

## Явища переносу в напівпровідниках

Явища переносу в напівпровідниках називають кінетичними явищами. Причиною їх є те, що 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. До кінетичних явищ відносяться: електропровідність, ефект Холла, зміна опору в магнітному полі, термоерс, ефекти Томпсона, Пельтьє, Рігі-Ледюка, теплопровідність та інші.

**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).

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  $l = v_0 * \tau$  ( $v_0$  - середня швидкість теплового руху вільного носія).

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.

**Для напівпровідників.** Процес перетворення зв'язаного електрона у вільний називається **генерацією**. Зворотний йому процес 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.

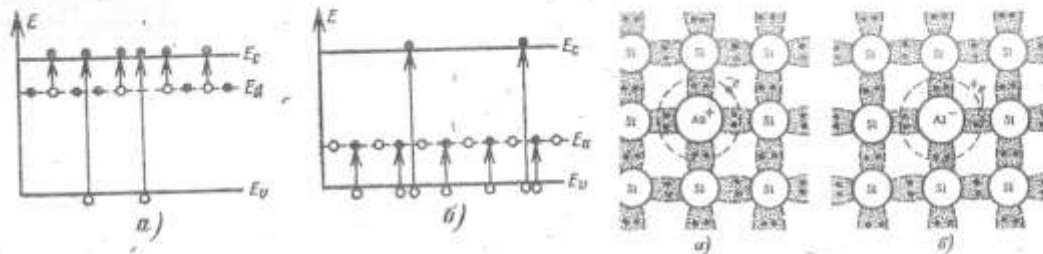
В чистому напівпровіднику, що не містить домішок, відбувається електронна і діркова електропровідність. Відповідно електричний струм у власному напівпровіднику визначається двома складовими - електронним і дірковим струмом, що протікають в одному напрямі. Напівпровідник, що містить у собі

домішки, називається домішковим, а провідність створена домішками називається домішковою електропровідністю.

Домішка, що віддає електрон називається **донорною**. Якщо домінуючу роль в провідності напівпровідника грають електрони, то вони є основними 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. Напівпровідник з акцепторною домішкою називається **дірковим** або **p-типу**.



На рис зображено енергетичні діаграми та кристалічну ґратку донорного (а) та акцепторного (б) напівпровідників

В ізотропних речовинах дрейфова швидкість направлена або паралельно полю (у позитивних частинок), або протилежно полю (у відємних 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

$$\begin{aligned} j_x &= \sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} E_y + \sigma_{xz} E_z, \\ j_y &= \sigma_{yx} E_x + \sigma_{yy} E_y + \sigma_{yz} E_z, \\ j_z &= \sigma_{zx} E_x + \sigma_{zy} E_y + \sigma_{zz} E_z. \end{aligned}$$

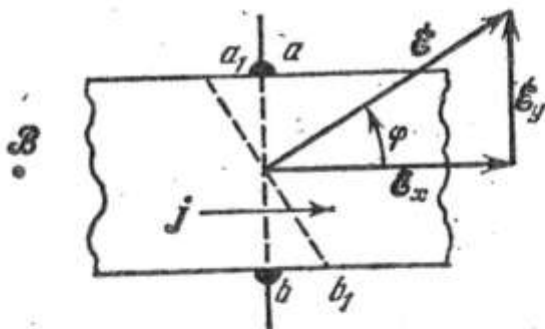
Або в скороченому записі:  $j_\alpha = \sigma_{\alpha\beta} E_\beta$  ( $\alpha, \beta = x, y, z$ ).

У 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.

#### 4. Кінетичні явища в напівпровідниках. Ефект Холла.

Кінетичні явища в напівпровідниках також ще називаються явищами переносу. Причиною їх є те, що 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. До кінетичних явищ відносяться: електропровідність, ефект Холла, зміна опору в магнітному полі, термоерс, ефекти Томпсона, Пельтьє, Рігі-Ледюка, теплопровідність та інші.

**Ефект Холла** (відноситься до гальваноманітних явищ) полягає в тому, що в провіднику зі струмом, який поміщений в магнітне поле, з'являються електрорушійні сили і, як наслідок, виникає додаткове електричне поле.



$$E_y = U/d = Rj = RBl/ad$$

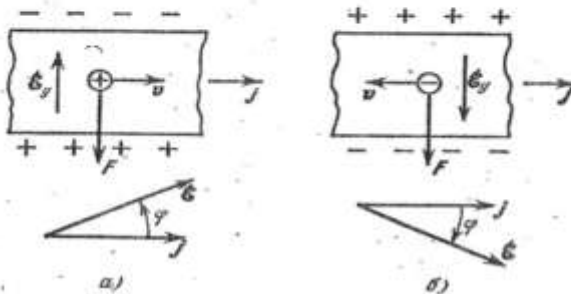
$R$  – постійна Холла;  $d$  – товщина зразка;  $a$  – ширина зразка;  $I$  – повний струм

Як видно з рис., кут Холла – кут між векторами  $E$  та  $j$ , може бути додатнім (а) та від'ємним (б). Вираз кута Холла через компоненти тензора електропровідності в магнітному полі  $\sigma_{\alpha\beta}$ :

$$\operatorname{tg}\varphi = E_y/E_x = -\sigma_{yx}/\sigma_{yy} = \sigma_{xy}/\sigma_{xx}; (\sigma_{xy} = -\sigma_{yx}; \sigma_{xx} = -\sigma_{yy})$$

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

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



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

**Для напівпровідників.** Вимірюючи знак і значення постійної Холла, можна встановити тип носіїв заряду і їх концентрацію. Одночасно вимірюючи питому електропровідність, є можливість визначити цілий ряд фундаментальних характеристик напівпровідників: ступінь чистоти, енергію активації домішок і ширину забороненої зони, відношення рухливості дірок і електронів і їх ефективні маси.

Поява холлівської ЕРС використовується в більшості вимірювальних пристроїв і схем автоматики: в магнітометрах (для вимірювання індукції магнітного поля), струмомірах (для вимірювання сили струму, який протікає в кабелях), ватметрах, для перетворення постійного струму в змінний, генерування, модуляції і демодуляції електромагнітних коливань; для підсилення електричних сигналів.

## 5. Кінетичні явища в напівпровідниках. Зміна опору в магнітному полі.

Кінетичні явища в напівпровідниках також ще називаються явищами переносу. Причиною їх є те, що 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. До кінетичних явищ відносяться: електропровідність, ефект Холла, зміна опору в магнітному полі, термоерс, ефекти Томпсона, Пельтьє, Рігі-Ледюка, теплопровідність та інші.

**Зміна опору в магнітному полі.** Властивість матеріалу змінювати свій електричний опір у магнітному полі називається **магнетоопором**. Якщо позначити опір матеріалу без магнітного поля  $\rho$ , а його опір у магнітному полі з магнітною індукцією  $\mathbf{B}$  позначити  $\rho_H$ , то магнетоопір зручно характеризувати

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_H - \rho}{\rho}$$

величиною

Ця відносна зміна опору не залежить від напрямку прикладеного магнітного поля, а, отже, є парною функцією магнітної індукції  $\mathbf{B}$ . При малому магнітному полі відносна зміна опору залежить від магнітної індукції квадратично, в сильних полях зазвичай виходить на насичення. Якщо магнітне поле паралельне струму, поздовжній магнітоопір  $\Delta\rho_H/\rho = 0$ .

Величина магнетоопору для кожного конкретного матеріалу залежить від типу розсіювання носіїв заряду. Вона різна в залежності від того, чи розсіювання відбувається в основному на нейтральних чи на заряджених домішках чи на фонах.

**Фізична природи явища:** в однорідному магнітному полі вільні заряджені частинки рухаються по спіралі. Магнітне поле не впливає на складову швидкості вздовж поля, але складова, перпендикулярна до поля змінюється сильно. Як наслідок, електропровідність стає тензорною величиною.  $\hat{\mathbf{j}} = \hat{\sigma}(\mathbf{B})\mathbf{E}$

Якщо магнітне поле прикладене перпендикулярно до електричного поля, то струм можна записати у вигляді  $j_x = \sigma_{xx}E_x + \sigma_{xy}E_y$ ;  $j_y = \sigma_{yx}E_x + \sigma_{yy}E_y$ .

Якщо вибрати вісь  $x$  вздовж зовнішнього поля, то, зазвичай, у магнітному полі виникне також і перпендикулярна складові напруженості електричного поля  $\mathbf{E}_y$ , яку можна знайти з умови  $j_y = 0$ . В такому випадку

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\sigma_0\sigma_{xx}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yx}^2} - 1$$

де  $\sigma_0$ — провідність без магнітного поля.

**Напівпровідники.** У слабких магнітних полях, коли  $\tau\omega_H \ll 1$ , де  $\tau$ — час релаксації носіїв заряду, а  $\omega_H$  — циклотронна частота, в напівпровідниках із одним типом носіїв заряду відносну зміну опору в магнітному полі можна

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \omega_H^2 \frac{\langle \tau^3 \rangle \langle \tau \rangle - \langle \tau^2 \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle^2}$$

оцінити за формулою: де час релаксації  $\tau$  усереднюється по енергії. Якщо час релаксації енергії носія заряду не залежить від енергії, то відносна зміна опору в магнітному полі дорівнює нулю.

Але для більшості механізмів розсіювання носіїв заряду така залежність існує.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \langle\tau\rangle\langle\tau^{-1}\rangle - 1$$

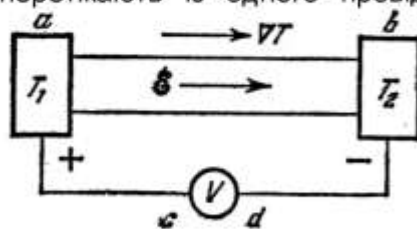
У сильних магнітних полях  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  і не залеж. від магнітного поля.

## 6. Кінетичні явища в напівпровідниках. Термоерс.

Кінетичні явища в напівпровідниках також ще називаються явищами переносу. Причиною їх є те, що 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. До кінетичних явищ відносяться: електропровідність, ефект Холла, зміна опору в магнітному полі, термоерс, ефекти Томпсона, Пельтьє, Рігі-Ледюка, теплопровідність та інші.

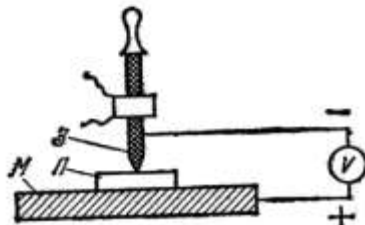
**ТермоЕРС. (по суті те ж, що і ефект Зеебека)** Даний ефект проявляється наступним чином: між кінцями розімкненого провідника, які мають різну температуру, виникає різниця потенціалів, а значить всередині провідника з'являється електрорушійна сила. Причиною ефекту є те, що потік дифузії заряджених частинок від нагрітого кінця до холодного більший, ніж в зворотному напрямку.

Фізична природа полягає в тому, що в кожній речовині електрони мають властивий для речовини розподіл за енергіями, яка характеризується рівнем хімічного потенціалу. При контакті двох речовин їхні хімічні потенціали вирівнюються за рахунок перетікання частини електронів із однієї речовини в іншу (див. Контактна різниця потенціалів). Якщо два контакти між провідниками мають однакову температуру, то перетікання електронів на одному контакті балансується аналогічним на іншому контакті й виникає термодинамічна рівновага. При неоднаковій температурі контактів, кількість електронів, які перетікають із одного провідника в інший і навпаки, різна, тож один із провідників стає зарядженим, що призводить до протікання електричного струму.



На кінцях провідника (і на його поверхні) з'являються електричні заряди, а в середині – електричне поле.  $dV_0 = \alpha dT$  ( $\alpha$  – диференційна термоерс).

**Верхній рис.** Термоерс, вказаний знак напруги відповідає позитивним носіям заряду і  $T_2 > T_1$



**Нижній рис.** Термозонд. З – нагрітий стержень, П – напівпровідник, М – холодна металічна пластина. Знак напруги показаний для позитивних частинок

## 7. Кінетичні явища в напівпровідниках. Ефект Томсона.

Кінетичні явища в напівпровідниках також ще називаються явищами переносу. Причиною їх є те, що 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. До кінетичних явищ відносяться: електропровідність, ефект Холла, зміна опору в магнітному полі, термоерс, ефекти Томпсона, Пельтьє, Рігі-Ледюка, теплопровідність та інші.

**Ефект Томпсона.** Якщо в однорідному провіднику є градієнт температури в напрямку осі  $X$  і в тому ж напрямку проходить електричний струм густиною  $j$ , то в кожній одиниці об'єму за одиницю часу виділяється, крім тепла Джоуля  $j^2/\sigma$  ще додаткове тепло  $-\alpha_T j dT/dx$ , де  $\alpha_T$ - 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.

## 8. Кінетичні явища в напівпровідниках. Ефект Пельтьє.

Кінетичні явища в напівпровідниках також ще називаються явищами переносу. Причиною їх є те, що 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. До кінетичних явищ відносяться: електропровідність, ефект Холла, зміна опору в магнітному полі, термоерс, ефекти Томпсона, Пельтьє, Рігі-Ледюка, теплопровідність та інші.

**Ефект Пельтьє.** Зворотнє виділення тепла спостерігається на границі контакту двох різних провідників. Кількість тепла  $Q$ , що виділяється на одиниці площі контакту за одиницю часу, рівне  $Q_s = P_{12} j$ , де  $j$  – густина струму через контакт, а  $P_{12}$  – коефіцієнт Пельтьє. Він залежить від властивостей провідників, що контактують.

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

Причина виділення (поглинання) тепла Пельтьє 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**:

- Потенціальна енергія електрона  $-e\phi$ , оскільки на границі розділу є скачок електростатичного потенціалу і тому  $\phi_1 \neq \phi_2$ .
- 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).

$P_{12} = P_1 - P_2$ , де  $P_1$  і  $P_2$  – коефіцієнти Пельтьє для провідника 1 і провідника 2, відповідно.

Зв'язок термоелектричних кінетичних коефіцієнтів:  $P = \alpha T$ ,  $\alpha_T = T \alpha / dT$

**Технічне застосування:**

- термоелектричні генератори невеликої потужності;
- термоелектричні охолоджуючі пристрої

## 9. Кінетичні явища в напівпровідниках. Ефект Нернста-Етінгсгаузена.

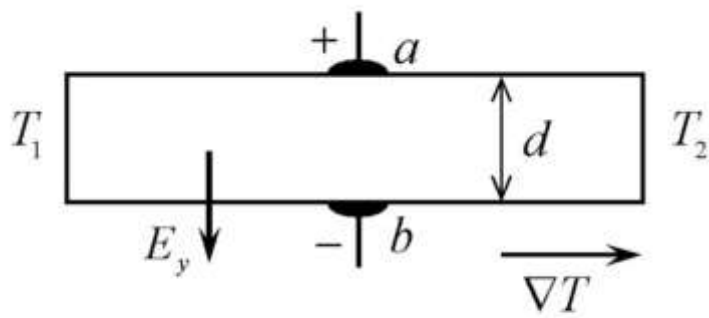
Кінетичні явища в напівпровідниках також ще називаються явищами переносу. Причиною їх є те, що електрони провідності в своєму русі переносять зв'язані з ними фізичні величини: масу, електричний заряд, енергію та ін. В результаті чого при певних умовах виникають направлені потоки цих величин, що приводить до ряду електричних і теплових ефектів. До кінетичних явищ відносяться: електропровідність, ефект Холла, зміна опору в магнітному полі, термоерс, ефекти Томпсона, Пельтьє, Рігі-Ледюка, теплопровідність та інші.

**Ефект Нернста-Етінгсгаузена (поперечний).** 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 електр. поле паралельне осі  $Y$ .  $E_y = q_{\perp} B_z dT/dx$ .

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

**Ge:**  $\rho \sim 1$  Ом см,  $B \sim 10^3$  Гс,  $dT/dx \sim 10^2$  рад/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.



Даний ефект виникає в результаті відхилення потоку заряджених частинок силою Лоренца (аналогічно до ефекту Холла). 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.