

МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

П.В. Безбородкин, М.В. Быков, В.В. Демидов, К.В. Дукельский

Приведены данные о разработке одномодовых микроструктурированных волокон с сердцевинной диаметром 35 мкм, отличающихся от аналогов лучшей устойчивостью фундаментальной моды к изгибу. Показано, что одномодовый режим распространения излучения достигается в волокнах за счет явления дифференциального модового затухания, обусловленного различием в интенсивности вытекания фундаментальной и высшей мод.

Ключевые слова: микроструктурированное волокно, большая сердцевина, одномодовый режим

MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBERS FOR INFORMATION TRANSFER AND PROCESSING SYSTEMS

Bezborodkin P., Bykov M., Demidov V., Dukelskii K.

Data on development of single-mode microstructured fibers with a 35 micron core diameter different from analogs by the higher bending resistance property are provided. It is shown that the single-mode regime of operation is reached in fibers due to the phenomenon of differential mode attenuation caused by a distinction in leakage intensity of fundamental and higher-order modes.

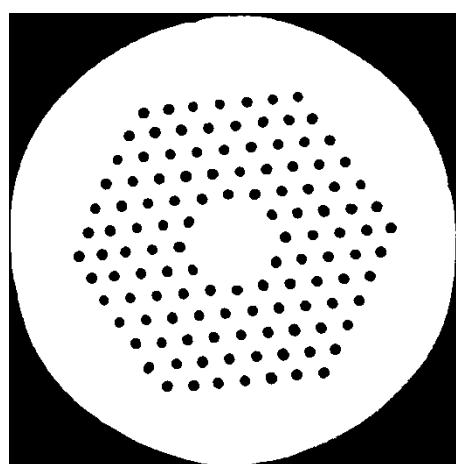
Keywords: microstructured fiber, large core, single-mode operation

Микроструктурированные волокна с оболочкой, образованной гексагональной системой воздушных отверстий, и сердцевинной из кварцевого стекла обладают световодным эффектом за счет явления полного внутреннего отражения [1]. Волокна такого типа обладают рядом преимуществ по сравнению с аналогами, изготовленными из сплошных оптических сред, в частности, возможностью поддерживать одномодовый режим распространения излучения в неограниченном спектральном диапазоне [2] и в сердцевине диаметром в несколько десятков микрометров [3]. Данное обстоятельство позволяет рассматривать микроструктурированные волокна в качестве перспективных элементов для создания волоконных лазеров и усилителей с высокой средней и пиковой мощностью, охватывающих одновременно *S*-, *C*-, *L*- и *U*-диапазоны, а также лидаров, дальномеров и систем дистанционного зондирования.

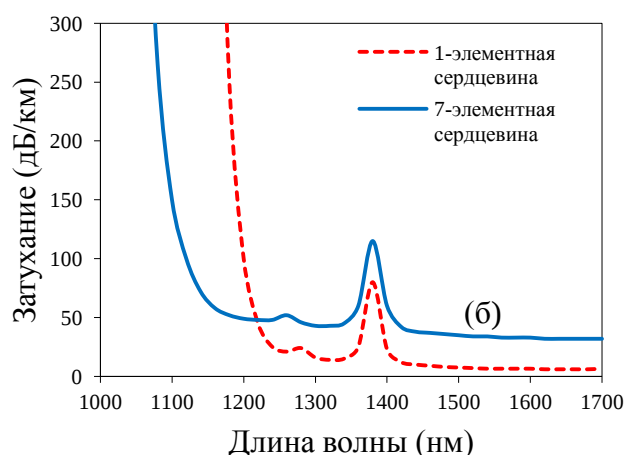
Однако на практике увеличению размеров сердцевинной одномодового микроструктурированного волокна препятствует значительное сокращение рабочего спектрального диапазона из-за смещения границы коротковолнового вытекания фундаментальной моды в область больших значений длины волны излучения [4, 5, 6]. Например, оптический элемент с сердцевинной диаметром 35 мкм и параметром $k = 0,50$, характеризующим степень содержания воздуха в оболочке ($k = d/\Lambda$, d – диаметр отверстия, Λ – шаг структуры), оказывается работоспособным при расположении на катушке радиусом не менее 16 см [7], габариты которой могут быть неприемлемыми для ряда приложений.

Цель настоящей работы заключалась в поиске геометрии микроструктурированного волокна, способствующей реализации неограниченного по спектру одномодового режима передачи излучения в сердцевине диаметром 35 мкм при намотке волокна на стандартную транспортировочную катушку радиусом 8 см.

Первая вариация конструкции волокна основывалась на увеличении размеров сердцевины относительно внешнего диаметра за счет формирования ее семью центральными элементами в исходной поликапиллярной сборке, а не одним, как это делалось ранее (рис. 1а). Предпринятая мера позволила сократить значение шага структуры с 23 до 10 мкм по сравнению с одноэлементным аналогом, что имело своим следствием повышение устойчивости фундаментальной моды к изгибу. Достижение одномодового режима работы стало возможным благодаря выбору параметра k , обеспечивающего существенную разницу в потерях мощности фундаментальной и высшей направляемых мод (табл. 1). Вместе с тем, несмотря на расширение границы коротковолнового вытекания моды в сторону синей части спектра для микроструктуры с оптимальным по характеристикам модового затухания значением $k = 0,20$ (рис. 1б), эксплуатация волокна на катушке радиусом 8 см по-прежнему представлялась трудно-разрешимой задачей.



а)



б)

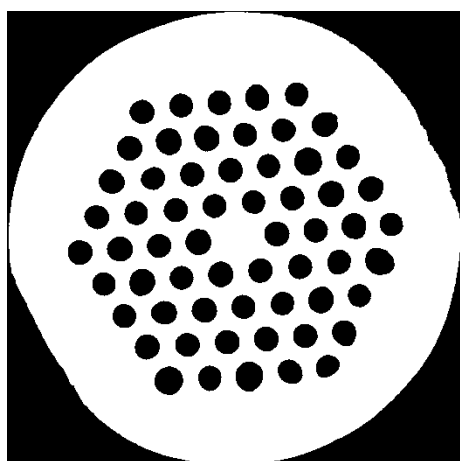
Рис. 1. а) фотография сечения микроструктурированного волокна с семиэлементной сердцевинной; б) спектральные характеристики затухания волокон с одно- ($k = 0,50$) и семиэлементной ($k = 0,20$) сердцевинами диаметром 35 мкм. Радиус катушки 16 см

Отметим, что более чем двукратное уменьшение параметра содержания воздуха в волокнах с семиэлементной сердцевинной относительно волокон с сердцевинной, полученной заменой одного элемента на штабик в исходной сборке, было продиктовано необходимостью обеспечения режима распространения единственной поперечной моды [8], что подтверждается данными таблицы 1.

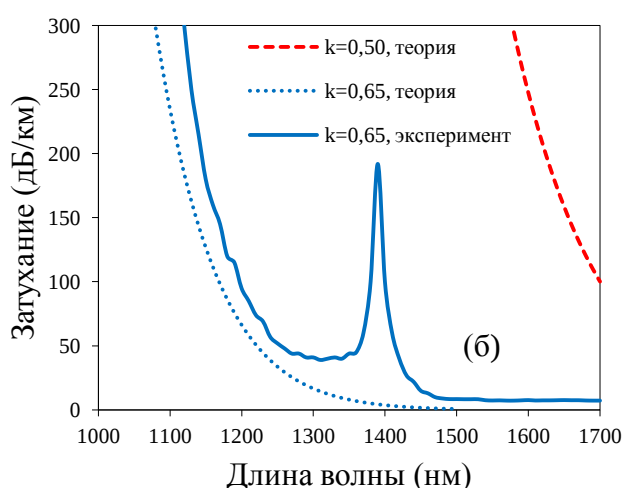
ТАБЛИЦА 1. Расчетные характеристики фундаментальной и наиболее конкурентной первой высшей мод в микроструктурированных волокнах с семиэлементной сердцевинной диаметром 35 мкм. Длина волны излучения 1550 нм

k	Фундаментальная мода		Первая высшая мода		Радиус катушки, см	Граница вытекания, нм
	Потери, дБ/км	Площадь, мкм ²	Потери, дБ/км	Площадь, мкм ²		
0,10	1,71E+4	4020,51	> 1E+5	783,68	16	~ 1800
0,15	1,89E+2	606,13	> 1E+4	545,09	16	~ 1400
0,20	6,44E+0	627,42	1,2E+3	266,61	16	~ 1100
0,25	2,49E-1	640,74	3,61E+1	303,67	16	~ 1050
0,30	7,99E-3	647,64	9,54E-1	204,2	16	~ 1000

Следующая вариация конструкции волокна подразумевала развитие концепции дифференциального модового затухания применительно к микроструктурам с одноэлементной сердцевинной и повышенным контрастом показателей преломления сердцевинной и отражающей оболочки (рис. 2а).



а)



б)

Рис. 2. а) фотография сечения микроструктурированного волокна с одноэлементной сердцевинной; б) спектральная характеристика затухания излучения в волокне с одноэлементной сердцевинной диаметром 35 мкм. Радиус катушки 8 см

Как оказалось, увеличение параметра k более 0,50 может способствовать установлению одномодового режима передачи излучения при прохождении светом нескольких метров волокна при расположении его на катушке радиусом 8 см. Для изучения природы обнаруженного явления авторами были исследованы оптические свойства серии волокон с сердцевинной диаметром от 15 до 35 мкм (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Геометрические и оптические свойства одномодовых микроструктурированных волокон с одноэлементной сердцевинной длиной 10 м, расположенных на катушке радиусом 8 см. Длина волны излучения 1550 нм

Диаметр сердцевины, мкм	Шаг структуры, мкм	k	Потери фундамент. моды, дБ/км	Потери первой высш. моды, дБ/км
15	9,68	0,45	8,82E-1	—
20	13,33	0,50	2,82E-2	$> 1E+10$
25	17,24	0,55	2,08E-3	$> 1E+10$
30	21,43	0,60	7,87E-4	3,08E+9
35	25,93	0,65	4,49E-3	1,63E+11

Из данных таблицы 2 видно, что, как и предполагалось, режим распространения единственной поперечной моды достигается в структурах рассматриваемой геометрии за счет значительной разницы в потерях мощности фундаментальной и высшей мод. Для волокна с сердцевинной диаметром 15 мкм определить значение затухания первой высшей моды не удалось по причине ее абсолютного вытекания во внешнюю конструктивную оболочку из кварцевого стекла. Обращает на себя внимание факт увеличения параметра k одномодового волокна при масштабировании структуры в область больших значений Λ в одинаковых эксплуатационных условиях (катушка радиусом 8 см), что свидетельствует о более интенсивном характере вытекания высшей моды в упомянутую внешнюю оболочку при увеличении размеров сердцевины. Отмеченная тенденция подтверждается результатами численного анализа, проведенного для микроструктур с различным содержанием воздуха в оболочке (рис. 3).

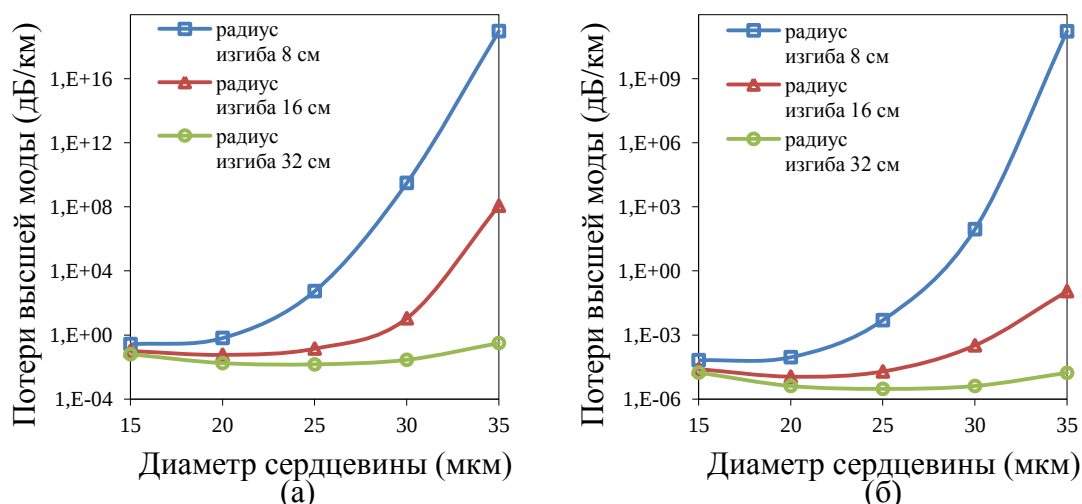


Рис. 3. Потери мощности первой высшей моды на длине волны излучения $\lambda = 1550$ нм в микроструктурированных волокнах с различным содержанием воздуха в оболочке: а) $k = 0,60$; б) $k = 0,65$.

Спектр затухания излучения в одномодовом микроструктурированном волокне с сердцевинной диаметром 35 мкм (рис. 2б), показывает, что увеличение

степени содержания воздуха в оболочке с 0,50 до 0,65 приводит к значительному снижению чувствительности фундаментальной моды к изгибу. Это обстоятельство находит логичное объяснение, если обратиться к теории оптических волокон со сплошной оболочкой. Увеличение параметра k эквивалентно увеличению разности показателей преломления сердцевины и оболочки в «обычном» волокне, что способствует возрастанию устойчивости фундаментальной моды к изгибу. Более того, указанная тенденция, прогрессирующая по мере увеличения размеров сердцевины одномодового волокна (k возрастает), позволяет минимизировать потери мощности фундаментальной моды, обусловленные влиянием нерегулярностей и микроизгибов [9].

Таким образом, разработана конструкция одномодового микроструктурированного волокна на основе кварцевого стекла с сердцевиной диаметром 35 мкм и высокой устойчивостью фундаментальной моды к изгибу по радиусу 8 см. Установлено, что режим распространения единственной поперечной моды достигается в волокне за счет явления дифференциального модового затухания, обусловленного различием в интенсивности вытекания фундаментальной и высшей направляемых мод во внешнюю конструктивную оболочку. Показано, что для оптического элемента со значением параметра содержания воздуха $k = 0,65$ расширение границы коротковолнового вытекания фундаментальной моды составляет приблизительно 500 нм, что позволяет использовать волокно для работы в спектральном диапазоне от 1450 до 1700 нм.

Список используемых источников

1. Russell P. St. J. Photonic-crystal fibers // J. Lightwave Technol. 2006. V. 24. № 12. pp. 4729–4749.
2. Birks T. A., Knight J. C., and Russell P. St. J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber // Opt. Lett. 1997. V. 22. № 13. pp. 961–963.
3. Knight J. C., Birks T. A., Cregan R. F., Russell P. St. J., and de Sandro J.-P. Large mode area photonic crystal fibre // Electron. Lett. 1998. V. 34. № 13. pp. 1347–1348.
4. Nielsen M. D., Mortensen N. A., Albertsen M., Folkenberg J. R., Bjarklev A., and Bonacinni D. Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers // Opt. Express. 2004. V. 12. № 8. pp. 1775–1779.
5. Демидов В. В., Дукельский К. В., Тер-Нерсисянц Е. В., Шевандин В. С. Микроструктурированные одномодовые световоды на основе явления дифференциального модового затухания // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 1. С. 52–57.
6. Демидов В. В., Дукельский К. В., Тер-Нерсисянц Е. В., Шевандин В. С. Исследование одномодового режима работы микроструктурированных световодов с каналами вытекания излучения // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 5. С. 65–70.
7. Nielsen M. D., Folkenberg J. R., and Mortensen N. A. Single-mode photonic crystal fiber with an effective area of $600 \mu\text{m}^2$ and low bending loss // Electron. Lett. 2003. V. 39. № 25. pp. 1802–1803.
8. Агрузов П. М., Дукельский К. В., Ильичев И. В., Козлов А. С., Шамрай А. В., Шевандин В. С. Исследование волноводных свойств маломодовых микроструктурированных волокон с большой сердцевиной // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 3. С. 254–258.
9. Mortensen N. A. and Folkenberg J. R. Low-loss criterion and effective area considerations for photonic crystal fibres // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2003. V. 5. № 3. P. 163–167.