

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

Межфакультетский курс лекций

«Фундаментальные основы нанотехнологий»

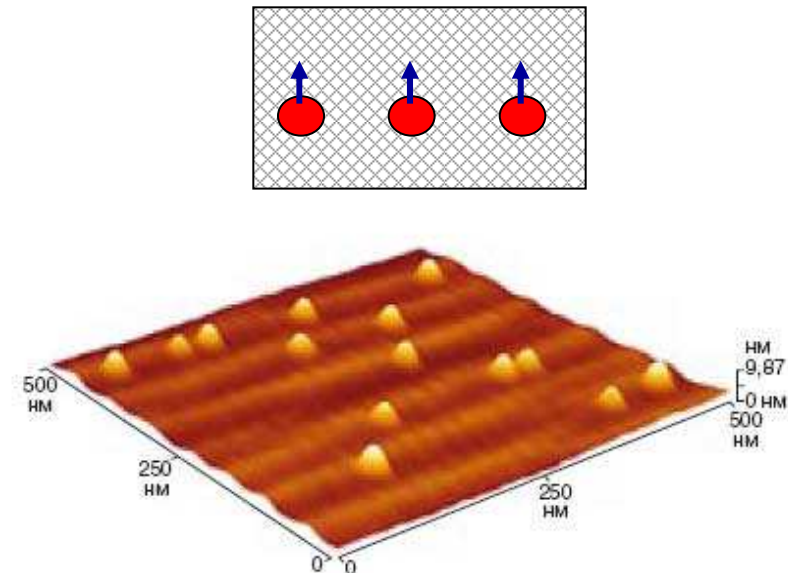
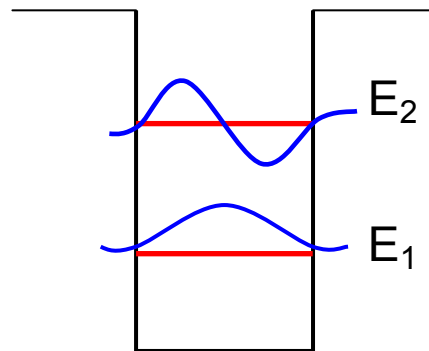
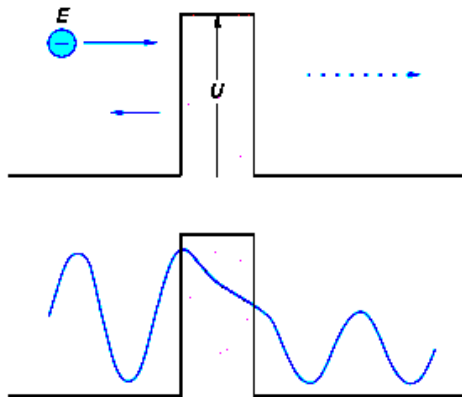
Лекция 12. Физика наноустройств. Устройства оптоэлектроники и наноэлектроники. Светодиоды и лазеры на двойных гетероструктурах. Фотоприемники на квантовых ямах. Лавинные фотодиоды на системе квантовых ям. Устройства и приборы нанофотоники. Фотонные кристаллы. Искусственные опалы. Волоконная оптика. Оптические переключатели и фильтры. Перспективы создания фотонных интегральных схем, устройств хранения и обработки информации. Магнитные наноустройства для записи и хранения информации. Наносенсоры.

Тимошенко Виктор Юрьевич
профессор, Физический факультет МГУ

Устройства наноэлектроники

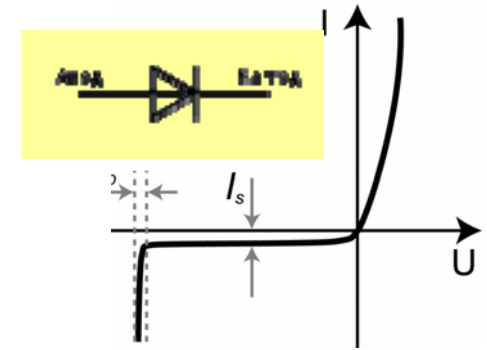
В настоящее время наноэлектроника – это использование нанотехнологий в микроэлектронике для создания новых устройств и улучшения характеристик уже существующих.

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.

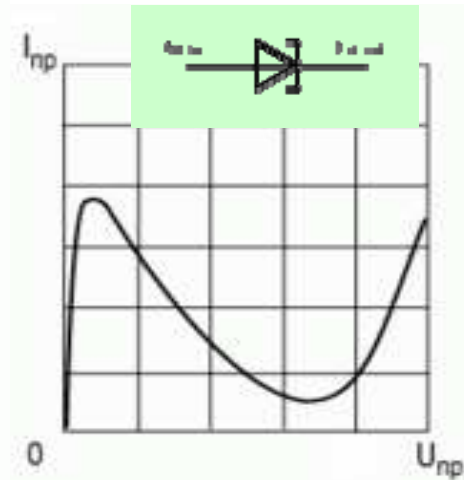
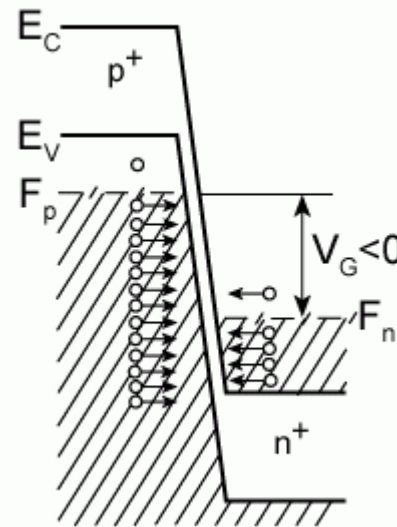


Туннельный диод

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).

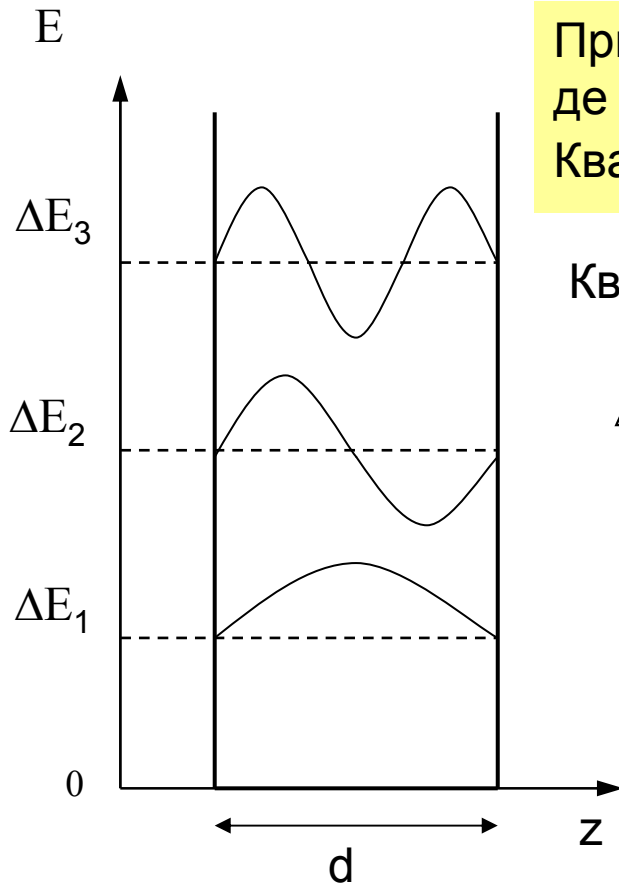


Туннельный диод - диод, использующий квантовомеханический эффект туннелирования. Имеет область «отрицательного сопротивления» на вольт-амперной характеристике. Применяется в усилителях, генераторах и т.п. Был изобретен Лео Эсаки в 1959 г. (Нобелевская премия 1973 г.)



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.

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).

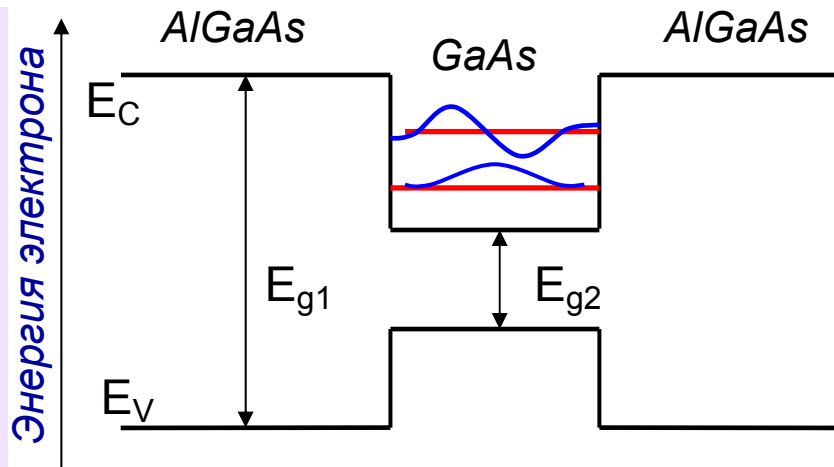
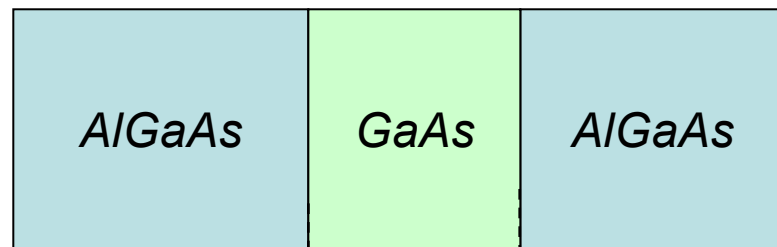
Запрещенная зона – энергетический зазор между заполненными и незаполненными разрешенными энергетическими зонами в твердом теле.

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:



Энергетическая диаграмма

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

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 исследований SiC в режиме электролюминесценции, 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

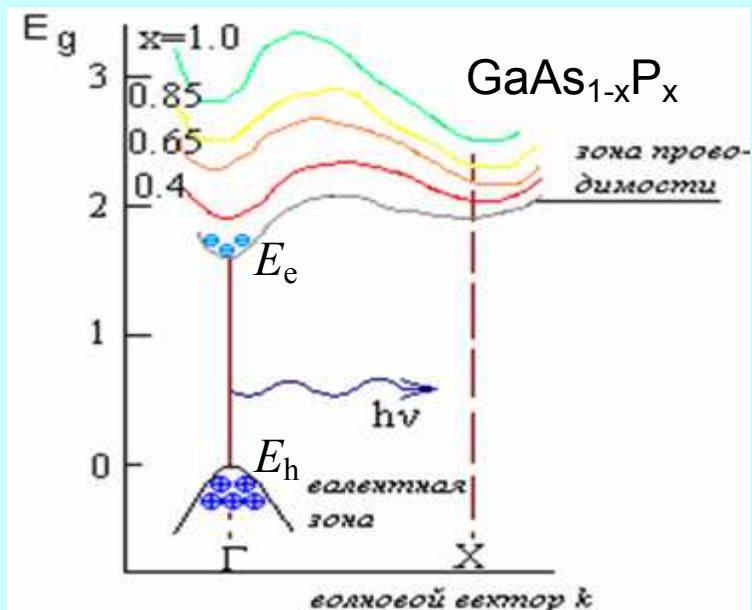
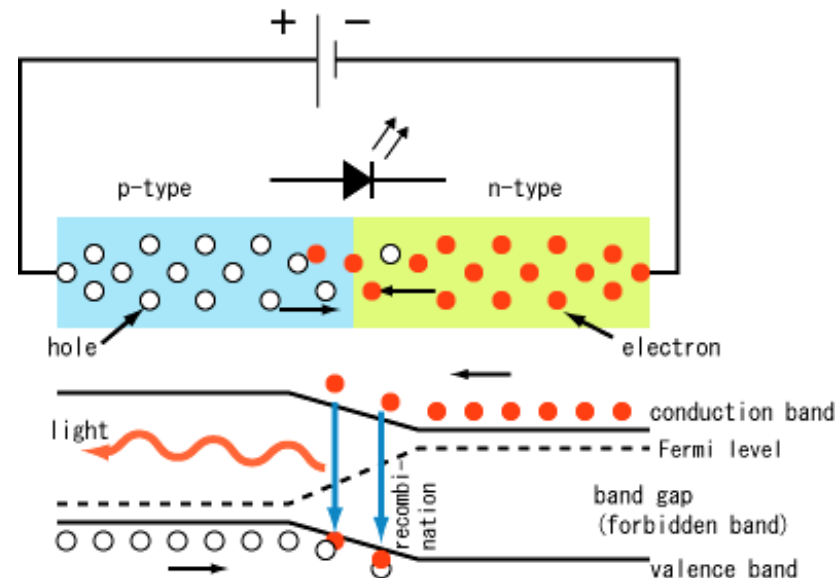
Полупроводниковый светодиод

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 $\lambda = 100$ нм - 100 мкм).

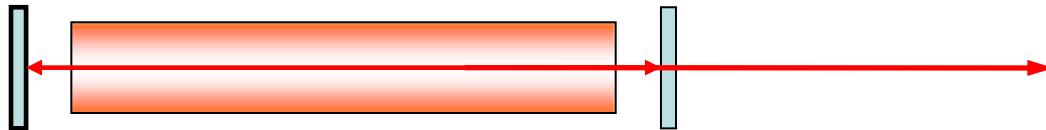
Мазер – устройство для генерации когерентного микроволнового излучения. Мазеры были изобретены А.М.Прохоровым, Н.Г.Басовым и Ч.Таунсом (Нобелевская премия 1964 г.).

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.

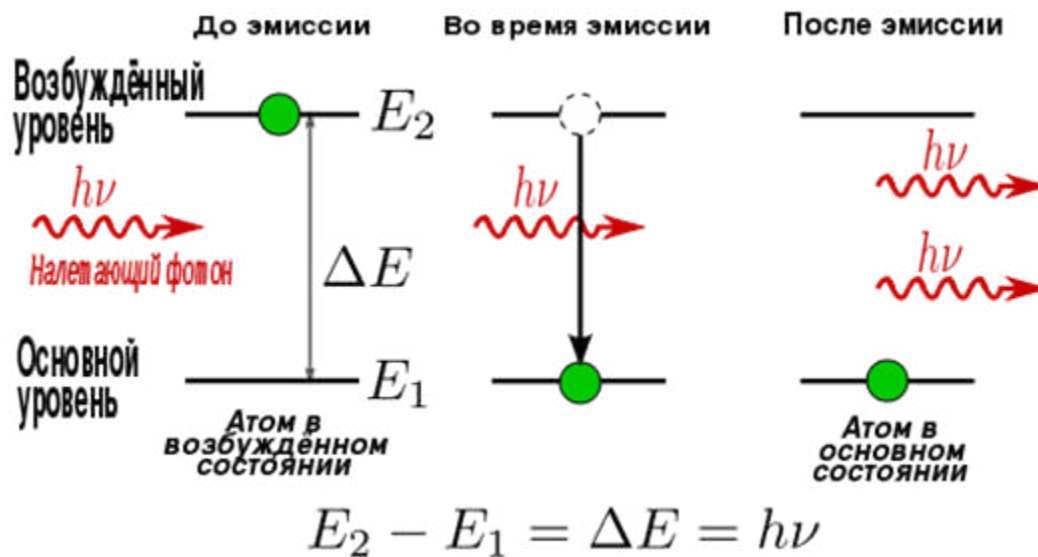


По типу **активных сред** лазеры подразделяются на **газовые** (на полностью или частично ионизованных газах и парах), **твердотельные** (диэлектрические, полупроводниковые), **жидкостные** (химические, лазеры на красителях), **на свободных электронах** и т.п. Известны лазеры на динамической плазме,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

$$E_{\text{фотона}} = h\nu$$



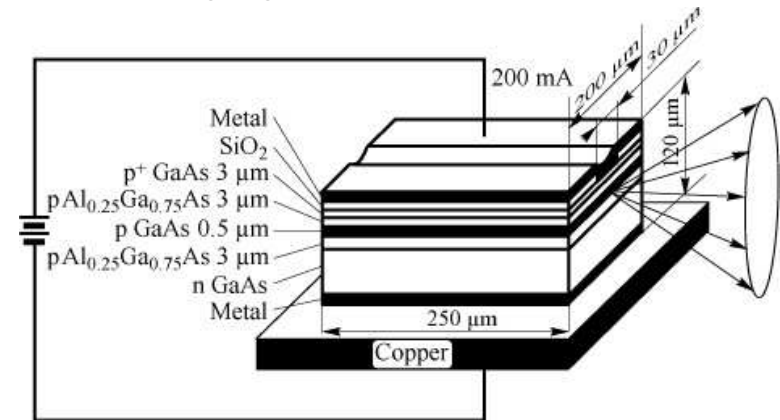
Явление вынужденного испускания света используется в лазерах и оптических усилителях. Для реализации положительного эффекта вынужденного излучения необходима инверсия населенностей состояний в активной среде, т.е. перевод большей части активных центров (атомов, молекул, ионов, электронов и т.п.) в возбужденное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

Полупроводниковые лазеры

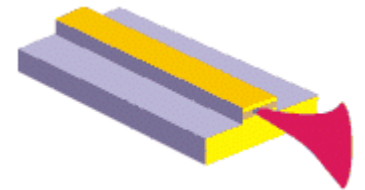
В полупроводниковом лазере (лазерном диоде) используется явление вынужденных оптических переходов, что дает усиление сигнала электролюминесценции при отражении от стенок резонатора, образованного специально подготовленными боковыми гранями.

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

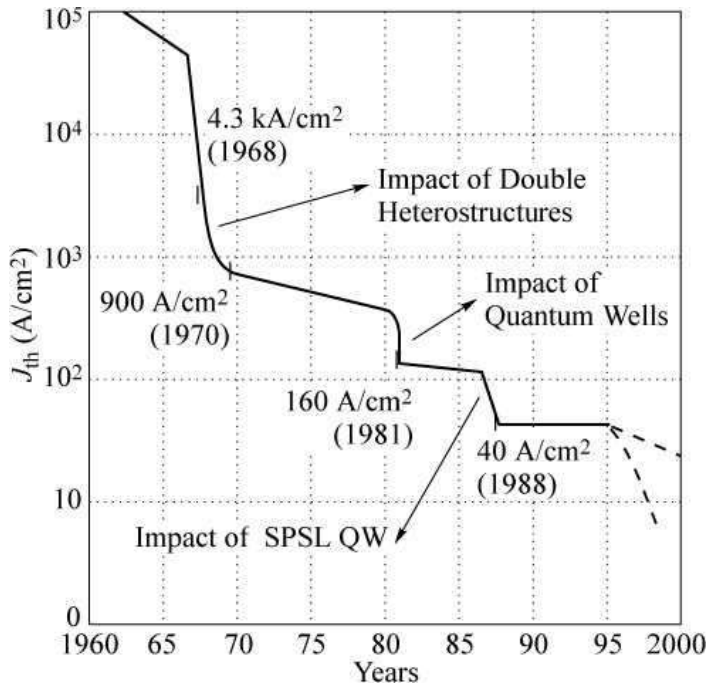
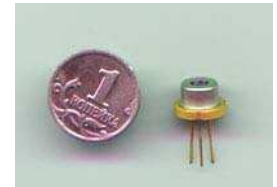
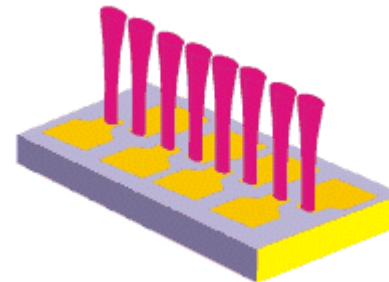
Полупроводниковые лазеры на гетероструктурах



Полосковые лазеры:



Вертикальные лазеры:

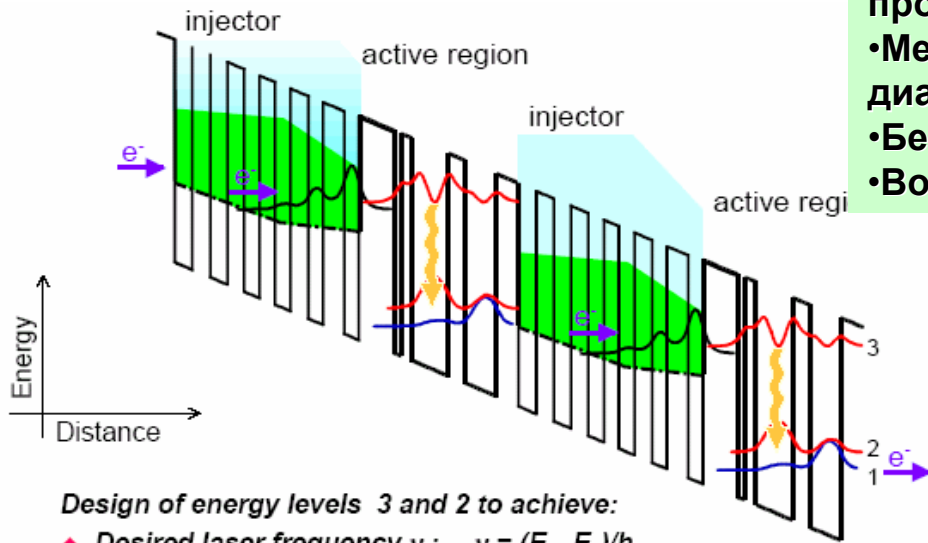


КВАНТОВЫЕ КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ

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 (≈ 1 мм)

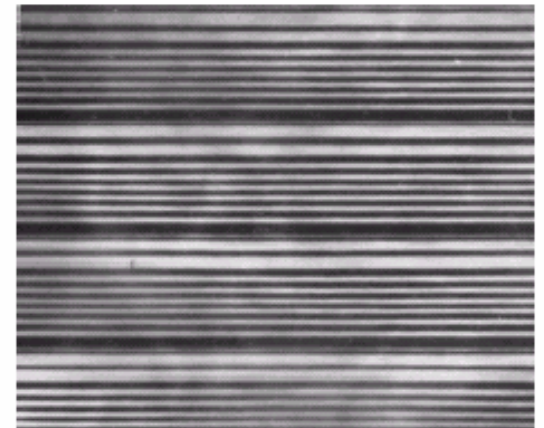
- Анализ окружающей среды
- Контроль промышленных процессов
- Транспорт - контроль сгорания топлива, противостолкновительные локаторы
- Медицина - анализ дыхания, ранняя диагностика
- Беспроводная оптическая связь
- Военные применения



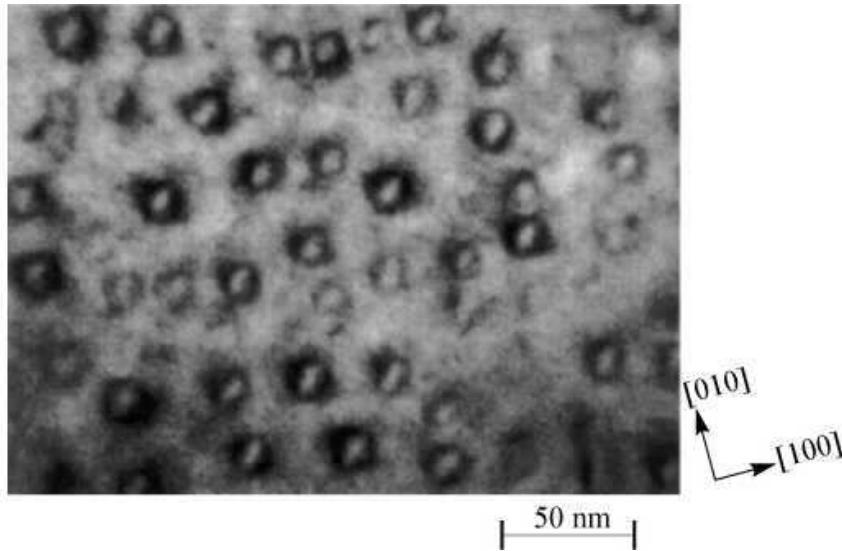
Design of energy levels 3 and 2 to achieve:

- ♦ Desired laser frequency ν : $\nu = (E_3 - E_2)/h$
- ♦ Light amplification: level 3 full of electrons; level 2 empty of electrons

45 nm



Лазер на квантовых точках



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

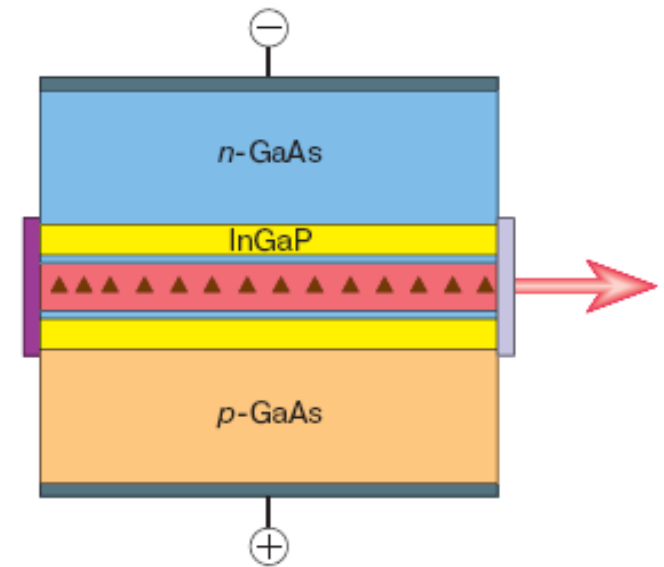
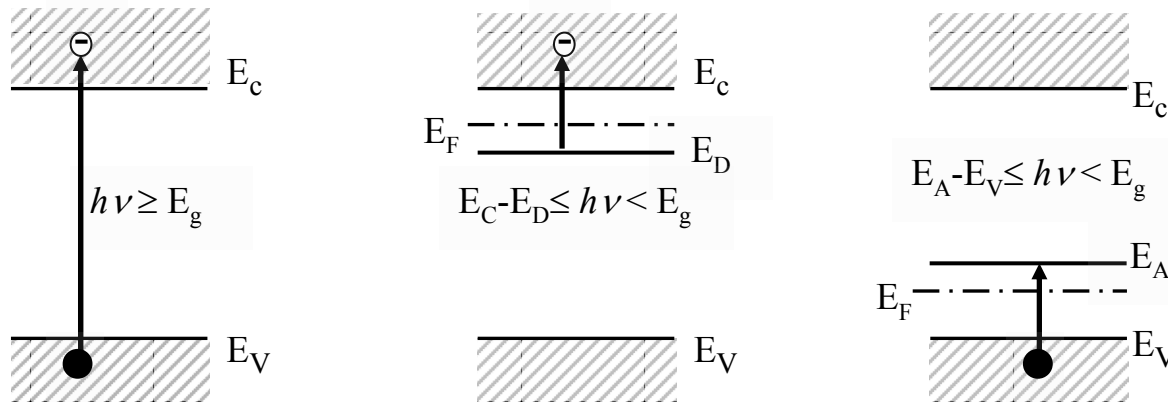


Схема инжекционного лазера на квантовых точках.

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

Полупроводниковые фотоприемники

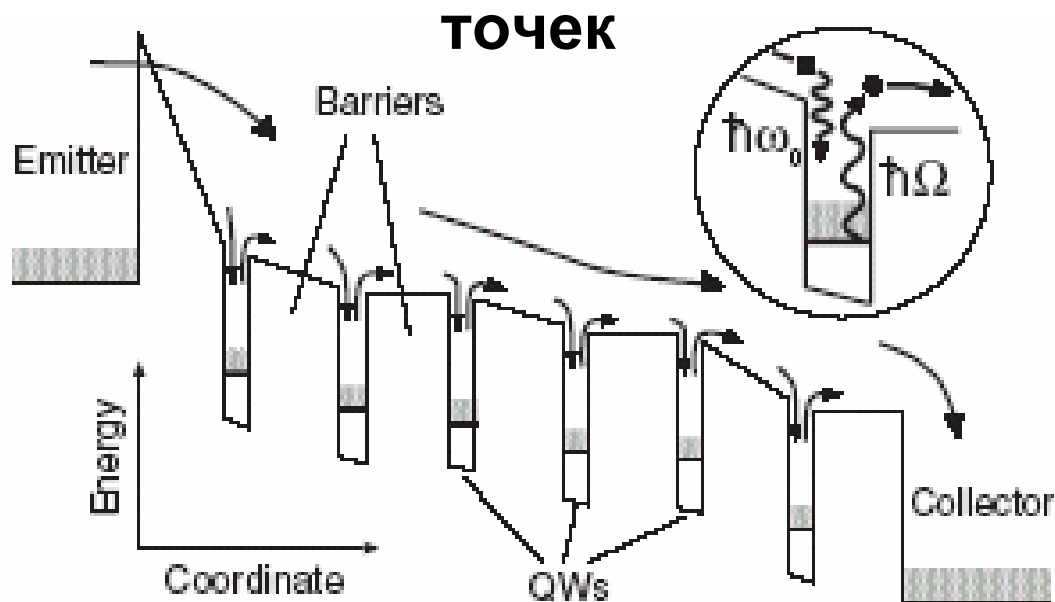
Спектральная чувствительность задается составом полупроводника, который определяет **ширину запрещенной зоны** E_g , и составом введенных примесей - уровни примесей.



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



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

Фотоника и нанофотоника

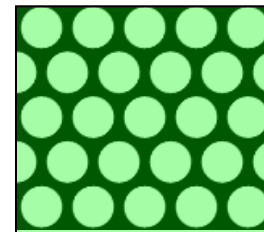
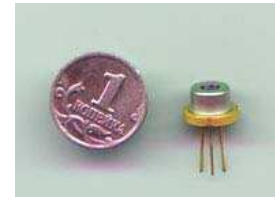
Фотоника может быть определена как область физики и технологии, связанная с излучением, поглощением, детектированием, распространением света и управлением светом (фотонами).

Общепринятого определения термина "Фотоника" не существует !

*Фотоника как область науки началась в 1960 с изобретением [REDACTED], 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.*



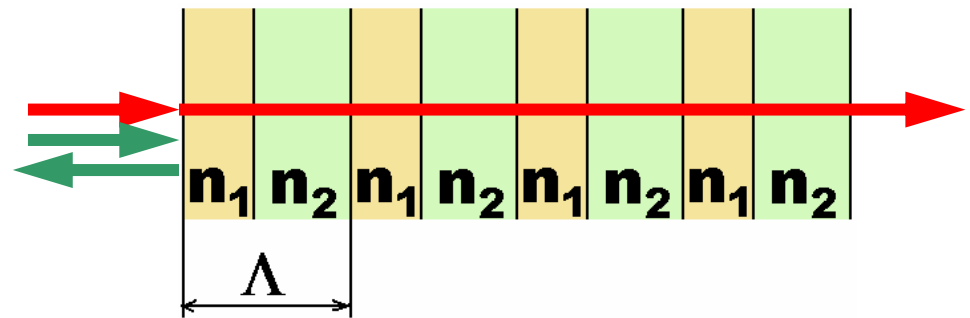
Нанофотоника является разделом фотоники, в котором исследуются явления со считанным количеством фотонов и исследуется поведение света на нанометровой шкале, в том числе, при взаимодействии с наночастицами и наноструктурами.

Фотонные кристаллы

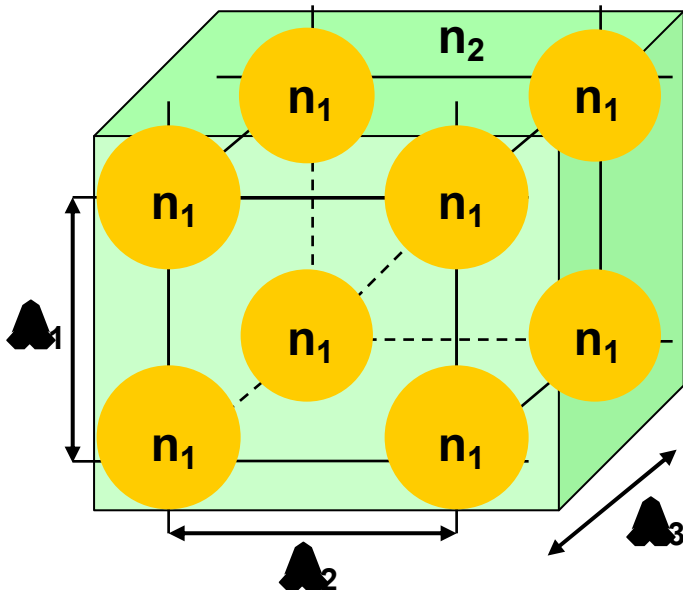
Фотонный кристалл - это объект, структура которого характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях .

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

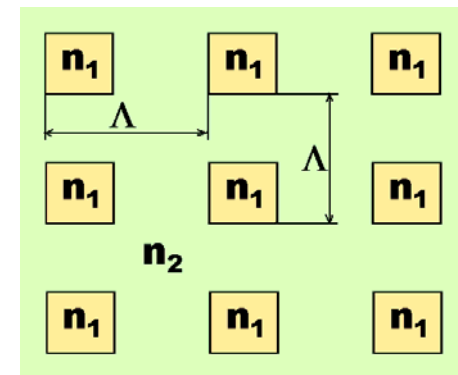
Одномерный фотонный кристалл



Трехмерный фотонный кристалл



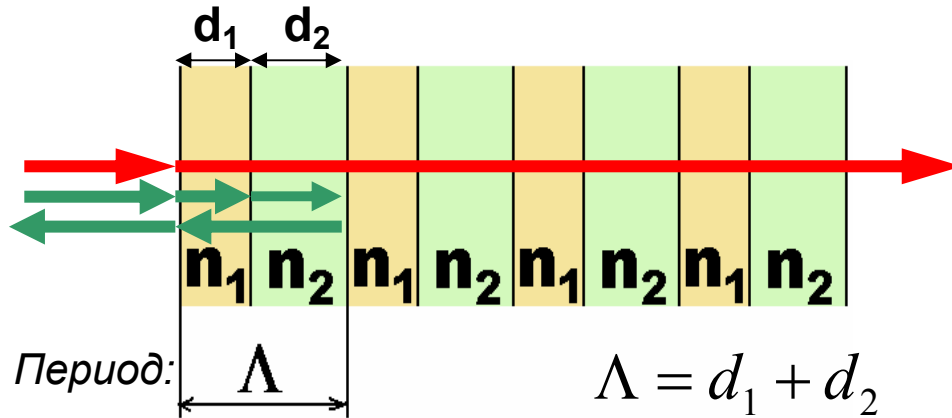
Двумерный фотонный кристалл



Как образуется фотонная запрещенная зона

Фотонная запрещенная зона есть результат интерференции световых волн, отраженных от периодически повторяющихся 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**:

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

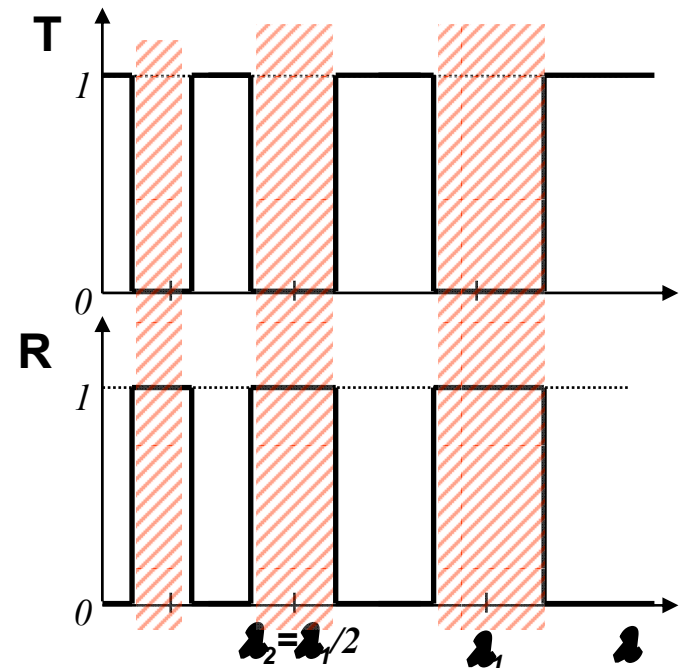
Практически важный частный случай для основной фотонной запрещенной зоны ($m = 1$) :

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

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

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

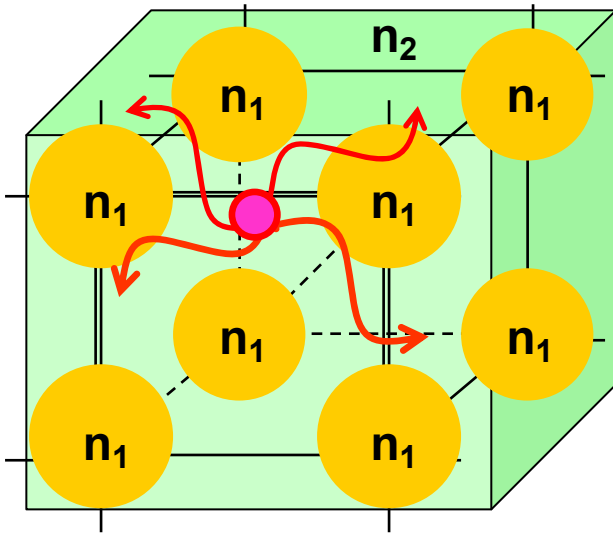
$$m = 1, 2, 3, \dots$$



Перспективы фотонных устройств

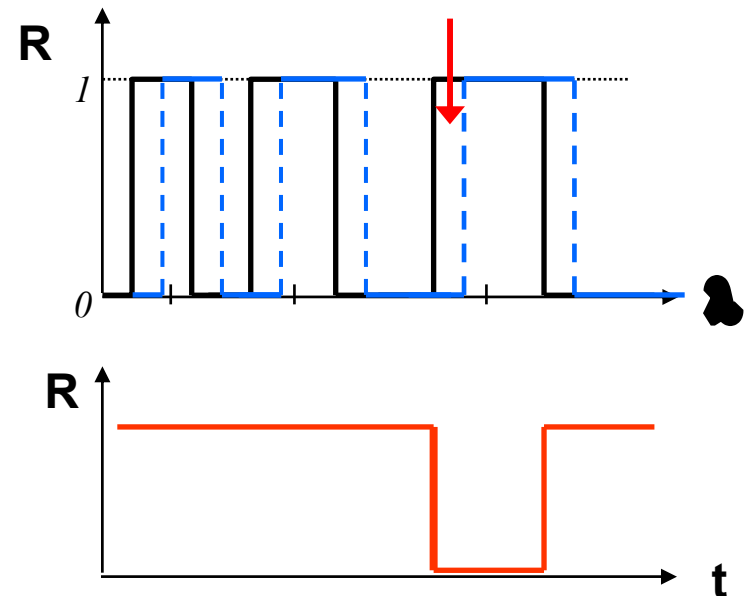
В 3D фотонных кристаллах возможно пленение излучения с длиной волны, соответствующей фотонной запрещенной зоне. Это нужно для создания *лазеров со сверхнизкими порогами генерации*.

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.



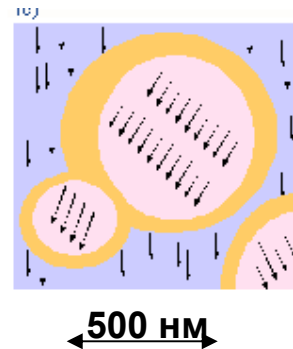
Магнитные наноустройства

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



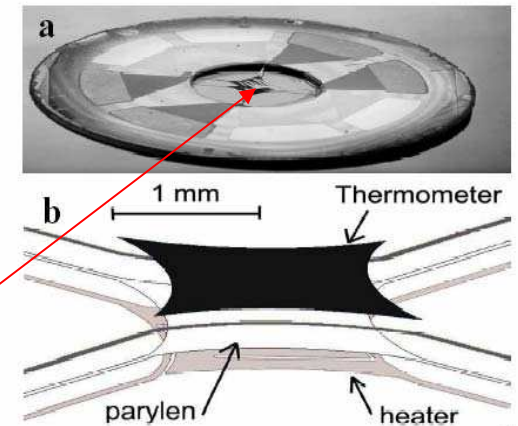
Устройство памяти на жестком магнитном диске. Стрелками показаны основные элементы, где используются магнитные наноматериалы.

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**.

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



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.

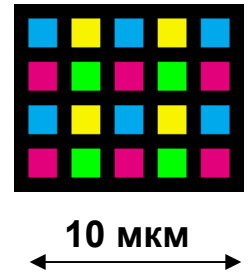
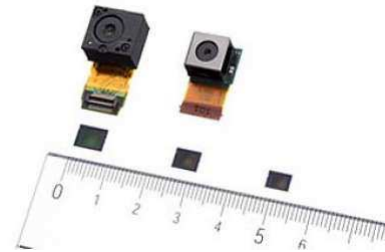
Газовые сенсоры



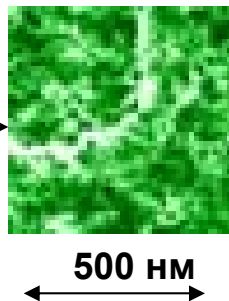
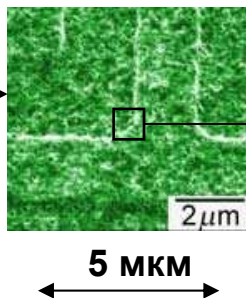
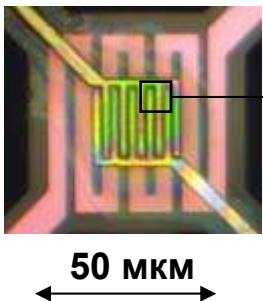
Сенсор давления



Сенсоры изображения



Газовый сенсор на основе нанопористого анилина



Наносенсорика занимается использованием нанобъектов и наноматериалов для создания сенсоров, в том числе, на нанокочество вещества 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.

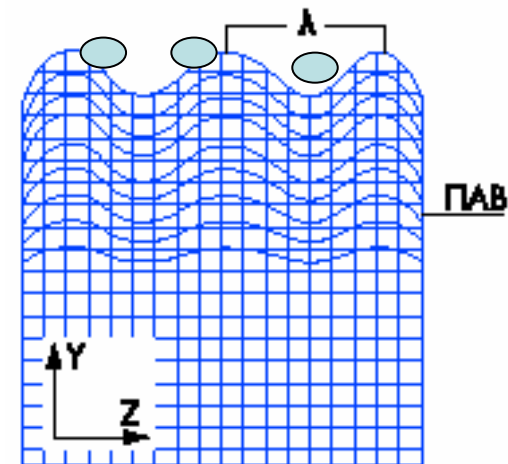
В зависимости от первичного отклика химические сенсоры подразделяют на следующие типы:

- 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 проходящей волны за счет изменения ее скорости.**
- 3. Изменение резонансной частоты всего устройства.**

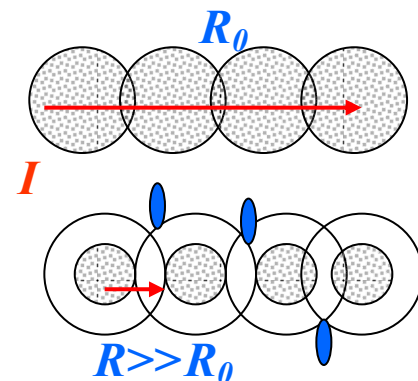
ПАВ сенсоры могут быть в сотни раз более чувствительны, чем **пьезовесы** (частоты ≤ 20 МГц). Кроме того, они могут быть много меньше по размеру.

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

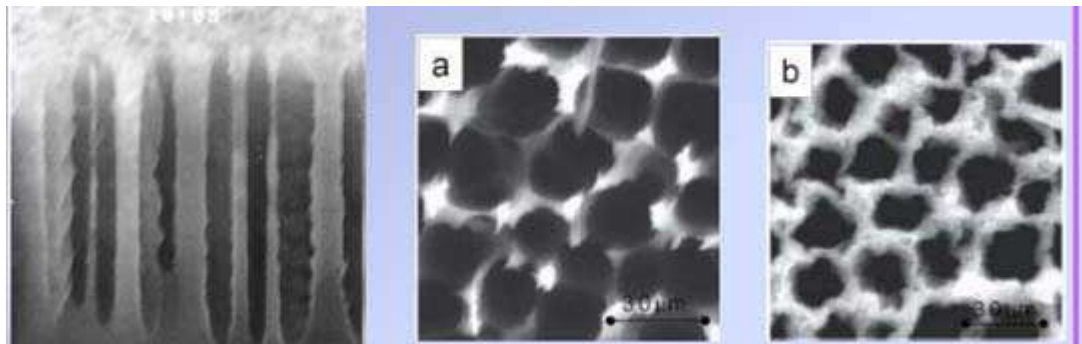
Хемирезисторы

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.

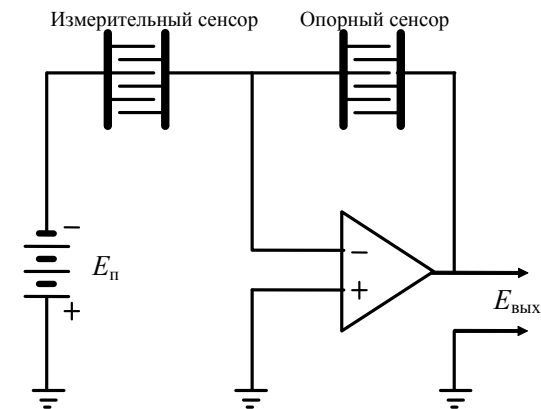
В качестве органических покрытий обычно используются фталоцианины различных металлов, например, меди. Основное преимущество таких сенсоров перед очень распространенными твердотельными хемирезисторами на оксидных полупроводниках (так называемыми Тогути-сенсорами) состоит в возможности работы при комнатной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



Хемирезистор на основе пористого кремния с наночастицами SnO_2



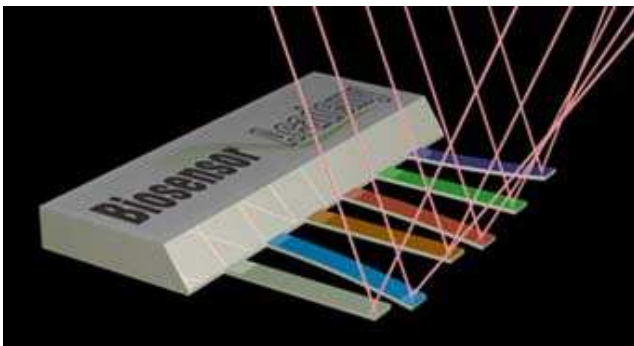
3 МКМ



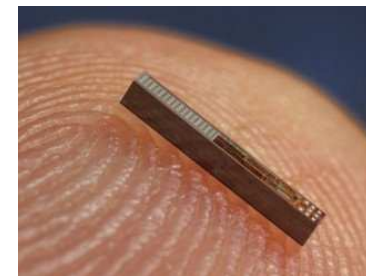
Наносенсоры и нанотехнологии

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.

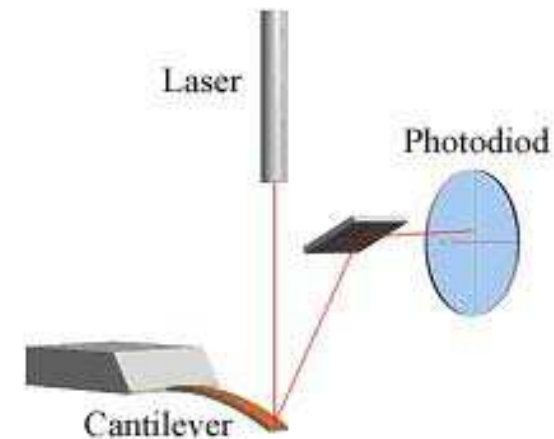
Новая тенденция – использование кантилевера (одного из основных элементов атомно-силовой микроскопа) в качестве сенсора на массу.



**сенсор давления
потока жидкости**



**Имплантируемый
сенсор давления
крови**



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

Выводы

- 1. Свойства наноструктур и наноматериалов зависят не только от химического состава входящих в них веществ, но и от их размеров (размерные эффекты), состава покрытия поверхности (роль удельной поверхности) и степени упорядочения.**
- 2. Полупроводниковые гетероструктуры (квантовые ямы и квантовые точки) являются перспективными для создания новых светоизлучающих и фоточувствительных устройств.**
- 3. Фотонные кристаллы представляют интерес для создания новых устройств фотоники, лазерной физики и обработки информации.**
- 4. Существующие магнитные устройства записи, хранения и считывания информации уже используют наноматериалы. Дальнейшая перспектива связана с развитием вертикального способа записи и созданием устройств спинтроники.**
- 5. Нанотехнологии и наноматериалы позволяют значительно уменьшить размеры, увеличить чувствительность и другие характеристики сенсоров, которые фактически становятся наносенсорами (по масштабу измеряемых величин и размеров использованных частиц).**