

Тема 4.

Взаимодействие излучения с полупроводниками.

Типы оптических переходов в пп

Поглощение на свободных носителях

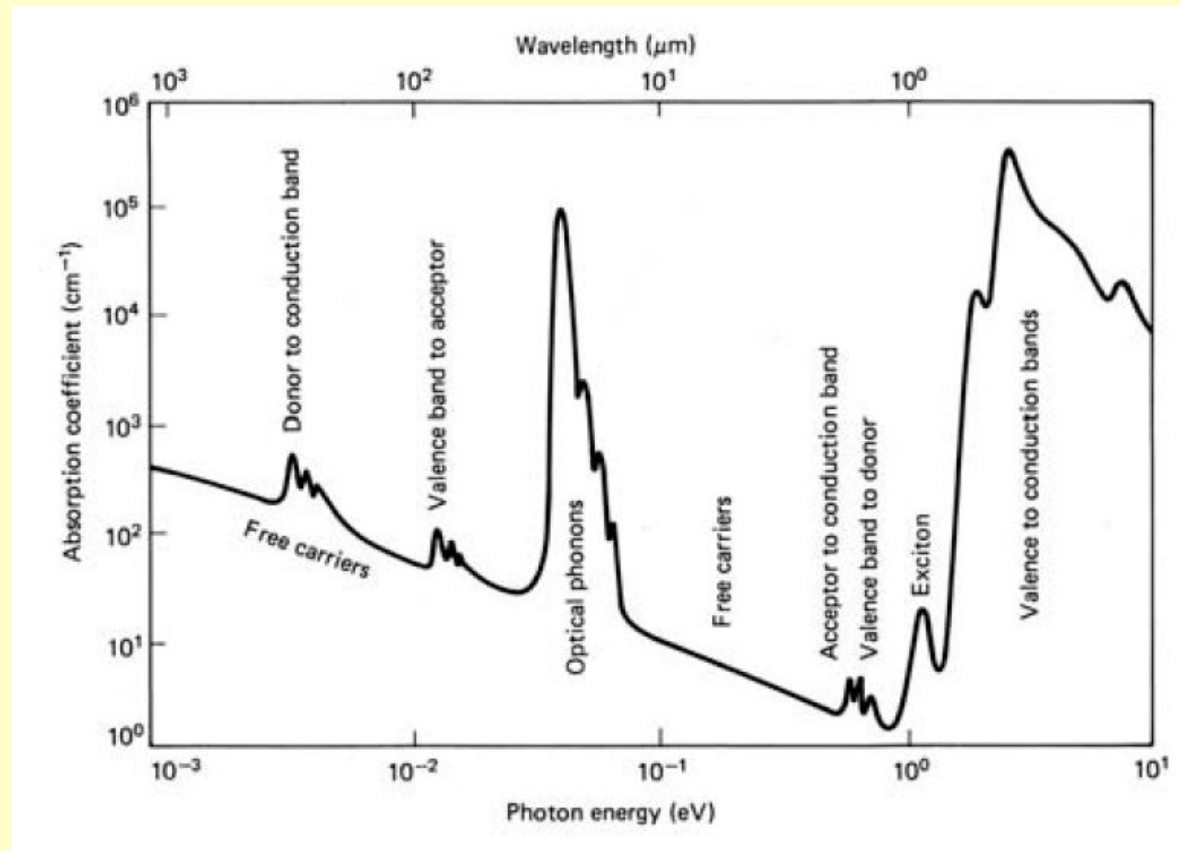
Зона – зона: прямой и не прямой

Экситонный

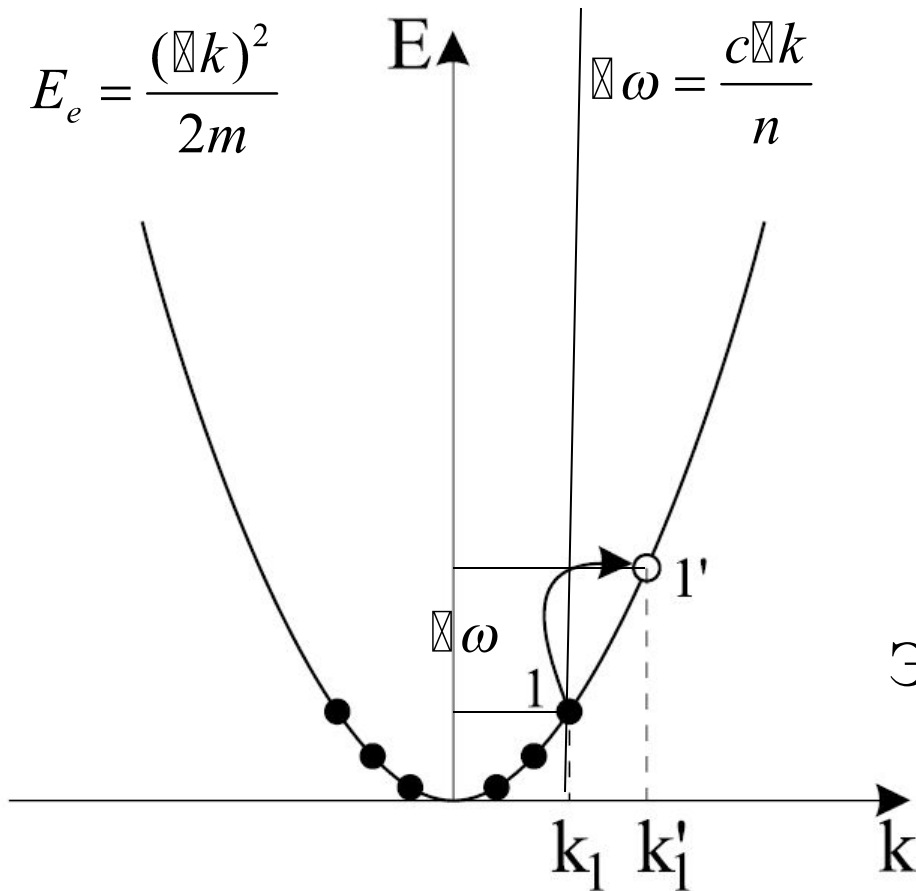
Зона-примесь

Примесь-примесь

Безызлучательный



Поглощение на свободных носителях



$$\hbar\omega < kT \quad E(t) = E_0 \cos(\omega t)$$

$$m \frac{dv}{dt} = eE(t)$$

$$v = \frac{eE_0}{\omega m} \sin(\omega t)$$

Энергия, поглощаемая в ед.времени
в ед.объема

$$W = \frac{en}{T} \int_0^T E(t)v(t)dt =$$

$$\frac{e^2 n E_0}{\omega m T} \int_0^T \cos(\omega t) \sin(\omega t) dt = 0$$

Поглощение на свободных носителях

$$m \frac{dv}{dt} = eE(t) - \frac{mv}{\tau}$$

$$v = \frac{e\tau}{m} \frac{E}{1 - i\omega\tau} = \mu \frac{E}{1 - i\omega\tau}$$

$$E(t) = E_0 e^{-i\omega t}$$

$$j = env = en\mu \frac{E}{1 - i\omega\tau} = \sigma(\omega)E$$

$$\sigma_0 = \frac{e^2 n \tau}{m}$$

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{1 - i\omega\tau} = \frac{\sigma_0}{1 + (\omega\tau)^2} + i \frac{\omega\tau\sigma_0}{1 + (\omega\tau)^2}$$

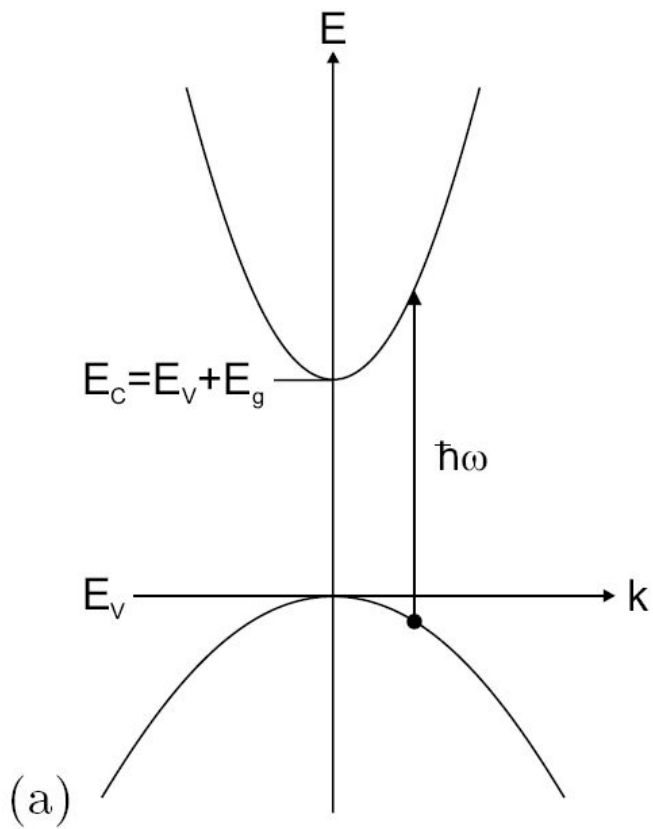
Энергия, поглощаемая в
ед.времени в ед.объема

$$W = \frac{\sigma_0}{1 + (\omega\tau)^2} E^2$$

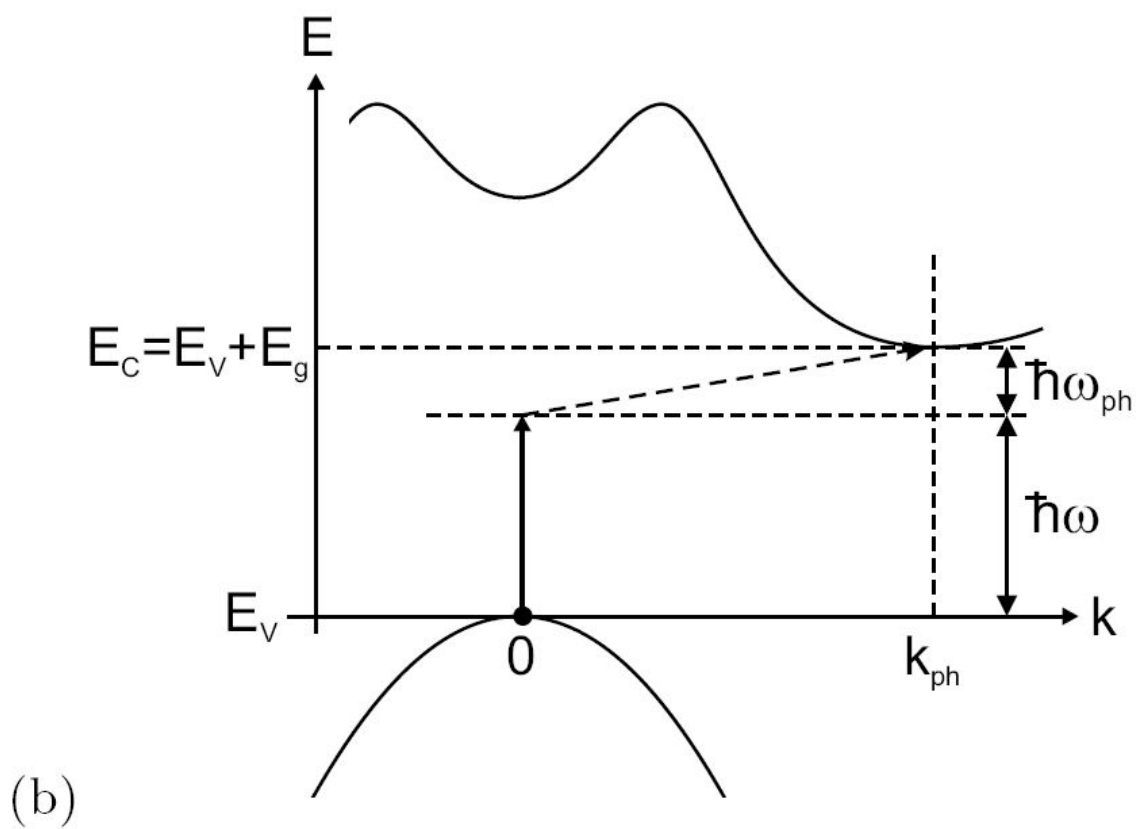
$$W \approx \sigma_0, \text{ когда } \omega\tau \ll 1$$

$$W \propto \frac{1}{\omega^2}, \text{ когда } \omega\tau \gg 1$$

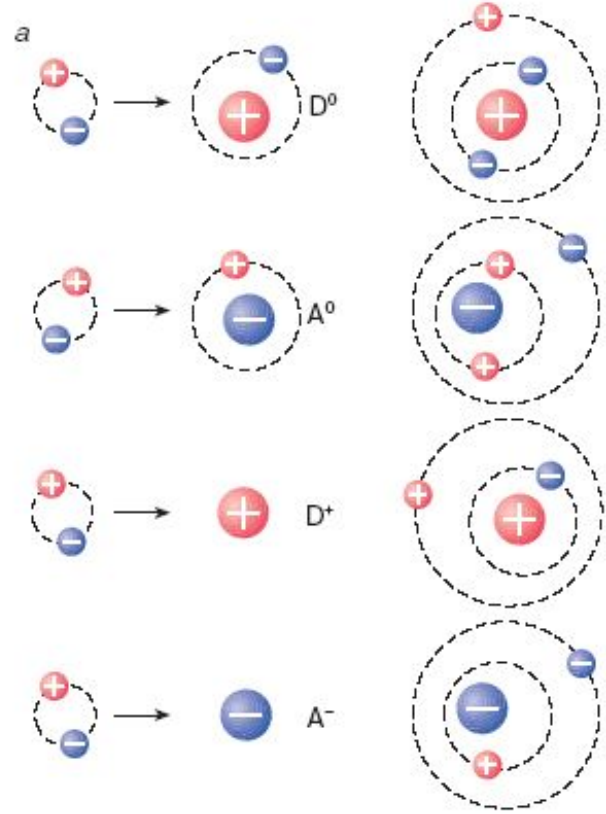
Зона – зона: прямой и не прямой



$$\alpha \propto (E - E_g)^{1/2}$$



$$\alpha \propto (E - E_g - \hbar\omega_{ph})^2$$

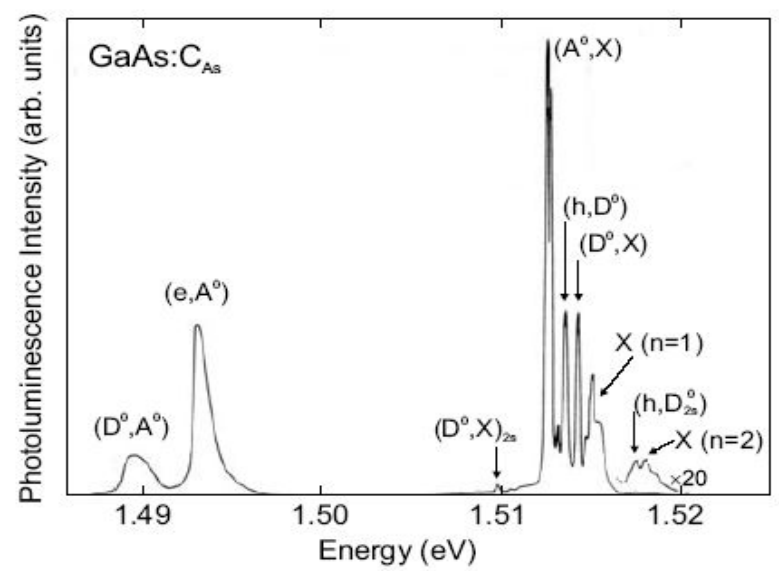
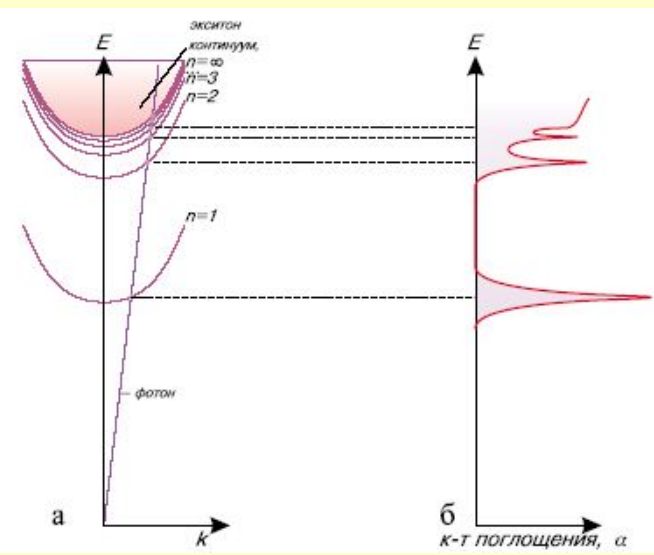
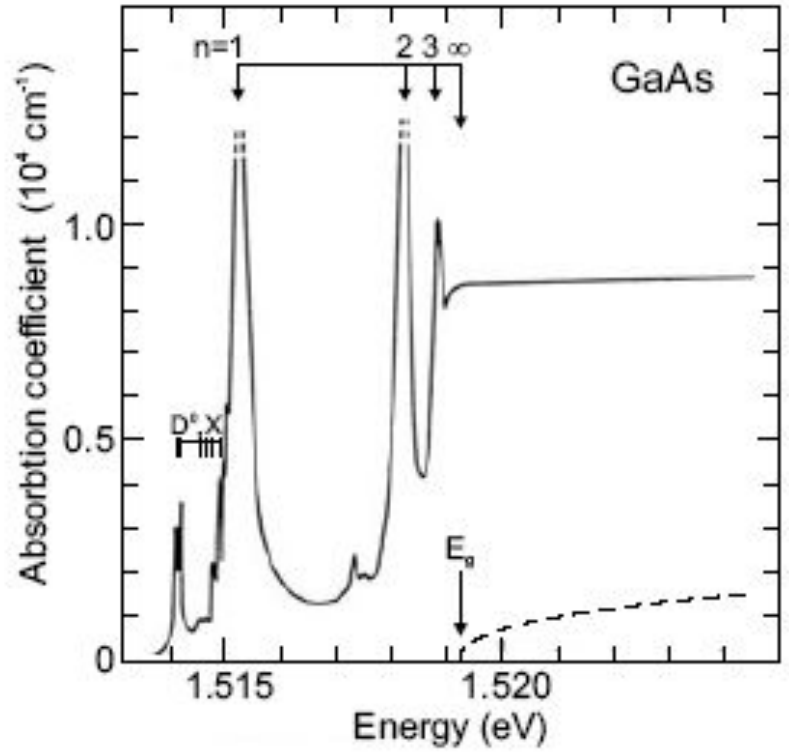


ЭКСИТОНЫ

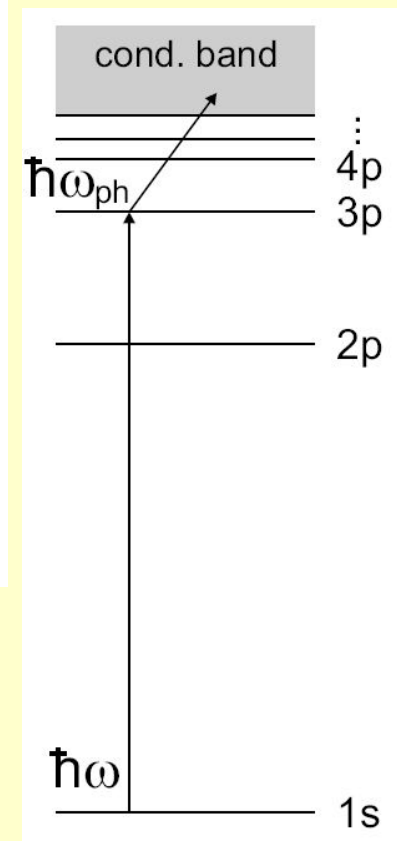
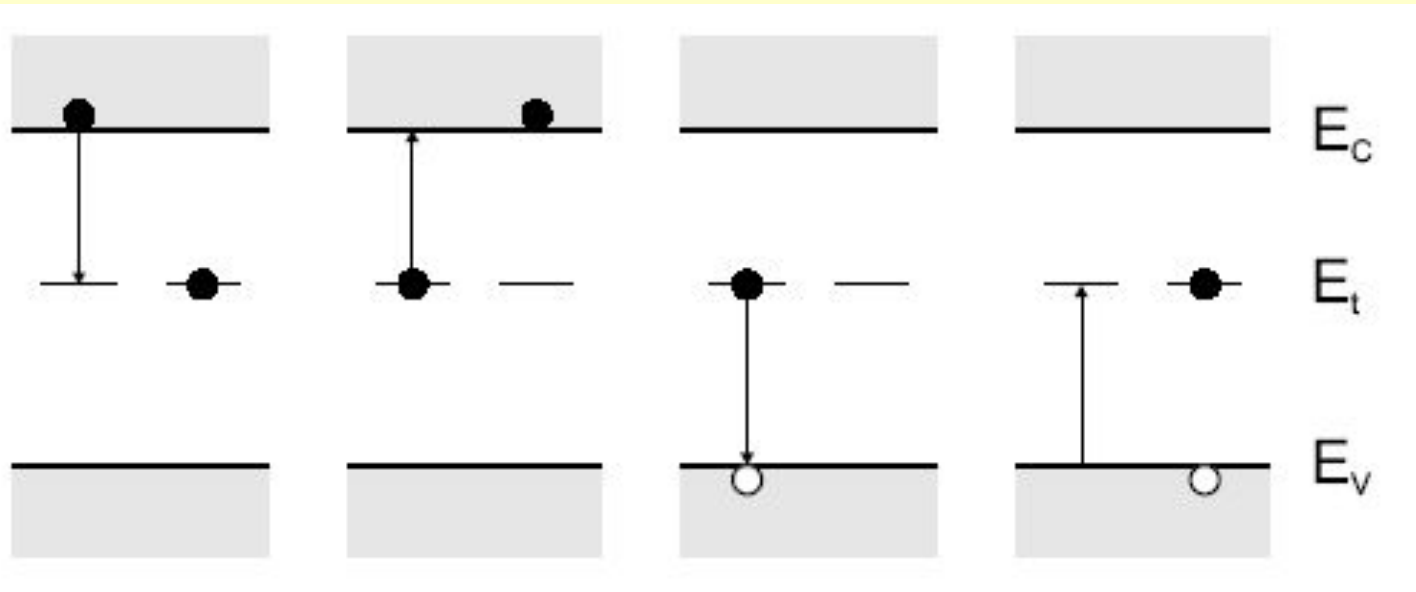
$$E_n = \frac{e^4 \mu}{2 \varepsilon^2 \hbar^2 n^2}$$

$$= 13,6 \frac{\mu}{m_0 \varepsilon^2} \text{ эВ}$$

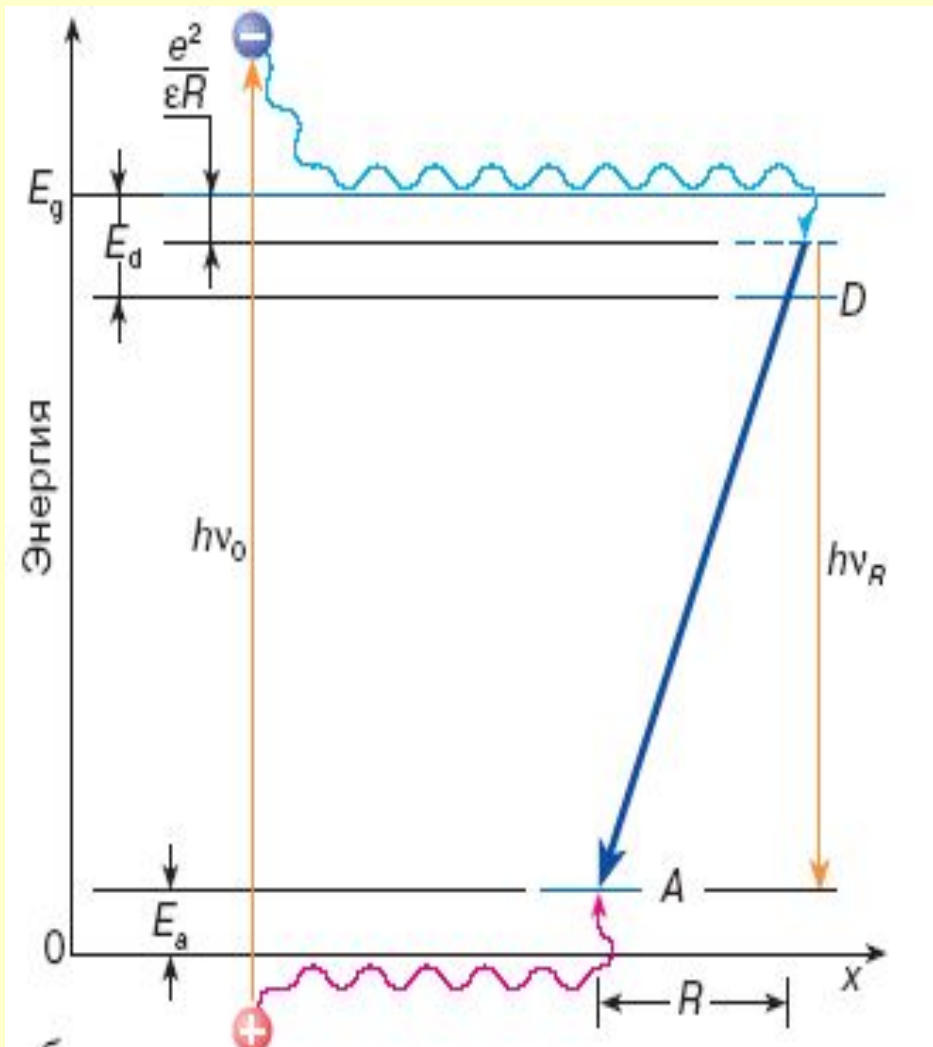
$$\mu = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h}$$



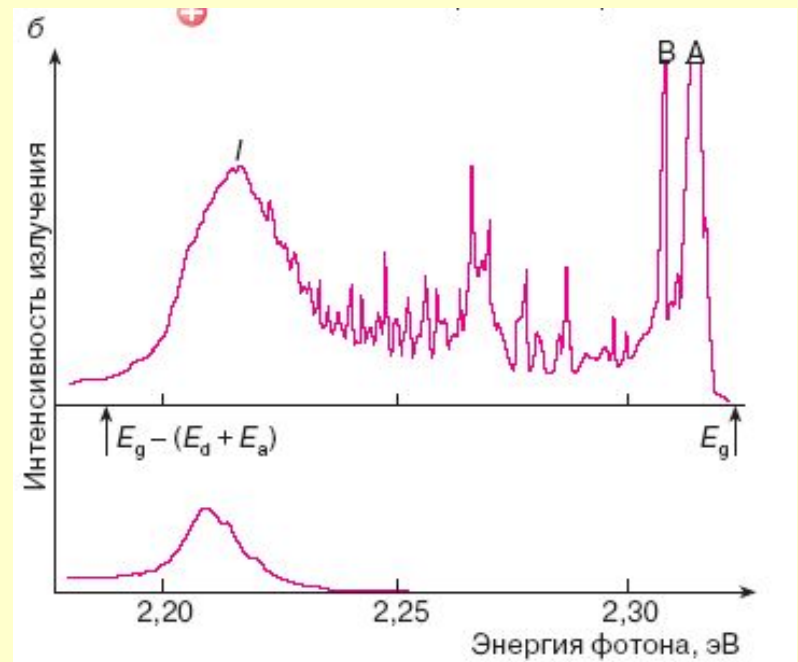
Зона-примесь



Примесь-примесь: донорно-акцепторные переходы



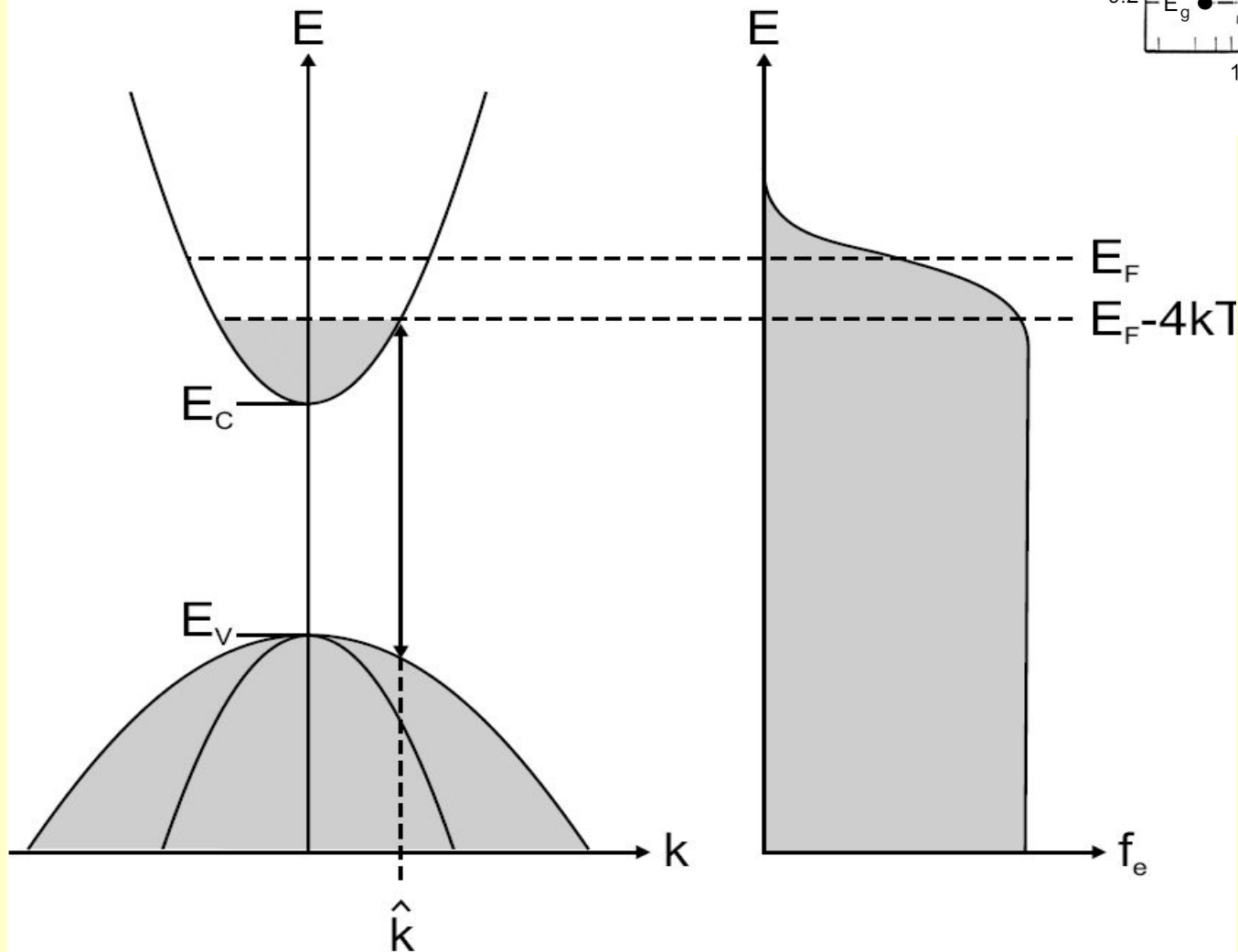
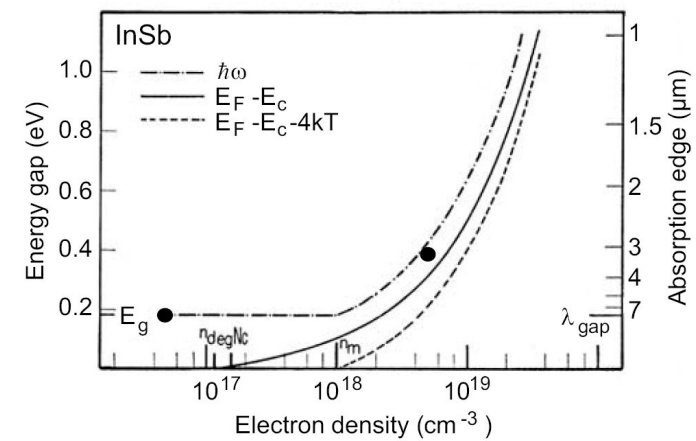
$$\hbar\omega = E_g - E_a - E_d - \frac{e^2}{\epsilon R}$$



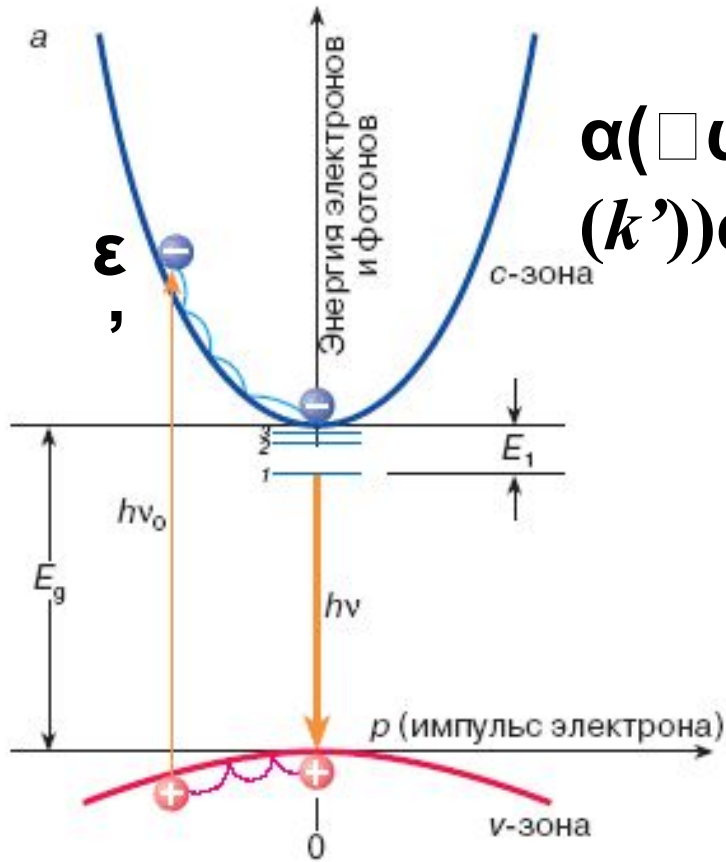
Влияние сильного легирования!

1 Эффект Бурштейна Мосса - уширение

2 Эффективное сужение



Поглощение света в п.п.



$$\alpha(\omega) \sim \int V^{eh} \delta(\epsilon' - \epsilon - \omega) f(k) (1 - f(k')) d^3 k'$$

$$f(k) = 1; \quad f(k') = 0$$

$$\epsilon' = \hbar^2 k'^2 / 2m_e$$

$$\epsilon = -E_g - \hbar^2 k^2 / 2m_h$$

$$\alpha(\omega) \sim \int V^{eh} \delta(E_g + \hbar^2 k'^2 / 2m_e + \hbar^2 k^2 / 2m_h - \omega) d^3 k'$$

Поглощение света в п.п.

$$k' = k + k_{\phi} \cong k$$

$$\gamma^{\text{eh}}(\square \omega) \cong \text{const}$$

$$\alpha(\square \omega) \sim \gamma^{\text{eh}} \int \delta(E_g + \square^2 k^2 (1/2m_e + 1/2m_h) - \square \omega) d^3k$$

$$1/2m_r = (1/2m_e + 1/2m_h)$$

$$\alpha(\square \omega) \sim \gamma^{\text{eh}} \int 4\pi \delta(E_g + \square^2 k^2 / 2m_r - \square \omega) k^2 dk$$

$$\begin{aligned} & \int 4\pi \delta(E_g + \square^2 k^2 / 2m_r - \square \omega) k^2 dk = \\ & 2\pi [2m_r / \square^2]^{3/2} \int \delta(E_g + \square^2 k^2 / 2m_r - \square \omega) [\square^2 k^2 / 2m_r]^{1/2} d[\square^2 k^2 / 2m_r] \\ & \quad y = \square^2 k^2 / 2m_r \end{aligned}$$

Поглощение света в п.п.

$$2\pi[2m_r/\hbar^2]^{3/2} \int \delta(E_g + y - \hbar\omega) y^{1/2} dy = 2\pi[2m_r/\hbar^2]^{3/2} (E_g - \hbar\omega)^{1/2}$$

$$J = 2\pi[2m_r/\hbar^2]^{3/2} (E_g - \hbar\omega)^{1/2}$$

МЕЖЗОННАЯ ПЛОТНОСТЬ СОСТОЯНИЙ

Как вычислить γ^{eh} ?

$H\psi =$

V возмущение

$$|V_{ij}|^2 = \int \psi_j^* V \psi_i |\psi_i|^2 dr^3$$

вероятность перехода

Необходимо найти оператор возмущения !!!

Поглощение света в п.п.

$$\hat{H}_0 = p^2/2m + U$$

$$\hat{H} = (1/2m)[p - (e/c)A]^2 + e\phi + U$$

$$[p - (e/c)A]^2 = -(\nabla^2) - (e/c)A i \nabla - i \nabla (e/c)A + [(e/c)A]^2$$

$$A i \nabla - i \nabla A = i \nabla \cdot A$$

divA

$$[p - (e/c)A]^2 = -(\nabla^2) - 2(e/c)A i \nabla - i \nabla \cdot A + [(e/c)A]^2$$

$$\hat{H} = \hat{H}_0 - (i e/mc) A \nabla - i \nabla \cdot A + [(e/c)A]^2 + e\phi$$

Кулоновская калибровка: $\text{div}A=0$, $\phi = 0$

$$\hat{H} = \hat{H}_0 - (i e/mc) A \nabla + [(e/c)A]^2$$

$$[(e/c)A]^2 \ll (i e/mc) A \nabla \longrightarrow V = -(e/mc) A p$$

Поглощение света в п.п.

Для монохроматической волны

$$E(r,t) = E_0 \sin(\omega t - qr)$$

$$A(r,t) = (c/\omega) E_0 \cos(\omega t - qr) = \\ = (cE_0/2\omega) [\exp(i(\omega t - qr)) + \exp(-i(\omega t - qr))]]$$

$$V(r,t) = -(eE_0/2\omega m) \times \\ \times [\exp(iqr) \underset{\substack{\downarrow \\ V(r)}}{p} \exp(i\omega t) + \exp(-iqr) \underset{\substack{\downarrow \\ V^*(r)}}{p^*} \exp(-i\omega t)]$$

$\downarrow$ $C/$ $i\Box$

$$V^{eh} = |V_{ij}|^2 = \left| \int \psi_j^* V(r) \psi_i dr \right|^2$$

Поглощение света в п.п.

$$V_{ij} = \int \psi_j^* V \psi_i \, d\mathbf{r} = C \int \psi_j^* \exp(i \mathbf{q} \mathbf{r}) \nabla \psi_i \, d\mathbf{r}$$

$$\exp(i \mathbf{q} \mathbf{r}) = 1 + i \mathbf{q} \mathbf{r} + \dots \quad \longleftarrow \quad \mathbf{q} = 2\pi/\lambda \quad \mathbf{r} = \mathbf{a}$$

$$\psi(\mathbf{r}) = u(\mathbf{r}) \cdot \phi(\mathbf{r}) \quad \text{Медленная часть!!! (теорема Блоха)}$$

$$V_{ij} = C \int u(\mathbf{r})^* \cdot \phi(\mathbf{r})^* \nabla u(\mathbf{r}) \cdot \phi(\mathbf{r}) \, d\mathbf{r} =$$

$$C \int u(\mathbf{r})^* \cdot u(\mathbf{r}) \cdot \phi(\mathbf{r})^* \nabla \phi(\mathbf{r}) + \phi(\mathbf{r})^* \cdot \phi(\mathbf{r}) \cdot u(\mathbf{r})^* \nabla u(\mathbf{r}) \, d\mathbf{r}$$

$$\sum \phi(\mathbf{r})^* \nabla \phi(\mathbf{r}) \int u(\mathbf{r})^* \cdot u(\mathbf{r}) \, d\mathbf{r} + \sum \phi(\mathbf{r})^* \cdot \phi(\mathbf{r}) \cdot \int u(\mathbf{r})^* \nabla u(\mathbf{r}) \, d\mathbf{r}$$



$$\delta_i$$



$$\mathbf{p}_{ij}$$

$$V_{ij} = C \cdot [\delta_{ij} \cdot \int \phi(\mathbf{r})^* \nabla \phi(\mathbf{r}) \, d\mathbf{r} + \mathbf{p}_{ij} \cdot \int \phi(\mathbf{r})^* \cdot \phi(\mathbf{r}) \, d\mathbf{r}]$$

Поглощение света в п.п.

$$V_{ij} = C \cdot [\delta_{ij} \cdot \int \phi(r)^* \nabla \phi(r) dr + p_{ij} \cdot \int \phi(r)^* \cdot \phi(r) dr]$$

Внутризонные переходы

$$V_{ij} = C \cdot \delta_{ij} \cdot \int \phi(r)^* \nabla \phi(r) dr$$

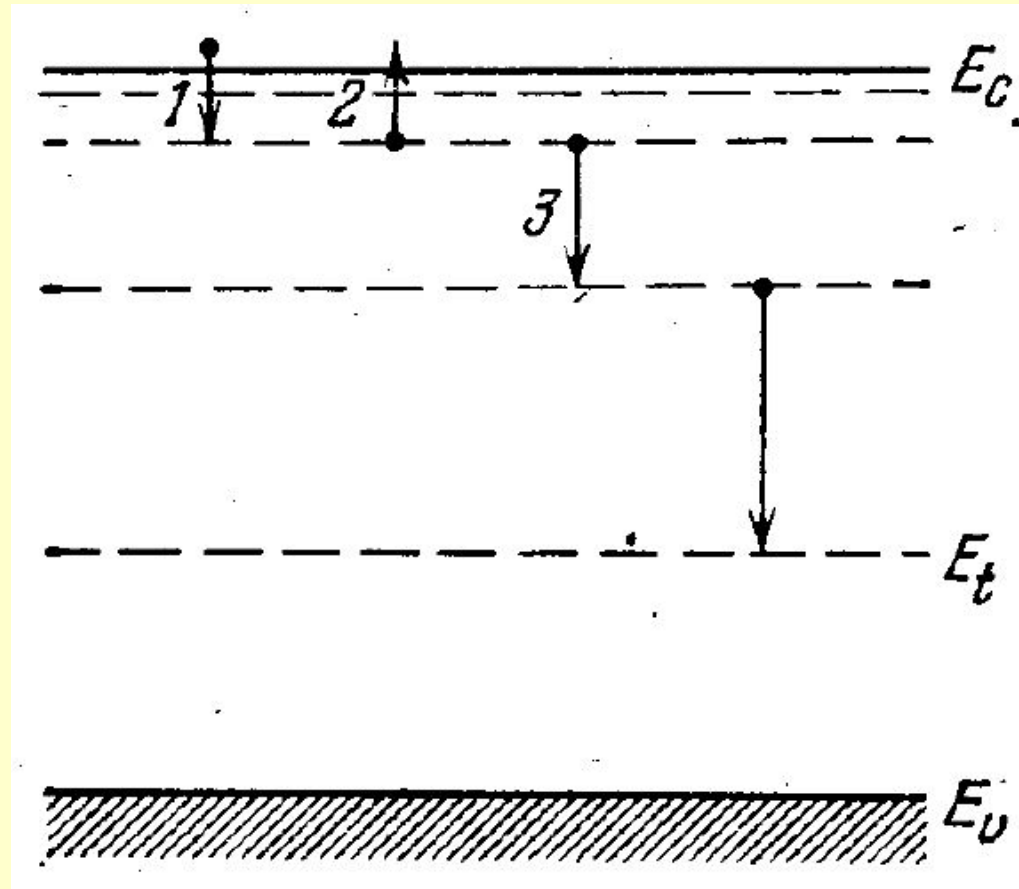
Межзонные переходы

$$V_{ij} = C \cdot p_{ij} \cdot \int \phi(r)^* \cdot \phi(r) dr$$

$$\alpha(\omega) \sim \frac{J}{|V_{ij}|^2}$$

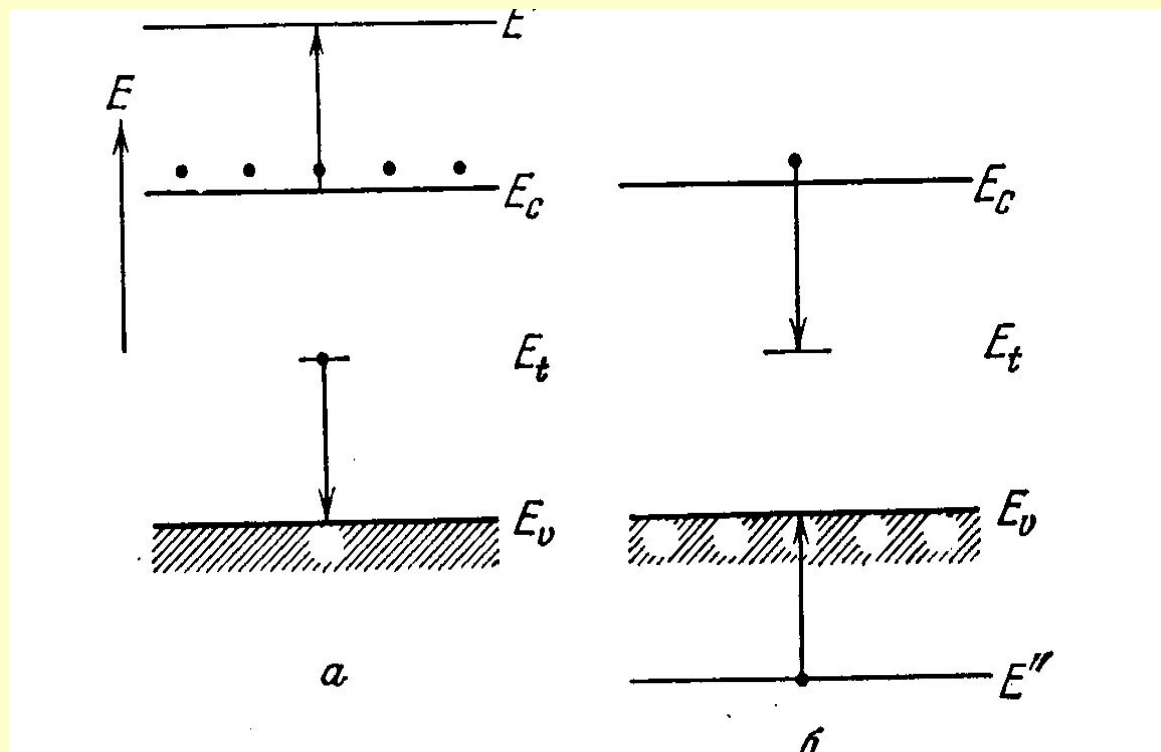
Безызлучательный В чем проблема?

Каскадная модель Лэкса



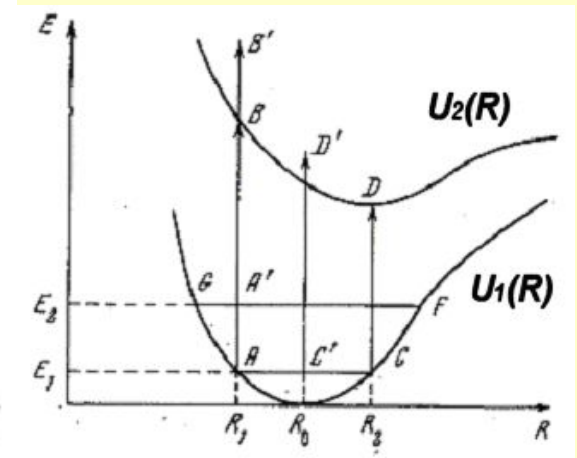
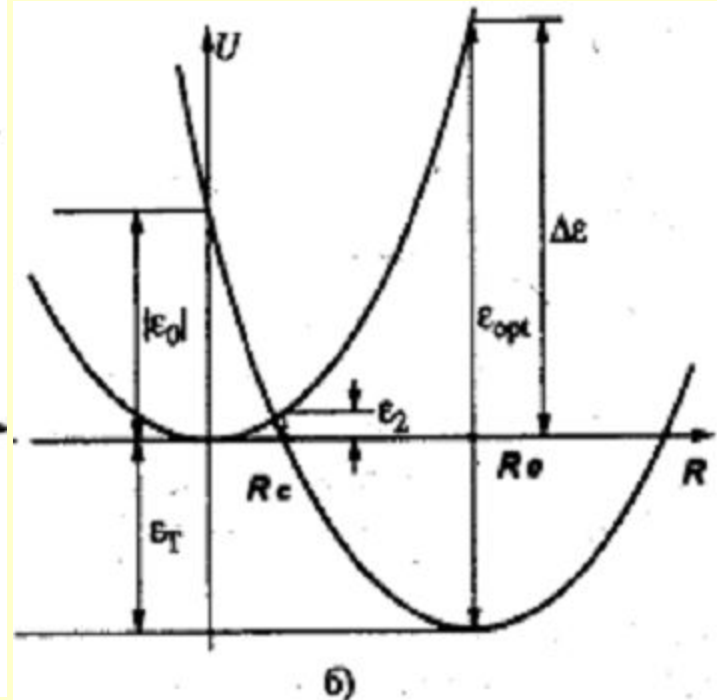
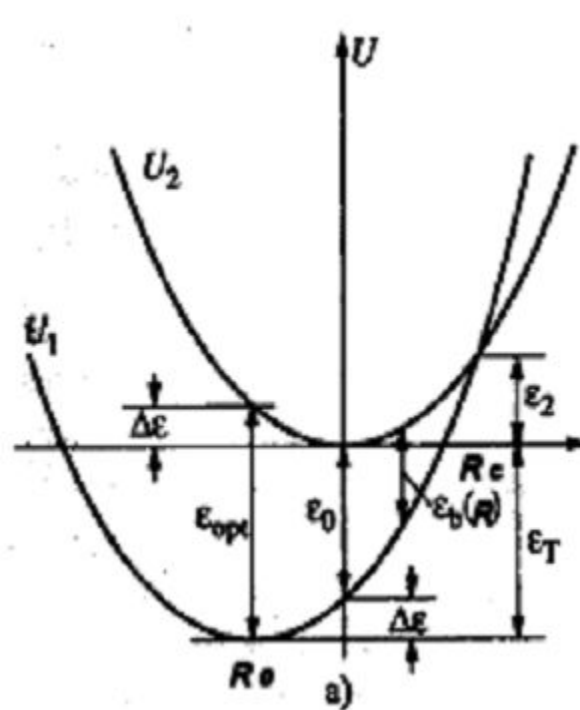
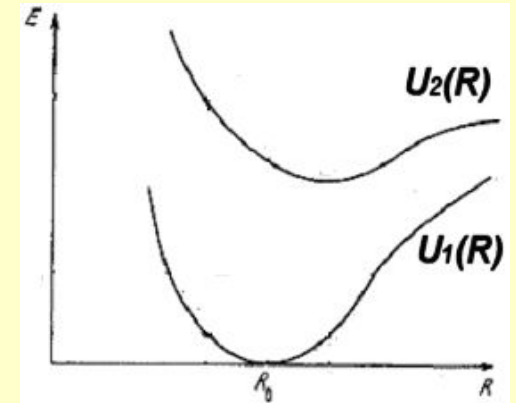
Безызлучательная рекомбинация

Модель ударной ионизации и захвата



Безызлучательный

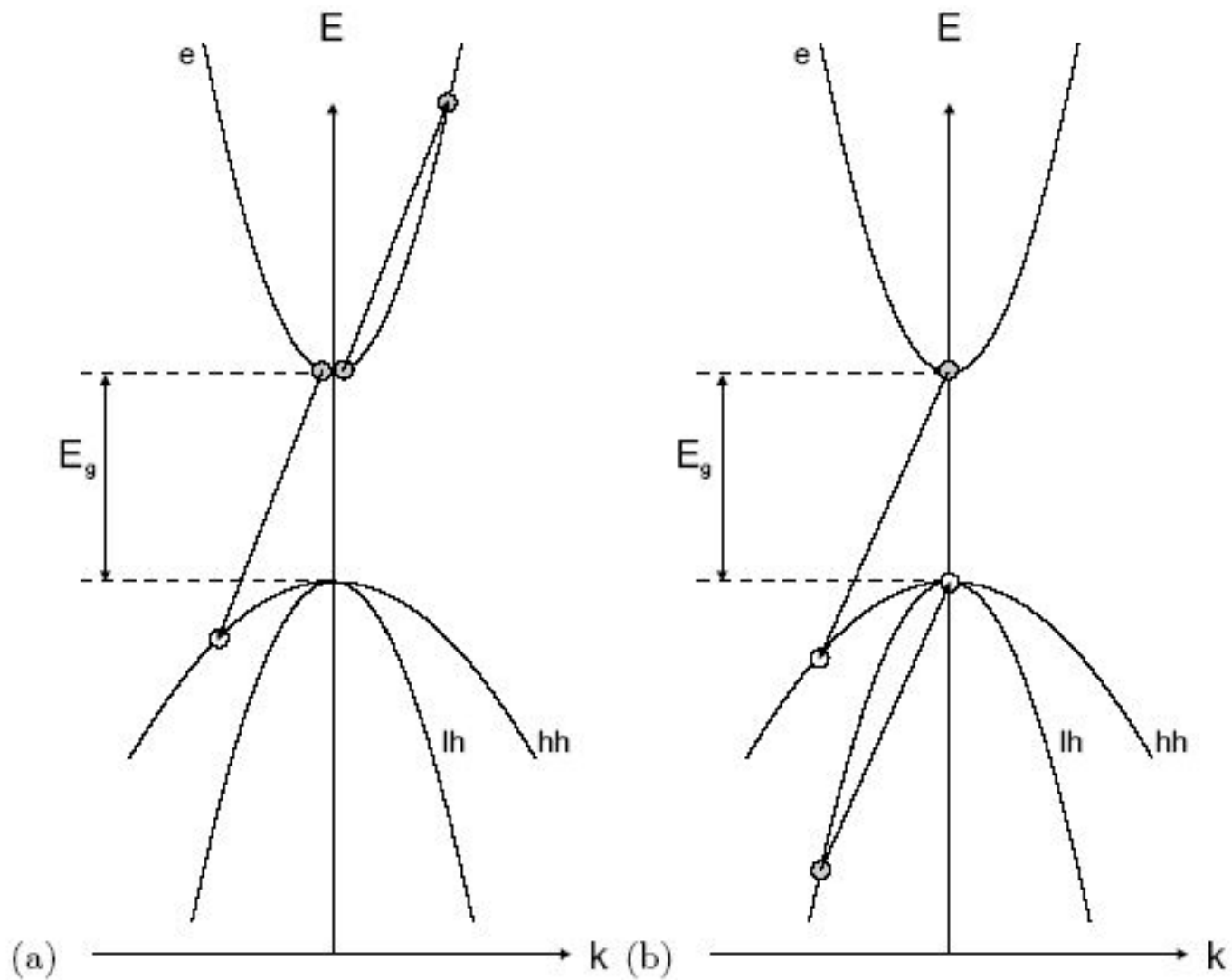
Модель конфигурационных координат



Принцип Франка-Кондона

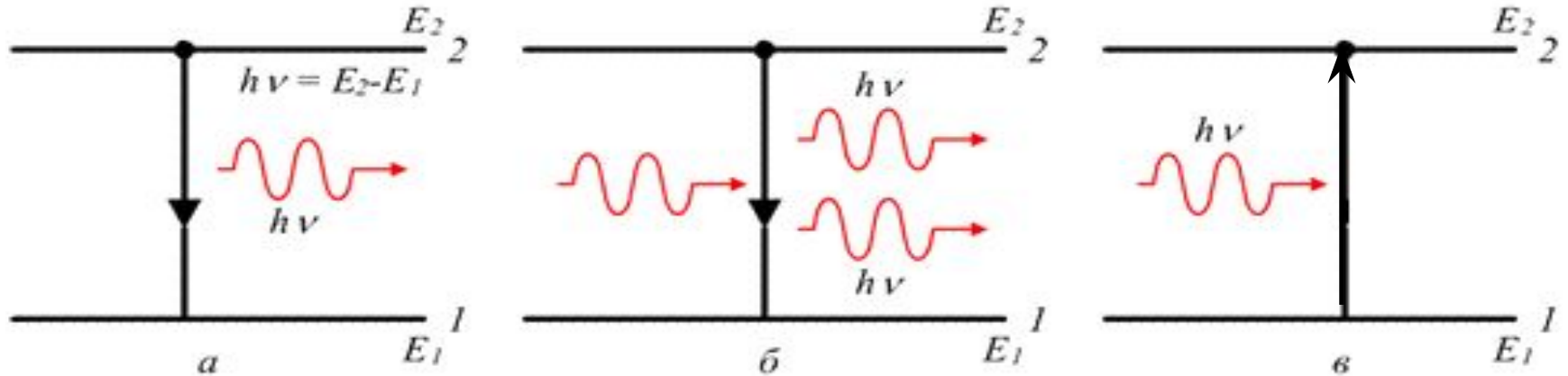
Модель Хуанга и Рис

Оже рекомбинация



Лазер

Light amplification by stimulated emission of radiation



$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\tilde{N}} = -AN_2 \quad \tau = 1/A \quad N_2(t) = N_2(0) \exp(-t/\tau)$$

A коэф. Энштейна для спонтанного излучения

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_A = -W_{21}N_2$$

W_{21} и W_{12} коэф. Энштейна для
вынужденного

излучения и поглощения

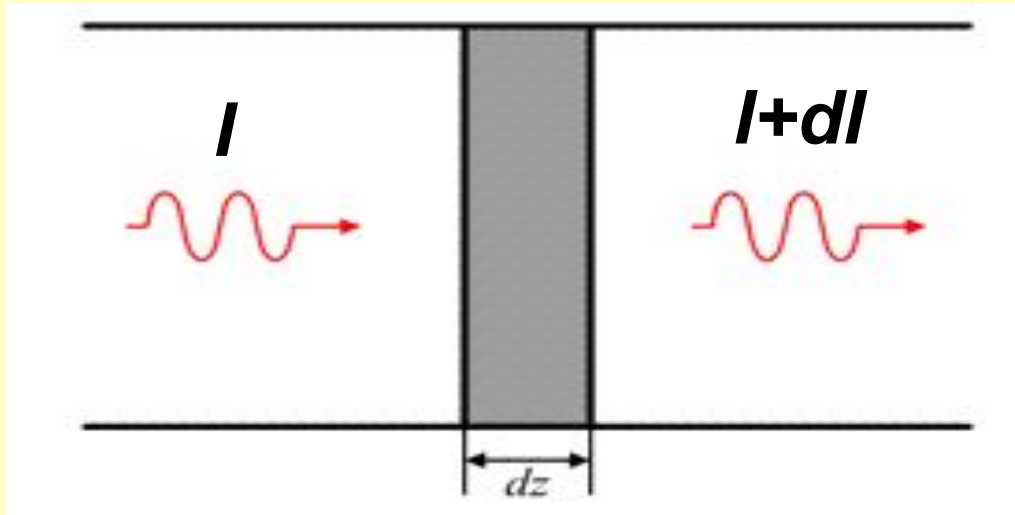
$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_I = -W_{12}N_1$$

$$W_{21} = W_{12}$$

$$W_{21} = \frac{\sigma_{12}}{h\nu}$$

$$\frac{\sigma_{21}}{h\nu} = \frac{\sigma_{12}}{h\nu}$$

Лазер



$$\frac{dI}{dz} = \sigma I (N_2 - N_1)$$

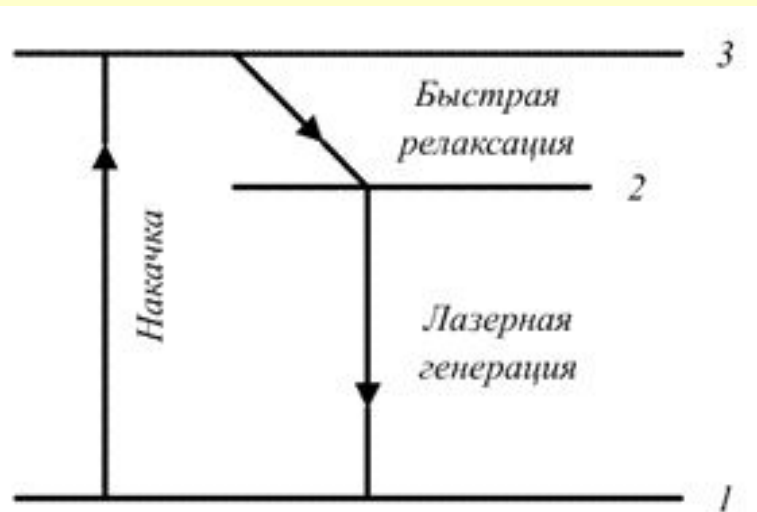
$N_1 > N_2$ поглощение

$N_1 < N_2$ усиление

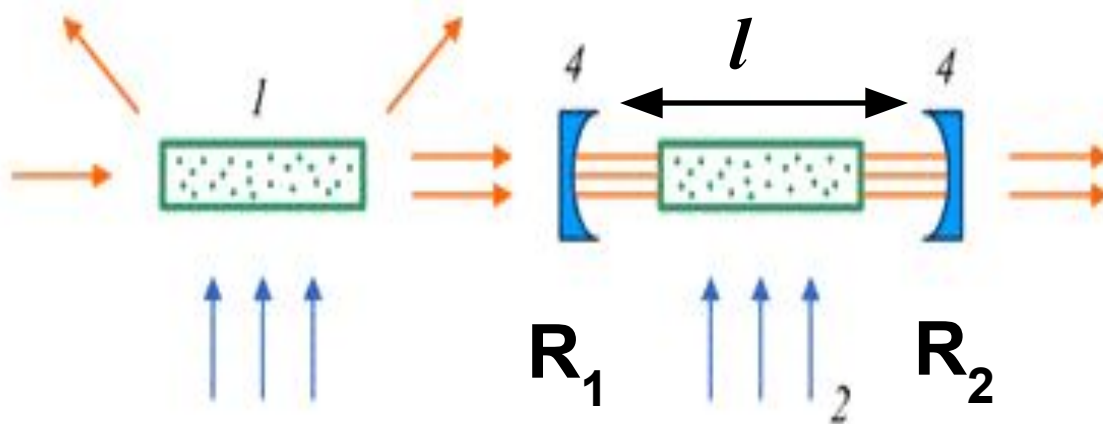
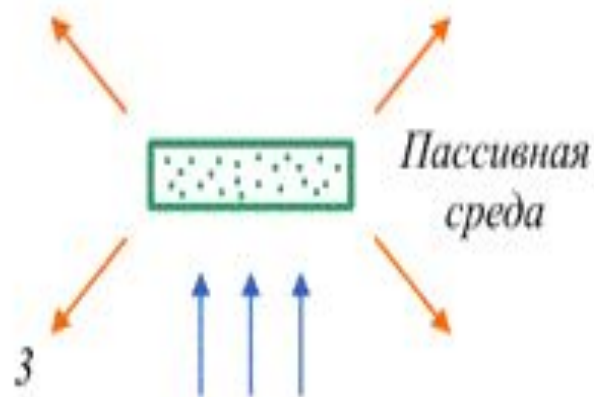
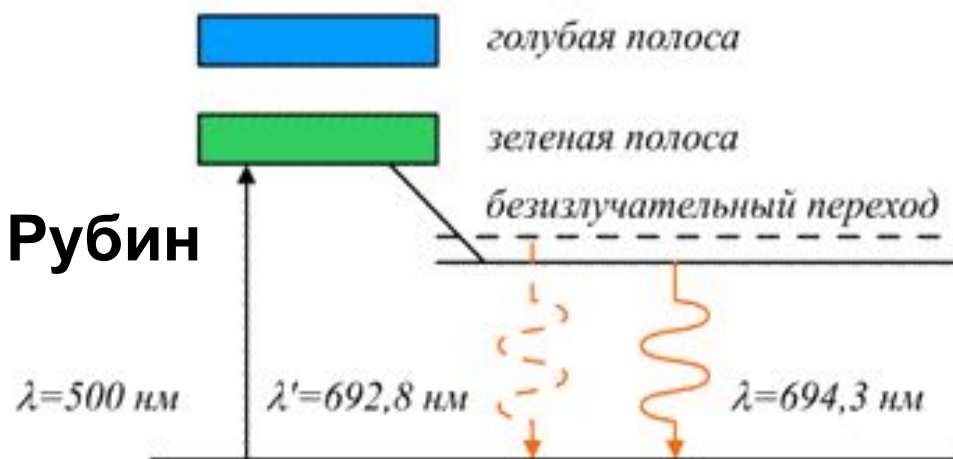
В термодинамическом равновесии

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) < 1$$

Для усиления необходимо создать инверсную заселенность $N_2 > N_1$

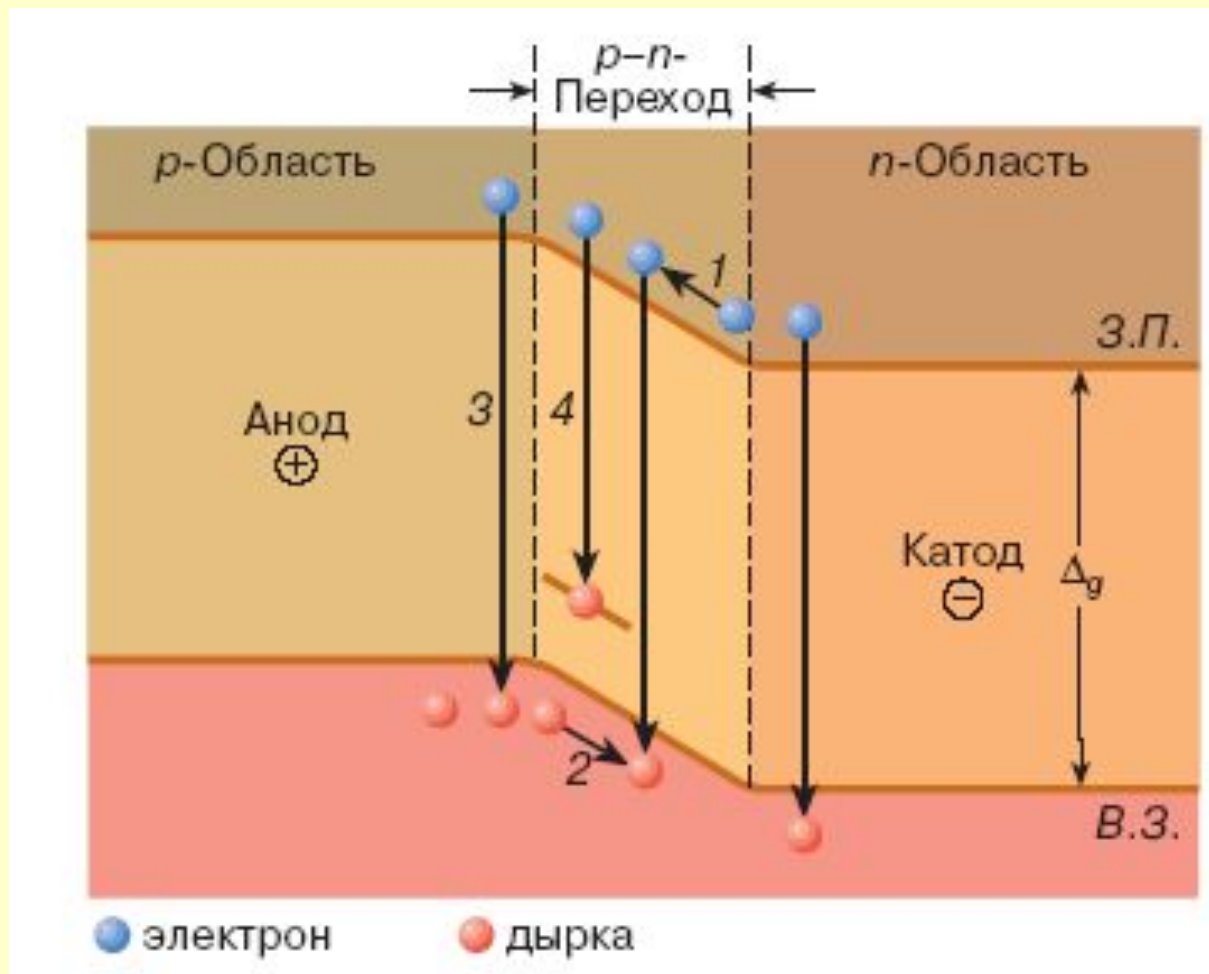


Рубин



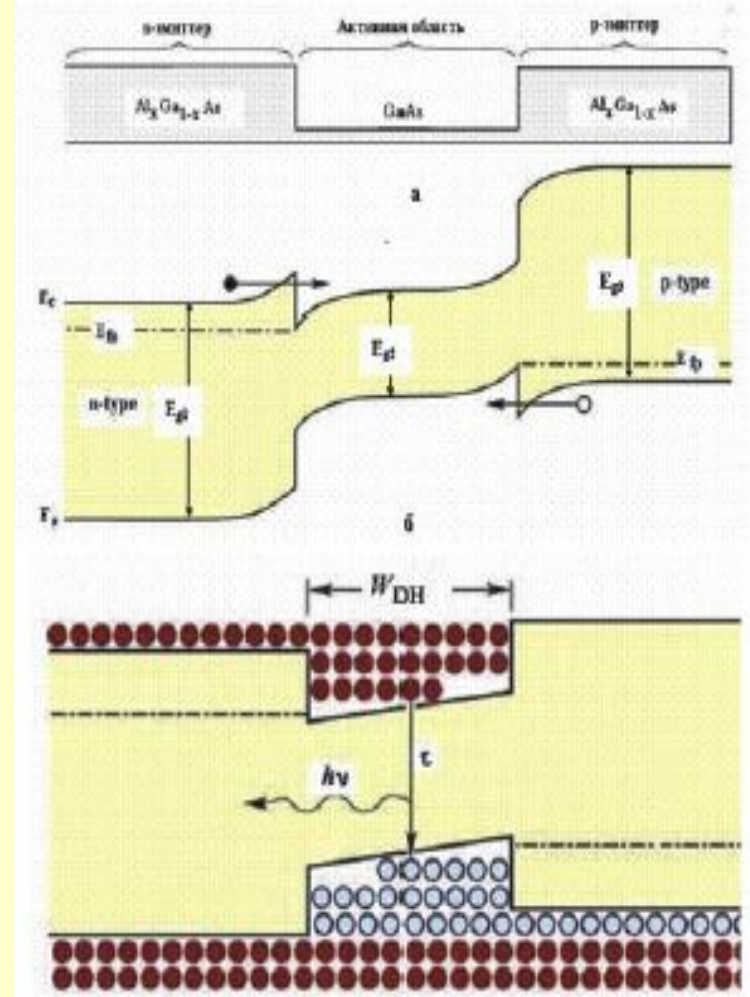
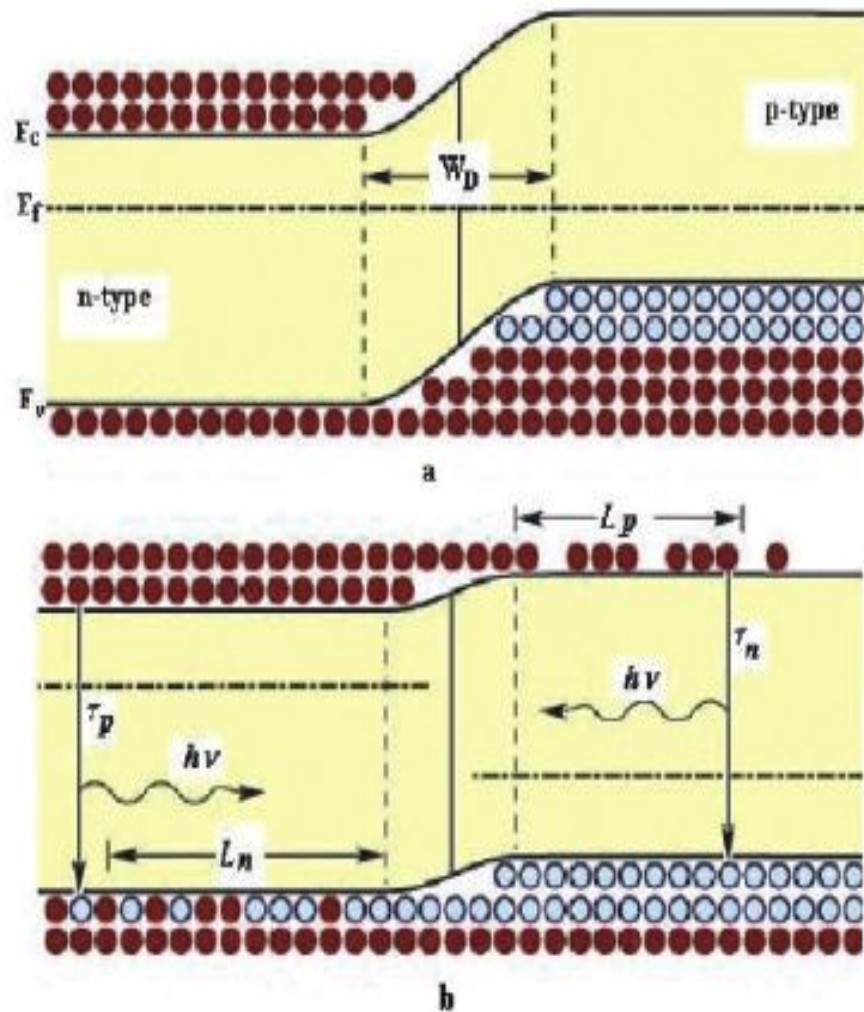
$$R_1 R_2 \exp[2\sigma(N_2 - N_1)l] = 1 \quad \text{Порог генерации}$$

Лазера на п.п.

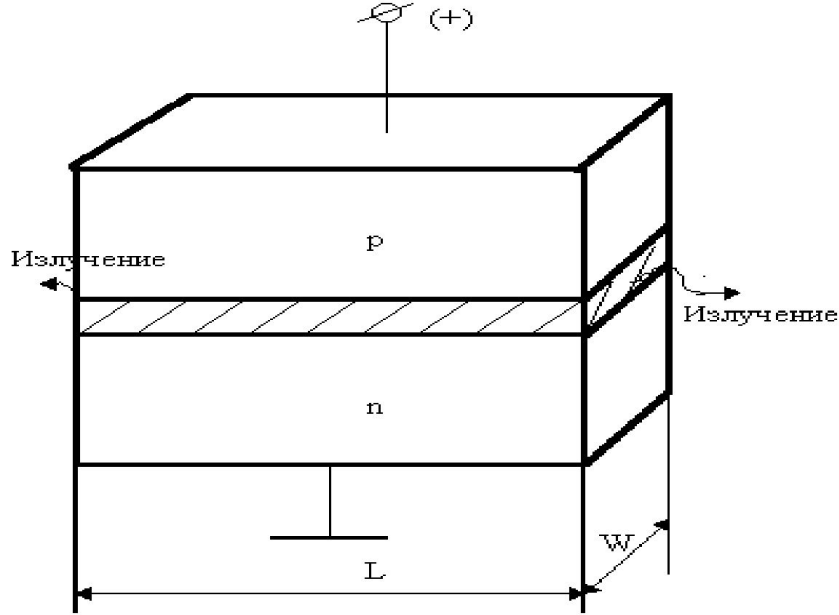


Электролюминесценция – светоизлучающий диод

Лазера на п.п.



Лазера на п.п.



$$g\Gamma = \alpha + (1/L)\ln(1/R)$$

Для GaAs $g(\text{cm}^{-1}) = 5 \cdot 10^{-2} [J \eta / d - 4,5 \cdot 10^3]$ при 300 K

d - толщина активной области

η - квантовый выход

L - длина резонатора

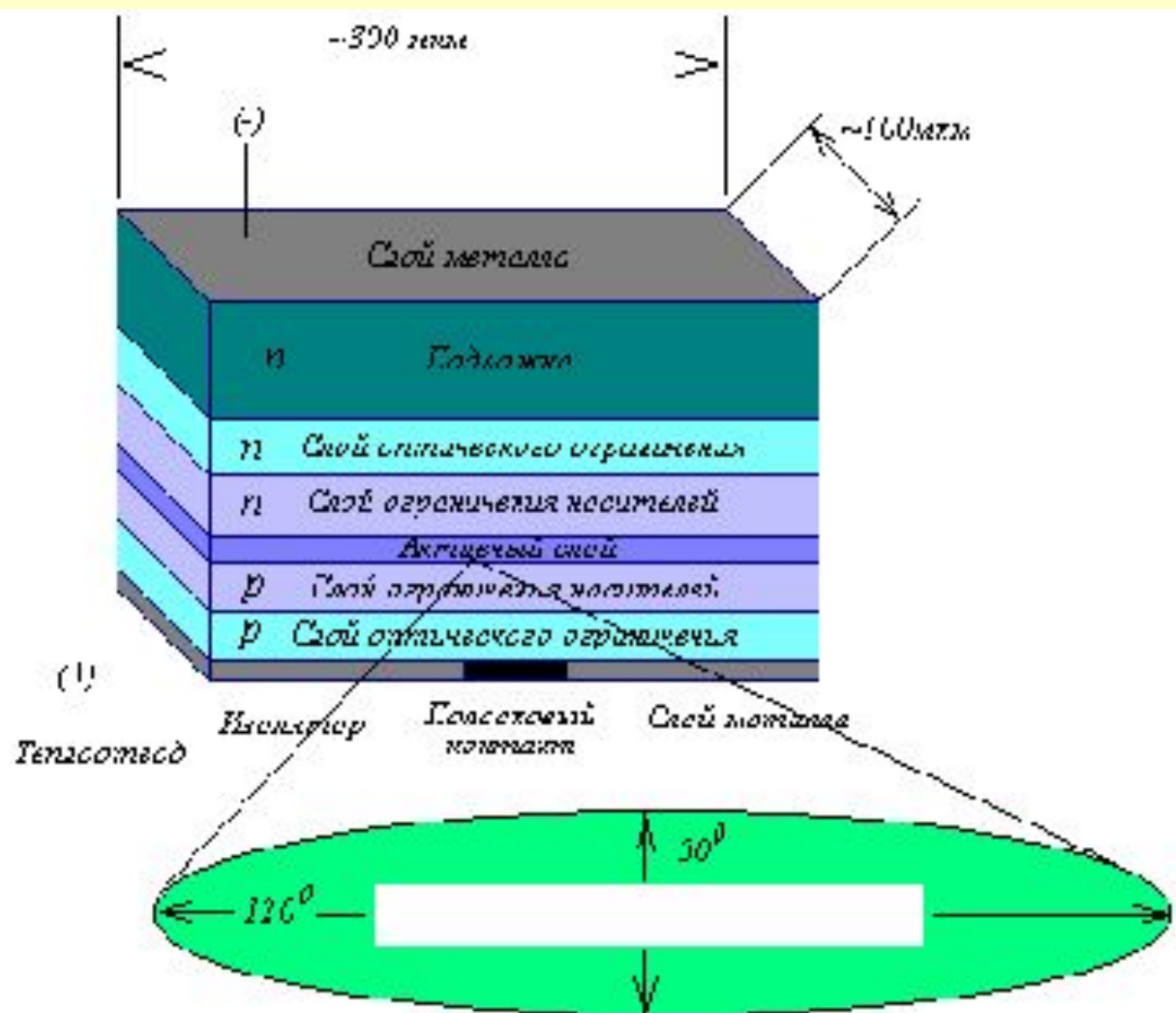
Γ - коэффициент оптического ограничения (сколько излучения приходится на область генерации)

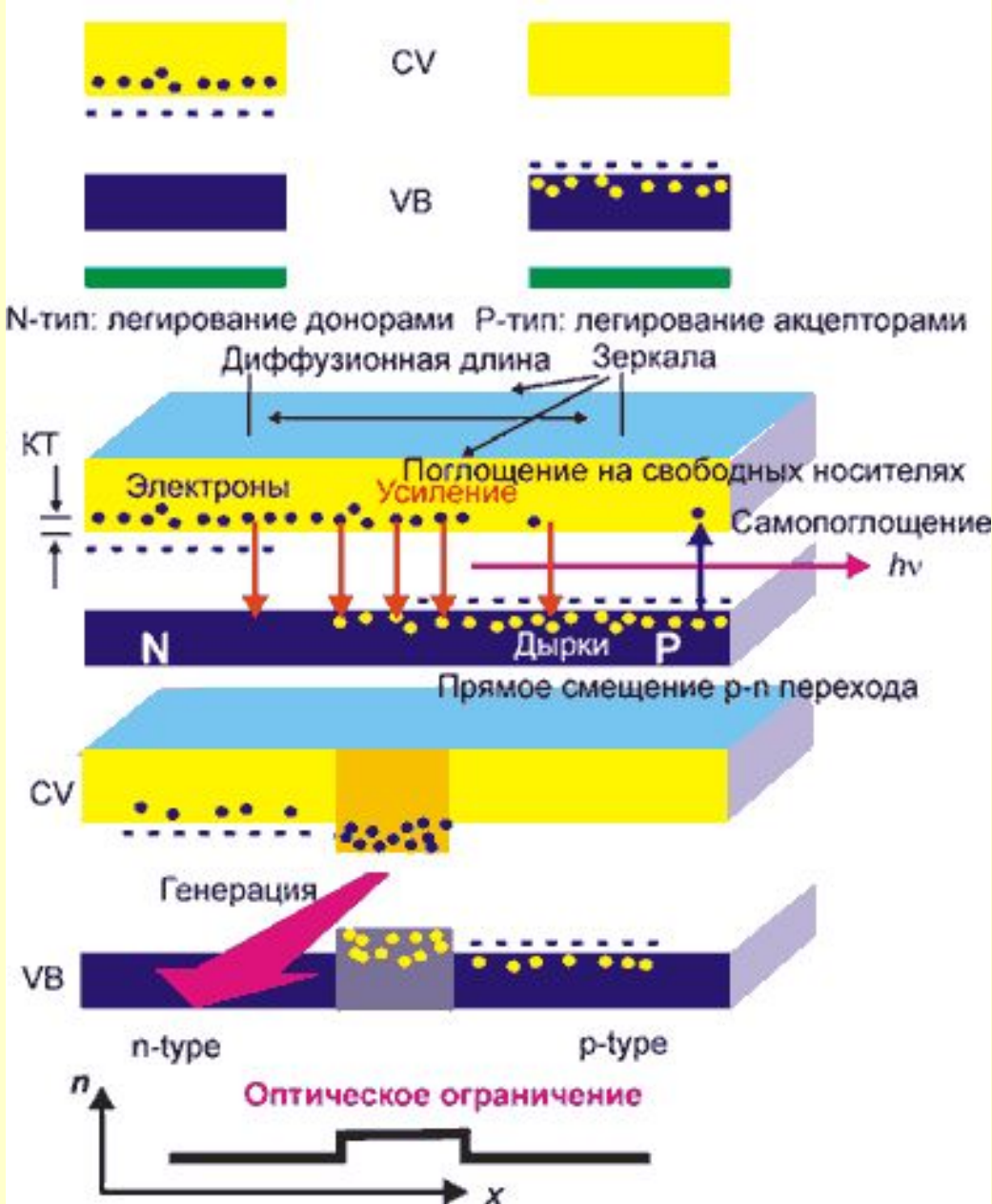
$$J = 4,5 \cdot 10^3 d / \eta - 20 (d / \eta \Gamma) [\alpha + (1/L)\ln(1/R)] \quad (\text{A cm}^{-2})$$

Пороговый ток

α - коэф. поглощения

Лазера на п.п.





Гомолазер $>50 \text{ кА/см}^2$

ДГС Гетеролазер 1 кА/см^2

Лазер на
квантовых ямах 50 А/см^2

Носителей заряда
в области генерации

Лазер на КТ 10 А/см^2

Лазера на п.п.

