



ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ В ОПТИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

*ИВАНОВ П.С., УНОЛЬД Х., ЛЫСАК В.В.,
СУХОИВАНОВ И.А.*

Анализируются основные свойства и особенности фотонных кристаллов с различной степенью ограничения оптического излучения, а также оптоволоконные устройства, созданные на их основе.

Введение

В настоящий момент фотонные кристаллы (ФК) все шире используются в оптоэлектронной и микроволновой технике. Однако наиболее перспективной областью, где ФК могут привести к новым решениям, является полупроводниковая лазерная техника. Согласно работам, связанным с использованием ФК, такие структуры способны существенно улучшить параметры лазерных диодов [1,2], что подразумевает сокращение ширины полосы лазерного излучения, уменьшение порогового тока и повышение модуляционных свойств. По прогнозам ведущих специалистов, ФК способны привести даже к революции в микроволновой и оптической технике [2]. Особый интерес они представляют для создания новых типов полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором – VCSEL. В данном случае задача состоит в том, чтобы добиться более глубокого понимания принципов работы VCSEL с ФК и найти решения, которые обеспечат одномодовый режим генерации излучения в этом лазере. Однако в отечественной литературе таким структурам уделяется недостаточно внимания. Поэтому в данной статье мы постарались коснуться основных понятий, связанных с ФК, первых результатов по использованию данных структур в оптоволоконной технике, а также проблем теоретического моделирования и адекватного описания устройств с ФК, стоящих перед исследователями.

1. Физика ограничения света в ФК

ФК являются специфическим классом сред, в которых возможно управление и контроль над процессами распространения электромагнитных волн. Изготовленные специальным образом ФК способны пропускать электромагнитные колебания только с определенной длиной либо локализовывать их в определенных областях ФК. В зависимости от типа кристаллов, они проявляют свои свойства в одном, двух и трех пространственных измерениях.

Физическая концепция энергетических зон в ФК во многом сходна с представлением энергетических зон полупроводниковых материалов. Как и в полупроводниках, носители заряда могут иметь лишь определенные дискретные значения энергии, определяемые положением носителей в валентной зоне и зоне проводимости, и не могут иметь значения энергий, которые соответствуют запрещенной зоне [3]. По аналогии с этим, в ФК существуют зоны запрещенных и разрешенных значений энергий фотонов. Для наглядности на рис. 1, а, б приведены энергетические диаграммы для электронов и фотонов в полупроводниках и ФК соответственно.

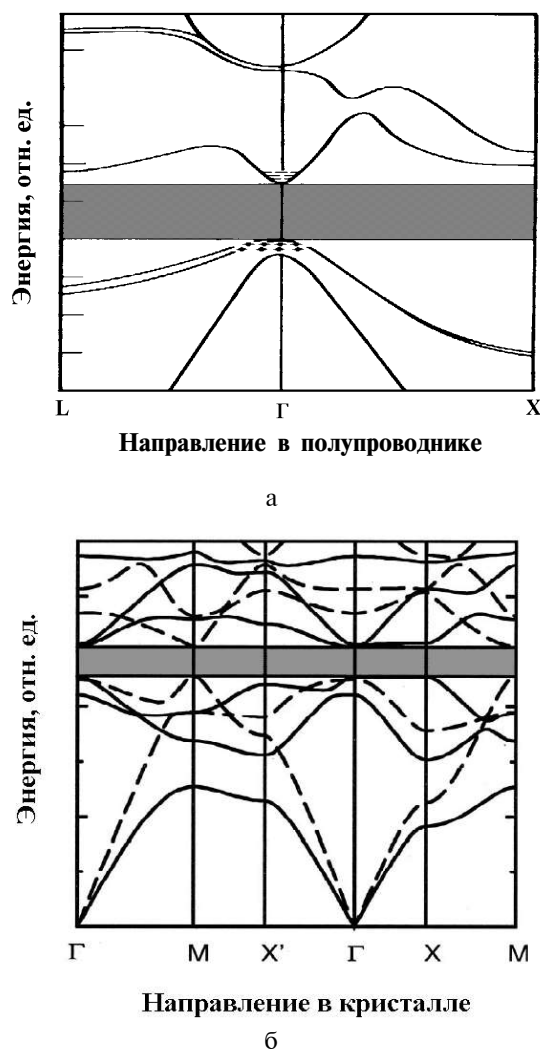


Рис. 1. Примеры энергетической диаграммы для носителей заряда в полупроводнике (а) и для фотонов в фотонном кристалле (б)

Электромагнитная волна оптического диапазона, характеризуемая энергией, соответствующей разрешенным значениям энергии для данного кристалла, способна локализовываться и распространяться в ФК. Напротив, волна с энергией запрещенной зоны отражается обратно в среду практически без потерь. В ФК также можно создавать энергетические уровни в запрещенных зонах посредством изменения размеров или формы периодической структуры.

Простейшим примером одномерного (1D) ФК является слоистая структура отражателя Брэгга, приведенная на рис. 2,а. Она обеспечивает ограничение оптического излучения в одном пространственном направлении, перпендикулярном к плоскости слоев. Другими словами, такая структура представляет собой среду с периодической модуляцией показателя преломления

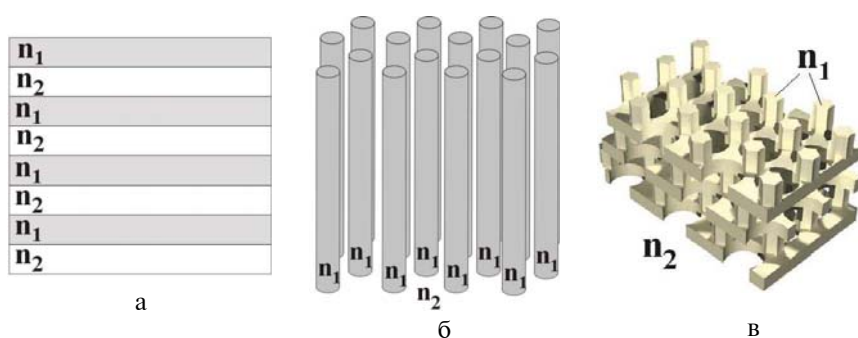


Рис. 2. Примеры одно- (а), двух- (б) и трехмерных (в) фотонных кристаллов [5]. Здесь n_1 и n_2 соответствуют областям с разными значениями показателя преломления материала

известна и широко используется в лазерной и телекоммуникационной технике. Практическое воплощение двух- и трехмерных ФК, приведенных на рис. 2,б,в соответственно, было вызвано в 1999г. революционными результатами исследований вибрации электронов в металлической пластине [4]. Так, впервые было показано, что массив малых отверстий в тонкой металлической пленке способен пропускать электромагнитное излучение с длиной волны, большей, чем радиус отверстий. Это стимулировало дальнейшую разработку и исследование структур с периодической модуляцией показателя преломления в двух- и трехпространственных координатах, которые и получили впоследствии название двух- и трехмерных ФК.

2. Одномерные ФК

Одномерные ФК предусматривают ограничение светового пучка в одном направлении. Наиболее распространенным прибором является периодическая решетка Брэгга, схематически представленная на рис 2,а. Ограничение света в данной структуре подчиняется закону Брэгга:

$$d_1 n_1 = d_2 n_2 = \lambda_B / 4 ,$$

благодаря чему эти решетки получили название четвертьволновых.

Одномерные решетки широко применяются в качестве зеркал для лазеров с распределенными брэгговскими отражателями и в лазерах с вертикальным излучением. В телекоммуникации используются фильтры с брэгговскими решетками для компенсации волоконной дисперсии в системах с разделением каналов по длине волны (wave division multiplexing – WDM). Кроме периодических одномерных структур, применяются и чирпинговые зеркала, в которых толщина слоя с большим показателем преломления изменяется от слоя к слою. Такие зеркала обладают отрицательной дисперсией групповой задержки и применяются в системах ультракоротких импульсов.

3. Двумерные ФК

В оптоволоконной технике наряду с одномерными ФК успешно реализованы и используются двумерные структуры. Примерами могут служить так называемые ‘дырочные волокна’.

По принципу действия световоды можно разделить на два типа. Первый – это обычные световоды, основанные на эффекте полного внутреннего отражения света от границ слоев стекла. Во втором типе локализация волны происходит из-за совпадения длины волны распространяющегося излучения с длиной волны, соответствующей энергии запрещенной зоны для фотонов в дырочном слое (световоды, основанные на эффекте фотонных кристаллов). Таким образом, можно говорить о возникновении нового типа волоконных световодов, в которых используется фокусирующая способность периодически расположенных отверстий.

Дырочные волокна, впервые полученные группой проф. Birks в 1997 году, сразу привлекли к себе внимание благодаря возможностям создания одномодового режима [6] и передачи высокомошных оптических сигналов. Начиная с 2001 года, их производит серийно компания Crystal Fibre.

Типичная структура дырочных волокон, представленная на рис. 3, состоит из сердцевины, окруженной цилиндрическими отверстиями, заполненными воздухом [7]. В результате излучение фокусируется в центральной части, там, где отсутствует отверстие. Другими словами, согласно концепции ФК [8], происходит локализация света в дефекте решетки, приходящемся на центральную часть волокна.

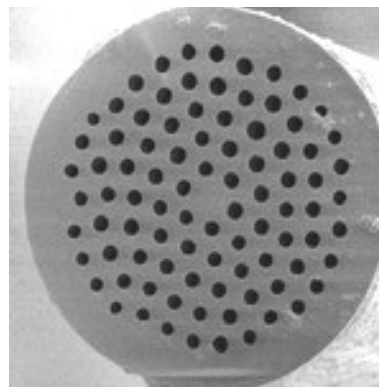


Рис. 3. Фотография скола дырочного волокна, полученная с помощью электронного микроскопа

Следующий тип двумерного ФК – это структура, созданная для кремния с периодически расположенными отверстиями (рис. 2,б). Сформированный канал в такой структуре позволяет передавать когерентный свет в оптическом диапазоне длин волн с минимальными потерями, высокой эффективностью передачи (95 % в сравнении со стандартными светопередающими средами – около 30%), используемыми в настоящее время. При этом можно направлять лучи по сложной траектории, содержащей “изгибы”, практически под прямым углом в заданную точку (рис. 4) [9]. Потери на изгиб в таких устройствах практически отсутствуют, а радиус изгиба в пять–десять раз меньше, чем в использующихся сейчас устройствах интегральной оптики.

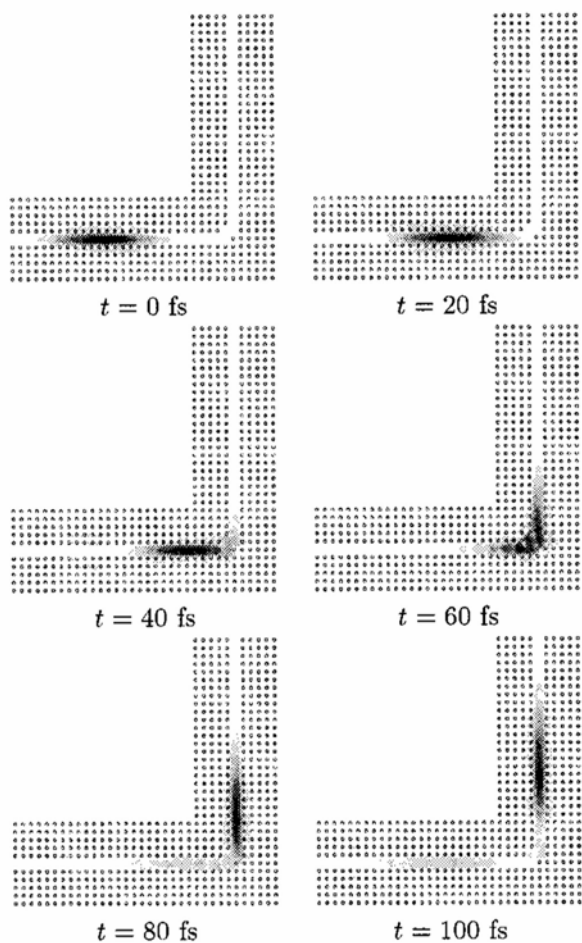


Рис. 4. Модель прохождения оптического импульса через прямоугольный канал в структуре двумерного ФК [9]

4. Трехмерные ФК

Трехмерные ФК являются наиболее сложными структурами, позволяющими создавать запрещенную зону для электромагнитного излучения во всех пространственных измерениях.

На данный момент существует много работ по моделированию и технологии изготовления 3D ФК. К таким структурам относятся “яблоновит” (первая фотонная структура в диапазоне СВЧ, реализована Эли Яблоновичем, сотрудником ком-

пании Bell Labs, в конце 80-х), прямые и инверсные опалы, woodpile структура (под микроскопом фотонная решетка похожа на подготовленный костер, сложенный “колодцем”) и более сложные структуры. На рис. 2, в показана теоретически разработанная в Массачусетском технологическом институте структура, обладающая достаточно широкой запрещенной зоной для фотонов (порядка 21%), но при этом более простая в изготовлении по сравнению со своими предшественниками [10].

Наиболее перспективным, на наш взгляд, является использование трехмерных ФК в полупроводниковых лазерах. Теоретические исследования таких лазеров начались практически одновременно с началом исследований самих ФК. В работе [2] авторы теоретически исследовали лазер вертикального типа (рис. 5,а), в котором трехмерные ФК располагались по всему объему устройства. При этом было показано, что такой лазер имеет потенциальные возможности для генерации когерентного излучения при сверхмалых значениях электрического тока.

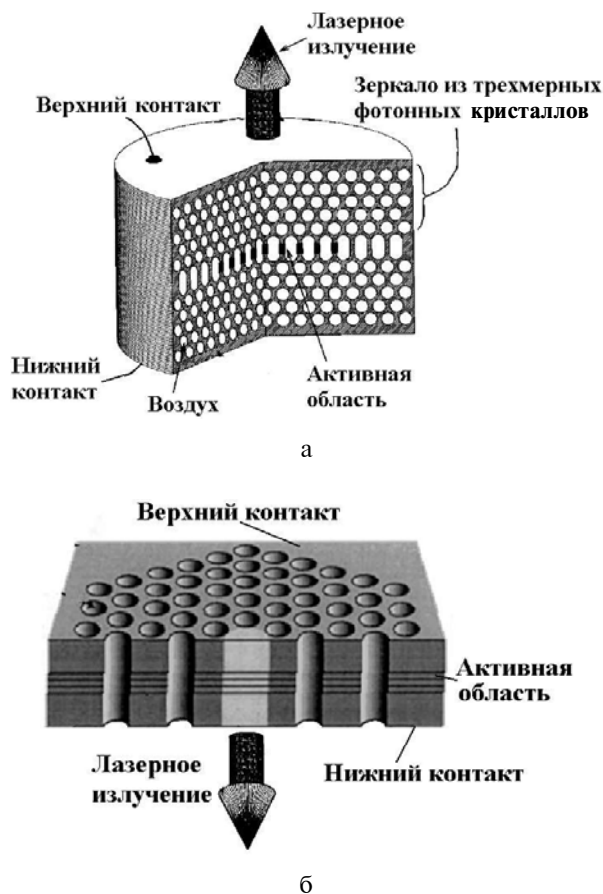


Рис. 5. Лазерные диоды вертикального типа с фотонными кристаллами: теоретическая структура с трехмерными ФК (а) и практически реализованная структура с псевдо-трехмерным ФК (б)

Однако практическая реализация такой лазерной структуры весьма затруднена, прежде всего, из-за недостаточного уровня современной технологии. Поэтому усилия ученых-практиков сфокусировались на создании лазеров с сочетанием одномерных

и двумерных ФК, что в свою очередь дает возможность создания псевдо-трехмерных структур. В 2000 году были опубликованы результаты о создании лазера вертикального типа [11], в котором сделаны цилиндрические отверстия сквозь слой отражателя и активную область (рис. 5,б). Таким образом, было осуществлено дополнительное сокращение объема активной зоны лазера, что в конечном итоге выразилось в значительном сокращении спектра излучения. В настоящий момент уже реализованы лазерные структуры торцевого типа и лазер вертикального типа, в котором сквозь отражатели Брэгга (одномерные ФК) были сделаны отверстия (двумерные ФК), что создало трехмерную структуру ФК.

Наряду с практическими успехами по применению двумерных ФК в оптоволоконной технике, существует много нерешенных проблем. Как правило, значительную сложность представляет процесс оптимизации существующих параметров и создание новых оптических устройств с заранее заданными параметрами. Это связано с недостаточным уровнем технологии, недостаточной изученностью свойств двух- и трехмерных ФК, а также устройств с их использованием. Прежде всего, проблема недостаточной изученности напрямую связана со сложностями численного исследования ФК, поскольку разработанная теоретическая база во многом пригодна только для их периодической структуры. Но практические структуры, как правило, имеют недостаточную периодичность. Выходом из этой ситуации может быть использование ряда упрощений либо прямое решение уравнений Максвелла для данной структуры, что, как правило, затруднено или невозможно из-за сложности численных расчетов.

Тем не менее, число работ по исследованию и использованию ФК лавинообразно растет. Уже теоретически показано, что трехмерные ФК способны существенно увеличить КПД, оптическую мощность, значительно уменьшить значение порогового тока [2] и создать одномодовый режим в достаточно широком диапазоне длин волн полупроводниковых лазеров [6]. Использование ФК в микроволновой технике позволит повысить отражательную способность СВЧ антенн [12].

5. Основные проблемы моделирования оптоволоконных устройств с ФК

Существует ряд методов расчета оптических полей в структурах с ФК, которые основаны на численном решении уравнений Максвелла исходя из различных подходов волновой оптики. Все эти методы можно условно разделить на две категории. Первая предусматривает наличие строгой трансляционной симметрии в строении ФК, что существенно упрощает численные процедуры [5,8]. Такие методики позволяют исследовать только идеальные ФК, но не устройство в целом. Вторая категория методов предполагает решение уравнений Максвелла для всего устройства в целом, что требует значительных вычислительных мощностей. Более того, такие подходы ведут к достаточно сложной реализации

численного расчета даже в двумерных задачах [13], и часто на их основе невозможно провести расчет трехмерной задачи ввиду сложностей сходимости численных методов.

Таким образом, для моделирования реальных оптоволоконных устройств на основе ФК, которые являются трехмерными, но при этом не обладают трансляционной симметрией, целесообразно использовать условное разбиение всего устройства на отдельные части, где существует трансляционная симметрия. Кроме того, принимается, что электромагнитные поля в данном устройстве не гибридные, т.е. суммарное оптическое поле всего устройства может быть представлено как суперпозиция плоских волн, соответствующих электрическому и магнитному полям. Такие упрощения позволяют применить к области фотонных кристаллов подход эффективного показателя преломления для данной длины волны излучения [6], который в общем случае зависит от материальных и геометрических параметров ФК. Следовательно, использование эффективного показателя преломления позволяет свести трехмерную задачу расчета оптического поля к двумерной. При этом уравнение для оптического поля разделяется на два математических выражения: для поперечной и продольной составляющих [1].

Эту методику расчета мы используем для численного исследования оптических полей в полупроводниковом лазере вертикального типа, который представлен на рис. 5,б. Результаты исследований будут представлены в нашей следующей статье.

Заключение

В данной статье представлено понятие ФК, рассмотрены типовые структуры и их основные свойства, а также первые оптоволоконные и оптоэлектронные устройства, полученные с использованием периодических структур. Проведен анализ текущих проблем и перспектив развития в данной области. Показано, что такие структуры способны привести к созданию эмиссионных диодов или же полупроводниковых лазеров с очень узким диапазоном длин волн излучения, а также к созданию чрезвычайно селективных оптических фильтров, встраиваемых в "интегральный оптический чип". Кроме того, применение таких структур позволит разработать оптические интегральные схемы, что приведет к созданию оптических процессоров и компьютеров с тактовыми частотами, на три порядка выше существующих кремниевых микросхем.

Литература: 1. *Yariv A., Yen P.* Optical Waves in Crystals. New-York: John Wiley & Sons, 1983. 490p. 2. *Hirayama H., Hamano T., Aoyagi Y.* Novel surface emitting laser diode using photonic band-gap crystal cavity // *Applied Physics Lett.* 1996. Vol. 69. P. 791-793. 3. *Sze S.M.* Physics of semiconductor devices. New-York: John Wiley & Sons, 1981. 820p. 4. *Porto J.A., Garcia-Vidal F.J., Pendry J.B.* Transmission resonances on Metallic Gratings with very narrow slits // *Phys. Rev. Lett.* 1999. Vol. 83. P. 2845. 5. *Johnson S.G., Joannopoulos J.D.* Three-dimensionally periodic dielectric layered structure with omnidirectional photonic band gap // *Appl. Phys. Lett.* 2000. Vol. 77. P. 3490–3492. 6. *Birks T.A., Knight J.C., Russell P.St.J.* Endlessly single-mode photonic crystal fiber // *Optics Lett.* 1997.

Vol. 22. P. 961. 7. *Inauguration of New Production Facility for Crystal Fibre A/S in Birkerod, Denmark, on 20 June 2001, www.crystal-fibre.com.* 8. *Sondergaard T. Photonic crystal distributed feedback fiber lasers with Bragg gratings // IEEE J. of Lightwave Technology. 2000. Vol. 18. P. 589-597.* 9. *Koshiba M., Tsuji Y. and Hikari M. Time-Domain Beam Propagation Method and Its Application to Photonic Crystal Circuits // IEEE JLT, VOL. 18, N 1, 2000. P. 102-110.* 10. *Chan C.T., Datta S., Ho K.M. and Soukoulis C.M. // Phys. Rev. B50, P. 1988 (1994).* 11. *Painter O., Husain A., Scherer A., Lee P.T., Kim I., O'Brein J.D., Darkus P.D. Lithographic tuning of a two-dimensional photonic crystal laser array // IEEE Photonics Technology Lett. 2000. Vol. 12. P. 1126-1128.* 12. *Maarten J.M. van der Vorst, Peter J.I. de Maagt, Neto A., Reynolds A.L., Heeres R.M., Luinge W., Matti H.A.J. Herben. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique. 2001. Vol. 49. P. 1118-1125.* 13. *Noble M.J., Loehr J.P., Lott J.A. // IEEE J. of Quantum Electronics. 1998. Vol. 34. P. 1890-1903.*

Поступила в редколлегия 20.05.2002

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Свич В.А.

Иванов Павел Сергеевич, аспирант кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: фотонные кристаллы, методы моделирования динамического поведения полупроводниковых лазеров на основе наноразмерных структур. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, p.ivanov@ieee.org.

Унольд Хайко, аспирант департамента оптоэлектроники, университет города Ульм, Германия. Научные интересы: фотонные кристаллы, методы моделирования динамического поведения полупроводниковых лазеров на основе наноразмерных структур. Адрес: heiko.unold@e-technik.uni-ulm.de.

Лысак Владимир Валериевич, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры физических основ электронной техники ХНУРЭ. Научные интересы: волоконно-оптические системы передачи данных, фотонные кристаллы, системы формирования сверхкоротких импульсов, методы моделирования динамического поведения полупроводниковых лазеров на основе наноразмерных структур. Член IEEE LEOS с 2002 г. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, Lysak@kture.kharkov.ua.

Сухоиванов Игорь Александрович, профессор кафедры физических основ электронной техники ХНУРЭ, руководитель научно-учебной лаборатории "Фотоника", председатель Украинского отделения общества лазерной и оптоэлектронной техники международного института инженеров электронной техники (IEEE LEOS), Senior Member IEEE. Научные интересы: волоконно-оптические технологии, полупроводниковые квантоворазмерные лазеры и усилители, фотонные кристаллы и методы их моделирования. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, sukhoivanov@kture.kharkov.ua.