

Д. т. н. Е. А. НЕЛИН

Украина, НТУУ “Киевский политехнический институт”
E-mail: ye_nelin@rtf.ntu-kpi.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
09.02 2004 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК
(ЮГПУ им. К. Д. Ушинского)

УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Рассмотрены физико-технические особенности фотонных кристаллов. Представлен обзор конструкций и характеристик устройств на их основе.

Физико-технические принципы формирования требуемых характеристик устройств электроники и микроэлектроники основаны на управлении движением электронов в кристаллической решетке твердого тела. По отношению к электронам как волнам де Бройля кристаллическая решетка представляет собой волновой фильтр [1]. В результате деструктивной и конструктивной интерференции волн, отраженных от отдельных неоднородностей, формируются, соответственно, полосы пропускания и подавления фильтра или разрешенные и запрещенные энергетические зоны в кристалле.

В последнее время интенсивно развиваются исследования искусственных периодических структур, аналогичных естественным кристаллам. Эти структуры составляют основу новых разнообразных интегральных устройств обработки сигналов, прежде всего, наноэлектронных. Из таких кристаллоподобных структур значительное развитие получили полупроводниковые сверхрешетки для электронов как волн де Бройля, фотонные кристаллы для электромагнитных волн, фоновые кристаллы для упругих волн. Частотная фильтрация в таких структурах с формированием зон запрещенных энергий для электронов, фотонных и фоновых запрещенных зон позволяет управлять прохождением волн, что обеспечивает значительные возможности в обработке сигналов.

За время, прошедшее после первой публикации по фотонным кристаллам (ФК) [2], выполнен большой объем фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ, позволивших решить базовые физические и конструктивно-технологические вопросы разработки устройств на основе ФК для систем оптической связи и передачи информации, лазерной техники, квантовых компьютеров. Обширная информация по ФК содержится в Интернете. На сайте [3], полностью посвященном ФК, сгруппированы ссылки на сайты с информацией по ФК.

Фотонный кристалл для оптического диапазона представляет собой пространственную решетку с периодом порядка длины волны света с пространственно модулированным показателем пре-

ломления. Различают два основных типа трехмерных ФК, показанные на рис. 1. В первом случае (рис. 1, а) в узлах решетки ФК размещены одинаковые диэлектрические частицы, например, шары. Здесь ϵ_1 и ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость вне и внутри шаров, соответственно. Противоположное решение — периодически расположенные отверстия в диэлектрике. В этом случае (рис. 1, б) узлы решетки в диэлектрике с проницаемостью ϵ_1 связаны друг с другом стержнями с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 .

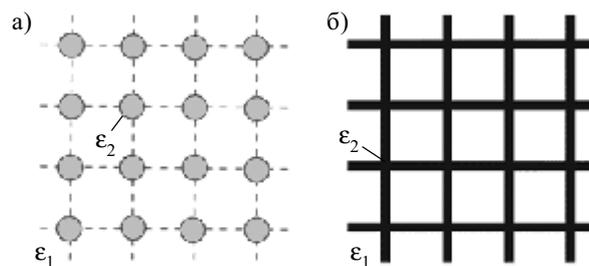


Рис. 1. Основные типы трехмерных ФК:

а — в узлах решетки ФК размещены диэлектрические частицы;
б — узлы решетки связаны друг с другом стержнями

Помимо значения постоянной решетки, характеристики ФК определяются глубиной модуляции показателя преломления — оптическим контрастом, равным отношению показателей преломления элементов решетки и среды, в которой они размещены.

ФК могут быть одно-, двух- и трехмерными. К одномерным ФК относят давно используемые тонкопленочные оптические фильтры, а также планарные отражательные решетки интегральных устройств оптоэлектроники. Принципиальные особенности ФК и других кристаллоподобных структур проявляются в одномерном варианте.

Зонные свойства электронных и фотонных кристаллов определяются дисперсионной характеристикой $\omega(k)$, где ω — круговая частота, k — волновое число. Эта характеристика определяет также и энергетическую зависимость $E(k)$, поскольку $E = \hbar\omega$, $\hbar = h/2\pi$, h — постоянная Планка.

Рис. 2 иллюстрирует зависимость $E(k)$, а также соответствие между электронными и фотонными запрещенными зонами. Здесь m^* — эффективная масса электрона, n^* — эффективный показатель преломления, соответственно характеризующие влияние кристаллической решетки на движущийся в ее поле электрон и движущийся в ФК фотон.

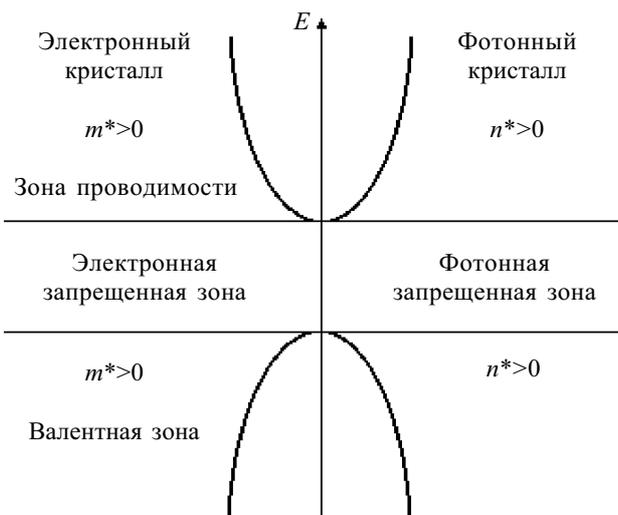


Рис. 2. Соответствие между электронными и фотонными зонами

На границах запрещенной зоны и в самой запрещенной зоне собственные функции кристалла — стоячие волны, так что волны с такими энергиями распространяться не могут. Внутри запрещенной зоны значение k мнимое.

Отрицательность m^* и n^* обусловлена значительным отражением, при котором амплитуда отраженной волны превышает амплитуду падающей. Электроны с отрицательной m^* (эти состояния расположены вблизи потолка зоны) соответствуют дыркам. Отрицательному n^* отвечает отрицательная рефракция — изменение направления распространения света на противоположное.

При $n^* \gg \langle n \rangle$, где $\langle n \rangle$ — средний показатель преломления ФК, свет существенно замедляется. В двумерном ФК экспериментально достигнуто значение $n^* > 90$, что соответствует замедлению света приблизительно на два порядка [4].

В кристалле с нарушенным дальним порядком возникает андерсоновская локализация. Вследствие многократных отражений от неоднородностей и интерференции отраженных волн формируются стоячие волны, локализованные в ограниченной области кристалла. Высокая степень локализации фотонов чрезвычайно важна для различных устройств на основе ФК.

В дисперсии фотонов и электронов имеются два принципиальных различия: 1) линейный закон дисперсии свободных фотонов вместо параболического закона дисперсии свободных электронов; 2) существенная малость размера зоны Бриллюэна ФК, равная π/d (d — постоянная решетки), по сравнению с размером зоны Бриллюэна электронов в полупроводниках, т. е. период ФК приблизительно в 10^3 раз превышает постоянную кристаллической решетки.

Материалы с фотонными запрещенными зонами (ФЗЗ) аналогичны кристаллической решетке, однако имеют больший масштаб. Типичный пример — специальное стекло с цилиндрическими отверстиями, аналогичными атомам. Модификация такой структуры (например, заполнением части отверстий) приводит к эффектам, аналогичным легированию полупроводников.

Природными ФК являются опалы. ФК как многоэлементные структуры сформированы на цветных крыльях бабочек, на волосах морских мышей [5]. Во всех этих случаях ФЗЗ не полная: свет может распространяться лишь в некоторых направлениях.

Для полного подавления спонтанного излучения необходима полная ФЗЗ — всенаправленная зона с нулевой плотностью фотонных состояний. Такая идеализация применима для бесконечного кристалла с высоким оптическим контрастом во всех трех измерениях. Реальные структуры конечны, имеют ограниченный оптический контраст, обладают низкой, по сравнению со сферической, симметрией и имеют дефекты упаковки. Для всенаправленной зоны необходим контраст 2,5—3, чему в оптическом диапазоне частот удовлетворяет лишь очень ограниченный круг полупроводников. Кроме того, такой ФК должен обладать высокой симметрией упаковки для уменьшения дисперсии ФЗЗ в зависимости от направления.

Широкая ФЗЗ (относительно ее средней частоты) обеспечивает значительные оптические эффекты, например, высокую локализацию фотонов, что позволяет уменьшить размеры ФК и устройств на их основе, снизить чувствительность к искажающим эффектам. ФЗЗ образуется не для всех типов решеток, ее существование возможно в гранецентрированной кубической (ГЦК) решетке. Поскольку зона Бриллюэна ГЦК-структуры наиболее близка к сферической, то в ней повышается вероятность перекрытия запрещенных зон для всех направлений в кристалле. Это относится и к решетке алмаза, которая представляет собой комбинацию двух ГЦК-решеток, вдвинутых одна в другую.

В отличие от скалярной модели зонной структуры для электронов (в пренебрежении спина), векторная модель зонной структуры для электромагнитных волн приводит к существенно большим ограничениям в образовании запрещенных спектральных зон, в частности, к вырождению «валентной» зоны и зоны «проводимости» в точке W зоны Бриллюэна ГЦК-решетки со сферическими симметричными диэлектрическими «атомами». Из-за этого возникает только псевдощель, а не полная ФЗЗ. Чтобы снять это вырождение, необходимо использовать несферические «атомы».

Обратим внимание на существенное различие СВЧ- и оптических элементов [6]. Волноводные СВЧ-компоненты (например, металлические волноводы) — экранированные волноводы с жесткой локализацией волны за счет хорошо отражающих стенок. Оптические волноводы относятся к открытым (неэкранированным). Локализация поля в оптических волноводах обычно обусловлена явлением полного внутреннего отражения. По этой причине потери излучения — критическая проблема при конструировании компонентов оптических интегральных схем. Использование металлических отражателей в оптическом диапазоне невозможно вследствие больших потерь в металле. Идеальный материал для оптических волноводов и резонаторов должен обладать малыми потерями, такими, как в диэлектрике, и отражательными свойствами металла. Таким критериям удовлетворяет фотонный кристалл.

К настоящему времени предложено большое число конструкций ФК. Впервые полная ФЗЗ была реализована экспериментально в микроволновом диапазоне на искусственной структуре с ГЦК-решеткой (рис. 3, а) [7]. Поверхность диэлектрика покрывается маской с треугольной решеткой дырок,

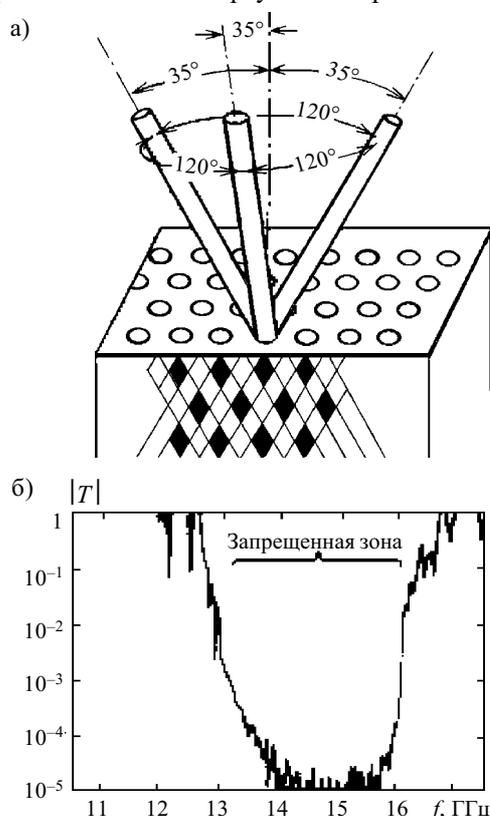


Рис. 3. ФК с полной ФЗЗ для микроволнового диапазона: а — конструкция ФК; б — экспериментальная частотная зависимость модуля коэффициента прохождения ФК

затем в местах расположения дырок механически высверливаются отверстия в трех направлениях, составляющих угол 35° по отношению к нормали и 120° по отношению друг к другу по азимуту. Пересечение высверленных цилиндрических полостей внутри образца определяет трехмерно-периодическую ГЦК-решетку. При пересечении отверстия образуют несферические полости, благодаря чему снимается вырождение фотонного спектра в точке W зоны Бриллюэна ГЦК-решетки. На рис. 3, б приведена экспериментальная частотная зависимость модуля коэффициента прохождения $|T|$ такого ФК, состоящего из 10 слоев; показатель преломления материала равен 3,6. ФЗЗ имеет ширину 3 ГГц с центром на частоте $f=14,5$ ГГц. При наличии одиночного диэлектрического дефекта в центре ФК наблюдается дополнительный пик в ФЗЗ, обусловленный локальным уровнем дефекта.

ФК для микроволнового диапазона изображены на рис. 4. На рис. 4, а показан металлический ФК, имеющий простую тетрагональную структуру [8]. Кристаллическая ячейка ФК образована металлическими брусками смежных слоев. Размеры бруска: ширина 0,8 мм, толщина 2,5 мм, длина 120 мм, расстояние между центрами смежных параллельных брусков 7,6 мм. Запрещенная зона такого ФК расположена в диапазоне от нуля до 20 ГГц.

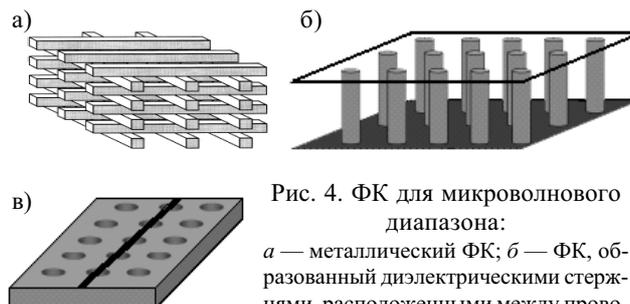


Рис. 4. ФК для микроволнового диапазона: а — металлический ФК; б — ФК, образованный диэлектрическими стержнями, расположенными между проводящими плоскостями; в — ФК на основе микрополосковой линии передачи

ФК, показанный на рис. 4, б, образован диэлектрическими стержнями, расположенными между проводящими плоскостями [9]. На рис. 4, в показан ФК на основе несимметричной микрополосковой линии передачи с периодически расположенными круглыми отверстиями в диэлектрике и заземленной металлизированной поверхности [10].

Как ФК оптического диапазона большую перспективу имеют синтетические опалы [11]. Они обладают высокой технологичностью и возможностью существенного варьирования оптических свойств. Опалы образованы плотноупакованными шарами аморфного SiO_2 и имеют своеобразную кристаллическую решетку фрактального типа [12]. Шары первого порядка диаметром 2000—2500 Å образованы плотноупакованными шарами второго порядка диаметром 300—400 Å, которые, в свою очередь, образованы плотноупакованными шарами третьего порядка диаметром 100 Å. Шары первого порядка образуют плотноупакованную ГЦК-решетку с периодом 3000—4000 Å. В решетке имеются пустоты соответственно трех порядков, связанные между собой каналами в форме рупоров. При точечном контакте между шарами на долю пустот (пор) приходится до 26% общего объема. Это позволяет изменять оптический контраст путем введения различных наполнителей в поры. Композиты, полученные заполнением пор, называют прямыми опалами. Еще большее увеличение контрастности достигается при инвертировании опала, под которым понимается удаление SiO_2 из прямого композита (например, вытравливание SiO_2 из композита "опал — Si").

Конструкции ФК с полной ФЗЗ конструктивно и технологически сложны. Рассмотрим конструкции, позволяющие упростить технологию изготовления.

Важная особенность, необходимая для формирования полной ФЗЗ, — связность структуры ФК [13]. На рис. 5, а показана относительно простая конструкция трехмерного ФК на основе двухмерного ФК с диэлектрическими областями Si/SiO_2 , расположенными в шахматном порядке. Связность обеспечена вытравленными сквозными отверстиями. На рис. 5, б приведена конструкция, модифицированная с учетом технологии изготовления осаждением чередующихся слоев. Структура эквивалентна кристаллической решетке алмаза. Рис. 5, в—д иллюстрируют технологию изготовления. Вначале электронно-лучевой литографией и сухим травлением изготавливается рифленая подложка (рис. 5, в). Затем автоклонированным

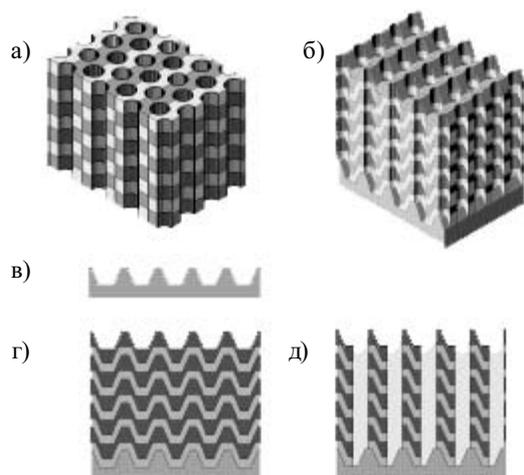


Рис. 5. Трехмерный ФК с полной ФЗЗ для оптического диапазона:

a — конструкция ФК, образованного диэлектрическими областями, расположенными в шахматном порядке, со сквозными отверстиями; *b* — модифицированная конструкция ФК; *в* — рифленая подложка; *г* — формирование многослойной структуры; *д* — вытравливание отверстий

осаждением формируется многослойная структура Si/SiO₂ (рис. 5, *г*). Завершающий этап — вытравливание отверстий электронно-лучевой литографией (рис. 5, *д*). Относительная ширина ФЗЗ равна 11,8%.

На рис. 6 показана другая конструкция трехмерного ФК с полной ФЗЗ для оптического диапазона [14].



Рис. 6. Трехмерный ФК с полной ФЗЗ, образованный горизонтально смещенными слоями

Структура образована плоскими идентичными горизонтально смещенными слоями с периодичностью в три слоя. Этот трехмерный ФК можно рассматривать как образованный двумя двумерными ФК: диэлектрические стержни в воздухе и воздушные цилиндры в диэлектрике. Такой высокосимметричный плоский исходный слой позволяет упростить конструкции интегральных оптических приборов и компонентов, поскольку необходима модификация лишь одного слоя использованием простых идентичных дефектов, таких же, как и в исходных двумерных ФК. Сочетанию Si/воздух соответствует ФЗЗ с относительной шириной 21%, сочетанию Si/SiO₂ — 8%.

Одно из применений ФК радиодиапазона, конструкция которого показана на рис. 4, *в*, — в качестве выходного фильтра усилителя для фильтрации шумов и гармоник [10]. На рис. 7 приведена экспериментальная частотная зависимость модуля коэффициента отражения $|R|$ такого фильтра. Параметры фильтра: 8 периодов вдоль направления распространения (9 отверстий), два периода (3 отверстия) — в поперечном направлении; период — 5,08 мм, диаметр отверстия — 1,27 мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки — 10,5. ФЗЗ соответствуют значения $|R| \approx 1$. Для расширения ФЗЗ в

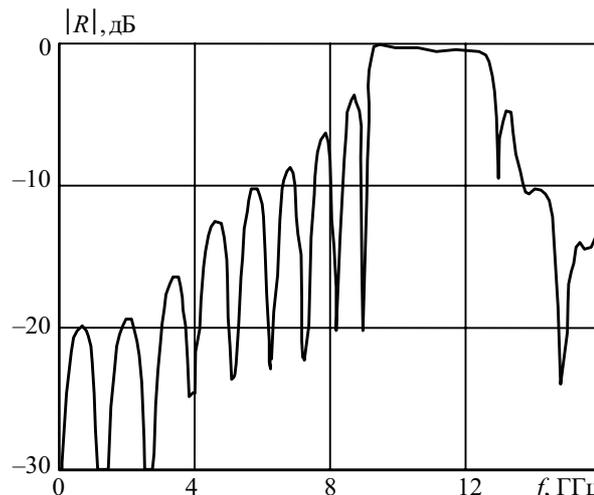


Рис. 7. Экспериментальная частотная зависимость модуля коэффициента отражения фильтра на основе ФК

одной конструкции объединены три таких ФК с различающимися параметрами.

Еще одно применение ФК такой конструкции — уменьшение поперечных искажений в связанных линиях [15]. ФК выполнен с квадратными или прямоугольными отверстиями по одному в ряд и расположен под пассивной линией. За счет уменьшения связи между линиями улучшается передача с активной линией.

В [16] предложено использование ФК для улучшения диаграмм излучения антенн, предназначенных для контроля электромагнитной совместимости. В случае печатной микрополосковой антенны трехмерный ФК используется в качестве подложки. Такие структуры виртуально невидимы на некоторых частотах и ведут себя как проводники на других частотах, не позволяя сигналу распространяться.

Антенны, предназначенные для контроля электромагнитной совместимости, отличаются очень широкой полосой. ФК может использоваться в качестве структуры, формирующей поле излучения антенны. В [16] предложено использование ФК для расширения частотного диапазона рупорной антенны за счет уменьшения уровня излучения мод высокого порядка.

Для эффективного конструирования антенн с ФК необходимо априорное знание поля излучения антенны. Это поле может быть рассчитано численным моделированием.

Больше возможностей в формировании характеристик устройств обеспечивают трехмерные ФК. Однако конструкции таких ФК заметно сложнее в производстве. Еще одно ограничение связано с размерами ФК. Для полного подавления распространения энергии ФК должен быть “электрически протяженным” (в идеальном случае бесконечным). Ограниченные миниатюрные ФК обеспечивают лишь частичное подавление распространения. Это ограничение особенно существенно для печатных конструкций, в которых ФК может занимать значительную площадь.

Антенны, сконструированные на поверхности подложек, выполненных как ФК, отличаются высокой эффективностью и направленностью по сравнению с обычными антеннами на диэлектрических подложках. Трехмерный ФК позволяет существенно повысить

эффективность излучения резонансной антенны [17]. Антенна образована излучающим монополем, помещенным в резонансную полость трехмерного ФК. Диапазон ФЗЗ от 10,6 до 12,8 ГГц. На краях зоны направленность равна 100, максимальное значение — 310 на резонансной частоте 10,7 ГГц. Усиление по мощности на резонансной частоте равно 180.

ФК радиодиапазона сантиметрового масштаба могут использоваться для моделирования сложных оптических ФК микрометрового масштаба. В [18] рассмотрены устройства на основе ФК конструкции рис. 4, в для моделирования брэгговских отражательных решеток устройств волоконно-оптических линий связи. Характеристики неаподизованных и аподизованных ФК радио- и оптического диапазонов хорошо соответствуют друг другу. Аподизация выполнена уменьшением диаметра отверстий от центра к краям структуры. Без аподизации экспериментальный и теоретический уровни боковых лепестков частотной зависимости модуля коэффициента отражения равны -2 дБ, с аподизацией — -9 и -12 дБ, соответственно.

Фотонные кристаллы служат основой нового поколения компактных элементов и устройств интегральной оптики и волоконно-оптических линий связи. Среди этих элементов и устройств — миниатюрные расщепители, волноводы с остроугольным изгибом, переключатели, поверхностно излучающие лазеры с вертикальной полостью, светодиоды с резонансной полостью, фильтры, волоконные световоды. Трехмерные ФК открывают возможность полного управления фотонными модами и, следовательно, конструирования лазеров и светодиодов с предельной эффективностью. ФК обеспечивают важное для технических приложений удержание излучения для всем направлениям с малыми потерями.

За счет ФЗЗ обеспечивается отражение волны, альтернативное обычному полному внутреннему отражению (ПВО). Рис. 8 иллюстрирует конструкции резонаторных полостей и волноводов в зависимости от размерности ФК [6].

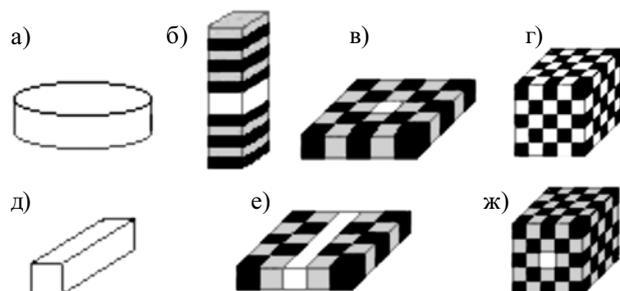


Рис. 8. Конструкции резонаторных полостей и волноводов на основе ФК:

a — лазерный микродиск; *б* — резонаторная полость лазера с вертикальным излучением; *в* — двухмерный ФК; *г* — трехмерный ФК; *д* — диэлектрический волновод; *е* — волновод с локализацией света в горизонтальной плоскости за счет ФК; *ж* — волновод с локализацией света в горизонтальной и вертикальной плоскости за счет ФК

Для характеристики конструкций с учетом используемых эффектов отражения по каждой из трех осей введем буквенную классификацию: *T* — локализация за счет ПВО, *P* — локализация за счет ФЗЗ, *E* — распространение света.

Лазерный микродиск (рис. 8, *a*) в горизонтальной плоскости обладает высокодобротной модой “шепчущей галереи” за счет многократного ПВО. Поскольку свет локализован благодаря этому эффекту вдоль каждой из осей, обозначим конструкцию через T^3 . Над и под полостью лазера с вертикальным излучением (рис. 8, *б*) размещены две стопы, образованные четвертьволновыми слоями. Периодические структуры образуют одномерный ФК, локализирующий свет в вертикальном направлении. В двух других направлениях свет локализован за счет ПВО. Таким образом, конструкция имеет обозначение P^1T^2 . В конструкции, показанной на рис. 8, *в*, локализация в горизонтальной плоскости обусловлена ФЗЗ двухмерного ФК, вертикальная локализация — за счет ПВО. Обозначение конструкции — P^2T^1 . Конструкция на рис. 8, *г* соответствует трехмерному ФК с локализацией света во всех трех направлениях за счет ФЗЗ. Такой ФК имеет обозначение P^3 . Обычный диэлектрический волновод (рис. 8, *д*) имеет обозначение E^1T^2 . Волновод с локализацией света в горизонтальной плоскости за счет ФЗЗ и в вертикальном направлении за счет ПВО (рис. 8, *е*) — $E^1P^1T^1$. Волновод с локализацией света в двух направлениях за счет ФЗЗ (рис. 8, *ж*) — E^1P^2 .

Рис. 9, а иллюстрирует формирование конструкции трехмерного (3D) микрорезонатора на основе одномерного (1D) микрорезонатора, предназначенного для усиления излучения в вертикальном направлении, и двухмерного (2D) горизонтального ФК для подавления горизонтальных или близких к горизонтальным мод [19]. Добротность микрорезонаторов на основе ФК достигает величин, превышающих 10^3 .

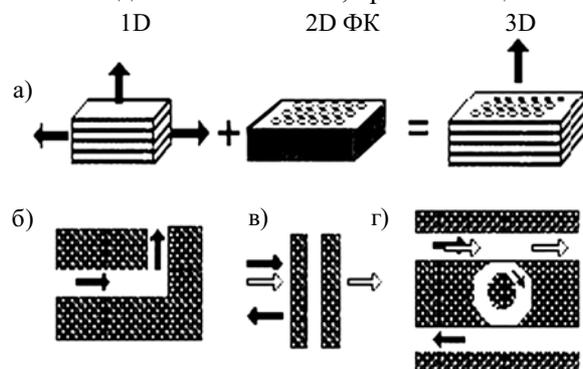


Рис. 9. Конструкции элементов интегрально-оптических устройств на основе ФК:

a — микрорезонатор; *б* — волновод с остроугольным изгибом; *в* — проходной фильтр; *г* — фильтр соединитель-разделитель

Привлекательность использования ФК в интегральной оптике объясняется следующими обстоятельствами:

1) высокая функциональная плотность, обусловленная тем, что ФК позволяют реализовать оптические функции в пределах размеров порядка длины волны без потерь (т. к. колебания связаны только с затухающими модами);

2) возможность изготовления в едином литографическом цикле конструктивно разнообразных структур для большого числа функций;

3) новые функции, обусловленные особенностями ФК (такими как дифракция, положительная реф-

рация со значительным замедлением, отрицательная рефракция [19]. Рис. 9 иллюстрирует использование ФК для волновода с остроугольным изгибом (б), проходного фильтра (в), фильтра соединитель-разделитель (з).

Оптические фильтры и мультиплексоры по длине волны — базовые компоненты современных оптических коммуникационных систем с мультиплексированием по длине волны. Построение этих компонентов на основе ФК позволяет существенно уменьшить их габариты. Для оптических фильтров применим аналог простого решения, известного из теории линий передачи, — резонатор, связанный с волноводом. Фильтр образован введением полости по одну из сторон волновода на основе ФК, выполненного из кремниевых стержней квадратного сечения в воздухе (врезка на рис. 10, а). На рис. 10 приведены характеристики модуля коэффициента пропускания такого фильтра соответственно с сильной и средней связью резонатора и волновода, рассчитанные методом конечных разностей во временной области [20]. Для уменьшения связи между резонатором и волноводом добавлен один слой.

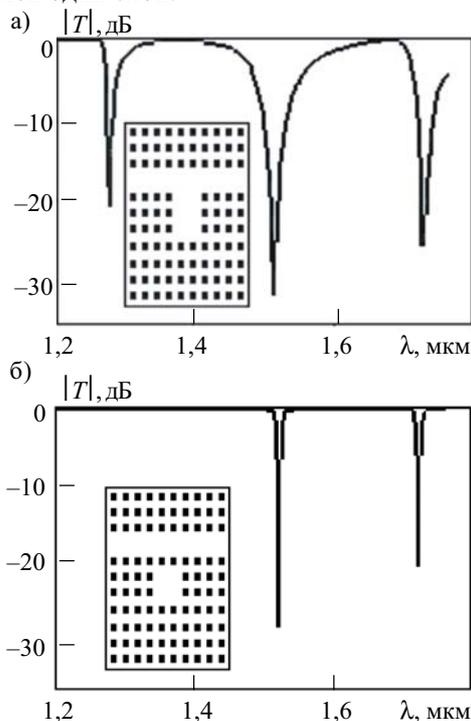


Рис. 10. Характеристики пропускания и конструкции фильтров на основе резонатора, связанного с волноводом: а — сильная связь резонатора и волновода; б — средняя связь резонатора и волновода

Спектральные свойства такого сверхузкополосного гребенчатого фильтра определяются формой сечения стержней, образующих полость. В [21] приведены характеристики фильтров, рассчитанные методом конечных элементов. Фильтр образован кремниевыми стержнями в воздухе с постоянной решетки, равной 600 нм. В первом варианте все стержни имеют квадратное сечение с длиной стороны, равной 150 нм, во втором — полость образована стержнями круглого сечения.

Оптические линии задержки (ЛЗ) — базовые элементы полностью оптических компьютеров будущего. Для демультиплексирования и оптических вычислительных систем необходимы компактные ЛЗ, предназначенные для задержки ультракоротких импульсов. Существенное замедление света в ФК служит физической основой ЛЗ. Однако значительная дисперсия на краях ФЗЗ приведет к существенным искажениям ультракоротких импульсов. Этот недостаток преодолевается при использовании обусловленной связанными дефектами полосы пропускания с квазиплоской характеристикой пропускания [22].

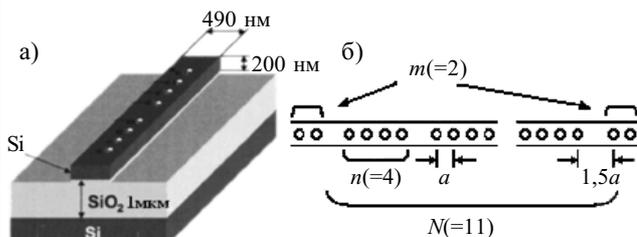


Рис. 11. Оптическая ЛЗ на основе ФК: а — конструкция ЛЗ; б — геометрия отверстий и неоднородностей ФК

Конструкция основана на фотоннокристаллическом кремниевом полосковом волноводе, выполненном на диоксиде кремния (рис. 11, а). ФК образован отверстиями в волноводе, дефекты — увеличенным расстоянием между группами отверстий (рис. 11, б). Характеристика пропускания зависит от трех параметров — общего числа дефектов (N), числа отверстий между двумя соседними дефектами (n), числа отверстий на краях (m). Время задержки пропорционально N . Значение n определяет коэффициент связи и, соответственно, полосу пропускания, m — плоскостность характеристики. Для экспериментальной ЛЗ, рассмотренной в [22], с учетом технологических погрешностей выбраны такие параметры: $N=11$, $n=4$ и $m=2$. Диаметр отверстий равен 200 нм, расстояние между центрами соседних отверстий $a=420$ нм, расстояние между неоднородностями — 610 нм. Задержка импульса длительностью 110 фс с длиной волны 1,53 мкм составила 600 фс при длине ЛЗ 20 мкм.

Аномальная дисперсия ФК приводит к эффекту, названному сверхпризменным. Этот эффект используется в демультиплексорах по длине волны [23]. Рис. 12 иллюстрирует демультиплексирование пучка, падающего под углом α по отношению к нормали n к плоскости раздела Y среды и ФК. Здесь θ_g — угол групповой скорости света внутри ФК по отношению к нормали n ; $\lambda_1 \dots \lambda_8$ — длины волн парциальных пучков демультиплексированного падающего пучка. Эффективный показатель преломления в области ФК n_3 определяется выражением

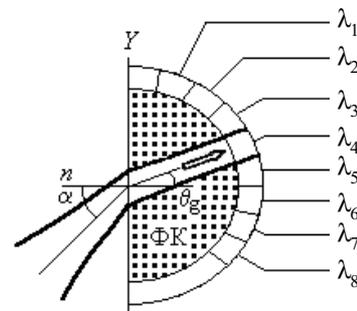


Рис. 12. Демультиплексирование по длине волны за счет аномальной дисперсии ФК

$$n_z = (1/\cos\theta_g)[\partial(k_t/k_0)/\partial\theta_g],$$

где k_t — тангенциальная составляющая волнового вектора по отношению к плоскости Y ;

k_0 — волновое число в свободном пространстве.

Значение n_z существенно зависит от длины волны и угла α . В [23] предложен метод оптимизации конструкции такого демультимплексора.

Высокая степень локализации фотонов внутри ФК открывает возможность решения проблем создания квантовых компьютеров [24]. Квантовые компьютеры — физические устройства, выполняющие логические операции над квантовыми состояниями путем унитарных преобразований, не нарушающих квантовые суперпозиции в процессе вычислений. Простейшей системой, выполняющей функцию, аналогичную битам в классическом компьютере, является система с двумя возможными состояниями $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Общее состояние такой системы — q -бит — квантовая суперпозиция нуля и единицы: $|q\rangle = C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$, где C_0 и C_1 — комплексные амплитуды ($|C_0|^2 + |C_1|^2 = 1$). Физическими системами, реализующими q -биты, могут быть любые объекты, имеющие два квантовых состояния, например, поляризационные состояния фотонов.

Основная проблема создания квантовых компьютеров — быстрый распад суперпозиционных состояний (декогеренция). Время сохранения когерентности состояний должно быть больше времени вычислений. Для этого необходимо увеличивать время когерентности искусственно либо найти квантовые системы, максимально изолированные от окружающей среды. Изоляция полевых квантовых систем — мод поля возможна в высокодобротных микрорезонаторах оптического и микроволнового диапазонов, в которых при миллиметровых размерах достигаются параметры, обеспечивающие время сохранения суперпозиционных оптических состояний от секунд до микросекунд. Трехмерные ФК за счет высокой локализации фотонов обеспечивают решение этой проблемы.

Применение ФК в оптических волоконных световодах доведено до промышленного производства (фирмы BlazePhotonics, Crystal Fibre). Рис. 13 иллюстрирует два основных конструктивных решения ФК-световодов. Идея ФК-световодов основана на рассмотренной выше замене локализации света за счет полного внутреннего отражения в обычных световодах локализацией, обусловленной ФЗЗ.

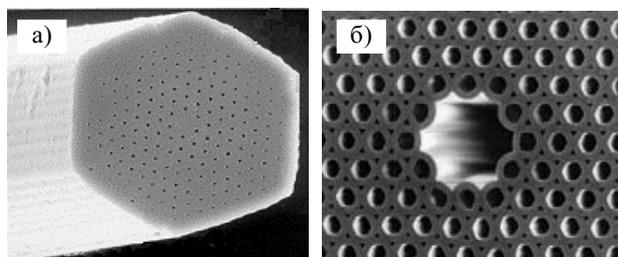


Рис. 13. Сечения ФК-световодов: *a* — световод с воздушными отверстиями; *b* — световод с полой сердцевинной

На рис. 13, *a* показан одномодовый ФК-световод, выполненный из нелегированного кварцевого стекла с воздушными отверстиями. Такой световод имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с обыч-

ным. Обычный одномодовый световод обладает одномодовым характером лишь в ограниченном диапазоне длин волн (свыше длины волны отсечки). ФК-световод не имеет такого ограничения. Большая длина и изгибы в обычном световоде приводят к потерям из-за утечки света. ФК-световод позволяет передавать мощность, приблизительно в 20 раз превышающую предельную мощность для обычного световода.

В световоде с полой сердцевинной (рис. 13, *b*) уменьшены потери по сравнению с предыдущей конструкцией. Использование воздушного волноводящего канала позволяет полностью исключить оптическую нелинейность, так что порог мощности, при котором проявляются нелинейные эффекты, возрастает в 10^3 раз по сравнению с обычным световодом. На концах световода нет рассогласования показателей преломления, что исключает отражение волны.

Обычно требуется, чтобы световод был оптически линейным в возможно более широком диапазоне мощностей передаваемого сигнала. Для ряда применений (усиление, генерация, переключение световых сигналов), напротив, важна высокая нелинейность. Нелинейные ФК-световоды усиливают нелинейные эффекты за счет концентрации света в сердцевине с очень малым ее диаметром, приблизительно равным $0,8\lambda$. Такой световод позволяет сформировать солитоны в видимой и ближней инфракрасной области спектра, а также спектрально супернепрерывный свет (яркий, как лазерный, и широкополосный, как солнечный) от низкоэнергетических пикосекундных импульсов.

Для телекоммуникационных и сенсорных систем, ряда применений на основе лазеров необходимы световоды, поддерживающие поляризацию света. В ФК-световодах значительный скачок показателя преломления между кварцевым стеклом и воздухом позволяет использовать двойное лучепреломление, усиливающееся с увеличением длины волны. Тактовая длина таких световодов составляет 100 мкм и менее, что на порядок лучше по сравнению со световодами для этих целей на основе полного внутреннего отражения. Кроме того, ФК-световоды существенно менее чувствительны к температурным и механическим воздействиям.

Трудность изготовления обычных световодов с двумя и более сердцевинами заметно возрастает. Изготовление многосердцевинного ФК-световода не сложнее, чем одномодового, поскольку используется такой же технологический процесс. Сердцевины могут быть расположены исходя из условия их полной изоляции или на расстоянии, обеспечивающем эффективную связь между ними.

ФК-световоды изготавливаются из пучка трубок и прутков из кварцевого стекла, образующих “макроскопическую” преформу структуры световода. Преформа скрепляется танталовой проволокой и помещается в печь для вытяжки. При температуре приблизительно 2000°C кварцевое стекло размягчается. В результате двухэтапной вытяжки формируется ФК-световод с расстоянием между соседними отверстиями, равным 1 мкм, и диаметром отверстий 25 нм. (Выполнение столь малых отверстий на длине в ки-

лометры волокна занесено в Книгу рекордов Гиннеса в 2000 году.)

Световедущая сердцевина формируется как дефектная область за счет замены части трубок прутками или удалением одной или нескольких трубок из пучка. Формирование особенностей дефектной области выполняется за счет утолщения или утоньшения стенок трубок в требуемых областях волокна.

Таким образом, фотонные кристаллы предоставляют принципиально новые возможности управления световыми потоками благодаря наличию полной фотонной запрещенной зоны в плотности электромагнитных состояний в заданной области частот. Такие возможности экспериментально продемонстрированы для микроволновой области, частично в инфракрасном и видимом диапазонах спектра. Трудности в создании фотонных кристаллов несоизмеримо возрастают по мере увеличения частоты фотонной запрещенной зоны, однако можно надеяться, что значительные усилия, прилагаемые в этом направлении, делают решение проблемы вопросом времени.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Спроул Р. Современная физика.— М.: Наука, 1974.
2. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett.— 1987.— Vol. 58, N 20.— P. 2059—2062.
3. www.pbglink.com
4. www.brl.ntt.co.jp/group/shitsubi-g/project2-e.htm
5. Yablonovitch E. Photonic crystals: semiconductors of light // Scientific American.— 2001.— Vol. 285, N 6.— P. 46—54.
6. Meade R. D., Devenyi A., Joannopoulos J. D. et al. Novel applications of photonic band gap materials: Low-loss bends and high Q cavities // J. Appl. Phys.— 1994.— Vol. 75, N 9.— P. 4753—4755.
7. Yablonovitch E., Gmitter T. J., Leung K. M. Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms // Phys. Rev. Lett.— 1991.— Vol. 67, N 17.— P. 2295—2298.
8. Temelkuran B., Ozbay E., Sigalas M. et al. Reflection properties of metallic photonic crystals // Appl. Phys. A.— 1998.— Vol. 66, N 3.— P. 363—365.
9. Maradudin A. A., McGurn A. R. Photonic band structure of a truncated, two-dimensional, periodic dielectric medium // J. Opt. Soc. Am. B.— 1993.— Vol. 10, N 2.— P. 307—313.
10. Radisic V., Qian Y., Itoh T. Broad-band amplifier using dielectric photonic bandgap structure // IEEE Microwave and Guided Wave Letters.— 1998.— Vol. 8, N 1.— P. 13—14.
11. Голубев В. Г., Кособукин В. А., Курдюмов Д. А. и др. Фотонные кристаллы с перестраиваемой запрещенной зоной на основе заполненных и инвертированных композитов опал-кремний // ФТП.— 2001.— Т. 35, вып. 6.— С. 710—713.
12. Богомолов В. Н., Парфеньева Л. С., Смирнов И. А. и др. Прохождение фононов через фотонные кристаллы — среды с пространственной модуляцией акустических свойств // ФТТ.— 2002.— Т. 44, вып. 1.— С. 175—179.
13. Notomi M., Tamamura T., Kawashima T. et al. Drilled alternating-layer three-dimensional photonic crystals having a full photonic band gap // Appl. Phys. Lett.— 2000.— Vol. 77, N 26.— P. 4256—4258.
14. Johnson S. G., Joannopoulos J. D. Three-dimensionally periodic dielectric layered structure with omnidirectional photonic band gap // Appl. Phys. Lett.— 2000.— Vol. 77, N 22.— P. 3490—3492.
15. Rodriguez-Pereyra V., Elsherbeni A. Z., Smith C. E. Photonic bandgap structures for minimizing the coupling between microstrip lines // IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting.— Orlando.— 1999.— P. 125—128.
16. Rodriguez-Pereyra V. Photonic bandgap structures and their application to EMC antennas // ITEM.— 2002.— P. 90—95.
17. Temelkuran B., Bayindir M., Ozbay E. et al. Photonic crystal-based resonant antenna with a very high directivity // J. Appl. Phys.— 2000.— Vol. 87, N 1.— P. 603—605.
18. Erro M. J., Laso M. A. G., Lopetegui T. et al. Modeling and testing of uniform fiber bragg gratings using 1-D photonic bandgap structures in microstrip technology // Fiber and Integrated Optics.— 2000.— Vol. 19, N 4.— P. 311—325.
19. Weisbuch C., Benisty H., Houdré R. Microcavities, photonic crystals and semiconductors: from basic physics to applications in light emitters // International Journal of High Speed Electronics and Systems.— 2000.— Vol. 10, N 1.— P. 339—354.
20. Ridder R. M., Stoffer R. Applicability of the finite-difference time-domain method to photonic crystal structures / In book: Nanoscale linear and nonlinear optics / Ed. by M. Bertolotti et al.— American Institute of Physics, 2001.— P. 99—106.
21. Cucinotta A., Selleri S., Vincetti L. et al. Impact of cell geometry on the spectral properties of photonic crystal structures // Appl. Phys. B.— 2001.— Vol. 73, N 5—6.— P. 595—600.
22. Sugimoto Y., Lan S., Nishikawa S. et al. Design and fabrication of impurity band-based photonic crystal waveguides for optical delay lines // Appl. Phys. Lett.— 2002.— Vol. 81, N 11.— P. 1946—1948.
23. Momeni B., Adibi A. Optimization of photonic crystal demultiplexers based on the superprism effect // Appl. Phys. B.— 2003.— Vol. 77, N 6—7.— P. 555—560.
24. Килин С. Я. Квантовая информация // УФН.— 1999.— Т. 169, № 5.— С. 507—527.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Шабанов Б. М., Яцков А. С. VHDL — ЯЗЫК ОПИСАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ: Уч. пособие.— М.: МИЭТ, 2003.— 140 с.

Дано описание VHDL — языка описания сверхскоростных интегральных схем и устройств. Подробно обсуждается синтаксис языка по стандарту ANSI/IEEE Std 1076-1987. Описывается ряд изменений, внесенных в стандарт ANSI/IEEE Std 1076-1992. Приведено значительное количество примеров использования конструкций языка.

Для студентов, обучающихся проектированию и технологии создания электронных средств, а также для разработчиков интегральных схем и электронных вычислительных устройств и систем.

