



**Беликов Андрей Иванович, к.т.н., доцент**  
кафедра МТ-11 "Электронные технологии в машиностроении"

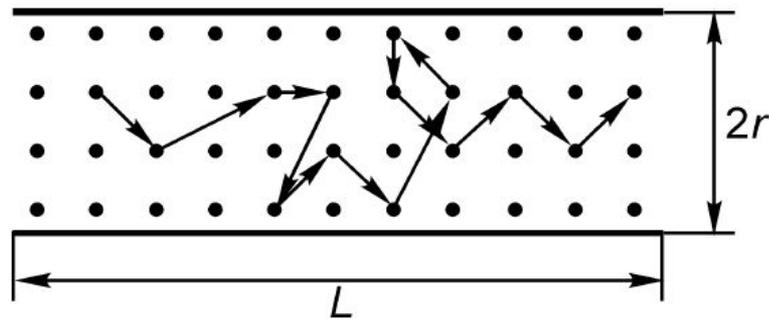
# **Основы наноэлектроники и нанотехнологий**

**Москва, 2014**

## Баллистический транспорт электронов в 1D - структурах

Диффузионный механизм

*a*



Средняя длина свободного пробега  $l$  – путь электрона между двумя последовательными актами рассеяния.

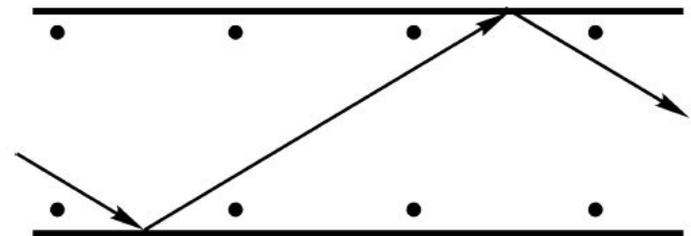
Для металлов  $l \sim 10$  нм

Для полупроводников –  $l \sim 50-120$  нм

Например, для Si, GaAs:  $l = 50-100; 120$  нм

Баллистический механизм

*б*



Квантуемая проводимость

$$G = \frac{I}{U} = \frac{2e^2}{h} N$$

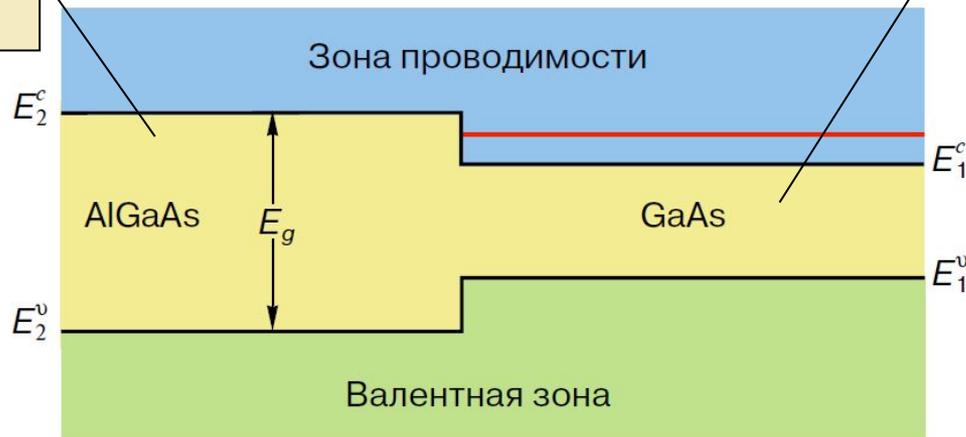
Квант сопротивления:

$$\frac{h}{2e^2} \approx 12,9 \text{ кОм}$$

$N$  – число разрешенных состояний в проводнике

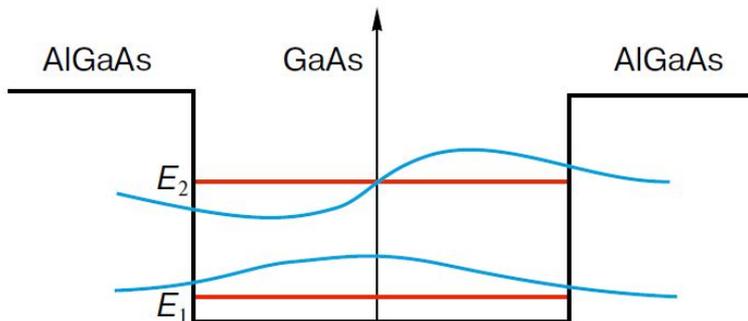
## Формирование квантовых барьеров и ям

Широкозонный п/п  
 $E_g = \text{до } 2.2 \text{ эВ}$

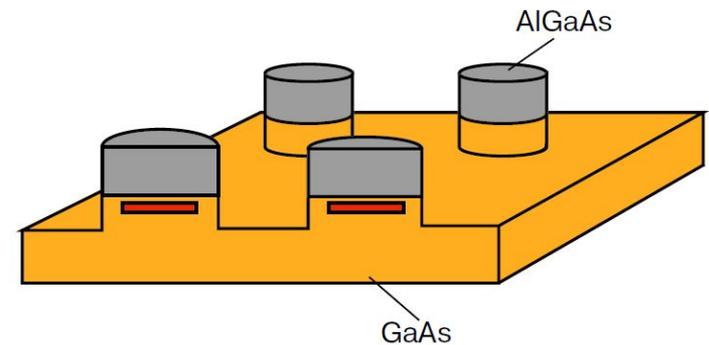


Узкозонный п/п  
 $E_g = 1.5 \text{ эВ}$

### Квантовая яма



### Квантовая точка



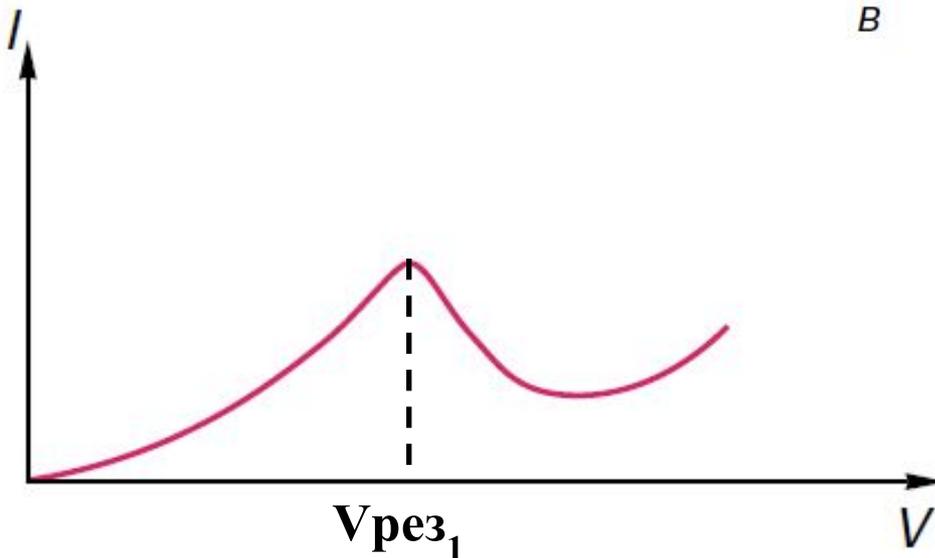
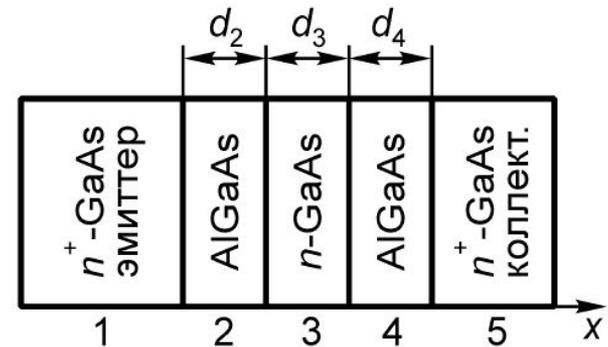
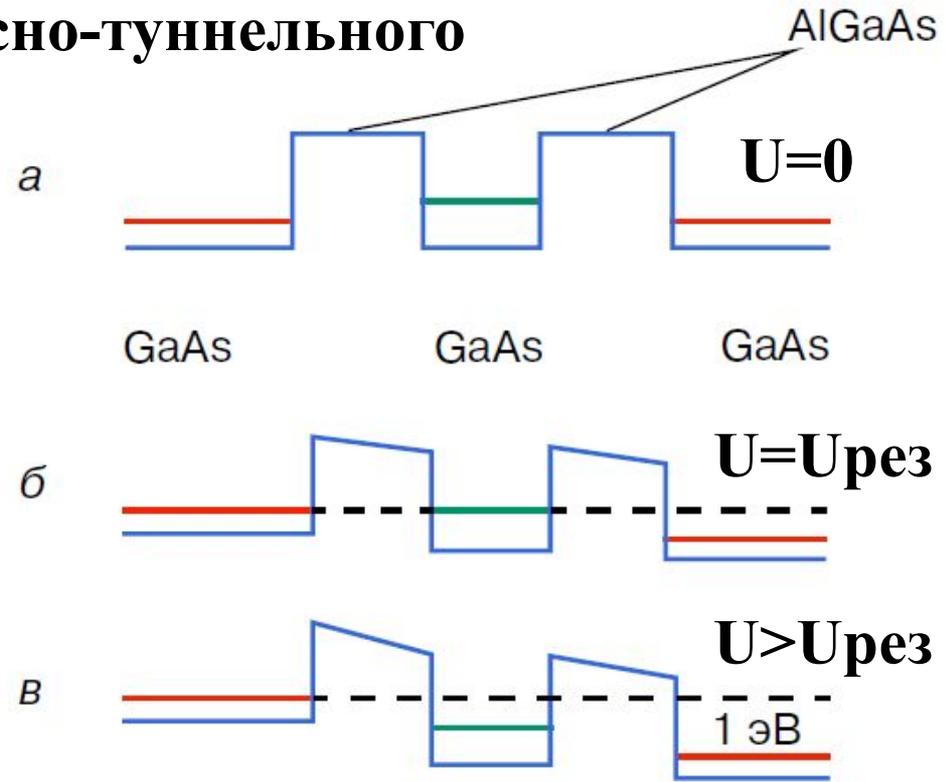
МГТУ имени Н.Э.Баумана, кафедра МТ-11 "Электронные технологии в машиностроении"

## Принцип работы резонансно-туннельного диода и его ВАХ

1958 г. Л.Исаки (Япония) – исследование резонансного туннелирования.

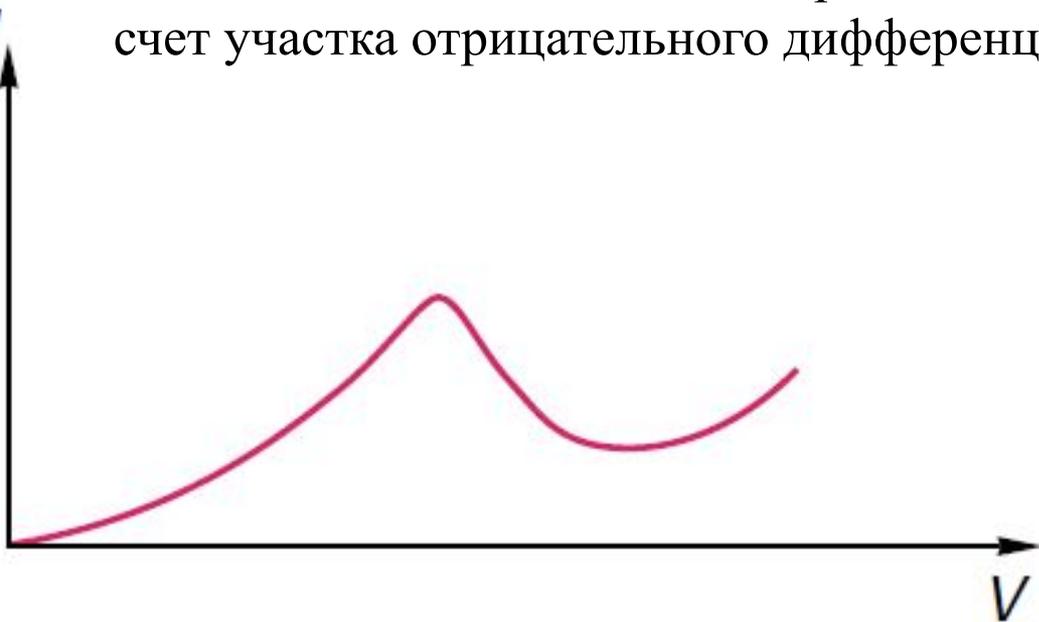
1962 г. Л.В.Келдыш – возможность создания особой периодической структуры (сверхрешетка).

1974 г. – Исаки и Чанг – создают первый РТД



## Особенности резонансно-туннельного диода

1. Малое время переключения (пикосекунды –  $10^{-12}$ ).
2. Низкая потребляемая мощность.
3. Большие плотности тока при малых размерах.
4. Существенная нелинейность ВАХ.
5. Возможность спонтанной генерации электрических колебаний (за счет участка отрицательного дифференциального сопротивления).



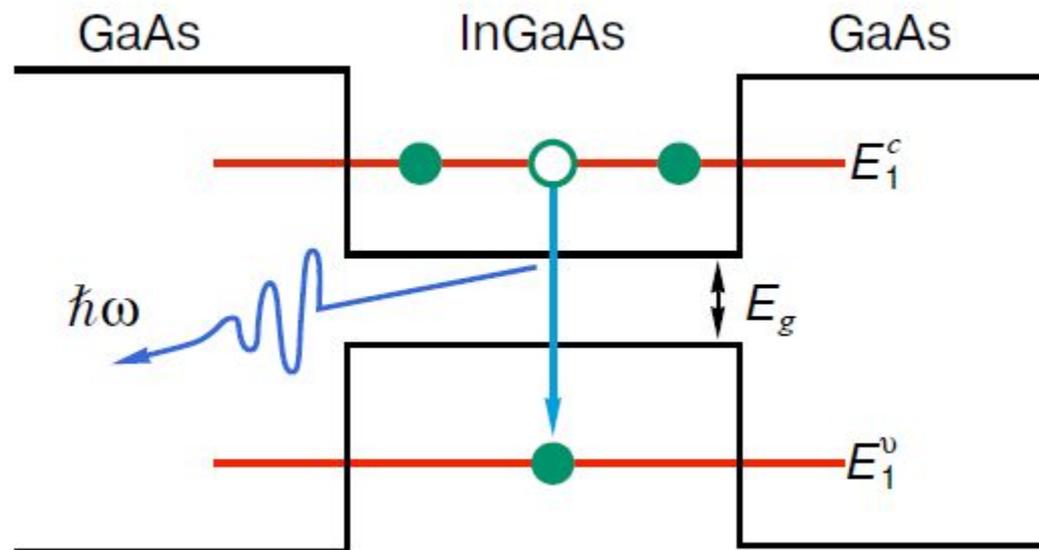
1. Используемые материалы: GaAs, AlAs, InP, InAs.

## Полупроводниковый лазер на квантовой яме

$$\hbar\omega = E_g + E_1^C + E_1^V$$

$\omega$  - частота излучения,  
 $E_g$  – ширина запрещенной зоны,  
 $E^C$  – зона проводимости,  
 $E^V$  – валентная зона

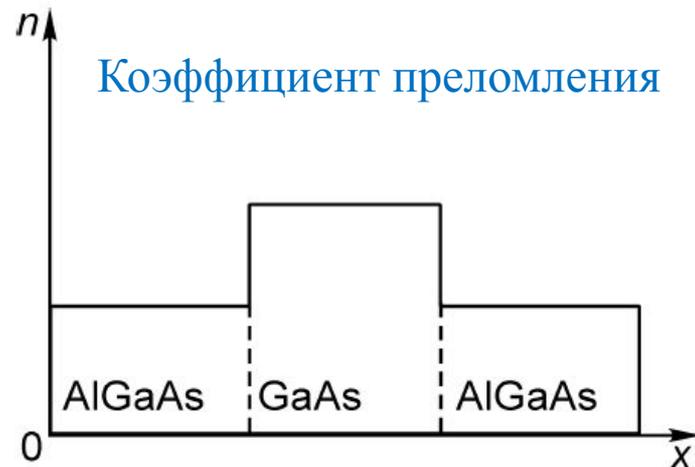
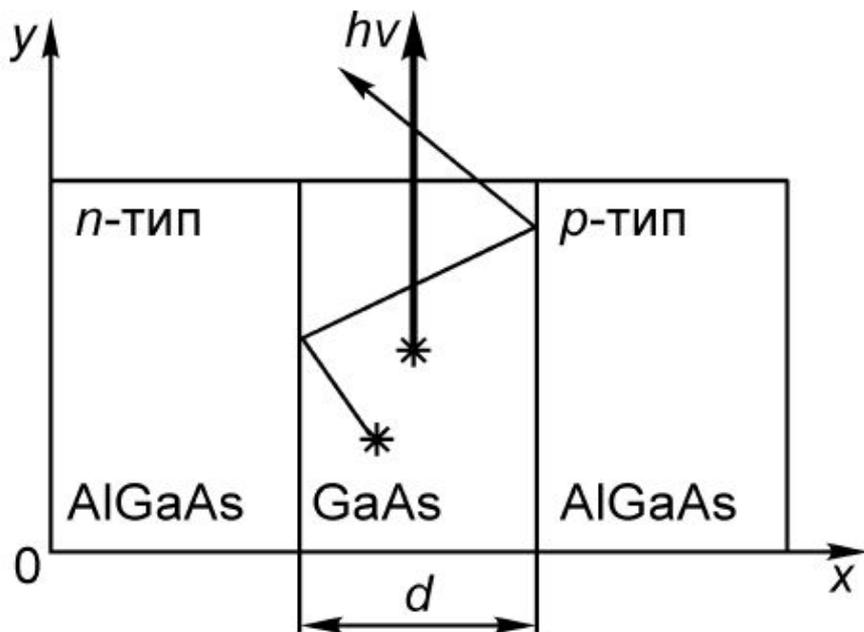
Высокий (60%)  
 КПД



# Лазеры на двойных гетероструктурах

7

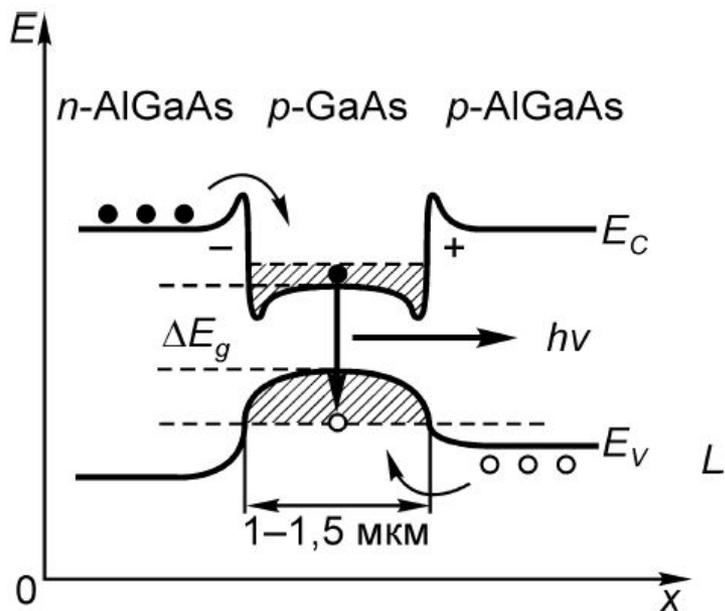
Формирование излучения



**Нобелевская премия 2000 г.** - исследования в области физики полупроводников и полупроводниковой технологии: полупроводниковые гетероструктуры.

Ж.И.Алферов (Россия), Г.Кремер, Дж.Килби (США)

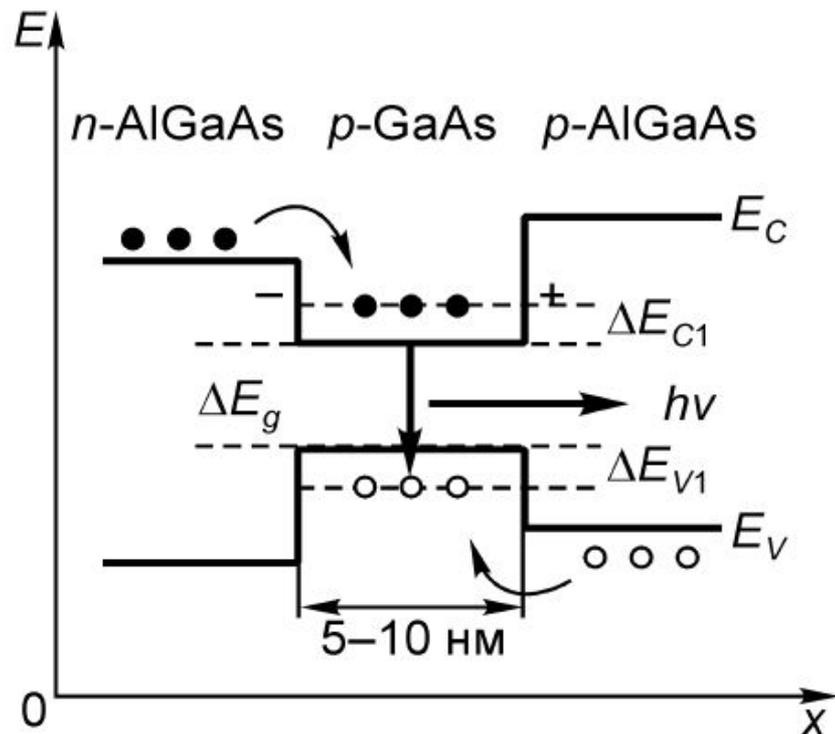
## ДГС-лазер классический



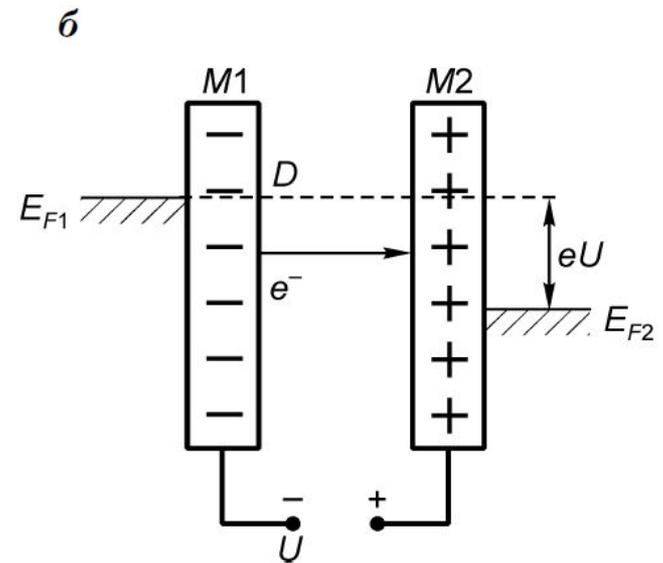
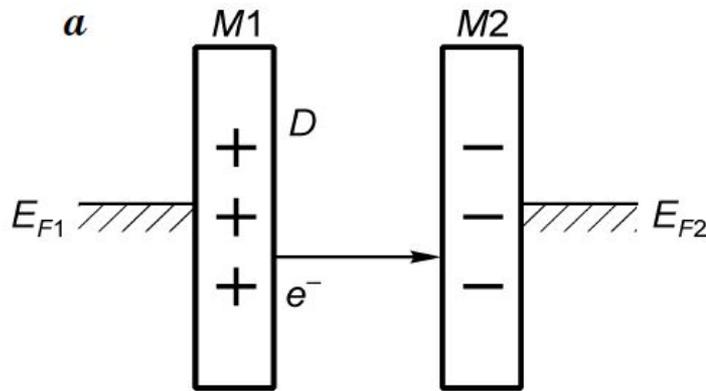
$$h\nu = \Delta E_g$$

$$h\nu = \Delta E_g + \Delta E_{C1} + \Delta E_{V1}$$

## ДГС-лазер на квантовой яме



**Кулоновская блокада** – величина разности потенциалов эл. поля, препятствующая туннелированию электронов



$$\Delta E = \frac{e^2}{2C}$$

$$eU_k = \frac{e^2}{2C}$$

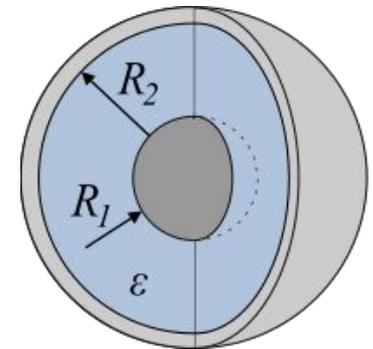
$$U_k = \frac{e}{2C}$$

Наличие кулоновской блокады:

$$kT < \Delta E$$

$$\Delta E = \frac{e^2}{2C} \quad \square \quad C < \frac{e^2}{2kT}$$

Емкость сферического конденсатора  
(пример) -  $C_{сф} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1$

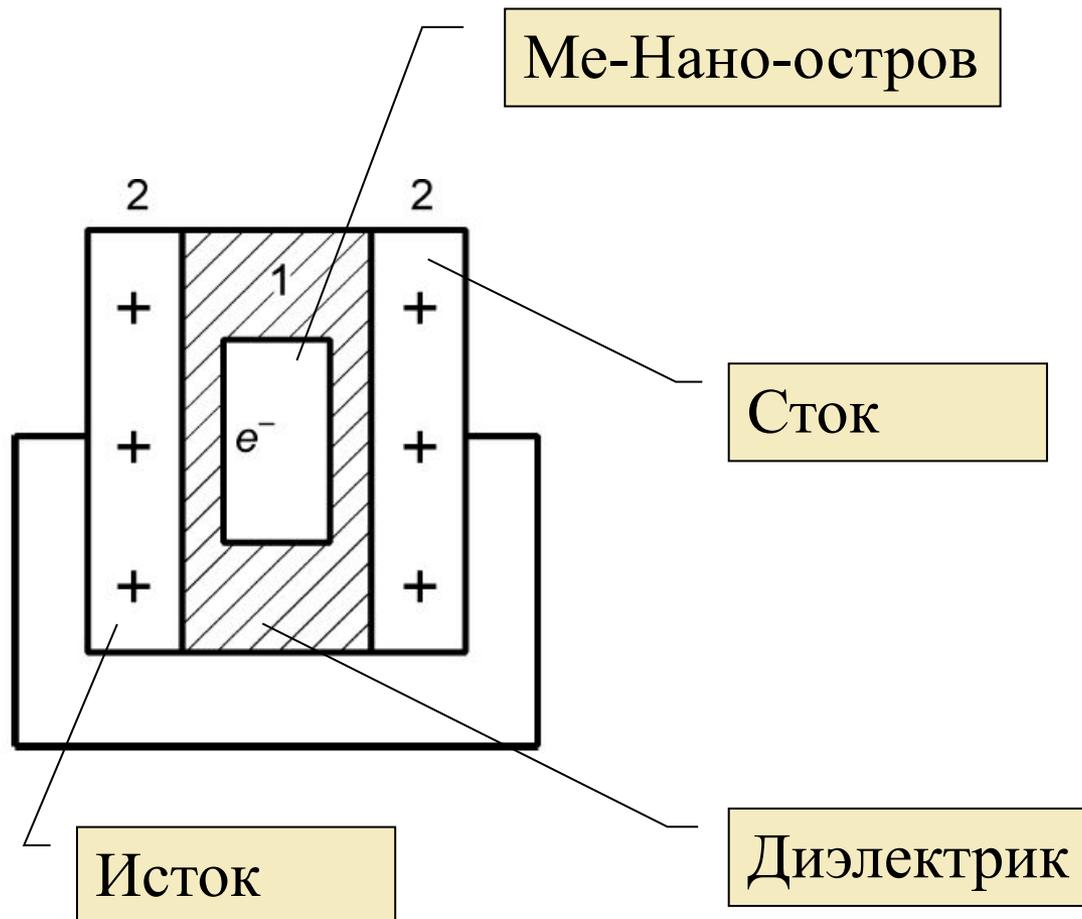


Для температур:

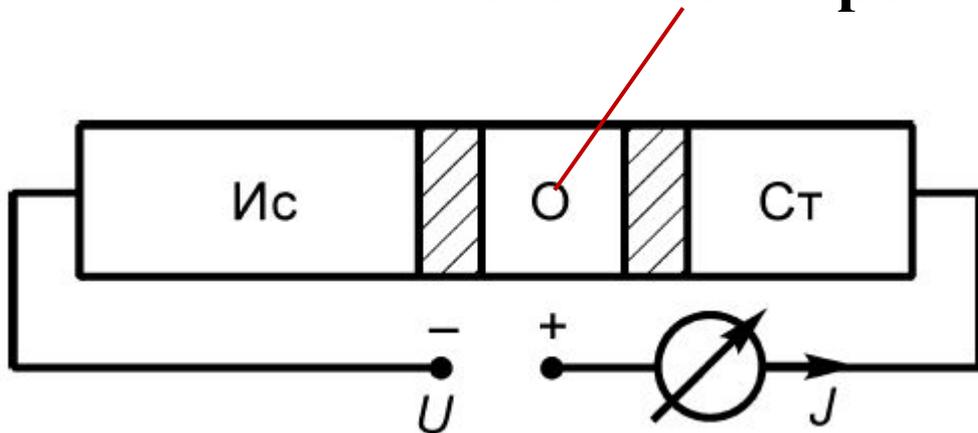
**1К:**  $C \sim 9 \cdot 10^{-16}$  Ф, размер конденсатора (для  $\epsilon=10$ ) –  $R_1 \sim 1$  мкм

**300 К:**  $C \sim 3 \cdot 10^{-18}$  Ф,  $R_1 \sim 3$  нм

## Использование кулоновской блокады в одноэлектронных приборах

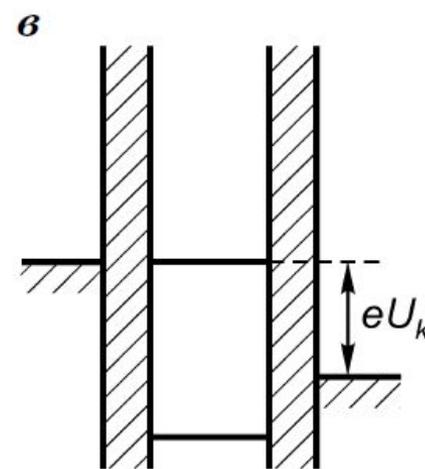
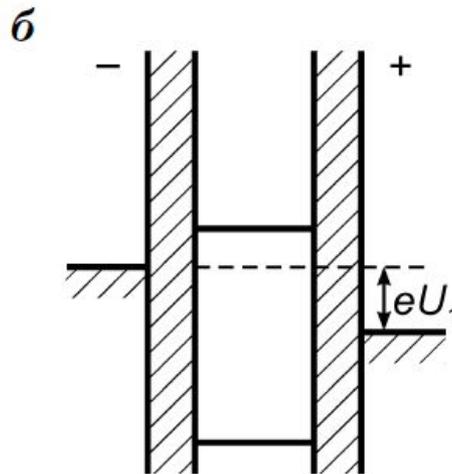
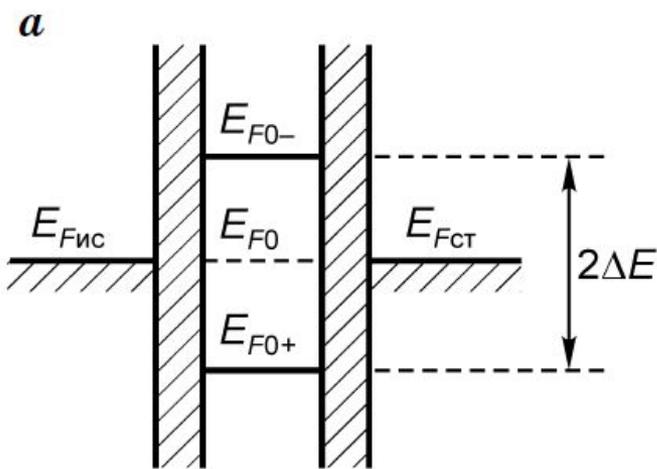
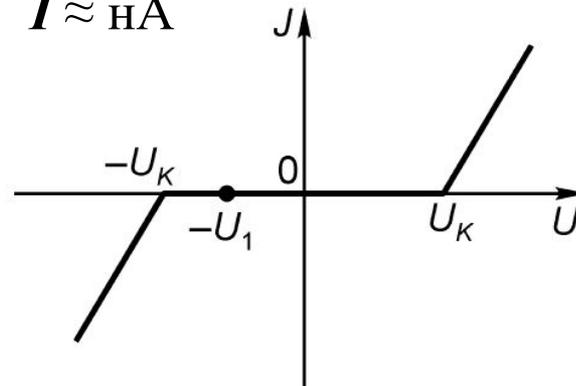


## Элемент на основе nano-острова

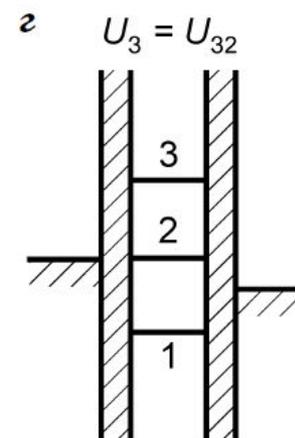
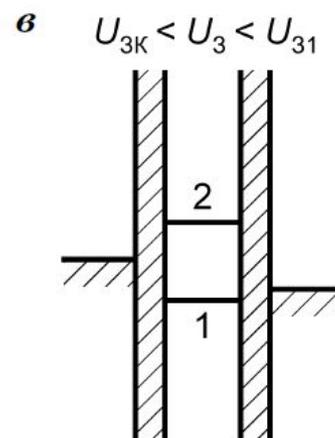
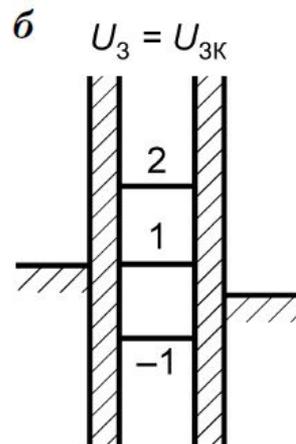
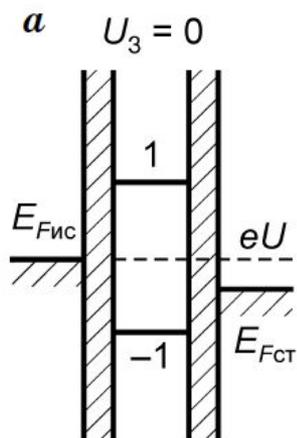
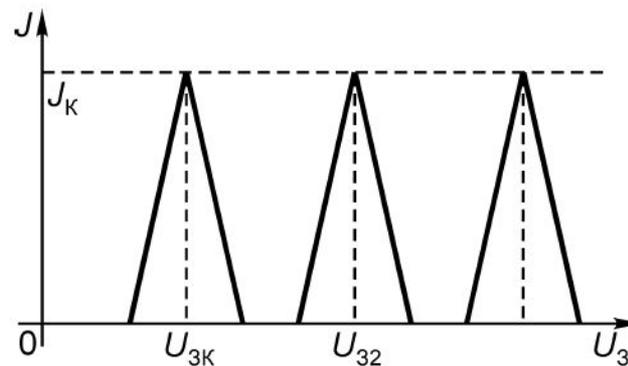
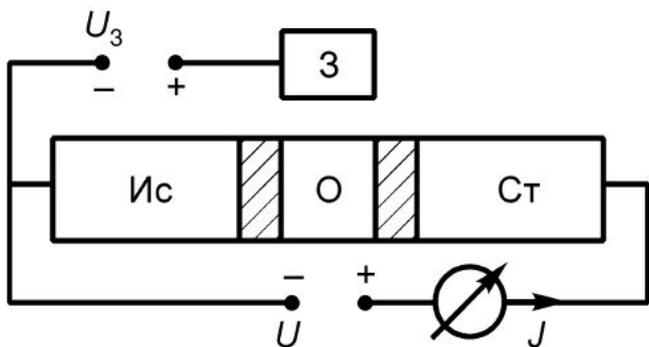


$U \approx \text{мВ}$

$I \approx \text{нА}$



## Использование кулоновской блокады в одноэлектронных приборах – одноэлектронный транзистор



end

14

**Спасибо за  
внимание!**