



# Полупроводниковые нанотехнологии для информатики и биомедицины

**В. Ю. Тимошенко**



*Физический факультет  
МГУ им. М.В.Ломоносова*



# Содержание

---

- I. Введение: нанофизика, нанотехнологии
- II. Эмиссия света из структур кремниевых квантовых точек
- III. Перенос энергии в ансамблях кремниевых нанокристаллов и оптоэлектронные применения
- IV. Спин-зависимый перенос электронного возбуждения от кремниевого нанокристалла к молекулярному окружению
- V. Биомедицинское применение
- VI. Заключение



# I. Нанотехнологии

1. В **1959 г.** Нобелевский лауреат по физике **Ричард Фейнман** прочитал лекцию с аллегорическим названием **“Внизу полным-полно места”** (**There is plenty of rooms at the bottom. In minituarization**). Р.Фейнман рассказал аудитории о фантастических перспективах, которые сулит изготовления материалов и устройств на атомном и молекулярном уровнях.
2. **Почему нанотехнологии?** Оказывается, многие свойства твердых тел (температура плавления, электропроводность, область прозрачности, магнетизм и др.) при уменьшении кристалла до размеров **10-20 нм и меньше** начинают зависеть от размера частицы. Таким образом, появляется возможность создавать новые материалы не путем изменения химического состава компонентов, а в результате регулирования размеров и формы частиц, составляющих систему.



# Терминология

**Нано** – в переводе с греческого «карлик», означает  $10^{-9}$  часть чего-либо.

**Наноматериалы** – объекты или композиции объектов, обладающие новыми качествами вследствие уменьшения размеров объекта в одном, двух или трех измерениях до нанометрового масштаба. Подавляющее большинство новых физических явлений в таких материалах проистекает из волновой природы электронов, т.е. характерным наномасштабом является длина волны де-Бройля;

**Нанотехнологии** – методы получения наноматериалов

**Наука о наносистемах** – разделы физики, химии и биологии, изучающие явления в нанообъектах и наноматериалах.

Часто в термин нанотехнологии включают также и науку о наносистемах и наноинженерию.



# Немного истории...

Реально работы в области нанотехнологий начались с 80-х годов XX века. Наиболее выдающиеся достижения в этой области отмечены нобелевскими премиями по физике:

**1985 г.** – за открытие квантового эффекта Холла;

**1986 г.** – за создание методов электронной и туннельной микроскопии высокого разрешения;

**1998 г.** – за открытие дробного квантового эффекта Холла;

**2000 г.** – за создание полупроводниковых гетероструктур и разработку полупроводниковых интегральных схем.



# Перспектива...

---

**«Нанотехнологии произведут такую же революцию в манипулировании материей, какую произвели компьютеры в манипулировании информацией»**

**Ralph Merkle (Xerox, Palo Alto)**



## II. Наноэлектроника

1. Последняя треть XX века и начало XXI проходят под знаком все возрастающего влияния микроэлектроники на общество. Это связано с небывалыми достижениями **вычислительной техники, информатики, средств связи** – областей техники, целиком базирующихся на **полупроводниковой микроэлектронике**.
2. С начала 80-х годов, когда появились первые интегральные микросхемы, размеры транзисторов уменьшились от 1 мм до долей мкм. Сейчас освоена технология **130 нм** и на одном кристалле **1x1 см<sup>2</sup>** располагаются **100 млн. транзисторов**. Прогноз в соответствии с т.н. законом Мура (каждые 1.5 года число транзисторов на одном кристалле увеличивается вдвое) на 2010 г. предсказывает уменьшение отдельных элементов до **50 нм**. Это тот фундаментальный предел, за которым и начинается нанофизика. Начинают появляться в полной мере **квантовые эффекты**, а электропроводность определяется квантово-механической интерференцией электронных волн.



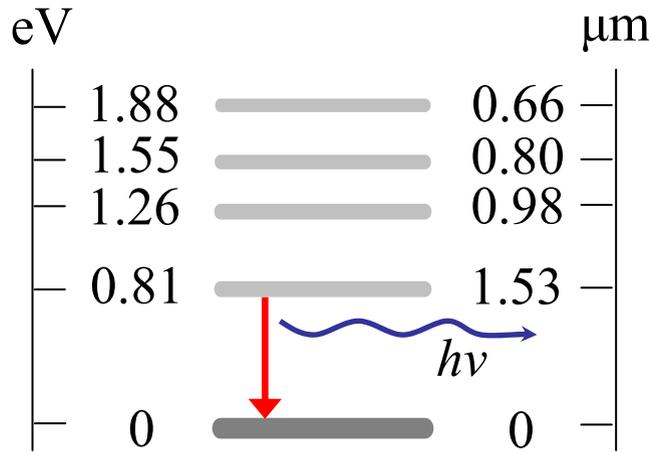
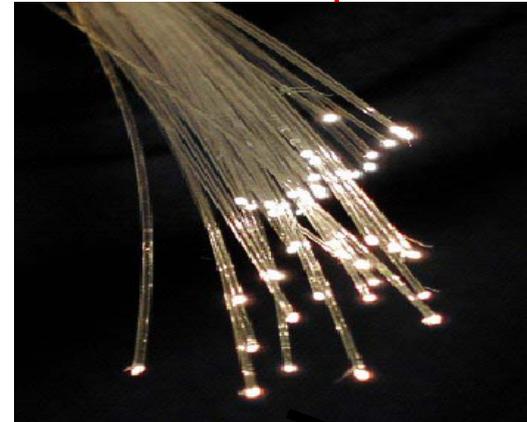
# III. Кремниевая оптоэлектроника

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.)?



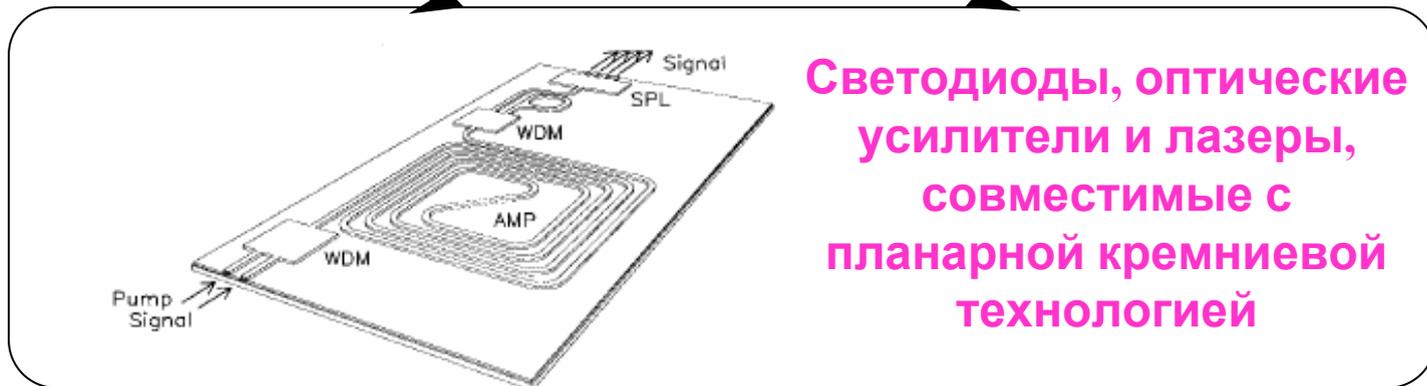
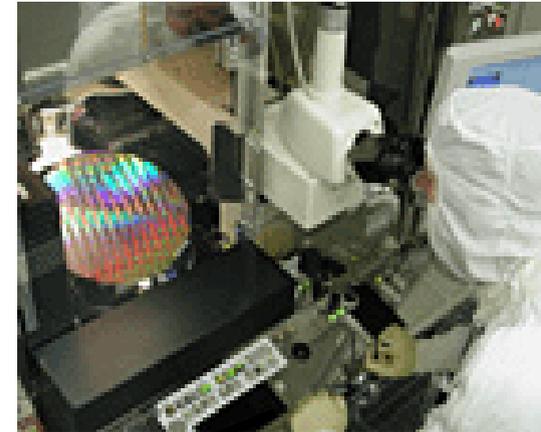
# Эмиссия света из кремниевых структур возможна!

Минимум потерь  
оптических  
волоконных линий  
связи **1.5  $\mu\text{m}$**



**Er<sup>3+</sup> ion**

Кремний (Si) –  
базовый материал  
оптоэлектроники



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



# 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:
  - 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 ( $\sim d^{-5}$ ).
  - б) **ввести примеси активаторы люминесценции**, например, редкоземельных элементов. Весьма перспективным является  $\text{Er}^{3+}$ , дающий узкую линию в области 1.5 мкм.



# Конкретная задача

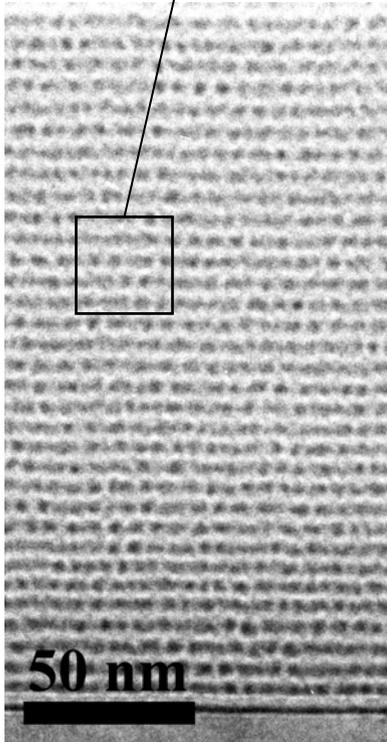
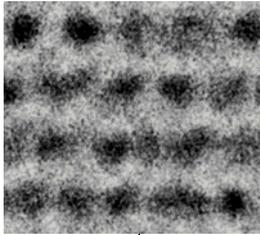
6. Кремниевое светоизлучающее устройство предназначенное для телекоммуникаций должно излучать свет в полосе прозрачности волоконных линий связи (1.5 мкм).

Для построения кремниевого излучателя мы решили объединить оба выше названных подхода и создать систему, содержащую кремниевые нанокристаллы (квантовые точки) и ионы  $\text{Er}^{3+}$ .



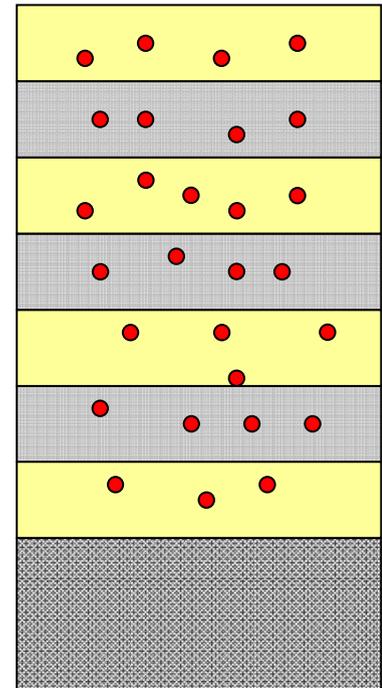
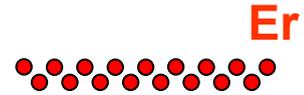
# Структуры кремниевых нанокристаллов в оксидной матрице

3nm



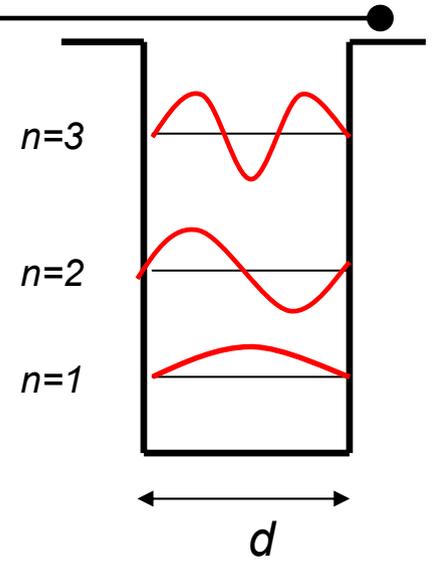
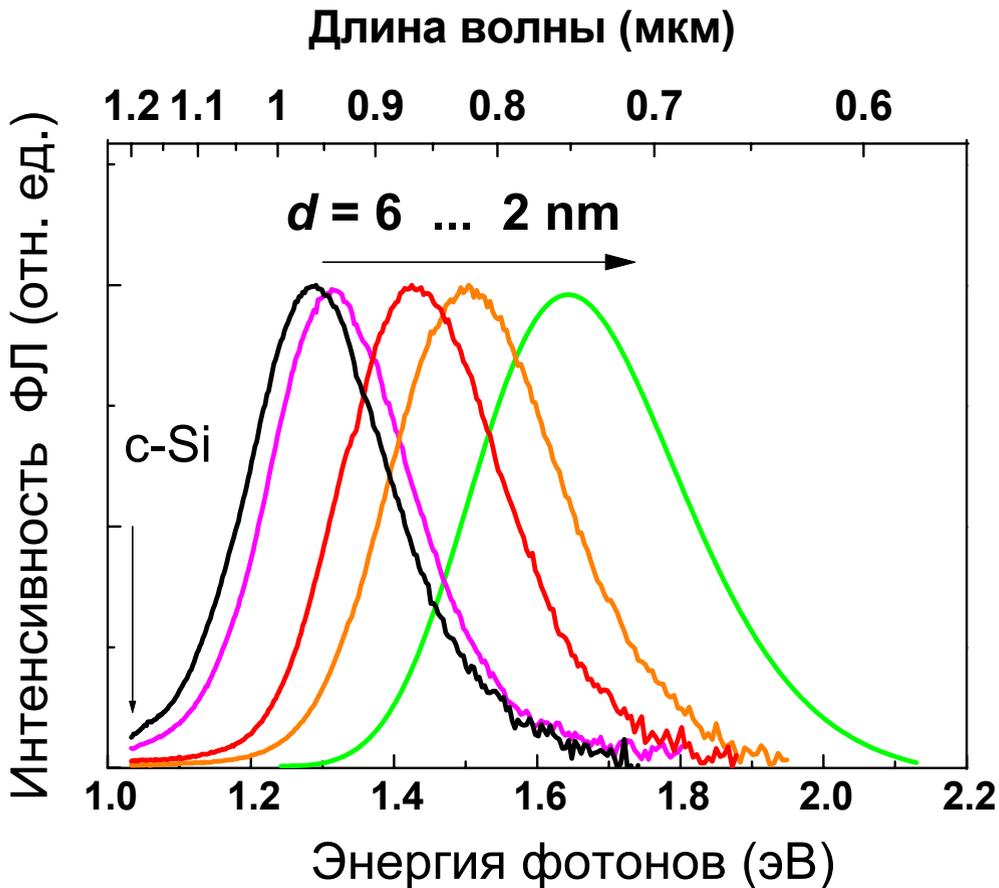
## Preparation Details:

1. Alternating evaporation of SiO powder in vacuum  $10^{-7}$  mbar or in oxygen atmosphere under oxygen partial pressure of  $10^{-4}$  mbar. This changes the stoichiometry  $x$  of  $\text{SiO}_x$  alternatively between 1 and 2.
2. **SiO/SiO<sub>2</sub> superlattices** are characterized by the thickness of the SiO layers varied between 1 and 3 nm and the thickness of SiO<sub>2</sub> layers between 2 and 3 nm. The number of periods varied between 30 and 90.
3. The evaporated samples were annealed at 1100 °C under N<sub>2</sub> atmosphere. Thus **nc-Si/ SiO<sub>2</sub> superlattices** were obtained.
4. **Er doped nc-Si/SiO<sub>2</sub> superlattices** were produced by implantation with Er ions (energy 300 keV, doses  $10^{14}$  –  $5 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-2</sup>) followed by RTA at 950 °C for 5-65 minutes. ě





# Спектры фотолюминесценции нанокристаллов Si



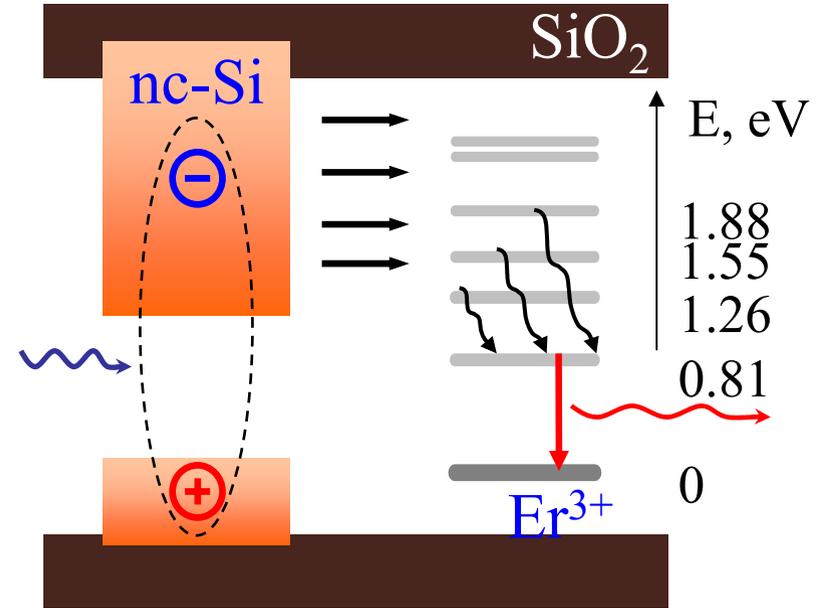
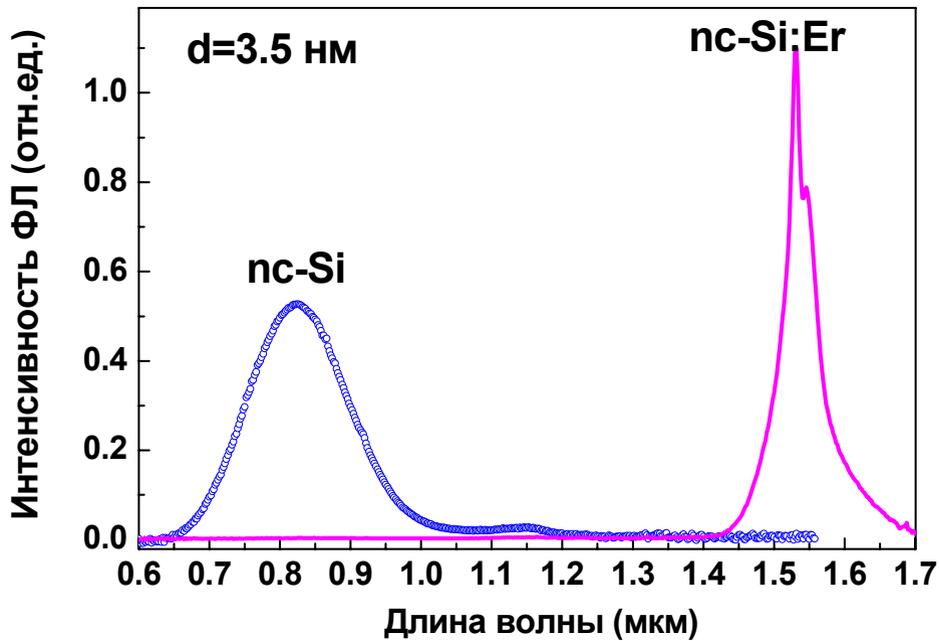
$$\Delta E \propto \frac{1}{d^k}, \quad 1 \leq k \leq 2$$

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

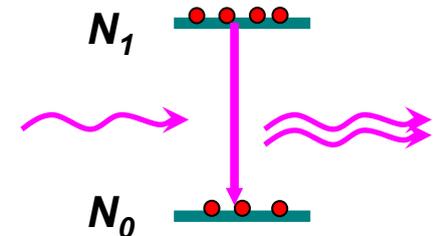
С уменьшением размеров нанокристаллов Si спектр их люминесценции сдвигается в высокоэнергетичную (коротковолновую) область вследствие квантового размерного эффекта.

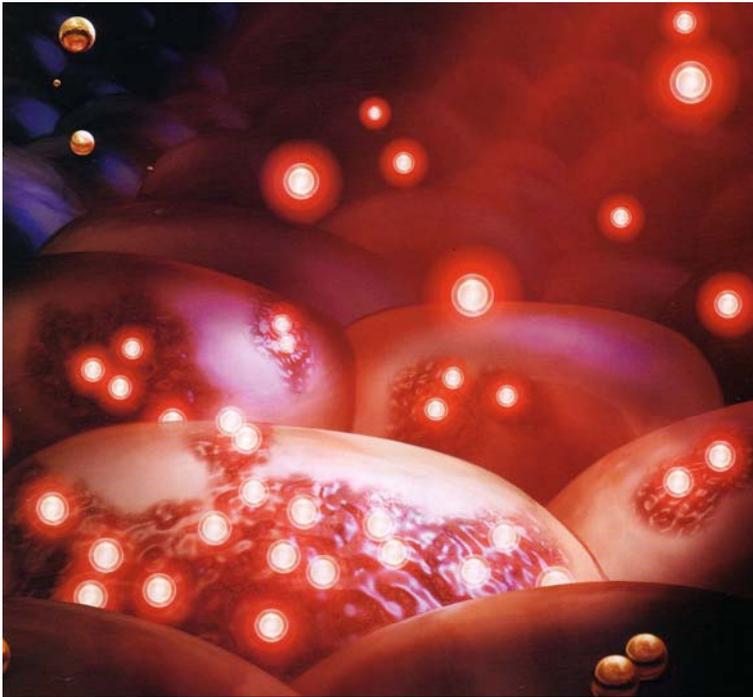


# Легированные эрбием структуры кремниевых нанокристаллов



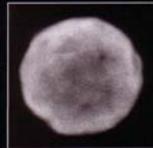
Передача энергии от нанокристаллов Si к ионам Er может быть использована для создания светодиодов, лазеров и оптических усилителей на длине волны 1.5 мкм





## Уничтожение раковых клеток

Хирургическое вмешательство, лучевая и химиотерапия – это всегда рискованное вторжение в организм пациента; лечение рака с помощью нанотехнологий, как ожидается, будет практически безопасным. Исследователи, в том числе Наоми Халас из Университета Райса, изготовили кремниевые шарики (их диаметр – примерно 120 нанометров), покрытые тонким слоем золота (справа). Через кровь пациента они могут проникать в опухоль. Если затем направить на нее инфракрасный лазер (вверху), поток света пройдет сквозь здоровые клетки, не причинив им вреда, и нагреет наночастицы: раковые клетки будут уничтожены, а окружающие их ткани не пострадают. Лабораторные мыши, на которых эта методика была опробована, более трех месяцев оставались здоровыми, у них не появилось новых опухолей.



— 150 нанометров (нм) —

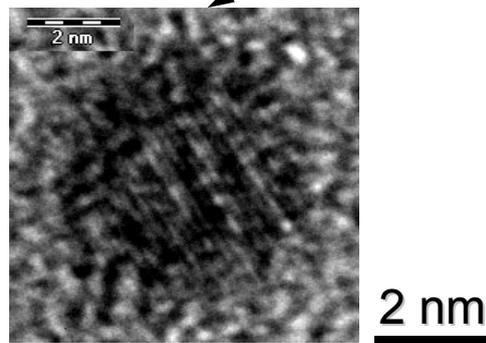
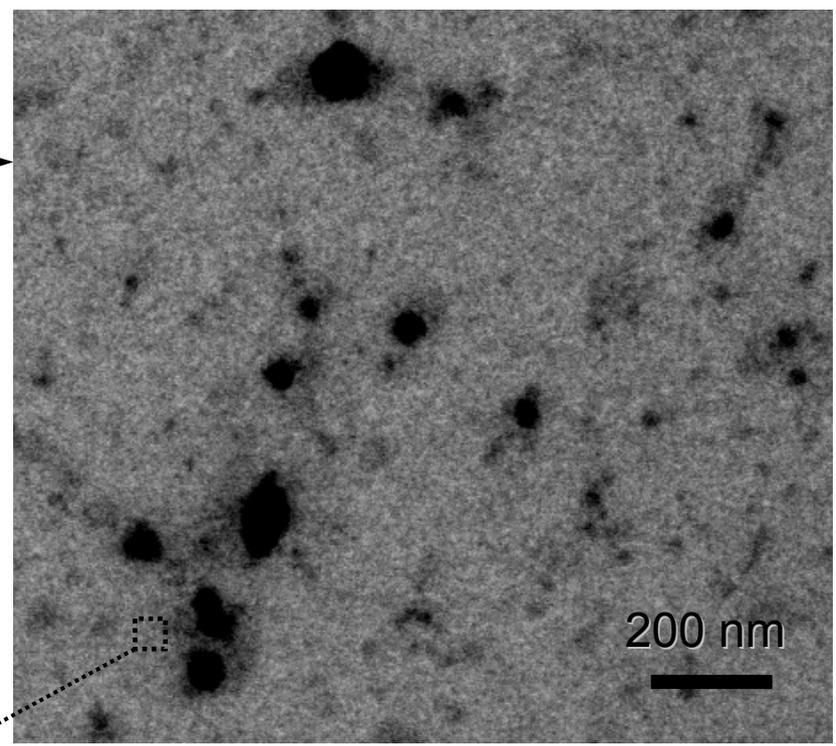
Хирургическое вмешательство, лучевая и химиотерапия – это всегда рискованное вторжение в организм человека.

Лечение рака с помощью нанотехнологий, как ожидается, будет практически безопасным. Например, кремниевые наночастицы диаметром 120 нм, покрытые тонким слоем золота могут быть введены в опухоль. Если затем на нее направить инфракрасный лазер, то его свет пройдет через здоровые клетки, не причинив им вреда, но нагреет наночастицы в раковых клетках, и в результате они будут уничтожены.

Изображение в сканирующем электронном микроскопе, сделанное исследователями из Университета Райса, США. Из журнала “National Geographic”

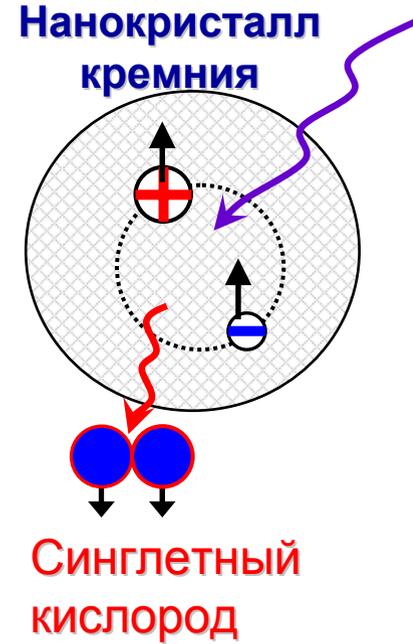
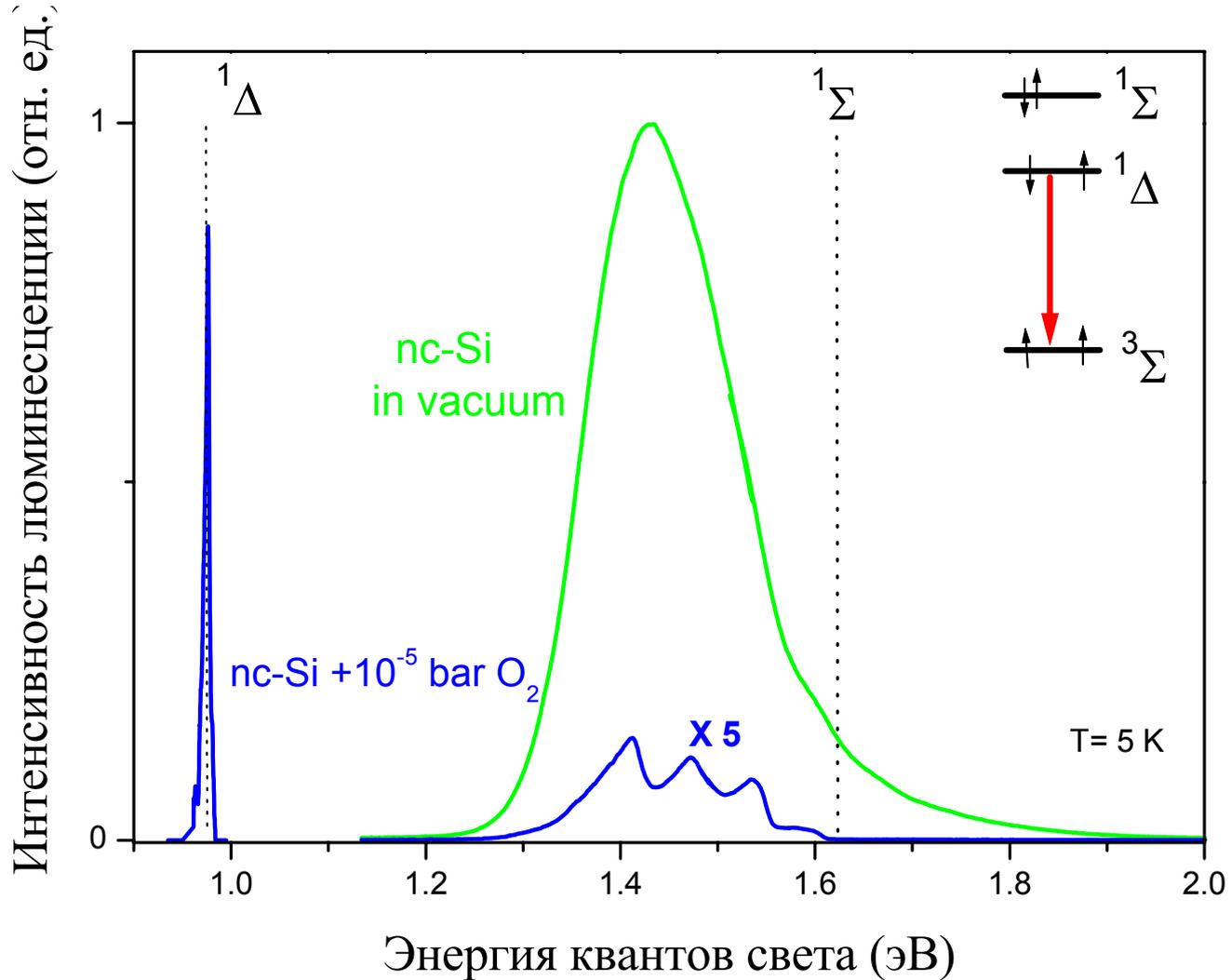


# Порошок из нанокристаллов кремния, полученных по технологии пористого Si





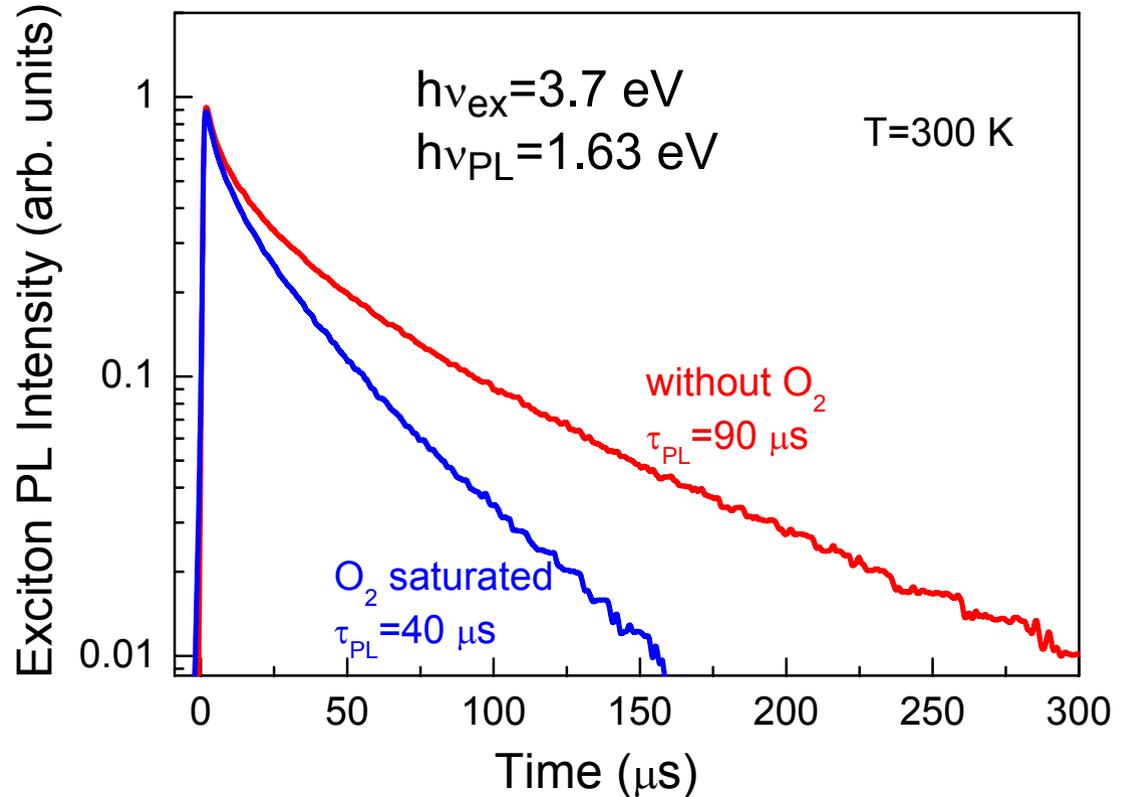
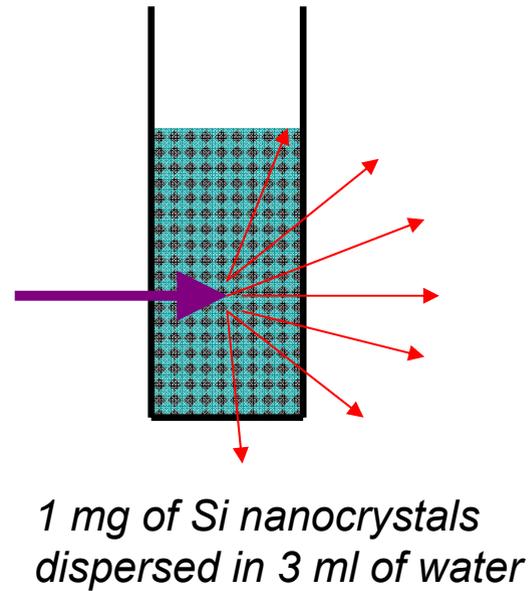
# Передача энергии от экситонов в нанокристаллах Si к молекулам O<sub>2</sub>





# Генерация синглетного кислорода в водных суспензиях нанокристаллов кремния

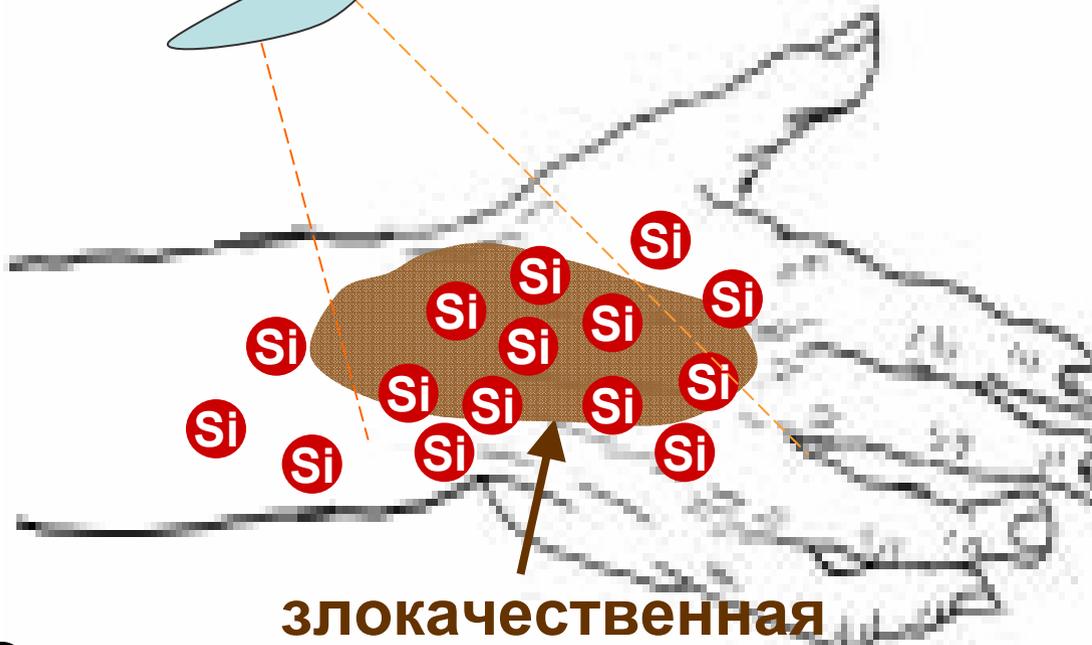
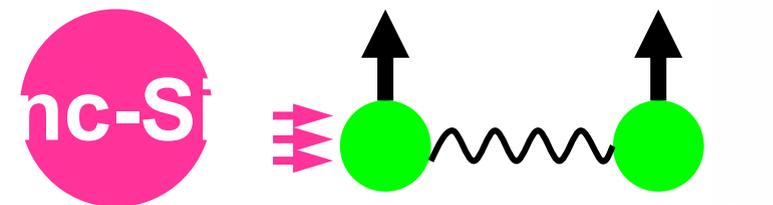
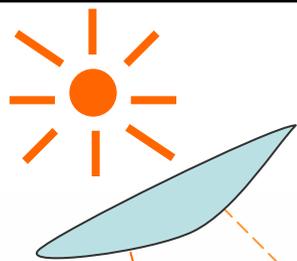
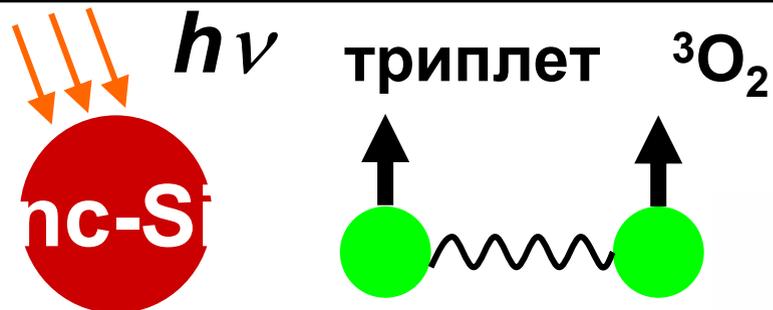
Si nanocrystals dispersed in water



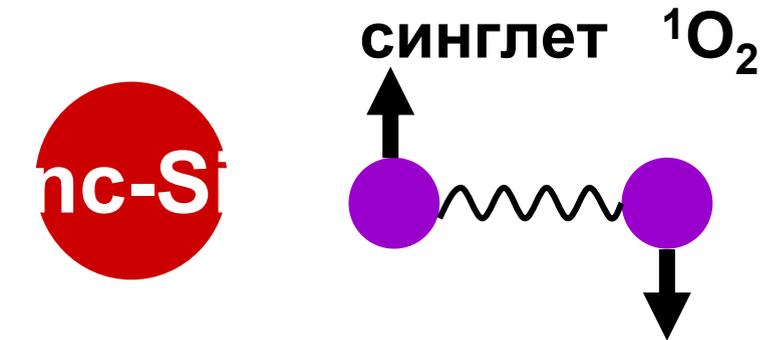
Укорочение времени жизни лиминесценции нанокристаллов кремния в водных суспензиях свидетельствует о генерации синглетного кислорода



# Фотодинамическая терапия рака



злокачественная  
опухоль





# Основные выводы

- 1. Использование нанотехнологий позволяет в широких пределах изменять электронные и оптические свойства полупроводниковых нанокристаллов.**
- 2. Системы, содержащие кремниевые нанокристаллы в диэлектрической матрице, являются перспективными для создания светоизлучающих устройств, совместимых с технологией интегральных схем.**
- 3. Легирование структур кремниевых нанокристаллов ионами редкоземельных металлов позволяет реализоваться уникальному процессу практически полной передачи энергии экситонов на возбуждение люминесценции ионов эрбия на длине волны 1.5 мкм.**
- 4. Кремниевые нанокристаллы являются эффективными сенсбилизаторами спин-зависящего процесса возбуждения молекул синглетного кислорода.**
- 5. Обнаруженная генерация синглетного кислорода при освещении ансамблей кремниевых нанокристаллов может быть использована для фотодинамической терапии различных заболеваний.**

---

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !**

