

# Наноэлектроника

## Лекция 7

к.т.н., доц. Марончук И.И.

# Нанофотоника

# Фотоника и нанофотоника

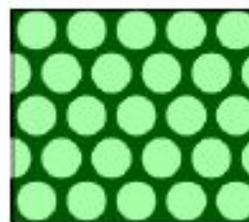
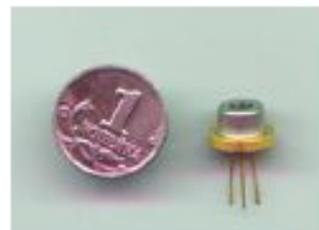
**Фотоника** может быть определена как область физики и технологии, связанная с излучением, поглощением, детектированием, распространением света и управлением светом (фотонами).

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.*

**Нанопотоника** — направление развития наноэлектроники, в котором исследуются физические явления, возникающие при взаимодействии фотонов с объектами нанометровых размеров, а также разрабатываются функциональные устройства обработки и хранения информации.

К **нанопотонным** относят **устройства**, использующие структуры размером около 100 нм и меньше. Также устройства решают проблемы миниатюризации многих оптических систем, содержащих волноводы, резонаторы, интерферометры и др.

**Нанопотонные вычислительные устройства** не только значительно превосходят электронные аналоги по быстродействию, но и позволяют успешно решать проблемы, связанные с тепловыделением и электропитанием.

В приборах и устройствах нанофотоники используется свет, локализованный в пространстве с размерами, много меньшими длины волны  $\lambda$ , или в объеме, меньшем  $\lambda^3$ . Если в **классической оптике** существует фундаментальное ограничение разрешающей способности оптического изображения, связанное с наличием рэлеевского критерия для минимального размера различимого объекта, то в нанофотонике найдены способы преодоления указанного критерия. При этом используются новые или модифицированные эффекты линейного и нелинейного, классического или квантового взаимодействий лазерного света с атомами, молекулами, кластерами и наноструктурами. **Практическое развитие этой области основано** на создании лазеров, которые позволяют получать субмикронные структуры (наноотверстия, нанощели, наноиглы и т. д.) для локализации света в очень малых размерах.

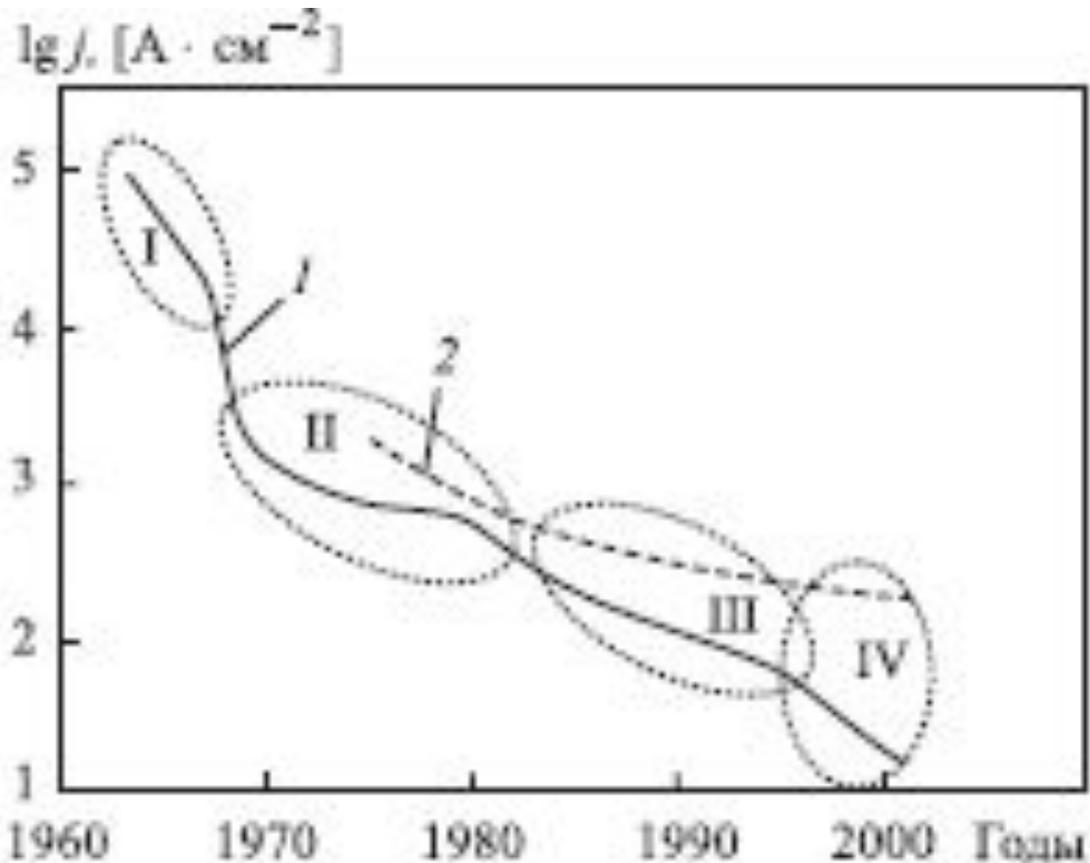
Создание фотонных кристаллов и фотонно-кристаллических или «дырчатых» волоконных световодов на их основе — одна из наиболее перспективных оптических технологий последних лет. В построении модели фотонных кристаллов особую роль сыграла зонная теория структуры твердых тел. Для носителей заряда (электронов), находящихся в периодическом потенциале кристаллической решетки, существуют определенные разрешенные и запрещенные энергетические зоны, обусловленные этим потенциалом.

По аналогии с зонной структурой вещества была предложена оптическая зонная структура. Для фотонов с различными энергиями определили разрешенные и запрещенные состояния.

По аналогии с твердым телом была предложена модель среды, в которой роль периодического потенциала решетки выполняют периодические изменения диэлектрической проницаемости или показателя преломления в волноводной среде.

Понятия «**фотонный кристалл**» и «**фотонная запрещенная зона**» стали ключевыми терминами новейшего направления современной оптики.

С развитием технологии наноэлектроники, переходом на субмикронные приборы значительный интерес проявился к лазерам на структурах с пониженной размерностью. К таким структурам относятся прежде всего гетероструктуры с ограничением по одной из координат. В этом случае образуется область с двумерным электронным газом. Такие структуры получили название «**квантовые ямы**». Структуры с ограничением по двум координатам получили название «**квантовые нити**». Для структур с трехмерным ограничением принят термин «**квантовые точки**». В такого типа структурах наблюдается снижение пороговой плотности тока. На рис. представлен сравнительный анализ снижения пороговой плотности тока для разных типов лазерных структур.



Зависимость пороговой плотности тока для различных лазерных структур: 1 — *GaAs*- структуры, 2 — структуры на основе *InP*; 300 К; I — гомоструктуры, II — двойные гетероструктуры, III и IV — структуры с квантовыми ямами и квантовыми точками соответственно



Эволюция полупроводниковых лазеров от арсенид-галлиевых на  $p-n$  переходах до наноразмерных на квантовых точках

Различают два фактора, стимулирующих уменьшение пороговой плотности. Первый — объем активной среды. В лазерах первого поколения или гомоструктурах инжектированные носители могли свободно мигрировать в полупроводниковой среде, поэтому активный объем не имел строго очерченных границ и плотность порогового тока принимала достаточно большие значения. Значительное снижение порога генерации было достигнуто при использовании гетероструктур. В таких структурах фактическая область локализации носителей определяется профилями плотности вероятности соответствующих волновых функций. Эти функции зависят от толщины квантовой ямы, главного квантового числа, эффективной массы носителей и высоты барьера.

**Второй фактор** связан с квантоворазмерными эффектами. Такие эффекты влияют на характер движения носителей в объемах с размерами, сопоставимыми с длиной волны электрона или дырки. С другой стороны, эти объемы должны быть достаточными для выполнения законов зонной теории. При локализации носителей в квантовой яме возникают дискретные разрешенные энергетические уровни. Основное или нижнее состояние характеризуется кинетической энергией локализации, отделяющей основной уровень от дна потенциальной ямы. Энергия локализации  $E_0$  в прямоугольной яме с бесконечными барьерами определяется значением  $E_0 = [\pi\hbar/(d^*m)]^2$ , где  $m^*$  — эффективная масса носителей,  $d$  — толщина квантовой ямы. Минимальную толщину ямы  $d_{\min}$ , при которой уже не обеспечивается локализация носителей, можно оценить из соотношения  $E_0 \geq \Delta E$ , где  $\Delta E$  — глубина ямы. В арсенид-галлиевых структурах величина  $d_{\min}$  составляет 4-5 нм. Энергия перехода между основными состояниями в квантовой яме оказывается больше энергии межзонного перехода в том же материале. Это позволяет изменять длину волны излучения за счет размеров квантовой ямы.

Возможность управлять плотностью состояний обеспечивает существенный ресурс дальнейшего улучшения лазерных характеристик. Дискретизация спектра сводится к модификации распределения плотности состояний по энергии. Для работы лазера необходимо и достаточно, чтобы были инвертированы рабочие уровни, именно такие уровни в зонах, которые фактически обеспечивают пороговое усиление и необходимую скорость вынужденных переходов при сверхпороговой накачке. В полупроводниковых гомоструктурах необходимо также заполнять некоторое число уровней в зонах, которые непосредственно не участвуют в генерации. Обычная или невынужденная рекомбинация с участием этих уровней входит в выражение для пороговых потерь.

Эти уровни расположены по энергии ниже либо выше рабочих уровней. Более низкие уровни приходится заполнять, поскольку сами они не обеспечивают достаточного усиления; для его увеличения требуется мощная накачка. В объемном полупроводнике плотность состояний растет примерно пропорционально корню квадратному из кинетической энергии.

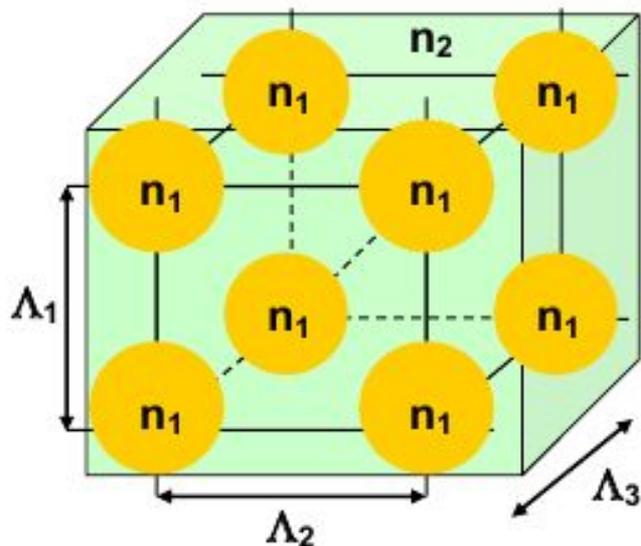
В низкоразмерных структурах иная картина. В квантовой яме плотность состояний возрастает скачком, и если она достаточна для получения эффекта генерации, то «неработающих» уровней нет. Населенность уровней энергии, находящихся выше рабочих уровней, связана с температурным размытием квазиравновесной функции заполнения. Число носителей на этих уровнях соответствует интегралу от произведения плотности состояния на функцию заполнения по указанному интервалу энергии. Функция заполнения определяется положением уровня Ферми и температурой. Плотность состояний квантовых нитей и точек убывает с энергией, превышающей квантовый уровень. Благодаря этому можно оптимизировать энергетический спектр и уменьшить вклад нерабочих состояний, лежащих выше рабочего уровня. В таких лазерных средах можно существенно ослабить температурную зависимость усиления и порога генерации. Использование квантовых эффектов в наноструктурах для снижения пороговой плотности тока полупроводникового лазера заключается в оптимизации профиля плотности состояний. Другими словами, речь идет о продуманной зонной инженерии или о создании структуры с наперед заданной зонной структурой.

# Фотонные кристаллы

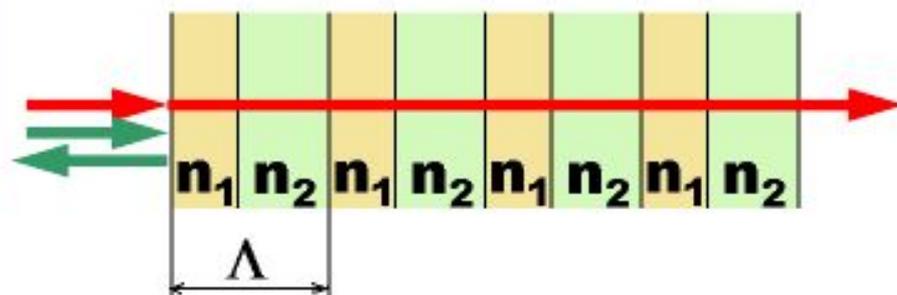
**Фотонный кристалл** - это материал, структура которого характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях .

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

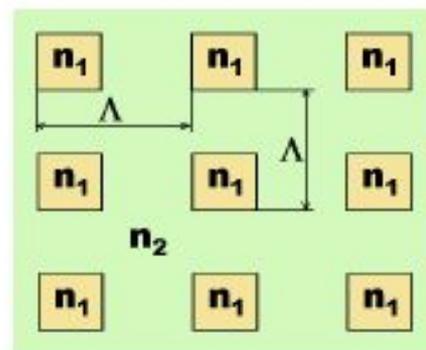
Трехмерный фотонный кристалл



Одномерный фотонный кристалл



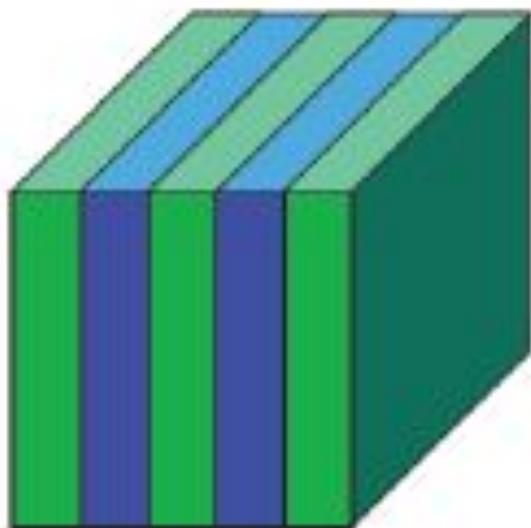
Двумерный фотонный кристалл



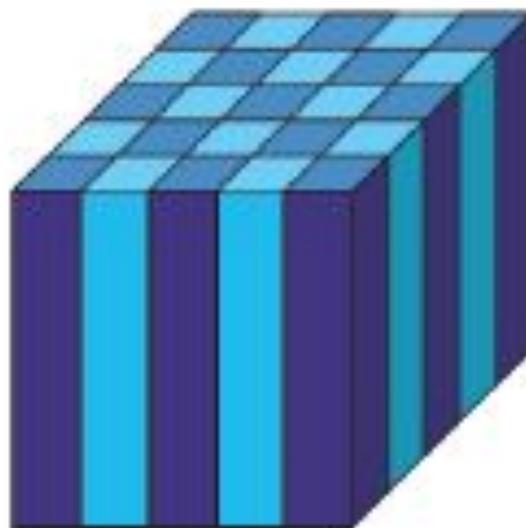
## Устройства на фотонных кристаллах

Фотонный кристалл представляет собой сверхрешетку, в которой искусственно создано поле с периодом, на порядки превышающим период основной решетки. Такое поле получают периодическим изменением коэффициента преломления среды в одном, двух или трех измерениях (1D-, 2D-, 3D-фотонные структуры соответственно). Если период оптической сверхрешетки сравним с длиной электромагнитной волны, то поведение фотонов кардинально отличается от их поведения в решетке обычного кристалла, узлы которого находятся друг от друга на расстоянии, много меньшем длины волны света. Поэтому такие решетки и получили особое название — фотонные кристаллы. Фотонные кристаллы классифицируются по различным признакам. По характеру изменения коэффициента преломления можно выделить три основных класса.

1-D



2-D



3-D

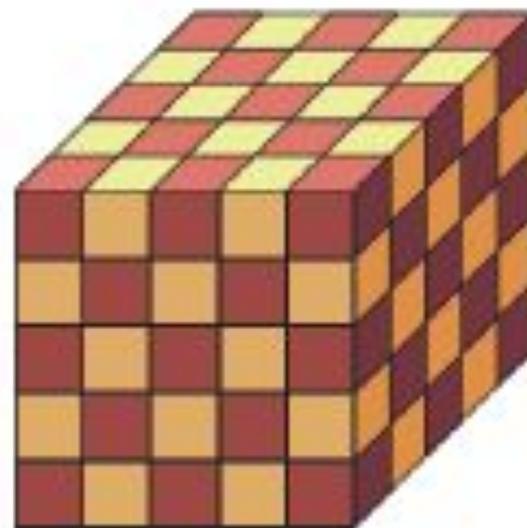
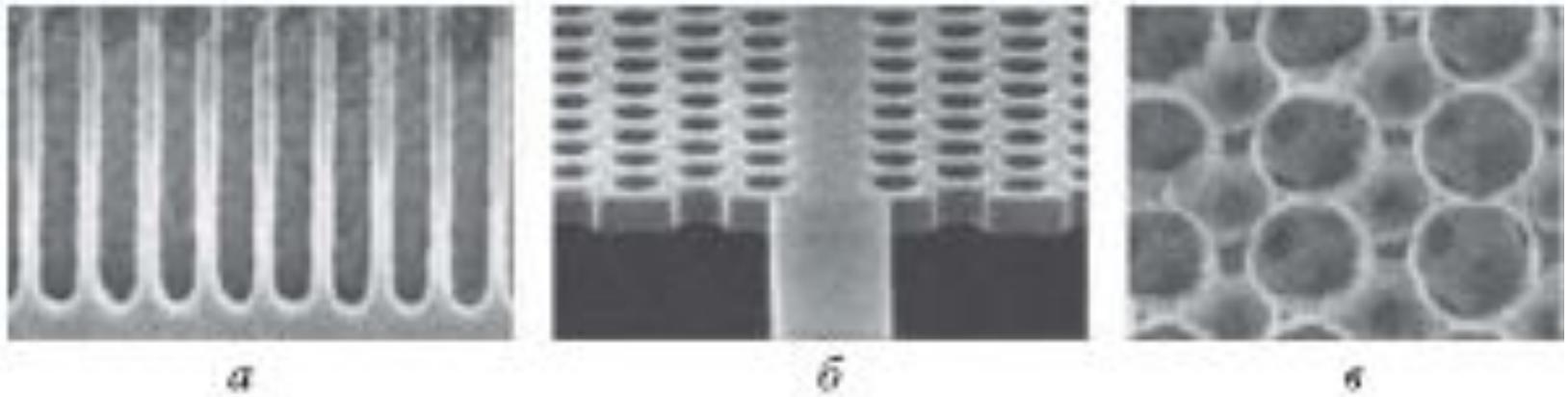


Иллюстрация наглядно представляющая модели фотонных кристаллов, с периодичностью в одном, двух и трёх направлениях соответственно

1. Одномерные, или 1D-структуры, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в одном пространственном направлении (рис. а). Символом  $l$  обозначен период изменения коэффициента преломления,  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления материалов. Такие фотонные кристаллы состоят из параллельных друг другу слоев различных материалов с разными коэффициентами преломления и могут проявлять свои свойства в одном пространственном направлении, перпендикулярном слоям (количество материалов может быть больше двух).

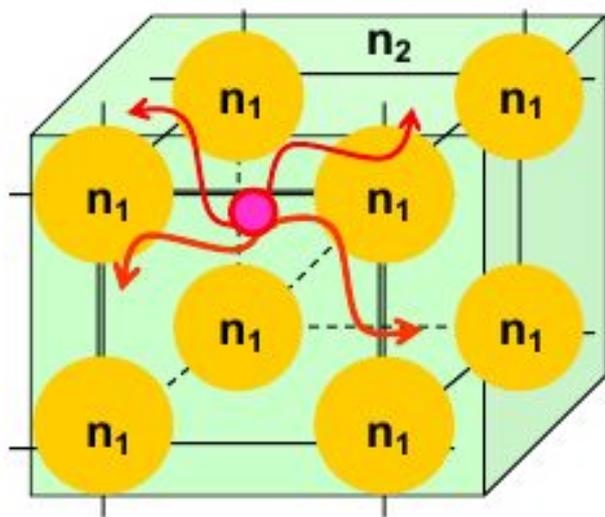
2. Двухмерные, или 2D-структуры, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в двух пространственных направлениях (рис. б). Кристалл создан прямоугольными областями с коэффициентом преломления  $n_1$ , которые находятся в среде с коэффициентом преломления  $n_2$ . Фотонные кристаллы могут проявлять свои свойства в двух пространственных направлениях. Форма областей с коэффициентом преломления может быть любой. Кристаллическая решетка, в которой упорядочены эти области, также может быть другой, а не только кубической, как на приведенном рисунке.

3. Трехмерные, или 3D-фотонные структуры, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в трех пространственных направлениях, в которых и проявляются свойства фотонных кристаллов (рис. в).



Фотонные кристаллы: а — одномерный; б — двумерный;  
в — трехмерный

# Перспективы фотонных устройств

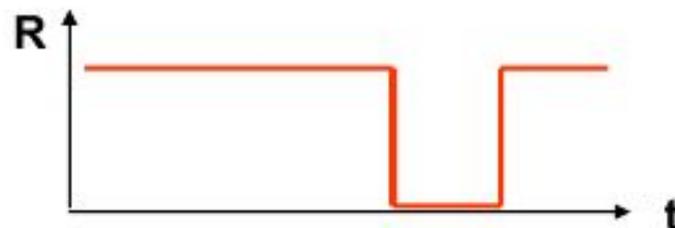
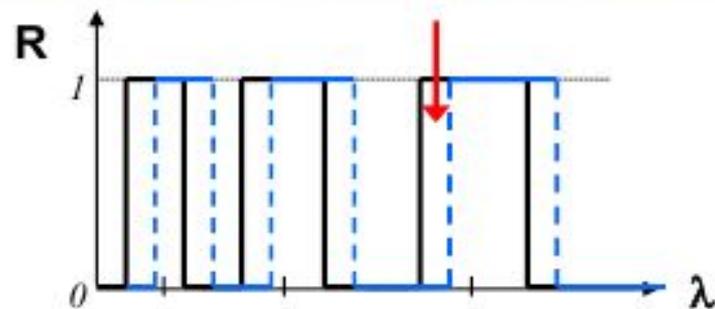


Замедление времени жизни фотона  $\tau_{rad}$

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**.

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.



По другому признаку классификации фотонные кристаллы в зависимости от ширины запрещенных и разрешенных зон можно разделить на проводники, диэлектрики и полупроводники. Проводящие кристаллы способны проводить свет с малыми потерями, а сверхпроводниковые обладают свойствами для распространения фотонов практически на неограниченные расстояния.

Диэлектрические кристаллы эквивалентны зеркалам, полупроводниковые фотонные кристаллы могут выборочно отражать фотоны определенной длины волны. Фотонная запрещенная зона трехмерного фотонного кристалла — некоторая аналогия электронной запрещенной зоны в кристалле кремния и способна управлять потоком света. В основе физического механизма образования фотонных запрещенных зон лежит явление распространения волны в среде с периодическим полем. Квантовые свойства фотонных кристаллов четко проявляются тогда, когда фотонная запрещенная зона существенно перекрывает электронную запрещенную зону.

## Различают резонансные и нерезонансные фотонные кристаллы.

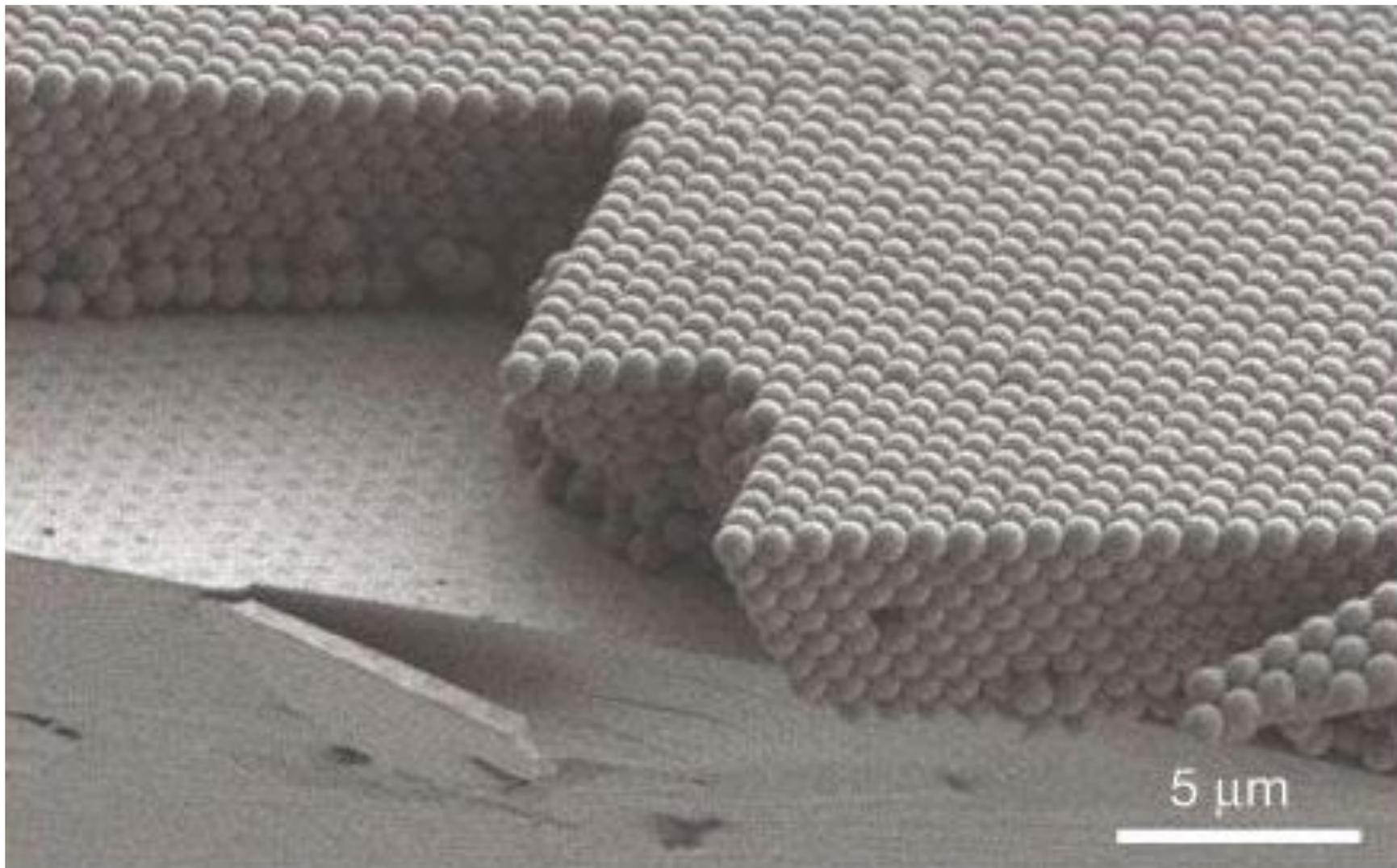
Резонансные фотонные кристаллы отличаются от нерезонансных использованием в них материалов, диэлектрическая проницаемость которых (или коэффициент преломления) как функция частоты имеет полюс на некоторой резонансной частоте.

При производстве фотонных кристаллов для видимого диапазона длин волн необходимо, чтобы его постоянная решетки должна быть сравнима с длиной волны света, другими словами, лежать в субмикронной области. В настоящее время существует несколько технологий производства фотонных кристаллов. Одна основана на литографии, широко используемой в микроэлектронике для производства полупроводниковых интегральных схем. Эта микроэлектронная технология позволяет получать заданные структуры. С ее помощью удастся создавать металлические, например, вольфрамовые фотонные кристаллы с очень широкой запрещенной зоной в диапазоне от 8 до 20 мкм. Период такого 3D-фотонного кристалла  $\sim 4$  мкм, толщина элементов  $\sim 1$  мкм. Чтобы создать фотонный кристалл с запрещенной зоной, непосредственно примыкающей к видимому диапазону, необходимо переходить в нанометровую область.

Однако не все ограничивается только варьированием размерности структурных элементов. Фотонные кристаллы можно также создавать за счет оптической нелинейности, перехода металл-неметалл, жидкокристаллического состояния, ферроэлектрического двойного лучепреломления, набухания и сжатия полимерных гелей. Во всех этих процессах изменяется показатель преломления.

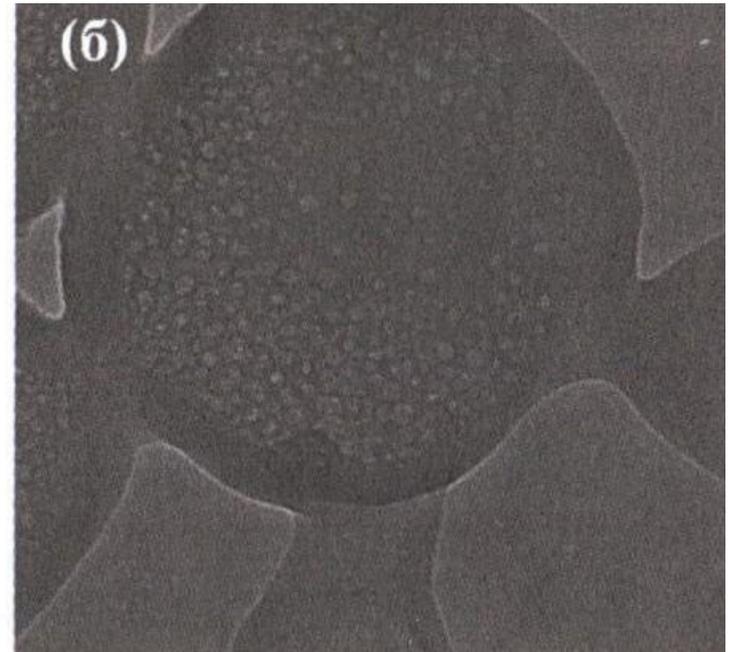
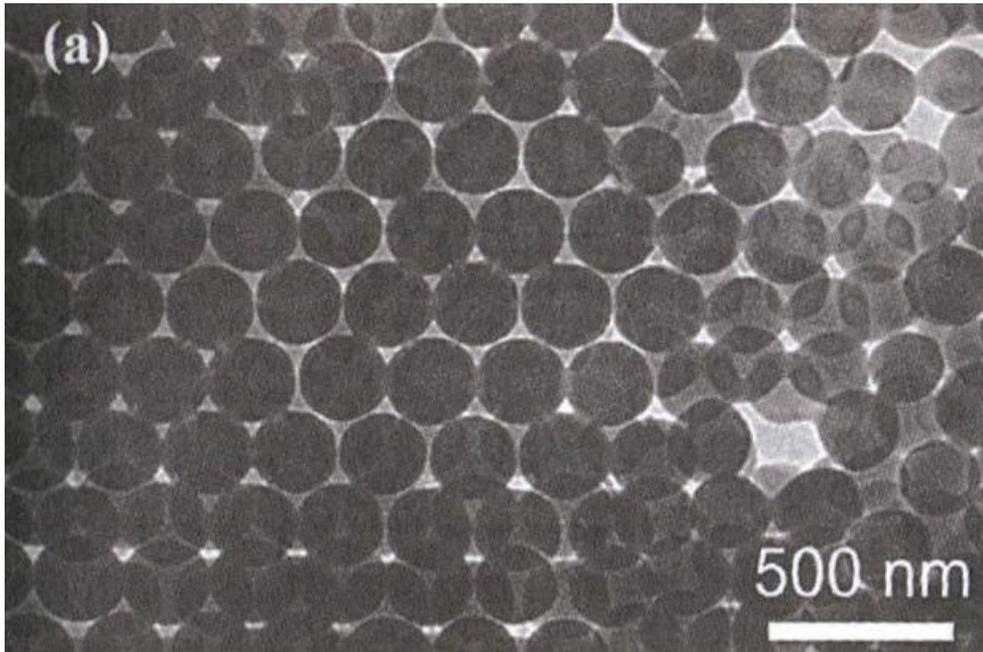
Весьма перспективна технология, основанная на спонтанной кристаллизации коллоидного раствора мелких частиц. Такая технология получила название самосборки и обеспечивает быстрый и сравнительно простой метод изготовления фотонных кристаллов. Технология самосборки применяется для создания диэлектрических фотонных кристаллов.

Например, на первом этапе из коллоидного раствора методом самосборки из полимерных или кварцевых ( $\text{SiO}_2$ ) микросфер выращивается трехмерная периодическая структура, которая используется далее как матрица для изготовления периодической оптической среды с заданными параметрами. На следующих стадиях пустоты матрицы заполняются материалом с высоким коэффициентом преломления, после чего микросферы удаляются путем химического травления. Такие искусственные фотонные кристаллы аналогичны по своим свойствам кристаллам естественного минерала — опала, который также состоит из плотно упакованных кварцевых сферических частиц, хотя и не обладает регулярной периодической структурой. Опалы издавна известны восхитительной игрой цветов, которая возникает так же, как и в фотонном кристалле, благодаря дифракции света на структуре кварцевых сфер.

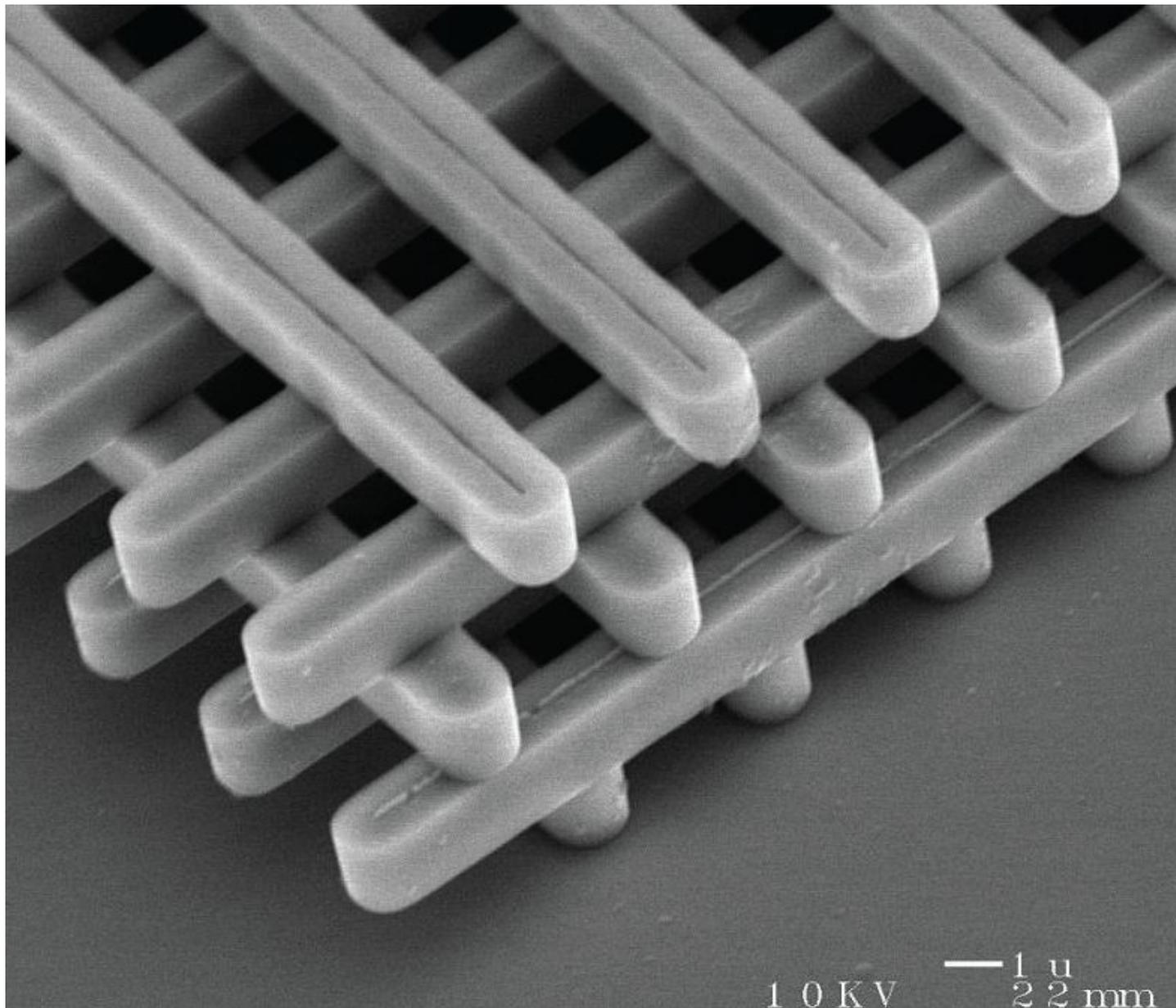


Микрофотография синтетического опала

Методами электронной микроскопии было установлено, что природные опалы образованы плотноупакованными однородными по размеру сферическими частицами  $\alpha\text{-SiO}_2$  диаметром 150-450 нм (рис. а). Каждая частица состоит из более мелких глобулярных образований диаметром 5-50 нм (рис. б). Пустоты упаковки глобул заполнены аморфным оксидом кремния. На интенсивность дифрагированного света влияют два фактора: первый - «идеальность» плотнейшей упаковки глобул, второй - различие в показателях преломления аморфного и кристаллического оксида  $\text{SiO}_2$ . Лучшей иризацией обладают благородные черные опалы (для них различие в значениях показателей преломления составляет  $\sim 0.02$ )



Микрофотографии природного опала: а) упаковка микросфер; б) внутренняя структура опаловых шаров



Трёхмерная фотонная структура, полученная в Sandia National Laboratories

Использование фотонных полупроводников целесообразно для организации управления световыми потоками. Это можно делать, например, влияя на положение и ширину запрещенной зоны. Поэтому фотонные кристаллы представляют огромный интерес для построения лазеров нового типа, оптических компьютеров, хранения и передачи информации. Фотонные кристаллы предполагается использовать для создания оптических интегральных схем так же, как обычные полупроводники, металлы и диэлектрики используются для создания электронных интегральных схем.

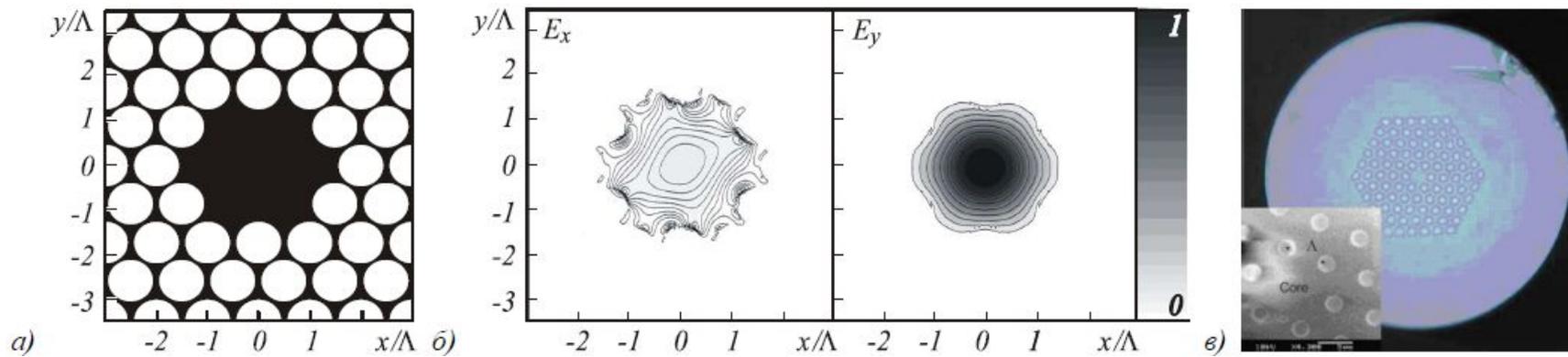
**Фотонно-кристаллическое волокно (ФКВ)** представляет собой оптическое волокно, оболочка которого имеет структуру двумерного фотонного кристалла. Благодаря такой структуре оболочки открываются новые возможности управления в широком диапазоне дисперсионными свойствами волокон и степенью локализации электромагнитного излучения в направляемых волноводных модах.

В большинстве случаев для создания ФКВ используют стекло или кварц с отверстиями, заполненными воздухом. Часть отверстий может быть заполнена другими газами или жидкостями, в том числе жидкими кристаллами. Иногда используются ФКВ, образованные двумя различными видами стекла, показатели преломления которых сильно отличаются друг от друга.

По физическому механизму удержания света в сердцевине оптические волокна можно разделить на два класса.

Первый класс образуют ФКВ со сплошной световедущей жилой. Такие волокна представляют собой сердцевину из кварцевого стекла в оболочке из фотонного кристалла. Конструкция этого типа имеет более низкий средний коэффициент преломления по отношению к жиле.

Волноводные свойства таких световодов обеспечиваются одновременно двумя эффектами: полного внутреннего отражения (как в обычных световодах) и зонными свойствами фотонного кристалла.



Сечение модельного ФКВ (белый цвет - цилиндрические отверстия оболочки, черный цвет - материал с показателем преломления 1.46 - плавленный кварц)(а); рассчитанные картины двух компонент  $E_x$  и  $E_y$  электромагнитного поля  $\phi$  фундаментальной моды (б); сечение реального ФКВ, снятое под микроскопом (в)

В обычных волоконных световодах удержание света в сердцевине происходит благодаря полному внутреннему отражению от оболочки с изменяющимся показателем преломления. Количество направляемых мод в сплошной световедущей жиле такого волокна определяется только величиной отношения диаметра  $d$  воздушных каналов к расстоянию между их осями  $A$ . При этом для случая  $d/A \gg 0,2$  такие дырчатые световоды одномодовы во всем спектральном диапазоне прозрачности кварца. В таких волокнах в широком спектральном диапазоне распространяются только моды низшего (нулевого) порядка, а все высшие моды затухают в оболочке. Этот эффект был назван модифицированным эффектом полного внутреннего отражения: зонная структура фотонного кристалла проявляется только косвенным образом, а волноведущие свойства его для мод нулевого порядка определяются эффектом полного внутреннего отражения.

Наличие полостей в оболочке позволяет более чем на порядок увеличить разность показателей преломления световедущей жилы и оболочки по сравнению со стандартным волокном. Этим в основном и определяются принципиально новые свойства ФКВ, отличающие их от обычных волоконных световодов. Помимо отмеченной выше возможности создания одномодовых ФКВ для очень широкого спектрального диапазона, необычны их дисперсионные свойства, которые зависят от размеров воздушных каналов и их взаимного расположения. Эти волокна могут иметь аномальную дисперсию в значительно более коротковолновой области спектра вплоть до длин волн  $\lambda \gg 0,8$  мкм. При этом абсолютная величина дисперсии в таких волокнах может на порядок превышать значения дисперсии в стандартных одномодовых волокнах и достигать  $10^3$  пс, а зависимость дисперсии от длины волны в широком спектральном диапазоне может быть очень слабой.

Большой размер световедущей жилы позволяет снизить влияние нелинейных эффектов на форму распространяющихся по волокну импульсов света и, наоборот, при малых размерах моды роль нелинейных эффектов заметно увеличивается по сравнению со стандартными световодами.

Волокна с поллой сердцевиной показали возможность передачи большой мощности и применимость для генерации лазерных импульсов длительностью в несколько периодов световых колебаний. Однако эти волокна имеют малые потери только в многомодовом режиме. Использование **фотонно-кристаллических волноводов с поллой сердцевиной** (ФКВТС) позволяет совместить малые потери и малое число мод. Эти волокна направляют свет за счет высокого отражения от периодической двумерной оболочки, когда частота и направление распространения волны соответствуют фотонной запрещенной зоне.

ФКВТС были использованы для наблюдения индуцированного Раман-эффекта, четырехволнового смешения и фазовой самомодуляции импульсов, наблюдения мегаваттных оптических солитонов. Обычно полая сердцевина формируется удалением семи центральных капилляров, и типичный диаметр сердцевины таких волокон составляет от 6 до 20 мкм. Важным для применений является задача создания ФКВТС с большим диаметром сердцевины. Это позволит, в частности, увеличить предельно допустимую мощность, передаваемую по ним.

Второй класс образуют волокна с фотонной запрещенной зоной в заданном диапазоне длин волн оптического излучения. В этом случае свет может распространяться по сердцевине волокна с показателем преломления, меньшим, чем средний показатель преломления оболочки.

Таким образом, возможно распространение света даже в полой сердцевине, что позволяет на несколько порядков увеличить мощность вводимого в них излучения и уменьшить потери и нелинейные эффекты. Также появляется возможность сдвигать длину волны нулевой дисперсии в видимую область спектра, обеспечивая условия для солитонных режимов распространения видимого света. В обычных волоконных световодах это практически недостижимо.

## Фотонные транзисторы

Одним из ключевых элементов фотоники может стать оптический транзистор. Фотонику также можно охарактеризовать как область физики и технологии, связанную с излучением, детектированием, поведением фотонов. Фотоника покрывает широкий спектр оптических, электрооптических и оптоэлектронных устройств и их разнообразных применений. Большинство электронных устройств в скором времени могут стать фотонными.

Другими словами, вместо электронов носителями информации станут фотоны. Это позволит снизить уровень потребляемой энергии в процессе обработки и хранения информации. С помощью фотонных чипов можно будет оперировать большими объемами информации.

Однако возникает необходимость сопряжения электронных устройств с фотонными. Фотонные устройства нужно правильно «монтировать» в приборы и устройства современной микроэлектроники. И для этого необходимо сконструировать устройство которое обеспечивало бы взаимодействие между фотонными и электронными чипами. Такое устройство можно назвать «фотонным транзистором» или «фотонным ключом» (рис.).

Его функция — пропускать световые волны при наличии соответствующего сигнала и не пропускать, если сигнала нет. Такие устройства были известны и раньше и назывались они трансфазорами.

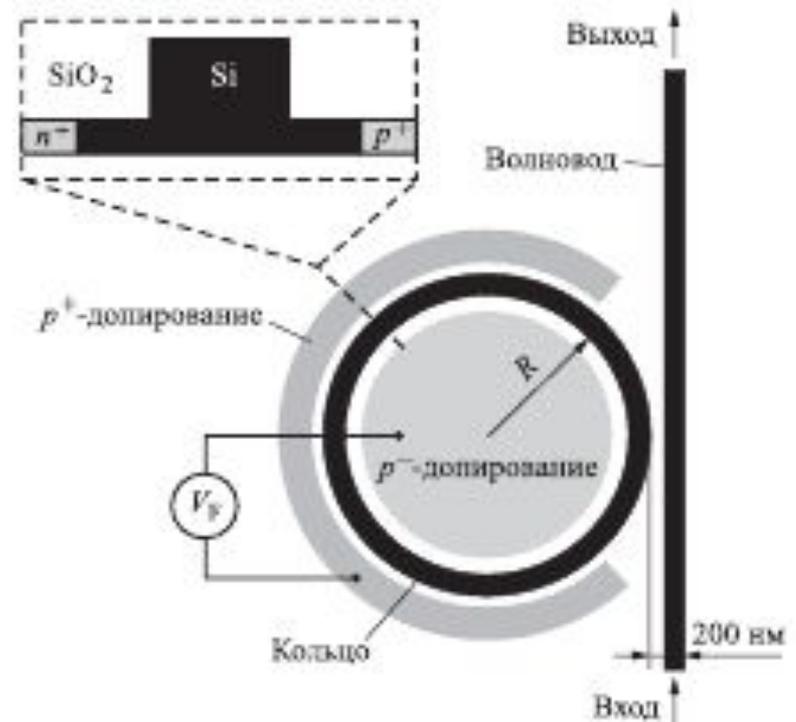


Схема фотонного ключа

Нанопотонный модулятор формируется на основе кольцевого резонатора радиусом  $R = 6$  мкм. На расстоянии  $0,2$  мкм располагается прямой световой волновод. Световой поток, проходящий через прямой отрезок волновода, множество разогинает кольцевой резонатор. Явление это широко известно и используется в фотонных устройствах. Длина волны светового пучка на выходе из резонатора прямо пропорциональна диаметру кольца. Для  $12$ -микрометрового резонатора длина волны светового излучения ( $1576$  нм) лежит в инфракрасном диапазоне. Электронная компонента фотонного ключа формируется на кремниевой структуре, в основу которой положены две допированные области, соответственно  $p^+$ -и  $n^+$ -типов. Конструктивно волновод располагается между  $p^+$ -и  $n^+$ -областями диодной кремниевой структуры.

При подаче на такой диод напряжения  $V_F$  ( $\sim 0,3$  В) электроны и дырки проникают в волноводную область фотонного ключа и меняют оптический коэффициент преломления. При этом изменяется резонансная частота волновода, и напряжение «запирает» свет, проходящий через прямой отрезок волновода.

Указанный эффект был известен и раньше для больших отрезков волновода. Исследователи из Корнелльского университета (США) заставили бежать свет по кругу в резонансном кольце, тем самым удлинив его путь, и выполнить фотонный чип нанометровых размеров.

Такой электронно-фотонный транзистор способен обработать 1,5 гигабита в секунду информации.

# 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  **$\gamma$ -лазеры** (газеры).

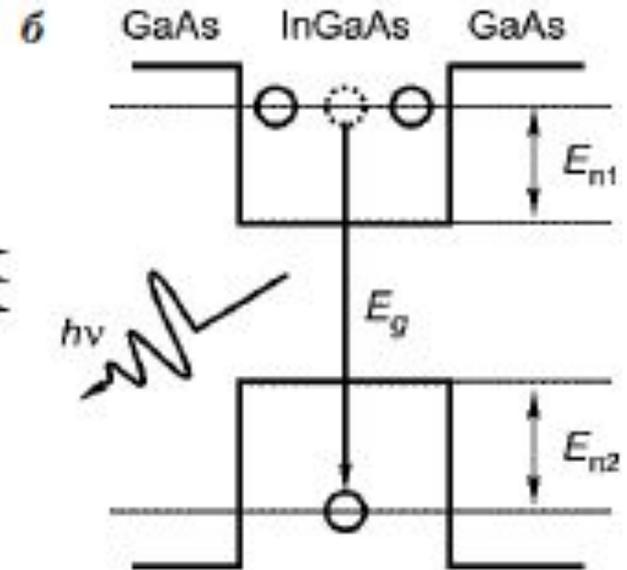
Лазер работает следующим образом. Из одного контакта (широкозонного полупроводника) электроны поступают в рабочую зону, создавая в ней инверсную заселенность. Далее, переходя из зоны проводимости в валентную зону, они излучают кванты электромагнитного излучения, частота которого определяется условием

$$\hbar\omega = E_g + E_{\text{П1}} + E_{\text{П2}}.$$

Лазер на квантовой яме:

*а* — двойная гетероструктура;

*б* — энергетическая диаграмма.

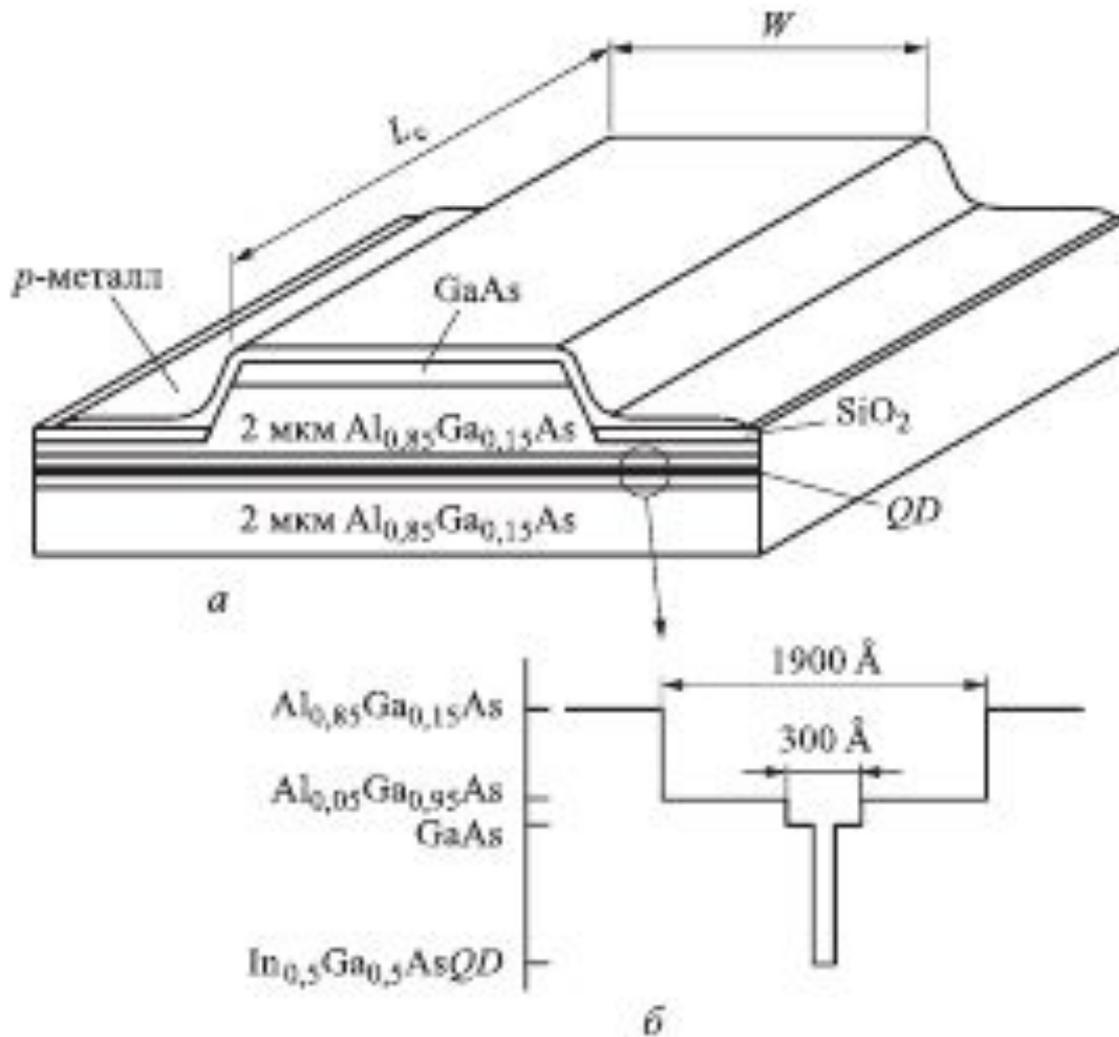


Для того чтобы сконцентрировать генерируемое излучение в активной центральной области прибора, для внутреннего слоя подбирают показатель преломления больше, чем для внешнего. Такое соотношение можно получить, например, в системе материалов  $GaAs/InGaAs$ . В этом случае внутренняя область становится подобной волоконнооптическому волноводу, на границах которого нанесены зеркала, формирующие резонатор.

## Лазерные наноструктуры

Для работы лазера, как показано выше, необходимо наличие активной среды, содержащей атомы с дискретными уровнями энергии. Между этими уровнями должны иметь место квантовые переходы. Должен быть известен механизм накачки активной среды с целью создания инверсной населенности, при которой на более высокоэнергетичном уровне будет накапливаться большее количество возбужденных атомов, чем на нижнем уровне. В лазерных наноструктурах в качестве активной среды обычно используется квантовые точки или квантовые штрихи (небольшие квантовые нити). Квантовые точки имеют дискретный энергетический спектр. При дискретном спектре не возникает теплового уширения полосы излучения, а коэффициент усиления имеет тенденцию к стабилизации. Излучательное время жизни возбужденного нуль-мерного состояния не зависит от температуры, что позволяет улучшить температурную стабильность таких лазеров. Заметим, что для лазеров на квантовых структурах имеет место низковольтная электрическая накачка.

Рассмотрим некоторые типовые конструкции лазеров на структурах с пониженной размерностью. На рис. представлена диодная конструкция лазера на квантовых точках. На подложке из n-типа GaAs выращивается гетероструктура, между слоями  $\text{Al}_{0,85}\text{Ga}_{0,15}\text{As}$  которой содержится 12 монослоев  $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$  квантовых точек. Верхний металлический слой контактирует с арсенидом галлия. Волновой канал  $\text{Al}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{As}$  имеет толщину 190 нм и служит проводником излучения к выходным окнам на границах структуры. Длина  $L$  и ширина канала  $W$  могут меняться в пределах 1-5 мм и 5-60 мкм соответственно. Торцы лазера покрыты высокоотражающими слоями  $\text{ZnSe}/\text{MgF}_2$ , формирующими своеобразный резонатор Фабри-Перо. Лазер работает в ИК-области спектра на длине волны 1,32 мкм.



Конструкция лазера на квантовых точках: а — диодная арсенидгаллиевая структура; б — волновод состоящий из 12 слоев квантовых точек (слой QD)

Другой тип перспективной конструкции лазера с вертикальным резонатором представлен на рис. Квантовое усиление в активной области достигается за счет процессов инжекции и рекомбинации электронов и дырок. Активная область состоит из нескольких квантовых ям или нескольких слоев квантовых точек.

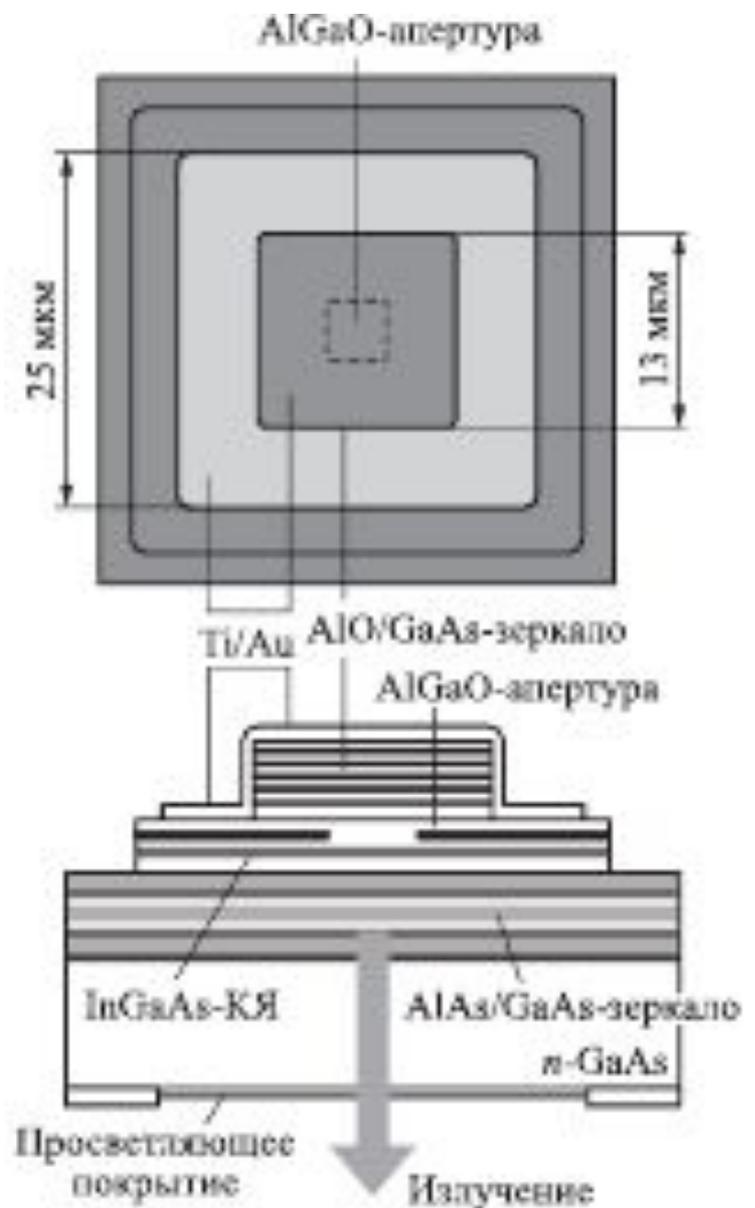
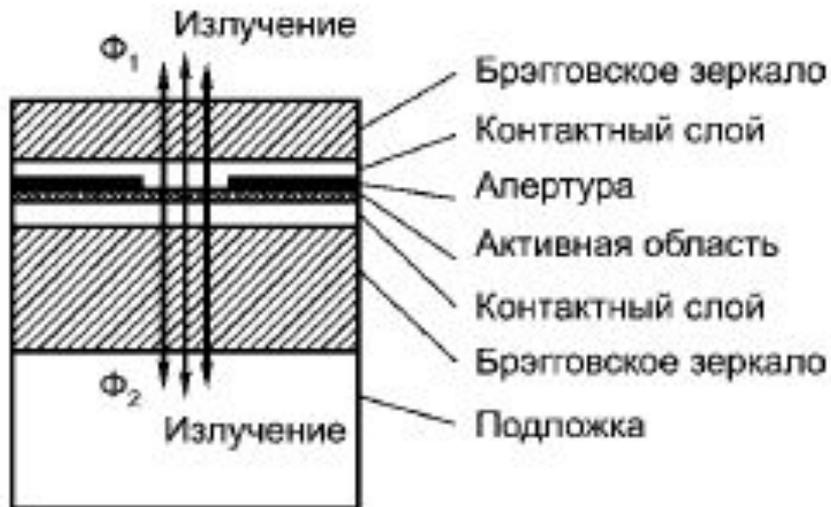
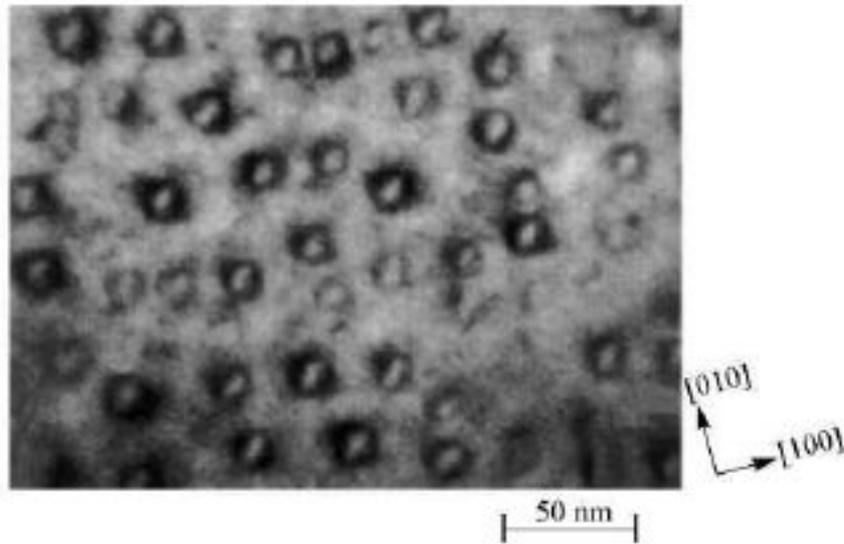


Схема лазера с вертикальным резонатором

# Лазер на квантовых точках



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

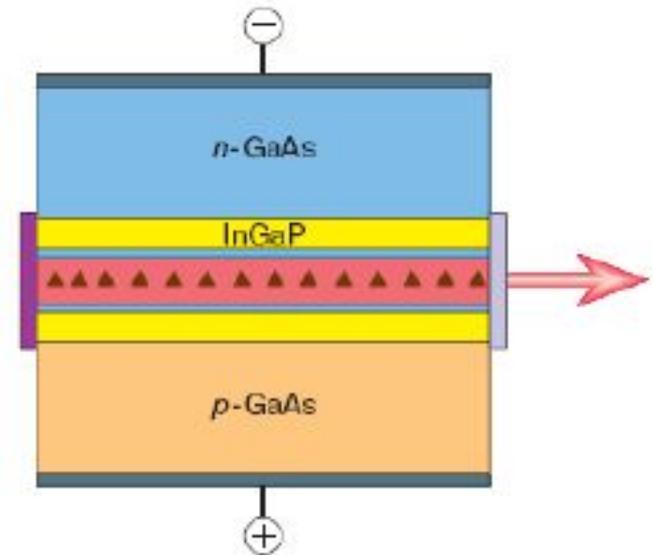


Схема **инжекционного лазера** на квантовых точках.

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

Предложена конструкция каскадного лазера, в котором используются оптические переходы между минизонами сверхрешеток. В сверхрешетках с постепенно меняющимся периодом при приложении внешнего постоянного электрического поля уровни энергии в отдельных квантовых ямах сливаются в миниполосы, происходит генерация в непрерывном режиме. На рис. приведена схема, реализованная на сверхрешетках.

Лазер излучает в инфракрасном диапазоне длин волн (7,6 мкм) и при комнатной температуре достигает пиковой мощности 0,5 Вт. Пороговая плотность тока составляет 5 кА/см<sup>2</sup>.

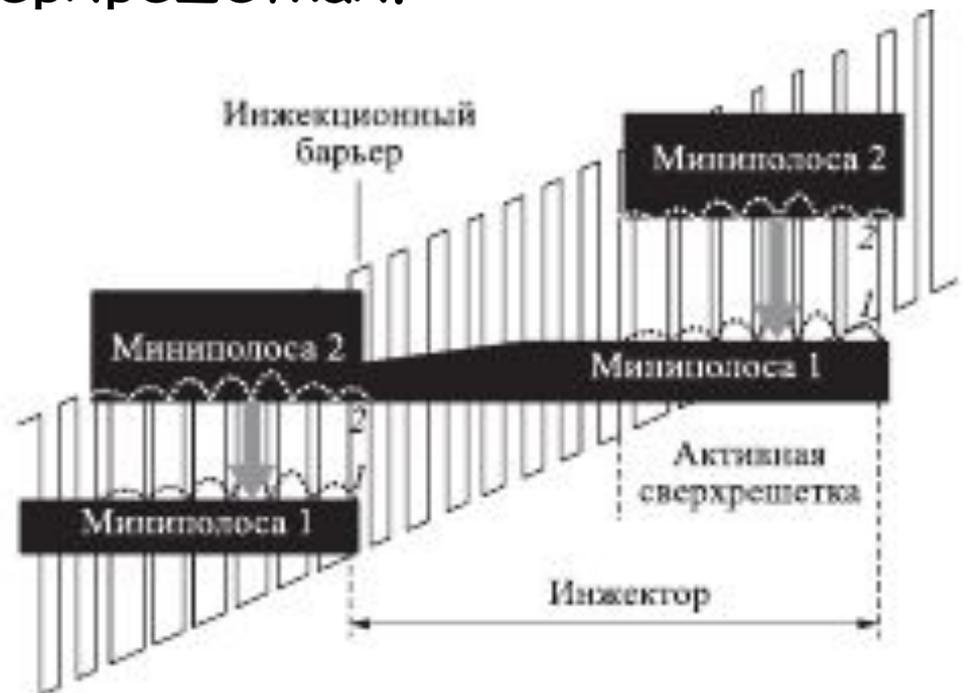


Схема лазера на сверхрешетках

Разработан лазер нового поколения, использующий в качестве активной среды фотонные кристаллы. Такой лазер обладает уникальными свойствами. Например, он может излучать в любом, заранее выбранном, направлении, что позволяет встраивать его в обычную полупроводниковую микросхему. Фотонный кристалл, являющийся активной средой этого лазера, представляет собой полупрозрачный диэлектрик с определенной периодической структурой и уникальными оптическими свойствами. Такой фотонный кристалл обеспечивает почти полное управление движением проходящего через него света из-за наличия в кристалле диэлектрика равномерно распределенных мельчайших отверстий. Их диаметр подобран таким образом, что одни отверстия пропускают световые волны лишь определенной длины, а остальные — частично отражают или поглощают эти волны. При определенном физическом воздействии на кристалл, например, звуковыми волнами, длина световой волны, пропускаемой кристаллом, и направление ее движения могут значительно меняться.

Многокаскадный полупроводниковый лазер представляет собой этакий «сэндвич», состоящий из нескольких (более двух) тончайших, в несколько нанометров толщиной, чередующихся слоев полупроводника с несколько отличающейся проводимостью. Если приложить к разным концам такого сэндвича электрическое напряжение, то электроны потекут сквозь эти слои весьма специфичным образом: накопив достаточно энергии, они синхронно «перепрыгивают» сквозь слой и падают в квантовую яму, излучая затраченную на переход энергию в виде фотонов. Характерная особенность такого лазера заключается в том, что он излучает непрерывно и равномерно, строго параллельно плоскости, в которой лежат слои полупроводников.

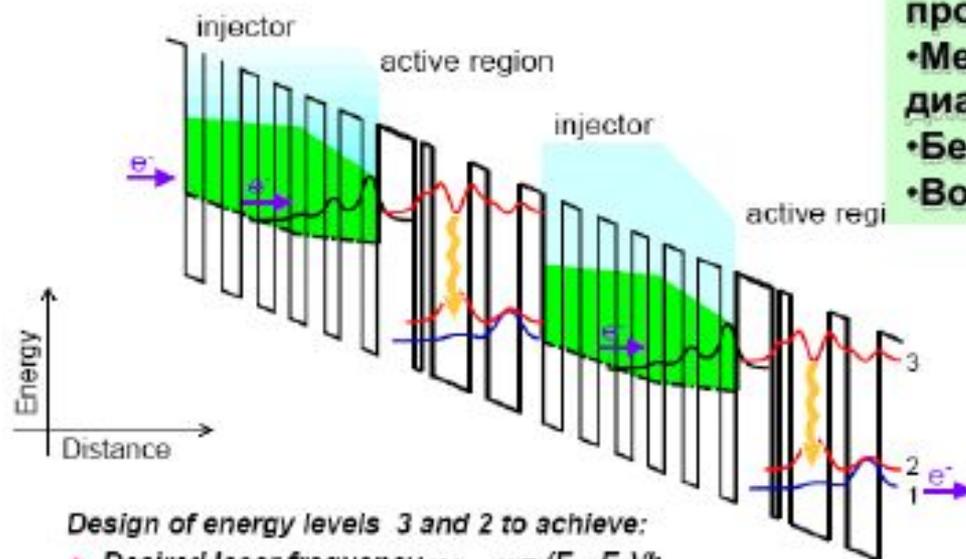
Лазерный излучатель имеет размер всего 50 мкм, что вдвое тоньше диаметра человеческого волоса. При помощи встроенных фотонных кристаллов удалось направить поток излучения от боков к поверхности пленки и заставить лазер излучать в вертикальном направлении. Таким образом, для использования нового лазера не нужны дополнительные устройства фокусировки, что позволит расширить область применения полупроводниковых лазеров. Велика вероятность того, что в будущем микросхемы, содержащие огромные массивы подобных лазерных излучателей, будут широко применяться в оптических телекоммуникациях, а также в качестве чувствительных сенсоров для различных датчиков.

# 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)

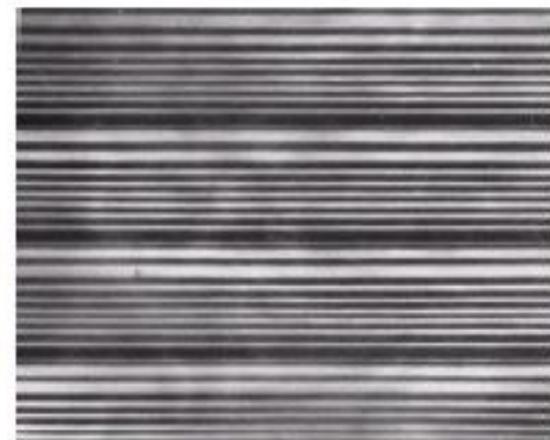
- Анализ окружающей среды
- Контроль промышленных процессов
- Транспорт - контроль сгорания топлива, противостолкновительные локаторы
- Медицина - анализ дыхания, ранняя диагностика
- Беспроводная оптическая связь
- Военные применения



Design of energy levels 3 and 2 to achieve:

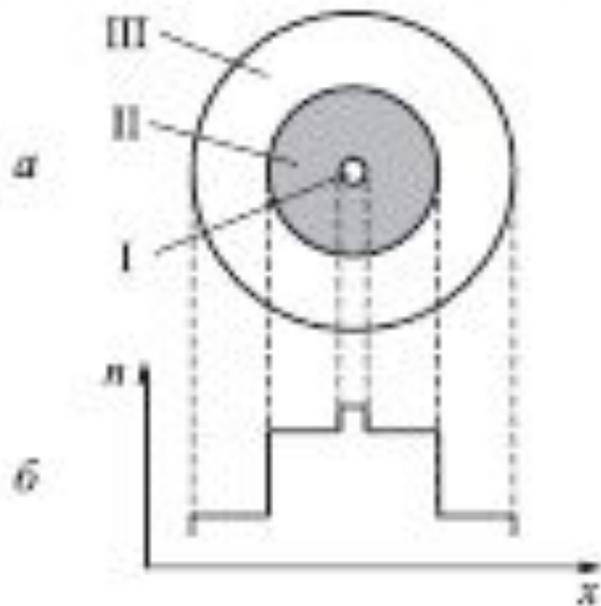
- Desired laser frequency  $\nu$ :  $\nu = (E_3 - E_2)/h$
- Light amplification: level 3 full of electrons; level 2 empty of electrons

45 nm



## Волоконные лазеры

Волоконный лазер представляет собой оптический квантовый генератор с активным волокном в качестве рабочей среды, внутри которого полностью или частично генерируется излучение, а накачка осуществляется излучением чаще всего диода. Активное одномодовое волокно световода имеет диаметр сердцевины в пределах от 10 до 30 мкм. Имеются участки волокна, в которых чередуются области с разным показателем преломления, играющие роль полупрозрачных зеркал лазера (рис.).



Поперечное сечение волоконного лазера (а) и профиль показателя преломления  $n$  по сечению волокна (б); I — активная сигнальная сердцевина, II — оболочка накачки, III — полимерная оболочка

Волоконные лазеры могут быть созданы на основе активного оптического волокна — кварцевого волокна, легированного редкоземельными элементами (иттербием, эрбием, неодимом, тулием, гольмием и другими). Возможно применение пассивного волокна с использованием эффекта вынужденного рамановского рассеяния. В этом случае оптический резонатор образует световод в сочетании с брэгговскими решетками показателя преломления, «записанными» в волокне. Такие лазеры называются волоконными рамановскими лазерами. Цельноволоконные лазеры полностью реализованы на оптическом волокне: в конструкции волоконно-дискретных или гибридных комбинируются волоконные и другие элементы. У волоконных лазеров отсутствуют свойственные обычным твердотельным лазерам недостатки, такие как искажение волнового фронта вследствие дефектов кристалла и флуктуации мощности излучения. Волоконные устройства экономичны — не требуют технического обслуживания, их системы охлаждения проще в силу более высокого КПД, и, как следствие, волоконные лазеры значительно более компактны. Волоконные лазеры обеспечивают выходную мощность до 50 кВт.

Излучение лазера распространяется внутри оптического волокна, и поэтому резонатор волоконного лазера не требует юстировки. Именно это обстоятельство обусловило интенсивное развитие волоконных лазеров. В волоконном лазере можно получать как одночастотную генерацию, так и генерацию ультракоротких (фемто-, пикосекундных) световых импульсов. Ключевую роль в достижении высоких мощностных показателей сыграло применение нанотехнологий в наноструктурированных волокнах и лазерных диодах, толщина активных слоев которых составляет менее 100 нм.

# 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  $AlIII BV$  (например, GaAs или InP) и  $AlIBVI$  (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

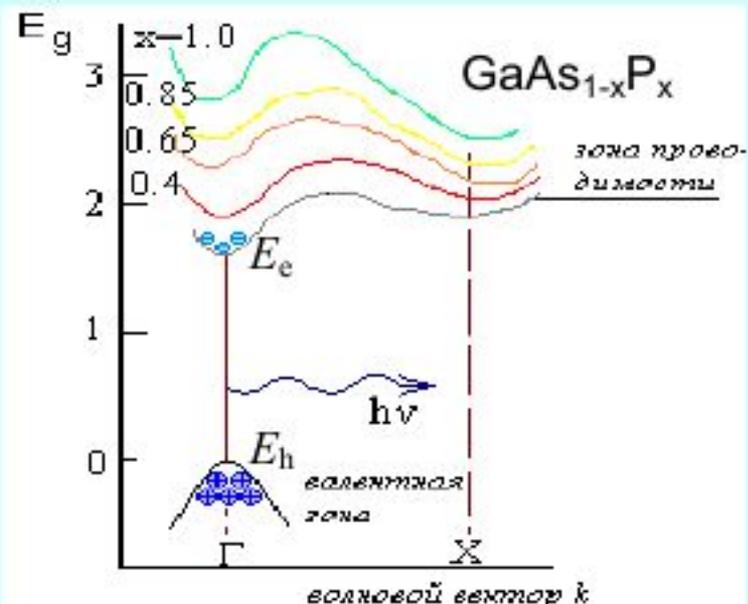
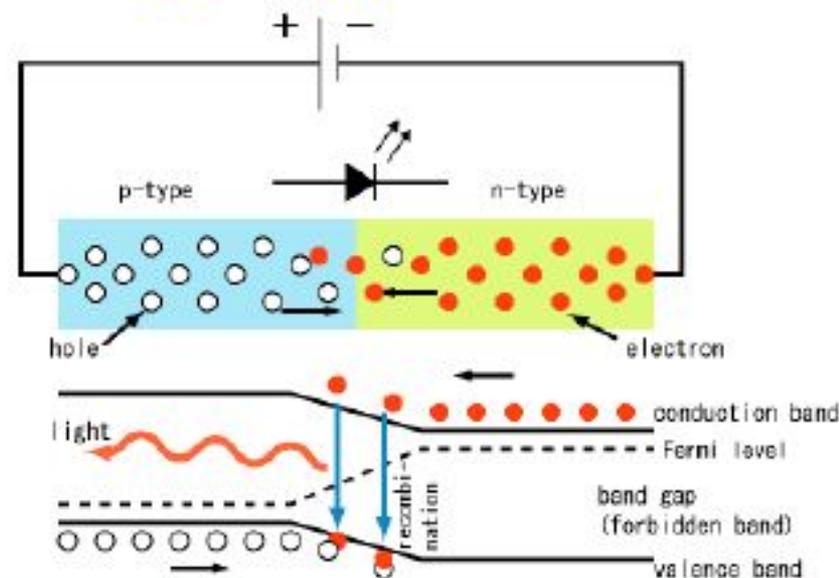
## Полупроводниковый светодиод

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:*

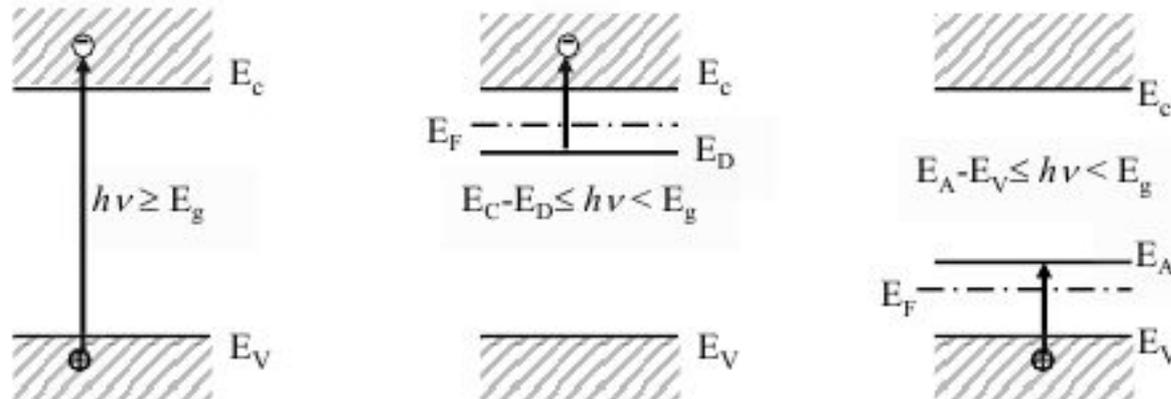
$$h\nu = E_e - E_h \approx E_g$$

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



# Полупроводниковые фотоприемники

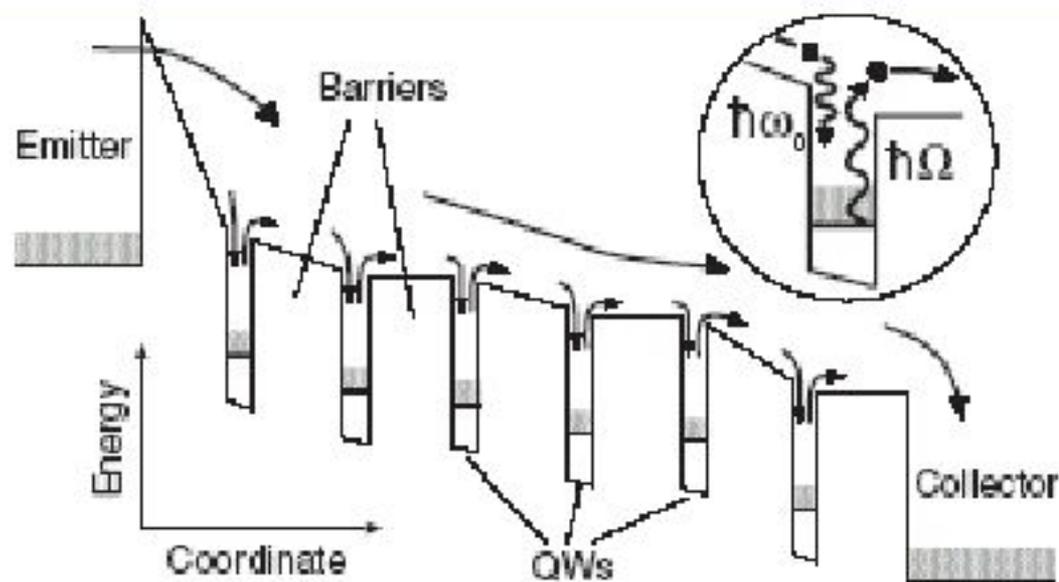
Спектральная чувствительность задается составом полупроводника, который определяет *ширину запрещенной зоны  $E_g$* , и составом введенных примесей уровни примесей.



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

## ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ

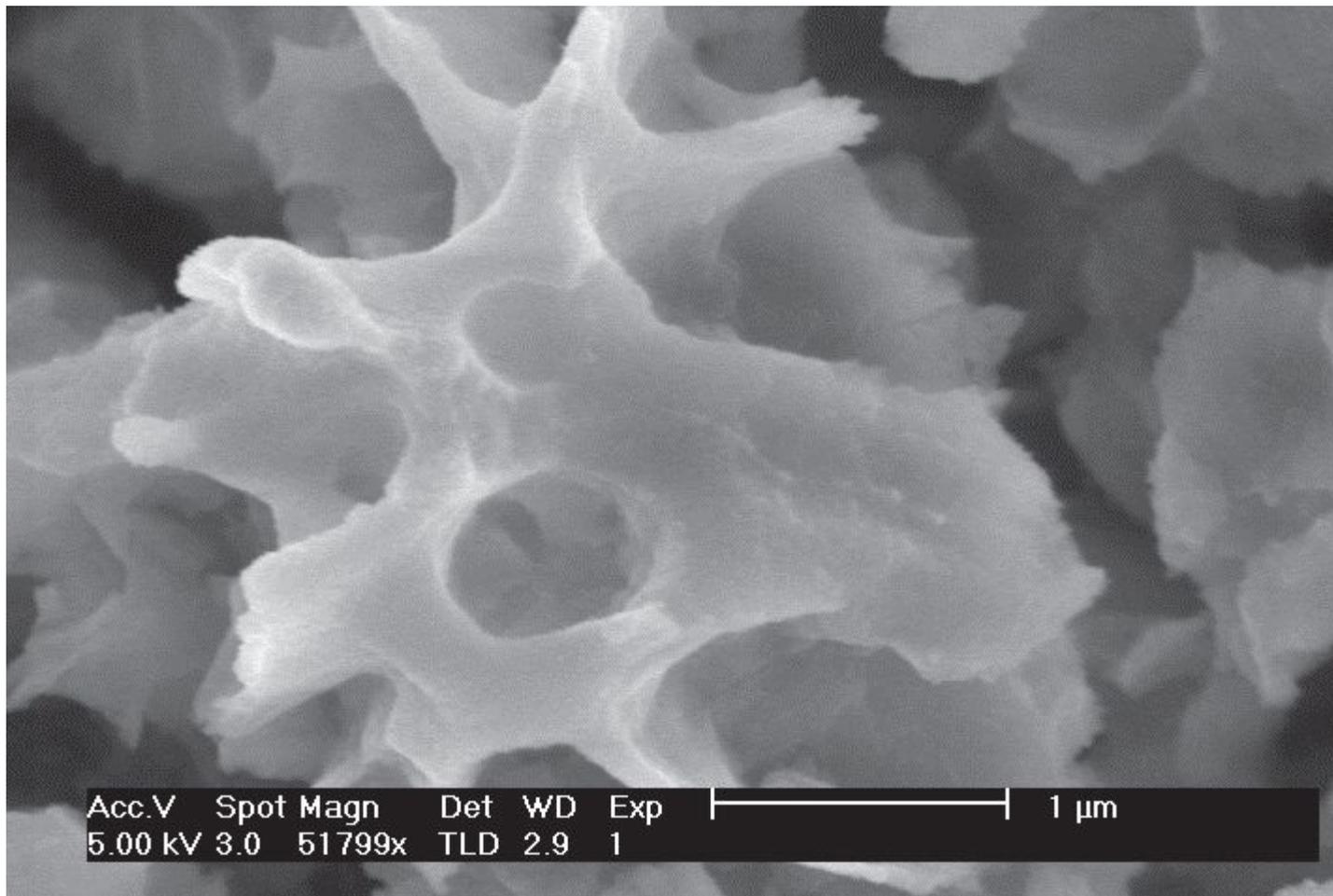
Структуры с квантовыми ямами могут использоваться не только для генерации, но и для модуляции светового излучения из области межзонного оптического поглощения. Физической основой эффекта модуляции являются два следующих экспериментальных факта:

- в структурах с квантовыми ямами наблюдаются резкие и значительно более интенсивные, чем в однородных полупроводниках, линии экситонного поглощения, причем не только при низкой, но и при комнатной температуре;
- спектральное положение линий заметно сдвигается при приложении сильного электрического поля перпендикулярно слоям гетероструктуры.

## Оптические хемосенсоры

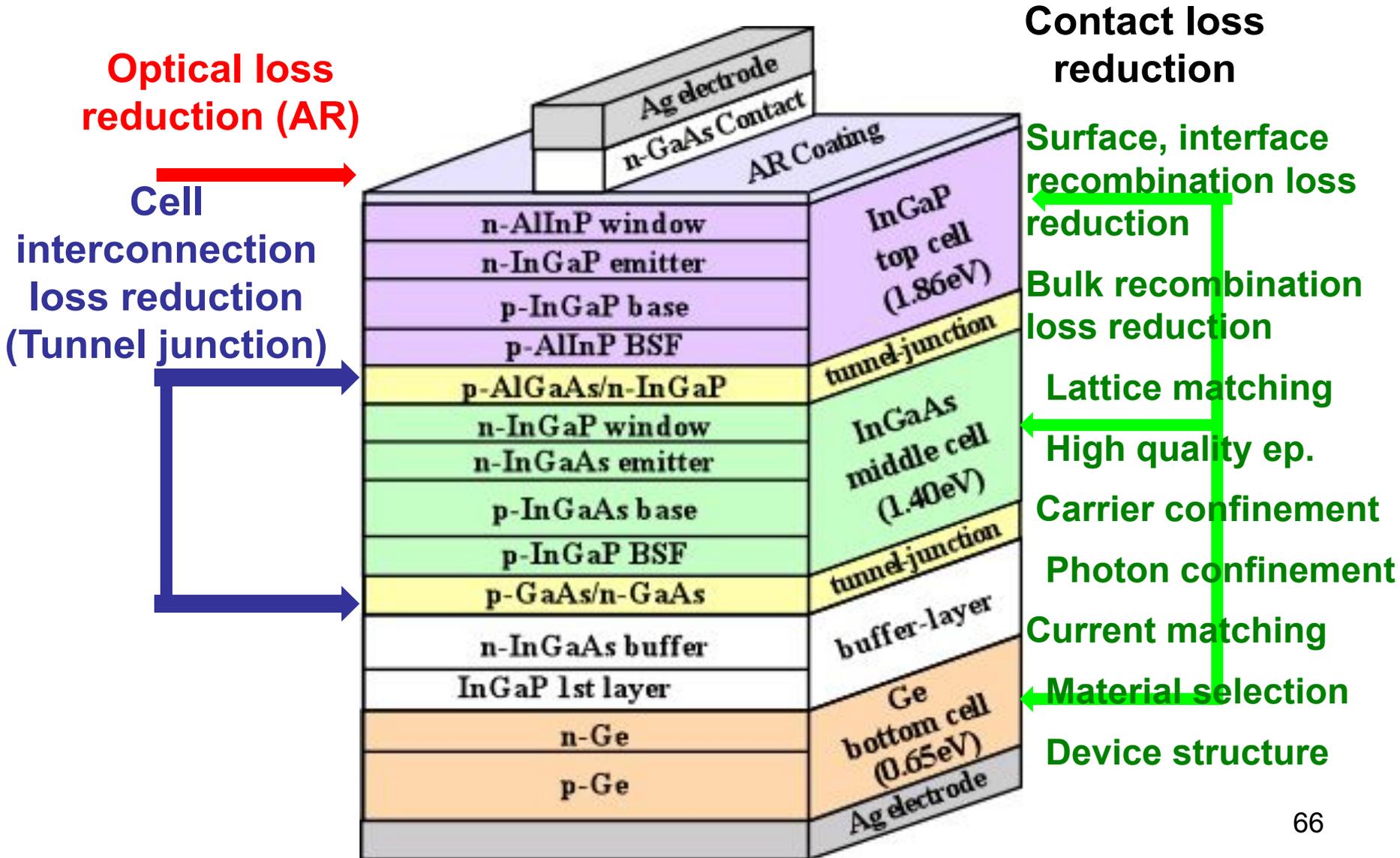
Отдельную самостоятельную область органической и гибридной нанофотоники представляют сенсорные системы. Центральное место занимает сенсорика химических и биологических веществ, направленная на контроль состояния человека и окружающей среды и осуществляемая автономными органическими наноэлектронными устройствами, имеющими малый вес и малый размер, состоящими из тонкоплёночных систем, включая газовый оптический хемосенсор (хемочип), термо- или фотоэлектрический источник питания, системы запасаения и преобразования энергии, обработки, отображения и передачи информации. Например, в настоящее время разрабатываются различные биометрические сенсоры, представляющие собой комбинацию матриц светоизлучающих диодов и фотодетекторов.

# Фотоэлектрические преобразователи энергии

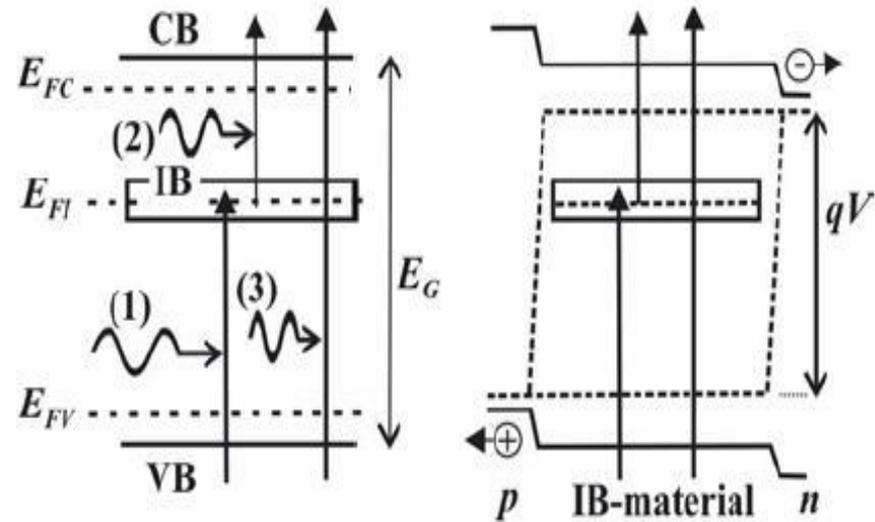
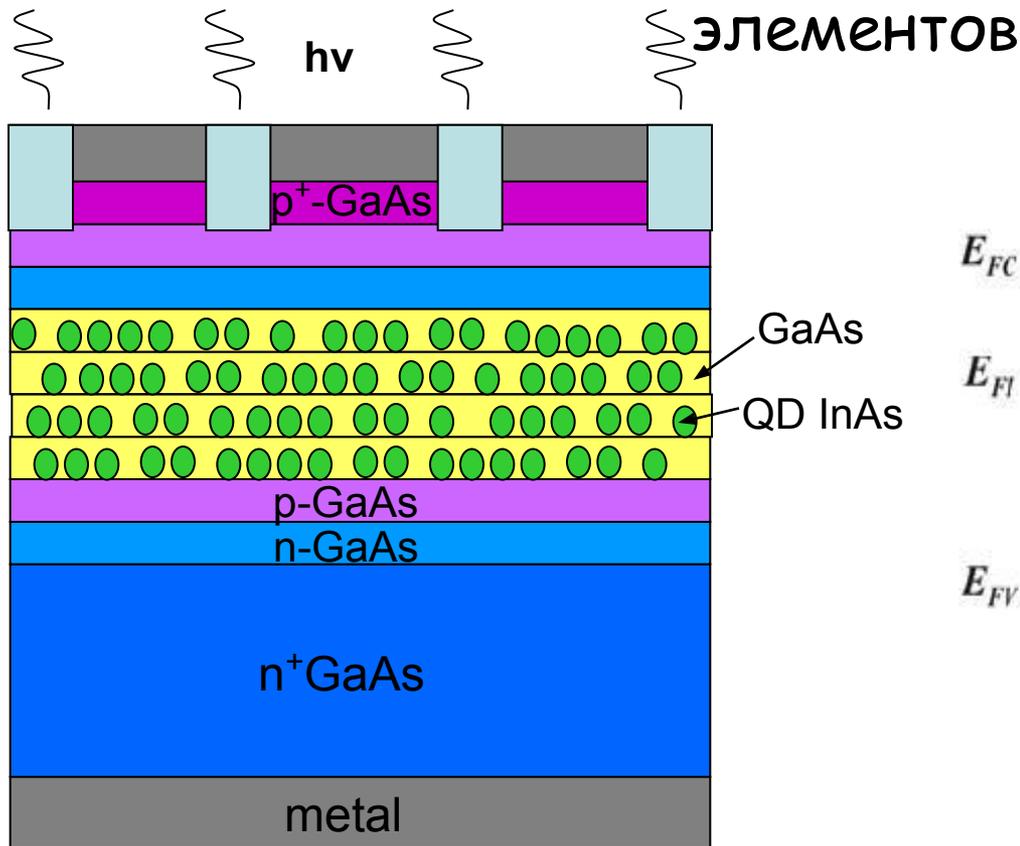


Вариант микроструктуры пористого кремния

Tandem solar cells providing the efficiency >30% at 500-1000 suns



# Структуры с квантовыми точками для солнечных элементов



*Выращивание КТ узкозонного материала InAs размером  $\sim 5 - 15$  нм вблизи p-n перехода вносит промежуточную зону (IB) в запрещенную зону объемного материала GaAs [3]. Фотоны с энергией большей, чем ширина запрещенной зоны объемного материала поглощаются в объеме, а фотоны с энергией, меньшей, чем ширина запрещенной зоны объемного материала могут вызывать оптические переходы из  $E_V$  в IB, а также из IB в  $E_C$ . Что позволяет достичь эффективности более 70 % за счет суммирования энергии двух длинноволновых квантов света, которые не поглощаются в материале широкозонного полупроводника, а поглощаются материалом КТ.*

К направлениям нанофотоники можно отнести исследования физических основ генерации и поглощения излучения в оптическом спектре К направлениям нанофотоники можно отнести исследования физических основ генерации и поглощения излучения в оптическом спектре в гетероструктурах с квантовыми слоями, нитями и точками.

Разработку полупроводниковых и сверхпроводниковых источников и детекторов электромагнитного излучения.

Разработку светодиодов на основе полупроводниковых гетероструктур и на органической основе.

Разработку твердотельных и органических лазеров.

Разработку элементов солнечной энергетики.

Разработку наноструктурированных оптических волокон и устройств на их основе.

Разработку элементов фотоники и коротковолновой нелинейной оптики.

К перспективным направлениям миниатюризации фотонных устройств и их интеграции в сложные системы относится использование фотонных кристаллов.

Изготовление и исследование свойств наноразмерных оптических резонаторов сейчас является одним из самых интересных направлений развития нанофотоники, представляющих большую практическую и научную ценность.