

# Электрический ток в полупроводниках

Литература:

Питер Ю, М. Кардона. Основы физики полупроводников. § 5.1, 5.2, 5.5.2

Дж. Займан. Основы теории твердого тела. § 6.5, 6.6

Электропроводность, проводимость  $\sigma$   
[Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>]

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{F}$$

|          |                         |               |           |
|----------|-------------------------|---------------|-----------|
| $\sigma$ | $<10^{-8}$              |               | $>10^6$   |
| тип      | диэлектрик,<br>изолятор | полупроводник | проводник |

$\sigma$  зависит от  $T$ , от освещенности, от дефектов,  
примесей, состава  
разброс более чем в 1000 раз

Удельное сопротивление

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

# Электрический транспорт

Движение электрона в электрическом поле  $F$

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{m}{\tau} \left( \frac{dr}{dt} \right) = eF$$

$\tau$  - время рассеяния носителей на примесях и фононах

Стационарный режим

Скорость дрейфа

$$v_d = \frac{dr}{dt} = e\tau / mF$$

Плотность  
тока

$$j = nev_d = \sigma F$$

Проводимость

$$\sigma = n\mu$$

Подвижность

$$\mu = e^2 \tau / m$$

## Плотность носителей тока

Металлы:

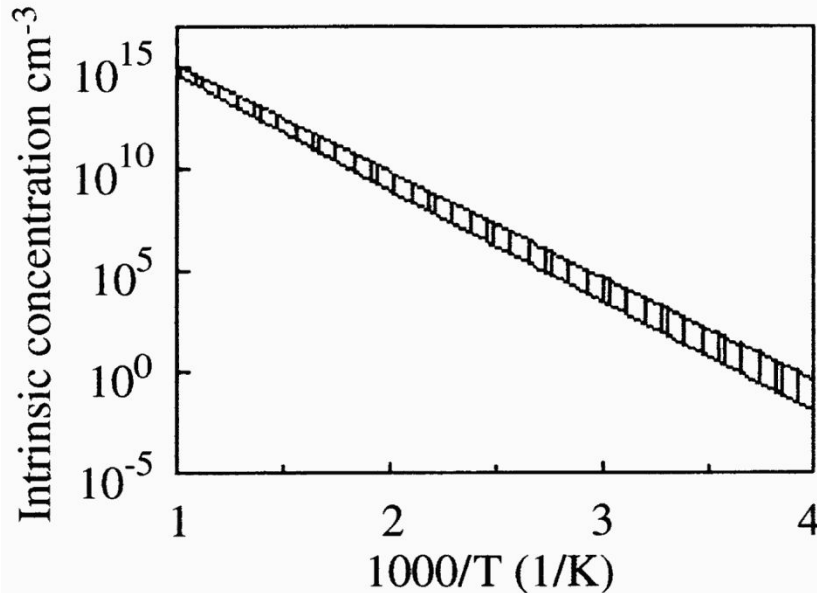
$$n \approx ZN_A \sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

Полупроводники:

InAs

$$n = n_e + n_p \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

InN

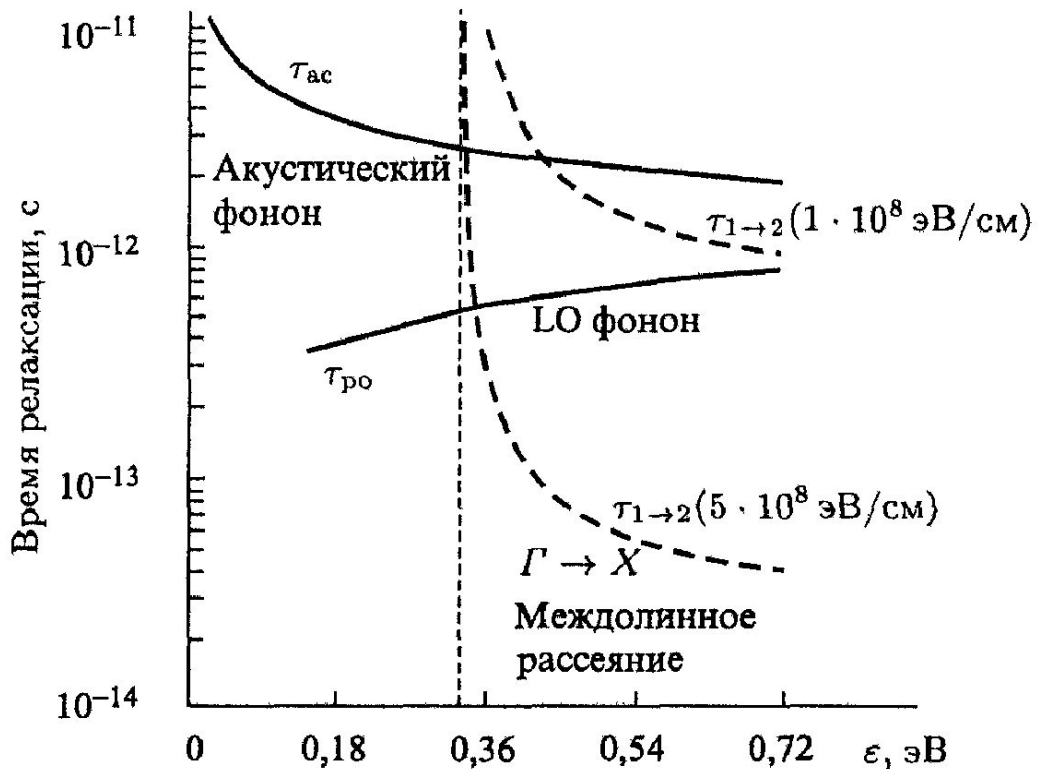


# Время рассеяния носителей

В металлах

$$\tau \approx \frac{l}{v_T} = \frac{10 \text{ nm}}{10^7 \text{ cm/sec}} \sim 10^{-13} \text{ sec}$$

В полупроводниках



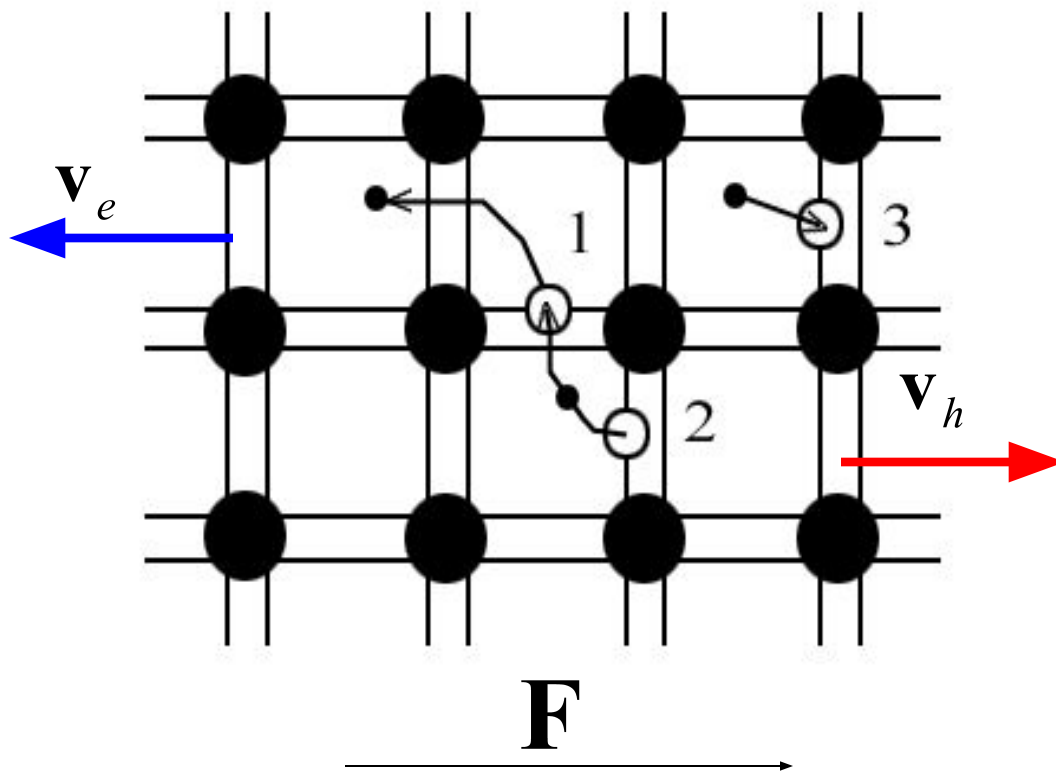
## Подвижность носителей тока

электронов в металле  $\sim$  100 - 1000  $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

### В полупроводниках типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$

| Подвижность, $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ : | AlSb | GaSb  | InSb   | GaAs  | InAs  |  |
|--|------|-------|--------|-------|-------|--|
| электронов   | 50   | 5 000 | 60 000 | 4 000 | 3 000 |  |
| дырок  | 150  | 1 000 | 4 000  | 400   | 200   |  |
|  |      |       |        |       |       |  |
| Эффективная масса                                    |      |       |        |       |       |  |
| электронов   | -    | 0.047 | 0.014  | 0.067 | 0.026 |  |
| тяжелых дырок  | -    | 0.9   | 0.42   | 0.53  | 0.4   |  |
| легких дырок   | -    | 0.05  | 0.016  | 0.08  | 0.026 |  |

Электронно-дырочный ток в полупроводнике



$$\mathbf{j} = -en_e \mathbf{v}_e + en_h \mathbf{v}_h$$

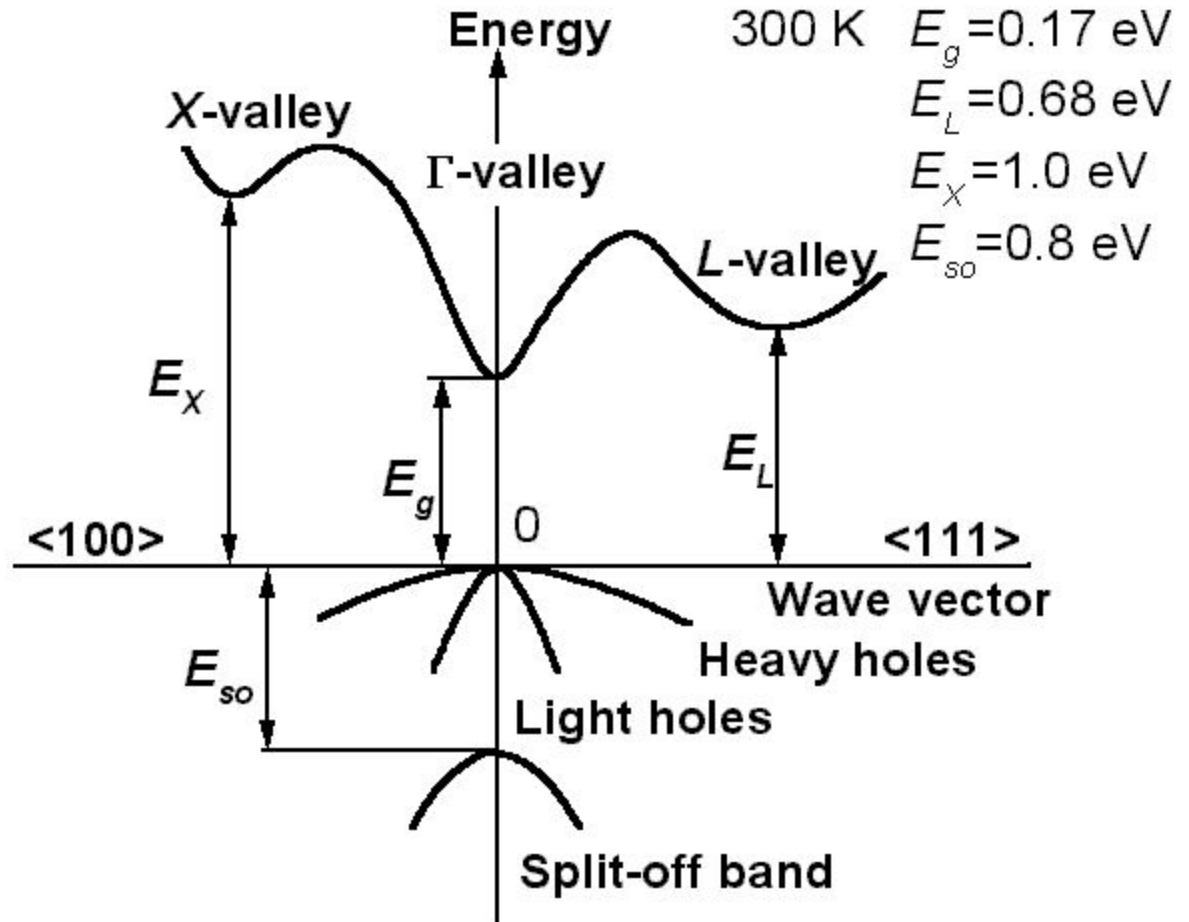
$$j = (en_e \mu_e + en_h \mu_h) F$$

## Зонная структура InSb

$$\mathcal{E}_e = \frac{\hbar^2 k_1^2}{2m_1} + \frac{\hbar^2 k_2^2}{2m_2} + \frac{\hbar^2 k_3^2}{2m_3}$$

$$\frac{1}{m_e} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E_c(k)}{dk^2}$$

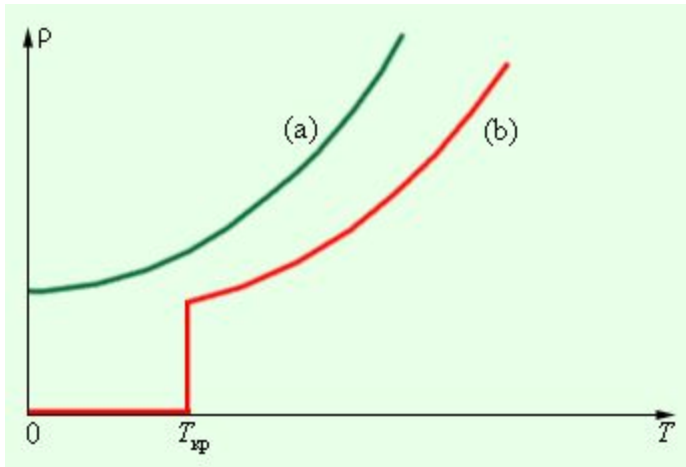
$$\frac{1}{m_h} = -\frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E_v(k)}{dk^2}$$





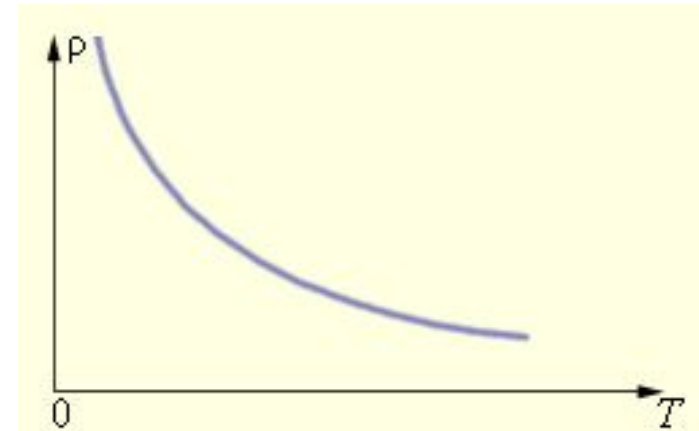
# Зависимость сопротивления от температуры

Металл



$$\rho \sim Q^2 \sim kT$$

Чистый полупроводник



$$n_e = n_h = 2 \left( \frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e m_h)^{3/4} e^{-E_{\text{gap}}/2kT}$$

$$\rho = \sigma^{-1} \sim \exp(E_g / 2kT)$$

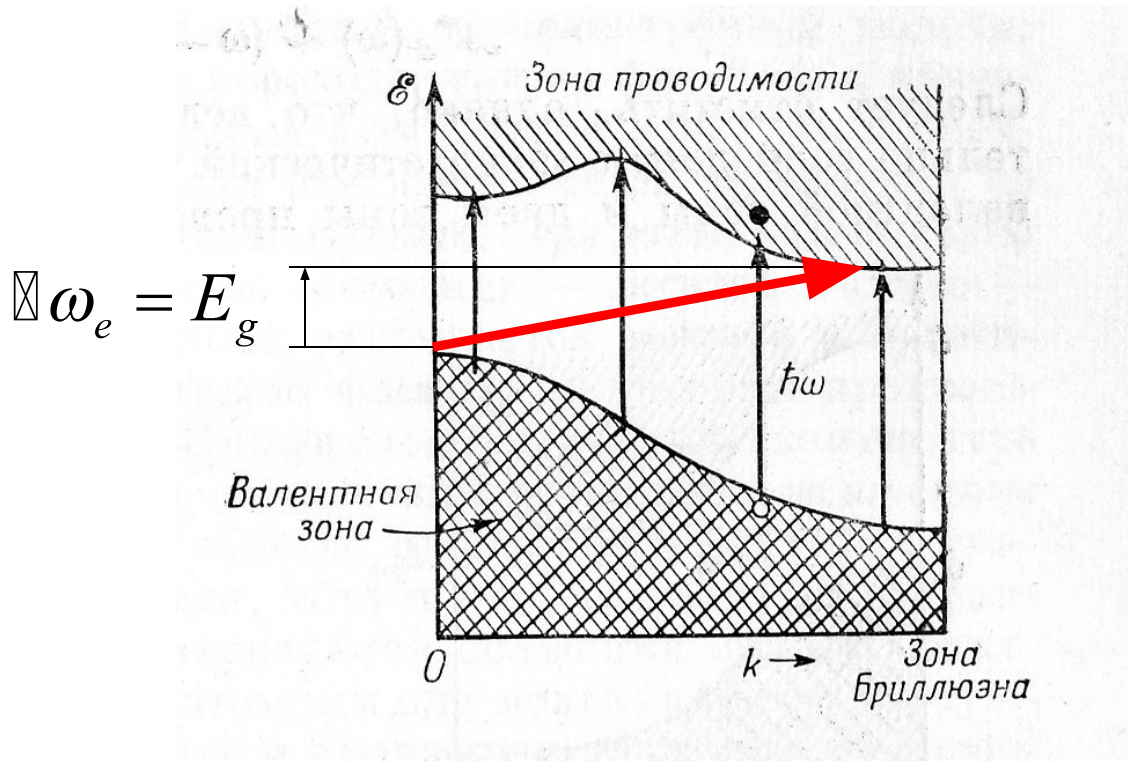
## Ширина запрещенной зоны, $E_g$ (eV)

|     |            |               |           |
|-----|------------|---------------|-----------|
|     | $>3.5$     | $3.5- 0.5$    | $0$       |
| ТИП | диэлектрик | полупроводник | проводник |

| Материал  | Форма          | $E_g$ |          |             |  | $A^{III}B^V$ |       |          |
|---|----------------|-------|----------|-------------|--|--------------|-------|----------|
|   |                | 0 К   | 300 К    |             |  |              |       |          |
| Элемент<br><u>С</u> С (мод.<br><u>Алмаз</u> )<br><u>Si</u><br><u>Ge</u><br><u>Se</u><br><br><u>SiC</u> 3C<br><u>SiC</u> 4H<br><u>SiC</u> 6H | н              | 5,4   | 5,46–6,4 | <u>InP</u>  | п                                      | 1,42         | 1,27  |          |
|   |                |       |          | <u>InAs</u> | п                                      | 0,43         | 0,355 |          |
|   |                |       |          | <u>InSb</u> | п                                      | 0,23         | 0,17  |          |
|   |                |       |          | <u>InN</u>  | п                                      |              | 0,7   |          |
|   |                | н     | 0,75     | 1,12        | <u>In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N</u> | п            |       | 0,7–3,37 |
|   |                |       |          |             | <u>GaN</u>                             | п            |       | 3,37     |
|   |                |       |          |             | <u>GaP</u> 3C                          | н            |       | 2,26     |
|   |                |       |          |             | <u>GaSb</u>                            | п            | 0,81  | 0,69     |
|   |                |       |          |             | <u>GaAs</u>                            | п            | 1,52  | 1,42     |
|   |                |       |          |             | <u>AlAs</u>                            | н            |       | 2,16     |
|   | н              |       | 1,74     | <u>AlSb</u> | н                                      | 1,65         | 1,58  |          |
|   |                |       |          | <u>AlN</u>  |  |              | 6,2   |          |
|   | $A^{IV}B^{IV}$ |       |          |             |  |              |       |          |
|   | н              |       | 2,36     |             |  |              |       |          |
|   | н              |       | 3,28     |             |  |              |       |          |
|   | н              |       | 3,03     |             |  |              |       |          |

Как экспериментально изучают  
электропроводность полупроводников?

## Электронные переходы при поглощении света

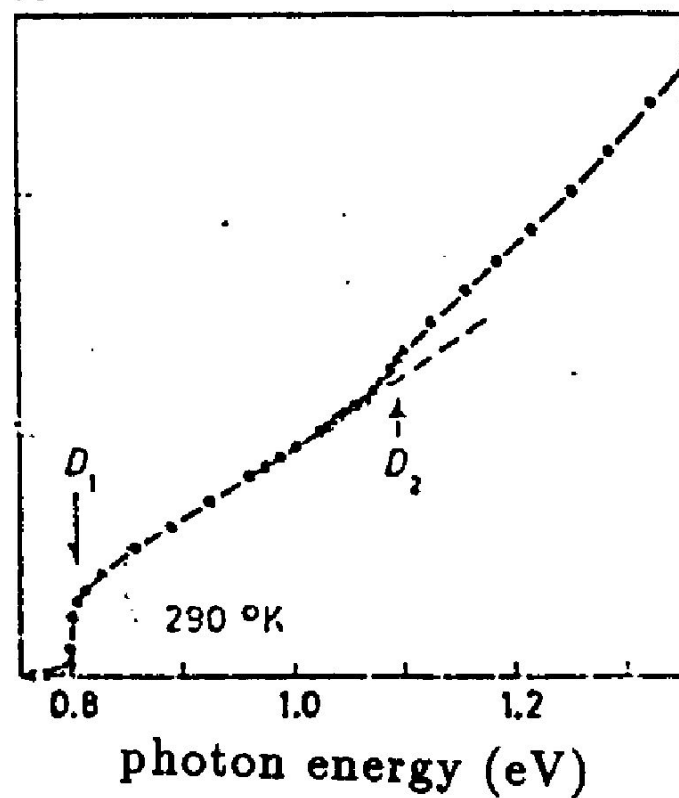
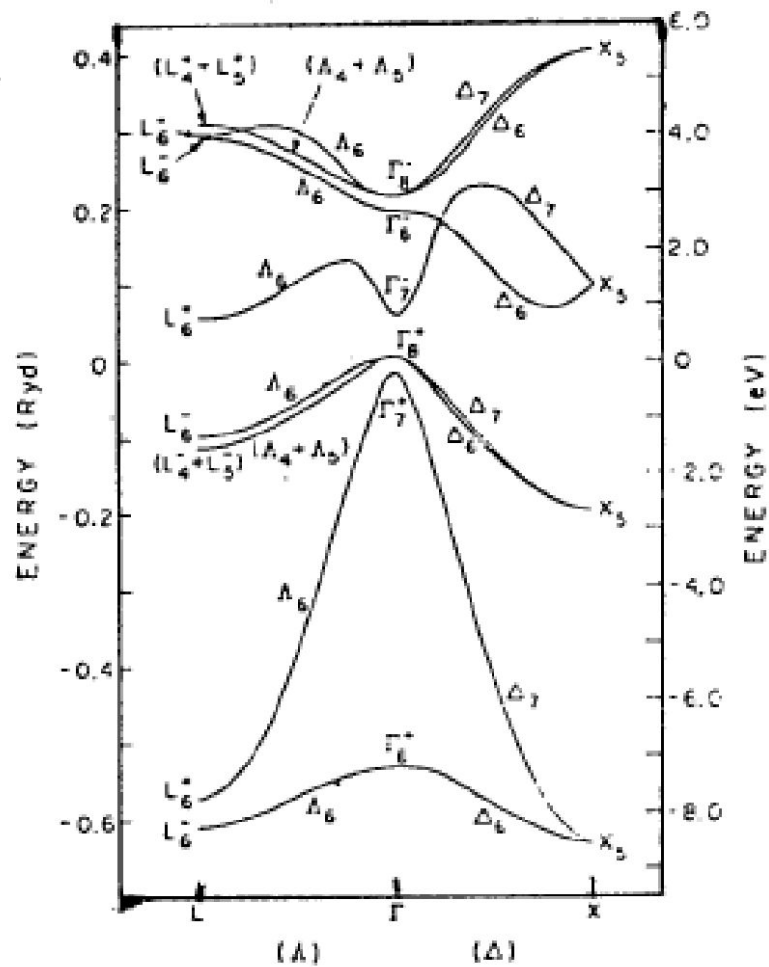


Прямые и **непрямые** межзонные переходы

Зонная структура

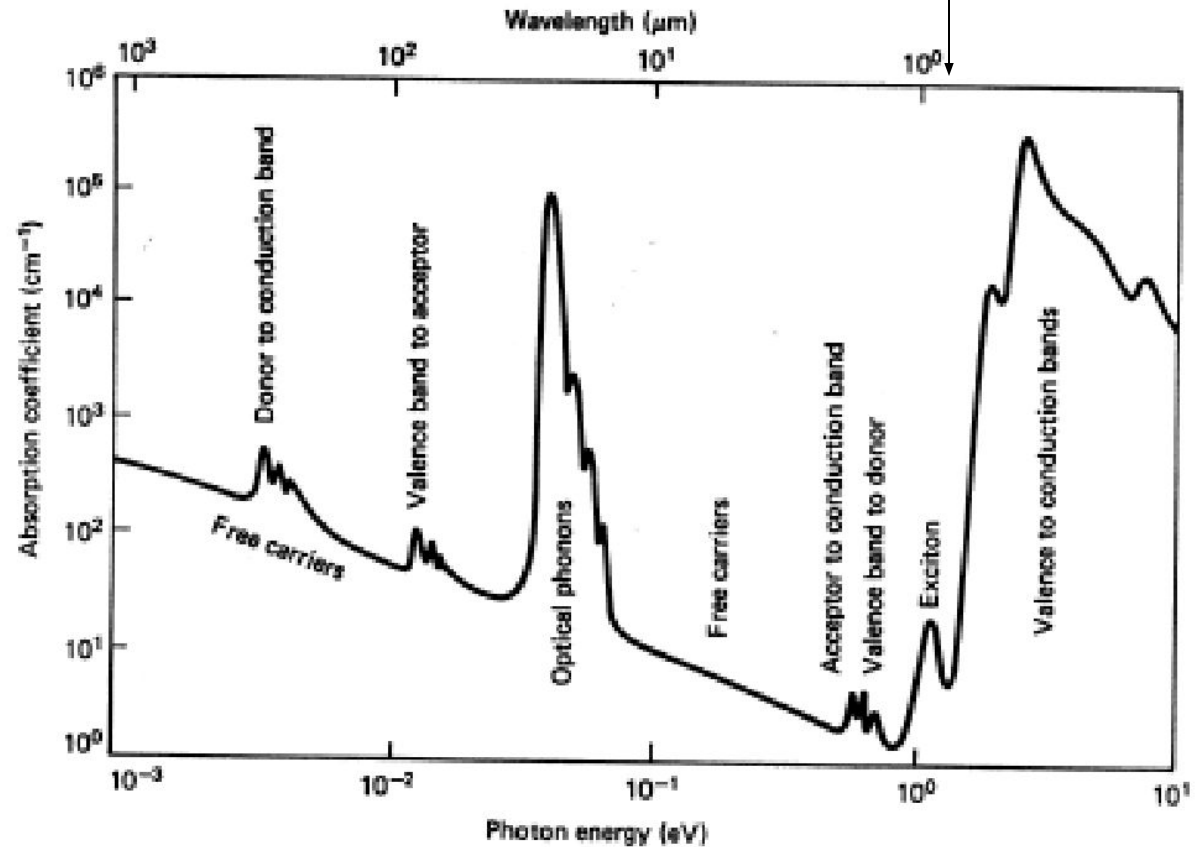
и

спектр поглощения Ge



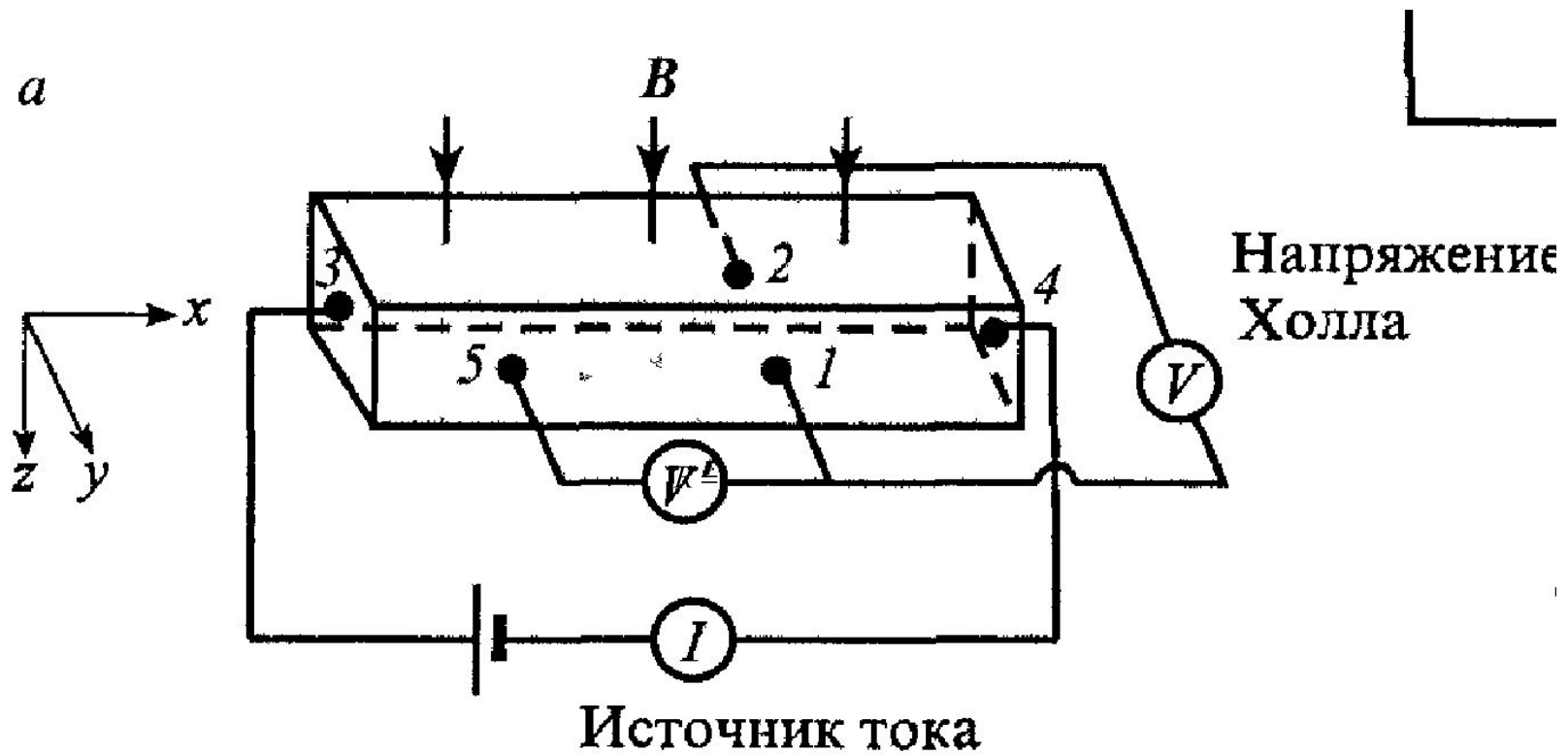
# Край собственного поглощения

$$\lambda_e = \frac{ch}{E_g}$$



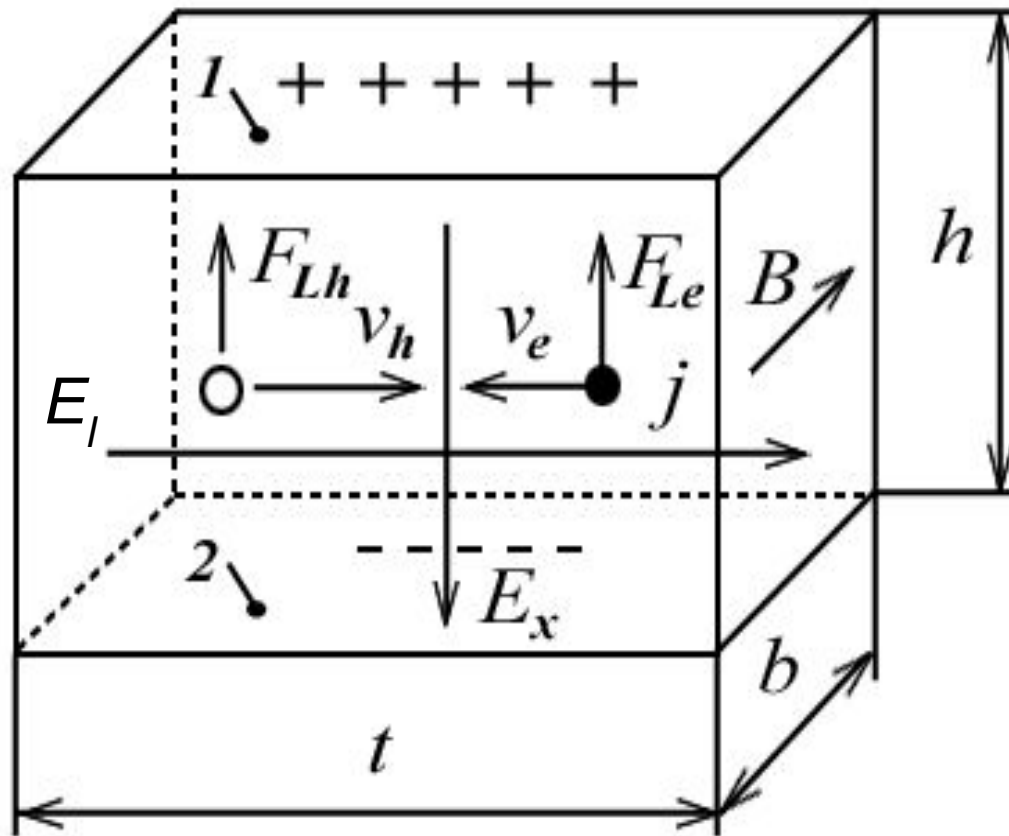
Примерный спектр поглощения типичного полупроводника группы III-V

# Эффект Холла



$$R_H = F_y / (j_x B_z).$$

$$R = (n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2) / \{(n_h \mu_h + n_e \mu_e)^2 e\}$$

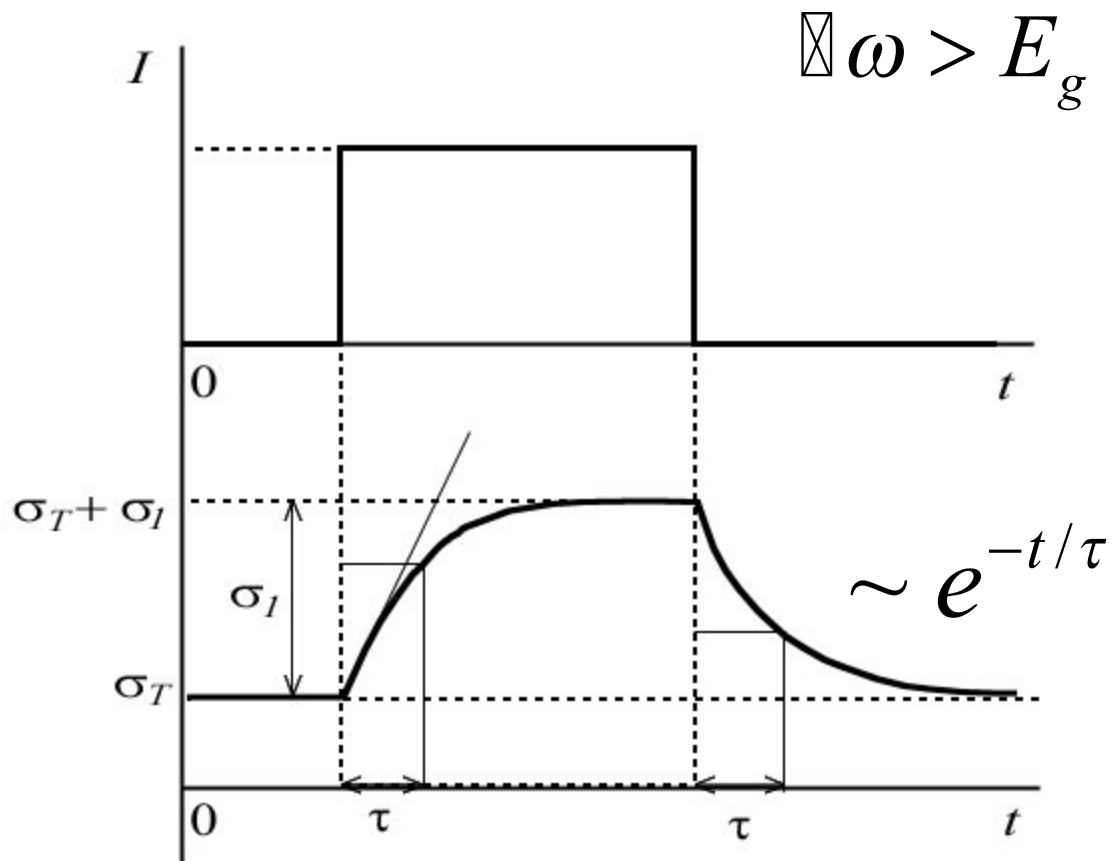


$$n_h = n_e$$

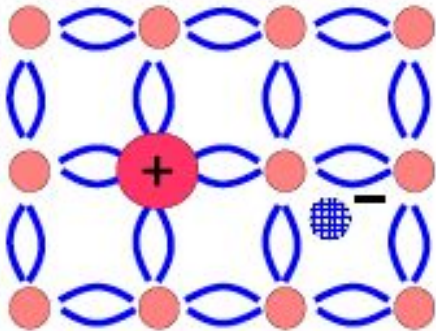
$$E_x / E_y = B(\mu_h - \mu_e)$$



# Временная релаксация фотопроводимости

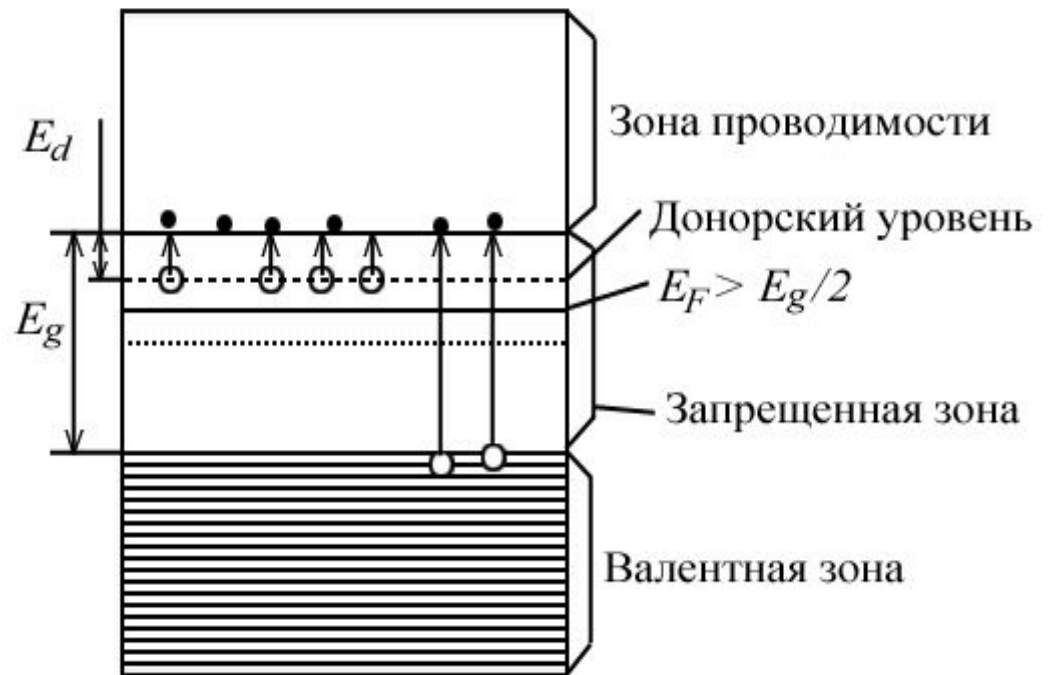


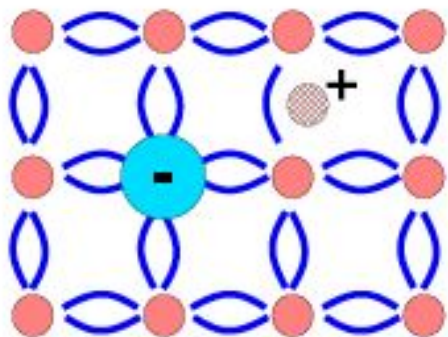
# Проводимость примесных полупроводников



Доноры

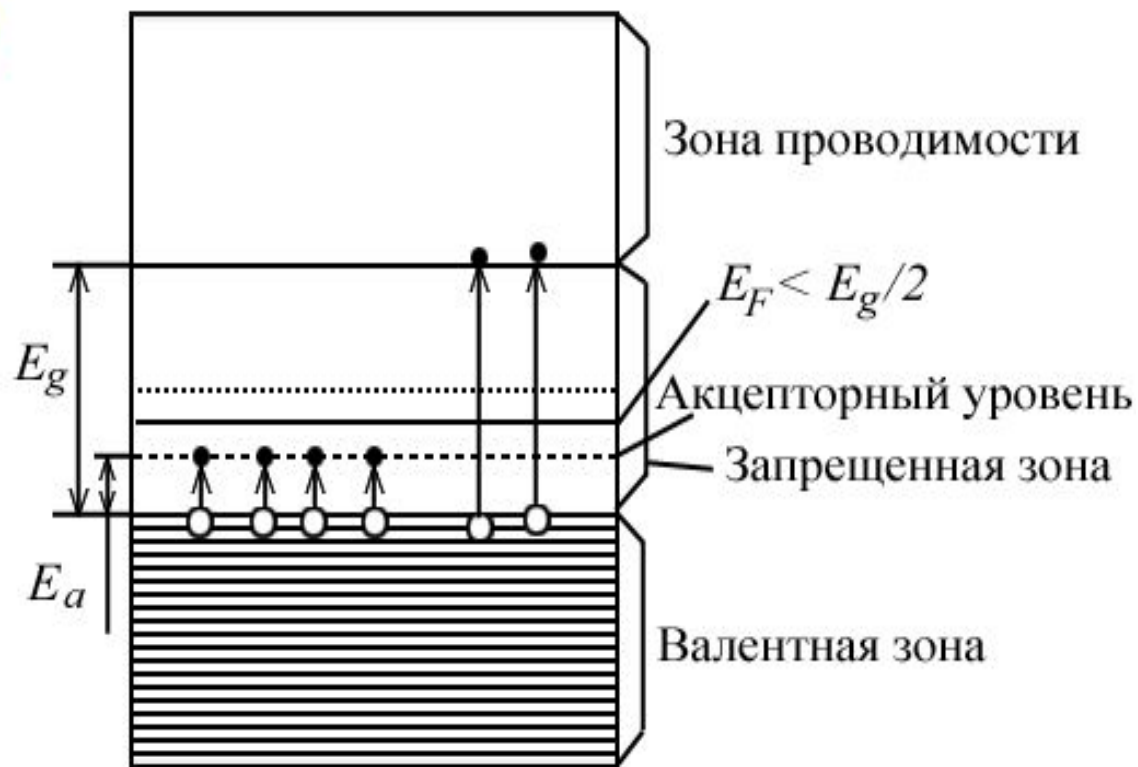
Ge: P, As, Sb





Акцепторы

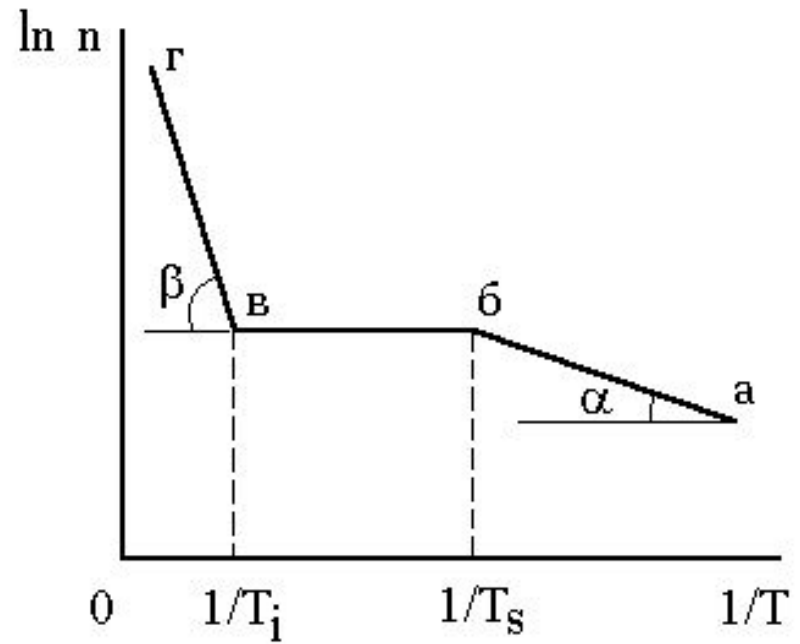
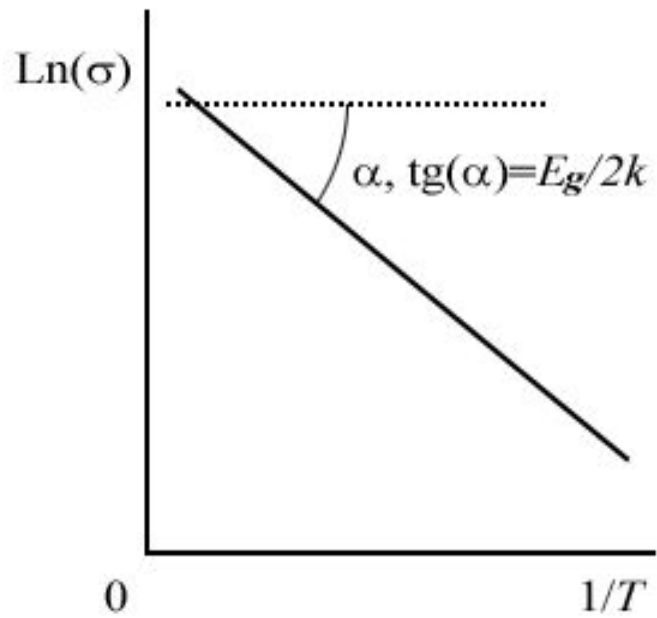
Ge: Al, Ga, In



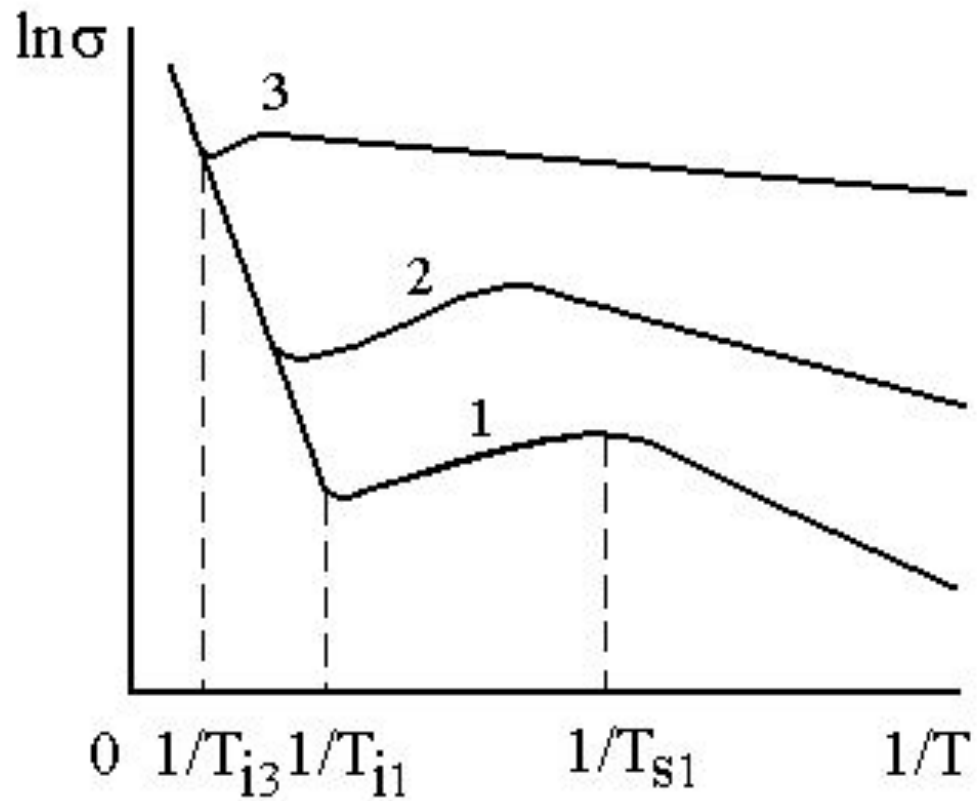
# Проводимость

чистого полупроводника

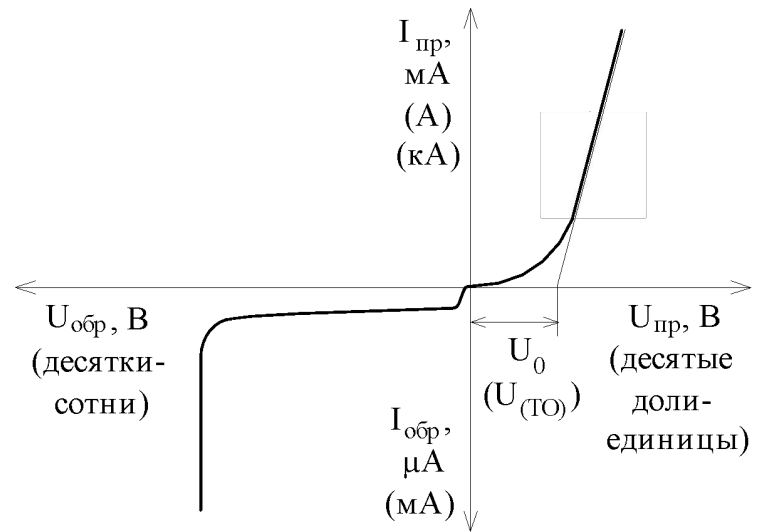
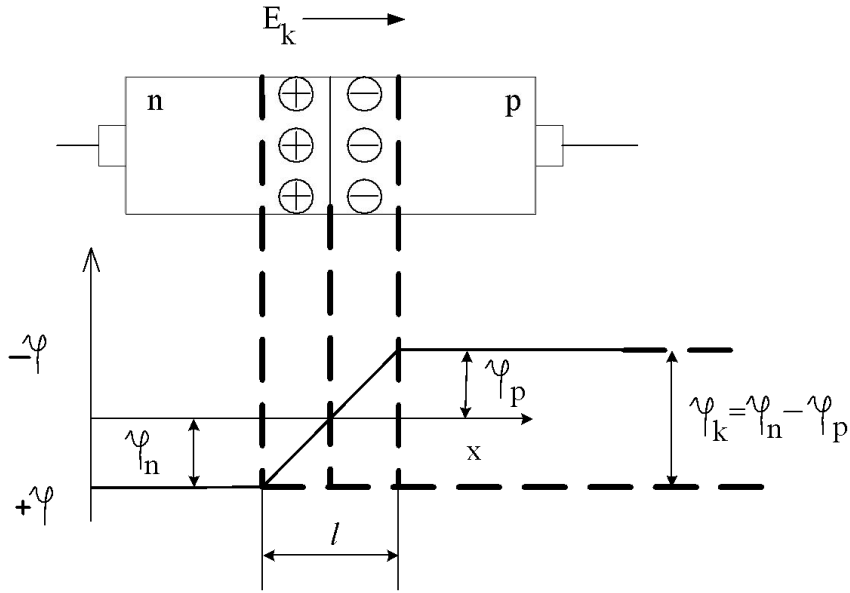
примесного полупроводника



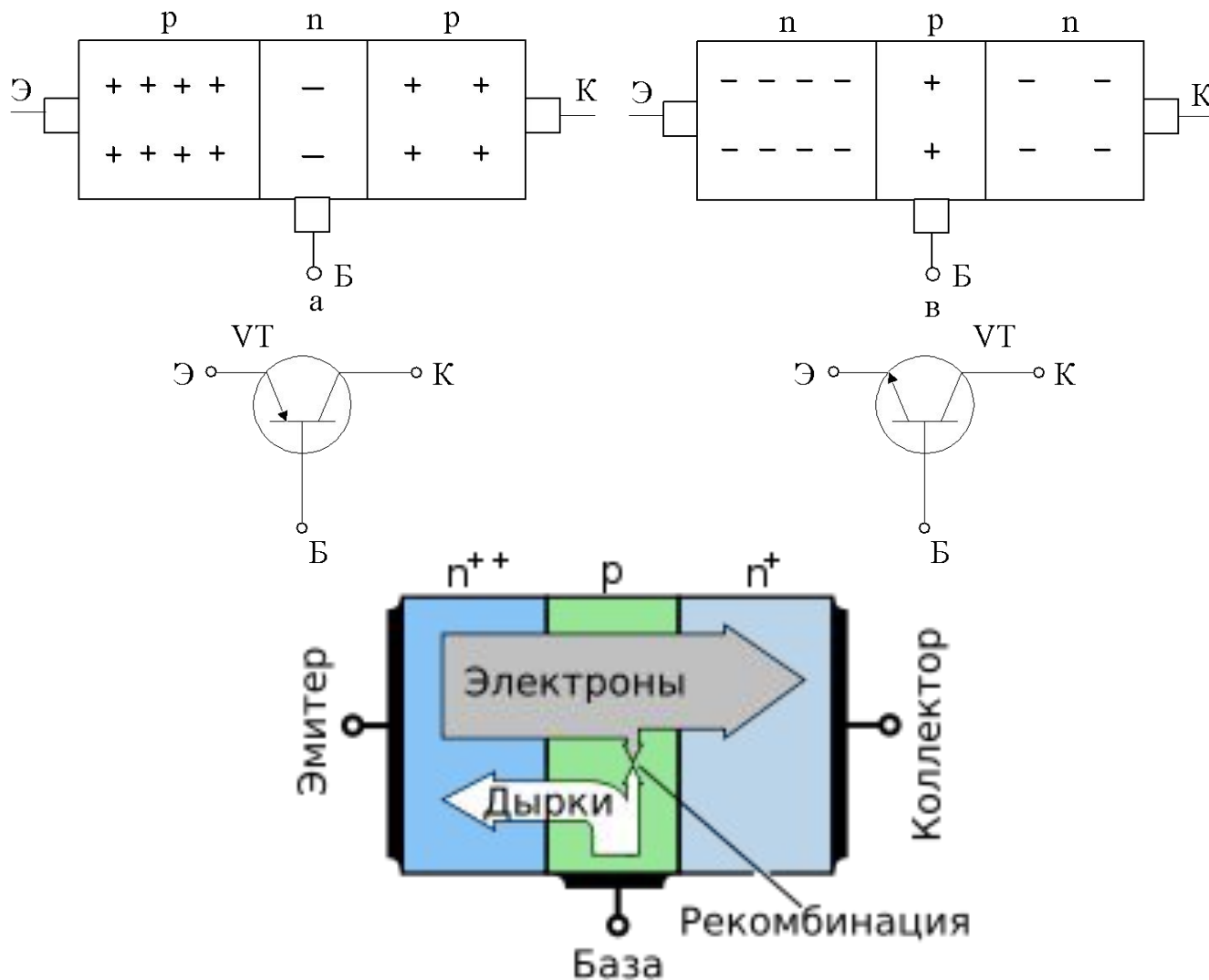
## Зависимость проводимости от концентрации примеси



# Полупроводниковый диод



## Транзистор – полупроводниковый триод



Структура биполярного n-p-n транзистора. Ток через базу управляет током «коллектор-эмиттер».

## Движение электрона в кристалле

Групповая скорость волнового пакета:

$$v = \frac{d\omega}{dk} \longrightarrow \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{d\varepsilon}{dk}$$

$$\varepsilon = \hbar \omega$$

$$\hbar \cdot \frac{dk}{dt} = \frac{dp}{dt} = m^* \cdot \frac{dv}{dt}$$

$$p = \hbar k$$

$$\frac{\hbar}{m^*} \cdot \frac{dk}{dt} = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{d}{dt} \frac{d\varepsilon}{dk} = \frac{1}{\hbar} \cdot \frac{d^2\varepsilon}{dk^2} \frac{dk}{dt}$$

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2} \cdot \frac{d^2\varepsilon}{dk^2}$$