

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИ СТАБИЛЬНЫХ ОДНОМОДОВЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕТОВОДОВ С ПРЕДЕЛЬНО НИЗКИМ ЗАТУХАНИЕМ СИГНАЛА

Ю.А. Гатчин¹, В.В. Демидов^{2*}, К.В. Дукельский^{1,3}, П.А. Злобин², А.С. Матросова²

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

²Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения Всероссийского научного центра «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация

³Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: demidov@goi.ru

Информация о статье

УДК 681.7.068, 535.3

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Гатчин Ю.А., Демидов В.В., Дукельский К.В., Злобин П.А., Матросова А.С. Технологические основы получения механически стабильных одномодовых микроструктурированных световодов с предельно низким затуханием сигнала // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 4. С. 29–35.

Аннотация: Исследовано влияние двух технологических подходов к получению из поликапиллярной сборки кварцевого одномодового микроструктурированного световода с сердцевинной диаметром 35 мкм, предназначенного для работы в условиях многократного изгиба, на величину потерь направляемого по нему излучения и механическую прочность. Установлено, что для достижения наилучших показателей указанных характеристик предпочтительно использовать одностадийный процесс («сборка – волокно») взамен более распространенного двухстадийного («сборка – прототип – волокно»). При этом затухание сигнала составляет 2-3 дБ/км на длине волны $\lambda = 1550$ нм, а прочность на растяжение – около 5,5 ГПа, что сопоставимо с аналогичными параметрами одномодовых световодов специального применения, выполненных из сплошных оптических сред.

Ключевые слова: микроструктурированный световод, большая сердцевина, одномодовый режим, затухание излучения, механическая прочность.

Введение

Разработка и исследование микроструктурированных световодов из кварцевого стекла, обладающих набором преимущественных эксплуатационных возможностей относительно оптических волокон на основе сплошных сред, продолжает оставаться востребованным направлением прикладной науки. В числе таких возможностей передача мощных (лазерных) световых потоков с минимальными нелинейными искажениями и дифракционной расходимостью излучения, что достигается за счет увеличения размеров сердцевины одномодового световода до нескольких десятков микрон [1-8]. Однако в силу технологических особенностей подобные оптические элементы часто характеризуются сравнительно высокими значениями затухания сигнала, на уровне десятков и даже сотен дБ/км в ближней инфра-

красной области спектра [9-15]. Указанное обстоятельство приводит к значительному падению мощности распространяющегося излучения на выходе световода и вынуждает работать с чрезмерно короткими объектами (длиной несколько метров) для компенсации данного эффекта. По этой причине одной из основных задач, решаемых при создании структур с большой сердцевиной, становится минимизация затухания, обусловленного технологическими факторами, до значений, гарантирующих практическую целесообразность доставки излучения с незначительными потерями мощности на расстояния в пределах нескольких десятков или сотен метров.

С другой стороны, не менее важной проблемой является прогнозирование и обеспечение высоких показателей механической прочности и долговечности микроструктурированных световодов, пре-

пятствующих их разрушению при работе в условиях долговременной эксплуатационной нагрузки, в частности, многократного изгиба. Задача осложняется тем фактом, что в имеющейся научной литературе отсутствует однозначная оценка механических свойств обсуждаемых волокон. Результаты немногочисленных экспериментальных исследований [16-19] свидетельствуют о тенденции к снижению прочностных характеристик кварцевых световодов при интеграции пустот в оболочке ввиду увеличения числа поверхностей, которые могут стать носителями дополнительных дефектов, особенно в присутствии паров воды. Математические модели [20, 21], напротив, указывают на возможность увеличения механической прочности микроструктурированных световодов вследствие предотвращения роста трещин с наружной поверхности вглубь оболочки как раз из-за наличия пустот на пути распространения трещин.

Ранее [22, 23] нами были отмечены принципиальные различия в спектральных характеристиках затухания и вейбулловских распределениях прочности на растяжение для микроструктурированных световодов с сердцевинной диаметром 20 мкм, изготовленных по стандартной методике «stack-and-draw» [24], но с использованием различных технологических подходов. Эти закономерности стимулировали постановку и проведение серии экспериментов по изучению влияния этих подходов на величину потерь излучения и прочностные свойства при переходе к структурам с сердцевинной большего размера.

Объект исследования

В качестве объекта исследований был выбран микроструктурированный световод с четырьмя циклами пустот и сердцевинной диаметром 35 мкм, смещенной на шаг структуры относительно центра световода (рисунок 1).

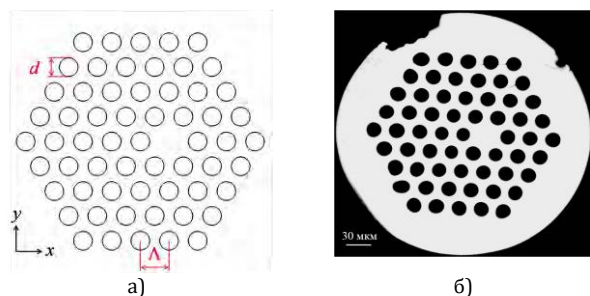


Рис. 1. Изображения расчетной (а) и экспериментально полученной (б) поперечных структур световода

Такое расположение сердцевин имеет положительным следствием увеличение доли пустот в оболочке d/Λ (d – диаметр отверстия, Λ – шаг гексагональной структуры) до 0,65, что, в свою очередь, способствует снижению потерь излучения, обусловленных возмущениями и искажениями геометрии световода [25-27]. Одномодовый режим работы в подобном оптическом элементе достигается

за счет различия в интенсивности вытекания на изгибе излучения фундаментальной и наиболее конкурентной первой высшей моды, о чем наглядно свидетельствуют данные таблицы.

ТАБЛИЦА. Численная оценка изгибных потерь фундаментальной (LP_{01}) и первой высшей (LP_{11}) мод световода на длине волны $\lambda = 1550$ нм

Радиус изгиба, см	Ориентация плоскости изгиба	Потери моды LP_{01} , дБ/км	Потери моды LP_{11} , дБ/км
16	Вдоль оси X	$2,90 \times 10^{-5}$	$1,72 \times 10^0$
	Вдоль оси Y	$2,32 \times 10^{-9}$	$1,84 \times 10^{-1}$
12	Вдоль оси X	$2,30 \times 10^{-4}$	$4,41 \times 10^1$
	Вдоль оси Y	$1,02 \times 10^{-7}$	$4,40 \times 10^4$
8	Вдоль оси X	$1,37 \times 10^{-2}$	$1,48 \times 10^4$
	Вдоль оси Y	$2,36 \times 10^{-2}$	$1,40 \times 10^{12}$

В частности, уменьшение эксплуатационного радиуса намотки с 16 до 8 см позволяет добиться необходимого коэффициента затухания высшей моды даже в отсутствии фазовой отсечки последней, регламентируемой, как известно, неравенством $d/\Lambda < 0,45$ [28], и фактически независимо от ориентации плоскости изгиба волокна. При этом расчетное значение потерь фундаментальной моды на вытекание излучения, полученное с помощью метода конечных элементов [29], не превышает 0,03 дБ/км в интересующем диапазоне спектра. Вклад базовых механизмов (примесного поглощения и рэлеевского рассеяния), детерминированный качеством исходных сырьевых материалов для изготовления световода (стержней и труб из синтетического кварцевого стекла), можно оценить величиной не более 0,2 дБ/км на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Таким образом, общий уровень затухания излучения в световоде представленной конструкции определяется преимущественно технологическими факторами.

Методика проведения эксперимента

Суть эксперимента заключалась в следующем. На первом этапе выполнялся комплекс операций по вытягиванию кварцевых капилляров и стержней диаметром 1,85 мм, разрезанию их на отрезки одинаковой длины, завариванию торцов капилляров в пламени кислородно-водородной горелки, очистке наружных поверхностей элементов от загрязнений, сборке их в композицию внутри кварцевой трубы с внешним диаметром 21 мм и толщиной стенки 2 мм в соответствии с требуемой геометрической конфигурацией. На втором этапе труба со сборкой помещалась в высокотемпературную печь на вытяжной установке, где из ее расплавленного конца производилось вытягивание прототипа – жесткого элемента диаметром несколько миллиметров со структурой будущего световода в поперечном сечении. После получения отрезка прототипа длиной 1,5 м (этого было достаточно для изготовления световода со стабильной структурой длиной 100 м, учитывая количество стекломассы, которое расхо-

дуется при выходе на стационарный режим вытягивания) изготовление прототипа прекращалось, и начиналось вытягивание световода диаметром 300 мкм напрямую из поликапиллярной сборки (далее в тексте – одностадийный процесс). После получения отрезка волокна длиной 100 м осуществлялось перетягивание изготовленного ранее прототипа в микроструктурированный световод, геометрические параметры которого максимально точно воспроизводили соответствующие параметры световода, вытянутого в одну стадию, с контролем внутриполостного давления (двухстадийный процесс). Затем экспериментальные образцы поступали на участок метрологического контроля для измерения коэффициента затухания распространяющегося по ним излучения в ближней инфракрасной области спектра и проведения сравнительных испытаний механической прочности.

Добавим, что в обоих процессах волокна покрывались слоем отверждаемого под действием ультрафиолетового излучения эпоксикарилата толщиной 100 мкм для защиты их наружной поверхности от повреждений извне.

Исследование затухания излучения

В первом эксперименте капилляры изготавливались из трубы с отношением внутреннего и внешнего диаметров $K = 0,80$ (труба предварительно проходила процедуру огневой полировки в пламени кислородно-водородной горелки системы MCVD для устранения поверхностных дефектов). Вследствие незначительного коллапсирования трубы в процессе вытягивания указанное отношение в капиллярах составляло 0,75. Оказалось, что получение микроструктурированного световода из сборки элементов с таким K в одностадийном процессе практически исключено: внутренние полости неограниченно раздувались в области образования луковичи под воздействием избыточного давления при любых значениях температуры графитового нагревателя. Причина заключалась в малом, порядка 20 мкм, поперечном размере пустот, достигаемом на расстоянии нескольких сантиметров от горячей зоны. Внутренние полости капилляров фактически не получали сообщения с атмосферой, и падение давления в направлении вытягиваемого волокна отсутствовало.

Проведение процесса по двухстадийной схеме позволило, напротив, без особых сложностей получить световод с параметром $d/\Lambda = 0,65$, измеренное значение затухания в котором составило 8 дБ/км на длине волны $\lambda = 1550$ нм. В данном случае рост давления в области образования луковичи компенсировался его снижением в направлении вытягиваемого прототипа, поскольку размер его пустот достигал нескольких сотен мкм. Добиться в световоде требуемого значения d/Λ при повторном перетягивании удавалось за счет прокачивания внутри полостей прототипа газа с постоянным давлением.

Величина затухания излучения в волокнах определялась классическим методом «обрыва» в результате сопоставления уровней оптических сигналов, зарегистрированных после прохождения светом длинного (измерительного) и короткого (опорного) отрезков при неизменных условиях возбуждения входного торца световода [30]. Волокна располагались на катушке радиусом 8 см.

Получение одномодового микроструктурированного световода в одну стадию представлялось возможным, по нашему мнению, при уменьшении объема газа внутри капилляров во избежание неконтролируемого раздувания луковичи в горячей зоне. По этой причине во втором эксперименте для производства элементов сборки использовалась частично коллапсированная в пламени кислородно-водородной горелки труба с меньшим, чем в первом случае, финальным отношением внутреннего и внешнего диаметров $K \approx 0,72$ (в капиллярах это отношение составляло 0,68). Выбор температурного режима вытягивания оказался определяющим фактором при изготовлении волокна с заданной геометрией. Максимальное значение температуры нагревателя (2100°C), как и в предыдущем эксперименте, приводило к получению структуры со значением d/Λ , неограниченно приближающимся к 1. Однако последовательное уменьшение температуры имело в конечном итоге положительный эффект. В частности, снижение этого технологического параметра до 1950°C позволило реализовать многомодовую конструкцию световода ($d/\Lambda = 0,80$), а дальнейшее снижение до 1900°C – искомую одномодовую ($d/\Lambda = 0,65$) для функционирования в условиях изгиба.

Сравнительный анализ спектральных характеристик затухания излучения в микроструктурированных световодах, вытянутых по разным технологическим схемам, показал различия в возможностях одно- и двухстадийного процессов по достижению минимального ослабления сигнала в ближней инфракрасной области спектра.

Одностадийный вариант оказался выигрышным при получении многомодового световода – потери в нем не превысили 2 дБ/км на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Для объекта с аналогичными геометрическими параметрами, изготовленного в две стадии, измерение показало большее значение, а именно 5 дБ/км в упомянутой области спектра. Принимая во внимание тот факт, что производство прототипа и волокна в двухстадийном процессе, а также вытягивание световода в одну стадию осуществлялись при одинаковой температуре нагревателя (1950°C), различие в базовом уровне затухания может быть отнесено за счет разной длительности нахождения луковичи в горячей зоне. Действительно, при изготовлении волокна по одностадийной схеме скорость подачи сборки в высокотемпературную печь составляла 1 мм/мин, что на порядок меньше ско-

рости подачи как сборки, так и прототипа в двухстадийном процессе. Данное обстоятельство способствовало более интенсивной тепловой обработке поверхностей капилляров, что, в свою очередь, обуславливало более высокую степень однородности стекломассы в месте их контакта друг с другом и сердцевинным элементом.

Применительно к одномодовой конструкции световода была зафиксирована обратная закономерность: затухание излучения в оптическом элементе, полученном в одностадийном процессе, составило около 20 дБ/км на длине волны $\lambda = 1550$ нм, что приблизительно в 3 раза превысило потери в аналоге, произведенном в две стадии (рисунок 2).

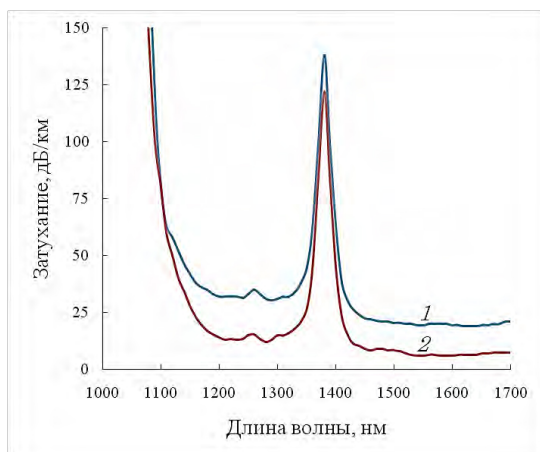


Рис. 2. Спектральные характеристики затухания излучения в микроструктурированных световодах, полученных одностадийным (1) и двухстадийным (2) перетягиванием сборки во втором эксперименте

Снижение температуры вытягивания на 50°C (значение температуры в 1900°C было безальтернативным), вероятно, имело своим следствием менее эффективное выглаживание поверхностей капилляров в сборке, несмотря на, казалось бы, продолжительное время нахождения луковицы в горячей зоне. По этой причине не устраненные в области границы раздела элементов поверхностные дефекты трансформировались в процессе пластической деформации кварцевого стекла в дефекты световода без существенного изменения своей морфологии, выступая в качестве центров рассеяния излучения.

С целью устранения отмеченного недостатка в третьем эксперименте использовались капилляры с параметром $K \approx 0,50$ (в частично коллапсированной трубе это отношение было 0,53), что позволило еще больше сократить объем газа внутри полостей и увеличить тем самым верхний предел температур вытягивания. На этот раз в одностадийном процессе пустоты в оболочке микроструктурированного световода практически отсутствовали ($d/\Lambda \sim 0,10$) вплоть до температуры 1970°C ввиду преобладания сил поверхностного натяжения над внутриволостным давлением. Искомый оптический элемент ($d/\Lambda = 0,65$) был получен при

температуре 2000°C, когда вязкость кварцевого стекла оставалась еще достаточно высокой для формирования пустот с правильной (круглой) и стабильной по длине волокна формой. В двухстадийном процессе эти условия обеспечивались при температуре вытягивания 1950°C.

Из сравнения спектральных характеристик затухания (рисунок 3) видно, что потери излучения в одномодовом световоде, изготовленном непосредственно из поликапиллярной сборки, оказались ниже потерь в аналоге, полученном двукратным перетягиванием композиции из капилляров и сердцевинного элемента, приблизительно в два раза.

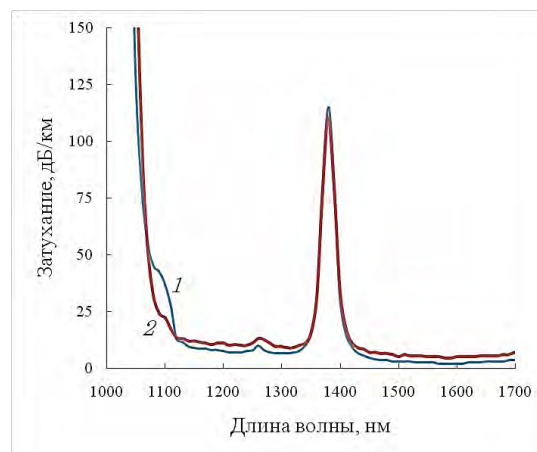


Рис. 3. Спектральные характеристики затухания излучения в микроструктурированных световодах, полученных одностадийным (1) и двухстадийным (2) перетягиванием сборки в третьем эксперименте

Относительно результата предыдущего эксперимента (кривая 1 на рисунке 2) затухание снизилось еще существеннее, а именно, почти на порядок – от 20 до 2,5 дБ/км на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Причину обоих указанных явлений следует искать в повышении эффективности выглаживания границы раздела капилляров в области формирования луковицы вследствие более интенсивной тепловой обработки (прирост температуры вытягивания составил 100°C) при столь же длительном, как и во втором случае, времени нахождения луковицы в горячей зоне (30 минут).

Заметим, что описанные выше закономерности справедливы для композиций, набранных капиллярами со значением внешнего диаметра около 2 мм.

Исследование механической прочности

Исследование механических свойств микроструктурированных световодов проводилось методом растяжения до разрыва сравнительно коротких (~ 1 м) отрезков со скоростью 200 мм/мин. Указанной длины нагружаемого участка волокна было достаточно для того, чтобы однозначно охарактеризовать прочность образцов, полученных с использованием разных технологических подхо-

дов. Для обеспечения достоверности результатов оценка прочности на растяжение давалась на основе серии испытаний в группе из 20-25 отрезков. Полученный набор данных представлялся в терминах статистики Вейбулла, согласно которой вероятность разрушения образца F регламентируется выражением [31]:

$$F(l, \sigma) = 1 - \exp(-\sigma^m l), \quad (1)$$

преобразуемым к виду:

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-F} \right) = m \ln(\sigma) + \ln(l), \quad (2)$$

где σ – величина разрушающего напряжения, l – длина тестируемого образца, m – параметр, определяемый как угол наклона графика к оси абсцисс (чем больше значение m , тем меньше статистический разброс прочности).

В каждой серии испытаний величина σ (в ГПа) вычислялась как отношение приложенной до разрыва силы растяжения отрезка волокна к площади его поперечного сечения (~ 70000 мкм²). При этом с целью корректной интерпретации механических свойств пустоты исключались из расчета, вследствие чего площадь, занимаемая исключительно кварцевым стеклом, сокращалась до ~ 57000 мкм².

На рисунке 4 приведены вейбулловские распределения прочности на растяжение для образцов микроструктурированных световодов, полученных двукратным перетягиванием сборки во втором и третьем экспериментах. Как видно из рисунка, средний уровень прочности волокон составил $\sim 3,5$ ГПа, что в 1,6 раза меньше величины, характерной для оптических элементов со сплошной оболочкой [32]. Это различие было подтверждено результатами испытаний прочности анизотропно-одномодового световода диаметром 125 мкм, изготовленного с использованием метода MCVD [33] (кривая 3 на рисунке 4).

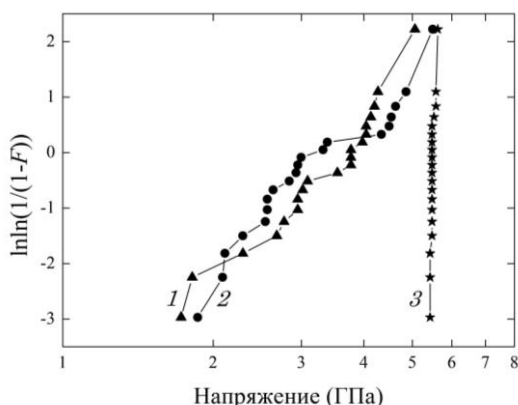


Рис. 4. Вейбулловские распределения прочности на растяжение для микроструктурированных световодов, вытянутых в две стадии во втором (1) и третьем (2) экспериментах, и анизотропно-одномодового световода (3)

Тенденция к ухудшению механических свойств микроструктурированных объектов, изготовлен-

ных в две стадии, относительно прочности стандартных световодов в полимерном защитном покрытии имеет, на взгляд авторов, уже упомянутый источник происхождения, а именно, увеличение плотности (речь идет о суммарном количестве и среднем размере) поверхностных дефектов в процессе пластической деформации сначала поликапиллярной композиции в прототип, а затем прототипа в искомый световод, осуществляемой при умеренных температурах нагревателя (1950°C). Вдобавок, как было установлено в независимом эксперименте, достаточно большой поперечный размер пустот в прототипе способствует насыщению их водяными парами в период, предшествующий получению волокна. Последнее обстоятельство нашло отражение в значительном разбросе разрушающих напряжений в статистике Вейбулла ($m = 4$).

Данные о прочности на растяжение микроструктурированных световодов, изготовленных однократным перетягиванием сборки во втором и третьем экспериментах, проиллюстрированы зависимостями $F(\sigma)$ на рисунке 5.

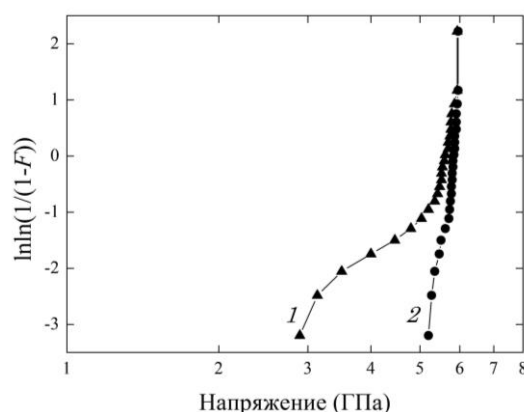


Рис. 5. Вейбулловские распределения прочности на растяжение для микроструктурированных световодов, вытянутых в одну стадию во втором (1) и третьем (2) экспериментах

Из рисунка видно, что статистика разрушения волокон претерпела существенные изменения, в частности, сократился разброс напряжений, особенно в области значений, соответствующих высокопрочному состоянию поверхности ($F > 0,5$). Объяснение этому феномену может быть дано с позиции уменьшения плотности дефектов после исключения из технологического процесса промежуточной стадии по получению прототипа световода, как раз индуцирующей рост поверхностных дефектов различной природы в условиях высокой вязкости кварцевого стекла. Отсутствие выраженных слабых точек в вейбулловском распределении прочности ($m = 30$) для образца, полученного в третьем эксперименте (кривая 2 на рисунке 5), свидетельствует, в свою очередь, об однородности дефектов, средний размер которых не превышает величину, достаточную для разрушения волокна с напряжением менее 5,2 ГПа.

Это позволяет сделать вывод о возможности достижения в кварцевых одномодовых микроструктурированных световодах с большой сердцевинной уровня прочности, сопоставимого с таковым в стандартных оптических волокнах, выполненных на основе сплошных сред.

Заключение

В работе проведено исследование влияния двух технологических подходов к получению из поликапиллярной сборки одномодового микроструктурированного световода с сердцевинной диаметром 35 мкм на основе кварцевого стекла, предна-

значенного для передачи мощных световых потоков в условиях многократного изгиба, на величину потерь распространяющегося по нему излучения и механическую прочность. Показано, что для снижения затухания оптического сигнала до значений 2-3 дБ/км в ближней инфракрасной области спектра и сохранения стандартных для кварцевых волокон показателей прочности на растяжение 5,5 ГПа целесообразно использовать процесс прямого перетягивания сборки в световод. Данный вывод справедлив при формировании композиции капиллярами с внешним диаметром около 2 мм.

Список используемых источников

1. Nielsen M.D., Folkenberg J.R., Mortensen N.A. Single-Mode Photonic Crystal Fiber with an Effective Area of 600 μm^2 and Low Bending Loss // *Electron. Lett.* 2003. Vol. 39. No. 25. PP. 1802–1803.
2. 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. Vol. 12. No. 8. PP. 1775–1779.
3. Агрузов П.М., Дукельский К.В., Комаров А.В., Тер-Нерсисянц Е.В., Хохлов А.В., Шевандин В.С. Разработка микроструктурированных световодов с большой сердцевинной и исследование их оптических свойств // *Оптический журнал.* 2010. Т. 77. № 1. С. 77–81.
4. 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 сердцевинной // *Квантовая электроника.* 2010. Т. 40. № 3. С. 254–258.
5. Гатчин Ю.А., Дукельский К.В., Бондаренко И.Б., Садыков А.А., Демидов В.В., Тер-Нерсисянц Е.В. Оптические потери при изгибе одномодового микроструктурированного световода с большой сердцевинной // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* 2015. Т. 15. № 2. С. 246–252.
6. Безбородкин П.В., Быков М.В., Демидов В.В., Дукельский К.В. Микроструктурированные оптические волокна для систем передачи и обработки информации // *Труды учебных заведений связи.* 2016. Т. 2. № 1. С. 23–27.
7. Демидов В.В. Одномодовые микроструктурированные световоды с круговым расположением пустот для передачи излучения в режиме ограниченной нелинейности // *Оптический журнал.* 2017. Т. 84. № 8. С. 3–8.
8. Гатчин Ю.А., Демидов В.В., Дукельский К.В., Тер-Нерсисянц Е.В. Квазиодномодовые световоды с увеличенным размером сердцевинной на основе микроструктур негексагонального типа // *Труды учебных заведений связи.* 2017. Т. 3. № 3. С. 37–42.
9. Minkovich V.P., Kir'yanov A.V., Sotsky A.B., Sotskaya L.I. Large-Mode-Area Holey Fibers with a Few Air Channels in Cladding: Modeling and Experimental Investigation of the Modal Properties // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2004. Vol. 21. No. 6. PP. 1161–1169.
10. Minkovich V.P., Kir'yanov A.V., Calixto Carrera S.A., Sotsky A.B., Sotskaya L.I. Modeling, Fabrication, and Characterization of Large-Mode-Area Photonic Crystal Fibers With Low Bending Loss // *Proc. SPIE.* 2005. Vol. 5776. PP. 402–408.
11. Napierala M., Nasilowski T., Beres-Pawlik E., Berghmans F., Wojcik J., Thienpont H. Extremely Large-Mode-Area Photonic Crystal Fibre with Low Bending Loss // *Opt. Express.* 2010. Vol. 18. No. 15. PP. 15408–15418.
12. Napierala M., Nasilowski T., Beres-Pawlik E., Mergo P., Berghmans F., Thienpont H. Large-Mode-Area Photonic Crystal Fiber with Double Lattice Constant Structure and Low Bending Loss // *Opt. Express.* 2011. Vol. 19. No. 23. PP. 22628–22636.
13. Vaca-Pereira M., Minkovich V.P., Calixto S. Fabrication and Investigation of Large-Mode-Area Photonic Crystal Fibers // *Rev. Mex. Fis.* 2013. Vol. 59. No. 4. PP. 317–321.
14. Демидов В.В., Дукельский К.В., Тер-Нерсисянц Е.В., Шевандин В.С. Микроструктурированные одномодовые световоды на основе явления дифференциального модового затухания // *Оптический журнал.* 2012. Т. 79. № 1. С. 52–57.
15. Демидов В.В., Дукельский К.В., Тер-Нерсисянц Е.В., Шевандин В.С. Исследование одномодового режима работы микроструктурированных световодов с каналами вытекания излучения // *Оптический журнал.* 2013. Т. 80. № 5. С. 65–70.
16. Kobelke J., Gerth K., Kirchhof J., Schuster K., Moerl K., Aichele C. Mechanical and Optical Behavior of Index Guiding Photonic Crystal Fibers (PCF) // *Proc. SPIE.* 2004. Vol. 5360. PP. 287–298.
17. Косолапов А.Ф., Семенов С.Л., Денисов А.Н. Механические свойства микроструктурированных световодов на основе высокоочищенного кварцевого стекла // *Неорганические материалы.* 2007. Т. 43. № 3. С. 362–367.
18. Sonnenfeld C., Sulejmani S., Geernaert T., Eve S., Gomina M., Makara M., Skorupski K., Mergo P., Berghmans F., Thienpont H. Mechanical Reliability of Microstructured Optical Fibers: A Comparative Study of Tensile and Bending Strength // *Proc. SPIE.* 2012. Vol. 8426. P. 84260Q.
19. Sonnenfeld C., Sulejmani S., Geernaert T., Eve S., Gomina M., Mergo P., Makara M., Skorupski K., Thienpont H., Berghmans F. Mechanical Strength of Microstructured Optical Fibers // *J. Lightwave Technol.* 2014. Vol. 32. No. 12. PP. 2193–2201.
20. Zhou J., Tajima K., Kurokawa K., Nakajima K., Sankawa I. High Tensile Strength Photonic Crystal Fiber // *Optical Fiber Communication Conf. (Los Angeles, California, USA).* 2004. Vol. W1. P. W12.

21. Chakravarthy S.S., Chiu W.K.S. Strength Prediction of Microstructured Optical Fibers // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6193. P. 61930B.
22. Дукельский К.В., Комаров А.В., Тер-Нерсисянц Е.В., Хохлов А.В., Шевандин В.С. Снижение затухания излучения в микроструктурированных световодах из поликапиллярной сборки до 2-3 дБ/км // Сб. трудов VIII Международной конференции «Прикладная оптика – 2008» (Санкт-Петербург, Россия). 2008. Т. 2. С. 253–256.
23. Демидов В.В., Кулеш А.Ю., Пасишник А.С., Тер-Нерсисянц Е.В., Хохлов А.В. Исследование прочностных характеристик кварцевых световодов с микроструктурированной оболочкой в эпоксикакрилатном и металлическом покрытиях // Фотон-Экспресс. 2015. № 6. С. 119–120.
24. Russell P.St.J. Photonic-Crystal Fibers // J. Lightwave Technol. 2006. Vol. 24. No. 12. PP. 4729–4749.
25. Демидов В.В., Дукельский К.В., Шевандин В.С. Модовый состав излучения в микроструктурированных световодах со смещенной сердцевинной // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 6. С. 55–60.
26. Demidov V.V. Large-Core Microstructured Fibers with Asymmetric Cladding Design for Practical Single-Mode Operation // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8426. P. 84261H.
27. Demidov V., Ter-Nersesyan E. New Possibilities of Higher-Order Mode Filtering in Large-Mode-Area Photonic Crystal Fibers // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9128. P. 91280S.
28. Mortensen N.A. Effective Area of Photonic Crystal Fibers // Opt. Express. 2002. Vol. 10. No. 7. PP. 341–348.
29. URL: <https://www.comsol.com>
30. Hui R., O'Sullivan M. Fiber Optic Measurement Techniques. Burlington & San Diego (USA): Elsevier, 2009. 672 p.
31. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение, 1964. 275 с.
32. Kurkjian C.R., Krause J.T., Matthewson M.J. Strength and Fatigue of Silica Optical Fibers // J. Lightwave Technol. 1989. Vol. 7. No. 9. PP. 1360–1370.
33. Дукельский К.В., Ероных 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.

* * *

BASIC TECHNOLOGICAL METHODS OF OBTAINING MECHANICALLY STABLE LOW-LOSS SINGLE-MODE MICROSTRUCTURED FIBERS

Y. Gatchin¹, V. Demidov², K. Dukelskii^{1,3}, P. Zlobin², A. Matrosova²

¹Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, 197101, Russian Federation

²Research and Technological Institute of Optical Materials All-Russia Scientific Center "S.I. Vavilov State Optical Institute", St. Petersburg, 192171, Russian Federation

³The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Gatchin Y., Demidov V., Dukelskii K., Zlobin P., Matrosova A. Basic Technological Methods of Obtaining Mechanically Stable Low-Loss Single-Mode Microstructured Fibers // Proceedings of Telecommunication Universities. 2017. Vol. 3. Iss. 4. PP. 29–35.

Abstract: *The influence of two technological approaches to the fabrication from a capillary stack of silica-based single-mode microstructured fiber with a core of 35 μm in diameter, intended for operation in conditions of multiple bending, on optical losses and mechanical strength was studied. It has been determined that achievement of the optimal characteristics requires using a single-stage process ("stack – fiber") instead of the more common two-stage process ("stack – cane – fiber"). In that case the attenuation level is 2-3 dB/km at the wavelength $\lambda = 1550$ nm and the tensile strength is about 5.5 GPa, which is comparable with the same parameters of specialty single-mode fibers made of solid media.*

Keywords: *microstructured fiber, large core, single-mode regime, attenuation, mechanical strength.*