

03;07

Оптические свойства заполненного жидкостью микроструктурированного волокна со стеклянной сердцевиной

© П.М. Агрузов, И.В. Ильичев, А.В. Шамрай

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: achamrai@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 28 января 2011 г.

Исследовано влияние показателя преломления заполняющей жидкости на оптические свойства микроструктурированного волокна со стеклянной сердцевиной. Для кварцевого волокна с геометрическим параметром структуры ($d/\Lambda = 0.9$) определены оптимальные условия, обеспечивающие одномодовый режим, высокую степень взаимодействия оптического излучения с жидкостью и малые потери.

Микроструктурированные волокна, или оптические волокна на основе двумерных фотонных кристаллов, представляют собой новый класс оптических материалов, свойства которых могут варьироваться в широких пределах за счет изменения геометрии структуры [1]. Большой интерес также представляет возможность заполнения дырчатой структуры, в особенности для химических и биологических датчиков [2–4]. Прокачка исследуемой жидкости через дырчатую структуру волокна позволяет реализовать большую длину взаимодействия света с веществом (до нескольких метров), что весьма трудно реализовать в объемной конфигурации.

Различают два основных типа микроструктурированных оптических волокон: волокна с пустой сердцевиной и волокна со стеклянной сердцевиной. Волокна с пустой сердцевиной обеспечивают максимальное взаимодействие оптического излучения с исследуемой жидкостью, заполняющей микроструктуру волокна. Однако данный тип волокон имеет высокую стоимость, обусловленную техническими трудностями их изготовления, и, что более важно, заполнение волокна приводит к существенному изменению его спектральных характеристик, связанных с фотонной запрещенной зоной [5]. В волокнах со стеклянной серд-

цевиной, в отличие от волокон с пустой сердцевинкой, волноводные моды формируются за счет эффекта полного внутреннего отражения на границе раздела стеклянной сердцевины и микроструктурированной оболочки, что существенно расширяет область рабочих длин волн и перечень жидкостей для исследований. В работе [3] было показано, что за счет оптимального выбора геометрических параметров микроструктурированных оптических волокон со стеклянной сердцевиной можно обеспечить значительное перекрытие волноводной моды с заполненной жидкостью микроструктурой, достаточное для практических применений в области оптических датчиков. В то же время существует дополнительная степень свободы, а именно показатель преломления заполняющей жидкости, который также может использоваться для оптимизации оптических свойств заполненного волокна. В данной работе проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния показателя преломления заполняющей жидкости на оптические характеристики микроструктурированного волокна со стеклянной сердцевиной. Определены условия поддержания одномодового режима распространения света, и исследована зависимость перекрытия волноводной моды с заполненной жидкостью микроструктурой.

В экспериментах исследовалось кварцевое микроструктурированное оптическое волокно с гексагональным расположением воздушных отверстий, электронная фотография торца представлена на рис. 1, *a*. Волокно было изготовлено методом сборки и вытяжки [6], при сборке заготовки центральный капилляр заменен кварцевым стержнем, впоследствии сформировавшим сердцевину. Микроструктурированная оболочка содержит значительную долю воздуха: отношение диаметра отверстия в оболочке (d) к расстоянию между центрами соседних отверстий (Λ) равно 0.9. Данная геометрическая структура обеспечивает хорошую наполняемость отверстий при прокачке жидкостей с различной вязкостью и коэффициентом смачивания кварцевого стекла.

Для выбранных геометрических параметров структуры волокно без заполнения поддерживает многомодовый режим распространения излучения в исследуемом спектральном диапазоне (1500–1600 nm) [7]. При этом излучение практически полностью сосредоточено в сердцевине волокна, и диаметр пятна фундаментальной моды оказывается меньше диаметра сердцевины (7.5 μm).

Проводилось заполнение волокна жидкостями с различным показателем преломления, при этом исследовалось влияние коэффициента

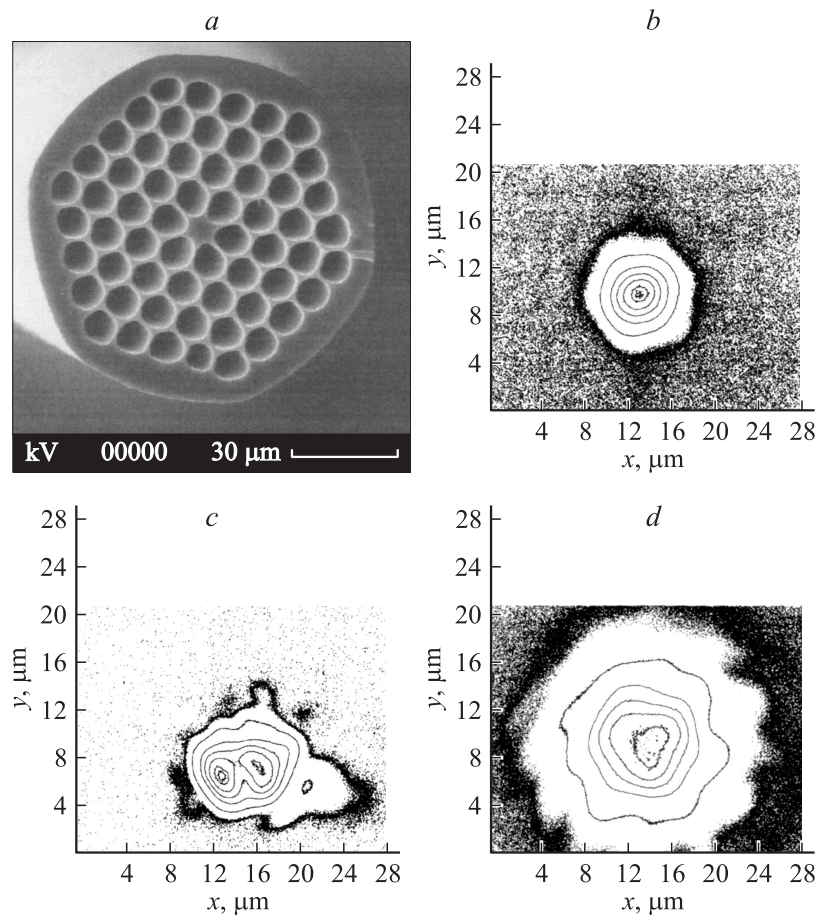


Рис. 1. *a* — электронная фотография исследуемого микроструктурированного волокна, *b* — профиль интенсивности оптического излучения в волокне без заполнения, *c* — картина интерференции мод в волокне без заполнения с преобладанием двудольной моды, *d* — фундаментальная мода в волокне с заполнением $n = 1.442$.

преломления заполняющей жидкости на волноводные характеристики волокна, а именно, условия одномодового режима (отсечки высших мод) и на диаметр фундаментальной моды, характеризующий долю

оптической мощности, проникающей в заполненные отверстия. В качестве жидкостей для заполнения использовался ацетон ($n = 1.348$), хлороформ ($n = 1.434$), а также смесь ацетонитрила ($n = 1.336$) с диметилсульфоксидом (ДМСО, $n = 1.464$) в различных пропорциях. Используемые компоненты смесей хорошо смачивают кварцевое стекло и слабо поглощают излучение в исследуемом спектральном диапазоне (1500–1600 nm). Варьируя пропорции в жидкой смеси, мы изменяли показатель преломления заполняющей жидкости в широких пределах (1.348–1.443). Контрольные измерения показателя преломления смеси производились по методике измерения коэффициента отражения от границы раздела кварцевое стекло–исследуемая жидкость. Для этого использовалась волоконно-оптическая установка, аналогичная описанной в работе [8], и проводились измерения абсолютного значения коэффициента отражения мощности от торца стандартного одномодового волокна (SMF 28), погруженного в исследуемую жидкость. Коэффициент преломления жидкости n определяется по формуле

$$R = \left(\frac{n_{SMF} - n}{n_{SMF} + n} \right)^2, \quad (1)$$

где R — измеряемый коэффициент отражения по мощности, а $n_{SMF} = 1.44961$ [8] — эффективный показатель преломления волоконной моды оптического волокна SMF 28. Калибровка установки по отражению на воздухе, а также учет „базового“ уровня обратных отражений, связанного с отражением от отдельных элементов оптической схемы, обеспечивают измерение показателя преломления жидкости с точностью ± 0.001 .

Волноводные характеристики микроструктурированного волокна с заполнением исследовались на установке визуализации оптического излучения, распространяющегося по волокну (рис. 1, $a-d$). Образец исследуемого микроструктурированного волокна длиной 15 см размещался в установке прямым отрезком без изгиба и скручивания. Один конец образца был погружен в герметичный цилиндрический контейнер с заполняющей жидкостью, в торце которого сделано прозрачное окно. Заполнение отрезка исследуемого волокна происходило самопроизвольно за счет капиллярного эффекта. На свободном конце исследуемого волокна с помощью микроподвижки был реализован ввод оптического излучения полупроводникового лазерного диода или суперлюминесцентного источника, имеющих волоконно-оптический выход.

Изображение выходного торца волокна, погруженного в контейнер с жидкостью, фокусировалось через прозрачное окно при помощи 50-кратного микрообъектива на ПЗС-матрицу камеры Ophir Spiricon SP503U с разрешением 640×480 точек, чувствительную в исследуемом спектральном диапазоне (1500–1600 nm).

Условия поддержания одномодового режима распространения определялись методом изменения эффективности возбуждения различных мод при изменении условий ввода. При вводе лазерного излучения в исследуемое волокно, имеющее многомодовый режим распространения, на выходном торце происходит интерференция мод [9]. В таком случае, при изменении условий ввода за счет смещения оси выходного волокна лазерного диода относительно оси исследуемого образца, наблюдается изменение формы пятна на выходном торце, регистрируемое камерой. В одномодовом режиме распространения интерференция мод отсутствует, и форма пятна не зависит от условий ввода.

В работе также были проведены измерения зависимости диаметра модового пятна в исследуемом волокне от показателя преломления заполняющей жидкости, при этом использовалось излучение низкокогерентного суперлюминесцентного источника, что позволило минимизировать погрешности измерений, связанные с межмодовой интерференцией. Распределение интенсивности на выходе образцов пустого микроструктурированного волокна и волокна, заполненного жидкостью с показателем преломления 1.442, представлено на рис. 1, *b–d*. Из рисунка видно, что распределение интенсивности имеет профиль гексагональной структуры волокна. Через центр распределения могут быть проведены два характерных сечения: через середины противоположных отверстий первого цикла отверстий вокруг сердцевин (минимальное сечение модового пятна MD_{\min}) и через противоположные вершины сердцевин-шестиугольника (максимальное сечение модового пятна MD_{\max}). Распределение интенсивности в двух указанных сечениях аппроксимировалось функцией Гаусса. Диаметры модового пятна w определялись как диаметры соответствующих функций Гаусса [10]. В таблице приведены результаты измерений диаметров модового пятна при различных показателях преломления заполняющей жидкости. Видно, что диаметр модового пятна (и максимальный, и минимальный) имеет сильно нелинейную зависимость от разности показателей преломления между стеклянной сердцевиной и жидкостью. При большом Δn излучение практически полностью сосредоточено в сердцевине (диа-

Волноводные свойства микроструктурированных волокон при различном показателе преломления заполняющей жидкости

Заполнение	n_{22}	Δn	$MD_{\max},$ μm	$MD_{\min},$ μm	Модовый состав
Воздух	1	0.444	6.5	6.2	Многомод.
Ацетон	1.348	0.096	7.2	7.1	»
Хлороформ	1.434	0.01	9	8.7	»
ДМСО+ацетонитрил	1.441	0.003	11.2	10.8	Одномод.
» »	1.442	0.002	13	12.3	»
» »	1.443	0.001	—	—	»

метр сердцевины $7.5 \mu m$). При $\Delta n > 0.01$ волокно имеет многомодовый режим распространения излучения, о чем свидетельствует возникновение двудольной структуры выходного пятна при вводе излучения от полупроводникового лазера и изменении условий ввода (рис. 1, *c*). При снижении разницы показателей преломления до уровня $\Delta n < 0.01$ образцы поддерживали распространение только фундаментальной моды, а излучение существенно проникает в оболочку. При $\Delta n = 0.002$ диаметр модового пятна в два раза превышает диаметр модового пятна волокна без заполнения. Однако значительное снижение разности показателей преломления приводит к росту потерь, связанных с утечкой через депрессированную оболочку. При заполнении волокна жидкостью с $n = 1.443$ размер моды оказывается сопоставим с внешним диаметром светоотражающей микроструктурированной оболочки, а прохождение оптической мощности по образцу падает более чем в 5 раз по сравнению с $n = 1.442$.

Было проведено численное моделирование распределения электрического и магнитного полей фундаментальной моды волокна методом конечных разностей [11]. В теоретической модели был использован профиль показателя преломления, полученный после графической обработки электронной фотографии (рис. 1, *a*). Для указанных в таблице показателей преломления заполняющей жидкости были определены распределения электрического и магнитного полей в пятне фундаментальной моды. На рис. 2, *a* представлен график зависимости диаметра модового пятна от разности показателей преломления кварцевого стекла и заполняющего вещества. Результаты численного моделирования

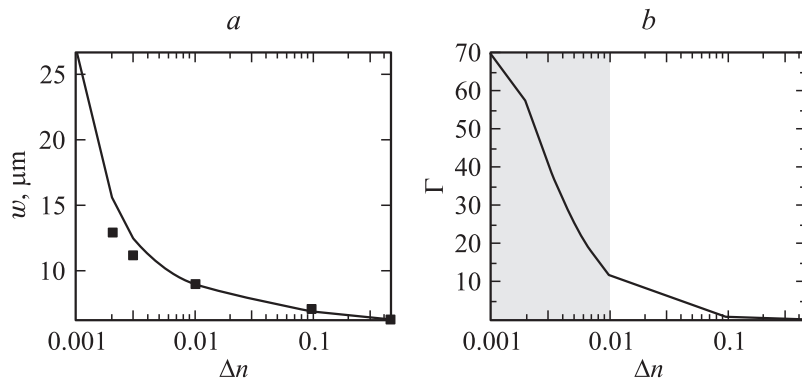


Рис. 2. *a* — зависимость диаметров модового пятна от разности показателей преломления, кривые без меток соответствуют численному моделированию, штриховые кривые — большему диаметру; *b* — доля оптической мощности, взаимодействующей с жидкостью в зависимости от разности показателей преломления. Серым закрашена область одномодового режима распространения излучения.

хорошо согласуются с экспериментально измеренными диаметрами моды вплоть до $n = 1.439$, далее расчетный диаметр моды становится больше измеренного. Такое расхождение теории и эксперимента вызвано ростом погрешности измерений показателя преломления жидкости при малых значениях Δn .

Результаты численного моделирования были использованы для оценки доли мощности оптического излучения, распространяющегося в отверстиях, которая характеризует взаимодействие оптического излучения с заполняющей жидкостью:

$$\Gamma_{cladding} = \frac{\int_{cladding} \mathbf{E} \times \mathbf{H} ds}{\int_{fiber} \mathbf{E} \times \mathbf{H} ds} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где интеграл в числителе представляет собой поток вектора Пойнтинга через отверстия оболочки, а интеграл в знаменателе — полный поток вектора Пойнтинга через поперечное сечение волокна. Зависимость параметра Γ от разности показателей преломления показана на рис. 2, *b*.

Из графика видно, что при значениях разности показателей преломления < 0.01 , обеспечивающих одномодовый режим распространения, значительная часть оптической мощности ($> 10\%$) взаимодействует с заполняющей жидкостью. При снижении разности показателей преломления до 0.002 более половины мощности оптического излучения распространяется по заполняющей жидкости, однако при дальнейшем снижении показателей преломления происходит быстрый рост оптических потерь, вызванный утечкой через депрессированную оболочку.

В результате, проведены детальные исследования волноводных свойств микроструктурированного волокна со стеклянной сердцевиной при заполнении жидкостями с различным показателем преломления. Показана возможность изменения в широких пределах показателя преломления жидкой смеси при изменении пропорции смешиваемых компонентов. Данный метод может быть использован для регулирования показателя преломления анализируемых веществ и достижения оптимальных условий взаимодействия излучения с заполняющим веществом. Для волокна с большим содержанием воздуха в оболочке показано, что существует область значений показателя преломления заполняющей жидкости, для которой обеспечиваются одномодовый режим и высокая ($> 10\%$) степень взаимодействия излучения с жидкостью. В общем случае границы области зависят от геометрических параметров структуры волокна (для $d/\Lambda = 0.9$, $0.02 \leq \Delta n < 0.01$). Данная область является наиболее благоприятной для оптических датчиков, где одномодовый режим позволяет использовать высокочувствительные интерферометрические методы.

Список литературы

- [1] *Russel P.* // Science. 2003. V. 299. P. 358.
- [2] *Fini J.M.* // Meas. Sci. Technol. 2004. V. 15. P. 1120–1128.
- [3] *Monro T.M.* et al. // Meas. Sci. Technol. 2001. V. 12. P. 854.
- [4] *Martelli C., Canning J., Stocks D., Crossley M.J.* // Opt. Lett. 2006. V. 31. P. 2100–2102.
- [5] *Sun J., Chan C., Dong X.Y., Shum P.* // J. Optoelectronics & Advanced Materials. 2006. V. 8. N 4. P. 1593–1596.
- [6] *Агрузов П.М., Дукельский К.В., Козлов А.С., Комаров А.В., Петров М.П., Тер-Нерсесянц Е.В., Хохлов А.В., Шевандин В.С.* // Оптический журнал. 2008. Т. 75. С. 73–76.

- [7] *Poli F., Cucinotta A., Selleri S.* Photonic crystal fibers: properties and applications. London: Springer, 2007. P. 75.
- [8] *Chang Bong Kim, Chin B. Su* // Meas Sci. Technol. 2004. V. 15. P. 1683–1686.
- [9] *Агрузов П.М., Дукельский К.В., Ильичев И.В., Козлов А.С., Шамрай А.В., Шевандин В.С.* // Квант. электроника. 2010. Т. 40 (3). С. 254–258.
- [10] *Young M.* Optics and lasers: including fibers and optical waveguides. Springer, 2000. P. 288.
- [11] *Ильичев И.В., Козлов А.С., Гаенко П.В., Шамрай А.В.* // Квант. электроника. 2009. Т. 39. С. 98–104.