

## ОПТИЧЕСКИЙ УЗКОПОЛОСНЫЙ ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ, ЗАПИСАННОЙ В МИКРОКАНАЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ, ЗАПОЛНЕННОМ ФОТОПОЛИМЕРОМ

© 2013 г. И. Ю. Денисюк\*, доктор физ.-мат. наук; Ю. Э. Бурункова\*, канд. физ.-мат. наук;  
А. С. Тибилев\*\*, канд. физ.-мат. наук; С. А. Сембина\*, аспирантка;  
В. Г. Булгакова\*, аспирантка

\* СПбНИУ ИТМО, Санкт-Петербург

\*\* Государственный оптический институт им С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

В работе решена задача создания узкополосного фильтра, оперирующего широкоапертурными (около  $30^\circ$ ) световыми пучками. Проведены поиск и экспериментальная апробация методов создания одномодового световода и брэгговской решетки в нем. Получен оптический узкополосный фильтр при формировании брэгговской решетки в микроканалах волокна, заполненных фотополимером. Предложенная технология заполнения волокна обеспечивает однородное заполнение микроканалов длиной более 20 мм. Разработанная фотополимерная композиция позволяет получить необходимую фотоиндуцированную модуляцию показателя преломления для записи решетки в твердой композиции. Такая запись обеспечивает ее стабильность. Полученный температурно-стабильный фильтр применим для спектральной фильтрации широкоапертурных (около  $30^\circ$ ) световых пучков.

**Ключевые слова:** узкополосный фильтр, брэгговская решетка, микроструктурированное оптическое волокно, фотополимерная композиция.

Коды OCIS: 050.1950, 050.1970, 060.2370.

Поступила в редакцию 15.11.2012.

### Введение

При необходимости выделения узкополосного лазерного излучения на фоне равномерных солнечных засветок необходимо использовать оптические фильтры с узкой полосой пропускания, сравнимой с шириной полосы излучения лазера (1 нм). Оптические фильтры на основе цветных стекол имеют более широкие полосы пропускания, но потери света в них значительны. Для выделения узкополосного лазерного излучения могли бы использоваться интерференционные многослойные фильтры, однако узкая полоса пропускания обеспечивается только при нормальном падении света на фильтр. При падении пучка света под углом, отличным от нормального, оптическая длина пути отличается от расчетной и спектр пропускания фильтра искажается. В то же время с учетом необходимости получения узкой линии пропускания не имеется альтернативы методам фильтрации, основанным на явлениях интерференции.

В работе [1] рассмотрены системы фильтрации оптического сигнала, основанные на использовании брэгговской решетки в оптоволокне. Данный подход состоит в фокусировке входного светового сигнала на торец оптоволокна, в котором создана необходимая брэгговская решетка. Поскольку свет, попадающий в конус входной апертуры (обычно  $30^\circ$ ), распространяется по оптоволокну в одномодовом режиме, то брэгговская решетка, созданная в оптоволокну, обеспечит спектральную фильтрацию независимо от угла падения пучка света на торец.

Таким образом, задача создания узкополосного фильтра, оперирующего широкоапертурными (около  $30^\circ$ ) световыми пучками, сводится к поиску путей создания одномодового световода и поиску методов создания брэгговской решетки в нем.

С учетом возможных сечений световых пучков в данном фильтре сложно сфокусировать свет на торец одного оптоволокна диаметром около 3 мкм (длина волны 532 нм). Сле-

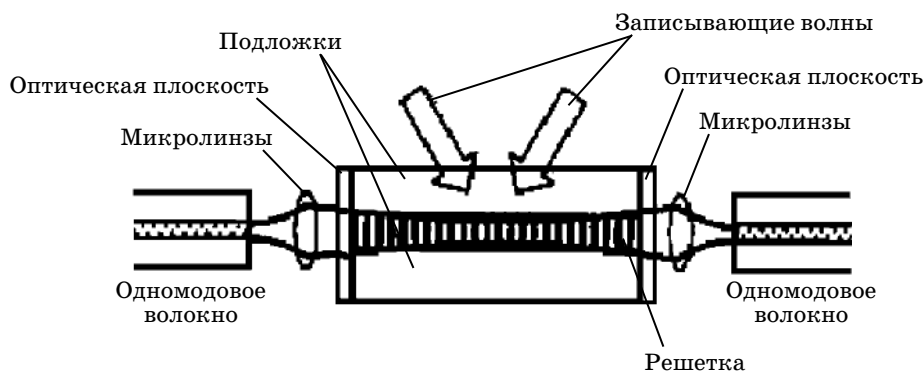


Рис. 1. Оптический фильтр на базе брэгговской решетки, записанной в фотополимере [5].

довательно, необходимо использовать шайбу, имеющую несколько параллельных каналов и общий диаметр не менее нескольких миллиметров.

Исходя из вышеизложенного, был выбран фотонно-кристаллический световод, в котором в качестве волноводов использовались многочисленные отверстия в кладдинге. Эти отверстия были заполнены фоточувствительной композицией, засветка которой периодическим световым полем формирует периодическое изменение показателя преломления – брэгговскую решетку.

Рассмотрим фотонно-кристаллическое оптическое волокно (ФКВ, микроструктурированное оптическое волокно, дырчатый волновод). Это оптическое волокно, оболочка которого имеет структуру двумерного фотонного кристалла, образованного цилиндрическими отверстиями, расположенными вокруг центральной жилы и образующими кладдинг. При изготовлении отверстия в волноводе свободные, но есть много работ, в которых описаны методы изменения оптических свойств волокна путем заполнения каналов различными материалами [2–4].

Обычно брэгговскую решетку в оптоволокне создают проводя запись во встречных пучках, когда свет проходит через оптоволокно, отражаясь от торца. В этом случае необходимо обеспечить запись на той же длине волны, на которой происходит использование решетки. Следовательно, имеется очевидное противоречие – для записи нужно достаточно большое поглощение, а для использования – малое. Это противоречие особенно существенно, если решетка длинная.

Мы использовали альтернативный метод записи, предложенный ранее [5]. В данной ра-

боте рассмотрено создание оптического узкополосного фильтра на базе тонкого слоя фотополимера, в котором сформирована брэгговская решетка, а излучение вводится и выводится с торца (рис. 1).

Решетка записывается в интерференционной картине, образованной двумя когерентными лазерными лучами. В результате интерференции образуются стоячие волны и перпендикулярно световоду формируется периодическая решетка.

### Экспериментальная часть

Использованное фотонно-кристаллическое оптическое волокно представляет собой стеклянное волокно в полимерной оболочке, диаметр волокна составляет 160 мкм. В волокне находятся микроканалы диаметром 8 мкм. Фотография поперечного сечения волокна представлена на рис. 2.

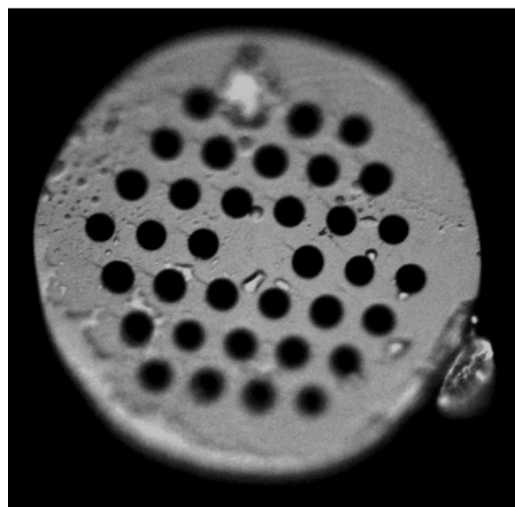


Рис. 2. Срез волокна. Диаметр волокна 160 мкм, диаметр канала 8 мкм.

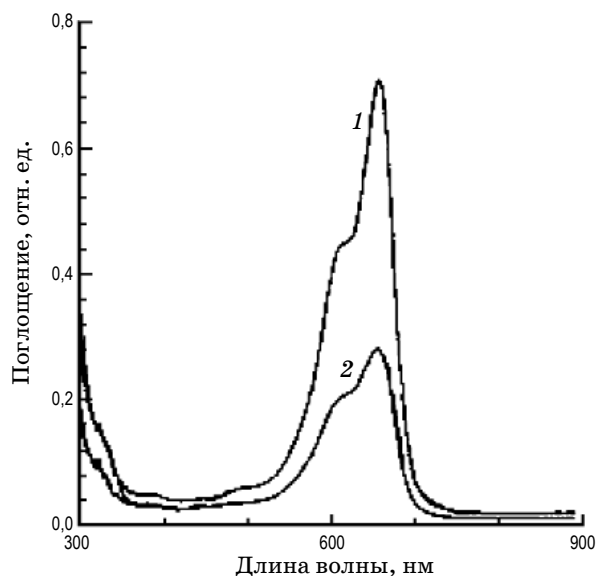


Рис. 3. Изменение спектра красителя. 1 – до засветки УФ излучением, 2 – после засветки [6].

В микроканалы волокна вводилась мономерная композиция с красителем. При записи интерференционной картины в результате выцветания красителя в максимумах интенсивности излучения происходило фотообесцвечивание и, таким образом, образование дифракционной решетки в твердой полимерной композиции. Запись решетки проводилась в твердом полимере путем лазерной модификации (разрушения) введенного в полимер красителя – метиленового голубого. В работе [6] приведены данные об изменении спектра красителя метиленового голубого при его лазерной засветке (рис. 3).

Таким образом, под действием УФ излучения происходит разрушение красителя, изменение спектра поглощения и, следовательно, запись брэгговской структуры. Поскольку запись производится в твердом материале, это исключает последующие перемещения компонентов, диффузию и деградацию. Полученный фильтр оказывается стабильным и выдерживает нагрев до температур 80 °С.

В таблице представлены названия химических веществ, входящих в состав материала для заполнения волокна [(2Саг/Тпр (9/1) + 1 вес.% МВ + 20 вес.% ДБФ)].

Для подготовки волокна к заполнению производилось сжигание внешнего полимерного покрытия фотонно-кристаллического волокна, а затем – очищение поверхности от следов горения фильтровальной бумагой. С помощью стан-

Используемые компоненты фотополимеризующейся композиции

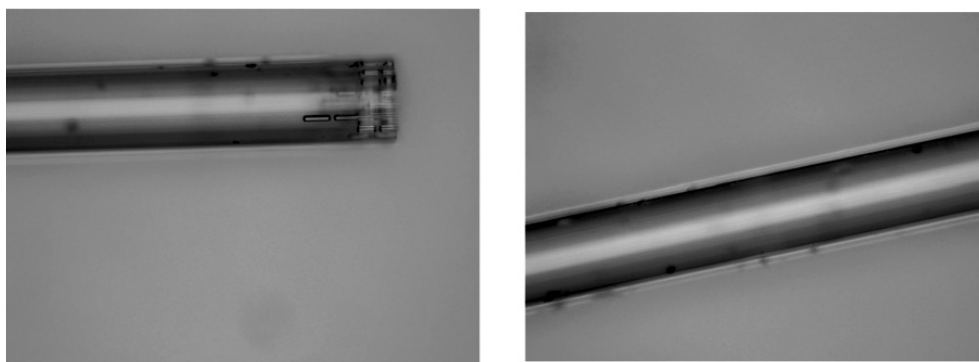
№	Название/сокращение	Производитель
1	2 Карбокси этил акрилат/2Саг	Aldrich, № 552348
2	3 Метил ол пропан этокси лат/Тпр	Aldrich, № 415871
3	Дибутиловый эфир фталевой кислоты/ДБФ	“АО Реаким”
4	2,2 Диметокси-2-фенилацетофенон/In II	Aldrich, № 19,611-8
5	Метиленовый голубой/МВ	ЗАО “Вектон”

дартного скалывателя Corning S46999-M9-A8 (производитель “Siemens AG”) нарезались одинаковые куски волокна длиной 20 мм.

Качество скола волокна оценивалось на микроскопе Olympus STM6. Волокно закреплялось одним торцом в специальном держателе, затем полученная конструкция помещалась на предметный столик микроскопа таким образом, чтобы волокно приняло вертикальное положение (для визуального наблюдения поверхности скола волокна).

Далее волокно заполнялось мономерным составом с красителем. Для удаления органических загрязнений и улучшения смачивания поверхности стекла композицией проводился отжиг фотонно-кристаллического волокна в муфеле при температуре 400 °С в течение 1 ч. Для дегазации волокно и мономерная композиция отдельно вакуумировались при температуре 80 °С в течение 1 ч. После этого волокно полностью погружалось в композицию и проводилось вакуумирование при температуре 80 °С в течение 20 мин. При этом из волокна выходил воздух, а поры заполнялись жидкой композицией, вязкость которой значительно уменьшалась в результате нагрева. Затем волокно промывалось в изопропиловом спирте при температуре 80 °С в течение 2–3 мин и сушилось в термостате при 60 °С в течение 5 мин. Фотографии заполненного светоотверждаемой мономерной композицией волокна представлены на рис. 4.

Было осуществлено два варианта записи интерференционной картины в волокне. В первом случае обеспечивалась равномерная засветка волокна УФ излучением ртутной лампы (длина волны 365 нм) для полимериза-



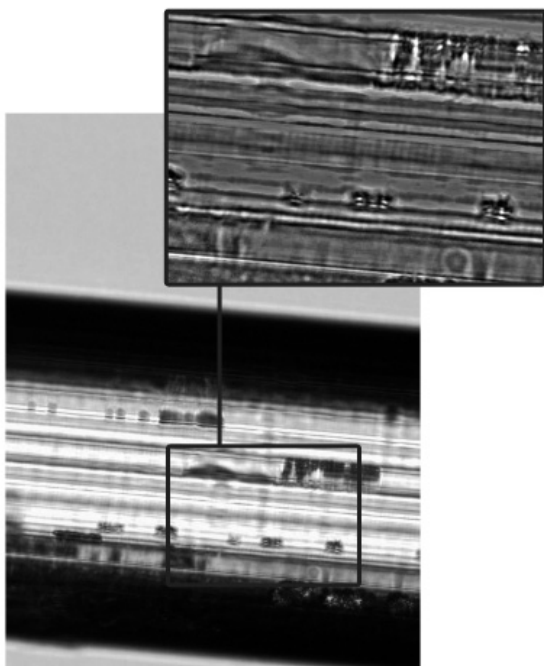
**Рис. 4.** Фотография волокна после заполнения мономерной композицией.

ции мономерной композиции в течение 2 мин не доходя до порога выцветания красителя (МВ). Затем проводилась запись интерференционной картины в волокне He–Cd-лазером (длина волны 325 нм), длительность экспозиции 5 мин. Период записываемой интерференционной картины составлял 2 мкм (рис. 5). На образцах, полученных предложенным способом, наблюдаются дефекты в виде разрывов полимера, заполняющего волокно. На увеличенном снимке в микроканалах волокна видна брэгговская решетка.

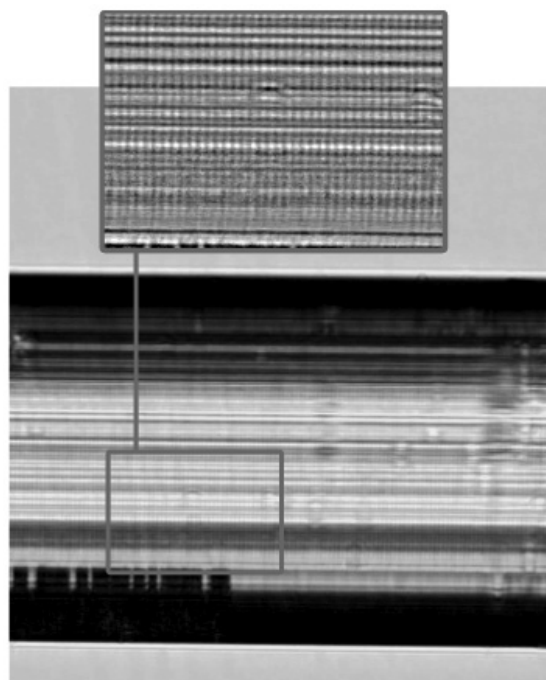
Во втором случае непосредственно после сушки, исключая стадию УФ засветки, про-

водилась запись интерференционной картины в волокне He–Cd-лазером (длина волны 325 нм), длительность экспозиции 5 минут. Период записываемой интерференционной картины составлял 2 мкм (рис. 6). В этом случае фотополимеризация сопровождалась фотовыцветанием красителя. На образцах, полученных данным способом, дефектов не обнаружено. На увеличенном снимке в микроканалах волокна более отчетливо, по сравнению с первым способом записи, видна брэгговская решетка.

С учетом соотношения показателей преломления фотонно-кристаллического волновода



**Рис. 5.** Фотография волокна после записи интерференционной картины (с предварительной УФ засветкой).



**Рис. 6.** Фотография волокна после записи интерференционной картины (без УФ засветки).

(кварц  $n = 1,46$ ) и полимерной композиции ( $n = 1,53$ ), полученные в каналах волновода являются одномодовыми при вводе излучения в телесном угле  $8^\circ$  и менее. Фотоиндуцированная модуляция показателя преломления составляет 0,05 и достаточна для получения необходимой брэгговской решетки.

### Обсуждение результатов

Исследованная в работе технология заполнения фотонно-кристаллического волокна фоточувствительной композицией с последующей записью брэгговской решетки в твердой полимерной композиции позволяет создавать уз-

копосные фильтры. Исследованный метод заполнения волокна позволяет получить однородное заполнение пор на длину как минимум 20 мм, а разработанная композиция обеспечивает необходимый показатель преломления и возможность создания фотоиндуцированной решетки в твердом слое. Полученный фильтр пригоден для спектральной фильтрации широкоапертурных (до  $30^\circ$ ) световых пучков и имеет диапазон рабочих температур от  $-30$  до  $80^\circ\text{C}$ . Температурная стабильность фильтра определяется стабильностью поперечно сшитой заполимеризованной композиции, а оболочка стеклянного волновода стабилизирует продольные размеры.

\* \* \* \* \*

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Bland-Hawthorn J., Englund M., Edvell G.* New approach to atmospheric OH suppression using an aperiodic fibre Bragg grating // Optics express. 2004. V. 12. № 24. P. 5902–5909.
2. *Zhang Y.N., Wang L.L.* Casting preforms for microstructured polymer optical fibre fabrication // Opt. Express. 14. 2006. P. 5541–5547.
3. *Eggleton B.J., Westbrook P.S., Windeler R.S., Spalter S., Strasser T.A.* Grating resonances in airsilica microstructured optical fibers // Opt. Lett. 1999. V. 24. P. 1460–1462.
4. *Li K., Yang X., Wang L., Zhao W.* Dye-doped microstructured polymer optical fibre laser with high numerical aperture air-clad // Optical Society of America. 2006. P. 1–2.
5. *Sato A., Scepanovic M., Kostuk R.K.* Holographic edge-illuminated polymer Bragg gratings for dense wavelength division optical filters at 1550 nm // Applied optics. 2003. V. 42. № 5. P. 778–784.
6. *Bartkiewicz S., Miniewicz A.* Methylene blue sensitized poly(methyl methacrylate) matrix: a novel holographic material // Applied optics. 1995. V. 34. № 23. P. 5175–5178.