

***Московский Государственный Университет
имени М. В. Ломоносова
Научно-Образовательный Центр по нанотехнологиям***

Межфакультетский курс лекций

«Фундаментальные основы нанотехнологий»

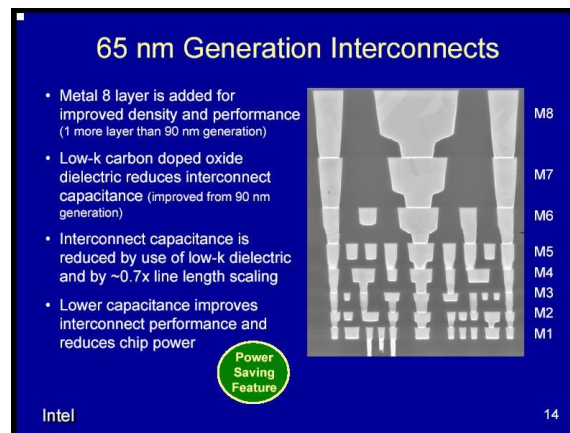
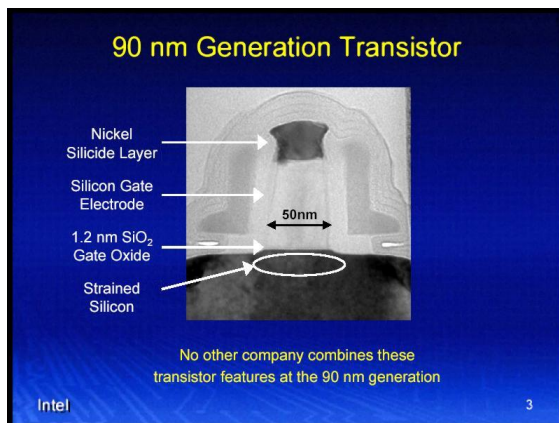
Лекция 12. Физика наноустройств. Устройства оптоэлектроники и наноэлектроники. Туннельный диод. Одноэлектроника. Светодиоды и лазеры на двойных гетероструктурах. Фотоприемники на квантовых ямах. Фотодиоды на системе квантовых ям. Устройства и приборы нанофотоники. Фотонные кристаллы. Искусственные опалы. Волоконная оптика. Оптические переключатели и фильтры. Магнитные наноустройства для записи и хранения информации. Наносенсоры.

Тимошенко Виктор Юрьевич

профессор, Физический факультет МГУ

Наноэлектроника

- Последняя треть XX века и начало XXI проходят под знаком все возрастающего влияния микроэлектроники на общество. Это связано с достижениями **вычислительной техники, информатики, средств связи** – областей техники, целиком базирующихся на **полупроводниковой микроэлектронике**.
- С начала 80-х годов, когда появились первые интегральные микросхемы, размеры транзисторов уменьшились с 1 мм до десятков нм. Сейчас освоена технология **90 нм** и **65 нм**, когда на одном кристалле располагаются порядка **10^9 транзисторов**. Начали производиться устройства с размером элементов **45 нм**. Ожидается уменьшение отдельных элементов до **32** и даже до **22 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.

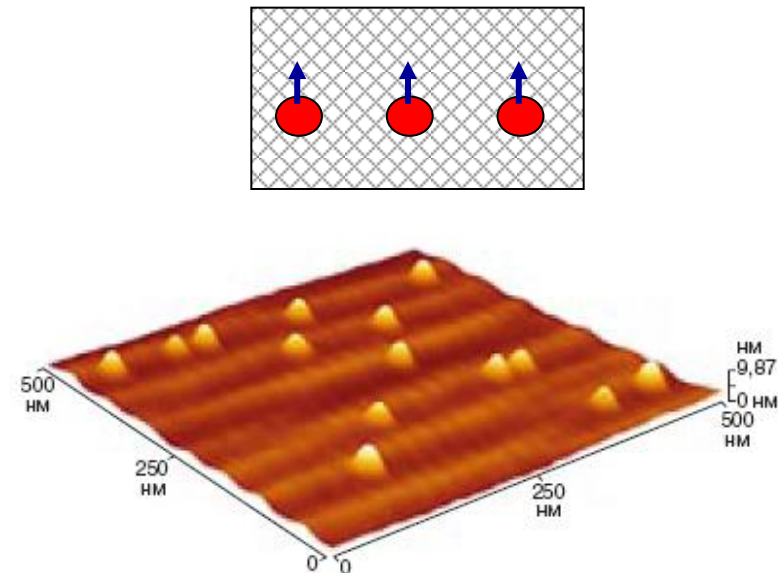
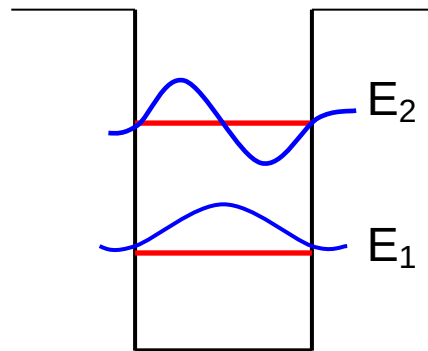
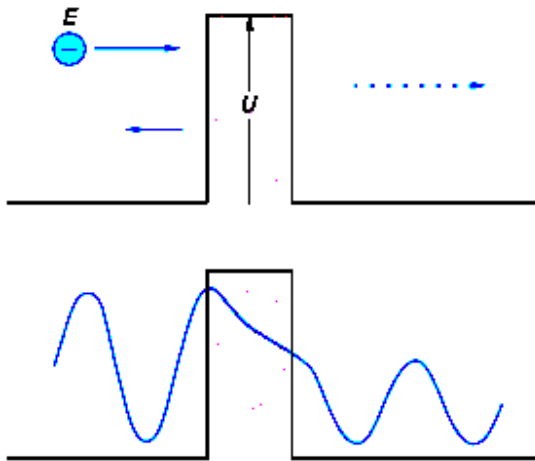


20 нм ?

Устройства наноэлектроники

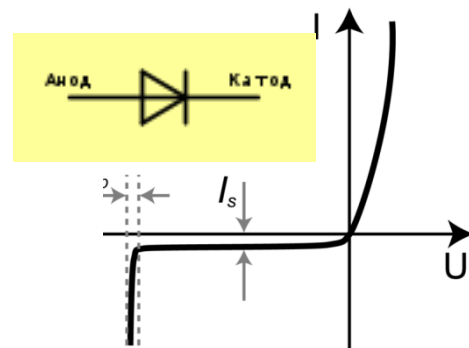
В настоящее время наноэлектроника – это использование нанотехнологий в микроэлектронике для создания новых устройств и улучшения характеристик уже существующих.

Устройства наноэлектроники базируются на физических эффектах в наноструктурах и наноматериалах, таких как **туннелирование**, **квантовый размерный эффект**, **управления спином** частиц, а также **одночастичные** и **коллективные эффекты** в ансамблях наночастиц.

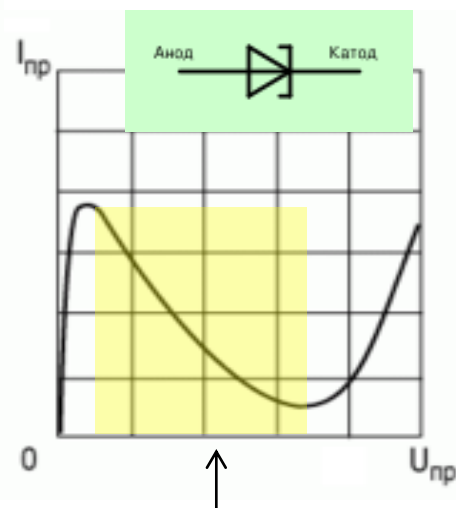
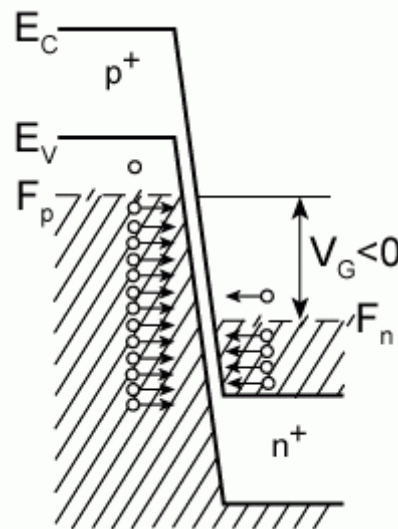


Туннельный диод

Полупроводниковый диод - прибор, использующий свойство односторонней проводимости р-п перехода — контакта между полупроводниками с разным типом примесной проводимости, либо между полупроводником и металлом (диод Шоттки).



Туннельный диод - диод, использующий квантовомеханический эффект туннелирования. Имеет область «отрицательного сопротивления» на вольт-амперной характеристике. Применяется в усилителях, генераторах и т.п. Был изобретен **Лео Эсаки** в **1959 г.** (Нобелевская премия 1973 г.)



Наибольшее распространение на практике получили туннельные диоды из Ge и GaAs, которые используются как генераторы и высокочастотные переключатели на частотах от 30 до 100 ГГц.

$$R = \frac{dV}{dI} < 0$$

Одноэлектроника

Раздел нанoeлектроники, занимающийся управлением токопереноса с точностью до одного электрона.

$$q = |e| = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Д.А. Аверин и К.К. Лихарев (1986):
Одноэлектронное туннелирование при кулоновской блокаде

$$V_{KB} = \frac{e}{2C}$$

$$\Delta E = V_{KB} e = \frac{e^2}{2C}$$

$$E = \frac{Q^2}{2C}$$

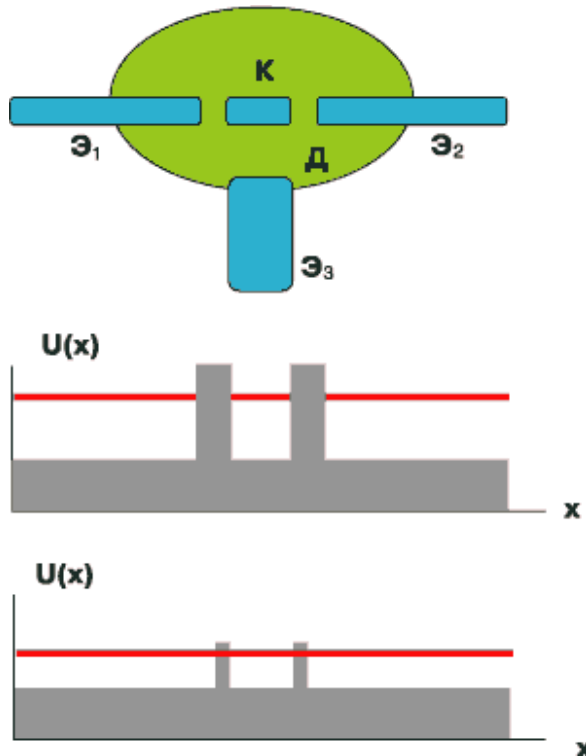
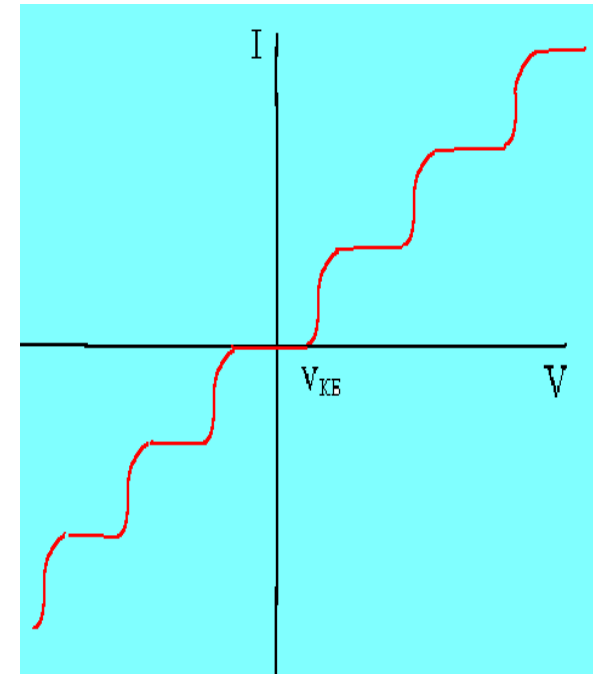


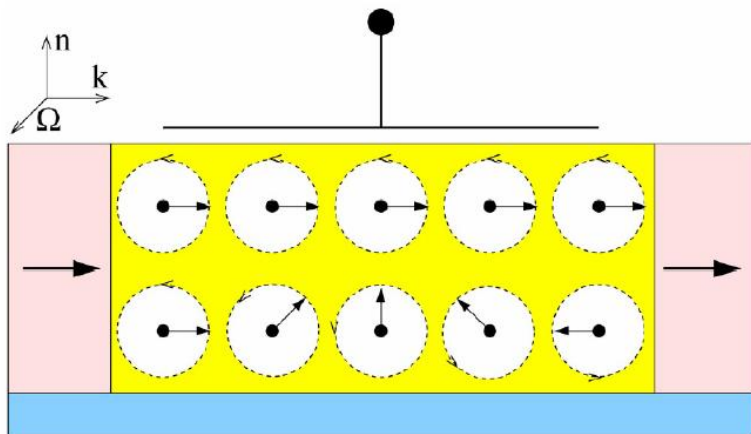
Схема работы
одноэлектронного транзистора

Напряжение преодоления кулоновской блокады (невозможности туннелирования электронов вследствие их отталкивания)

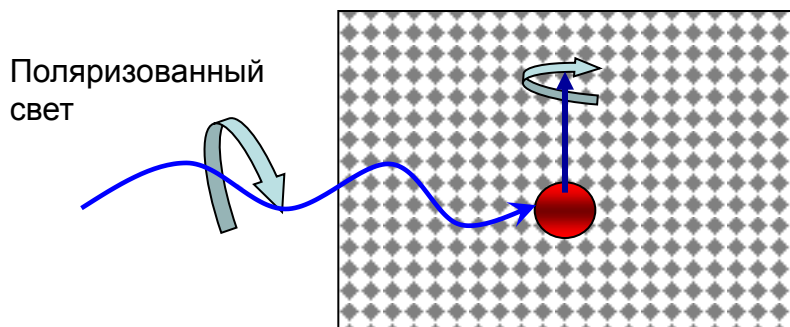
Энергопотребление $3 \cdot 10^{-8}$ Вт
Время срабатывания 10^{-14} с

Принципы спинтроники

Управление движением электронов с учетом направления их спинов



Полевой спиновый транзистор

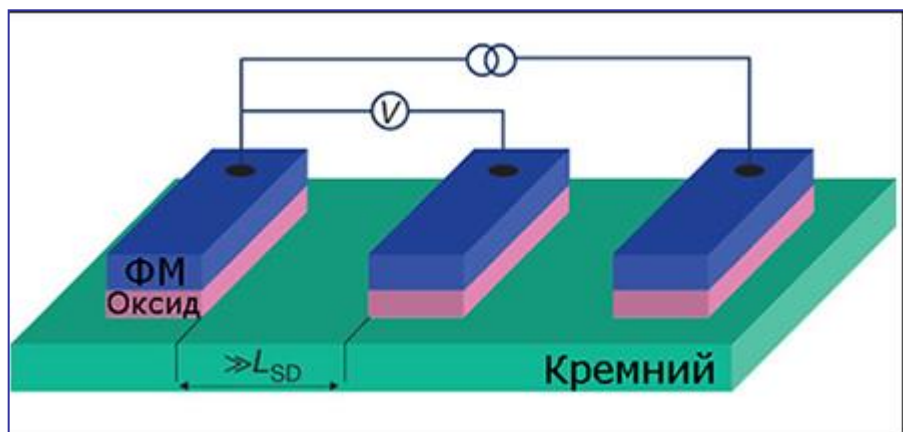


Оптическая ориентация спинов

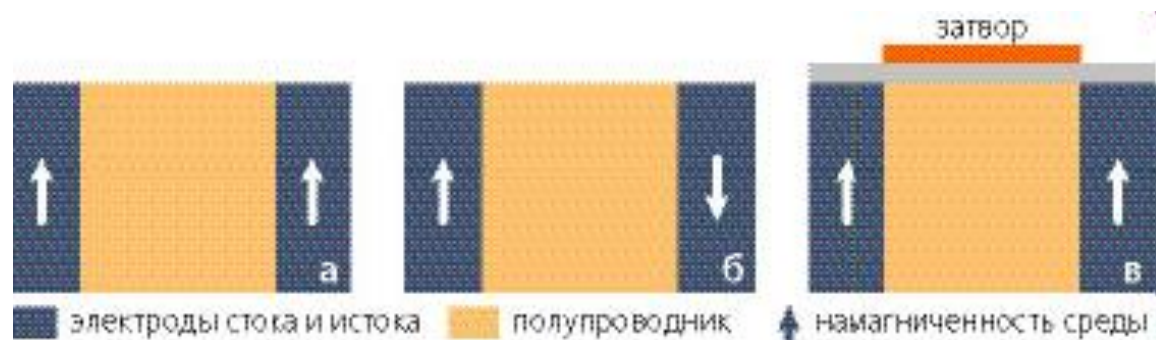
В наноструктурах эффекты, связанные со спином частиц усиливаются ввиду уменьшения вклада процессов спиновой релаксации

Спинтроника

Раздел квантовой электроники и область нанотехнологий по изучению спинового токопереноса и созданию нанoeлектронных спиновых устройств.

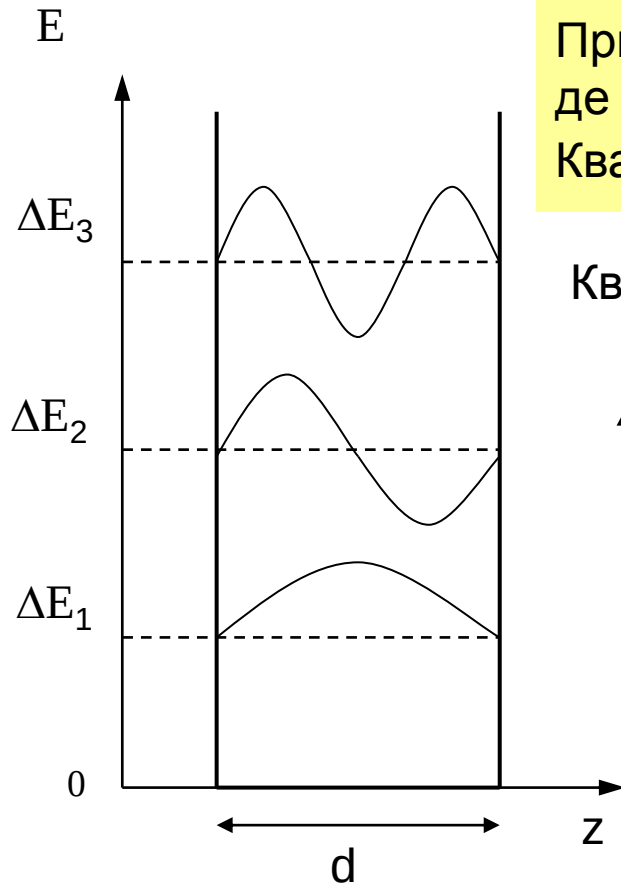


ФМ - ферромагнетик



Спиновые нанотранзисторы

Квантовый размерный эффект для электронов в потенциальной яме



При отражении от стенок ямы возникают стоячие волны де Бройля электронов и дырок.

Квазиимпульс частиц квантуется в направлении z .

Квантово-размерная добавка к энергии электрона:

$$\Delta E_{en} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e^* d^2} n^2, \quad \Delta E_{eh} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_h d^2} n^2$$
$$n = 1, 2, 3, \dots$$

Ширина запрещенной зоны возрастает:

$$E_g = E_{g0} + \Delta E_{e1} + \Delta E_{h1} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_r^* d^2}$$

$$E_g \propto \frac{1}{d^2}$$

$$m_r^{-1} = m_e^{-1} + m_h^{-1}$$

Уменьшение размера наноструктуры (ширины квантовой ямы) увеличивает энергию носителей заряда, а значит, ширина запрещенной зоны полупроводника увеличивается.

Квантовые ямы в полупроводниковых гетероструктурах

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

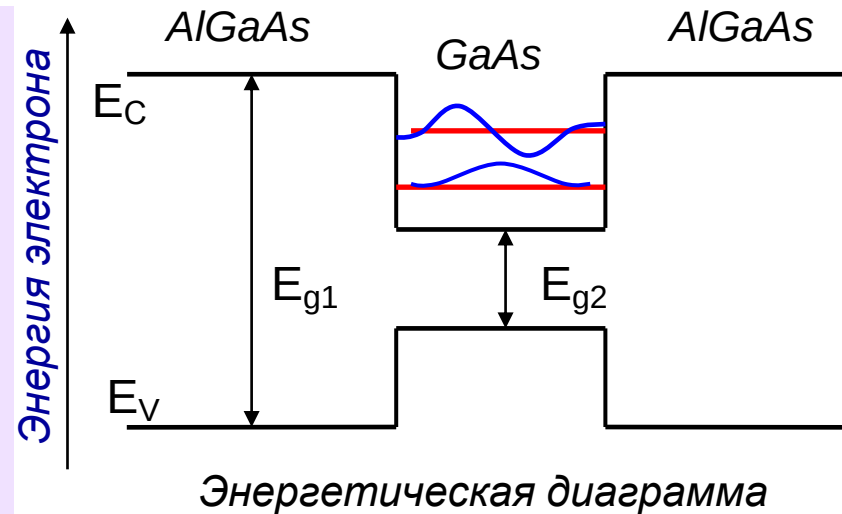
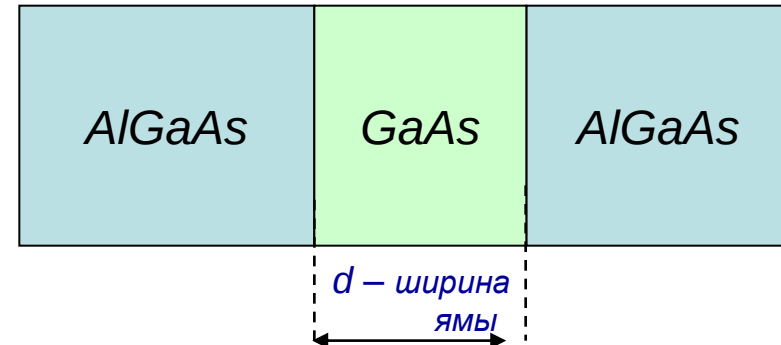
Запрещенная зона — энергетический зазор между заполненными и незаполненными разрешенными энергетическими зонами в твердом теле.

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).

Фотоника и нанофотоника

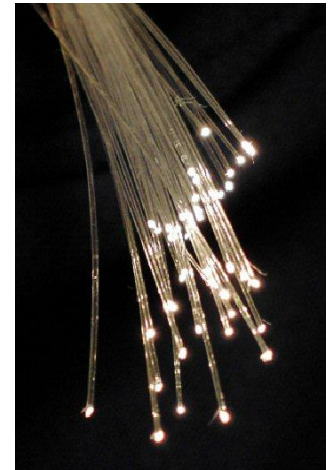
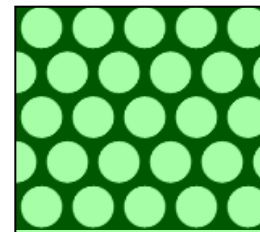
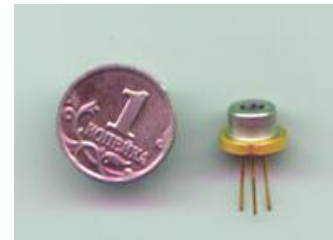
Фотоника может быть определена как область физики и технологии, связанная с излучением, поглощением, детектированием, распространением света и управлением светом (фотонами).

Общепринятого определения термина "Фотоника" не существует !

*Фотоника как область науки началась в 1960 с изобретением **лазера**, а также с изобретения **лазерного диода** в 1970-х с последующим развитием **оптоволоконных систем связи** как средств передачи информации, использующих световые методы.*

Некоторые основные элементы и устройства фотоники:

- лазер
- светодиод
- оптоволокно
- фотонный кристалл
- оптический усилитель и т.п.



Нанофотоника является разделом фотоники, в котором исследуются явления со считанным количеством фотонов и исследуются поведение света на нанометровой шкале, в том числе при взаимодействии с наночастицами и наноструктурами.

Светодиоды

Светодиод или **светоизлучающий диод** (**LED** - *Light-emitting diode*) — полупроводниковый прибор, излучающий некогерентный свет при пропускании через него электрического тока (**электролюминесценция**).

Хорошими электролюминесцирующими материалами являются, как правило, **прямозонные полупроводники** типа AIII BV (например, GaAs или InP) и AII BVI (например, ZnSe или CdTe). Варьируя состав полупроводников, можно создавать светодиоды для всевозможных длин волн от ультрафиолета (GaN) до среднего инфракрасного диапазона (PbS).



Впервые явление электролюминесценции наблюдал в **1907 г.** Генри Джозеф Раунд (Лаборатории Маркони). Явление было обнаружено в кристаллах SiC, которые пытались использовать в качестве выпрямителей. В **1928 г.** Олег Владимирович Лосев из Н.Новгорода опубликовал результаты исследования электролюминесценции SiC, которую предложил использовать в световых реле.



Сейчас активно создаются и уже выпускаются органические светодиоды (OLED), которые эффективно излучают свет при пропускании через них электрического тока. Основное применение - создание устройств освещения и отображения информации.



Как работает светодиод

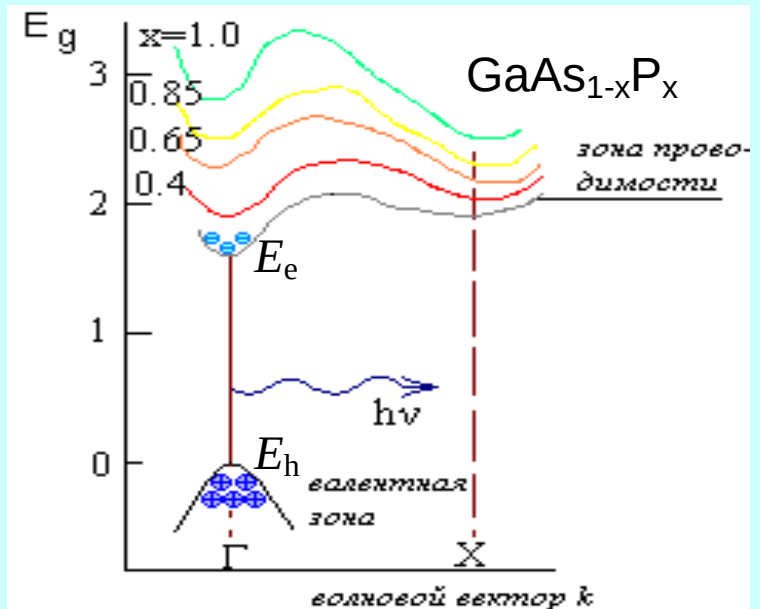
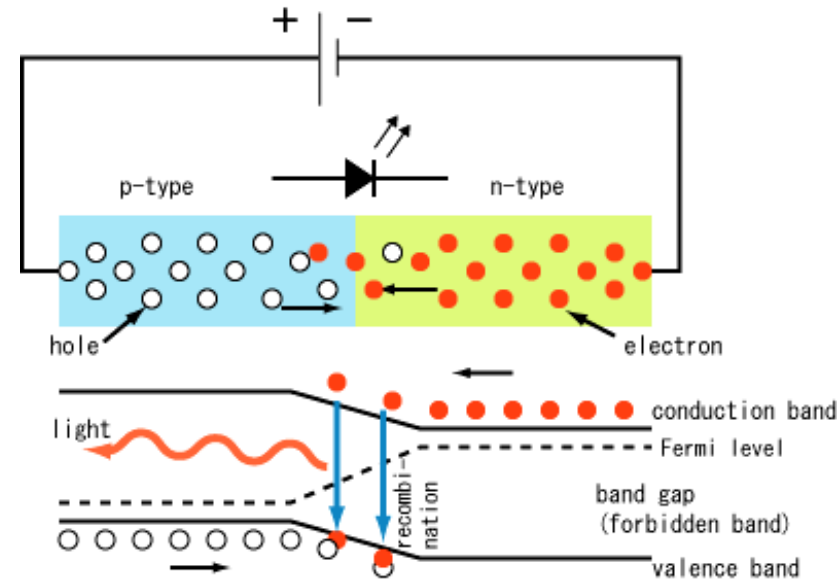
Полупроводниковый светодиод

работает при пропускании электрического тока через контакт 2-х полупроводников (p - n переход или гетеропереход), что приводит к **инжекции** (впрыскиванию) неравновесных (возбужденных) носителей заряда (электронов и дырок), излучательная рекомбинация которых приводит к **электролюминесценции**.

Спектр свечения определяется шириной запрещенной зоны полупроводника, в котором происходит излучательная рекомбинация инжектированных носителей заряда:

$$h\nu = E_e - E_h \approx E_g$$

E_g можно изменять, меняя состав полупроводника, а также используя квантовый размерный эффект.



Лазеры – квантовые генераторы света

Лазер (LASER - light amplification by stimulated emission of radiation) устройство для генерации когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона (обычно $\lambda = 100 \text{ нм} - 100 \text{ мкм}$).

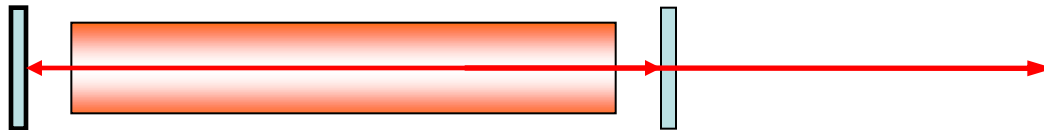
Мазер – устройство для генерации когерентного микроволнового излучения. Мазеры были изобретены А.М.Прохоровым, Н.Г.Басовым и Ч.Таунсом (Нобелевская премия 1964 г.).

Когерентность (от лат. cohaerens — "находящийся в связи") — скоррелированность (согласованность) нескольких колебательных или волновых процессов во времени, проявляющаяся при их сложении. Колебания когерентны, если их частоты равны, а разность их фаз постоянна во времени.

Лазеры и мазеры – **квантовые приборы**, поскольку используют квантовый **эффект вынужденного оптического излучения**, предложенный А.Эйнштейном.



Лазер = активная оптическая среда + резонатор для излучения.

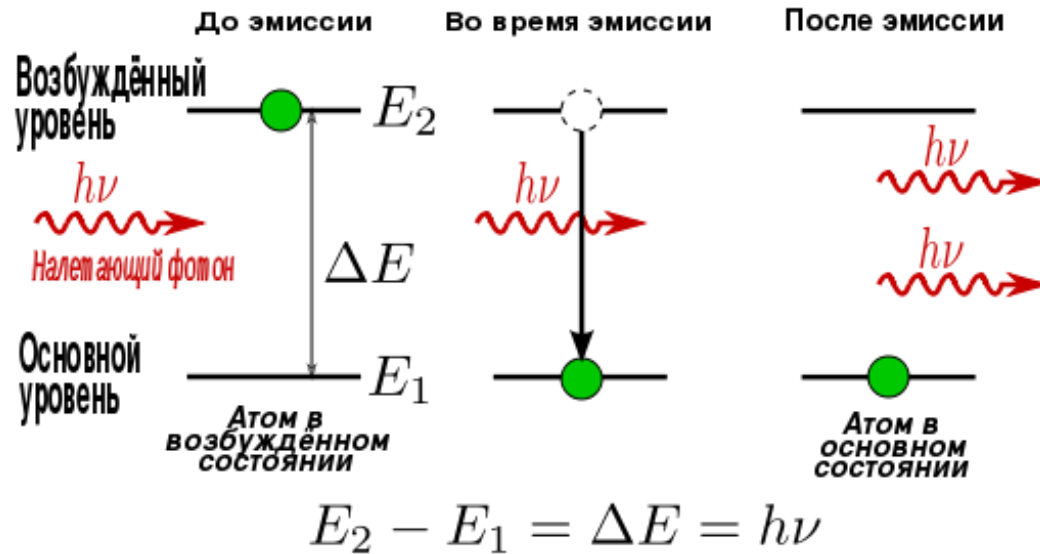


По типу **активных сред** лазеры подразделяются на **газовые** (на полностью или частично ионизованных газах и парах), **твердотельные** (диэлектрические, полупроводниковые), **жидкостные** (химические, лазеры на красителях), **на свободных электронах** и т.п. Известны лазеры на динамической плазме, например, **рентгеновские** $\lambda \sim 10 \text{ нм}$ (разеры). Разрабатываются **γ -лазеры** (газеры).

Вынужденное испускание света

Вынужденное излучение (индуцированное излучение) — генерация нового фотона при переходе квантовой системы (атома, молекулы и т.п.) из возбуждённого в основное стабильное состояние (низший энергетический уровень) под воздействием индуцирующего фотона, энергия которого равна разности энергий уровней. Созданный фотон имеет те же энергию, импульс, фазу и поляризацию, что и индуцирующий фотон (который при этом не поглощается). Оба фотона являются когерентными.

$$E_{\text{фотона}} = h\nu$$



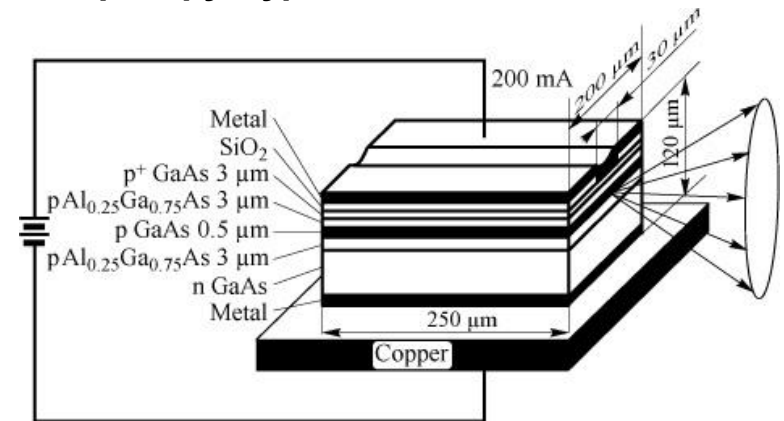
Явление вынужденного испускания света используется в лазерах и оптических усилителях. Для реализации положительного эффекта вынужденного излучения необходима инверсия населенностей состояний в активной среде, т.е. перевод большей части активных центров (атомов, молекул, ионов, электронов и т.п.) в возбужденное (верхнее) состояние. Инверсия населенностей создается возбуждением (накачкой) светом, электрическим током, химической или ядерной реакцией и т.п.

Полупроводниковые лазеры

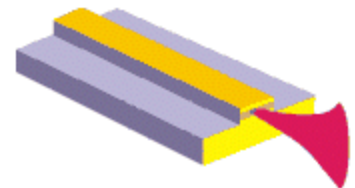
В **полупроводниковом лазере (лазерном диоде)** используется явление вынужденных оптических переходов, что дает усиление сигнала электролюминесценции при отражении от стенок резонатора, образованного специально подготовленными боковыми гранями.

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

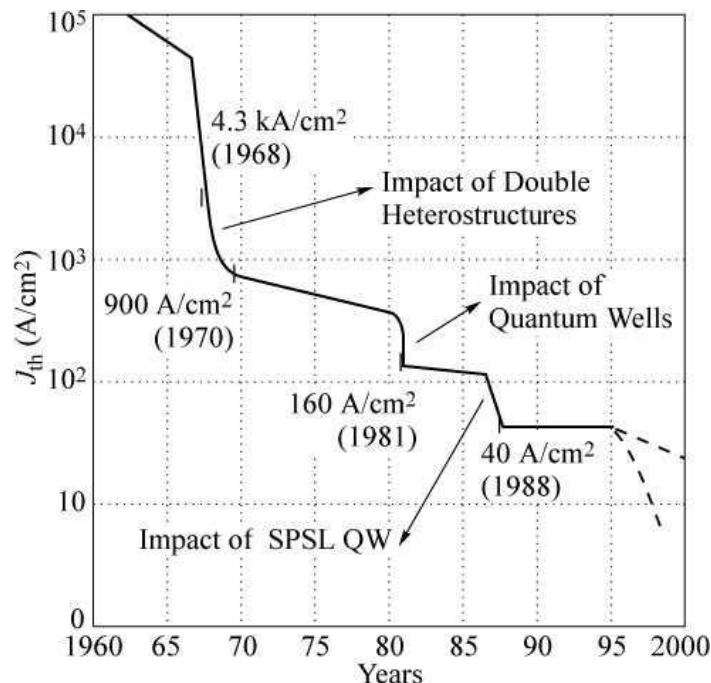
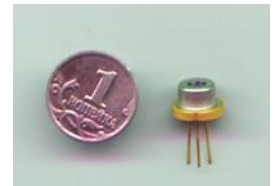
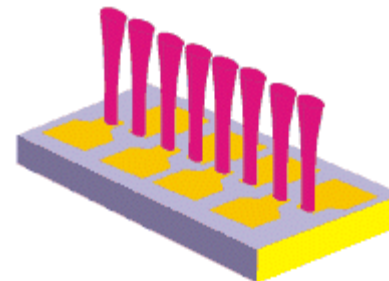
Полупроводниковые лазеры на гетероструктурах



Полосковые лазеры



Вертикальные лазеры:

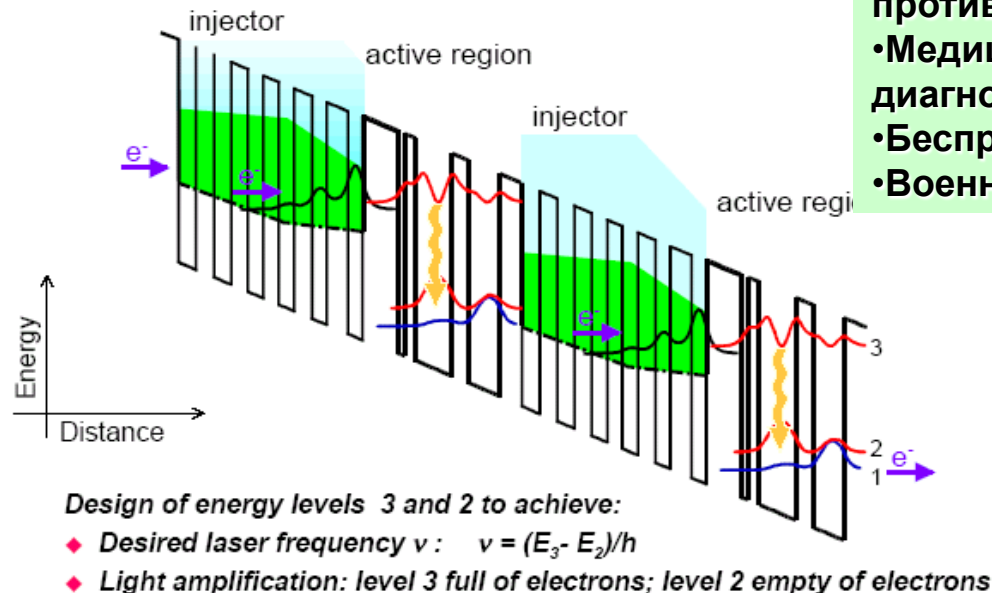


КВАНТОВЫЕ КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ

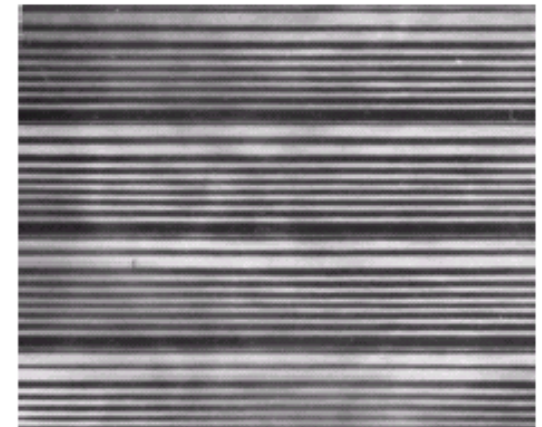
Новый тип лазеров, где генерация обусловлена переходами электронов между уровнями размерного квантования.

- 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)

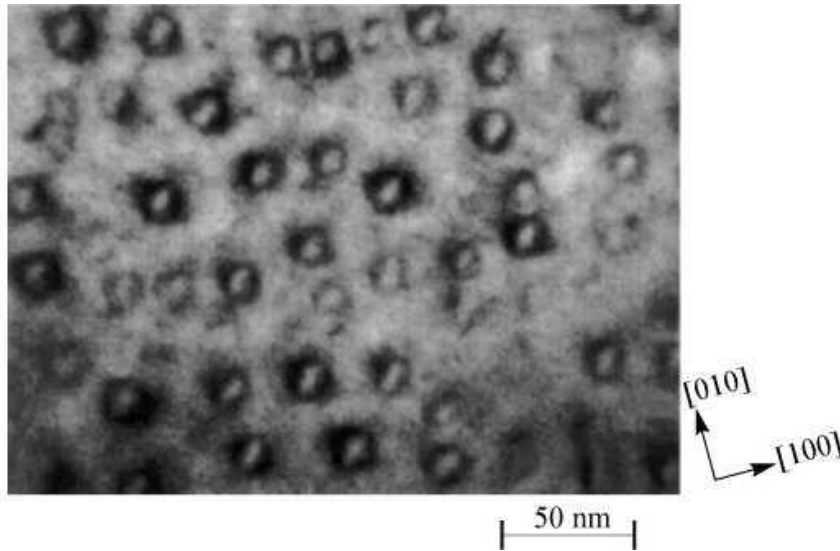
- Анализ окружающей среды
- Контроль промышленных процессов
- Транспорт - контроль сгорания топлива, противостолкновительные локаторы
- Медицина - анализ дыхания, ранняя диагностика
- Беспроводная оптическая связь
- Военные применения



45 nm



Лазер на квантовых точках



Изображение в просвечивающем электронном микроскопе **саморганизованных квантовых точек** InAs на поверхности GaAs. Механизм роста Странского-Крастанова.

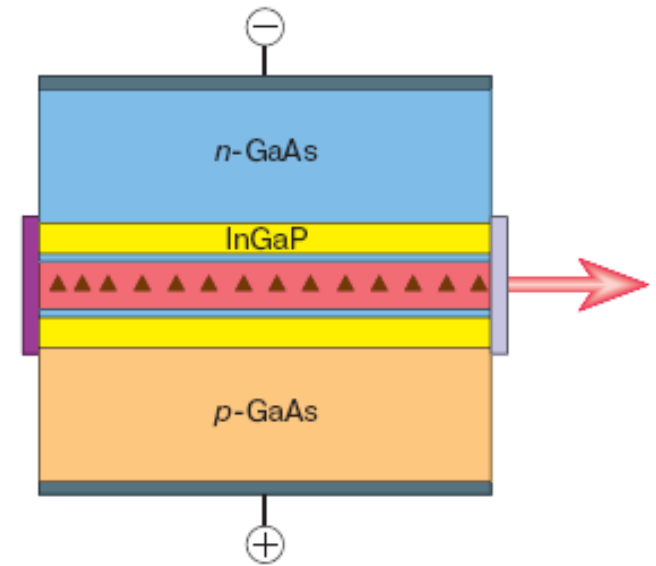
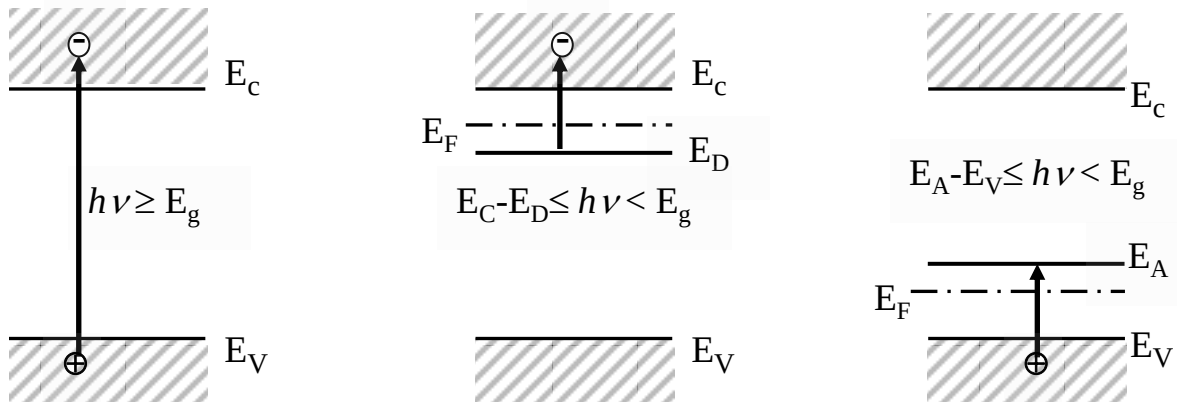


Схема **инжекционного лазера** на квантовых точках.

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

Полупроводниковые фотоприемники

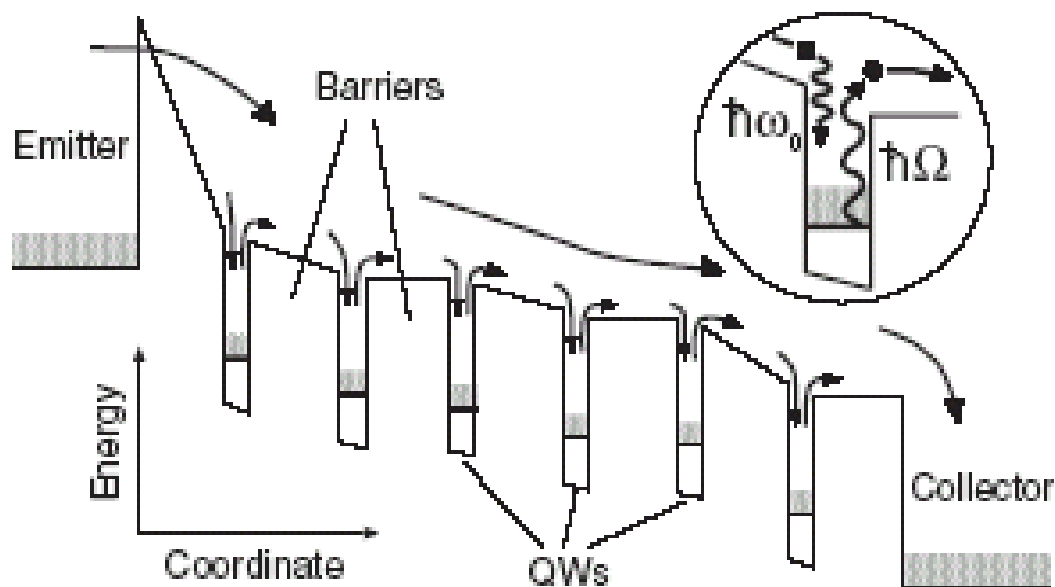
Спектральная чувствительность задается составом полупроводника, который определяет *ширину запрещенной зоны* E_g , и составом введенных примесей уровни примесей.



Возможны два случая фотогенерации (фотовозбуждения) свободных носителей заряда, а именно, биполярная, когда появляются носители обоих знаков (т.е. и электроны и дырки), и монополярная, при которой появляются либо электроны, либо дырки.

Фотоприемники на полупроводниковых наноструктурах с квантовыми ямами и точками

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



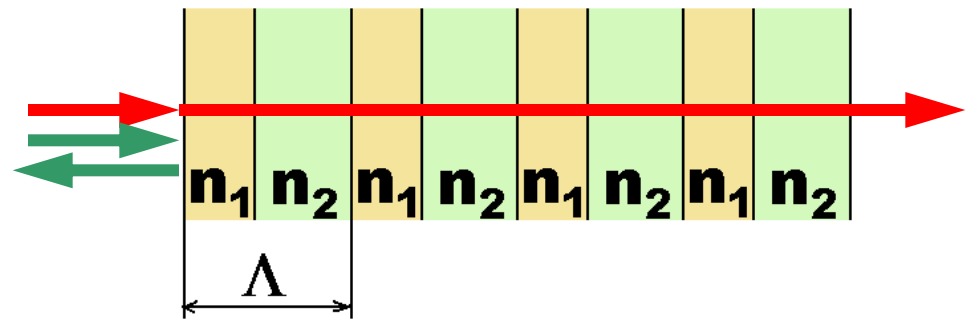
- Возможность перекрыть весь средний и дальний (вплоть до ТГц) ИК диапазон
- Высокая чувствительность
- Возможность изготовления многоэлементных и многозональных приемников

Фотонные кристаллы

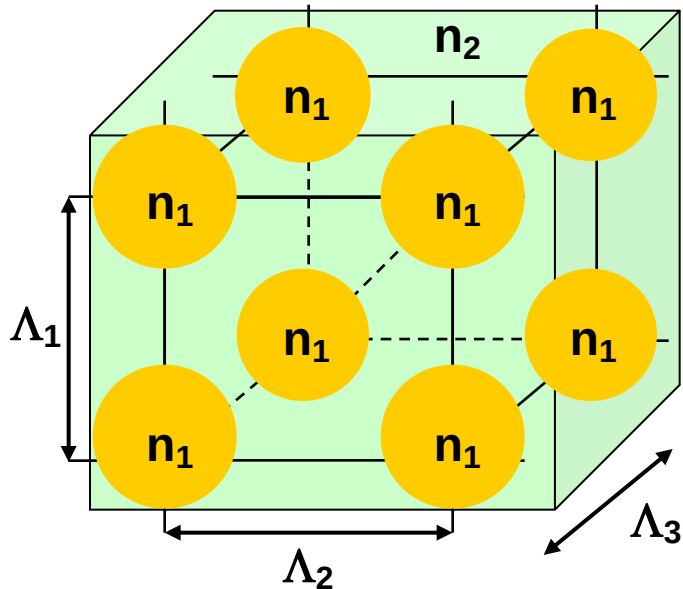
Фотонный кристалл - это материал, структура которого характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях .

Основное свойство фотонного кристалла – существование **фотонной запрещенной зоны** – области частот фотонов, которые не могут распространяться внутри фотонного кристалла.

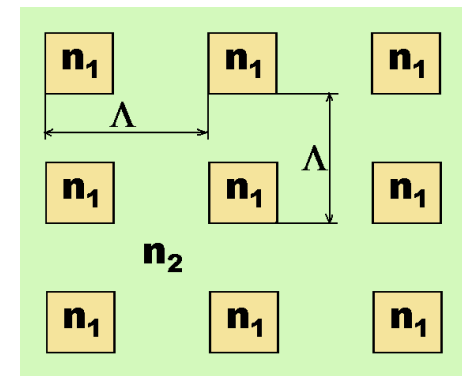
Одномерный фотонный кристалл



Трехмерный фотонный кристалл



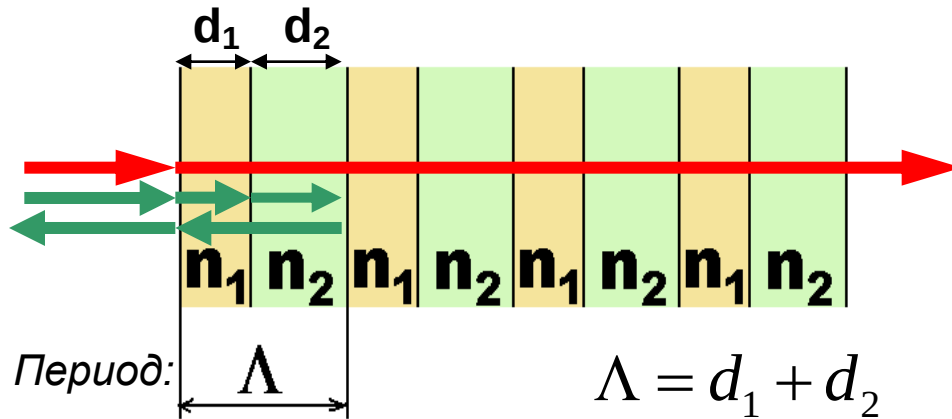
Двумерный фотонный кристалл



Как образуется фотонная запрещенная зона

Фотонная запрещенная зона образуется в результате интерференции световых волн, отраженных от областей с различными показателями преломления.

Одномерный фотонный кристалл :



Максимумы в спектре коэффициента отражения **R** и минимумы в пропускании **T** для длин волн, соответствующих серединам **фотонных запрещенных зон**:

$$\lambda_m = 2(n_1 d_1 + n_2 d_2) / m$$

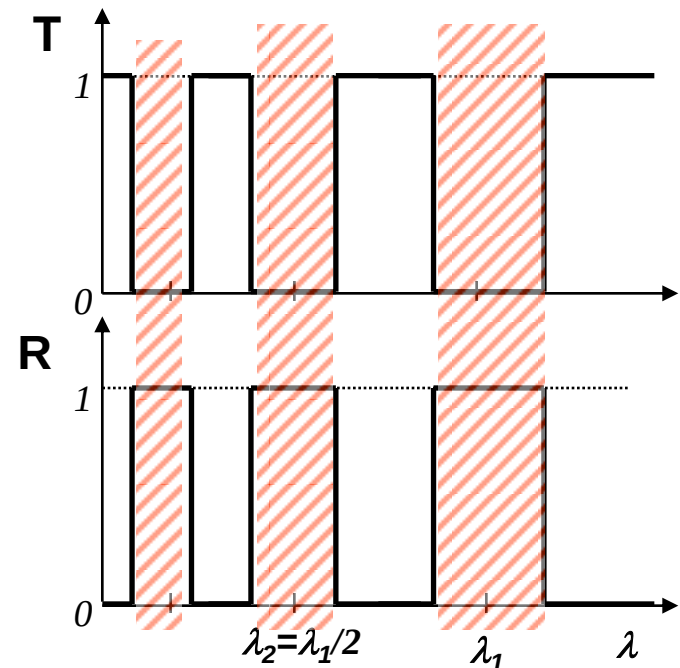
Практически важный частный случай для основной фотонной запрещенной зоны ($m = 1$) :

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_1 / 4$$

Интерференция волн, отраженных от пары слоев, будет конструктивной при выполнении условия Брэгга:

$$2(n_1 d_1 + n_2 d_2) = m \lambda_m$$

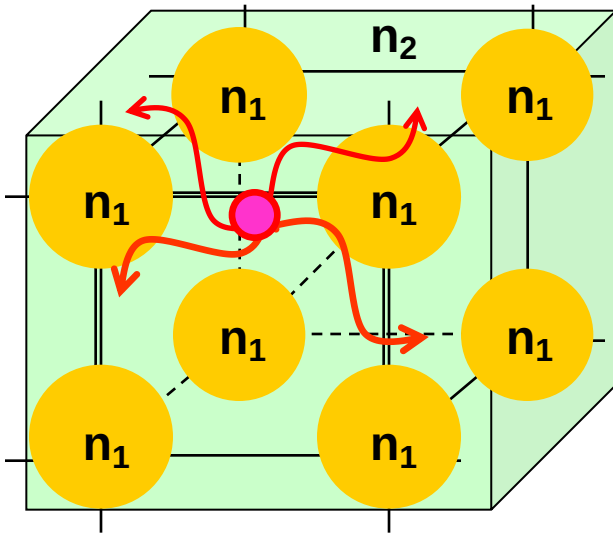
$$m = 1, 2, 3, \dots$$



Перспективы фотонных устройств

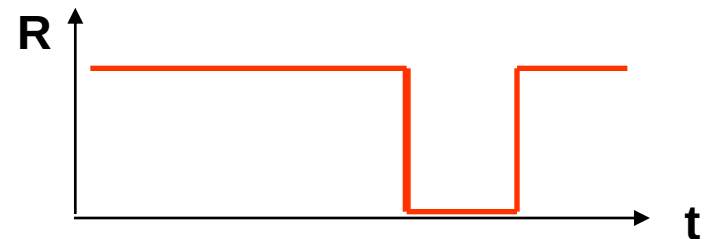
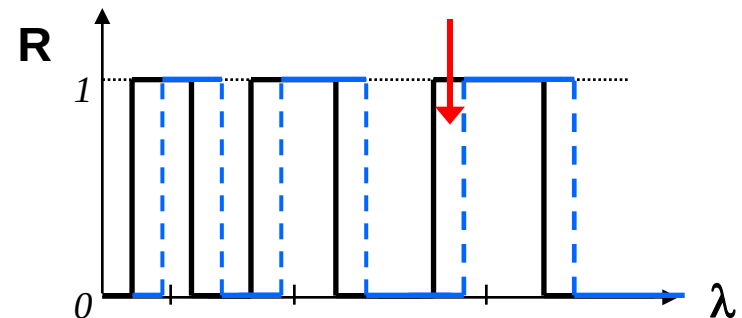
В 3D фотонных кристаллах возможно пленение излучения с длиной волны, соответствующей фотонной запрещенной зоне. Это нужно для создания *лазеров со сверхнизкими порогами генерации*.

Управляемые светом или электрическим полем фотонные кристаллы могут быть использованы как элементы *оптических усилителей, переключателей и транзисторов*, что дает возможность построить оптические устройства обработки информации.



Замедление времени жизни фотона τ_{rad}

Еще одно применение фотонных кристаллов связано с использованием *контролируемых законов дисперсии* для света вблизи края фотонной зоны, что дает возможность реализовать условия для эффективных волновых *нелинейно-оптических взаимодействий*.



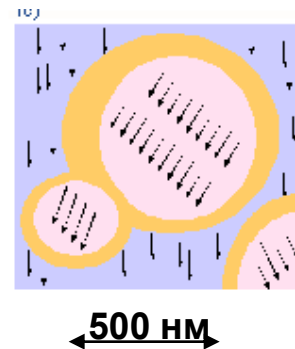
Магнитные наноустройства

В существующих устройствах магнитной записи информации уже сейчас активно используются нанотехнологии и наноматериалы.



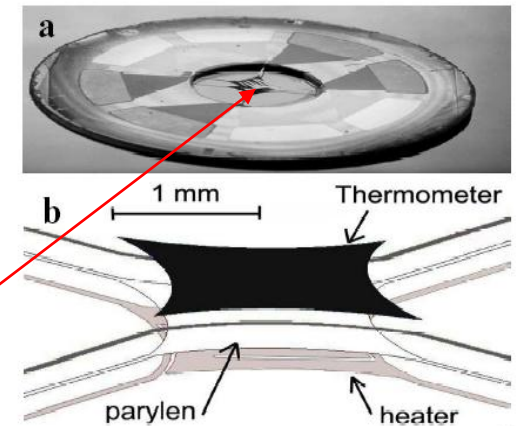
Устройство памяти на жестком магнитном диске. Стрелками показаны основные элементы, где используются магнитные наноматериалы.

Для записи информации в магнитных наноматериалах пока доминирует горизонтальный способ намагничивания.



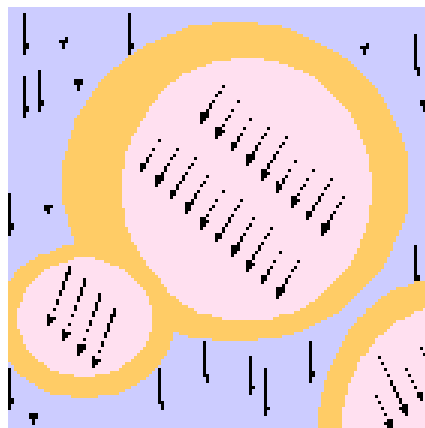
Большие перспективы открываются с **вертикальным способом намагничивания** для более плотной записи информации, а также с развитием новой сферы применения магнитных наноструктур – **спинтроники** и **магнитной сенсорики**.

Высококочувствительный миниатюрный термометр из NbN (сенсор) для диапазона температур 40 – 300 K:

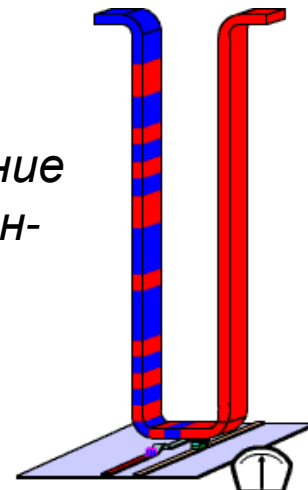


Наномагнетизм и устройства памяти и записи/считывания информации

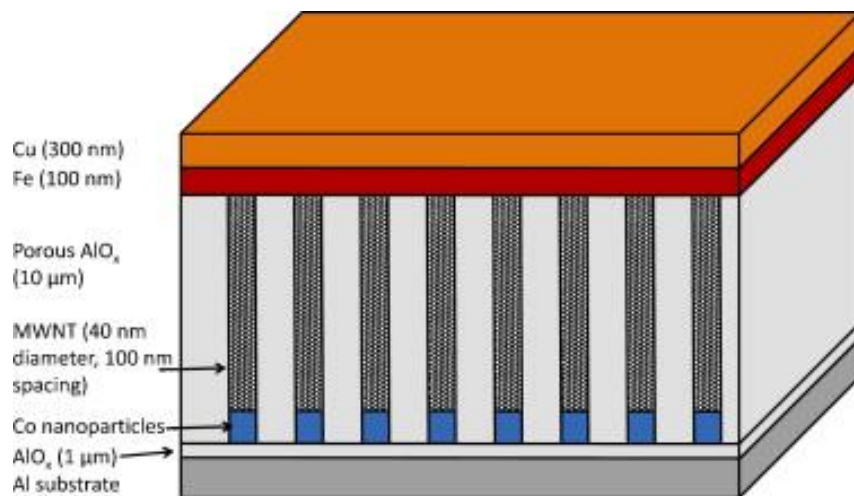
Для записи информации в магнитных наноматериалах пока доминирует горизонтальный способ намагничивания.



Магнитная запись/считывание информации спин-поляризованным током



Большие перспективы открываются с **вертикальным способом намагничивания** для более плотной записи информации, а также с развитием новой сферы применения магнитных наноструктур – **спинтроники**



Сенсорика и наносенсорика

Сенсор (датчик) - элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства системы, преобразующий детектируемую величину в удобный для использования сигнал.

Сенсорика – область знаний на стыке науки и техники, занимающаяся изучением принципов работы сенсоров и созданием новых сенсоров.

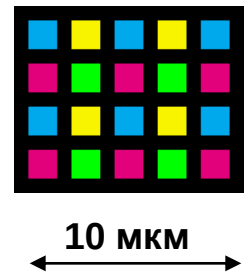
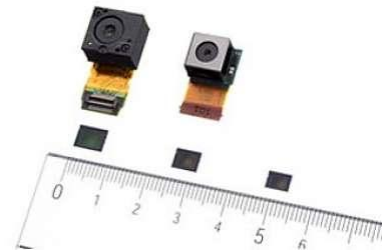
Газовые сенсоры



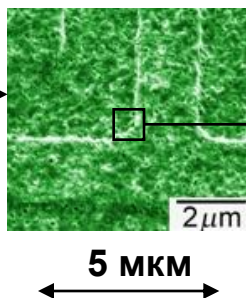
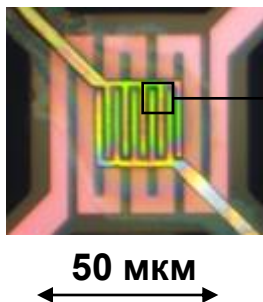
Сенсор давления



Сенсоры изображения



Газовый сенсор на основе нанопористого анилина



Наносенсорика занимается использованием нанообъектов и наноматериалов для создания сенсоров, в том числе, на нанокочичество и другие характеристики наносистем.

Химические сенсоры

Химические сенсоры – это устройства, с помощью которых можно получить информацию о химическом составе среды, в которую погружен датчик, без отбора анализируемой пробы и без специальной подготовки.

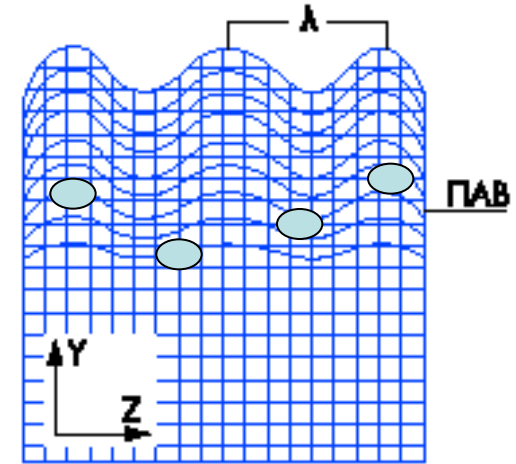
В зависимости от первичного отклика химические сенсоры подразделяют на следующие типы:

1. **Электрохимические** (потенциометрические, амперометрические, кулонометрические, кондуктометрические);
2. **Оптические** (спектрофотометрические, люминесцентные, оптотермические);
3. **Электрические** (полупроводники на основе оксидов металлов, полевые транзисторы, органические полупроводники);
4. **Термохимические**;
5. **Магнитные**;
6. **Сенсоры массы** (пьезоэлектрические, на поверхностных акустических волнах);
7. **Каталитические**;
8. **Биосенсоры**.

Химические сенсоры на ПАВ

Сенсоры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) используют изменение свойств волны после адсорбции молекул.

Используемые материалы: кварц, LiNbO_3 , LiTaO_3 , $(\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3)$, ZnO . Рабочие частоты $F=30 - 3000$ МГц.



Принцип работы ПАВ-сенсора: поверхностная акустическая волна несет свою энергию в тонком приповерхностном слое (толщиной 1-2 длины волны). Специально подобранное селективное покрытие адсорбирует газовые молекулы, и свойства распространяющихся ПАВ меняются.

Адсорбция молекул на чувствительном покрытии может приводить к изменению трех видов параметров:

1. Падение амплитуды волны за счет потери части энергии.
2. Изменение фазы приходящей волны за счет изменения ее скорости.
3. Изменение резонансной частоты всего устройства.

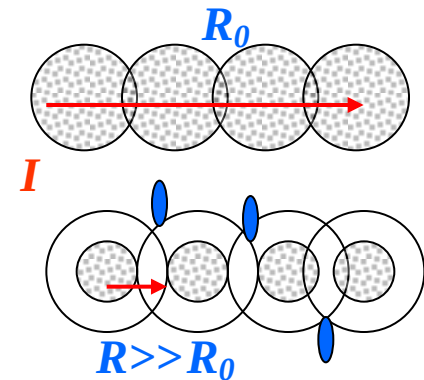
ПАВ сенсоры могут быть в сотни раз более чувствительны, чем пьезовесы (частоты ≤ 20 МГц). Кроме того, они могут быть много меньше по размеру.

В пьезорезонансных и ПАВ сенсорах -- применяются “нанопокрывтия” пленки Ленгмюра-Блоджетт.

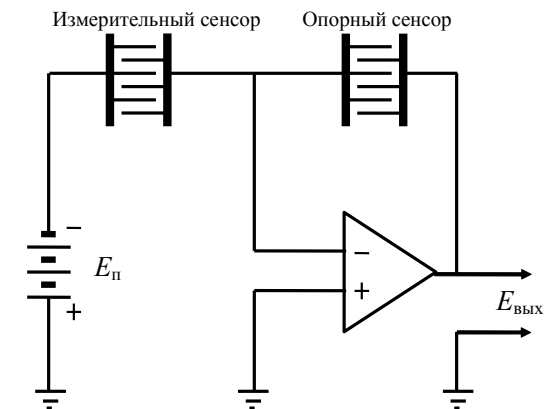
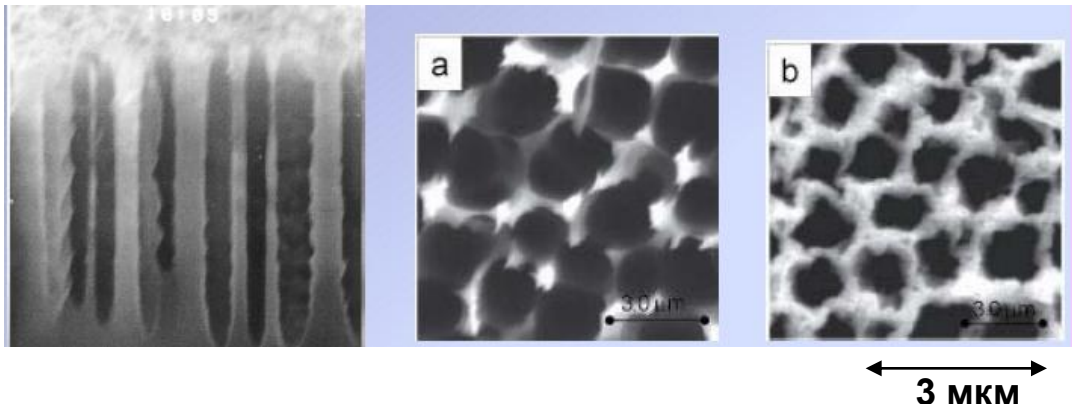
Хемирезисторы

В настоящее время основным типом **газовых сенсоров** с применением молекулярных систем являются так называемые **хемирезисторы**. Они создаются из полупроводниковых неорганических (металлооксидных SnO_2 , TiO_2 и др.) или органических пленок нанесенных на диэлектрическую подложку и снабжаемых контактами для измерения сопротивления пленки.

В качестве органических покрытий обычно используются фталоцианины различных металлов, например меди. Основное преимущество таких сенсоров перед очень распространенными твердотельными хемирезисторами на оксидных полупроводниках (так называемыми Тогучи-сенсорами) состоит в возможности работы при комнатной температуре, в то время как последние требуют повышенных температур.



Хемирезистор на основе пористого кремния с наночастицами SnO_2

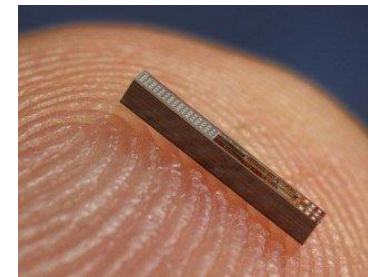


Наносенсоры и нанотехнологии

В **сенсорах давления** активно используются следующие детекторы: **пьезорезистивные, емкостные** и преобразователи на **туннелировании электронов**. Последние были признаны наиболее перспективными, позволяющими значительно снизить порог детектирования. Построение интегральной линейки сенсоров с туннельными преобразователями требует наличия многовходовой многоканальной схемы обработки сигнала, способной обрабатывать слабые туннельные токи.

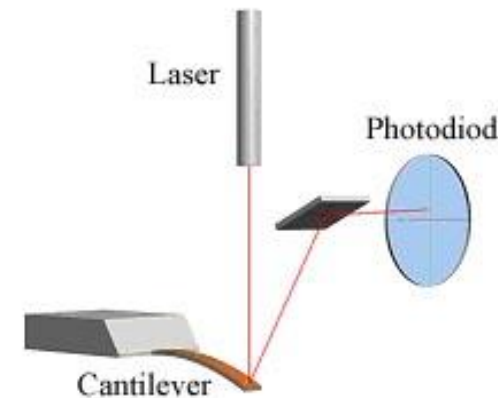
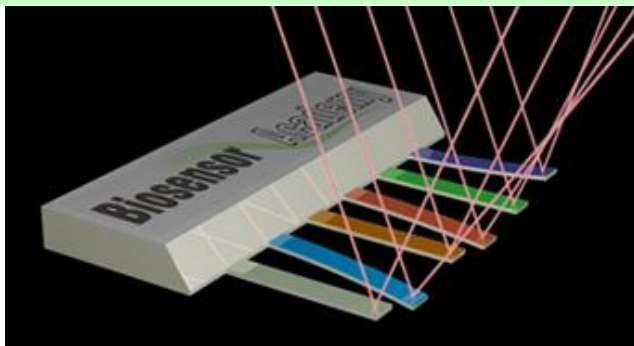


**сенсор давления
потока жидкости**



**Имплантируемый
сенсор давления
крови**

Новая тенденция – использование кантилевера (одного из основных элементов атомно-силовой микроскопа) в качестве сенсора на массу.



Сенсор на массу осажденных веществ может измерять массу микрообъектов до 10^{-19} г (масса вируса)

Контрольные вопросы к Лекции 4

1. Что такое туннельный диод?
2. Как устроены и для чего предназначены полупроводниковые гетероструктуры?
3. Что такое одноэлектроника?
4. Чем занимается спинтроника?
5. Как устроены и для чего предназначены фотонные кристаллы ?
6. Как можно записывать и считывать информацию в наномагнитных устройствах?
7. Какие примеры наносенсоров вы знаете?