

# 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).

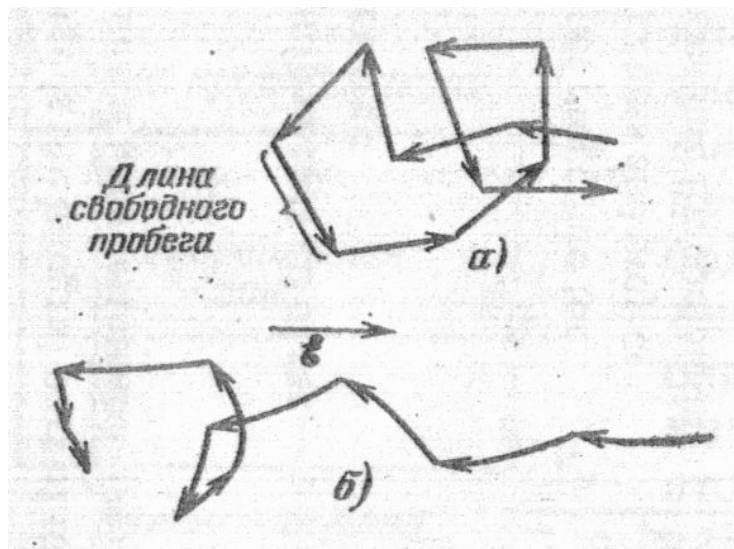
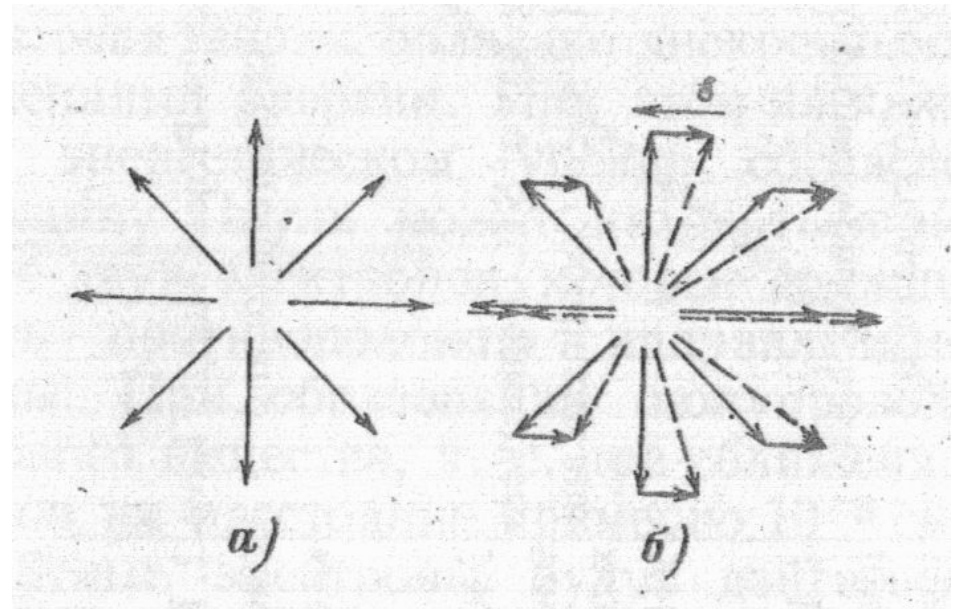


Схема руху вільного електрону за рахунок теплової енергії (а) і в зовнішньому електричному полі (б).



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  $\tau$  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 невпорядкованого теплового і впорядкованого руху, визваного дією зовнішнього електричного поля.

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

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

$$V_d = \mu E$$

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

Для негативних частинок  $\mu$  відємна,  
для позитивних частинок  $\mu$  додатня.

Густина струму  $j$

$$j = env_d = en\mu E$$

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

Закон Ома в диференційній формі

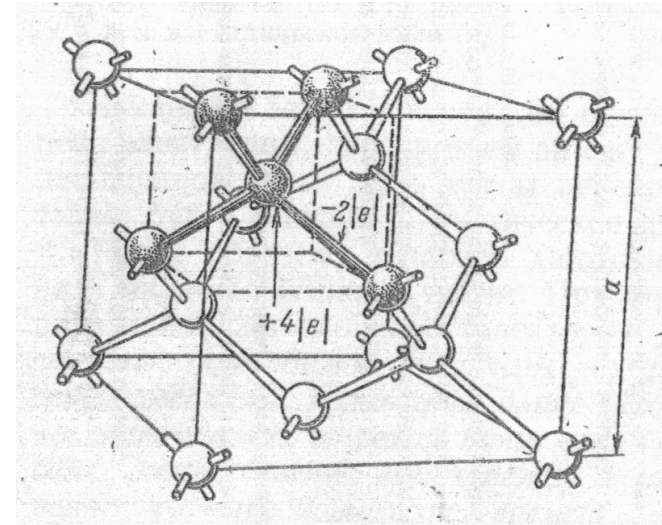
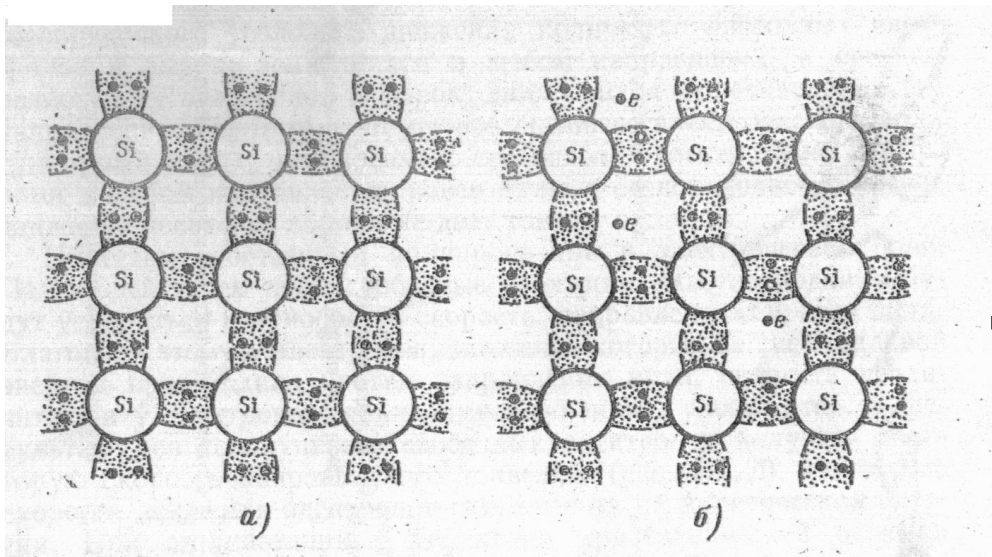
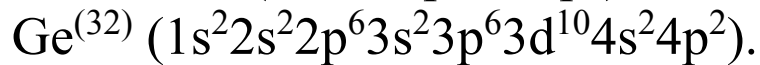
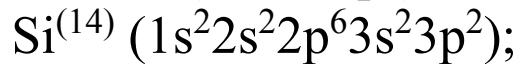
$$j = \sigma E$$

де  $\sigma$  - питома електропровідність речовини.

$$\sigma = en\mu$$

# Електропровідність напівпровідників

Власні, елементарні



Кристалічна гратка типу алмазу (а- постійна гратки).

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



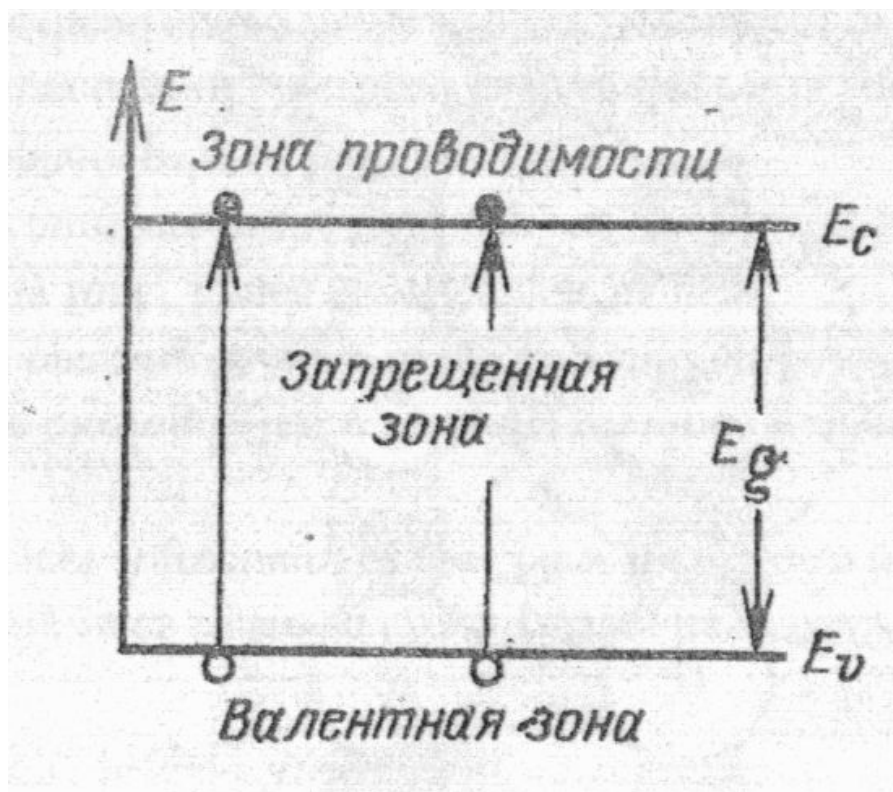
Процес перетворення зв'язаного електрона у вільний електрон називається **генерацією**.

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

Фактичний рух електрона в кристалі складається з невпорядкованого теплового і впорядкованого руху, який визивається дією зовнішнього електричного поля.

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

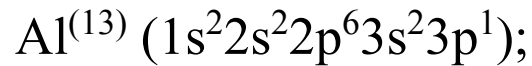
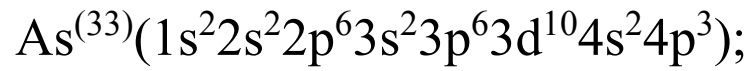
В чистому напівпровіднику, що не містить домішок, відбувається електронна і діркова електропровідність. Відповідно електричний струм у власному напівпровіднику визначається двома складовими – електронним і дірковим струмом, що протікають в одному напрямі.



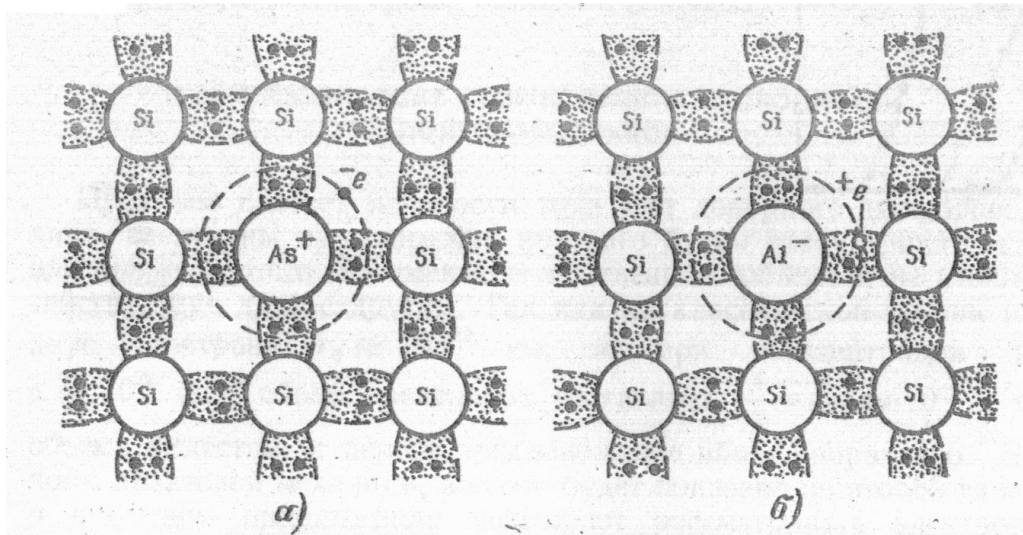
Схематичне зображення енергетичних зон власного напівпровідника.

# Електропровідність напівпровідників

Домішкові, елементарні



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



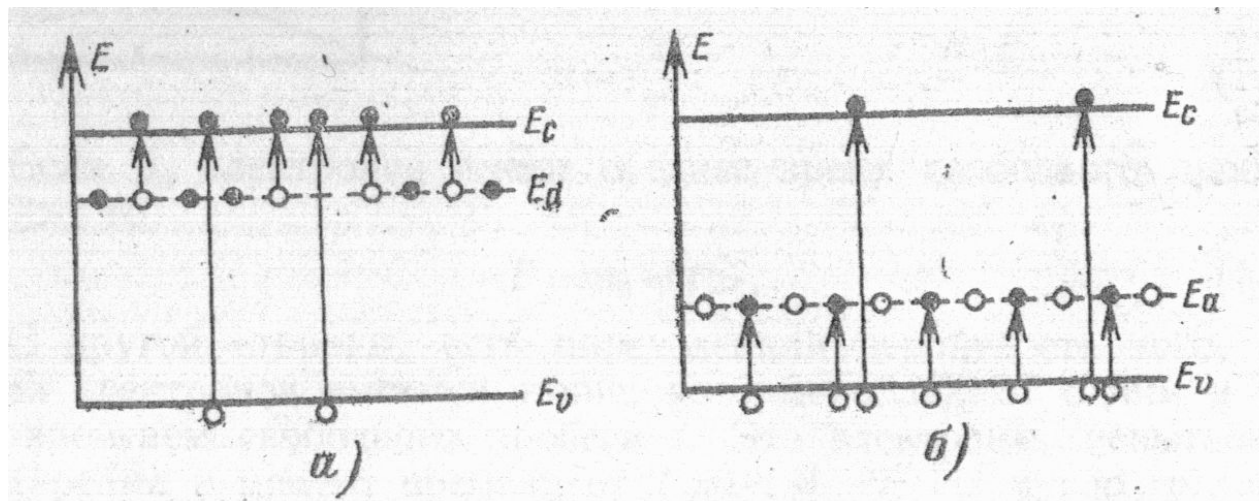
Схематичне зображення кристалічної ґратки донорного (а) і акцепторного (б) напівпровідників.

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  $\mu$  і  $\sigma$  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

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

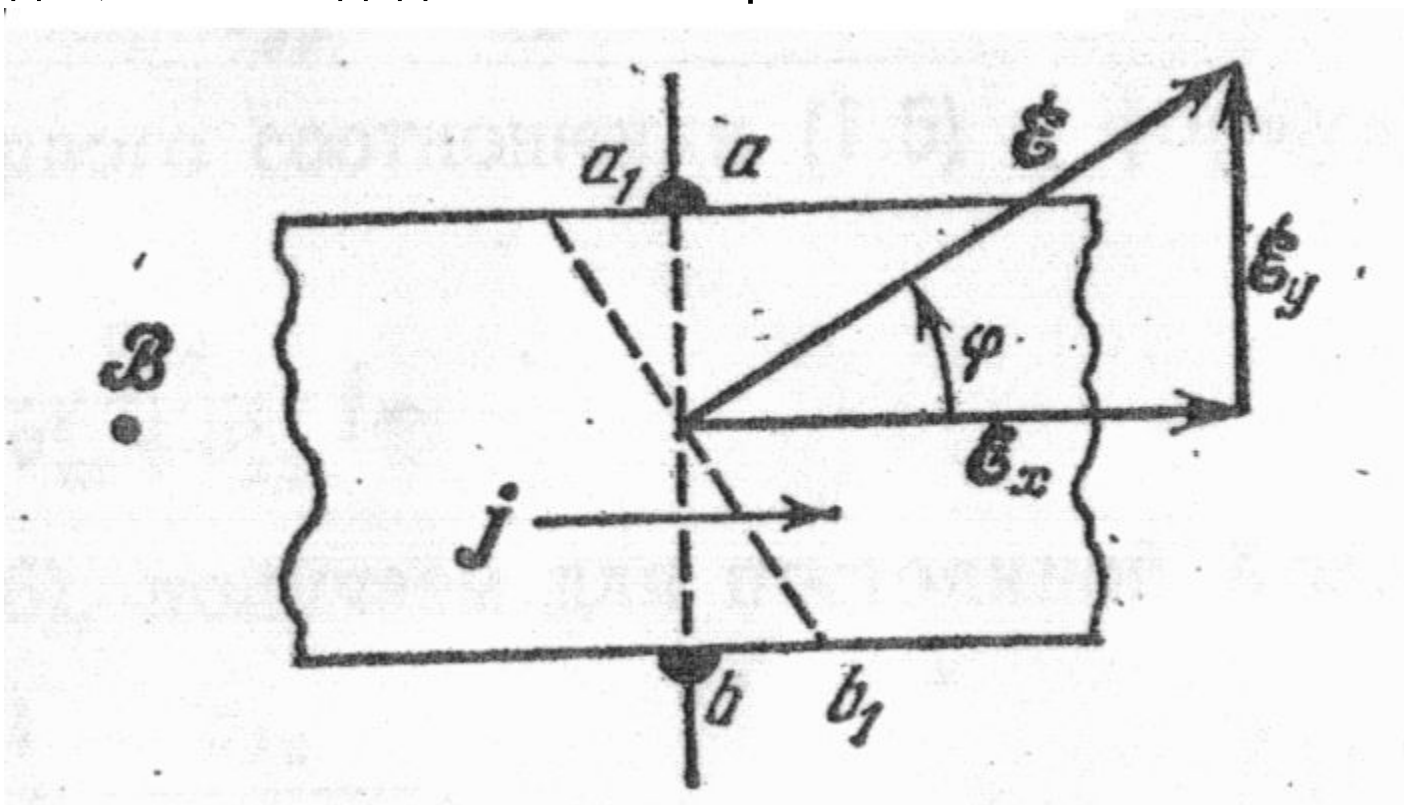
Або в скороченому записі

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

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. (Гальваномагнітні явища)

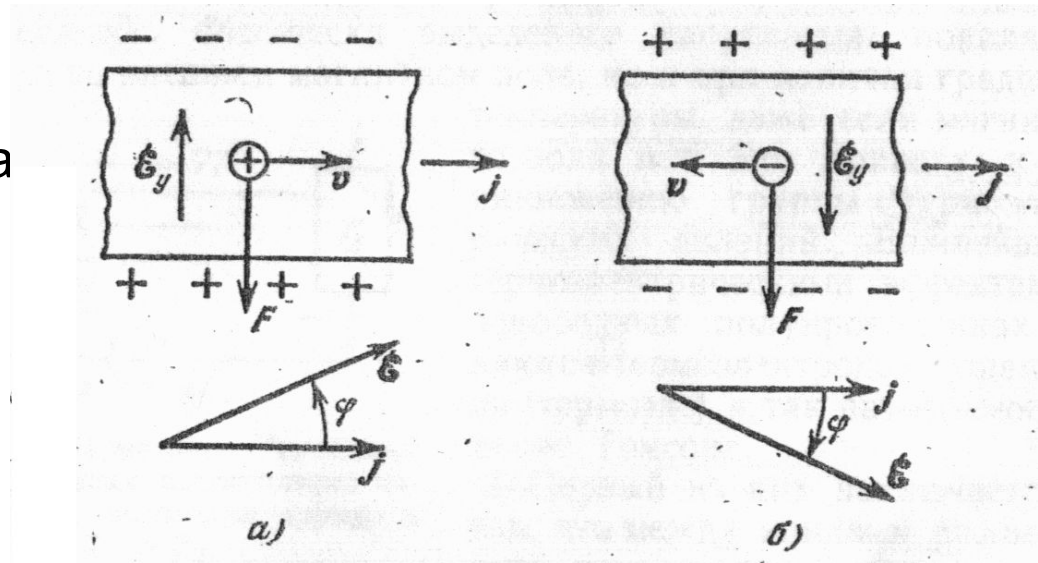
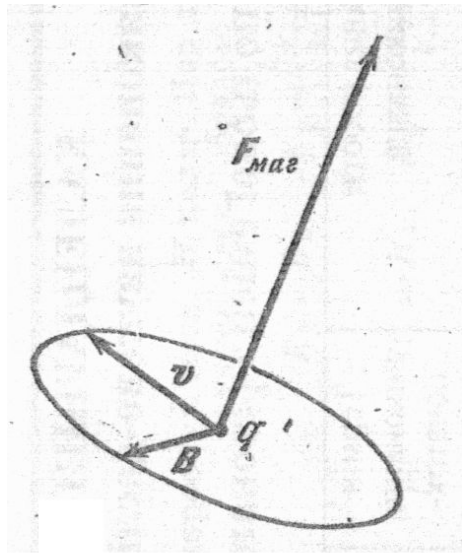
Ефект Холла полягає в тому, що в провіднику зі струмом, який поміщений в магнітне поле, з'являються електрорушійні сили  $\mathcal{E}$ , як наслідок, виникає додаткове електричне поле.





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

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



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

Сила Лоренца

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

Вираз кута Холла через компоненти тензора електропровідності в

магнітному полі  $\sigma_{\alpha\beta}$

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

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

Вираз постійної Холла через компоненти тензора електропровідності в

магнітному полі  $\sigma_{\alpha\beta}$

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

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

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,  
подовжній магнітоопір  $\Delta\rho_{\parallel}/\rho = 0$

## 4. Термоерс. (термоелектричні явища)

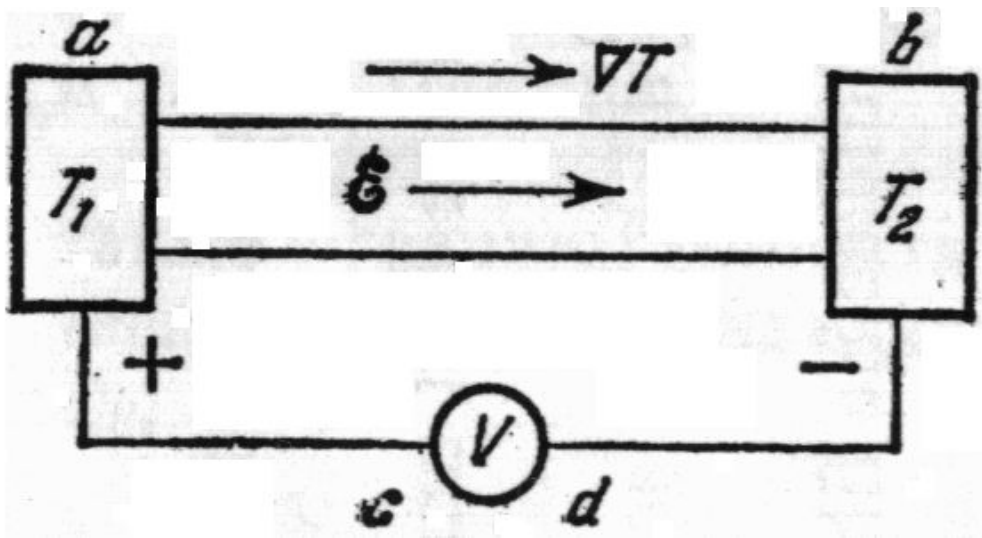
Між кінцями розімкненого провідника, які мають різну температуру, виникає різниця потенціалів, а значить всередині провідника з'являється електрорушійна сила.

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.

$$dV_0 = \alpha dT$$

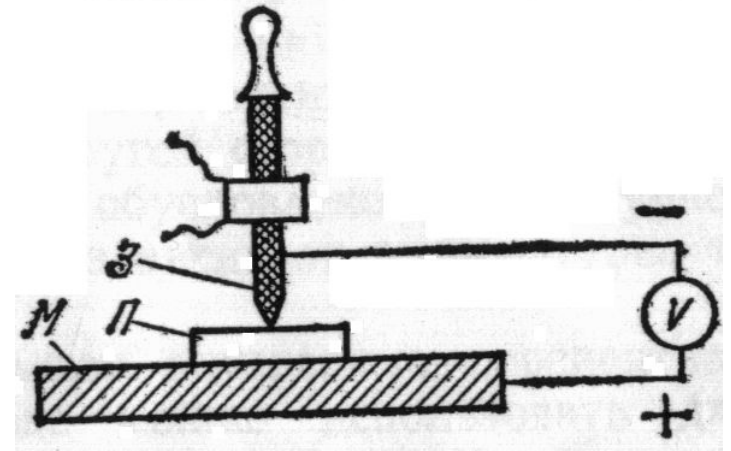
$\alpha$ - диференційна термоерс.



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  $j^2/\sigma$  ще додаткове тепло

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

$\alpha_T$ - 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  $\chi$  – коефіцієнт теплопровідності.

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

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

В загальному випадку, коли напрям  $j$  і  $\nabla T$  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  $\Pi_{12}$  - 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  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  – 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  $\nabla T$  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  $Y$ .

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

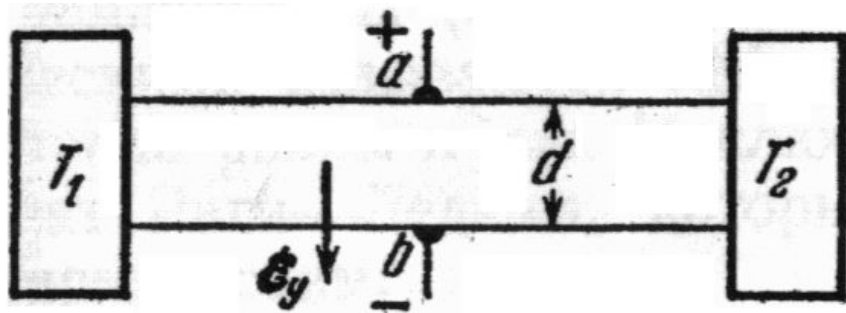
$q_{\perp}$  - постійна Нернста-Етінгсгаузена.

**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.

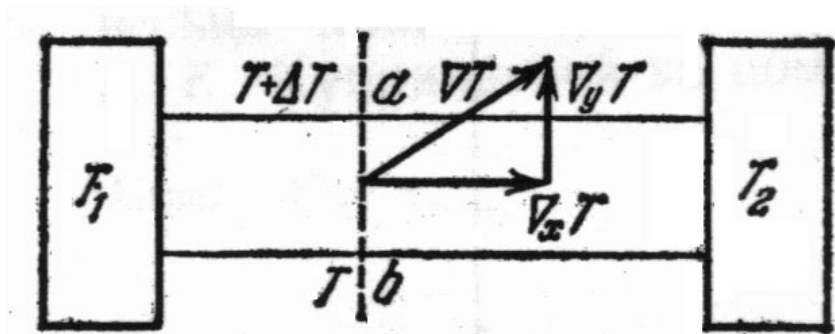




Поперечний  
терромагнітний ефект  
Нернста-Етінгсгаузена.

Даний ефект виникає по тій же причині, що і ефект Хола, тобто в результаті відхилення потоку заряджених частинок силою Лоренца. Відмінність, однак, полягає в тому, 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.



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.

Поперечний  
термомагнітний ефект  
Рігі-Ледюка.

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!**