

## ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ С ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНОЙ, ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ В ОБЛАСТИ 930 – 1030 НМ

М.В.Алфимов<sup>+</sup>, А.М.Желтиков<sup>1)</sup>, А.А.Иванов<sup>+</sup>, В.И.Белоглазов\*,  
Б.А.Кириллов, С.А.Магницкий, А.В.Тарасишин, А.Б.Федотов,  
Л.А.Мельников<sup>□</sup>, Н.Б.Скибина\*

Международный лазерный центр Московского государственного университета  
им. М.В.Ломоносова, 119899 Москва, Россия

<sup>+</sup> Центр фотохимии РАН, 117421 Москва, Россия

\* Институт технологии и обработки стеклянных структур РАН  
410044 Саратов, Россия

□ Саратовский государственный университет, 410026 Саратов, Россия

Поступила в редакцию 18 мая 2000 г.

Продемонстрированы физические принципы реализации фотонно-кристаллических волокон с фотонной запрещенной зоной оболочки, перестраиваемой в видимой и ближней ИК области спектра. На основе прямого численного интегрирования уравнений Максвелла методом конечных разностей показана возможность формирования фотонной запрещенной зоны в спектре пропускания фотонно-кристаллической оболочки дырчатых волноводов в области частот, характерных для широко распространенных твердотельных фемтосекундных лазеров. Изготовление подобных волокон с оболочкой в виде двумерной периодической структуры с периодом менее 500 нм позволило экспериментально наблюдать фотонные запрещенные зоны, перестраиваемые в области 930 – 1030 нм, в спектре пропускания волокон. Положение запрещенной зоны удовлетворительно описывается в рамках предложенного численного подхода.

PACS: 42.70.Qs, 42.81.Qb

Спектральная область существования одномодового режима распространения света в обыкновенных оптических волокнах, как правило, относительно невелика [1]. При повышении частоты оптического излучения обычный световод переходит в многомодовый режим, понижение же частоты излучения приводит к росту оптических потерь. Разработанный недавно новый тип оптических волокон с оболочкой, имеющей форму двумерного фотонного кристалла (ФК), то есть представляющей собой двумерный периодический набор плотно упакованных полых стеклянных волокон, позволяет существенно расширить спектральную область существования одномодового режима распространения света за счет изменения эффективного показателя преломления ФК-оболочки при изменении частоты излучения [2–5]. Волокна этого типа представляют значительный интерес как в связи с возможностью решения ряда важных задач волоконной оптики, так и для практической реализации идей, высказанных в последнее время в области физики фотонных кристаллов [6–8]. Результаты первых экспериментов, посвященных исследованию свойств ФК-волокон (называемых также “дырчатыми” волокнами), показавших, что волноводы с ФК-оболочкой поддерживают одномодовый режим распространения излучения в широ-

<sup>1)</sup> e-mail: zheltikov@top.phys.msu.su

ком диапазоне длин волн и позволяют свести к минимуму потери энергии излучения в одномодовом режиме [2], стимулировали интенсивные исследования волноводных свойств дырчатых волокон, позволившие выяснить модовую структуру [3], границы существования одномодового режима [4], а также частотную зависимость расходимости лазерного излучения [5]. Чрезвычайно перспективной также представляется возможность использования дырчатых волноводов в нелинейной оптике. В частности, высокая локализация светового поля в малой области в сердцевине ФК-волновода позволяет рассчитывать на существенное увеличение эффективности нелинейно-оптических взаимодействий в подобных материалах [9]. Как показали недавние эксперименты [10, 11], эти свойства ФК-волноводов могут быть использованы для управления спектром сверхкоротких лазерных импульсов и генерации суперконтинуума.

До настоящего времени исследования оптических свойств дырчатых волноводов были ограничены режимами распространения оптического излучения с длиной волны, существенно меньшей периода ФК-решетки и диаметра сердцевины. При этом наличие фотонной запрещенной зоны, по сути, не оказывало влияния на распространение света в волокне. Цель настоящей работы – продемонстрировать физические принципы реализации ФК-волокон с фотонной запрещенной зоной оболочки, перестраиваемой в видимой и ближней ИК областях спектра. Методом прямого численного интегрирования уравнений Максвелла с помощью техники конечных разностей будет показано, что формирование фотонной запрещенной зоны в спектре пропускания ФК-оболочки дырчатых волноводов в области частот, характерных для существующих экономичных фемтосекундных лазеров, возможно при условии использования в качестве оболочки волокна двумерной периодической структуры с периодом менее 500 нм. Нами были изготовлены и экспериментально изучены подобные ФК-волокна. Исследование спектров пропускания дырчатых волноводов в направлении, перпендикулярном направлению волноводного распространения света в дырчатом волокне, показывает существование фотонной запрещенной зоны в области 930 – 1030 нм. Будет также экспериментально продемонстрирована возможность перестройки фотонной запрещенной зоны ФК-оболочки дырчатых волноводов путем заполнения воздушных отверстий оболочки спиртом.

Для расчета структуры фотонной запрещенной зоны ФК-оболочки дырчатых волноводов нами использовался метод прямого численного интегрирования уравнений Максвелла с помощью техники конечных разностей, известный в литературе как FDTD-метод [12]. Рассматривалась система цилиндрических воздушных отверстий радиусом  $r$  бесконечной длины, образующих в диэлектрике двумерную периодическую структуру с треугольной решеткой (рис.1а). Первая зона Бриллюэна для подобной решетки имеет вид правильного шестиугольника, показанного на рис.1б.

Подробное описание разработанной численной процедуры интегрирования уравнений Максвелла методом конечных разностей приводится в работе [13]. В наших расчетах использовались периодические граничные условия, а начальные условия задавались в виде, соответствующем падающей плоской волне с теми значениями волновых векторов, которые используются при задании граничных условий. Производя численное решение уравнений Максвелла и выполняя фурье-преобразование полученной в результате такого решения эволюции поля во времени в произвольных точках области вычислений, мы получаем информацию о собственных частотах, со-

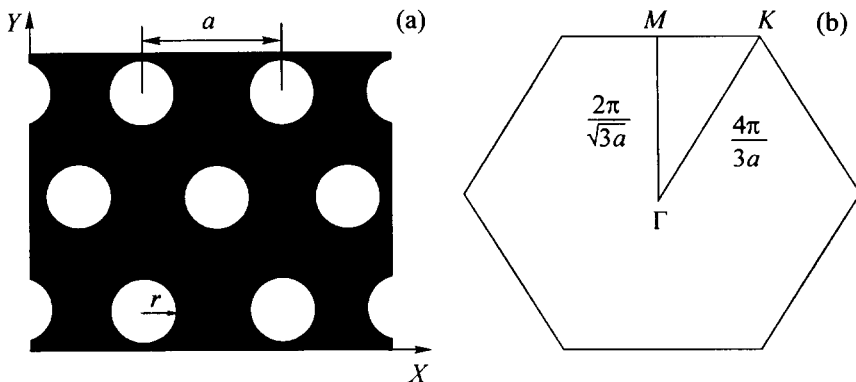


Рис.1. Треугольная решетка воздушных отверстий в диэлектрике (а) и соответствующая ей первая зона Бриллюэна (б)

ответствующих выбранным значениям волновых векторов. Повторяя указанную процедуру для всех векторов из первой зоны Бриллюэна, можно построить зонную структуру фотонных энергий и определить структуру фотонной запрещенной зоны. Описанная выше процедура была использована для вычисления зонной структуры фотонных энергий для ФК-решетки с параметрами  $r/a = 0.4$ ,  $n = 1.5973$ . Ошибки вычисления частот при указанных параметрах, как показывает расчет, не превышают 1%. Зонная структура фотонных энергий для  $E$ - и  $H$ -поляризованного поля излучения представлена на рис.2. Как следует из результатов выполненных расчетов, для создания ФК-волноводов с фотонной запрещенной зоной в области частот существующих экономичных фемтосекундных лазеров на сапфире с титаном и форстерите требуется изготовление двумерной периодической волоконной структуры с периодом менее 500 нм.

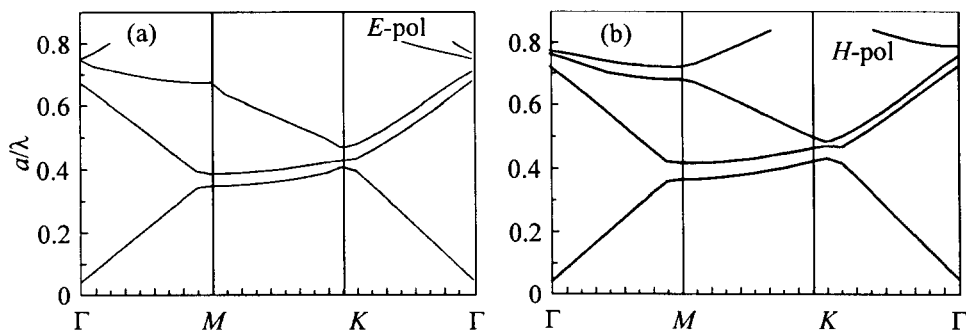


Рис.2. Зонная структура фотонных энергий для а)  $E$ - и б)  $H$ -поляризованного поля излучения в треугольной решетке воздушных пор в диэлектрике с параметрами  $r/a = 0.4$ ,  $n = 1.5973$

Процедура изготовления волноводов с такими параметрами была аналогична процедуре, описанной в [10], и заключалась в следующем. Одинаковые стеклянные капилляры укладывались в периодическую структуру, которая спекалась при высокой температуре для устранения воздушных промежутков между капиллярами, а затем вытягивалась. Получившееся волокно разрезалось на отрезки, которые, в свою очередь, также укладывались в периодическую структуру и также подвергались вытяжке. Эти операции повторялись до достижения шага структуры (расстояния

между центрами воздушных каналов) в 32 мкм. Затем эта структура помещалась в стеклянную оболочку, и вытягивалась до достижения желаемого шага. Начальный внутренний диаметр капилляров составлял около 1 мм. С помощью описанной выше процедуры получались оптические волокна с оболочкой, имеющей форму двумерного фотонного кристалла со строго периодически расположенными воздушными отверстиями. Число отверстий составляло несколько сотен. Особое внимание уделялось сохранению круговой формы отверстий и устранению воздушных промежутков между соседними капиллярами. Данная процедура позволила изготовить образцы с шагом ФК структуры менее 0.5 мкм и отношением диаметра отверстия к шагу, равным 0.4. Изображение подобной ФК-структуры, полученное с помощью электронного микроскопа, представлено на рис.3. Для внесения дефекта в двумерную ФК-решетку центральный капилляр заполнялся стеклом другой марки. Данное волокно служило сердцевиной в ФК-волноводе.

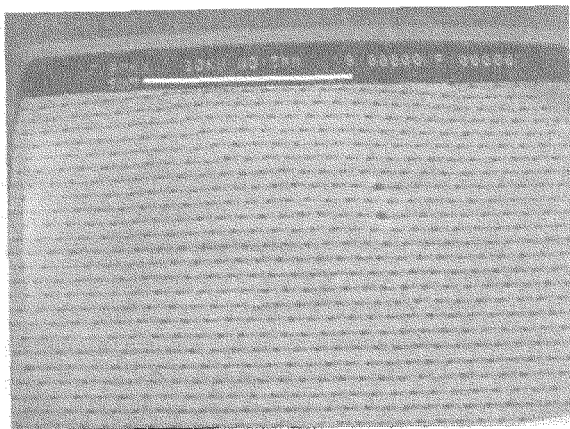


Рис.3. Изображение ФК-оболочки созданного оптического волокна, полученное с помощью электронного микроскопа. Горизонтальная полоса в верхней части рисунка соответствует расстоянию 5 мкм

Периодическая структура оболочки дырчатого волновода приводит к возникновению запрещенных зон в спектре пропускания структуры, измеренном в направлении, перпендикулярном направлению волноводного распространения излучения. Изготовление структур с периодом менее 500 нм позволяет наблюдать фотонные запрещенные зоны в спектре пропускания в области длин волн излучения широко распространенных лазерных источников. Схема измерения спектров дырчатых волокон была создана на базе спектрофотометра Hitachi-333 и включала в себя опорный и сигнальный каналы. С целью преимущественного освещения центральной части образца, имеющей ФК-структуру, в сигнальном канале измерительной схемы использовалась короткофокусная кварцевая линза с фокусным расстоянием  $f = 5$  см, фокусирующая излучение на щелевую диафрагму с апертурой  $d = 150$  мкм. Непосредственно за диафрагмой помещался образец дырчатого волокна. Излучение, прошедшее через образец, коллимировалось кварцевой линзой, идентичной фокусирующей. Измерения проводились в диапазоне 400 – 1400 нм. При проведении измерений имелась возможность вращения ФК-волокна вокруг его оси.

Спектры пропускания, измеренные для дырчатого волокна с периодом структуры менее 500 нм, представлены на рис.4. Фотонная запрещенная зона для изготовленных дырчатых волокон наблюдалась в области 930 – 1030 нм. Поскольку периодически расположенные воздушные отверстия в оболочке волокна образуют гексагональную решетку, положение запрещенной зоны в спектре пропускания смещается в зависи-

мости от угла поворота структуры относительно падающего излучения. Как показывает сравнение результатов расчетов и экспериментальных измерений (рис.3 и 4), положение запрещенной зоны удовлетворительно описывается в рамках численного подхода, основанного на прямом интегрировании уравнений Максвелла методом конечных разностей.

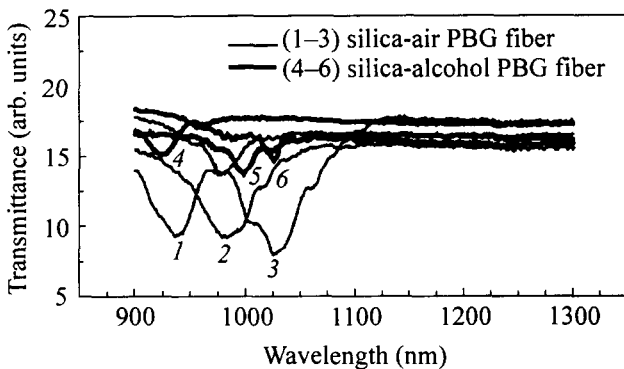


Рис.4. Спектры пропускания фотонно-кристаллического волокна, измеренные для различных кристаллографических направлений ФК-решетки: 1 – 3 – для волоконной структуры типа стекло – воздух, 4 – 6 – для волоконной структуры типа стекло – спирт

Структура фотонной запрещенной зоны в спектре пропускания ФК-структуры зависит от соотношения показателей преломления материалов, образующих периодическую структуру. В случае дырчатых волокон данное обстоятельство открывает возможность перестройки фотонной запрещенной зоны путем заполнения воздушных отверстий материалами с показателем преломления, отличным от единицы.

Нами исследовалась перестройка фотонной запрещенной зоны, наблюдающаяся в спектре пропускания дырчатого волокна в случае, когда воздушные отверстия заполнены спиртом. Как видно из результатов, представленных на рис.4 (линии 4 – 6), положение и ширина запрещенной зоны при этом заметно изменяются.

Таким образом, результаты прямого численного интегрирования уравнений Максвелла методом конечных разностей показывают возможность формирования фотонной запрещенной зоны в спектре пропускания ФК-оболочки дырчатых волокон в области частот, характерных для существующих экономичных фемтосекундных лазеров на сапфире с титаном и форстерите, при условии использования в качестве оболочки волокна двумерной периодической структуры с периодом менее 500 нм. Изготовление подобных волокон позволило нам показать существование фотонной запрещенной зоны в области 930 – 1030 нм в спектре пропускания волокон, измеренном в направлении, перпендикулярном направлению волноводного распространения излучения. Положение запрещенной зоны удовлетворительно описывается в рамках численного подхода, основанного на прямом интегрировании уравнений Максвелла методом конечных разностей. Экспериментально продемонстрированная возможность перестройки фотонной запрещенной зоны ФК-оболочки дырчатых волокон путем использования различных материалов для заполнения воздушных отверстий оболочки открывает широкие возможности как для управления дисперсией дырчатых волокон, так и для проведения экспериментов по управлению люминесценцией молекул в широком спектральном диапазоне.

Работа выполнена при поддержке гранта # 00-15-99304 Президента Российской Федерации, Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 00-02-17567) и ИНТАС (грант # 97-0369).

- 
1. A.W.Snyder and J.D.Love, *Optical Waveguide Theory*, Chapman and Hall, New York, 1983.
  2. J.C.Knight, T.A.Birks, P.St.J.Russell, and D.M.Atkin, *Opt. Lett.* **21**, 1547 (1996).
  3. J.C.Knight, T.A.Birks, R.F.Cregan et al., *Opt. Mater.* **11**, 143 (1999).
  4. T.A.Birks, J.C.Knight, and P.St.J. Russell, *Opt. Lett.* **22**, 961 (1997).
  5. M.J.Gander, R.McBride, J.D.C.Jones et al., *Opt. Lett.* **24**, 1017 (1999).
  6. E.Yablonovitch, *J. Opt. Soc. Am.* **B10**, 283 (1993).
  7. J.Joannopoulos, R.Meade, and J.Winn, *Photonic Crystals*, Princeton Univ., Princeton, 1995.
  8. N.I.Koroteev, S.A.Magnitskii, A.V.Tarasishin, and A.M.Zheltikov, *Opt. Commun.* **159**, 191 (1999).
  9. N.G.R.Broderick, T.M.Monro, P.J.Bennett, and D.J.Richardson, *Opt. Lett.* **24**, 1395 (1999).
  10. А.В.Федотов, А.М.Желтиков, Л.А.Мельников и др., *Письма в ЖЭТФ* **71**, 407 (2000).
  11. J.K.Ranka, R.S.Windeler, and A.J.Stentz, *Opt. Lett.* **25**, 25 (2000).
  12. A.Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Artech House, Norwood, 1995.
  13. А.М.Желтиков, С.А.Магницкий, А.В.Тарасишин, *ЖЭТФ* **117**, 691 (2000).