

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 σ
[Ом⁻¹м⁻¹]

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

σ	$<10^{-8}$		$>10^6$
тип	диэлектрик, изолятор	полупроводник	проводник

σ 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

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

τ - 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:

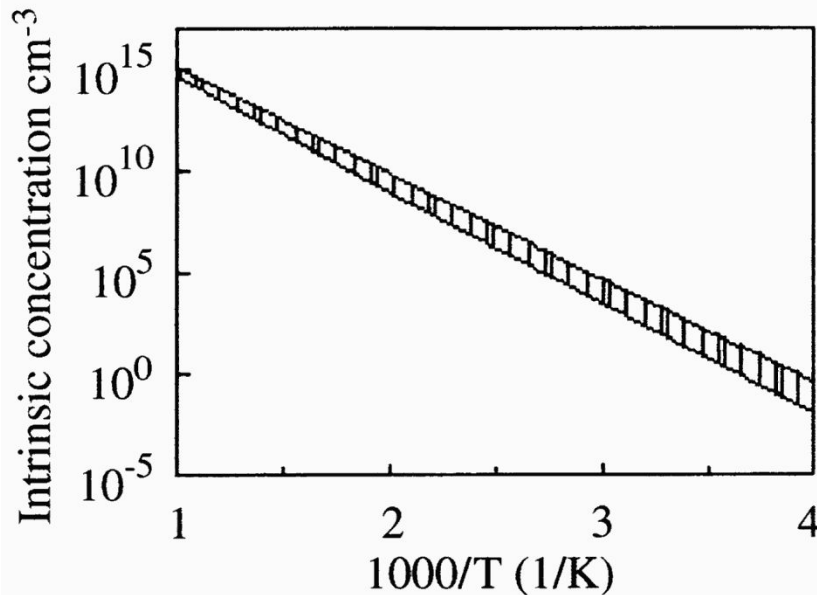
$$n \approx ZN_A \sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

Полупроводники:

InAs

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

InN

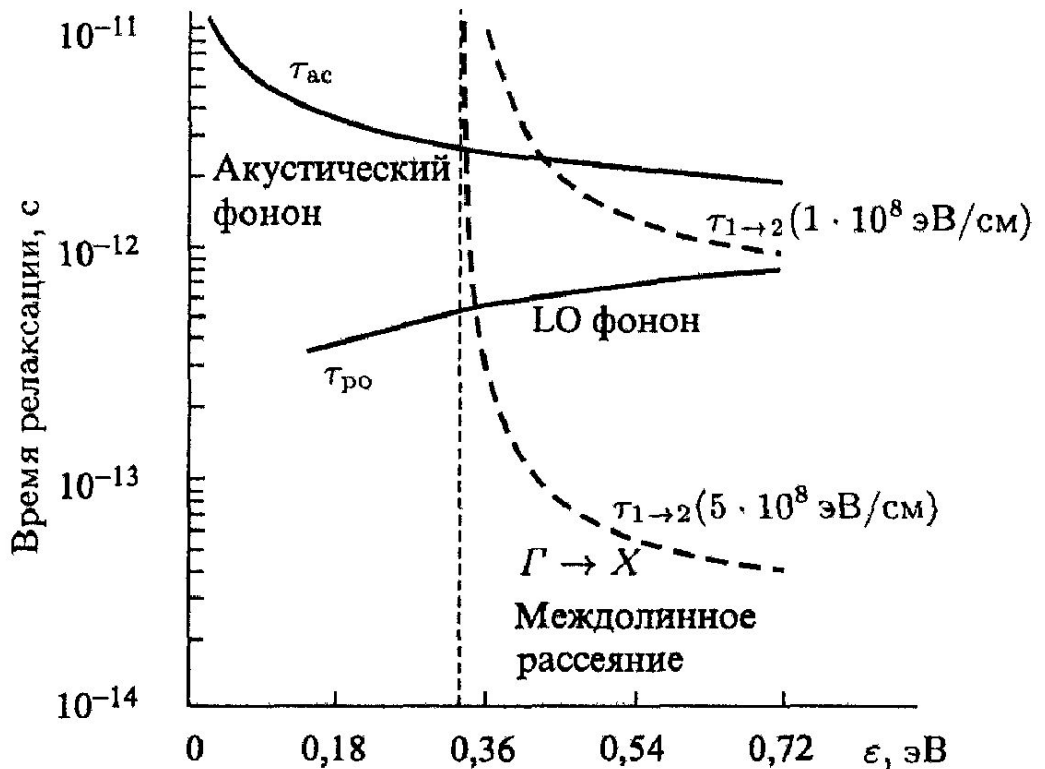


Время рассеяния носителей

В металлах

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

В полупроводниках



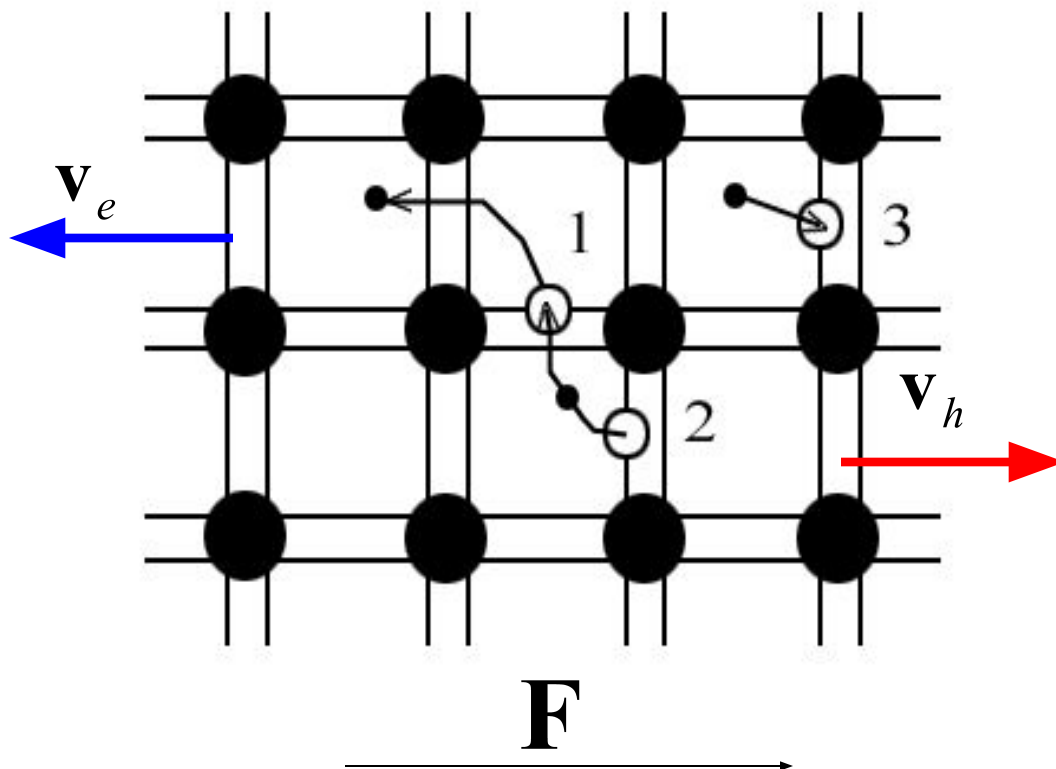
Подвижность носителей тока

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



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

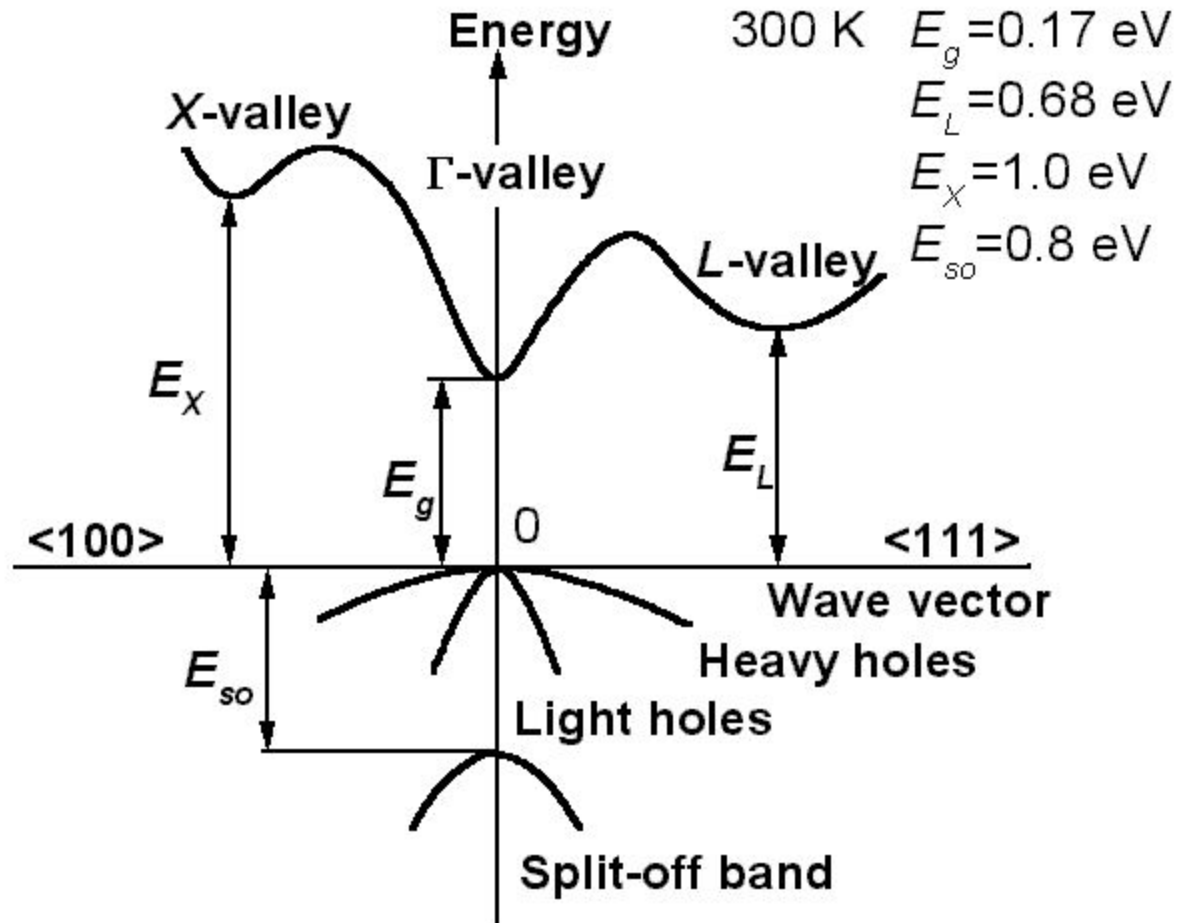
$$j = (en_e \mu_e + en_h \mu_h) F$$

Зонная структура InSb

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

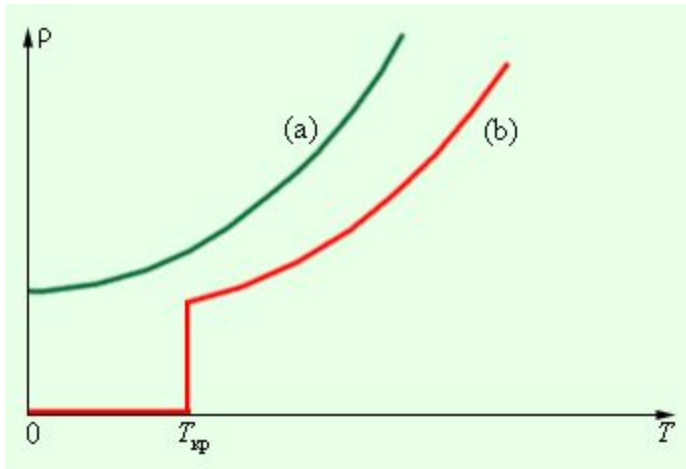
$$\frac{1}{m_e} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E_c(k)}{dk^2}$$

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



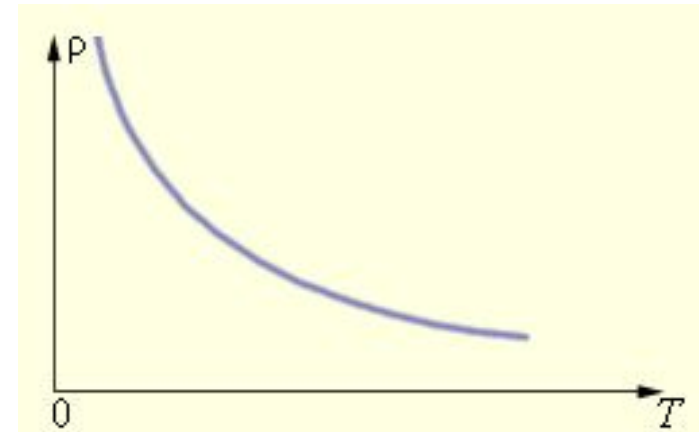
Зависимость сопротивления от температуры

Металл



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

Чистый полупроводник



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

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

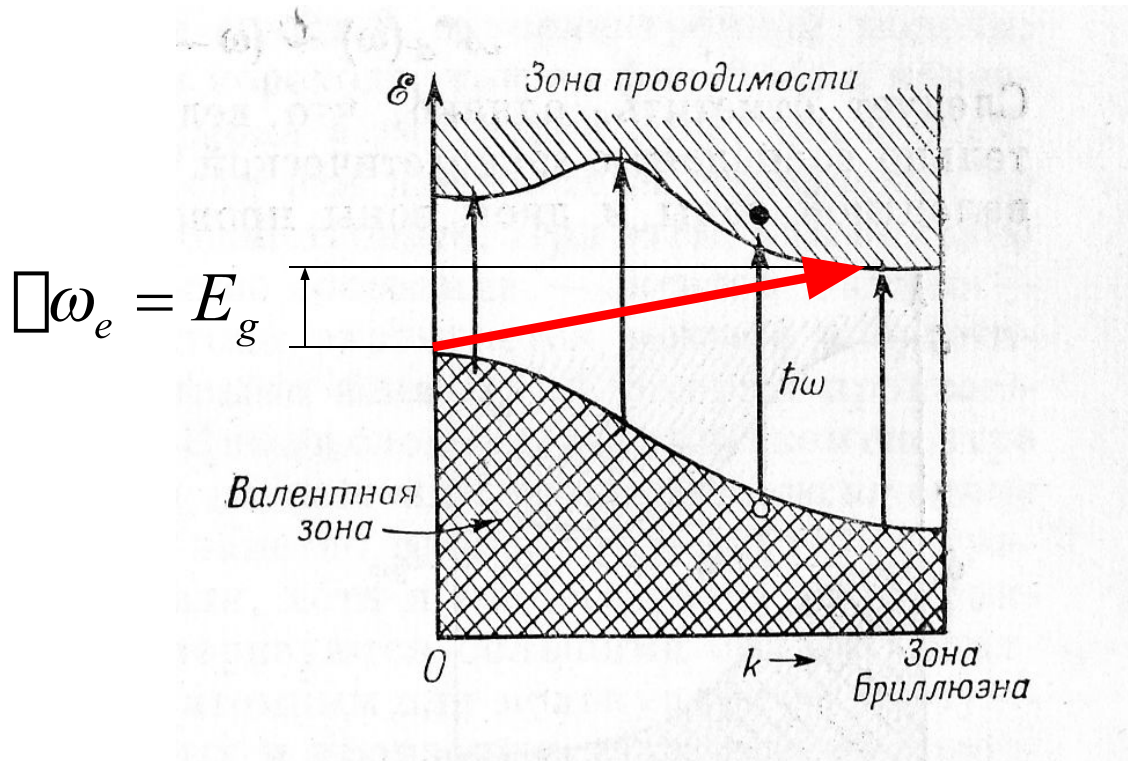
Ширина запрещенной зоны, E_g (eV)

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

Материал	Форма	E_g				$A^{III}B^V$		
		0 К	300 К					
Элемент <u>С</u> С (мод. <u>Алмаз</u>) <u>Si</u> <u>Ge</u> <u>Se</u> <u>SiC</u> 3C <u>SiC</u> 4H <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_xGa_{1-x}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

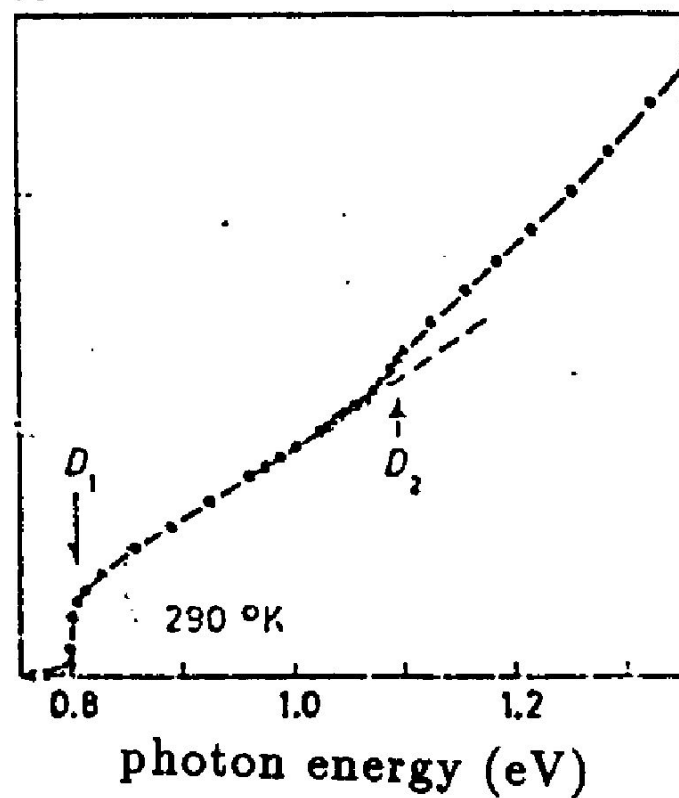
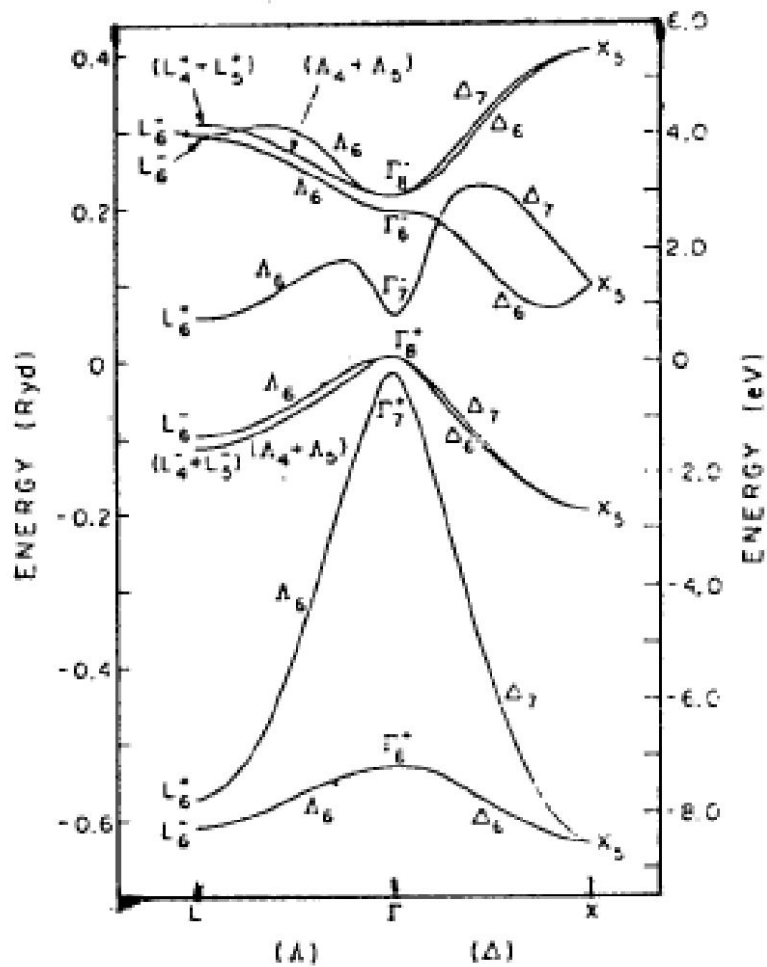


Прямые и **непрямые** межзональные переходы

Зонная структура

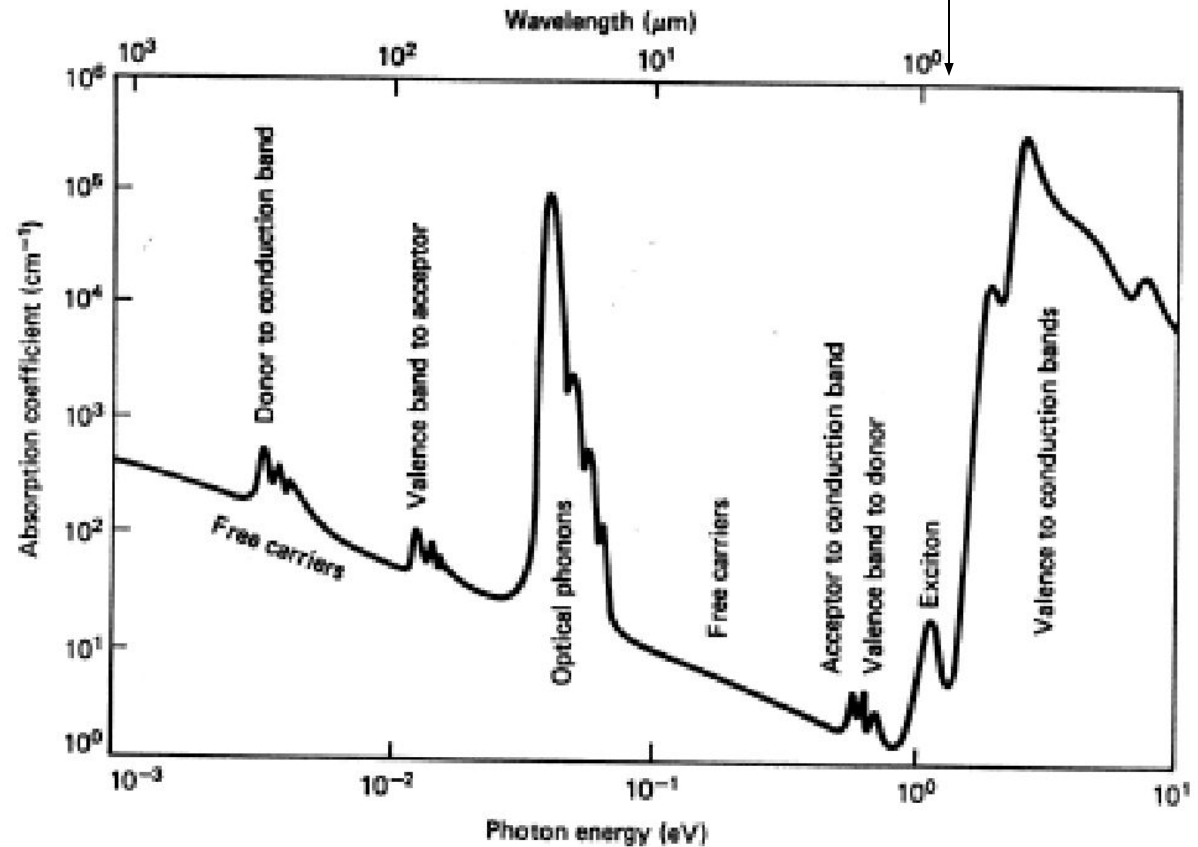
и

спектр поглощения Ge



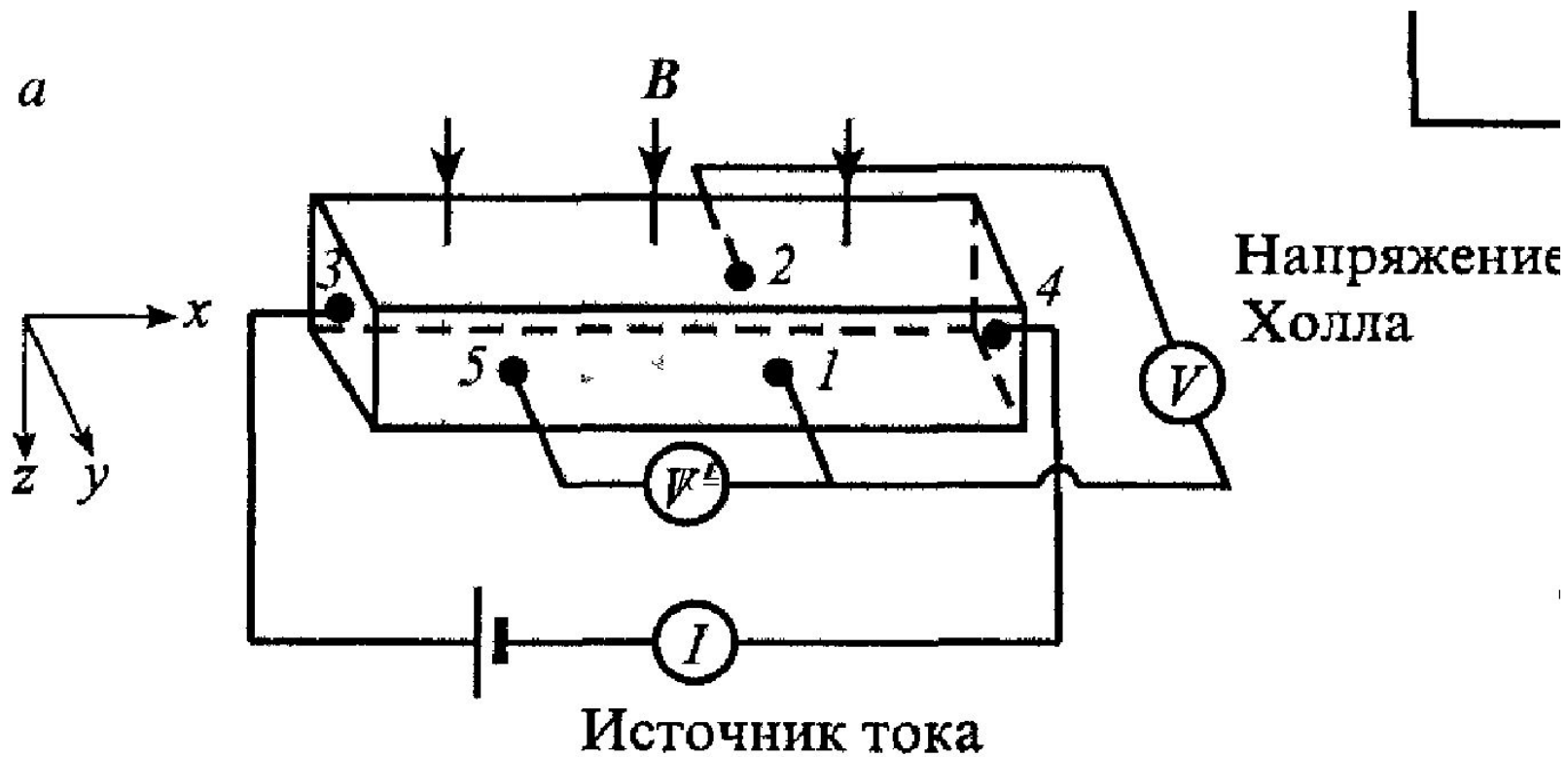
Край собственного поглощения

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



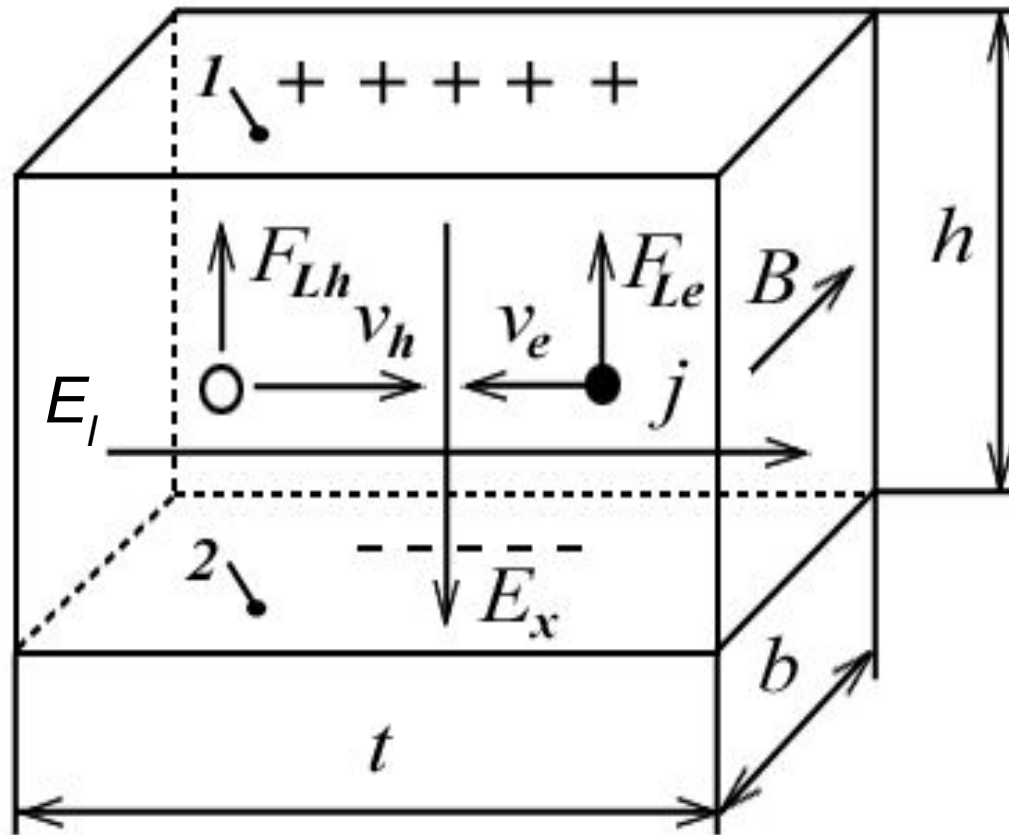
Примерный спектр поглощения типичного полупроводника группы III-V

Эффект Холла



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

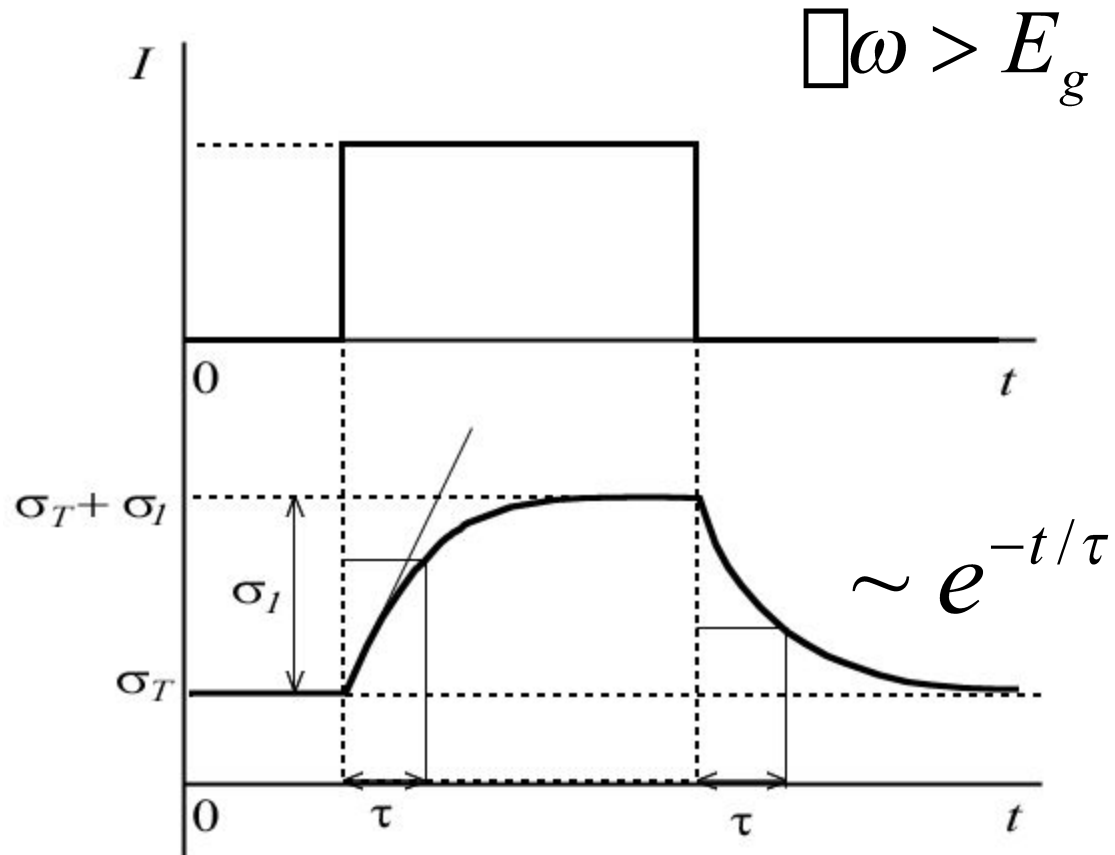
$$R = (n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2) / \{(n_h \mu_h + n_e \mu_e)^2 e\}$$



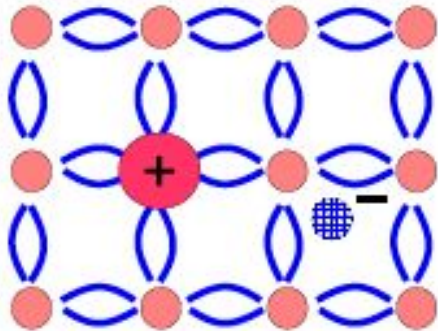
$$n_h = n_e$$

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

Временная релаксация фотопроводимости

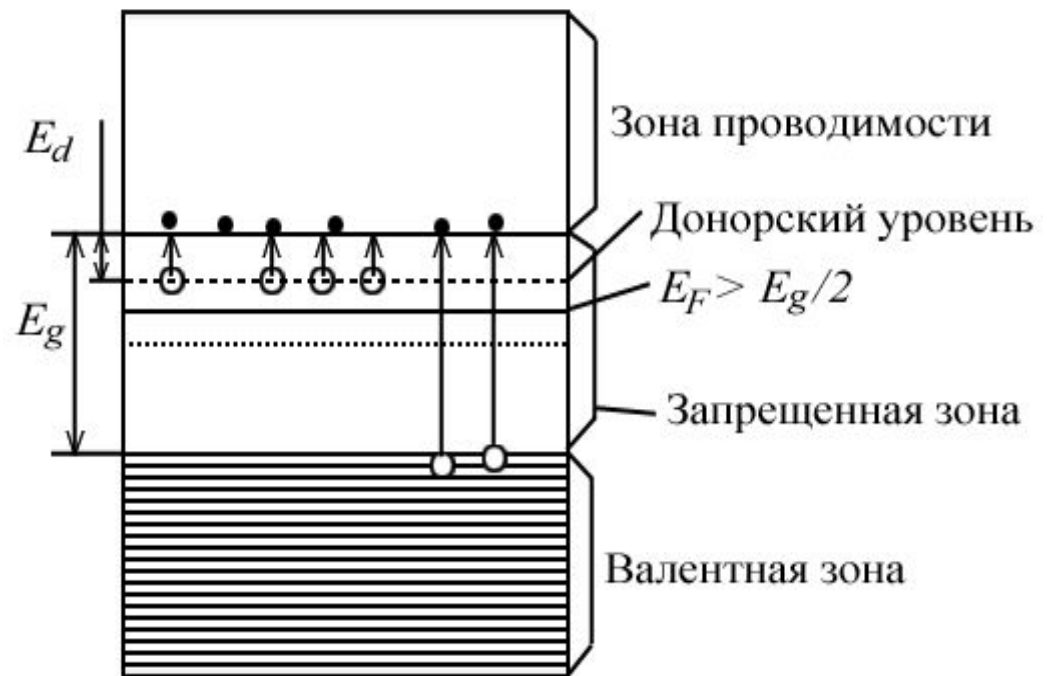


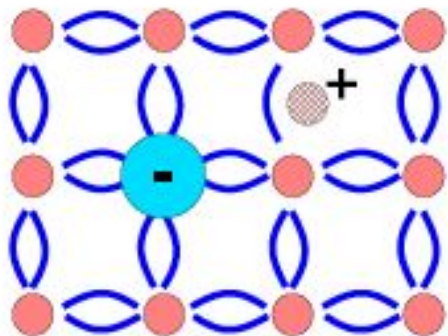
Проводимость примесных полупроводников



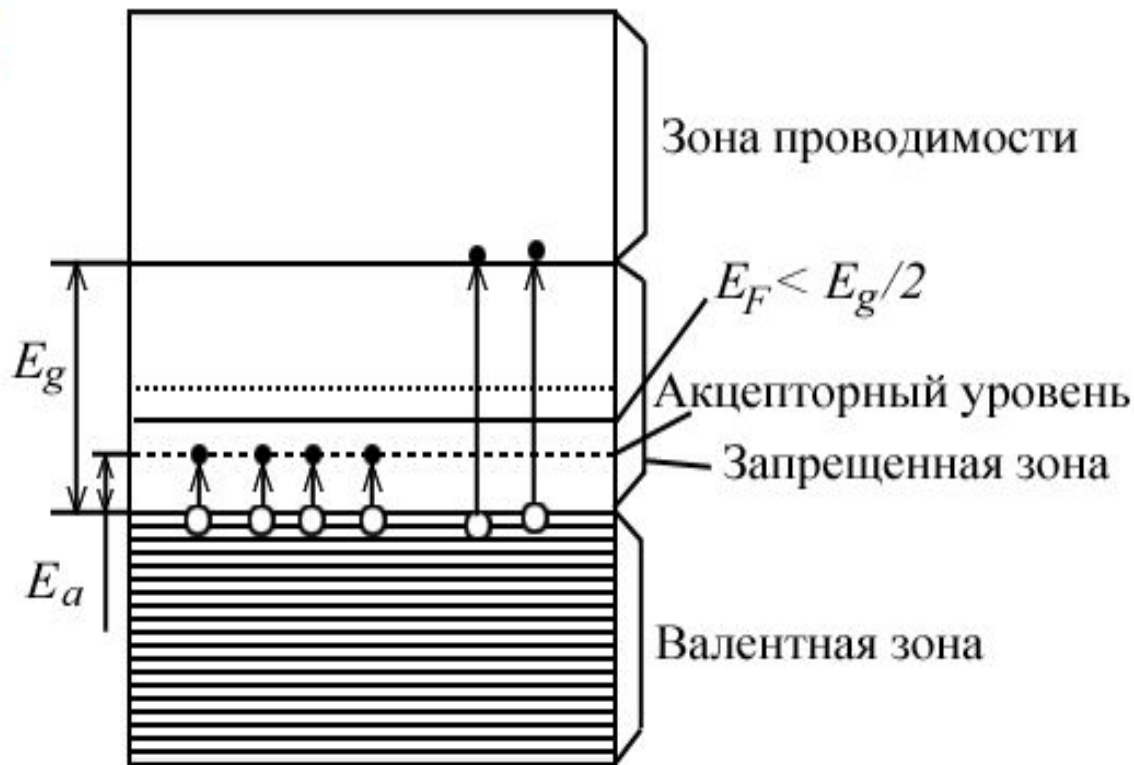
Доноры

Ge: P, As, Sb





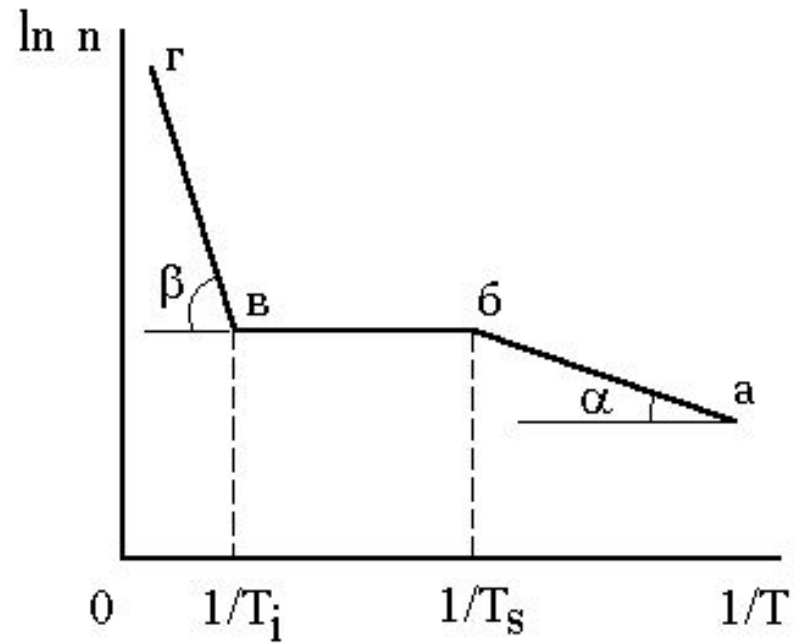
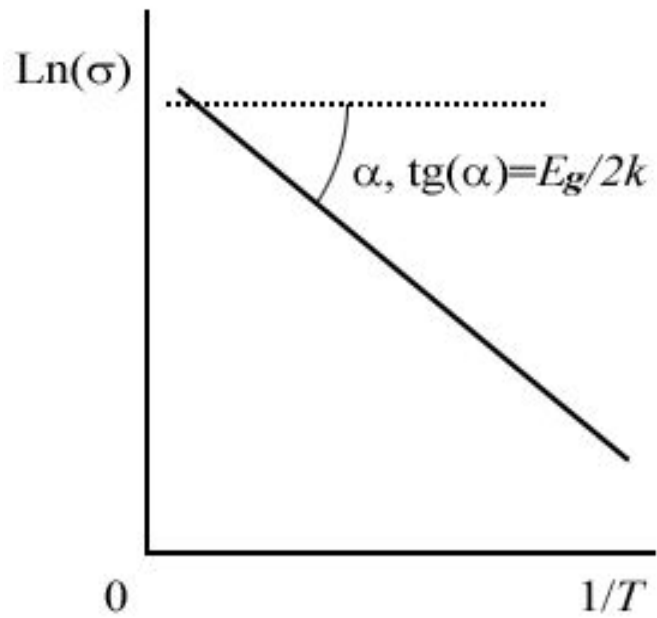
Акцепторы
Ge: Al, Ga, In



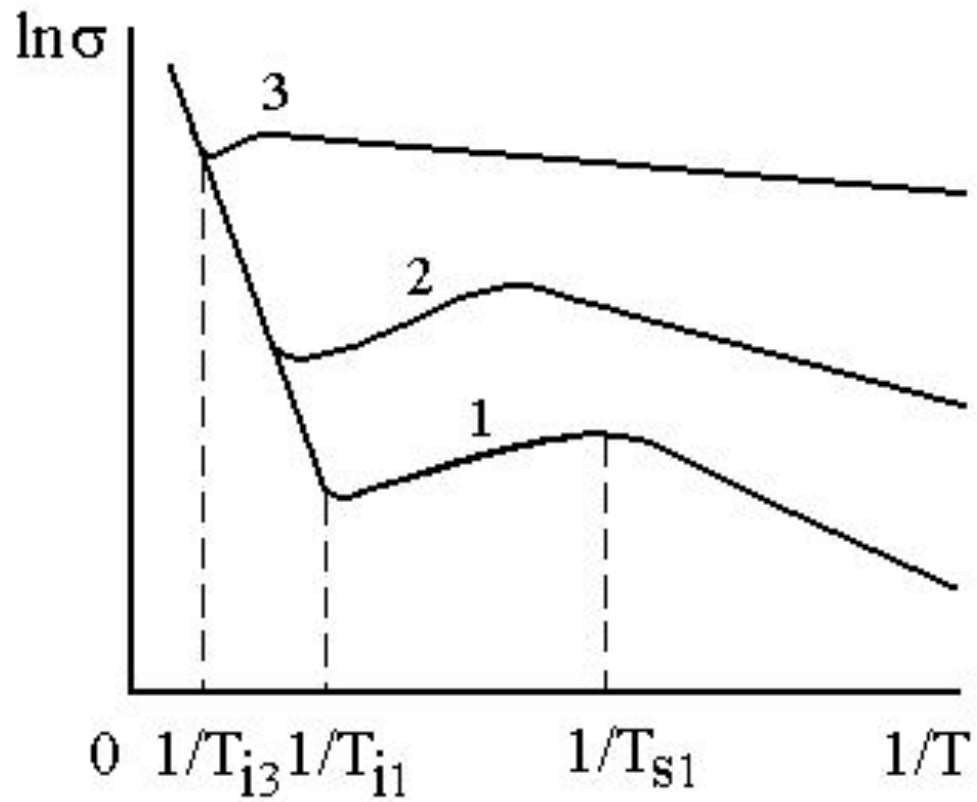
Проводимость

чистого полупроводника

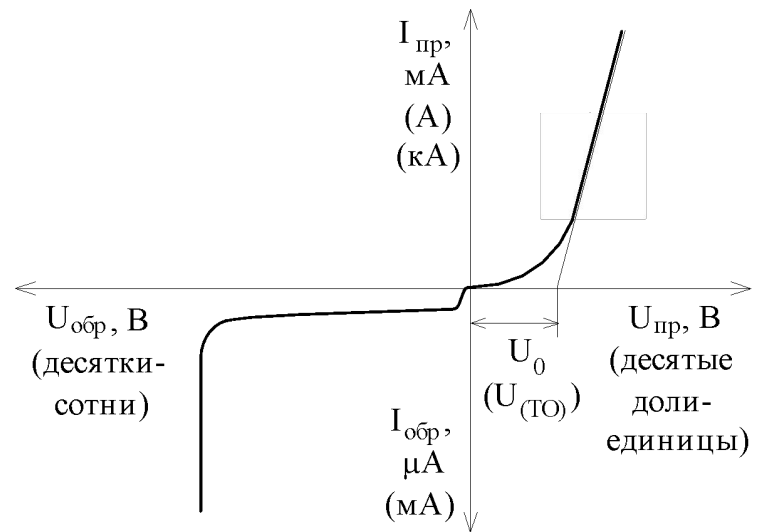
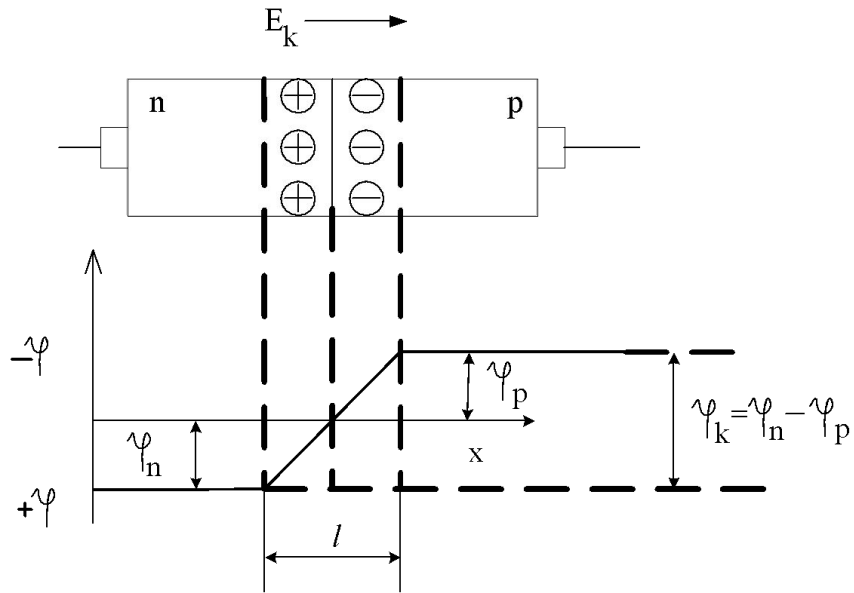
примесного полупроводника



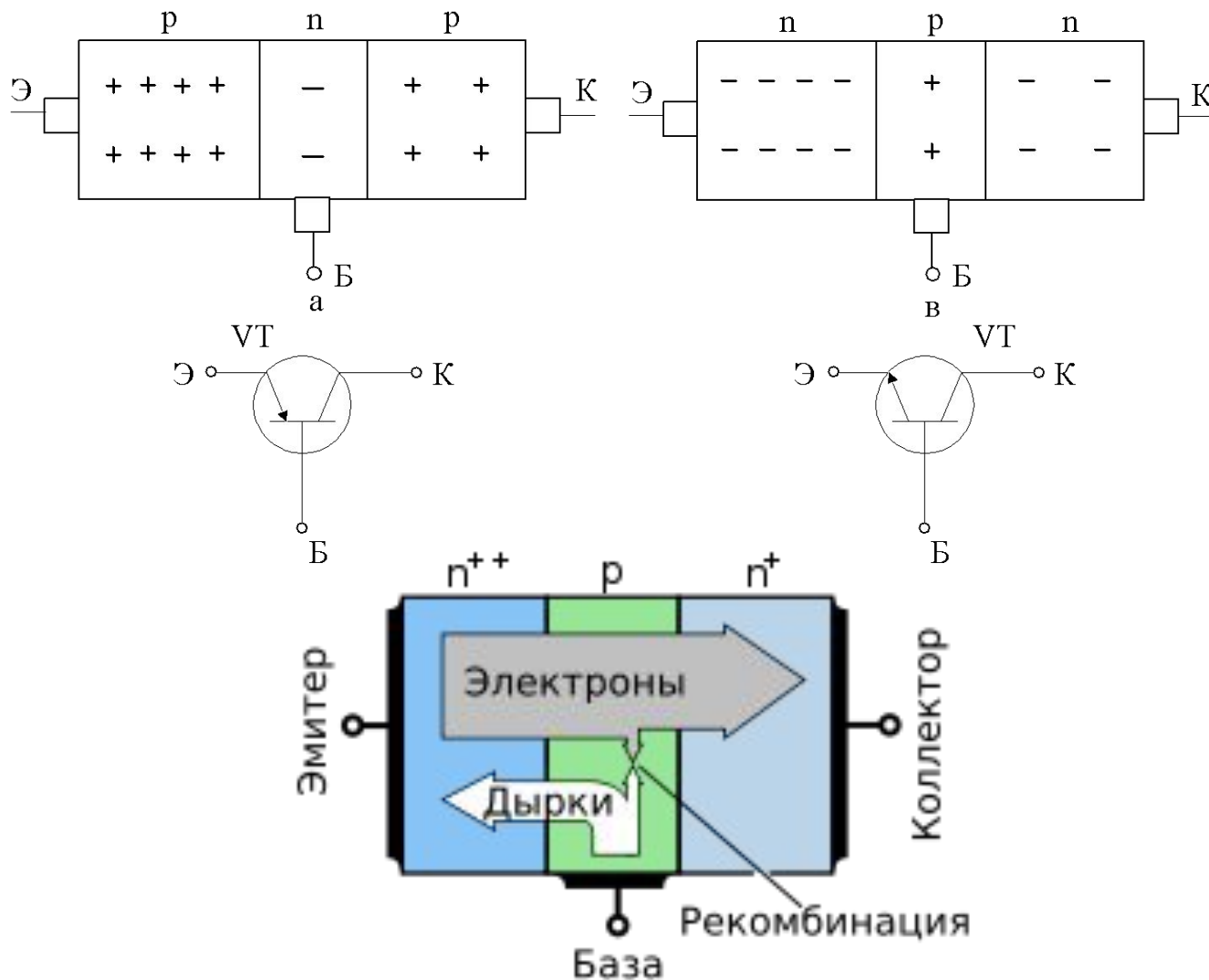
Зависимость проводимости от концентрации примеси



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:

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

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

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

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