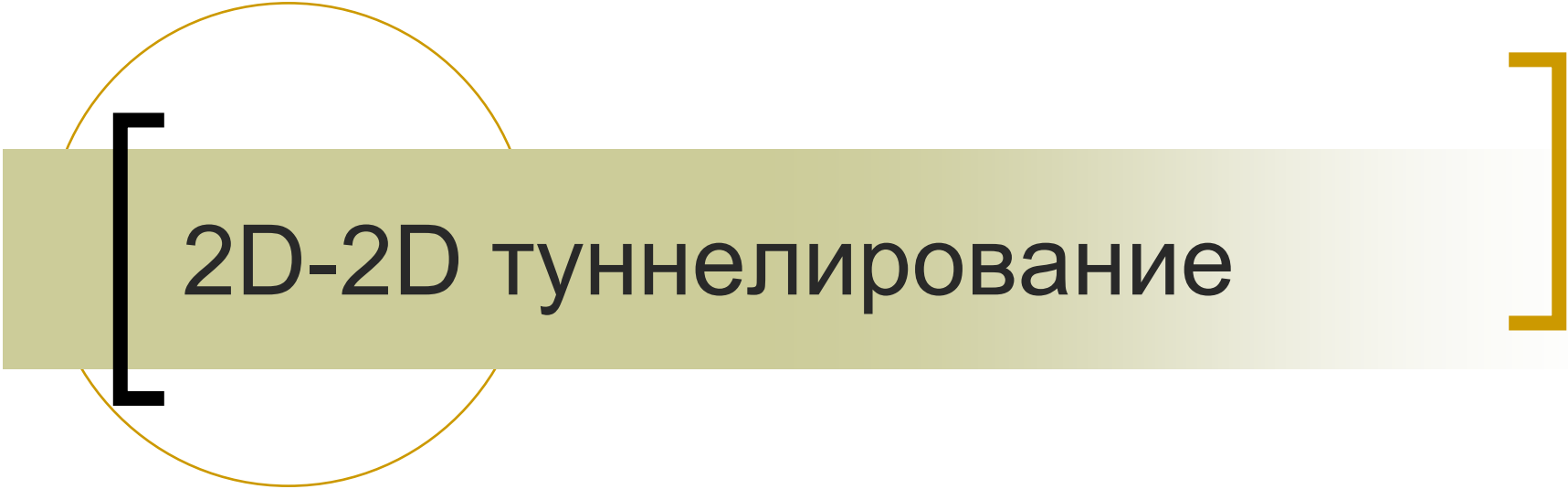


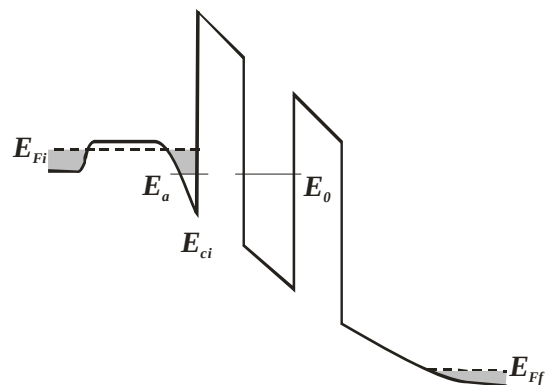


2D-2D туннелирование

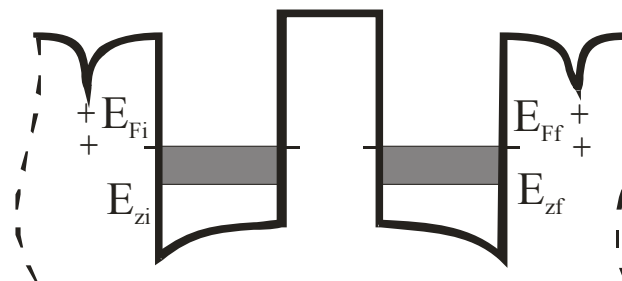
1. Реализация 2D-2D туннелирования.
2. Модель последовательного туннелирования.
3. Квантующее магнитное поле.
4. Планарное поле.

Структуры с 2D-2D туннелированием

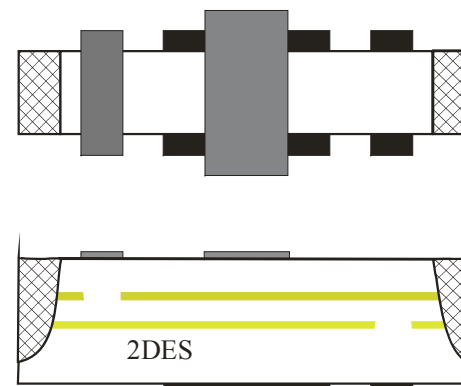
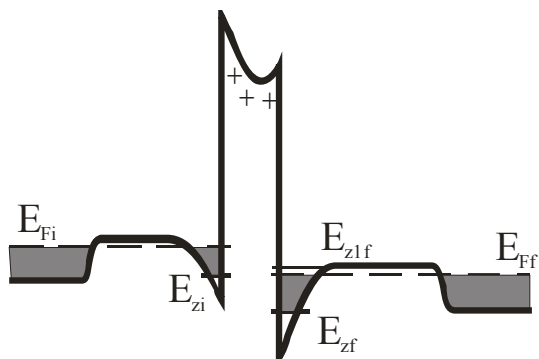
РТД с длинным спейсером



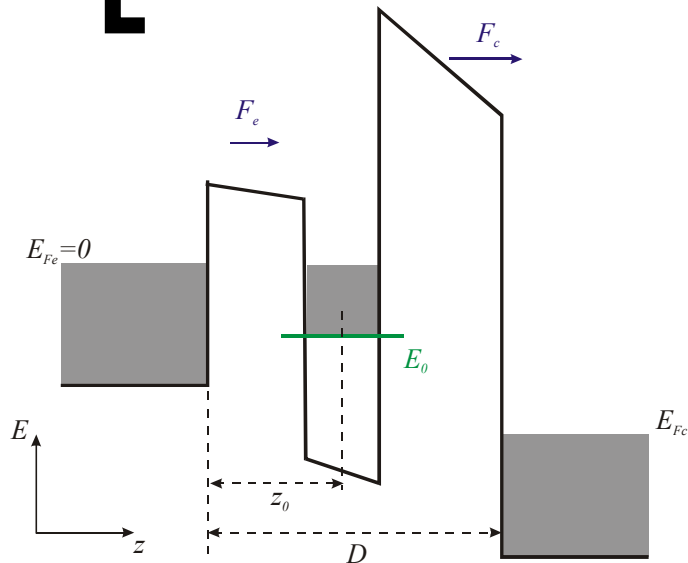
Две квантовые ямы



Туннельный диод с легированным барьером



Емкостная аккумуляция заряда



$$E_0(V) = E_0(0) - e\alpha V + \beta J_T \quad J_T \rightarrow 0$$

Как в такой ситуации влияет экранирование?

$$\beta J_T = \frac{ez_0\tau_c J_T}{\epsilon\epsilon_0 D} (D - z_0) \quad \tau_c \rightarrow \infty \Rightarrow \tau_c J_T \not\rightarrow 0$$

$$\delta F_1 = \frac{1}{D} \left(V - \frac{e\delta n}{\epsilon\epsilon_0} [D - z_0] \right) \quad \delta n = -g_{2D} \delta E_0(V)$$

$$\delta E_0(V) = -e\delta F_1 z_0$$

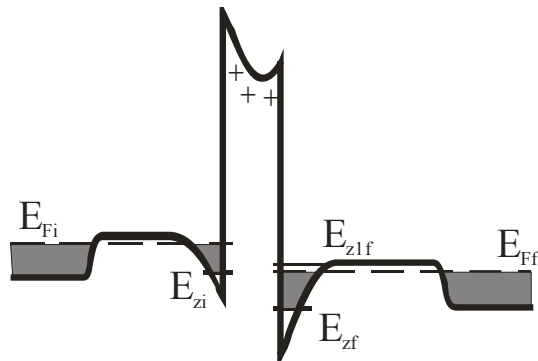
$$\delta E_0(V) = \frac{-\frac{ez_0}{D} V}{1 + \frac{e^2 g_{2D} (D - z_0) z_0}{\epsilon\epsilon_0 D}}$$

В туннельных структурах на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

$$\frac{eg_{2D}}{\epsilon\epsilon_0} (D - z_0) \sim 10 \Rightarrow \delta E_0(V) \approx -\frac{\epsilon\epsilon_0 V}{eg_{2D} (D - z_0)} \Rightarrow$$

$$e\delta n(V) \approx \frac{\epsilon\epsilon_0 V}{(D - z_0)} = VC_b$$

Модель последовательного туннелирования



$$J_T = \sum_{p_i p_f} e W_{i,f} (f_i - f_f) \quad \Psi_{i,f}(r) = \varphi_{i,f}(z) \exp\left(i \frac{p_x x + p_y y}{\hbar}\right)$$

$$W_{if} = K_{if} \cdot \int \exp\left(\frac{i}{\hbar} (p_{xi} - p_{xf}) x\right) dx \cdot \int \exp\left(\frac{i}{\hbar} (p_{yi} - p_{yf}) y\right) dy$$

$$K_{i,f} = \frac{2\pi}{\hbar} |T_{if}|^2 \delta(E_i - E_f)$$

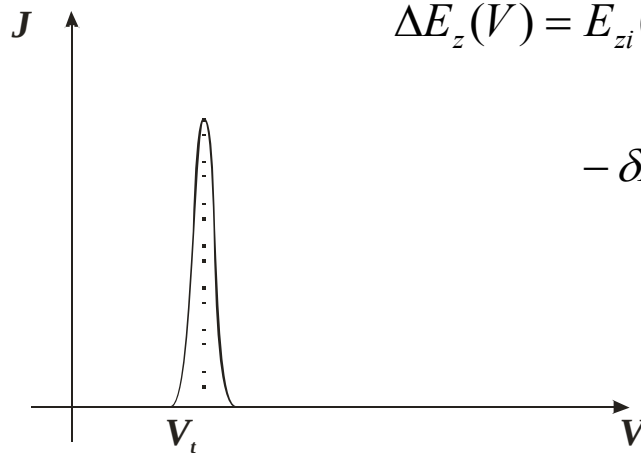
$$T_{if} = \frac{\hbar}{2m_*} \left(\varphi_i(z_b) \frac{d\varphi_f^*}{dz}(z_b) - \varphi_f(z_b) \frac{d\varphi_i^*}{dz}(z_b) \right) \Rightarrow W_{if} = K_{if} \cdot \delta(p_{xi} - p_{xf}) \delta(p_{yi} - p_{yf})$$

Сохранение импульса $p_{xi} = p_{xf} \quad p_{yi} = p_{yf}$

Сохранение энергии $E_i = E_f$

$$E_{i,f} = \frac{p_{xi,f}^2}{2m_*} + \frac{p_{yi,f}^2}{2m_*} + E_{zi,f} \Rightarrow \boxed{E_{zi} = E_{zf}} \quad - \text{условие резонанса}$$

Резонансная спектроскопия



$$\Delta E_z(V) = E_{zi}(V) - E_{zf}(V) \quad E_{zi,f}(V) = E_{Fi,f} + E_{zi,f}(0) - \delta E_{zi,f}(V)$$

$$-\delta E_{zi,f}(V) = \frac{\delta n_{i,f}}{g_{2D}} \quad \delta n_i(V) = -\delta n_f(V) = \frac{VC_b}{e}$$

$$\Delta E_z(V) = \Delta E_z(0) + eV + 2\delta E_z(V)$$

$$\Delta E_z(V) = \Delta E_z(0) + eV \left(1 - \frac{2C_b}{e^2 g_{2D}} \right)$$

В случае достаточно толстых барьерных слоев $1 \gg \frac{2C_b}{e^2 g_{2D}}$

$$\Delta E_z(V) = \Delta E_z(0) + eV$$

Квантующее магнитное поле

$$\Psi_{ni,f}(r) = \varphi_{i,f}(z) \chi_{ni,f}(y) \exp\left(\frac{ip_x x}{\hbar}\right) \quad \chi_{mi,f}(y) = \frac{1}{\pi^{1/4} l_c^{1/2} \sqrt{2^m m!}} \exp\left(-\frac{(y - y_{0i,f})^2}{2l_c^2}\right) H_{mi,f}\left(\frac{y - y_{0i,f}}{l_c}\right)$$

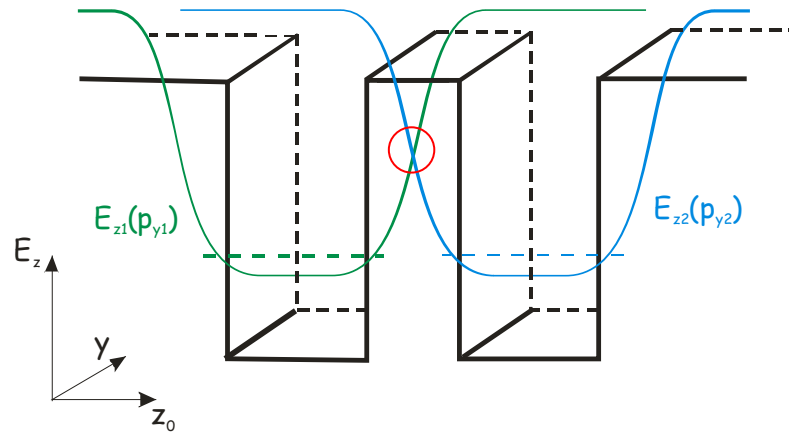
$$T_{if} = K_{if} \cdot \delta(p_{xi} - p_{xf}) \delta_{mi,mf}$$

Сохранение импульса $p_{xi} = p_{xf}$ Сохранение магнитного числа $m_i = m_f$

Сохранение энергии $E_i = E_f \Rightarrow (m_i + 1/2)\hbar\omega_c + E_{zi} = (m_f + 1/2)\hbar\omega_c + E_{zf}$

$E_{zi} = E_{zf}$ - условие резонанса

Планарное магнитное поле



$$z_0 = \frac{p_y}{eB} \quad E = \frac{p_x^2}{2m_*} + E_z(p_y)$$

$$\Phi_{1,2}(x, y) = A_{1,2} \exp[(p_{x1,2}x + p_{y1,2}y)i/\hbar]$$

$$\Psi_{1,2}(\vec{r}) = \Phi_{1,2}(x, y)\varphi(z, p_{y1,2})$$

$$T_{fi} = T_{12}(p_{y1,2})\delta(p_{x1} - p_{x2})\delta(p_{y1} - p_{y2})$$

Закон сохранения энергии

$$E_f = E_i$$

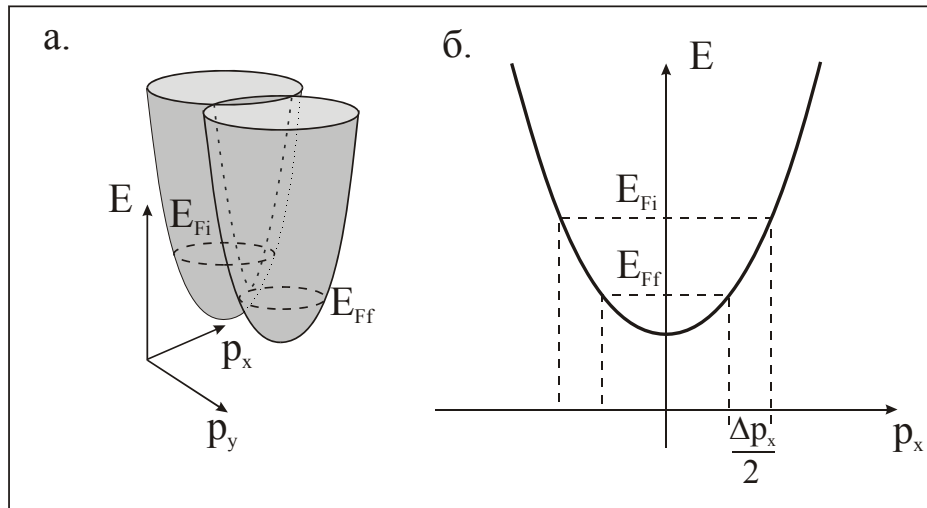
Закон сохранения поперечного импульса

$$p_{x1} = p_{x2} \quad p_{y1} = p_{y2}$$

Условие РТ

$$E_{z1}(p_y) = E_{z2}(p_y)$$

Ток в планарном магнитное поле



$$J = \frac{eT}{2\pi\hbar} \Delta p_{xif}$$

$$J = \begin{cases} e \int_0^{E_{Fi}-E_0} T \frac{dp_x}{2\pi\hbar} \dots \text{если } E_{Ff} \leq E_0 \leq E_{Fi} \\ e \int_{E_{Ff}-E_0}^{E_{Fi}-E_0} T \frac{dp_x}{2\pi\hbar} \dots \text{если } E_0 \leq E_{Ff} \end{cases}$$

