

# Вступ

1. Фотопровідність	2
2. Фотоефект	4
3. Фотоефект зовнішній і внутрішній	6
4. Відхилення від законів фотоефекту	7
5. Види фотопровідності	8
6. Внутрішньозонна фотопровідність	15
7. Охолодження носіїв	17
8. Спектр фотоносіїв	20

# Фотопровідність

Серед фізичних властивостей напівпровідників далеко не останнє місце займає фотопровідність.

*Фотопровідність (фоторезисторний ефект) це здатність напівпровідників змінювати електричний опір (провідність) під дією електромагнітного випромінювання різних довжин хвиль.*

В колі змінного струму  $G = R/Z^2$ , де  $Z$  – імпеданс, а  $R$  – опір. Одиниця виміру  $[G] = S$ , Сіменс. У ланцюзі постійного струму ( $R = Z$ ) провідність  $G = 1/R$ .

На цьому явищі ґрунтується принцип дії різноманітних типів фотоопорів, приладів нічного бачення, видіюконів (передавальна телевізійна трубка з накопиченням заряду, дія якої ґрунтується на внутрішньому фотоефекті, яка була найбільш поширена до появи напівпровідникових матриць), запам'ятовуючих пристроїв е. в. м., підсилювачів світла, сонячних батарей, фотодіодів, фототріодів і т. ін.

# Фотопровідність

У 1873 р. Віллоубі Сміт виявив, що селен на світлі має інше опір, ніж у темряві [Willoughby Smith "Effect of light on the electric conductivity of selenium " *Nature*, 1873. – Vol. 7., No.176, P.361 - 361] .

*"У пошуках високих опорів для використання на берегових станціях у зв'язку з моєю системою контролю і сигналізації при зануренні довгих підводних кабелів мені довелося експериментувати зі стрижнями селену металом з дуже високим опором. Коли стрижні поміщалися в світлонепроникну коробку з ковзаючою кришкою, що виключало проникнення світла, то їх опір було найбільшим і залишалося строго постійним, задовольняючи всім необхідним для мене умов. Як тільки кришку зсували, провідність відразу збільшувалася на 15 - 20% в залежності від інтенсивності світла, який потрапляв на стрижень".*

# Фотоефект

Перший фотоелектричний елемент був створений раніше Едмоном Беккерелем в 1839г. Сам факт існування фотоефекту остаточно довів Генріх Герц в 1887 р. Досліджуючи роботу відкритого конденсатора, він встановив, що його в чорну коробку, що б краще розрізняти поява іскри, проте в темряві її довжина виявилася менше. При освітленні ультрафіолетовим світлом конденсатор став випускати більш довгі іскри за менший час. Першу в історії сонячних батарей клітинку, засновану зовнішньому фотоефекті створив Олександр Григорович Столетов вже в 1888 р.

Основними результатами численних експериментів були докази:

- а) незалежності максимальної кінетичної енергії фотоелектронів  $E_{max}$  від інтенсивності світла,
- б) лінійної залежності  $E_{max}$  від частоти  $\omega$  фотонів світла,
- в) існування мінімального значення  $\omega_0$ .

# Фотоефект

Фотоефект – це випромінювання електронів речовиною при поглинанні нею фотонів електромагнітного випромінювання.

Ейнштейн у 1905 р пояснив це явище. За що у 1921р отримав Нобелівську премію. Він припустив, що світло може існувати як пучок квантів.

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4 = E_0^2 ; \quad m^2 = \frac{E^2}{c^4} - \frac{\vec{p}^2}{c^2} ; \quad (\vec{p}) = (E/c^2) \quad (1)$$

$$p_2 - p_1 = c^{-2} [E_2 v_2 - E_1 v_1] = c^{-1} [E_2 (v_2/c) - E_1 (v_1/c)] \quad (2)$$

Нехай відбувається оптичний перехід зі стану 1 в стан 2. Тоді для будь-якої швидкості електрона  $v < c$  рівняння для  $E$  і  $\vec{p}$  несумісні.

$$E_2 - E_1 = h\nu; \quad p_2 - p_1 = h\nu / c = [E_2 - E_1]/c \quad (3)$$

Іншими словами, вільний електрон не може поглинути фотон це призвело б до несумісності законів збереження енергії  $E$  і імпульсу  $\vec{p}$ . Необхідно третє тіло. Наприклад сама речовина із **роботою виходу  $\Phi$** .

# Фотоефект зовнішній і внутрішній

Тоді кінетична енергія електрона:

$$E = \hbar \omega - \Phi$$

і при температурі  $T = 0$  та не дуже великій інтенсивності світла, коли многофотонні процеси відсутні, фотоефект виникає тільки при  $\hbar\omega \geq \Phi$ .

За усталеною термінологією фотоефект у конденсованому середовищі називають *фотоелектронної емісією*, а при переході електрона із зв'язаного стану в атомі або молекулі в безперервний спектр називають *фотоіонізацією*. Друга назва фотоелектронної емісії – *зовнішній фотоефект*.

Виникнення вільних електронів і (або) дірок в твердому тілі при поглинанні в ньому фотонів електромагнітного випромінювання називають *внутрішнім фотоефектом*.

# *Відхилення від законів фотоефекту*

Як показали експерименти в національному метрологічному інституті Німеччини Physikalisch-Technische Bundesanstalt, результати которых опубліковані 24 апреля 2009 года в Physical Review Letters [Phys. Rev. Lett. 102, 163002 (2009): Extreme Ultraviolet Laser Excites Atomic Giant Resonance] в м'якому рентгенівському діапазоні довжин хвиль при щільності потужності на рівні декількох пентават ( $10^{15}$  Вт) на квадратний сантиметр загальноприйнята теоретична модель фотоефекту може виявитися невірною.

Порівняльні кількісні дослідження різних матеріалів показали, що глибина взаємодії між випромінюванням і речовиною суттєво залежить від структури атомів цієї речовини і кореляції між внутрішніми електронними оболонками.

# Види фотопровідності

Фотопровідність виникає під дією випромінювання завдяки зміні:

- *концентрації* носіїв (концентраційна фотопровідність),
- *рухливості* носіїв заряду.

Залежно від механізму поглинання випромінювання фотопровідність поділяють на власну, домішкову і внутризонну. В *основі власної та домішкової* фотопровідності лежить *внутрішній фотоефект*.

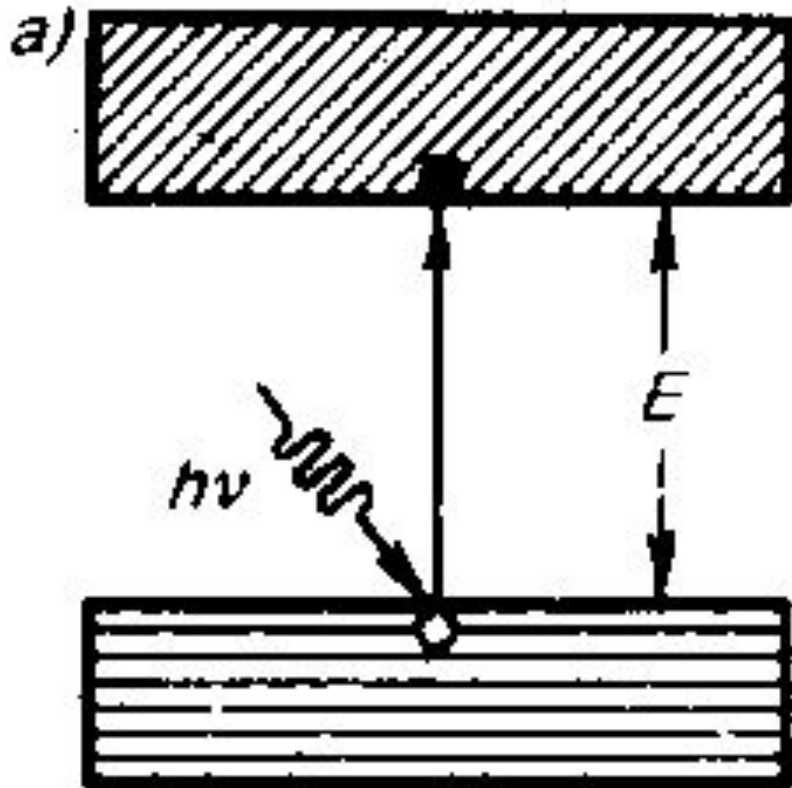
Власна фотопровідність виникає при оптичній генерації пар електрон - дірка.

Для домішкової фотопровідності характерний фотовідрив носія заряду від зарядженого домішкового центру.



# Види фотопровідності

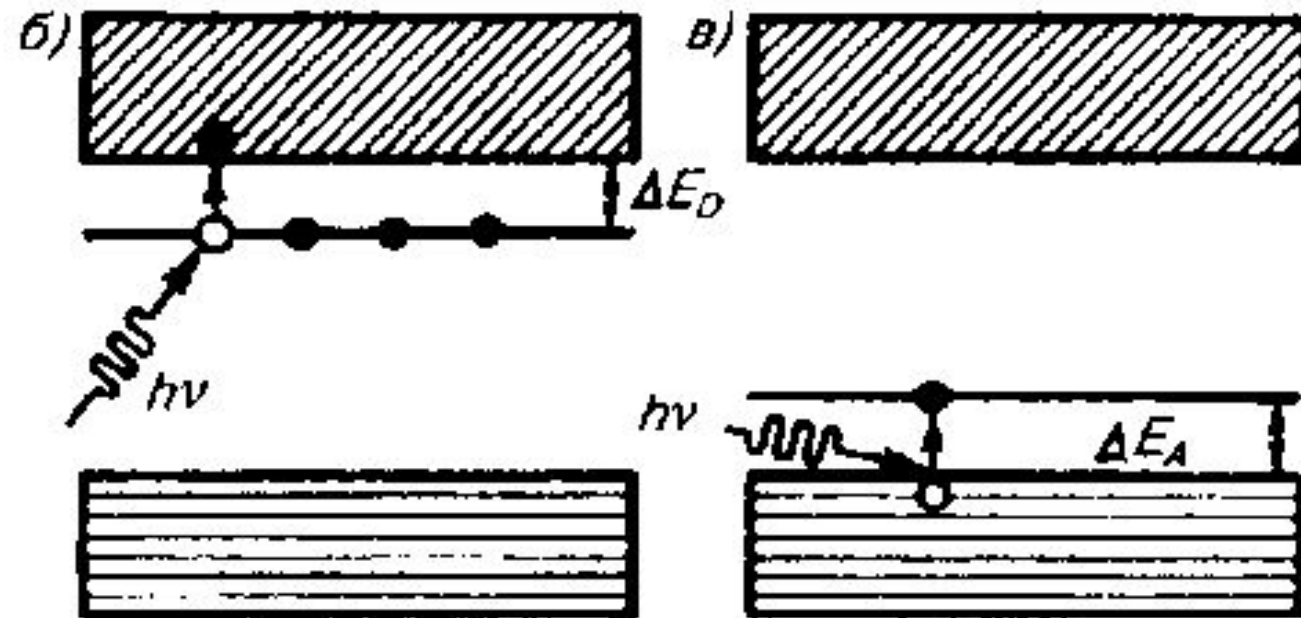
При поглинанні фотонів, енергії яких відповідають власній смужці поглинання напівпровідника, тобто коли енергія фотонів дорівнює або більше ширини забороненої зони ( $h\nu > \Delta E$ ), можуть відбуватися переходи електронів з валентної зони в зону провідності (рис. 1.а).



Це викликає появу додаткових (нерівноважних) електронів (в зоні провідності) і дірок (у валентній зоні). В результаті виникає власна фотопровідність, обумовлена як електронами, так і дірками.

# Види фотопровідності

Якщо напівпровідник містить домішки, то фотопровідність може виникати і при  $h\nu < \Delta E$ . Для напівпровідників з донорною домішкою фотон повинен мати енергію  $h\nu > \Delta E_D$ , а для напівпровідників із акцепторною домішкою —  $h\nu > \Delta E_A$ . При поглинанні світла домішковими центрами відбувається перехід електронів із донорних рівнів у зону провідності у випадку напівпровідника *n*-типу (рис. 1.б) або з валентної зони на акцепторні рівні у випадку напівпровідника *p*-типу (рис. 1.в).



\*

В результаті виникає домішкова фотопровідність, яка є суто електронною для напівпровідників *n*-типу і чисто дірковою для напівпровідників *p*-типу.

# Види фотопровідності

Якщо  $\Delta E_n$  є енергією активації домішкових атомів, то в напівпровіднику збуджується фотопровідність. Можна визначити **червону межу фотопровідності** як максимальну довжину хвилі  $\lambda_0$ , при якій ще виникає фотопровідність

$$\lambda_0 = c h / \Delta E \quad \text{для власних напівпровідників}$$

$$\lambda_0 = c h / \Delta E_n \quad \text{для домішкових напівпровідників}$$

Враховуючи значення  $\Delta E$  і  $\Delta E_n$  для конкретних напівпровідників, можна показати, що червона межа фотопровідності для власних напівпровідників, зазвичай, припадає на видиму область спектру, для домішкових напівпровідників — на інфрачервону.

Фотопровідність може виникати і як наслідок сенсibilізованого фотоефекту. Сенсibilізованим фотоефектом називається фотоефект, що супроводжується явищем сенсibilізації, тобто зміною величини і спектру фоточутливості у широких

# *Види фотопровідності*

фотопровідниках органічної і неорганічної природи в залежності від структури молекулярних сполук.

Поряд з поглинанням, яке приводить до появи фотопровідності, може мати місце екситонний механізм поглинання. Екситони це квазічастинки, які є електрично-нейтральними пов'язаного стану електрона і дірки, що утворюються у разі збудження з енергією, меншою за ширину забороненої зони. Рівні енергії екситонів розташовуються біля дна зони провідності. Так як екситони електрично-нейтральні, то їх виникнення в напівпровіднику не викликає появи додаткових носіїв струму, внаслідок чого екситоне поглинання світла не супроводжується збільшенням фотопровідності.

# Види фотопровідності

Зміна питомої електропровідності  $\sigma$  однорідного напівпровідника під дією випромінювання дорівнює:

$$\Delta\sigma = e(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p)$$

де  $\Delta n$ ,  $\Delta p$  це є зміни концентрацій електронів провідності ( $n$ ) и дірок ( $p$ ), а  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  це їх рухливості. Величини  $\Delta n$ ,  $\Delta p$  визначаються **квантовим виходом  $Y$**  внутрішнього фотоефекту, тобто числом електронно-діркових пар (при власної фотопровідності), що генеруються, або числом генерованих носіїв (при домішкової фотопровідності) в розрахунку на один поглинений фотон, а також часом життя фотоносіїв (до їх рекомбінації або захоплення домішковими центрами). Якщо **фотопровідність власна**, то вона визначається рухомими фотоносіями обох знаків. Її називають **біполярною**.

# *Види фотопровідності*

Якщо навіть і генеруються фотоносії обох знаків, але фотоносії одного типу мають незначні рухливість і час життя, а також якщо фотопровідність є домішковою, коли генеруються фотоносії тільки одного знаку, тоді фотопровідність називається *монополярною*.

Так як імпульс фотона, як правило, занадто малий у порівнянні з імпульсом електрона, вимога одночасного виконання законів збереження енергії та імпульсу приводить до того, що переходи електронів з участю лише одного фотона виявляються можливими лише між станами, в яких імпульс електрона практично один і той же ("прямі", або "вертикальні", переходи).

Ця заборона може порушуватися за рахунок взаємодії електронів або дірок з фононами. Останнє викликає "непрямі" переходи зі зміною як енергії, так і імпульсу електрона і випромінюванням або поглинанням фонона.

# *Виды фотопровідності*

Дослідження залежності фотопровідності від енергії фотонів  $h\nu$  дозволяють по мінімальній енергії, яка ще викликає фотопровідність, визначати енергетичні щілини між рівнями або зонами.

## *Внутрішньозонна фотопровідність*

Внутрішньозонна фотопровідність пов'язана зі зміною рухливості носіїв заряду при їх перерозподілі з енергетичних станів в результаті поглинання випромінювання.

До процесів, що викликають внутрішньозонну фотопровідність, відносять:

- а) оптичні переходи носіїв заряду в межах однієї зони, які можливі завдяки розсіюванню носіїв на домішках і фононах;
- б) прямі оптичні переходи між підзонами діркової зони у напівпровідниках  $p$ - типу ("легкі" і "важкі" дірки);
- в) переходи між підзонами розмірного квантування в напівпровідникових структурах.

# *Внутрішньозонна фотопровідність*

При внутрішньозонній фотопровідності може змінюватися рухливість як а) тих носіїв, які безпосередньо поглинули випромінювання, так і б) всіх носіїв заряду через перерозподілу поглиненої енергії, обумовленого міжелектронним розсіюванням. Як правило, визначальну роль відіграє другий процес. Якщо час перерозподілу енергії малий у порівнянні з часом релаксації енергії носіїв, то фотопровідність можна розглядати як результат зміни температури газу носіїв  $T_n$  при поглинанні випромінювання. В цьому випадку

$$\Delta\sigma \approx d\mu/dT_n$$

Знак  $d\mu/dT_n$  і  $\Delta\sigma$  може бути як позитивним, так і негативним. Знак  $\Delta\sigma$  визначається також знаком зміни електронної температури  $dT_e$ .



# *Внутрішньозонна фотопровідність*

Як правило, при поглинанні світла  $dT_e > 0$ , однак можливе охолодження газу. Охолодження спостерігається, наприклад, в *p*-Ge при оптичних переході дірок із підзони "важких" дірок в підзону "легких" і швидкому розсіювання енергії "легких" дірок на оптичних фононах. Зі зміною енергії фотонів знак  $\Delta\sigma$  змінюється і внутрішньозонна фотопровідність осцилює, змінюючи знак.

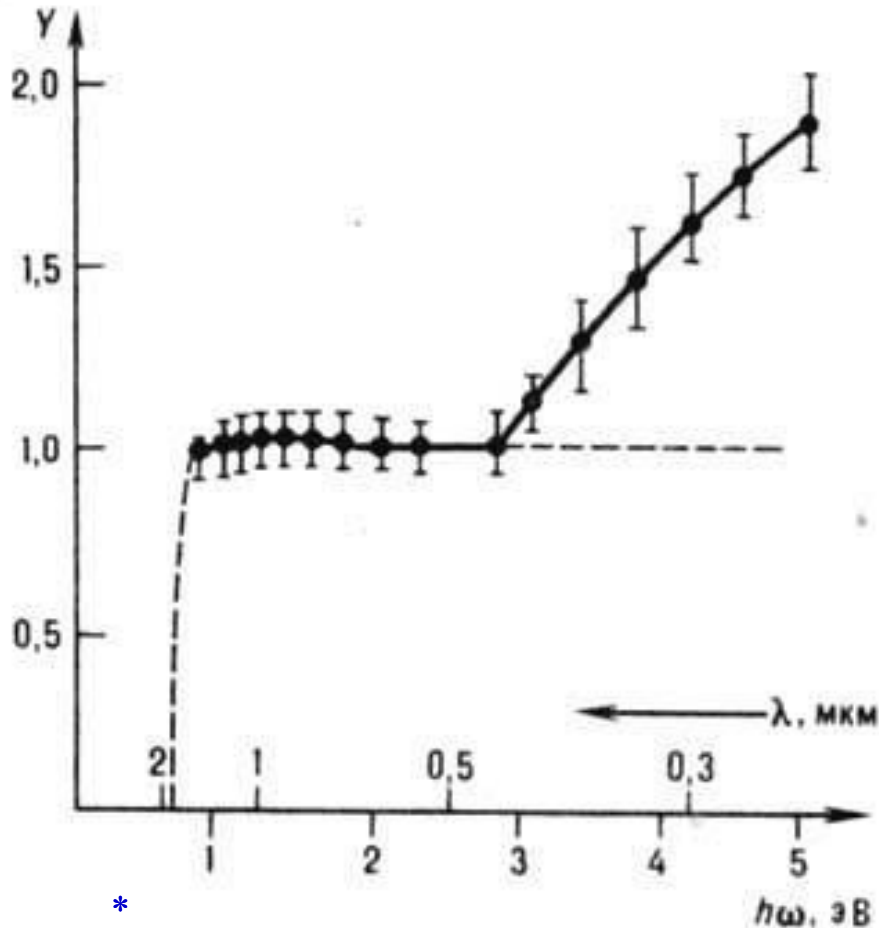
## *Охолодження носіїв*

Якщо  $E < E_g$ , то основний механізм втрат енергії - розсіяння на фононах. Якщо  $E_g$  перевищує енергію  $\hbar\Omega$  оптичного фонона, то носії втрачають енергію шляхом послідовних випромінювань оптичних фононів. Характерне час їх пробігу  $t_{\text{опт}} \sim 10^{-13}$  с.

Після того як залишкова енергія носіїв  $E_{\text{зал}}$  виявляється менше  $\hbar\Omega$ , подальше їх "охолодження" відбувається шляхом випромінювання акустичних фононів або за рахунок електронних зіткнень. Відповідні часи релаксації енергії на кілька порядків більше за  $t_{\text{опт}}$ .

# Охолодження носіїв

Якщо носії, які генеруються світлом, мають енергії  $E$ , що перевищують ширину забороненої зони напівпровідника  $E_g$ , то такі гарячі носії можуть втрачати енергію на створення додаткових електронно-діркових пар і квантовий вихід  $Y > 1$  (рис. 2).



Довжина пробігу носіїв при цьому залежить від  $E$  і змінюється від декількох нанометрів для  $E \leq 10\text{eV}$  до декількох десятків нанометрів для  $E > 1\text{keV}$  (час пробігу  $t \sim 10^{-14}$  с).

**Рис. 2. Залежність квантового виходу  $Y$  для Ge від енергії фотонів.**

# Охолодження носіїв

Залишкова енергія носіїв, які швидко випустили максимально можливе число ( $n_{\text{макс}}$ ) оптичних фононів, дорівнює:

$$E_{\text{ост}} = \hbar \omega - n_{\text{макс}} \hbar \Omega \quad 0 \leq E_{\text{ост}} \leq \hbar \Omega$$

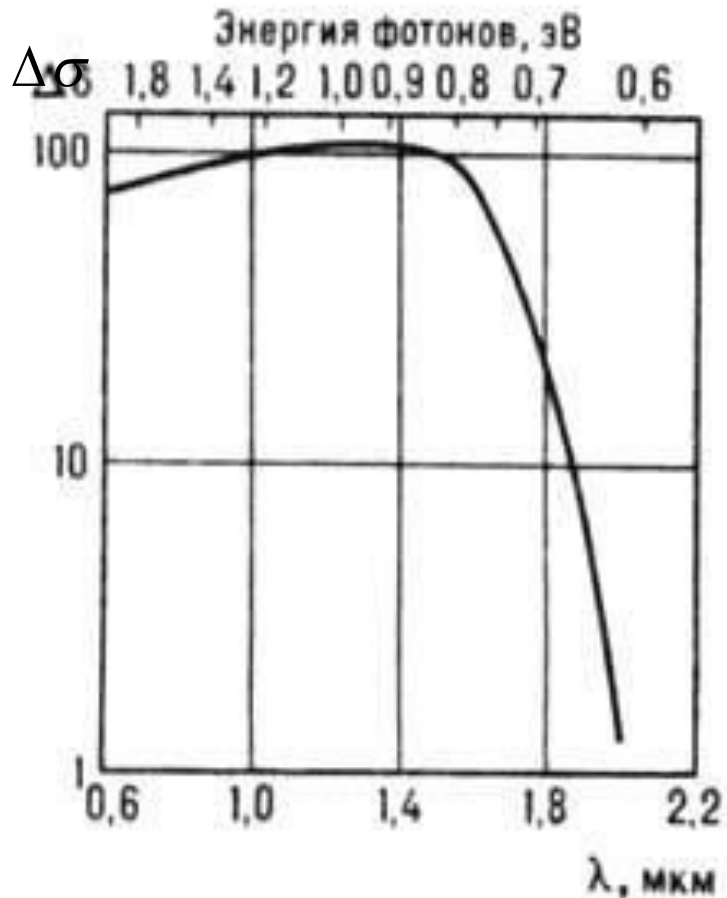
У слабколегованих напівпровідниках ефективна рухливість гарячих фотоносіїв залежить від  $E_{\text{зал}}$ , тому  $\Delta\sigma$  як функція  $\hbar\omega$  осцилює. У сильнолегованих напівпровідниках енергія передається спочатку не акустичним фононам, а газу носіїв; в залежності від величини переданої енергії змінюється середня рухливість носіїв. Це також призводить до осциляціям  $\Delta\sigma$ .

## Спектр фотоносіїв

Завдяки залежності квантового виходу  $Y$  від енергії фотонів (рис. 2) спектр фотопровідності (рис.3) відрізняється від спектра оптичного поглинання кристалів.

# Спектр фотоносіїв

Відмінність виникає також завдяки тому, що процес "остигання" фотоносителів не є миттєвим: тому частина їх може мати енергії, що значно перевищують рівноважну енергію при даній температурі кристала.



Внесок цих "гарячих" фотоносителів в фотопровідність залежить як від відношення між часом релаксації енергії і часом життя носіїв, так і від первісної їх енергії.

**Рис. 3. Спектральний розподіл власної фотопровідності в Ge.**

На кривій, що наведена на рис. 3 чітко проявляється різкий довгохвильовий спад фотопровідності. За його положенням можна визначити ширину забороненої зони. (Для 300К  $E_g \sim 0,67$  еВ).

