

Оптика наносистем



Тимошенко Виктор Юрьевич

*Московский Государственный Университет
им. М. В. Ломоносова, Физический факультет
Научно-Образовательный Центр по нанотехнологиям*

Содержание курса

Лекция 1. Основные понятия оптики конденсированных фаз вещества.

Лекция 2. Взаимодействие света с металлами и диэлектриками.

Лекция 3. Поглощение света в полупроводниках.

Лекция 4. Экситонное и примесное поглощение света.

Лекция 5. Эмиссия излучения из твердых тел.

Лекция 6. Оптические явления в неоднородных твердотельных системах.

Лекция 7. Оптические свойства твердотельных нанокompозитов.

Лекция 8. Фотонные кристаллы и микрорезонаторы.

Лекция 9. Рассеяние света в твердых телах.

Лекции 10,11. Влияние размеров тел на их оптические свойства.

Лекции 12-14. Экситоны в полупроводниковых наноструктурах.

Лекция 15. Оптические свойства и применения полупроводниковых наноструктур.

Лекция 16. Элементы спиновой оптики и спинтроники.

Лекция 17. Нелинейные оптические явления в твердотельных системах.

Лекция 18. Элементы нелинейной оптики наноструктур и нанокompозитов.

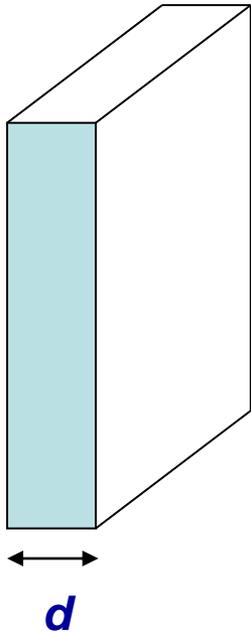
Лекции 10 и 11. Влияние размеров тел на их оптические свойства.

Классификация низкоразмерных систем. Квантовый размерный эффект. Приближение эффективной массы. Модель квантового ограничения для потенциальной ямы с бесконечными стенками – квантовой ямы. Размерный эффект для квантовых нитей и точек. Функция плотности состояний для электронов в двумерных, одномерных и нульмерных системах. Квантовый размерный эффект в реальных наноструктурах. Влияние квантового размерного эффекта на поглощение и люминесценцию твердотельных наноструктур.

Основные типы идеальных твердотельных наноструктур

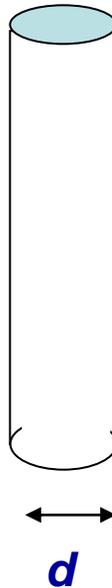
2D

Квантовая
яма



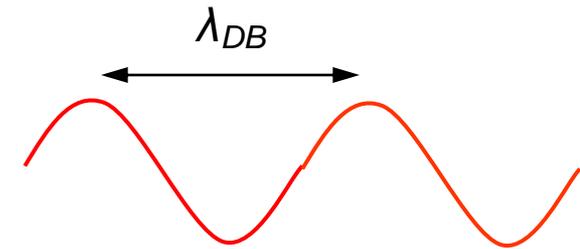
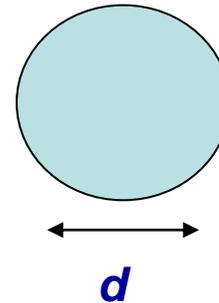
1D

Квантовая
нить



0D

Квантовая
точка



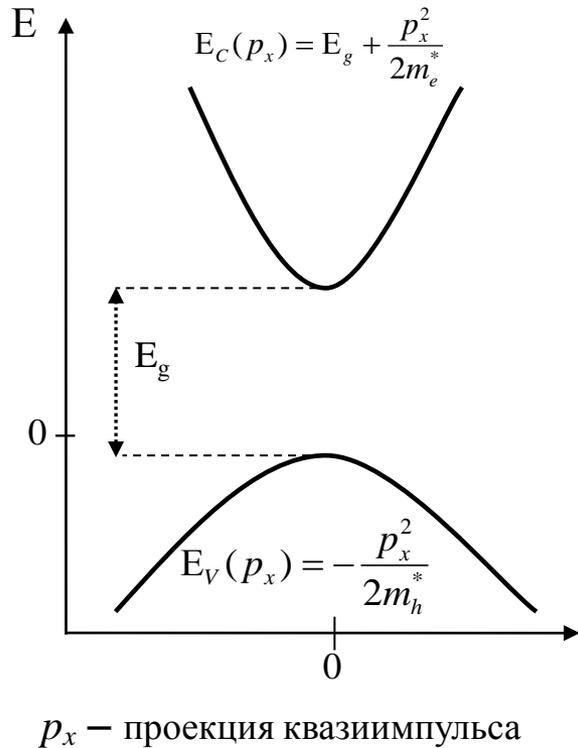
$$d \sim \lambda_{DB} = h / p$$

p – квазиимпульс
электрона или
дырки в кристалле

Для электрона в полупроводнике с $m_e^* = (0.1-1) m_0$: $3 \text{ нм} < \lambda_{DB} < 30 \text{ нм}$

В наноструктурах с минимальными размерами 1 -100 нм электроны, дырки и другие квазичастицы будут испытывать ограничения при движении, что приводит к **квантовому размерному эффекту**.

Зависимость энергии электрона от квазиимпульса вблизи краев зон в 3D полупроводниковом кристалле



$$E_C(\vec{p}) = E_g + \frac{p^2}{2m_e^*} = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*}$$

$$E_V(\vec{p}) = -\frac{p^2}{2m_h^*} = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*}$$

Квазиимпульс : $\vec{p} = \hbar \vec{k}$

Квазиволновой вектор: \vec{k}

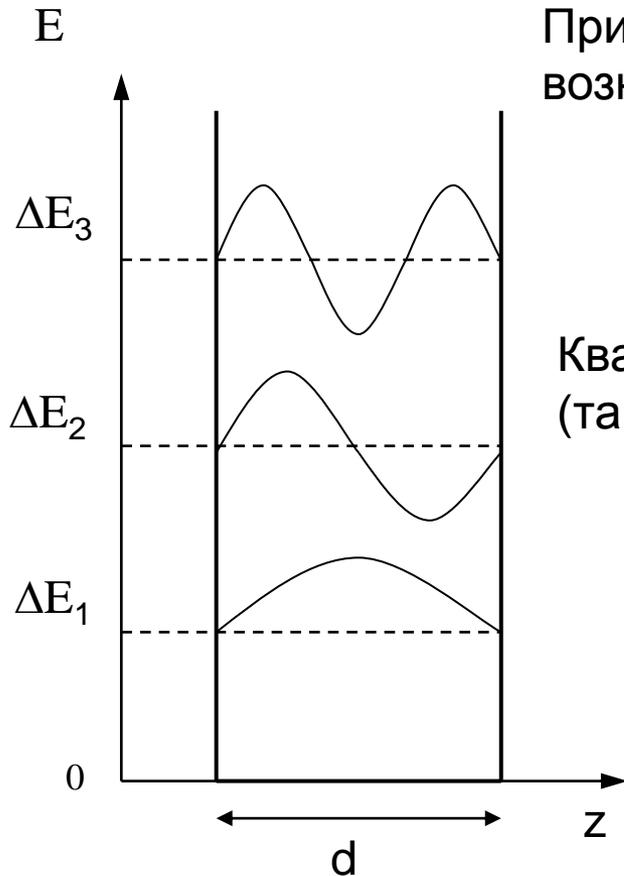
$$k = \frac{2\pi}{\lambda_e} \Rightarrow p = \hbar \frac{2\pi}{\lambda_e} = \frac{h}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{\lambda_e} = \frac{h}{\lambda_e}$$

$$\Psi(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\vec{r}} u(\vec{r})$$

$$\lambda_e \rightarrow \lambda_{DB}$$

Электрон в кристалле – квазичастица-волна, которая иногда называется блоховскими волнами, по имени ученого Ф.Блоха.

Квантовый размерный эффект 2D системе (электрон в квантовой яме с бесконечно высокими стенками)



При отражении от стенок
возникают стоячие волны:

$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{d}} \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{d} n\right)$$

$$\frac{1}{2} n \lambda_e = d \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Квазиимпульс p_e в направлении z квантуется
(так называемое **вторичное квантование**)

$$p_{ez} = \frac{h}{\lambda_e} = \frac{h}{2d} n$$

Квантово-размерная добавка к энергии частицы:

$$\Delta E_{en} = \frac{p_{ez}^2}{2m_e^*} = \frac{h^2}{8m_e^* d^2} n^2 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e^* d^2} n^2$$

Уровни размерного квантования $n = 1, 2, 3, \dots$ с энергиями : $\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_2, \dots$

Квантовый размерный эффект в квантовой яме (приближение эффективной массы)

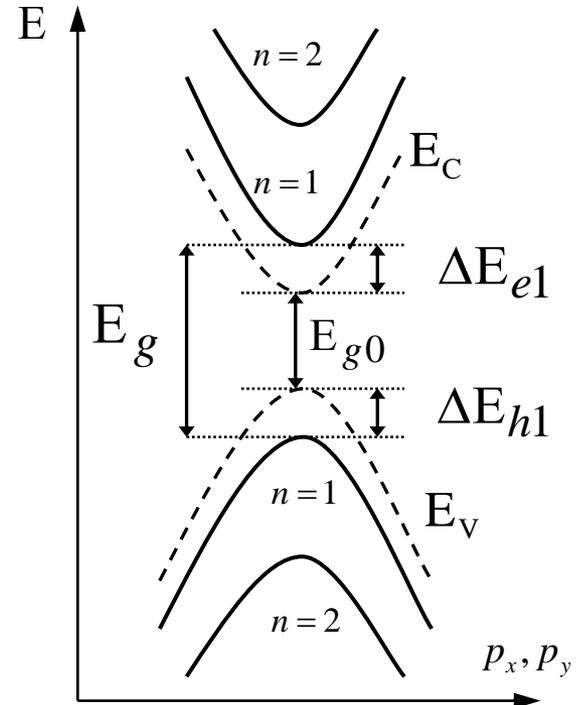
Полная энергия электрона: $E_e(\vec{p}) = E_e(\hbar\vec{k})$

$$E_e(\vec{p}) = E_c(p_x, p_y) + \Delta E_e = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m_e^*} + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e^* d^2} n^2$$

Полная энергия дырки:

$$E_h(\vec{p}) = E_v(p_x, p_y) + \Delta E_h = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m_h^*} + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_h^* d^2} n^2$$

Квантово-размерное увеличение ширины запрещенной зоны ($n=1$):



$$E_g = E_{g0} + \Delta E_g = E_{g0} + \frac{\pi \hbar^2}{2d^2 m_r^*}$$

Приведенная масса: $\frac{1}{m_r^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}$

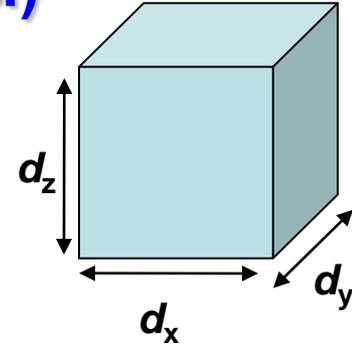
Квантово-размерная добавка к ширине запрещенной зоны возрастает обратно пропорционально квадрату ширины квантовой ямы d .

Размерный эффект для квантового ящика прямоугольного сечения (в приближении эффективной массы)

Размерные добавки к энергии электрона аддитивно складываются :

$$\Delta E_e = \Delta E_e(d_x) + \Delta E_e(d_y) + \Delta E_e(d_z) = \frac{p_{ex}^2 + p_{ey}^2 + p_{ez}^2}{2m_e^*} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e^*} \left(\frac{n_1^2}{d_x^2} + \frac{n_2^2}{d_y^2} + \frac{n_3^2}{d_z^2} \right)$$

$$n_{1,2,3} = 1, 2, 3, \dots$$



Квантово-размерный рост ширины запрещенной зоны :

$$E_g = E_{g0} + \Delta E_g = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_r^*} \left(\frac{1}{d_x^2} + \frac{1}{d_y^2} \right)$$

Волновая функция :

$$\Psi_{n_1, n_2, n_3}(\vec{r}) = \sqrt{\frac{8}{d_x d_y d_z}} \sin\left(\frac{\pi \cdot z \cdot n_1}{d_x}\right) \sin\left(\frac{\pi \cdot z \cdot n_2}{d_y}\right) \sin\left(\frac{\pi \cdot z \cdot n_3}{d_z}\right)$$

Приведенная масса:

$$\frac{1}{m_r^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}$$

Квантово-размерная добавка к ширине запрещенной зоны складывается из вкладов ограничения по всем направлениям.

Размерный эффект для цилиндрической квантовой нити с бесконечно высоким барьером

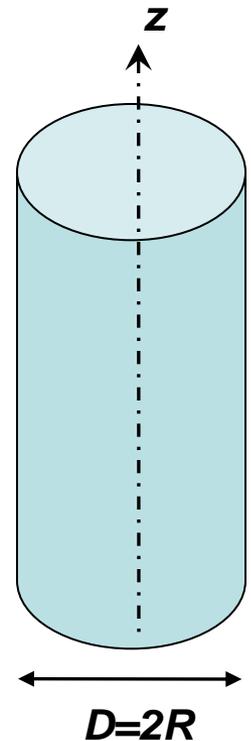
Квантово-размерный рост ширины запрещенной зоны :

$$E_g = E_{g0} + \Delta E_g = \frac{2\hbar^2 \zeta^2}{m_r^* D^2}$$

Корень цилиндрической функции Бесселя J_0 : $\zeta=2.4048$

Волновая функция электрона в квантовой нити:

$$\Psi_n(\rho) = A J_n(\rho) \exp(ik_z z)$$
$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$$



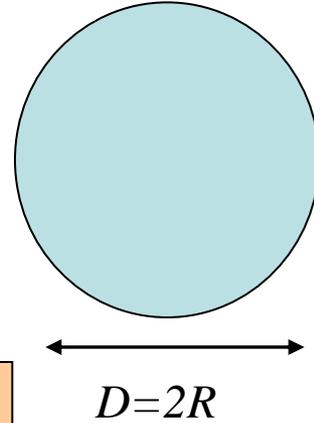
Квантово-размерная добавка к ширине запрещенной зоны обратно пропорциональна квадрату диаметра (радиуса) нити.

Размерный эффект для сферической квантовой точки с бесконечно высоким барьером

Квантово-размерная добавка к энергии электрона :

$\xi_{n,l}$ - n -й корень сферической функции Бесселя полуцелого аргумента $l+1/2$ ($l=0, 1, 2, \dots$): $\xi_{n,0} = \pi n$ ($n=1, 2, 3, \dots$)

$$\Delta E_{n,l} = \frac{2\hbar^2 \xi_{n,l}^2}{m_r^* D^2}$$



Квантово-размерный рост ширины запрещенной зоны :

$$E_g = E_{g0} + \Delta E_{1,0} = E_{g0} + \frac{2\hbar^2 \pi^2}{m_r^* D^2}$$

Волновая функция :

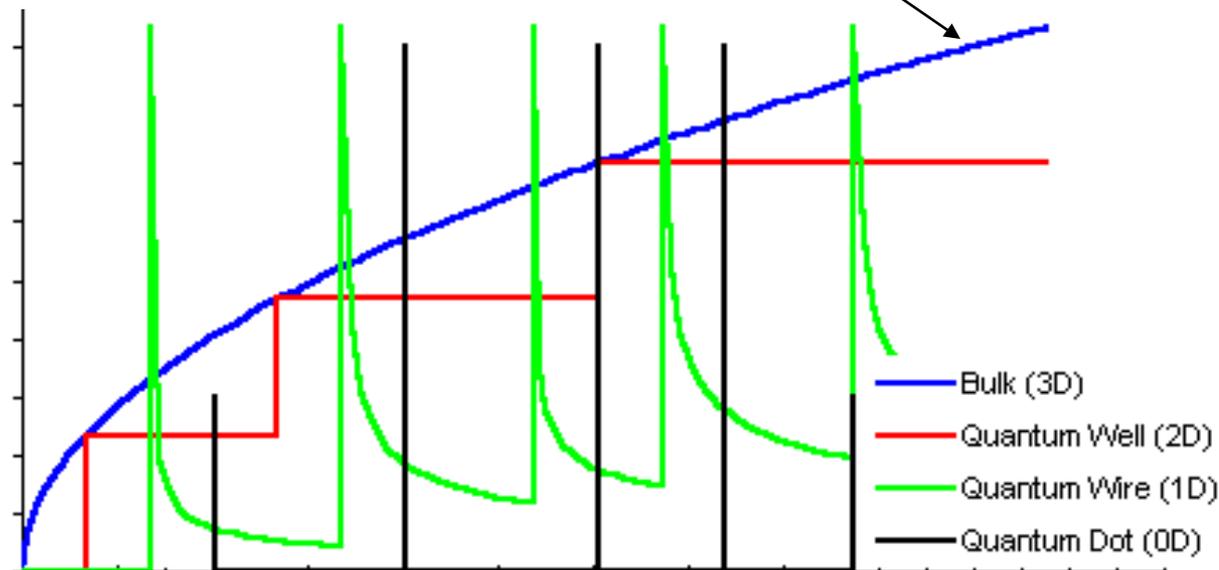
$$\Psi_{n,l}(\vec{r}) = \Phi(r)Y_{n,l}(\varphi, \theta)$$

Число $l=0, 1, 2, \dots$ имеет смысл орбитального квантового числа. Пара чисел (n, l) целиком задает электронный спектр квантовой точки. Для обозначения его уровней часто используют символы, применяемые для атомного спектра, например, $1S$ ($n=1, l=0$), $2S$ ($n=2, l=0$), $1P$ ($n=1, l=1$) и т.д. Поэтому $0D$ -объекты иногда называют искусственными атомами.

Свойства малых квантовых точек нельзя рассчитывать методом эффективной массы, а надо использовать методы квантовой химии (ЛКАО, функционала плотности и др.

Плотность электронных состояний в объектах различной размерности

$$g_{c,3D} = \frac{dN_{3D}}{dE} = \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} m^{*3/2} \sqrt{E - E_{\min}}, \text{ for } E \geq E_{\min}$$



$$g_{c,2D} = \frac{dN_{2D}}{dE} = \frac{4\pi m^*}{h^2}, \text{ for } E \geq E_{\min}$$

$$g_{c,1D} = \frac{dN_{1D}}{dE} = \sqrt{\frac{2\pi m^*}{h^2}} \frac{1}{\sqrt{E - E_{\min}}}, \text{ for } E \geq E_{\min}$$

Квантовые ямы в полупроводниковых гетероструктурах

Гетероструктура – структура из двух различных полупроводников (с разной шириной запрещенной зоны E_g).

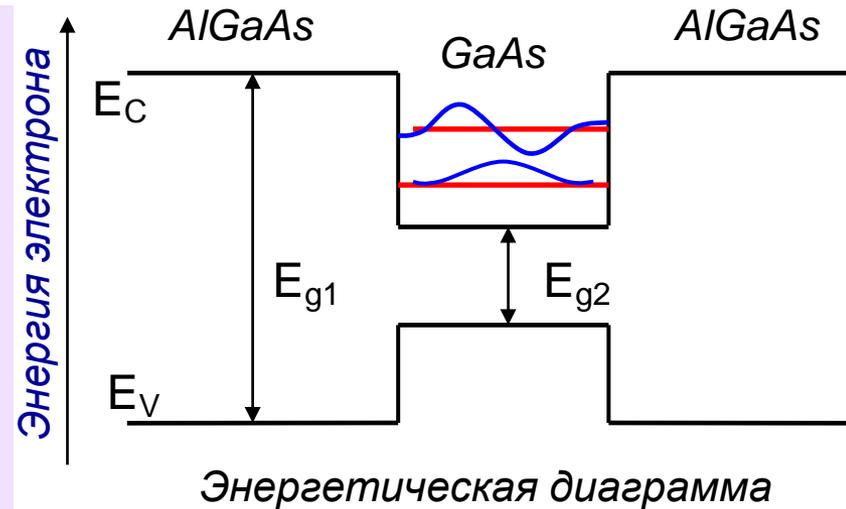
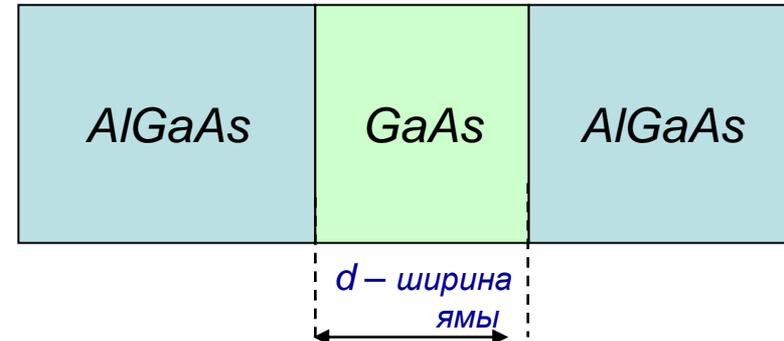
Запрещенная зона – энергетический зазор между заполненными и незаполненными разрешенными энергетическими зонами в твердом теле.

Квантовая яма образуется в слое полупроводника с узкой запрещенной зоной, заключенном между двумя полупроводниками, обладающими более широкой запрещенной зоной:

$E_{g1} > E_{g2}$. Обычно $d = 2-10$ нм.

Меняя d , можно изменять электронные и оптические свойства гетероструктур.

Схематичное изображение двойной гетероструктуры:



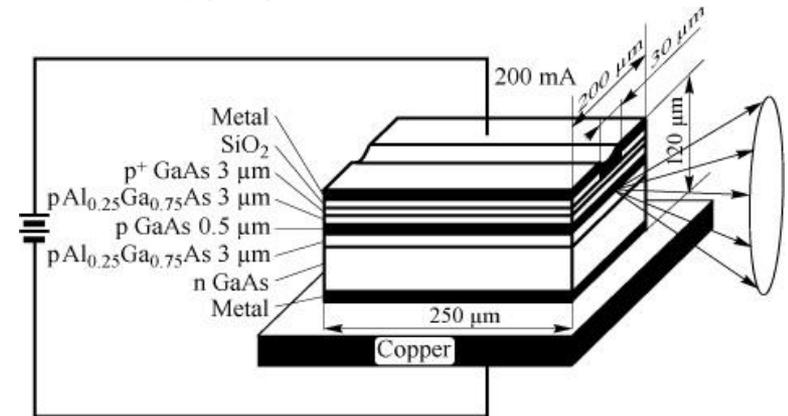
Использование двойной полупроводниковой гетероструктуры с узким (единицы нм) слоем полупроводника позволяет создавать квантовые ямы и ветоизлучающие оптоэлектронные устройства (светодиоды и лазеры).

Полупроводниковые лазеры

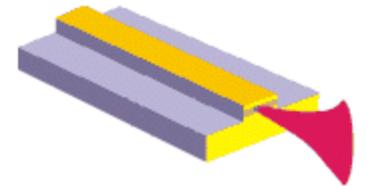
В полупроводниковом лазере (лазерном диоде) используется явление вынужденных оптических переходов, что дает усиление сигнала электролюминесценции при отражении от стенок резонатора, образованного специально подготовленными боковыми гранями.

С целью уменьшения пороговой плотности тока J_{th} были реализованы лазеры на гетероструктурах (с одним гетеропереходом: n-GaAs-p-GaAs- $Al_xGa_{1-x}As$; и с двумя гетеропереходами: $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs- $Al_xGa_{1-x}As$).

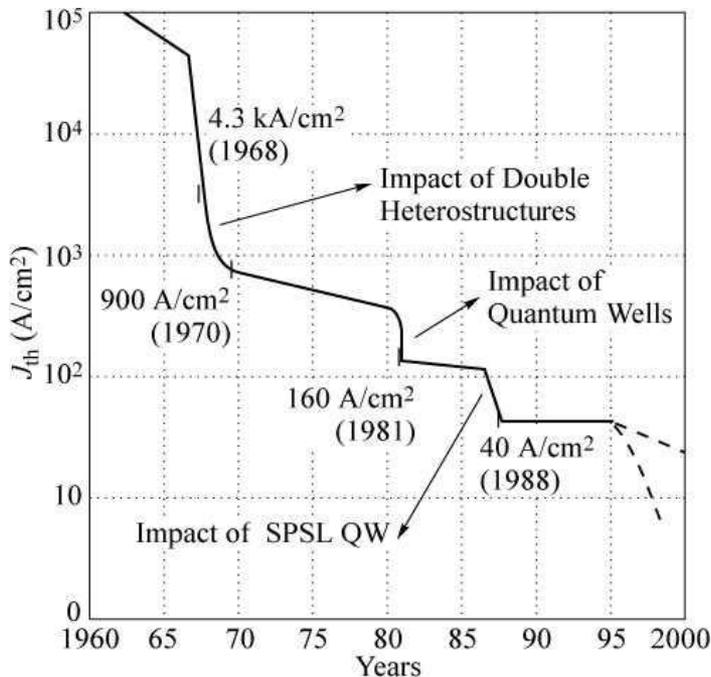
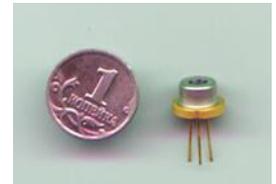
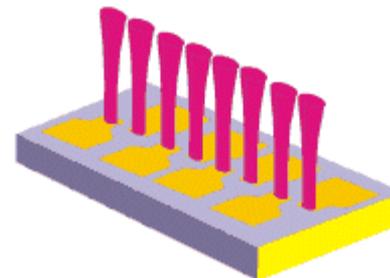
Полупроводниковые лазеры на гетероструктурах



Полосковые лазеры



Вертикальные лазеры:

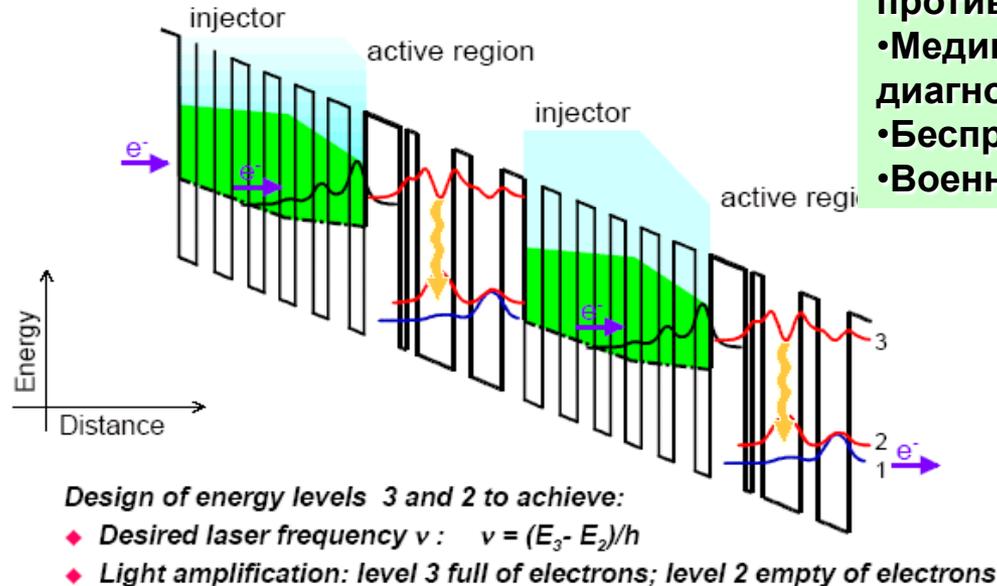


КВАНТОВЫЕ КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ

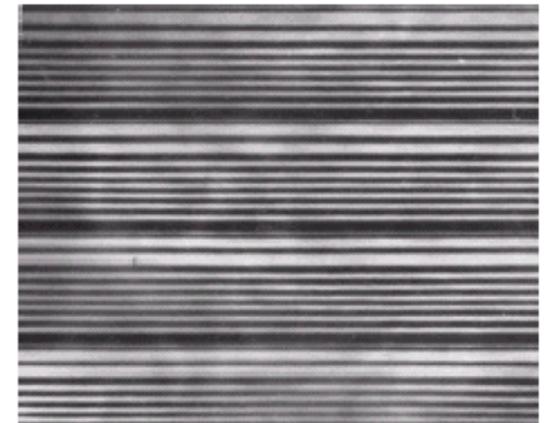
Новый тип лазеров, где генерация обусловлена переходами электронов между уровнями размерного квантования.

- Длина волны излучения от 3.4 до 17 мкм
- Пиковая мощность (1 Вт) при комнатной температуре в импульсном режиме и высокая мощность (0,2 Вт) при 77 К в непрерывном режиме
- Одномодовый спектр
- Широкая перестройка частоты для высокоразрешающей спектроскопии (в частности, для спектроскопии газов)
- Высокая частота модуляции (> 10 ГГц)
- Компактность ($\propto 1$ мм)

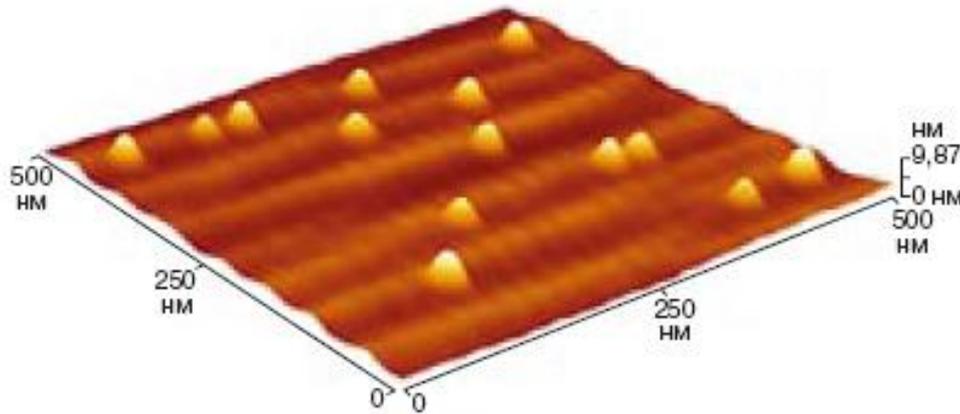
- Анализ окружающей среды
- Контроль промышленных процессов
- Транспорт - контроль сгорания топлива, противостолкновительные локаторы
- Медицина - анализ дыхания, ранняя диагностика
- Беспроводная оптическая связь
- Военные применения



45 nm



Самоорганизованные квантовые точки



Изображение в атомно-силовом микроскопе саморганизованных квантовых точек InP на поверхности GaAs. Механизм роста Странского-Крастанова.

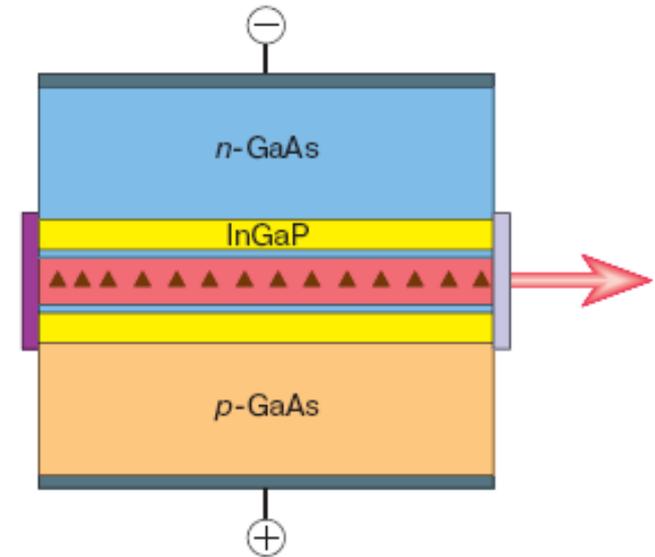
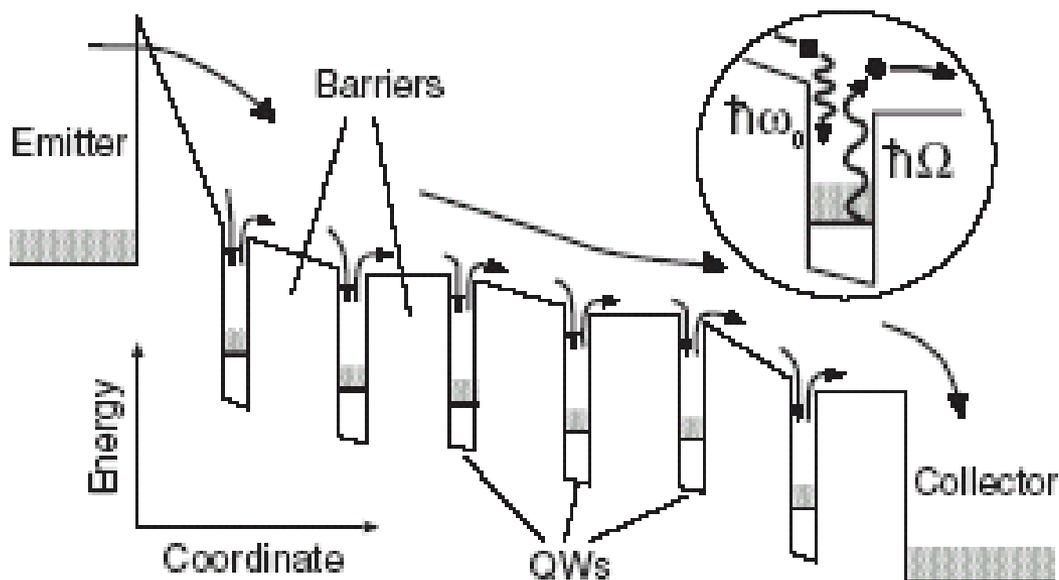


Схема инжекционного лазера на квантовых точках.

Гетероструктуры с самоорганизованными квантовыми точками являются следующим за планарными гетероструктурами этапом **наноинженерии** электронных и оптических свойств полупроводников.

Фотоприемники на полупроводниковых наноструктурах с квантовыми ямами и точками

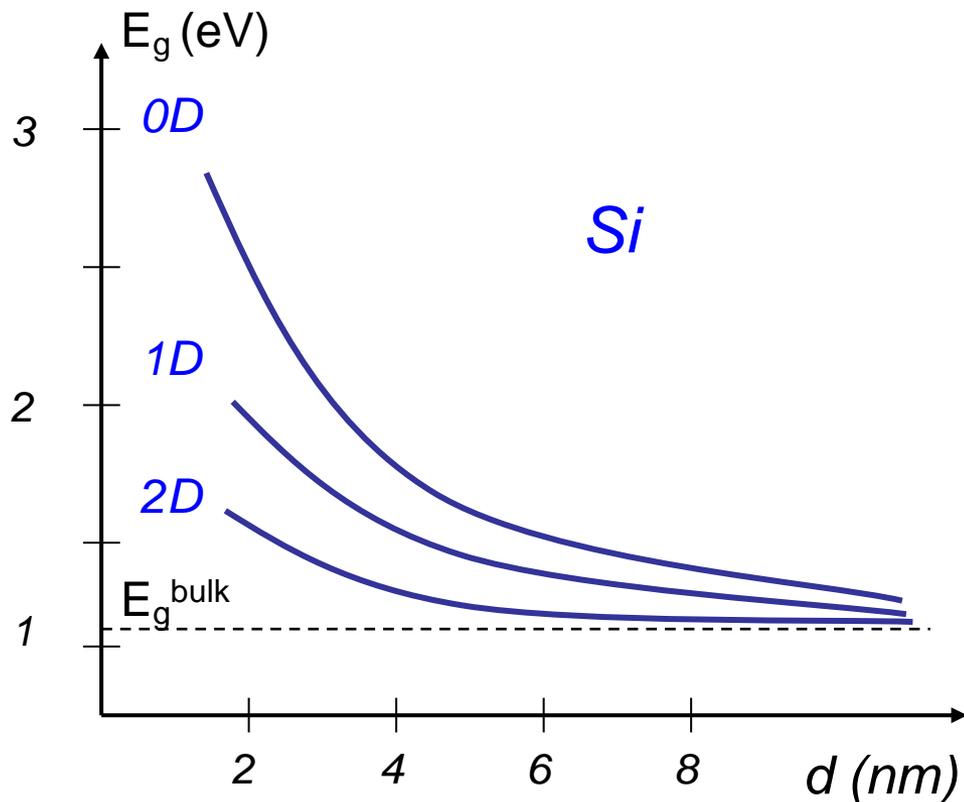
Спектральная чувствительность задается составом и толщиной квантовых ям или размером квантовых точек



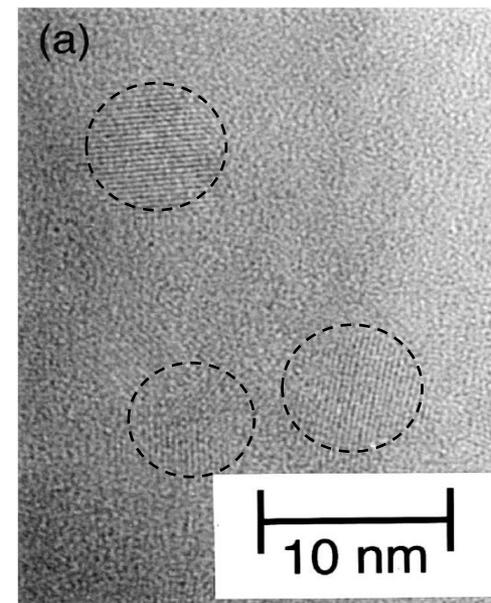
- Возможность перекрыть весь средний и дальний (вплоть до ТГц) ИК диапазон
- Высокая чувствительность
- Возможность изготовления многоэлементных и многозональных приемников

Квантовый размерный эффект в кремниевых нанокристаллах

Расчет методом эффективной массы



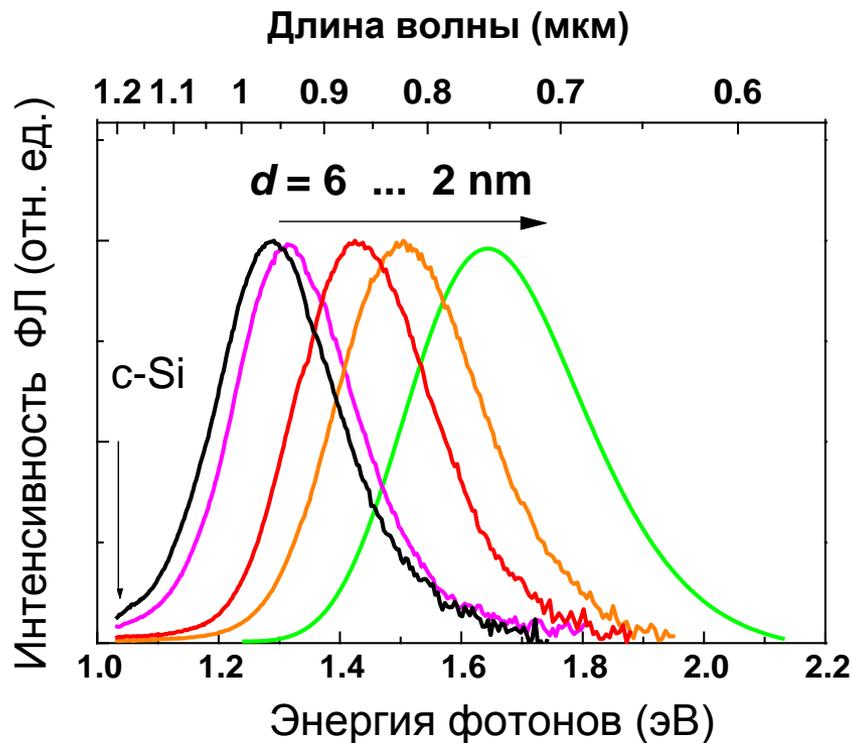
Нанокристаллы Si в SiO₂



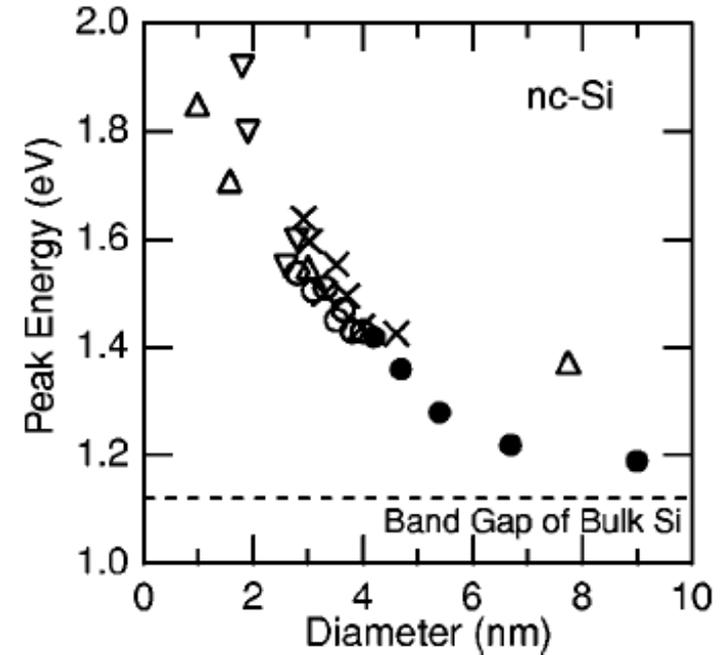
M. Fujii et al., J. Appl. Phys. (1998).

Квантово-размерный эффект для запрещенной зоны усиливается при переходе от 2D к 0D (понижении размерности наноструктуры)

Спектры фотолюминесценции нанокристаллов Si в матрице диоксида кремния

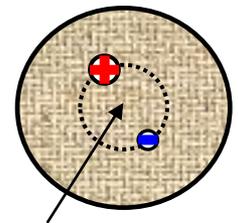


M. Fujii et al., PRB 62 (2000)



$$h\nu_{PL} = E_{g0} + \Delta E - E_{exc}$$

С уменьшением размеров нанокристаллов Si спектр их люминесценции сдвигается в высокоэнергетичную (коротковолновую) область вследствие квантового размерного эффекта. Кулоновское взаимодействие электронов и дырок в нанокристалле приводит к возникновению экситона (E_{exc}), что несколько ослабляет квантово-размерный сдвиг полосы люминесценции.



ЭКСИТОН

Контрольные вопросы к Лекциям 10 и 11:

- Что такое квантовый размерный эффект?
- В чем заключается приближение эффективной массы?
- Что такое квантовая яма, квантовая нить и квантовая точка?
- Как изменяется функция плотности состояний при понижении размерности системы?