



МИОО
МПГУ

Учебно-научный центр
функциональных и наноматериалов

Методика формирования представлений учащихся о нанотехнологиях в общеобразовательной школе

НАНОТЕХНОЛОГИЯ

Третья
научно-техническая
революция

ЛЕКЦИЯ 3

СВЕРХРЕШЕТКИ И ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

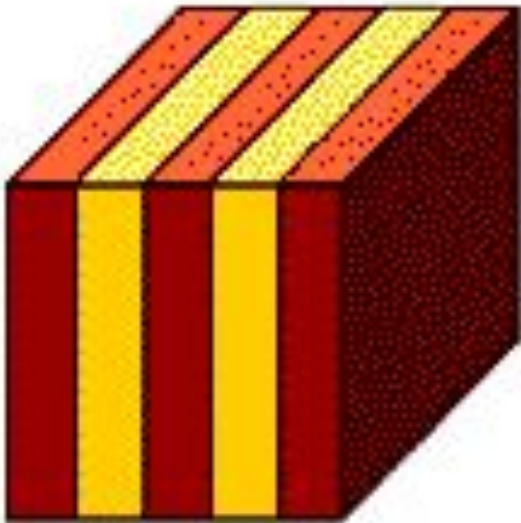
СВЕРХРЕШЕТКИ

Твердые тела с **периодическим** чередованием областей, в которых какая либо физическая величина, характеризующая свойства тела (магнитные свойства, электрические, упругих и т. д.), имеет разные значения. При этом размеры таких областей и расстояния между ними на несколько порядков больше межатомных расстояний.

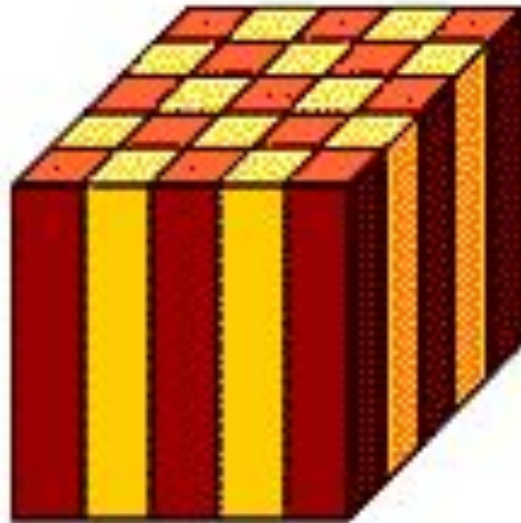
Еще в 1962 г. академик Л.В.Келдыш рассмотрел теоретически сверхрешетку и особенности ее *зонной структуры*.

Модели сверхрешеток разной размерности

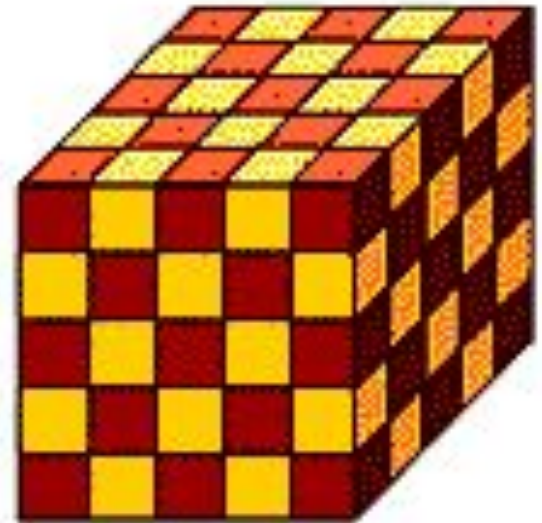
1D



2D



3D



Полупроводниковые сверхрешетки

В 1970 г. будущий нобелевский лауреат Л.Эсаки и Р.Цу создали первую искусственную *сверхрешетку* – периодически расположенные в полупроводнике квантовые ямы и барьеры. Это было началом практической инженерии зонной структуры.

Если гетеропереходы находятся на расстояниях меньше 100 нанометров – это уже наноструктура.

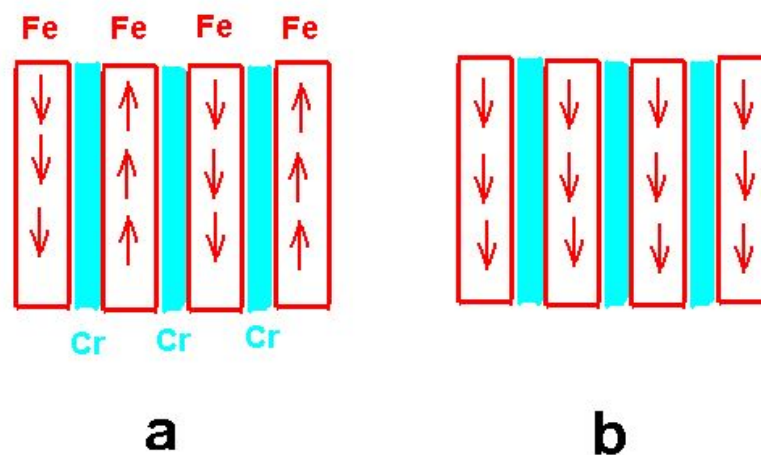
Современная технология позволяет формировать такие наноструктуры с атомарной точностью, что позволяет ввести термины «инженерия зонной структуры» и «инженерия волновых функций»

1D магнитная сверхрешетка

Гигантское магнитосопротивление (ГМС) в нанослоях Fe-Cr:

a – ориентация магнитных моментов атомов железа (красные стрелки) в нанослоях в отсутствии магнитного поля: структура антиферромагнитна;

b – магнитное поле выше некоторой критической величины делает структуру ферромагнитной



Разница между сопротивлениями структуры при параллельном и антипараллельном направлении намагниченности в соседних слоях называется **ГМС-соотношением**. Изменить это направление можно при приложении внешнего магнитного поля. В используемых сейчас структурах при комнатных температурах эффект составляет 20 и более процентов.

Именно применение эффекта ГМС позволило за несколько последних лет увеличить информационную плотность жестких дисков в 20 раз.

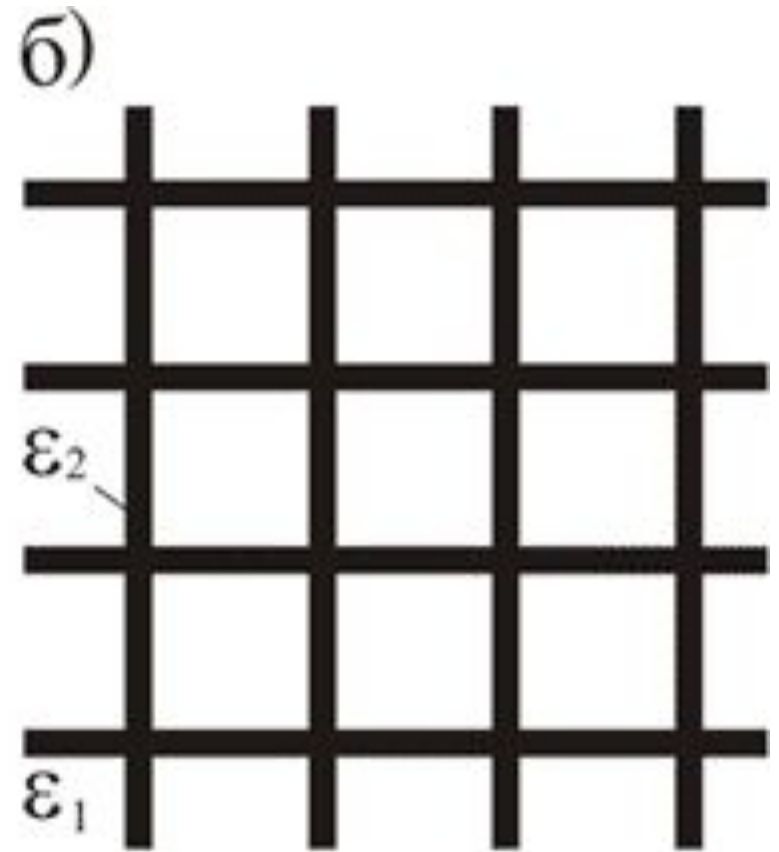
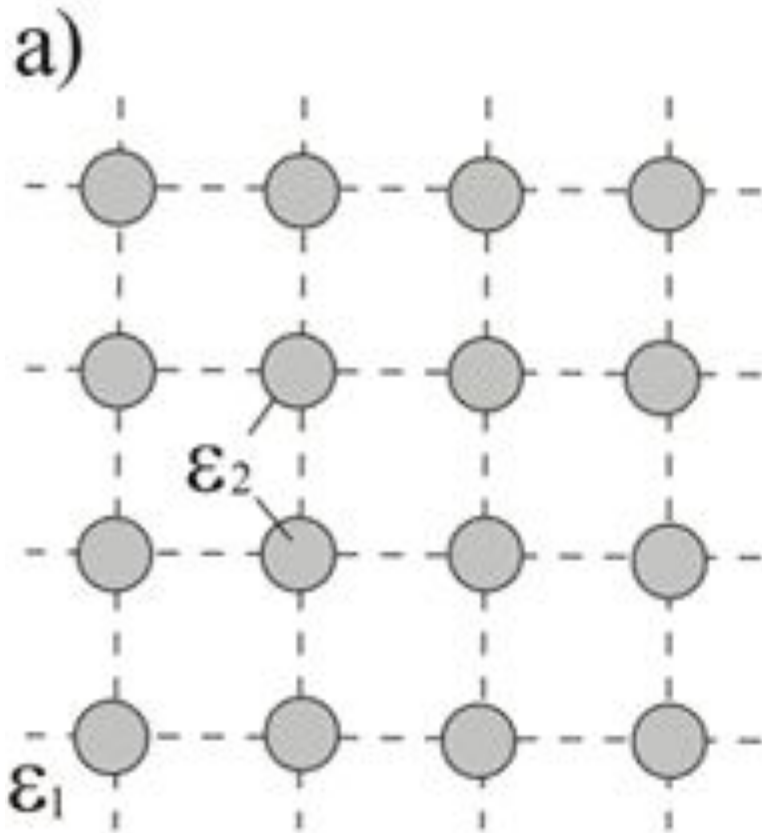
Нобелевская премия по физике 2007 года была присуждена Петеру Грюнбергу ([Peter Grünberg](#)) Нобелевская премия по физике 2007 года была присуждена Петеру Грюнбергу (Peter Grünberg) и Альберу Феру ([Albert Fert](#)) за открытие



АГНИТОС



Модели фотонных кристаллов – оптических сверхрешеток



**Первую искусственную
сверхрешетку
для миллиметрового
диапазона
электромагнитных волн создал
в 1989 году**

Эли Яблонович

Он же ввел понятие
*запрещенной зоны для
электромагнитных волн
(photonic band gap)*

Эли Яблонович



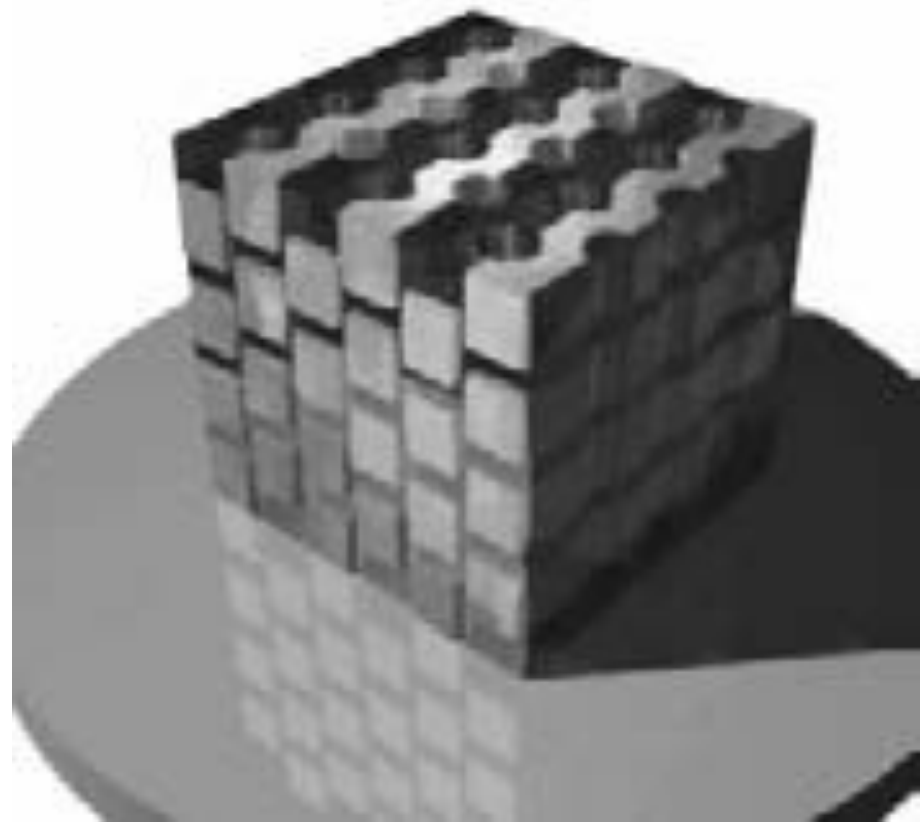
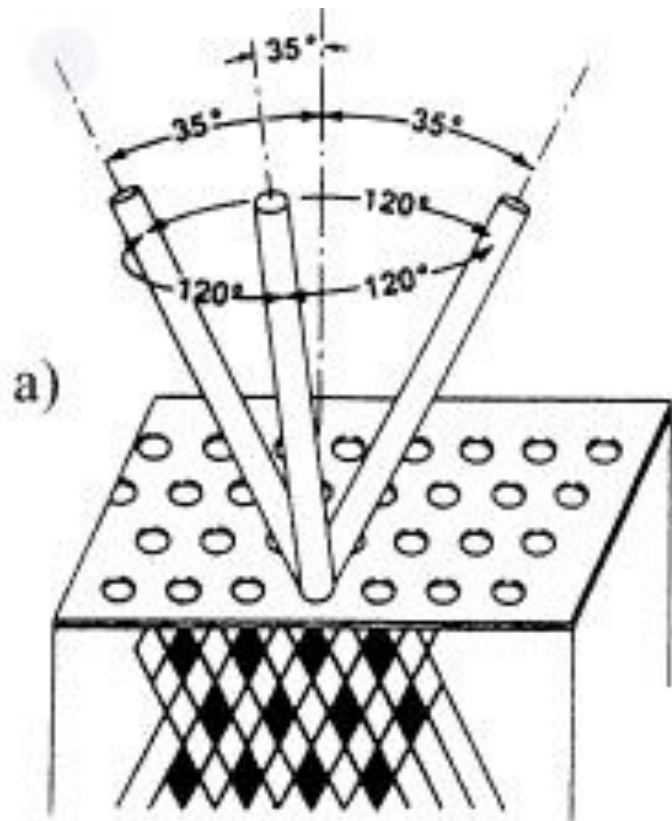
**Физическая природа
возникновения запрещенных
зон для электронов и фотонов
одна и та же – это условия
распространения волн в среде
с периодически
изменяющимися свойствами**

По аналогии с классической зонной теорией **фотонные кристаллы делят на проводники, изоляторы и полупроводники.** Фотонные проводники для видимого света обладают

широкими разрешенными зонами, в них свет на больших расстояниях почти не поглощается. У фотонных изоляторов широкие запрещенные зоны, у фотонного полупроводника они более узкие. В отличие от обычных непрозрачных сред, в которых световая энергия поглощается и переходит в тепловую, фотонные изоляторы не поглощают свет, он просто в них не может распространяться.

В запрещенной зоне фотонных кристаллов можно создавать энергетические уровни, аналогичные **донорным и акцепторным уровням** для классических полупроводников. Такой **примесной проводимости** соответствуют, например, пустоты на месте некоторых элементов фотонного кристалла, их объединение в нитевидные полости или заполнение отдельных элементов веществом с другим значением показателя преломления

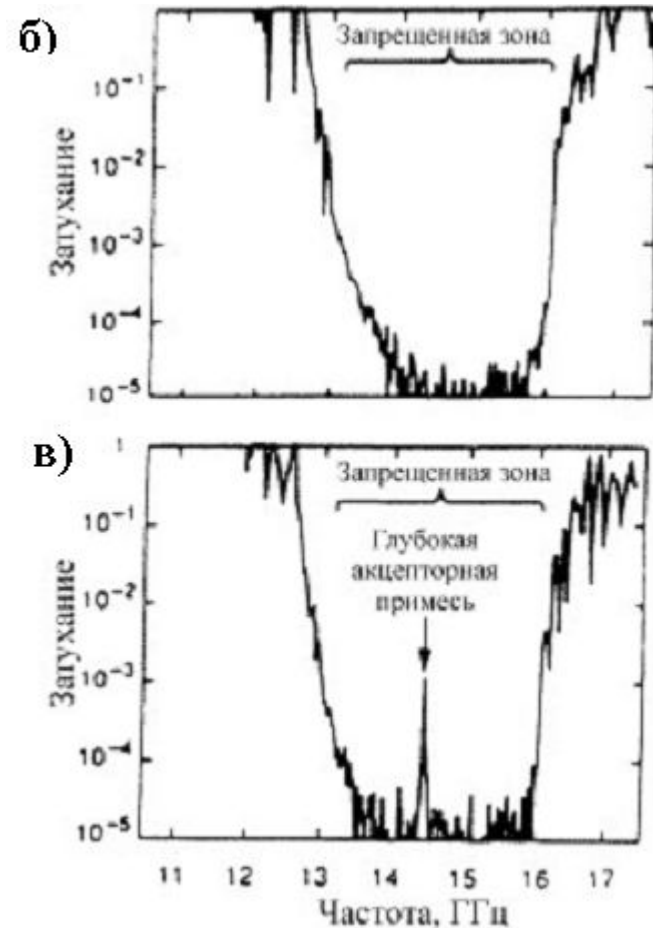
Схема получения «яблоновита»



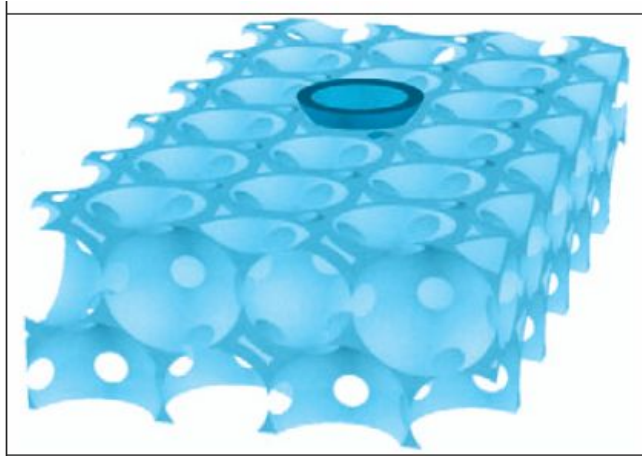
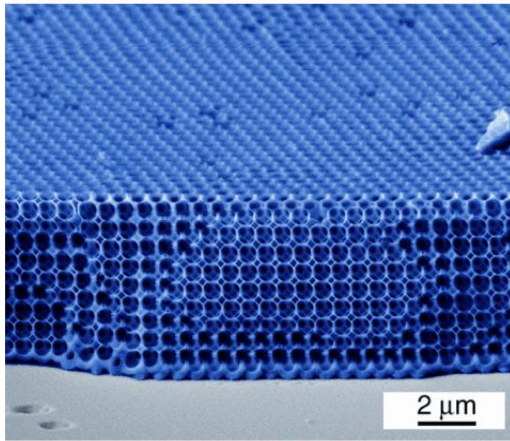
Зонная структура «яблоновита»

б) – частотная зависимость затухания электромагнитного излучения при его прохождении через «яблоновит»;

в) – появление дополнительного пика затухания в запрещенной зоне за счет создания одиночного акцепторного дефекта



ФК с регулируемой запрещенной зоной



В 1999 г группа ученых во главе с Саджива Джонсоном (из университета Торонто) создали структуру с управляемой запрещенной зоной на основе инвертированного искусственного опала с периодически расположенными сферическими пустотами. Ширина запрещенной зоны 1380-1620 нм.

Покрытие пустот веществом с низким коэффициентом преломления позволило осуществлять управление запрещенной зоной с помощью внешнего магнитного поля

В современной оптоэлектронике электронные и фотонные разрешенные и запрещенные зоны приходится рассматривать совместно:
например, электрон и дырка не могут *рекомбинировать* с выделением фотона, если энергия их рекомбинации (энергия фотона) попадает в запрещенную фотонную зону. В этом случае время жизни возбужденного атома может быть увеличено во много раз.

Кластерная сверхрешетка опала – модель фотонного кристалла

Опал является примером природного, хотя и не вполне совершенного фотонного кристалла. В нем периодическую «решетку» образуют достаточно крупные по сравнению с атомами *кластеры* кремнезема SiO_2 (на рисунке модели они выделены зеленым цветом)

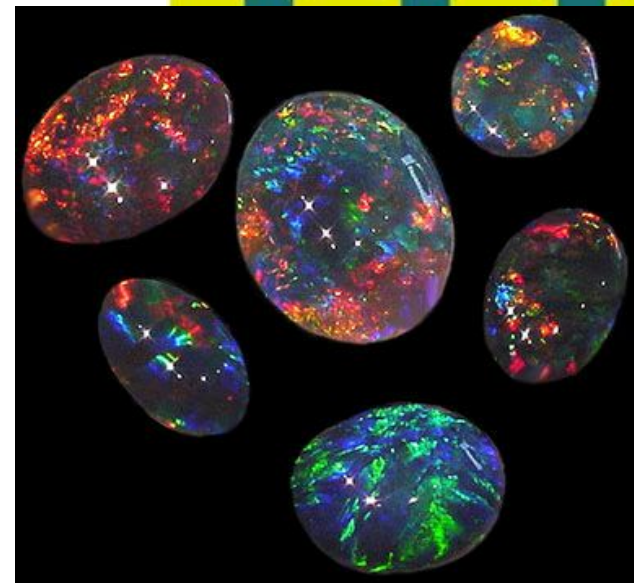
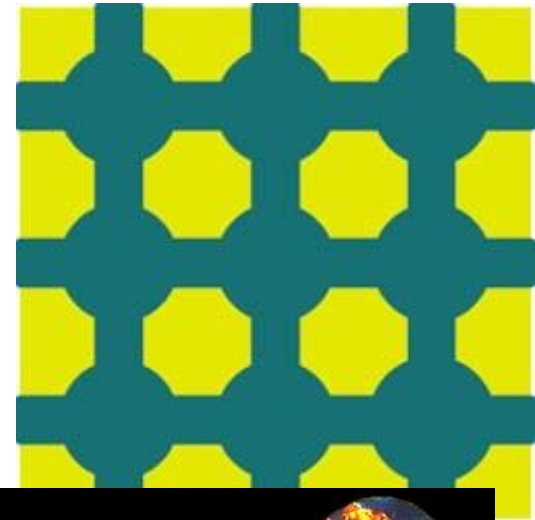
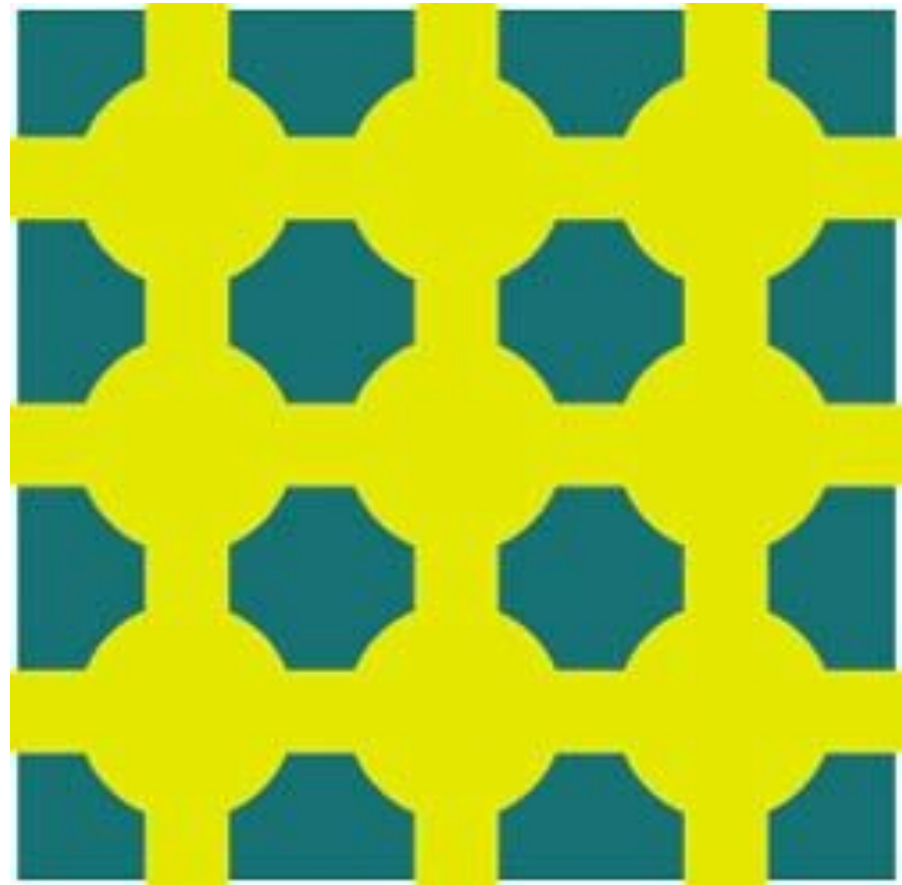
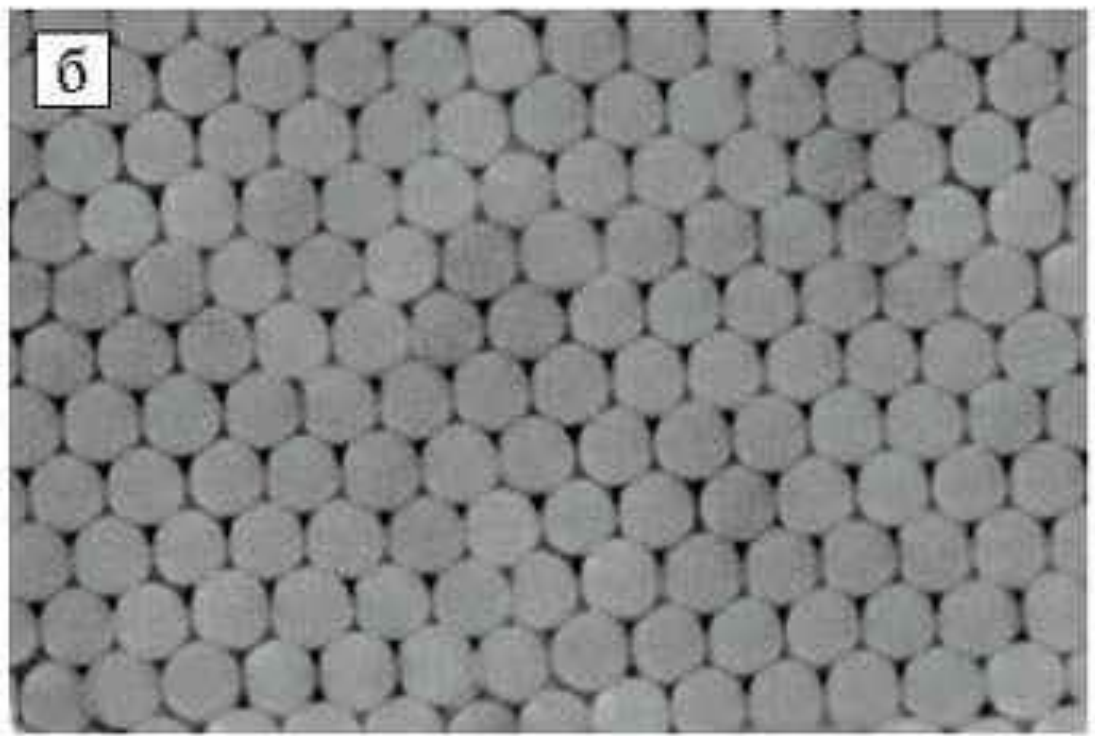
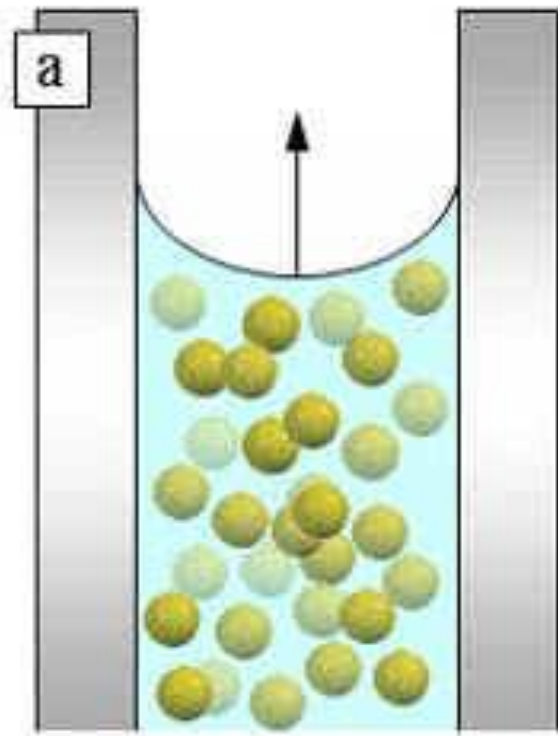


Схема реплики со сверхрешетки опала (инвертированный опал)

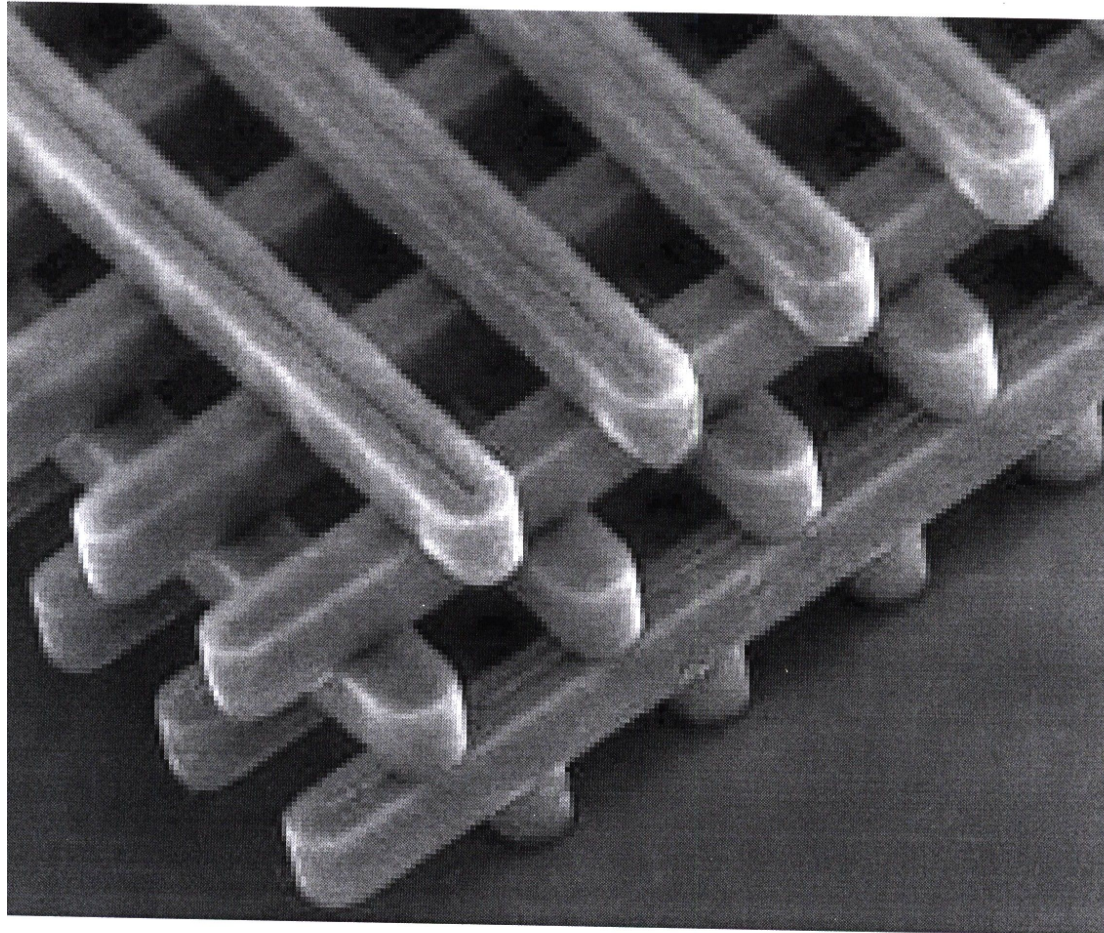
Внутреннюю полость пустот можно обрабатывать различными веществами, тем самым управляя коэффициентом преломления, а значит и свойствами фотонного кристалла. Если полости покрыты веществом, меняющим коэффициент преломления под действием электрического или магнитного поля, это позволяет управлять положением запрещенной зоны.



Самосборка системы сферических микрочастиц в плотноупакованный фотонный кристалл



**«Дровяная поленница»
из кремниевых полосок
(получена методом литографии)**



Методы получения ФК

Два основных подхода:

1. «сверху-вниз» с использованием методов литографии, что не позволяет их изготавливать дешево и в больших количествах;

2. «снизу-вверх», процесс самосборки.



Фотолитография

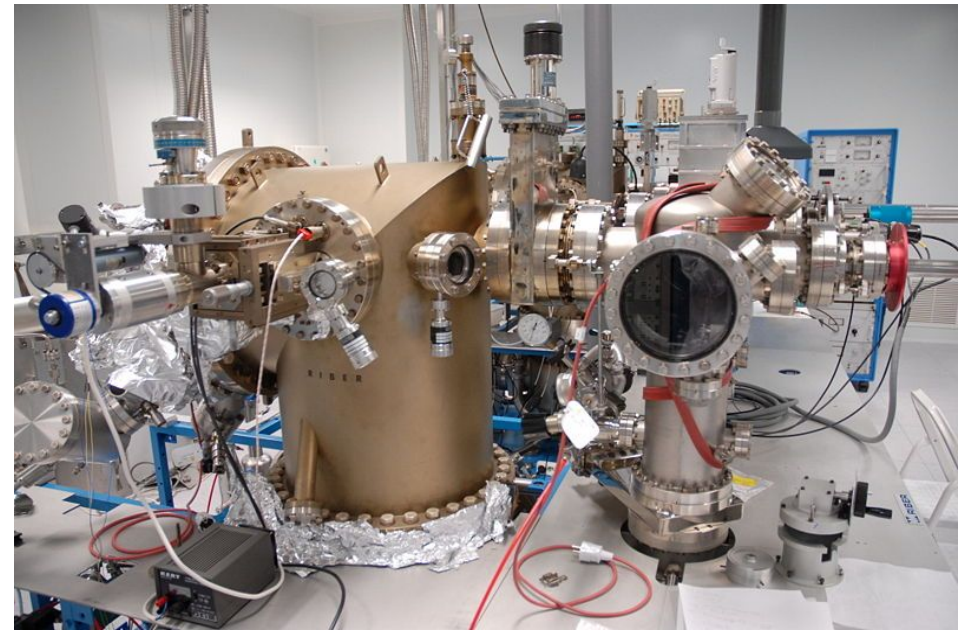
Процесс фотолитографии:

- На подложку наносят тонкий слой материала, из которого нужно сформировать рисунок. На этот слой наносится *фоторезист*.
- Производится экспонирование через *фотошаблон* (контактным или проекционным методом).
- Облучённые участки *фоторезиста* изменяют свою растворимость и их можно удалить химическим способом (процесс травления). Освобождённые от *фоторезиста* участки тоже удаляются.
- Заключительная стадия — удаление остатков *фоторезиста*



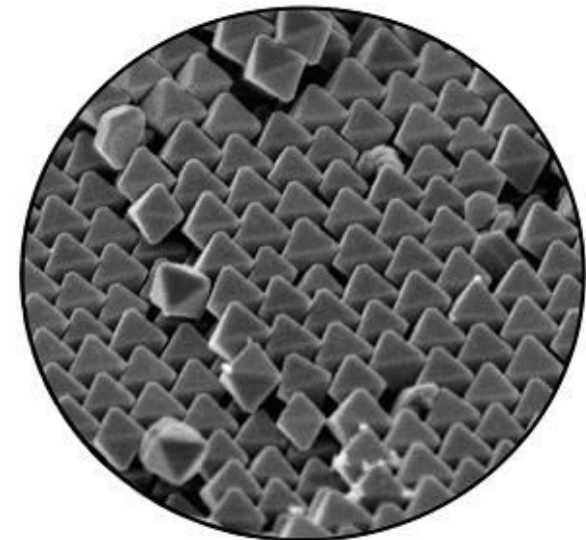
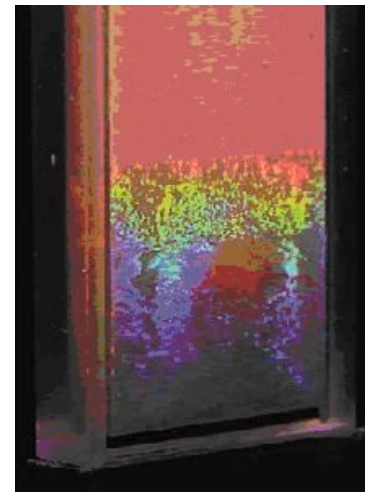
Молекулярно-лучевая эпитаксия

В основе метода лежит осаждение испаренного в молекулярном источнике вещества на кристаллическую подложку. Несмотря на достаточно простую идею, реализация данной технологии требует чрезвычайно сложных технических решений.



Самосборка серебряных наночастиц

Кювета содержит раствор серебряных наночастиц, их оптические параметры существенно зависят от расстояний между частицами. В верхней части кюветы частицы находятся на довольно больших расстояниях друг от друга; внизу- наночастицы плотно упакованы

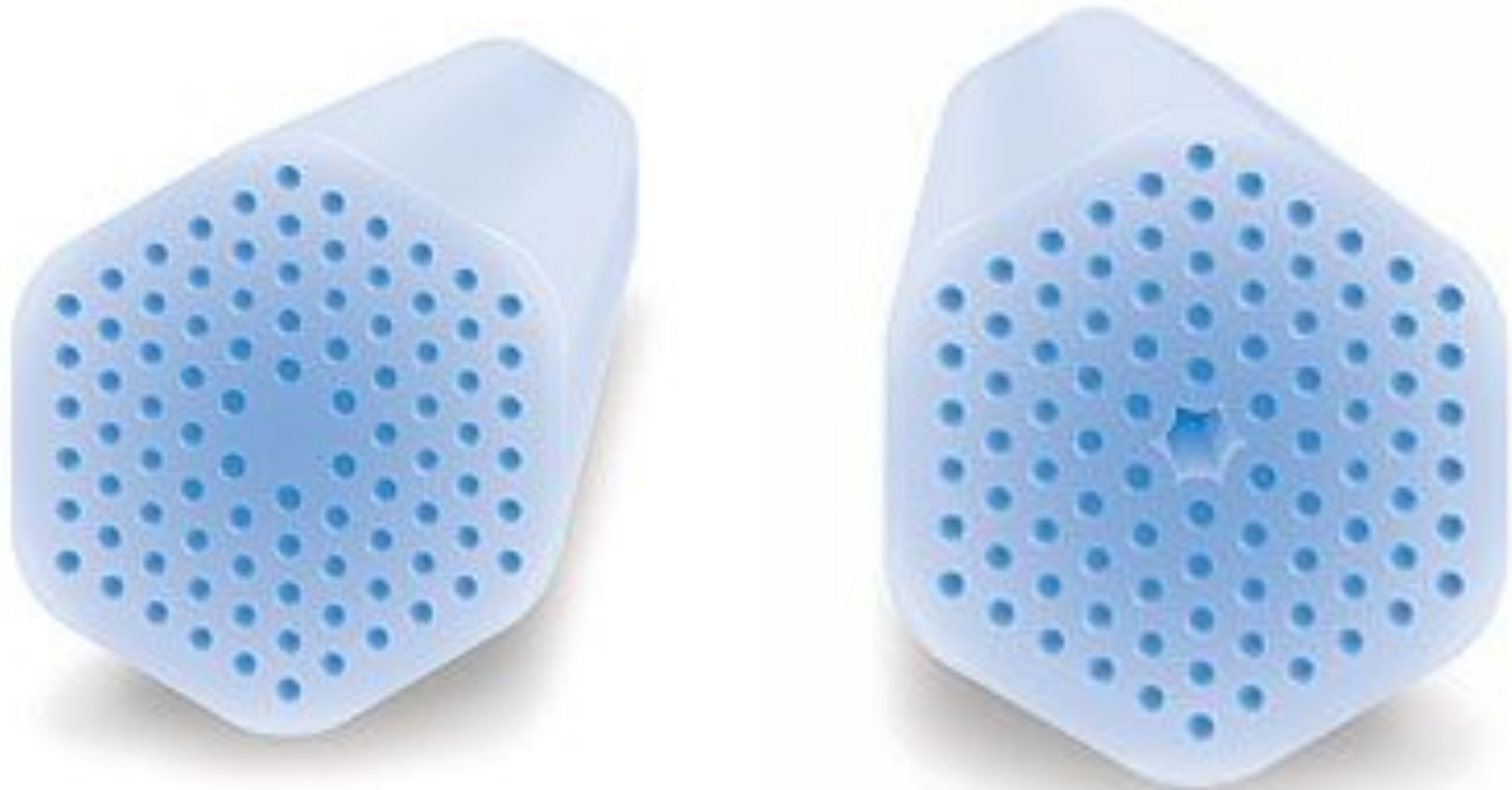


Фотонные кристаллы - световоды

Принцип действия традиционных световодов – многократное полное внутреннее отражение света. В случае фотонных кристаллов передача энергии по световоду происходит по принципиально иному механизму. Световые волны не могут распространяться в поверхностных слоях световода (фотонного кристалла) за счет наличия в них запрещенной зоны

**Эффективность передачи в
уже созданных фотонных
кристаллах типа «поленница»
составляет 95 процентов;
для стандартных
светопередающих сред этот
показатель порядка 30
процентов**

Фотонные световоды на основе отработанной волоконно-оптической технологии



Преимущества передачи информации с помощью фотонов

- Интерес к фотонным проводникам связан в частности с тем, что в них не выделяется тепло. Между тем тепловыделение - одно из главных препятствий на пути увеличения плотности интегральных схем и тактовой частоты.
- Второй проблемой является взаимная *самоиндукция*, характерная для высокочастотных электронных устройств. Для потоков света эта проблема не возникает.

Вторая уже реальная в ближайшее время область применения фотонных кристаллов – повышение на порядок эффективность ламп накаливания. В настоящее время только 5 % энергии из выделяемой лампой накаливания попадают в диапазон видимой части света, остальная энергия выделяется в виде ненужного и даже вредного тепла (в качестве примера взята вольфрамовую нить, позволяющая обеспечить нагрев до 2000°C). Идеальным материалом был бы фотонный кристалл, для которого инфракрасный диапазон попадает в запрещенную зону, а основная часть энергии излучается в видимой области спектра. В одном эксперименте был использован фотонный кристалл-губка из вольфрама, широкая запрещенная зона позволила повысить эффективность лампы накаливания до 60%.