



УДК 681.7

ОПТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ ИЗГИБЕ ОДНОМОДОВОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОГО СВЕТОВОДА С БОЛЬШОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ

Ю.А. Гатчин^a, К.В. Дукельский^b, И.Б. Бондаренко^a, А.А. Садыков^{c,d}, В.В. Демидов^e,
Е.В. Тер-Нерсесянц^e

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

^c Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, 010000, Казахстан

^d Казахский институт интеллектуальных систем и высоких технологий, Астана, 010000, Казахстан

^e ОАО «НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация

Адрес для переписки: vovecc@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.02.15, принята к печати 26.02.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-246-252

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Гатчин Ю.А., Дукельский К.В., Бондаренко И.Б., Садыков А.А., Демидов В.В., Тер-Нерсесянц Е.В. Оптические потери при изгибе одномодового микроструктурированного световода с большой сердцевинной // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 2. С. 246–252.

Аннотация. Проведено исследование оптических потерь при изгибе одномодового микроструктурированного световода на основе нелегированного кварцевого стекла с сердцевинной диаметром от 20 до 35 мкм и повышенным относительным содержанием воздуха в дырчатой оболочке. С использованием метода эквивалентного ступенчатого профиля показателя преломления в приближении волноводных параметров микроструктурированного световода (нормированных частоте и поперечном коэффициенте затухания) проанализировано влияние изгиба на спектральное положение границы коротковолнового вытекания мощности основной моды в конструкционную оболочку из кварцевого стекла. По результатам измерения спектральных характеристик затухания излучения в рассматриваемых волокнах обнаружено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Показано, что увеличение степени содержания воздуха в дырчатой оболочке приводит к расширению упомянутой границы в область меньших значений длины волны передаваемого излучения на величину от 150 до 800 нм в зависимости от размеров сердцевинной и условий намотки волокна. При этом режим распространения единственной поперечной моды устанавливается на длине световода 5–10 м за счет существенной разницы в потерях мощности основной и высшей направляемых мод, достигаемой при изгибе волокна. Значение оптических потерь во всех исследованных образцах волокон составило не более 10 дБ/км на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Результаты исследования могут найти применение при проектировании мощных лазерных систем, основными требованиями которых являются сравнительно большой размер модового пятна и высокое качество выходного излучения.

Ключевые слова: микроструктурированный световод, одномодовый режим, большая сердцевина, оптические потери, изгибные потери.

BEND-INDUCED LOSSES IN A SINGLE-MODE MICROSTRUCTURED FIBER WITH A LARGE CORE

Yu.A. Gatchin^a, K.V. Dukel'skii^b, I.B. Bondarenko^a, A.A. Sadykov^{c,d}, V.V. Demidov^e, E.V. Ter-Nersesyants^e

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation

^c L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan

^d Kazakh Institute of Intelligent Systems and High-Technologies, Astana, 010000, Kazakhstan

^e NITIOM Vavilov State Optical Institute, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation

Corresponding author: vovecc@mail.ru

Article info

Received 19.02.15, accepted 26.02.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-246-252

Article in Russian

For citation: Gatchin Yu.A., Dukel'skii K.V., Bondarenko I.B., Sadykov A.A., Demidov V.V., Ter-Nersesyants E.V. Bend-induced losses in a single-mode microstructured fiber with a large core. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 2, pp. 246–252. (in Russian)

Abstract. A study of bend-induced losses in a silica-based single-mode microstructured fiber with a core diameter ranging from 20 to 35 microns and increased relative air content in the holey cladding has been conducted. With the use of the equivalent step-index profile method in approximation of waveguide parameters of microstructured fiber (normalized frequency and normalized transverse attenuation constant) the effect of bending on the spectral position of the fundamental mode short-wavelength leakage boundary has been analyzed. Upon measurement of spectral characteristics of attenuation in the considered fibers good accordance of numerical and experimental data has been found out. It is shown that increase of the air content in the holey cladding leads to expansion of the mentioned boundary to lower wavelengths for the value from 150 to 800 nm depending on the core size and bending conditions. A single-transverse-mode propagation is achieved on fiber length of 5-10 meters due to a substantial difference in losses of fundamental and higher-order guided modes attained by bending. Optical losses in all studied samples are less than 10 dB/km at the wavelength $\lambda = 1550$ nm. The results of the study can be applied in the design of high-power laser systems having such basic requirements as a relatively large mode spot and high beam quality.

Keywords: microstructured fiber, single-mode regime, large core, optical losses, bend-induced losses.

Введение

Акцентированный интерес исследователей к созданию одномодовых световодов с большой сердцевиной (по принятой терминологии – размер которой превышает 10 мкм) обусловлен возрастающей потребностью стратегически приоритетных отраслей промышленности (автомобильной, судостроительной, аэрокосмической) в надежных и высокоэффективных средствах передачи мощных световых потоков технологических лазеров, работающих как в непрерывном, так и в импульсном режимах, с минимальной оптической нелинейностью и высоким порогом разрушения материала. Однако базовое требование к подобным передающим элементам – необходимость работы в режиме основной моды – применительно к технологии кварцевых волоконных световодов со сплошными средами вызывает существенные затруднения технического порядка. В частности, для реализации одномодового световода с сердцевиной диаметром 20 мкм требуется обеспечить поддержание относительной разности показателей преломления сердцевины и оболочки на уровне менее 10^{-3} , что практически недостижимо [1–3].

В последние годы в качестве конкурентоспособной альтернативы технологии монолитных структур для значительного увеличения размеров сердцевины одномодового световода рассматривается технология оптических волокон с дырчатой светоотражающей оболочкой, или микроструктурированных.

Микроструктурированные волокна с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и оболочкой, образованной гексагональной системой воздушных отверстий, обладают световодным эффектом за счет явления полного внутреннего отражения, аналогично волокнам со сплошной оболочкой [4]. Однако, несмотря на схожий механизм удержания излучения в сердцевине, микроструктурированные световоды отличаются от «обычных» волокон рядом преимуществ принципиального характера, например, способностью поддерживать одномодовый режим распространения излучения в неограниченном спектральном диапазоне [5]. Подразумевается, что при выполнении соотношения параметра $k = d/\Lambda < 0,45$ [6–8], характеризующего степень содержания воздуха в дырчатой оболочке (d – диаметр отверстия, Λ – шаг структуры, определяемый как расстояние между центрами соседних отверстий), высшая мода световода не возбуждается ни при каких значениях длины волны вводимого излучения. Это обстоятельство совместно с отсутствием каких-либо ограничений, накладываемых технологией изготовления волокон на разность показателей преломления сердцевины и оболочки, предоставляет возможность увеличения размеров световедущей сердцевины до значений в несколько десятков микрометров с достигаемым качеством выходного излучения, близким к дифракционному пределу.

Вместе с тем в подавляющем большинстве научно-технических приложений, использующих волоконные световоды различного назначения, в том числе в лазерных технологиях, условия эксплуатации оптических волокон так или иначе сопряжены с их многократным изгибом. Прямым следствием такой эксплуатационной особенности является резко выраженный рост потерь излучения основной моды на изгибе волокна. В одномодовых микроструктурированных световодах обсуждаемый рост потерь, обусловленный интенсивным вытеканием мощности основной моды во внешнюю (конструкционную) стеклянную оболочку, наблюдается в коротковолновой области оптического диапазона и прогрессирует по мере увеличения размеров сердцевины, что, в свою очередь, приводит к сокращению рабочего спектрального диапазона [9]. В наших предыдущих работах [10–13] было показано, что на практике одномодовый микроструктурированный световод может быть реализован при значении параметра содержания воздуха $k > 0,45$, когда условие для отсечки высшей моды по фазовым соотношениям (равенство эффективных показателей преломления высшей моды сердцевины и основной моды дырчатой оболочки) не выполняется. При этом режим существования только основной моды во всем спектральном диапазоне достигается за счет значительной (несколько порядков величины) разницы в потерях излучения основной и высшей распространяющихся мод, достаточной для абсолютного затухания мощности высшей моды на длине световода около 10 м.

Целью настоящей работы было развитие концепции дифференциального модового затухания излучения применительно к структурам с большой сердцевиной и четырьмя циклами отверстий в дырчатой

оболочке, ориентированное на улучшение направляемых свойств одномодового световода, и исследование их изгибных характеристик.

Теоретическая модель

Как было выяснено в работах [10–13], геометрические параметры микроструктурированного световода оказывают определяющее влияние на его эксплуатационные характеристики. Предпринятая нами оптимизация конструкции одномодового световода, а именно, увеличение контраста показателей преломления сердцевинки и оболочки, способна в значительной мере расширить функциональные возможности волокон рассматриваемого класса, в особенности в аспекте смещения границы коротковолнового вытекания мощности основной моды на изгибе световода в области меньших значений длины волны передаваемого излучения и вариативности выбора значения эксплуатационного диаметра намотки волокна.

С целью количественной и качественной оценки указанных параметров, а также сопоставления теоретических и экспериментальных данных применительно к серии микроструктурированных световодов с большой сердцевинкой и высокой степенью содержания воздуха в дырчатой оболочке авторами были получены и проанализированы расчетные зависимости потерь мощности основной моды на изгибе волокна от длины волны излучения и радиуса изгиба. За основу был взят метод эквивалентного ступенчатого профиля показателя преломления [14, 15], позволяющий заменить расчет потерь в изогнутом световоде расчетом потерь в прямом световоде с возмущенным профилем показателя преломления.

Согласно данной теоретической модели, расчет потерь мощности основной моды при изгибе микроструктурированного световода производился по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \frac{1}{A_{\text{эфф}}} \frac{\rho}{W} \frac{\exp\left(-\frac{4}{3} \frac{R}{\rho} \frac{\Delta}{V^2} W^3\right)}{\sqrt{W \frac{R}{\rho} + \frac{V^2}{2\Delta W}}},$$

где $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь поля основной моды с гауссовым распределением интенсивности излучения по сечению световода; R – радиус изгиба; $\rho = \Lambda/\sqrt{3}$ – эффективный радиус сердцевинки (Λ – шаг гексагональной структуры волокна); Δ – относительная разность эффективных показателей преломления сердцевинки и оболочки; V – нормированная частота; W – нормированный поперечный коэффициент затухания. Нормированные волноводные параметры микроструктурированного световода определялись в соответствии со следующими выражениями [16]:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \rho \sqrt{n_{\text{кв}}^2 - n_{\text{об}}^2},$$

$$W = \frac{2\pi}{\lambda} \rho \sqrt{n_{\text{с}}^2 - n_{\text{об}}^2},$$

где λ – длина волны излучения, $n_{\text{кв}}$ – показатель преломления стеклянной основы волокна (нелегированного кварцевого стекла), $n_{\text{с}}$ и $n_{\text{об}}$ – эффективные показатели преломления сердцевинки и оболочки соответственно. Значения $n_{\text{с}}$, $n_{\text{об}}$ и $A_{\text{эфф}}$ были получены с использованием полновекторного метода конечных элементов в многофункциональной программной среде COMSOL Multiphysics. Расчет площади поля моды производился по формуле [7]

$$A_{\text{эфф}} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_z(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E_z(x, y)|^4 dx dy},$$

где $E_z(x, y)$ – поперечная составляющая электрического поля.

Экспериментальные образцы

Микроструктурированные световоды вытягивались из преформ, представляющих собой гексагональную систему из калиброванных капилляров внутри опорной трубы, по двухступенчатой технологии [17] с получением на первой стадии предволокна (прототипа световода диаметром 5–7 мм) и на второй стадии – волоконного световода с наружным диаметром 150–300 мкм. В процессе вытягивания световоды покрывались защитным слоем эпоксиакрилата и размещались на стандартных транспортировочных катушках с диаметром намотки 16 см. Для образования световедущей сердцевинки центральный капилляр в преформе заменялся на микроштабик идентичного диаметра. Опорная труба, капилляры и сердцевинный микроштабик изготавливались из сырьевых материалов на основе синтетического кварцевого стекла с минимальным содержанием примесей.

На рис. 1 в качестве примера представлено изображение поперечного сечения микроструктурированного световода, полученного по описанной технологии. Выбор числа циклов воздушных отверстий,

окружающих сердцевину, был остановлен на четырех, что априорно гарантирует минимальное затухание излучения в ближней инфракрасной области спектра [18].

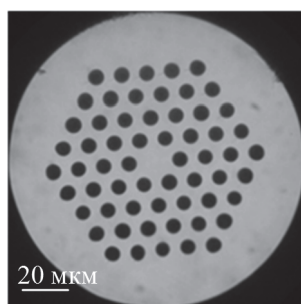


Рис. 1. Изображение поперечного сечения микроструктурированного световода с сердцевинной диаметром 20 мкм

По результатам исследования модового состава излучения, распространяющегося по микроструктурированным световодам с сердцевинной диаметром 20, 25 и 35 мкм и различной величиной относительного содержания воздуха в оболочке (параметр k варьировался в пределах 0,45–0,70), для каждого значения диаметра сердцевинной было определено максимальное значение параметра k , при котором световод длиной в несколько десятков метров поддерживает одномодовый режим передачи излучения. Параметры волокон приведены в таблице.

Диаметр сердцевинной, мкм	Шаг структуры Λ , мкм	Параметр содержания воздуха k	Потери излучения основной моды, дБ/км	Потери излучения высшей моды, дБ/км	Диаметр пятна основной моды, мкм	
					Теория	Эксперимент
20	13,3	0,50	0,028	1260	16,4	16,4
25	17,2	0,55	0,002	1450	20,3	20,2
35	25,0	0,60	9,626	2240	26,9	26,8

Таблица. Геометрические и оптические параметры одномодовых микроструктурированных световодов с большой сердцевинной, расположенных на катушках с диаметром намотки 16 см. Длина волны излучения $\lambda = 1550$ нм

Значения потерь мощности основной и высшей пространственных мод при изгибе микроструктурированного световода были получены из мнимой части эффективного модового показателя преломления, рассчитанного в программной среде COMSOL Multiphysics с использованием оптимизированной модели идеального согласованного слоя [19]. Экспериментальная оценка размеров пятна основной моды производилась методом ближнего поля при возбуждении входного торца одномодового световода излучением полупроводникового лазерного диода и регистрации выходного сигнала анализатором лазерного луча Thorlabs Beam Profiler. Абсолютная погрешность измерения не превышала 0,5 мкм. Теоретическое значение обсуждаемого параметра определялось из выражения для эффективной площади поля основной моды световода, $A_{\text{эфф}} = \pi w^2$ [7], где w – радиус модового пятна.

Из данных таблицы видно, что, как и предполагалось, режим распространения единственной поперечной моды достигается в рассматриваемых структурах за счет значительной разницы в потерях мощности основной и высшей направляемых мод при изгибе световода. Косвенным подтверждением одномодового режима является соответствие расчетного и измеренного значений размера пятна основной моды. Обращает на себя внимание факт увеличения параметра k одномодового световода при масштабировании структуры в область больших значений Λ и неизменных условиях изгиба, что свидетельствует о более интенсивном характере вытекания излучения высшей моды в конструкционную оболочку при увеличении диаметра сердцевинной световода.

Заметим, что расчетные значения коэффициента затухания высшей моды хорошо согласуются с результатами аналогичного исследования [20], проведенного для микроструктур с многоэлементной сердцевинной (сердцевина была образована заменой в преформе не одного, а нескольких центральных капилляров на микроштабик), а также были подтверждены нами экспериментально. В частности, при исследовании модового состава излучения в образцах волокон было установлено, что в ближней инфракрасной области спектра высшая мода практически полностью затухала на длине световода 5–10 м. Исходя из того, что общее затухание излучения высшей моды можно оценить величиной более 10 дБ, получим для нижней границы параметра затухания значение 1000–2000 дБ/км.

Обсуждение результатов

Результаты исследования влияния геометрических параметров дырчатой оболочки одномодового микроструктурированного световода, расположенного на стандартной транспортировочной катушке с диаметром намотки 16 см, на которой обычно проводится измерение оптических параметров световодов, на чувствительность излучения основной моды к изгибу представлены на рис. 2–4. Величина ослабления сигнала в рассматриваемых волокнах определялась методом обрыва, т.е. сравнивались уровни сигналов, полученные при прохождении излучения по измерительному и опорному отрезкам волокон при неизменных условиях возбуждения входного торца световода. Длина образцов при измерении затухания излучения составляла 100 м.

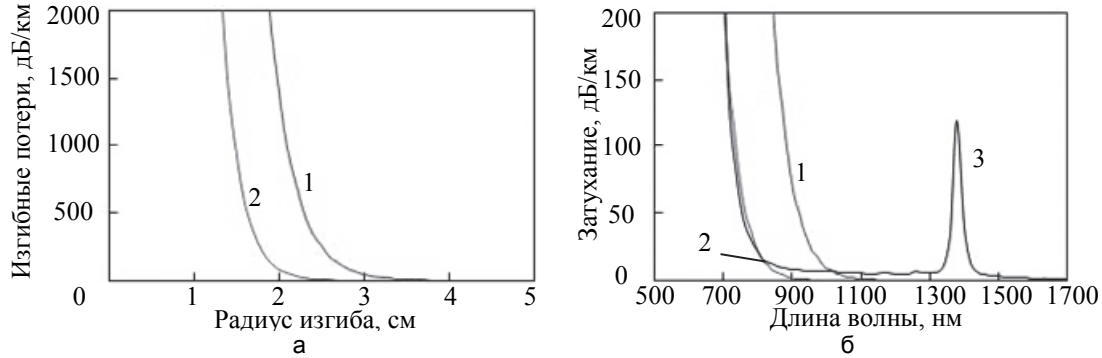


Рис. 2. Изгибные потери на длине волны $\lambda = 1550$ нм (а) и спектральная характеристика затухания излучения (б) в одномодовом микроструктурированном световоде с сердцевинной диаметром 20 мкм

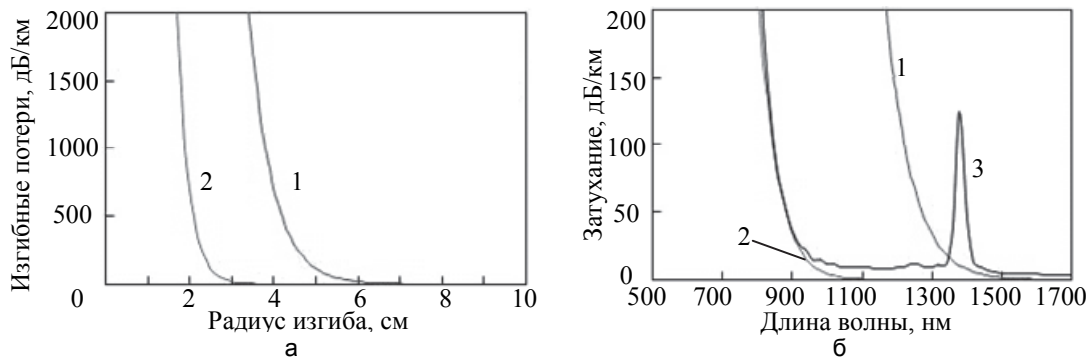


Рис. 3. Изгибные потери на длине волны $\lambda = 1550$ нм (а) и спектральная характеристика затухания излучения (б) в одномодовом микроструктурированном световоде с сердцевинной диаметром 25 мкм

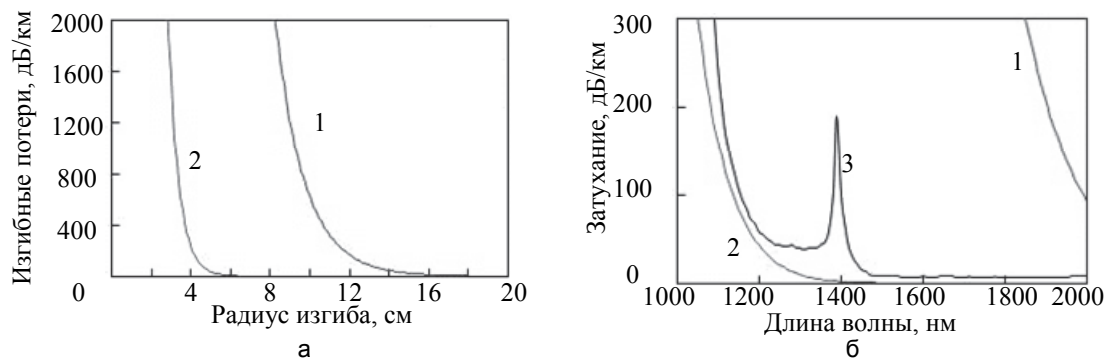


Рис. 4. Изгибные потери на длине волны $\lambda = 1550$ нм (а) и спектральная характеристика затухания излучения (б) в одномодовом микроструктурированном световоде с сердцевинной диаметром 35 мкм

Из зависимостей, приведенных на рис. 2–4, видно, что увеличение содержания воздуха в дырчатой оболочке одномодового микроструктурированного световода по сравнению с теоретически задаваемым значением, обуславливающим отсечку высшей моды по фазовым соотношениям ($k = 0,45$), имеет своим следствием ощутимое снижение чувствительности излучения основной моды к изгибу волокна. Это обстоятельство находит логичное объяснение, если обратиться к теории оптических волокон со сплошной оболочкой. Увеличение величины относительного содержания воздуха в микроструктурированном световоде эквивалентно увеличению разности показателей преломления сердцевинны и оболочки в «обычном» световоде, что способствует возрастанию устойчивости основной моды к изгибу волокна. Более того, отмеченная тенденция, прогрессирующая по мере увеличения размеров сердцевинны

одномодового световода (k возрастает), позволяет минимизировать потери мощности основной моды за счет микроизгибов световодного тракта [21].

Из анализа спектров затухания излучения (рис. 2, б, рис. 3, б и рис. 4, б) видно, что предпринятая нами оптимизация конструкции одномодового микроструктурированного световода предоставляет возможности для расширения границы коротковолнового вытекания основной моды на изгибе в синюю часть спектра приблизительно на 150, 350 и 800 нм для сердцевин диаметром 20, 25 и 35 мкм соответственно. При этом эксплуатация упомянутых волокон возможна как в стандартных условиях намотки (диаметр витка 16 см), так и в более жестких, когда диаметр витка уменьшается до значения 6–8 см, без значительного сокращения размеров модового пятна и прироста затухания излучения в области устойчивого распространения моды.

Рассуждая о сердцевине диаметром 35 мкм, следует отметить, что в диапазоне максимальной прозрачности кварцевого стекла ($\lambda = 1000\text{--}2000$ нм) одномодовый микроструктурированный световод, построенный на принципе фазовой отсечки высшей моды, является слабонаправляющим и фактически нераспространяемым ввиду чрезмерного вытекания мощности основной моды на изгибе. Для сравнения с литературными данными [9] мы перемотали волокно, характеризуемое параметром $k = 0,60$, на катушку диаметром 32 см и измерили по описанной методике характеристику затухания излучения. Минимальное значение затухания не изменилось и составило порядка 10 дБ/км на длине волны $\lambda = 1550$ нм, в то время как спектральное положение границы модового вытекания ожидаемо сместилось в коротковолновую область. В менее жестких условиях изгиба расширение рабочего спектрального диапазона составило около 200 нм.

В заключение отметим хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных, а также добавим, что затухание излучения во всех исследованных образцах волокон составило от 2 до 10 дБ/км на длине волны $\lambda = 1550$ нм.

Заключение

Проведено исследование оптических потерь при изгибе одномодового микроструктурированного световода на основе нелегированного кварцевого стекла с большой (диаметром от 20 до 35 мкм) сердцевиной и повышенным относительным содержанием воздуха в дырчатой оболочке. С использованием метода эквивалентного ступенчатого профиля показателя преломления в приближении волноводных параметров микроструктурированного световода и привлечением экспериментально полученных характеристик затухания излучения проанализировано влияние изгиба на спектральное положение границы коротковолнового вытекания мощности основной моды в конструкционную оболочку. Обнаружено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Отмечено, что одномодовый режим передачи излучения достигается в рассматриваемых волокнах за счет явления дифференциального модового затухания. Показано, что одномодовые световоды со степенью содержания воздуха в оболочке более 0,45 отличаются от аналогов, работающих в условиях фазовой отсечки высшей моды, лучшей устойчивостью основной моды к изгибу или, в другом аспекте, расширенным рабочим спектральным диапазоном.

Литература

1. Tunnermann A., Schreiber T., Roser F., Liem A., Hofer S., Zellmer H., Nolte S., Limpert J. The renaissance and bright future of fibre lasers // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2005. V. 38. N 9. P. S681–S693. doi: 10.1088/0953-4075/38/9/016
2. Taverner D., Richardson D.J., Dong L., Caplen J.E., Williams K., Pentyl R.V. 158- μ J pulses from a single-transverse-mode, large-mode-area erbium-doped fiber amplifier // *Optics Letters*. 1997. V. 22. N 6. P. 378–380.
3. Baggett J.C., Monro T.M., Furusawa K., Richardson D.J. Comparative study of large-mode holey and conventional fibers // *Optics Letters*. 2001. V. 26. N 14. P. 1045–1047.
4. Russell P.St.J. Photonic-crystal fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 2006. V. 24. N 12. P. 4729–4749. doi: 10.1109/JLT.2006.885258
5. Birks T.A., Knight J.C., Russell P.St.J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber // *Optics Letters*. 1997. V. 22. N 13. P. 961–963.
6. Broeng J., Mogilevtsev D., Barkou S.E., Bjarklev A. Photonic crystal fibers: a new class of optical waveguides // *Optical Fiber Technology*. 1999. V. 5. N 13. P. 305–330. doi: 10.1006/ofte.1998.0279
7. Mortensen N.A. Effective area of photonic crystal fibers // *Optics Express*. 2002. V. 10. N 7. P. 341–348.
8. Mortensen N.A., Nielsen M.D., Folkner J.R., Petersson A., Simonsen H.R. Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers // *Optics Letters*. 2003. V. 28. N 6. P. 393–395.
9. Nielsen M.D., Mortensen N.A., Albertsen M., Folkner J.R., Bjarklev A., Bonacinni D. Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers // *Optics Express*. 2004. V. 12. N 8. P. 1775–1779. doi: 10.1364/OPEX.12.001775
10. Агрозов П.М., Дукельский К.В., Козлов А.С., Комаров А.В., Петров М.П., Тер-Нерсисянц Е.В., Хохлов А.В., Шевандин В.С. Модовый состав дырчатых волокон с большой семиэлементной сердцевиной // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. № 11. С. 73–76.

11. Агрузов П.М., Дукельский К.В., Комаров А.В., Тер-Нерсесянц 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.
12. 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.
13. Демидов В.В., Дукельский К.В., Тер-Нерсесянц Е.В., Шевандин В.С. Микроструктурированные одномодовые световоды на основе явления дифференциального модового затухания // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 1. С. 52–57.
14. Sakai J., Kimura T. Bending loss of propagation modes in arbitrary-index profile optical fibers // Applied Optics. 1978. V. 17. N 10. P. 1499–1506.
15. Sakai J. Simplified bending loss formula for single-mode optical fibers // Applied Optics. 1979. V. 18. N 7. P. 951–952.
16. Saitoh K., Koshiha M. Empirical relations for simple design of photonic crystal fibers // Optics Express. 2005. V. 13. N 1. P. 267–274. doi: 10.1364/OPEX.13.000267
17. 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 сердцевиной для получения спектрального суперконтинуума в фемтосекундном диапазоне // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 7. С. 57–59.
18. Демидов В.В., Дукельский К.В., Тер-Нерсесянц Е.В., Шевандин В.С. Исследование одномодового режима работы микроструктурированных световодов с каналами вытекания излучения // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 5. С. 65–70.
19. Berenger J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // Journal of Computational Physics. 1994. V. 114. N 2. P. 185–200. doi: 10.1006/jcph.1994.1159
20. 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.
21. Mortensen N.A., Folkner J.R. Low-loss criterion and effective area considerations for photonic crystal fibres // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2003. V. 5. N 3. P. 163–167. doi: 10.1088/1464-4258/5/3/303

- Гатчин Юрий Арменакович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, gatchin@mail.ifmo.ru
- Дукельский Константин Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, начальник центра, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, kdukel@mail.ru
- Бондаренко Игорь Борисович** – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, igorlitmo@rambler.ru
- Садыков Аскарбек Амиркулович** – доктор технических наук, профессор, профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, 010000, Казахстан; научный руководитель, Казахский институт интеллектуальных систем и высоких технологий, Астана, 010000, Казахстан, aseke89@gmail.com
- Демидов Владимир Витальевич** – младший научный сотрудник, ОАО «НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, vovecc@mail.ru
- Тер-Нерсесянц Егише Вавикович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ОАО «НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, ter@goi.ru
- Yuri A. Gatchin** – D.Sc., Professor, Head of Department, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, gatchin@mail.ifmo.ru
- Konstantin V. Dukel'skii** – PhD, Associate professor, Director of Scientific Center, Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation, kdukel@mail.ru
- Igor B. Bondarenko** – PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, 197101, Russian Federation, igorlitmo@rambler.ru
- Askarbek A. Sadykov** – D.Sc., Professor, Professor, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan; Scientific Adviser, Kazakh Institute of Intelligent Systems and High-Technologies, Astana, 010000, Kazakhstan, aseke89@gmail.com
- Vladimir V. Demidov** – junior scientific researcher, NITIOM Vavilov State Optical Institute, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, vovecc@mail.ru
- Egishe V. Ter-Nersesyants** – PhD, senior scientific researcher, NITIOM Vavilov State Optical Institute, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, ter@goi.ru