

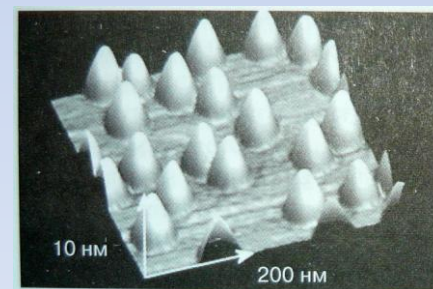
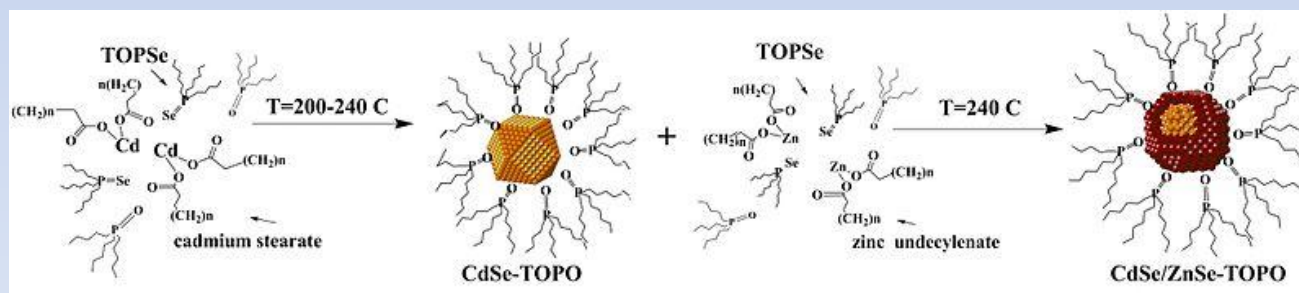
7. Наноразмерные полупроводники



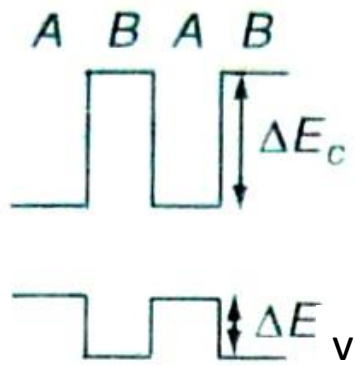
I. Типы полупроводниковых наноструктур и методы их изготовления:

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

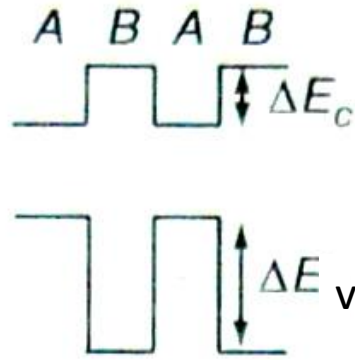
II. Физические явления в полупроводниковых наноструктурах и их применения



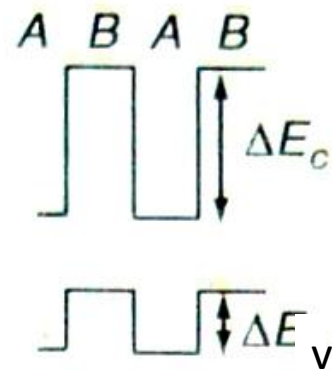
Квантовые ямы



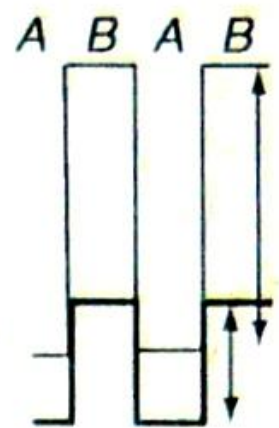
I



I



II



II

Типы квантовых ям

Квантовые ямы, проволоки и точки



Квантовая яма I типа шириной L :

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

для зоны проводимости и аналогичная формула для дырок в валентной зоне.

Дно зоны проводимости сдвигается вверх до первого квантового уровня $E_{1,0} \approx \frac{\pi^2 \hbar^2}{2 m_e^* L^2}$,
потолок валентной зоны — вниз до $E_{1,0} \approx \frac{\pi^2 \hbar^2}{2 m_h^* L^2}$.

Отсюда эффективная ширина запрещенной зоны

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



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:

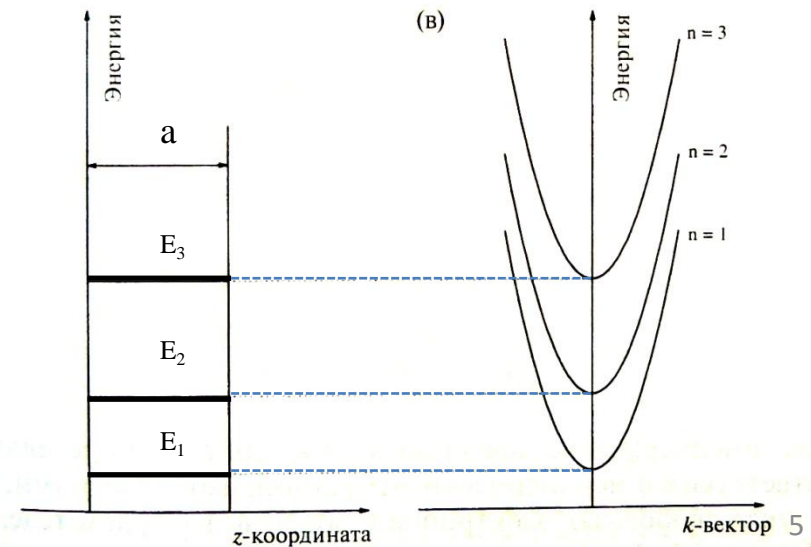
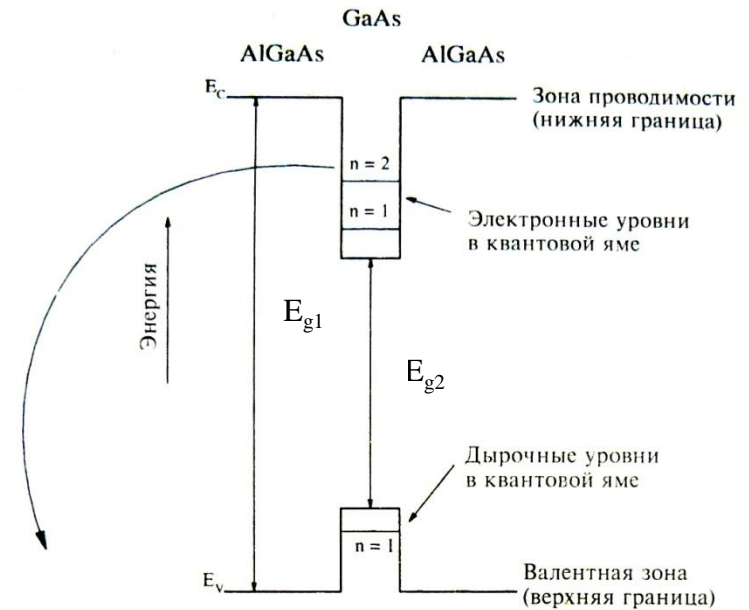
$$E_{n,m,l} \approx \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* L_z^2} + \frac{\pi^2 \hbar^2 m^2}{2m^* L_y^2} + \frac{\pi^2 \hbar^2 l^2}{2m^* L_x^2}$$

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

Квантовые ямы

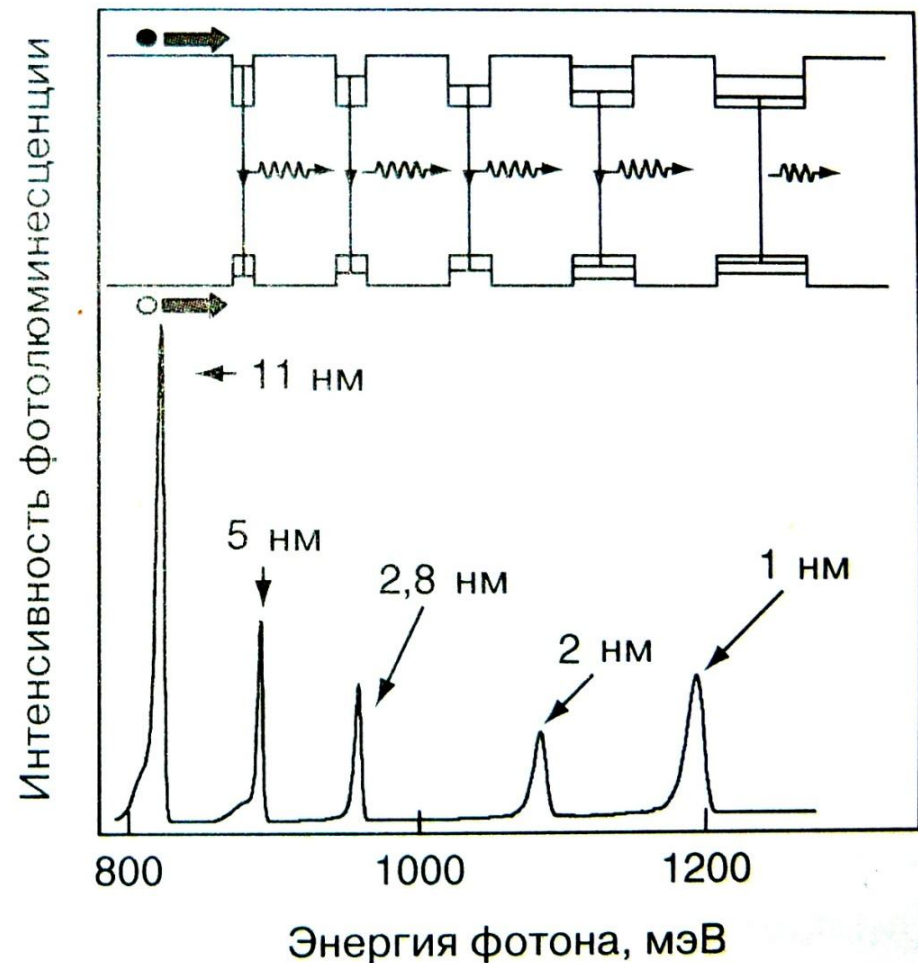


Схема уровней в яме типа I





$$E_g^{\text{эф}} = E_g + A/L^2$$



Спектр люминесценции 5 ям разной ширины

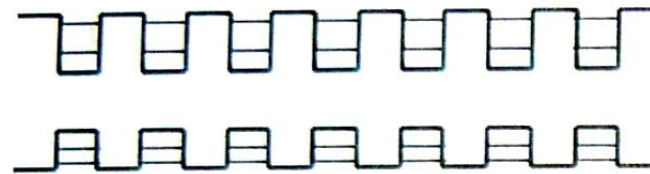
Квантовые ямы



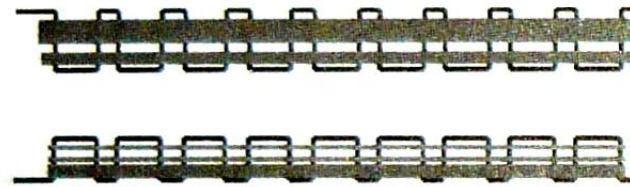
Составная яма:

Сверхрешетка:

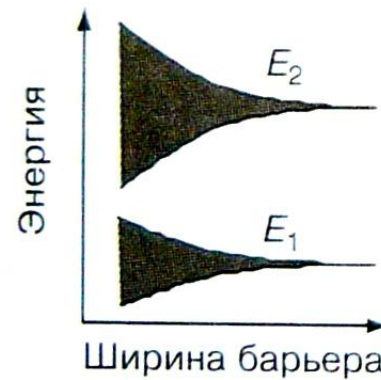
**Изменение спектра при
превращении составной
ямы в сверхрешетку**



a



б



в



Методы изготовления квантовых ям:

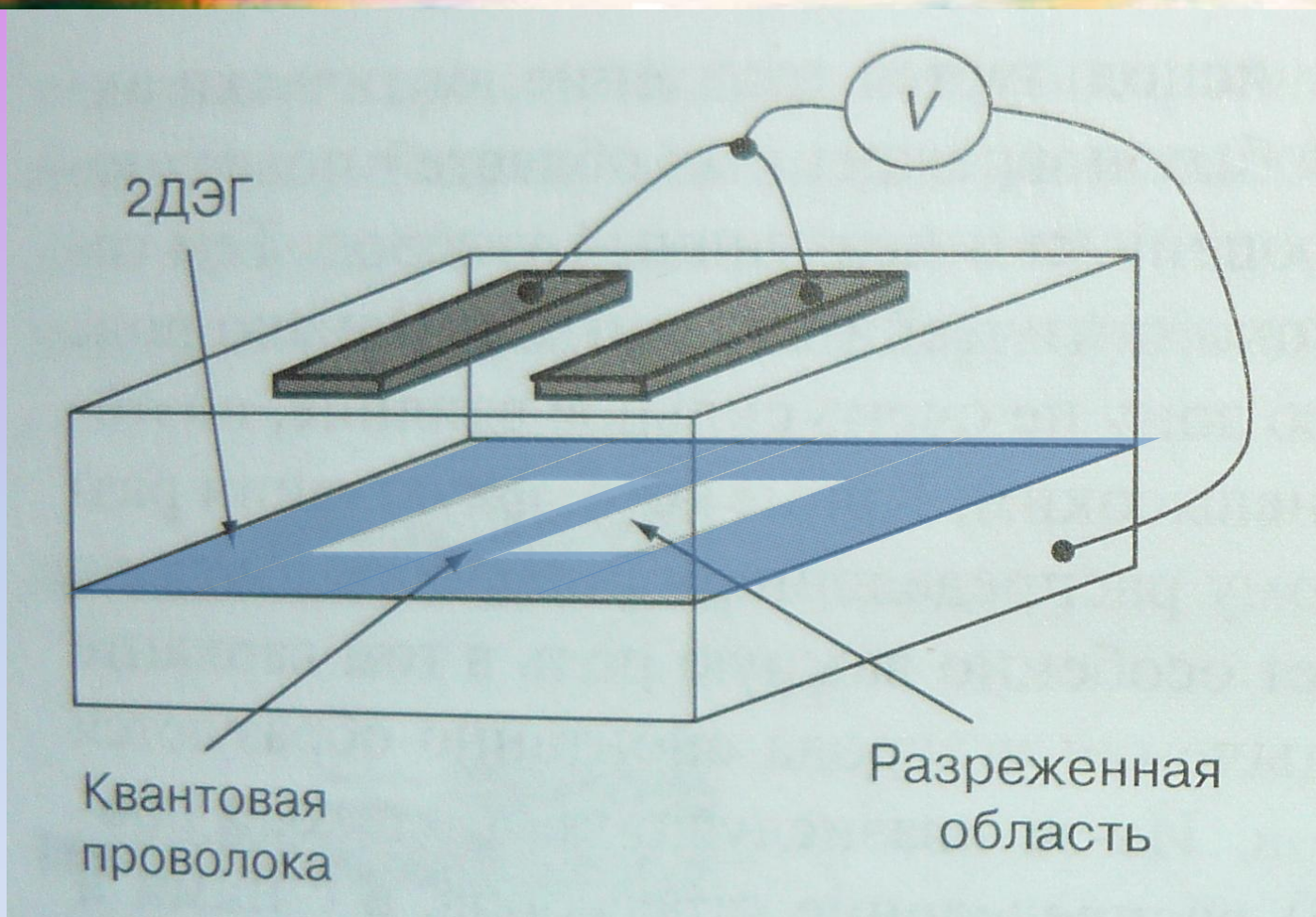
эпитаксиальное выращивание (МПЭ, МОГФЭ и пр.).

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.



Изготовление квантовой проволоки методом электрического наведения

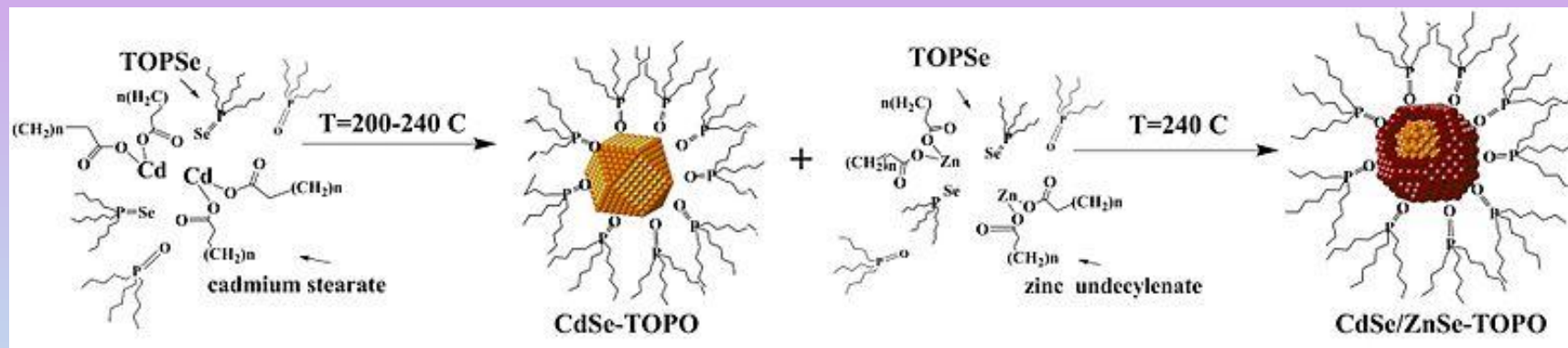


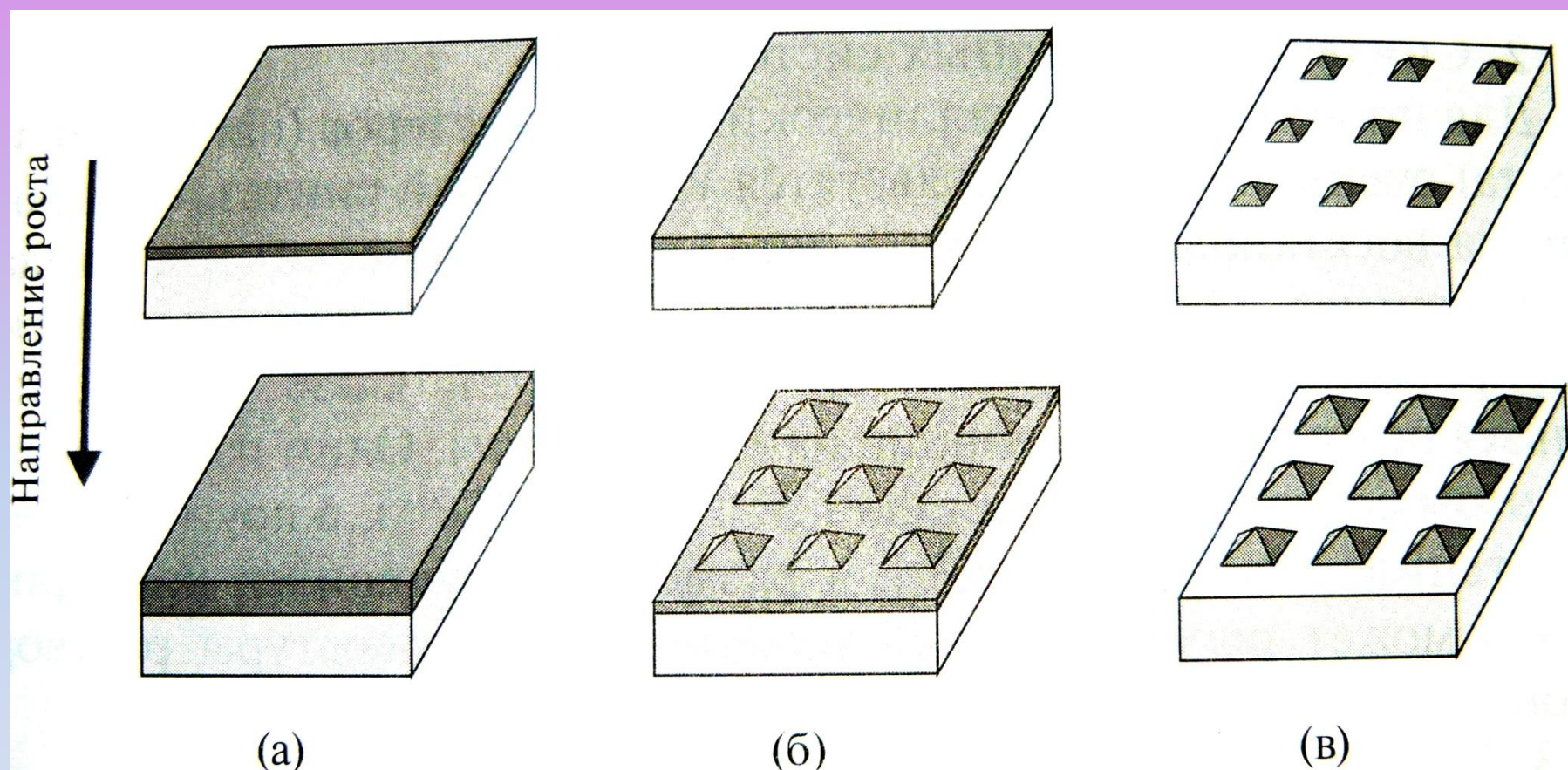
Схема синтеза CdSe-ZnSe квантовых точек
(википедия, quantum-dots.ru)



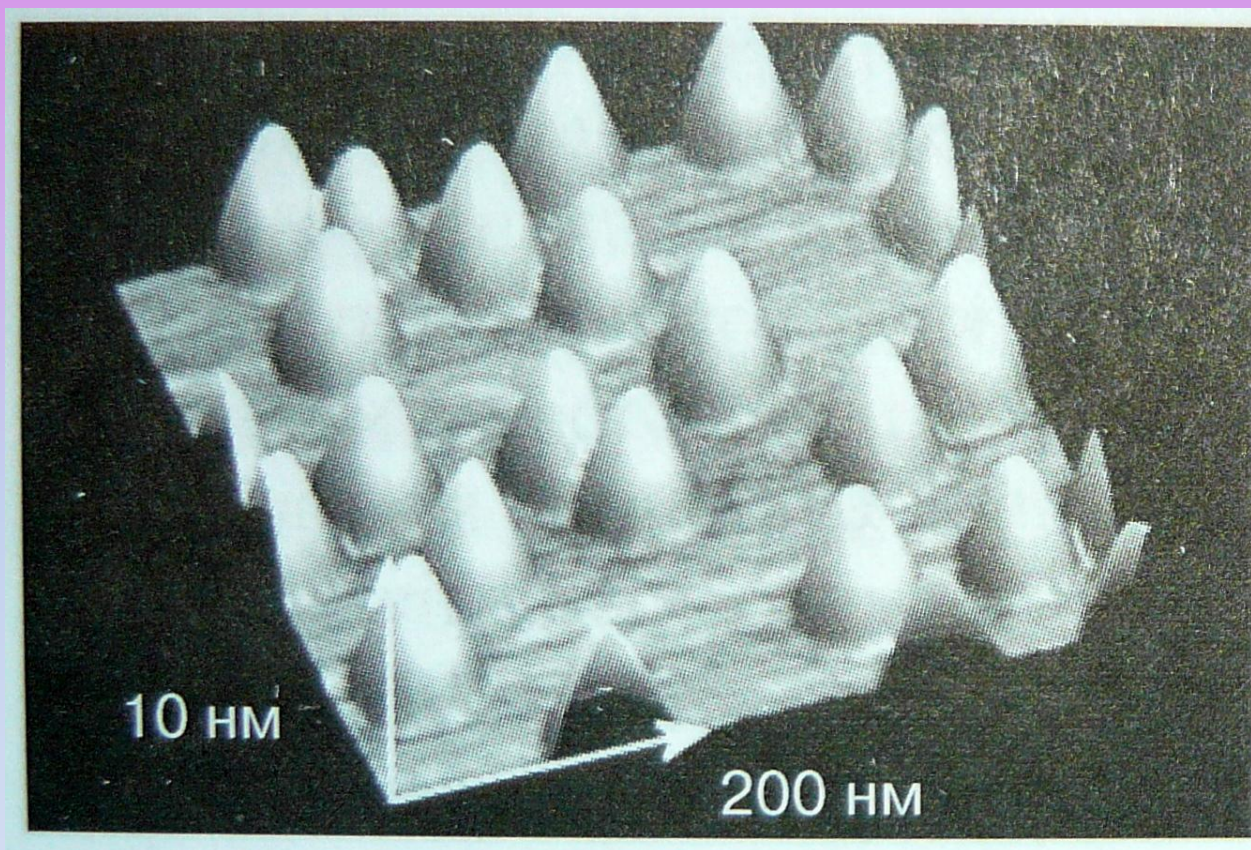
$$E_g^{\text{эф}} = E_g + A/L^2$$



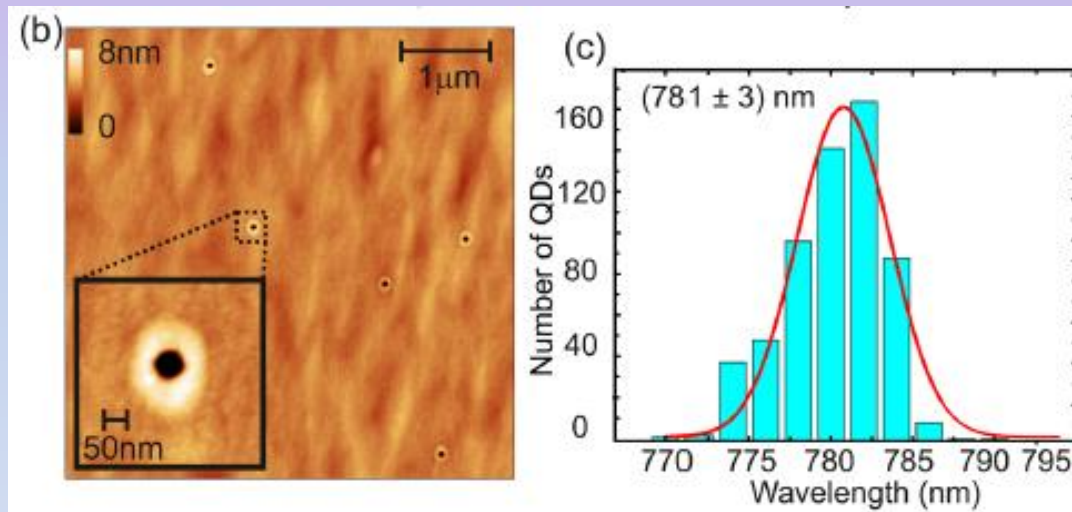
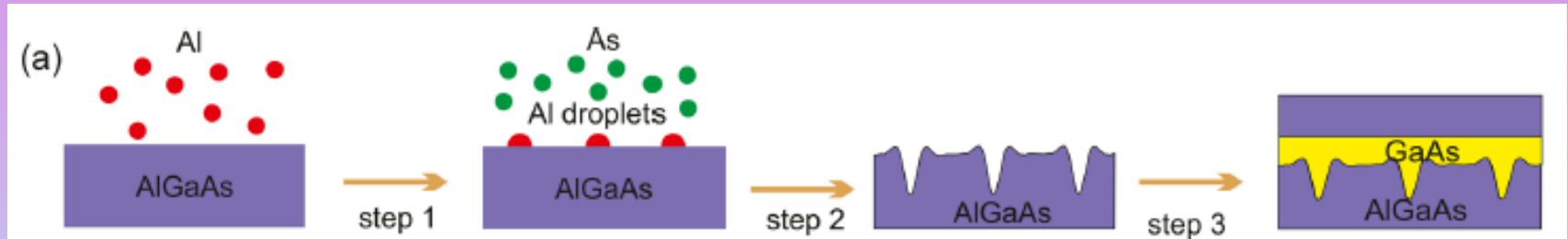
Коллоидные растворы квантовых точек CdSe разного размера



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



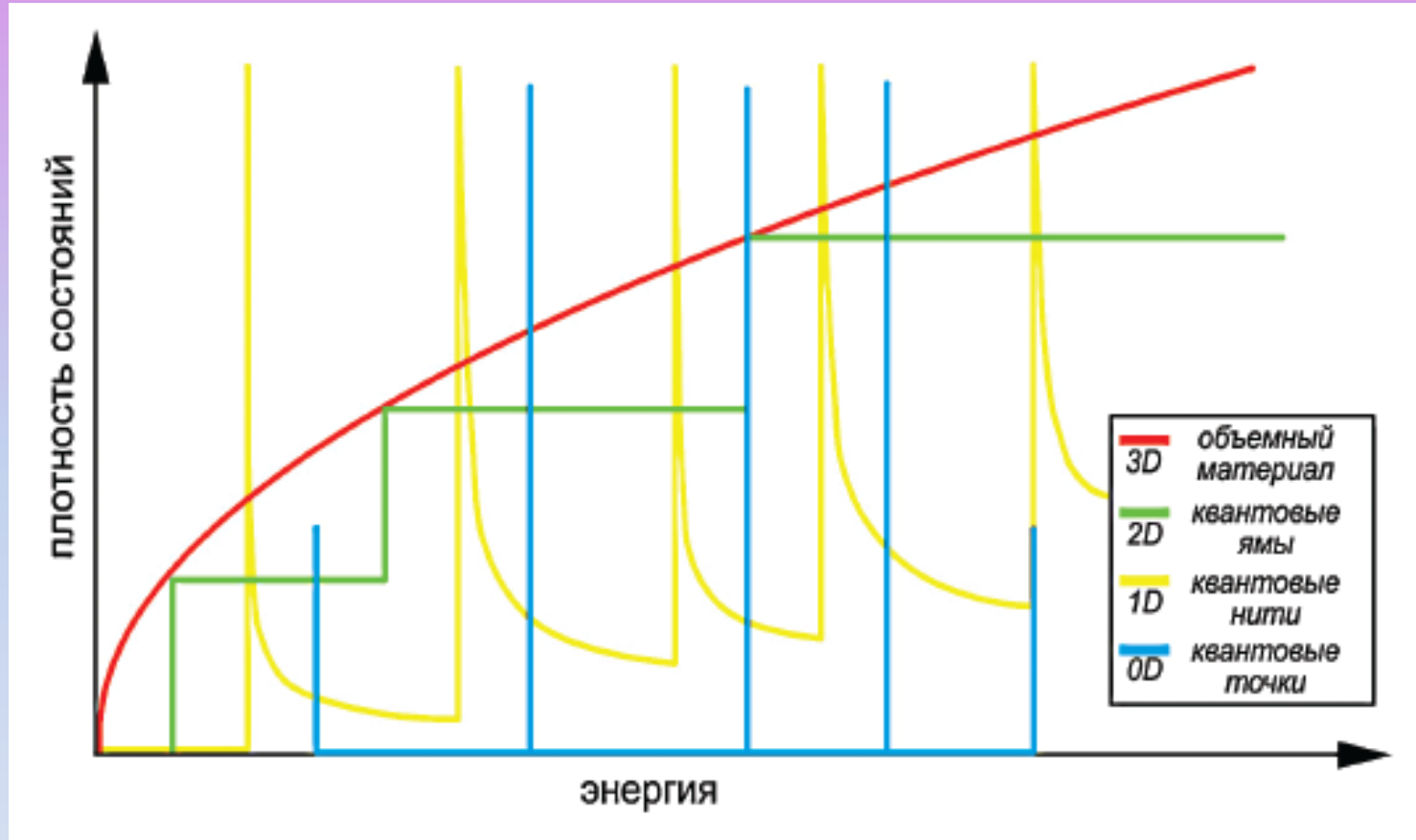
АСМ-изображение непокрытых самособирающихся квантовых точек InAs на поверхности GaAs.



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.



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

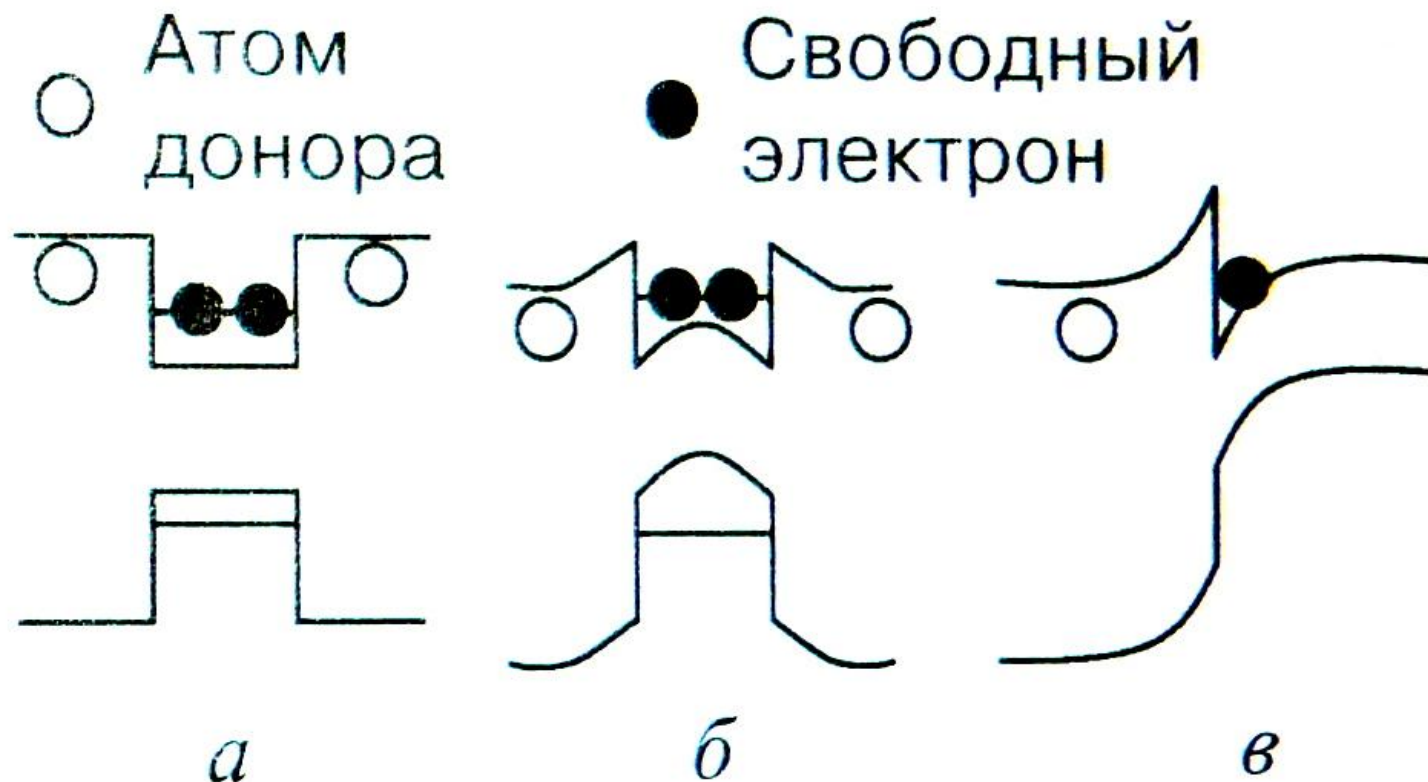
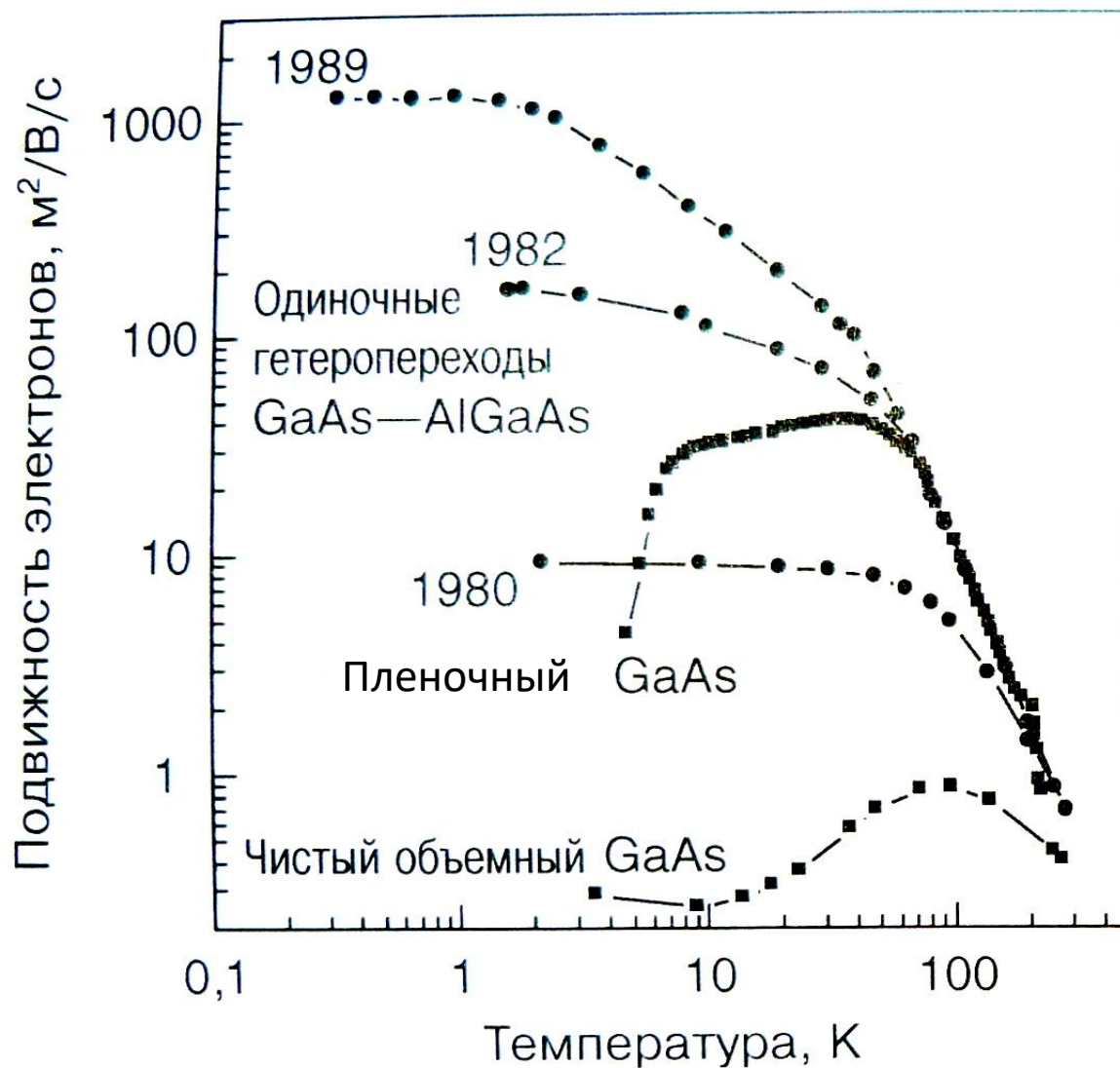


Схема модулированного легирования

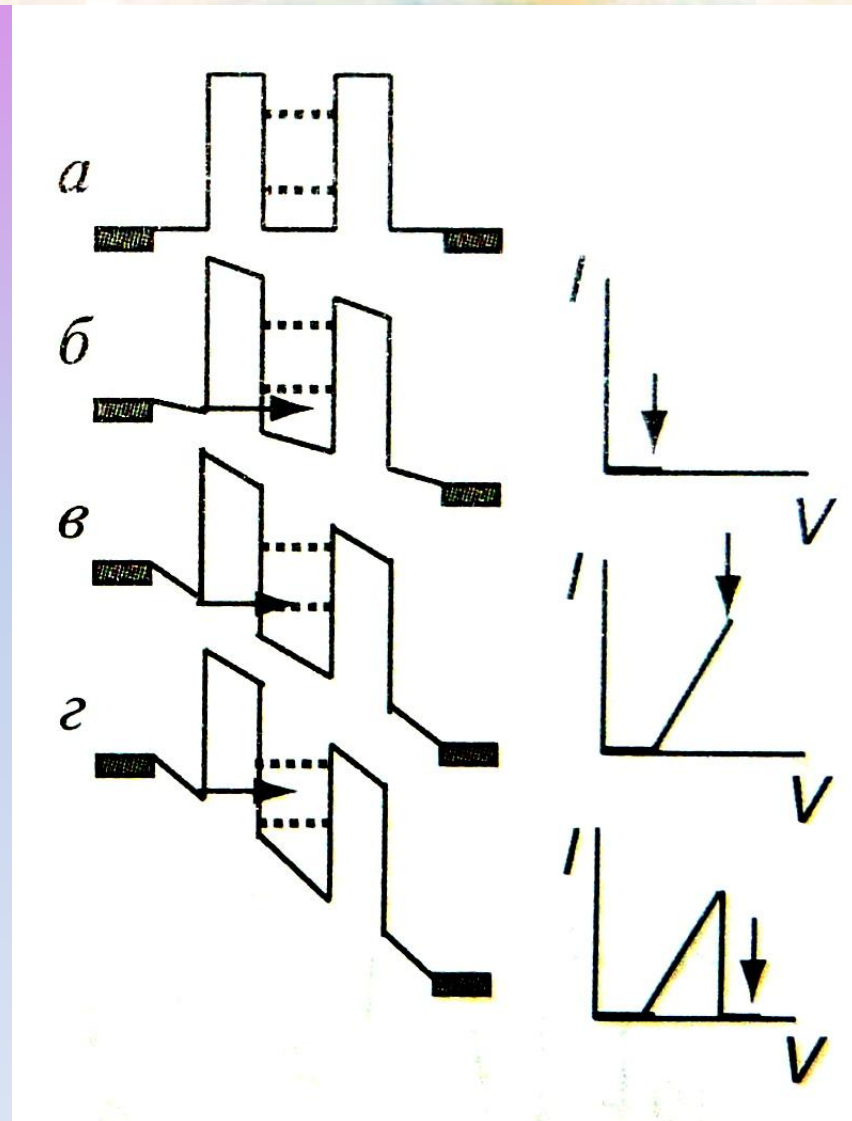
Электронные свойства квантовых ям



Электронные свойства квантовых ям



Схема структуры
с резонансным
туннелированием



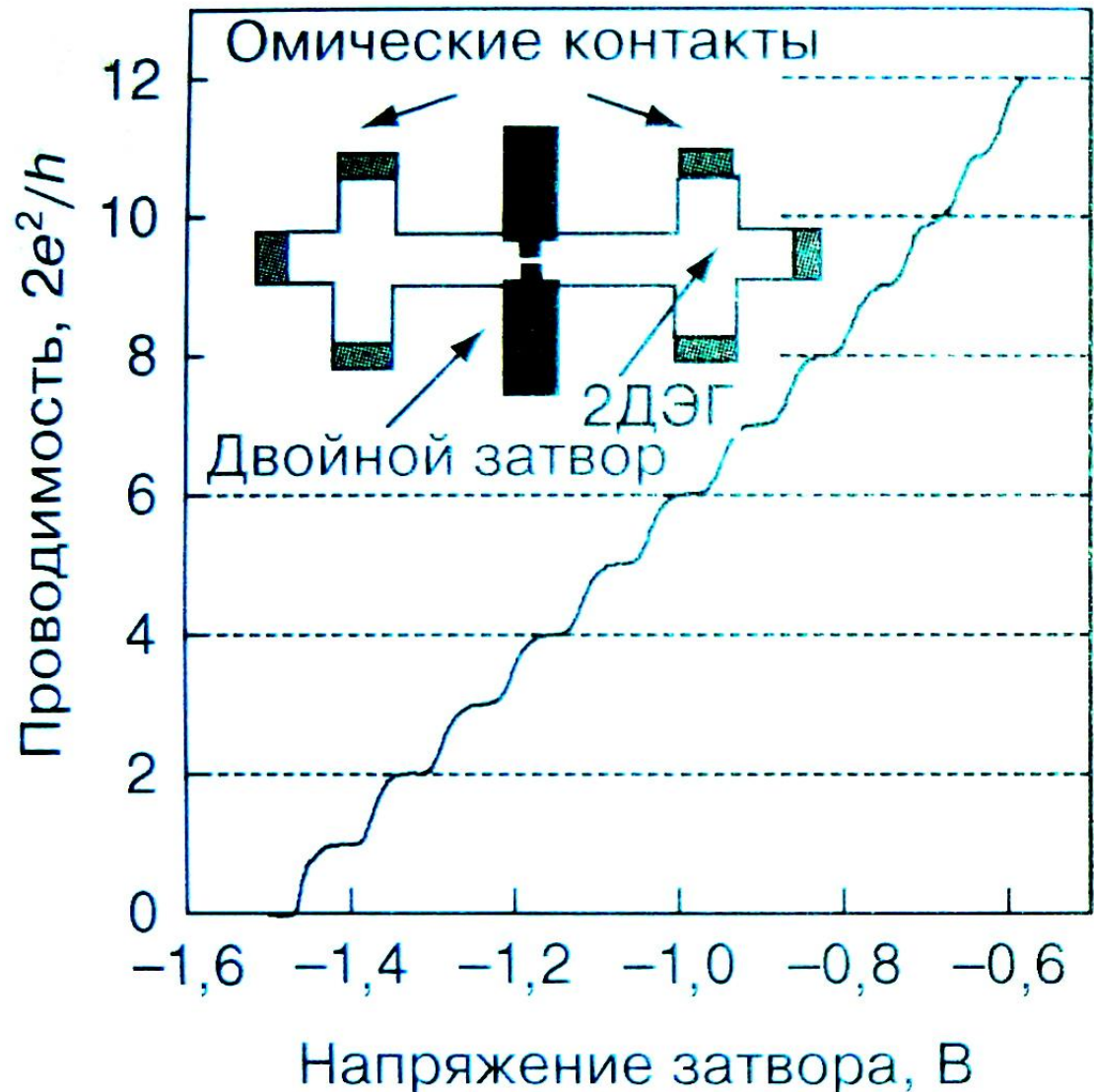
Электронные свойства квантовых проволок



Квантовая проводимость

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

$T = 17$ мК

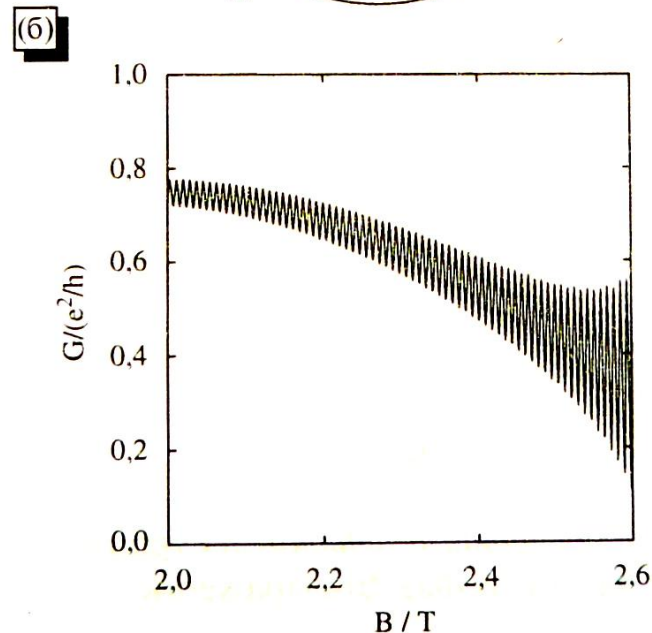
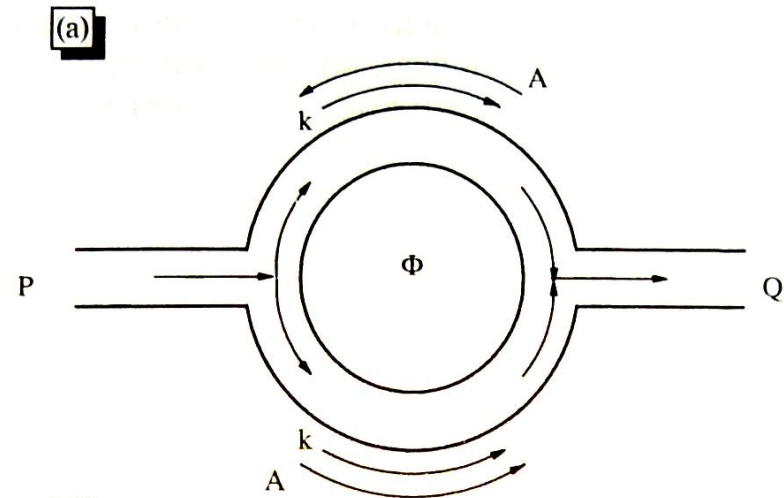


Электронные свойства квантовых проволок



Эффект Ааронова-Бома.

а – схема исследуемой наноструктуры,
б – осцилляции проводимости.



Электронные свойства квантовых ям



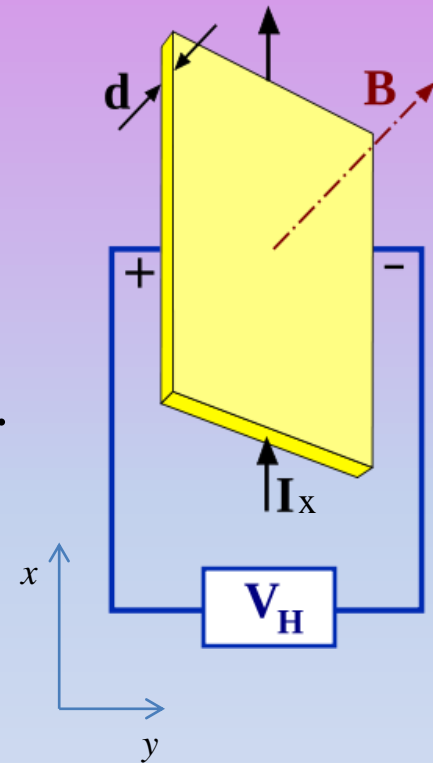
Эффект Холла

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:

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

Электронные свойства квантовых ям



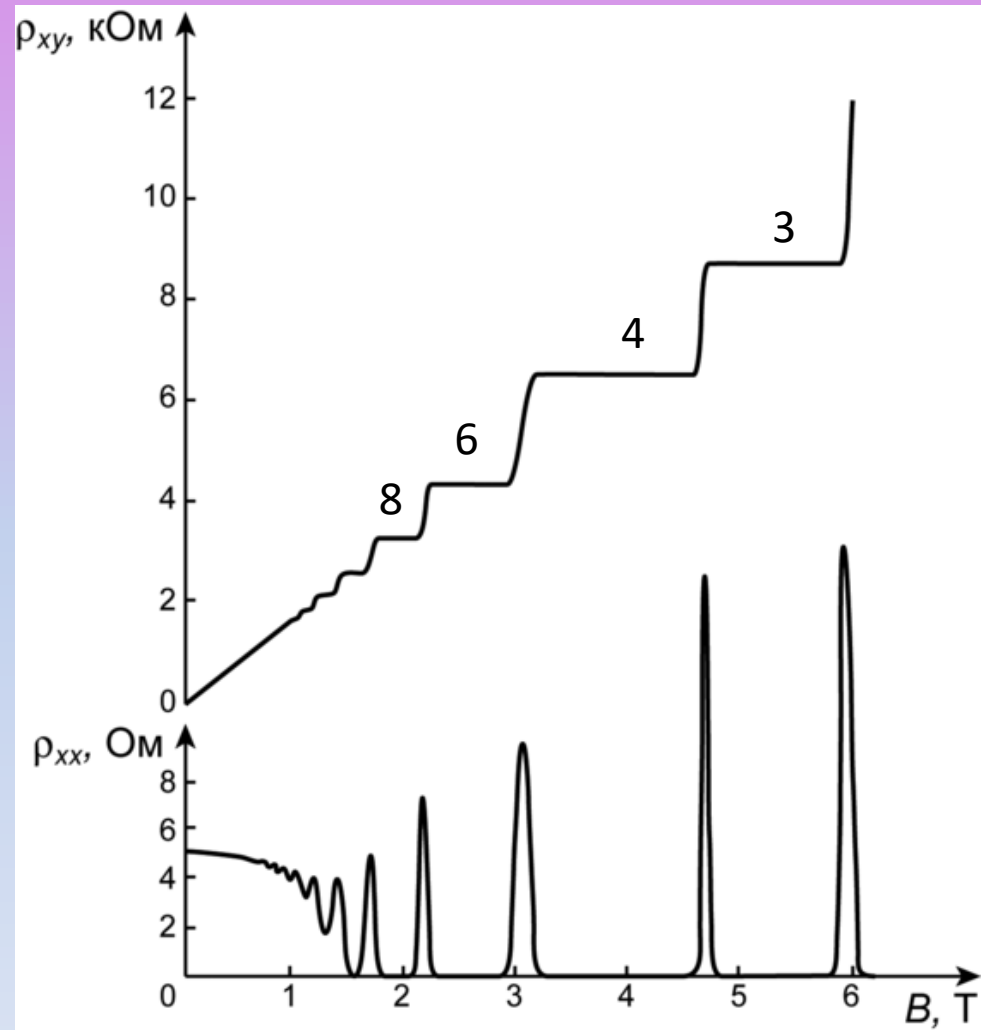
Квантовый эффект Холла

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

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

$R_k = \frac{h}{e^2} = 25812,807 \text{ Ом}$ —
постоянная фон Клитцинга.

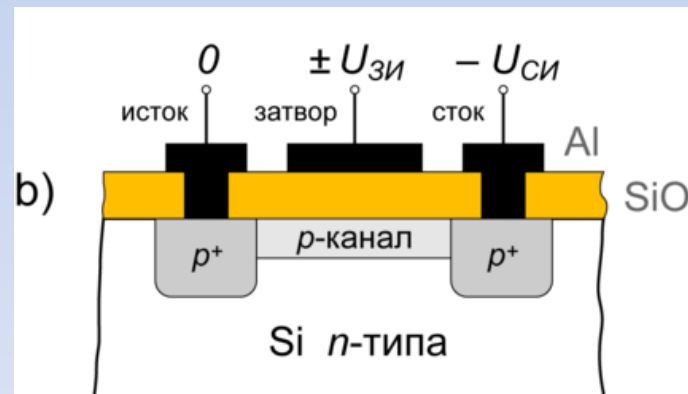
Зависимости холловского сопротивления и удельного сопротивления от магнитного поля.



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



Установка ультрафиолетовой литографии



Википедия, [Antikon](#)

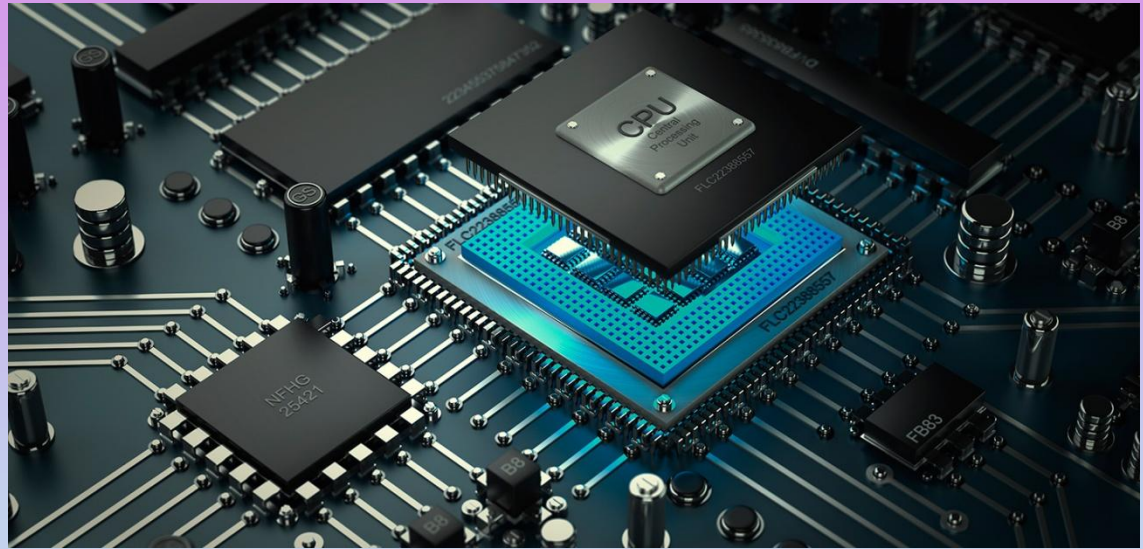
Полевые транзисторы с изолированным затвором

Технология изготовления процессоров



Техпроцесс (длина затвора транзистора):

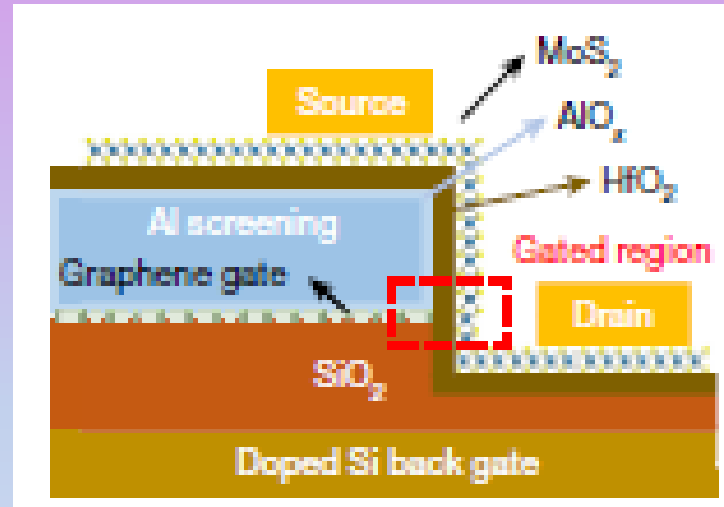
2004 – 65 нм,
2011 – 32 нм,
2015 – 14 нм,
2017 – 10 нм,
2024 – 03 нм.



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.

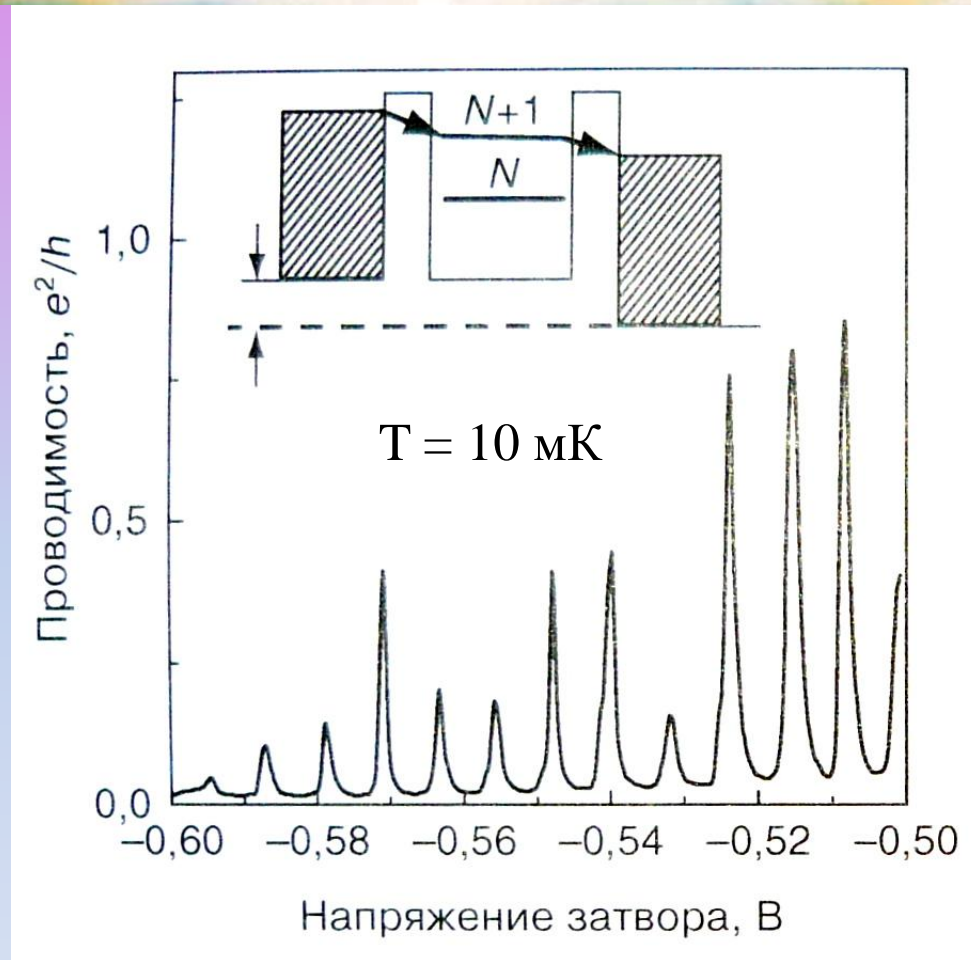
Технология изготовления процессоров



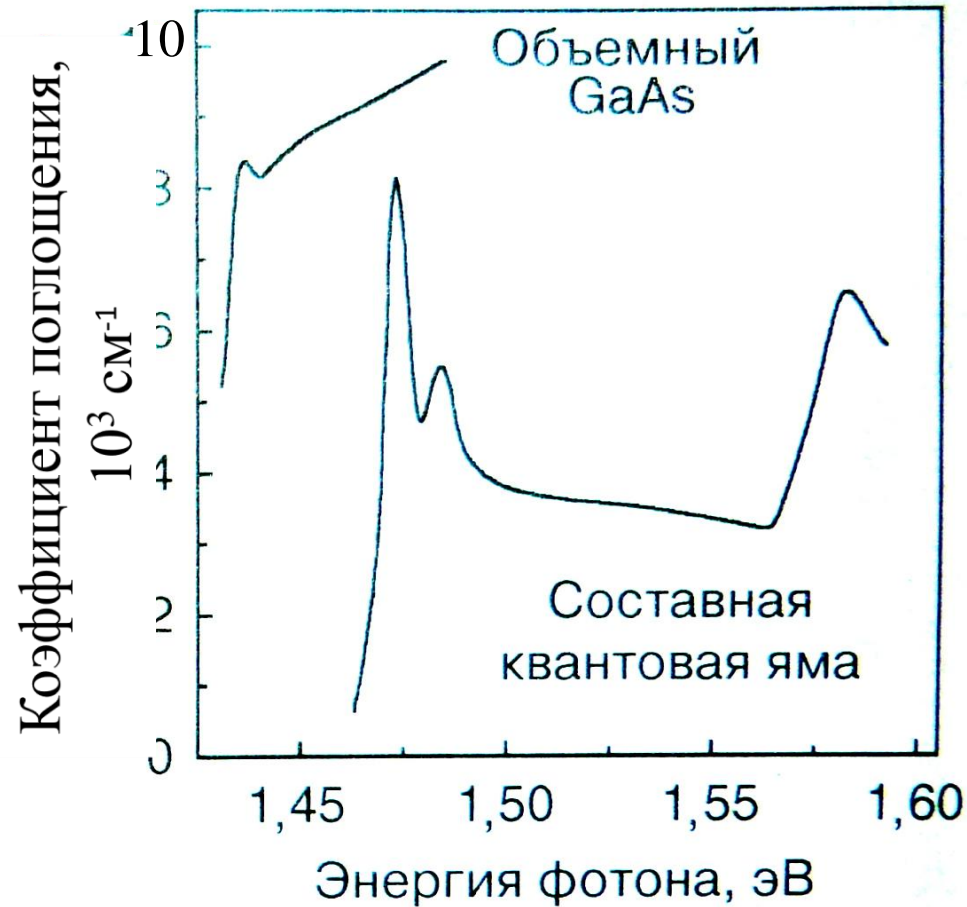
0.34 nm L_g side-wall transistor

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

Электронные свойства квантовых точек

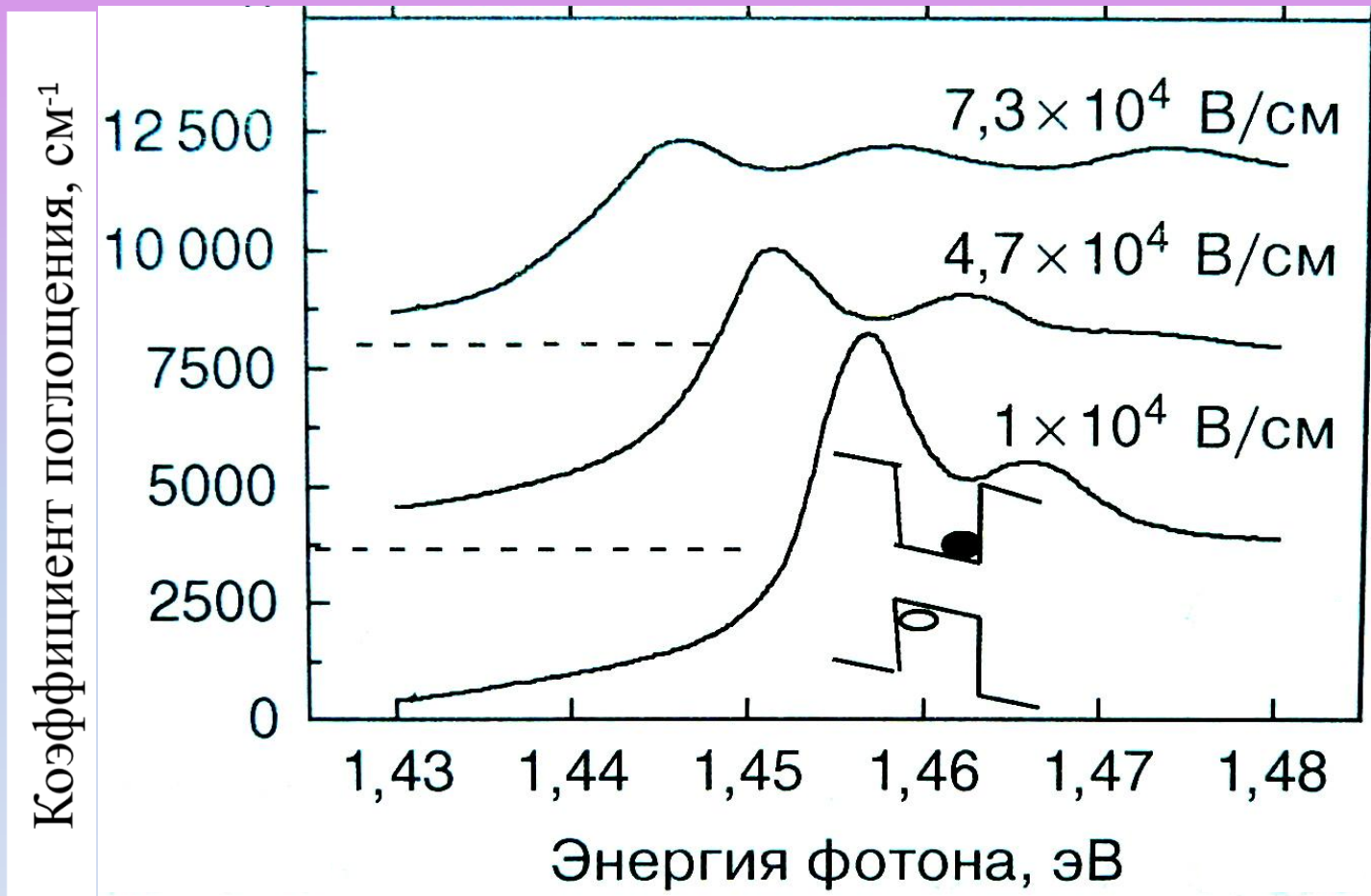


Одноэлектронный транзистор на эффекте кулоновской блокады (L.P. Kouwenhoven et al., *Zeitschrift für Physik B*, **85** (1991) 367).



Спектр экситонов при комнатной температуре

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



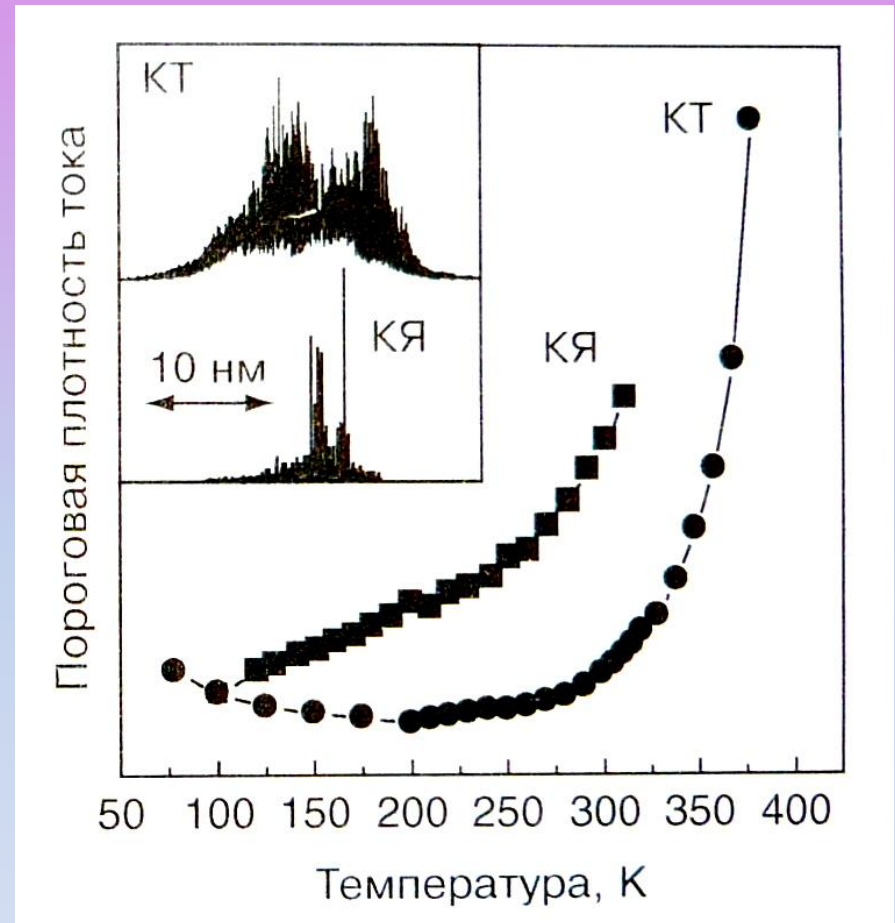
Спектр поглощения квантовой ямы в перпендикулярном электрическом поле (квантово-ограниченный эффект Штарка)

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

Оптоэлектронные свойства квантовых ям и точек



Пороговый ток
 $j = j_0 \exp(t/t_0)$, где
 $t_0 = 104, 285, 481 \text{ } ^\circ\text{C}$ и ∞
для объемных кристаллов,
квантовых ям, проволок и
точек, соответственно
(расчетные значения).

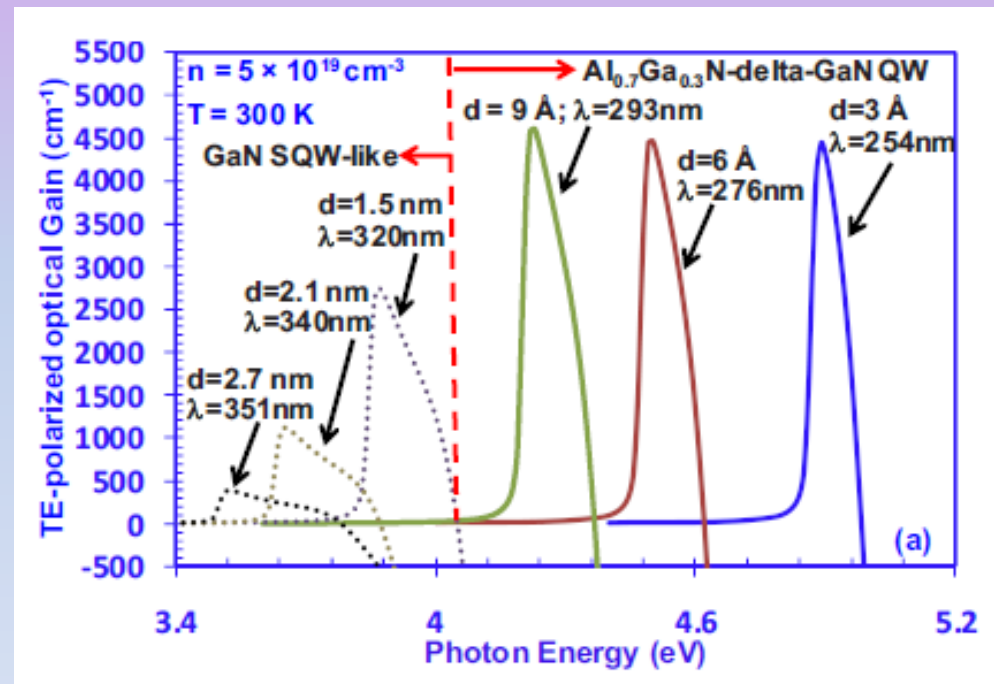
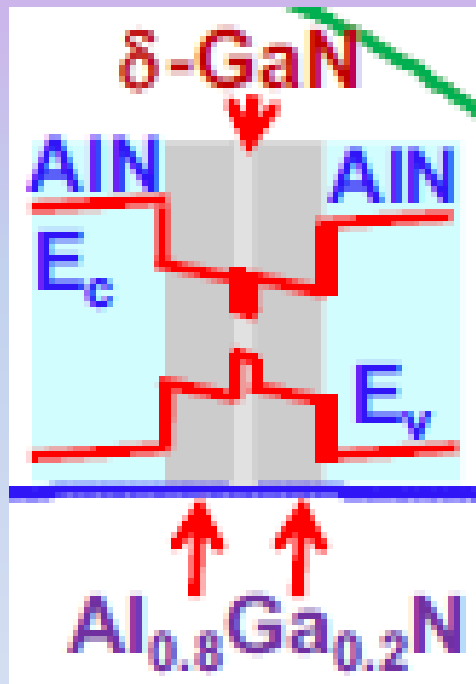


Температурные зависимости пороговых плотностей тока инжекционных лазеров на квантовых ямах (квадратики) и самособирающихся квантовых точках (кружки). На вставке: спектры излучения лазеров.

Оптоэлектронные свойства квантовых ям и точек



Спектры усиления для лазерных усилителей, построенных на двойной квантовой яме



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

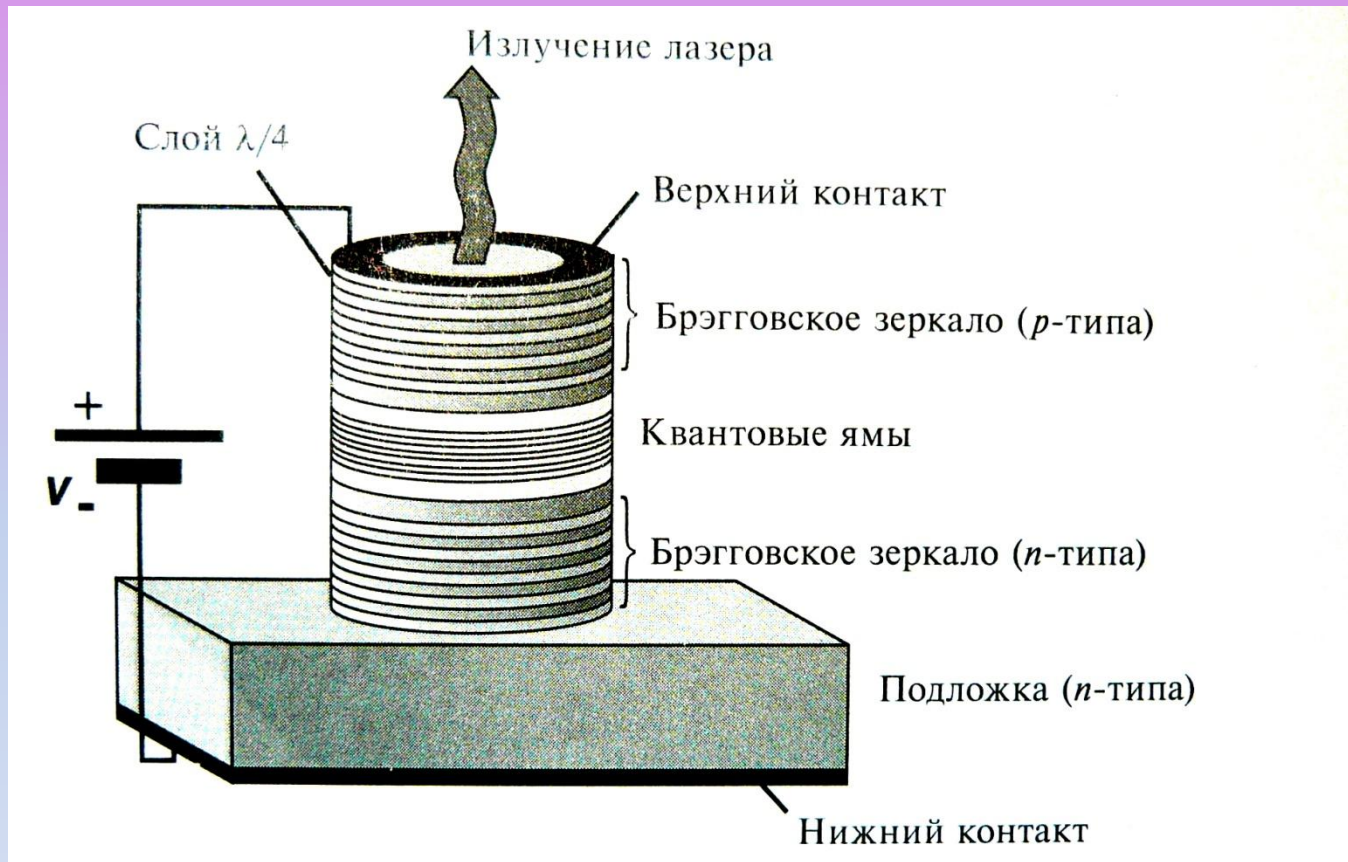
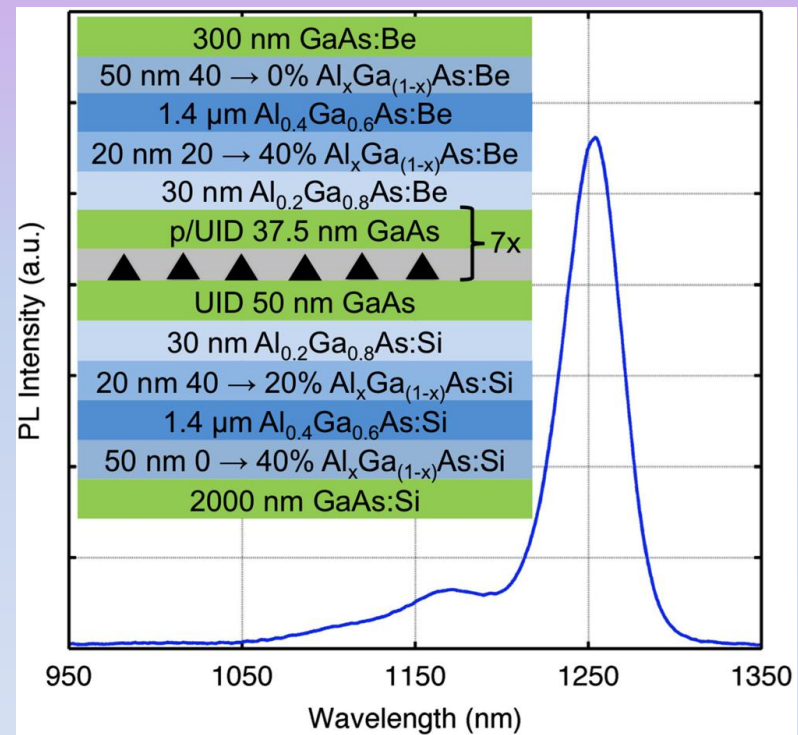


Схема строения лазера на квантовых ямах с вертикальным резонатором

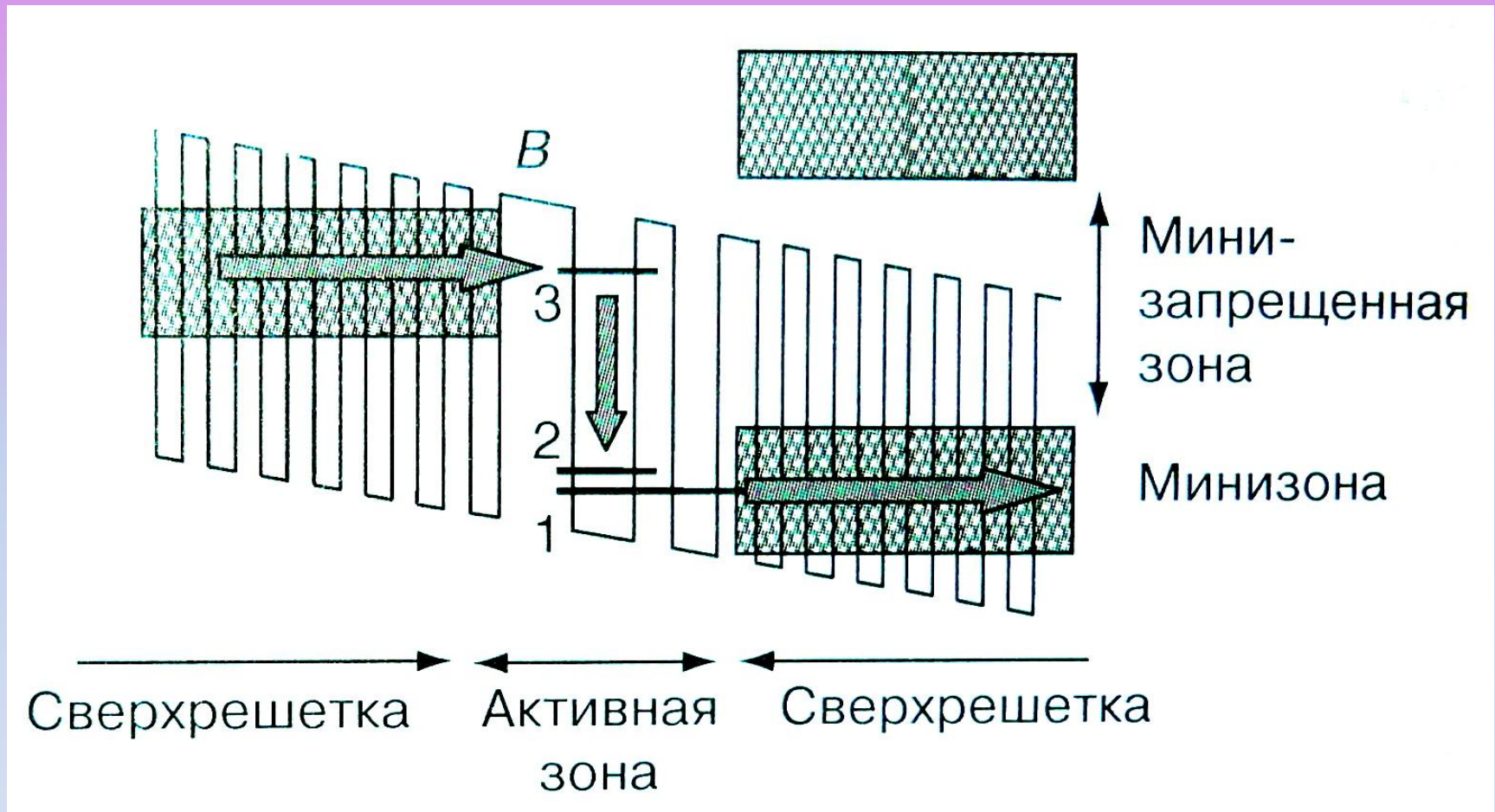


1,3 мкм лазер на квантовых точках InAs на кремниевой подложке

Структура слоев и спектр фотолюминесценции квантовых точек

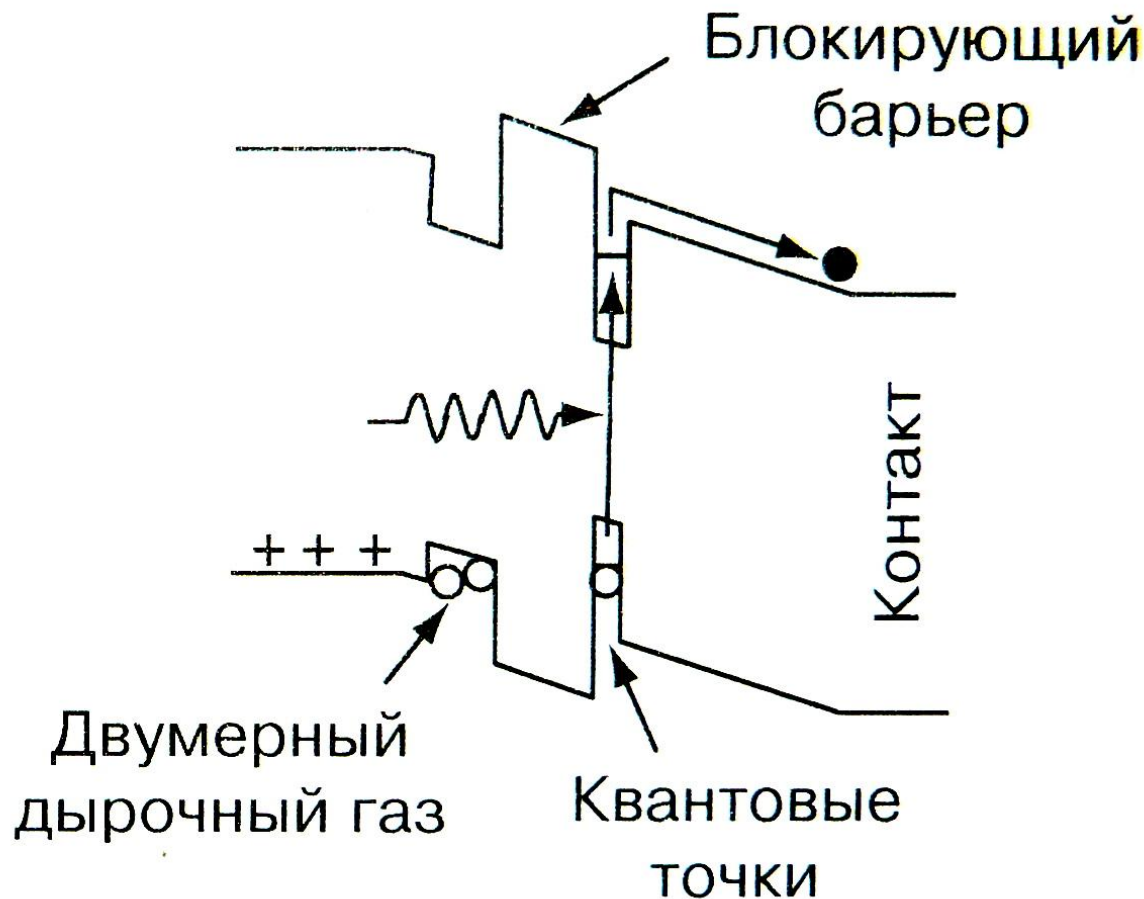


A.Y. Liu et al. Appl. Phys. Lett. 104 (2014) 041104.



Зонная структура квантового каскадного лазера

Оптоэлектронные свойства квантовых точек



**Зонная структура запоминающего устройства на
КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ**



Рис. 2.1. Матрица квантовых наноключей

Запоминающее устройство на самособирающихся наноключях из атомов серебра.

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



- 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?**