

МОДОВЫЙ СОСТАВ ДЫРЧАТЫХ ВОЛОКОН С БОЛЬШОЙ СЕМИЭЛЕМЕНТНОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ

© 2008 г. **П. М. Агрузов***; **К. В. Дукельский****, канд. техн. наук; **А. С. Козлов***; **А. В. Комаров****;
М. П. Петров*, доктор физ.-мат. наук; **Е. В. Тер-Нерсесянц****; **А. В. Хохлов****;
В. С. Шевандин**, доктор техн. наук

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

** Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения
ВНЦ “ГОИ им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: mpetr.shuv@mail.ioffe.ru, volokno@goi.ru

Проведено экспериментальное исследование модового состава излучения, распространяющегося по сердцевине дырчатых волокон на основе кварцевого стекла. Сердцевина образована заменой семи центральных элементов в поликапиллярной гексагональной сборке одним стержнем, что позволяет увеличить размер сердцевины относительно внешнего диаметра волокна. Показано, что практически одномодовый режим достижим при большем значении содержания воздуха в оболочке по сравнению с результатом теоретического анализа.

Коды OCIS: 060.2430.

Поступила в редакцию 22.04.2008.

Интерес к дырчатым оптическим волокнам с большой сердцевиной (по принятой терминологии, размер которой превышает 10 мкм) обусловлен необходимостью генерации или передачи мощных лазерных световых потоков с минимальными нелинейно-оптическими искажениями.

В работах [1, 2] было предложено для увеличения диаметра сердцевины лазерных волоконных микроструктурированных световодов формировать ее заменой не одного, как делалось ранее, а семи или девятнадцати центральных отверстий в гексагональной упорядоченной системе на единый стержень. После перетягивания сборки стержень образовывал сердцевину световода, а капилляры – светоотражающую оболочку. В работах [3, 4] проведен теоретический анализ распространения излучения по дырчатым световодам с многоэлементной сердцевиной (имеется в виду, что сердцевина монолитна, но образована заменой нескольких однородных элементов – отверстий). Было установлено, что неограниченный по спектру одномодовый режим передачи излучения устанавливается при значении параметра $k \leq 0,04$ ($k = d/\Lambda$, где d – диаметр отверстия, Λ – шаг структуры светоотражающей оболочки). В то же время характерный для дырчатых волокон режим распространения единственной основной моды в неограниченном спектральном диапазоне (“бесконечный” одномодовый световод) с одноэлементной сердцевиной достигается при $k \leq 0,4$. Практически реализация и воспроизведение структуры с $k \leq 0,04$ представляется весьма затруднительным. В связи с этим детальное изучение особенно-

стей распространения излучения по многоэлементным сердцевинам для выяснения возможности передачи излучения в одномодовом режиме, пусть и в ограниченном спектральном диапазоне, является актуальной задачей.

В нашей публикации [5] сообщалось о разработке и исследовании микроструктурированных оптических волокон, в которых сердцевина образована заменой семи или девятнадцати центральных капилляров в исходной сборке на один центральный стержень, образующий в процессе вытяжки сердцевину световода. Упомянутые элементы изготавливались из кварцевого стекла, а замена не одного, а нескольких капилляров позволила увеличить эффективный размер сердцевины по сравнению с внешним диаметром световода. В процессе исследования оптических характеристик световодов с большой многоэлементной сердцевиной было установлено их заметное отличие от параметров аналогов с одним дефектом структуры в качестве сердцевины. В частности, при одинаковых значениях диаметра сердцевины сравниваемых волокон рабочий спектральный диапазон в волокнах с многоэлементной сердцевиной расширялся за счет коротковолнового смещения границы вытекания основной моды. Измерения проводились на стандартной волоконной катушке диаметром 16 см. При этом спектры оптических потерь независимо от значения параметра k в диапазоне 0,2–0,5 были подобны спектрам “бесконечного” одномодового волокна [6].

Эти спектры не содержали максимумов затухания по причине отсечки высших мод и отличались

выраженной коротковолновой границей, обусловленной характерным для дырчатых волокон вытеканием основной моды на изгибе при намотке на стандартную транспортировочную катушку диаметром 16 см.

Угловая расходимость излучения световодов с сердцевинной диаметром 20–30 мкм составляла несколько сотых радиан, что также соответствовало режиму распространения фундаментальной моды.

Однако предположение, что одномодовый характер излучения сохраняется в столь широкой области изменения геометрических параметров световодов, как это можно было бы представить по данным работы [5], нуждалось в дополнительной проверке. Поэтому целью настоящей работы было проведение исследований модового состава излучения в многоэлементной сердцевине, в частности методами модовых биений.

В эксперименте излучение полупроводникового лазера, перестраиваемое в спектральной области 1520–1600 нм, вводилось в отрезки микроструктурированных световодов длиной от нескольких до десятков метров. Промежуточным звеном между лазером и исследуемым волокном служил отрезок стандартного одномодового волокна SMF28. Волокна стыковались между собой с помощью микрометрической подвижки, пространство между торцами заполнялось иммерсионной УФ-отверждаемой жидкостью для достижения надежной фиксации волокон. Сигнал с выходного торца исследуемого волокна регистрировался измерителем оптической мощности ПТ 2010.

Были изготовлены образцы микроструктурированных волокон на основе кварцевого стекла с семиэлементной сердцевинной и варьированием параметра k в пределах приблизительно от 0,19 до 0,5. Волокна вытягивались из исходной гексагональной поликапиллярной сборки, в которой семь централь-

ных капилляров были заменены одним стержнем, формирующим в процессе вытягивания сердцевину оптического волокна. Сердцевина световодов имела гексагональную форму и поэтому характеризовалась двумя размерами – вдоль диагонали шестиугольника и в ортогональном направлении. Спектры оптических потерь измерялись методом обрыва, а на электронном микроскопе были получены изображения торцов волокон. Измерения оптических потерь проводились на отрезках волокон длиной несколько десятков метров (максимальная длина 200 м), при определении картины модовых биений длины световодов составляли несколько метров для получения достаточного спектрального разрешения.

Было установлено, что для большинства полученных образцов световодов характерно существование по меньшей мере двух мод. Исключение составил световод с $k \approx 0,19$, в котором биения мод не наблюдались даже при увеличении на порядок разрешающей способности регистрирующей системы по сравнению с ее обычным значением, достаточным для проявления модовых биений в остальных исследованных световодах. Результаты фурье-анализа картины биений – пространственные частоты биений ν – пересчитывались в величину разности эффективных показателей преломления Δn_{eff} , распространяющихся по световоду мод. Расчет Δn_{eff} производился по формуле

$$\Delta n_{\text{eff}} = (\nu \lambda^2) / l,$$

где λ – длина волны середины диапазона сканирования, l – длина световода.

Результаты исследования модовых биений в микроструктурированных волокнах сведены в таблицу.

Из таблицы видно, что разность эффективных значений модовых показателей преломления составляет несколько единиц 10^{-3} , что свидетельствует о биениях различных пространственных мод. Обра-

Зависимость модовых характеристик от геометрических параметров световода

Номер световода	Размер сердцевины, мкм	Параметр k	Длина образца, м	Частота биений, нм^{-1}	Разница эффективных показателей преломления мод
1	25,5×23	0,19	19	биения отсутствуют	—
1a	25,5×23	0,19	0,8	0,06	0,0002
2	26,5×24,5	0,27	2,0	0,8	0,00096
3a	26,5×24,5	0,34	1,6	0,7	0,00105
3б	26,5×24,5	0,34	3,2	1,5 3,2	0,0010 0,0024
4	24,5×22	0,50	2,8	1,3 1,8 4,0 4,8	0,0011 0,0015 0,0034 0,0041

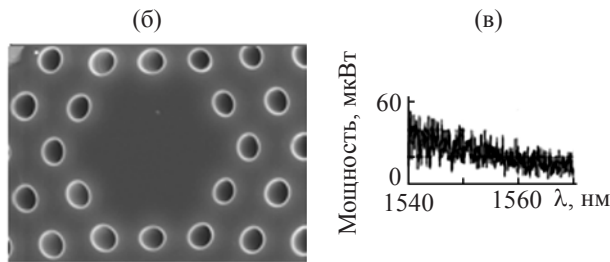
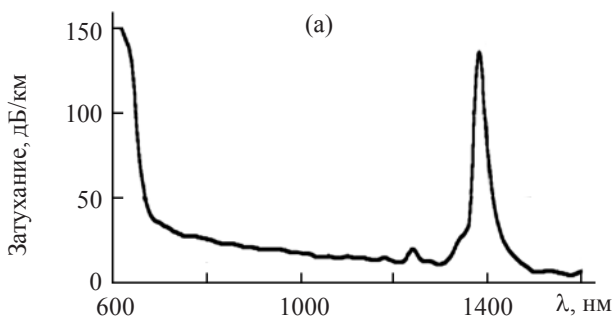


Рис. 1. а – спектр оптических потерь, б – фотография торца волокна, в – картина модовых биений для образца с $k \approx 0,5$.

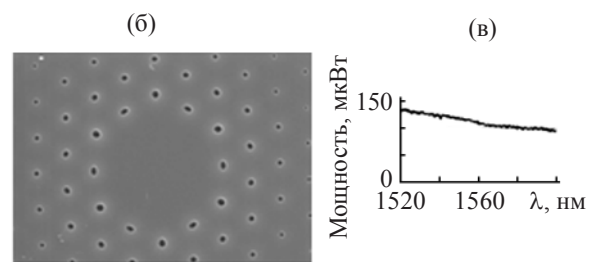
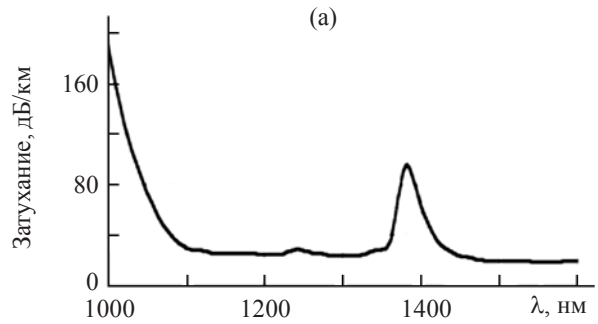


Рис. 2. а – спектр оптических потерь, б – фотография торца волокна, в – картина модовых биений для образца с $k \approx 0,9$.

щает на себя внимание совпадение значений $\Delta n_{\text{эф}}$, составляющих около 0,001, во всех исследованных образцах при варьировании параметра k . Данные, приведенные в таблице, также показывают наличие модовых биений на выходе короткого, менее метра, отрезка волокна 1а. Это говорит о том, что хотя бы одна из высших мод не полностью затухает на относительно малых длинах. На длинах в несколько десятков метров возможно распространение только основной моды.

На рис. 1 приведены спектр оптических потерь, электронная фотография торца и картина модовых биений в световоде № 4 со значением $k \approx 0,5$. Минимальное значение оптических потерь составило 2 дБ/км. Как видно из рисунка, картина модовых биений четко выражена, а глубина модуляции значительна, что свидетельствует о несущественном различии напряженностей полей интерферирующих мод. Необходимо отметить, что многомодовый состав распространяющегося по световодам излучения сохраняется в достаточно широком спектральном диапазоне. В частности, при возбуждении световодов № 2–4 излучением He–Ne-лазера ($\lambda = 633$ нм) на выходе из волокна в дальней зоне визуально наблюдается типичная картина интерференции различных пространственных мод с “перетеканием” интенсивности излучения в пределах

пятна засветки в зависимости от условий прохождения света по волокну, например, при изгибе или механическом воздействии на волокно.

Представленные на рис. 2 графики свидетельствуют об отсутствии модовых биений в волокне № 1 с достаточно низким значением параметра $k \approx 0,19$. Повышенный базисный уровень затухания сигнала обусловлен менее тщательной очисткой исходной для получения световода сборки от механических примесей.

Из сравнения свойств световодов с $k \approx 0,27$ и $k \approx 0,19$ становится понятным, что уменьшение параметра воздушности оболочки существенным образом изменяет свойства исследуемой структуры – световод становится одномодовым. Для ответа на вопрос, насколько широк диапазон одномодового режима, в световод вводилось излучение He–Ne-лазера, как и в опытах с другими световодами, для исследования картины интерференции мод. Однако модовую картину для световода № 1 получить не удалось, поскольку излучение с $\lambda = 633$ нм интенсивно вытекало из сердцевины даже на длине около метра и заполняло дырчатую оболочку.

Резюмируя приведенные выше данные, обратим внимание, что ранее нами отмечался квазиодномодовый характер распространения излучения по се-

миэлементной сердцевине, проявляющийся в отсутствии характерных скачков затухания, вызванных отсечкой высших мод, а также в типичном для одномодового режима вытекании излучения на изгибе катушки. Полученные в настоящей работе сведения дополняют эту картину – модовый состав (две–три моды) в волокнах со значением $k > 0,2$ стабилен в спектральной области в пределах от 1600 нм до коротковолновой границы вытекания, которая, по-видимому, является общей для всех наблюдаемых мод. Это свойство световодов с семиэлементной сердцевинной, как можно судить по литературным данным, не имеет аналогов.

Одномодовый режим передачи излучения возможен по семиэлементной сердцевине диаметром порядка 20 мкм при значении параметра воздушности оболочки k не более 0,2. Реализуется ли при этом условии “бесконечный” по спектру одномодовый световод, остается задачей последующего исследования.

Авторы благодарят И.В. Ильичева за работу по получению электронных фотографий торцов световодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Limpert J., Deguil-Robin N., Manek-Honninger I., Salin F., Roser F., Liem A., Schreiber T., Nolte S., Zellmer H., Tunnermann A., Broeng J., Petersson A., Jakobsen C.* High-power rod-type photonic crystal fiber laser // *Opt. Exp.* 2005. V. 13. № 4. P. 1055–1058.
2. *Limpert J., Schmidt O., Rothhardt J., Roser F., Schreiber T., Tunnermann A., Ermenoux S., Yvernauld P., Salin F.* Extended single-mode photonic crystal fiber lasers // *Opt. Exp.* 2006. V. 14. № 7. P. 2715–2720.
3. *Saitoh K., Tsuchida Y., Koshiba M., Mortensen N.A.* Endlessly single-mode holey fibers: the influence of core design // *Opt. Exp.* 2005. V. 13. № 26. P. 10833–10839.
4. *Faroni M., Poli F., Rosa L., Cucinotta A., Selli S.* Cutoff properties of large-mode-area photonic crystal fibers // *Proc. of 2005 IEEE/LEOS Workshop.* June 22–24. 2005. P. 41–46.
5. *Dukel'skii K.V., Komarov A.V., Khokhlov A.V., Ternersyantz E.V., Shevandin V.S.* 7- and 19-element-core bend-resistant microstructured fibers // *Trans Tech Publications, Advanced Mat. Research.* 2008. V. 39–40.
6. *Nielsen M.D., Mortensen N.A., Albertsen M., Folkenberg J.R., Bjarklev A., Bonacinni D.* Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers // *Opt. Exp.* 2004. V. 12. № 8. P. 1775–1779.