

## Анализ температурной зависимости спектральных характеристик фотонно-кристаллических волокон с поллой сердцевиной

© К.А. Бжеумихов, З.Ч. Маргушев, Ю.В. Савойский

Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН,  
360000 Нальчик, Россия  
e-mail: zmargush@ya.ru

(Поступило в Редакцию 13 августа 2012 г.)

Теоретически и экспериментально изучена зависимость спектральных характеристик монокапилляров из стекла С87-2 с воздухом и этиловым спиртом внутри от температуры в диапазоне 23–90°C и 23–40°C соответственно. Подобные же исследования проведены для фотонно-кристаллического волокна из стекла AR-Glass (Schott). В указанных диапазонах температур наблюдалась очень слабая трансформация спектров пропускания волокон с воздушным заполнением от температуры. Установлена прямо пропорциональная зависимость сдвига максимумов пропускания с ростом температуры в сторону больших длин волн в случае заполнения полостей образцов этиловым спиртом. Показано, что температурная зависимость формы спектров пропускания волокон определяется в большей степени характеристиками среды заполнения полых каналов по сравнению с материалом волокна. Чувствительность фотонно-кристаллического волокна к температуре при заполнении полых каналов спиртом составила 1.25 nm/°C, а монокапилляра — 0.4 nm/°C.

Фотонно-кристаллические волокна (ФКВ) с поллой сердцевиной как одна из разновидностей микроструктурированных волокон на сегодняшний день привлекают интерес многих исследователей благодаря возможности многочисленных приложений в спектроскопии, телекоммуникационных и сенсорных системах [1–3]. Все приложения ФКВ основаны на особенности периодического распределения показателя преломления оболочки в радиальном и полярном направлениях, что формирует фотонные запрещенные и разрешенные зоны. Это приводит к тому, что определенные частоты из спектра излучения поглощаются оболочкой, в то время как другие частоты распространяются по поллой сердцеvine путем отражения от стенок практически без потерь [4]. Данный эффект проявляется на спектрах излучения, распространяющегося по поллой сердцеvine ФКВ в виде чередующихся пиков и минимумов с периодом, который определяется структурными параметрами оболочки волокна. Спектральное положение областей пропускания оптического излучения ФКВ с поллой сердцевиной определяется как показателем преломления материала, структурными параметрами, так и показателем преломления среды заполнения сердцевины и каналов оболочки [5].

На основе исследования закономерностей в трансформации спектров пропускания ФКВ с поллой сердцевиной в зависимости от концентрации водного раствора рибофлавина, введенного в каналы, авторами сделан вывод о возможности использования их в качестве сенсоров в аналитических устройствах в биологии и медицине [6,7]. Количественная оценка влияния концентрации водного раствора этилового спирта в качестве среды заполнения ФКВ на величину сдвига фотонных полос пропускания на спектре показала чувствительность метода порядка  $10^{-4}$  [8]. Применения ФКВ с поллой сердцевиной в

качестве датчиков различных физических показателей среды заполнения каналов, на наш взгляд, требуют более детального изучения характера влияния исследуемых материалов на спектральные свойства ФКВ. В частности, не до конца изучены вопрос о степени влияния разного рода внешних воздействий (температура, давление и т.д.) на спектральные свойства ФКВ. Настоящая работа является продолжением работы [8] и имеет целью установить закономерности температурного воздействия на спектральное положение пиков пропускания излучения монокапиллярами и фотонных запрещенных зон ФКВ с заполнением полых каналов воздухом и жидкостью на примере 95% раствора этилового спирта.

Расчет температурной зависимости спектров пропускания излучения для монокапилляра проведен в рамках модели [2], где выражение для положения максимумов пиков в спектре имеет вид:

$$\lambda_j = \frac{4d}{2j+1} (n_2^2 - n_1^2)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $j$  — целое число,  $n_1$  и  $n_2$  — коэффициенты преломления среды заполнения сердцевины и материала капилляра с толщиной стенки  $d$  соответственно. Все три параметра зависят от температуры, при этом  $n_1$  и  $n_2$  являются также функциями длины волны.

Для оценки результирующего вклада температурных зависимостей всех параметров на смещение положений пиков пропускания волокна, дифференцируя выражение (1), получим

$$\Delta\lambda_j = \left( \frac{\Delta d}{d} + \frac{n_2 \Delta n_2}{(n_2^2 - n_1^2)} - \frac{n_1 \Delta n_1}{(n_2^2 - n_1^2)} \right) \lambda_j, \quad (2)$$

где  $\Delta d/d = \alpha \Delta T$ ,  $\alpha$  — коэффициент термического расширения материала волокна (КТР),  $\Delta T$  — изменение

температуры относительно начального значения (в нашем случае 23°C).

При расчете изменения показателя преломления материала волокна  $\Delta n_2$  в зависимости от длины волны и температуры используем выражение [9]

$$\frac{dn_2(\lambda, T)}{dT} = \frac{n_2^2(\lambda, T_0)}{2n_2(\lambda, T_0)} \left( D_0 + 2D_1\Delta T + 3D_2\Delta T^2 + \frac{E_0 + 2E_1\Delta T}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2} \right), \quad (3)$$

где  $\Delta T$  — изменение температуры относительно базовой температуры  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $\lambda_{TK}$  — константы, зависящие от материала волокна.

В случае заполнения полости монокапилляра воздухом расчетная зависимость коэффициента преломления  $n_1$  имеет вид [10]

$$n_{air}(\lambda) = 1 + 10^{-6} \left( 64.328 + \frac{29498.1}{146 - 10^6/\lambda^2} + \frac{255.4}{41 - 10^6/\lambda^2} \right),$$

$$n_1(\lambda, P, T) = 1 + (n_{air}(\lambda) - 1) \frac{P(1 + (1.049 - 0.0157T)10^{-6}P)}{720.883(1 + 0.003661T)}, \quad (4)$$

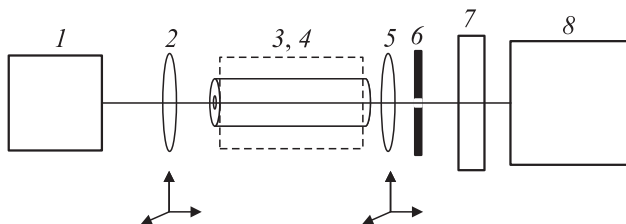
где  $n_{air}$  задает зависимость показателя преломления воздуха от длины волны при давлении  $P = 105$  Па и температуре  $T = 15^\circ\text{C}$ .

Температурная зависимость показателя преломления этилового спирта  $n_1$  в качестве среды заполнения капилляра была рассчитана с помощью выражения [11]

$$\frac{dn_1(T)}{dT} = -10^{-6} (404 + 0.44(T - 15) + 0.0075(T - 15)^2). \quad (5)$$

Эксперимент по измерению спектров пропускания образцов при различных температурах проводился по схеме рис. 1.

Излучение галогеновой лампы мощности 50 W  $I$  с помощью линзы  $2$ , установленной на 3D-держателе, фокусируется на входной торец волокна  $3$ . Образец размещен в специальную термостатическую кювету с диапазоном регулирования температуры 23–100°C. Излучение с выходного торца образца собирается объективом  $5$ , который закреплен на 3D-держателе и после



**Рис. 1.** Схема измерения:  $1$  — источник излучения,  $2$  — линза,  $3$  — образец,  $4$  — термостатическая кювета,  $5$  — объектив,  $6$  — диафрагма,  $7$  — оптоволоконная приставка,  $8$  — спектрометр USB2000+.

диафрагмы  $6$ , оптоволоконной приставки  $7$  попадает на приемное окно спектрометра USB2000+ (Ocean Optics)  $8$ . Положение и размер диафрагмы выбраны таким образом, чтобы в приемное окно спектрометра попадали только те моды излучения, которые прошли через сердцевину, а оболочечные моды отсекались. Вся схема собрана на виброизоляционном оптическом столе Thorlabs.

На первом этапе нами проведены измерения спектров пропускания монокапилляра из стекла C87-2, относящегося к группе свинцово-силикатных.

Геометрические размеры образца монокапилляра: внешний диаметр — 257  $\mu\text{m}$ , внутренний диаметр — 205  $\mu\text{m}$ , толщина стенки — 26  $\mu\text{m}$ , длина — 8 см.

Диапазон изменения температуры монокапилляра с воздухом внутри составлял 23–100°C, для заполненного этиловым спиртом — 23–40°C. Для нескольких значений температур в указанном диапазоне снимался соответствующий спектр пропускания. Для количественного анализа зависимости формы спектров от температуры на соответствующей 23°C кривой выбирались две точки репера, соответствующие положению пиков с разными длинами волн. Таким образом, на эксперименте измерялись значения смещения точек репера с ростом температуры.

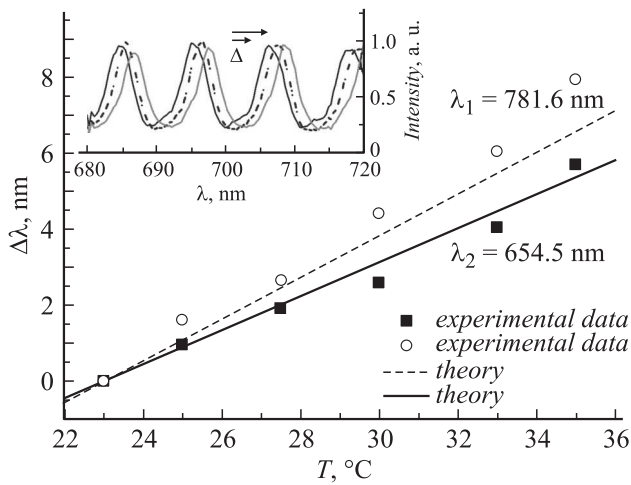
В диапазоне температур 23–90°C эксперимент не показал каких-либо смещений положения пиков пропускания на спектре монокапилляра с воздухом внутри. Этот результат согласуется с расчетными данными по формулам (2)–(4), которые составили величину 0.5 nm для точки репера 652 nm при температуре 90°C. Ввиду отсутствия данных в литературе по коэффициентам  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $\lambda_{TK}$  для C87-2 в выражении (3) нами были использованы значения этих констант для стекла SF2 (Schott) [12], которое по показателю преломления и КТР близко к материалу стекла C87-2. Корректность такой подстановки обусловлена тем, что вклад изменения коэффициента преломления спирта  $n_1$  в смещение максимума пика в выражении (2) на два порядка превышает вклад изменения коэффициента преломления стекла  $n_2$ .

На рис. 2 показаны экспериментальные и расчетные графики температурной зависимости смещения реперных пиков на спектре пропускания капилляра с этиловым спиртом, проведенные с использованием выражений (2), (3), (5). На этом же рисунке во вкладке показаны форма спектров и характер смещения пиков  $\Delta\lambda$  от температуры.

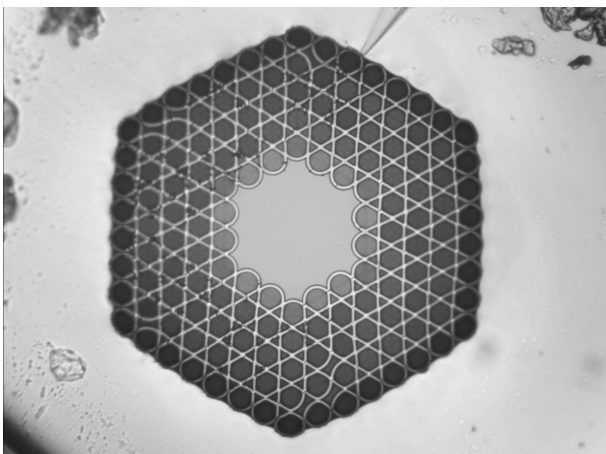
Как видно из графика, в диапазоне температур 23–40°C величина смещения положения реперов от температуры носит прямо пропорциональный характер, что подтверждено расчетными данными.

На заключительном этапе работы нами были проведены изучения характера зависимости смещения пиков пропускания от температуры для ФКВ. В качестве экспериментальных образцов нами были изготовлены ФКВ с полый сердцевинной (рис. 3) по поликапиллярной технологии [13].

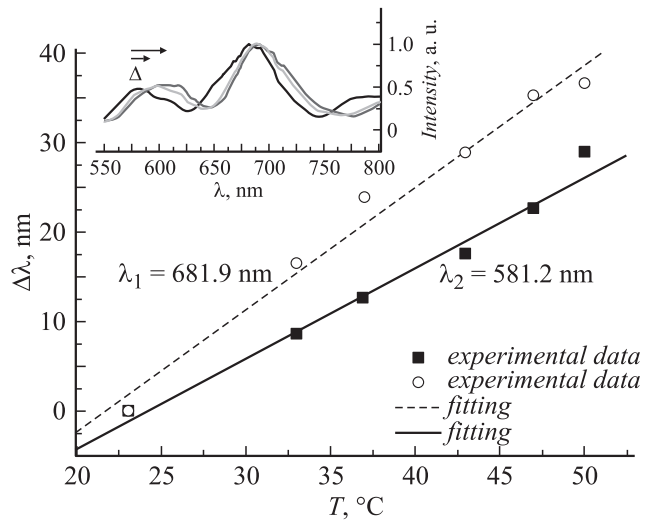
Микроструктурированная оболочка из стекла AR-Glass (Schott) заключена в сплошную оболочку из стекла LG (Crystalight) для придания прочности конструкции волокна. Полая сердцевина образована путем удаления 19 капилляров из центральной части на стадии предварительной гексагональной упаковки капилляров. Измерения спектров пропускания проводились по схеме рис. 1. Как и в предыдущем случае, эксперимент с воздушным заполнением полых каналов сердцевины и оболочки ФКВ в том же диапазоне температур не показал зависимости смещения соответствующих точек репера от температуры в диапазоне 23–90°С. На рис. 4 представлен экспериментальный график зависимости смещения выбранных реперов от температуры образца



**Рис. 2.** Экспериментальные (точки) и расчетные (сплошная и штриховая линии) зависимости смещения пиков пропускания от температуры для монокапилляра, заполненного этиловым спиртом.



**Рис. 3.** Микроскопическое изображение поперечного сечения ФКВ: внешний диаметр  $D = 740 \mu\text{m}$ , длина  $L = 8 \text{ cm}$ , диаметр полых сердцевин  $d_c = 107 \mu\text{m}$ , диаметр каналов структурированной оболочки  $d = 22 \mu\text{m}$ , шаг структуры  $\Lambda = 28 \mu\text{m}$ , толщина стенок капиллярных каналов  $h = 2.7 \mu\text{m}$ , количество слоев вокруг полых сердцевин  $N=5$ .



**Рис. 4.** Экспериментальные графики зависимости смещения пиков пропускания от температуры ФКВ с заполнением каналов оболочки и полых сердцевин этиловым спиртом.

ФКВ, полая сердцевина и каналы оболочки которого заполнены этиловым спиртом, во вкладке показаны форма спектров и характер смещения пиков  $\Delta$  от температуры.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

- форма спектров пропускания монокапилляра из стекла C87-2 и ФКВ из стекла AR-Glass (Schott) с воздушным заполнением полых каналов в диапазоне температур 23–90°С практически не претерпевает трансформации,
- в диапазоне температур 23–40°С происходит изменение формы спектров пропускания монокапилляра и ФКВ с заполнением полых каналов этиловым спиртом, что выражается сдвигом пиков пропускания в сторону больших длин волн, при этом спектральная чувствительность ФКВ к температуре составила  $1.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , в то время как у монокапилляра  $0.41 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . Такое различие мы связываем с конструкцией волокна,
- показано, что температурная зависимость формы спектров пропускания волокон определяется в большей степени характеристиками среды заполнения полых каналов по сравнению с материалом волокна.

### Список литературы

- [1] *Russell P.St.J.* // J. Lightwave Tech. 2006. Vol. 24. P. 4729–4749.
- [2] *Желтиков А.М.* Микроструктурированные световоды в оптических технологиях. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 192 с.
- [3] *Roberts P., Couny F., Sabert H., Mangan B., Williams D., Farr L., Mason M., Tomlinson A., Birks T., Knight J., Russell P.St.J.* // Opt. Express. 2005. Vol. 13. N 1. P. 236–244.
- [4] *Knight J.C., Broeng J., Birks T.A., Russell P.St.J., Knight J.C.* // Science. 1998. Vol. 282. P. 1476.

- [5] Желтиков А.М., Федотов А.Б. Патент РФ № КГ 2432568С1 от 11.06.2010.
- [6] Тучин В.В., Скибина Ю.С., Белоглазов В.И., Чайников М.В., Скибина Н.Б., Михайлова Н.А., Жестков П.М., Силовин И.Ю. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 15. С. 63–69.
- [7] Скибина Ю.С., Тучин В.В., Белоглазов В.И., Штейнмайер Г., Бетге Й.Л., Ведель Р., Лангхофф Н. // Квант. электрон. 2011. № 4. С. 284–301.
- [8] Бжеумихов К.А., Гуртуева И.А., Маргушев З.Ч., Савойский Ю.В. // Изв. КБНЦ РАН. 2012. № 3 (47). С. 26–31.
- [9] [http://www.pmoptics.com/Glass\\_Temperature\\_Coefficient.html](http://www.pmoptics.com/Glass_Temperature_Coefficient.html).
- [10] Кикоин И.К. Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976.
- [11] Elmer E. Hall, Arthur R. Payne // Phys. Rev. 1922. Vol. 20. P. 249–258.
- [12] <http://www.schott.com/>
- [13] Бжеумихов К.А., Маргушев З.Ч. // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 4. С. 495–500.