



УДК 681.7.068, 535.3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КВАРЦЕВЫХ СВЕТОВОДОВ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ГАБАРИТНЫМ ДЕФЕКТОМ ГРАДИЕНТНОГО ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДЛЯ СЕНСОРОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА МАЛОМОДОВЫХ ЭФФЕКТАХ

В.В. Демидов^а, Е.В. Тер-Нерсесянц^а, А.В. Бурдин^б, В.А. Бурдин^б, А.Ю. Минаева^б, А.В. Хохлов^а,
А.В. Комаров^а, С.В. Устинов^а, К.В. Дукельский^{с,д}

^а АО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация

^б Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443010, Российская Федерация

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

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

Автор для переписки: vovecc@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.12.16, принята к печати 14.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-224-233

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Демидов В.В., Тер-Нерсесянц Е.В., Бурдин А.В., Бурдин В.А., Минаева А.Ю., Хохлов А.В., Комаров А.В., Устинов С.В., Дукельский К.В. Технологические вопросы изготовления кварцевых световодов с центральным габаритным дефектом градиентного профиля показателя преломления для сенсоров волоконно-оптических датчиков на маломодовых эффектах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 224–233. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-224-233

Аннотация

Представлены результаты исследования основных технологических вопросов полного цикла изготовления кварцевых многомодовых волоконных световодов с градиентным профилем показателя преломления, отличительной особенностью которого является наличие центрального дефекта в виде габаритного провала. Проанализированы возможности и оптимизированы условия процесса MCVD-синтеза преформ световодов для практической реализации указанного дефекта. Проведено исследование влияния нерегулярностей геометрии световодов класса 50/125 мкм с габаритным провалом градиентного профиля показателя преломления в центре сердцевин, индуцированных вытягиванием в режиме ручного поддержания постоянства внешнего диаметра, на коэффициент затухания распространяющегося по ним излучения. Показано, что отклонение диаметра световодов на величину $\pm 3,5$ мкм от номинального значения приводит к увеличению затухания на 2–5 дБ/км в спектральной области $\lambda = 1310$ нм относительно аналогов, при изготовлении которых применялся режим автоматического контроля диаметра. Установлено, что во втором случае световод с параболическим профилем показателя преломления, соответствующим числовой апертуре 0,20, и глубиной провала 0,0115 демонстрирует затухание на уровне 5 дБ/км в области второго и третьего окон прозрачности оптического волокна. С применением статистики Вейбулла дана оценка механических свойств световодов, полученных при разных температурах вытягивания. По результатам оценки прочность на растяжение составила 5,07–5,49 ГПа, что сопоставимо с прочностными характеристиками кварцевых оптических волокон связного типа. Полученные многомодовые световоды представляют интерес для создания на их основе чувствительных элементов регистрации внешних воздействий в системах волоконно-оптических датчиков сенсорных сетей, базирующихся на маломодовых эффектах.

Ключевые слова

кварцевый многомодовый волоконный световод, многомодовое оптическое волокно, градиентный профиль показателя преломления, дефект профиля показателя преломления, маломодовые эффекты, химическое газофазное осаждение, вытягивание оптических волокон, микроизгибы, коэффициент затухания излучения, механическая прочность

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-50089 мол_нр.

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MANUFACTURING SILICA OPTICAL FIBERS WITH LARGE CENTRAL DEFECT OF GRADED REFRACTIVE INDEX PROFILE FOR FIBER OPTIC SENSORS BASED ON FEW-MODE EFFECTS

V.V. Demidov^a, E.V. Ter-Nersesyants^a, A.V. Bourdine^b, V.A. Burdin^b, A.Yu. Minaeva^b, A.V. Khokhlov^a,
A.V. Komarov^a, S.V. Ustinov^a, K.V. Dukelskii^{c,d}

^a Research and Technological Institute of Optical Materials All-Russia Scientific Center "S.I. Vavilov State Optical Institute", Saint Petersburg, 192171, Russian Federation

^b Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443010, Russian Federation

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

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

Corresponding author: vovecc@mail.ru

Article info

Received 19.12.16, accepted 14.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-224-233

Article in Russian

For citation: Demidov V.V., Ter-Nersesyants E.V., Bourdine A.V., Burdin V.A., Minaeva A.Yu., Khokhlov A.V., Komarov A.V., Ustinov S.V., Dukelskii K.V. Technological aspects of manufacturing silica optical fibers with large central defect of graded refractive index profile for fiber optic sensors based on few-mode effects. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 224–233 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-224-233

Abstract

The paper deals with results of the study on the main technological aspects relating to a full production cycle of silica multimode graded-index fibers with the refractive index profile having central defect in the form of a large dip. Preform synthesis conditions for implementation of the mentioned defect via MCV method have been analyzed and optimized. We have carried out research of the effect of geometrical irregularities, induced by drawing optical fibers under the manual control of the outer diameter stability, on attenuation coefficient of the graded-index 50/125 μm optical fibers with a large dip in the center of the refractive index profile. It is shown that variations of the outer diameter within the limits $\pm 3.5 \mu\text{m}$ lead to an increase of attenuation by 2–5 dB/km at the wavelength $\lambda = 1310 \mu\text{m}$ as compared to the optical fibers fabricated under the automatic maintenance of the outer diameter stability. It has been determined that in the latter case fibers with the parabolic refractive index profile, corresponding to numerical aperture of 0.20, and the dip depth equal to 0.0115 demonstrate the attenuation about 5 dB/km in the second and third optical fiber transmission windows. Applying the Weibull distribution, a statistical evaluation of mechanical properties of the optical fibers drawn at various temperatures has been carried out. Based upon measurements, tensile strength of the fibers was estimated to be 5.07–5.49 GPa, that is comparable with the strength properties of silica telecom fibers. The manufactured multimode fibers are attractive candidates for developing sensing elements of registering external influences in systems of fiber-optic sensor networks based on few-mode effects.

Keywords

silica optical fiber, graded-index multimode fiber, graded-index profile, refractive index profile defect, few-mode effects, chemical vapor deposition, optical fiber drawing, microbending, attenuation coefficient, mechanical strength

Acknowledgements

The reported study was funded by the RFBR according to the research project No. 16-37-50089 mol_nr.

Введение

В настоящее время кварцевые многомодовые волоконные световоды (МВС) с градиентным профилем показателя преломления (ППП) являются базовым элементом компактных многопортовых инфокоммуникационных сетей, соединительные линии которых отличаются сравнительно малой протяженностью (формально – до 2 км, на практике – несколько сотен или даже десятков метров), совмещающая высокие скорости передачи информации и эффективность согласования с лазерными источниками [1–3].

Переход к мультигигабитным скоростям требует применения в оптических модулях активного оборудования таких сетей когерентных источников лазерного излучения [1, 3–5]. Использование последних в сочетании с МВС формирует режим распространения ограниченного числа модовых составляющих (от буквально двух до нескольких десятков), или маломодовый режим [5, 6]. Ключевым фактором, определяющим возможность функционирования МВС в подобном режиме, становится величина дифференциальной модовой задержки (ДМЗ) [1, 3–5], обусловленная, в том числе, отклонениями ППП от градиентной формы. Именно по этой причине МВС первого поколения ОМ1.. ОМ2 с технологическим дефектом в центральной части ППП в виде габаритного провала, для которых характерно сильное проявление эффекта ДМЗ [7–9] и, соответственно, неприемлемо низкое значение ширины полосы пропускания сигнала, были заменены в мультигигабитных сетях новым поколением МВС категории ОМ3.. ОМ4 [5].

С другой стороны, как показано в ряде публикаций авторов [9–12], обсуждающих результаты разработки и апробации альтернативного существующим подхода к регистрации локальных либо распределенных внешних воздействий (например, механических или температурных) в системах волоконно-оптических датчиков сенсорных сетей на маломодовых эффектах, практический интерес представляет использование МВС как раз с сильным проявлением ДМЗ. Речь идет об анализе и сопоставлении «опорной» и «текущей» форм маломодового оптического сигнала короткой длительности, детектируемого на

выходе МВС. ДМЗ в данном случае способствует изменению характера импульсного отклика после образования за счет упомянутого воздействия новых микро- и макроизгибов, оказывающих влияние на процессы модовой конверсии в оптическом волокне.

За последние тридцать лет вопросы, касающиеся нюансов технологии изготовления кварцевых МВС, изучены достаточно полно [13–16]. Однако усилия разработчиков были направлены преимущественно на решение проблемы устранения дефекта в центре ППП для минимизации ДМЗ, в то время как получению МВС с контролируемой величиной дефекта, ориентированного как раз на максимальное проявление эффекта ДМЗ, внимание практически не уделялось. По этой причине целью настоящей работы было исследование технологических аспектов в рамках полного цикла производства МВС с дефектом градиентного ППП в центре сердцевины, в числе основных требований к которым следует отметить приемлемое значение коэффициента затухания передаваемого излучения и адекватную величину механической прочности, существенных для обеспечения корректной работы указанных систем волоконно-оптических датчиков.

Исследование особенностей синтеза преформ волоконных световодов

Как известно, получение кварцевого волоконного световода состоит из двух стадий, а именно, синтеза преформы цилиндрической формы методами химического осаждения диоксида кремния (SiO_2) из газовой фазы и вытягивания из ее расплавленного конца собственно световода в защитном покрытии [13–16]. Для изготовления преформ МВС использовался освоенный авторами [17–21] метод модифицированного химического газозафазного осаждения (MCVD – modified chemical vapor deposition), основным преимуществом которого является изолированность реакционной зоны и линий подачи к ней реагентов от внешней среды.

Суть процесса, схематически изображенного на рис. 1, заключается в следующем. Парогазовая смесь, состав которой формируется регулируемой подачей сухих газов-носителей (кислорода или аргона) через барботеры с легколетучими жидкими реагентами (SiCl_4 , GeCl_4 , POCl_3 , BBr_3), разбавляется кислородом и направляется во внутреннее пространство вращающейся кварцевой трубы. Нагрев трубы пламенем перемещающейся со скоростью несколько миллиметров в секунду газовой горелки до температуры около $1500\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к гетерогенной реакции, в результате которой образуются мелкодисперсные частицы оксидов. Частицы осаждаются на внутренней поверхности трубы и спекаются до прозрачного состояния, образуя за один проход горелки слой стекла с определенным значением показателя преломления. В ряде случаев получение в преформе заданного ППП осуществляется путем подачи внутрь трубы газообразных фторсодержащих соединений (SiF_4 , SF_6 , CCl_2F_2 и др.). После нанесения стеклообразных слоев оболочки и сердцевины происходит высокотемпературное ($2000\text{--}2300\text{ }^\circ\text{C}$) сжатие трубы в стержень, из которого затем вытягивается световод.

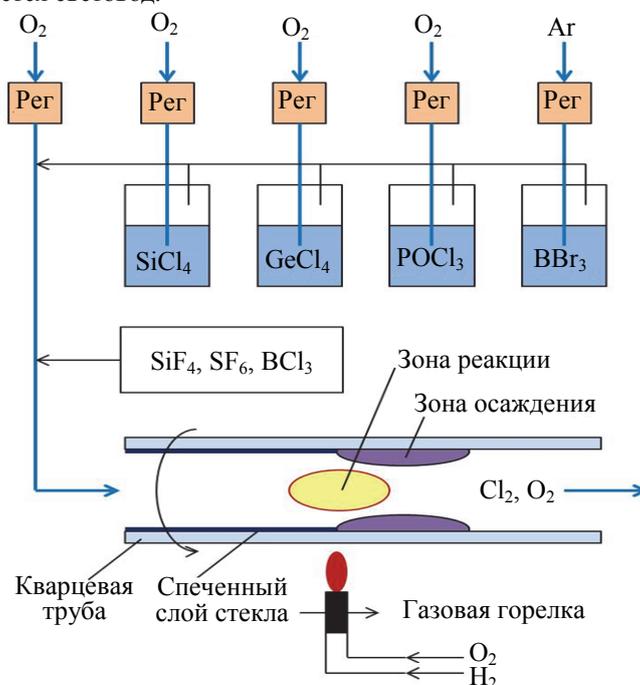


Рис. 1. Схема синтеза преформы волоконного световода методом MCVD («Per» – регулятор подачи газов)

В данной работе синтез преформ МВС осуществлялся на основе кварцевых труб с низким содержанием примесей различных металлов и гидроксильных групп. Нанесение слоев оболочки производи-

лось в оксидной системе $P_2O_5-B_2O_3-SiO_2$, показатель преломления которой был близок по значению к показателю преломления нелегированного кварцевого стекла. Отказ от осаждения на внутренней поверхности трубы исключительно SiO_2 был продиктован стремлением к снижению температурного режима спекания на 200–250 °С за счет низкой вязкости стекла во избежание деформации трубы в радиальном направлении. Основная сложность на этапе создания легкоплавких слоев оболочки заключалась в согласовании расходов $POCl_3$ и BCl_3 для исключения образования пузырей и депрессии показателя преломления.

Формирование слоев сердцевин выполнялось композицией $GeO_2-P_2O_5-SiO_2$ с последовательным увеличением в каждом из 40 проходов горелки расхода потока $GeCl_4$ относительно фиксированного расхода потока $SiCl_4$ в подаваемой внутрь трубы парогазовой смеси. Солегирирование добавками пентаоксида фосфора (P_2O_5) имело своей целью, как и в предыдущем случае, снижение рабочей температуры процесса. На завершающих проходах с противоположного конца трубы в ее внутреннее пространство подавалось положительное давление в 10^3 Па, препятствовавшее преждевременному сжатию трубы в стержень силами поверхностного натяжения.

В градиентном МВС изменение ППП описывается зависимостью [1, 4, 22]

$$n^2(r) = n_1^2 \left(1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right), \quad (1)$$

где n_1 – максимальное значение показателя преломления, соответствующее центру сердцевин; r – радиальная координата; a – радиус сердцевин; Δ – относительная разность показателей преломления сердцевин и оболочки; α – параметр профиля.

Считая процесс образования и консолидации оксидных частиц стационарным (количество осаждаемого за каждый проход горелки стекла остается неизменным), можно перейти от зависимости (1) к выражению для расхода потока $GeCl_4$ v_n [13]:

$$v_n = v_{nt} \left(1 - 2\Delta R_n^\alpha \right), \quad (2)$$

где n – порядковый номер слоя стекла в направлении центра трубы; nt – общее количество слоев; R_n – расстояние от центра трубы до n -го слоя.

С учетом преобразования [13] $R_n = K(nt-n)^{0,5}$, где K – параметр, определяемый геометрией трубы, соотношение (2) может быть сведено к виду

$$v_n = v_{nt} \left(1 - 2\Delta K^\alpha (nt - n)^{0,5\alpha} \right). \quad (3)$$

Полагая в выражении (3) $\alpha = 2$ (оптимальный с точки зрения минимальной межмодовой дисперсии параболический ППП) и $\Delta = 0,01$, обеспечивающую значение числовой апертуры на уровне 0,20, получим

$$v_n = v_{nt} \left(1 - 0,02K^2 (nt - n) \right). \quad (4)$$

Выражение (4) принималось за базовое при выборе расходов потоков $GeCl_4$ и $SiCl_4$ в процессе формирования градиентного ППП. На рис. 2 приведены ППП серии изготовленных преформ с отношением диаметров сердцевин и оболочки 0,4 (под класс МВС 50/125 мкм) и габаритным провалом в центральной части, измеренные с помощью рефрактометра P-101 компании York Technologies.

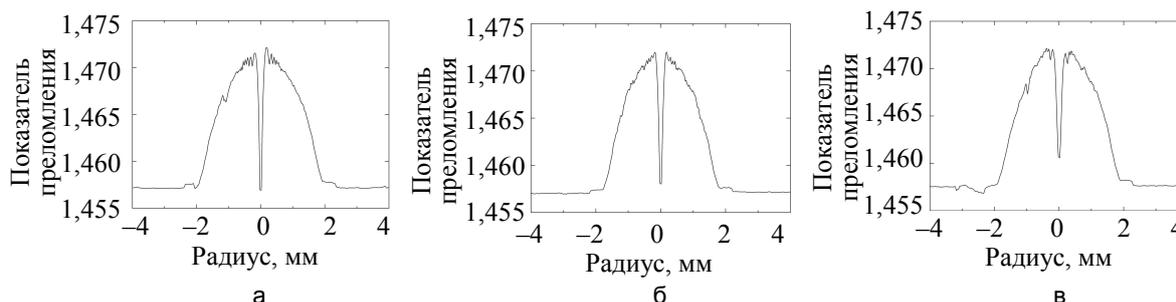


Рис. 2. Профили показателей преломления преформ волоконных световодов с глубиной провала: $\Delta n = 0,015$ (а); $\Delta n = 0,014$ (б); $\Delta n = 0,0115$ (в)

Согласно сформулированной выше цели работы, значительное внимание было уделено контролю величины габаритного провала в центре ППП, представляющей интерес с позиции усиления/ослабления в МВС эффекта ДМЗ в зависимости от параметров передаваемого маломодового оптического сигнала. Физическая природа появления провала хорошо изучена и обусловлена диффузией германия из глуболежащих слоев стекла к поверхности с последующим его испарением по мере высокотемпературного сжатия трубы в стержень [13, 14, 23].

В первой серии преформ был применен способ снижения слоистой неоднородности синтезируемого германосиликатного стекла, что достигалось подачей в реакционную зону паров $POCl_3$ в процессе осаждения и консолидации оксидных частиц. Эта мера способствовала получению ППП, в котором пока-

затели преломления нижней точки провала и оболочки были уравнены (рис. 2, а). Последовательное уменьшение глубины провала, проиллюстрированное на рис. 2, б, в, оказалось возможным благодаря компенсации испарения германия за счет прокачки внутри полости малых концентраций GeCl_4 в атмосфере осушенного кислорода на этапе сжатия трубы.

Профили преформ второй серии (рис. 3) демонстрируют возможности не менее эффективного подхода к управлению глубиной провала в центре сердцевины, в том числе преобразование его в дефект альтернативного вида – пик (рис. 3, в).

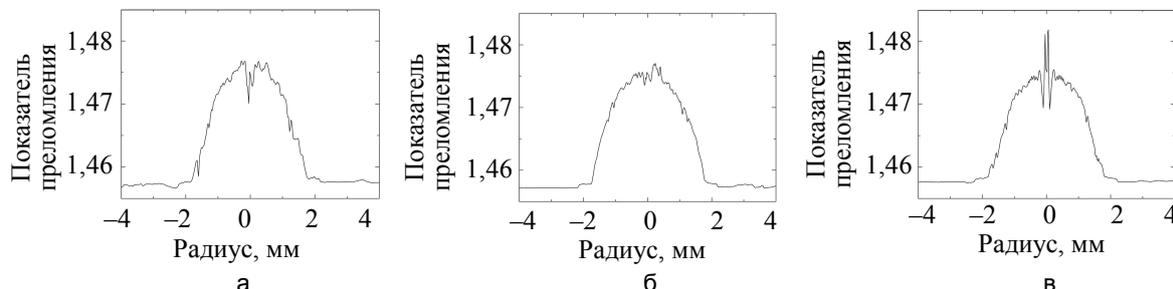


Рис. 3. Профили показателей преломления преформ волоконных световодов с глубиной провала: $\Delta n = 0,002-0,003$ (а); $\Delta n \approx 0$ (б); $\Delta n = -(0,004-0,005)$ (в)

Частичное (рис. 3, а) и практически полное (рис. 3, б) устранение провала было реализовано путем высокотемпературного газофазного травления обедненной германием внутренней поверхности трубы совместно с уменьшением размеров ее полости до 3 мм. Для формирования скачка показателя преломления в центральной части профиля операцию финального сжатия трубы проводили в условиях, аналогичных первому описанному подходу, в результате чего удалось подобрать такие технологические режимы, которые обеспечивали не только полную компенсацию испарения германия, но и некоторое увеличение его содержания в синтезированном стекле.

Исследование влияния условий вытягивания волоконных световодов на их оптические и механические свойства

Вытягивание МВС из полученных преформ производилось на вертикально ориентированной установке, оснащенной высокотемпературной (1900–2300 °С) печью разогрева преформы, блоком подачи ее с постоянной скоростью в жаровое пространство печи, механизмом вытягивания оптического волокна, узлом нанесения на его наружную поверхность полимерного защитного покрытия, а также устройством намотки на приемную катушку.

Поскольку объектом исследования в настоящей работе являлись градиентные МВС с сильным проявлением ДМЗ для применения в качестве чувствительных элементов систем регистрации внешних воздействий на маломодовых эффектах, представлялось обоснованным смоделировать подобное воздействие и оценить его влияние на наиболее важные с практической точки зрения свойства волокон.

Результатом физического воздействия на световод, если речь не идет о его разрушении, в первую очередь следует считать искажение геометрии микро- или макроскопического характера, которое отсутствовало в тракте до совершения упомянутого воздействия. Применительно к МВС с параболическим ППП и числовой апертурой 0,20 справедливо говорить о высокой устойчивости оптических параметров к макроизгибам: прирост затухания не превышает 0,0015 дБ/виток на длине волны излучения $\lambda = 1310$ нм при изгибе по диаметру 75 мм [24]. Однако ситуация изменяется коренным образом при наличии искажений, продольный размер которых сопоставим или менее размеров сердцевины волокна: увеличение затухания на относительно коротком отрезке может составлять десятки дБ/км [25, 26]. Для исследования чувствительности МВС к макроизгибам проводился сравнительный анализ значений затухания в световодах идентичной длины, вытянутых с использованием режимов автоматического и ручного поддержания постоянства внешнего диаметра в 125 мкм. Преформы оптических волокон характеризовались ППП, приведенным на рис. 2, в, который был отмечен ранее [27] как один из наиболее благоприятных для сильного проявления эффекта ДМЗ.

Из рис. 4, а, видно, что градиентный МВС с габаритным провалом ППП глубиной $\Delta n = 0,0115$ в центре сердцевины, изготовленный в штатном автоматическом режиме, отличается узким разбросом значений диаметра ($\pm 1,5$ мкм), близким по величине к одноименному параметру коммерчески доступных аналогов [24]. При этом очевидна слабая зависимость σ от температуры вытягивания, о чем свидетельствуют соответствующие кривые на рис. 5. Для образца, получение которого производилось в режиме ручного контроля показаний диаметра, характерна обратная картина: разброс значений двукратно возрастает ($\pm 3,5$ мкм), появляются квазипериодические осцилляции диаметра с локальными всплесками величиной более 130 мкм (рис. 4, б), увеличивается среднеквадратичное отклонение. Обращает на себя внимание и другая особенность, а именно, рост параметра σ по мере повышения температуры вытягивания, что обу-

словлено, по-видимому, снижением вязкости стекла в области адиабатического преобразования преформы в волокно [13].

Таким образом, использование режимов автоматического и ручного поддержания постоянства внешнего диаметра позволило получить строительные длины МВС с двумя принципиально разными статистиками распределения нерегулярностей по длине оптического волокна. В дальнейшем образцы поступали на участок метрологического контроля, где методом обратного рассеяния [28] проводилось измерение коэффициента затухания передаваемого по ним излучения (таблица).

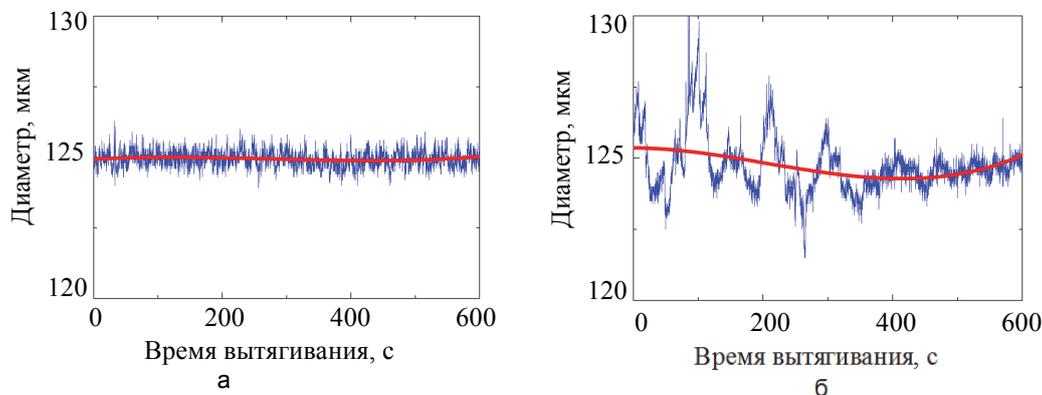


Рис. 4. Показания диаметра волоконных световодов, вытянутых в режимах автоматического (а) и ручного (б) поддержания постоянства диаметра

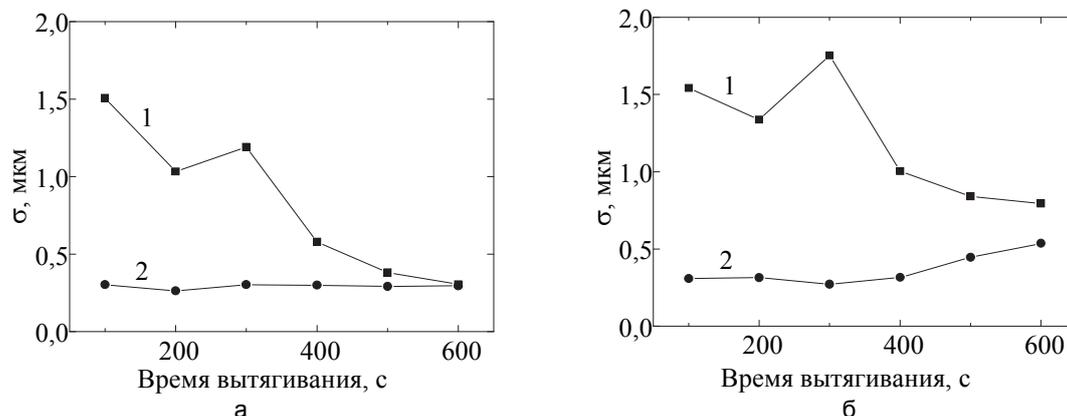


Рис. 5. Среднеквадратичное отклонение σ диаметра волоконных световодов, вытянутых при температуре: 2000 °С (а) и 2100 °С (б) в ручном (1) и автоматическом (2) режимах

Образец	Температура вытягивания, °С	Режим вытягивания	Длина, м	Коэффициент затухания излучения, дБ/км	
				$\lambda = 850 \text{ нм}$	$\lambda = 1310 \text{ нм}$
А-1	2000	автоматический	500	3,685	3,844
А-2	2000	автоматический	2000	3,781	4,406
Р-1	2000	ручной	500	3,967	5,966
Р-2	2000	ручной	2000	4,317	7,005
А-3	2100	автоматический	500	4,400	5,101
А-4	2100	автоматический	3000	4,383	5,122
Р-3	2100	ручной	500	7,059	8,190
Р-4	2100	ручной	3000	8,524	10,091

Таблица. Затухание сигнала в градиентных волоконных световодах с провалом профиля показателя преломления в центре сердцевины

По данным, представленным в таблице, можно сделать однозначный вывод об увеличении затухания в световодах, вытянутых с ручным контролем, относительно оптических волокон, произведенных в автоматическом режиме. Это обстоятельство является следствием рассеяния мощности на распределенных с разной плотностью индуцированных продольных микронеоднородностях. При этом, как следует из экспериментальных данных, повышение температуры вытягивания приводит к росту затухания. Схожий эффект наблюдается и в случае увеличения строительной длины волокна. Первый процесс связан, как уже было отмечено выше, с излишним размягчением стекла в условиях пониженной вязкости, а второй –

с дополнением микродеформационного спектра новыми компонентами, пространственная частота которых может совпадать с разностью постоянных распространения мод высшего и низшего порядков.

Измерение методом обрыва [28] спектральной зависимости затухания оптического излучения в образцах МВС показало нехарактерное для световодов с градиентным ППП ослабление сигнала по мере увеличения длины волны (рис. 6).

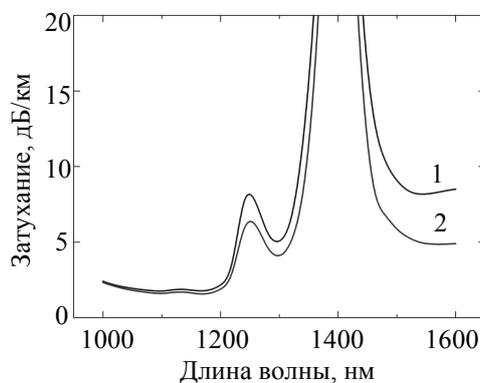


Рис. 6. Спектральная зависимость затухания в образцах А-3 (1) и А-1 (2)

Как видно из рис. 6, ослабление сигнала более акцентированно проявляется для световодов, изготовленных в условиях повышенной температуры. Однако на этот раз рост коэффициента затухания не связан с низковязким состоянием стекла в горячей зоне печи. В качестве причины столь неравномерного спектра оптических потерь следует указать три физических явления:

- наличие в составе стекла сердцевинины P_2O_5 , имеющего обертоны поглощения в области $\lambda = 1500\text{--}1600$ нм;
- наличие в составе стекла оболочки V_2O_5 , вызывающего рост затухания на длине волны более 1200 нм;
- избыточное содержание в составе стекла сердцевинины гидроксильных групп.

Оптимизация состава стекла и технологических режимов осаждения слоев оболочки и сердцевинины в процессе MCVD-синтеза преформ МВС с центральным дефектом градиентного ППП позволит в дальнейшем сократить затухание излучения в световодах, что несколько упростит обработку данных в системах волоконно-оптических датчиков сенсорных сетей на маломодовых эффектах. С другой стороны, достижение предельно низких значений затухания, существенных для связанных приложений, в данном случае является второстепенной задачей.

Несколько слов необходимо сказать о механических свойствах полученных световодов, определяющих, наравне с оптическими характеристиками, потенциальные возможности применения их в реальных приборах и устройствах. В эксплуатационной практике оптические волокна располагаются на катушках различного диаметра либо закладываются в кабель, поэтому испытывают многократные растягивающие и сжимающие напряжения, которые при отсутствии должного контроля могут приводить к их быстрому разрушению. По этой причине разработчики стремятся к доведению показателей прочности волокон в полимерном покрытии до уровня 5,5–6 ГПа, гарантирующего бесперебойную эксплуатацию под нагрузкой в течение 20–25 лет [29].

Как следует из данных таблицы, минимальные значения затухания излучения были зафиксированы в МВС, полученных при умеренной температуре вытягивания в 2000 °С, что, однако, не является гарантией их приемлемой механической прочности. По опыту, последняя обеспечивается при более высоких температурах за счет интенсивной тепловой обработки поверхности преформы. Авторами была произведена оценка прочности световодов, вытянутых при двух разных температурах.

Исследование механических свойств МВС проводилось методом растяжения до разрыва коротких (около 1 м) отрезков со скоростью 200 мм/мин в группе из 20 таких отрезков. Набор данных представлялся в терминах статистики Вейбулла, согласно которой вероятность разрушения образца F регламентируется выражением [13]

$$\ln \ln(1 - F)^{-1} = m \ln(\sigma_0) + \ln(l),$$

где σ_0 – величина разрушающего напряжения; l – длина тестируемого образца; m – статистический параметр, определяемый как угол наклона графика к оси абсцисс.

На рис. 7 приведены вейбулловские распределения прочности на растяжение для образцов А-1 и А-3, вытянутых при температуре 2000 и 2100 °С соответственно.

Исследование показало, что при уменьшении температуры вытягивания от 2100 до 2000 °С прослеживается тенденция к снижению прочности на растяжение МВС в среднем от 5,49 до 5,07 ГПа. Последнее значение сопоставимо с показателем прочности коммерчески доступных кварцевых световодов связанного типа, однако находится на нижней его границе. Задача дальнейших разработок, таким образом,

сводится к усовершенствованию как оптических, так и механических свойств, которые позволят использовать градиентные МВС с дефектом ППП в центре сердцевины в сенсорных сетях.

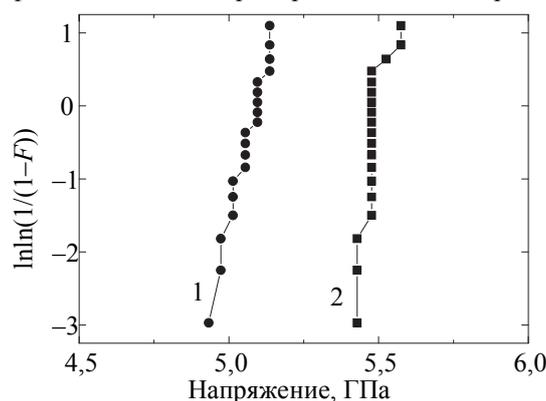


Рис. 7. Статистика Вейбулла для образцов А-1 (1) и А-3 (2)

Заключение

В работе представлены результаты исследования технологических вопросов, касающихся полного цикла изготовления кварцевых многомодовых волоконных световодов с градиентным профилем показателя преломления, отличительной особенностью которого является наличие центрального дефекта в виде габаритного провала. Проанализированы возможности и оптимизированы условия процесса MCVD-синтеза преформ световодов для практической реализации указанного дефекта. Рассмотрены и реализованы два механизма управления глубиной провала, основанные на компенсации испарения германия подачей малых концентраций GeCl_4 в потоке осушенного кислорода на этапе финального сжатия трубы и высокотемпературном травлении обедненного германием слоя трубы фторсодержащим реагентом. Определены технологические параметры процесса, позволяющие преобразовать провал в альтернативный вид дефекта – пик в центре сердцевины. Проведено исследование влияния нерегулярностей геометрии световодов класса 50/125 мкм с габаритным провалом градиентного профиля показателя преломления в центре сердцевины, индуцированных вытягиванием в режиме ручного поддержания постоянства внешнего диаметра, на коэффициент затухания распространяющегося по ним излучения. Показано, что отклонение диаметра световодов на величину $\pm 3,5$ мкм от номинального значения с отдельными всплесками более 5 мкм приводит к увеличению затухания на 2–5 дБ/км в спектральной области $\lambda = 1310$ нм относительно аналогов, при изготовлении которых применялся режим автоматического контроля диаметра. Установлено, что во втором случае световод с параболическим профилем показателя преломления, соответствующим числовой апертуре 0,20, и глубиной провала 0,0115 демонстрирует затухание на уровне 5 дБ/км в области второго и третьего окон прозрачности оптического волокна. С использованием теории Вейбулла произведена статистическая оценка механических свойств световодов, полученных при разных температурах вытягивания. По результатам оценки прочность на растяжение составила 5,07–5,49 ГПа, что сопоставимо с прочностными характеристиками кварцевых оптических волокон связанного типа. Полученные многомодовые световоды представляют интерес для создания на их основе чувствительных элементов регистрации внешних локальных и распределенных воздействий в системах волоконно-оптических датчиков сенсорных сетей, базирующихся на маломодовых эффектах.

Литература

1. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРарт, 2003. 288 с.
2. Смирнов И.Г. Структурированные кабельные системы: проектирование, монтаж и сертификация. М.: Экон-Информ, 2005. 348 с.
3. Семенов А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС. М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. 632 с.
4. Bottacchi S. Multi-Gigabit Transmission over Multimode Optical Fibre: Theory and Design Methods for 10GbE Systems. JohnWiley&Sons, 2006. 670 p.
5. Бурдин А.В. Маломодовый режим передачи оптических сигналов по многомодовым волокнам: приложения в современных инфокоммуникациях. Самара: ПГУТИ, 2011. 274 с.
6. Ellis A.D. The nonlinear Shannon limit and the need for new fibers // Proc. SPIE. 2012. V. 8434. Art. 84340H. doi: 10.1117/12.928093

References

1. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Optical Fibers for Communication Lines*. Moscow, LESARart Publ., 2003, 288 p. (In Russian)
2. Smirnov I.G. *Structured Cabling Systems: Design, Installation and Certification*. Moscow, Ekon-Inform, 2005, 348 p. (In Russian)
3. Semenov A.B. *Fiber-Optic Subsystems of Modern Structured Cabling Systems*. Moscow, Academia IT-DMK Press, 2007, 632 p. (In Russian)
4. Bottacchi S. *Multi-Gigabit Transmission over Multimode Optical Fibre: Theory and Design Methods for 10GbE Systems*. JohnWiley&Sons, 2006, 670 p.
5. Burdin A.V. *Low-Mode Optical Signal Transmission Mode for Multimode Fibers: Application to Modern Infocommunications*. Samara, PGUTI Publ., 2011, 274 p.
6. Ellis A.D. The nonlinear Shannon limit and the need for new fibers. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8434, art. 84340H. doi: 10.1117/12.928093

7. Бурдин А.В. Дифференциальная модовая задержка кварцевых многомодовых оптических волокон разных поколений // Фотон-Экспресс. 2008. № 5–6. С. 20–22.
8. Бурдин А.В., Яблочкин К.А. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи // Инфокоммуникационные технологии. 2010. Т. 8. № 2. С. 22–27.
9. Бурдин А.В., Дмитриев Е.В., Прапорщиков Д.Е., Севрук Н.Л. Применение кварцевых многомодовых волоконных световодов с габаритным центральным дефектом профиля показателя преломления в распределенных сенсорах волоконно-оптических датчиков на базе маломодовых эффектов // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 3. С. 252–279.
10. Kafarova A.M., Faskhutdinov L.M., Kuznetsov A.A. et al. Quasiinterferometric scheme improved by fiber Bragg grating for detection of outer mechanical stress influence on distributed sensor being silica multimode optical fiber operating in a few-mode regime // Proc. SPIE. 2016. V. 9807. Art. 98070K. doi: 10.1117/12.2234567
11. Бурдин А.В., Василец А.А., Бурдин В.А., Морозов О.Г. Распределенный сенсор на многомодовых оптических волокнах, дополненных волоконной решеткой Брэгга, функционирующих в маломодовом режиме передачи сигнала // Фотон-экспресс. 2016. № 6. С. 12–13.
12. Бурдин А.В., Бурдин В.А., Василец А.А. и др. Исследование спектральных откликов кварцевых многомодовых волоконных световодов с габаритным центральным дефектом градиентного профиля показателя преломления, дополненных волоконной решеткой Брэгга // XIV Международная научная конференция «Оптические технологии в телекоммуникациях». Самара, 2016. С. 241–243.
13. Tingye L. Optical Fiber Communications. Volume 1. Fiber Fabrication. Academic Press, 1985. 363 p.
14. Lewin M., Preston J. Handbook of Fiber Science and Technology: Volume III. High Technology Fibers. NY, Marcel Dekker, 1993. 376 p.
15. Mendez A., Morse T.F. Specialty Optical Fibers Handbook. Academic Press, 2007. 840 p.
16. Oh K., Paek U.C. Silica Optical Fiber Technology for Devices and Components: Design, Fabrication, and International Standards. JohnWiley&Sons, 2012. 472 p.
17. Коробейников А.Г., Гатчин Ю.А., Дукельский К.В., Ероньян М.А., Тер-Нерсисянц Е.В., Нестерова Н.А. Анализ совместимости фторсиликатных и боросиликатных слоев стекла для изготовления оптического волокна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 3. С. 15–18.
18. Dukel'skii K.V., Bureev S.V., Bisyarin M.A. et al. Minimizing the optical losses in anisotropic single-mode lightguides with elliptical boron germanosilicate cladding // Journal of Optical Technology. 2012. V. 79. N 7. P. 433–436. doi: 10.1364/jot.79.000433
19. Andreev A.G., Bureev S.V., Eron'yan M.A. et al. Increasing the birefringence in anisotropic single-mode fiber lightguides with elliptical stress cladding // Journal of Optical Technology. 2012. V. 79. N 9. P. 107–109. doi: 10.1364/jot.79.000608
20. Bisyarin M.A., Bureev S.V., Eronyan M.A. et al. Anisotropic single-mode lightguides with an elliptical germanium silicate core and depressed cladding // Journal of Optical Technology. 2014. V. 81. N 2. P. 108–110. doi: 10.1364/jot.81.000108
21. Дукельский К.В., Ероньян М.А., Мешковский И.К., Комаров А.В., Кулеш А.Ю., Ромашова Е.И., Тер-Нерсисянц Е.В. Повышение поляризационной устойчивости анизотропных одномодовых кварцевых световодов с эллиптической напрягающей оболочкой // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 12. С. 92–94.
22. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
23. Nagel S.R., McChesney J.B., Walker K.L. An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1982. vol. 18, no. 4, pp. 459–476. doi: 10.1109/jqe.1982.1071596
24. THORLabs 0.20 and 0.27 NA Graded-Index Multimode Fibers. Available at: https://www.thorlabs.de/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=358 (accessed 21.02.2017).
25. Marcuse D. Losses and impulse response of a parabolic index fiber with random bends. *Bell System Technical Journal*, 1973, vol. 52, no. 8, pp. 1423–1437. doi: 10.1002/j.1538-7305.1973.tb02026.x
7. Burdin A.V. Differential modal delay of quartz multimode optical fibers of various generations. *Foton-Ekspress*, 2008, no. 5–6, pp. 20–22. (In Russian)
8. Burdin A.V., Yablochkin K.A. Investigations of refractive index profile defects of silica graded-index multimode fibers of telecommunication cables. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2010, vol. 8, no. 2, pp. 22–27. (In Russian)
9. Burdin A.V., Dmitriev E.V., Praporshchikov D.E., Sevruk N.L. Application of silica multimode optical fibers with large-size central defect of refractive index profile for fiber optic sensors based on a few-mode effects. *Applied Photonics*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 252–279. (In Russian)
10. Kafarova A.M., Faskhutdinov L.M., Kuznetsov A.A. et al. Quasiinterferometric scheme improved by fiber Bragg grating for detection of outer mechanical stress influence on distributed sensor being silica multimode optical fiber operating in a few-mode regime. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9807, art. 98070K. doi: 10.1117/12.2234567
11. Burdin A.V., Vasilets A.A., Burdin V.A., Morozov O.G. Distributed sensor on multimode optical fibers supplemented with fiber Bragg grating operating in few-mode signal transmission. *Foton-Ekspress*, 2016, no. 6, pp. 12–13.
12. Burdin A.V., Burdin V.A., Vasilets A.A. et al. Study of the spectral response of quartz multimode optical fibers with a bulky central defect of the gradient refractive index profile supplemented with a fiber Bragg grating. *Proc. XIV Int. Conf. on Optical Technologies in Telecommunications*. Samara, Russia, 2016, pp. 241–243.
13. Tingye L. *Optical Fiber Communications. Volume 1. Fiber Fabrication*. Academic Press, 1985, 363 p.
14. Lewin M., Preston J. *Handbook of Fiber Science and Technology: Volume III. High Technology Fibers*. NY, Marcel Dekker, 1993, 376 p.
15. Mendez A., Morse T.F. *Specialty Optical Fibers Handbook*. Academic Press, 2007, 840 p.
16. Oh K., Paek U.C. *Silica Optical Fiber Technology for Devices and Components: Design, Fabrication, and International Standards*. JohnWiley&Sons, 2012, 472 p.
17. Korobeinikov A.G., Gatchin Yu.A., Dukel'skii K.V., Eron'yan M.A., Ter-Nerseysants E.V., Nesterova N.A. Compatibility analysis of fluorine silicate and borosilicate glass layers for optical fiber manufacturing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 3, pp. 15–18. (In Russian)
18. Dukel'skii K.V., Bureev S.V., Bisyarin M.A. et al. Minimizing the optical losses in anisotropic single-mode lightguides with elliptical boron germanosilicate cladding. *Journal of Optical Technology*, 2012, vol. 79, no. 7, pp. 433–436. doi: 10.1364/jot.79.000433
19. Andreev A.G., Bureev S.V., Eron'yan M.A. et al. Increasing the birefringence in anisotropic single-mode fiber lightguides with elliptical stress cladding. *Journal of Optical Technology*, 2012, vol. 79, no. 9, pp. 107–109. doi: 10.1364/jot.79.000608
20. Bisyarin M.A., Bureev S.V., Eronyan M.A. et al. Anisotropic single-mode lightguides with an elliptical germanium silicate core and depressed cladding. *Journal of Optical Technology*, 2014, vol. 81, no. 2, pp. 108–110. doi: 10.1364/jot.81.000108
21. Dukel'skii K.V., Eron'yan M.A., Meshkovskii I.K., Komarov A.V., Kulesh A.Yu., Romashova E.I., Ter-Nerseysants E.V. Increasing of polarization stability of anisotropic single-mode silica fibers with elliptical stress cladding. *Opticheskii Zhurnal*, 2016, vol. 83, no. 12, pp. 92–94. (In Russian)
22. Snyder A.W., Love J.D. *Optical Waveguide Theory*. London-New-York, Chapman and Hall, 1983.
23. Nagel S.R., McChesney J.B., Walker K.L. An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. 18, no. 4, pp. 459–476. doi: 10.1109/jqe.1982.1071596
24. THORLabs 0.20 and 0.27 NA Graded-Index Multimode Fibers. Available at: https://www.thorlabs.de/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=358 (accessed 21.02.2017).
25. Marcuse D. Losses and impulse response of a parabolic index fiber with random bends. *Bell System Technical Journal*, 1973, vol. 52, no. 8, pp. 1423–1437. doi: 10.1002/j.1538-7305.1973.tb02026.x

- V. 18. N 4. P. 459–476. doi: 10.1109/jqe.1982.1071596
24. THORLabs 0.20 and 0.27 NA Graded-Index Multimode Fibers. Available at: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=358 (accessed 21.02.2017).
 25. Marcuse D. Losses and impulse response of a parabolic index fiber with random bends // Bell System Technical Journal. 1973. V. 52. N 8. P. 1423–1437. doi: 10.1002/j.1538-7305.1973.tb02026.x
 26. Olshansky R. Mode coupling effects in graded-index optical fibers // Applied Optics. 1975. V. 14. N 4. P. 935–945. doi: 10.1364/ao.14.000935
 27. Бурдин А.В., Бурдин В.А., Дмитриев Е.В. и др. Анализ ввода оптического сигнала «О»-диапазона через согласующее стандартное одномодовое волокно в градиентный многомодовый световод с центральным габаритным дефектом профиля показателя преломления // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. № 4 (принята в печать).
 28. Hui R., O'Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier, 2009. 672 p.
 29. Kurkjian C.R., Krause J.T., Matthewson M.J. Strength and fatigue of silica optical fibers // Journal of Lightwave Technology. 1989. V. 7. N 9. P. 1360–1370. doi: 10.1109/50.50715
 26. Olshansky R. Mode coupling effects in graded-index optical fibers. *Applied Optics*, 1975, vol. 14, no. 4, pp. 935–945. doi: 10.1364/ao.14.000935
 27. Burdin A.V., Burdin V.A., Dmitriev E.V. et al. Analysis of input optical signal of O-range through a matching standard single-mode fiber into multimode graded-index optical fiber with a bulky central defect of refractive index profile. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2016, vol. 14, no. 4 (in press)
 28. Hui R., O'Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier, 2009, 672 p.
 29. Kurkjian C.R., Krause J.T., Matthewson M.J. Strength and fatigue of silica optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, vol. 7, no. 9, pp. 1360–1370. doi: 10.1109/50.50715

Авторы

Демидов Владимир Витальевич – научный сотрудник, АО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, vovecc@mail.ru

Тер-Нерсесянц Егизе Вавикович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, er@goi.ru

Бурдин Антон Владимирович – доктор технических наук, профессор, помощник ректора, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443010, Российская Федерация, bourdine-av@psuti.ru

Бурдин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, проректор, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443010, Российская Федерация, burdin@psati.ru

Минаева Алина Юрьевна – студент, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443010, Российская Федерация, minaeva1993@mail.ru

Хохлов Александр Вадимович – ведущий инженер, АО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, volokno@goi.ru

Комаров Александр Валентинович – научный сотрудник, АО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, volokno@goi.ru

Устинов Сергей Валерьевич – инженер, АО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, volokno@goi.ru

Дукельский Константин Владимирович – кандидат технических наук, доцент, проректор, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация; доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kdukel@mail.ru

Authors

Vladimir V. Demidov – scientific researcher, Research and Technological Institute of Optical Materials All-Russia Scientific Center "S.I. Vavilov State Optical Institute", Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, vovecc@mail.ru

Egishe V. Ter-Nerseyanets – PhD, Senior scientific researcher, Research and Technological Institute of Optical Materials All-Russia Scientific Center "S.I. Vavilov State Optical Institute", Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, ter@goi.ru

Anton V. Bourdine – D.Sc., Professor, Rector's assistant, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443010, Russian Federation, bourdine-av@psuti.ru

Vladimir A. Burdin – D.Sc., Professor, Vice-rector, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443010, Russian Federation, burdin@psati.ru

Alina Yu. Minaeva – student, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443010, Russian Federation, minaeva1993@mail.ru

Alexander V. Khokhlov – leading engineer, Research and Technological Institute of Optical Materials All-Russia Scientific Center "S.I. Vavilov State Optical Institute", Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, volokno@goi.ru

Alexander V. Komarov – scientific researcher, Research and Technological Institute of Optical Materials All-Russia Scientific Center "S.I. Vavilov State Optical Institute", Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, volokno@goi.ru

Sergey V. Ustinov – engineer, Research and Technological Institute of Optical Materials All-Russia Scientific Center "S.I. Vavilov State Optical Institute", Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, volokno@goi.ru

Konstantin V. Dukelskii – PhD, Associate professor, Vice-rector, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation; Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kdukel@mail.ru