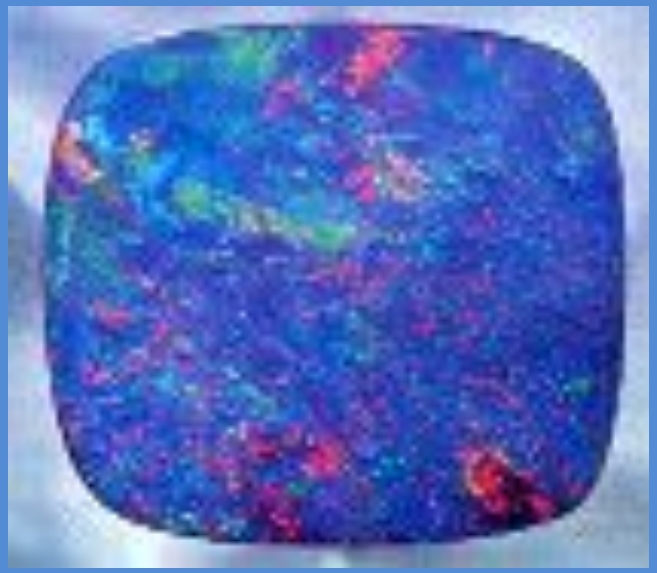
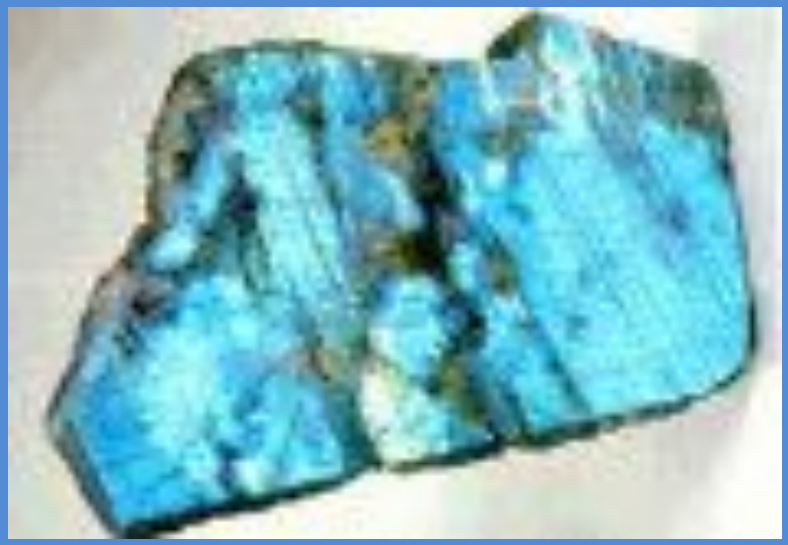
Фотонные кристаллы
Нанофотоника

Фотонные кристаллы в природе - большая редкость. С древних времен человека, нашедшего такой кристалл, завораживала в нем особая радужная игра света. Это оптическое явление, заключающееся в появлении радужной игры цветов на гранях и плоскостях спайности некоторых минералов при прохождении света, получившее название иризация (от греч. - радуга), характерно для таких минералов, как кальцит, лабрадор, опал.





Это явление, как оказалось, одной природы с множеством других завораживающих природных загадок. Недавно было выяснено, что радужные переливы чешуек и перьев различных животных и насекомых обусловлены существованием на них сверхструктур, получивших за свои анизотропные отражающие свойства название **фотонные кристаллы.**

Интереснее всего то, что фотонная система крылышек бабочек, в отличие от сложной системы в промышленных светодиодах, не является строго упорядоченной и в то же прекрасно работает, производя ошеломляюще яркое излучение. Природа в очередной раз продемонстрировала, как редко в ней встречаются правильные периодические структуры. „Нерегулярные“ фотонные кристаллы, подобные чешуйкам бабочек, гораздо легче изготовить, и этот метод может стать новым этапом в развитии технологии светодиодов будущего».

Морская мышь уже давно применяет на практике фотонные кристаллы. Мех этого червя обладает столь ярко выраженным явлением иризации, что способен селективно отражать свет с эффективностью, близкой к 100% во всей видимой области спектра - от красной до зеленой и голубой, - такой специализированный "бортовой" оптический компьютер помогает выживать этому червю на глубине до 500 м.

Фотонные кристаллы (photonic crystals, «коллоидные кристаллы» по старой терминологии) - это материалы с упорядоченной структурой, характеризующейся строго периодическим изменением коэффициента преломления в масштабах, сопоставимых с длинами волн излучений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Фотонные кристаллы, благодаря периодическому изменению коэффициента преломления, позволяют получить разрешенные и запрещенные зоны для энергий фотонов, аналогично полупроводниковым материалам, в которых наблюдаются разрешенные и запрещенные зоны для энергий носителей заряда. Практически, это значит, что если на фотонный кристалл падает фотон, обладающий энергией (длиной волны, частотой), которая соответствует запрещенной зоне данного фотонного кристалла, то он не может распространяться в фотонном кристалле и отражается обратно. И наоборот, это значит что если на фотонный кристалл падает фотон, обладающий энергией (длиной волны, частотой), которая соответствует разрешенной зоне данного фотонного кристалла, то он может распространяться в фотонном кристалле. Другими словами, фотонный кристалл выполняет функцию оптического фильтра.

С общей точки зрения фотонный кристалл является сверхрешеткой (crystal superlattice) - средой, в которой искусственно создано дополнительное поле с периодом, на порядки превышающим период основной решетки. Для фотонов 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.

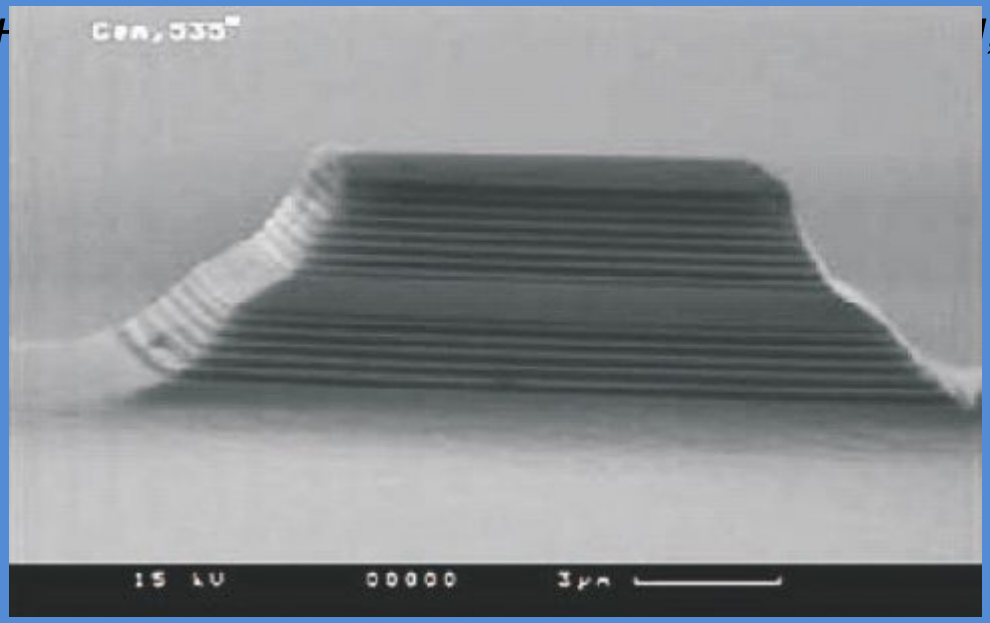
Кассификация фотонных кристаллов.

Фотонные кристаллы по характеру изменения коэффициента преломления можно разделить на три основных класса:

- **Одномерные фотонные кристаллы**
- **Двумерные фотонные кристаллы**
- **Трехмерные фотонные кристаллы**

Одномерные фотонные кристаллы, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в одном пространственном направлении как показано на рисунке. На этом рисунке символом Λ обозначен период изменения коэффициента преломления, *n1 и n2 - показатели преломления двух материалов (но в общем случае может присутствовать любое число материалов). Такие фотонные кристаллы состоят из параллельных друг другу слоев различных материалов с разными коэффициентами преломления и могут проявлять свои свойства в одн*[illegible], *перпендикулярном слоям.*

Схематическое представление одномерного фотонного кристалла

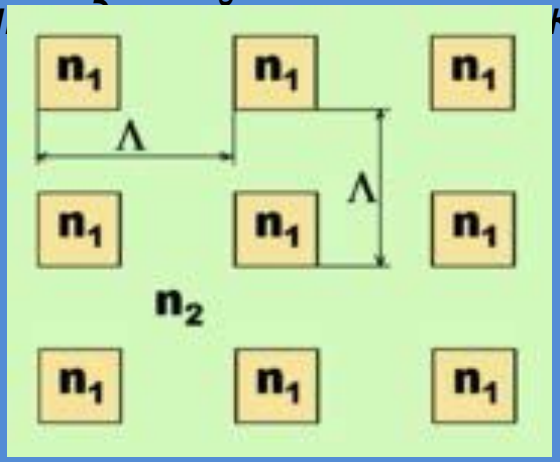


Электронный снимок одномерного ФК

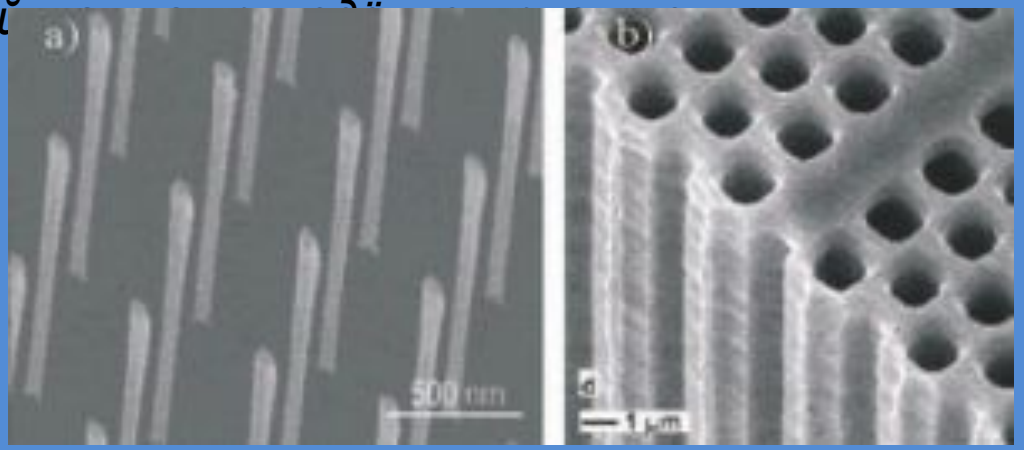
Одним из первых практически важных применений таких структур стало изготовление диэлектрических покрытий с уникальными оптическими характеристиками, применяемых для создания высокоэффективных оптических спектральных фильтров и снижения нежелательного отражения от оптических элементов (такая оптика получила название просветленной) и диэлектрических зеркал с коэффициентом отражения, близким к 100%. В качестве другого хорошо известного примера 1D-фотонных структур можно упомянуть полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью, а также оптические волноводы с периодической продольной модуляцией физических параметров (профиля или коэффициента преломления).

Наконец, обычные штриховые дифракционные решетки - это тоже пример 1D-фотонных структур: по аналогии с ними фотонные кристаллы называют иногда трехмерными дифракционными решетками.

Двумерные фотонные кристаллы, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в двух пространственных направлениях. На этом рисунке фотонный кристалл создан прямоугольными областями с коэффициентом преломления *n1, которые находятся в среде с коэффициентом преломления n2. При этом, области с коэффициентом преломления n1 упорядочены в двумерной кубической решетке. Такие фотонные кристаллы могут проявлять свои свойства в двух пространственных направлениях, и форма областей с коэффициентом преломления n1 не ограничивается прямоугольниками, как на рисунке, а может быть любой (окружности, эллипсы, произвольная и т.д.). Кристаллическая решётка, в которой упорядочены эти области, также может бы* *кубической*



Схематическое представление двумерного фотонного кристалла

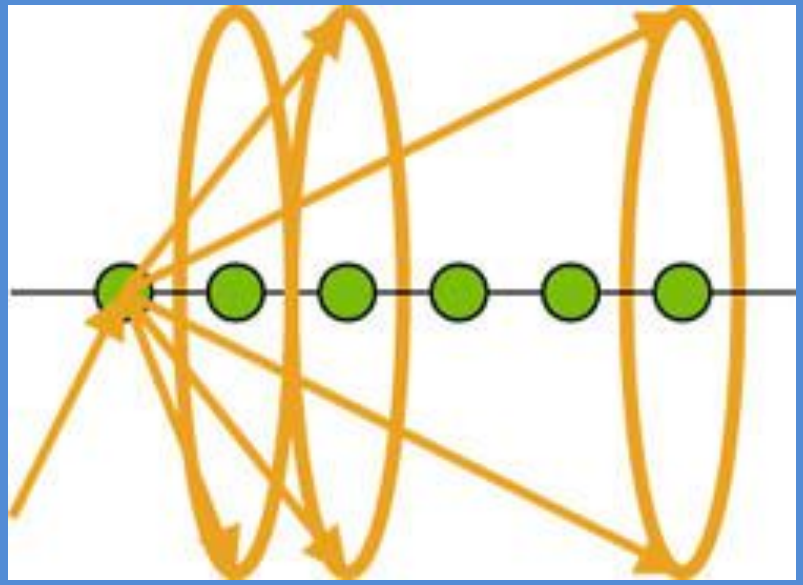


Электронные снимки, двумерного прямого и обратного ФК с треугольной решеткой

Трехмерные фотонные кристаллы, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в трех пространственных направлениях. Такие фотонные кристаллы могут проявлять свои свойства в трех пространственных направлениях, и можно их представить как массив объемных областей (сфер, кубов и т.д.), упорядоченных в трехмерной кристаллической решётке.

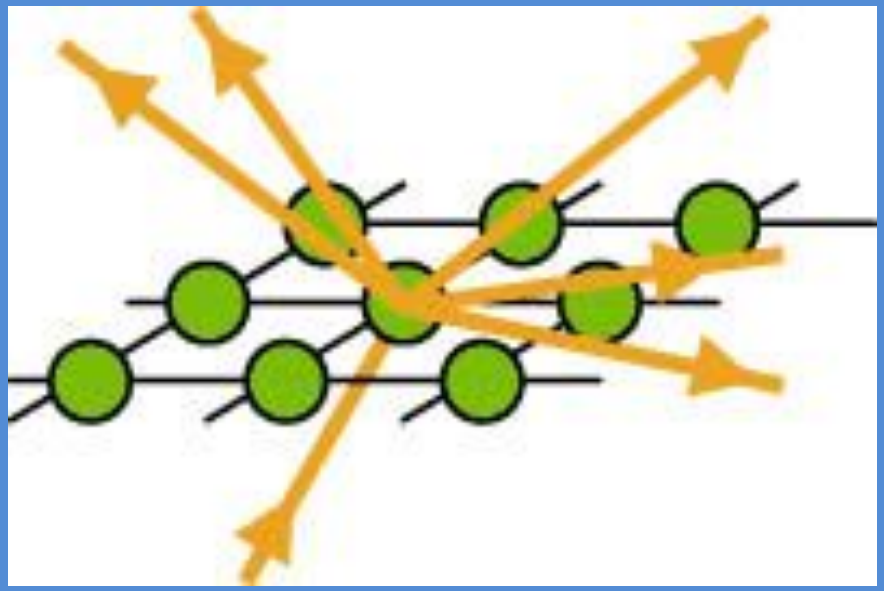
Распространение излучения в фотонных кристаллах различной размерности определяется условием максимума интерференции света, рассеянного на узлах, и зависит от угла между направлением волнового вектора и осями дифракционной решетки - фотонного кристалла.

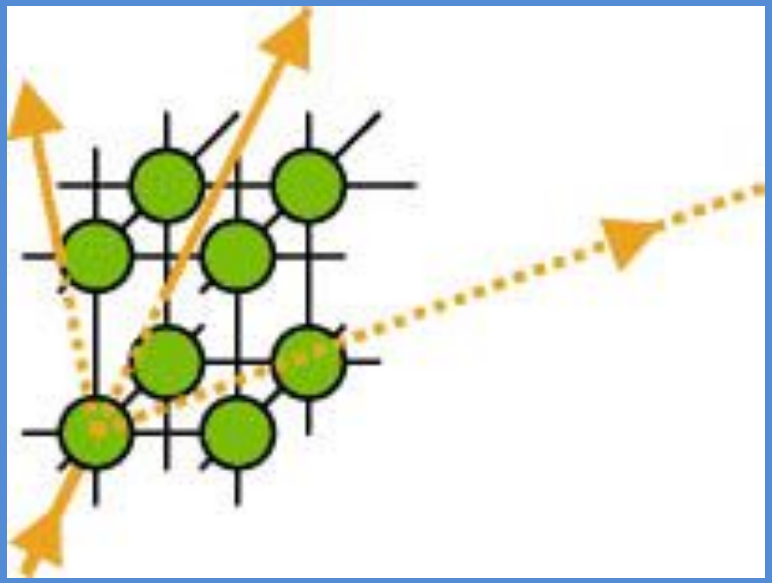
На рисунках схематично показано явление дифракции лучей света на периодических структурах различной размерности. При рассеянии фотонов на 1D- и 2D-структурах всегда находятся такие направления распространения дифрагировавших лучей, для которых условие максимума интерференции выполнено.



Для одномерного кристалла - нити, такие направления образуют конические поверхности, а в двумерном случае - совокупность отдельных, изолированных друг от друга лучей.

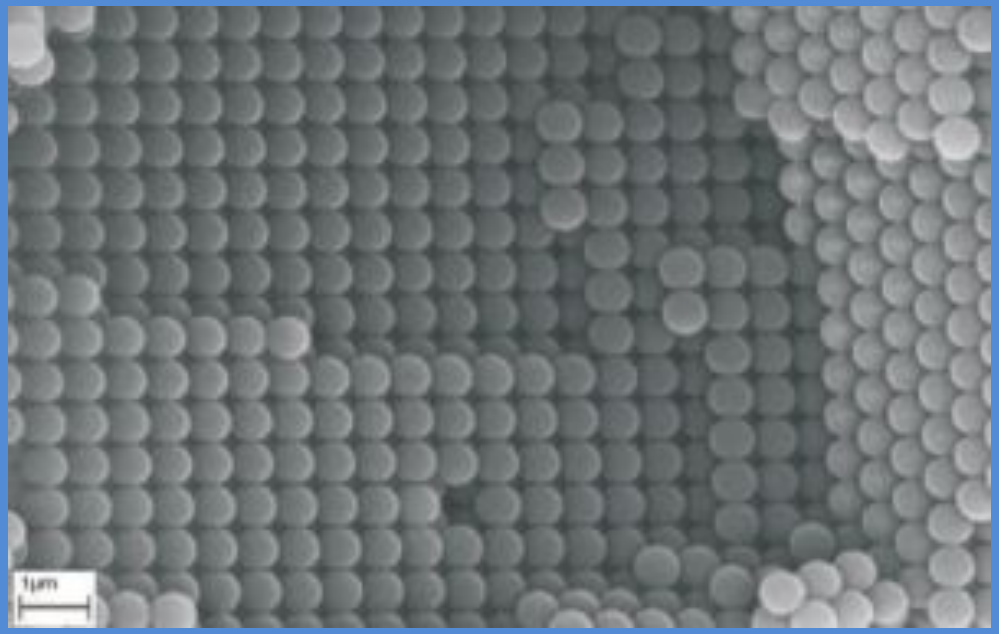
Трехмерный случай принципиально отличается от одномерного и двумерного тем, что условие максимума интерференции для данной длины волны света может оказаться невыполнимым ни для одного из направлений в пространстве. Распространение фотонов с такими длинами волн в трехмерном кристалле невозможно, а соответствующие им энергии образуют запрещенные фотонные зоны.





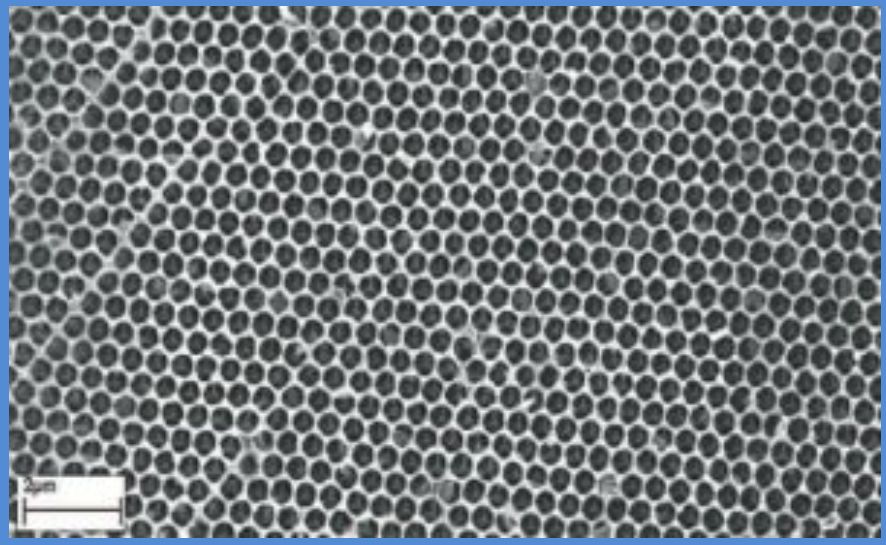
Структуры трехмерных ФК весьма разнообразны. Наиболее распространенными в этой категории являются искусственные опалы - упорядоченные системы сферических рассеивателей. Различают два основных типа опалов: прямые и обратные (inverse) опалы. Переход от прямого опала к обратному опалу осуществляется заменой всех сферических элементов полостями (как правило, воздушными), в то время как пространство между этими полостями заполняется каким–либо материалом.

Ниже представлена поверхность ФК, представляющего собой прямой опал с кубической решеткой на основе самоорганизованных сферических микрочастиц полистирола.

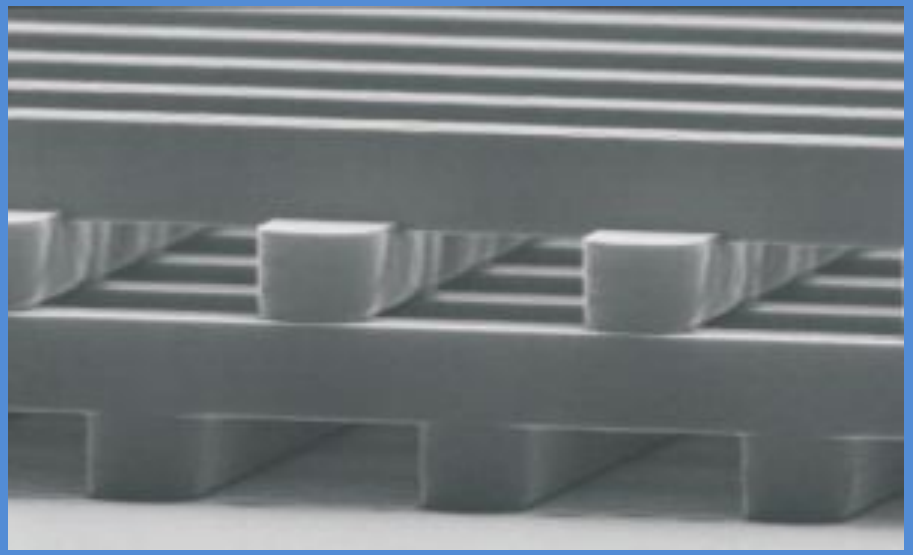


Внутренняя поверхность ФК с кубической решеткой на основе самоорганизованных сферических микрочастиц полистирола.

Следующая структура представляет собой инверсный опал, синтезированный в результате многостадийного химического процесса: самосборки полимерных сферических частиц, пропитки пустот полученного материала веществом и удалением полимерной матрицы путем химического травления.



Поверхность кварцевого инверсного опала



Электронная фотография ФК из металлических параллелепипедов

Еще одним типом трехмерных ФК являются структуры типа «поленница» (logpiles), образованные скрещенными, как правило, под прямым углом прямоугольными параллелепипедами.

Теория фотонных запрещенных зон

Природа запрещенных зон

Как выше уже отмечалось, фотонные кристаллы позволяют получить разрешенные и запрещенные зоны для энергий фотонов, аналогично полупроводниковым материалам, в которых существуют разрешенные и запрещенные зоны для энергий носителей заряда. Появление запрещенных зон объясняется тем, при определенных условиях, интенсивности электрического поля стоячих волн фотонного кристалла с частотами близкими к частоте запрещенной зоны, смещаются в разные области фотонного кристалла. Так, интенсивности поля низкочастотных волн концентрируется в областях с большим коэффициентом преломления, а интенсивности поля высокочастотных - в областях с меньшим коэффициентом преломления. Другое описание природы запрещенных зон в фотонных кристаллах: "фотонными кристаллами принято называть среды, у которых диэлектрическая проницаемость периодически меняется в пространстве с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света".

Ширина запрещенной зоны

В зависимости от ширины запрещенной зоны фотонные кристаллы можно разделить на **проводники, изоляторы, полупроводники** и **сверхпроводники**.

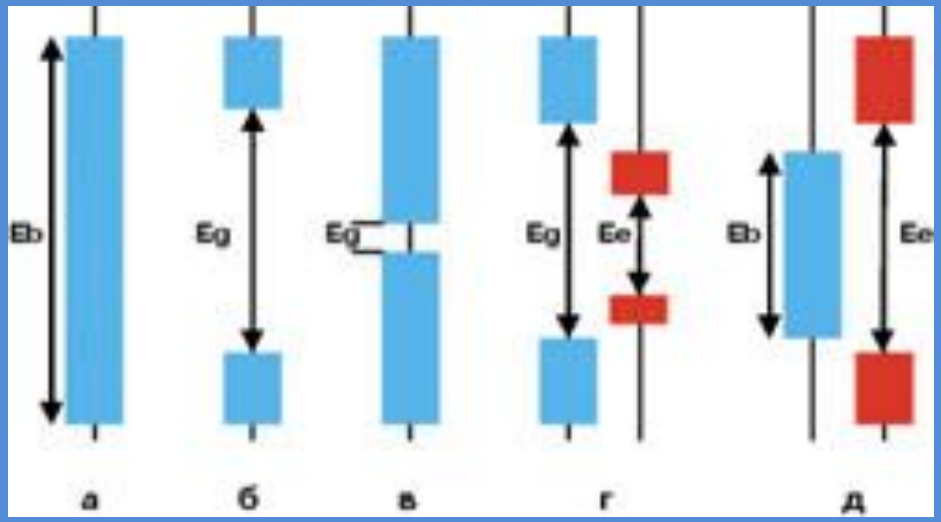
Фотонные **проводники** обладают широкими разрешенными зонами. Это прозрачные тела, в которых свет пробегает большое расстояние, практически не поглощаясь.

Другой класс фотонных кристаллов - фотонные **изоляторы** - обладает широкими запрещенными зонами. Такому условию удовлетворяют, например, широкодиапазонные многослойные диэлектрические зеркала. В отличие от обычных непрозрачных сред, в которых свет быстро затухает, превращаясь в тепло, фотонные изоляторы свет не поглощают. Что же касается фотонных **полупроводников**, то они обладают более узкими по сравнению с изоляторами запрещенными зонами. Полупроводники способные, например, выборочно отражать фотоны определённой длины волны. **Диэлектрики** – практически идеальные зеркала.

В **сверхпроводниках** благодаря коллективным явлениям фотоны способны распространяться практически на неограниченные расстояния. Известно, что тепло, выделяемое проводниками при протекании по ним электрического тока, является одним из главных препятствий на пути создания интегральных схем со сверхплотной упаковкой логических элементов. Использование сверхпроводников могло бы решить многие проблемы, однако разработка сверхпроводящих материалов, совместимых с технологией полупроводников - кремния или арсенида галлия, да к тому же обладающих способностью работать при комнатной температуре, - дело весьма туманного будущего.

В то же время для фотонных кристаллов, где информация переносится светом, создание сверхпроводников, точнее, идеальных фотонных проводников по соседству с фотонным изолятором или фотонным полупроводником не представляет принципиальных трудностей. Следует также отметить, что обычные сверхпроводники принципиально не могут работать при очень большой частоте переключения, так как она ограничена сравнительно малым значением ширины запрещенной зоны вблизи уровня Ферми. На фотонные идеальные проводники это ограничение не распространяется

На рисунке показано соотношение разрешенных и запрещенных энергетических зон, соответствующих различным случаям: фотонного проводника (а), фотонного изолятора (б), фотонного полупроводника (в), подавителя спонтанного излучения (г) и фотонного идеального проводника (сверхпроводника) (д). Здесь Eb - ширина разрешенной фотонной зоны, Eg - ширина запрещенной фотонной зоны, Ee - ширина запрещенной электронной зоны, голубым цветом показаны фотонные зоны, красным - электронные.

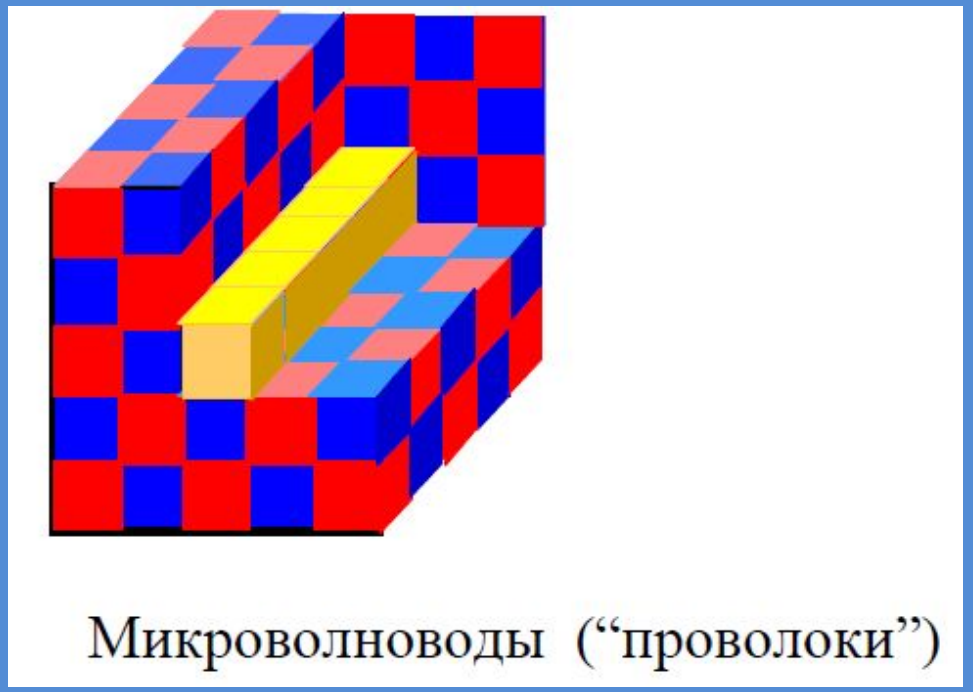


Дефекты в фотонных кристаллах

Любая неоднородность в фотонном кристалле называется дефектом фотонного кристалла. В таких областях часто сосредотачивается электромагнитное поле, что используется в микрорезонаторах и волноводах построенных на основе фотонных кристаллов.

Для прохождения луча формируется линейный дефект структуры (например, убирается один ряд стержней). Для поворота луча на 90 градусов формируют два линейных дефекта, соединенных под прямым углом. Физически это сводится к удалению ряда стержней на предполагаемом пути следования луча, - в периодической двумерной структуре создают прямоугольный канал, выходу излучения из которого препятствует запрещенная зона.

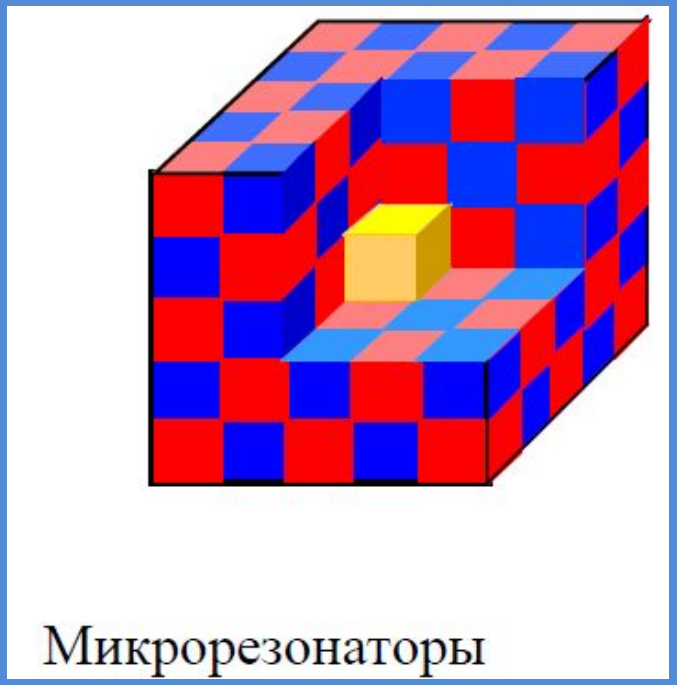
Теоретически прохождению луча препятствую отражения, однако фактически эффективность передачи может быть близка к 100%. Радиус поворота имеет порядок 2a, (где a – период решетки), что меньше длины волны луча. Такой поворот можно рассматривать как явление, аналогичное одномерному резонансному туннельному эффекту в квантовой механике.



Микроволноводы (“проволоки”)

Создавая точечные дефекты (или резонансные полости) в кристалле, можно захватить фотоны в “ловушки” запрещенной зоны (локализовать фотоны в полостях дефекта) и, соответственно, на их основе можно создать устройства хранения и обработки информации нового типа. Резонансная полость действует следующим образом. Белый свет, вошедший с торца волновода, распространяется вдоль него. Волна с резонансной частотой захватывается между двумя центральными отверстиями (благодаря сформированной в структуре запрещенной зоне) и многократно отражается назад-вперед между этими отверстиями (внутреннее отражение из-за зеркального эффекта в резонансной полости). Оптические колебания на резонансной частоте усиливаются за счет энергии поступающего света аналогично тому, как это происходит, например, в оптических усилителях Фабри-Перо. Другие же спектральные компоненты экспоненциально угасают (из-за запрещенной зоны).

При достаточном усилении свет резонансной частоты вырывается из резонансной полости и выходит из торца волновода. Конструкция аналогична заряженному проводнику, окруженному со всех сторон диэлектриком.



Микрорезонаторы

Изготовление фотонных кристаллов

В настоящее время существует множество методов изготовления фотонных кристаллов, и новые методы продолжают появляться. Некоторые методы больше подходят для формирования одномерных фотонных кристаллов, другие удобны в отношении двумерных, третьи применимы чаще к трёхмерным фотонным кристаллам, четвертые используются при изготовлении фотонных кристаллов на других оптических устройствах и т.д. Рассмотрим наиболее известные из этих методов.

1. Методы, использующие самопроизвольное формирование фотонных кристаллов

При самопроизвольном формировании фотонных кристаллов используются коллоидальные частицы (чаще всего используются монодисперсные силиконовые или полистереновые частицы, но и другие материалы постепенно становятся доступными для использования по мере разработки технологических методов их получения), которые находятся в жидкости и по мере испарения жидкости осаждаются в некотором объеме. По мере их осаждения друг на друга, они формируют трехмерный фотонный кристалл, и упорядочиваются преимущественно в гранецентрированную или гексагональную кристаллические решетки. Этот метод достаточно медленный, формирование фотонного кристалла может занять недели.

Другой метод самопроизвольного формирования фотонных кристаллов, называемый сотовым методом, предусматривает фильтрование жидкости, в которой находятся частицы через маленькие споры. Этот метод представлен в работах, позволяет сформировать фотонный кристалл со скоростью определенной скоростью течения жидкости через поры, но при высыхании такого кристалла образуются дефекты в кристалле. Также фотонные кристаллы получают методом вертикального осаждения, который позволяет создавать высокоупорядоченные фотонные кристаллы большего размера, чем позволяют получить вышеописанные методы.

В большинстве случаев требуется большой контраст коэффициента преломления в фотонном кристалле для получения запрещенных фотонных зон во всех направлениях. Упомянутые выше методы самопроизвольного формирования фотонного кристалла чаше всего применялись для осаждения сферических коллоидальных частиц силикона, коэффициент преломления которого мал, а значит, мал и контраст коэффициента преломления. Для увеличения этого контраста, используется дополнительные технологические шаги, на которых сначала пространство между частицами заполняется материалом с большим коэффициентом преломления, а затем частицы вытравливаю.

2. Методы травления

Методы травления наиболее удобны для изготовления двухмерных фотонных кристаллов и являются широко используемыми технологическими методами при производстве полупроводниковых приборов. Эти методы основаны на применении маски из фоторезиста (которая задает, например, массив окружностей), осажденной на поверхности полупроводника, которая задает геометрию области травления. Эта маска может быть получена в рамках стандартного фотолитографического процесса, за которым следует травление сухим или влажным методом поверхности образца с фоторезистом. При этом, в тех областях, в которых находится фоторезист, происходит травление поверхности фоторезиста, а в областях без фоторезиста - травление полупроводника. Так продолжается до тех пор, пока нужная глубина травления не будет достигнута и после этого фоторезист смывается. Таким образом, формируется простейший фотонный кристалл. Недостатком данного метода является использование фотолитографии, наиболее распространенное разрешение которой составляет порядка одного микрона. Фотонные кристаллы, как известно, имеют характерные размеры порядка сотен нанометров, поэтому использование фотолитографии при производстве фотонных кристаллов с запрещенными зонами ограниченно разрешением фотолитографического процесса. Чаще всего, для достижения нужного разрешения используется комбинация стандартного фотолитографического процесса с литографией при помощи электронного пучка. Пучки сфокусированных ионов (чаще всего ионов Ga) также применяются при изготовлении фотонных кристаллов методом травления, они позволяют удалять часть материала без использования фотолитографии и дополнительного травления.

Современные системы использующие сфокусированные ионные пучки используют так называемую "карту травления", записанную в специальный форматах файлов, которая описывает где пучок ионов будет работать, сколько импульсов ионный пучок должен послать в определенную точку и т.д. Таким образом, создание фотонного кристалла при помощи таких систем максимально упрощено - достаточно создать такую "карту травления" (при помощи специального программного обеспечения) в которой будет определена периодическая область травления, загрузить её в компьютер, управляющий установкой сфокусированного ионного пучка и запустить процесс травления. Для большей скорости травления, повышения качества травления или же для осаждения материалов внутри вытравленных областей используются дополнительные газы. Материалы, осажденные в вытравленные области, позволяют формировать фотонные кристаллы, с периодическим чередованием не только исходного материала и воздуха, но и исходного материала, воздуха и дополнительных материалов.

3. Голографические методы

Голографические методы создания фотонных кристаллов базируются на применении принципов голографии, для формирования периодического изменения коэффициента преломления в пространственных направлениях. Для этого используется интерференция двух или более когерентных волн, которая создает периодическое распределение интенсивности электрического поля. Интерференция двух волн позволяет создавать одномерные фотонные кристаллы, трех и более лучей - двухмерные и трехмерные фотонные кристаллы.

Применение

Первое применение фотонного кристалла - создание световедущих каналов. Современные световедущие каналы на основе оптического волокна не могут иметь крутых изгибов из-за недопустимого увеличения потерь, вызванного нарушением полного внутреннего отражения в них. Световедущие каналы в фотонном кристалле основаны на другом принципе: практически идеальное отражение света под любым углом от стенок световедущего канала обеспечивается наличием "запрещенной зоны" для световой волны передаваемой частоты, препятствующей проникновению света в глубь фотонного кристалла.

Второе применение - это спектральное разделение каналов. Во многих случаях по оптическому волокну идет не один, а несколько световых сигналов. Их бывает нужно рассортировать - направить каждый по отдельному пути. Например - оптический телефонный кабель, по которому идет одновременно несколько разговоров на разных длинах волн. Фотонный кристалл - идеальное средство для "высечения" из потока нужной длины волны и направления ее туда, куда требуется.

Третье - кросс для световых потоков. Такое устройство, предохраняющее от взаимного воздействия световых каналов при их физическом пересечении, совершенно необходимо при создании светового компьютера и световых компьютерных чипов.

Специалисты по волоконной оптике сразу заинтересовались фотонными кристаллами, разглядев самые разные перспективы их использования для увеличения пропускной способности сетей. Чтобы увеличить объем передаваемых по волоконным световодам данных, надо создавать как можно более короткие оптические импульсы. Это определяется временем срабатывания эмиссионых диодов. Вторая проблема - волоконные световоды прозрачны в малом диапазоне длин волн. Третья проблема - на выходе информационных каналов требуются узкочастотные оптические фильтры и высокоскоростные оптические переключатели - своеобразные интегральные оптические схемы. Для них нужно создавать миниатюрные плоскостные волноводы.

Фотонные кристаллы могут помочь решить все эти проблемы. С их помощью можно сузить диапазон длин волн излучения в полупроводниковых лазерах и эмиссионных диодах или создать оптические фильтры с высокой селективностью. Главный недостаток существующих эмиссионных диодов и полупроводниковых лазеров в том, что они испускают фотоны в большой телесный угол и в широком частотном диапазоне. На основе фотонных кристаллов можно создать зеркало, которое будет отражать определенную волну света для любого выбранного угла и направления.

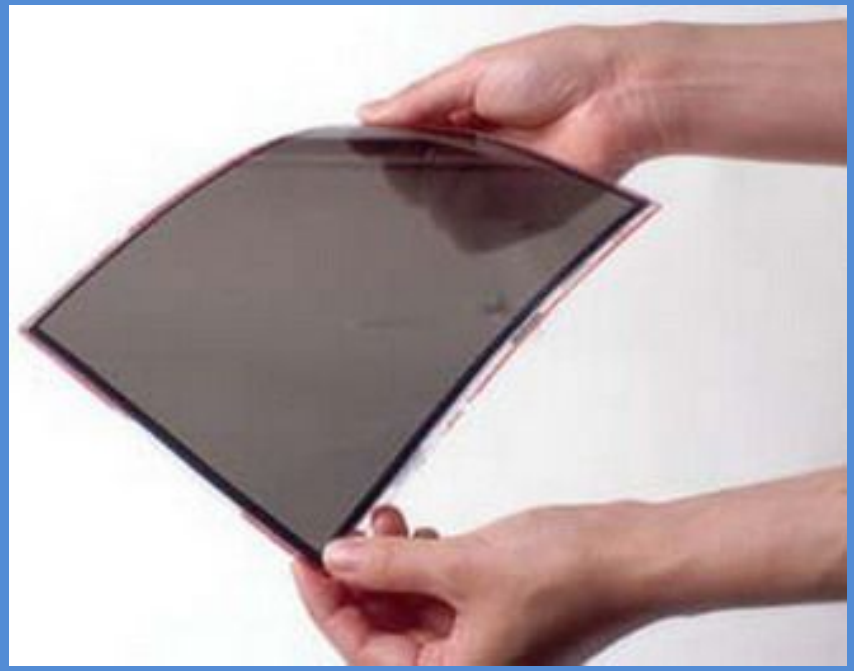
Такие трехмерные зеркала были созданы в 1994 году в лаборатории Эймса (США) для СВЧ-волн. Для более коротких длин волн их разработали специалисты из Голландии и США. Эти структуры представляют собой специально уложенные кремниевые полоски - для СВЧ-волн - или специальным образом ориентированные крошечные (меньше микрона) кварцевые сферы в некотором коллоидном веществе.

Еще одна перспективная технология в волоконной оптике - скоростные солитонные линии связи, которые отличаются от обычных высокой помехоустойчивостью и низким уровнем шумов. Солитоны - это устойчивые уединенные гребни волн, которые распространяются в среде как частицы. При взаимодействии друг с другом или с другими возмущениями они не разрушаются, а расходятся, сохраняя свою структуру неизменной.

Настоящую революцию в оптоэлектронике способны произвести разрабатываемые на основе фотонных кристаллов низкопороговые (low-threshold) или даже беспороговые (thresholdless) лазеры, открывающие путь для малосигнальной лазерной техники - вплоть до однофотонных лазеров. Полученный лазер обладает уникальными свойствами. Например, его излучение может быть направлено в любом, заранее выбранном, направлении, что позволяет встраивать его в обычную полупроводниковую микросхему.

Фотонные кристаллы обеспечивают отличную цветопередачу у ЖК-дисплеев. Находка ученых, возможно, позволит значительно повысить качество картинки, формируемой жидкокристаллическими дисплеями, и увеличить размеры экранов на базе данной технологии. Кроме того, обнаруженную методику можно применить в электронной бумаге. На фотонных кристаллах разработан полноцветный гнущийся дисплей учеными из университета Торонто. Благодаря простоте его конструкции становится возможным скорое его появление в виде крупномасштабных систем отображения видеоинформации (например, на рекламных щитах).

Каждый пиксель такого дисплея представляет собой фотонный кристалл массив кремниевых микросфер, располагающихся в пространстве строго определенным образом. В зависимости от шага решетки такой материал имеет различные оптические свойства. Управление оптическими свойствами материала осуществляется механически - его "растяжением".



Также ученым пришло в голову, как использовать обыкновенный кремнезём и технологии производства фотонных кристаллов для создания необычных и очень красивых "камней". Используя метод фотолитографии (получение рисунка на тонкой плёнке материала), вытравливаются на образцах будущих "бриллиантов" круглые, треугольные и шестиугольные фигуры, "вставляя" в один кристалл до 200 различных образцов рисунков. Таким образом добиваются эффекта огранки как у алмазов: каждая нанесённая на фотонный кристалл фигура отражает свет определённой длины волны и в определённом направлении. И "камень" играет всеми цветами радуги. Хоть драгоценности и искусственные, стоить они будут не так уж и мало.

Использование структур на базе фотонных кристаллов **(**ФК**)** открывает новые возможности в управлении потоком света и может оказать существенное влияние на создание и миниатюризацию устройств оптической связи**.**

ОСТАНОВКА СВЕТА В ФК

Возможность существенно замедлить скорость распространения света, а также остановить и запомнить оптические импульсы является ключом к полному управлению светом. Это можно использовать в оптической связи и процессах обработки информации на квантовом уровне. На основе электронного или оптического резонанса можно когерентно уменьшить групповую скорость света. Однако использование электронных состояний для когерентного хранения оптической информации ограничено тем, что только некоторые электронные резонансы, наблюдаемые в природе, обладают требуемыми свойствами. Диапазоны длин волн, где такие эффекты наблюдаются, также очень ограничены.

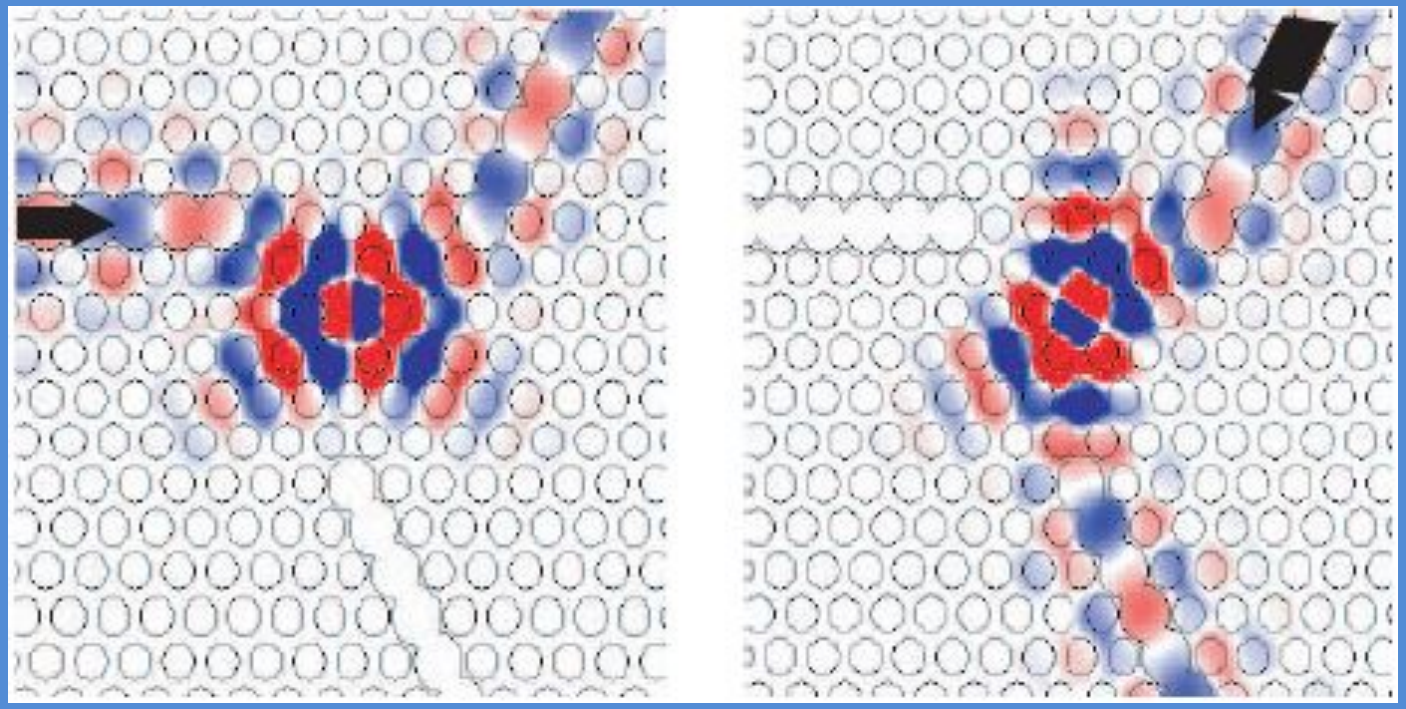
Интересно добиться управления скоростью света за счет использования оптических резонансов в фотонных структурах, имеющих микрорезонаторы, и в ФК. Фотонные структуры могут быть получены с помощью литографии в виде ИС для работы в любом диапазоне длин волн. Значительное снижение групповой скорости распространения импульсов наблюдалось в ФК-волноводах или в волноводах со связанными оптическими резонаторами (CROW). Однако групповая задержка в среде с оптическими резонансами обратно пропорциональна ширине полосы, внутри которой возникает эта задержка. Поэтому для импульса определенной длительности и ширины полосы минимально достижимая скорость ограничена. По этой причине до сих пор структуры на ФК не могли быть использованы для остановки света.

Световые импульсы можно останавливать и когерентно сохранять, используя процесс адиабатического и обратимого сжатия спектра импульсов. Этот процесс можно применить к обращенной во времени последовательности оптических импульсов. Возможность обращения последовательности во времени имеет важные последствия. Для оптических волн все механизмы, связанные с обращенным временем, используют нелинейные процессы, такие, например, как четырехволновое смешение. Согласование фаз при этом должно удовлетворяться по всему спектру импульса. Это сложная задача для создателей новых нелинейных материалов: требуется применение мощных лазеров, что ограничивает возможности интеграции на базе ИС. Связывая два ФК-волновода, имеющие противоположные дисперсионные параметры, можно (путем модуляции показателя преломления при нахождении фотонов внутри волновода) передать фотоны между двумя волноводами, завершив тем самым обращение времени. Практика показывает, что динамические ФК, сконструированные на кристалле в любой системе, где показатель преломления настраивается путем небольших изменений ($dn/n < 10^{-4}$), могут обеспечить оптическую информационную обработку.

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ (МО) ФК И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ НА ЕДИНОЙ ВОЛНОВОЙ ПЛАТФОРМЕ

Интегрированные невзаимные оптические элементы, такие как оптические изоляторы и циркуляторы, могут играть важную роль в оптических схемах высокой степени интеграции. Такие элементы подавляют многократные отражения от взаимодействующих компонентов и снижают влияние неточности изготовления и воздействие окружающей среды. Длина обычных оптических изоляторов и циркуляторов – несколько миллиметров. Они, естественно, нуждаются в миниатюризации.

Также рассмотрены невзаимные МО-резонаторы в двумерных ФК, используемые для конструирования компактных, широкополосных и планарных оптических циркуляторов. Предложенный элемент состоит из трех волноводных ответвлений (портов), которые бесконечно мало связаны с центральной резонансной полостью. Такая структура позволяет осуществлять передачу между портами 1 и 2, 2 и 3 или 3 и 1, запрещая передачу в противоположном направлении. Для этой цели используются МО-материалы с резонансной полостью, которая поддерживает две (разные по частоте) моды, вращающиеся в противоположном направлении. Так как такие противонаправленные моды в общем случае связаны с симметрией относительно обращения времени, то факт, что они имеют различные частоты, прямо указывает на нарушение симметрии относительно обращения времени.



Моделирование оптического циркулятора (стрелки показывают направление падающей волны)

Предложенный элемент (см. рисунок) имеет малые (несколько квадратных длин волн) размеры. При тонкопленочной реализации материал (BIG) демонстрирует явную гиротропию с насыщением (0,06). BIG-элемент обеспечивает уровень изоляции 30 дБ в широком диапазоне (до 213 ГГц) при работе на длине волны 633 нм. Так как добротность такого резонатора не ниже 140, то он допускает значительный уровень поглощения.