



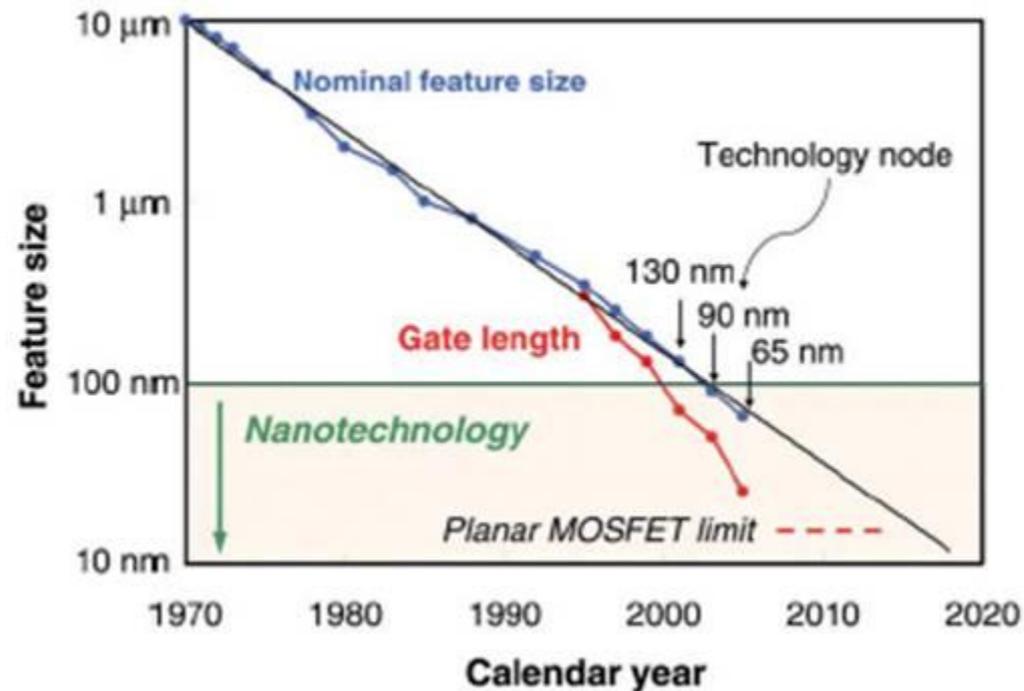
**Беликов Андрей Иванович, к.т.н., доцент**  
кафедра МТ-11 "Электронные технологии в машиностроении"

# **Основы наноэлектроники и нанотехнологий**

**Москва, 2014**

**Нанoeлектроника** – область электроники, изучающая распространение информационного сигнала в веществе носителями, имеющими электронную природу, под воздействием различных полей, и разрабатывающая принципы создания на этой основе приборов с топологическими размерами менее 100 нм.

**2000 г.** – преодоление размера 100 нм.



## ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОСНОВЕ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ:

1. Квантовые ограничения.
2. Туннельные эффекты.
3. Баллистический транспорт.
4. Спиновые эффекты.

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОДАНИЯ И РАЗВИТИЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

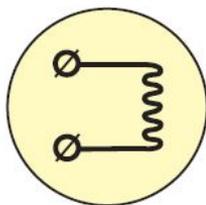
1. Открытие углеродных нанотрубок и графена, разработка методов их формирования.
2. Разработка зондовых методов по-атомной сборки.
3. Появление спинтроники. Использование спинов в качестве носителей информации.
4. Создание транзисторов на гетеропереходах.
5. Открытие квантового эффекта кулоновской блокады, создание одноэлектронных устройств, работоспособных при комнатных температурах.
6. Появление молекулярной наноэлектроники.
7. Разработка химических методов получения нанокристаллов и упорядоченных наноструктур.

# Тенденции. ВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

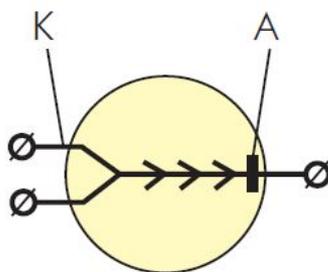
запатентован в 1904 году  
англичанином Д.А. Флемингом  
в 1904 году

Л. Де Форест и Р. Либен,  
1906 год

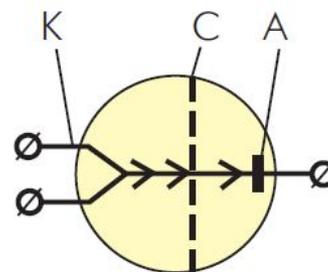
а



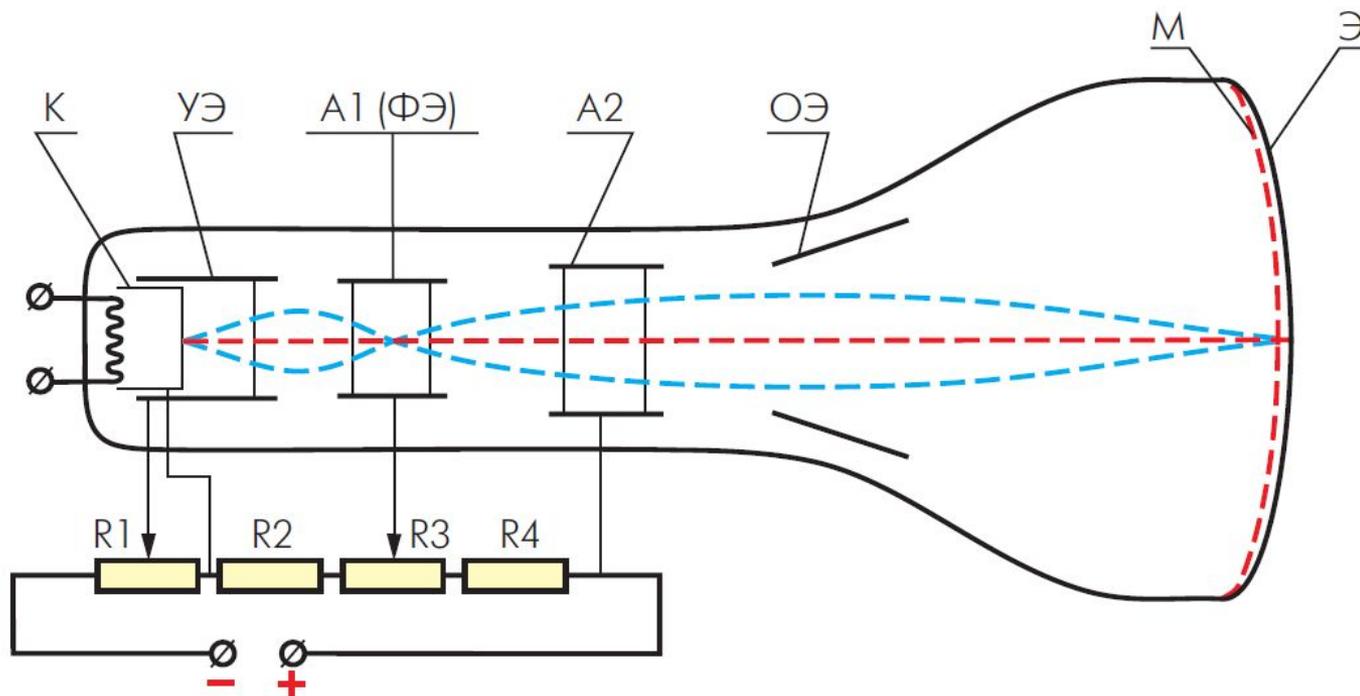
б



в

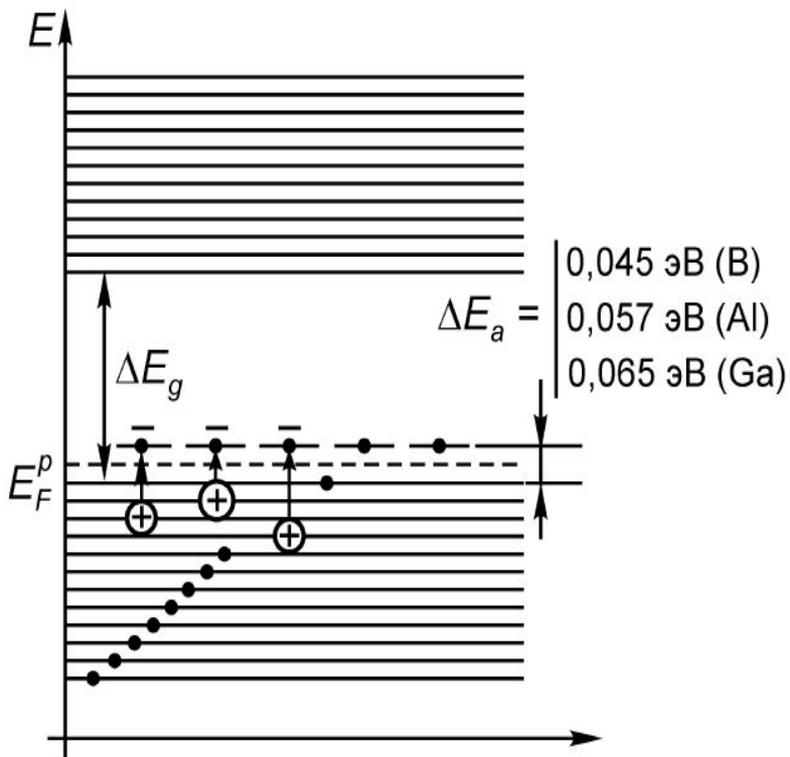


г

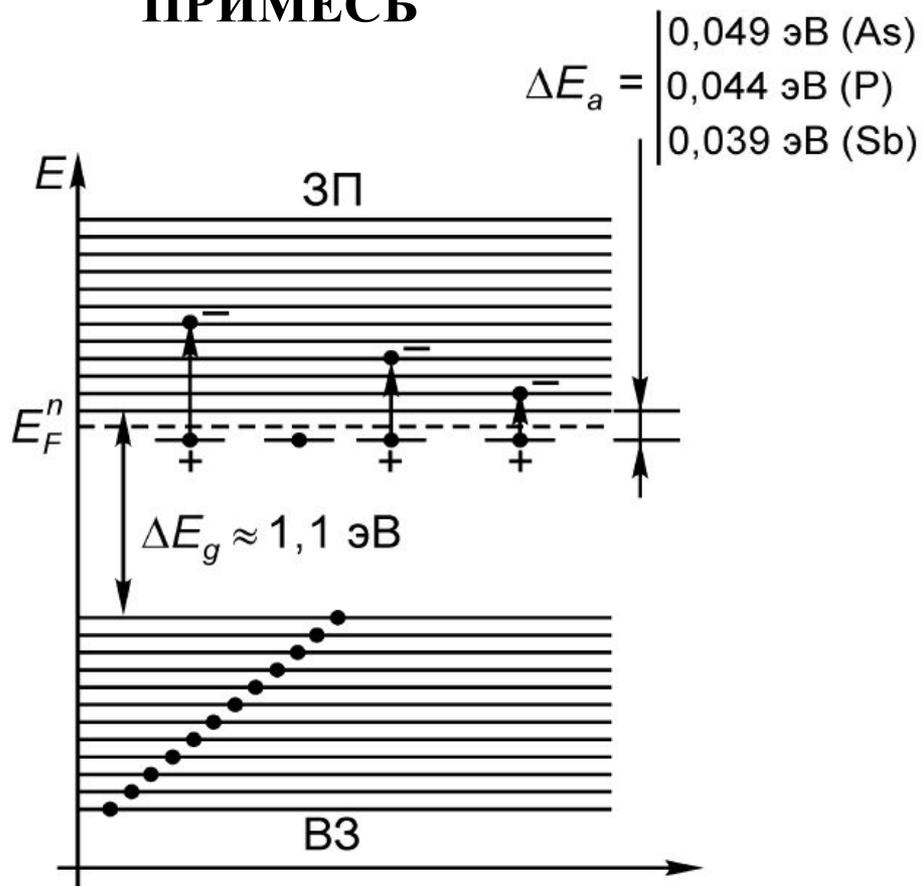


## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ ЛЕГИРОВАННОГО Si

### АКЦЕПТОРНАЯ ПРИМЕСЬ



### ДОНОРНАЯ ПРИМЕСЬ

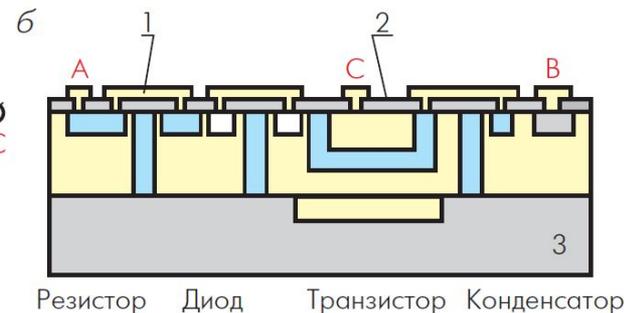
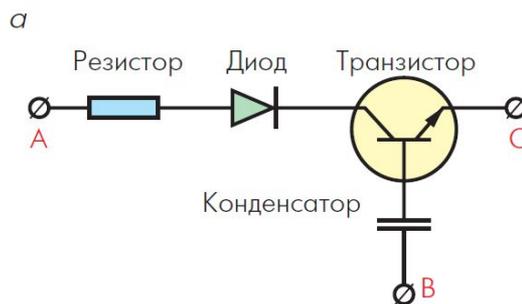
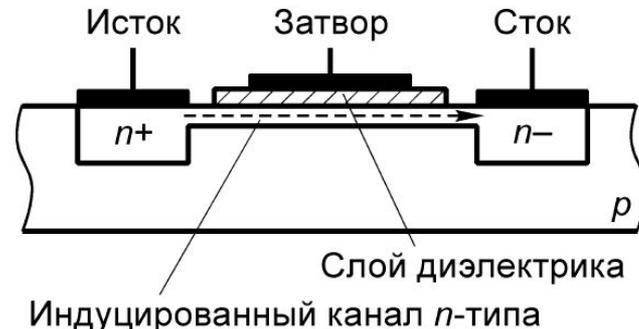
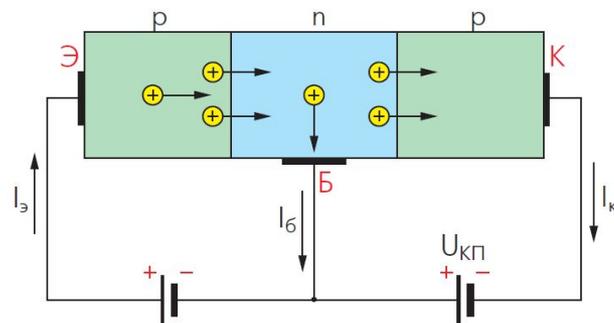
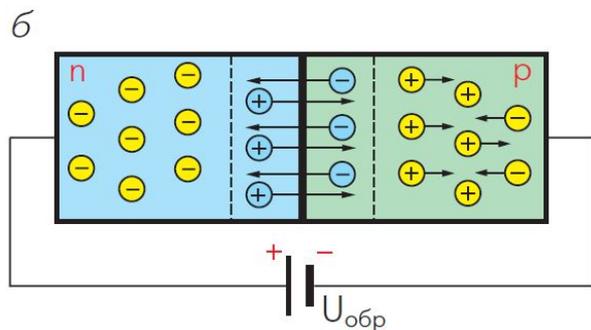
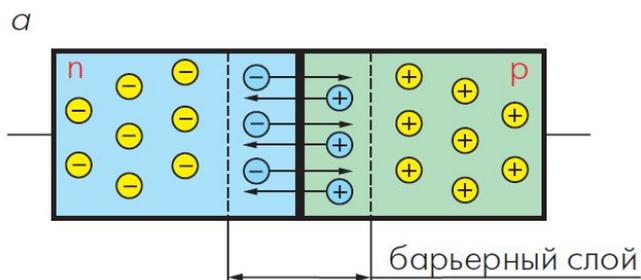


# Тенденции. ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

У. Браттейн, Дж. Бардин,  
У. Шокли, 1947 год

## Биполярный и полевой транзисторы

## р-п переход, твёрдотельный диод



## Интегральная схема, Si-технология

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

## ПРОБЛЕМЫ УМЕНЬШЕНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ НОРМЫ

1. Повышение токов утечки за счет преобладания туннельных эффектов через диэлектрические слои.
2. Электрический пробой подзатворного диэлектрика.
3. Проблемы теплоотвода.
4. Уменьшение подвижности носителей зарядов. Переход на германий ?

**Размерный эффект** – зависимость свойств твердого тела от его размера, существенно, принципиально изменяющаяся при сопоставимости размера с фундаментальными характеристиками (длина свободного пробега  $E$ , длина волны)

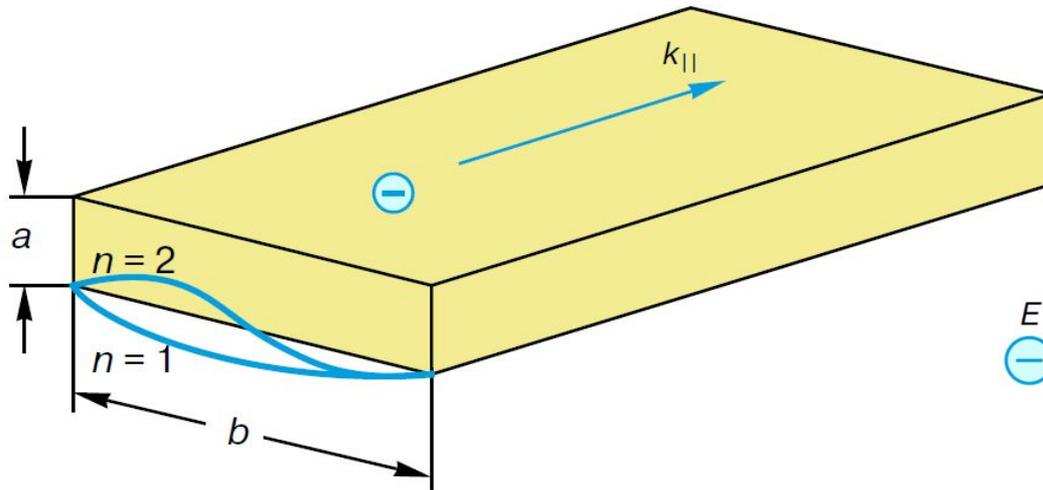
$$\lambda_B \approx h / \sqrt{2m^* \cdot E}$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $m^*$ ,  $E$  – эффективная масса и энергия электронов

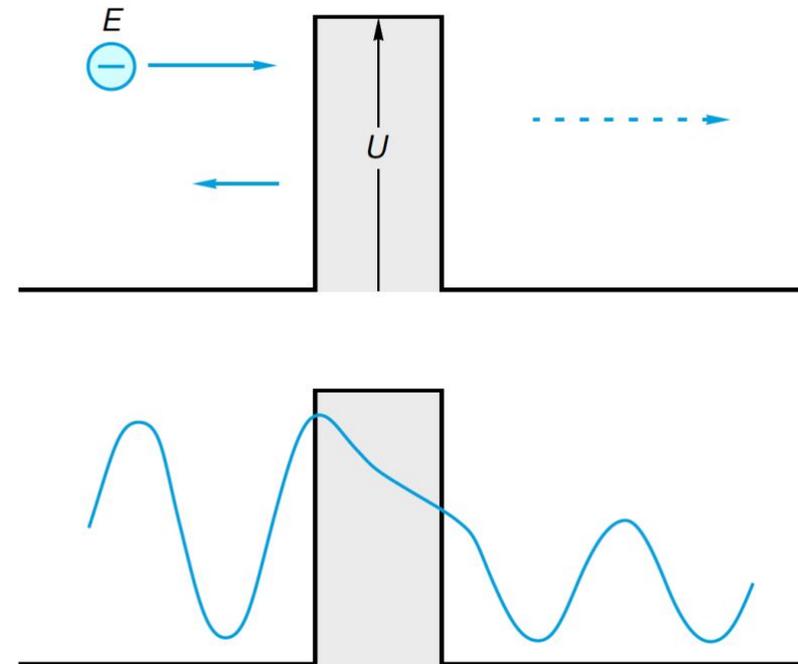
Для металлов  $\lambda_B \sim 0,1-1$  нм

Для полупроводников –  $\lambda_B \sim 0,1-100$  нм ( $E$  и  $m$  меньше в 10–100 раз)

Например, для Si, GaAs, Bi:  $\lambda_B = 8; 30; 80$  нм

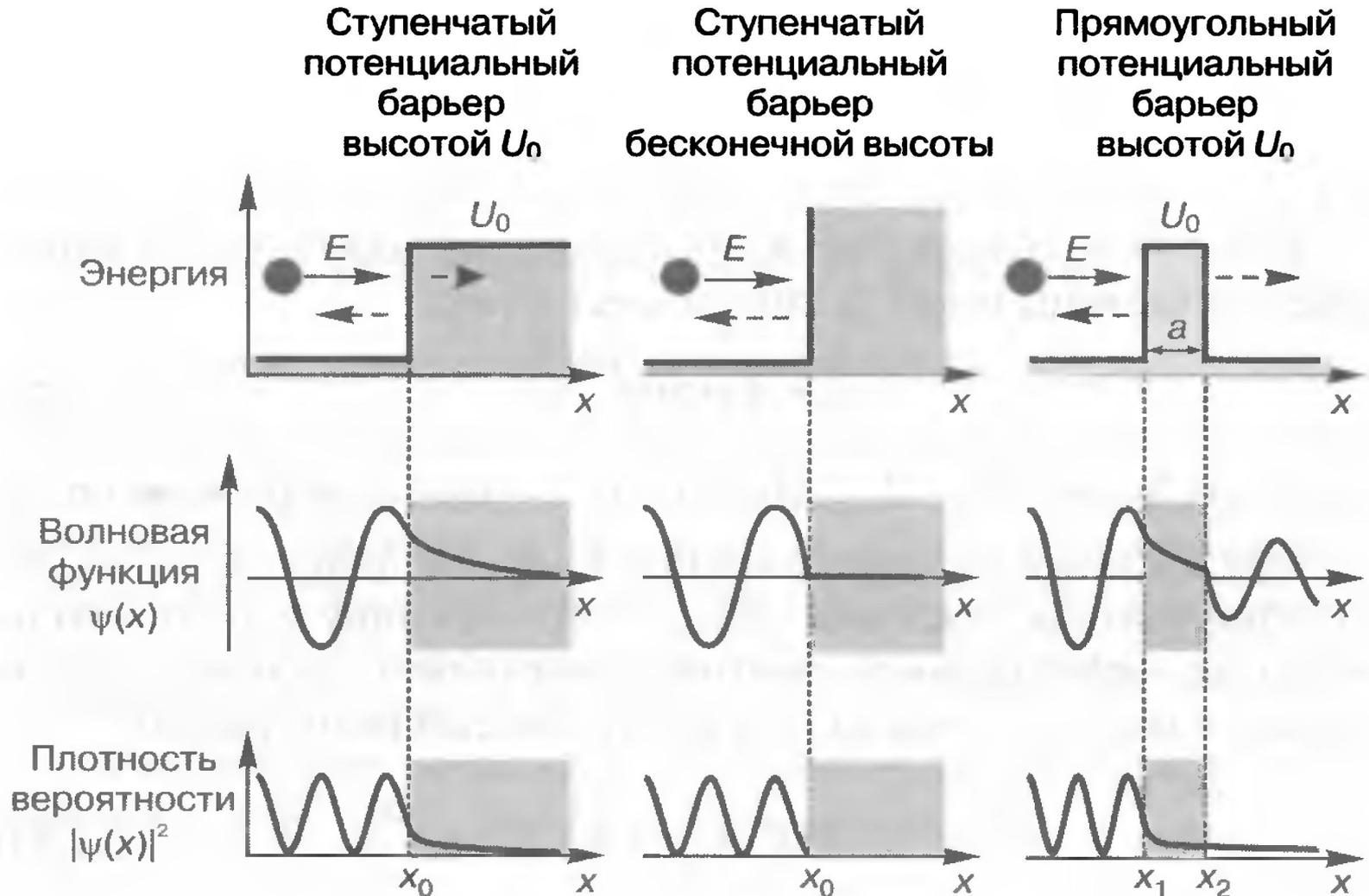


Размерные ограничения на движение электрона в квантово-ограниченном объеме

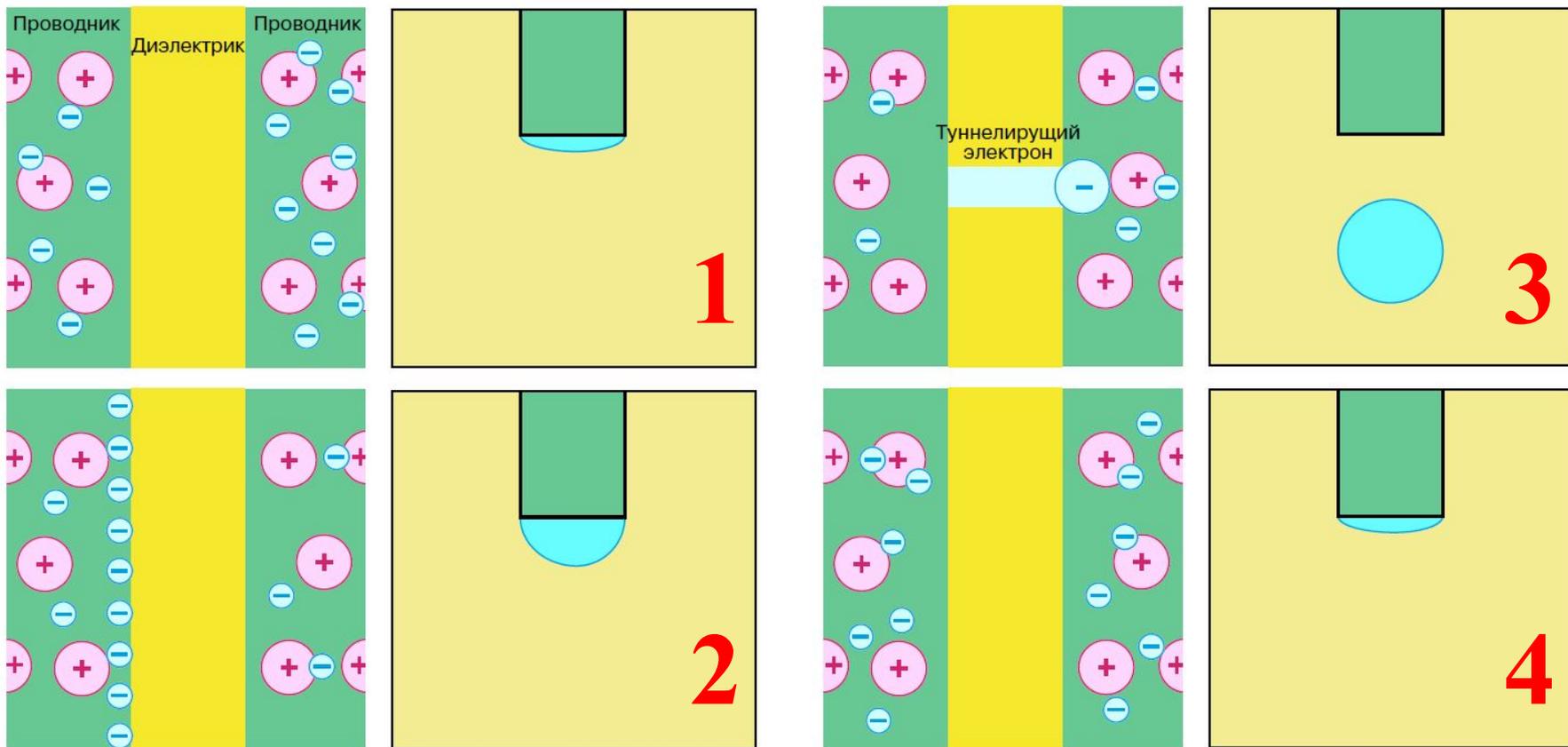


Туннелирование электронов с энергией  $E$  через потенциальный барьер  $U$

Туннелирование электронов с энергией  $E$  через потенциальный барьер



В 1986 г. К.К.Лихарев теоретически предсказал кулоновскую блокаду туннелирования и одноэлектронное туннелирование

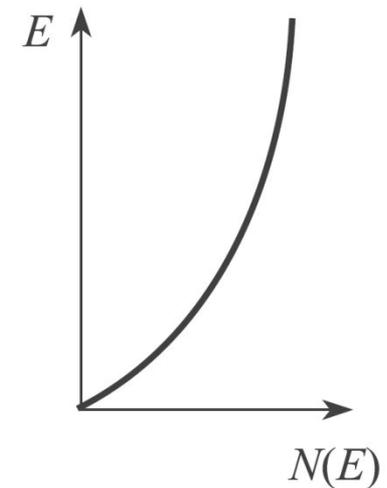
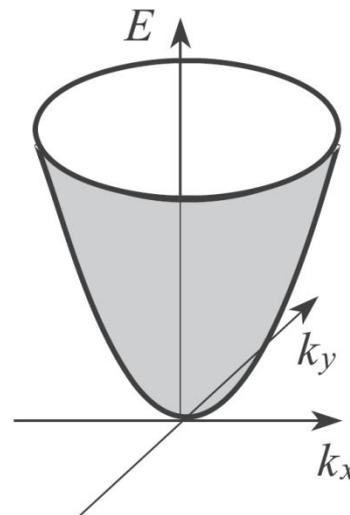
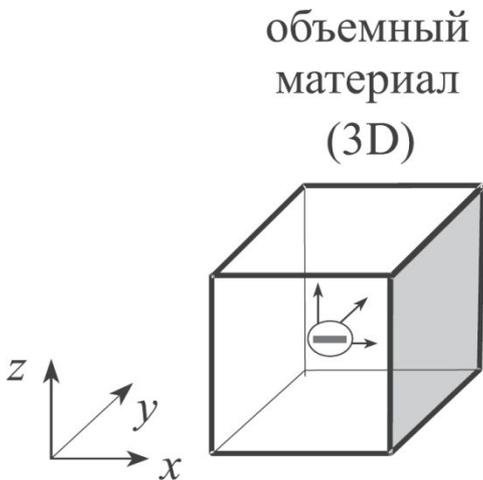


**Одноэлектронное туннелирование  
в условиях кулоновской блокады**

*Объемный материал* — трехмерный (3D) объект.

$$E = \frac{m^* v^2}{2} = \frac{\bar{p}^2}{2m^*} = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m^*} = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

$p$  – импульс,  $k$  – волновой вектор электрона



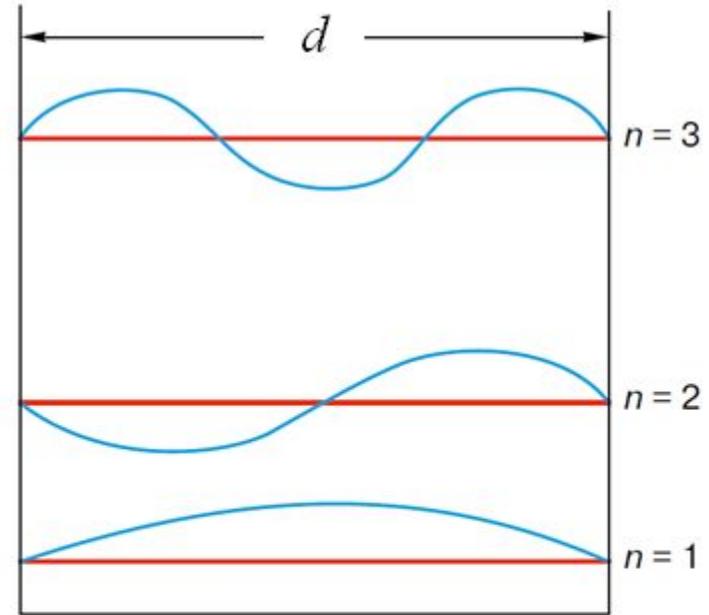
**Постулат Бора:** электрону с импульсом  $p_n$  в потенциальной яме шириной  $d$  разрешены траектории, описываемые соотношением:

$$p_n d = \pi \hbar n$$

Квантуемая энергия:

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2md^2}$$

Для ширины ямы 5 нм  $E_1 = 0.2$  эВ  
(для эффективной массы электрона  $10^{-28}$  г)

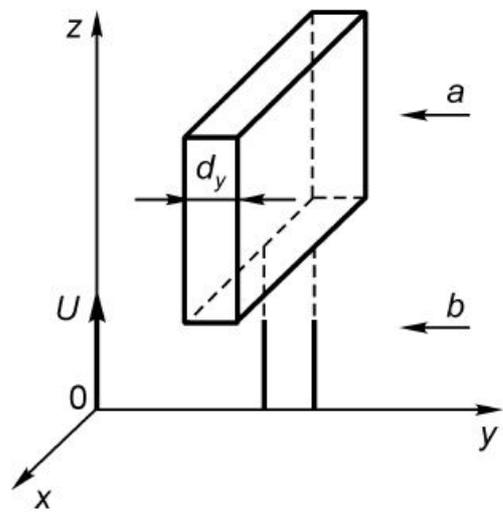


Волновые функции и уровни энергии частицы, находящейся в бесконечно глубокой потенциальной яме. Показаны три нижних энергетических уровня (красный цвет) и три волновые функции

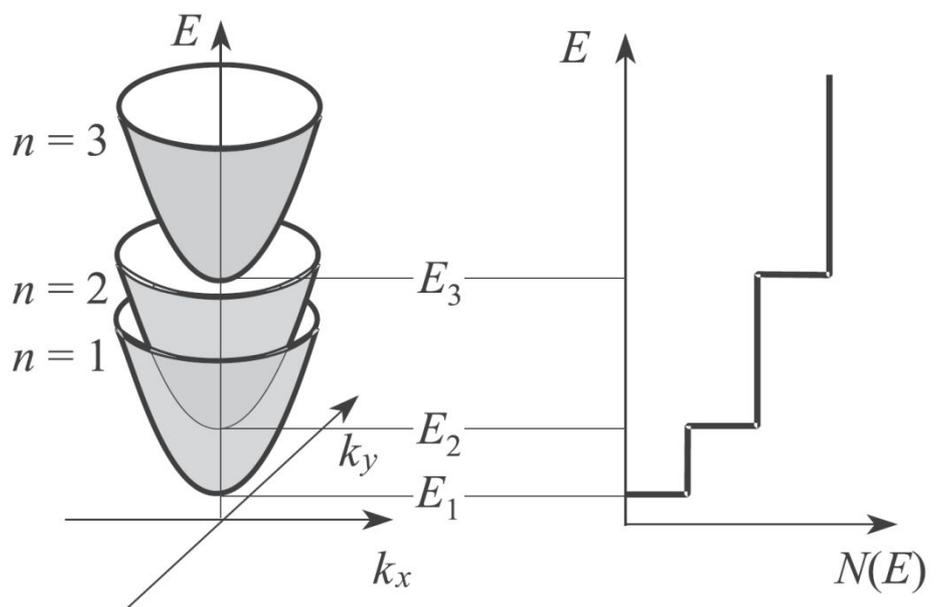
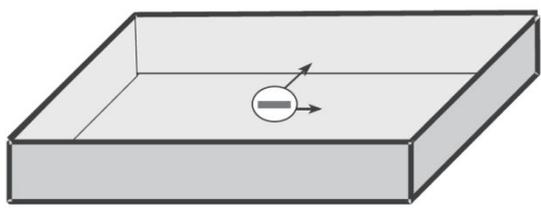
**Квантовая яма (пленка)** — двухмерный (2D) объект, толщина  $d_y$  соизмерима с длиной волны де Бройля ( $d \sim \lambda_B$ ). Система электронов — двухмерный (2D) электронный газ.

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m^* d_y^2} \quad - \text{энергия, квантуемая размерным ограничением по оси «у»}$$

$$E = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} + E_n + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m^*}$$

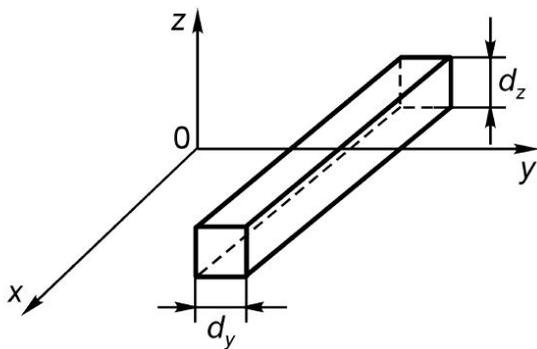


КВАНТОВАЯ ПЛЕНКА (2D)

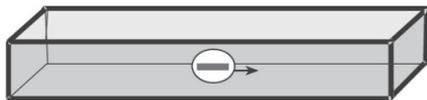


**Квантовая проволока (нить)** — одномерный (1D) объект, перемещение электронов не ограничено по координате X. 1D - электронный газ.

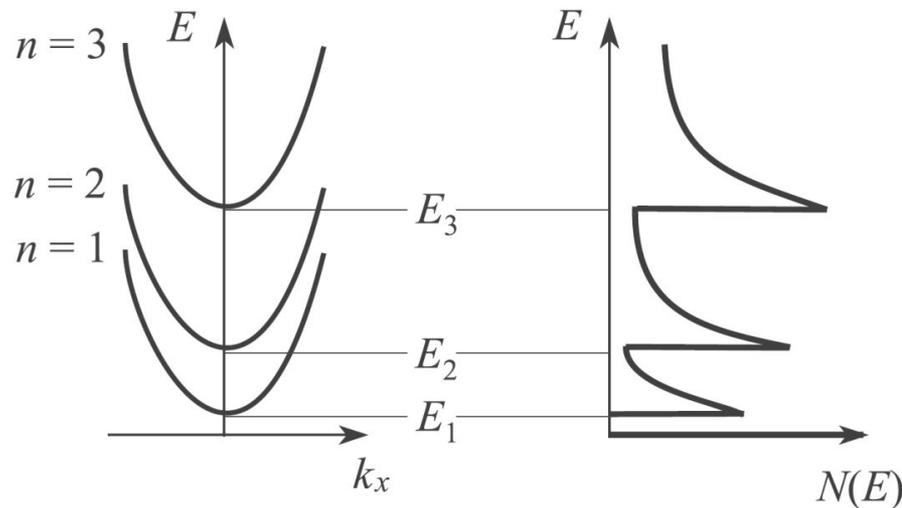
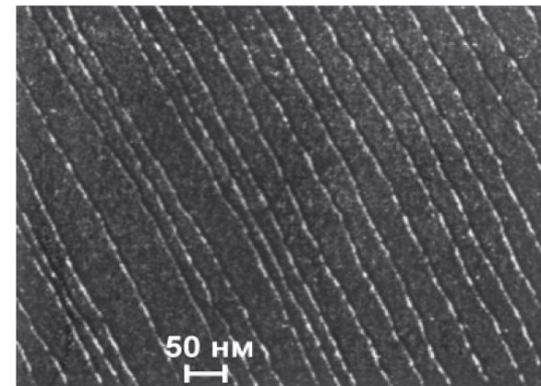
$$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} k_x^2 + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \cdot \frac{n^2}{d_y^2} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \cdot \frac{m^2}{d_z^2}$$



КВАНТОВЫЙ  
шнур  
(1D)

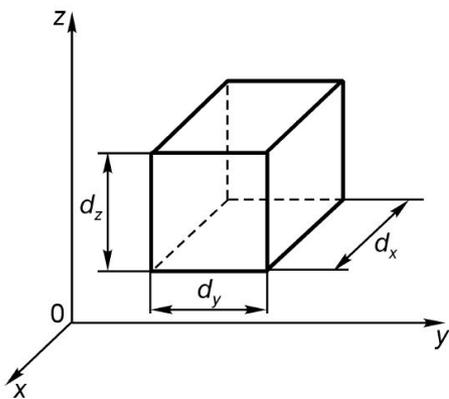


$$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} k_x^2 + E_{mn}$$

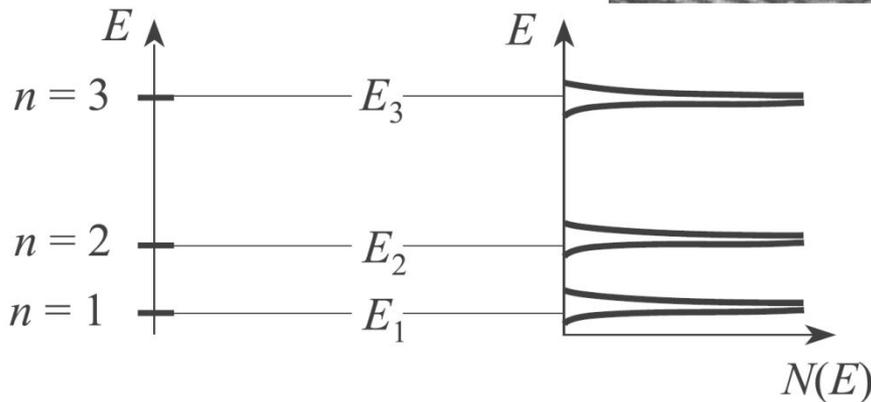
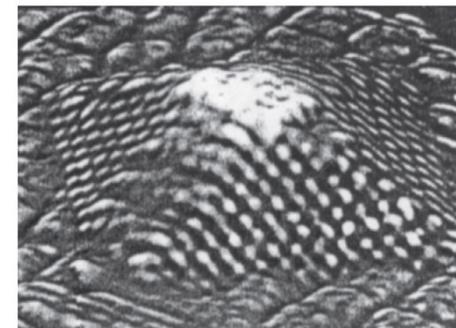
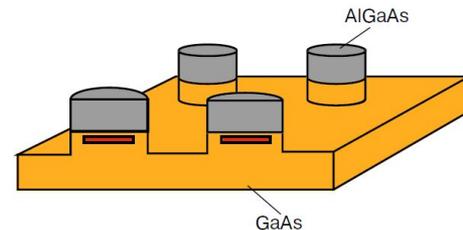


**Квантовая точка (искусственный атом)** — нуль-мерный (0D) объект. Ширина запр.зоны GaAs для массивного  $E_g=1,52$  эВ, КТ (933 атомов) -  $E_g=2,8$  эВ, КТ (465 атомов) -  $E_g=3,2$  эВ

$$E_{lmn} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \cdot \frac{l^2}{d_x^2} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \cdot \frac{m^2}{d_y^2} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \cdot \frac{n^2}{d_z^2}$$



КВАНТОВАЯ  
ТОЧКА  
(0D)



end

18

**Спасибо за  
внимание!**