

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 666.189.21: 666.22

МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОДНОМОДОВЫЕ СВЕТОВОДЫ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МОДОВОГО ЗАТУХАНИЯ

© 2012 г. В. В. Демидов; К. В. Дукельский, канд. техн. наук; Е. В. Тер-Нерсесянц;
В. С. Шевандин, доктор техн. наук

Научно-исследовательский институт оптического материаловедения
ВНЦ "ГОИ им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

E-mail: volokno@goi.ru, victor@goi.ru

Исследован модовый состав излучения, распространяющегося по микроструктурированным световодам с сердцевинной большого диаметра и особой структурой оболочки. Показано, что все представленные конструкции оптических волокон (световоды со смещенной сердцевинной, с циклической системой отверстий, с симметрией C_{3v}) отличаются от традиционного аналога повышенной устойчивостью основной моды к изгибу световода. Одномодовый режим распространения света практически достигается в указанных структурах за счет существенной разницы в коэффициентах затухания основной и высших мод. Экспериментально установлено, что основным преимуществом световодных структур, сочетающих большой диаметр сердцевины (20–40 мкм) и повышенный уровень содержания воздуха в оболочке, является расширенный рабочий спектральный диапазон.

Ключевые слова: микроструктурированный световод, сердцевина световода, модовый состав излучения.

Коды OCIS: 060.2400, 060.2430, 060.4005

Поступила в редакцию 04.04.2011

Микроструктурированные световоды рассматриваются в качестве средств генерации и доставки мощного лазерного излучения. Именно в этих направляющих структурах была продемонстрирована возможность существенного увеличения размеров диаметра сердцевины световода для подавления нелинейно-оптических явлений и увеличения лучевой прочности [1–4]. Вместе с тем, увеличение размеров сердцевины независимо от типа световода может сопровождаться изменением модового состава переносимого по световоду излучения. Возможны и другие негативные явления: снижение стойкости направляемых мод к изгибу световода, сужение рабочего спектрального диапазона, увеличение параметра затухания света. Присущий многим лазерным системам способ генерации единственной поперечной моды обладает рядом преимуществ, таких как возможность получения ультракоротких импуль-

сов излучения, относительная простота пространственного преобразования гауссовых пучков, в частности получение заданного распределения мощности излучения при его фокусировке в технологических установках. Последнее обстоятельство, в свою очередь, требует от оптических волокон, встроенных в лазерные системы, соблюдения одномодового режима передачи света. В этом аспекте разработка оптических одномодовых волокон продолжает оставаться востребованным направлением прикладной науки. Однако обеспечение одномодового режима передачи излучения сталкивается с необходимостью фазовой отсеки высших мод, что может быть выполнено на практике при таких условиях, которые делают одномодовый световод слабонаправляющим и работоспособным лишь в ограниченном диапазоне спектра. Причиной сужения спектрального диапазона является вытекание излучения основной моды

на изгибе световода. В ряде случаев при попытке улучшить слабую направляемость излучения основной моды вынужденно создаются условия для присутствия излучения высшей моды, доля которой характеризуется параметром M^2 качества лазерного пучка [5], изменяющимся от 1 (основная мода) до 2 (первая высшая мода). В исследованиях генерации лазерного излучения в микроструктурированных световодах [3, 4] параметр M^2 заметно отличается от 1, что свидетельствует о сопоставимом уровне мощности основной и высшей мод. Задача дальнейших разработок, таким образом, состоит в поиске новых или оптимизации известных структур, в которых примесь излучения высшей моды была бы минимальной при условии высокой устойчивости основной моды к изгибу световода.

В предыдущих работах авторов статьи [6–8] были исследованы серии микроструктурированных световодов с сердцевинной диаметром 25–35 мкм, образованной заменой 7 или 19 центральных отверстий в исходной гексагональной системе одним элементом из кварцевого стекла. В работе [9] сообщалось о свойствах структуры, в которой замещено стеклом не центральное, а соседнее с ним отверстие, – о световоде со смещенной сердцевинной. Исследования модового состава показали, что в таких структурах возможно достижение одномодового режима распространения излучения в отсутствие фазовой отсечки высшей моды. В условиях, когда разница в коэффициентах оптических потерь основной и высших мод может достигать нескольких порядков (дифференциальное модовое затухание), по световодам длиной в десятки метров распространяется практически только фундаментальная мода, а высшие моды полностью затухают на длинах в несколько метров. Преимуществом представленных структур стала лучшая устойчивость основной моды к изгибу световода, достигаемая, в частности, увеличением относительно размера отверстий в оболочке оптического волокна.

В настоящей публикации приводятся дополнительные данные о свойствах микроструктурированных световодов со смещенной сердцевинной, а также обсуждаются результаты исследования новых структур – световода с циклической системой отверстий и световода с симметрией C_{3V} .

В работе [9] было установлено, что смещение сердцевинной световода, как и ожидалось,

сопровождается повышенным затуханием излучения высшей моды. Как известно, в световодных структурах высшая мода отличается от фундаментальной в том числе и более широким модовым полем [10]. По этой причине при заполнении стеклом не центрального, а соседнего с ним отверстия в гексагональной структуре, образующего смещенную сердцевину, высшая мода испытывает существенно большее затухание: ее излучение интенсивнее вытекает в близко расположенную конструкционную оболочку. Поэтому полученные образцы волокон со смещенной сердцевинной диаметром 20 мкм даже на сравнительно малых длинах поддерживали устойчивый одномодовый режим распространения света. Опытами по идентификации направляемых мод в дальней зоне с использованием цифровой CCD-камеры было установлено, что для длин волн $\lambda = 658, 808$ и 980 нм излучение представлено основной модой с размерами пятна 12,3, 13,0 и 13,4 мкм соответственно. При этом параметр заполнения воздухом структурированной оболочки световода $k = d/\Lambda$ (d – диаметр отверстия, Λ – шаг структуры) заметно превышал граничное значение для отсечки высшей моды по фазовым условиям ($k < 0,46$) и в предельном случае составлял 0,6.

Таким образом, комплекс исследований по определению модового состава излучения разработанных оптических волокон показал, что граница коротковолнового вытекания излучения основной моды располагается в видимой области спектра. Однако определение ее точного положения посредством измерения оптических потерь было затруднено малой длиной образцов, составлявшей 10 м. Для устранения этого недостатка в имеющихся характеристиках микроструктурированных световодов со смещенной сердцевинной авторами статьи было получено несколько образцов длиной от 50 до 100 м, что позволило провести измерение затухания излучения. Соответствующая спектральная характеристика для световода с сердцевинной диаметром 20 мкм, размещенного на катушке для телекоммуникационного волокна диаметром 16 см, приведена на рис. 1.

Как видно из представленной зависимости, вытекание излучения основной моды происходит в спектральной области $\lambda \approx 650$ нм, в то время как в световоде с сердцевинной такого же размера, расположенной в центре структуры, излучение вытекает в области $\lambda \approx 900$ нм на катушке диаметром 16 см и в области $\lambda \approx 650$ нм

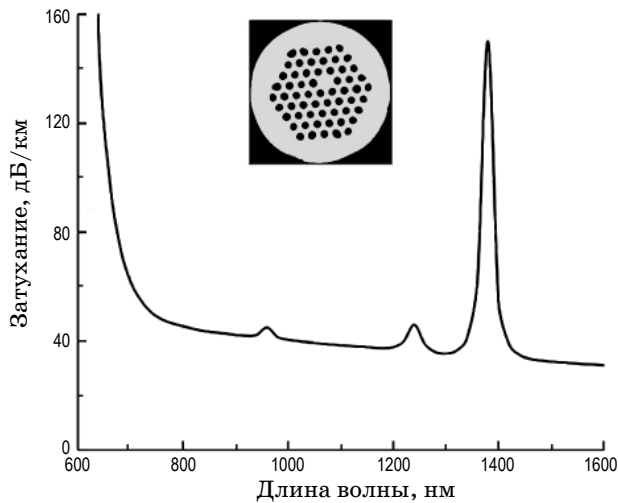


Рис. 1. Спектр оптических потерь и фотография торца световода с сердцевинной диаметром 20 мкм и параметром содержания воздуха $k = 0,6$. Измерения проводились на катушке диаметром 16 см.

на катушке диаметром 32 см [11]. Другими словами, световод со смещенной сердцевинной диаметром 20 мкм может быть охарактеризован заметно лучшей стойкостью фундаментальной моды к стационарному изгибу оптического волокна. Выигрыш в расширении рабочего спектрального диапазона составляет около 250 нм.

Этот выигрыш обусловлен тем обстоятельством, что в световоде со смещенной сердцевинной параметр заполнения воздухом структурированной оболочки k составляет 0,6 и превышает аналогичную величину для световода с центральной сердцевинной. В световоде с сердцевинной, расположенной в центре структуры, при $k \approx 0,60$ наблюдался бы многомодовый режим распространения излучения, поскольку условием существования единственной моды является неравенство $k < 0,46$. Смещение сердцевинной к периферии световода сопровождается практически полным затуханием излучения высших мод, а направляемая основная мода лучше удерживается в световоде при его изгибе благодаря повышенному содержанию воздуха в оболочке.

Схожие процессы наблюдаются и в микроструктурированном световоде со смещенной сердцевинной диаметром 34 мкм (рис. 2). Увеличение относительного содержания воздуха в оболочке до $k = 0,65$ делает световод работоспособным и на стандартной транспор-

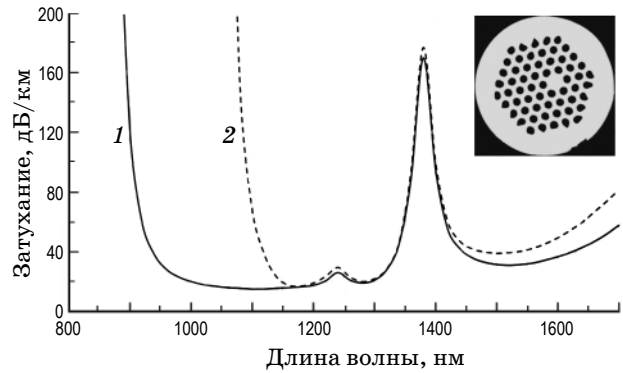


Рис. 2. Спектр оптических потерь и фотография торца световода с сердцевинной диаметром 34 мкм и параметром содержания воздуха $k = 0,65$. Измерения проводились на катушках диаметром 32 см (1) и 16 см (2).

тировочной катушке диаметром 16 см. Размер пятна основной моды на $\lambda = 1550$ нм составляет 26 мкм, что совпадает со значением одноименного параметра для световода с гексагональной системой отверстий и центральной сердцевинной [12]. При размещении образца на катушке диаметром 32 см, что сделало возможным измерение размера пятна в области спектра $\lambda = 980$ нм, получено меньшее значение, а именно 22 мкм.

Дальнейшее увеличение параметра k до 0,7, вызванное желанием расширить диапазон рабочих частот, привело к появлению излучения высшей моды на выходе волокна, в связи с чем значение $k = 0,65$ представляется оптимальным в аспекте сочетания одномодового режима распространения излучения в достаточно широком спектральном диапазоне с устойчивостью основной моды к изгибу световода.

Следует обратить внимание на рост затухания излучения в области спектра $\lambda > 1200$ нм, не свойственный микроструктурированным оптическим волокнам. Размер пятна моды в гексагональных световодных структурах обычно слабо зависит от длины волны излучения [9, 13], а вытекание фундаментальной моды наблюдается в коротковолновой области спектра. При смещении сердцевинной световода поле моды в большей мере, чем в световоде с центральной сердцевинной, проникает в конструкционную оболочку, что сопровождается ростом потерь излучения адекватно некоторому росту модового пятна [9] при движении в длинноволновую часть рабочего спектрального диапазона.

Необходимо отметить, что различный “фоновый” уровень затухания излучения в исследуемых образцах световодов обусловлен в основном неконтролируемым содержанием механических примесей на поверхности кварцевых капилляров и стержней, составляющих сборку для вытягивания оптического волокна. Поскольку вытягивание капилляров и их совмещение в исходный пучок проводились в обычных лабораторных условиях, примеси вызывали колебания “фоновое” затухания в пределах от 10 до 40 дБ/км.

Особо следует остановиться на доказательности основной роли дифференциального модового затухания в достижении одномодового режима распространения света в представленных оптических волокнах. Для этого был исследован модовый состав излучения в образцах волокон длиной от 1,5 до 5 м, который сопоставлялся с результатами, полученными для длинномерных образцов световодов. Резуль-

таты сравнения свойств световодов со смещенной сердцевинной, расположенных на катушке диаметром 16 см, представлены в табл. 1.

Как видно из таблицы, для коротких образцов волокон характерен многомодовый состав направляемого излучения, который переходит в одномодовый по мере увеличения длины образца, начиная с коротковолновой области спектра. Полученные данные, таким образом, свидетельствуют о значительном затухании мощности высшей моды при распространении излучения по микроструктурированному световоду. После прохождения отрезка длиной 5 м высшая мода на длинах волн 658 и 808 нм затухает практически полностью в образце с $k = 0,65$. Исходя из того, что общее затухание излучения высшей моды можно оценить значением не менее 10 дБ, получим для нижней границы параметра затухания значение 2 дБ/м. Этот результат находится в соответствии с данными работы [8], полученными для световодов с гексагональной структурой отверстий и центральной 7- и 19-элементной сердцевинной. Увеличение содержания воздуха в структурированной оболочке до $k = 0,68$, как видно из табл. 1, уменьшает затухание высшей моды и тем самым ограничивает спектральный диапазон одномодового режима работы световода.

Подобные исследования, проведенные для других типов световодов, представленных в этой работе, также показали, что высшая мода практически затухает на расстоянии нескольких метров от входного торца оптического волокна.

Результаты разработки и исследования микроструктурированных световодов с циклической системой отверстий приведены в табл. 2. Циклическая структура отличается от гексагональной тем, что количество отверстий

Таблица 1. Зависимость модового состава излучения в волокнах со смещенной сердцевинной диаметром 20 мкм от их длины

Длина образца, м	Длина волны излучения, нм		
	658	808	980
Образцы с параметром $k = 0,65$			
50	1	1	2
5	1	1	2
3	1	2	2
1,5	2	2	2
Образцы с параметром $k = 0,68$			
40	1	1	2
5	1	2	2
2,5	2	2	2

Таблица 2. Модовый состав излучения в световодах с циклической структурой

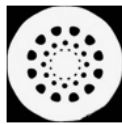
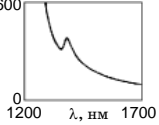

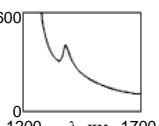
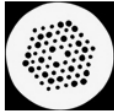
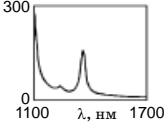
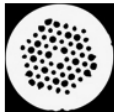
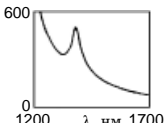
Образец	Количество мод (диаметр модового пятна, мкм)				Диаметр сердцевинны, мкм	Структура поперечного сечения	Затухание, дБ/км
	$\lambda = 658$ нм	$\lambda = 808$ нм	$\lambda = 980$ нм	$\lambda = 1550$ нм			
1	1 (17,1)	1 (18,3)	1 (18,8)	1 (24,0)	30		
2	вытекание	1 (25,7)	1 (27,3)	1 (31,5)	40		

Таблица 3. Модовый состав излучения в световодах с симметрией C_{3V}

Образец	Количество мод (диаметр модового пятна, мкм)				Диаметр сердцевин, мкм	Структура поперечного сечения	Затухание, дБ/км
	$\lambda = 658$ нм	$\lambda = 808$ нм	$\lambda = 980$ нм	$\lambda = 1550$ нм			
1	вытекание	вытекание	1 (16,8)	1 (19,6)	25		
2	вытекание	вытекание	вытекание	1 (24,4)	35		

в циклах по мере удаления от сердцевин световода остается неизменным и достаточно большим. В данном случае количество отверстий в каждом из трех циклов, окружающих сердцевину, составляет 12. По этой причине форма модового пятна оказывается более сглаженной. Поскольку в “обычной” структуре сердцевина окружена шестью отверстиями, поле основной моды может быть охарактеризовано симметрией C_{6V} , а не круговой, как в световодах, изготовленных из сплошных сред. В некоторых практических приложениях это обстоятельство может иметь определенное значение. Кроме того, было целесообразно исследовать и характер вытекания излучения высших мод, и устойчивость основной моды при изгибе световода со структурой оболочки, отличной от гексагональной.

Как видно из табл. 2, для сердцевин диаметром 30 мкм уровень оптических потерь вследствие вытекания всех направляемых мод за пределы светоотражающей оболочки чрезмерно высок. Однако некоторое увеличение содержания воздуха в каждом из трех циклов отверстий при одновременном увеличении диаметра сердцевин световода позволило найти структуру с оптимальным соотношением высокого коэффициента затухания излучения высших мод и устойчивостью фундаментальной моды к изгибу волокна. Световод с сердцевиной диаметром 40 мкм представляется объектом, удачно сочетающим столь противоречивые требования.

Этот световод отличается сравнительно большим размером модового пятна, изменяющимся от 25,7 до 31,5 мкм в исследованном спектральном диапазоне. Затухание излучения на $\lambda = 1550$ нм имеет, казалось бы, высокое

значение, а именно 150 дБ/км (стандартная катушка диаметром 16 см), что ограничивает применение такого световода в помещениях с небольшими размерами. Однако, для сравнения, в “обычном” микроструктурированном световоде с таким же диаметром сердцевин в аналогичных условиях размещения вытекание излучения основной моды столь значительно, что позволяет использовать его только на катушке нестандартного диаметра 32 см [14].

В табл. 3 приведены результаты исследования световодных свойств структур с симметрией C_{3V} в поперечном сечении. Интерес к такой структуре был обусловлен сочетанием в ней отверстий большого и малого диаметров, что может иметь следствием необходимое соотношение коэффициентов затухания фундаментальной и высшей мод и, как результат, практическую реализацию одномодового режима передачи излучения. Действительно, из данных табл. 3 следует, что среди представленных типоразмеров оптических волокон можно найти такие, которые отличаются от аналогичных структур с одинаковыми размерами отверстий в циклах лучшей устойчивостью основной моды к стационарному изгибу волокна (стандартная катушка диаметром 16 см). На данном этапе исследований не обнаружено заметных преимуществ одномодового световода с сердцевиной диаметром 25 мкм по сравнению с традиционным микроструктурированным аналогом: границы коротковолнового вытекания излучения располагаются приблизительно в одной спектральной области (катушка диаметром 32 см). Сердцевина диаметром 35 мкм, наоборот, имеет явное преимущество, поскольку существенные оптиче-

ские потери в такой структуре наблюдаются в области $\lambda < 1200$ мкм (катушка диаметром 16 см), в то время как аналог работоспособен исключительно на катушке диаметром 32 см (литературные данные для стационарного изгиба радиусом 8 см отсутствуют).

В заключение необходимо отметить, что в настоящей публикации представлены результаты исследования оптических характеристик микроструктурированных волокон, отличающихся от аналога повышенной стойкостью основной моды к стационарному изгибу. Принцип работы новых одномодовых световодных

структур основан на явлении дифференциального модового затухания, что и определяет ряд их преимущественных свойств. Эти свойства обеспечиваются выбором типа структуры световода (световоды со смещенной сердцевинной, с циклической системой отверстий разного диаметра, с симметрией C_{3V}), размера сердцевины и относительного содержания воздуха в светоотражающей оболочке. Расширение одномодового рабочего спектрального диапазона при оптимизации указанных параметров может достигать 250 нм в ближней инфракрасной области спектра.

* * * * *

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., Yvernault P., Salin F.* Extended single-mode photonic crystal fiber lasers // Opt. Exp. 2006. V. 14. № 7. P. 2715–2720.
3. *Wang P., Cooper L.J., Sahu K., Clarkson W.A.* Efficient single-mode operation of a cladding-pumped ytterbium-doped helical-core fiber laser // Opt. Lett. 2006. V. 31. № 2. P. 226–228.
4. *Dong L., Li J., Peng X.* Bend-resistant fundamental mode operation in ytterbium-doped leakage channel fibers with effective areas up to $3160 \mu\text{m}^2$ // Opt. Exp. 2006. V. 14. № 24. P. 11512–11519.
5. *Wang X., Lu B.* The beam propagation factor and far-field distribution of Bessel-modulated Gaussian beam // Opt. and Quant. Electron. 2002. V. 34. P. 1071–1077.
6. *Дукельский К.В., Комаров А.В., Тер-Нерсисянц Е.В., Хохлов А.В., Шевандин В.С.* Устойчивые к изгибу микроструктурированные световоды с большой сердцевиной // Труды Всерос. конф. по волоконной оптике. Пермь, 10–12 октября 2007 г. Спецвыпуск “Фотон-экспресс”. Наука, 2007, сессия Б6. С. 154–155.
7. *Dukel'ski K.V., Komarov A.V., Khokhlov A.V., Ter-Nersesyantz E.V., Shevandin V.S.* 7- and 19-element-core bend-resistant microstructured fibers // Trans. Tech. Publications. Advanced Materials Research. 2008. V. 39–40. № 5. P. 261–264.
8. *Агзузов П.М., Дукельский К.В., Комаров А.В., Тер-Нерсисянц Е.В., Хохлов А.В., Шевандин В.С.* Разработка микроструктурированных световодов с большой сердцевиной и исследование их оптических свойств // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 1. С. 77–81.
9. *Демидов В.В., Дукельский К.В., Шевандин В.С.* Модовый состав излучения в микроструктурированных световодах со смещенной сердцевиной // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 6. С. 55–60.
10. *Tsuchida Y., Saitoh K., Koshiha M.* Design and characterization of single-mode holey fibers with low bending losses // Opt. Exp. 2005. V. 13. № 12. P. 4770–4779.
11. *Nielsen M.D., Mortensen N.A., Folkenberg J.R.* Reduced microdeformation attenuation in large-mode-area photonic crystal fibers for visible applications // Opt. Lett. 2003. V. 28. № 18. P. 1645–1647.
12. *Nielsen M.D., Folkenberg J.R., Mortensen N.A.* Singlemode photonic crystal fibre with effective area of $600 \mu\text{m}^2$ and low bending loss // Electron. Lett. 2003. V. 39. № 25. P. 1802–1803.
13. *Nielsen M.D., Folkenberg J.R., Mortensen N.A., Bjarklev A.* Bandwidth comparison of photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers // Opt. Exp. 2004. V. 12. № 3. P. 430–435.
14. *Nielsen M.D., Mortensen N.A., Albertsen M., Folkenberg J.R., Bjarklev A., Bonacinni D.* Predicting macro-bending loss for large-mode area photonic crystal fibers // Opt. Exp. 2004. V. 12. № 8. P. 1775–1779.