

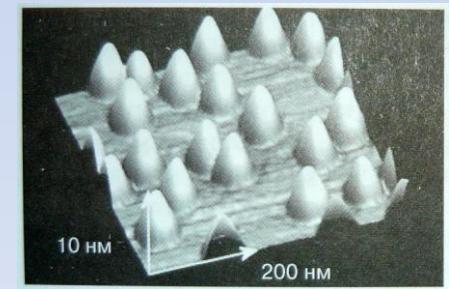
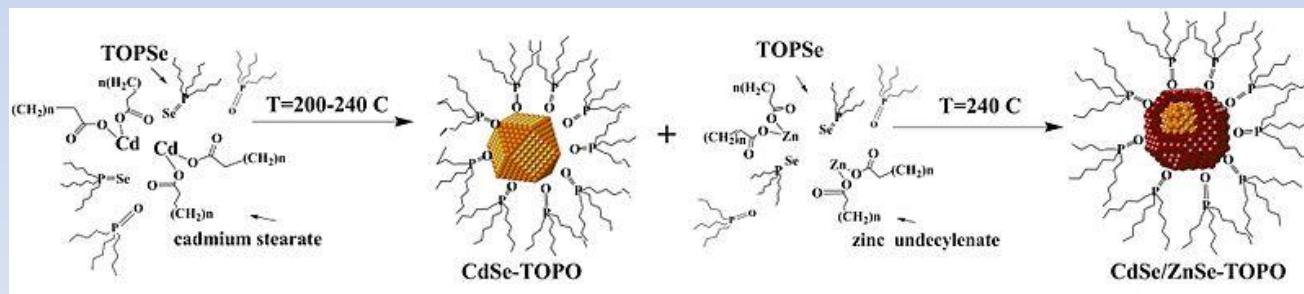
# 7. Наноразмерные полупроводники



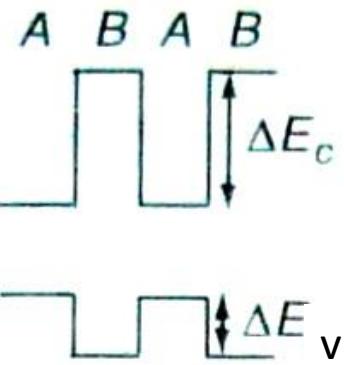
## I. Типы полупроводниковых наноструктур и методы их изготовления:

- квантовые ямы,
- квантовые проволоки,
- квантовые точки.

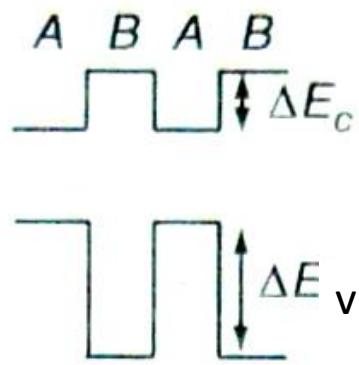
## II. Физические явления в полупроводниковых наноструктурах и их применения



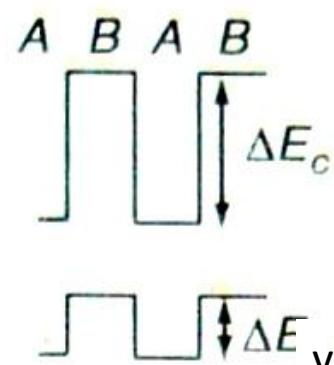
# Квантовые ямы



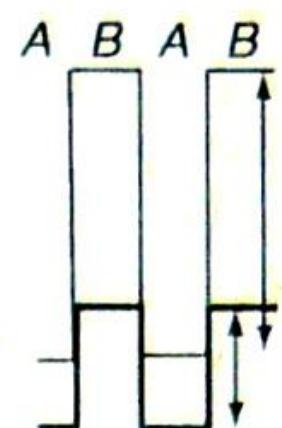
I



I



II



II

Типы квантовых ям

# Квантовые ямы, проволоки и точки



Квантовая яма I типа шириной  $L$ :

$$E_{n, k_{||}} \approx \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2 m_e^* L^2} + \frac{\hbar^2 k_{||}^2}{2 m_e^*} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

для зонк проводимости и аналогичная формула для зонок в валентной зоне.

Две зонки проводимости сдвигаются вверх до первого квантового уровня  $E_{1,0} \approx \frac{\pi^2 \hbar^2}{2 m_e^* L^2}$ , побочная валентная зона — вниз до  $E_{1,0} \approx \frac{\pi^2 \hbar^2}{2 m_h^* L^2}$ .

Отсюда эфирективная ширина запрещенной зоны

$$E_g^{\text{эфф}} \approx E_g + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2 m_e^* L^2} + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2 m_h^* L^2} = E_g + \frac{A}{L^2}.$$

# Квантовые ямы, проволоки и точки



Квантовая проволока:

$$E_{n,m,k_x} \approx \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* L_z^2} + \frac{\pi^2 \hbar^2 m^2}{2m^* L_y^2} + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}$$

( $n, m = 1, 2, 3, \dots$ )

Квантовая точка:

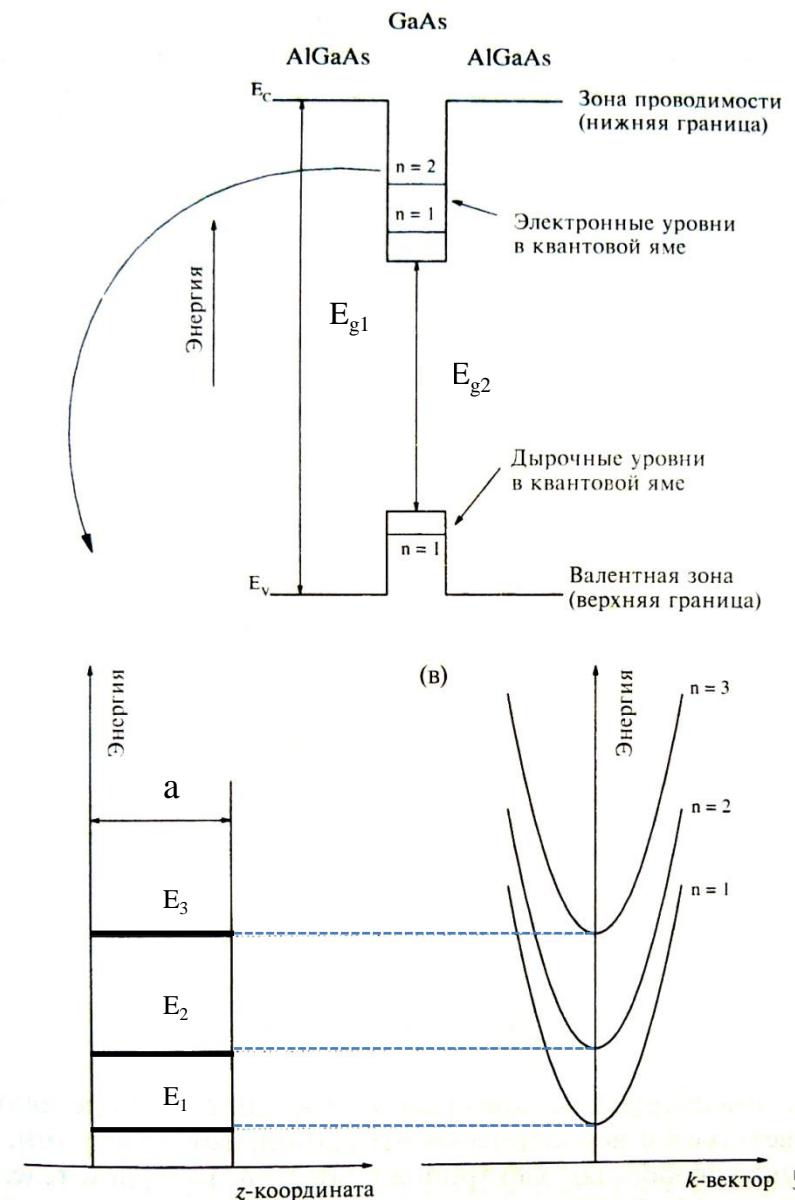
$$E_{n,m,l} \approx \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* L_z^2} + \frac{\pi^2 \hbar^2 m^2}{2m^* L_y^2} + \frac{\pi^2 \hbar^2 l^2}{2m^* L_x^2}$$

( $n, m, l = 1, 2, 3, \dots$ ).

# Квантовые ямы



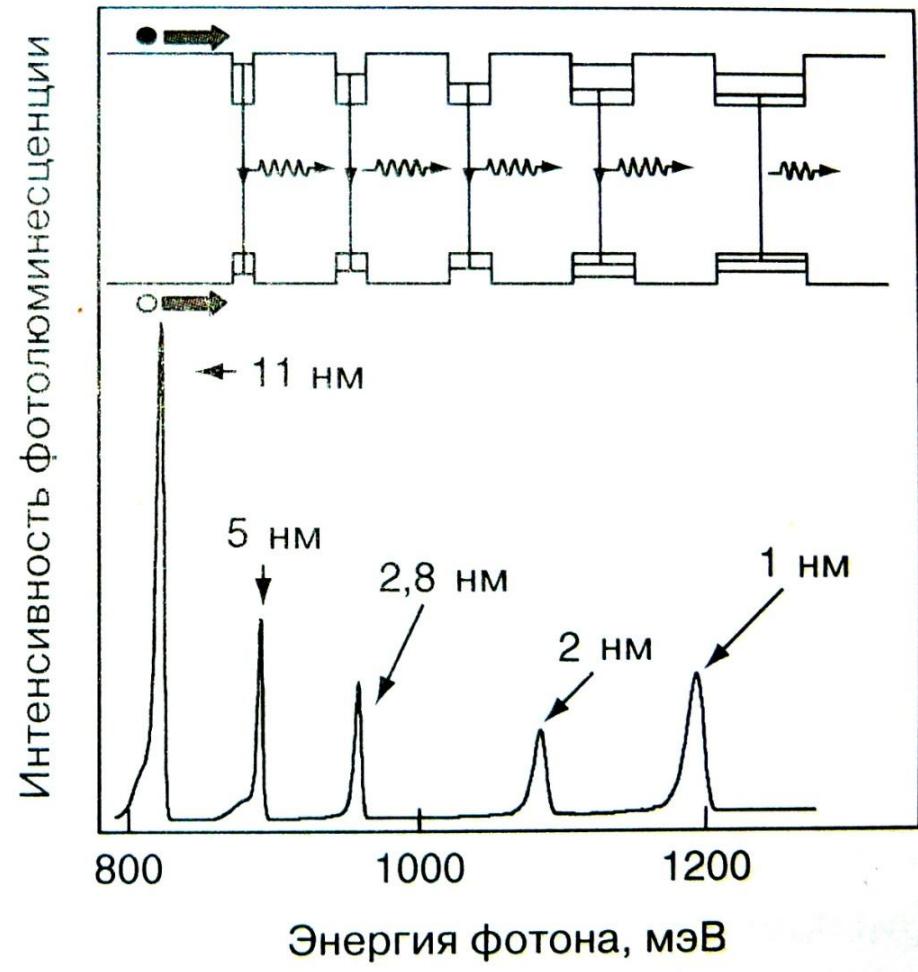
## Схема уровней в яме типа I



# Квантовые ямы



$$E_g^{\text{эфф}} = E_g + A/L^2$$



Спектр люминесценции 5 ям разной ширины

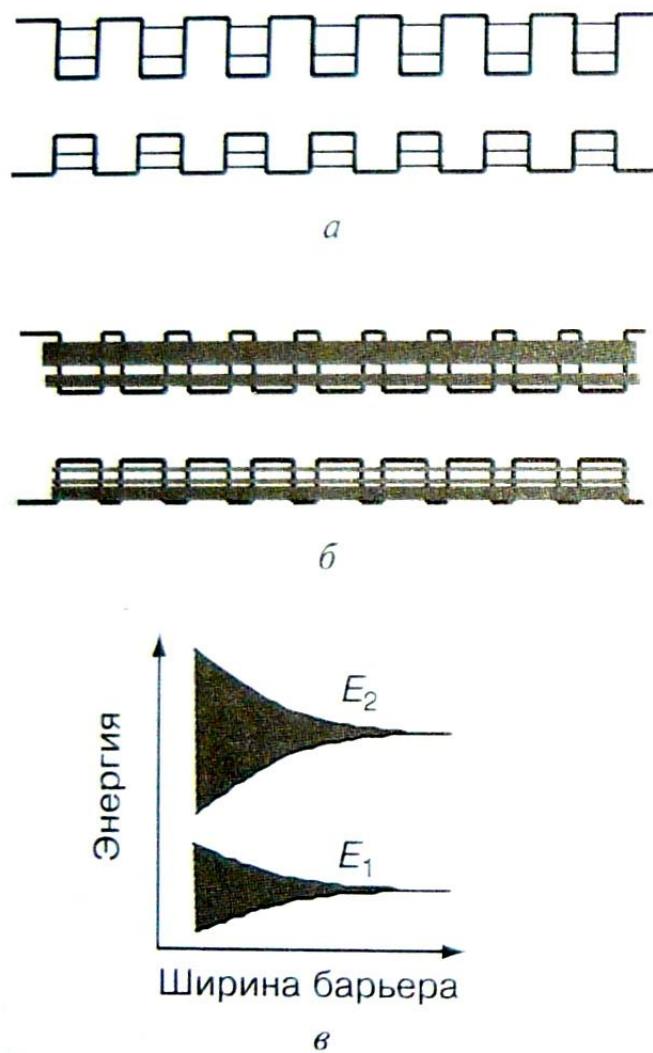
# Квантовые ямы



**Составная яма:**

**Сверхрешетка:**

**Изменение спектра при превращении составной ямы в сверхрешетку**



# **Квантовые ямы, проволоки и точки**

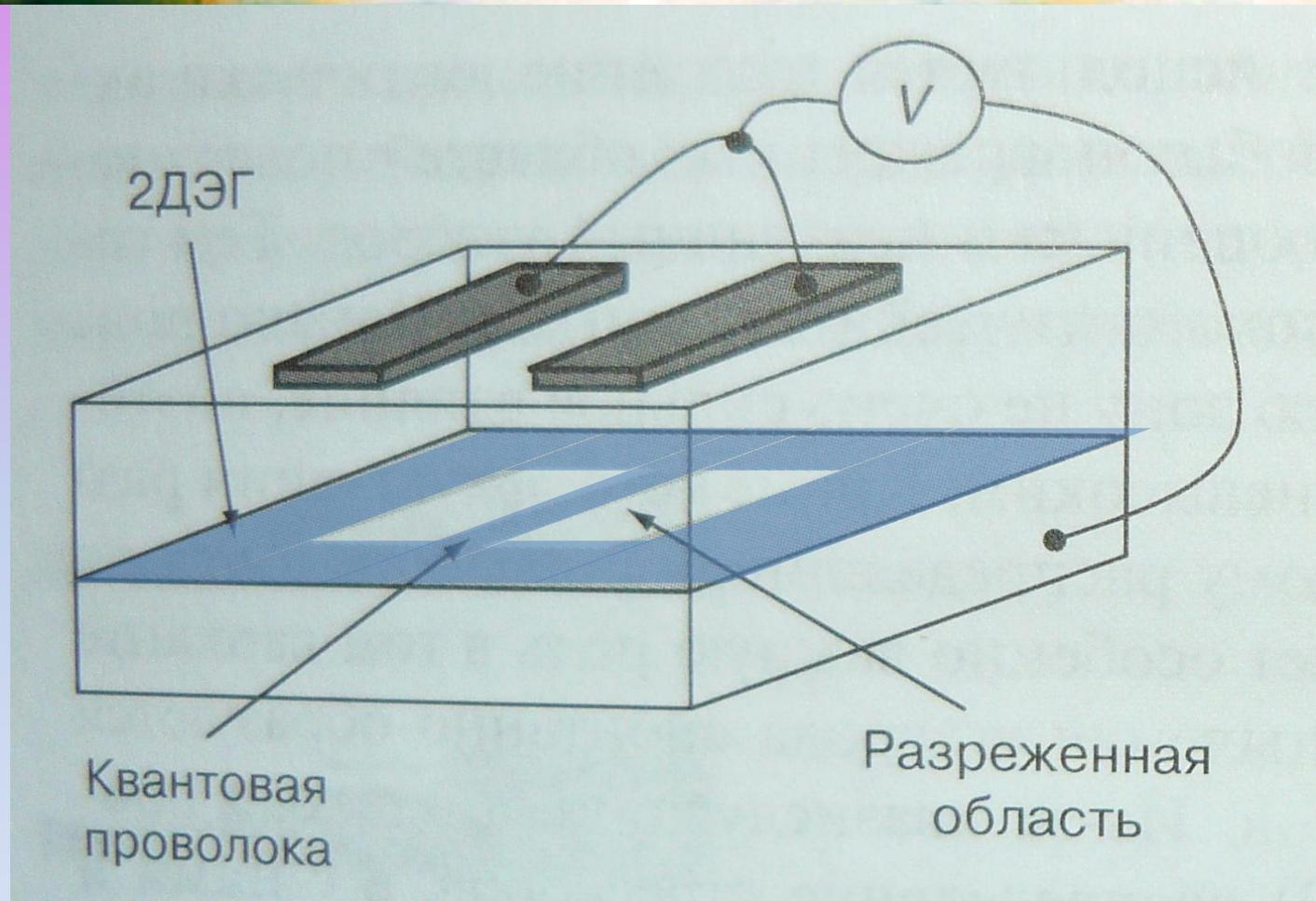


**Методы изготовления квантовых ям:**  
**эпитаксиальное выращивание (МПЭ, МОГФЭ и пр.).**

**Методы изготовления квантовых проволок:**  
**литография квантовых ям, выращивание на краю скола гетероструктуры и на вицинальных подложках, электрическое наведение и пр.**

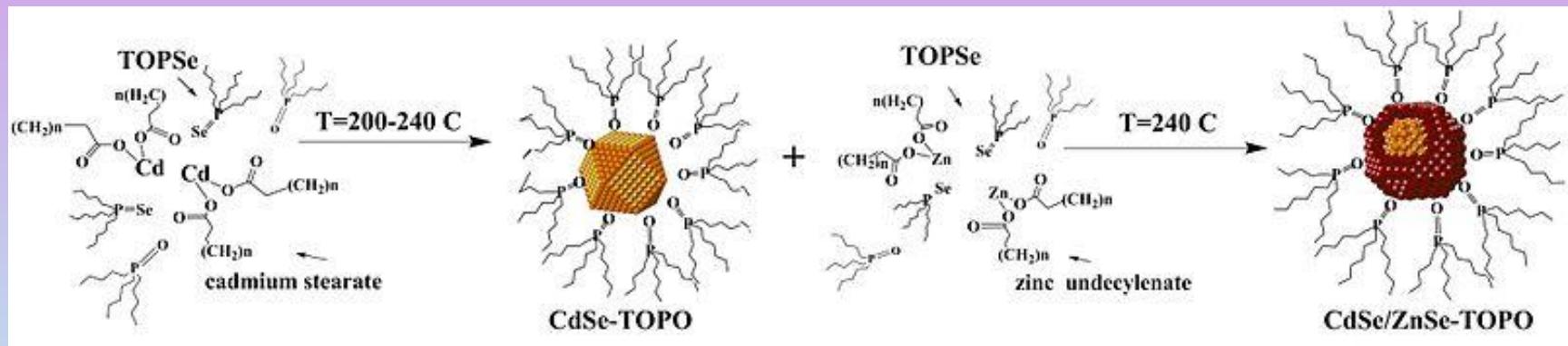
**Методы изготовления квантовых точек:**  
**литография квантовых ям и проволок, коллоидная химия, кристаллизация в стеклянной матрице, самосборка и пр.**

# Квантовые проволоки



**Изготовление квантовой проволоки методом  
электрического наведения**

# Квантовые точки



**Схема синтеза CdSe-ZnSe квантовых точек**  
(википедия, quantum-dots.ru)

# Квантовые точки

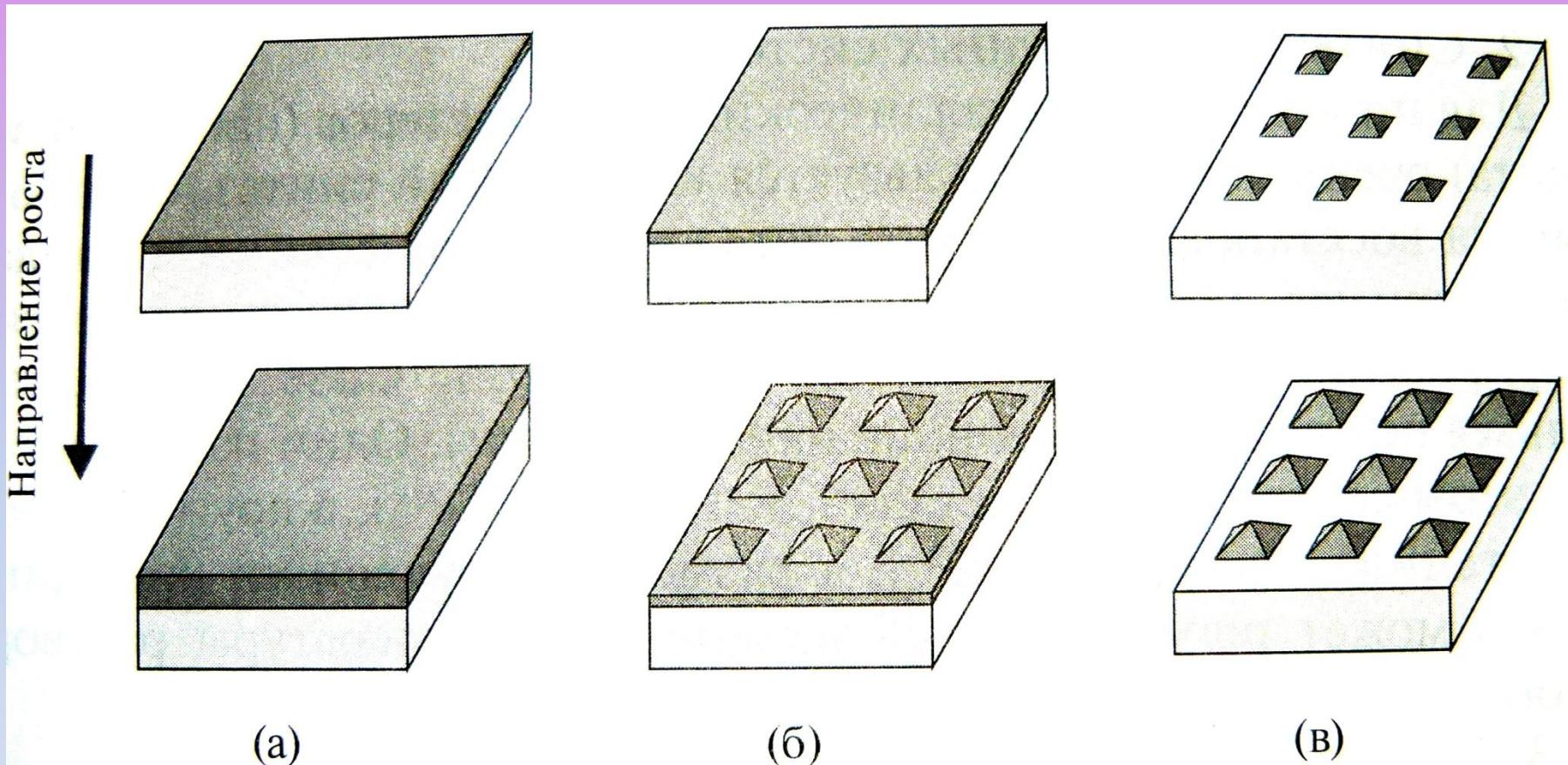


$$E_g^{\text{эф}} = E_g + A/L^2$$



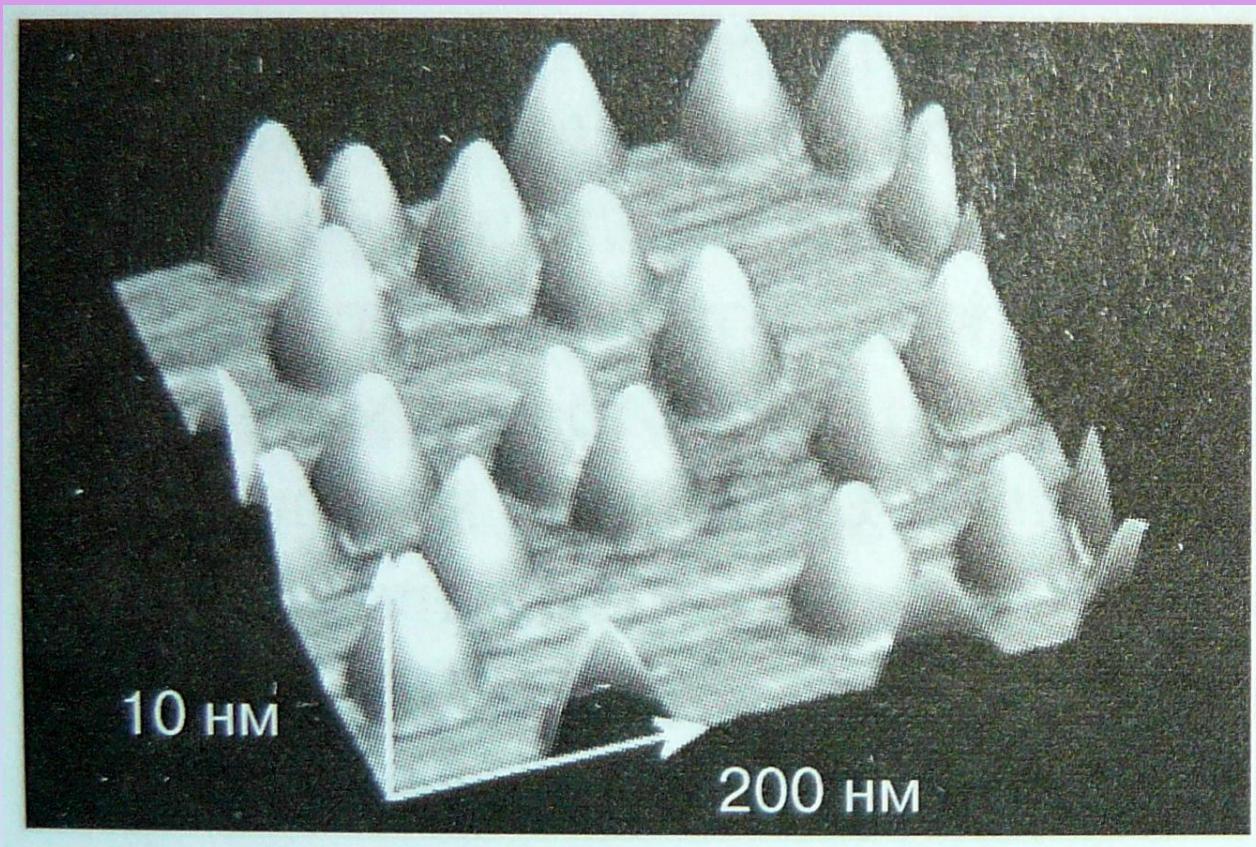
Коллоидные растворы квантовых точек CdSe разного размера

# Квантовые точки



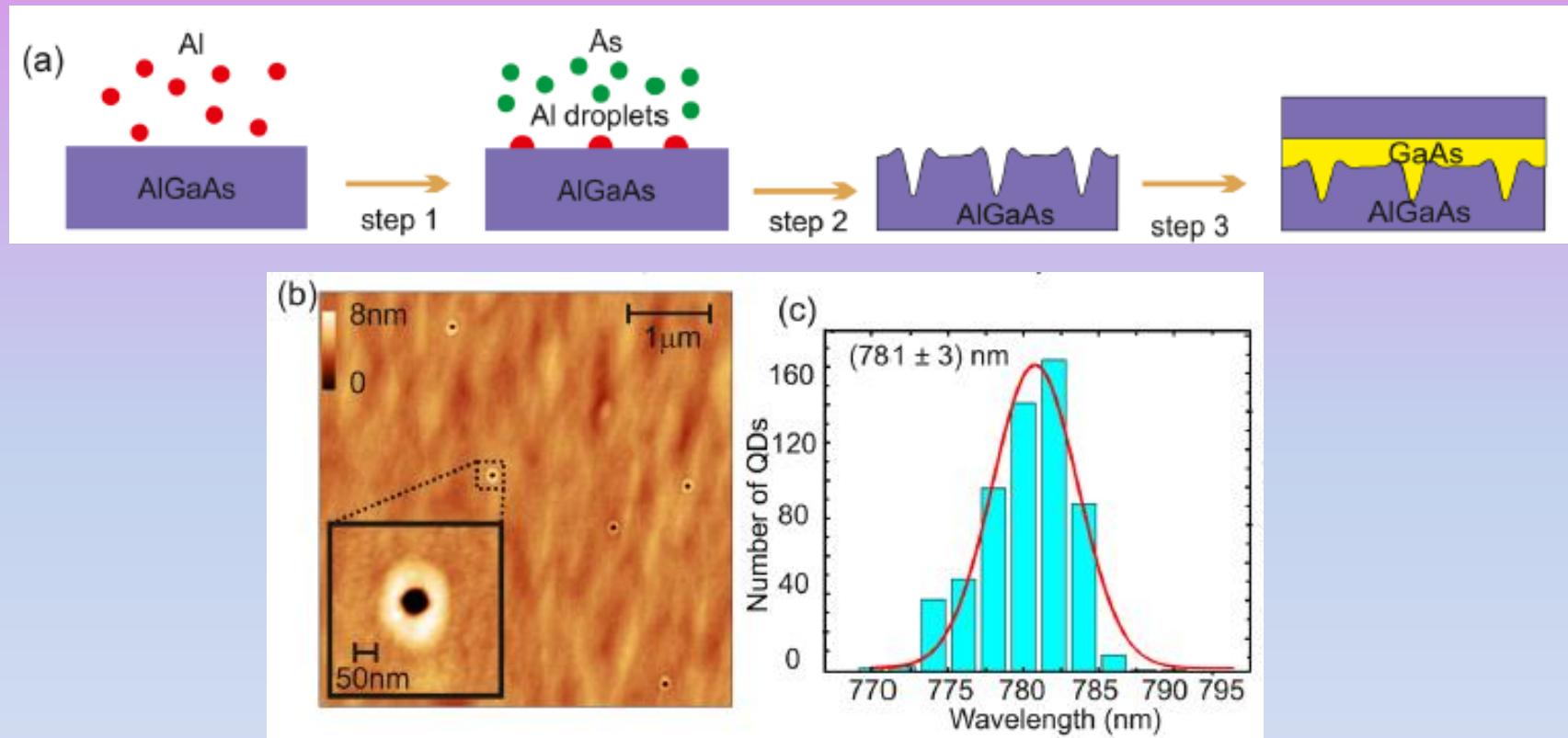
Схемы различных режимов выращивания кристаллических пленок на подложках: а – послойный рост; б – режим Странского-Крастанова; в – режим Фольмера-Вебера.

# Квантовые точки



**АСМ-изображение непокрытых самособирающихся квантовых точек InAs на поверхности GaAs.**

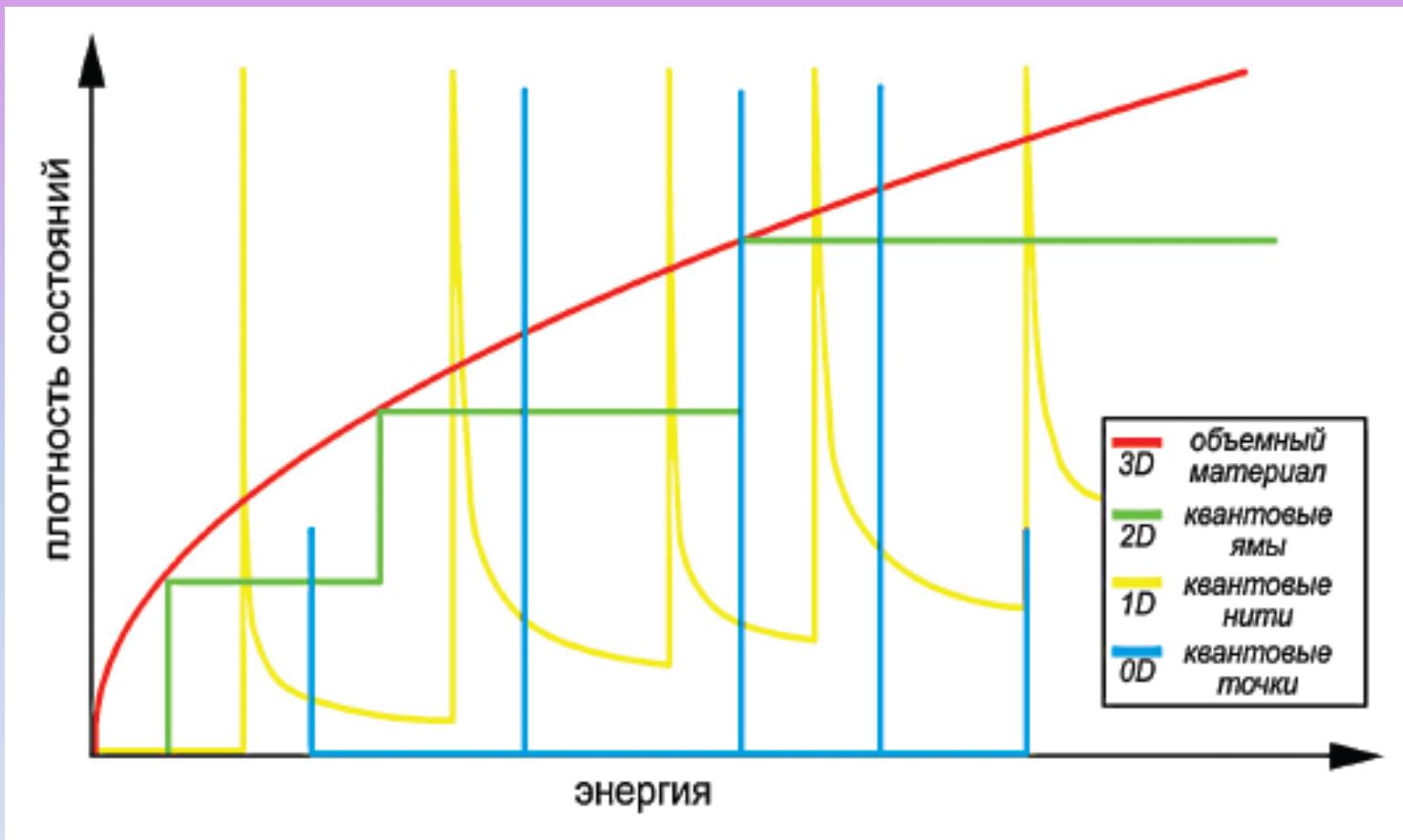
# Квантовые точки



**Метод эпитаксии после капельного травления**  
(droplet etching epitaxy)

S.F.C. Da Silva et al., *Appl. Phys. Lett.*, **119** (2021) 120502

# Квантовые ямы, проволоки и точки



Спектры плотности состояний носителей заряда для систем с различной размерностью.

# Наноразмерные полупроводники



## I. Типы полупроводниковых наноструктур и методы их изготовления.

## II. Физические явления в полупроводниковых наноструктурах и их применения:

- **электронные явления и свойства** (модулированное легирование, резонансное туннелирование, квантовый эффект Холла, квантовая проводимость и интерференция токов, явление кулоновской блокады);
- **оптические и оптоэлектронные явления и свойства** (экситонные эффекты, свойства инжекционных и квантовых каскадных лазеров, внутризонное поглощение, однофотонные источники, оптические запоминающие устройства на квантовых точках, оптические биологические метки).

# Электронные свойства квантовых ям

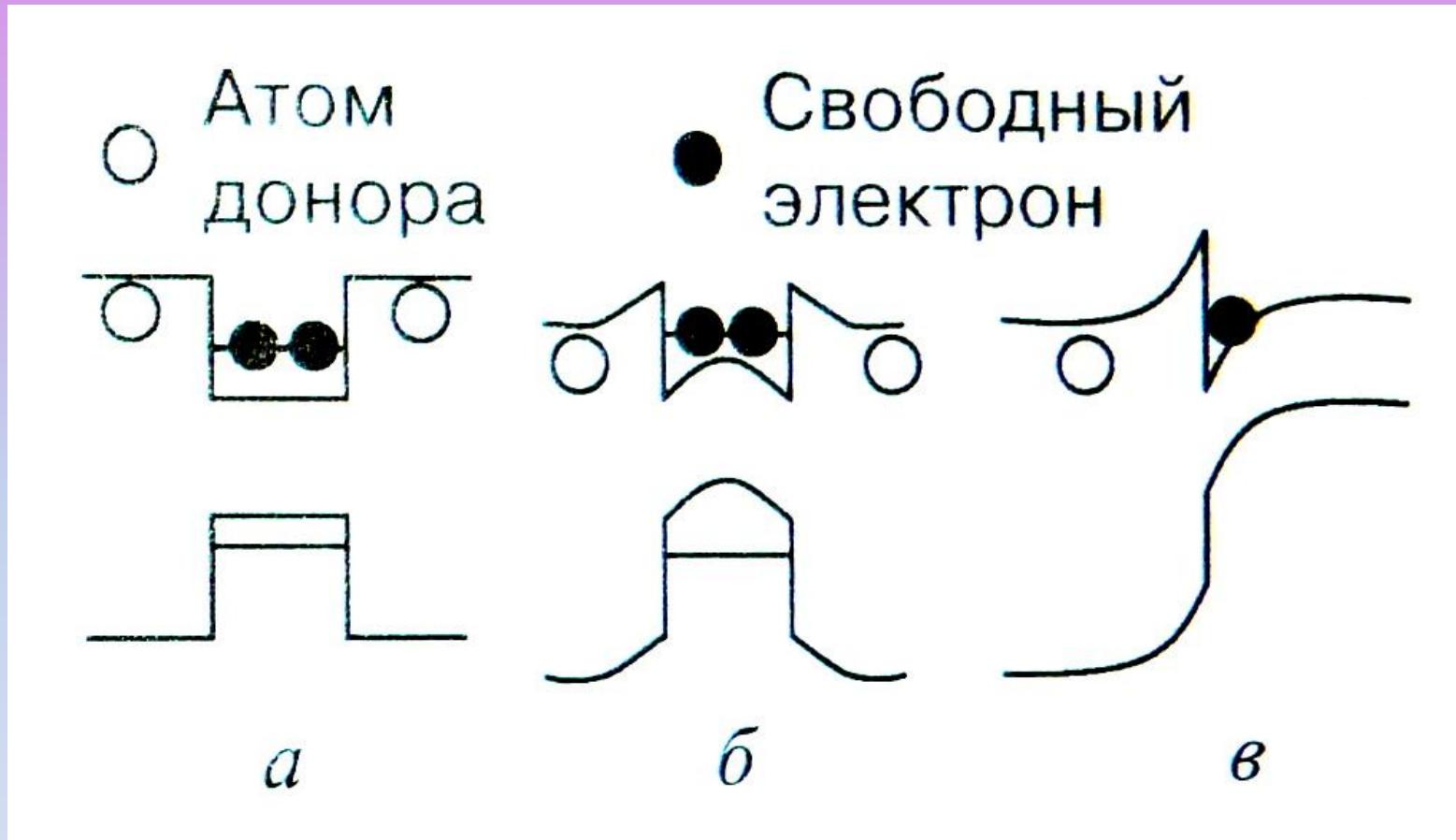
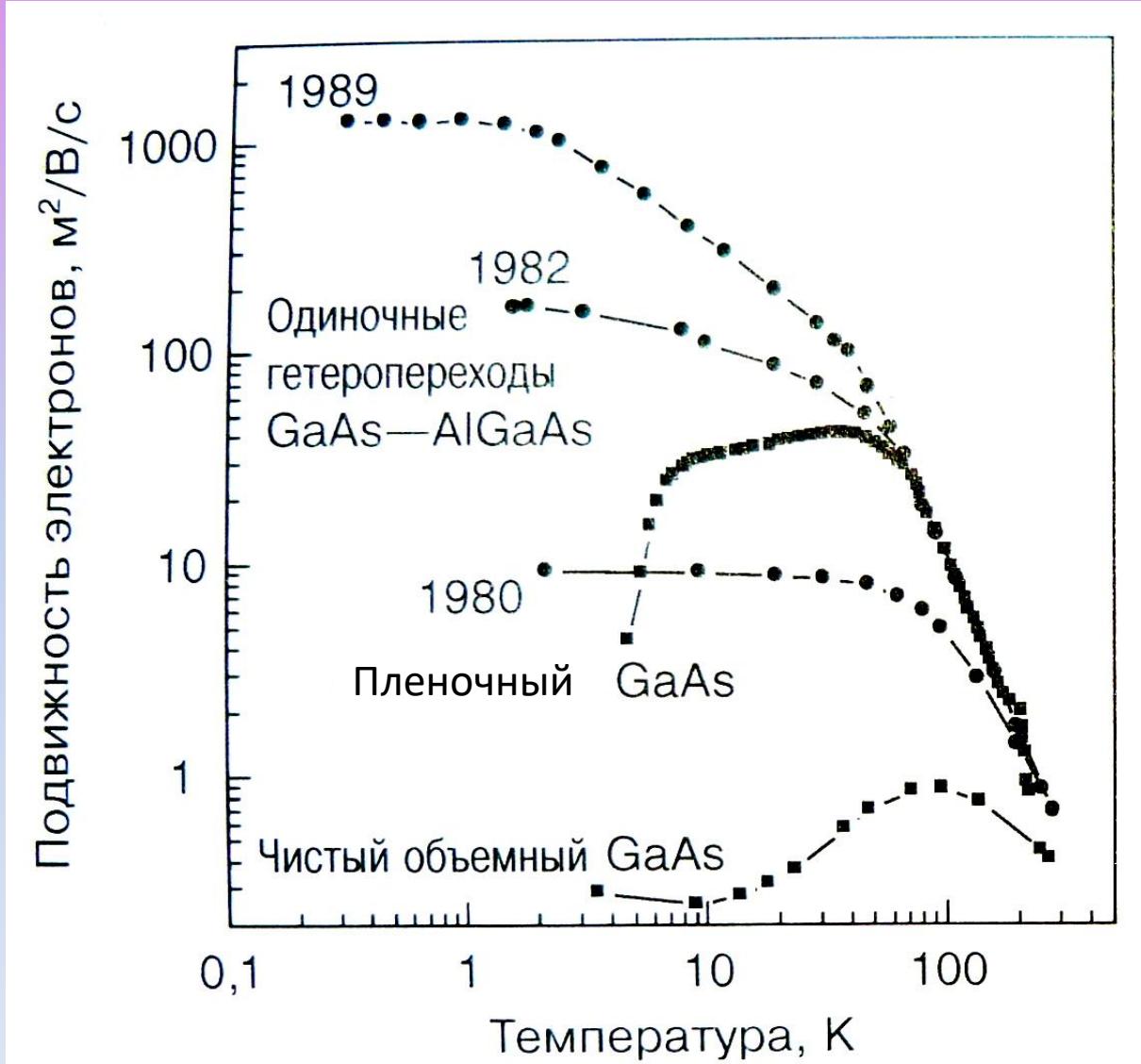


Схема модулированного легирования

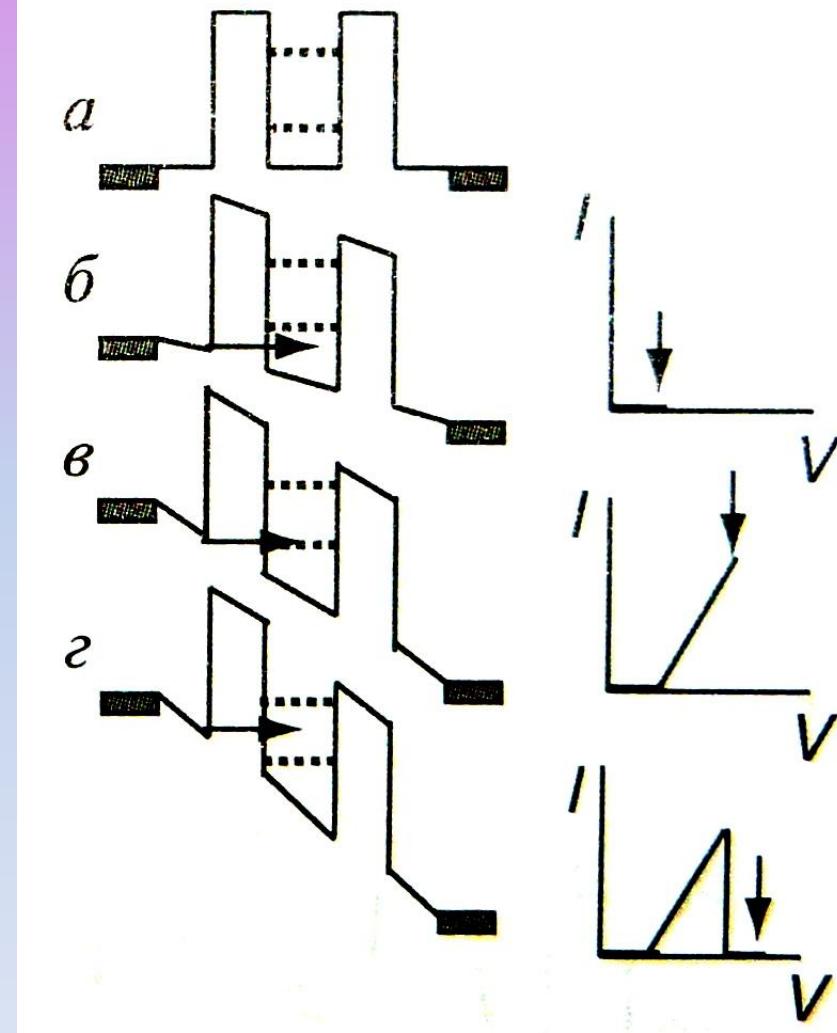
# Электронные свойства квантовых ям



# Электронные свойства квантовых ям



Схема структуры  
с резонансным  
туннелированием



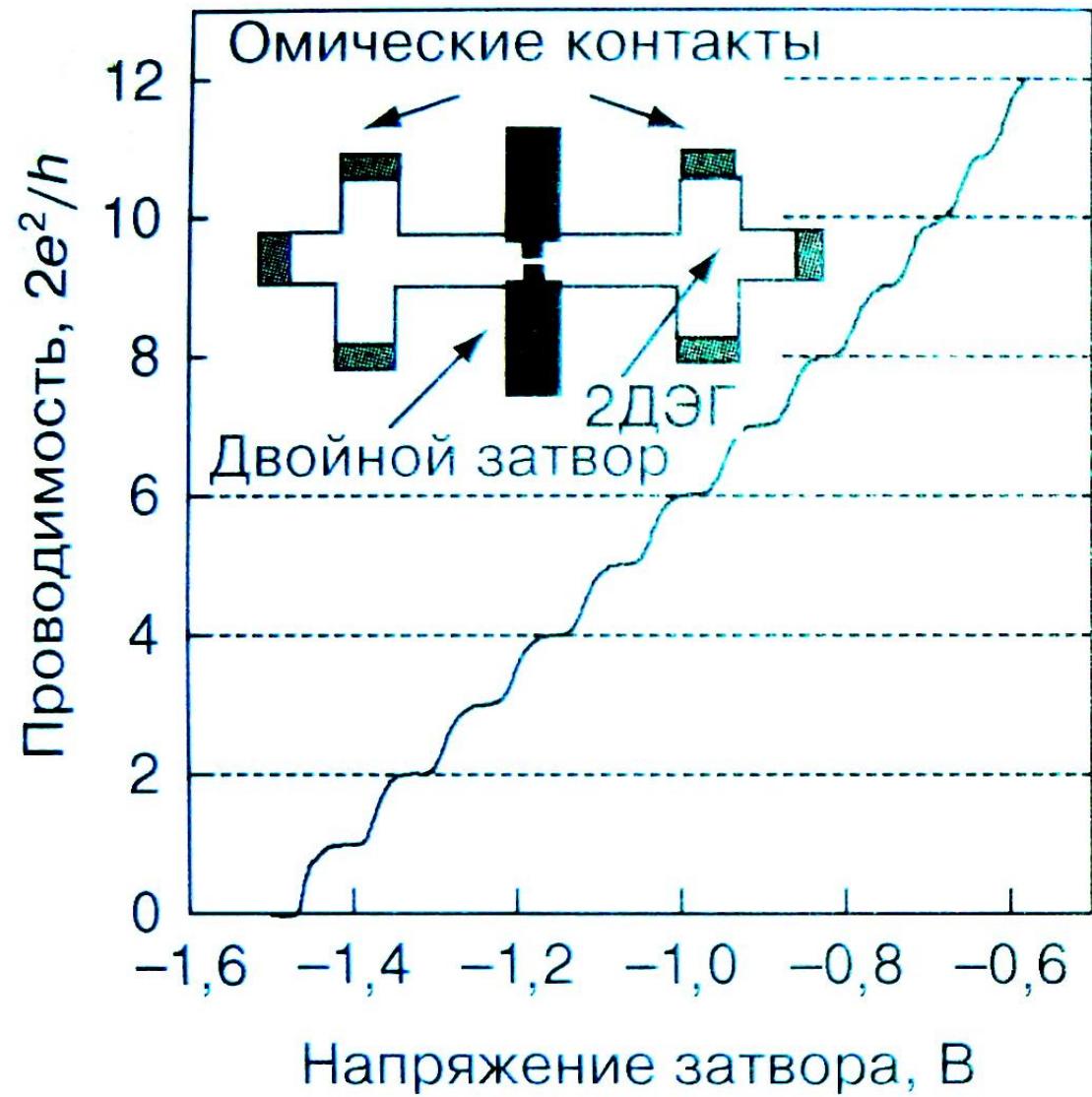
# Электронные свойства квантовых проволок



## Квантовая проводимость

A.R. Hamilton et al.,  
*Appl. Phys. Lett.*, **60**  
(1992) 2782.

$T = 17 \text{ мК}$



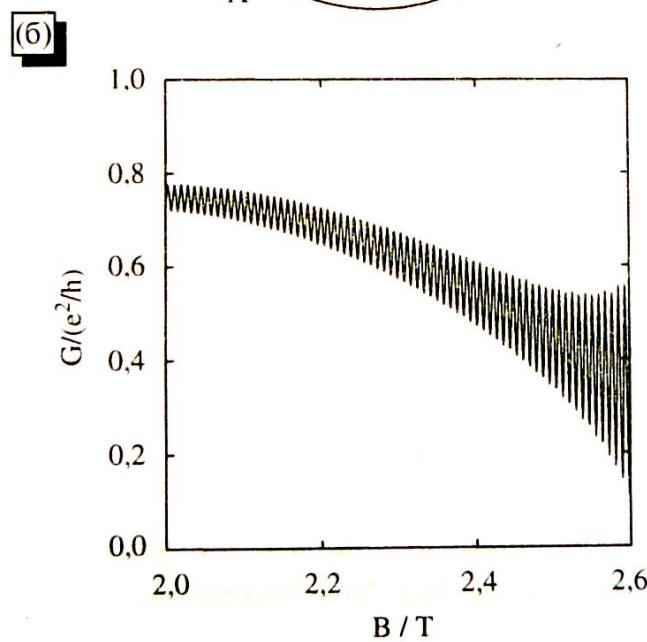
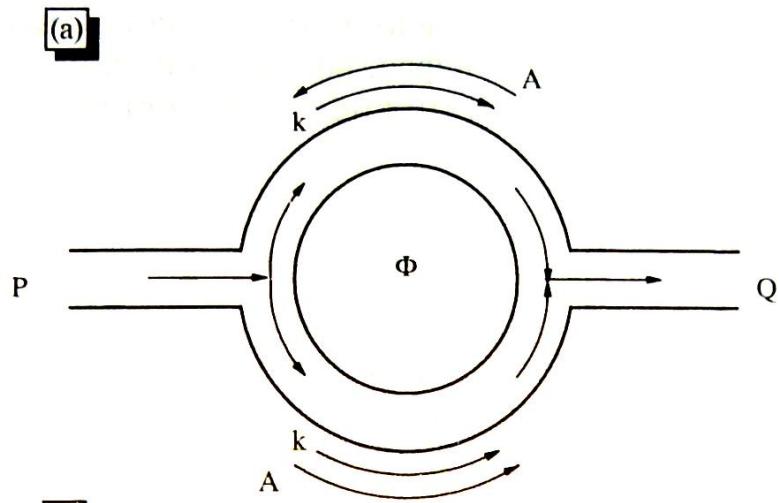
# Электронные свойства квантовых проволок



## Эффект Ааронова-Бома.

а – схема исследуемой наноструктуры,

б – осцилляции проводимости.



# Электронные свойства квантовых ям



## Эффект Холла

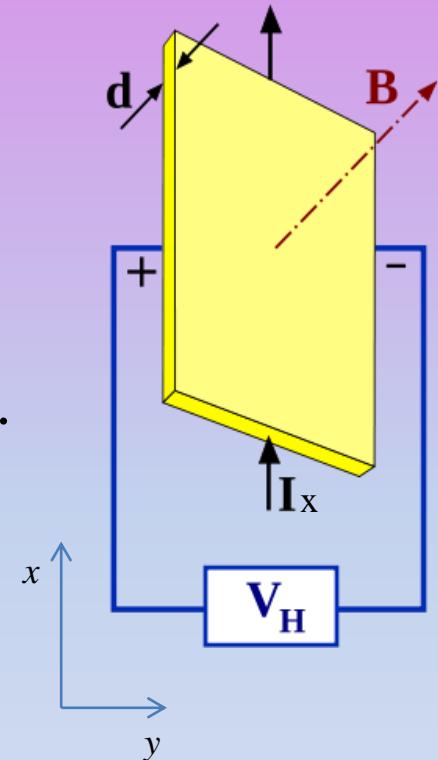
Сопротивление  $R_{xx} = \frac{V_x}{I_x}$ ,

сопротивление Холла  $R_{xy} = \frac{V_H}{I_x}$ ,

коэффициент Холла  $R_H = R_{xy} \frac{d}{B} \leftrightarrow R_{xy} = R_H \frac{B}{d}$ .

$|R_H| \approx \frac{1}{eN}$ , где  $N$  – концентрация носителей

заряда.



Квантование электронных состояний в магнитном поле:

$$E_n = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega_c \text{ (уровни Ландау), где } \omega_c = \frac{eB}{m^*} \text{ (СИ).}$$

# Электронные свойства квантовых ям



## Квантовый эффект Холла

$$R_{xy} = \frac{h}{e^2 v} = \frac{R_k}{v}$$

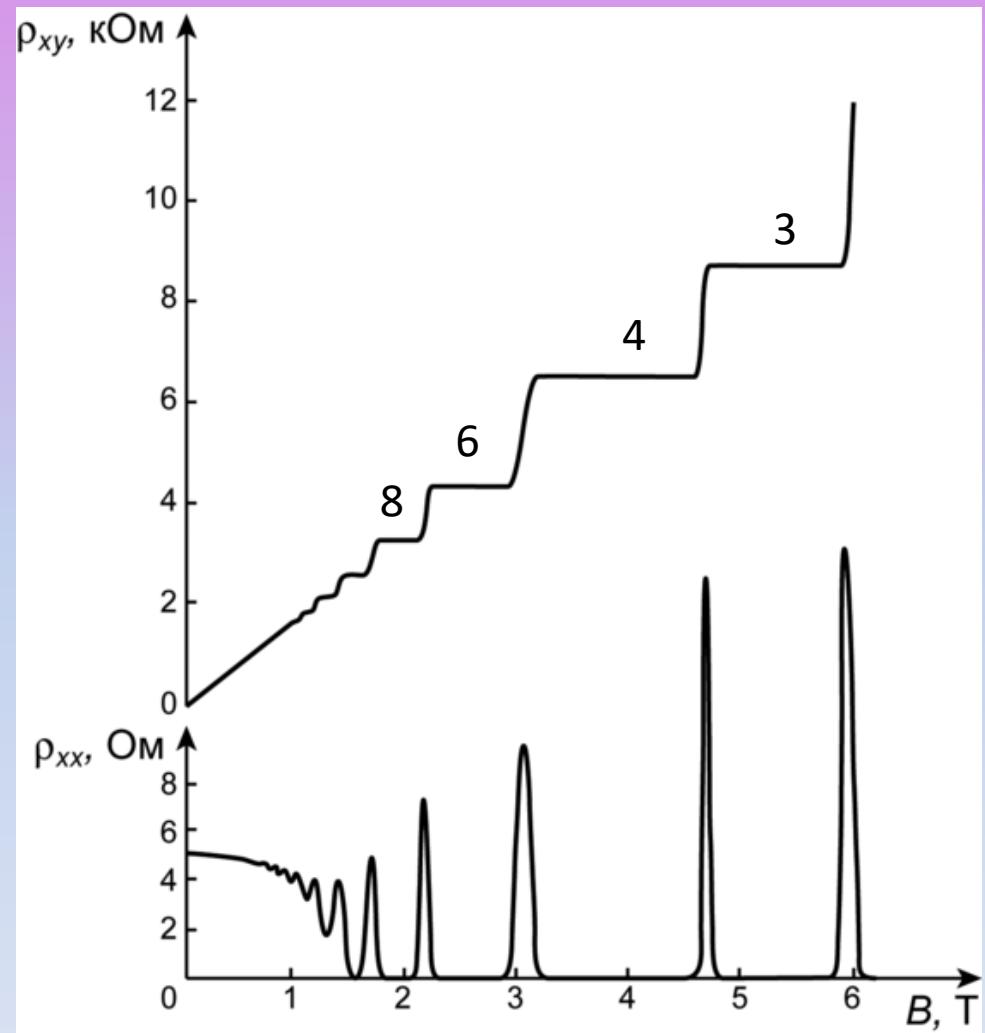
( $v = 1, 2, 3, \dots$ ).

$$R_k = \frac{h}{e^2} = 25812,807 \text{ Ом} -$$

постоянная фон Клитцинга.

Зависимости холловского сопротивления и удельного сопротивления от магнитного поля.

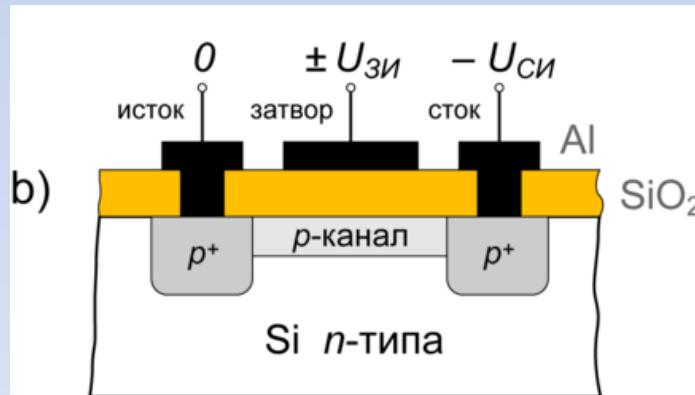
К. фон Клитцинг, «Квантовый эффект Холла: Нобелевские лекции по физике — 1985 г.», УФН, 150, 107 (1986).



# Устройства на основе полупроводников



## Установка ультрафиолетовой литографии



Википедия, [Antikon](#)

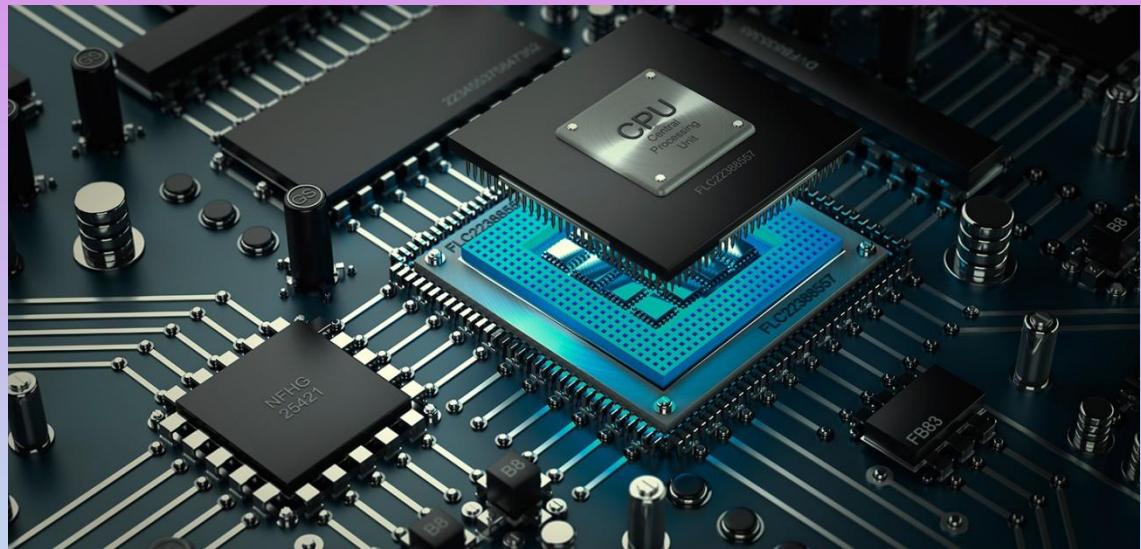
## Полевые транзисторы с изолированным затвором

# Технология изготовления процессоров



Техпроцесс (длина затвора транзистора):

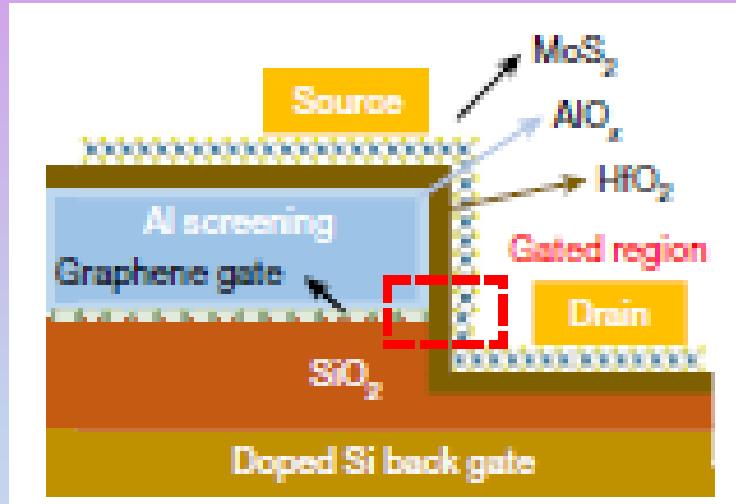
2004 – 65 нм,  
2011 – 32 нм,  
2015 – 14 нм,  
2017 – 10 нм,  
2024 – 03 нм.



Процессоры на одинаковой архитектуре, но произведенные с использованием разного техпроцесса, будут отличаться в следующих аспектах:

- тактовая частота (повышение производительности);
- потребление энергии;
- возможное увеличение количества ядер;
- снижение себестоимости производства;
- больше кэш-памяти, для которой на кристалле можно выделить больше места.

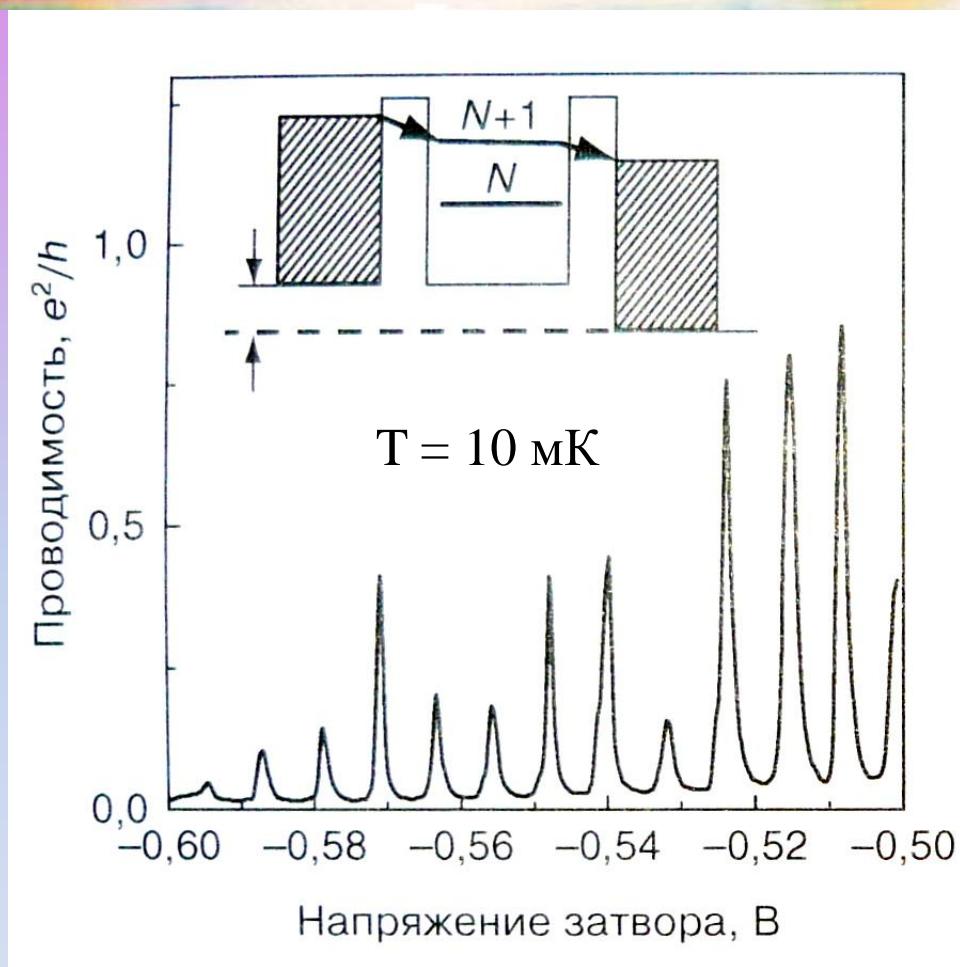
# Технология изготовления процессоров



0.34 nm  $L_g$  side-wall transistor

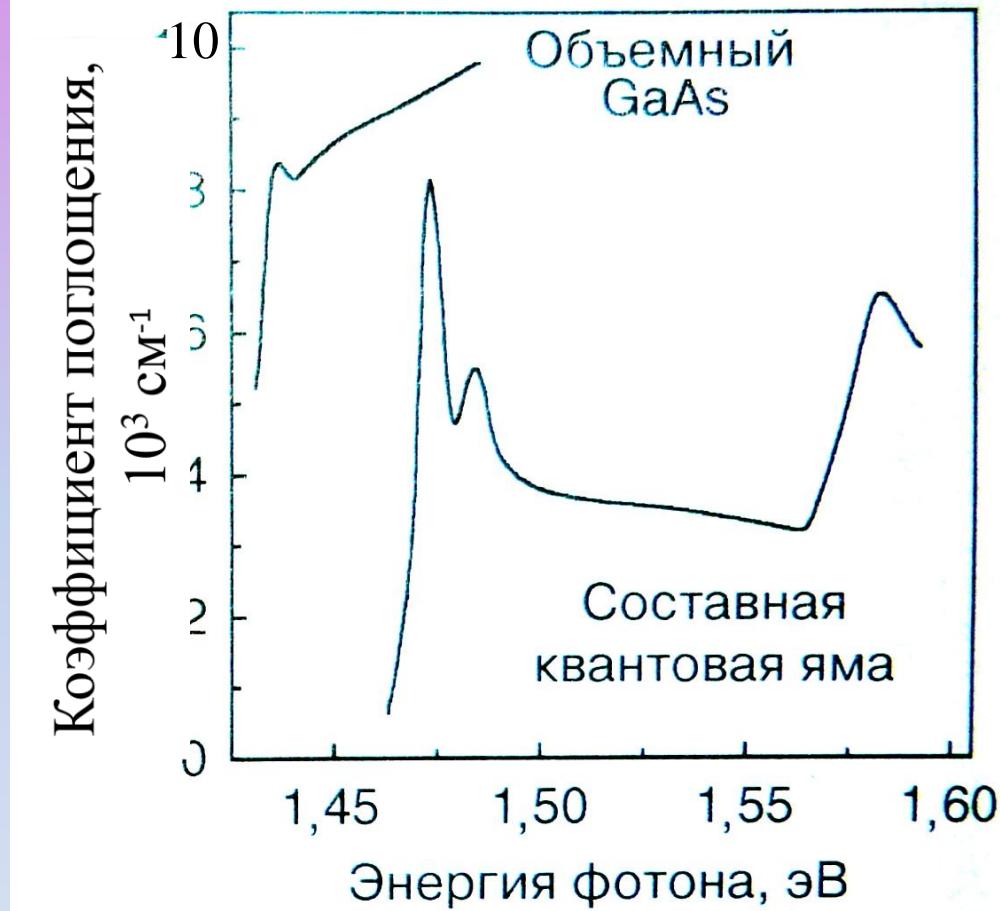
F. Wu et al., *Nature*, **603** (2022) 259.

# Электронные свойства квантовых точек



**Одноэлектронный транзистор на эффекте кулоновской блокады** (L.P. Kouwenhoven et al., *Zeitschrift fur Physik B*, **85** (1991) 367).

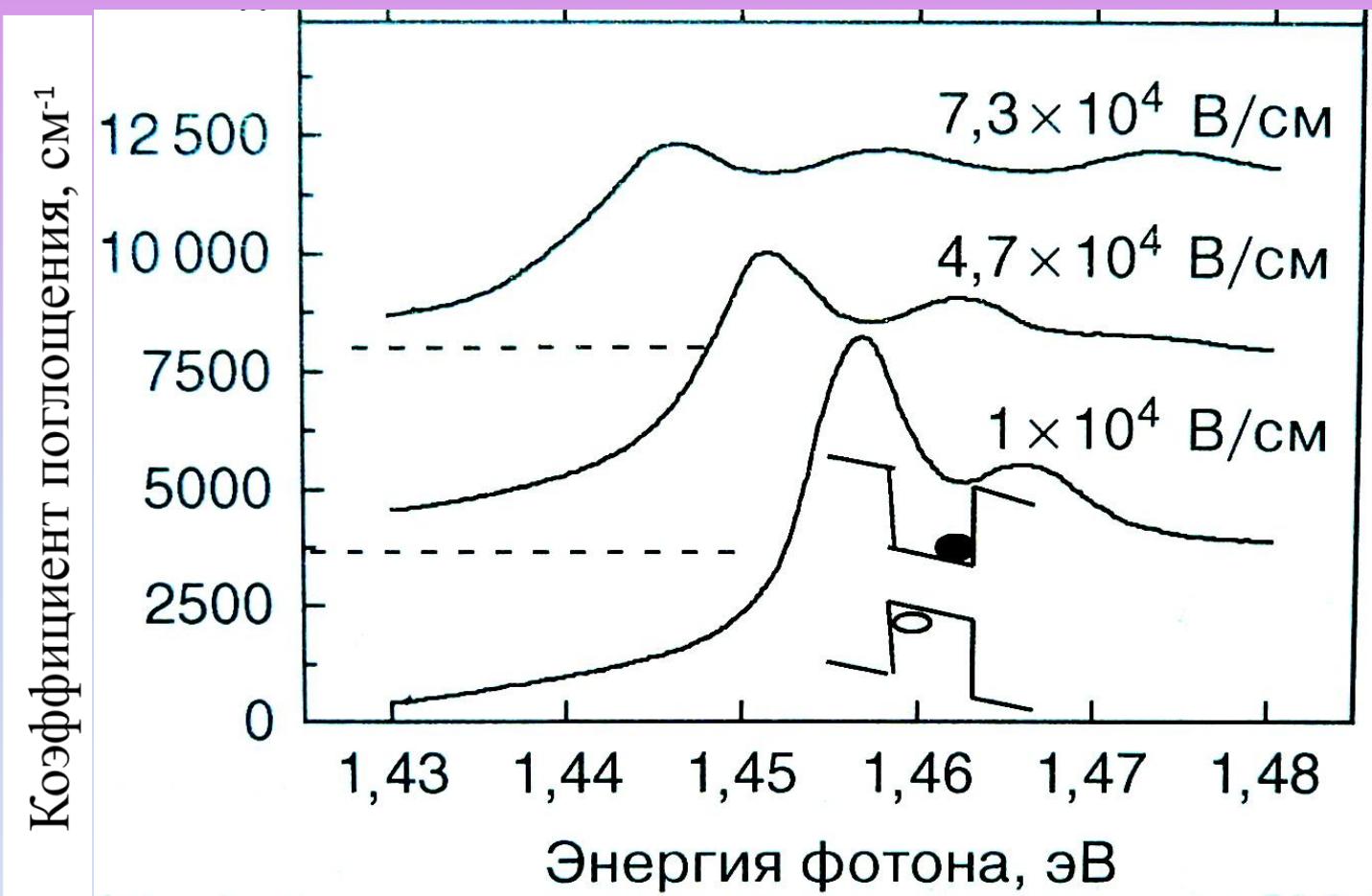
# Оптические свойства квантовых ям



**Спектр экситонов при комнатной температуре**

(D.A.B. Miller et al., *Appl. Phys. Lett.*, **41** (1982) 679).

# Оптические свойства квантовых ям



Спектр поглощения квантовой ямы в перпендикулярном  
электрическом поле (квантово-ограниченный эффект Штарка)

D.A.B. Miller et al., *Phys. Rev. B*, 32 (1985) 1043.

# Оптоэлектронные свойства квантовых ям и точек

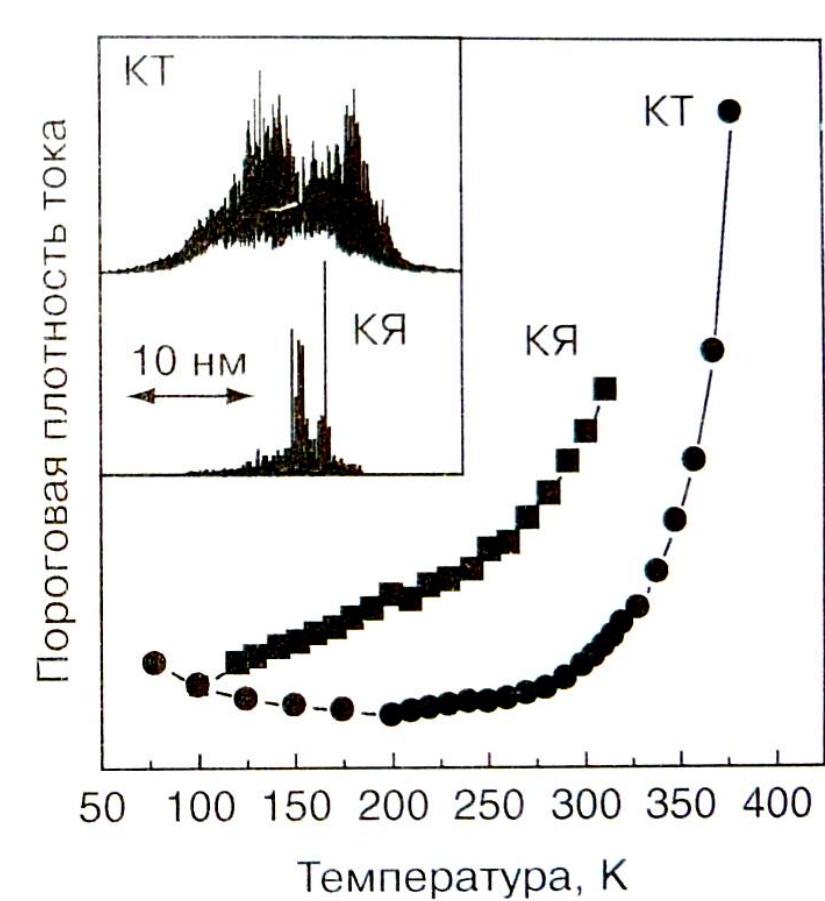


Пороговый ток

$$j = j_0 \exp(t/t_0), \text{ где}$$

$t_0 = 104, 285, 481 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\infty$

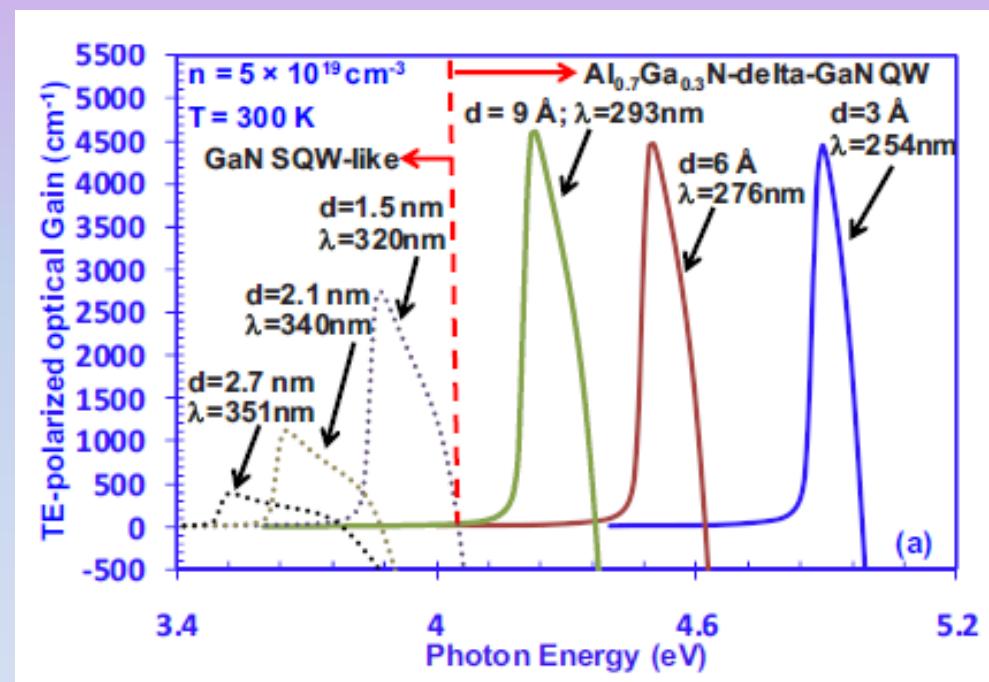
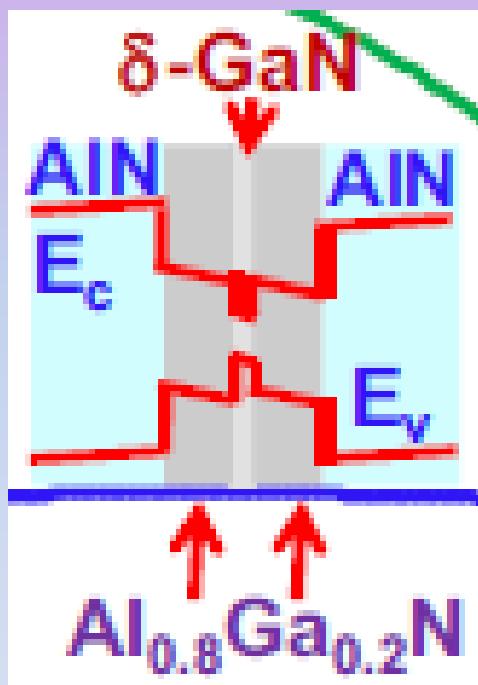
для объемных кристаллов,  
квантовых ям, проволок и  
точек, соответственно  
(расчетные значения).



Температурные зависимости пороговых плотностей тока инжекционных лазеров на квантовых ямах (квадратики) и самособирающихся квантовых точках (кружки). На вставке: спектры излучения лазеров.

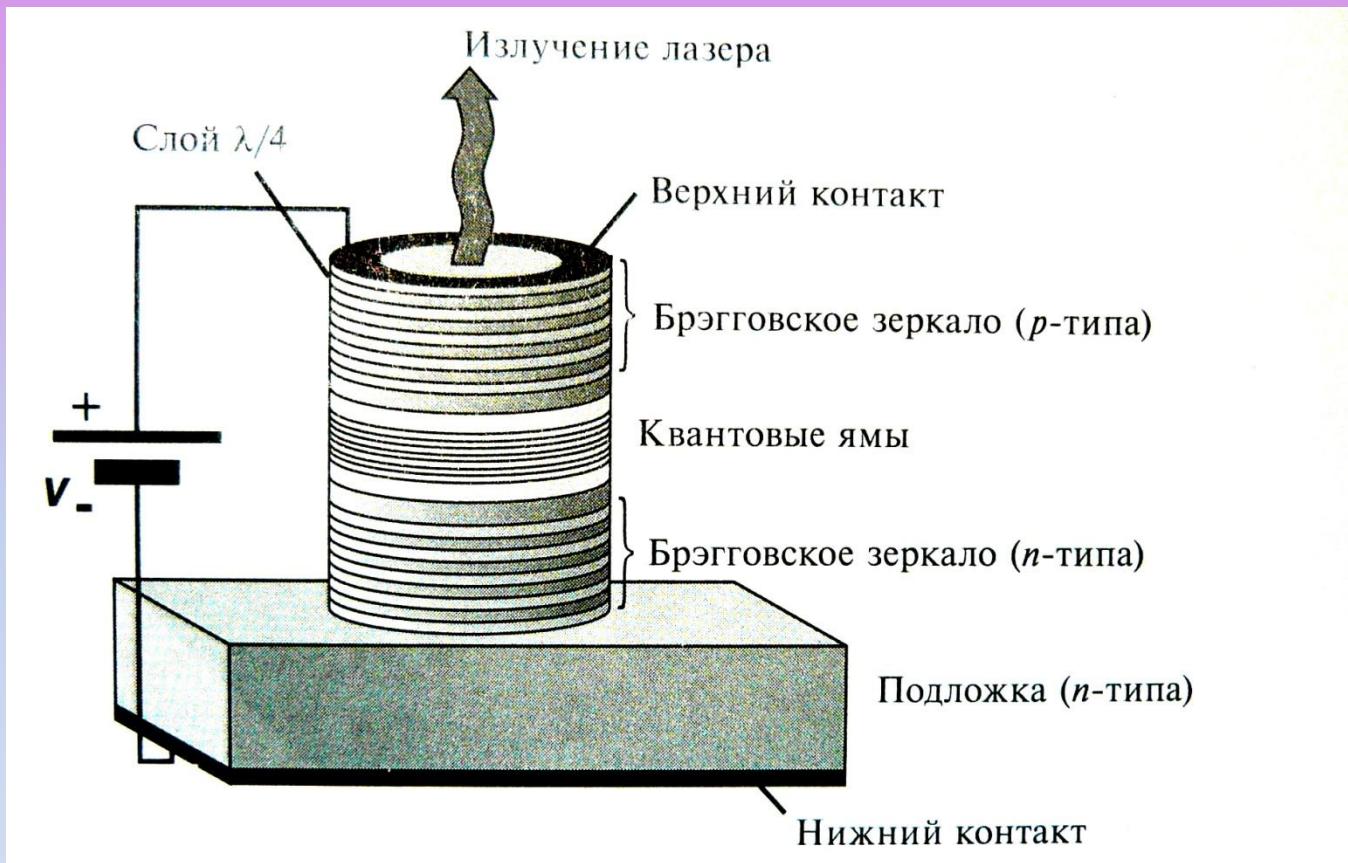


## Спектры усиления для лазерных усилителей, построенных на двойной квантовой яме



J. Zhang, H. Zhao, N. Tansu. Appl. Phys. Lett. 98 (2011) 171111.

# Оптоэлектронные свойства квантовых ям

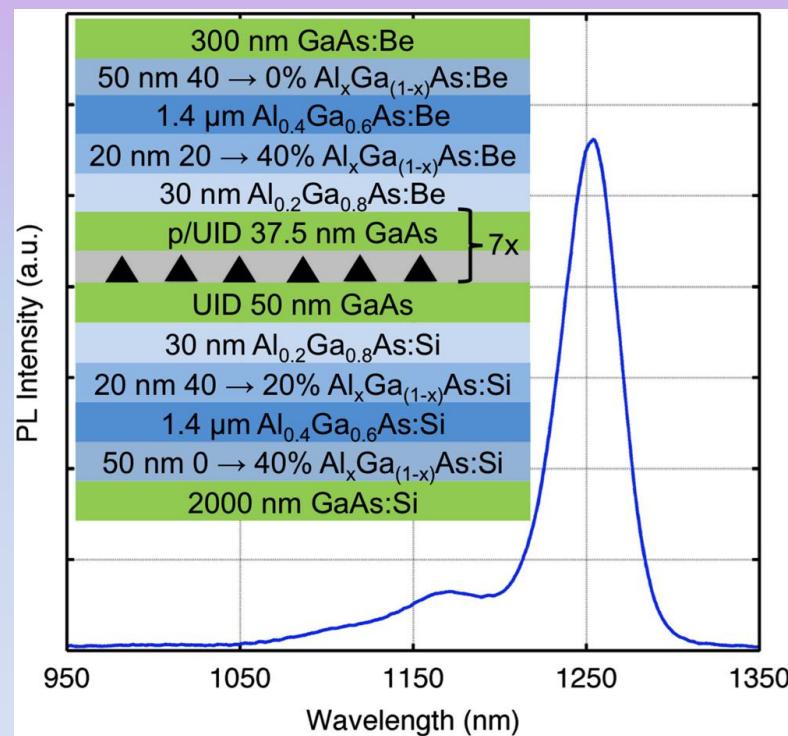


**Схема строения лазера на квантовых ямах с вертикальным резонатором**



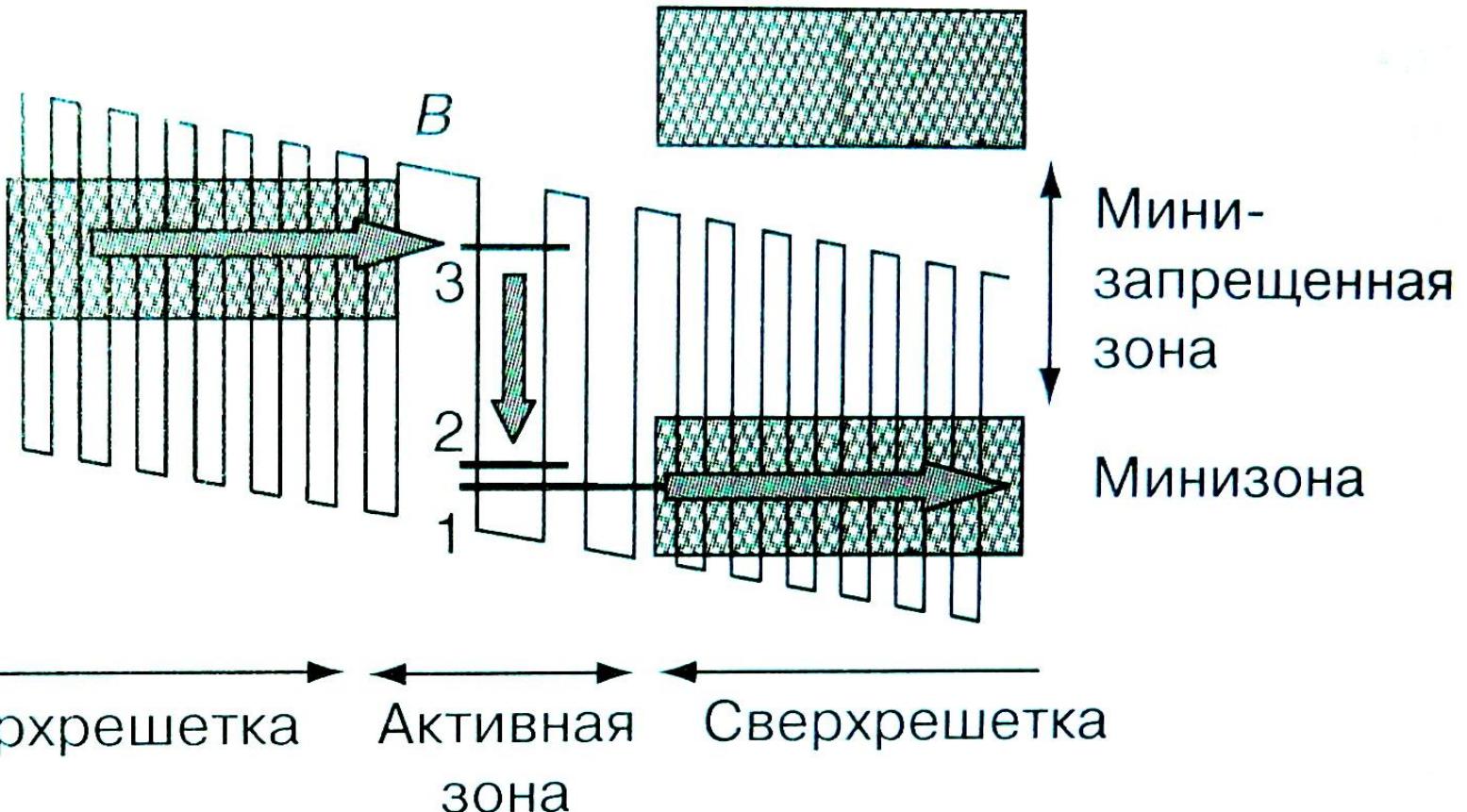
## 1,3 мкм лазер на квантовых точках InAs на кремниевой подложке

Структура слоев и спектр фотолюминесценции квантовых точек



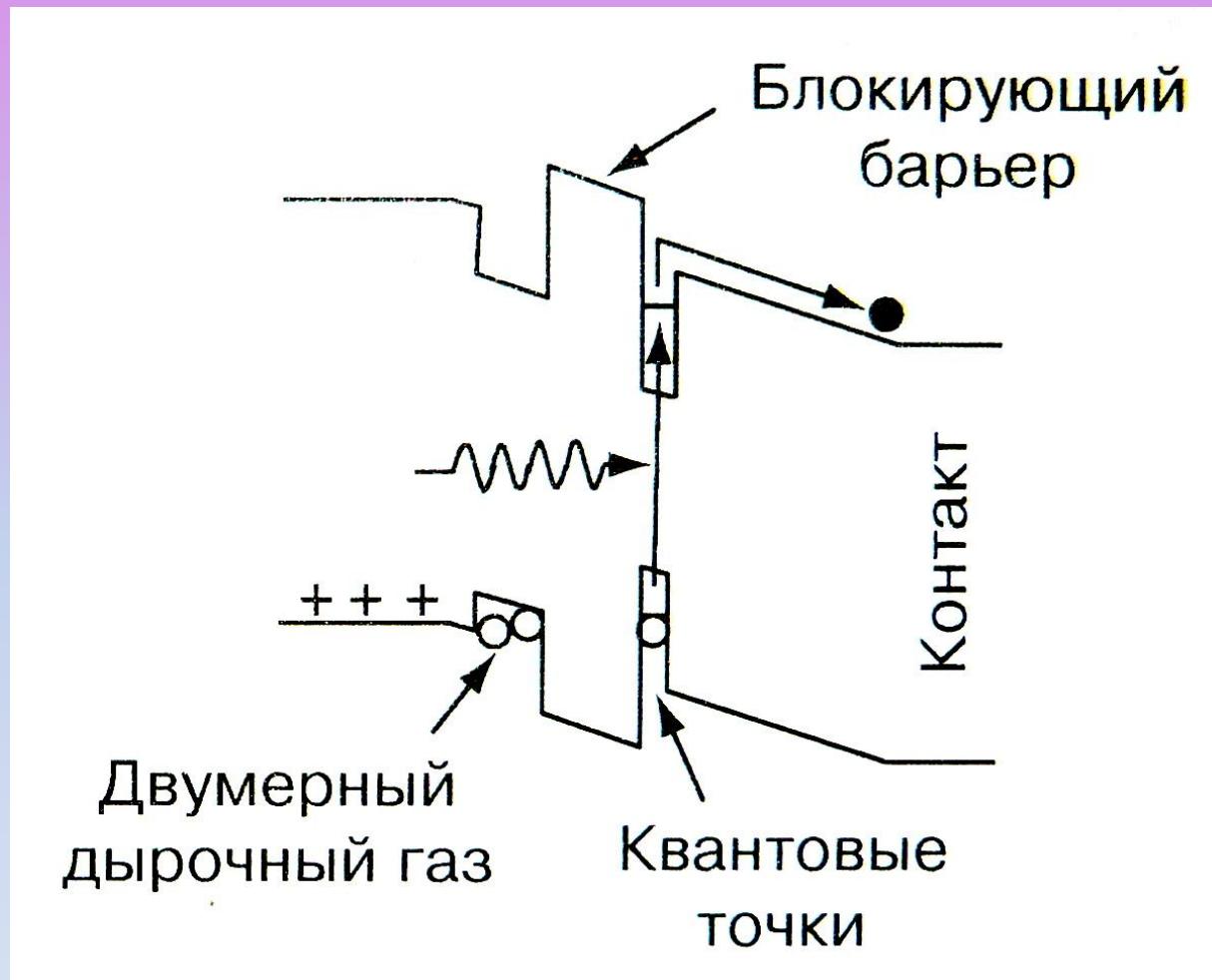
A.Y. Liu et al. Appl. Phys. Lett. 104 (2014) 041104.

# Оптоэлектронные свойства квантовых ям



**Зонная структура квантового каскадного лазера**

# Оптоэлектронные свойства квантовых точек



Зонная структура запоминающего устройства на  
квантовых точках

# Технологии атомного уровня

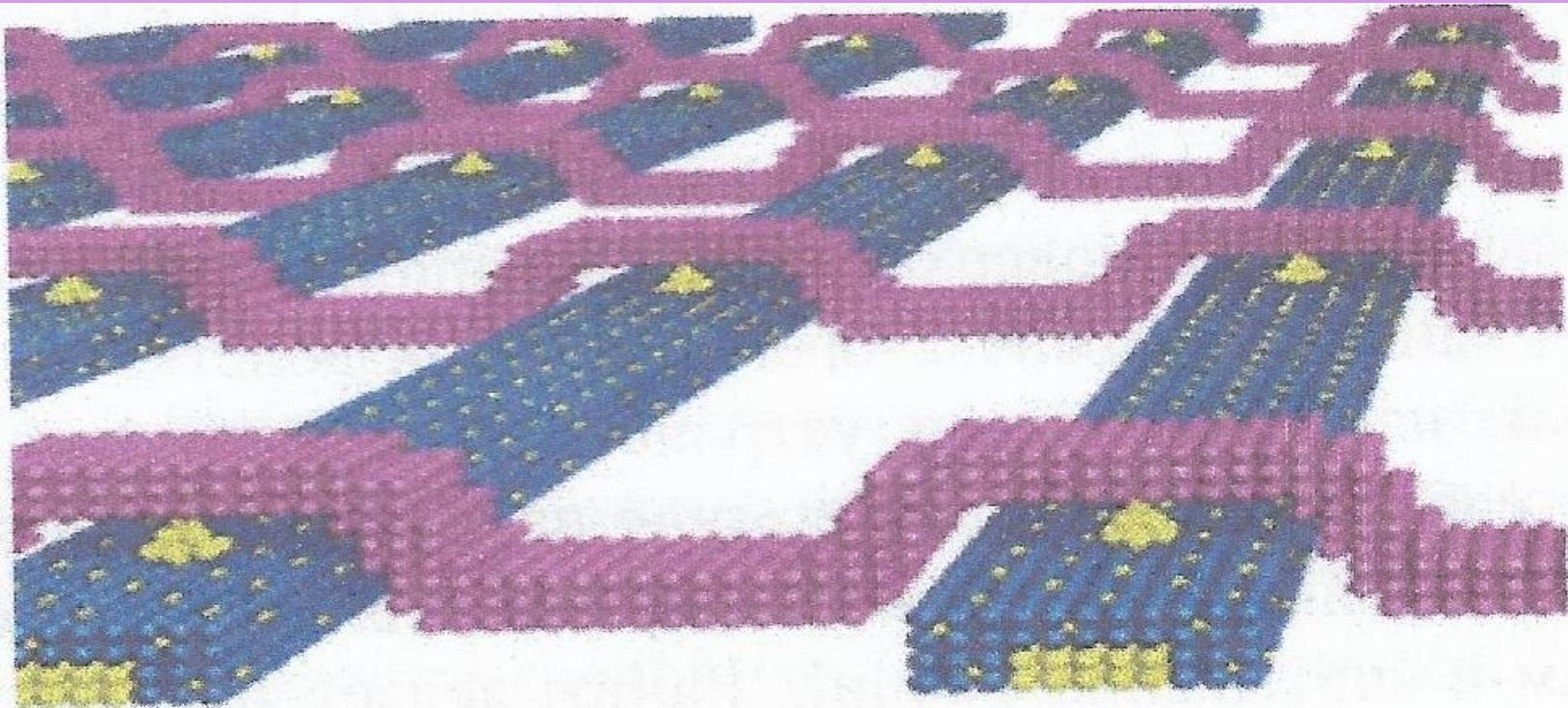


Рис. 2.1. Матрица квантовых наноключей

**Запоминающее устройство на самособирающихся наноключах из атомов серебра.**

Из книги: В.Д. Казаков. Наноматериалы и наноустройства в радиоэлектронике. / Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. С. 40.

# Вопросы



- 1. В чем заключается метод электрического наведения?**
- 2. Что такое режим Странского-Крастанова? Почему в этом режиме происходит рост квантовых точек?**
- 3. Что такое модулированное легирование?**
- 4. В чем причина возникновения квантовой проводимости в квантовых проволоках?**
- 5. В чем состоят преимущества и недостатки инжекционных лазеров на квантовых точках?**
- 6. Что такое квантовый каскадный лазер? Для чего он может быть полезен?**