

07

## **Пропускание стеклянных фотонно-кристаллических световодов с поллой сердцевиной**

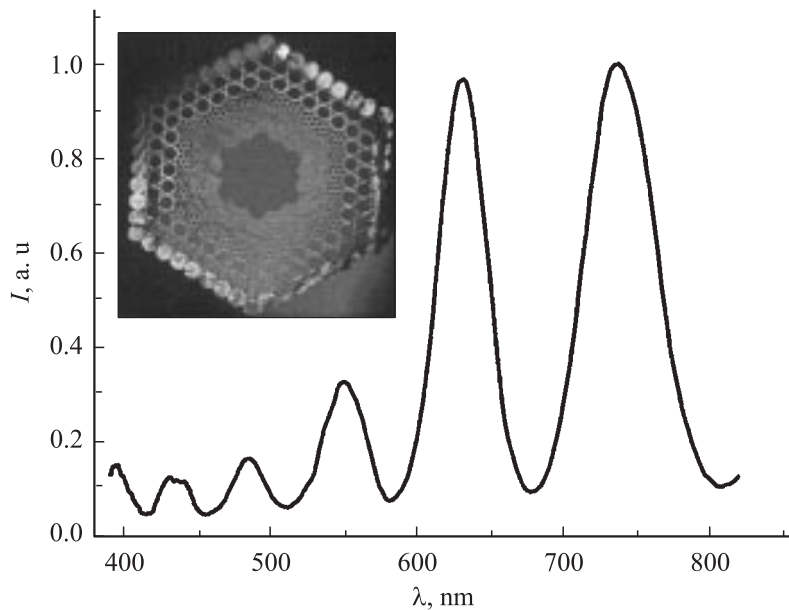
© В.И. Белоглазов, Ю.С. Скибина, В.В. Тучин, М.В. Чайников

ООО НПП „Наноструктурная технология стекла“, Саратов  
Саратовский государственный университет,  
Научно-образовательный институт оптики и биофотоники, Саратов  
E-mail: julia@mail.saratov.ru

*Поступило в Редакцию 6 июля 2005 г.*

Впервые создан фотонно-кристаллический световод, обладающий запрещенной зоной в видимой области спектра, оболочка которого состоит из concentрических слоев воздушных отверстий переменного диаметра, с поллой сердцевиной. Проведены исследования спектров пропускания. Выяснено влияние геометрических параметров структуры на величину фотонной запрещенной зоны и ее расположение в видимом диапазоне длин волн. Установлено, что вариации геометрической структуры волокна позволяют управлять величиной фотонной запрещенной зоны, что дает неограниченные возможности управления светом.

Существует два основных типа фотонно-кристаллических световодов (ФКС) [1–3]. ФКС с сердцевиной из стекла обладает высоким показателем преломления, и окружающая оболочка имеет структуру двумерного фотонного кристалла и характеризуется низким значением эффективного показателя преломления. Свет в таком ФКС направляется по сердцевине, соблюдая закон полного внутреннего отражения. ФКС с поллой (воздушной) сердцевиной имеет низкий показатель преломления сердцевины по отношению к эффективному показателю преломления оболочки со структурой двумерного фотонного кристалла. В нем не реализуется эффект полного внутреннего отражения, поскольку показатель преломления оболочки больше показателя преломления сердцевины. Определенная же световая мода направляется по поллой сердцевине благодаря локализирующему и направляющему свойству сформированной фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ). Изготовление ФКС основано на классической волоконной технологии [4]. На вставке рис. 1 представлено поперечное сечение ФКС, оболочка которого

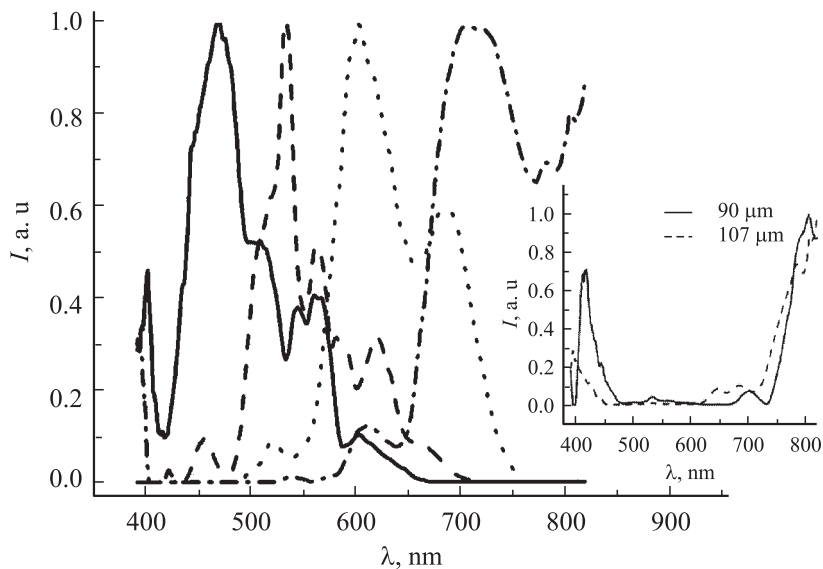


**Рис. 1.** Спектр пропускания микроструктурного световода, размер поллой сердцевины  $518 \mu\text{m}$ , диаметр первого отверстия, прилегающего к поллой сердцевине  $14 \mu\text{m}$ . На вставке — поперечное сечение микроструктурного волокна.

состоит из концентрических слоев воздушных отверстий переменного диаметра с диаметром сердцевины  $518$ ;  $61.3$ ;  $64.4$ ;  $71.5$ ;  $80.5$ ;  $90$ ;  $107 \mu\text{m}$ .

Исследования проводились в видимой и ближней инфракрасной области спектра, в качестве спектрального оборудования использовался спектральный комплекс на базе монохроматора ДМР-4.

На рис. 1 приведены спектры пропускания ФКС с диаметром центрального отверстия  $518 \mu\text{m}$ , диаметр отверстий в первом слое  $14 \mu\text{m}$ . На вставке рис. 1 — его поперечное сечение. Это преформа — первоначальный пакет, из которого изготовлено волокно с меньшими размерами. Спектры пропускания полого ФКС характеризуются наличием ярко выраженных максимумов. Природа этих пиков объясняется высокой отражательной способностью периодически структурированной оболочки волокна вблизи фотонных запрещенных зон [5].



**Рис. 2.** Спектры пропускания микроструктурных волокон, оболочка которых состоит из концентрических слоев воздушных отверстий переменных диаметров.

Изучение спектральных свойств полых ФКС строилось на выяснении влияния геометрии структурируемой оболочки и геометрии полый сердцевины. Экспериментально продемонстрирована возможность перестройки спектра пропускания за счет изменения геометрии и структуры оболочки. Такая перестройка в зависимости от размера центрального отверстия наблюдается визуально. При этом при наличии ФЗЗ в красной области спектра полая сердцевина имеет фиолетово-синий цвет, т.е. пропускается только фиолетово-синий цвет. Поэтому визуально можно определить с большой степенью точности, в какой области видимого спектра будет пик пропускания и ФЗЗ.

На рис. 2 приведены спектры пропускания ФКС при изменении поперечного размера полый сердцевины, длина образцов составляла 950 мм, где сплошной линией представлен спектр пропускания ФКС с диаметром центрального отверстия  $61.3 \mu\text{m}$ , а диаметр отверстий, входящих в первый слой, составляет  $1.33 \mu\text{m}$ . Числовая апертура

структуры составляет 0.105, расходимость пучка на выходе — 12.1°. Максимальный пик пропускания приходится на синюю область длин волн 467 nm, а ФЗЗ лежит в красной и ИК-области спектра от 658 nm. На рис. 2 пунктирной линией представлен спектр пропускания структуры с размером центрального отверстия 64.4  $\mu\text{m}$ , диаметром отверстий, входящих в первый слой, 1.4  $\mu\text{m}$ , числовой апертурой 0.122, расходимостью пучка на выходе 14.1°. Пик пропускания для этого образца приходится на зеленую область с максимумом на 531 nm, а ФЗЗ лежит в красной и ИК-области спектра от 700 nm. Следующий спектр пропускания (кривая в виде точек, рис. 2) соответствует структуре, размер полый сердцевинки которой составляет 71.5  $\mu\text{m}$ , размер отверстий первого ряда — 1.55  $\mu\text{m}$ . Числовая апертура 0.124, расходимость пучка на выходе — 14.2°. Для этого образца центральный максимум пропускания приходится на красную область 604 nm, причем в спектре полностью отсутствуют длины волн от 400–492 (фиолетовые, синие и часть голубых длин волн), а также длины волн ближнего ИК-диапазона, начиная от 763 nm. Кривая точечно-пунктирная (рис. 2) отражает спектр пропускания образца, размер полый сердцевинки которого составляет 80.5  $\mu\text{m}$ , размер первых отверстий 1.75  $\mu\text{m}$ . Числовая апертура для него составляет 0.073, а расходимость пучка на выходе — 8.4°. Пик пропускания для такой структуры приходится на 715 nm, ФЗЗ соответствует полосе 402 — 572 nm. Ширина ФЗЗ составляет 170 nm. На вставке рис. 2 приведены спектры пропускания ФКС с размером полый сердцевинки 90  $\mu\text{m}$  (сплошная кривая) и 107  $\mu\text{m}$  (пунктирная). Размер отверстий, входящих в первый слой волокна, составляет 2 и 2.33  $\mu\text{m}$  соответственно. Ширина ФЗЗ для этих образцов составляет 190 nm (480–670 nm) и 167 nm (450–617 nm) соответственно. Причем ФЗЗ полностью приходится на видимый диапазон длин волн. Числовая апертура этих ФКС составляет 0.079 и 0.083, с расходимостью пучка 9.1 и 9.5°.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности управления ФЗЗ за счет изменения геометрии структурируемой оболочки и полый сердцевинки ФКС в видимой области спектра. Увеличивая размер полый сердцевинки ФКС, оболочка которого структурирована радиально расположенными воздушными отверстиями с увеличивающимся диаметром каналов от центра к периферии по определенному закону, можно сдвигать пик максимального пропускания в ближнюю инфракрасную область. Кроме того, малые изменения в геометрических

параметрах ФКС позволяют смещать ФЗЗ с точностью несколько нанометров, добиваясь спектрально-чистого излучения. Такое управление светом дает возможность рассматривать ФКС такой конфигурации, как хорошие спектральные элементы с заданной полосой подавления и/или пропускания. Важно, отметить, что характер распространения света в таких структурах существенно отличается от характера распространения света в стандартных волоконных световодах.

Проведенные эксперименты показали, что *свет, в исследуемом типе фотонно-кристаллического световода, распространяется вдоль стенок капилляров („пристеночно“), организуя внутреннюю поверхность полой сердцевины.* Этот эффект доказывается малой числовой апертурой волокон и малыми потерями. Факт „пристеночного“ распространения света в ФКС позволяет считать, что в данном случае роль материала невелика, на этом уровне важно организовать структуру материала — шаг, диаметр каналов и распределение каналов в оболочке (градиент показателя преломления), размер и геометрию дефекта. И если изготовить ФКС, где стенки капилляров будут соизмеримы с глубиной проникновения света в материал, то потери в данном случае будут стремиться к нулю. Чем меньше длина волны, тем критичнее состояние поверхности канала. Наличие градиента показателя преломления обуславливает удержание излучения на незначительной глубине в стенках каналов не более 10 nm, и для данной конструкции и геометрии волокна оно конкурирует с эффектами дифракции. Поэтому необходимы дальнейшее изучение физических факторов, определяющих предельные значения эффективности нелинейно-оптических процессов, и выработка в результате оптимизированной архитектуры наноразмерной структуры, влияющей на условия распространения света.

Разработанные ФКС позволяют достичь высоких эффективностей целого набора нелинейно-оптических процессов, которые уже на этой стадии позволяют использовать их в таких областях, как биомедицина — создание высокоэффективных источников света для оптической когерентной томографии и прецизионных сенсоров. Введение в полую сердцевину жидкости или клеток (например, воды, спирта, глюкозы, гемоглобина, эритроцитов или других клеток) должно позволить влиять на спектры пропускания таких структур, смещая полосу пропускания в ту или иную сторону спектрального диапазона. Дальнейшие исследования в этой области должны позволить создать высокочувствительные экспресс-биосенсоры (lab-on-chip) для определения сверхмалых

изменений концентрации или показателя преломления реагента для диагностики различных заболеваний. ФКС должны найти применение в цитометрии, в частности для определения витальности клетки, ее перехода к апоптозу или некрозу, в инженерии биологических тканей, в частности для мониторинга процесса выращивания нервных волокон, при создании высокоэффективных, ярких источников, преимущественно составленных из синих, красных, или инфракрасных длин волн, обеспечивающих необходимый набор длин волн для лучшего поглощения растениями. В области оптической метрологии такие ФКС могут быть полезными при создании сверхширокополосного, многооктавного источника света для оптического синтезатора частоты. Создание структур с управляемыми ФЗЗ, определяющими цвет, позволит создать наноструктурный материал для официальных бумаг, требующих защиты, специальных тканей, защитных покрытий и пр., для которых необходим определенный спектр отражения.

Работа выполнена при поддержке гранта CRDF REC 006.

## Список литературы

- [1] Слепов Н. // Электроника. 2004. № 5. С. 80–84.
- [2] Broeng J., Sondergaard T., Barkou S.E., Barbeito P.M., Bjarklev A. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 1999. V. 1. P. 477–482.
- [3] Knight J.C., Birks T.A., Cregan R.F., Russell P. St. J. // Opt. Mater. 1999. V. 11. P. 143–151.
- [4] Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Melnikov L.A., Beloglazov V.I., Skibina Yu.S. // Laser Physics. 2000. V. 10. N 5. P. 723–726.
- [5] Желтиков А.М. // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 1. С. 73–105.