

07

## Сенсорные свойства фотонно-кристаллического волновода с поллой сердцевиной

© В.В. Тучин, Ю.С. Скибина, В.И. Белоглазов, М.В. Чайников,  
Н.Б. Скибина, Н.А. Михайлова, П.М. Жестков, И.Ю. Силохин

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

*В окончательной редакции 4 февраля 2008 г.*

Продемонстрирован новый класс фотонно-кристаллических волноводов с поллой сердцевиной, с различными модификациями пространственной решетки. Показано влияние геометрии структуры на управление фотонными запрещенными зонами в видимом диапазоне длин волн. Выявлена взаимосвязь изменения показателя преломления сердцевины, при заполнении поллой сердцевины различными жидкостями, с шириной и расположением фотонной запрещенной зоны. Фотонно-кристаллические волноводы открывают новые возможности для применения в качестве биологических и химических сенсоров.

PACS: 42.25.Bs, 42.70.-a, 42.70.Qs, 42.81.Pa, 42.81.Qb, 71.20.Tx, 87.50.Hj

Волноводы, в которых могут быть сформированы фотонные запрещенные зоны, позволяют: 1) увеличить эффективность нелинейно-оптических взаимодействий; 2) управлять дисперсией волноводных мод, сдвигая длину волны нулевой дисперсии в область видимого спектра, и эффективным показателем преломления оболочки; 3) с высокой степенью локализации передавать электромагнитное излучение [1–7].

Фотонный кристалл (ФК) — это искусственно созданная периодическая диэлектрическая среда, которая может иметь фотонные запрещенные зоны, препятствующие распространению света в определенном диапазоне длин волн. Наличие фотонных запрещенных зон реализуется за счет создания структурной оболочки из композиции „стекло–воздух“, которая обладает высоким коэффициентом отражения. Периодичность расположения воздушных отверстий в оболочке волновода является

определяющим фактором формирования волноводных мод. Структура двумерного фотонного кристалла формируется укладкой симметрично или асимметрично расположенных вокруг сердцевин (дефекта микроструктуры, соответствующего одному или нескольким стеклянным цилиндрам) стеклянных капилляров круглой или шестигранной формы, создающих периодическую двумерную решетку. Основная особенность фотонно-кристаллического волновода состоит в том, что распространение энергии световой волны в таком волноводе происходит вдоль сердцевин, когда длина волны и направление распространения волны соответствуют фотонной запрещенной зоне.

Фотонно-кристаллический волновод с поллой (воздушной) сердцевиной имеет низкий показатель преломления сердцевин по отношению к эффективному показателю преломления окружающей ее оболочки со структурой двумерного фотонного кристалла. Он не похож на обычный оптический волновод, так как в нем не реализуется эффект полного внутреннего отражения, поскольку показатель преломления оболочки больше показателя преломления сердцевин. Определенная же световая мода направляется по поллой сердцевине благодаря локализирующему и направляющему свойству сформированной фотонной запрещенной зоны.

Биосенсоры занимают ведущее положение среди сенсоров для целей аналитического определения субстратов в медицине. Сочетание высокой селективности ферментов с регистрацией отклика в электрических и оптических величинах позволяет создать устройства с высокой селективностью и чувствительностью, пригодных для проведения экспресс-анализа и мониторинга. Капиллярные биосенсоры могут изготавливаться из стеклянных, кварцевых, кремниевых, полимерных или иных субстратов с каналами и отверстиями для заполнения рабочими растворами, введения пробы и реагентов.

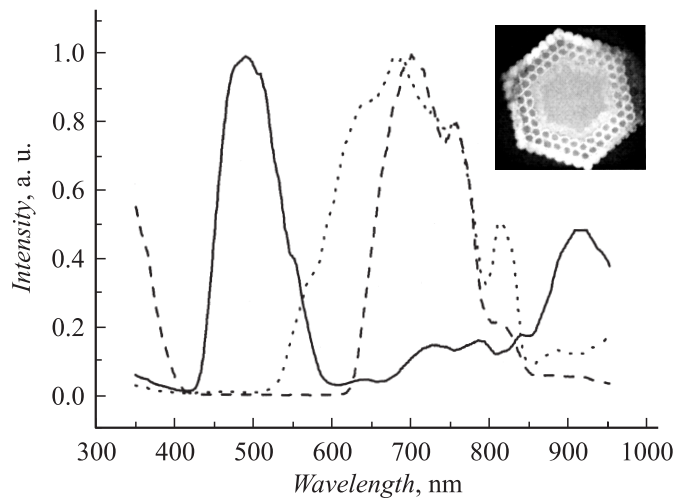
Сенсор на основе фотонно-кристаллических волноводов — датчик физических величин, в конструкции которого в качестве чувствительного элемента и передающей оптическое излучение среды используется оптический волновод [8]. Чувствительный элемент сенсора преобразует определенное физическое воздействие в изменение свойств прошедшего, отраженного или рассеянного излучения. По принципу действия волноводные сенсоры можно разделить на группы в соответствии с тем, какой параметр оптического излучения измеряется для получения информации о физическом воздействии: интенсивность, фаза, состояние поляризации, спектральный и модовый состав излучения [9].

В настоящее время фотонно-кристаллические волноводы рассматриваются как один из наиболее перспективных чувствительных элементов волноводно-оптических датчиков физических величин. К числу их основных преимуществ можно отнести защищенность от воздействий электромагнитных полей, высокую чувствительность, надежность, воспроизводимость и широкий динамический диапазон измерений, возможность спектрального и пространственного мультиплексирования чувствительных элементов, расположенных в одном или нескольких волноводах, малое время отклика на изменение измеряемой величины, малые объемы пробы, малые габариты.

Изготовление фотонно-кристаллического волновода основано на классической волоконной технологии [10]. Прецизионные, круглые, стеклянные капилляры укладывают в пакет, например, гексагональной формы. Уложенный пакет капилляров нагревают до температуры размягчения стекла, перетягивают в подобии, получая шестигранные поликапиллярные структуры. Полученные структуры собирают в пакет гексагональной формы и снова перетягивают, повторяя эту операцию до тех пор, пока не получат заданный шаг (период воздушных каналов) структуры. Если в исходном пакете заменить один или несколько капилляров на такой же по геометрии стержень или направляющую втулку, то в конечном шестиграннике появится место с нарушением периодичности воздушных каналов, которое отвечает за формирование сердцевин из стекла или воздуха соответственно.

Демонстрация влияния модификации пространственной решетки на спектры пропускания фотонно-кристаллического волновода представлена на рис. 1. Сплошной кривой показан волновод с полостью сердцевинной диаметром  $153 \mu\text{m}$ , диаметром капилляров, окружающих полую сердцевину,  $4 \mu\text{m}$ , наружным размером волновода  $340 \mu\text{m}$ . Для такой структуры характерна запрещенная зона шириной  $60 \text{ nm}$  ( $607\text{--}667 \text{ nm}$ ). Точечная кривая представляет волновод с полостью сердцевинной  $102 \mu\text{m}$ , диаметром капилляров, окружающих полую сердцевину,  $2 \mu\text{m}$ , наружным размером волновода  $224 \mu\text{m}$ . Ширина запрещенной зоны в этом случае составляет  $100 \text{ nm}$  ( $414\text{--}514 \text{ nm}$ ).

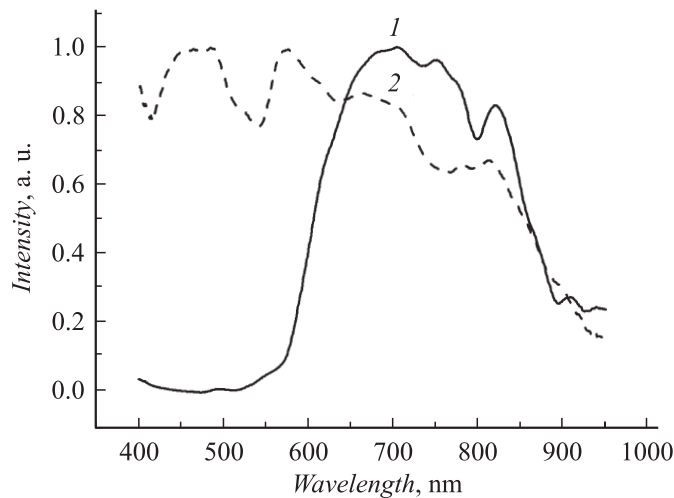
Для исследований смещения фотонной запрещенной зоны при изменении показателя преломления сердцевинной использовался фотонно-кристаллический волновод, представленный на вставке рис. 1. Размер полости сердцевинной фотонно-кристаллического волновода составляет  $114 \mu\text{m}$ , диаметр капилляров, окружающих полую сердцевину,  $3 \mu\text{m}$ ,



**Рис. 1.** Спектры пропускания полых фотонно-кристаллических волноводов. На вставке — поперечное сечение фотонно-кристаллического волновода (размер полый сердцевины  $102\ \mu\text{m}$ ; единичный канал, прилегающий к полый сердцевине,  $2\ \mu\text{m}$ ).

наружный размер волновода  $250\ \mu\text{m}$  (пунктирная кривая). Ширина запрещенной зоны в этом случае составляет  $193\ \text{nm}$  ( $423\text{--}616\ \text{nm}$ ).

Проведенные эксперименты также показали, что свет в исследуемом фотонно-кристаллическом волноводе распространяется вдоль стенок капилляров („пристеночно“), организующих внутреннюю поверхность полый сердцевин. Этот эффект доказывается малой числовой апертурой волокон и малыми потерями. Факт „пристеночного“ распространения света в фотонно-кристаллическом волноводе 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 фотонно-кристаллическую структуру, 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.



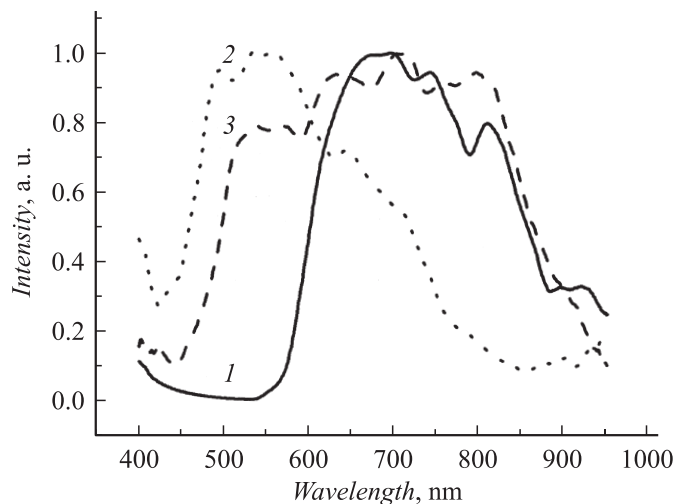
**Рис. 2.** Спектры пропускания фотонно-кристаллического волновода: 1 — воздушная сердцевина, 2 — заполненная водой.

Волновод такого типа заполняется дистиллированной водой. Вода — универсальный растворитель. Она имеет высокую теплоемкость и одновременно высокую для жидкостей теплопроводность. Для воды характерна полная прозрачность в видимом участке спектра.

Образец погружался в кювету с водой на 1 минуту. В результате под воздействием капиллярных сил водой заполнялись микроструктурная оболочка и воздушная сердцевина.

На рис. 2 приведены спектры пропускания идентичных по структуре волноводов: с воздушной сердцевиной и волновода, заполненного водой. Спектры пропускания полых фотонно-кристаллических волноводов характеризуются наличием ярко выраженных максимумов (рис. 1). Изменение интенсивности, или сдвиг в коротковолновую или в некоторых случаях длинноволновую области спектра, позволяет связывать эти характеристики непосредственно со свойствами введенного вещества (рис. 2).

В спектрах пропускания рис. 3 сплошная кривая отвечает за волновод с воздушной сердцевиной, точечная кривая — волновод, заполненный раствором аскорбиновой кислоты в воде.



**Рис. 3.** Спектры пропускания фотонно-кристаллического волновода: 1 — воздушная сердцевина, 2 — заполненные аскорбиновой кислотой с концентрацией 5%, 3 — 10%.

Аскорбиновая кислота — витамин С —  $\gamma$ -Лактон 2,3-дегидро-L-гулоновой кислоты-водорастворимый. Она играет важную роль в регуляции окислительно-восстановительных процессов, участвует в синтезе коллагена и проколлагена, обмене фолиевой кислоты и железа, а также в синтезе стероидных гормонов и катехоламинов. По спектрам пропускания (рис. 3) отчетливо видно влияние не только концентрации (изменение показателя преломления) аскорбиновой кислоты (сдвиг пика пропускания между двумя концентрациями составляет примерно 180 nm), но и присутствие воды в растворе.

Таким образом, введение в полую сердцевину исследуемой жидкости (например, воды, глюкозы, аскорбиновой кислоты) влияет на спектры пропускания фотонно-кристаллических волноводов, смещая полосу пропускания в ту или иную сторону спектрального диапазона.

Варианты использования подобных биосенсоров: измерение пищевой ценности, свежести и безопасности продуктов питания; экспресс-анализ крови непосредственно у кровати больного; обнаружение и измерение степени загрязнения окружающей среды; детекция и опре-

деление количества взрывчатых веществ, токсинов и возможного биологического оружия. Такие сенсоры позволяют наблюдать протекание химических реакций взаимодействия, фазовых переходов под действием температуры, давления в реальном масштабе времени.

Дальнейшие исследования в этой области позволят создать базу для проектирования высокочувствительных экспресс-биосенсоров („lab-on-chip“) для определения сверхмалых (на молекулярном уровне) изменений концентрации или показателя преломления реагента для диагностики различных заболеваний.

## Список литературы

- [1] Слепов Н. // Электроника. 2004. № 5. С. 80–84.
- [2] Birks T.A., Roberts P.J., Russell P.St. J. // IEEE Electr. Letters. 1995. V. 31. P. 1941–1943.
- [3] Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N. Photonic crystals. Princeton Press, Princeton, NJ, 1995.
- [4] Варфоломеев С.Д. // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 1. С. 47–50.
- [5] Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2005. С. 305–307.
- [6] Beloglazov V.I., Chainikov M.V., Skibina Yu.S., Tuchin V.V. // J. X-Ray Science and Technology. 2005. V. 13. N 4. P. 171–177.
- [7] Желтиков А.М. // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 1. С. 73–105.
- [8] Broeng J., Sondergaard T., Barkou S.E. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 1999. V. 1. P. 477–482.
- [9] Knight J.C., Birks T.A., Cregan R.F., Russell P. St. J. // Opt. Mater. 1999. V. 11. P. 143–151.
- [10] 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.