

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ НА ИЗГИБ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА КВАРЦЕВОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

*А.В. Бурдин^{1,2,3}, В.Г. Нестеров³, М.А. Орлов³, А.С. Евтушенко², А.А. Беляев^{1,3},
Е.С. Зайцева², Д.Н. Шурупов¹, С.С. Пашин¹, Е.В. Тер-Нерсесянц¹*

¹ АО «Научно-производственное объединение Государственный
оптический институт им. С.И. Вавилова»
Российская Федерация, 192171, г. Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, д.36, к.1

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Российская Федерация, 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, д. 23

³ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
Российская Федерация, 193232, Санкт-Петербург, проспект Большевиков, д. 22, к.1

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований приращения потерь на изгиб на отрезке ранее изготовленного методом «Stack-and-Draw» опытного образца кварцевого микроструктурированного оптического волокна (МСОВ) с «традиционной» гексагональной конфигурацией, включенного в макетную волоконно-оптическую линию передачи. Контроль изменения изгибных потерь осуществлялся методом обратного рассеяния с помощью оптического рефлектометра на длинах волн 1310 и 1550 нм. Первое полученное значение итоговых вносимых потерь для расправленного прямолинейного отрезка МСОВ рассматривалось как опорное. Далее на оправку соответствующего диаметра наносился одиночный виток тестируемого МСОВ, проводилось измерение характеристики обратного рассеяния и регистрировалось значение изменения итогового затухания за счет потерь на изгиб. Тестировалось 6 оправок с радиусом от 75.00 мм до экстремально малых 6.25 мм. Как и прогнозировалось, МСОВ оказалось, в целом, более чувствительным к изгибам, по сравнению, например, со стандартными одномодовыми ОВ рек. ITU-T G.652. Однако в отличие от последних, согласно результатам проведенных измерений, представленных в данной работе, для МСОВ, напротив, дополнительные потери на изгиб повышаются не с увеличением, а с уменьшением длины волны.

Ключевые слова: кварцевое микроструктурированное оптическое волокно, потери на изгиб, допустимый радиус изгиба кварцевых микроструктурированных оптических волокон.

Введение

На сегодняшний день кварцевые микроструктурированные оптические волокна (МСОВ) / фотонно-кристаллические волокна (ФКВ) позиционируются как высокотехнологичная продукция, которая находит широчайшее применение в разнообразных (в зависимости от конфигурации волоконного световода) научно-технических приложениях волоконной оптики и фотоники, в том числе, лазерной технике, оптическом приборостроении, системах навигации, устройствах техники связи, волоконно-оптических сенсорах и датчиках, биосенсорах, медицинской технике и целого ряда других научно-технических направлениях [1-4].

В отличие от телекоммуникационных оптических волокон (ОВ) типовой коаксиальной конструкции (сердцевина, окруженная внешней сплошной оболочкой), благодаря особенностям конфигурации (в общем случае представляющей собой 2D-структуру из массива воздушных отверстий, распределенных по соответствующей схеме), МСОВ обладают нетривиальными волноводными свойствами и, как результат, возможностями управления дисперсией и нелинейностью [1-4]. Однако их сложная морфология обуславливает повышенную чувствительность к геометрическим деформациям, которые могут проявляться, в том числе, из-за макро- и микроизгибов, неизбежно появляющихся, например, при компактировании ОВ в корпус прибора или наложении защитных покровов микрокабеля с его последующей инсталляцией.

Известны опубликованные работы и российских, и зарубежных коллективов авторов, посвященные как теоретическим исследованиям и моделированию МСОВ, направленные на оптимизацию конфигурации волокна, с точки зрения снижения потерь на изгиб, так и непосредственно экспериментальным исследованиям влияния радиуса изгиба на рост затухания, которые проводились и на отдельных оптических несущих, и в заданных спектральных диапазонах [5-10]. Однако в данном случае речь идет о теоретической оценке либо практическом измерении изменения коэффициента затухания (размерность дБ/км или дБ/м) моделируемого/тестируемого МСОВ. При этом в подавляющем большинстве экспериментов были использованы достаточно габаритные оправки с диаметром от 200 мм, а диапазон исследуемых значений радиуса изгиба при моделировании МСОВ также начинался с минимального значения 100 мм.

Данная работа посвящена экспериментальным исследованиям приращения потерь на изгиб ранее изготовленного методом «Stack-and-Draw» опытного образца кварцевого МСОВ с «классической» гексагональной конфигурацией [11]. Данный тип волокна теоретически обеспечивает квазиодномодовый режим функционирования в расширенном, по сравнению с типовыми стандартными одномодовыми ОВ (SMF, с внешним «телекоммуникационным» диаметром 125 мкм, разработанными на основе действующих рекомендаций ITU-T), в область коротких длин волн спектральном диапазоне > 700 нм, но включая классические телекоммуникационные диапазоны. Предполагается, что область применения разрабатываемых МСОВ ориентирована на линии связи компактных оптических сетей передачи данных, в том числе, использующих технологию коротковолнового мультиплексирования SWDM (Short Wavelength Division Multiplexing). Это, в первую очередь, структурированные кабельные системы дата-центров, вычислительных центров, сетей хранения данных, а также отдельных примеров бортовых и промышленных сетей передачи данных разного назначения, соединительные линии которых характеризуются экстремально малой (буквально десятки метров) протяженностью. В свою очередь, полностью кварцевая, не содержащая каких-либо дополнительных легирующих примесей, структура МСОВ при реализации на базе опорных элементов (трубок и стержней) из особо чистого синтетического кварцевого стекла практически нивелирует формирование центров окрашивания и создает все предпосылки для применения указанных МСОВ на компактных оптических сетях, эксплуатируемых в агрессивных условиях воздействия опасного излучения.

Учитывая ориентированность разрабатываемых МСОВ на практическое применение в полевых условиях, включая сам технологический процесс изготовления волоконно-оптических кабелей/сборок, их инсталляцию и техническую эксплуатацию, а также монтаж в оконечных устройствах коммутации, было принято решение провести экспериментальные исследования локального изменения потерь на изгиб, учитывая требования спецификаций и отраслевых нормативных документов телекоммуникационных ОВ [12]. Так, согласно [12], для стандартных одномодовых оптических волокон (SMF) рек. ITU-T G.652 регламентируется прирост затухания не более, чем на 0.05 дБ, при нанесении одного витка волокна на оправку диаметром 32 мм, что соответствует радиусу изгиба 16 мм. Результаты

экспериментальных исследований локального увеличения потерь опытного образца МСОВ описанной выше конфигурации, при нанесении его одиночных витков на оправки разного диаметра, представлены в следующем разделе.

Материалы и методы

Как было отмечено выше, структура предлагаемого МСОВ является «классической» (Рис. 1, а) и включает в себя 5 циклов или 116 воздушных отверстий, расположенных по типовой гексагональной схеме вокруг центральной световедущей области («сердцевины»).

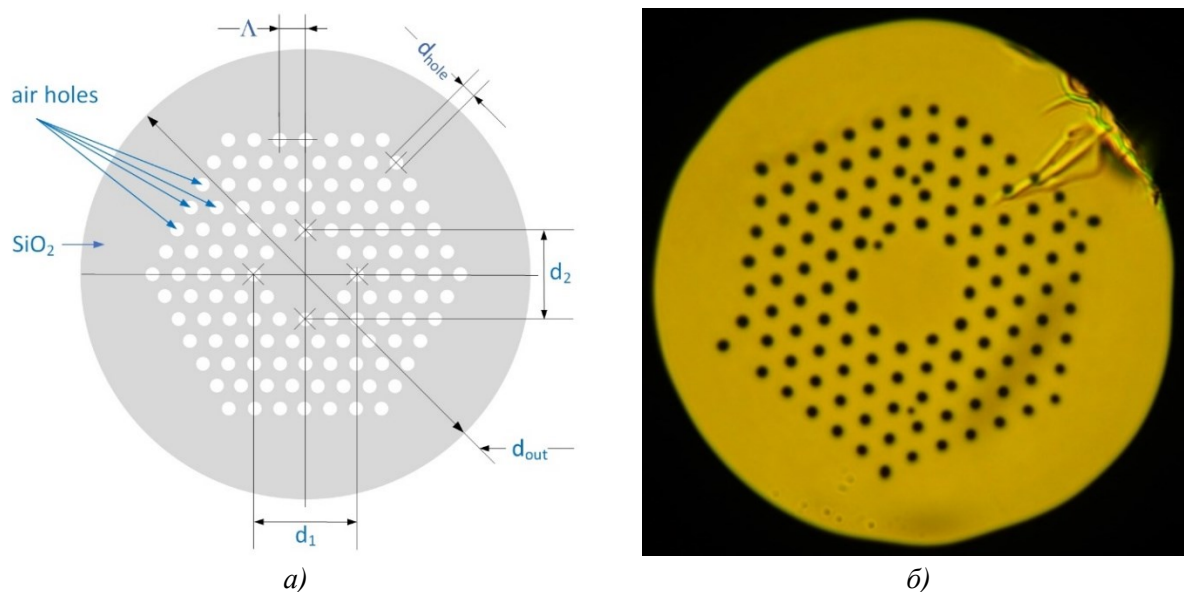


Рис. 1. Опытный образец кварцевого МСОВ:
а) эскиз поперечного сечения; б) изготовленный опытный образец МСОВ

Ранее авторами было проведено моделирование и расчет строгим методом конечных элементов, реализованного в коммерческом ПО COMSOL Multiphysics описанной волоконной структуры [11, 13]. Это позволило на основании полученных результатов определить оптимальные параметры конфигурации МСОВ, обеспечивающие искомый одномодовый режим передачи оптического излучения во всем расширенном в область коротких длин волн «телекоммуникационном» спектральном диапазоне 700...1700 нм, а также локализовать технологические допуски на них, с учетом масштабирования на заявленный внешний «телекоммуникационный» диаметр $d_{out}=125$ мкм. Так, рекомендуемый диапазон значений диаметра воздушных отверстий составил $d_{hole}=2.4...2.5$ мкм для шага их размещения по гексагональной схеме $\Lambda=7.21$ мкм при габаритах «сердцевины» $d_{core}=(26.39 \times 22.52) \pm 0.5$ мкм («длинная» и «короткая» диагонали центральной световедущей области).

Указанные значения параметров геометрии «классической» структуры рассматривались как опорные и далее использовались для отработки технологических режимов фабрики МСОВ новой описанной конфигурации. В результате методом «Stack-and-Draw» были изготовлены опытные образцы описанных волокон длиной по 100 м каждый (Рис.1, б), которые отличались от искомой конфигурации неидеальной несимметричной структурой при следующих полученных характеристиках: внешний диаметр МСОВ $d_{out}=125 \pm 3$ мкм, диаметр воздушных отверстий $d_{hole}=2.5 \pm 0.4$ мкм, шаг $\Lambda=7.15 \pm 0.5$ мкм, габариты (диагонали) «сердцевины» $d_1=26.5 \pm 0.5$ мкм и $d_2=22.5 \pm 0.5$ мкм.

При изготовлении первой партии опытных образцов заявленных волоконных световодов основной акцент работ был сфокусирован на оптимизации технологических режимов производственного цикла фабрикации МСОВ описанной конфигурации. Поэтому на данном этапе для формирования сборки использовались дешевые и доступные опорные элементы (стержни и трубки) из синтетического кварцевого стекла с высоким содержанием гидроксильных групп ОН (1000 ppm и более) и низкой однородностью по металлическим примесям (порядка 5 ppm) (аналоги КУ-01 (ГОСТ 15130-86 «Стекло кварцевое оптическое»), Heraeus Suprasil Standard, Saint-Gobain Spectrosil A / B, Corning HPFS 7980, JGS1, Dynasil 1100 / Dynasil 4100 и др). Кроме того, для снижения трудозатрат часть технологических операций была исключена: в частности, отдельные этапы химической очистки и промывки.

Как результат, вышесказанное отразилось на итоговом увеличении собственных потерь изготовленных опытных образцов МСОВ. Так, согласно результатам измерений методом обрыва, коэффициенты затухания МСОВ, изображение торца которого приведено на рис. 1,б, на длинах волн $\lambda = 850, 1310$ и 1550 нм составили $\alpha = 0.11, 0.80$ и 0.40 дБ/м, соответственно. По этой причине далее в измерительной схеме для оценивания изменения потерь на изгиб использовались короткие отрезки данного МСОВ длиной до 1.5...2 м.

Схема проведения измерений представлена на рисунке 2, коллаж с ее фотографией – на рисунке 3.

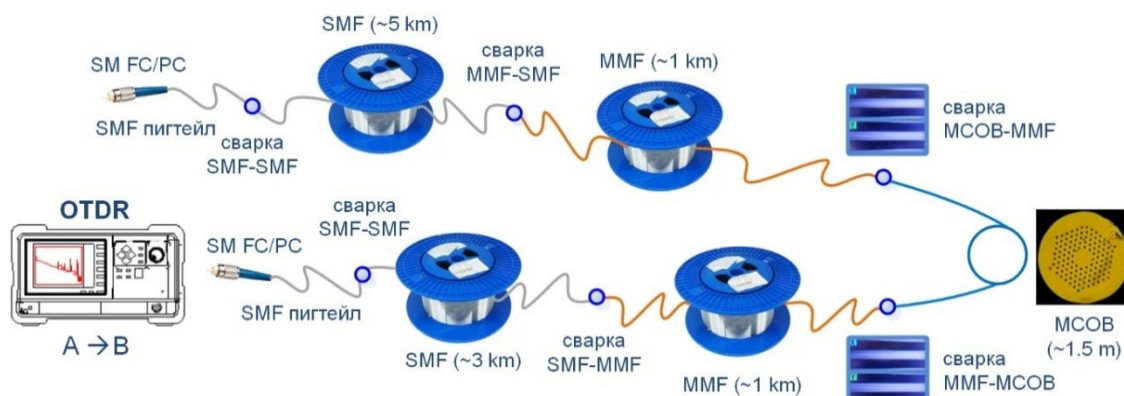


Рис. 2. Схема измерения изменения потерь на изгиб МСОВ

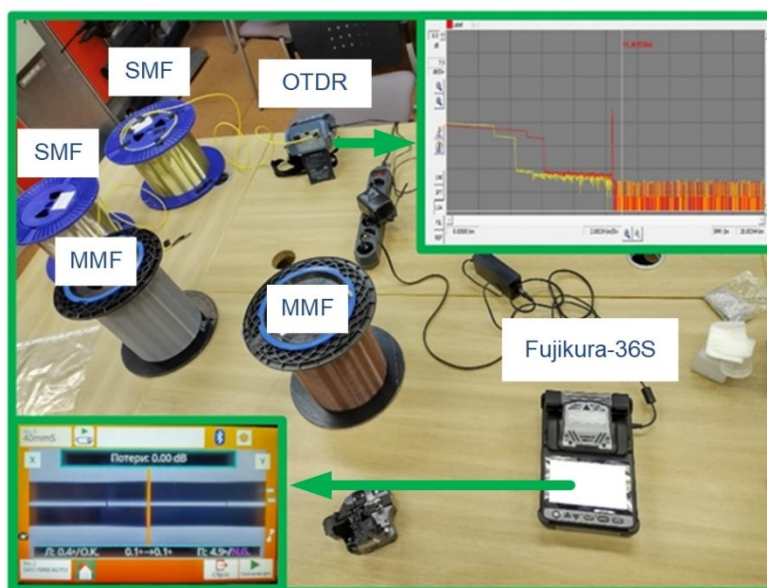


Рис. 3. Коллаж с фотографией схемы измерений

Контроль изменения изгибных потерь осуществлялся методом обратного рассеяния во временной области с помощью полевого оптического рефлектометра (OTDR – Optical Time Domain Reflectometer) EXFO AXS-110 с одномодовым оптическим блоком на длинах волн $\lambda=1310$ и 1550 нм. Поскольку, как было отмечено выше, тестировался короткий (не более 2 м) отрезок МСОВ (при этом одиночный виток волокна наносился на оправку примерно в середине отрезка), для адекватной оценки изменения итоговых вносимых потерь по рефлектограмме (две сварки, собственное затухание МСОВ и локальные потери на изгиб), образец МСОВ вваривался между двумя катушками с многомодовыми оптическими волокнами (ММФ) кат. ISO/IEC OM2+/OM3 длиной по ~ 1 км каждая, которые, в свою очередь, были соединены с пигтелированными катушками с волокнами SMF протяженностью 3 и 5 км.

Соединение волокон осуществлялось с помощью штатного комплекта полевого сварочного аппарата Fujikura-36S в режиме «ММ AUTO» без внесения каких-либо дополнительных коррекций параметров программы сварки (ток дуги, время подачи дуги) относительно исходных значений «по умолчанию». Изображения сварных соединений МСОВ – ММФ приведены на рис. 4.



Рис. 4. Изображения сварных соединений на экране сварочного аппарата Fujikura-36S, выполненные в автоматическом режиме «ММ AUTO»: а) МСОВ – ММФ «А»; б) МСОВ – ММФ «Б»

Первое полученное значение итогового затухания для расплавленного прямолинейного отрезка МСОВ рассматривалось как опорное. При этом, результаты измерения суммарных потерь на стыках МСОВ и ММФ, смонтированных даже в режиме «ММ AUTO», показали относительно адекватные значения – не более 7.0 дБ для описанной схемы измерения, приведенной на рис. 2, что с учетом двух сварок МСОВ–ММФ и собственного затухания МСОВ на отрезке 1.5...2 м, составляет менее 3.5 дБ на сварку.

Далее на оправку соответствующего диаметра наносился одиночный виток тестируемого МСОВ, проводилось измерение характеристики обратного рассеяния и регистрировалось значение изменения итогового затухания за счет локальных потерь на изгиб. Были использованы оправки, обеспечивающие следующие радиусы изгиба: 75.00, 41.25, 36.00, 29.00, 14.00 и 6.25 мм. Измеренные в направлении «А→Б» характеристики обратного рассеяния одновременно выведенные и разнесенные для удобства визуального просмотра в пространстве рабочего окна ПО OTDR, представлены на рис. 5.

Результаты

Сводная диаграмма результатов измерений локальных потерь на изгиб приведена на рис. 6. Как и прогнозировалось, МСОВ оказалось существенно более чувствительным к изгибам, по сравнению с типовыми SMF рек. ITU-T G.652.

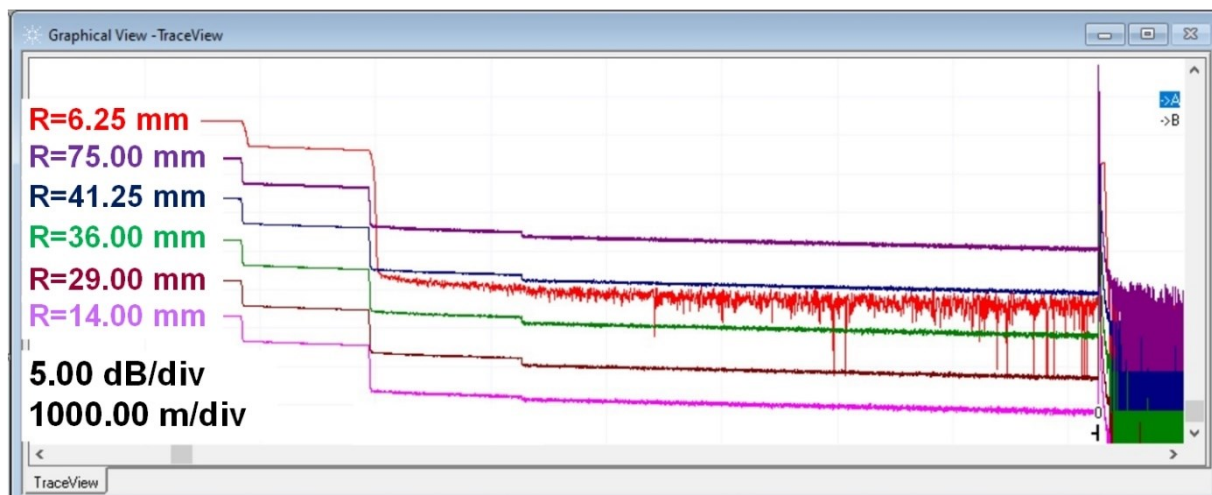


Рис. 5. Результаты измерений характеристик обратного рассеяния в направлении «А→Б»

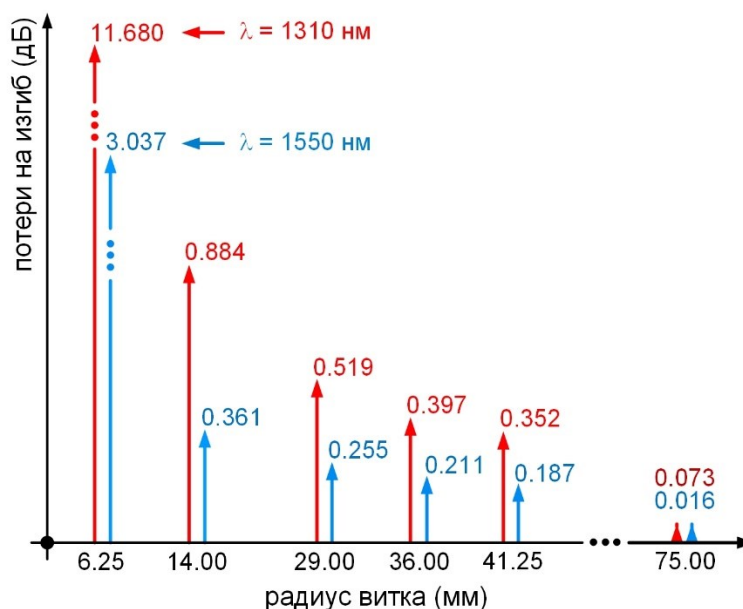


Рис. 6. Диаграмма результатов измерений локальных потерь на изгиб МСОВ

Если провести сопоставление с рассмотренной выше нормой для этих волокон, которая согласно [12], не должна превышать 0.05 дБ на длине волны 1550 нм для одиночного витка с радиусом изгиба 16 мм, то в случае МСОВ радиус изгиба 14 мм приводит к потерям 0.351 дБ, что в 7.22 раз больше.

Кроме того, в отличие от SMF, для МСОВ, напротив, дополнительные потери на изгиб повышаются не с увеличением, а с уменьшением длины волны, что показывают результаты сопоставления полученных экспериментальных данных, приведенные также на рис. 6 и дополнительно на рис.7. Так, для этой же оправки радиусом 14 мм на длине волны $\lambda=1310$ нм потери на изгиб составили уже 0.884 дБ, что практически в 2.45 раз больше, по сравнению с указанным выше значением, полученным на оптической несущей $\lambda=1550$ нм.

Отдельный интерес в рамках данной работы представляет сопоставление результатов измерений для экстремально малого радиуса изгиба 6.25 мм при допустимом 30 мм для SMF рек. ITU-T G.652 с внешним диаметром 250 мкм по первичному защитно-упрочняющему покрытию и внешнему диаметру по оболочке 125 мкм.

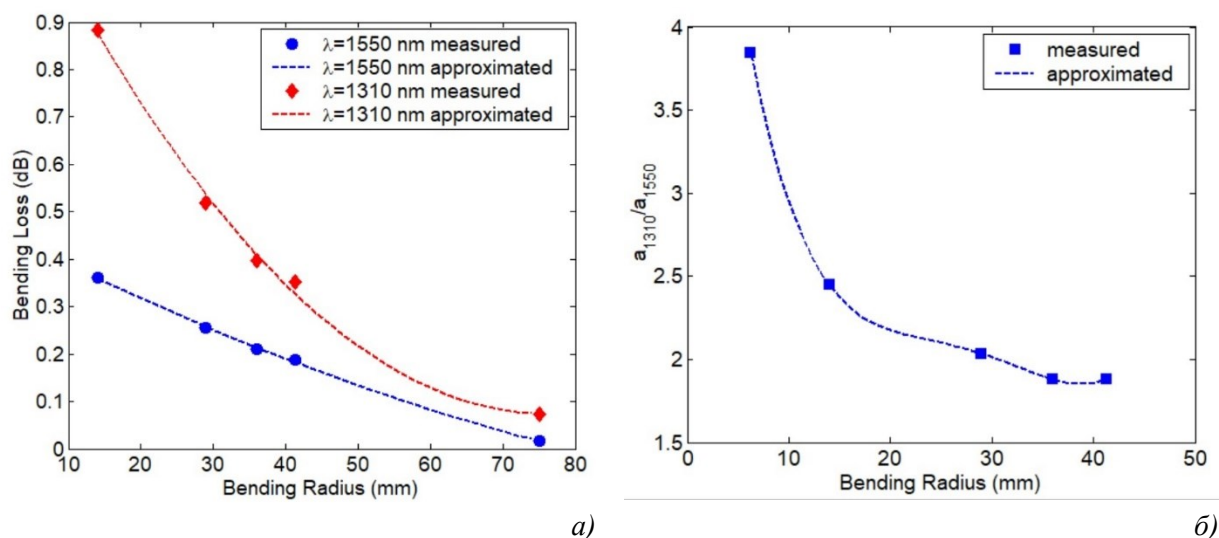


Рис. 7. Сравнение локальных потерь на изгиб, измеренных на длинах волн $\lambda=1310$ и 1550 нм: (а) диаграммы сопоставления полученных экспериментальных данных; (б) отношение измеренных потерь на одиночном витке МСОВ, нанесенного на оправку заданного диаметра с соответствующим радиусом изгиба

Здесь уже для длины волны $\lambda=1310$ нм наблюдается критически высокое затухание 11.680 дБ, в то время как на $\lambda=1550$ нм потери на изгиб также увеличились, но до 3.037 дБ, что в 3.85 раз меньше, соответственно, по сравнению с первым значением.

Вместе с тем, можно отметить общий тренд экспоненциального снижения разности потерь, измеренных на упомянутых длинах волн $\lambda=1310$ и 1550 нм, с увеличением радиуса изгиба: от приведенного выше разброса в 3.85 раз для 6.5 мм до 1.88 раз для 41.25 мм, а для большего изгиба 75 мм эта разница становится уже в пределах погрешности средства измерения.

Заключение

Представлены результаты экспериментальных исследований приращения локальных потерь на изгиб в области второго и третьего окон прозрачности ($\lambda=1310$ и 1550 нм) на одиночном витке ранее изготовленного методом «Stack-and-Draw» опытного образца кварцевого МСОВ с «традиционной» гексагональной конфигурацией. В отличие от телекоммуникационных волокон SMF рек. ITU-T G.652, для МСОВ дополнительные потери при уменьшении радиуса изгиба на длине волны $\lambda=1310$ нм становятся существенно больше, по сравнению с $\lambda=1550$ нм. Это соотношение значений измеренного на указанных оптических несущих затухания для одной и той же оправки варьируется от 1.88 до 3.85 , экспоненциально увеличиваясь при уменьшении радиуса изгиба от 41.25 мм до 6.25 мм. Сопоставление результатов тестирования МСОВ с допустимым, регламентированным руководящим документом [12], увеличением потерь на изгибе одиночного витка для SMF рек. ITU-T G.652, показывает, что МСОВ, несомненно, более чувствительны к подобным воздействиям: здесь различие значений прироста затухания отличается практически на порядок.

Полученные в ходе проведения экспериментальных исследований данные подчеркивают необходимость учета специфических характеристик МСОВ, особенно принимая во внимание ориентированность разрабатываемых МСОВ на полевые условия. Здесь, несомненно, возникает целый ряд вопросов, связанных с особенностями технологических про-

цессов: изготовления волоконно-оптических кабелей/сборок, их инсталляции и технической эксплуатации, а также монтажа в оконечных устройствах коммутации, неизбежно приводящих к возникновению макро-изгибов волокна.

В то же время, речь идет о линиях связи компактных сетей передачи данных разного назначения, протяженность которых составляет буквально десятки метров и, фактически, ограничена технологической картой производства МСОВ двухстадийным методом «Stack-and-Draw» на промышленном оборудовании до 100 м. Для указанной дистанции при адекватном радиусе локального изгиба, с учетом бюджета мощности коммерчески доступных трансиверов оборудования систем связи, ратифицированных спецификаций действующих сетевых стандартов IEEE, зарегистрированные потери не являются критичными. Тем не менее, представляется целесообразным проведение серии дополнительных исследований методов модификации конфигурации МСОВ, с точки зрения повышения стойкости к увеличению потерь на изгиб.

***Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект №25-29-00881.*

Список литературы

1. Мендес, А. Справочник по специализированным оптическим волокнам: перевод с английского / А. Мендес, Т. Ф. Морзе. – Москва: Техносфера, 2012. – 728 с.
2. Ermatov, T. Functionalized microstructured optical fibers: materials, methods, applications / T. Ermatov, J. S. Skibina, V. V. Tuchin et al. // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – P. 921-1 – 921-20.
3. Nizar, S. M. Comparison of different photonic crystal fiber structure: a review / S. M. Nizar, S. R. Ahamed, E. Priyanka et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1717. – P. 012048-1 – 012048-7.
4. Tang, Z. Applications of microstructured optical fibers in ultrafast optics: a review / Z. Tang, Z. Zheng, B. Li et al. // *Photonics*. – 2024. – Vol. 11. – P. 151-1 – 151-21.
5. Chen, M.-Y. Design of asymmetric large-mode area optical fiber with low-bending loss / M.-Y. Chen, Yu.-R. Li, J. Zhou et al. // *IEEE Journal of Lightwave Technologies*. – 2013. – Vol. 31, No. 3. – P. 476–481.
6. Гатчин, Ю. А. Оптические потери при изгибе одномодового микроструктурированного световода с большой сердцевиной / Ю. А. Гатчин, К. В. Дукельский, И. Б. Бондаренко и др. // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2015. – № 2. – С. 246–252.
7. Zehua, X. Ultralow bending-loss micro-structured fiber with large-mode-area / X. Zehua, Sh. Yu-Lai, Zh. Wen-Tao et al. // *Optik*. – 2022. – Vol. 251. – P. 168440-1 – 168440-10.
8. Denisov, A. All-glass single-mode leakage channel microstructured optical fibers with large mode area and low bending loss / A. Denisov, V. Dvoyrin, A. Kosolapov et al. // *Photonics*. – 2023. – Vol. 10, No. 4. – P. 465-1 – 465-19.
9. Gu, Sh. Research on bending characteristics of hollow-core micro-structured fibers for development of fiber optic gyroscopes / Sh. Gu, P. Pi, Zh. Lian et al. // *Chinese Journal of Lasers*. – 2023. – Vol. 50, No. 6. – P. 0606003-1 – 0606003-7.
10. Uthman, M. Prediction of bending loss in photonic crystal fibres: a machine learning approach using low-computing-cost algorithm / M. Uthman // *Middle East Research Journal of Engineering and Technology*. – 2025. – Vol. 5, No. 1. – P. 001-1 – 001-19.

11. Бурдин, А. В. Разработка и тестирование кварцевых микроструктурированных оптических волокон для линий связи компактных высокоскоростных сетей передачи данных разного назначения / А. В. Бурдин, А. С. Евтушенко, М. А. Орлов и др. // Труды 10-й Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике, Пермь, 2026. – С. 90–93.
12. Рекомендация МСЭ-Т G.652. Серия G: Системы и среда передачи, цифровые системы и сети. Характеристики среды передачи и оптических систем – Волоконно-оптические кабели. Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля: издание официальное. – Женева: Международный союз электросвязи, 2025. – 30 с.
13. Бурдин, А. В. Результаты моделирования кварцевых микроструктурированных оптических волокон, обеспечивающих одномодовый режим функционирования в области коротких длин волн / А. В. Бурдин, А. С. Евтушенко, М. В. Дашков и др. // Труды 10-й Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике, Пермь, 2026. – С. 669–671.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF BENDING LOSS OF SILICA MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBER WITH A HEXAGONAL CONFIGURATION

A.V. Bourdine^{1,2,3}, V.G. Nesterov³, M.A. Orlov³, A.S. Evtushenko², A.A. Belyaev^{1,3}, E.S. Zaitseva², D.N. Shurupov¹, S.S. Pashin¹, E.V. Ter-Nersesyants¹

¹ JSC "Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I."
36/1, Babushkin str., St. Petersburg 192171, Russian Federation

² Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
23, Lev Tolstoy str., Samara, 443010, Russian Federation

³ Saint Petersburg State University of Telecommunications named after M.A. Bonch-Bruевич,
22, Bolshevikov av., St. Petersburg 193232, Russia

Abstract. This work presents the results of experimental research of the increase in bending loss increasing on a segment of earlier on fabricated by “Stack-and-Draw” method pilot sample of silica microstructured optical fiber (MOF) with typical hexagonal configuration, included in lab artificial fiber optic link. Changes in bending loss were measured by optical time domain reflectometer on wavelengths 1310 and 1550 nm, while initial total loss value, measured for straightened segment of MOF, was considered as the reference. A single turn of the MOF around a mandrel with a specified diameter was then applied, and the backscattered characteristic was measured to estimate the change in total attenuation due to bending loss. Six mandrels ranging in radius from 75 mm to an extremely small 6.25 mm were tested. As expected, the MOF proved to be generally more sensitive to bending than, for example, standard single-mode fiber of ITU-T Rec. G.652. However, unlike the latter, according to the results of the measurements presented in this paper, for the MOF, additional bending losses increase more strongly for lower wavelengths.

Keywords: silica microstructured optical fiber, bending loss, permissible bending radius for silica optical fibers.

Статья представлена в редакцию 05 ноября 2025 г.