

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 666.189.21: 666.22

МОДОВЫЙ СОСТАВ ИЗЛУЧЕНИЯ

В МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕТОВОДАХ СО СМЕЩЕННОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ

© 2010 г. В. В. Демидов; К. В. Дукельский, канд. техн. наук; В. С. Шевандин, доктор техн. наук

Научно-исследовательский и технологический 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, смещенной относительно центра световода на размер шага структуры. Показано, что одномодовый режим световода достигается при тех же геометрических параметрах структурированной оболочки, что и в световоде с центральной сердцевинной. Модовое пятно в световодах со смещенной сердцевинной меньше одноименного параметра в световодах с сердцевинной, расположенной в центре, при одинаковых размерах сердцевины. По этой причине устойчивость основной моды к изгибу световода при распространении по смещенной сердцевине выше, чем в световоде с центральной сердцевинной.

Ключевые слова: микроструктурированный световод, модовое пятно.

Коды OCIS: 060.2270, 060.2280, 060.2400, 060.2430.

Поступила в редакцию 15.12.2009.

Микроструктурированные (дырчатые) световоды рассматриваются как перспективные оптические элементы для применения в лазерной технике в качестве активных сред, а также для передачи и нелинейно-оптического преобразования мощных световых потоков с заданным распределением светового излучения в поперечном сечении. Эти возможности определяются такими отличительными особенностями микроструктурированных световодов, как существование только основной моды в неограниченном спектральном диапазоне, возможность смещения нулевой дисперсии групповой скорости распространения волны в видимый диапазон спектра, достижение одномодового режима в сердцевинах большого (более 10 мкм) диаметра. Последнее из упомянутых преимуществ микроструктурированных световодов сравнительно легко достигается в технологической практике простым масштабированием размеров световода [1–5] и, соответственно, диаметра сердцевины до значений около 50 мкм. Единственное ограничение, которое при этом накладывается

на геометрические параметры световода, – это соблюдение соотношения $d/\Lambda < 0,46$, где d – диаметр отверстия в гексагональной структуре светоотражающей оболочки, Λ – шаг структуры. Однако, поскольку условия эксплуатации оптических волокон так или иначе сопряжены с их многократным изгибом, рабочая спектральная область оказывается ограниченной вытеканием излучения основной моды на изгибе дырчатого световода в коротковолновой части оптического диапазона [5–7]. Вытекание излучения носит резко выраженный характер и фактически представляет собой спектральную “отсечку” основной моды даже в условиях размещения оптического волокна на стандартной транспортировочной бобине диаметром 16 см с мягким подслоем, на которой обычно проводится измерение оптических параметров световодов. Положение “отсечки” определяется размером сердцевины и параметром $k = d/\Lambda$. Увеличение размеров сердцевины, вызванное желанием ограничить развитие нелинейно-оптических процессов, приводит к смещению коротковолновой рабочей границы

в ИК область спектра. При увеличении диаметра сердцевинки до 35 мкм [5] дырчатый световод превращается в “одночастотный” оптический элемент для работы исключительно в области $\lambda = 1550$ нм. Увеличение содержания воздуха в светоотражающей структурированной оболочке, т. е. увеличение параметра k , отодвигает “отсечку” основной моды в коротковолновую область, но способно привести к нежелательному присутствию излучения высшей моды при $d/\Lambda > 0,46$. На практике одномодовый микроструктурированный световод может быть реализован при значении $d/\Lambda = 0,50$ [8], но столь незначительное изменение содержания воздуха по сравнению с теоретически задаваемым значением не приводит к заметному смещению коротковолнового вытекания излучения основной моды световода.

Альтернативным способом увеличения диаметра сердцевинки одномодового дырчатого световода стало ее образование в результате заполнения стеклом не одного центрального отверстия в гексагональной дырчатой структуре, а 7 или 19 отверстий. Такие световоды с большой сердцевинкой использовались в качестве волоконных лазеров [1, 2] и генерировали стимулированное излучение в режиме основной поперечной моды. Оказалось, что достижение одномодового режима работы в световодах с многоэлементной сердцевинкой возможно и в условиях распространения высшей моды, но при этом необходимо создать структуру, в которой затухание высшей моды существенно превосходило бы затухание основной моды световода [3, 4]. В работе [4] показано, что в оптическом дырчатом волокне с 7-элементной сердцевинкой диаметром 25–35 мкм реализуется одномодовый режим передачи излучения с затуханием излучения основной моды около 40 дБ/км для $\lambda = 1550$ нм (определяемым в основном механическими примесями) и затуханием излучения высшей моды порядка 6 дБ/м для того же значения длины волны.

В настоящей работе приведены результаты исследования условий для существенно разного значения затухания основной и высшей мод за счет смещения сердцевинки световода относительно ее обычного положения в центре световода. Высшая мода, в отличие от основной, характеризуется большей степенью проникновения излучения в структурированную оболочку [9, 10]. При смещении сердцевинки могут быть созданы условия для повышенного вытекания периферийной области поля высшей моды в конструкционную оболочку световода. В этом случае одномодовый режим переноса излуче-

ния может устанавливаться на определенных длинах световода, даже если не выполнены фазовые условия отсечки высшей моды. Еще одно обстоятельство, которое способствовало реализации микроструктурированных световодов со смещенной сердцевинкой, – относительная техническая простота достижения такой структуры. Процессы изготовления преформ и световодов из сплошных сред “обычными” методами газофазного осаждения предусматривают вращение заготовки вокруг оси. В последнем случае смещение световедущей сердцевинки относительно центра заготовки представляет собой трудную технологическую задачу.

Для проведения исследований модового состава излучения в зависимости от структуры дырчатых волокон были получены экспериментальные образцы световодов по двухступенчатой технологии [11].

Оптические микроструктурированные волокна вытягивались из преформ, представляющих собой гексагональную систему из капилляров в опорной внешней трубе. Один из капилляров заменялся на микроштабик для образования световедущей сердцевинки. Опорная труба, капилляры и микроштабик изготавливались из синтетического кварцевого стекла.

Были вытянуты серии световодов с диаметром сердцевинки 12,5, 20 и 22 мкм. Для сравнения оптических свойств полученных волокон с аналогом были изготовлены световоды с центральной сердцевинкой диаметром 20 и 22 мкм. Фотографии торцов исследованных световодов приведены на рис. 1. В каждой серии световодов изменялось относительное содержание воздуха (параметр k) в структурированной оболочке. Для этого варьировался один из двух существенных параметров технологического процесса – давление в воздушных каналах или температура вытягивания.

Модовый состав излучения исследовался на установке, схема которой приведена на рис. 2. Излучение полупроводниковых лазерных диодов с положением спектральных максимумов на длинах волн $\lambda = 658, 808$ и 980 нм вводилось системой двух линз в торец исследуемого волокна. Излучение, прошедшее через оптическое волокно, направлялось на CCD-камеру, расположенную на расстоянии от 5 до 10 мм от торца световода, т. е. регистрировалось поперечное распределение интенсивности излучения в дальней зоне. CCD-камера соединялась интерфейсом IEEE-1394 с компьютером, а обработка полученных данных проводилась с помощью лицензионно-

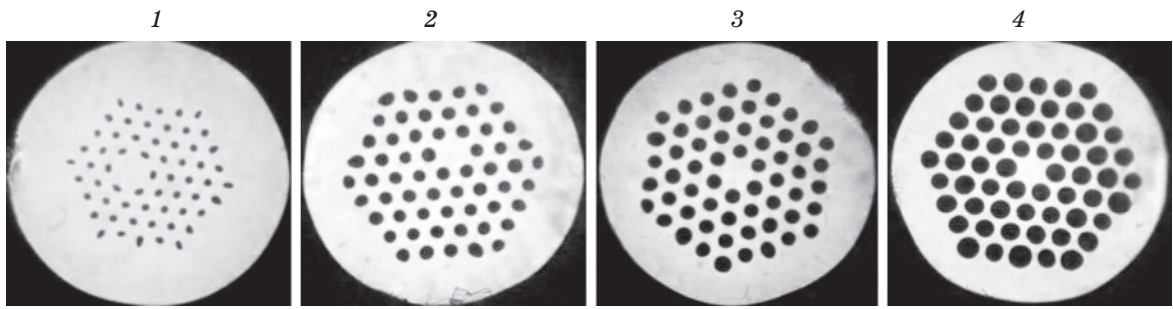


Рис. 1. Фотографии торцов исследованных световодов. 1, 2 – со смещенной сердцевиной; 3, 4 – с центральной сердцевиной. Величина параметра содержания воздуха k в образцах составляет 0,35 (1), 0,60 (2), 0,67 (3), 0,82 (4).

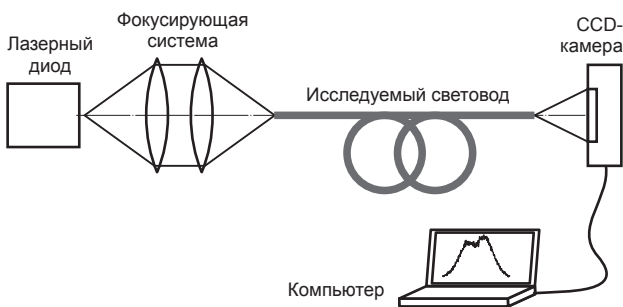


Рис. 2. Схема установки для исследования модового состава излучения.

го программного обеспечения OriginPro7.50 и MatCad14.

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты исследования картины модовых пятен в световоде со смещенной на 1 шаг сердцевиной. Как видно из рисунка, переносимое световодом излучение для $\lambda = 658$ и 808 нм представлено основной модой, для $\lambda = 980$ нм – суперпозицией основной и первой высшей мод.

Необходимо особо оговорить метод получения того или иного модового состава излучения в исследованных образцах световодов. Как по-

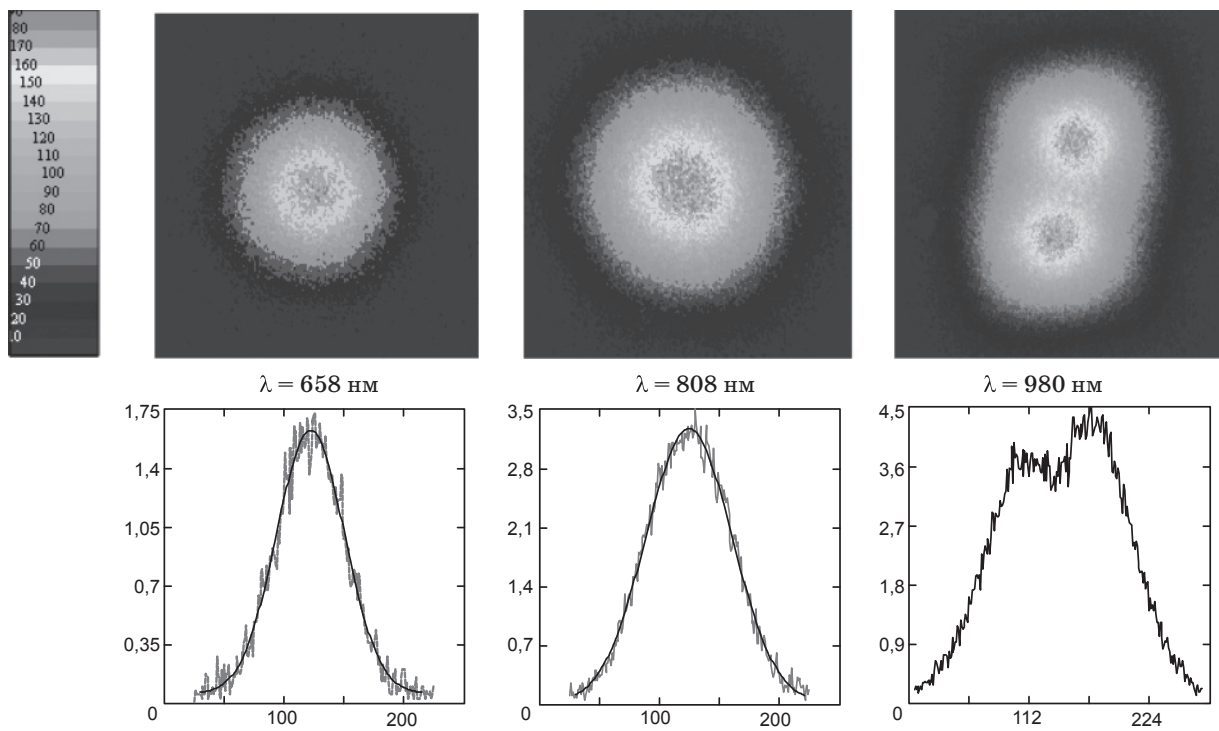


Рис. 3. Пример картины модовых пятен в световоде с сердцевиной, смещенной на 1 шаг структуры, для трех рабочих длин волн источника излучения. Размерность по осям координат представлена условными единицами.

казано в работах [3, 4], условия размещения образцов на измерительных катушках могут существенным образом влиять на затухание излучения высшей моды и в этой связи требуют тщательного контроля.

В проводимых нами экспериментах световоды располагались на стандартных катушках с мягким подслоем для транспортировки связанных оптических волокон. Диаметр катушек составлял 16 см. Оценка модового состава выходящего из световодов излучения проводилась при варьировании условий ввода излучения в световод. Для этого входной торец засвечивался с изменением апертуры входящего в образец светового потока или угла между осью световода и осью вводимого в него излучения. В этих условиях наиболее легко возбуждалась основная мода с характерным гауссовым распределением интенсивности света. Если при изменении условий ввода излучения менялась лишь интенсивность основной моды, а возбудить высшую моду не удавалось, то в приведенных ниже таблицах число мод обозначалось единицей. Число мод обозначалось цифрой 2 в случаях, когда в картине распределения интенсивности присутствовала примесь высшей моды как нарушение гауссового распределения, зависящее от условий ввода излучения. Эти условия иногда удавалось подобрать таким образом, что на экране ССД-камеры присутствовала только характерная двудольная картина высшей моды.

Присутствие высшей моды на выходном торце исследуемого световода могло наблюдаться и в результате механического воздействия на световод – например, при надавливании на витки, расположенные ближе к выходному торцу. Однако такой световод нами не рассматривался в качестве многомодового, поскольку представлял собой оптический элемент с местным возмущением световодного тракта, вызывающим конверсию мод.

Результаты исследования модового состава излучения в смещенной сердцевине диаметром 12,5 и 20,0 мкм приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Как видно из сравнения данных табл. 1 и 2, увеличение диаметра сердцевины с 12,5 до 20 мкм при сохранении неизменным (или приблизительно неизменным) значения параметра k сопровождается дополнительным затуханием моды высшего порядка. Увеличение размеров сердцевины ведет к увеличению приведенной частоты V световода в соответствии с выражением [6, 10, 12] $V = 2\pi\lambda^{-1}\Lambda(n_c^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$, где n_c

и n_{cl} – показатель преломления сердцевины и эффективный показатель преломления оболочки соответственно. Увеличение параметра V , казалось бы, должно было приводить к возрастанию числа мод или, по крайней мере, к большей устойчивости существующих мод к искажениям световода, в частности к его изгибу. В эксперименте, однако, наблюдается противоположная тенденция – затухание высшей моды становится сильнее. Повышенное затухание высшей моды можно объяснить вытеканием излучения в промежутки между отверстиями в светоотражающей оболочке [13], размеры которых возрастают при масштабировании световода.

В предыдущей работе [3] для световода с центральной сердцевиной показано, что этот же физический процесс является причиной появления примеси высшей моды при смещении по спектру в ИК область. При увеличении длины волны излучения и неизменных размерах промежутков между отверстиями вытекание высшей моды становится слабее и она в большей мере проявляется на выходе световода.

Для сравнения свойств световодов со смещенной сердцевиной с аналогом, в котором сердцевина находится в центре световода, были изготовлены соответствующие образцы, характеристики которых представлены в табл. 3.

Необходимо пояснить, что длина световодов с центральной сердцевиной при их изготовлении составила 20 м, что не отвечает корректному сравнению с данными по световодам со смещенной сердцевиной, длина которых составляла 10 м. Поэтому нами дополнительно были проведены исследования модового состава для 10-метровых образцов волокон с центральной сердцевиной, результаты которых полностью совпали с данными табл. 3.

Сравнение табл. 2 и 3 показывает, что модовый состав излучения, распространяющегося

Таблица 1. Модовый состав излучения в сердцевине диаметром 12,5 мкм, смещенной на 1 шаг структуры. Длина образца 10 м

Номер образца	Параметр содержания воздуха, k	Модовый состав для длины волны, нм		
		658	808	980
1 _{смещ.}	0,35	1	1	1
2 _{смещ.}	0,47	2	2	2
3 _{смещ.}	0,52	2	2	2
4 _{смещ.}	0,57	2	2	> 2

Таблица 2. Модовый состав излучения в сердцевине диаметром 20 мкм, смещенной на 1 шаг структуры. Длина образца 10 м

Номер образца	Параметр содержания воздуха, k	Модовый состав для длины волны, нм		
		658	808	980
5 _{смещ.}	0,51	1	1	1
6 _{смещ.}	0,60	1	1	1
7 _{смещ.}	0,81	2	2	2

ся по световодам с центральной и смещенной сердцевинной, примерно одинаков в световодах с совпадающими или близкими значениями размеров сердцевины и параметра k . Заметным различием является вытекание основной моды на $\lambda = 658$ нм в волокнах с центральной сердцевиной, что не позволило оценить размер пятна моды. В проведенных нами экспериментах регистрируемое на пороге чувствительности излучение с $\lambda = 658$ нм на выходе образцов 1–5 (табл. 3) имело аномально малую расходимость, порядка нескольких единиц 10^{-3} рад. Это свидетельствовало об аномальном расширении пятна моды,

следствием которого было ее вытекание в упомянутой области спектра.

Нами также была проведена численная оценка размеров пятна основной моды в тех случаях, когда наблюдался одномодовый режим распространения излучения.

Известно, что гауссов пучок в свободном пространстве имеет угловую расходимость $\text{tg}\alpha = \lambda/\pi w$, где α – половинный угол, w – значение радиуса пятна на выходе световода. Привлекая определяемое из эксперимента значение модового пятна W в дальней зоне (на экране CCD-камеры), получим $\text{tg}\alpha = W/L$, где L – расстояние от торца волокна до экрана. Окончательно выражение для w приобретает вид $w = \lambda L/\pi W$. Определение размеров модового пятна W в дальней зоне проводилось на уровне $1/e^2$ от максимального значения интенсивности света. Результаты определения размеров пятна основной моды приведены в табл. 4. В названии образцов нашло отражение геометрическое положение сердцевины световода.

Как видно из табл. 4, размер модового пятна в изученных образцах слабо зависит от длины волны света, что является отличительной особенностью микроструктурированных световодов [7].

Таблица 3. Модовый состав излучения в световодах с центральной сердцевиной. Длина образца 20 м

Номер образца	Диаметр сердцевины, мкм	Параметр содержания воздуха, k	Модовый состав для длины волны, нм		
			658	808	980
1 _{центр.}	20	0,55	вытекание	вытекание	1
2 _{центр.}	20	0,65	вытекание	1	1
3 _{центр.}	20	0,67	вытекание	1	1
4 _{центр.}	22	0,65	вытекание	1	1
5 _{центр.}	22	0,67	вытекание	1	1
6 _{центр.}	22	0,72	1	1	1
7 _{центр.}	20	0,82	2	2	2

Таблица 4. Зависимость размера пятна основной моды от геометрических параметров световодов

Номер образца	Диаметр сердцевины, мкм	Параметр содержания воздуха, k	Длина образца, м	Диаметр модового пятна для длины волны, нм		
				658	808	980
1 _{смещ.}	12,5	0,35	10	10,4	11,8	11,8
5 _{смещ.}	20	0,51	10	13,4	14,1	14,2
6 _{смещ.}	20	0,60	10	12,3	13,0	13,4
4 _{центр.}	22	0,65	20	вытекание	15,3	15,8
5 _{центр.}	22	0,67	20	вытекание	13,9	14,9
6 _{центр.}	22	0,72	20	12,6	13,7	14,0

Представленные в табл. 4 результаты показывают, что при неизменном размере сердцевинки и увеличении параметра k происходит некоторое уменьшение модового пятна. Особенно отчетливо это наблюдается для центральной сердцевинки диаметром 22 мкм. Уменьшение модового пятна находит естественное объяснение, если принять во внимание свойства аналога – световода со сплошной оболочкой. Увеличение значения k в структурированной оболочке эквивалентно увеличению разности показателей преломления сердцевинки и оболочки. В оптике световодов, изготовленных из сплошных сред, обсуждаемое явление сужения модового пятна при увеличении разности показателей преломления или уменьшения длины волны света подробно изучено [14].

Необходимо отметить и устойчивость моды к изгибу световода со смещенной сердцевинкой, проявляющаяся в существовании заметного сигнала в области $\lambda = 658$ нм. Повышенная устойчивость моды к изгибу становится понятной, если обратить внимание на некоторое снижение размеров модового пятна в смещенной сердцевинке по сравнению с сердцевинкой, расположенной в центре световода, при их одинаковых геометрических параметрах.

В заключение статьи необходимо констатировать, что для исследованного спектрального диапазона ($\lambda = 650\text{--}1000$ нм) в имеющихся образцах световодов получить модовое пятно диаметром более 16 мкм нам не удалось. Даже при увеличении диаметра сердцевинки с 12,5 до 20 мкм модовое пятно растет незначительно. Выбранные нами значения параметра k сужают размер пятна моды, а если следовать по пути снижения k , то основная мода вытекает в рассматриваемом спектральном диапазоне [5]. Таковы общие закономерности поведения основной моды в микроструктурированных световодах как с центральной, так и со смещенной сердцевинками. Преимуществом световодов со смещенной сердцевинкой является расширение границы вытекания основной моды на изгибе световода приблизительно на 100–200 нм в коротковолновую область 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. Express*. 2005. V. 13. № 4. P. 1055–1058.
2. *Limpert J., Schmidt O., Rothhardt J., Roser F., Schreiber T., Tunnermann A., Ermeuex S., Yvernault P., Salin F.* Extended single-mode photonic crystal fiber lasers // *Opt. Express*. 2006. V. 14. № 7. P. 2715–2720.
3. *Азрузов П.М., Дукельский К.В., Козлов А.С., Комаров А.В., Петров М.П., Тер-Нерсесянц Е.В., Хохлов А.В., Шевандин В.С.* Модовый состав дырчатых волокон с большой семиэлементной сердцевинкой // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. № 11. С. 73–76.
4. *Дукельский К.В., Комаров А.В., Тер-Нерсесянц Е.В., Хохлов А.В., Шевандин В.С.* Микроструктурированные световоды с большой сердцевинкой // *Оптический журнал*. 2007. Т. 74. № 12. С. 62–65.
5. *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. Express*. 2004. V. 12. № 8. P. 1775–1779.
6. *Birks T.A., Knight J.C., Russel P.St.J.* Endlessly single-mode photonic crystal fibers // *Opt. Lett.* 1997. V. 22. № 13. P. 484–485.
7. *Nielsen M.D., Folkenberg J.R., Mortensen N.A., Bjarklev A.* Bandwidth comparison of photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers // *Opt. Express*. 2004. V. 12. № 3. P. 430–435.
8. *Nielsen M.D., Jacobsen C., Mortensen N.A., Folkenberg J.R., Simonsen H.R.* Low-loss photonic crystal fibers for transmission systems and their dispersion properties // *Opt. Express*. 2004. V. 12. № 7. P. 1372–1376.
9. *Kacik D., Turek I., Martincek I., Canning J., Issa N.A., Lyytikainen K.* Intermodal interference in a photonic crystal fibre // *Opt. Express*. 2004. V. 12. № 15. P. 3465–3470.
10. *Vigne Y., Rosenbluh M.* Spatial modes in a PCF fiber generated continuum // *Opt. Express*. 2005. V. 13. № 24. P. 9721–9725.
11. *Дукельский К.В., Кондратьев Ю.Н., Хохлов А.В., Шевандин В.С., Желтиков А.М., Коноров С.О., Серебрянников Е.Е., Сидоров-Бирюков Д.А., Федотов А.Б., Семенов С.Л.* Микроструктурированные световоды с кварцевой сердцевинкой для получения спектрального суперконтинуума в фемтосекундном диапазоне // *Оптический журнал*. 2005. Т. 72. № 7. С. 57–60.
12. *Mortensen N.A., Folkenberg J.R., Nielsen M.D., Hansen K.P.* Modal cut-off and the V-parameter in photonic crystal fibers // *Opt. Lett.* 2003. V. 28. № 20. P. 1879–1881.
13. *Russel P.St.J.* Photonic-crystal fibers // *J. Lightwave Techn.* 2006. V. 24. № 12. P. 4729–4749.
14. *Jeunhomer L.B.* Single-mode fiber optics. Principles and applications. N. Y. and Basel: M. Dekker, Inc., 1983. 275 p.