

03;07

Биологический сенсор на базе фотонно-кристаллического световода с поллой сердцевиной

© А.В. Малинин, Ю.С. Скибина, Н.А. Михайлова,
И.Ю. Силохин, М.В. Чайников

Саратовский государственный университет
ООО НПП „Наноструктурная технология стекла“, Саратов
E-mail: malinin_student@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 октября 2009 г.

Продемонстрирован новый класс фотонно-кристаллических световодов с поллой сердцевиной, используемых в качестве чувствительного элемента химических и биологических сенсоров. Показано изменение спектральных характеристик фотонно-кристаллических световодов при изменении физических параметров среды, заполняющих их периодическую структуру. Доказано влияние изменения концентрации вводимого раствора органического вещества на формирование спектра проводимого световодом оптического излучения. Разработан способ регистрации оптического отклика системы световод–жидкость на изменение концентрации растворенного в анализируемой жидкости вещества.

Появившиеся несколько десятилетий назад электронные аналитические устройства, биосенсоры, быстро заняли свою нишу среди устройств анализа, применяемых в медицине и биологии. Нетрудно проследить направление эволюции биосенсоров в плане физических методов анализа: от электрохимических к оптическим. Последние, в свою очередь, считаются перспективными в силу нескольких причин: оптические устройства обеспечивают высокую точность анализа, безопасны для пациента, требуют малых количеств исследуемого материала.

Возможность использования фотонно-кристаллических световодов в конструкции сенсоров благодаря свойствам, характерным для этих структур, открывает новые возможности исследователям.

Фотонно-кристаллический световод, по сути, является волноводом, проводящим электромагнитное излучение оптического диапазона. Однако конструктивно и по принципу распространения излучения такие световоды отличаются от широко известного оптического волокна [1].

Основное и самое принципиальное отличие — структурная оболочка, которая формируется на первом этапе изготовления волновода, когда тонкостенные стеклянные капилляры укладываются в пакет требуемой формы с заданной периодичностью.

В данном случае рассматриваемый тип фотонно-кристаллического волокна — фотонно-кристаллическое волокно с полый сердцевинной. В центре симметрии такого волновода нарушена периодичность воздушных каналов — присутствует полый дефект решетки. Формирование полый сердцевинной световода производится также на этапе сборки структуры путем замены одного или нескольких стеклянных капилляров на такую же по геометрии направляющую втулку [2,3].

Для получения волновода требуемых размеров сформированный пакет капилляров нагревают до температуры размягчения стекла и перетягивают в подобии. Операция повторяется несколько раз — до получения требуемого диаметра волокна и заданного шага в расположении воздушных каналов в структурной оболочке.

Очевидно, что конструктивные особенности фотонно-кристаллического волокна недопускают распространения оптического излучения вдоль сердцевинной волновода по физическому принципу, действующему в классическом оптическом волокне, — по закону полного внутреннего отражения. В данном случае независимо от конфигурации структурированной оболочки эффективный показатель преломления оболочки больше показателя преломления сердцевинной. Направляющие свойства фотонно-кристаллических волокон обусловлены характерным только для световодов этого типа наличием фотонной запрещенной зоны [3,4].

Наличие фотонных запрещенных зон — это уникальное свойство фотонных кристаллов. Фотонным кристаллом называют периодическую диэлектрическую структуру, которая может иметь фотонную запрещенную зону, препятствующую распространению света в структуре в определенном диапазоне длин волн [3].

Фотонно-кристаллические волокна в сечении представляют собой двухмерный фотонный кристалл. Роль дефекта решетки играет полый сердцевинной волновода [2,3,5–8]. Оптическое излучение определенного диапазона, вводимое в полую сердцевинную волокна, не может пройти через структурную оболочку и покинуть световод. Таким образом, становится возможной локализация излучения в пределах полый сердцевинной. Варьируя конфигурацию структурной оболочки, можно добиться изменения спектрального состава проводимого по волноводу света.

Появление фотонно-кристаллических волокон дало начало реализации нового подхода к управлению спектральными характеристиками света, в том числе и в видимой части оптического спектра.

Конфигурация структурируемой оболочки является определяющим фактором формирования спектра пропускания в случае, когда периодическая структура заполнена воздухом.

Экспериментально также доказано, что на генерацию спектра проводимого волокном излучения влияет показатель преломления заполняющей полую сердцевину и каналы оболочки среды. При заполнении волокна жидкостями, отличными друг от друга своими свойствами, происходит изменение положения максимумов в спектре пропускания волокна, а также их рост и падение. Потому возможно связывать изменение в регистрируемом спектре пропускания фотонно-кристаллического волокна непосредственно со свойствами заполняющей среды, такими как, например, концентрация некоего растворенного вещества в заполняющей каналы световода жидкости. Проявление упомянутых выше эффектов, в свою очередь, дает возможность для реализации различных методов анализа. Подходящая методика анализа экспериментальных данных выбирается исходя из задач исследования.

В данном случае предметом исследования является жидкость, в которой присутствует холероген (*cholero-genum*) — токсин белковой природы, продуцируемый холерными вибрионами, фиксируемый рецепторами клеток слизистой оболочки тонкой кишки и обуславливающий синдром диареи при холере. Интерес представляет влияние возрастания концентрации молекул холерогена в водном растворе, заполняющем каналы фотонно-кристаллического световода, на спектральные свойства проводимого световодом излучения (рис. 1).

Схематически экспериментальная установка представляет собой несколько блоков: источник оптического излучения, фокусирующая система, образец, спектрофотометр, персональный компьютер. Оптическое излучение от источника собирается линзой; размер светового пятна в фокусе соответствует размеру полой сердцевины фотонно-кристаллического световода. Входной торец фотонно-кристаллического волокна помещают в фокус линзы. С помощью 3D-юстировочного устройства производится юстировка расположения световода так, чтобы излучение от источника вводилось строго в его сердцевину. Таким образом, на выходе излучение сконцентрировано исключительно в полой сердцевине световода, а не в периодической структурированной

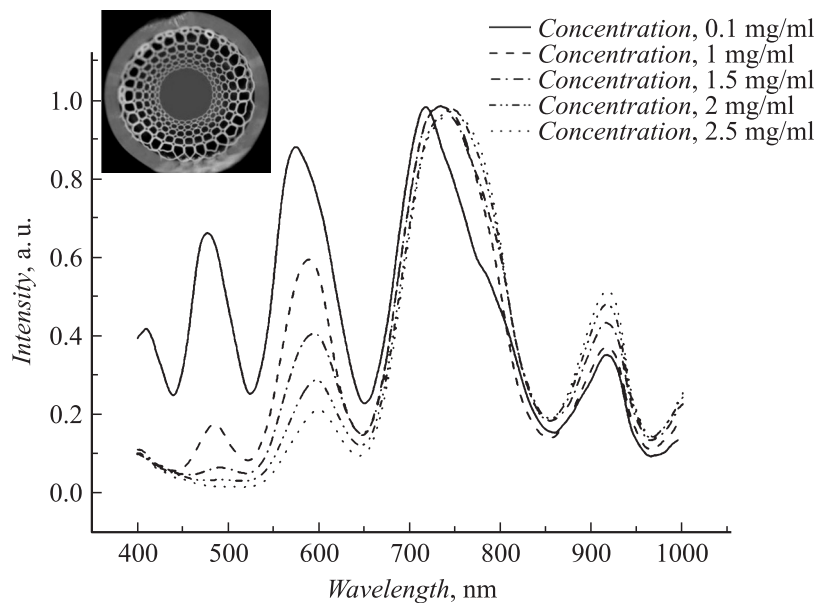


Рис. 1. Спектры оптического излучения, проходящего по образцам светодовов, после заполнения их внутренней структуры водным раствором холерогена (концентрация раствора возрастает от образца к образцу в интервале 0.1–2.5 mg/ml).

оболочке. Прошедшее через образец фотонно-кристаллического световода излучение с помощью микрообъектива фокусируется на входной оптоволоконный кабель спектрофотометра, напрямую связанного с компьютером.

Для исследования изменения спектров пропускания фотонно-кристаллического световода с поллой сердцевинной при изменении параметров заполняющей среды использовался световод, микрофотография которого представлена на рис. 1. Размер поллой сердцевинной световода составляет $150\ \mu\text{m}$, наружный размер — $750\ \mu\text{m}$.

На рис. 1 приведены спектры пропускания одинаковых по структуре волноводов, заполненных водным раствором молекул холерогена возрастающих концентраций. На графике видно, что с увеличением концентрации растворенного в воде вещества спектр пропускания света для данного типа фотонно-кристаллического волокна изменяется

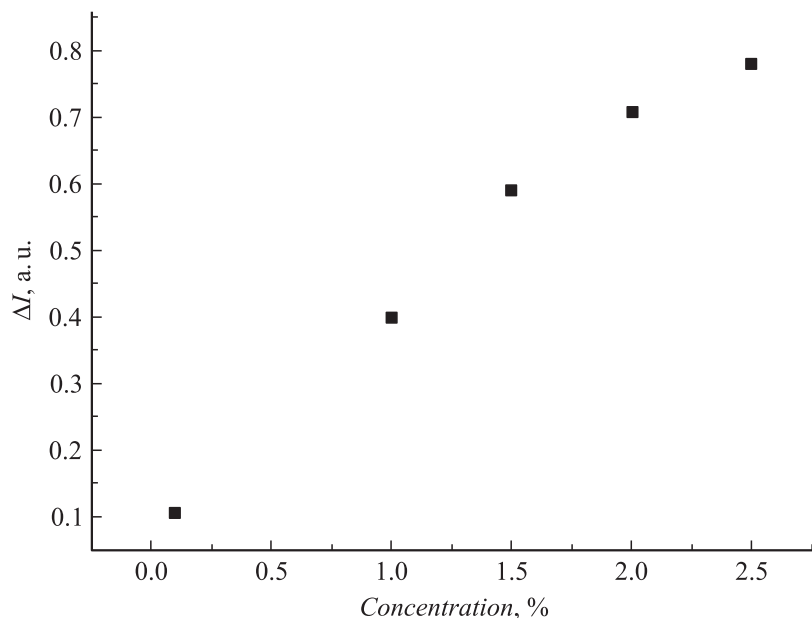


Рис. 2. Зависимость величины смещения по шкале интенсивности максимума на длине волны 600 nm относительно максимума 750 nm от значения концентрации молекул холерогена, содержащихся в растворе.

значительно. Для анализа данных спектров была измерена величина смещения максимума пропускания света, расположенного на длине волны 580 nm, по шкале интенсивности относительно значения пропускания в соседнем максимуме 740 nm. Для оценки смещения данного максимума по шкале интенсивности при изменении количества растворенного в жидкости вещества была построена зависимость смещения от концентрации раствора. Зависимость приведена на рис. 2. Такие зависимости можно использовать в качестве калибровочных кривых для различных типов фотонно-кристаллических волокон, при определении концентраций растворов органических веществ.

Данные локальные максимумы в спектрах проводимого образцами излучения были выбраны для анализа исключительно из соображений удобства. Нужно отметить, что такой подход к анализу изменений

спектральных характеристик структур не единственный, а один из возможных. При заполнении образцов структур жидкостями в их спектрах пропускания кроме смещения максимумов по шкале интенсивности часто наблюдаются смещение максимумов по шкале длин волн и рождение новых максимумов. Такие изменения также можно подвергнуть оценке.

Результат проведенной работы — создание чувствительного элемента, настроенного своей внутренней структурой на измерение концентрации холерогена в жидком растворе. Доказано наличие оптического отклика фотонно-кристаллического волокна на изменение параметров среды, заполняющей их внутреннюю структуру. Проведенное исследование позволяет говорить о возможности применения таких чувствительных элементов в схемах электронных аналитических устройств.

Авторы статьи выражают благодарность Д.В. Уткину (Российский научно-исследовательский противочумный институт „МИКРОБ“ Роспотребнадзора) за помощь в проведении экспериментов и продуктивное обсуждение полученных результатов.

Список литературы

- [1] Маркузе Д. Оптические волноводы. М.: Мир, 1974. С. 368–392.
- [2] 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.
- [3] Белоглазов В.И., Тучин В.В., Скибина Н.Б., Скибина Ю.С., Чайников М.В. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 15. С. 63–69.
- [4] Слепов Н. // Электроника. 2004. В. 5. С. 80–84.
- [5] Желтиков А.М. // УФН. 2004. Т. 174. № 1. С. 73–105.
- [6] 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.
- [7] Knight J.C., Birks T.A., Cregan R.F. and Russell P. St. J. // Opt. Mater. 1999. V. 11. P. 143–151.
- [8] Broeng J., Sondergaard T., Barkou S.E. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 1999. V. 1. P. 477–482.