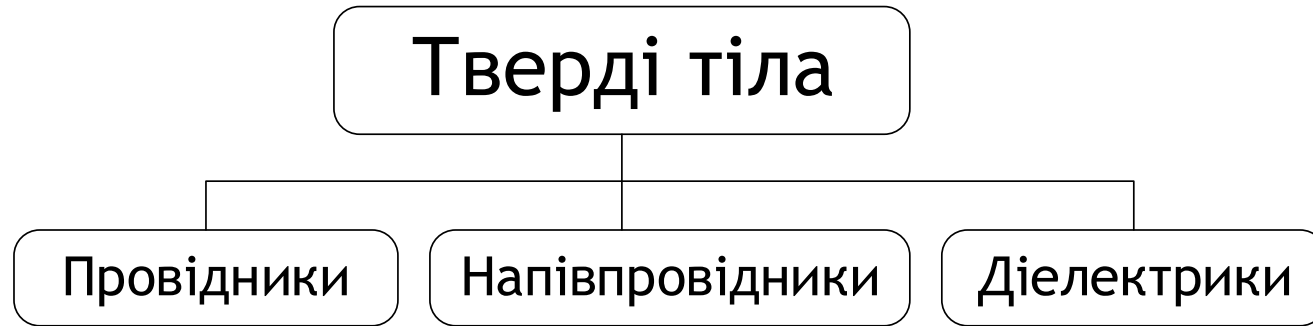
Метод Віккерса
(вдавлювання
чотирикутної
алмазної
пірамідки)



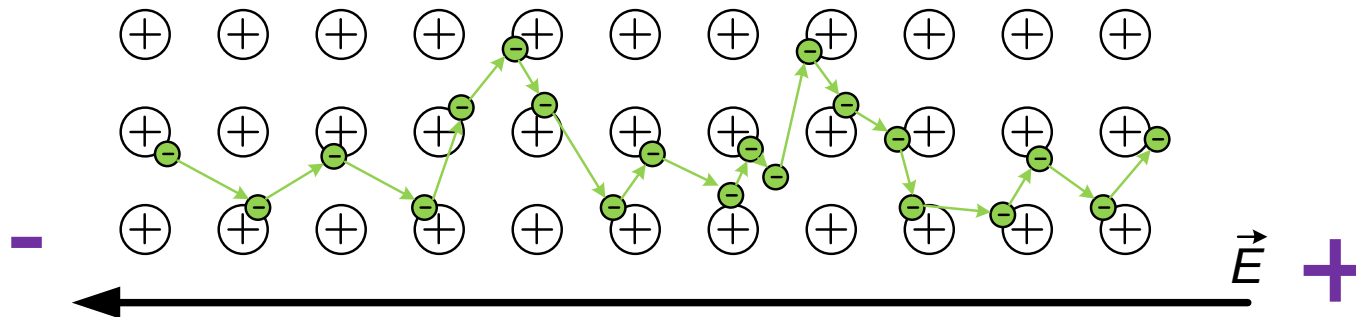
Механічні властивості твердих тіл

Шкала відносної твердості по Моосу

Твердість	Мінерал	Абсолютна твердість
1	Тальк ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$)	1
2	Гіпс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	3
3	Кальцит ($CaCO_3$)	9
4	Флюорит (CaF_2)	21
5	Апатит ($Ca_5(PO_4)_3(OH-,Cl-,F-)$)	48
6	Польовий шпат ($KAlSi_3O_8$)	72
7	Кварц (SiO_2)	100
8	Топаз ($Al_2SiO_4(OH-,F-)_2$)	200
9	Корунд (Al_2O_3)	400
10	Алмаз (C)	1500

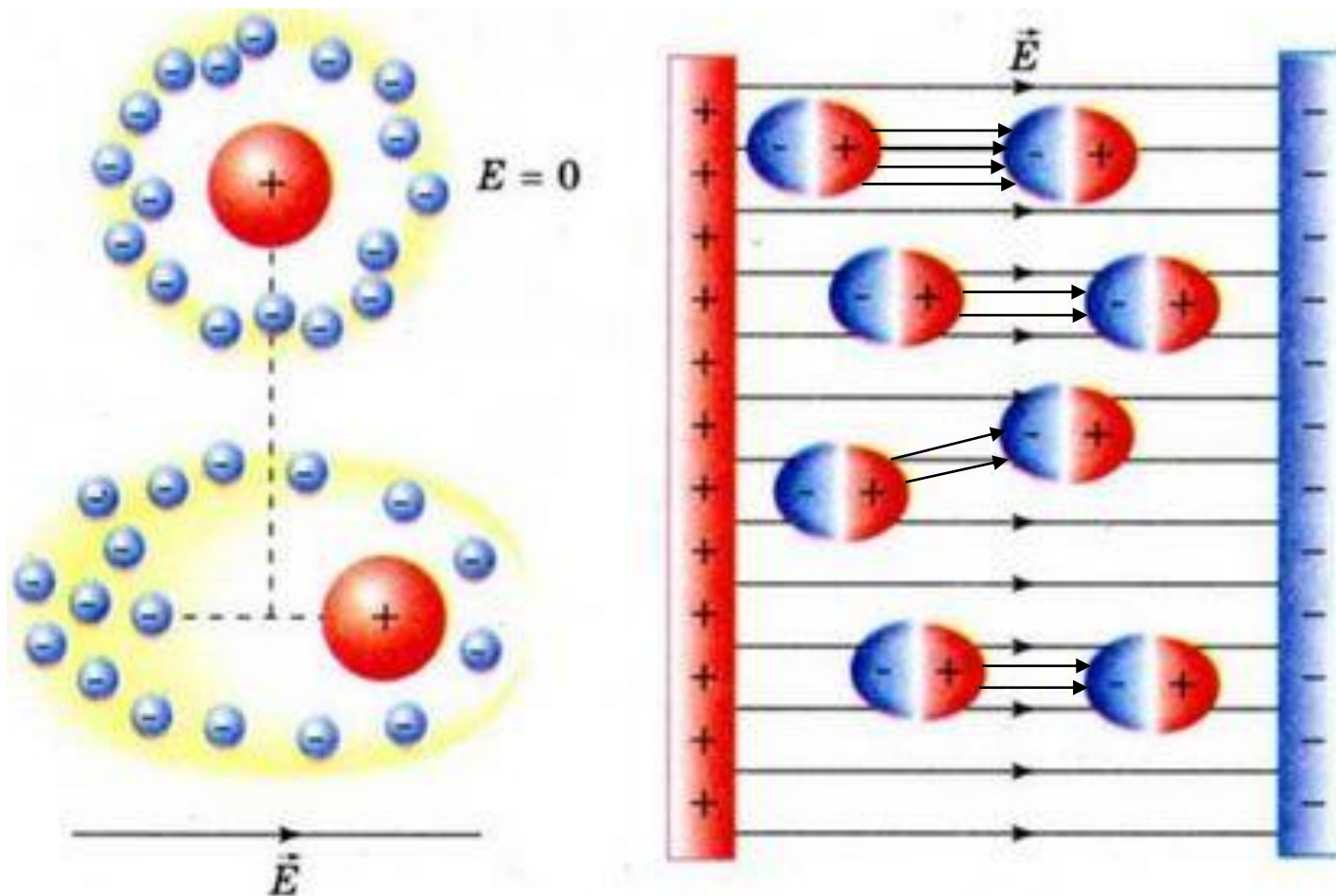


Класична теорія електропровідності металів говорить, що в металі електрони, які знаходяться на зовнішніх електронних оболонках - слабо зв'язані з ядрами атомів, і ведуть себе майже як газ у закритій посудині. Тому говорять про «електронний газ в металах». Якщо до металу прикласти найменшу різницю потенціалів - потече електричний струм провідності. Електрони при цьому рухаються в цілому хаотично, але мають так звану дрейфову швидкість, яка пропорційна напрузі.



Електричні властивості твердих тіл

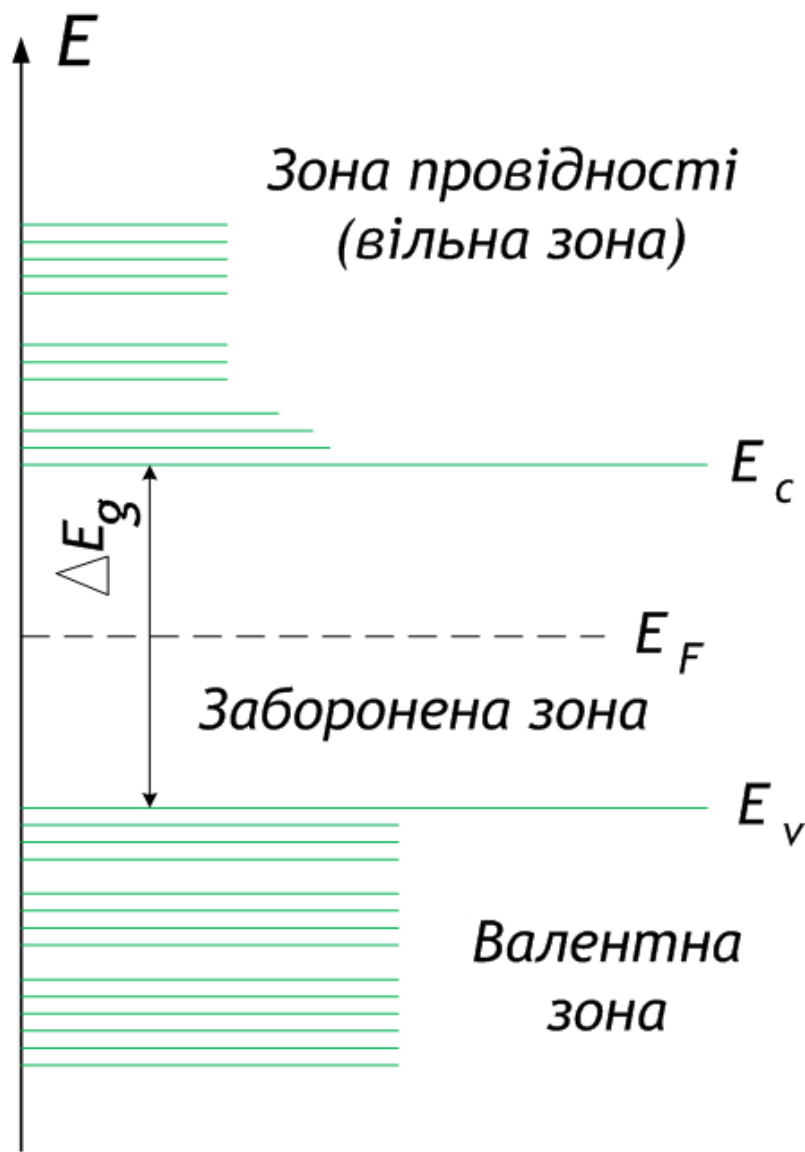
Явище поляризації в діелектриках



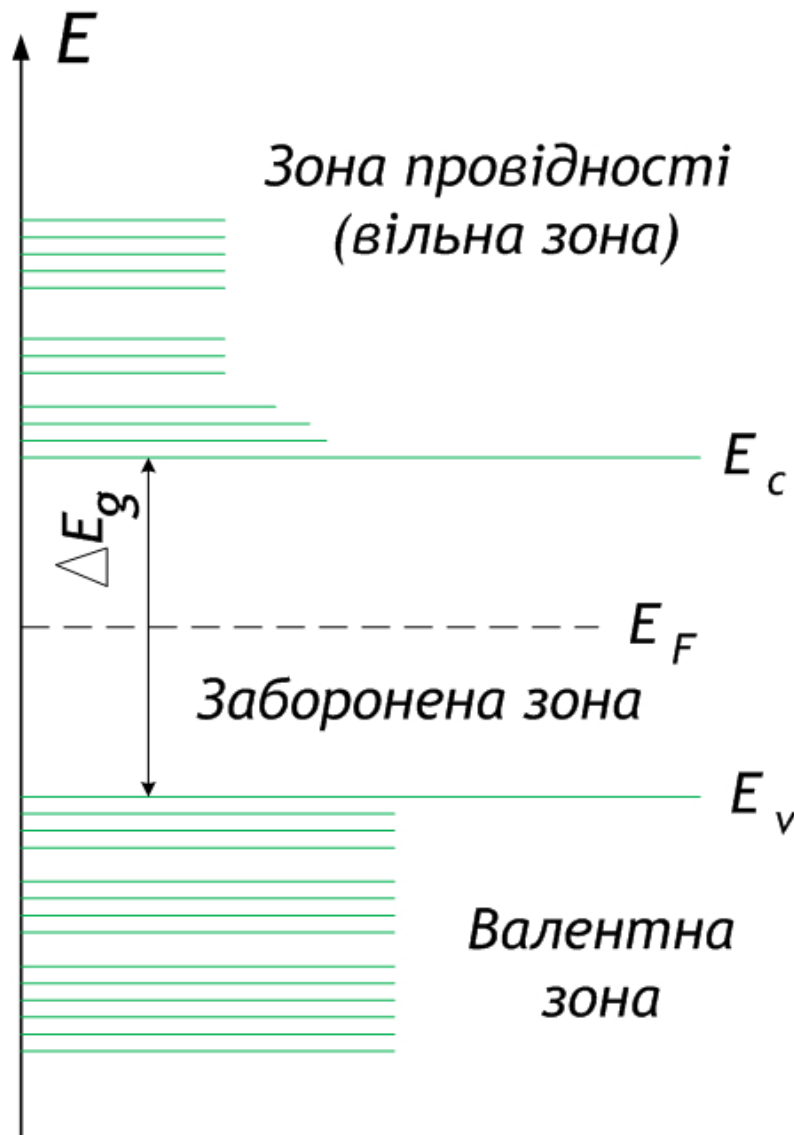
Всередині діелектрика електричне поле в ϵ разів сильніше, ніж зовнішнє електричне поле.

Електричні властивості твердих тіл

Розподіл електронів по енергіям у твердому тілі



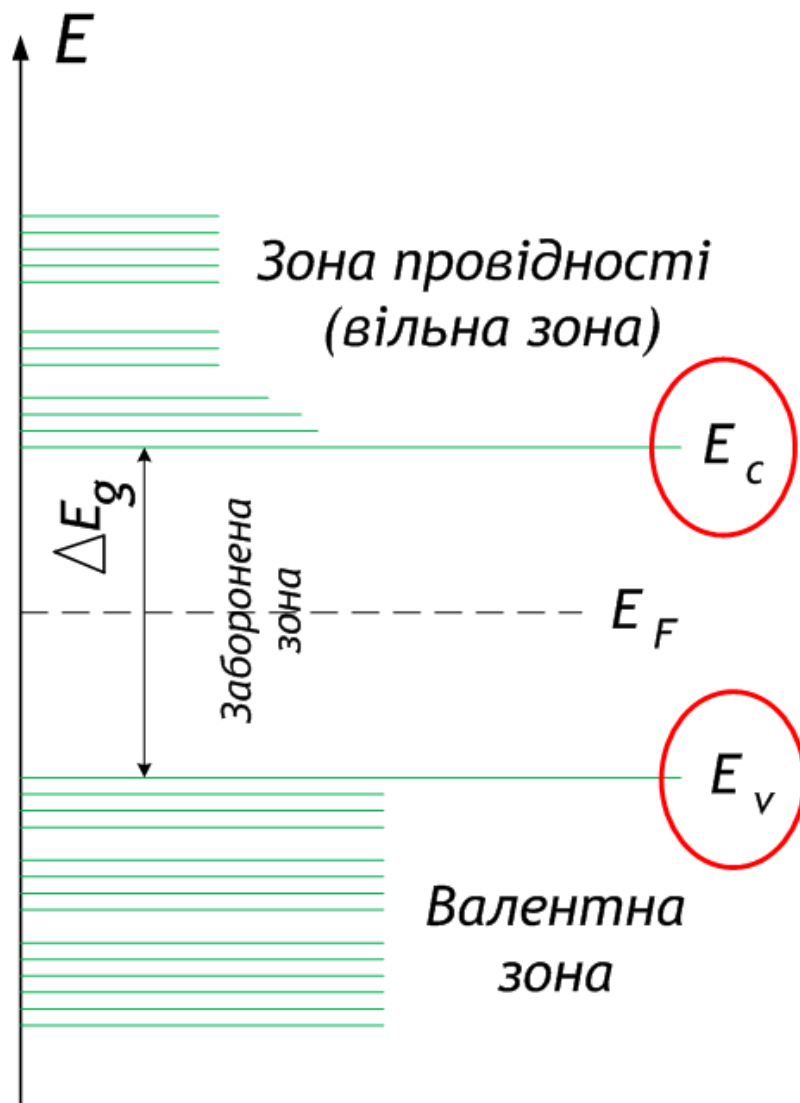
У речовині в околі атома електрони можуть знаходитися лише на певних енергетичних рівнях (які можна уявляти собі як відстані від електрона до ядра - чим далі від ядра, тим вищий енергетичний рівень). Доки електрон знаходиться на одному енергетичному рівні, він не випромінює енергію і не втрачає її. При переході електрона з вищого енергетичного рівня на нижчий енергія випромінюється, а для переходу з нижчого енергетичного рівня на вищий електрон повинен десь взяти енергію.



Таким чином, практично всі електрони за своїми енергіями вкладаються у так звану валентну зону – це така область енергій, електрони у якій жорстко пов'язані із ядром атома і самостійно мігрувати по всьому об'єму речовини не можуть. Натомість деяка невелика кількість електронів може мати значно більшу енергію, і вони утворюють так звану вільну зону (або зону провідності) – це ті електрони, які жорстко не пов'язані із ядрами атомів і можуть вільно мігрувати в межах об'єму твердого тіла.

Розподіл електронів по енергіям у твердому тілі

Границі зон



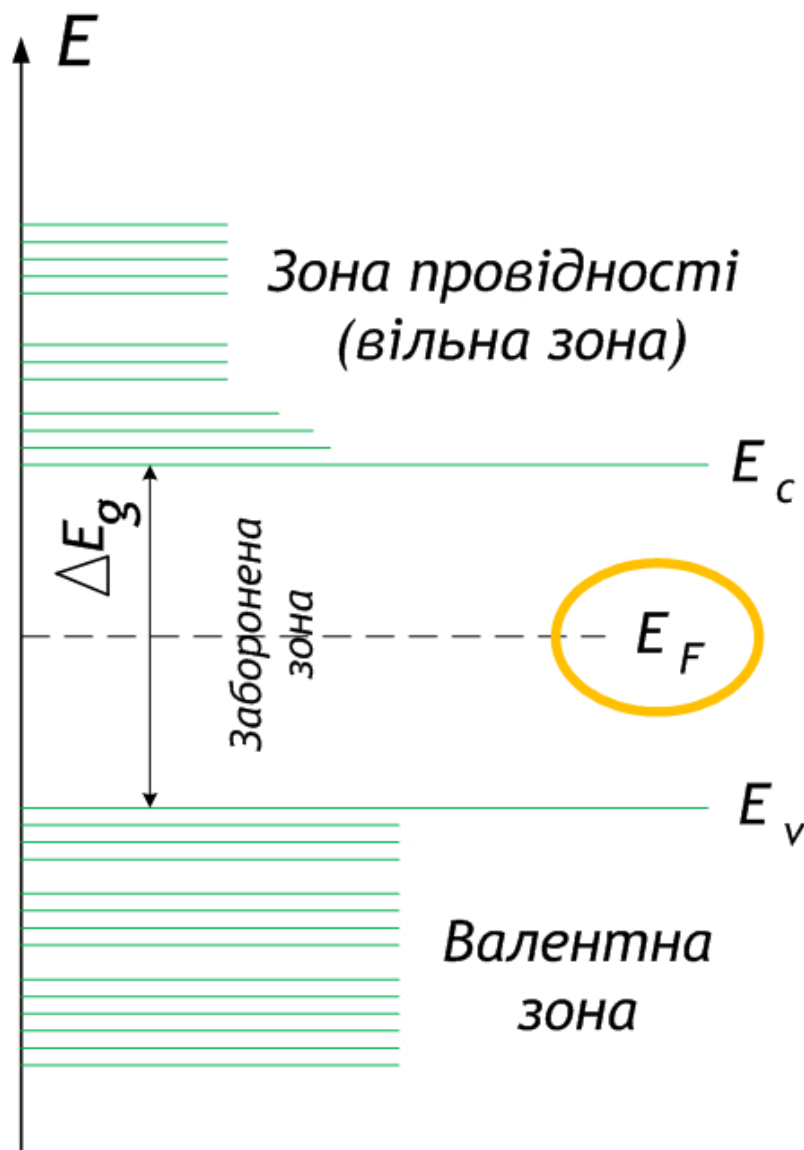
Саме електрони із зони провідності відповідають за протікання електричного струму. Максимальна енергія валентної зони позначається E_v , а мінімальна енергія зони провідності - E_C . Таким чином, ширина забороненої зони становить

$$\Delta E_g = E_C - E_v.$$

Заборонена зона - це така область енергій електронів, яка для даної речовини не характерна, і електронів з такими енергіями у цій речовині немає.

Розподіл електронів по енергіям у твердому тілі

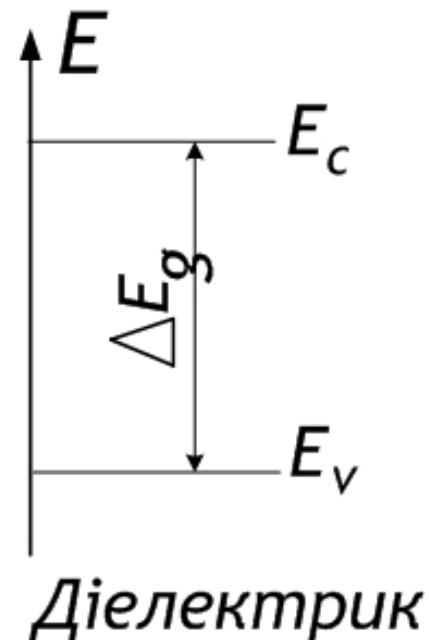
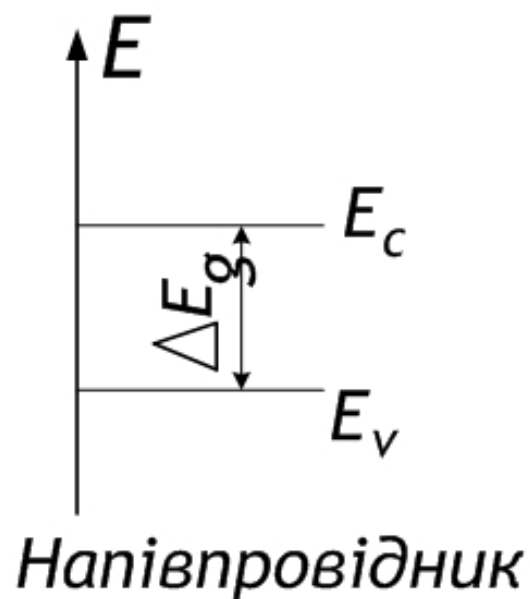
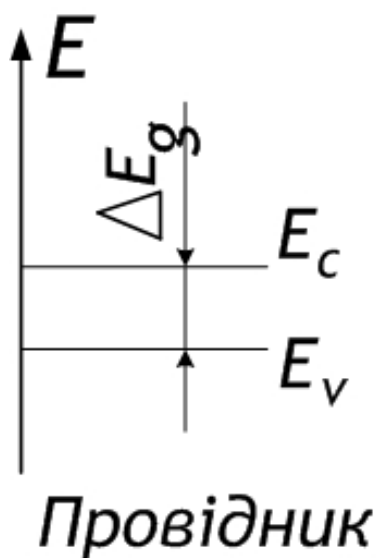
Рівень Фермі



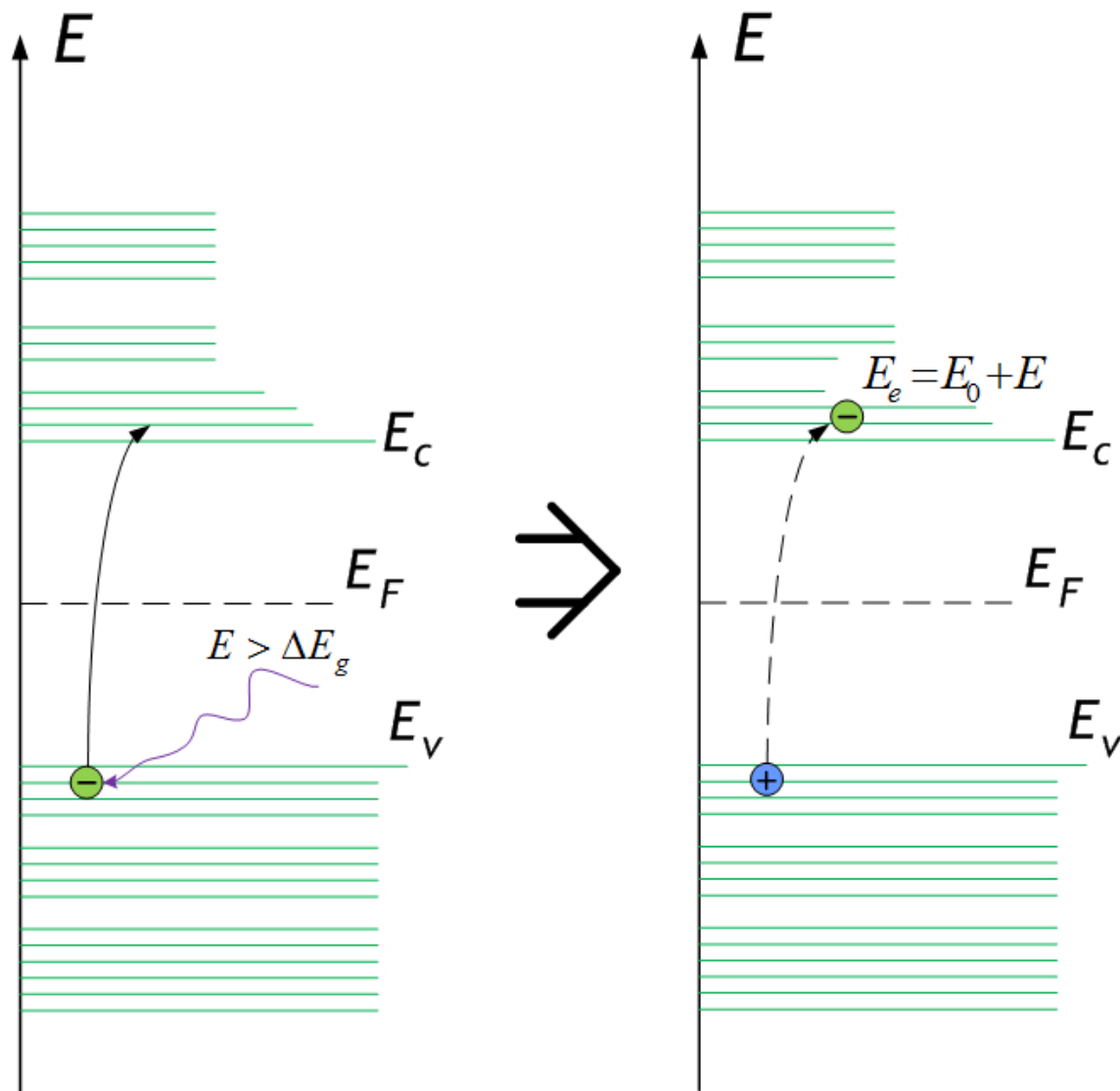
Практично посередині забороненої зони знаходиться рівень Фермі E_F - середня енергія електронів в речовині. Рівень (або енергія) Фермі, як і ширина забороненої зони є однією із констант речовини. Ці значення наводяться у спеціальних довідниках.

Показаний рисунок називається зонною діаграмою власного напівпровідника, тобто хімічно чистого напівпровідника без сторонніх домішок.

Провідники, напівпровідники та діелектрики з точки зору зонної теорії



З точки зору зонної теорії речовини поділяються на провідники, напівпровідники та діелектрики по принципу ширини забороненої зони: якщо $\Delta E_g \approx kT$ - то це провідник, якщо $\Delta E_g > kT$ - то це наївпровідник, а якщо $\Delta E_g \gg kT$ - то це діелектрик (тут k - стала Больцмана, T - абсолютна температура).



Якщо електрон звідкись отримує енергію $E > \Delta E_g$, (а він може отримати її за рахунок нагрівання, освітлення або електричного поля), то він переходить з нижчого енергетичного рівня на вищий. При цьому на місці електрона залишається так звана «дірка» - місце де може бути електрон, але його там немає.

Власні напівпровідники

Концентрація електронів у зоні провідності

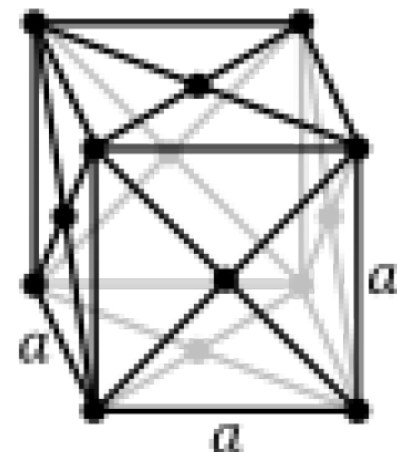
Власним називається хімічно чистий напівпровідник без сторонніх домішок. У такого напівпровідника концентрація електронів у зоні провідності точно дорівнює концентрації дірок у валентній зоні.

Оскільки атом з "діркою" перетворюється на позитивний іон, то вважається, що дірка має заряд $+e$. Ця концентрація дорівнює:

$$n = \int_{E_C}^{E_{top}} N(E)F(E)d E,$$

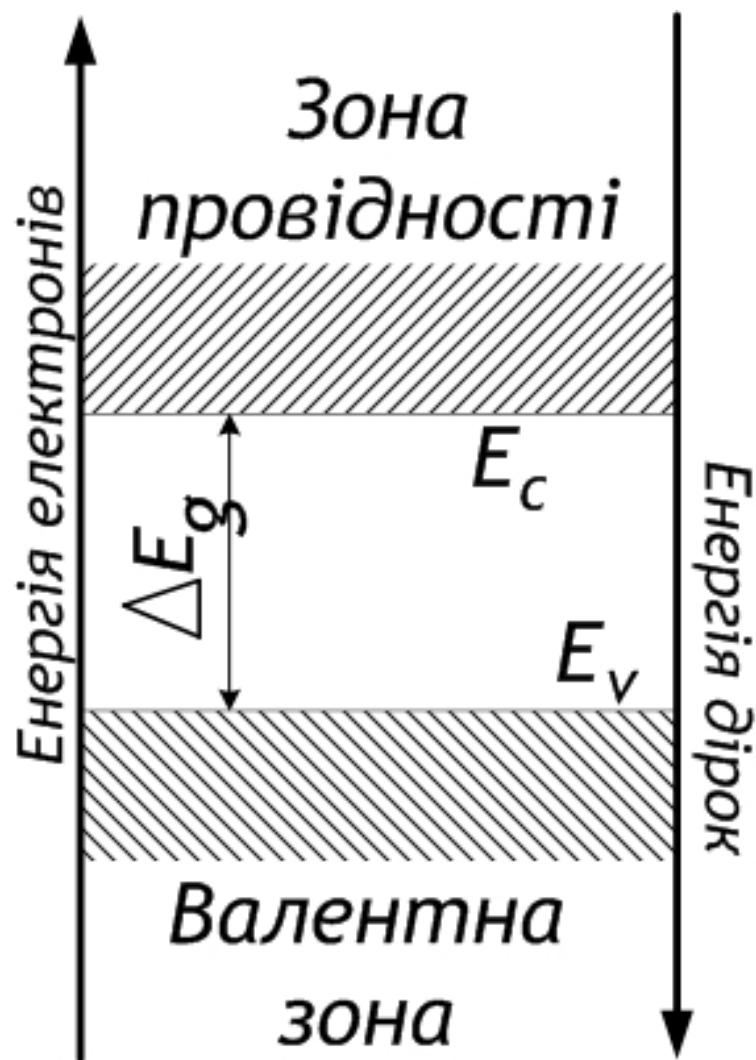
де E_C та E_{top} – відповідно нижня та верхня енергія зони провідності; $N(E)$ – щільність енергетичних рівнів у зоні провідності; $F(E)$ – розподіл Фермі - Дірака.

На сьогоднішній день найпоширенішим напівпровідником, який ми використовуємо, є **кремній** (силіцій, хімічний знак – **Si**) – хімічний елемент з атомним номером 14, що належить до 4-ї групи, 3-го періоду періодичної системи хімічних елементів. Проста речовина – кремній, утворює темно-сірі зі смолистим блиском кристали з гранецентрованою кубічною ґраткою типу алмазу.



Власні напівпровідники

Спрощена зонна діаграма

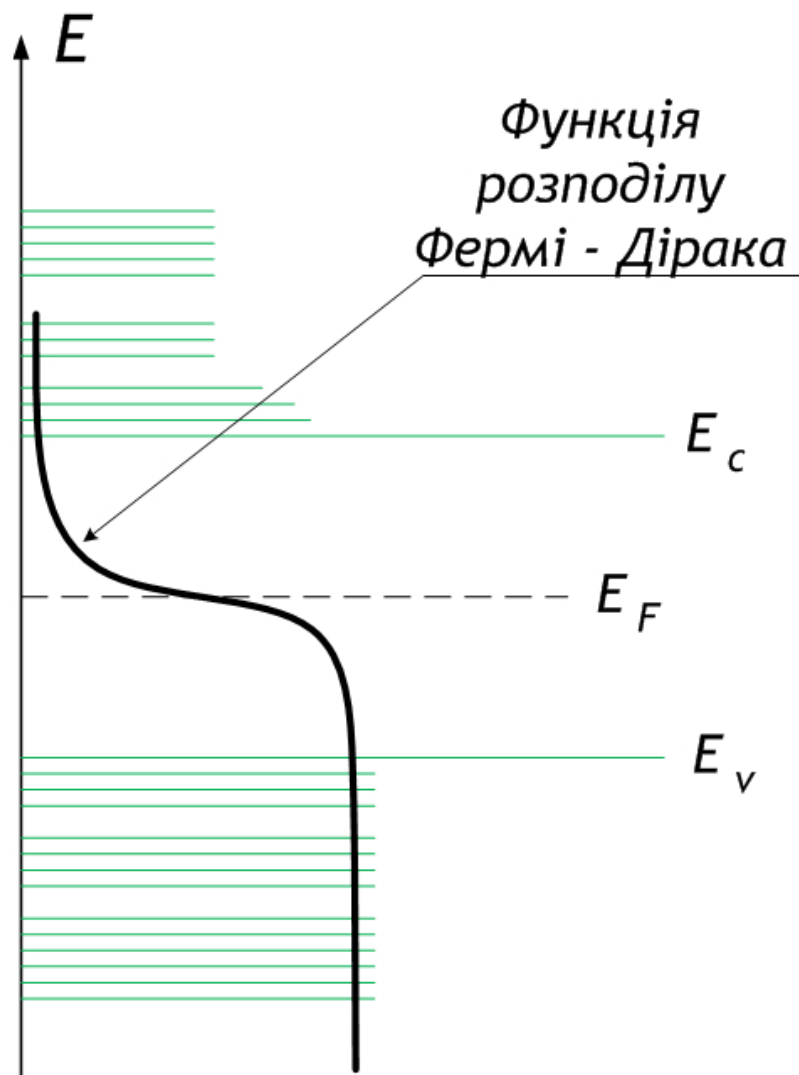


Строго кажучи, ширина забороненої зони не є сталою, а вона залежить від температури:

$$\Delta E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

де $E_g(0)$ - ширина забороненої зони при нульовій температурі, α і β - спеціальні константи, що залежать від речовини. Також, строго кажучи, лінії E_C та E_V не є прямими, вони є плавними кривими, що залежать від геометрії кристалічної ґратки.

При кімнатній температурі та атмосферному тиску ширина забороненої зони кремнію становить 1,12 еВ.



Функція, яка описує розподіл електронів по енергіям в твердому Тілі, називається розподілом Фермі – Дірака, . Аналітично вона задається виразом:

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)},$$

де k – стала Больцмана,
 T – абсолютна температура, E_F - енергія Фермі, величина якої визначається з умови електронейтральності.

Концентрація електронів у вільній зоні приблизно дорівнює

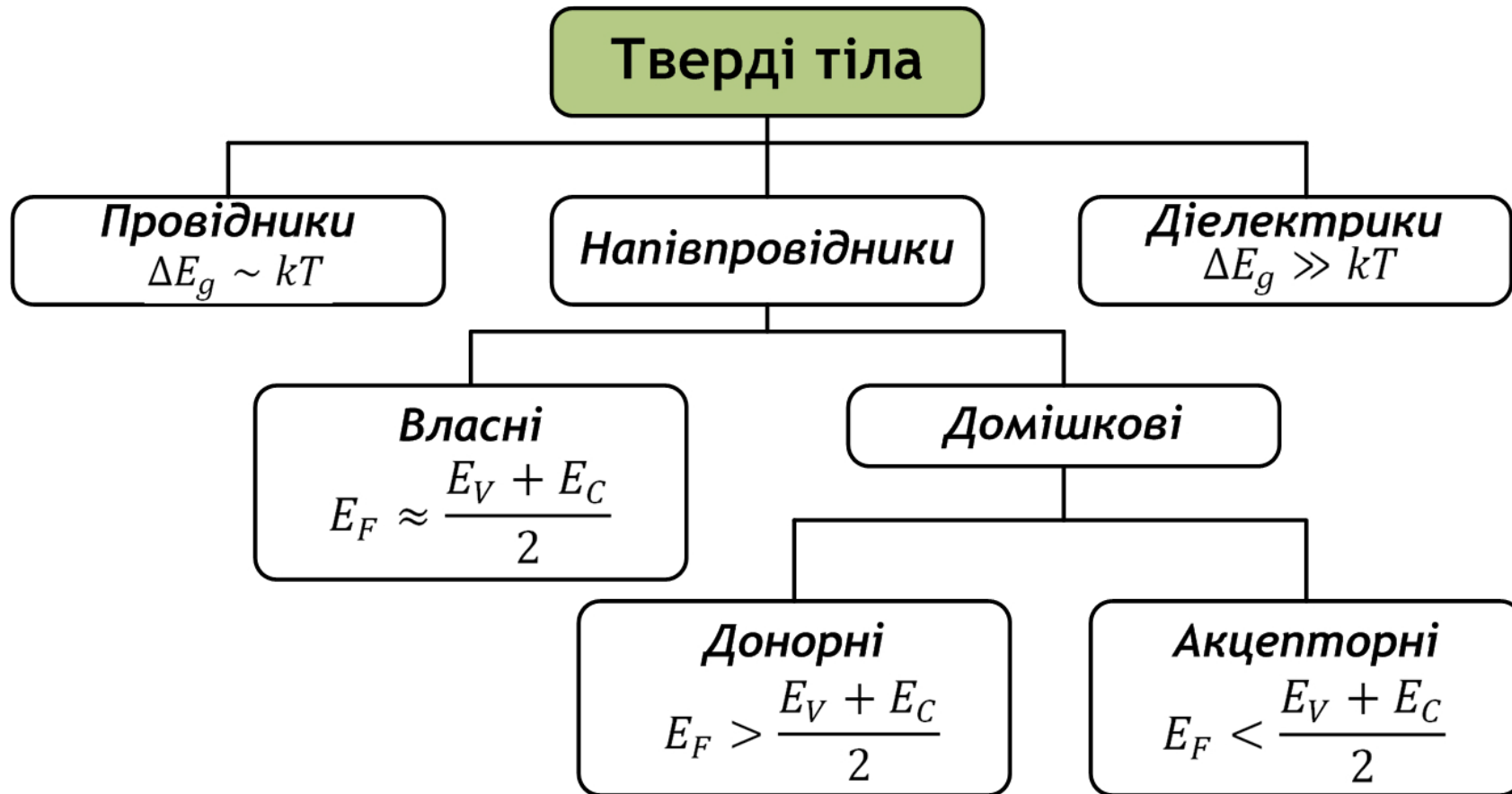
$$n \approx N_c \exp\left(-\frac{E_F - E_c}{kT}\right)$$

де N_c - концентрація енергетичних рівнів у вільній зоні.

Аналогічно, концентрація дірок у валентній зоні приблизно дорівнює

$$p \approx N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$$

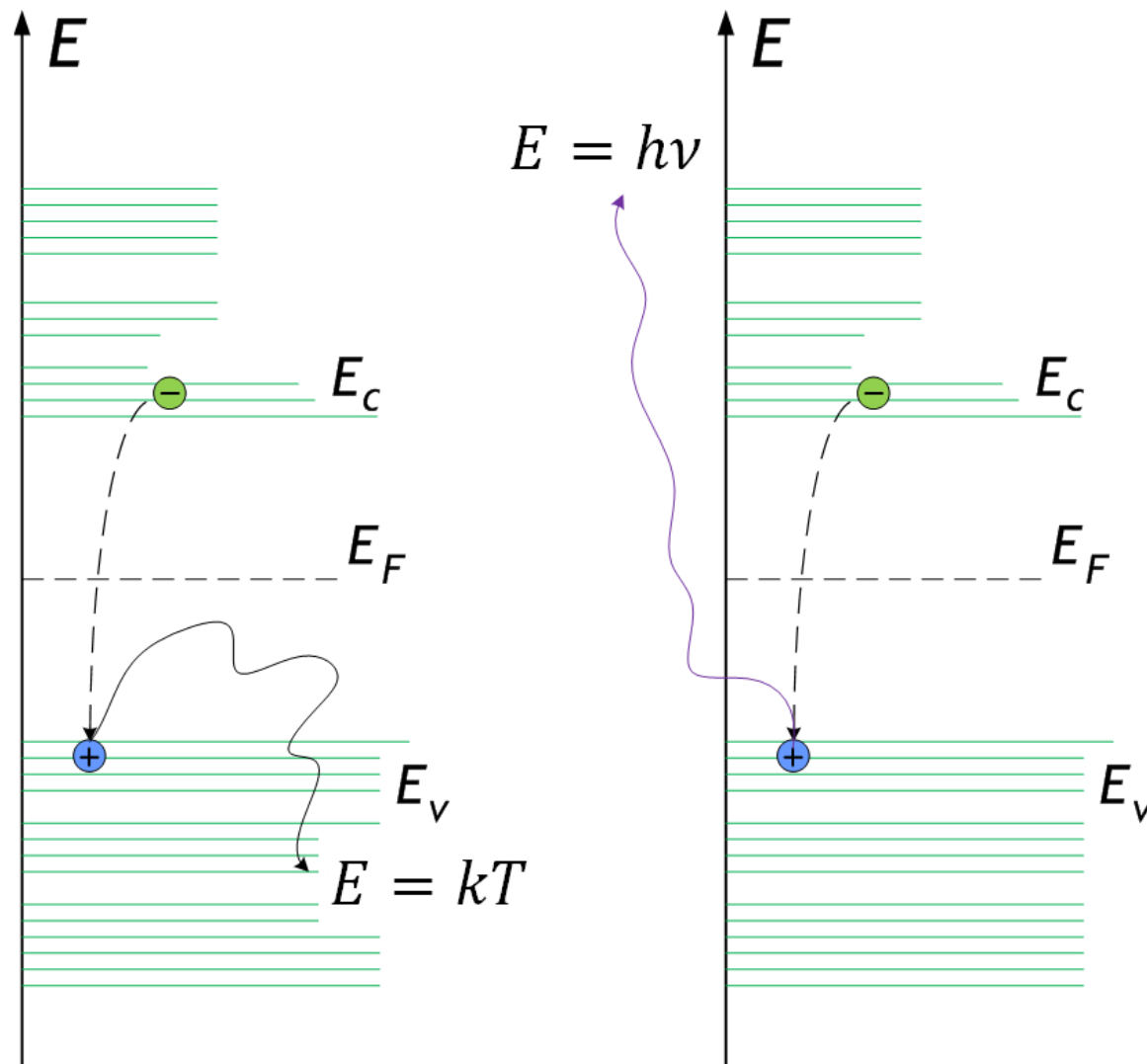
При кімнатній температурі власна концентрація носіїв заряду невелика, але вона доволі стрімко зростає із підвищенням температури. Наприклад, у кремнії вона подвоюється на кожні 11 °С. Таким чином, при достатньо високих температурах спостерігається ефект термогенерації, тобто появи електричної напруги (що знаходить своє застосування у напівпровідникових сенсорах температури та елементах Пельт'є).



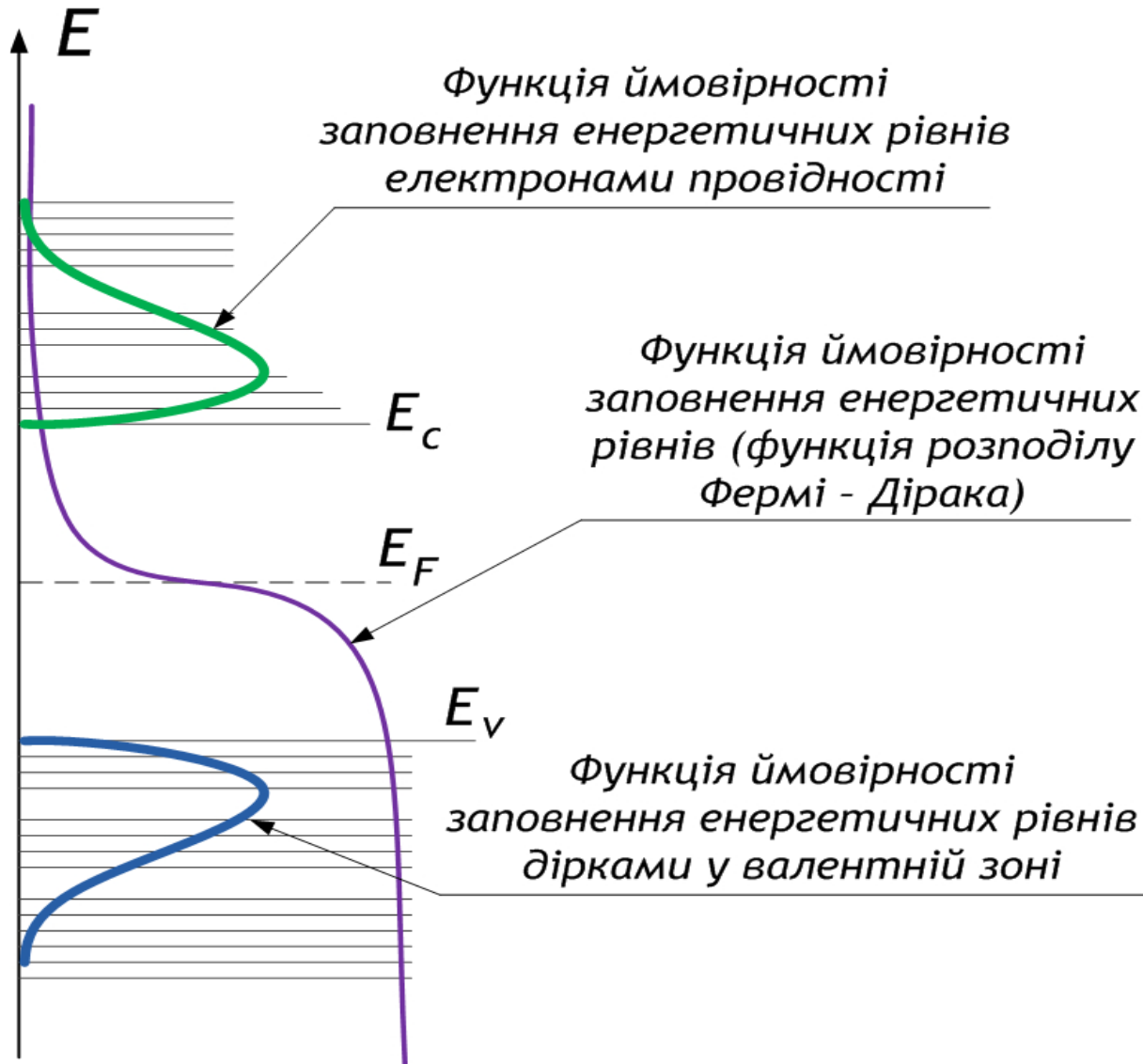
Утворення вільних електронів та дірок – *генерація* носіїв заряду – відбувається під впливом теплового хаотичного руху атомів кристалічної ґратки (так звана тепла генерація), або під впливом поглинутих напівпровідником квантів світла (світлова генерація) та/або інших енергетичних факторів. Оскільки напівпровідник весь час знаходиться під впливом принаймні одного з цих факторів ($T \neq 0$), то генерація носіїв заряду відбувається безперервно.

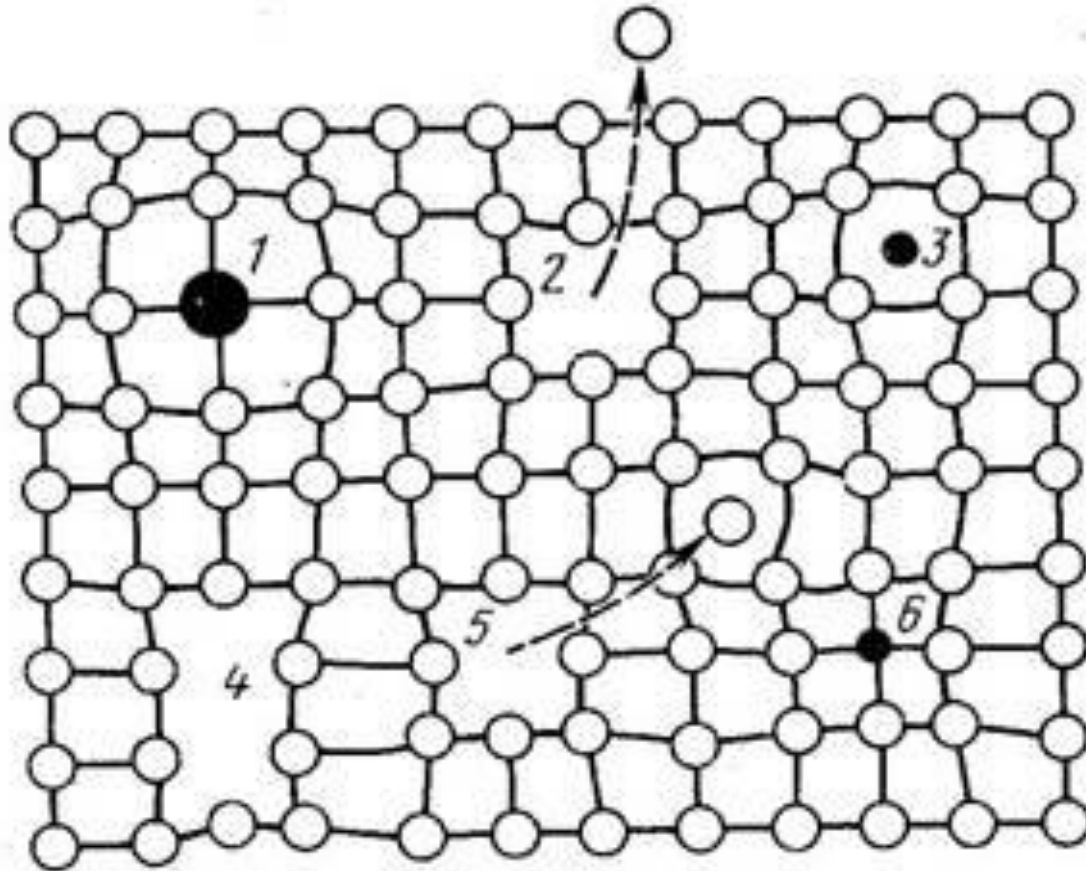
Одночасно із генерацією відбувається зворотний процес – *рекомбінація* носіїв заряду, тобто повернення електронів із зони провідності назад у валентну зону, у результаті чого зникає пара електрон - дірка.

У стані термодинамічної рівноваги процеси генерації носіїв заряду та їх рекомбінації взаємно урівноважені. При цьому в напівпровіднику існують рівноважні концентрації електронів n_0 та дірок p_0 .



Випромінювальна рекомбінація супроводжується випромінюванням **фотонів** (квантів світлової енергії), а безвипромінювальна — **фононів** (“уявних” квантів теплової енергії).





1 – домішковий атом заміщення;

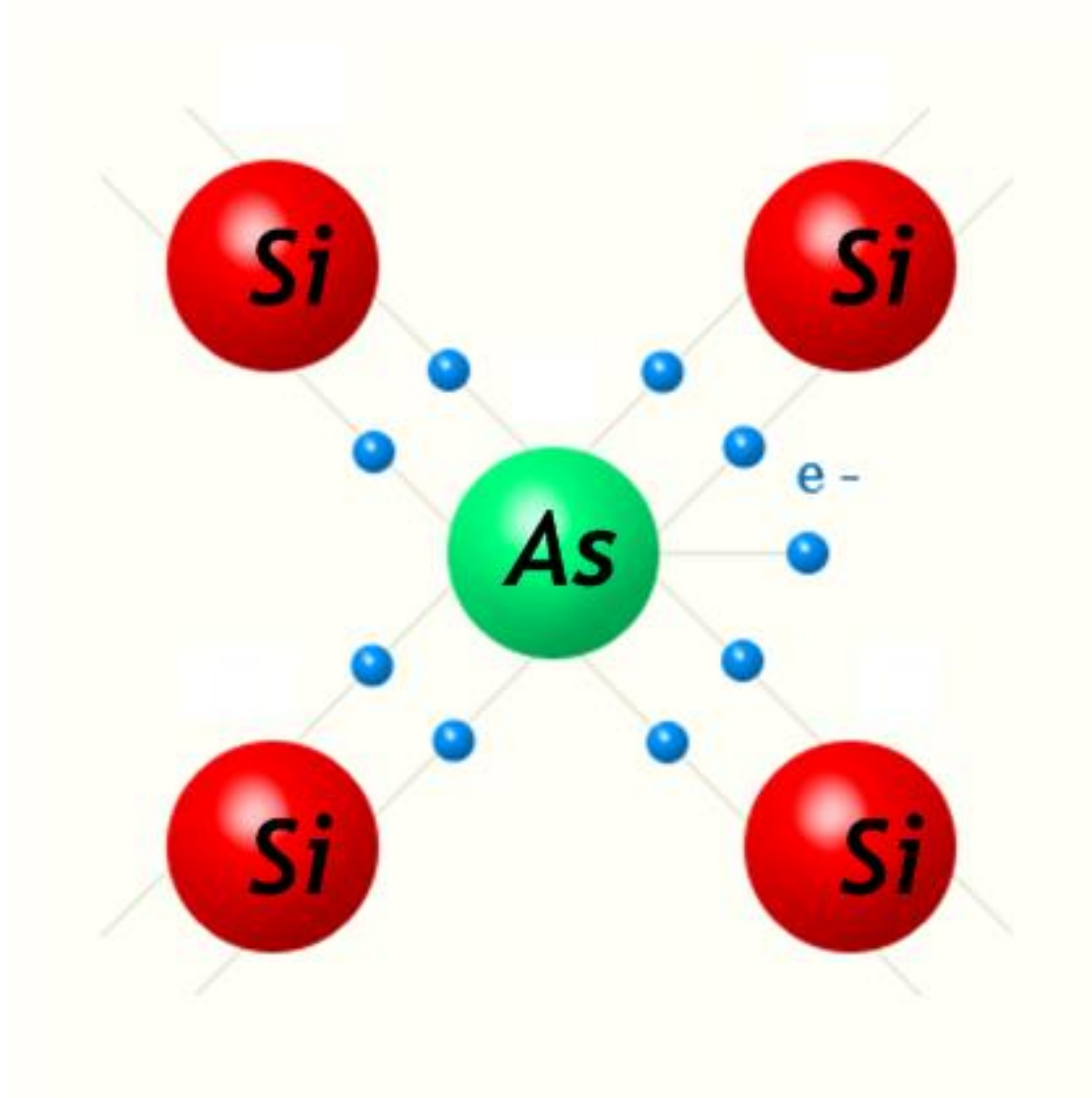
2 – дефект Шотткі;

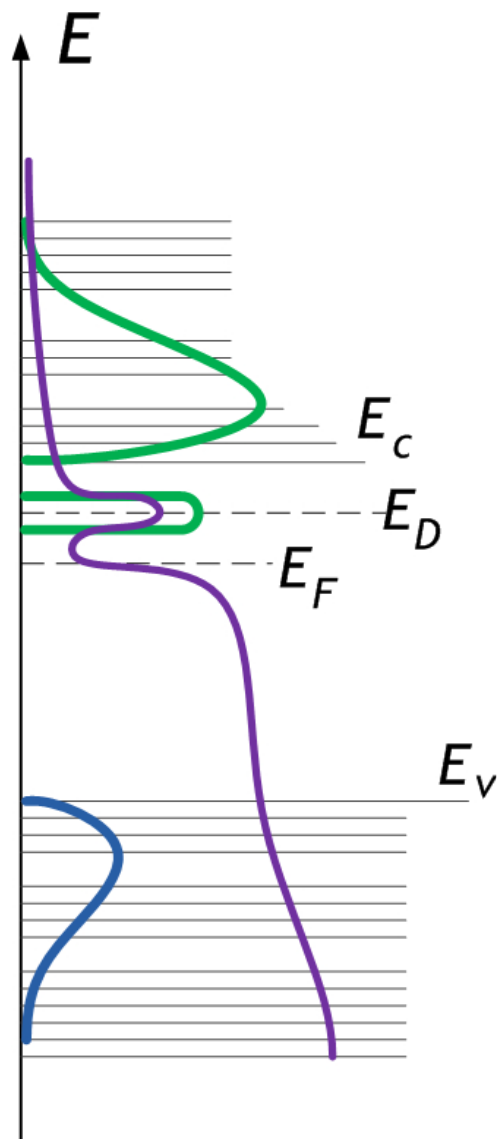
3 – домішковий атом впровадження;

4 – дивакансія;

5 – дефект Френкеля (вакансія та міжвузловий атом);

6 – домішковий атом заміщення.



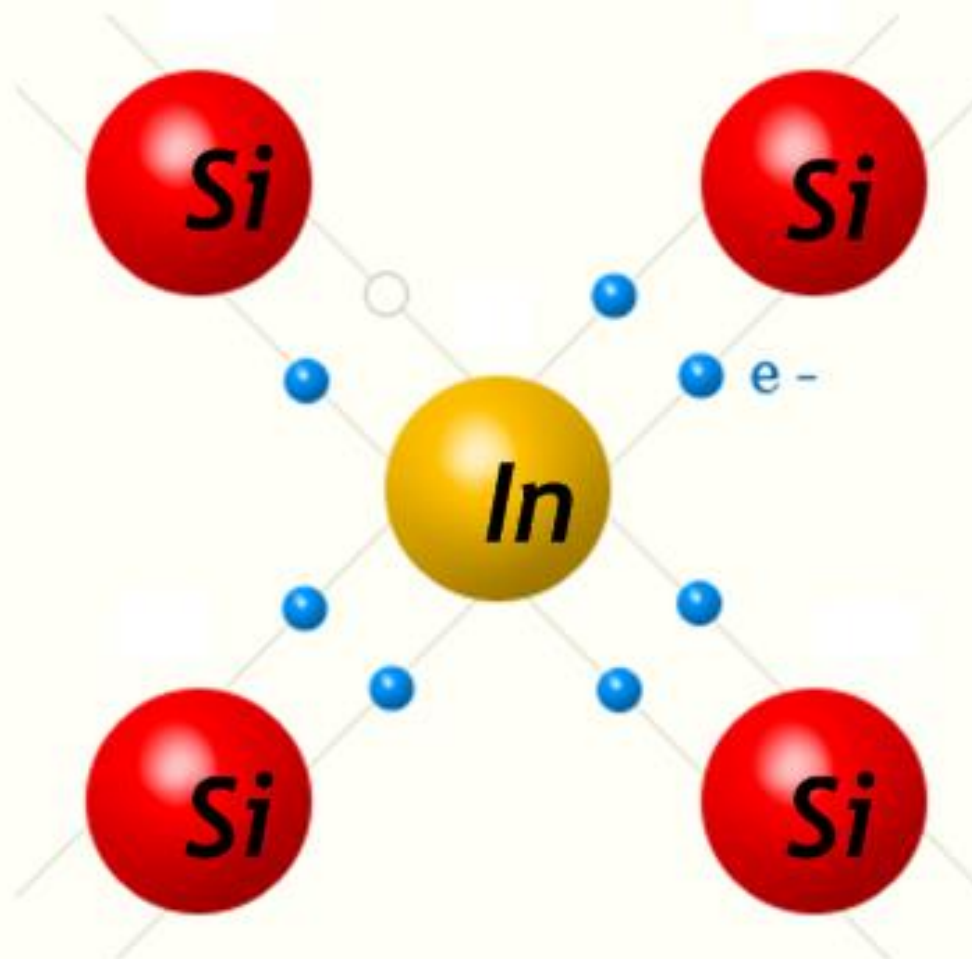


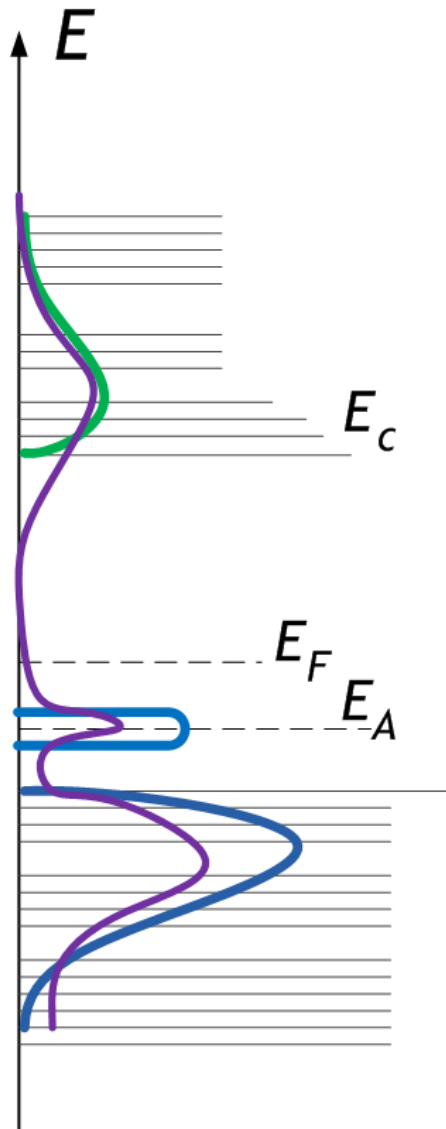
У донорного напівпровідника (або напівпровідника n-типу) на зонній діаграмі з'являється додатковий донорний рівень, утворений за рахунок незв'язаних електронів атомів домішки.

Один атом домішки приходить на $10^5 \dots 10^6$ атомів кристалічної ґратки напівпровідника.

Рівень Фермі у донорного напівпровідника зміщується вгору, вище середини забороненої зони.

Донорний рівень знаходиться приблизно між рівнем Фермі та мінімумом зони провідності.





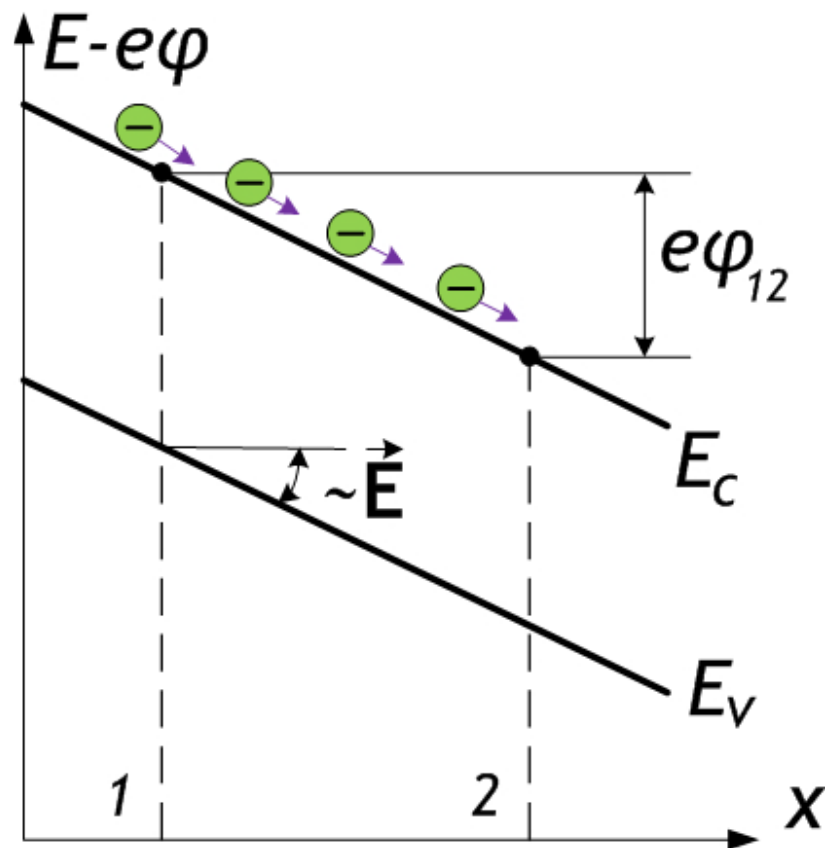
У акцепторного напівпровідника (або напівпровідника р-типу) на зонній діаграмі з'являється додатковий акцепторний рівень, утворений за рахунок додаткових дірок наколо атомів домішки.

Один атом домішки також приходить десь на $10^5 \dots 10^6$ атомів кристалічної ґратки напівпровідника.

Рівень Фермі у акцепторного напівпровідника зміщується донизу, нижче середини забороненої зони.

Додатковий акцепторний рівень знаходиться приблизно між рівнем Фермі та максимумом валентної зони.

Види рекомбінації



На всіх попередніх зонних діаграмах вважалося, що електричного поля у напівпровіднику немає. Однак коли ми вводимо якусь напівпровідникову деталь у електричне коло, то отримується, що напівпровідник знаходиться в електричному полі, і електрони, які знаходяться у зоні провідності, створюють електричний струм.

Тоді зонна діаграма напівпровідника якби "викривлюється" від точки з більшим потенціалом (1) до точки з меншим потенціалом (2).

Кутовий коефіцієнт нахилу енергетичних зон при цьому пропорційний напруженості електричного поля E .

Процеси перенесення зарядів у напівпровідниках

Для електронів у зоні провідності:

$$J_{n_{dr}} = e_0 n \mu_n E,$$

де e_0 – заряд електрона; n – концентрація електронів у зоні провідності; μ_n – рухливість електронів – фізична величина, яка чисельно дорівнює середній швидкості їх направленої руху в електричному полі, напруженість якого дорівнює одиниці.

Для дірок у валентній зоні:

$$J_{p_{dr}} = e_0 p \mu_p E,$$

де μ_p – рухливість дірок.

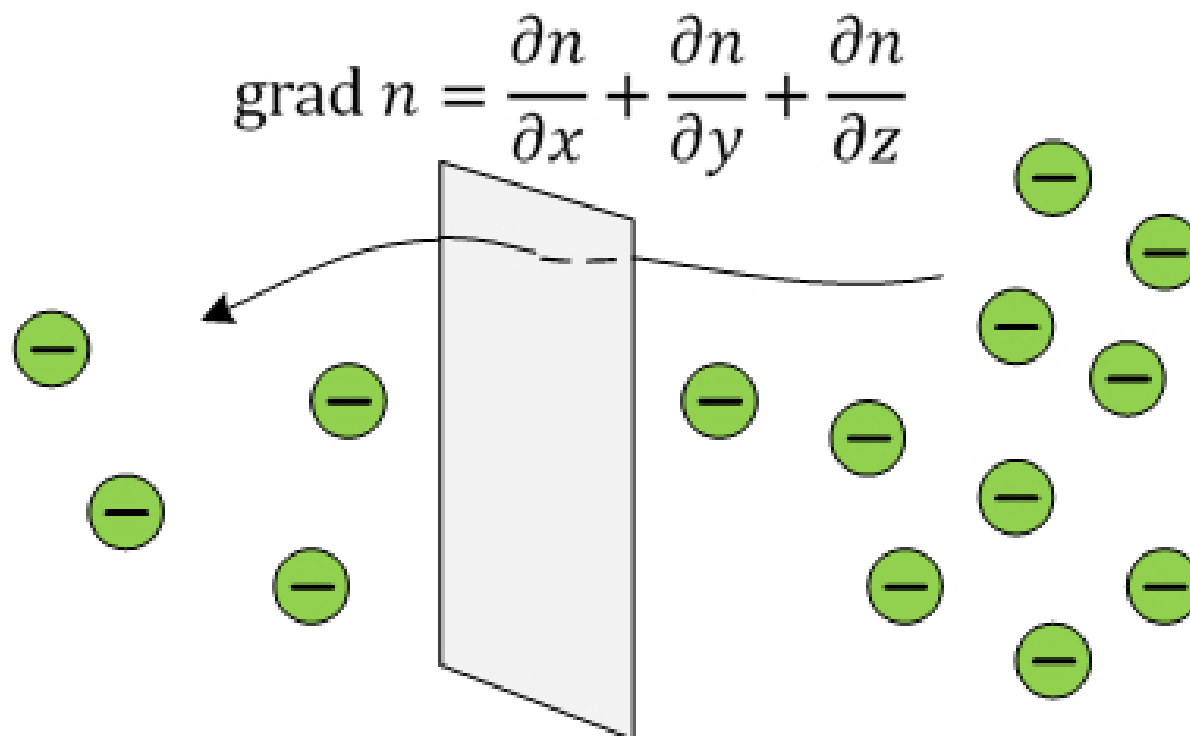
Повна щільність дрейфового струму при наявності вільних електронів та дірок дорівнює сумі електронної та діркової складових:

$$J = J_{n_{dr}} + J_{p_{dr}} = e_0 (n \mu_n + p \mu_p) E = e_0 \gamma E,$$

Де $\gamma = n \mu_n + p \mu_p$ – питома провідність напівпровідника, [См·м].

Дифузія носіїв заряду

Поведінка вільних електронів та дірок дещо нагадує поведінку молекул газу в замкненому просторі. Так само, як газ заповнює весь доступний йому простір, так і вільні електрони / дірки заповнюють весь об'єм напівпровідника. В цьому випадку відбувається дифузія – процес вирівнювання концентрації носіїв заряду по напівпровіднику.



Щільність дифузійного струму

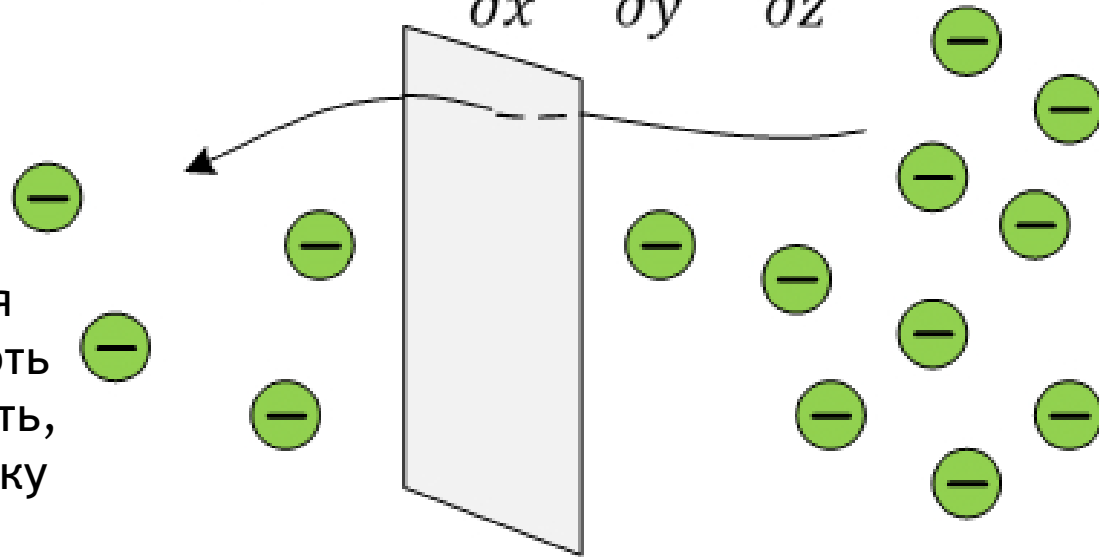
Щільність потоку частинок при дифузії (тобто число частинок, яке перетинає одиничну площинку, перпендикулярну напрямку градієнту концентрації, за одиницю часу) пропорційна градієнту концентрації цих частинок:

$$\Phi = -D_m \text{grad}(m),$$

де D_m – коефіцієнт дифузії, який дорівнює абсолютному значенню відношення потоку частинок до градієнту їх концентрації.

Вектор градієнта концентрації направлений у сторону зростання аргумента, а частинки дифундують з області, де їх більше – у область, де їх менше, тобто проти напрямку вектора градієнта.

$$\text{grad } n = \frac{\partial n}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial y} + \frac{\partial n}{\partial z}$$



Щільність дифузійного струму електронів та дірок

Оскільки електрони мають негативний заряд, то щільність дифузійного струму електронів

$$J_{n_{dif}} = e_0 D_n \text{grad}(n)$$

Аналогічно, щільність дифузійного струму дірок:

$$J_{p_{dif}} = -e_0 D_p \text{grad}(p)$$

Коефіцієнти дифузії пов'язані із рухливістю співвідношеннями Ейнштейна:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e_0}$$

При наявності електричного поля та градієнту концентрації носіїв заряду в напівпровіднику загальна щільність струму електронів буде дорівнювати:

$$J_n = J_{n_{dr}} + J_{n_{dif}} = e_0 n \mu_n E + e_0 D_n \text{grad}(n)$$

а загальна щільність струму дірок буде дорівнювати:

$$J_p = J_{p_{dr}} + J_{p_{dif}} = e_0 p \mu_p E + e_0 D_p \text{grad}(p)$$

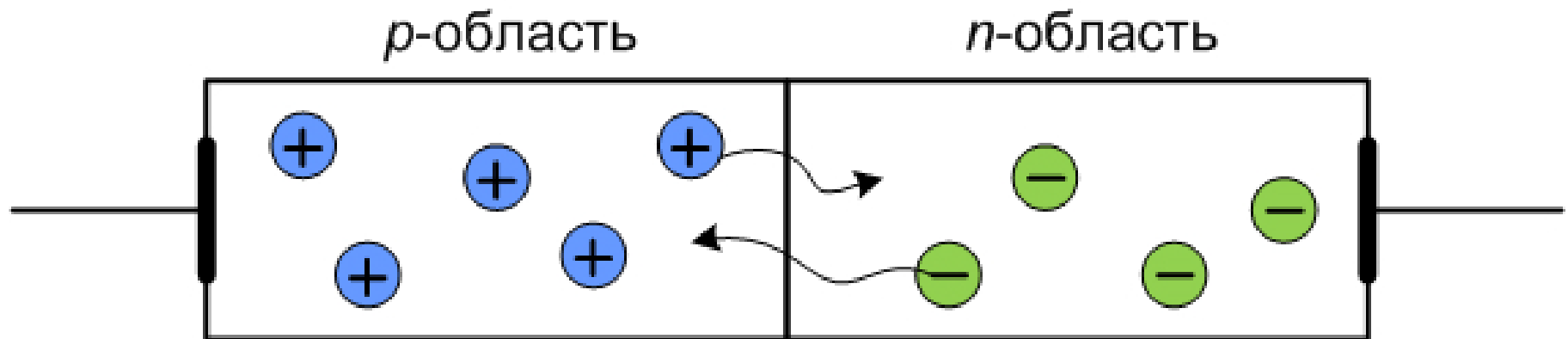
Для розрахунку повного струму слід додати ці дві складові струму і ще додати до них щільність струму зміщення:

$$J = J_n + J_p + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

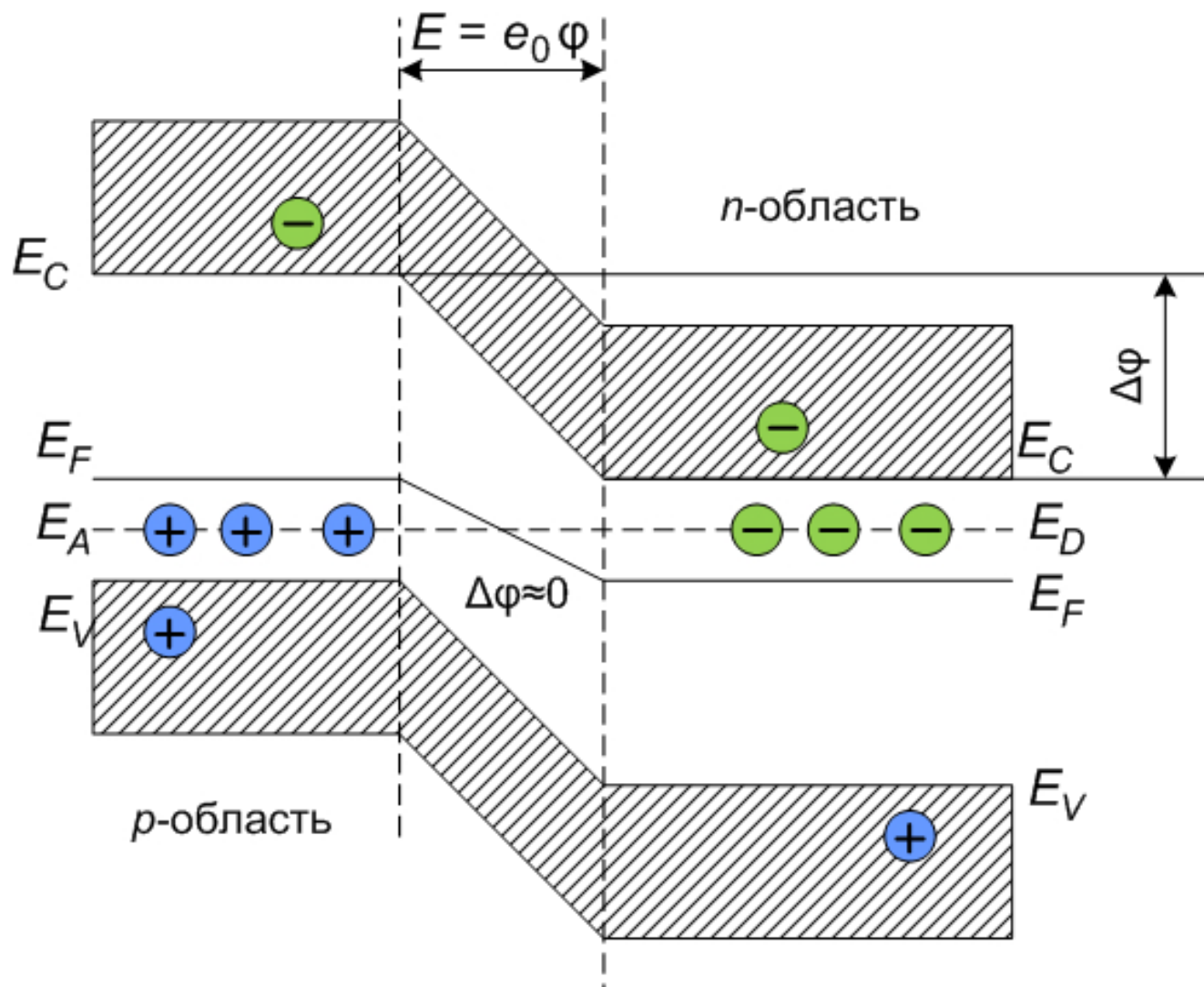
Електронно-дірковий перехід (або *p-n*-перехід) – це перехідний шар між двома областями напівпровідника з різною електропровідністю, в якому існує дифузійне електричне поле.

При ідеальному контакті двох напівпровідників з різним типом електропровідності внаслідок градієнту концентрації носіїв заряду виникає їх дифузія в області з протилежним типом провідності.

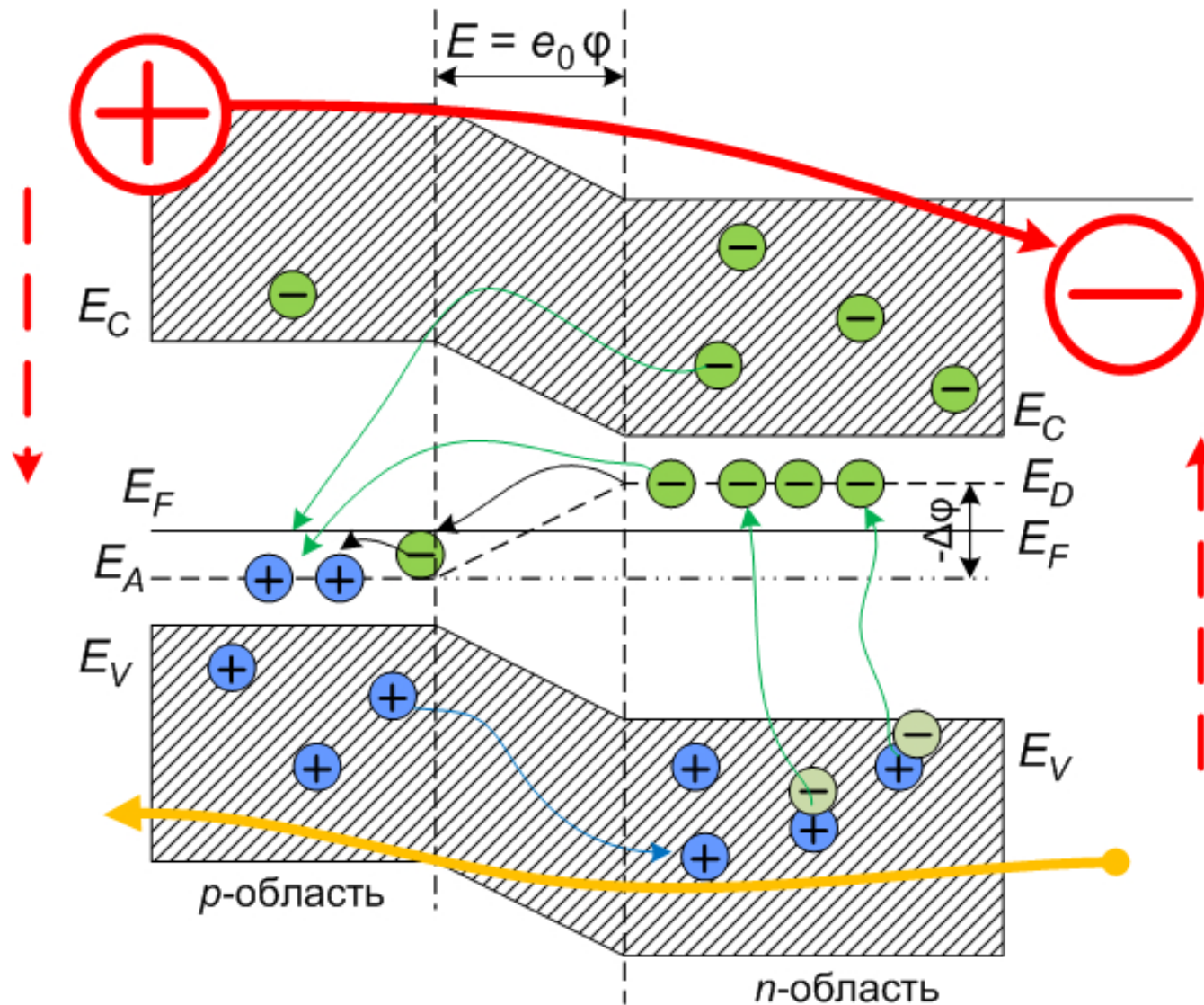
В *n*-області основними носіями заряду є електрони, а неосновними – дірки. В *p*-області навпаки: електрони є неосновними носіями заряду, а дірки | основними.



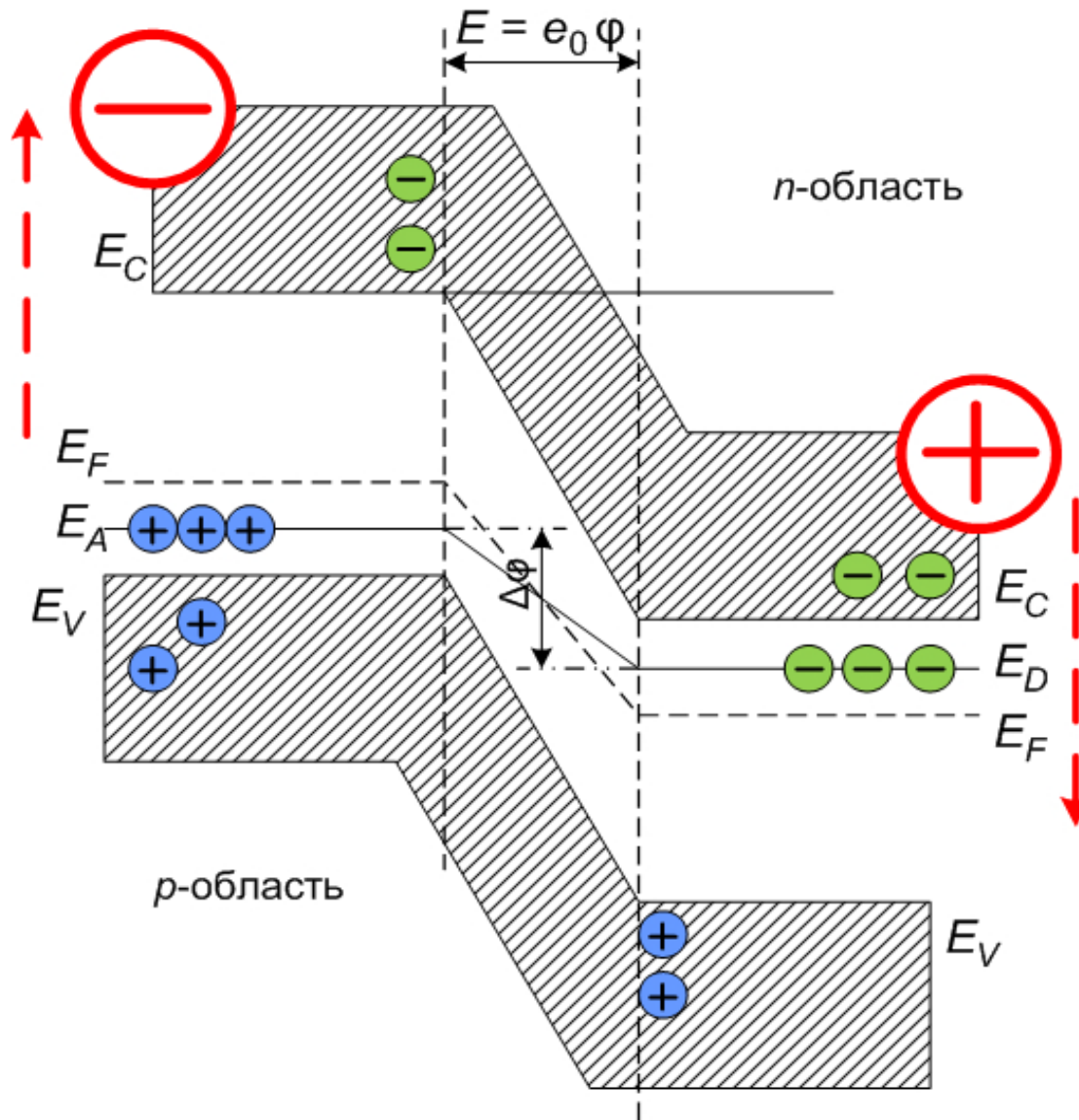
Зонна діаграма p - n -переходу за відсутності зовнішньої напруги



Зонна діаграма p - n -переходу при прямому зміщенні

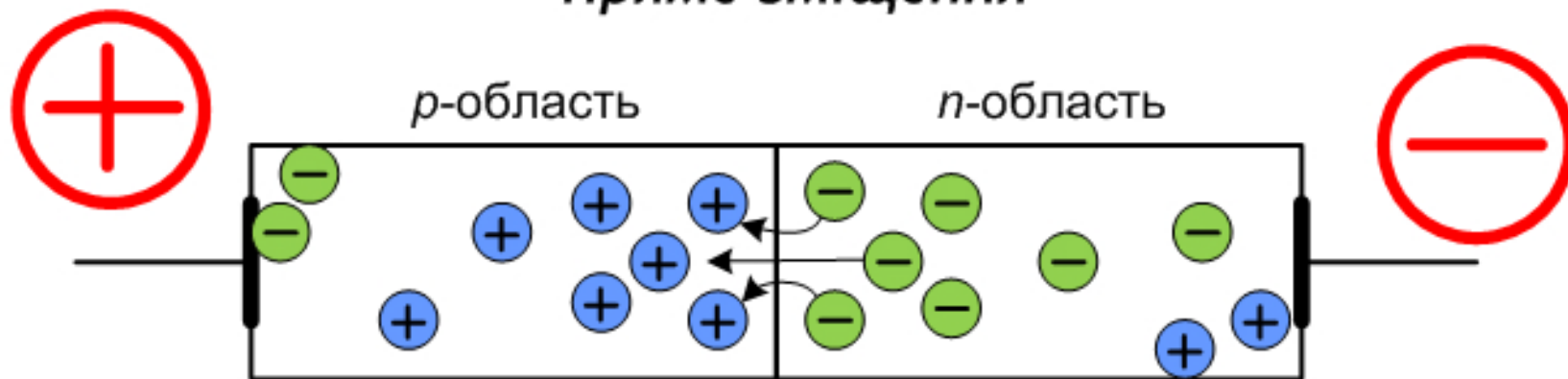


Зонна діаграма р-n-переходу при зворотному зміщенні

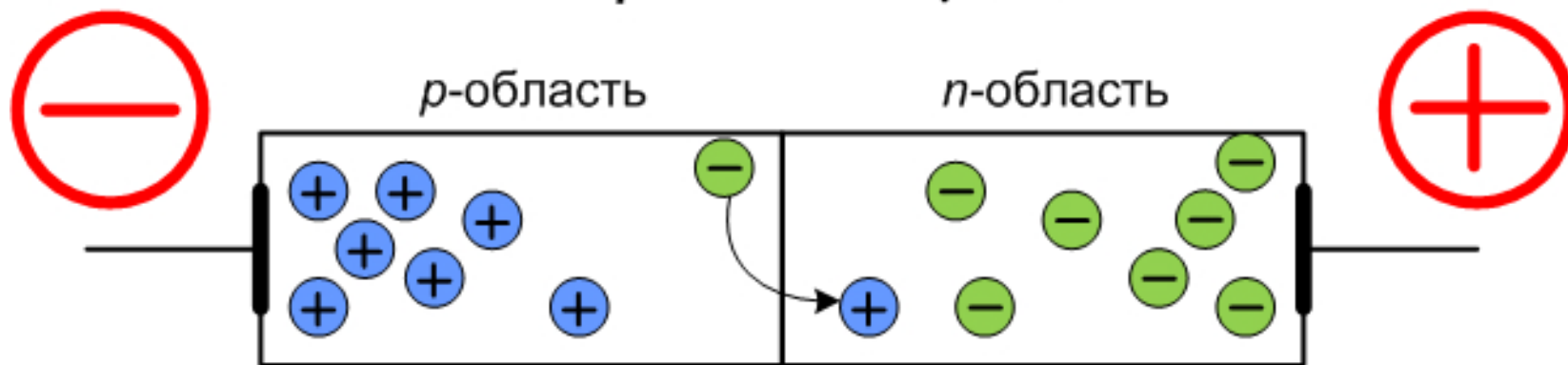


Схематичне зображення розподілу носіїв заряду

Пряме зміщення

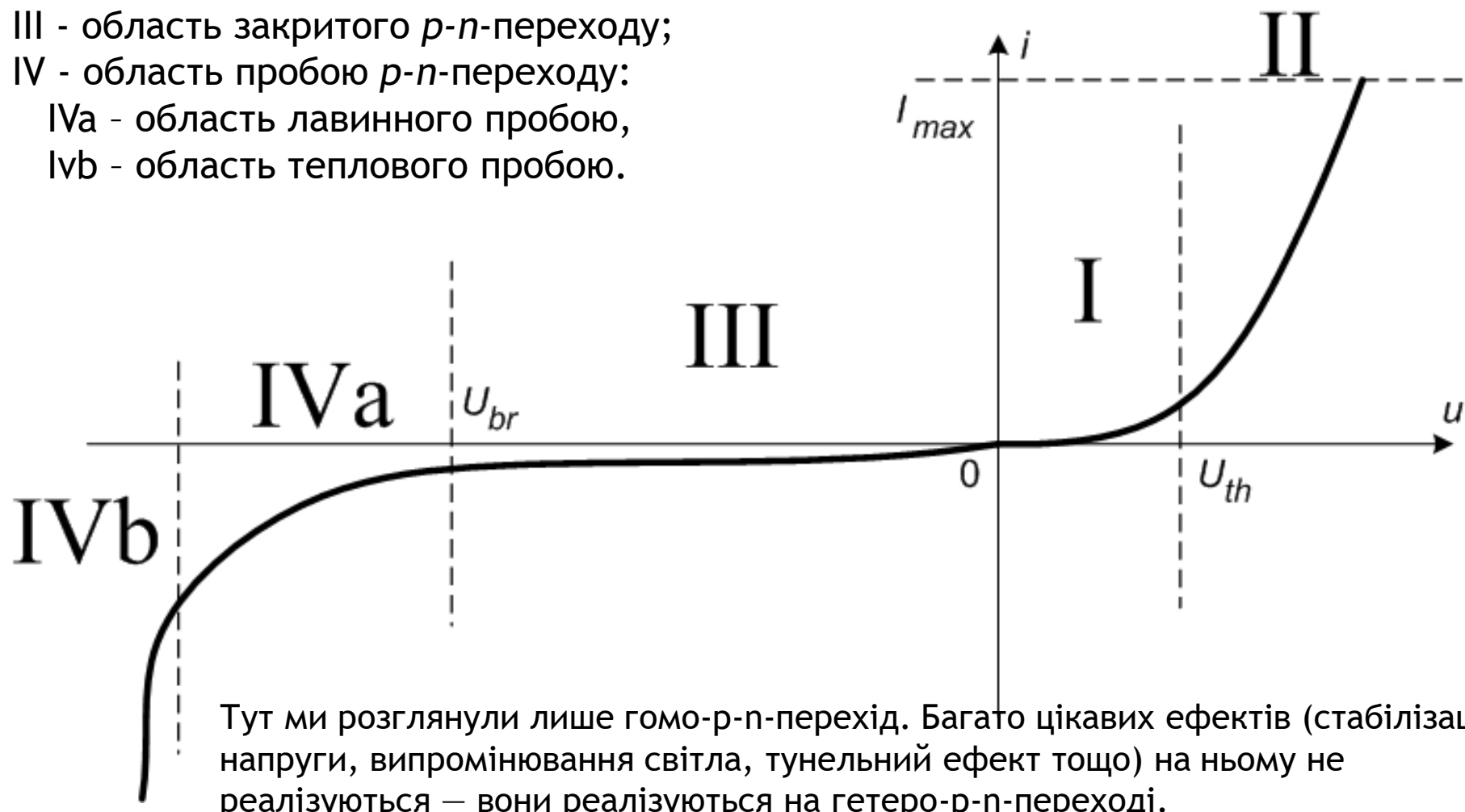


Зворотнє зміщення



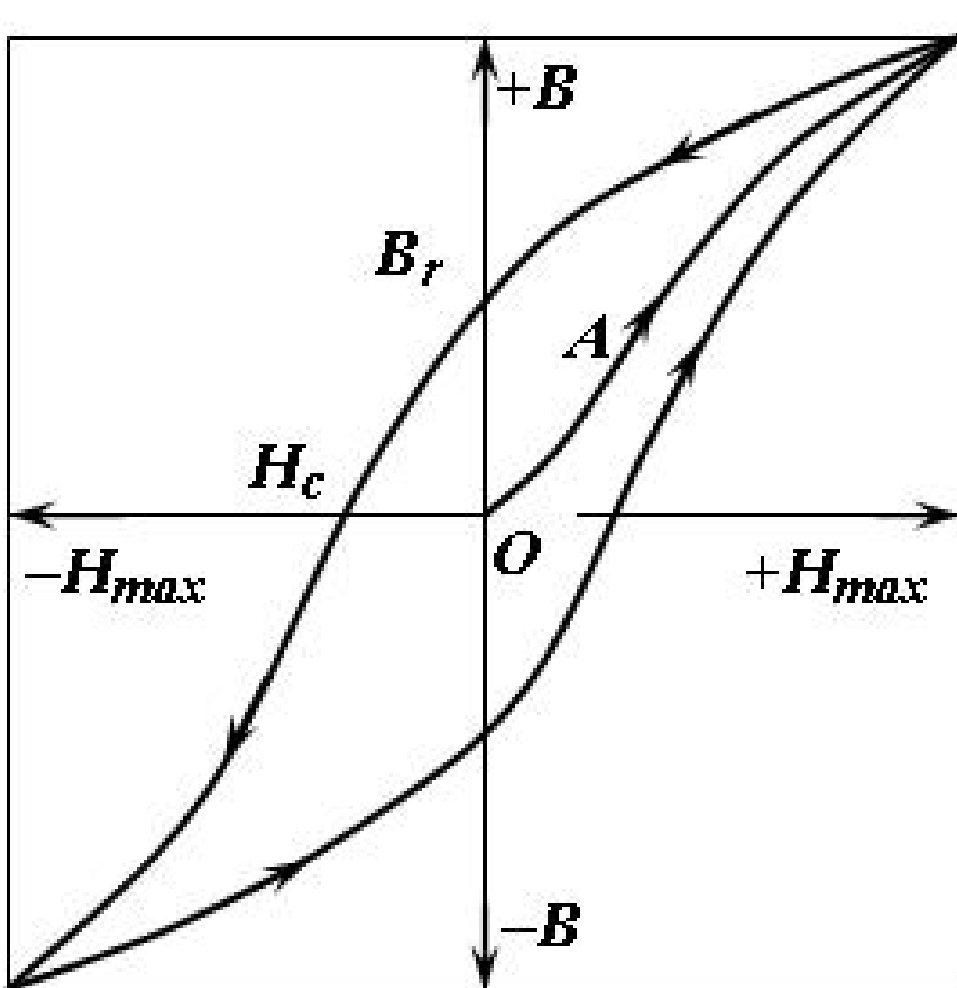
Вольт-амперна характеристика p - n -переходу

- I - область ще не відкритого p - n -переходу;
- II - область відкритого p - n -переходу;
- III - область закритого p - n -переходу;
- IV - область пробую p - n -переходу:
 - IVa - область лавинного пробую,
 - IVb - область теплового пробую.



Магнітні властивості феромагнетиків

Петля гістерезису



D Однією з основних особливостей сильномагнітних мінералів є залежність їхньої магнітної індукції або намагніченості від напруженості поля. При циклічному перемагнічуванні, що відбувається у напрямку вказаному стрілками, крива намагнічення переходить у криву гістерезису.

Магнітний гістерезис – це неоднозначна залежність магнітної індукції (намагніченості) магнітного матеріалу від напруженості зовнішнього магнітного поля, що періодично змінює напрям.

Оптичні властивості твердих тіл

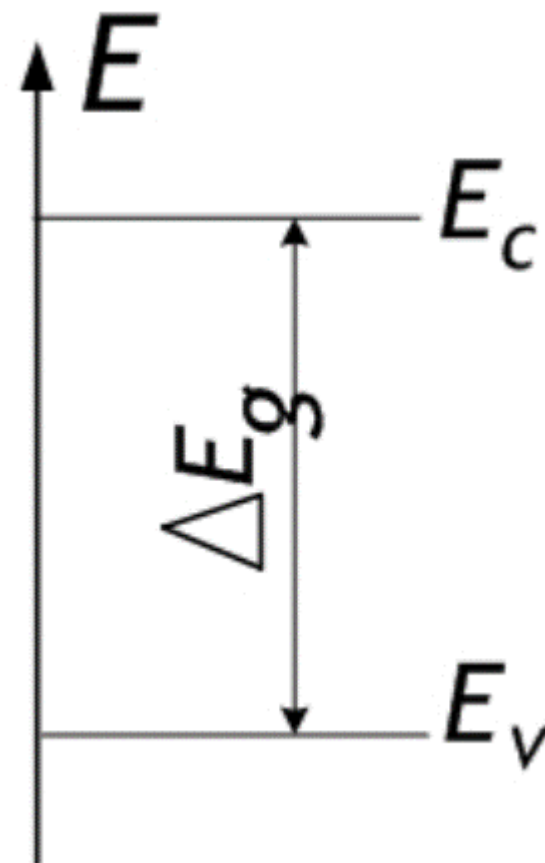
Прозорість

Оптична прозорість матеріалів пояснюється їхніми електронними властивостями та взаємодією електромагнітного випромінювання зі структурою матеріалу. Основні фізичні чинники, що впливають на прозорість, включають:

1. Енергетичну структуру матеріалу:

Кожен матеріал має зонну структуру, яка визначає енергетичні рівні електронів. У прозорих матеріалах, таких як скло, заборонена зона (*energy gap*) між валентною та зоною провідності досить широка.

Світло, яке проходить через матеріал, не має достатньої енергії (фотонів) для збудження електронів із валентної зони в зону провідності. Тому електрони не поглинають світло, і воно проходить крізь матеріал.

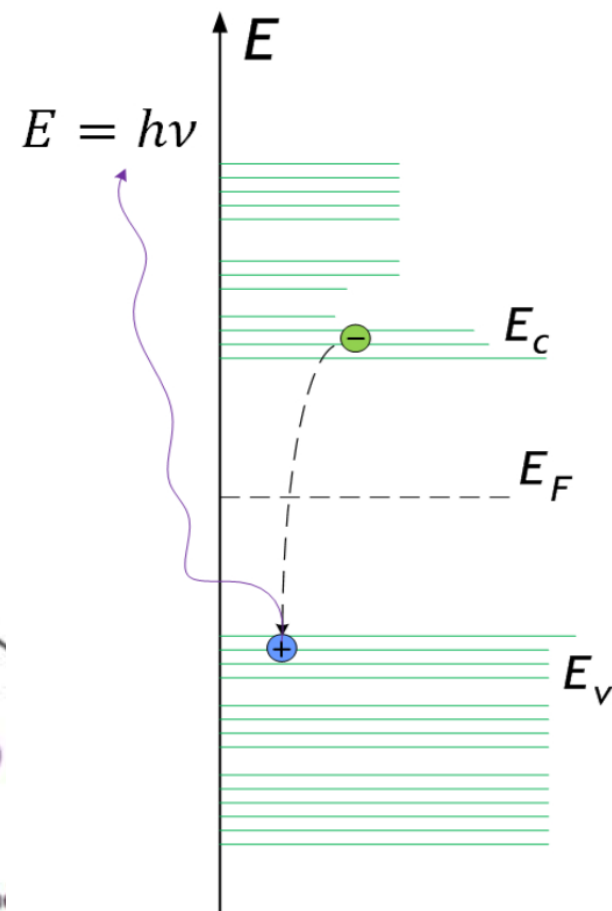
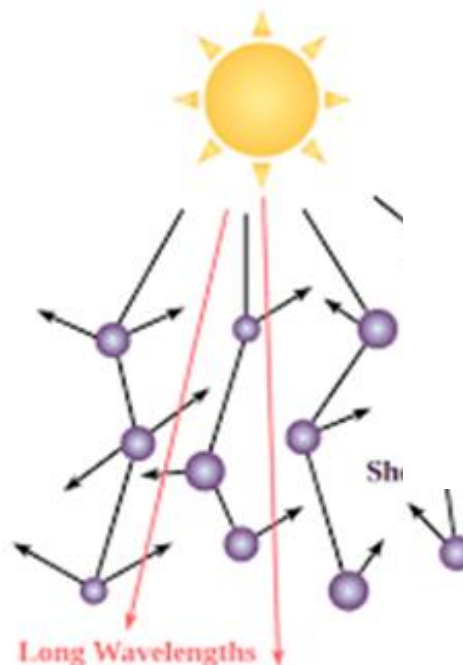


Оптичні властивості твердих тіл

Прозорість

2. *Резонансні частоти:* Електрони в матеріалі мають власні резонансні частоти, на яких вони ефективно поглинають електромагнітне випромінювання. Якщо частота світла (видимого спектра) не збігається з цими резонансними частотами, поглинання не відбувається, і матеріал залишається прозорим для світла.

3. *Розсіювання світла:* У прозорих матеріалів молекули чи атоми розташовані досить впорядковано (навіть якщо це аморфна структура, як у скла), і вони не створюють значного розсіювання світла. Це зменшує втрати інтенсивності світла.



4. Кристалічна структура:

У випадку кристалічних матеріалів прозорість також залежить від впорядкованості кристалічної ґратки. Якщо структура впорядкована, світло може проходити через матеріал без значного розсіювання. Натомість у матеріалах з дефектами чи домішками відбувається розсіювання або поглинання світла, що робить їх менш прозорими.

5. Вплив домішок:

Наявність домішок у матеріалі може створювати додаткові енергетичні рівні всередині забороненої зони, що призводить до поглинання світла на певних частотах.

6. Взаємодія зі зв'язками атомів:

У прозорих матеріалах, таких як скло, молекули утворюють зв'язки, які не мають електронних переходів у видимому діапазоні світла. Тому світло просто проходить крізь них.

Далі буде...

...Основи фізики плазми