

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Физический факультет
Кафедра радиофизики

Фотонные кристаллы

Студентка 2-го курса
Войтова Татьяна Андреевна

Научный руководитель:
профессор
Сухоруков Анатолий Петрович

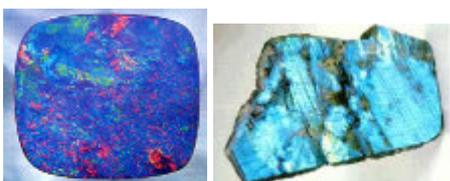
2008 г.

Оглавление

1. Введение	3
2. Общие сведения	5
3. Классификация фотонных кристаллов	
3.1. Одномерные фотонные кристаллы.....	6
3.2. Двумерные фотонные кристаллы.....	6
3.3. Трехмерные фотонные кристаллы.....	7
4. Методы теоретического исследования фотонных кристаллов, численные методы и программное обеспечение.....	8
5. Теория фотонных запрещенных зон.....	9
5.1. Природа запрещенных зон.....	9
5.2. Ширина запрещенной зоны.....	9
5.3. Дефекты в фотонных кристаллах.....	10
6. Изготовление фотонных кристаллов.....	12
6.1. Методы, использующие самопроизвольное формирование фотонных кристаллов	12
6.2. Методы травления.....	12
6.3. Голографические методы.....	13
6.4. Другие методы создания фотонных кристаллов.....	13
7. Применение.....	14
8. Выводы.....	16
9. Список литературы.....	17

1.Введение.

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. *ιρις*- 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**.



Живущие в жарком климате бабочки обладают переливчатым рисунком крыльев, а структура фотонного кристалла на поверхности, как оказалось, снижает поглощение света и, следовательно, разогрев крыльев. Эволюция бабочек, живущих в более холодных климатических поясах, привела к исчезновению структуры фотонного кристалла, что сделало их крылья коричневыми, но дало бабочкам новый жизненно необходимый источник тепла за счет поглощения дополнительной энергии солнечного света. Ученые (Jean-Pol Vigneron, Universitaires Notre-Dame de la Paix, Брюссель) полагают, что такое влияние фотонно - кристаллической структуры поверхности на тепловой баланс бабочек можно было бы использовать и в таких термозащитных системах, как космические скафандры или специальные костюмы для работы в пустынях.

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 червяку на глубине до 500 м.

2. Общие сведения.

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.

Создавая точечные дефекты (или резонансные полости) в таком кристалле, можно захватить фотоны в «ловушки» запрещенной зоны (локализовать фотоны в полостях дефекта), а затем определенным образом использовать. Частотный диапазон и другие параметры такой полости можно задавать достаточно просто. Регулярные структуры интегральных оптических волноводов (или диэлектрических стержней) с круглым, прямоугольным или шестигранным сечением позволяет формировать диэлектрическую (оптическую) и даже гибридную (диэлектрически - металлическую) кристаллические структуры, которые обладают удивительными свойствами.

3.Кассификация фотонных кристаллов.

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

3.1.Одномерные фотонные кристаллы, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в одном пространственном направлении как показано на Рис. 1. На этом рисунке символом Λ обозначен период изменения коэффициента преломления, n_1 и n_2 - 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 одном пространственном направлении, перпендикулярном слоям.

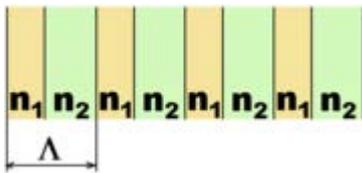


Рис. 1. Схематическое представление одномерного фотонного кристалла.

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.

3.2.Двумерные фотонные кристаллы, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в двух пространственных направлениях как показано на Рис. 2. На этом рисунке фотонный кристалл создан прямоугольными областями с коэффициентом преломления n_1 , которые находятся в среде с коэффициентом преломления n_2 . При этом, области с коэффициентом преломления n_1 упорядочены в двумерной кубической решетке. Такие фотонные кристаллы могут проявлять свои свойства в двух пространственных направлениях, и форма областей с коэффициентом преломления n_1 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 быть другой, а не только кубической, как на приведённом рисунке.

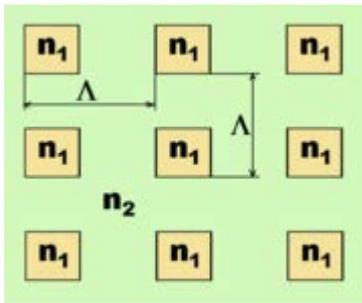
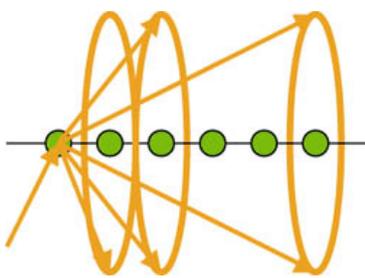


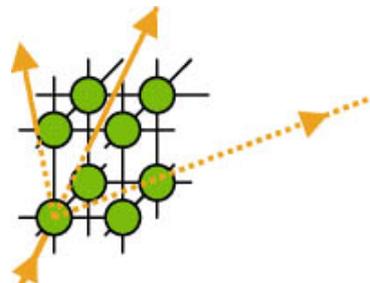
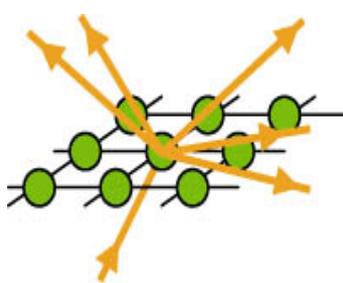
Рис. 2. Схематическое представление двумерного фотонного кристалла.

3.3.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.

4. Методы теоретического исследования фотонных кристаллов, численные методы и программное обеспечение.

Фотонные кристаллы позволяют проводить манипуляции с электромагнитными волнами оптического диапазона, причем характеристические размеры фотонных кристаллов часто близки к величине длины волны. Поэтому к ним не применимы методы лучевой теории, а используется волновая теория и решение **уравнений Максвелла**. Уравнения Максвелла могут быть решены аналитически и численно, но именно численные методы решения используются для исследования свойств фотонных кристаллов наиболее часто по причине их доступности и легкой подстройки под решаемые задачи. Уместно также упомянуть, что используется два основных подхода к рассмотрению свойств фотонных кристаллов - методы для временной области (которые позволяют получить решение задачи в зависимости от временной переменной), и методы для частотной области (которые предоставляют решение задачи в виде функции от частоты).

Методы для **временной** области удобны в отношении динамических задач, которые предусматривают временную зависимость электромагнитного поля от времени. Они также могут быть использованы для расчета зонных структур фотонных кристаллов, однако практически сложно бывает выявить положение зон в выходных данных таких методов. Кроме того, при расчете зонных диаграмм фотонных кристаллов используется преобразование Фурье, частотное разрешение которого, зависит от общего времени расчета метода. Т.е. для получения большего разрешения в зонной диаграмме нужно потратить больше времени на выполнение расчетов. Есть еще и другая проблема - временной шаг таких методов должен быть пропорционален размеру пространственной сетки метода. Требование увеличения частотного разрешения зонных диаграмм требует уменьшения временного шага, а, следовательно, и размера пространственной сетки, увеличения числа итераций, требуемой оперативной памяти компьютера и времени расчета.

Методы для **частотной** области удобны, прежде всего, тем, что решение уравнений Максвелла происходит сразу для стационарной системы и непосредственно из решения определяются частоты оптических мод системы, это позволяет быстрее рассчитывать зонные диаграммы фотонных кристаллов, чем с использованием методов для временной области. К их достоинствам можно отнести число итераций, которое практически не зависит от разрешения пространственной сетки метода и то, что ошибка численно метода спадает экспоненциально с числом проведенных итераций. Недостатками метода являются необходимость расчета собственных частот оптических мод системы в низкочастотной области для того, чтобы рассчитать частоты в более высокочастотной области, и естественно, невозможность описания динамики развития оптических колебаний в системе.

Безусловно, теоретические исследования фотонных кристаллов не ограничиваются только расчетом зонных диаграмм, а также требуют и знаний о стационарных процессах при распространении электромагнитных волн через фотонные кристаллы. Примером может служить задача исследования спектра пропускания фотонных кристаллов. Для таких задач можно использовать оба упомянутых выше подхода исходя из удобства и их доступности.

5. Теория фотонных запрещенных зон

5.1. 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".

Если излучение с частотой запрещенной зоны было сгенерировано внутри такого фотонного кристалла, то оно не может распространяться в нем, если же такое излучение посылается извне, то оно просто отражается от фотонного кристалла. Одномерные фотонные кристаллы, позволяют получить запрещенные зоны и фильтрующие свойства для излучения, распространяющегося в одном направлении, перпендикулярном слоям материалов. Двухмерные фотонные кристаллы могут иметь запрещенные зоны для излучения, распространяющегося как в одном, двух направлениях, так и во всех направлениях данного фотонного кристалла, которые лежат в плоскости. Трехмерные фотонные кристаллы могут иметь запрещенные зоны как в одном, нескольких или всех направлениях. Запрещенные зоны существуют для всех направлений в фотонном кристалле при большой разнице коэффициентов преломления материалов, из которых состоит фотонный кристалл, определенных формах областей с разными коэффициентами преломления и определенной кристаллической симметрии. Число запрещенных зон, их положение и ширина в спектре зависит как от геометрических параметров фотонного кристалла (размер областей с разным коэффициентом преломления, их форма, кристаллическая решетка, в которой они упорядочены) так и от коэффициентов преломления. Поэтому, запрещенные зоны могут быть перестраиваемыми, например, вследствие изменения размеров областей с разным коэффициентом преломления или же вследствие изменения коэффициентов преломления под воздействием внешних полей.

5.2. 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 определенной 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.

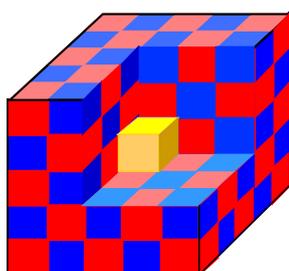
В то же время для фотонных кристаллов, где информация переносится светом, создание сверхпроводников, точнее, идеальных фотонных проводников по соседству с фотонным изолятором или фотонным полупроводником не представляет принципиальных трудностей. Следует также отметить, что обычные сверхпроводники принципиально 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



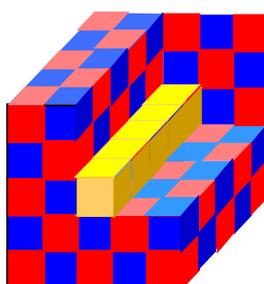
Использование фотонных полупроводников удобно для организации управления световыми потоками. Это можно делать, например, влияя на положение и ширину запрещенной зоны. Поэтому фотонные кристаллы представляют огромный интерес для построения лазеров нового типа, оптических компьютеров, хранения и передачи информации.

5.3. 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.



Микрорезонаторы



Микроволноводы (“провоолоки”)

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 препятствуют 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.

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.

Однако захват излучения в фотонных кристаллах является принципиально новым явлением, так как происходит без процесса многократного поглощения и испускания фотонов. Оно здесь попросту невозможно в силу определенных соотношений между параметрами фотонных и электронных энергетических зон. Поэтому перенос излучения при его пленении в фотонном кристалле носит упорядоченный характер, существенно отличаясь от известного ранее хаотического движения в газовой среде.

6.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.

6.1.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 поры. 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 чаще всего применялись для осаждения сферических коллоидальных частиц силикона, коэффициент преломления которого мал, а значит, мал и контраст коэффициента преломления. Для увеличения этого контраста, используются дополнительные технологические шаги, на которых сначала пространство между частицами заполняется материалом с большим коэффициентом преломления, а затем частицы вытравливаю.

6.2.Методы травления.

Методы травления наиболее удобны для изготовления двумерных 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 ограничено 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 специальных 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.

6.3. 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

6.4. Другие методы создания фотонных кристаллов.

Однофотонная фотолитография и двухфотонная фотолитография позволяют создавать трехмерные фотонные кристаллы с разрешением 200 нм и используют свойство некоторых материалов, таких как полимеры, которые чувствительны к одно- и двухфотонному облучению и могут изменять свои свойства под воздействием этого излучения. Литография при помощи пучка электронов является дорогим, но высокоточным методом для изготовления двумерных фотонных кристаллов. В этом методе, фоторезист, который меняет свои свойства под действием пучка электронов, облучается пучком в определенных местах для формирования пространственной маски. После облучения, часть фоторезиста смывается, а оставшаяся часть используется как маска для травления в последующем технологическом цикле. Максимальное разрешение этого метода - 10нм. Литография при помощи пучка ионов похожа по своему принципу, только вместо пучка электронов используется пучок ионов. Преимущества литографии при помощи пучка ионов над литографией при помощи пучка электронов заключаются в том, что фоторезист более чувствителен к пучкам ионов, чем электронов и отсутствует "эффект близости" ("proximity effect"), который ограничивает минимально возможный размер области при литографии при помощи пучка электронов.

7. 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 эмиссионных 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.

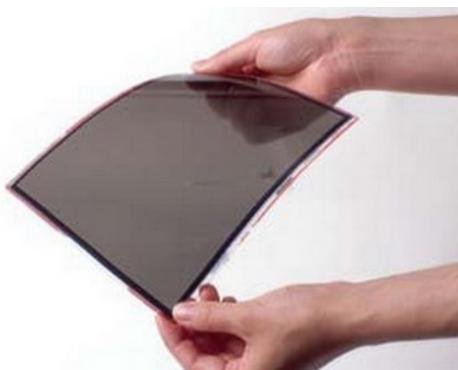
Фотонные кристаллы могут помочь решить все эти проблемы. С их помощью можно сузить диапазон длин волн излучения в полупроводниковых лазерах и эмиссионных диодах или создать оптические фильтры с высокой селективностью. Главный недостаток существующих эмиссионных диодов и полупроводниковых лазеров в том, 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 полосы - 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 видеoinформации (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.



8. Выводы.

Прошло не так много лет с начала первых разработок, как инвесторам стало ясно, что фотонные кристаллы являются оптическими материалами принципиально нового типа и что у них - блестящее будущее. Выход разработок фотонных кристаллов оптического диапазона на уровень коммерческого применения, скорее всего, произойдет в сфере телекоммуникаций. Эксперименты показали, что такие кристаллические волноводы способны передавать гораздо большую оптическую мощность, чем обычные волокна. Параллельно с волноводами на основе фотонных кристаллов ведутся технологические проработки других компонентов телекоммуникационной техники, в первую очередь - пассивных оптических фильтров, прерывателей и низкопороговых лазеров.

Конечно, сегодня фотонные кристаллы – это лишь лабораторные объекты, но их потенциальные возможности настолько широки, что промышленная реализация данных структур, скорее всего, не заставит себя долго ждать.

Обозреватели рынка высоких технологий уже отмечают появление признаков нешуточной конкурентной борьбы, участники которой зачастую тщательно скрывают направления финансируемых ими исследований и достигнутые результаты. Разработками в области фотоники занимаются и гиганты оптоволоконного бизнеса - Corning, Lucent Technologies, Pirelli (Италия), Alcatel (Франция), и стартапы, среди которых - OmniGuide Communications (США) и BlazePhotonics (Англия).

Не исключено, что последствия бума научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области физики фотонных кристаллов и устройств на их основе будут сравнимы по значимости с созданием интегральной микроэлектроники в 1960-е годы: материалы нового типа позволят создавать оптические микросхемы по образу и подобию элементов полупроводниковой электроники, а принципиально новые способы передачи, хранения и обработки информации, отрабатываемые сегодня на фотонных кристаллах, в свою очередь, найдут применение в полупроводниковой электронике будущего. Неудивительно, что эта область исследований - одна из самых горячих в крупнейших мировых научных центрах, гигантах высокотехнологичного бизнеса и на предприятиях военно-промышленного комплекса.

9. Список литературы.

1. Н. Слепов «Электроника: Наука, Технология, Бизнес» 2/2000.
2. Johnson S.G., Manolatou Ch., Fan Sh., Villeneuve P.R., Joannopoulos., Haus H.A. Elimination of Crosstalk in Waveguide Intersection. – Optics Letters, 1998, Dec, №23.
3. E. Yablonovitch, Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, Physical Review Letters, Vol. 58, N. 20, p.2059-2062.
4. В.А. Кособукин, "Фотонные кристаллы," Окно в Микромир, No. 4, 2002.
5. T.F. Krauss, R.M. De La Rue "Photonic Crystals in the Optical Regime – Past, Present and Future" // Progress in Quantum Electronics, 23 (1999) 51.
6. O. Toader and S. John. "Proposed Square Spiral Microfabrication Architecture for Large Three- Dimensional Photonic Band Gap Crystals" // Science, 292 (2001) 1133.
7. Е.Л. Ивченко, А.Н. Поддубный, "Резонансные трехмерные фотонные кристаллы" Физика твердого тела, 2006, том 48, вып. 3, стр. 540-547.