

# Лекция 6

## Одноэлектронные устройства (продолжение)

Одноэлектронные устройства (ОЭУ) для логических схем

Цели создания ОЭУ:

- Увеличение плотности элементов
- Уменьшение энергозатрат

Два способа осуществления логических операций:

- 1) Бит – один электрон
- 2) Бит – несколько электронов, но ОЭУ служит переключателем тока

- 1) – энергетически более выгоден
- 2) – большая стабильность, принцип действия аналогичен MOSFET

## Моделирование ОЭТ для логических схем

Базовые предпосылки:

1. Исток и сток соединены с резервуарами большой емкости
2. Сопротивления истока и стока равны между собой:  $R_s = R_D = R_t$
3. Для каждого напряжения на затворе существует два наиболее вероятных числа электронов на КТ
4.  $R_t$  много больше квантового сопротивления  $\frac{h}{e^2}$   
с целью подавления туннелирования квантовыми флуктуациями

Расшифровка 3:

Если напряжение на затворе 0, то число электронов или 0, или -1

Если напряжение на затворе  $(e/C_g)$ , то число электронов или 1, или 0

$$I_n = \frac{e}{2R_\Sigma} \frac{(\tilde{V}_{gs,n}^2 - V_{ds}^2) \sinh(\tilde{V}_{ds} / \tilde{T})}{\tilde{V}_{gs,n} \sinh(\tilde{V}_{gs,n} / \tilde{T}) - \tilde{V}_{ds} \sinh(\tilde{V}_{ds} / \tilde{T})}$$

$$\tilde{V}_{gs,n} = \frac{2C_g V_{gs}}{e} \frac{(C_g + C_s - C_d) V_{ds}}{e} - 1 - 2n$$

$$\tilde{V}_{ds} = \frac{C_\Sigma V_{ds}}{e}$$

$$\tilde{T} = \frac{2k_B T C_\Sigma}{e}$$

$$R_\Sigma = R_t + R_t \quad (R_S = R_D = R_t)$$

При фиксированном  $n$   $I_n$  соответствует одному периоду кулоновских осцилляций.

При  $V_{gs,n} = 0$  получим напряжение на затворе, дающее пик кулоновской осцилляции:

$$V_{gs} = \frac{e}{2C_g} + \frac{ne}{C_g} + \frac{(C_g + C_s - C_d)V_{ds}}{2C_g}$$

Период Кулоновских осцилляций  $e/C_g$ , тогда интервал напряжений затвора, в котором существует ток  $I_n$ , равен:

$$\frac{ne}{C_g} + \frac{(C_g + C_s - C_d)V_{ds}}{2C_g} < V_{gs} < \frac{(n+1)e}{C_g} + \frac{(C_g + C_s - C_d)V_{ds}}{2C_g}$$

Что эквивалентно условию  $-1 < V_{gs,n} < 1$

## Домашнее задание

Рассчитать  $I_n$  при следующих условиях:

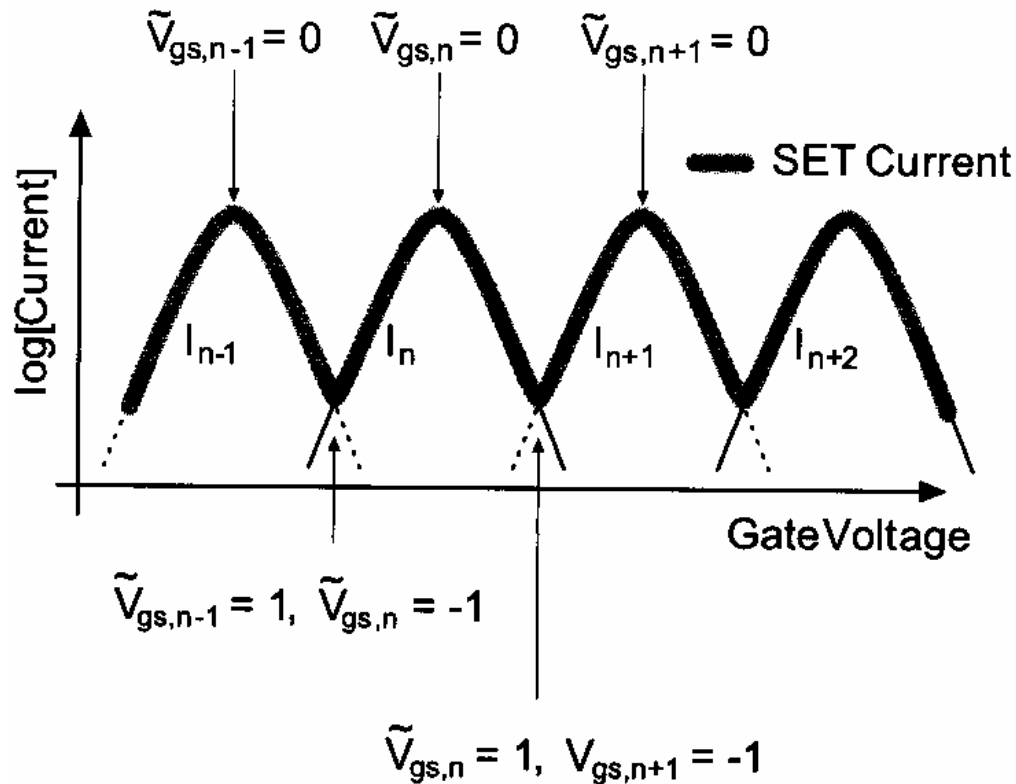
$$C_s = C_d = 1 \text{ аФ}$$

$$C_g = 3 \text{ аФ}$$

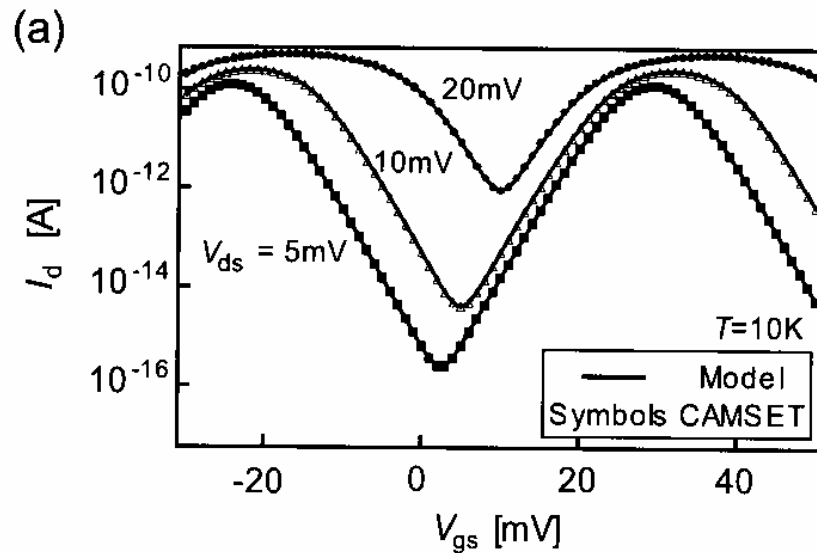
$$R_t = 1 \text{ МОм}$$

$$T = 20 \text{ К}$$

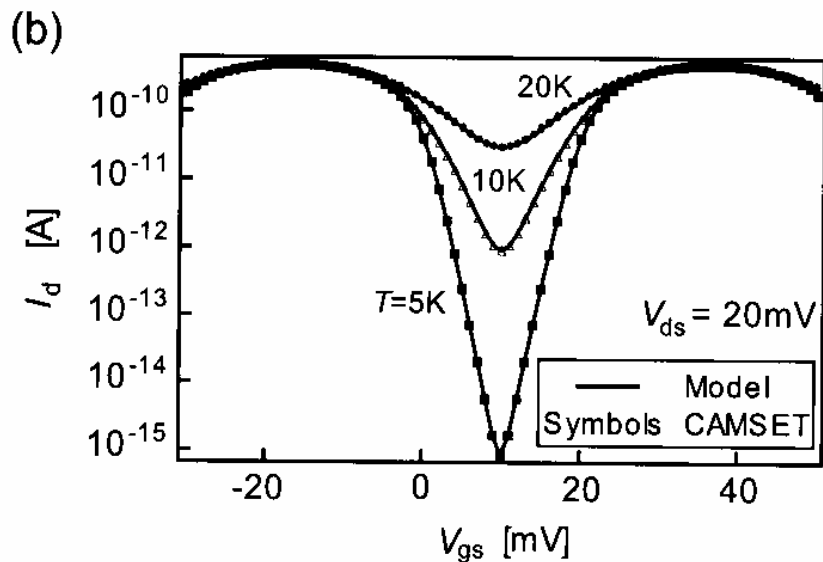
$$V_{dc} = 20 \text{ мВ}$$



## Типичные характеристики ОЭТ



Зависимость тока истока от напряжения между истоком и затвором для различных напряжений между истоком и стоком при заданной температуре

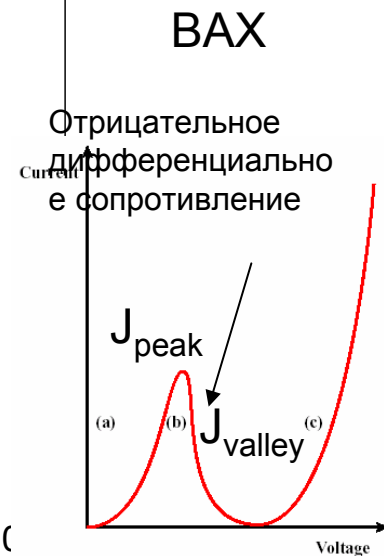
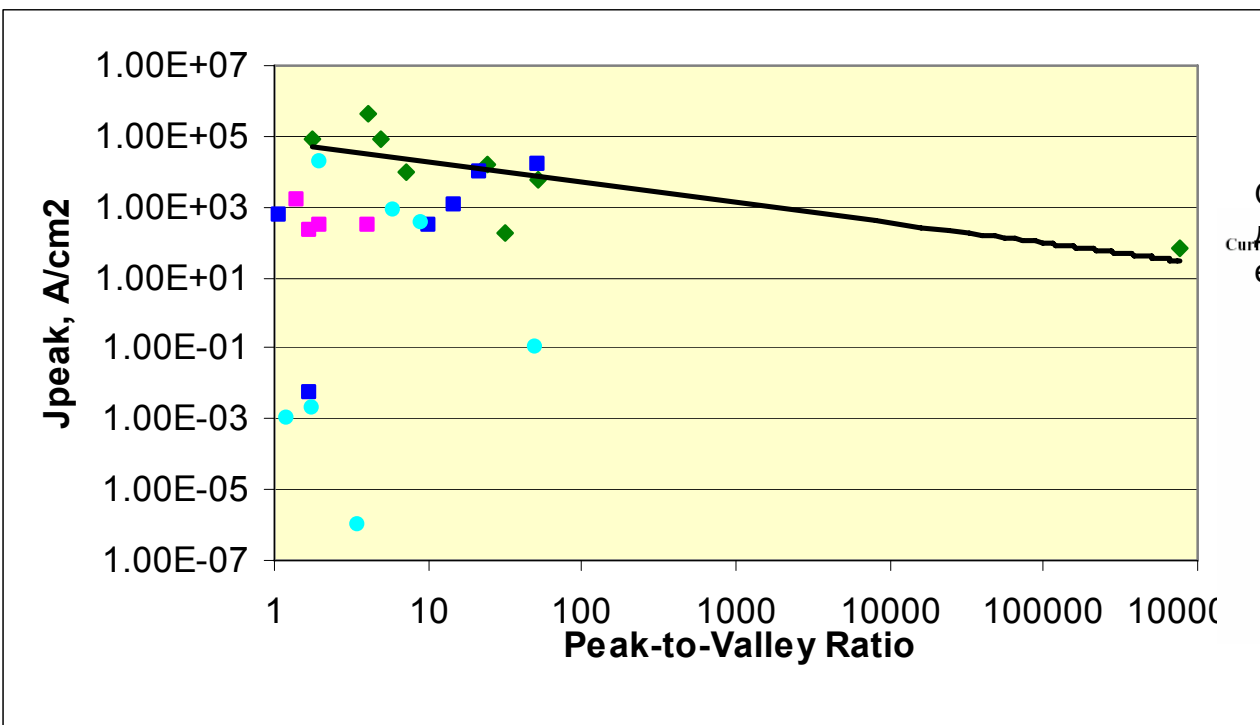


Зависимость тока истока от напряжения между истоком и затвором при различных температурах при заданном напряжении между истоком и стоком

# Резонансные туннельные устройства (диоды и транзисторы)

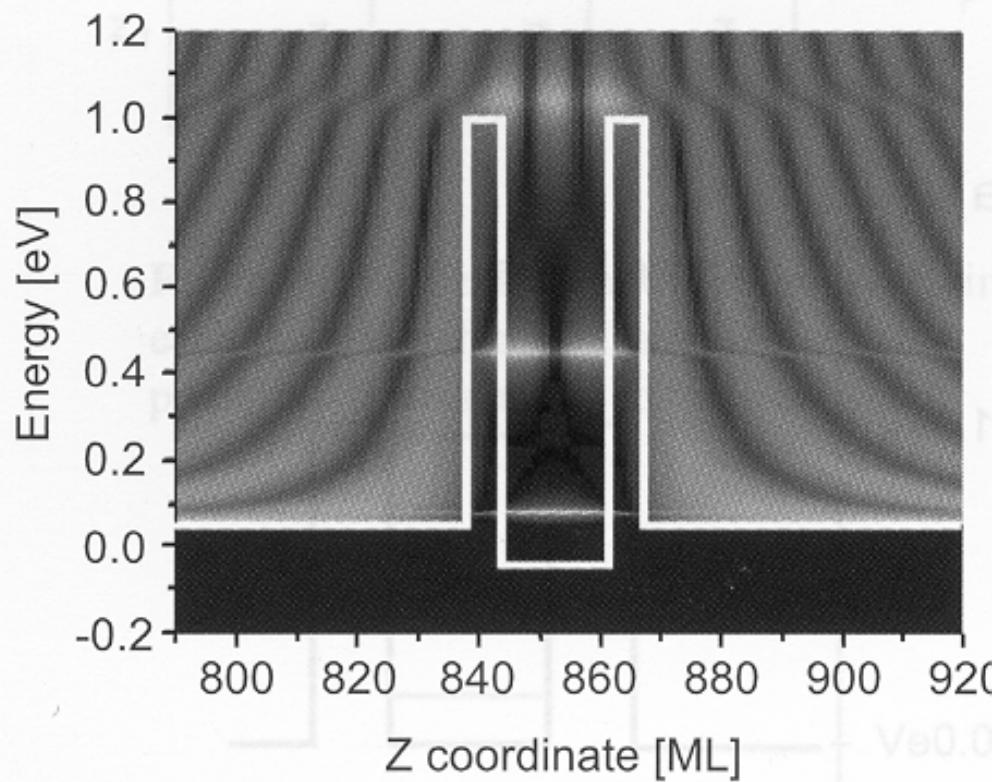
В 2004 году исполнилось 30 лет со дня изобретения резонансной туннельной структуры (CHANG LL, ESAKI L, TSU R / IBM, "RESONANT TUNNELING IN SEMICONDUCTOR DOUBLE BARRIERS", APPL. PHYS. LETT 24 (12): 593-595 1974)

1974	Chang
1986	Reed
1986	Reed
1988	Broekaert
1990	Broekaert
1990	Mehdi
1991	Chen
1991	Smet
1992	Watanabe
1995	Moise
1999	Miyamoto
2000	Watanabe
2001	Ishikawa
2002	Kikuchi
2002	Kado
2002	Wernersson
2002	Malindretos
2002	Bjork
2003	Wang
2003	Ikeda
2004	Xu

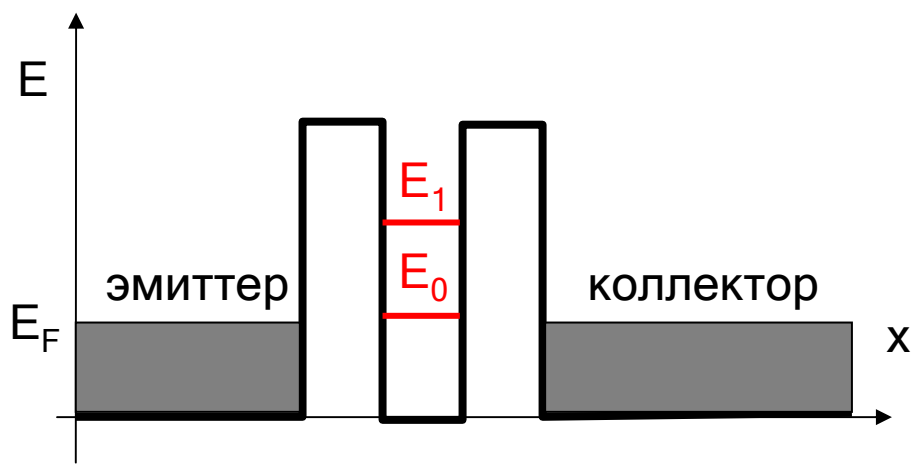
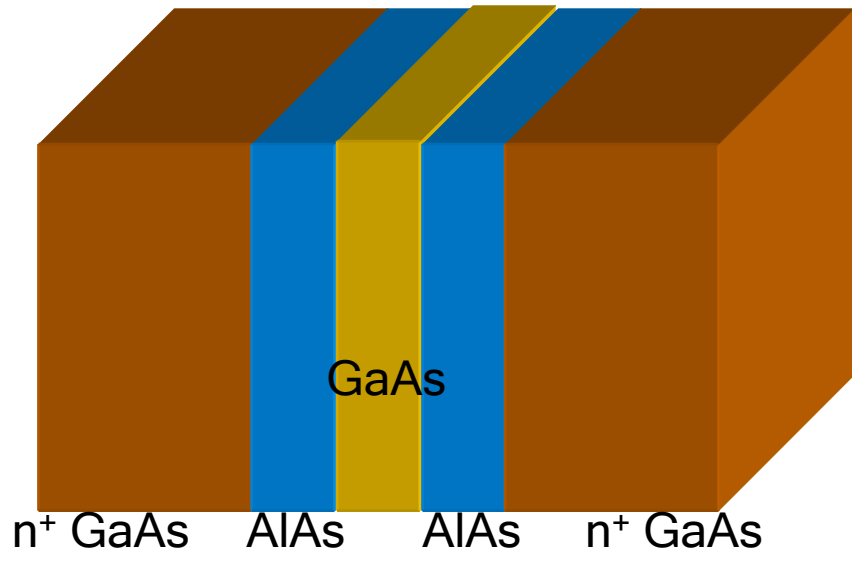




Локальная плотность состояний в РТД

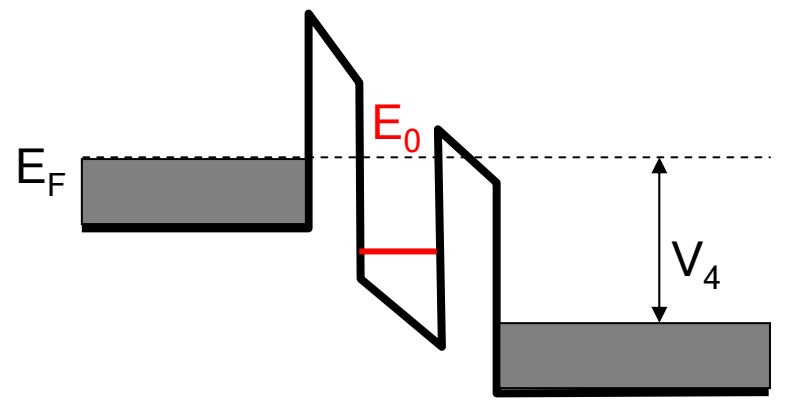
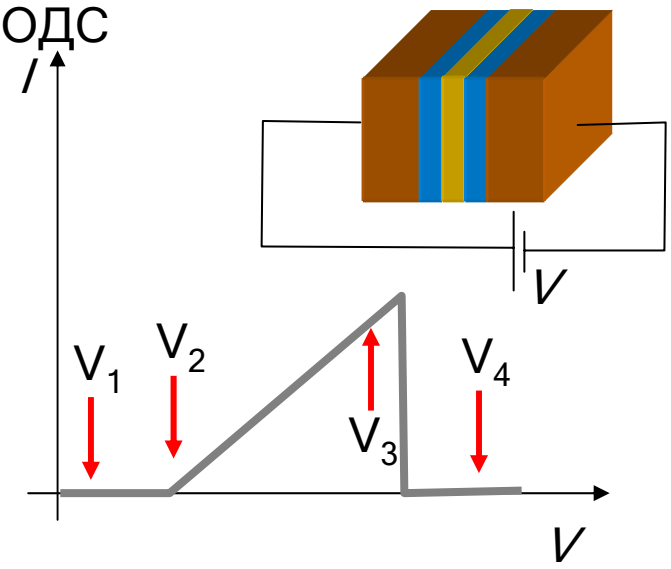
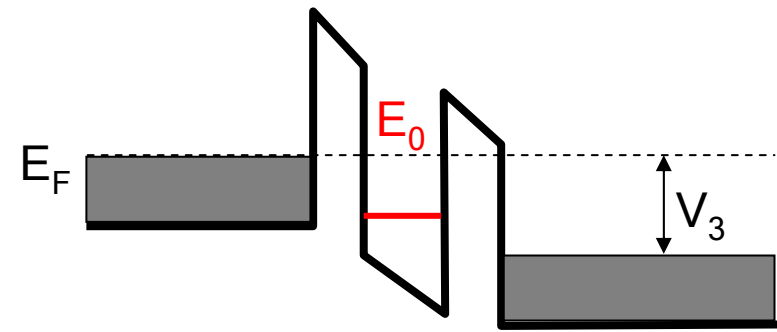
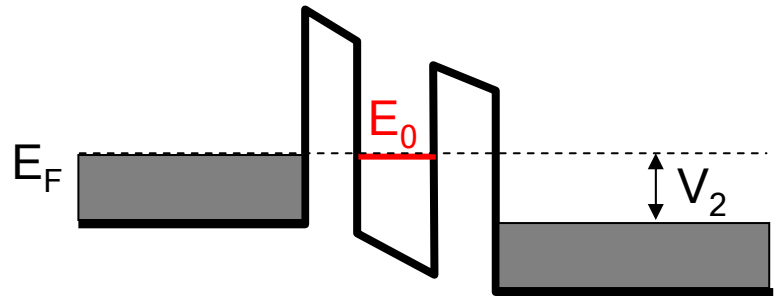
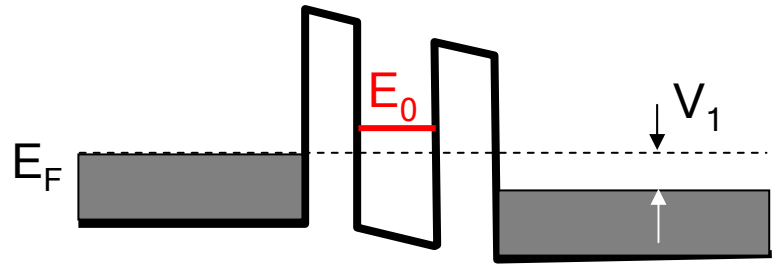






# Negative differential resistance NDR

Отрицательное дифференциальное сопротивление ОДС

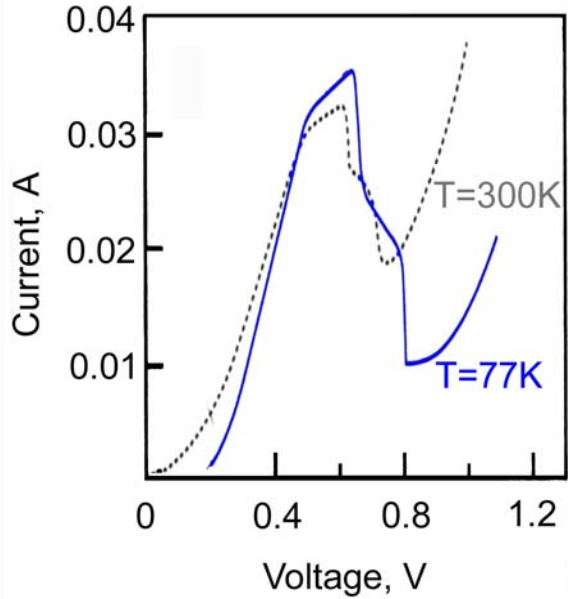


NDR-за счет аккумуляции электронов внутри ямы

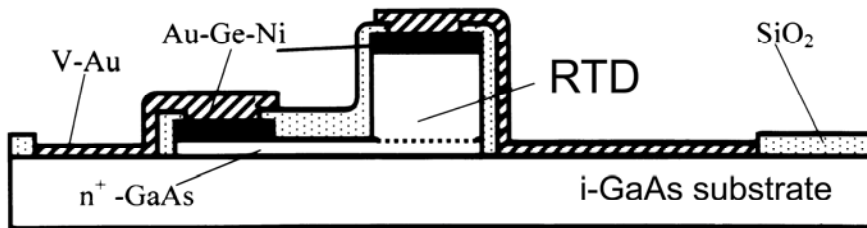
# Эксперимент

GaAs/AlAs

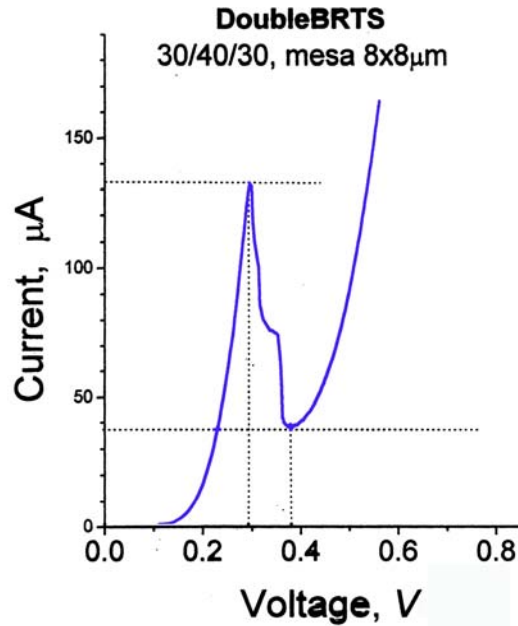
47/40/47, mesa  $\varnothing 28 \mu\text{m}$



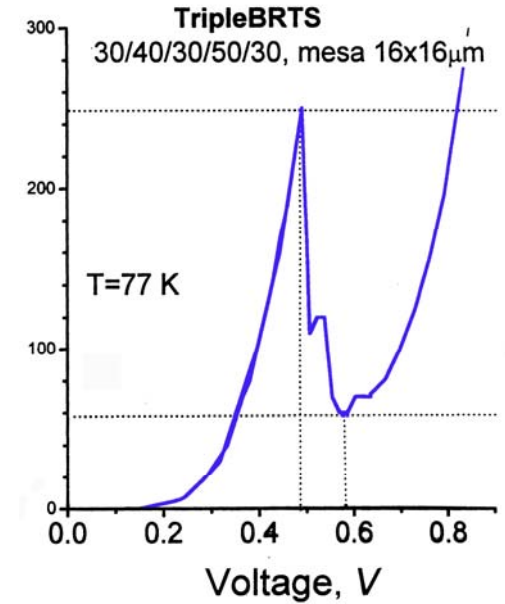
$$I_{\text{peak}}/I_{\text{valley}} = 3.7$$



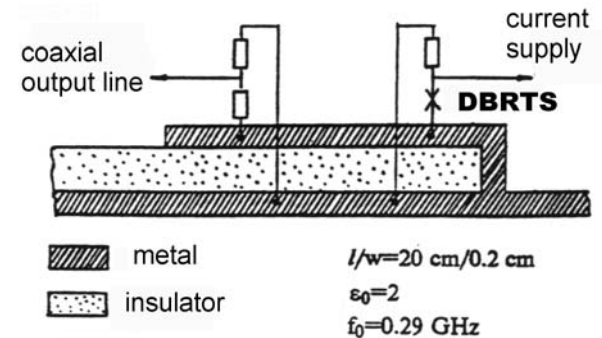
GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As



$$I_{\text{peak}}/I_{\text{valley}} = 3.5$$

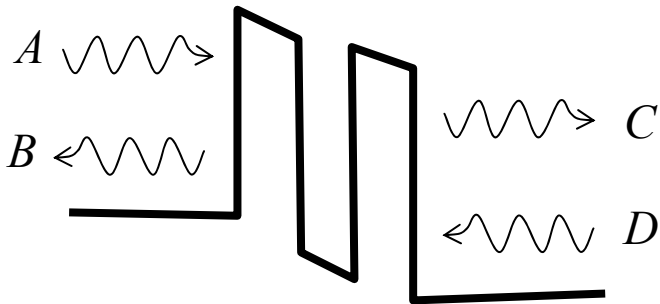


$$I_{\text{peak}}/I_{\text{valley}} = 4.3$$



# Расчет вероятности прохождения

## I. Метод матричного преобразования



Уравнение Шредингера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 \psi(z) + V(z)\psi(z) = E\psi(z)$$

Решение для эмиттера и коллектора:

$$\psi^{\text{emitter}}(z) = Ae^{ik_z^e z} + Be^{-ik_z^e z}$$

$$\psi^{\text{collector}}(z) = Ce^{ik_z^c z} + De^{-ik_z^c z}$$

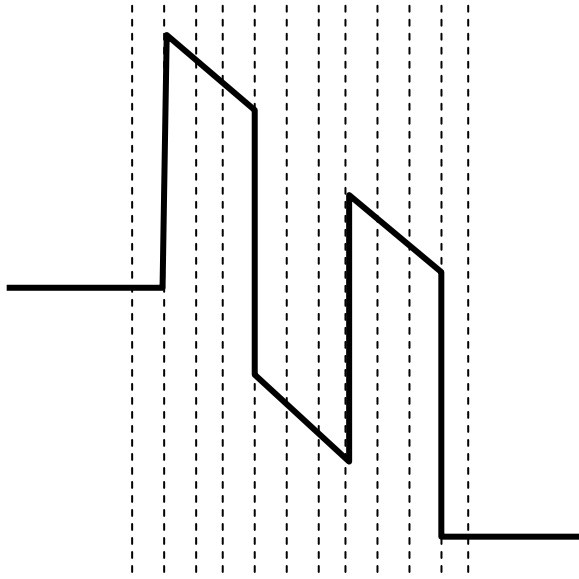
Матрица преобразования  $T$ :

$$\begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}$$

Состояния справа

Состояния слева

Как рассчитать матрицу преобразования  $T$ ?



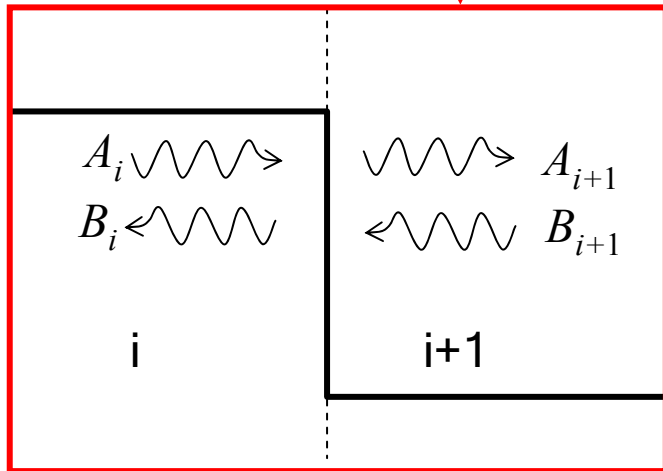
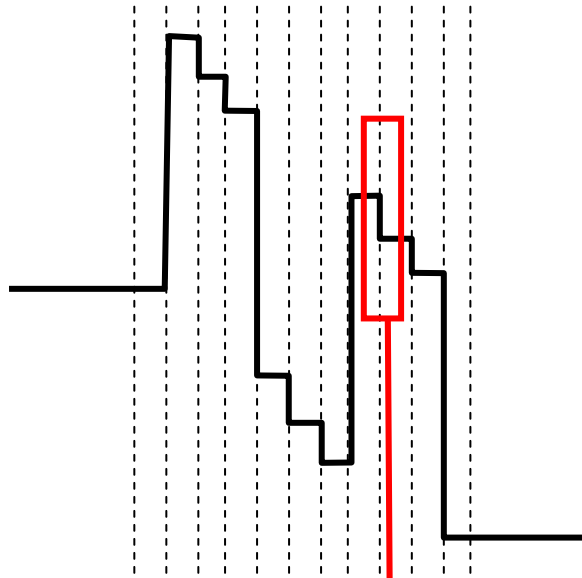
Разделим активную область на  $N$  полос

Тогда переобозначим:

$$A = A_1 \quad B = B_1$$

$$C = A_n \quad D = B_n$$

Считаем для каждой полосы



$$k_i = \hbar^{-1} \sqrt{2m_i(E - V_i)}$$

Дискретизируем потенциал

Рассматриваем граничные условия на  $i$  и  $i+1$  полосах:

Пишем решения для  $i$  и  $i+1$  полос

$$\psi_i(z) = A_i e^{+ik_z^i z} + B_i e^{-ik_z^i z}$$

$$\psi_{i+1}(z) = A_{i+1} e^{+ik_z^i z} + B_{i+1} e^{-ik_z^i z}$$

Условия непрерывности

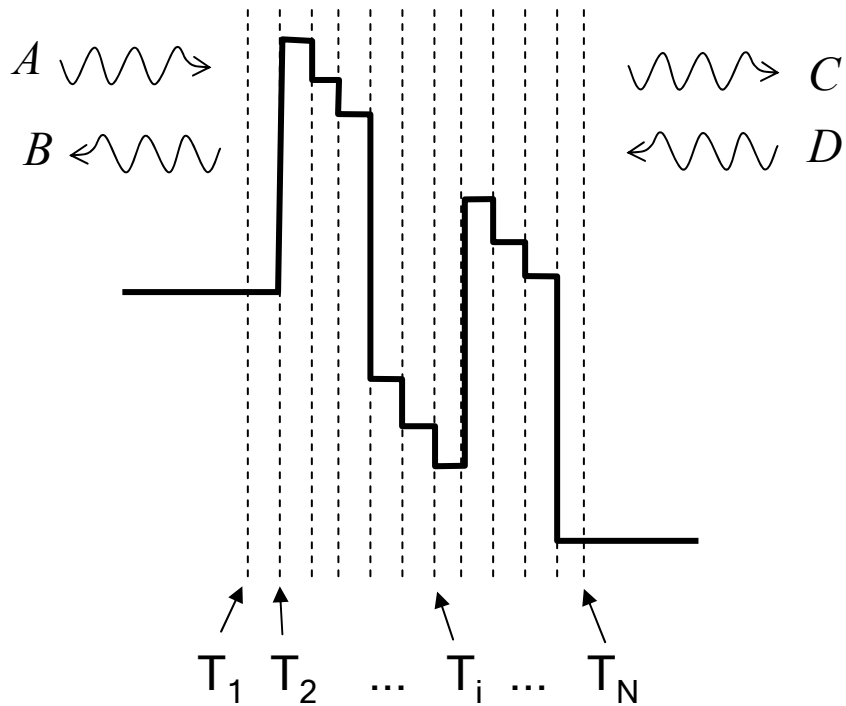
$$\psi^i(z_i) = \psi^{i+1}(z_i)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \psi^i(z_i) = \frac{\partial}{\partial z} \psi^{i+1}(z_i)$$

Матричное уравнение преобразования от  $i$  к  $i+1$  полосе

$$\begin{pmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \end{pmatrix} = T_i \begin{pmatrix} A_i \\ B_i \end{pmatrix}$$

$k$ -волновой вектор электрона в области  $i$



Полная матрица преобразования:

$$\begin{pmatrix} A_n \\ B_n \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix}$$

Обозначим

$$e^{ik_z^i z} = \psi_{i+} \quad e^{-ik_z^i z} = \psi_{i-}$$

$$T = T_N T_{N-1} \dots T_i \dots T_2 T_1$$

Тогда матрица  $i$ -го преобразования

$$T_i = \begin{bmatrix} \psi_{i+} & \psi_{i-} \\ \frac{1}{m_i^*} \psi'_{i+} & \frac{1}{m_i^*} \psi'_{i-} \end{bmatrix}$$

## Вероятность прохождения через барьер

$$T_C = \frac{k_n m_1^* |A_n|^2}{k_1 m_n^* |A_1|^2}$$

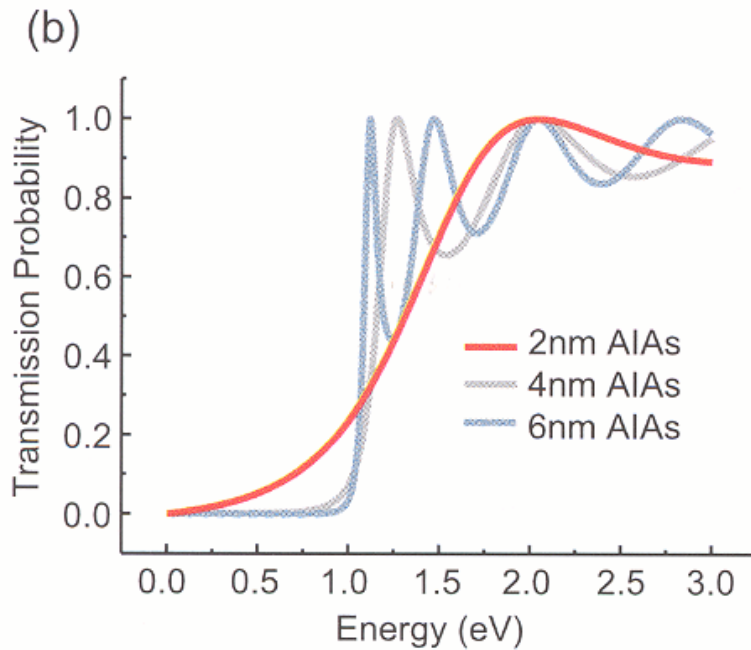
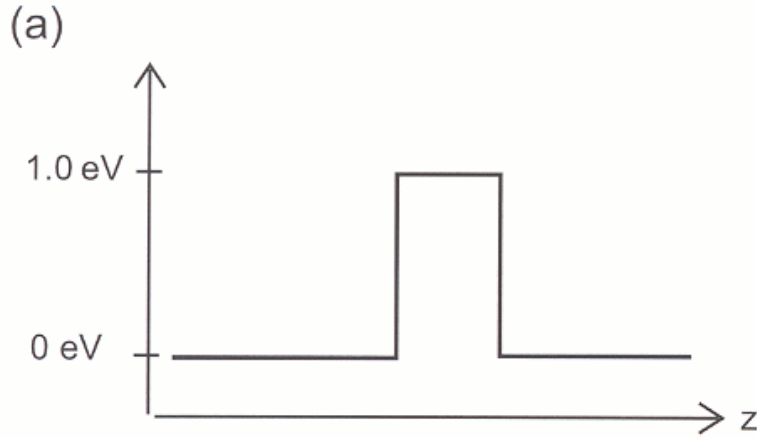
$$A_n = \frac{\det T}{T_{22}} A_1$$

$$\det T = \frac{k_1 m_n^*}{k_n m_1^*}$$

$$T_C = \frac{k_1 m_n^*}{k_n m_1^*} \frac{1}{|T_{22}|^2}$$



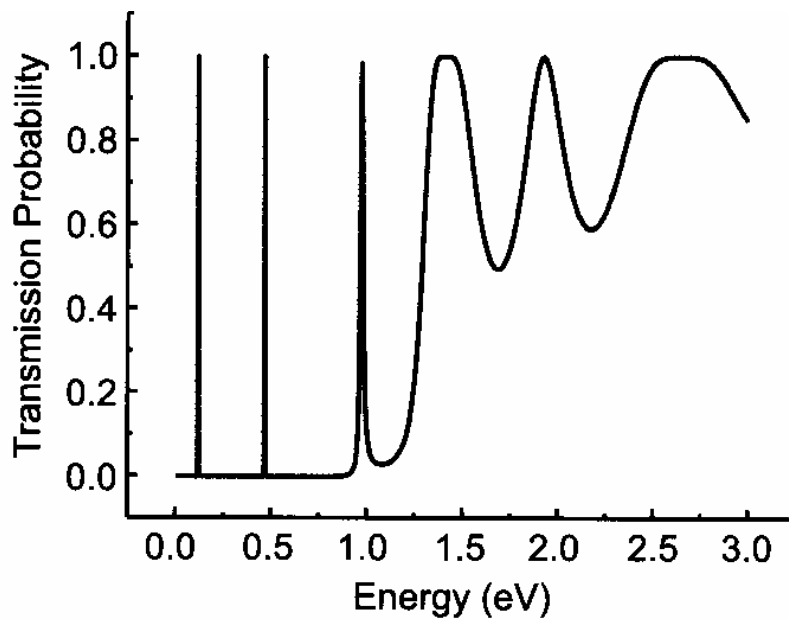
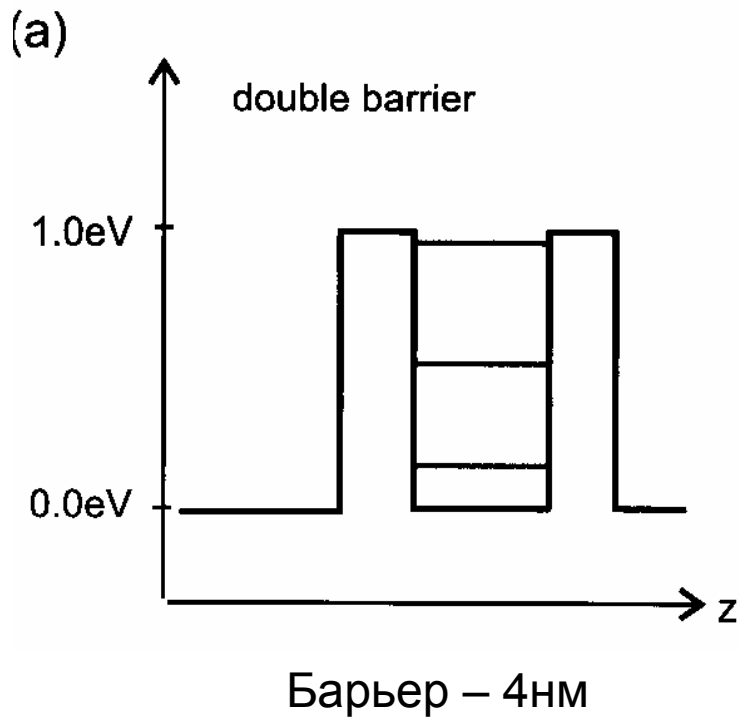
# Вероятность прохождения через одиночный барьер



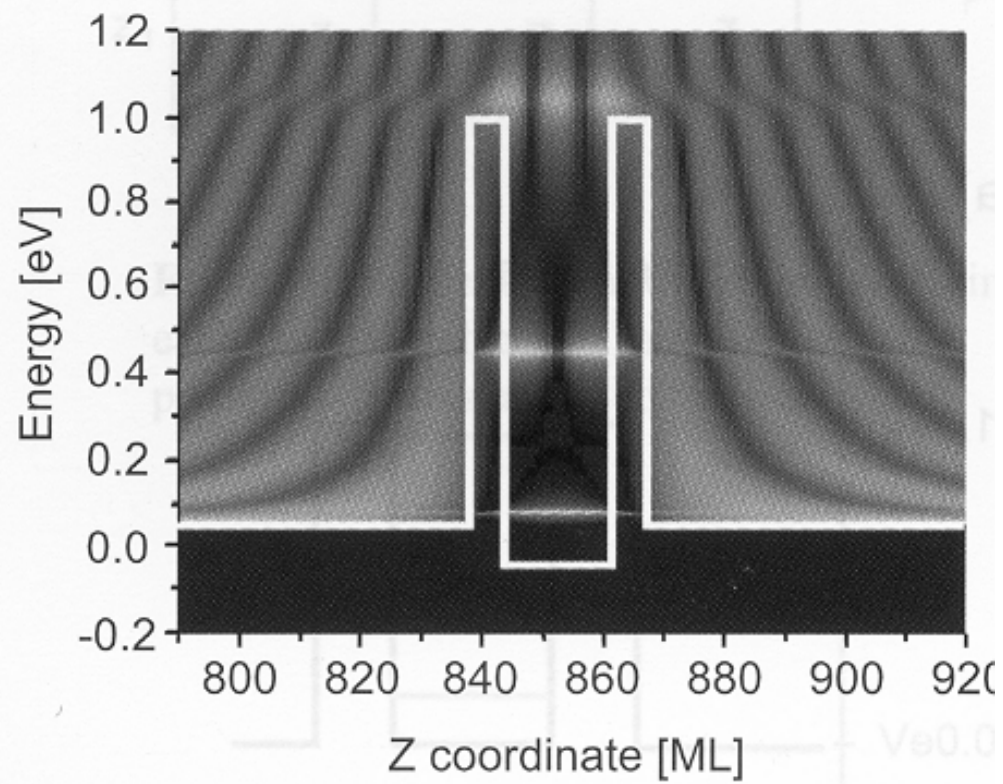
Осцилляции возникают вследствие интерференции прошедших и отраженных волн

Энергия электрона

# Вероятность прохождения через двойной барьер



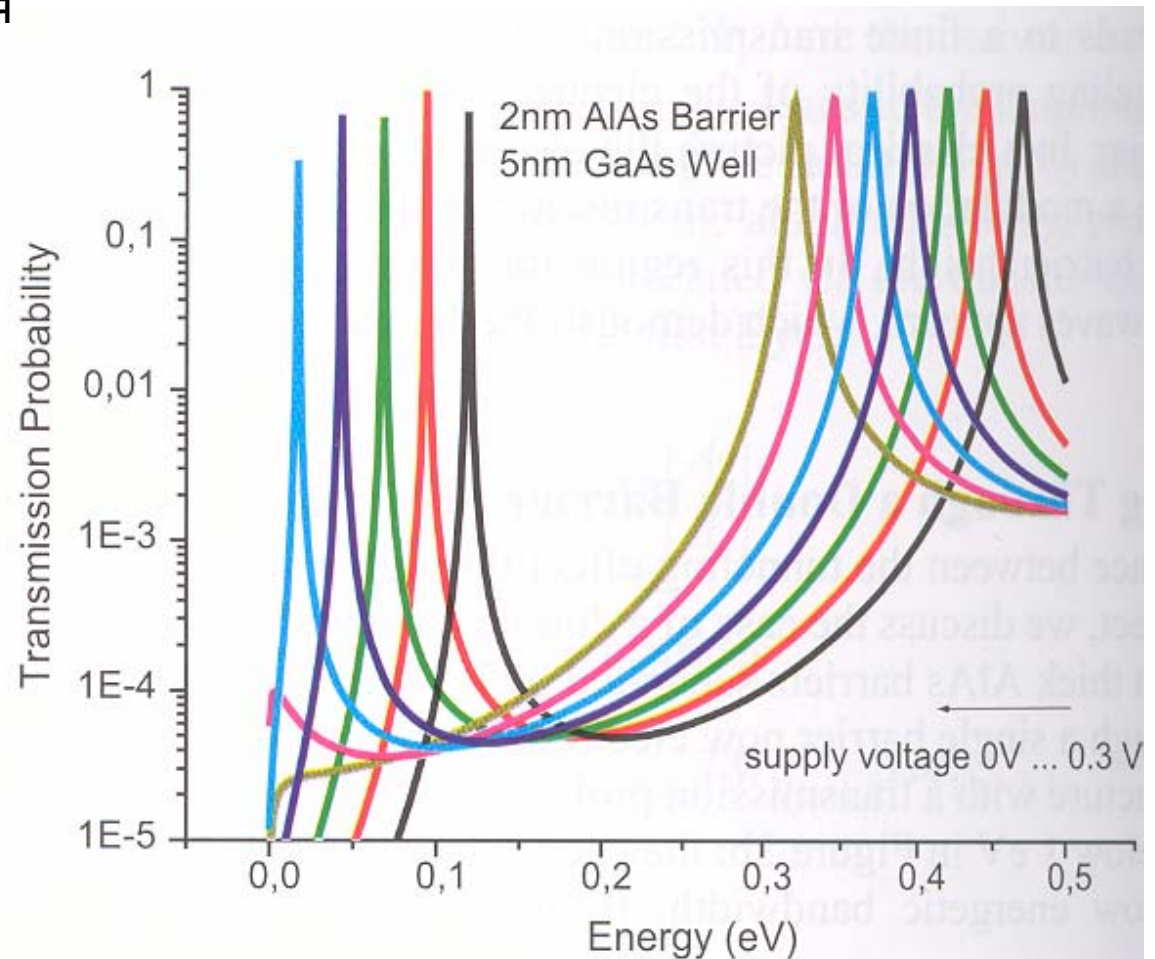
Резонансные «открытые» каналы!



МОНОСЛОИ

Резонансный туннельный диод (РТД)-  
гетероструктура с двойным барьером и  
расстоянием между барьерами в несколько  
мнонслоев

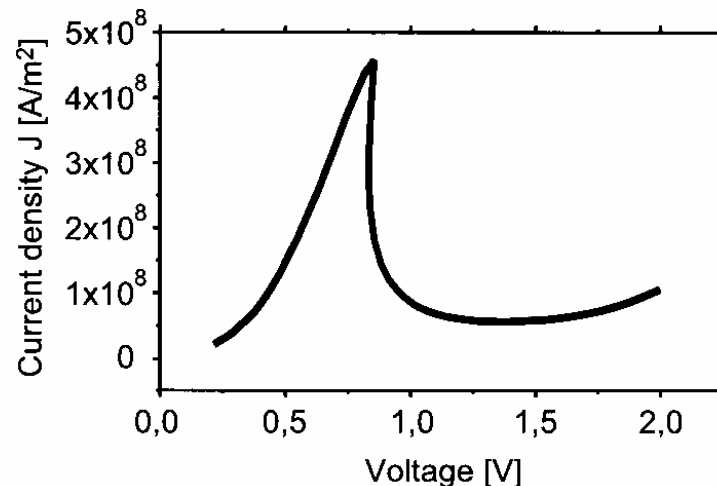
Вероятность прохождения  
электрона через РТД  
зависит от приложенного  
напряжения



# BAX

Формула Тсу-Есаки

$$j = \frac{2|e|}{(2\pi)^3} \int_0^\infty dk_z \int_0^\infty dk_{\parallel} (f_l(W) - f_r(W + eV)) T_c(W_z, V) \frac{1}{\hbar} \frac{\partial W_z}{\partial k_z}$$

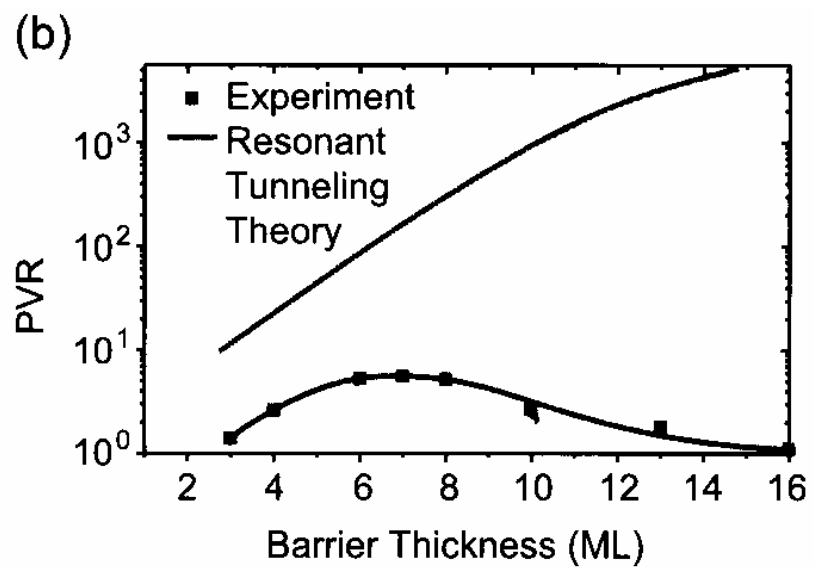
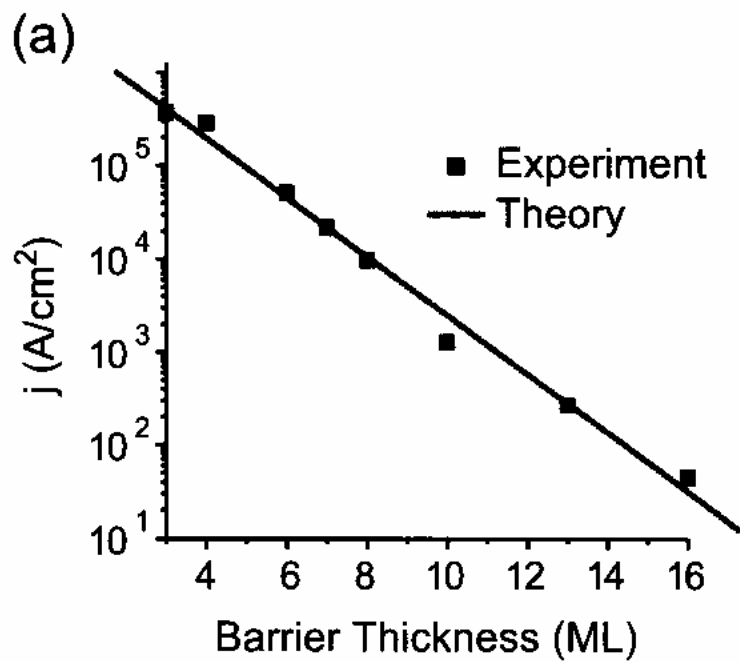


$f(W)$  - Распределение Ферми



**Leo Esaki**  
**Нобелевская премия**  
**по физике 1973**

$$j(V) = \frac{4\pi|e|m^*k_B T}{(h)^3} \int_0^\infty dW_z T_c(W_z, V) \ln \left| \frac{1 + \exp\left(\frac{W_F - W_z}{k_B T}\right)}{1 + \exp\left(\frac{W_F - W_z - eV}{k_B T}\right)} \right|$$



Peak-to-valley отношение

# РТД устройства Быстродействие

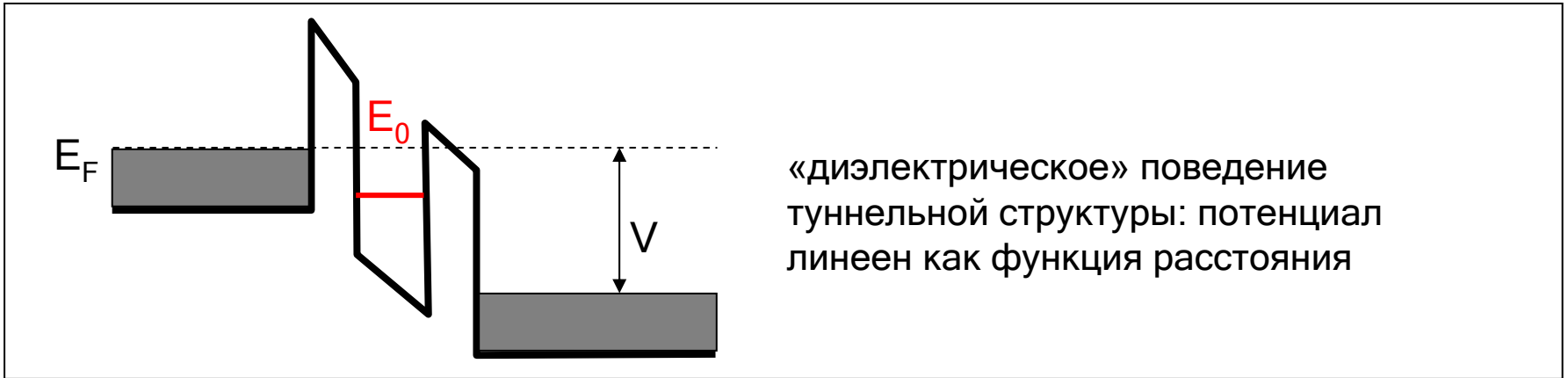
Быстродействие по порядку величины равно «резонансному времени жизни»

$$t_{life} = \hbar / \Gamma_0$$

$\Gamma_0$  - ширина резонансного уровня

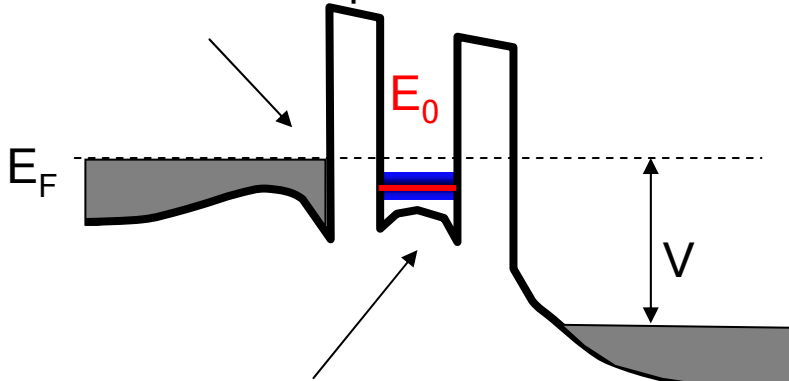
Определяется «коэффициентом ослабления» барьера и его шириной

## Эффекты встроенного заряда



«диэлектрическое» поведение  
туннельной структуры: потенциал  
линеен как функция расстояния

Накопление заряда  
в области эмиттера



Накопление заряда в яме

$$\Delta E \Delta t \sim \hbar$$

Электроны проводят в яме время  $\Delta t$

Количественное моделирование РТД  
требует самосогласованного решения  
уравнений Пуассона и Шредингера

доноры → электроны

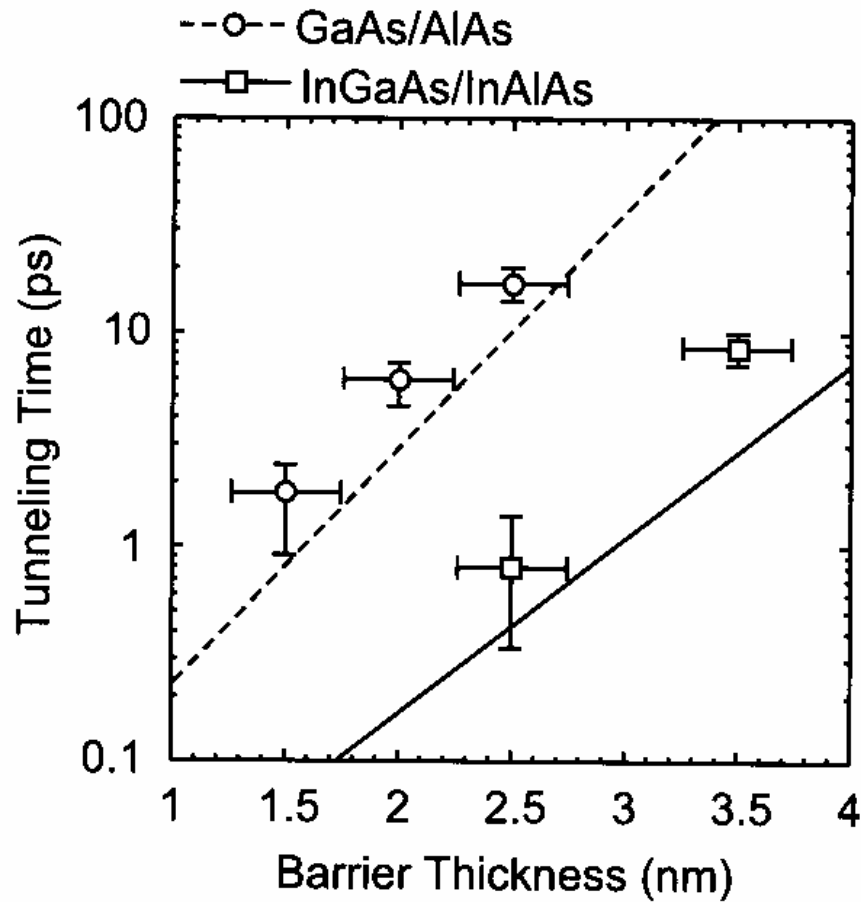
$$\epsilon \epsilon_0 \nabla^2 \phi(z) = -e(N_D^+(z) - n(z))$$

Электростатический потенциал

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 \psi(z) + [V_c(z) + e\phi(z)] \psi(z) = E\psi(z)$$

Накопление заряда в яме экранирует  
приложенное напряжение

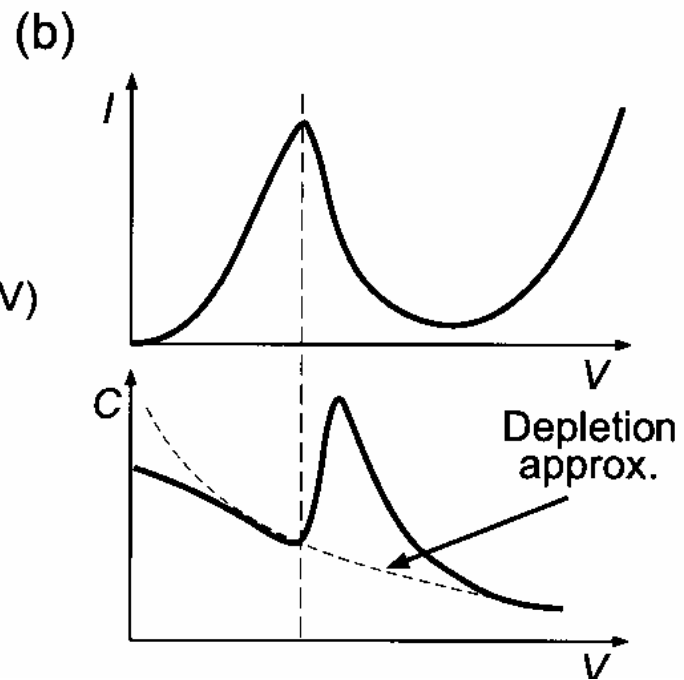
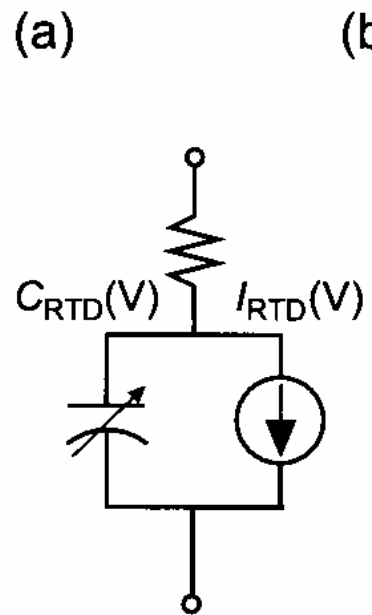




- 712 ГГц
- ТГц
- Время переключения 1.5 пс

Увеличение реального времени  
 — за счет

- Интерфейсной шероховатости
- Процессов неупругого рассеяния электронов
- RC времени зарядки емкости



Эквивалентная схема

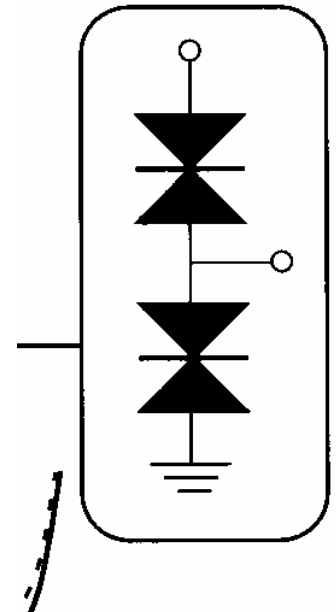
## Применение РТД

РТТ (резонансный туннельный транзистор)

- Комбинированный РТД&транзистор

# MOBILE – концепция Monostable-Bistable Transition Logic Element

- 2 последовательно соединенных NDR устройства
- Осциллирующее напряжение (bias) инициирует переход из одного состояния в другое (mono-bi)
- Имеется третий вход для модуляции тока



# График нагрузки

# Потенциальные ривые

