

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 15:

Оптические свойства и применения полупроводниковых наноструктур

Методы формирования и примеры низкоразмерных систем и наноструктур. Квантовые ямы и сверхрешетки. Квантовые нити. Квантовые точки. Механизм роста Странского-Крастанова. Пористый кремний. Сечение поглощения света нанокристаллами. Оптические свойства нанокомпозитов с учетом экситонных эффектов. Применения квантовых ям и сверхрешеток в оптоэлектронике. Использование оптических и люминесцентных свойств квантовых точек. Лазеры на квантовых точках.

Квантовые ямы в полупроводниковых гетероструктурах

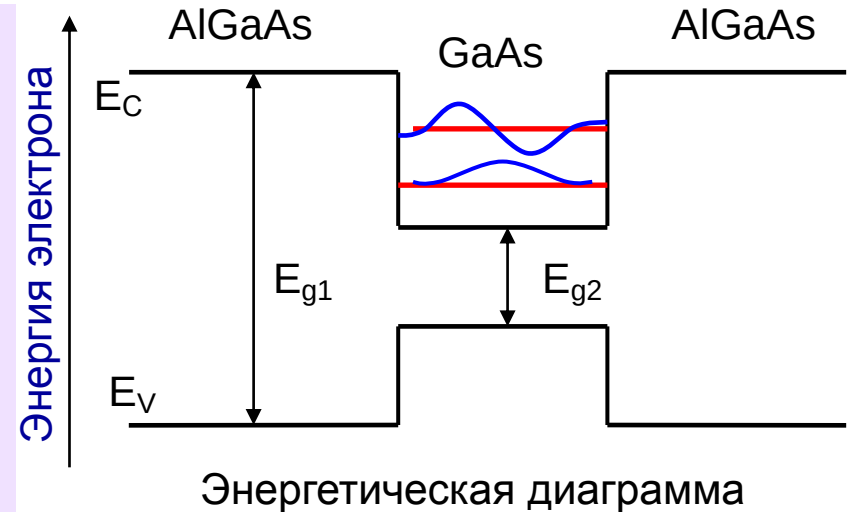
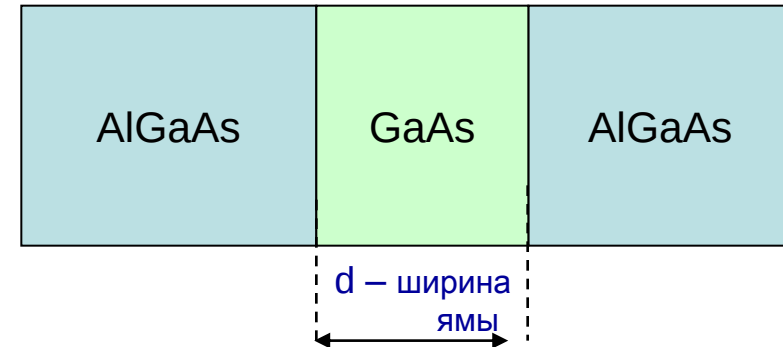
Гетероструктура – структура из двух различных полупроводников (с разной шириной запрещенной зоны E_g). **Запрещенная зона** – энергетический зазор между заполненными и незаполненными разрешенными энергетическими зонами в твердом теле.

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:



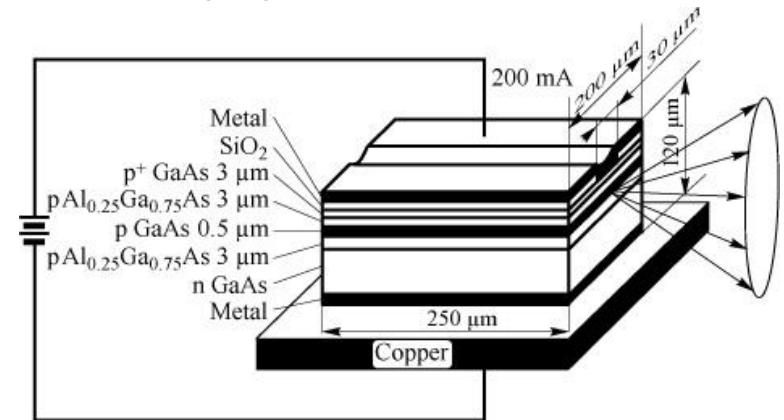
Использование двойной полупроводниковой гетероструктуры с узким (единицы нм) слоем полупроводника позволяет создавать квантовые ямы и ветоизлучающие оптоэлектронные устройства (светодиоды и лазеры).

Полупроводниковые лазеры

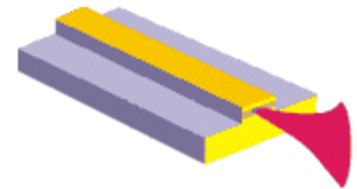
В **полупроводниковом лазере (лазерном диоде)** используется явление вынужденных оптических переходов, что дает усиление сигнала электролюминесценции при отражении от стенок резонатора, образованного специально подготовленными боковыми гранями.

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- $Al_xGa_{1-x}As$).

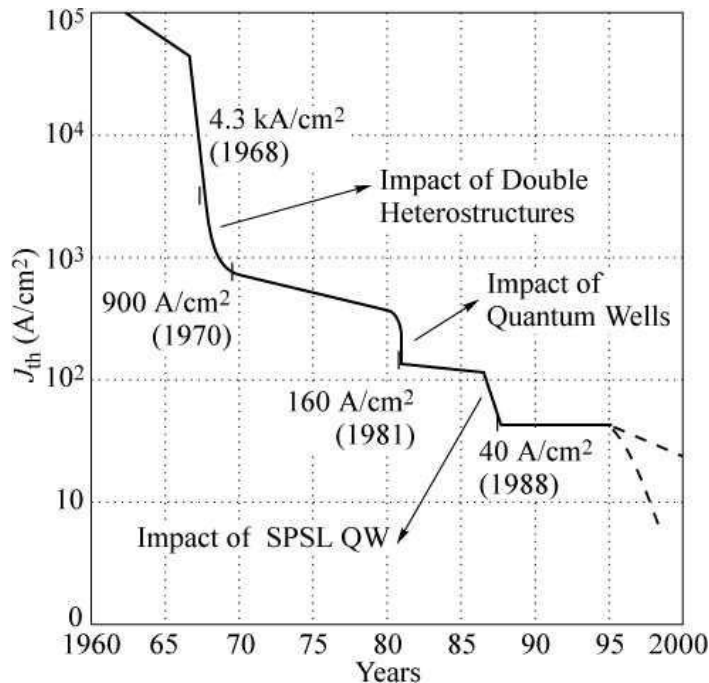
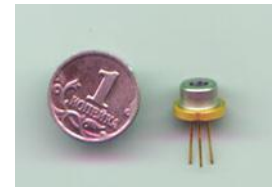
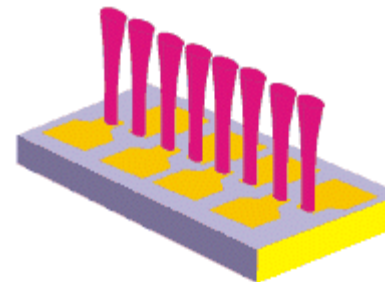
Полупроводниковые лазеры на гетероструктурах



Полосковые лазеры



Вертикальные лазеры:

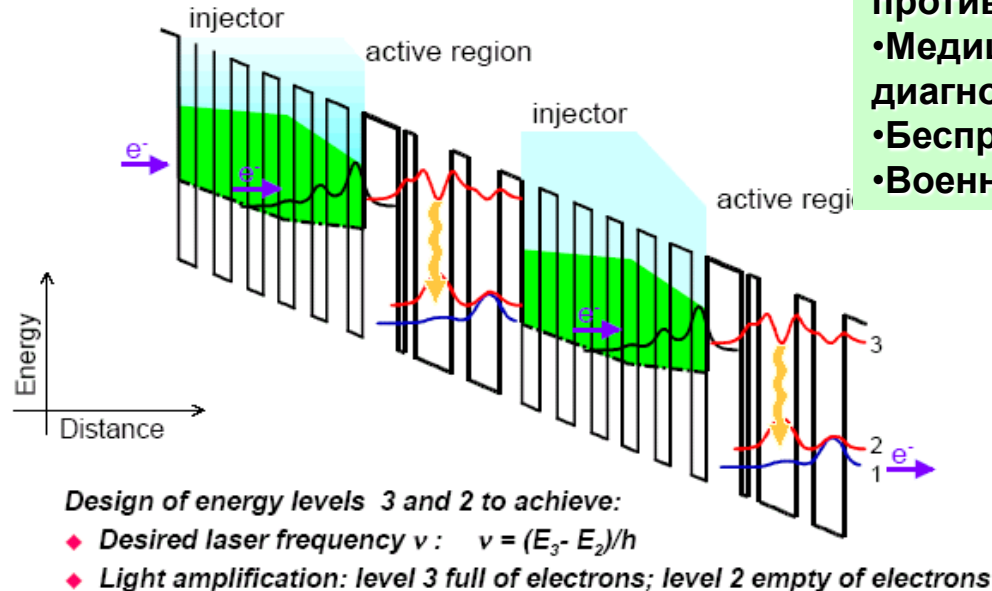


КВАНТОВЫЕ КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ

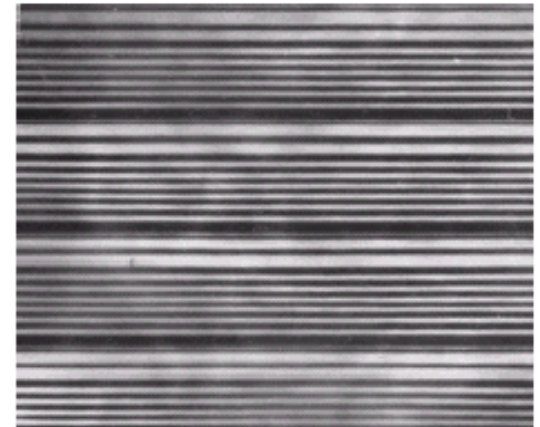
Новый тип лазеров, где генерация обусловлена переходами электронов между уровнями размерного квантования.

- 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

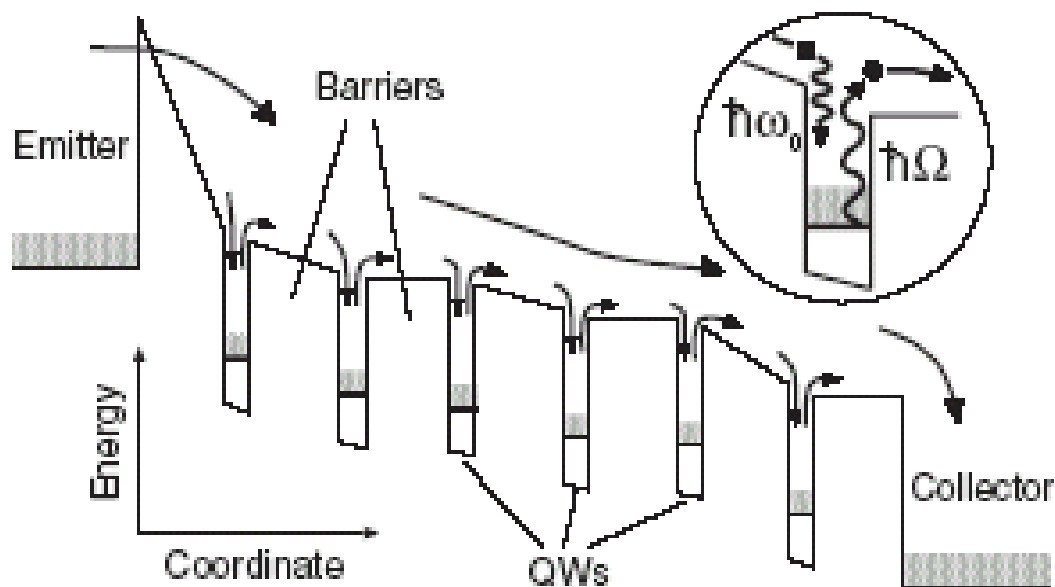


45 nm



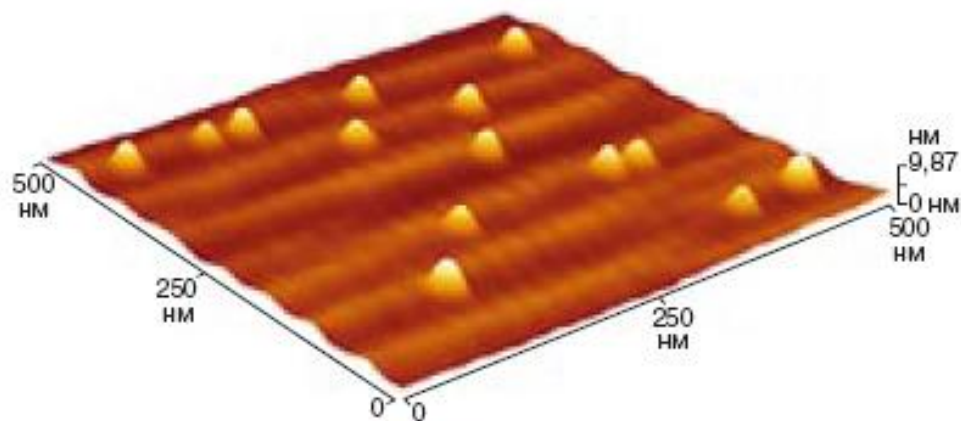
Фотоприемники на полупроводниковых наноструктурах с квантовыми ямами и точками

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

Самоорганизованные квантовые точки



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

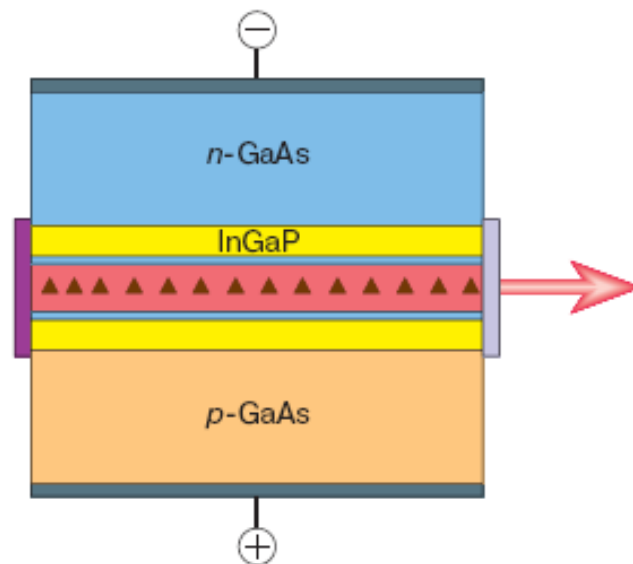
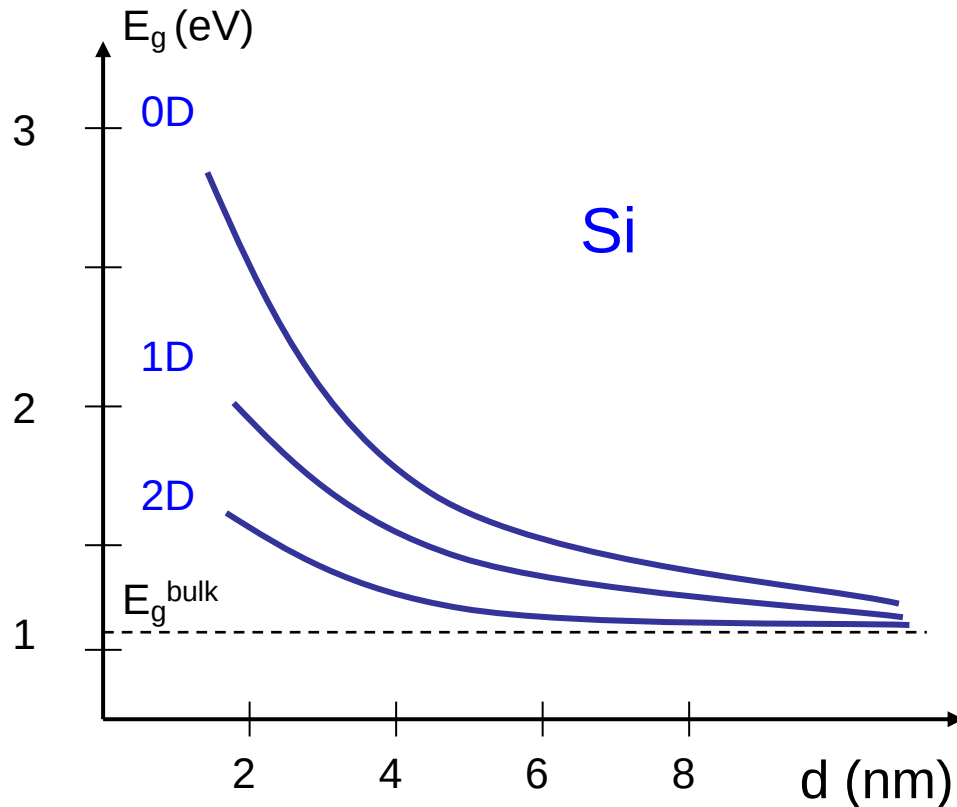


Схема **инжекционного лазера** на квантовых точках.

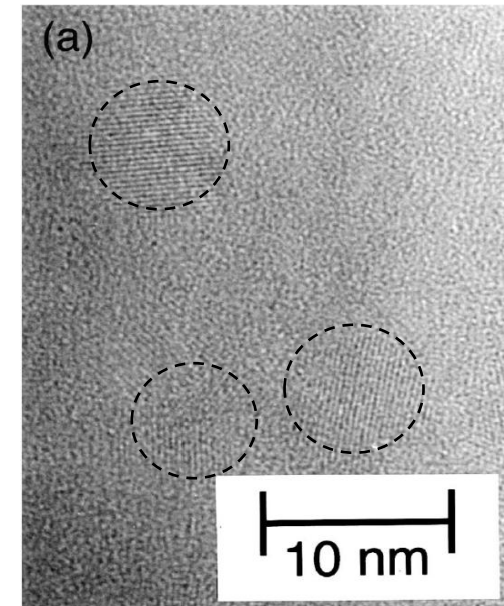
Гетероструктуры с самоорганизованными квантовыми точками являются следующим за планарными гетероструктурами этапом **наноинженерии** электронных и оптических свойств полупроводников.

Квантовый размерный эффект в кремниевых нанокристаллах

Расчет методом эффективной массы



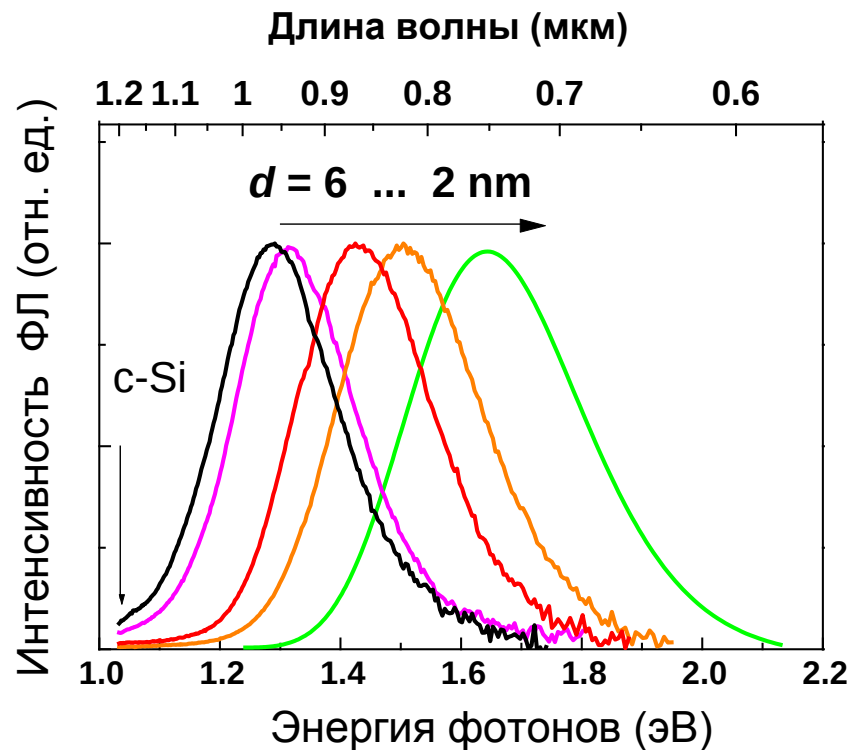
Нанокристаллы Si в SiO_2



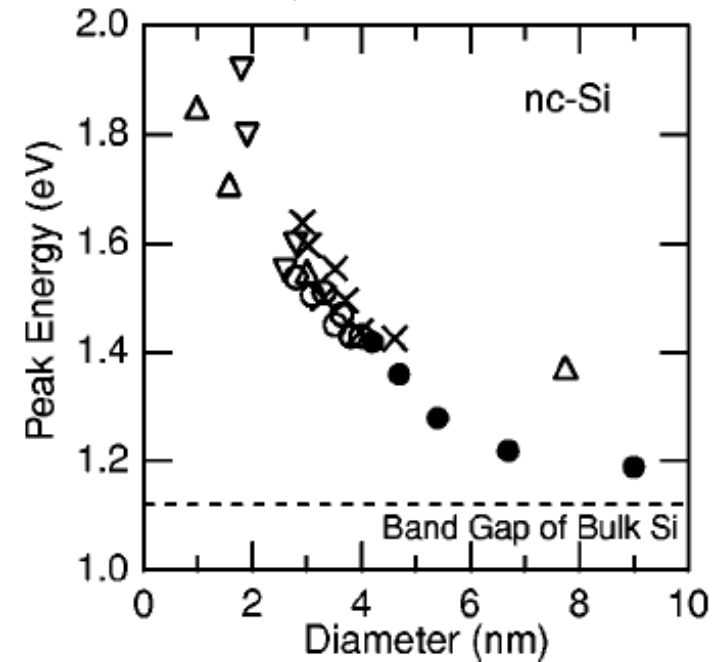
M. Fujii et al., J. Appl. Phys. (1998).

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

Спектры фотолюминесценции нанокристаллов Si в матрице диоксида кремния

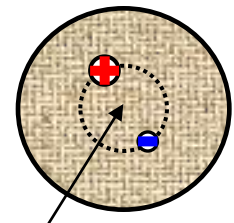


М. Fujii et al., PRB 62 (2000)



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

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

Применения в кремниевой оптоэлектронике

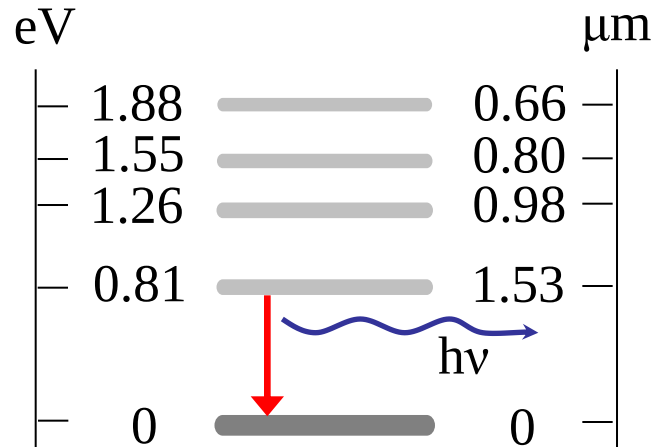
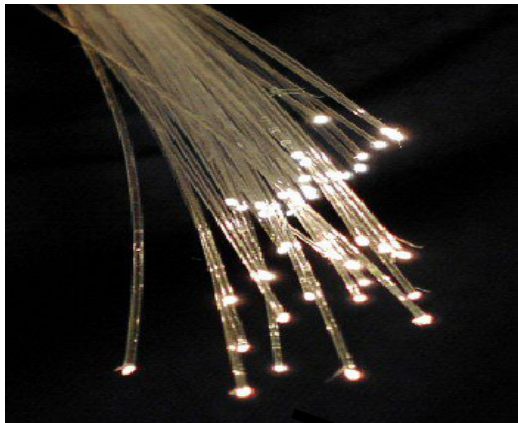
1. Основным материалом для создания интегральных схем был, есть и будет в течение очень длительного времени кремний (**Si**).
2. Однако, применение этого материала в оптоэлектронике ограничено устройствами, детектирующими излучение. Особенности энергетического спектра электронов в кремнии не позволяют создавать эффективный излучатель света (светодиод или лазер).
3. Зачем создавать светоизлучающие структуры на основе кремния, когда давно изготавливаются и отлично работают светодиоды на основе материалов A^3B^5 (GaAs, GaP и т.д.)?

Интеграция с наноэлектроникой

4. Известно, что между интегральными схемами в устройствах и между отдельными элементами интегральных схем связь чисто электрическая. Так в процессоре, содержащем до 10^8 транзисторов, длина проводников составляет **20 км**. Это не самые надежные участки схемы, и было бы неплохо хотя бы часть из них заменить оптическими линиями.
5. Как все-таки заставить кремний излучать свет при электрическом или оптическом возбуждении. Есть два пути:
6. а) **создать ансамбль наночастиц кремния** и вследствие принципа неопределенности Гейзенберга $\Delta P \cdot \Delta x \sim \hbar$ закон сохранения импульса становится не столь строгим и вероятность переходов растет ($\sim d^{-5}$).
7. б) **ввести примеси активаторы люминесценции**, например, редкоземельных элементов. Весьма перспективным является Er^{3+} , дающий узкую линию в области 1.5 мкм.

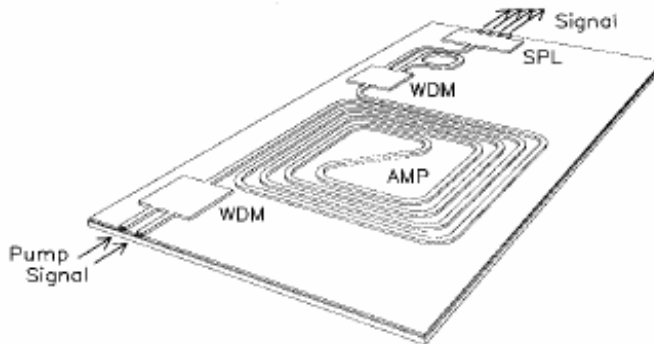
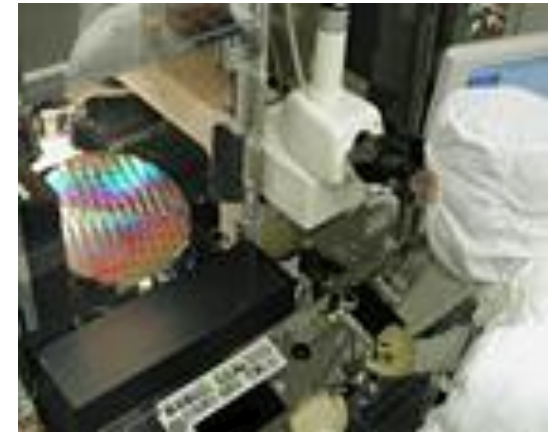
Кремниевые наноструктуры как основа светоизлучающей и усиливающей оптоэлектроники

Минимум потерь
оптических волоконных
линий связи **1.5 μm**



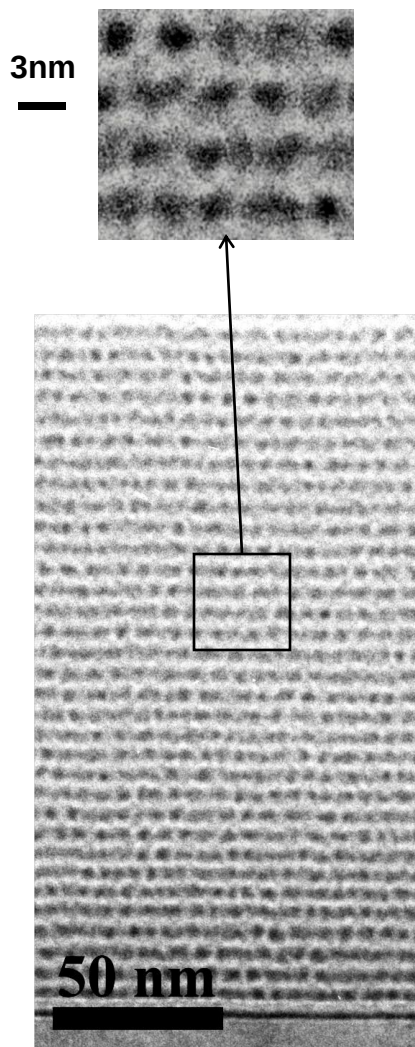
Er^{3+} ion

Кремний (Si) – базовый
материал
оптоэлектроники



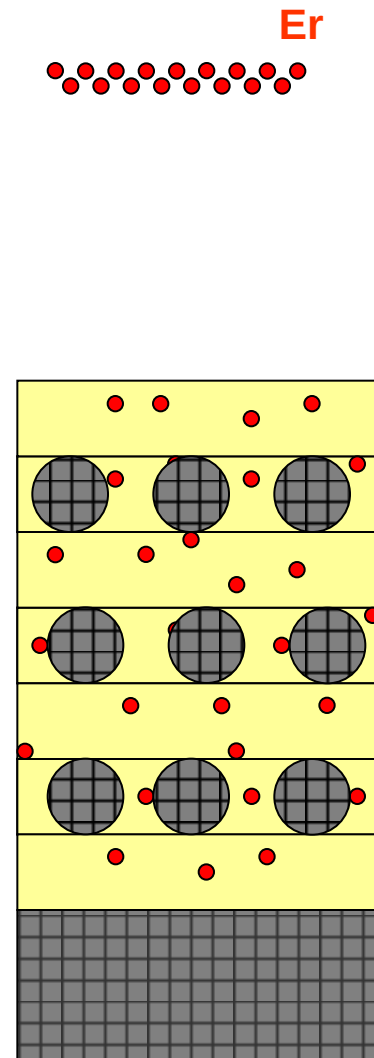
Светодиоды, оптические
усилители и лазеры,
совместимые с планарной
кремниевой технологией

Структуры нанокристаллов Si в матрице SiO₂

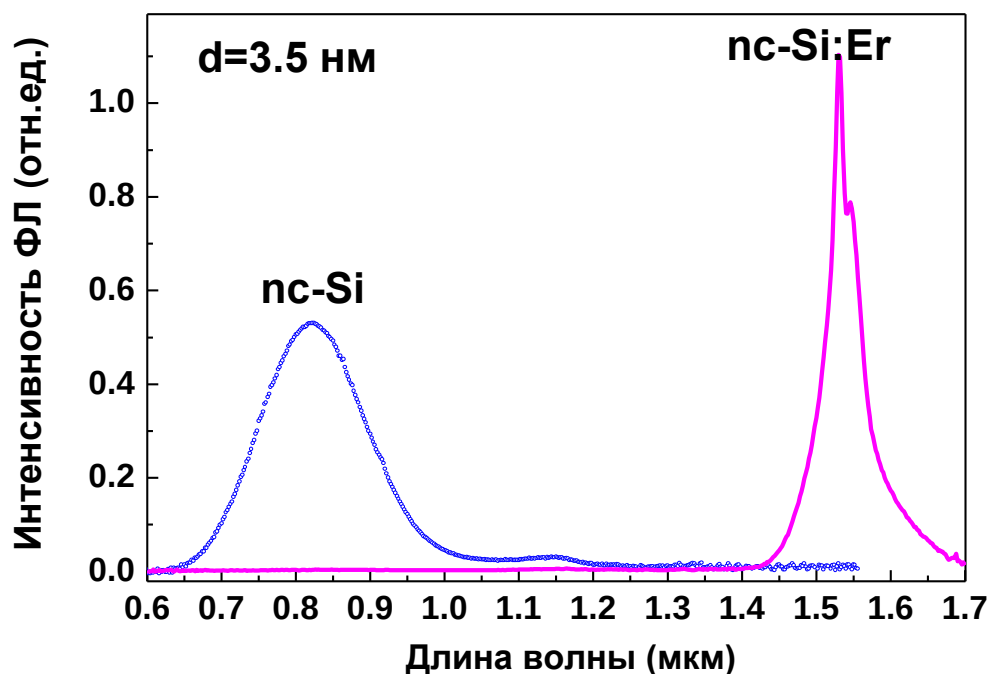


Метод приготовления:

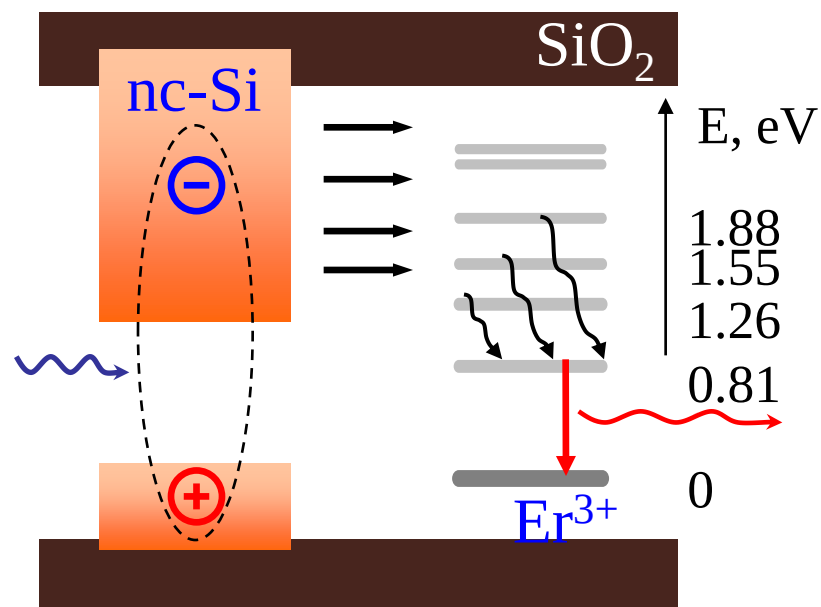
1. Термическое распыление SiO в вакууме 10^{-7} мбар или в кислороде при давлении 10^{-4} мбар, что позволяло менять концентрацию атомов кремния и кислорода в слоях SiO_x.
2. Были получены **SiO/SiO₂ сверхрешетки** с толщами слоев от 1 до 4 nm и числом периодов до 100.
3. Структуры были отожжены при 1100 °C в атмосфере N₂, что привело к формированию структур нанокристаллов **nc-Si/ SiO₂**.
4. Часть структур **nc-Si/SiO₂** имплантировалась ионами эрбия **Er** с дозами от 10^{14} до $5 \cdot 10^{16}$ см⁻² с последующим отжигом дефектов.



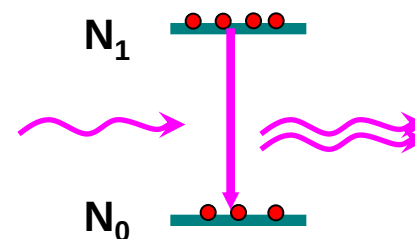
Легированные эрбием структуры кремниевых нанокристаллов



V.Yu.Timoshenko et al., Appl.Phys.Lett. (2004)



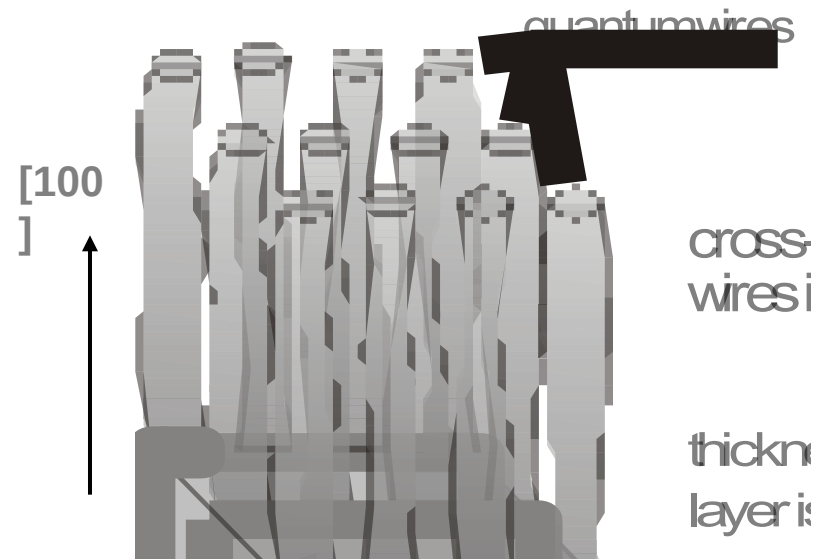
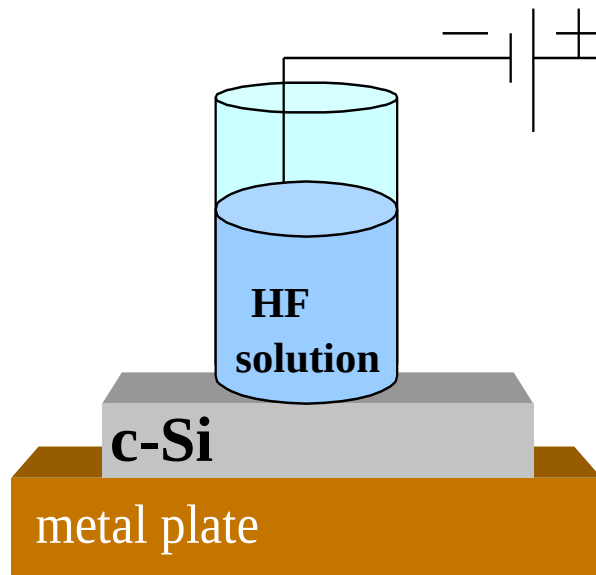
Передача энергии от нанокристаллов Si к ионам Er может быть использована для создания светодиодов, лазеров и оптических усилителей на длине волны 1.5 мкм



Наноструктурирование полупроводников методом электрохимического травления

Впервые получили пористый кремний А. Улир и его жена в 1955.

A. Uhlig, Electrolytic shaping of germanium and silicon, Bell Syst. Tech., 1956, v.35, no.2, pp.333-347.



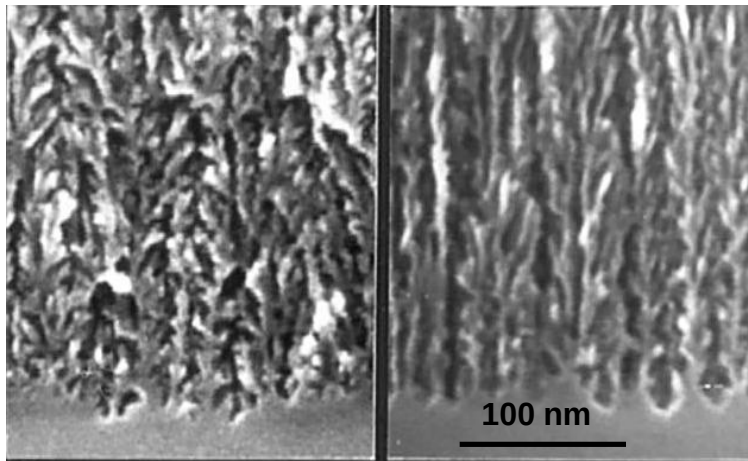
- Огромная удельная поверхность (до $1000 \text{ м}^2/\text{г}$)
- Возможность формирования наноструктур с размерами 1-100 нм
- Интенсивная фотолюминесценция (квантово-размерный эффект)
- Простота изготовления

Мезо- и микропористый кремний как примеры наноструктурированных полупроводников

Вид ПК	Размер пор
Микропористый	≤ 2 нм
Мезопористый	2-50 нм
Макропористый	>50 нм

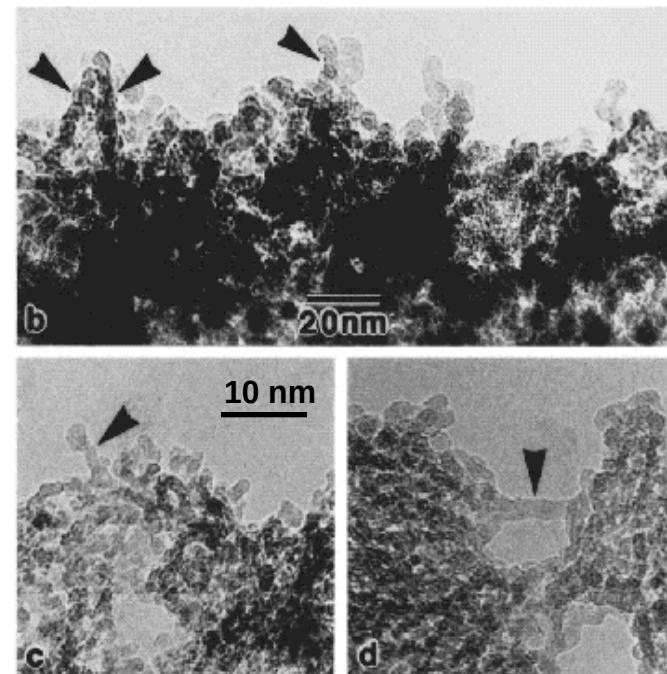
Microporous Si exhibits stronger confinement for charge carriers and photoluminescence
Because of smaller Si nanocrystals

Mesoporous Silicon

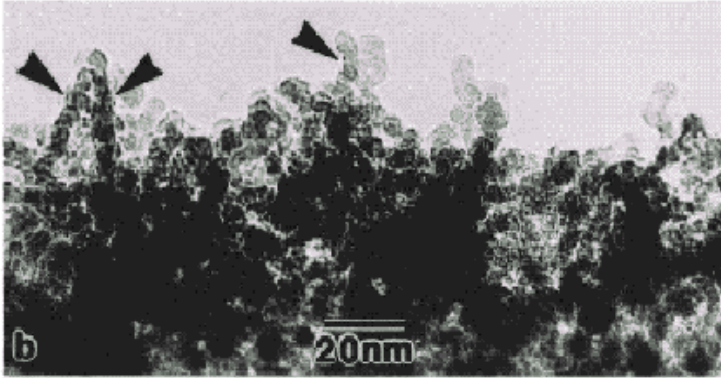


Mesoporous Si is characterized more ordered structure of pores and nanocrystals

Microporous Silicon

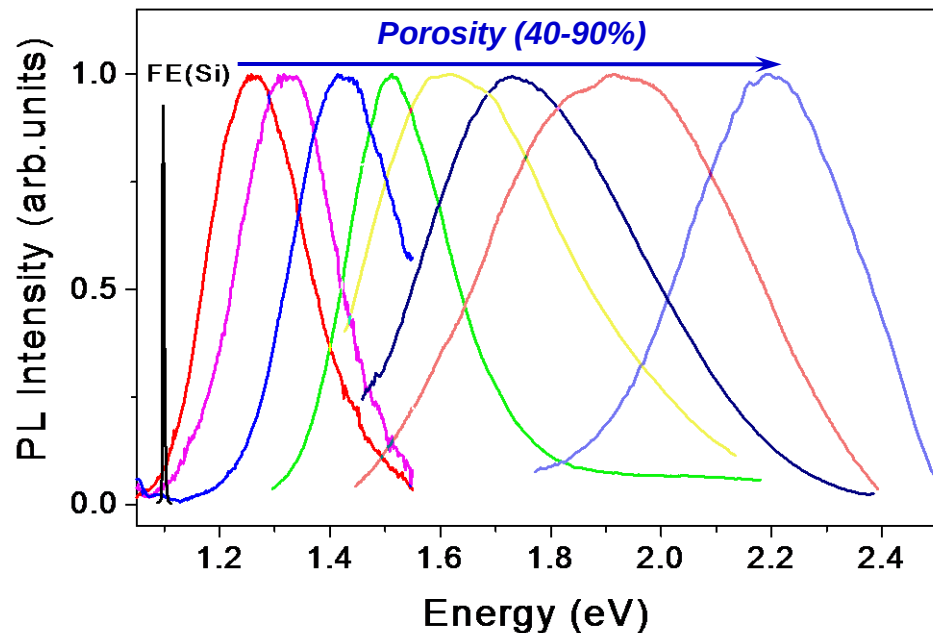


Нанокристаллы Si в пористом кремнии

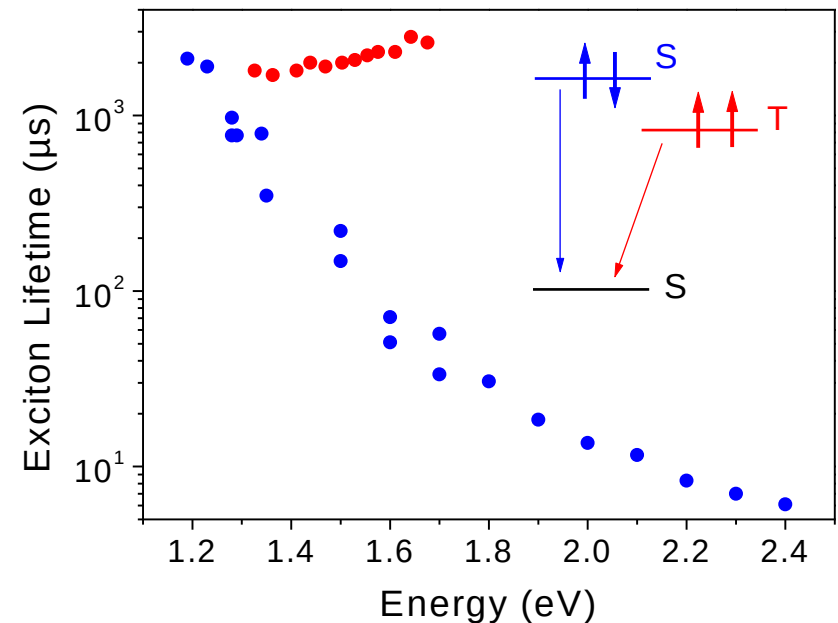


A.G.Cullis, L.T.Canham, Nature (1991)

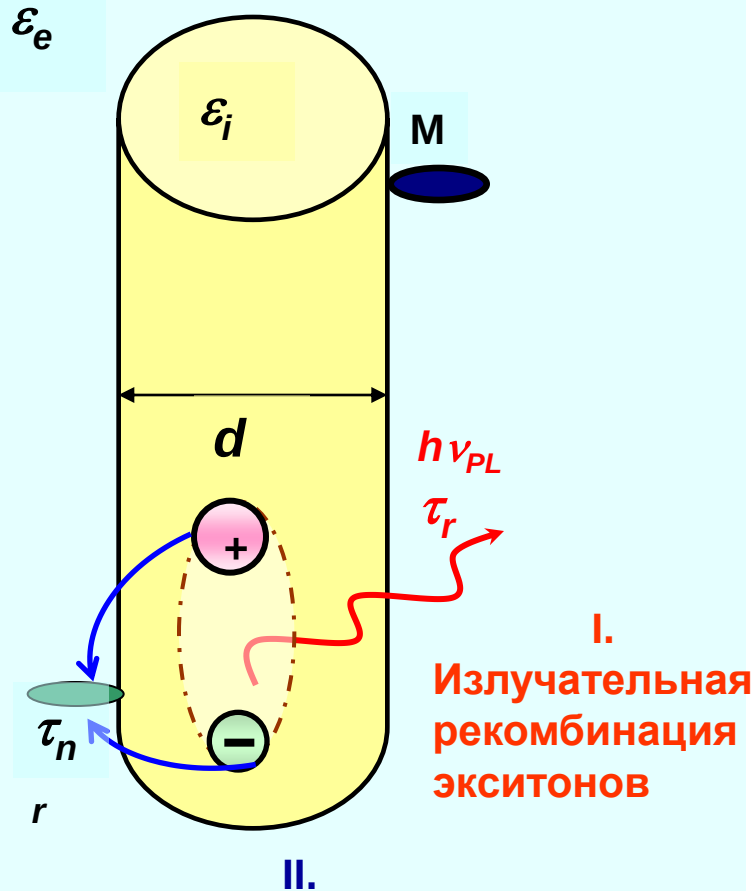
- Простой метод электрохимического травления
- Зависящая от размеров (пористости) полоса люминесценции
- Триплетные и синглетные состояния экситонов



D. Kovalev et al., Phys. Stat. Sol. (1999)

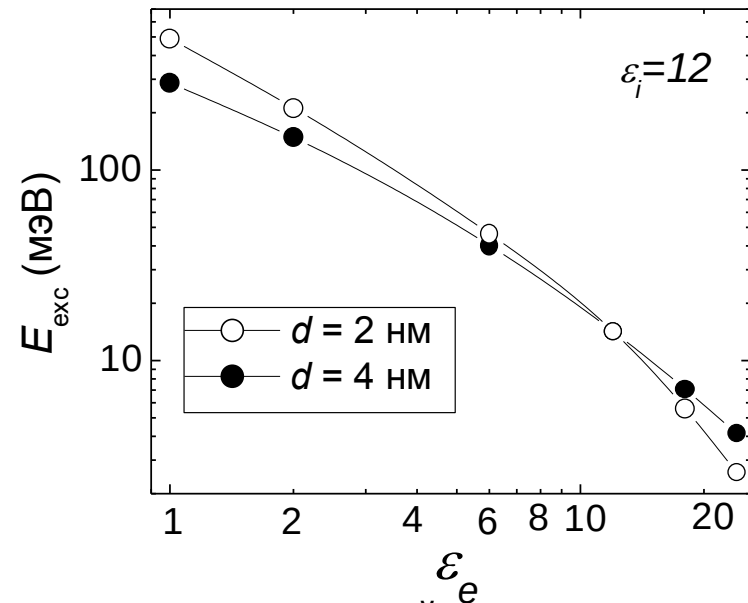


Экситон в кремниевых квантовых нитях: влияние размеров, поверхности и диэлектрической проницаемости



Молекулы на поверхности нанокристаллов (М) влияют на их зарядовое состояние. Параметры экситонов N_{ex} , E_{ex} , $h\nu_{PL}$ и τ_r зависят от d , N_M , ε_i , ε_e

Расчетные значения энергии связи экситонов E_{ex} в кремниевых квантовых нитях, окруженных диэлектрической средой с ε_e



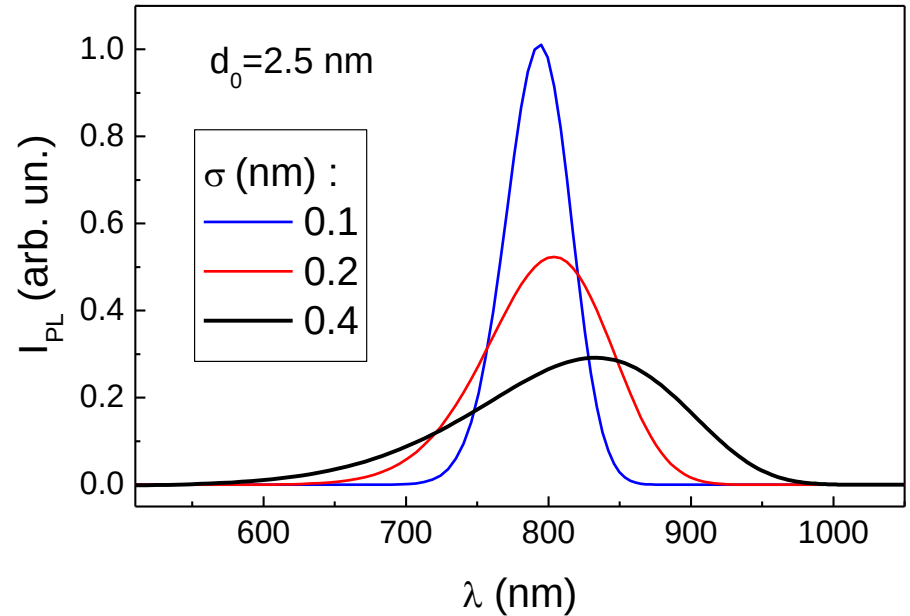
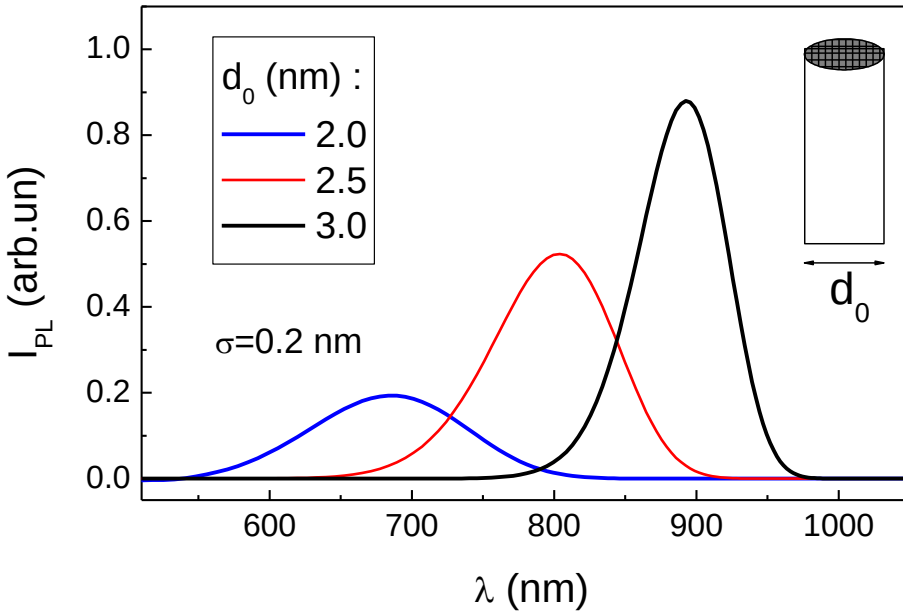
III. Влияние диэлектрической проницаемости среды на энергию связи и концентрацию экситонов

$$\tau_{nr} = \tau_{nr}^0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

Влияние распределения по размерам кремниевых нанокристаллов на ФЛ пористого кремния (расчет)

$$\rho(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{d-d_0}{2\sigma^2}\right)$$

$$\rho(h\nu_{PL}) \cdot \partial(h\nu_{PL}) = \rho(d) \cdot \partial d$$



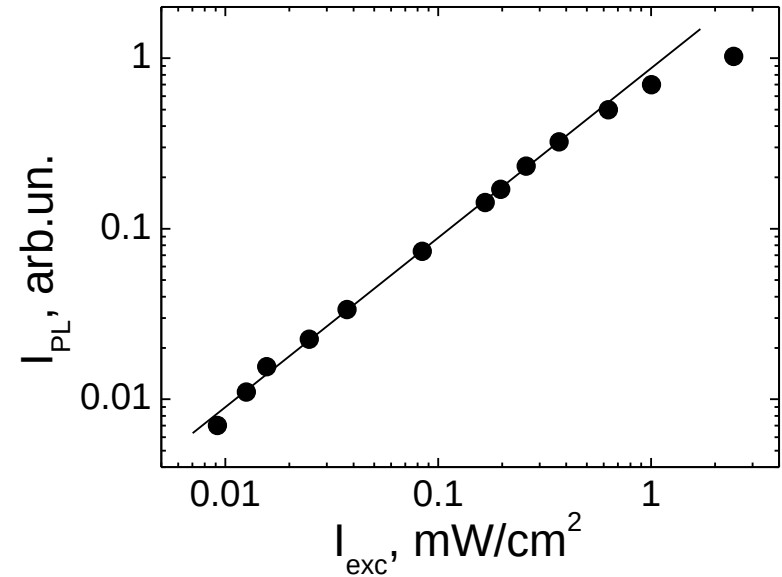
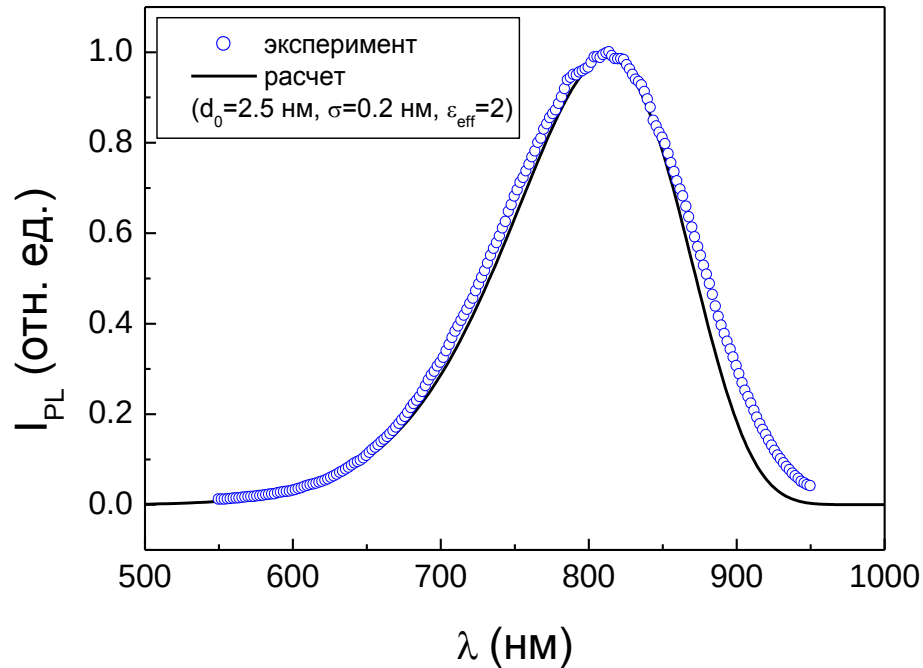
$$h\nu_{PL}(d) = E_{g0} + \frac{A}{d^2} - E_{exc}(d, \varepsilon_{eff})$$

$$\tau_r(d) \propto d^5$$

$$I_{PL} = \frac{N_0}{\tau_r} = \frac{g}{1 + \left[\tau_r \exp\left(-\frac{E_{exc}}{kT}\right) + C^{-1} \right] \tau_{nr}^{-1}}$$

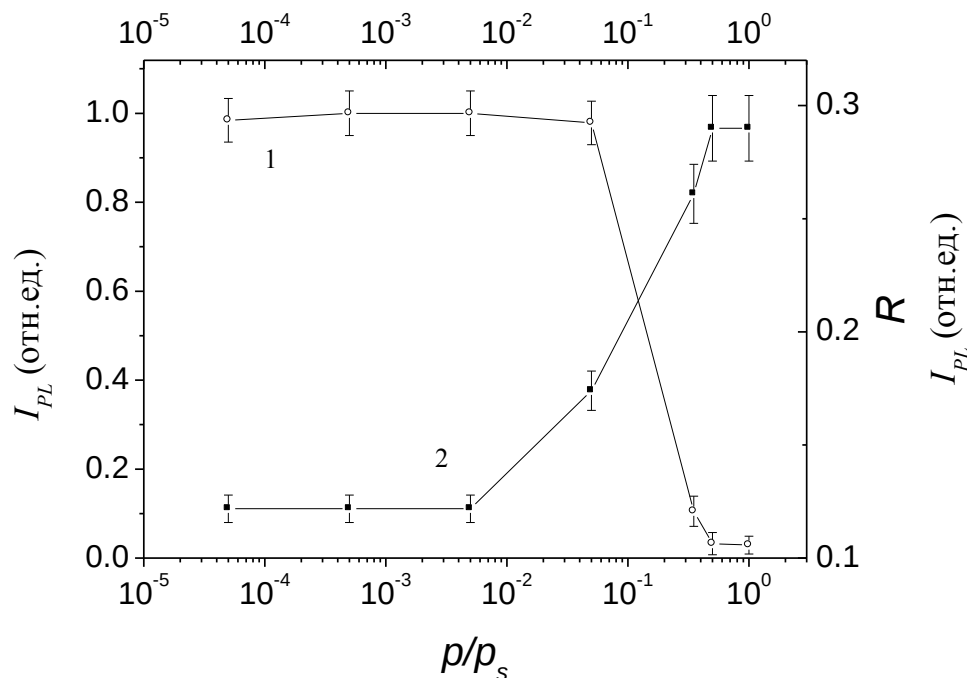
На положение максимума фотолюминесценции влияет как средний размер, так и разброс (дисперсия) размеров нанокристаллов.

Экспериментальное исследование фотолюминесценции пористого кремния

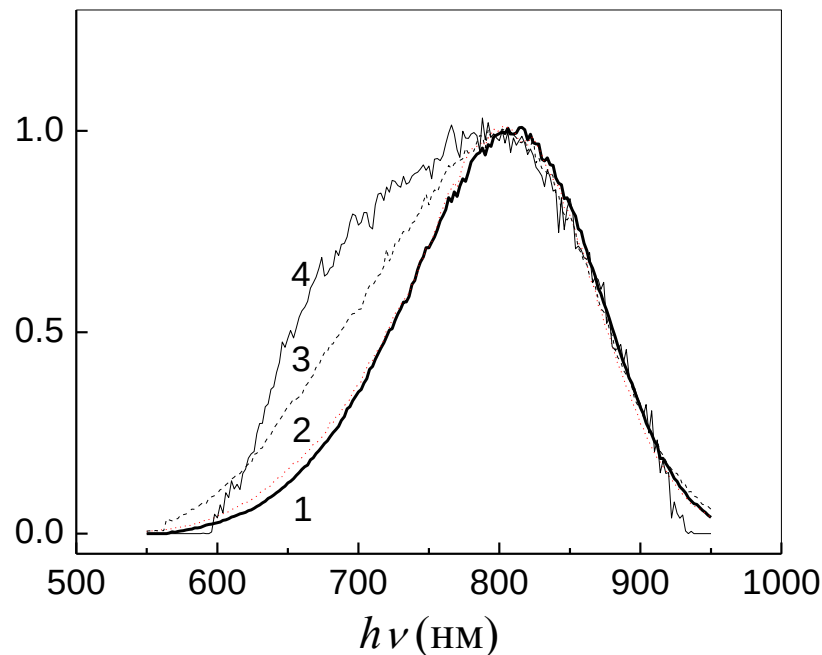


Экспериментальные и расчетные спектры ФЛ хорошо согласуются.
Наблюдается линейная зависимость интенсивности ФЛ с ростом интенсивности возбуждения, что находится в согласии с моделью.

Влияние окружающей среды на ФЛ и оптические свойства пористого кремния



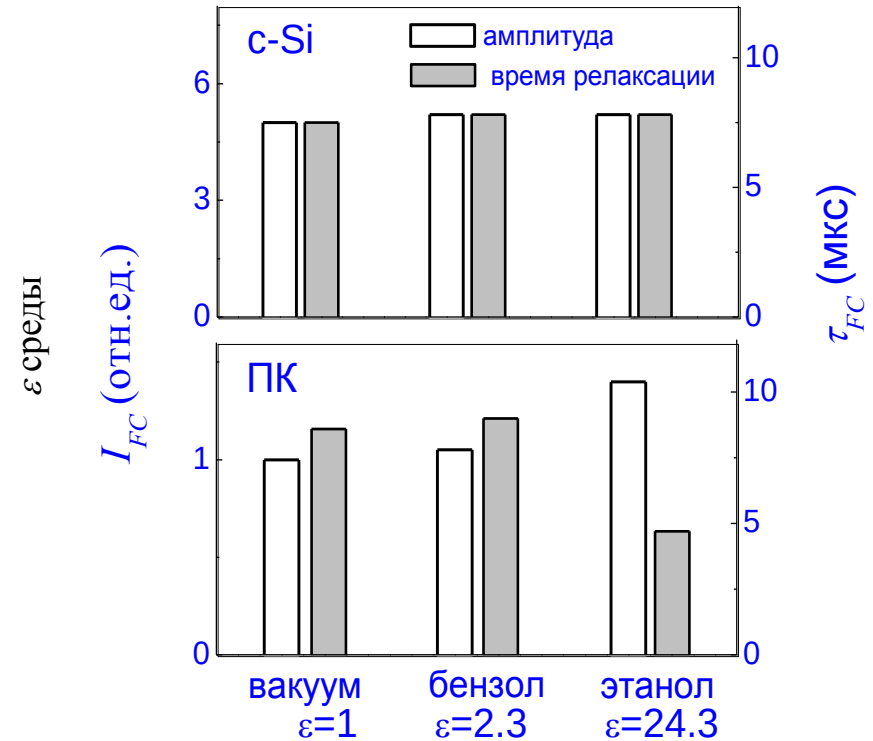
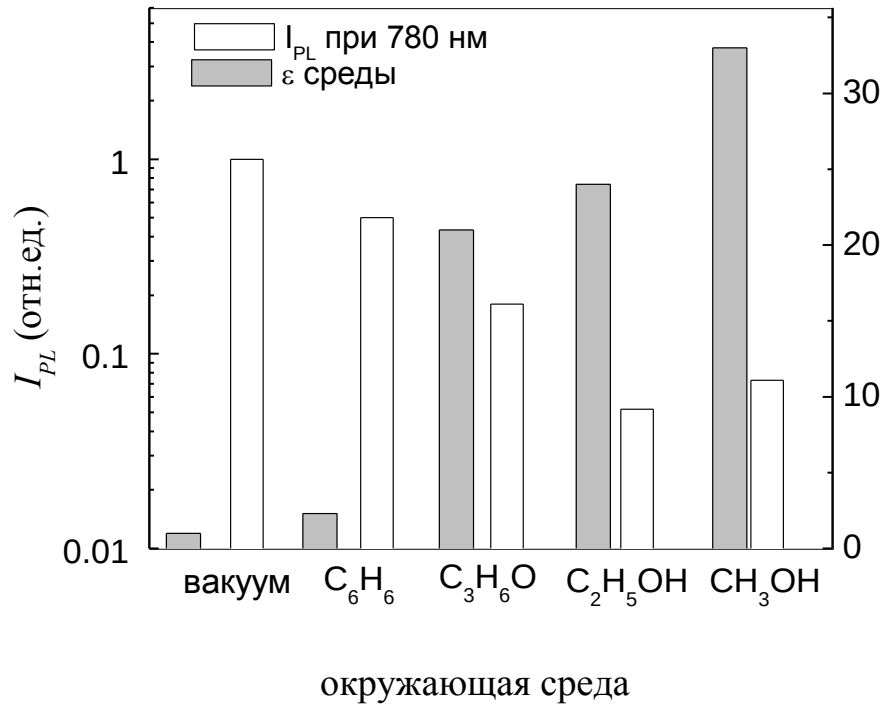
Зависимость интенсивности в максимуме полосы ФЛ (1) и коэффициента отражения (2) ПК от давления паров этанола.



Нормированные спектры ФЛ пористого кремния в вакууме (1), а также в насыщенных парах бензола $\varepsilon=2.3$ (2), ацетона $\varepsilon=21$ (3) или этанола $\varepsilon=25$ (4).

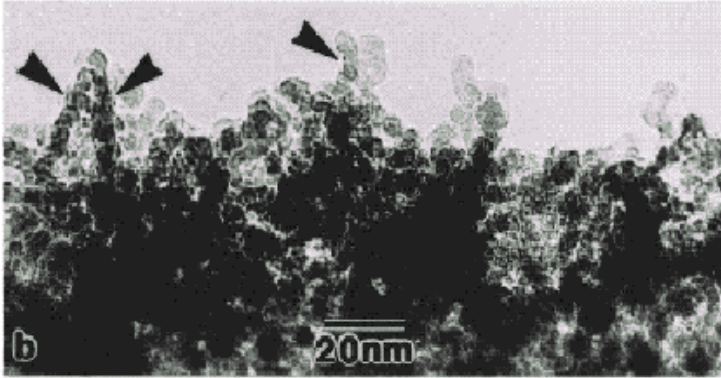
При конденсации молекул диэлектрических жидкостей в порах происходит гашение ФЛ и сдвиг ее полосы в коротковолновую область спектра, что находится в согласии с моделью.

Влияние окружающей среды на ФЛ и концентрацию неравновесных носителей заряда в пористом кремнии



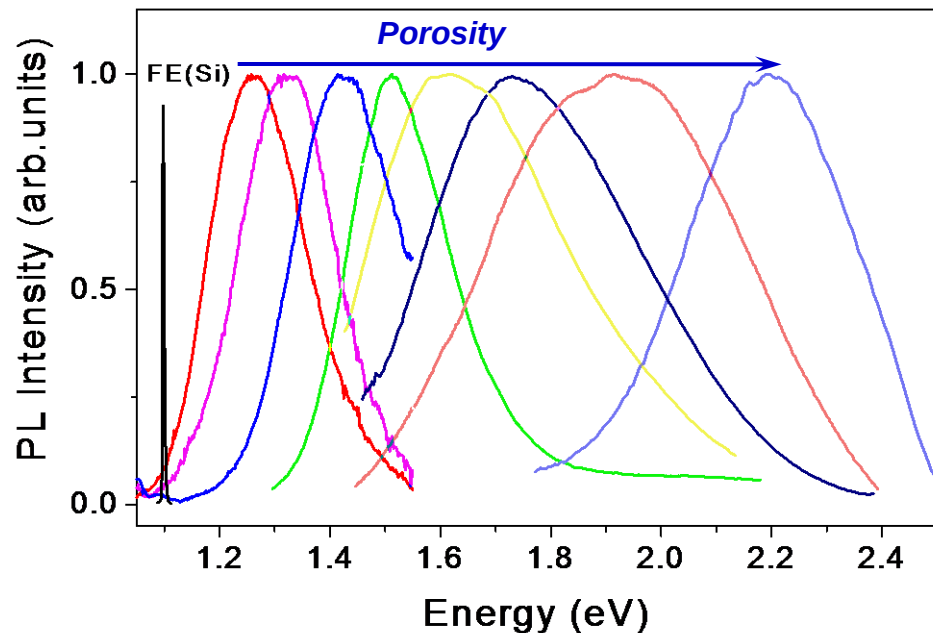
При конденсации молекул диэлектрических жидкостей в порах происходит гашение ФЛ, рост концентрации NH_3 и укорочение времени жизни, что находится в согласии с моделью.

Нанокристаллы Si в пористом кремнии

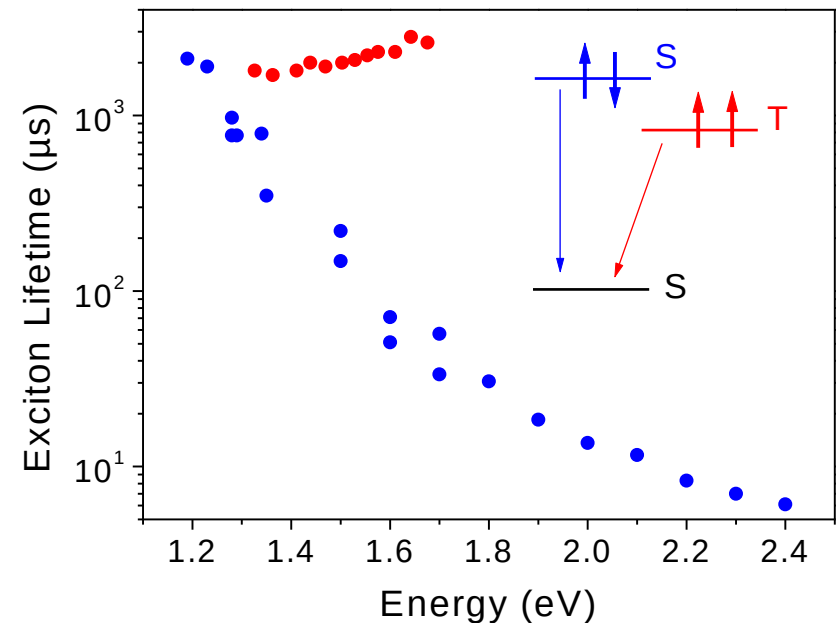


A.G.Cullis, L.T.Canham, Nature (1991)

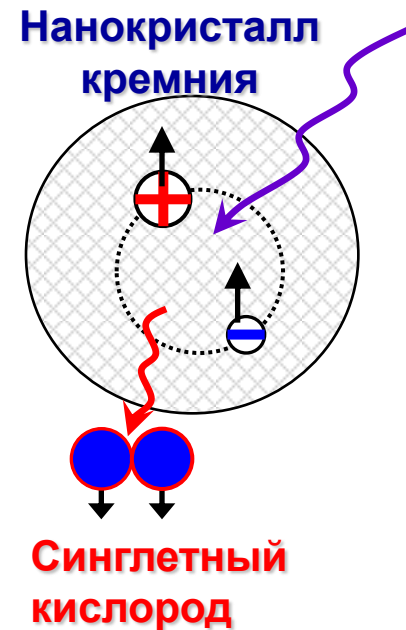
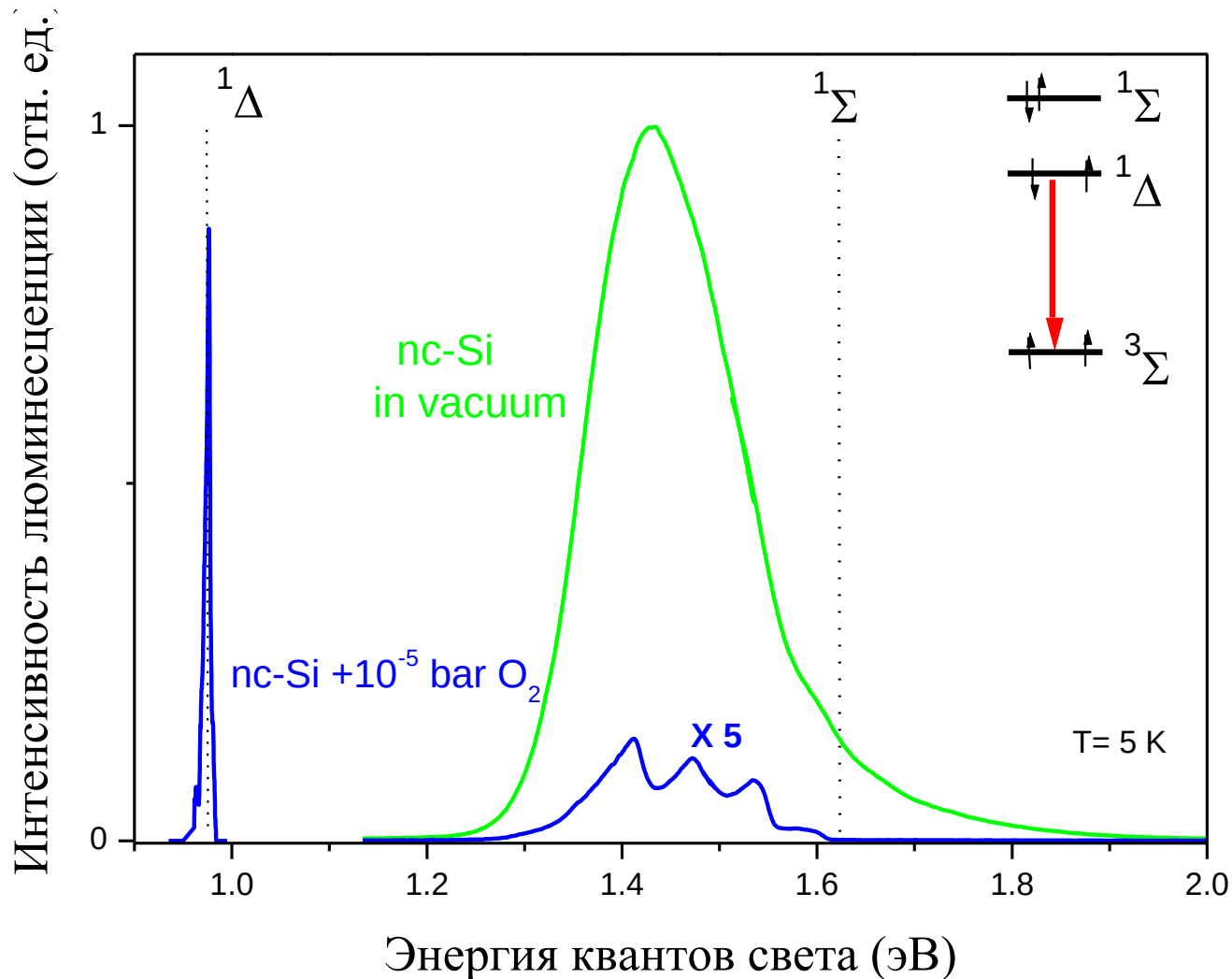
- Простой метод электрохимического травления
- Зависящая от размеров (пористости) полоса люминесценции
- Триплетные и синглетные состояния экситонов



D. Kovalev et al., Phys. Stat. Sol. (1999)

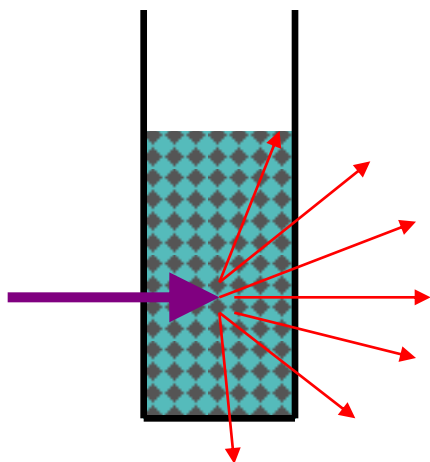


Передача энергии от экситонов в нанокристаллах Si к молекулам O₂

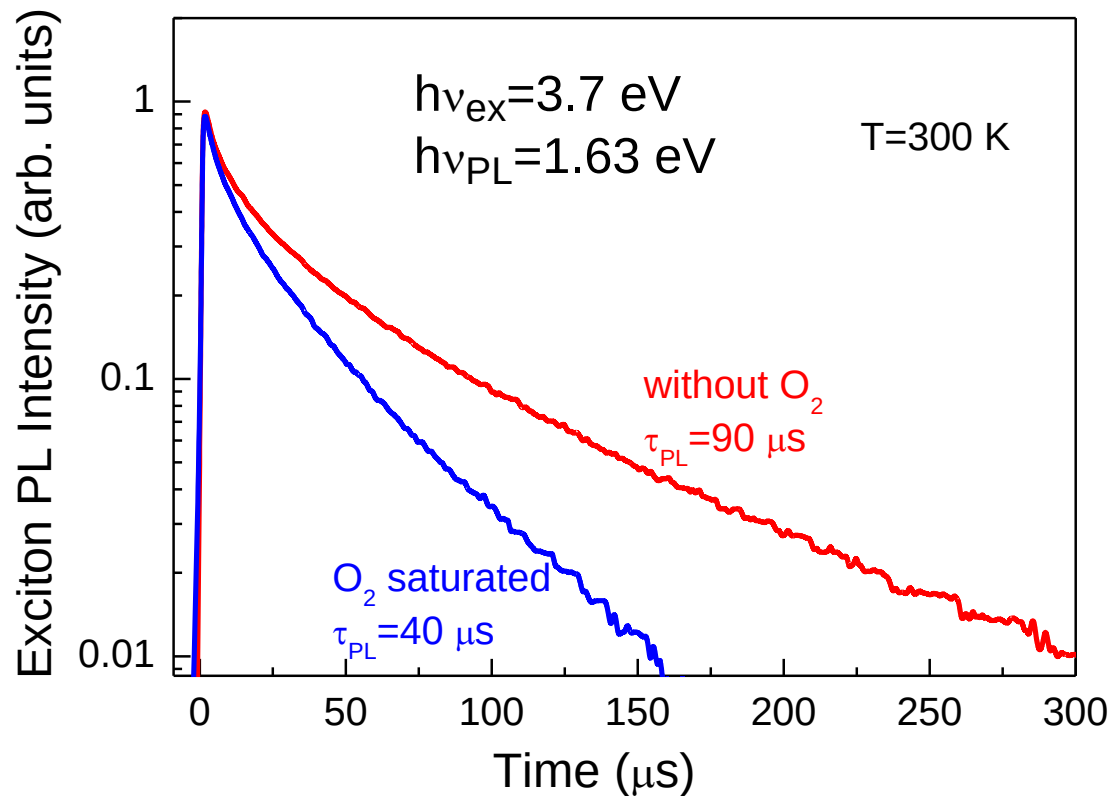


Генерация синглетного кислорода в водных суспензиях нанокристаллов кремния

Si nanocrystals dispersed in water



*1 mg of Si nanocrystals
dispersed in 10 ml of
water*



$$\frac{\int I_{\text{PL}}(t) dt}{\int I_{\text{PL}}(t) dt} = 1.7$$

vac / *oxygen*



$$\eta_E = 40\%$$

for $\tau_{\text{SO}} \sim 1\text{-}3 \text{ } \mu\text{s}$: $N_{\text{SO}} \sim 10^{15} - 10^{16} \text{ (1/cm}^3\text{)}$

Контрольные вопросы к Лекции 15:

- Как можно получить квантовые ямы в геретоструктурах?
- Что описывает механизм роста Странского-Крастанова (квантовые точки, нити, ямы)?
- Как изменяются люминесцентные свойства кремниевых нанокристаллов с уменьшением их размеров?
- При какой пористости возможен квантовый размерный эффект в пористом кремнии?