

# Исследование волноводных свойств малоимодовых микроструктурированных волокон с большой сердцевиной

П.М.Агрозов, К.В.Дукельский, И.В.Ильичев, А.С.Козлов, А.В.Шамрай, В.С.Шевандин

*Проведены детальные экспериментальные и теоретические исследования модового состава излучения, распространяющегося по микроструктурированным волокнам со сплошными сердцевинами, образованными путем заполнения стеклом 7 или 19 центральных капилляров. Исследован набор волокон с различными геометрическими размерами структур и определены условия, необходимые для достижения режима распространения только фундаментальной моды световода.*

**Ключевые слова:** микроструктурированные волокна, большая сердцевина, модовый состав, одноимодовый световод.

## 1. Введение

Микроструктурированные волокна (МСВ) с большой (диаметр свыше 10 мкм) сердцевиной способны передавать излучение высокой мощности в режиме фундаментальной моды с минимальными нелинейно-оптическими искажениями. Для сравнения: одноимодовый режим в оптических волокнах с большой сердцевиной, изготовленных из сплошных сред, может быть обеспечен при условии поддержания разности показателей преломления сердцевины и оболочки с точностью до  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$ , что представляет собой технологически трудноразрешимую задачу. В микроструктурированных световодах, напротив, реализация одноимодового режима работы сравнительно легко осуществляется выбором геометрических параметров структуры.

В работах [1, 2] приведены данные о МСВ для волоконных лазеров, сердцевина которых была образована заполнением стеклом не одного центрального отверстия в гексагональной структуре светоотражающей оболочки, а 7 или 19 отверстий (элементов), что позволило существенно увеличить размер сердцевины. Необходимо отметить, что доля содержащегося в структурированных оболочках воздуха [1, 2], определяемая отношением диаметра отверстия  $d$  к шагу структуры  $A$ , была относительно велика (0.2–0.3). Вместе с тем неограниченный по спектру одноимодовый режим передачи излучения, присущий МСВ, для световода с 7-элементной сердцевиной обеспечивается при  $d/A < 0.04$  [3]. Поэтому вопрос о возможности достижения одноимодового режима генерации или передачи одноимодового излучения в световодах с сердцевиной указанной геометрии остается открытым.

П.М.Агрозов, И.В.Ильичев, А.С.Козлов, А.В.Шамрай. Физико-технологический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: achamrai@mail.ioffe.ru  
К.В.Дукельский, В.С.Шевандин. ФГУП Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНИИ «ГОИ им. С.И.Вавилова», Россия, 192171 С.-Петербург, ул. Бабушкина, 36

Поступила в редакцию 24 сентября 2009 г., после доработки – 21 декабря 2009 г.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований модового состава излучения, распространяющегося по МСВ со сплошными сердцевинами, полученными замещением 7 или 19 элементов. Исследован набор волокон с различными геометрическими размерами структур (диаметр внешней конструкционной оболочки из кварцевого стекла составляет 100–150 мкм) и определены условия, необходимые для достижения режима распространения только фундаментальной моды световода. Проведено измерение и численное моделирование распределения интенсивности в пятне фундаментальной моды двух одноимодовых МСВ с сердцевинами, состоящими из 7 и 19 элементов.

## 2. Образцы МСВ с большой сердцевиной

Исследуемые образцы МСВ изготавливались методом, изложенным в работе [4]. Для получения заготовки стеклянные капилляры укладывались в плотную гексагональную сборку в опорной кварцевой трубе; 7 или 19 центральных капилляров заменялись одним стержнем, впоследствии образующим сердцевину световода. Материалом для всех указанных элементов служило синтетическое кварцевое стекло. После двукратной перетяжки исходной заготовки получались образцы световодов с требуемыми геометрическими параметрами. Образцы в процессе вытягивания покрывались защитным слоем эпоксиакрилата и размещались на стандартных транспортировочных катушках диаметром 16 см с мягким подслоем.

Электронные фотографии исследованных образцов с 7- и 19-элементной сердцевиной представлены на рис.1. Усредненные параметры дырчатых структур исследуемых образцов волокон, полученные на основе анализа электронных фотографий с учетом эллиптичности отверстий, приведены в табл.1.

## 3. Методика исследования модового состава оптических волокон

Для исследования модовых свойств МСВ использовалась методика наблюдения межмодовой интерференции. Для одновременного возбуждения совокупности

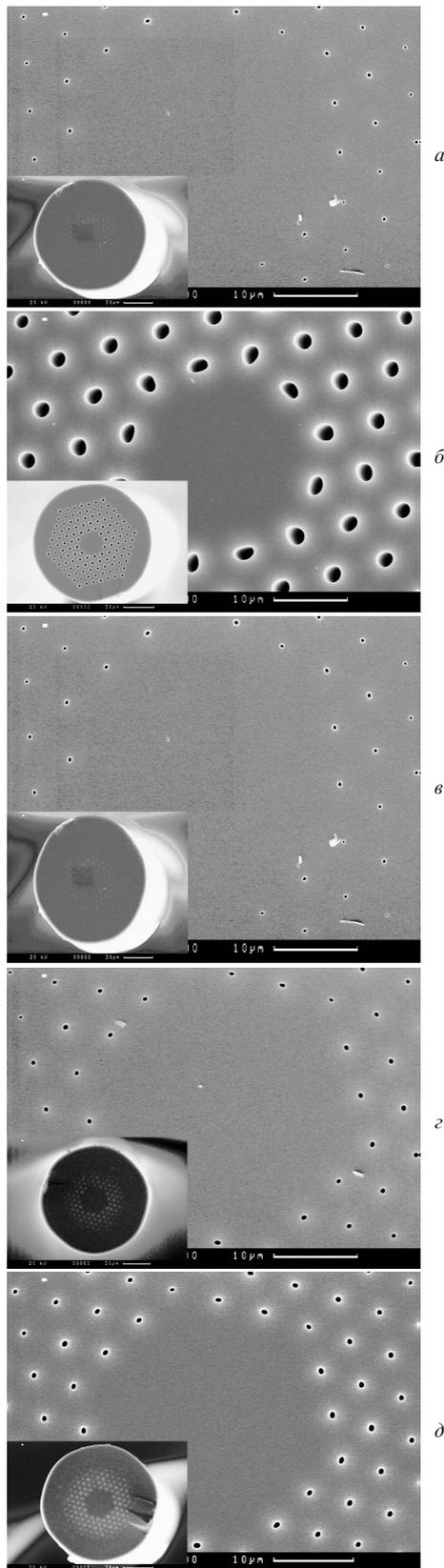


Рис.1. Электронные фотографии исследованных образцов МСВ: 7-1 (а), 7-2 (б), 19-1 (в), 19-2 (з) и 19-3 (д). На вставках – те же фотографии с меньшим увеличением.

всех мод применялся одномодовый возбуждающий световод, который позиционировался относительно входного торца исследуемого МСВ таким образом, чтобы поле его фундаментальной моды имело ненулевой ин-

Табл.1. Геометрические параметры структуры исследуемых МСВ.

МСВ	$N$	$d$ (мкм)	$A$ (мкм)	$d/A$	$M$
7-1	7	1.38	7.06	0.20	5
7-2	7	2.39	7.7	0.30	5
19-1	19	0.39	6.3	0.062	3
19-2	19	0.63	6.4	0.1	4
19-3	19	0.74	6.18	0.12	5

Примечание:  $N$  – число элементов в оболочке;  $M$  – число циклов отверстий вокруг сердцевины.

теграл перекрытия с полями всех мод исследуемого МСВ. В качестве возбуждающего световода в эксперименте использовалось стандартное телекоммуникационное волокно SMF-28. Возбуждение мод высших порядков в МСВ с большой сердцевиной обеспечивалось за счет сдвига оси зондового световода относительно оси МСВ при помощи точной оптомеханической подвижки с пьезоприводом. Величина сдвига контролировалась по уменьшению пропускания оптической системы в некогерентном свете от суперлюминесцентного эрбиевого источника. Во всех экспериментах для возбуждения высших мод сдвиг оси зондового световода выставлялся по уровню световой мощности на выходе МСВ, в два раза меньшему максимального уровня, соответствующего соосному расположению волокон. На выходе исследуемого МСВ использовался зондовый световод, полностью идентичный входному возбуждающему. Сдвиг оси выходного зондового световода контролировался по той же методике, что и сдвиг возбуждающего волокна.

Для наблюдения межмодовой интерференции использовалось излучение перестраиваемого полупроводникового лазера с диапазоном изменения длины волны 1520–1620 нм и минимальным шагом перестройки 0.001 нм. Сканирование по длине волны перестраиваемого лазера позволяет наблюдать на выходе зондового световода межмодовую интерференцию (биения) во времени. При обработке данных с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье вычисляли фурье-спектр зарегистрированных временных интерферограмм. В полученных фурье-спектрах сигналов интерференции разность эффективных показателей преломления интерферирующих мод  $\Delta n_i$  имеет смысл частоты, а присутствию высшей моды соответствует пик в фурье-спектре. При возбуждении сразу нескольких высших мод в фурье-спектре выходного сигнала наблюдаются несколько пиков, соответствующих взаимной интерференции между этими модами, взаимодействующими попарно. Частоты, на которых наблюдаются пики, равны разностям эффективных показателей преломления взаимодействующих мод. Таким образом, по полученным фурье-спектрам сигналов интерференции на выходе МСВ при сканировании длины волны можно судить о наличии мод с различными эффективными показателями преломления, а также определить разности этих показателей и эффективного показателя преломления фундаментальной моды.

#### 4. Результаты экспериментального исследования МСВ с большой сердцевиной

Интерференционные сигналы на выходе исследуемых образцов МСВ различной длины представлены на рис.2, а в табл.2 указаны параметры этих сигналов.

На выходе отрезка МСВ 7-1 длиной 1.5 м наблюдается интерференция двух мод с разностью эффективных

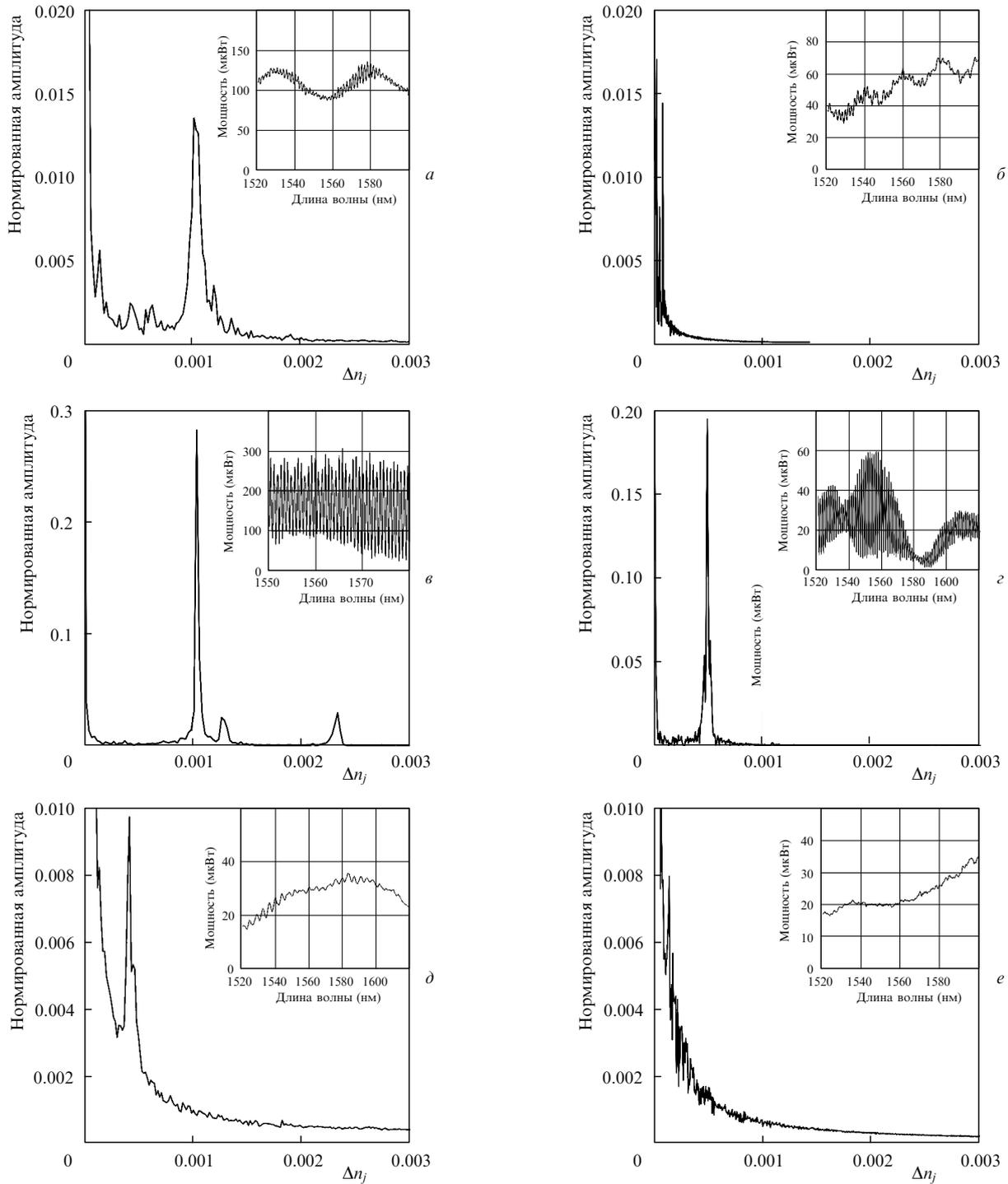


Рис.2. Фурье спектры интерференционных сигналов и (на вставках) соответствующие зависимости интенсивности выходного излучения от длины волны для различных образцов МСВ: 7-1, длина 1.5 м (а); 7-1, 16 м (б); 7-2, 3.8 м (в); 19-3, 3.8 м (г); 19-2, 1.5 м (д); 19-2, 5.9 м (е).

Табл.2. Сопоставление волноводных свойств МСВ с большой сердцевиной при различных геометрических параметрах структуры и длинах образцов.

МСВ	Длина (м)	Число мод ( $j = 1, 2, 3$ )	$\Delta n_j$	
			Эксперимент	Расчет
7-1	16.5	1	–	0.00101
7-1	1.5	2	0.00103	0.00101
7-2	3.8	3	0.00104, 0.00127, 0.00234	0.000967, 0.00118, 0.00214
19-1	6	Утечка	–	–
19-2	5.9	1	–	0.000535
19-2	1.5	2	0.00041	0.000535
19-3	3.8	2	0.000493	0.000591

показателей преломления 0.001. Из фазовых диаграмм [3] для волокна с близкой к образцу 7-1 структуре (7-элементная сердцевина, отношение диаметра отверстия к шагу структуры  $d/\Lambda = 0.20$  и отношение длины волны к шагу  $\lambda/\Lambda = 0.22$ ) следует, что помимо фундаментальной должны существовать высшие моды. На выходе образца этого же МСВ длиной 16.5 м остается только одна мода, что объясняется высоким коэффициентом затухания высшей моды, связанным с утечкой излучения.

В спектре интерференционной картины образца 7-2 присутствуют три пика, что можно объяснить наличием двух высших мод. Пик с наименьшей разностью показателей преломления (0.00104) имеет наибольшую амплитуду и обусловлен интерференцией фундаментальной и первой высшей мод, пик с наибольшей разностью эффективных показателей преломления (0.0034) – интерференцией фундаментальной и второй высшей мод. Пик с наименьшей амплитудой отвечает интерференции первой и второй высших мод. Увеличение отношения  $d/\Lambda$  с 0.2 до 0.3 (по сравнению с образцом 7-1) улучшает локализацию второй моды внутри сердцевины и уменьшает ее вытекание через оболочку.

Образец МСВ 19-1 на длине волны 1.55 мкм практически не имеет волноводных свойств, поэтому интерферограмма для него на рис.2 отсутствует. На указанной длине волны размер модового пятна в этом образце сопоставим с размером оболочки, и передаваемое по МСВ излучение вытекает [5].

Образец 19-2 имеет сходные с волокном 7-1 свойства. На выходе отрезка МСВ длиной 1.5 м наблюдаются две моды с разностью эффективных показателей  $\sim 0.0004$ , а на выходе отрезка длиной 5.9 м интерференционный сигнал отсутствует, что связано с вытеканием высшей моды через депрессированную оболочку.

Образец 19-3, имеющий наибольшее значение  $d/\Lambda$  среди образцов с 19-элементной сердцевиной, при длине 3.8 м оказывается двухмодовым в исследуемом спектральном диапазоне.

Таким образом, среди исследованного набора образцов МСВ можно выделить образцы 7-1 (длиной 16.5 м) и 19-2 (длиной 5.9 м), т. к. они при намотке на стандартную транспортировочную катушку диаметром 16 см обеспечивают одномодовый режим передачи излучения, а на этих МСВ длиной 1.5 м сигнал межмодовой интерференции имеет малую по сравнению с образцами 7-2 и 19-3 глубину модуляции (интенсивности компонент фурье-спектра интерференционного сигнала, соответствующие фундаментальной и первой высшей модам, различаются более чем на порядок).

Для проверки результатов экспериментальных исследований было проведено численное моделирование модовых свойств образцов МСВ с помощью метода конечных разностей [6]. Область вычисления занимала 80 мкм, сетка разбиения имела шаг 0.28 мкм. При построении профиля показателя преломления воздушные отверстия эллиптической формы были заменены круглыми отверстиями той же площади. С помощью численного анализа были найдены разности эффективных показателей преломления фундаментальной и первой высшей мод, которые сопоставлялись со значениями, определенными из фурье-спектров сигналов интерференции. При сопоставлении значений разности показателей преломления фундаментальной и высших мод, полученных экспериментально, с найденными с помощью численного моделирова-

вания (см. табл.2) наблюдается неплохое согласие расчетных и экспериментальных данных.

Образцы МСВ 7-1 и 19-2 имеют высокий коэффициент затухания высших мод и при длине отрезка волокна больше некоторой пороговой могут считаться одномодовыми. Для определения пороговой длины данных образцов МСВ с помощью метода скола был оценен коэффициент затухания высшей моды. Для этого последовательно измерялись сигналы межмодовой интерференции у отрезков волокна длиной 2, 1.5 и 1 м, намотанных на стандартную транспортировочную катушку диаметром 16 см. Для повышения достоверности измерений они проводились при различных условиях вывода: ось выходного зондового волокна имела постоянное смещение относительно оси исследуемого образца МСВ, но различное азимутальное расположение. Коэффициент затухания высших мод находился при усреднении полученных значений, отвечающих всем геометриям вывода, для трех длин образца; он составил  $5.9 \pm 1.3$  и  $5.6 \pm 2.3$  дБ/м для образцов 7-1 и 19-2 соответственно. Затухание фундаментальной моды в этих волокнах равнялось  $\sim 0.03$  дБ/м. При длине волокна более 10 м мощность излучения, распространяющегося в высших модах, составила по оценке менее  $-50$  дБ от мощности излучения в фундаментальной моде.

Для образцов 7-1 и 19-2, практически обеспечивающих одномодовый режим при длинах более 10 м, были проведены измерения и численное моделирование профиля поля фундаментальной моды. Распределение интенсивности света фундаментальной моды измерялось методом зондового сканирования в ближней зоне с помощью специального одномодового световода – зонда (диаметр модового пятна 5.8 мкм, шаг сканирования 0.4 мкм). Точность перемещения волокна (40 нм) контролировалась внешним оптическим интерферометром. Для учета влияния формы сердцевины на пространственное распределение фундаментальной моды сканирование осуществлялось в двух направлениях: по прямой, проходящей через середины противоположных сторон шестиугольника, образованного первым циклом воздушных отверстий (сечение с – с), а также по прямой, проходящей через противоположные вершины шестиугольника (сечение b – b). При определении радиуса фундаментальной моды МСВ использовалась аппроксимация его фундаментальной моды, а также моды зондового волокна функциями Гаусса [7].

На рис.3 показаны сечения распределений поперечной компоненты электрического поля исследуемых МСВ, из которых были определены ширина моды по уровню  $1/e$  и диаметр модового пятна в ближней зоне согласно [8]. Обобщенные результаты исследований поля фундаментальной моды представлены в табл.3. Наблюдается хорошее согласие результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Диаметр модового пятна отражает указанные выше особенности геометрии сердцевины исследуемых МСВ: сечения электрического поля образца 19-2 вдоль ортогональных направлений одинаковы, а сечение волокна 7-1 вдоль прямой, проходящей через середины противоположных сторон первого цикла отверстий, меньше сечения в перпендикулярном направлении. Полученные результаты позволяют оценить площадь модового пятна МСВ: для образца 7-1 она равна примерно 277 мкм<sup>2</sup>, а для образца 19-2 – примерно 600 мкм<sup>2</sup>. Площадь модового пятна опреде-

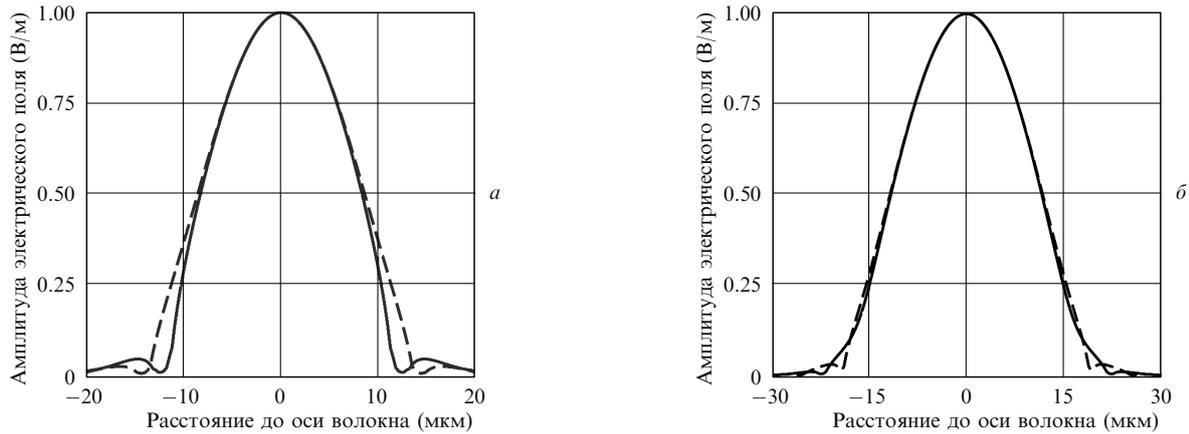


Рис.3. Сечения распределений электрического поля, полученных с помощью численного моделирования (сплошная линия – сечение с–с, штриховая – сечение b–b) для образцов МСВ 7-1 (а) и 19-2 (б).

Табл.3. Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментального исследования профиля поля фундаментальной моды.

МСВ	Сечение	Численное моделирование		Эксперимент
		$A$ (мкм)	$D$ (мкм)	$2\sigma$ (мкм)
7-1	с–с	18.8	17.1	18.4
	b–b	19.9	18.5	19.2
19-2	с–с	26.7	25.3	27.5
	b–b	27.4	25.3	27.6

Примечание:  $A$  – ширина профиля по уровню  $1/e$ ;  $D$  – диаметр модового пятна по определению [8];  $2\sigma$  – диаметр, соответствующий распределению Гаусса.

ляет максимальную мощность оптического излучения, которую можно передавать по световоду данного типа в одномодовом режиме без существенного влияния нелинейных эффектов [9].

## 5. Заключение

Проведено детальное экспериментальное исследование модового состава, затухания высших мод и диаметра модового пятна микроструктурированных волокон с большой сердцевиной, образованной заполнением стеклом семи или девятнадцати отверстий в светоотражающей микроструктурированной оболочке. Показано, что одномодовый режим в МСВ обеспечивается вытеканием высших мод через депрессированную светоотражающую микроструктурированную оболочку, что подтверждается большой (свыше 6 дБ/м) разностью коэффициентов

затухания фундаментальной и первой высшей мод. Несмотря на отсутствие отсечки высших мод, в исследованных структурах практически достижим одномодовый режим передачи оптического излучения в спектральной области  $\lambda = 1520 - 1620$  нм. Для обеспечения такого режима в МСВ с 7-элементной сердцевиной диаметром 23 мкм и пятью циклами воздушных отверстий необходимо, чтобы отношение диаметра отверстия  $d$  к шагу структуры  $A$  составило 0.20, а в волокне с 19-элементной сердцевиной диаметром 33 мкм – 0.1. Для сравнения с экспериментальными данными было выполнено численное моделирование волноводных мод исследованных волокон, результаты которого совпадают с результатами экспериментов с высокой степенью точности.

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. *Opt. Express*, **13**, 1055 (2005).
2. Limpert J., Schmidt O., Rothhardt J., Roser F., Schreiber T., Tunnermann A., Ermeneux S., Yvernault P., Salin F. *Opt. Express*, **14**, 2715 (2006).
3. Poli F., Cucinotta A., Selleri S. *Photonic Crystal Fibers: Properties and Applications* (London: Springer, 2007, с. 5).
4. Агрозов 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 журн.*, **75**, 73 (2008).
5. Russell P.St.J. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **24**, 4729 (2006).
6. Ильичев И.В., Козлов А.С., Гаенко П.В., Шамрай А.В. *Квантовая электроника*, **39**, 98 (2009).
7. Marcuse D. *Light Transmission Optics* (New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982, с. 339).
8. Petermann K. *Electron. Lett.*, **19**, 720 (1983).
9. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1996, с. 45).