

ОСНОВИ МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

Лекція 02

Кінетичні явища і напівпровідниках

Анатолій Євтух

*Інститут високих технологій
Київського національного університету імені Тараса Шевченка*

Кінетичні явища (явища переносу)

Причина явищ – електрони провідності в своєму русі переносять зв'язані з ними фізичні величини: масу, електричний заряд, енергію та ін. В результаті чого при певних умовах виникають направлені потоки цих величин, що приводить до ряду електричних і теплових ефектів.

1. Електропровідність.
2. Ефект Холла.
3. Зміна опору в магнітному полі.
4. Термоерс.
5. Ефект Томсона.
6. Ефект Пельтьє.
7. Ефект Нернста-Етінгсгаузена.
8. Ефект Рігі-Ледюка.
9. Повздовжні термомагнітні ефекти.
10. Дифузія.
11. Теплопровідність

1. Електропровідність.

В результаті невпорядкованого теплового руху в електронному газі в стані теплової рівноваги не має переважних напрямів руху, і тому середнє значення теплової швидкості рівне нулю.

При накладанні зовнішнього електричного поля електрони отримують додаткову швидкість під дією поля. В цьому випадку результуючий рух електронів вже не є зовсім невпорядкованим і виникає направлений потік електричного заряду (електричний струм).

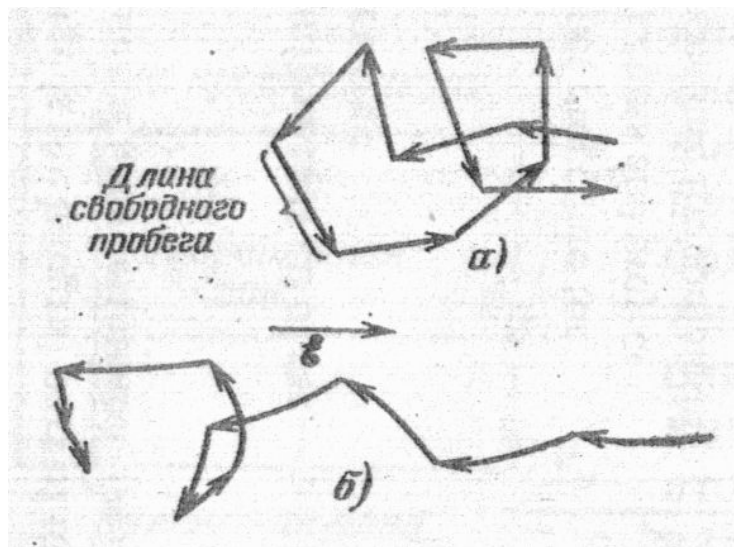
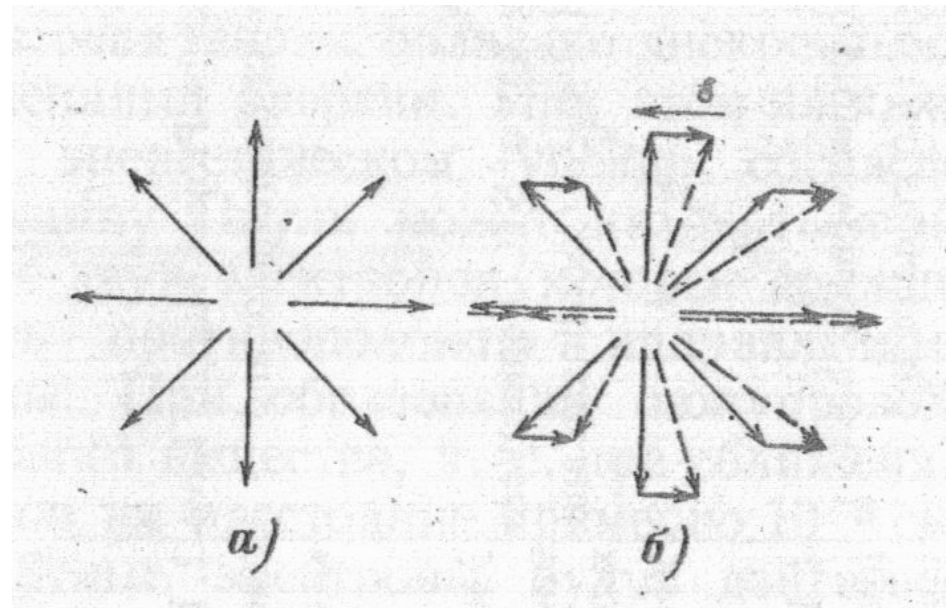


Схема руху вільного електрону за рахунок теплової енергії (а) і в зовнішньому електричному полі (б).



Схематичне зображення швидкостей електронів провідності при відсутності (а) і наявності (б) електричного поля.

Відстань, яку проходить вільний носій заряду між двома зіткненнями, називається *довжиною вільного пробігу*, а усереднене значення всіх відрізків шляху є *середня довжина вільного пробігу*.

Час між двома зіткненнями і його усереднене значення називається *часом вільного пробігу* і *середнім часом вільного пробігу*.

Середня довжина вільного пробігу l і середній час вільного пробігу τ зв'язані співвідношенням

$$l = v_0 \times \tau$$

де v_0 - середня швидкість теплового руху вільного носія.

В напівпровідниках при кімнатній температурі

$$v_0 \approx 10^7 \text{ см/с.}$$

Фактично рух електрону в кристалі складається з неупорядкованого теплового і упорядкованого руху, визваного дією зовнішнього електричного поля.

Направлений рух сукупності носіїв заряду в електричному полі називається дрейфом, а швидкість їх направленої руху називається дрейфовою швидкістю.

В багатьох випадках дрейфова швидкість v_d пропорційна напруженості електричного поля E .

$$v_d = \mu E$$

Дрейфова рухливість заряджених частинок μ є швидкість, яку отримує частинка в полі з напруженістю одиниця.

Для негативних частинок μ відємна,
для позитивних частинок μ додатня.

Густина струму j

$$j = en v_d = en \mu E$$

де e - заряд однієї частинки, n - концентрація рухливих частинок.

Закон Ома в диференційній формі

$$j = \sigma E$$

де σ - питома електропровідність речовини.

$$\sigma = en \mu$$

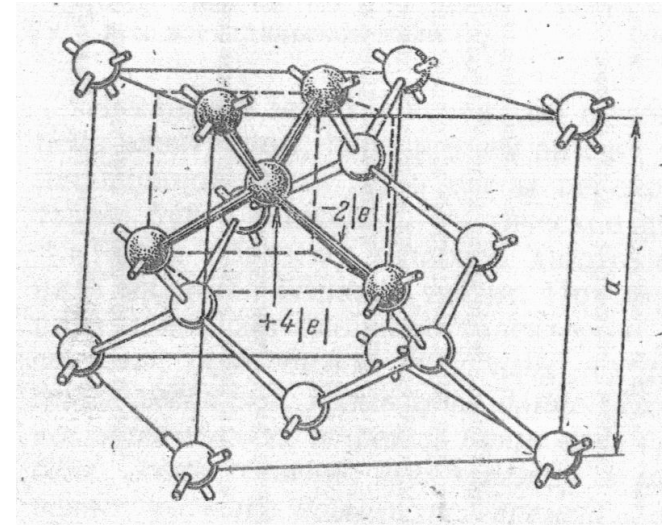
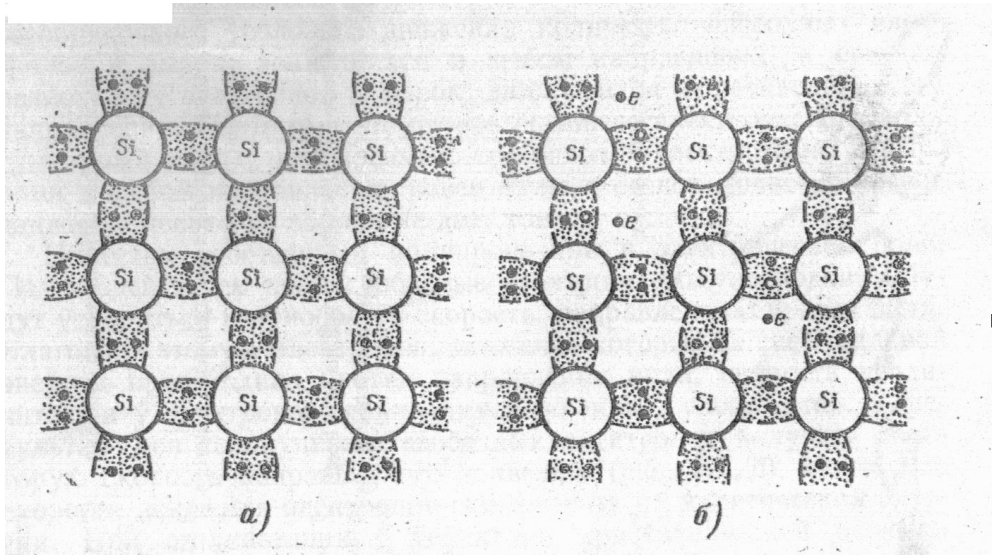
Електропровідність напівпровідників

Власні, елементарні

$C^{(6)} (1s^2 2s^2 2p^2);$

$Si^{(14)} (1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2);$

$Ge^{(32)} (1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2).$



Кристалічна ґратка типу алмазу
(а- постійна ґратки).

Двовимірне
представлення
розміщення зв'язків
в ґратці кремнію
(власний
напівпровідник).

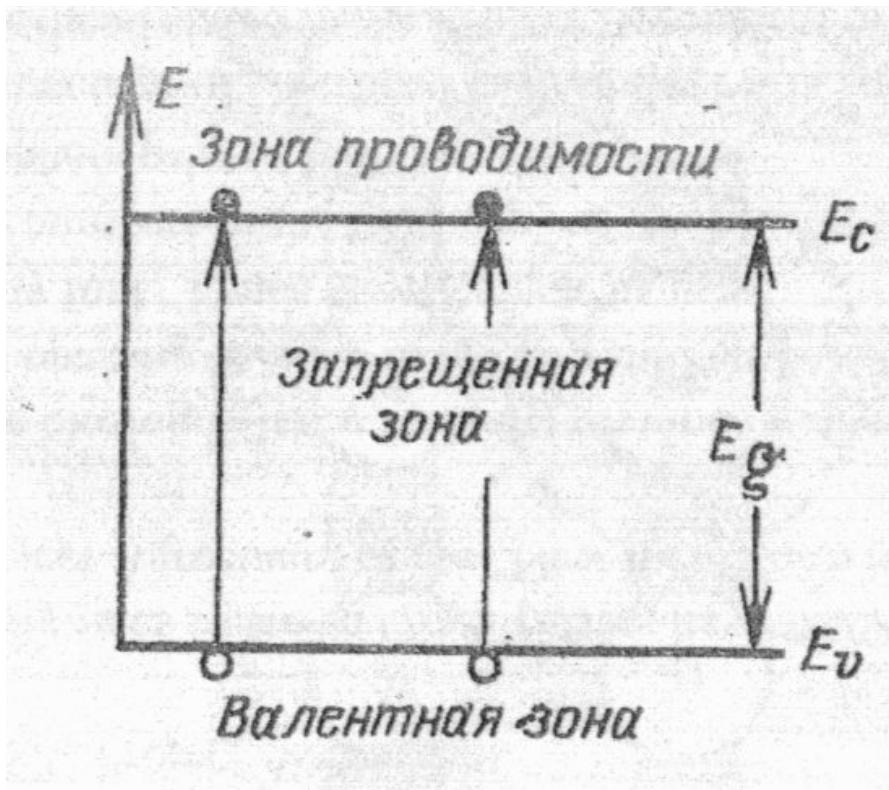
Процес перетворення зв'язаного електрона у вільний електрон називається **генерацією**.

Процес перетворення вільного електрона у зв'язаний називається **рекомбінацією**.

Фактичний рух електрона в кристалі складається з неупорядкованого теплового і упорядкованого руху, який визначається дією зовнішнього електричного поля.

Механізм провідності обумовлений рухом зв'язаних електронів по вакантним зв'язкам отримав назву діркової провідності.

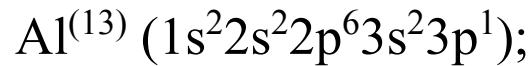
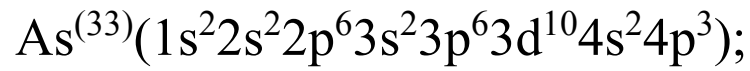
В чистому напівпровіднику, що не містить домішок, відбувається електронна і діркова електропровідність. Відповідно електричний струм у власному напівпровіднику визначається двома складовими – електронним і дірковим струмом, що протікають в одному напрямі.



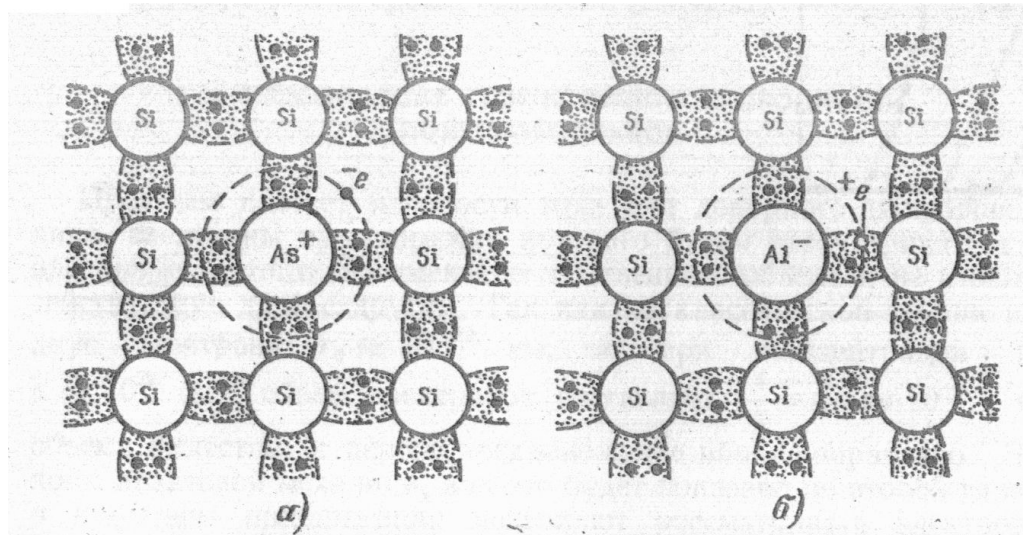
Схематичне зображення енергетичних зон власного напівпровідника.

Електропровідність напівпровідників

Домішкові, елементарні



Напівпровідник, що має домішки, називається домішковим, а провідність створена домішками називається домішковою електропровідністю.



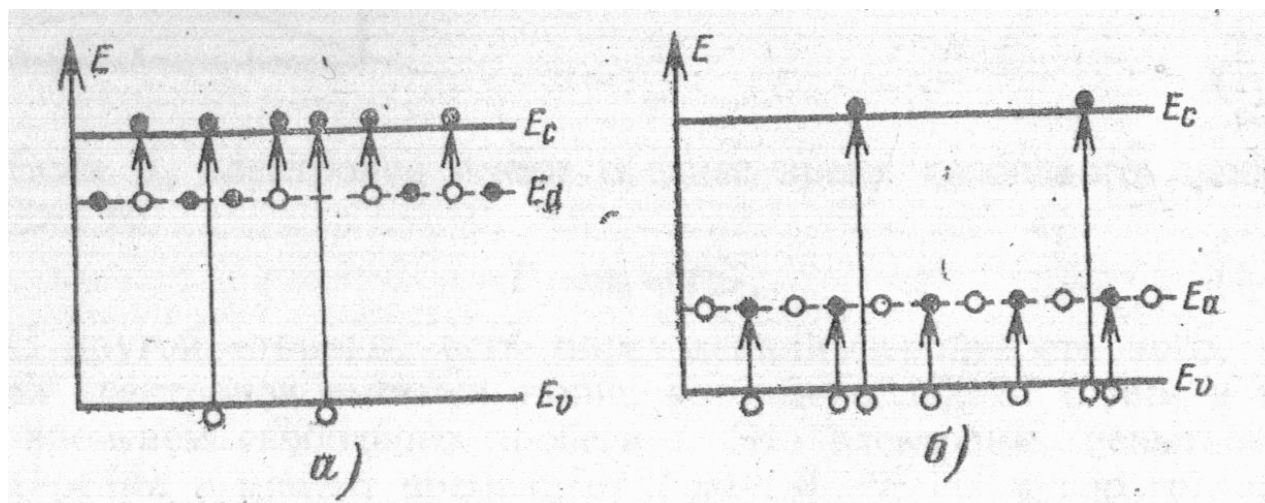
Схематичне зображення кристалічної ґратки донорного (а) і акцепторного (б) напівпровідників.

Домішка, що віддає електрон називається **донорною**.

Якщо домінуючу роль в провідності напівпровідника відіграють електрони, то вони є основними носіями заряду, а дірки – неосновними носіями заряду. Такий напівпровідник називається **електронним або n – типу**.

Домішка, що захоплює електрон називається **акцепторною**.

Якщо кількість дірок значно більша кількості вільних електронів, то електропровідність кристалу буде дірковою. В такому напівпровіднику основними носіями заряду будуть дірки, а електрони – неосновні носії заряду. Напівпровідник з акцепторною домішкою називається **дірковим або p – типу**.



Енергетична
діаграма
донорного (а) і
акцепторного (б)
напівпровідників

В ізотропних речовинах дрейфова швидкість направлена або паралельно полю (у позитивних частинок), або протилежно полю (у від'ємних частинок), тому μ і σ скаляри і, відповідно вектори $\mathbf{j}$ і $\mathbf{E}$ співпадають по напрямку.

В анізотропних речовинах це не має місця і співвідношення між $\mathbf{j}$ і $\mathbf{E}$ має більш загальний вид

$$\begin{aligned} j_x &= \sigma_{xx} \mathbf{E}_x + \sigma_{xy} \mathbf{E}_y + \sigma_{xz} \mathbf{E}_z, \\ j_y &= \sigma_{yx} \mathbf{E}_x + \sigma_{yy} \mathbf{E}_y + \sigma_{yz} \mathbf{E}_z, \\ j_z &= \sigma_{zx} \mathbf{E}_x + \sigma_{zy} \mathbf{E}_y + \sigma_{zz} \mathbf{E}_z, \end{aligned}$$

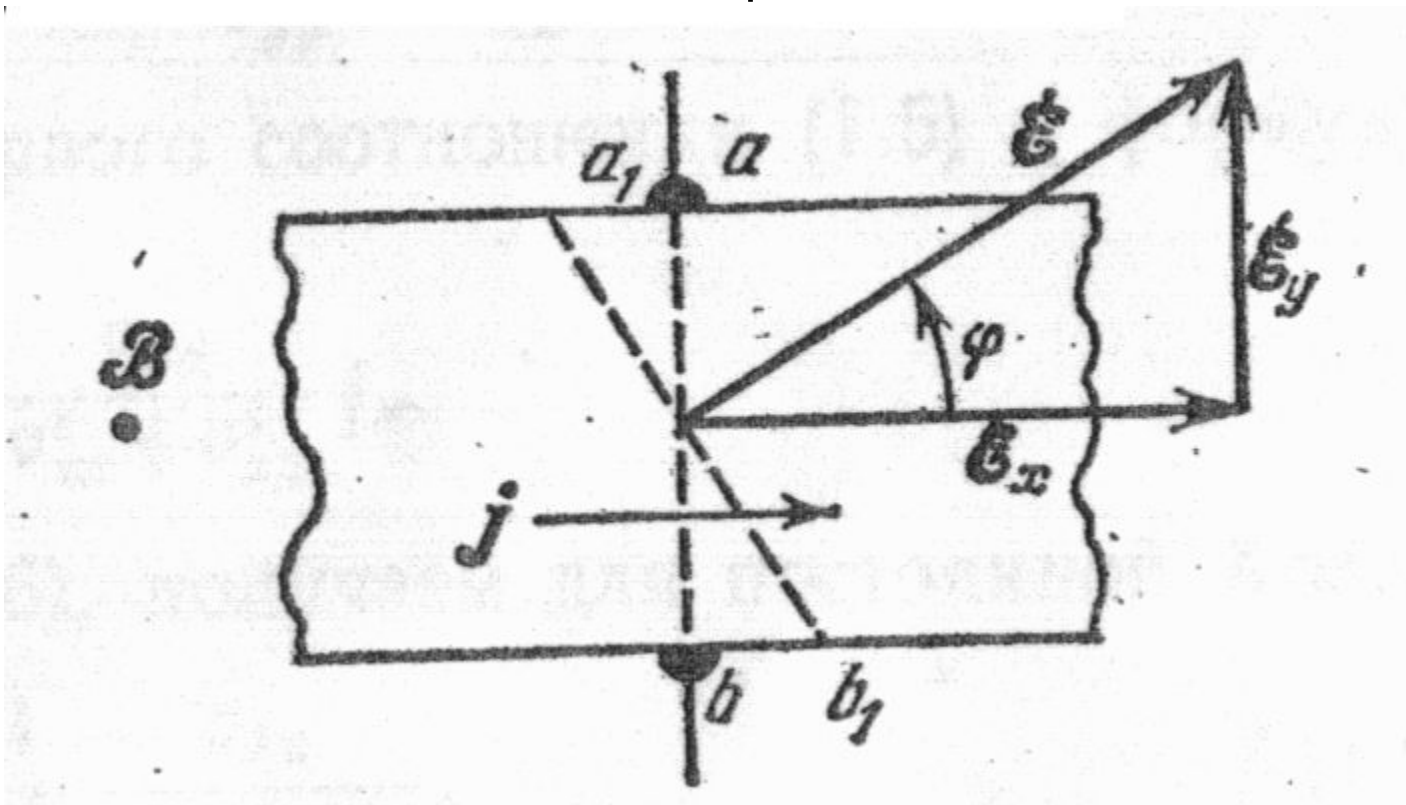
Або в скороченому записі

$$j_\alpha = \sigma_{\alpha\beta} \mathbf{E}_\beta \quad (\alpha, \beta = x, y, z).$$

В цьому випадку явище переносу заряду визначається вже не єдиним кінетичним коефіцієнтом, сукупністю коефіцієнтів $\sigma_{\alpha\beta}$, які є компонентами тензора 2-го рангу – тензора електропровідності.

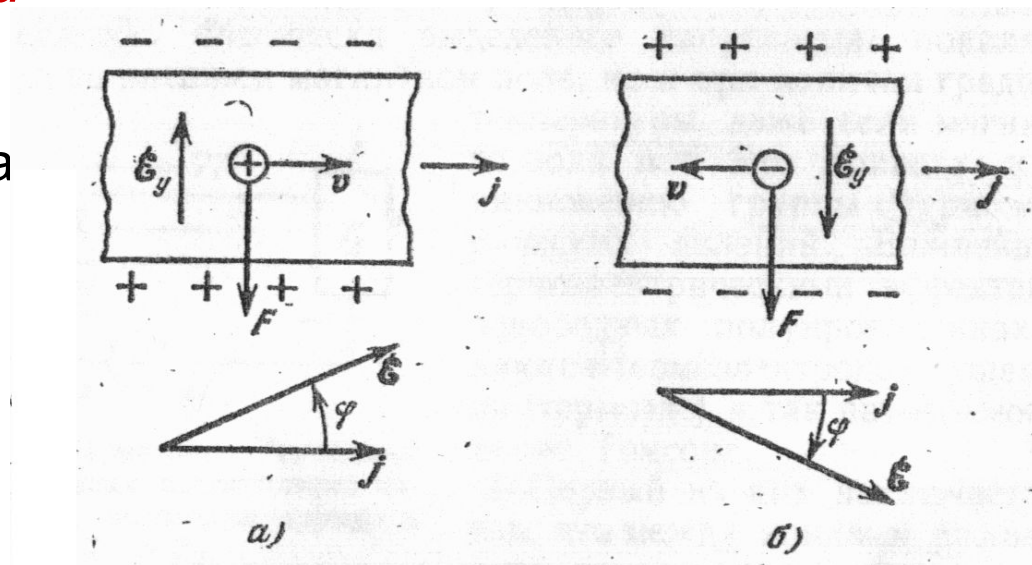
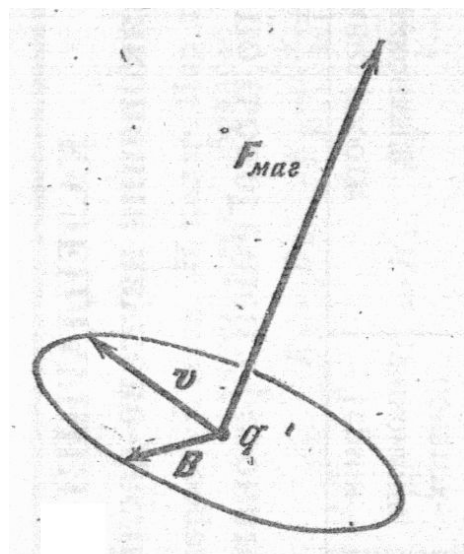
2. Ефект Холла. (Гальваномангнітні явища)

Ефект Холла полягає в тому, що в провіднику зі струмом, який поміщений в магнітне поле, з'являються електрорушійні сили $\mathcal{E}$, як наслідок, виникає додаткове електричне поле.



$$E_y = U / d = RBj = RB I / ad$$

R – постійна Холла; d – товщина зразка; a – ширина зразка; I – повний струм



Знак кута Холла: а) $\phi > 0$; б) $\phi < 0$.

Сила Лоренца

$$\mathbf{F}_m = q/c \mathbf{v} \times \mathbf{B}.$$

Вираз кута Холла через компоненти тензора електропровідності в
магнітному полі $\sigma_{\alpha\beta}$

$$\operatorname{tg}\phi = E_y / E_x = -\sigma_{yx} / \sigma_{yy} = \sigma_{xy} / \sigma_{xx}$$

$$(\sigma_{xy} = -\sigma_{yx} ; \sigma_{xx} = -\sigma_{yy})$$

Вираз постійної Холла через компоненти тензора електропровідності в
магнітному полі $\sigma_{\alpha\beta}$

$$R = 1/B \times \sigma_{xy} / (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2)$$

$$(E_y = \sigma_{xy} / (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2) \times j_x)$$

Технічні застосування ефекта Холла:

- вимірювання напруженості магнітного поля;
- вимірювання сили струму і потужності (В- відоме);
- генерація, модуляція і демодуляція електричних коливань;
- квадратичне детектування коливань;
- підсилення електричних сигналів;
- та ін.

3. Зміна опору в магнітному полі.

Зовнішнє магнітне поле викликає зміну j_x

$$-\Delta\sigma_{\perp}/\sigma = \Delta\rho_{\perp}/\rho = \chi_{\perp} B^2$$

$\chi_{\perp}$ - коефіцієнт поперечного магнітоопору
(залежить від властивостей матеріалу).

$$\sigma_{\perp}(B) = j_x / \mathbf{E}_x = (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2) / \sigma_{xx}^2$$

Якщо магнітне поле паралельне струму,
поздовжній магнітоопір $\Delta\rho_{\parallel}/\rho = 0$

4. Термоерс. (термоелектричні явища)

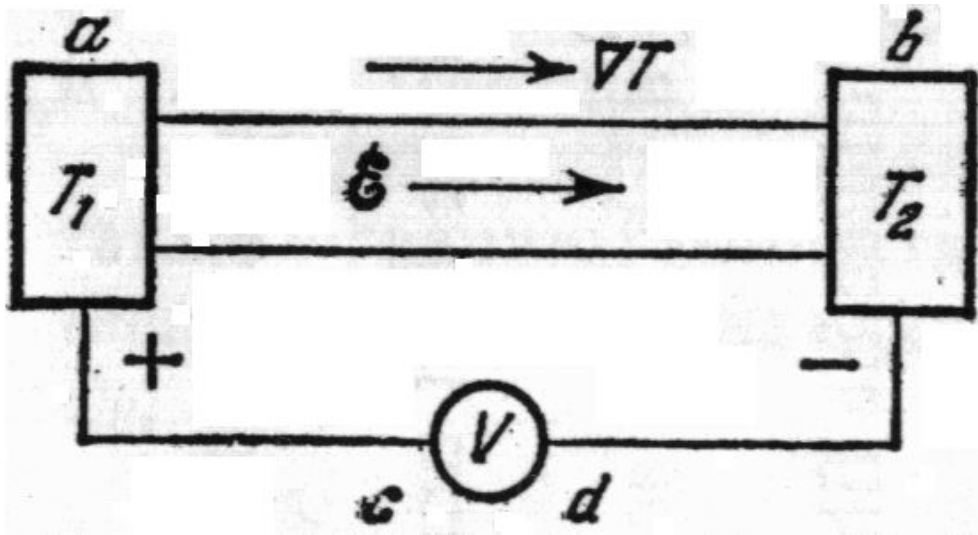
Між кінцями розімкненого провідника, які мають різну температуру, виникає різниця потенціалів, а значить всередині провідника з'являється електрорушійна сила.

Причина ефекту – потік дифузії заряджених частинок від нагрітого кінця до холодного більший, ніж в зворотньому напрямку.

На кінцях провідника (і на його поверхні) з'являються електричні заряди, а в середині – електричне поле.

$$dV_0 = \alpha dT$$

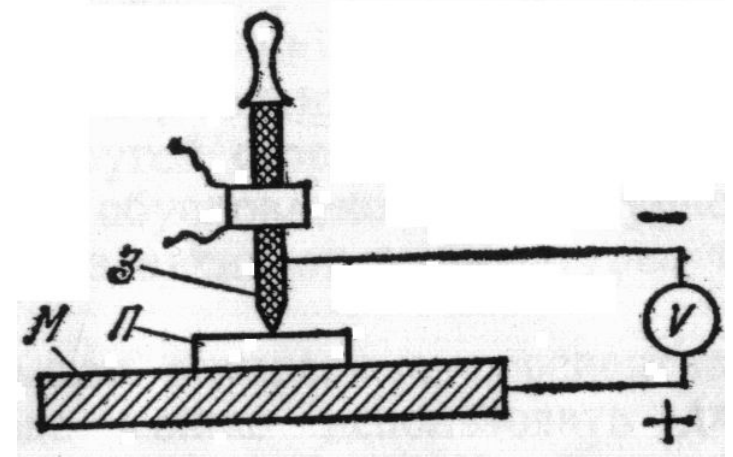
α - диференційна термоерс.



Термоерс. Вказаний знак напруги відповідає позитивним носіям заряду і $T_2 > T_1$.

Метали – $\alpha = 1 \div 10$ мкВ/град

Напівпровідники - $\alpha = (1 \div 10) \times 10^3$ мкВ/град



Термозонд. З- нагрітий стержень, П- напівпровідник, М- холодна металічна пластина. Знак напруги показаний для позитивних частинок.

5. Ефект Томсона.

Якщо в однорідному провіднику є градієнт температури в напрямку осі X і в тому ж напрямку тече електричний струм густиною j , то в кожній одиниці об'єму за одиницю часу виділяється, крім тепла Джоуля j^2/σ ще додаткове тепло

$$-\alpha_T j dT/dx.$$

α_T - коефіцієнт Томсона.

При зміні напрямку струму на зворотній тепло Томсона міняє знак: замість поглинання тепла спостерігається його виділення, і навпаки.

При наявності градієнта температури в провіднику є ще тепловий потік, обумовлений теплопровідністю речовини.

Кількість тепла, що проходить через одиницю поверхні за одиницю часу в напрямку X є

$$-\chi \, dT/dx,$$

де χ – коефіцієнт теплопровідності.

Якщо цей потік змінюється в просторі (в результаті зміни χ чи dT/dx), то в об'ємі провідника також виділяється тепло.

$$d/dx(\chi \, dT/dx).$$

В загальному випадку, коли напрям j і ∇T не співпадає, повна генерація тепла в одиниці об'єму за одиницю часу рівна

$$Q_V = j^2 / \sigma - \alpha_T(j \nabla T) + \text{div}(\chi \nabla T).$$

В стаціонарному випадку $Q_V = 0$.

Тому в провіднику встановлюється такий просторовий розподіл температури, при якому тепло, що відводиться теплопровідністю, як раз дорівнює сумі тепла Джоуля і тепла Томсона.

6. Ефект Пельте.

Зворотнє виділення тепла спостерігається на границі контакту двох різних провідників. Кількість тепла, що виділяється на одиниці площі контакту за одиницю часу Q , рівне

$$Q_s = \Pi_{12} j.$$

де j - густина струму через контакт, а Π_{12} - коефіцієнт Пельте. Він залежить від властивостей провідників, що контактують.

При зміні напрямку струму на зворотній замість виділення тепла спостерігається його поглинання і навпаки. Тобто, $\Pi_{12} = -\Pi_{21}$.

Причина виділення (поглинання) тепла Пельте полягає в тому, що середні енергії електронів E_1 і E_2 в різних провідниках 1 і 2 неоднакові, навіть якщо обидва провідники мають одну і ту ж температуру. При переході з одного провідника в другий змінюється:

- 1) Потенціальна енергія електрона $-e\phi$, оскільки на границі розділу є скачок електростатичного потенціалу і тому $\phi_1 \neq \phi_2$.
- 2) Може змінюватись середня кінетична енергія E . Причина- не класична статистика Максвелла-Больцмана для електронів, а квантова статистика Фермі-Дірака, у відповідності до якої залежить не лише від температури, але і від концентрації електронів.

При наявності струму для підтримки температури контакту постійною від нього необхідно відводити енергію, якщо $E_1 > E_2$ (виділення тепла Пельтьє), або підводити її до контакту, коли $E_1 < E_2$ (поглинання тепла Пельтьє).

$$\Pi_{12} = \Pi_1 - \Pi_2.$$

де Π_1 і Π_2 – коефіцієнти Пельтьє для провідника 1 і провідника 2, відповідно.

Зв'язок термоелектричних кінетичних коефіцієнтів:

$$\Pi = \alpha T,$$

$$\alpha_T = T \alpha / dT$$

Технічне застосування:

- термоелектричні генератори невеликої потужності;
- термоелектричні охолоджуючі пристрої.

7. Ефект Нернста-Етінгсгаузена. (термомагнітні ефекти)

Поперечний ефект Нернста-Етінгсгаузена.

Якщо провідник, в якому є градієнт температури, помістити в магнітне поле, то в ньому виникне електричне поле E перпендикулярне до ∇T і B , тобто в напрямку вектора $[\nabla T \times B]$. Якщо градієнт температури направлений вздовж осі X , а магнітна індукція – вздовж осі Z , то електричне поле паралельне осі Y .

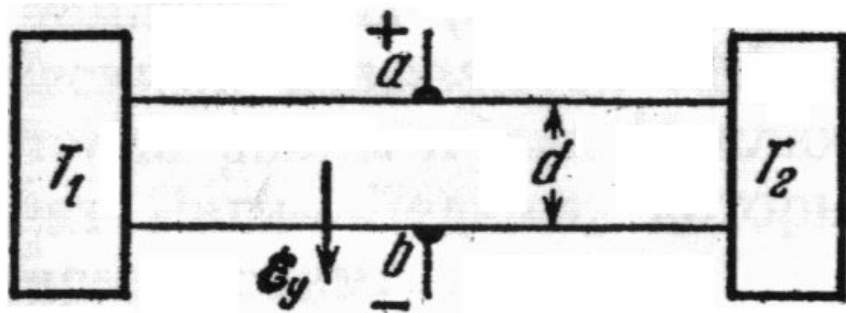
$$E_y = q_{\perp} B_z dTdx.$$

$q_{\perp}$ - постійна Нернста-Етінгсгаузена.

Ge: $\rho \sim 1$ Ом см, $B \sim 10^3$ Гс, $dT/dx \sim 10^2$ град/см, то $E_y \sim 10^{-2}$ В/см.

$q_{\perp}$ залежить від температури і магнітного поля і при зміні цих величин може навіть міняти знак.

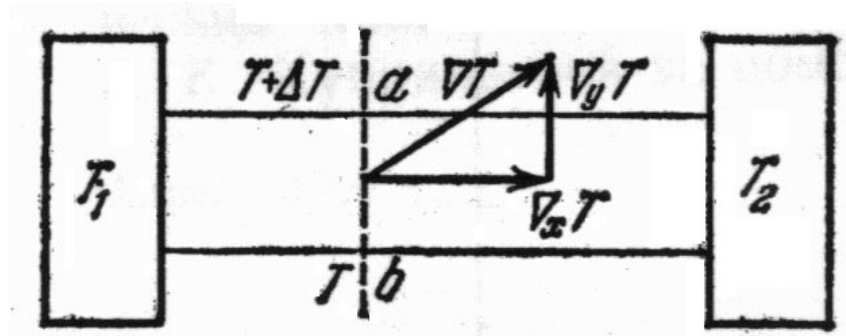
Знак $q_{\perp}$ не залежить від знаку носіїв заряду.



Поперечний
терромагнітний ефект
Нернста-Етінгсгаузена.

Даний ефект виникає по тій же причині, що і ефект Хола, тобто в результаті відхилення потоку заряджених частинок силою Лоренца. Відмінність, однак, полягає в тім, що при ефекті Хола направлений потік частинок виникає в результаті їх дрейфу в електричному полі, а в даному випадку — в результаті дифузії.

8. Ефект Рігі-Ледюка.



Поперечний
термомагнітний ефект
Рігі-Ледюка.

В провіднику, в якому є градієнт температури, при включенні магнітного поля з'являється також поперечна (по відношенню до початкового теплового потоку і напрямку B) різниця температур.

$$dT/dy = S B_z dt/dz$$

де S - постійна Рігі-Ледюка, що характеризує властивості даної речовини.

Ефект Рігі-Ледюка пов'язаний з тим, дифундуючи носії заряду переносять з собою тепло (теплопровідність). Без магнітного поля потік тепла направлений від гарячого кінця до холодного, тобто паралельно $-\nabla_x T$. В магнітному полі потоки дифузії і тепла повертаються силою Лоренца на деякий кут. Тому виникає складова теплового потоку вздовж осі Y , що і приводить до появи складової градієнта температури $-\nabla_y T$. Так як сили Лоренца при даному напрямку дифузії залежать від знаку заряджених частинок, то кут повороту теплового потоку, а значить і постійна мають різні знаки для позитивних і негативних носіїв заряду.

9. Повздовжні термомагнітні ефекти.

Повздовжні термомагнітні ефекти:

- поздовжній ефект Нернста-Етінгсгаузена-зміна термоерс в поперечному магнітному полі;
- поздовжній ефект Рігі-Ледюка – зміна теплопровідності в магнітному полі.

Теплообмін з оточуючим середовищем

- 1) Ізотермічний – поперечні градієнти температур рівні 0;
- 2) Адіабатичний – поперечні потоки тепла рівні 0.

Величини різних кінетичних коефіцієнтів – електропровідності, постійної Хола, термоерс та ін. – суттєво залежать від властивостей рухливих носіїв заряду: їх заряду, маси, енергетичного спектру в кристалі, а також від особливостей їх взаємодії з кристалічною ґраткою.

Дякую за увагу!