

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ
OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-1-14

УДК 681.7.068

Исследование характеристик сварных соединений телекоммуникационных многомодовых оптических волокон и кварцевых микроструктурированных волоконных световодов гексагональной конфигурации**Антон Владимирович Бурдин¹✉, Вячеслав Геннадьевич Нестеров²,
Михаил Алексеевич Орлов³, Александр Сергеевич Евтушенко⁴,
Станислав Сергеевич Пашин⁵, Елена Сергеевна Зайцева⁶, Андрей Александрович Беляев⁷,
Дмитрий Николаевич Шурупов⁸, Владимир Витальевич Демидов⁹,
Егеше Вавикович Тер-Нерсесянц¹⁰, Константин Владимирович Дукельский¹¹,
Григорий Сергеевич Полищук¹²**^{1,5,7,8,9,10,11,12} АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация^{1,4,6} Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443090, Российская Федерация^{1,2,3,7,11} Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация¹ bourdine@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8737-5486>² nesterovnonstop@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7699-4450>³ miha5033@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3075-9558>⁴ alex2194ru@yandex.com, <https://orcid.org/0000-0001-5677-7802>⁵ pashinstanislav@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-7898-974X>⁶ zaytzewa@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4696-9258>⁷ adresat240@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-3250-3786>⁸ shurupoff.dm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5223-2354>⁹ demidov@goi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2545-2487>¹⁰ ter@goi.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2280-6474>¹¹ kdukel@goi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>¹² g.polishchuk@goi.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>**Аннотация**

Введение. В работе представлены результаты экспериментальной апробации возможности выполнения сварного соединения телекоммуникационных градиентных многомодовых оптических волокон категории ISO/IEC OM2+/OM3 и микроструктурированных оптических волокон с помощью сварочного аппарата Fujikura-36S (Fujikura Ltd., Япония). Рассматривались кварцевые микроструктурированные волоконные световоды с гексагональной конфигурацией, обеспечивающей квазиодномодовый режим функционирования в расширенном, по сравнению с типовыми одномодовыми оптическими волокнами действующих рекомендаций ITU-T, в область коротких длин волн спектрального диапазона ($\lambda = 800\text{--}1700$ нм), и внешним «телекоммуникационным» диаметром 125 мкм. Исследовались потенциальные возможности снижения затухания на стыке путем соответствующего подбора параметров программы сварки — тока дуги и времени подачи дуги — и их оптимальной комбинации, обеспечивающей компромисс между качественным проваром без дефектов в зоне обжига и искомой минимизацией вносимых потерь. **Метод.** Экспериментальная схема включала в себя макетную комбинированную волоконно-оптическую линию передачи, которая состояла из двух катушек с одномодовыми и двух катушек с многомодовыми оптическими волокнами. С одной стороны катушки с одномодовыми оптическими волокнами были пителированы. Со второй неоконцованной стороны к ним с помощью сварочного аппарата подсоединялись упомянутые выше две катушки с многомодовыми оптическими волокнами. Протяженность волокон каждой из четырех катушек комбинированной линии составляла не

менее 1 км. Тестируемый образец микроструктурированного волоконного световода длиной около 1,5 м вваривался непосредственно между катушками с многомодовыми волокнами по соответствующим образом скорректированной программе сварки. Контроль изменения вносимых потерь, включающих в себя потери на двойном сварном соединении микроструктурированный световод — многомодовое оптическое волокно и собственные потери отрезка исследуемого микроструктурированного световода, осуществлялся с помощью оптического рефлектометра EXFO AXS-110 (EXFO, Канада), реализующего метод обратного рассеяния во временной области. **Основные результаты.** На основании серии проведенных экспериментальных исследований, направленных на поиск компромисса между предельно заниженными параметрами программы сварки и выполнения стыка без дефекта, была локализована оптимальная, с точки зрения минимизации вносимых потерь, комбинация тока дуги (STD-30 усл. ед.) и времени подачи дуги (1100 мс). Как результат, итоговое значение вносимых потерь удалось снизить практически на 0,8–1,0 дБ и более относительно референсного показателя: в частности, для указанных установок программы результирующее затухание составило 5,721 дБ при опорном значении 6,722 дБ. **Обсуждение.** Представленные кварцевые MOF, поддерживающие квазиодномодовый режим передачи оптического излучения в недоступном для типовых телекоммуникационных оптических волокон спектральном диапазоне области первого окна прозрачности ($\lambda = 850$ нм), в том числе, могут быть ориентированы на практическое применение как в оптических приборах для лазерной техники, так и в соединительных линиях связи компактных высокоскоростных сетей передачи данных. При этом инсталляция таких линий связи в полевых условиях потребует монтажа оконечных устройств коммутации, в том числе, выполнения сварных соединений оптических волокон линии (т. е. непосредственно микроструктурированных волоконных световодов) и многомодовых оптических волокон штатных пигтейлов. Таким образом, полученное экспериментальное подтверждение потенциальной возможности выполнения сварных соединений кварцевых микроструктурированных и типовых многомодовых оптических волокон с адекватным значением вносимых потерь и сохранением световедущих свойств создают все предпосылки для дальнейшего применения таких MOF в различных научно-технических и научно-практических приложениях.

Ключевые слова

микроструктурированное оптическое волокно, сварка микроструктурированных волокон, сварное соединение оптических волокон, вносимые потери на стыке, параметры программы сварки

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-29-00881).

Ссылка для цитирования: Бурдин А.В., Нестеров В.Г., Орлов М.А., Евтушенко А.С., Пашин С.С., Зайцева Е.С., Беляев А.А., Шурупов Д.Н., Демидов В.В., Тер-Нерсесянц Е.В., Дукельский К.В., Полищук Г.С. Исследование характеристик сварных соединений телекоммуникационных многомодовых оптических волокон и кварцевых микроструктурированных волоконных световодов гексагональной конфигурации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 1. С. 1–14. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-1-14

Research of parameters of fusion splices of telecommunication multimode optical fibers and silica microstructured fiber lightguides with hexagonal configuration

Anton V. Bourdine¹✉, Vyacheslav G. Nesterov², Mikhail A. Orlov³, Alexander S. Evtushenko⁴, Stanislav S. Pashin⁵, Elena S. Zaitseva⁶, Andrei A. Belyaev⁷, Dmitrii N. Shurupov⁸, Vladimir V. Demidov⁹, Egishe V. Ter-Nersesyants¹⁰, Konstantin V. Dukelskii¹¹, Grigorii S. Polishchuk¹²

^{1,5,7,8,9,10,11,12} JSC “Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I.”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation

^{1,4,6} Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443090, Russian Federation

^{1,2,3,7,11} Saint Petersburg State University of Telecommunications named after M.A. Bonch-Bruевич, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation

¹ bourdine@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8737-5486>

² nesterovnonstop@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7699-4450>

³ miha5033@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3075-9558>

⁴ alex2194ru@yandex.com, <https://orcid.org/0000-0001-5677-7802>

⁵ pashinstanislav@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-7898-974X>

⁶ zaytzewa@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4696-9258>

⁷ adresat240@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-3250-3786>

⁸ shurupoff.dm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5223-2354>

⁹ demidov@goi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2545-2487>

¹⁰ ter@goi.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2280-6474>

¹¹ kdukel@goi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>

¹² g.polishchuk@goi.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>

Abstract

This work presents the results of experimental approbation of the ability to fuse telecommunication graded index multimode optical fibers of ISO/IEC Category OM2+/OM3 and silica microstructured optical fibers by using a commercially available field fusion splicer kit Fujikura-36S (Fujikura Ltd., Japan). We tested silica microstructured optical fiber with a hexagonal configuration that provides quasi-singlemode operation over an extended spectral band

up to short wavelengths ($\lambda = 800\text{--}1700$ nm) in comparison with conventional singlemode optical fiber of ratified ITU-T Recommendations. The potential possibilities were explored for reducing of attenuation by selection and combination of fusion program parameters (arc current and arc time) to find a compromise between quality fusion splicing without any defects and minimization of insertion loss. About 1.5 m long short segment of researched microstructured optical fiber was spliced between two spools with multimode fibers, while each one of them was also spliced with two pigtailed spools with singlemode optical fibers. Fiber length of each spool was at the least 1 km long in order to provide insertion loss measurements by using optical time domain reflectometer EXFO AXS-110 (EXFO, Canada). Based on a series of experiment, we have identified an optimal combination of arc current (STD-30 a.u.) and arc time (1100 ms) which provides desired compromise between reducing the fusion program parameters to prevent the MOF air hole collapsing under the quality splice without defects, and decreased insertion loss. As a result, the total insertion loss has been reduced to 0.8–1.0 dB and more in comparison with the reference value. For instance, mentioned above program settings gave the loss 5.721 dB under the reference value 6.722 dB. Therefore, the experimental results confirm ability of fusion splicing microstructured and multimode optical fibers with an acceptable insertion loss by using commercially available field fusion splicer kits. This provides to utilize proposed microstructured optical fibers with extended singlemode operation wavelength range in various applications of laser technology, optical devices and short-range high bit rate optical networks.

Keywords

microstructured optical fiber, fusion splice of microstructured optical fibers, fusion splice of optical fibers, insertion loss, splice loss, fusion splicing program parameters

Acknowledgements

The research was funded by the Russian Science Foundation (RSF) (project No. 25-29-00881).

For citation: Bourdine A.V., Nesterov V.G., Orlov M.A., Evtushenko A.S., Pashin S.S., Zaitseva E.S., Belyaev A.A., Shurupov D.N., Demidov V.V., Ter-Nersesyants E.V., Dukelskii K.V., Polishchuk G.S. Research of parameters of fusion splices of telecommunication multimode optical fibers and silica microstructured fiber lightguides with hexagonal configuration. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 1, pp. 1–14 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-1-14

Введение

В настоящее время кварцевые микроструктурированные оптические волокна (Microstructured Optical Fibers, MOF) и фотонно-кристаллические волокна (Photonic Crystal Fibers, PCF) относятся к штатной серийной высокотехнологичной продукции. Данная продукция входит в состав современной электронно-компонентной базы и активно применяется в различных областях научно-технических направлений: лазерная техника/лазерные системы [1–4], волоконно-оптические датчики/сенсоры [3, 5–9], телекоммуникации [10, 11], оптические и оптоэлектронные устройства/приборы/оборудование [9, 12] и др.

Отметим, что использование MOF в практических приложениях требует решения проблемы их сращивания с телекоммуникационными оптическими волокнами (ОВ) действующих рекомендаций ITU-T¹ и категорий ISO/IEC² для подключения к типовому измерительному оборудованию. Например, для лабораторных измерительных схем и макетных образцов изделий подключение MOF к «связным» ОВ в большинстве случаев выполняется на оптической скамье с помощью прецизионных юстировочных устройств без физического контакта с некоторым воздушным зазором (так называемое «free-space» соединение). Однако практическая реализация приложений, ориентированных на опытную или эксплуатацию в полевых условиях требу-

ет более надежное, нечувствительное к вибрациям, а также компактное, по сравнению с «free-space»-стыком, решения. Всем перечисленным требованиям удовлетворяет сварное соединение.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальной апробации возможности выполнения сварного соединения телекоммуникационных градиентных многомодовых оптических волокон категории ISO/IEC² OM2+/OM3 и микроструктурированных оптических волокон с помощью сварочного аппарата Fujikura-36S (Fujikura Ltd., Япония). Рассматривался разработанный и изготовленный опытный образец кварцевого микроструктурированного волоконного световода с гексагональной конфигурацией, обеспечивающей, согласно расчетам, квази-одномодовый режим функционирования в расширенном, по сравнению с типовыми одномодовыми оптическими волокнами действующих рекомендаций ITU-T, в область коротких длин волн спектрального диапазона ($\lambda = 800\text{--}1700$ нм), и внешним «телекоммуникационным» диаметром 125 мкм. Исследовались потенциальные возможности снижения затухания на стыке путем соответствующего подбора параметров программы сварки — тока дуги и времени подачи дуги — и их оптимальной комбинации, обеспечивающей искомую минимизацию вносимых потерь.

Вопросы реализации сварных соединений кварцевых микроструктурированных волоконных световодов и телекоммуникационных оптических волокон

На сегодняшний день на рынке технологического оборудования волоконной оптики уже представлен коммерчески доступный универсальный инновационный сварочный аппарат Comcore PFS-500 (S) (Comcore

¹ ITU-T Manual. Optical Fibres, Cables and Systems. 2009.

² ГОСТ Р МЭК 60793-2-10-2018 (ISO/IEC 60793-2-10) Волокна оптические. Часть 2-10. Технические требования к изделию. Групповые технические требования к многомодовым оптическим волокнам категории A1. Введ. 04.10.2018. М.: Стандартинформ, 2018. 41 с.

Optical Intelligence Technologies Co. Ltd., Китай)¹, который обеспечивает автоматизированную юстировку и сращивание кварцевых неодинаковых ОВ различной конфигурации, в том числе, MOF и PCF с внешним диаметром 125 мкм с одномодовыми и многомодовыми ОВ. Заметим, что известен ряд работ [13–31], посвященных вопросам практической реализации сварного соединения MOF со стандартными одномодовыми ОВ (Standard Singlemode Fiber, SMF) рекомендации ITU-T G.652²), а также градиентными многомодовыми ОВ 50/125 (Multimode Optical Fiber, MMF) категории ISO/IEC³ OM2+/OM3 [30–32] не только хорошо известными «лабораторными» [13, 18–21, 24, 27–29], но и простыми доступными «полевыми» технологиями [14–17, 22, 23, 25, 30, 32].

Согласно данным теоретических и экспериментальных исследований, представленных в [13–32], ключевым фактором возникновения высоких вносимых потерь на стыке MOF и ОВ типовой «коаксиальной» конструкции (сердцевина, окруженная одной внешней сплошной оболочкой) является деформация структуры MOF, обусловленная неизбежным схлопыванием (коллапсированием) воздушных отверстий волокна под воздействием дуги в зоне обжига в процессе выполнения сварки. Дополнительно отмечается сильное несовпадение картин радиального распределения полей мод, обусловленное принципиально разной конфигурацией сращиваемых ОВ, а также разброс диаметров мод. При этом в работах [13–31] экспериментально продемонстрирована и подтверждена возможность реализации сращивания MOF и SMF при достаточно малых вносимых потерях не только на соединениях, выполненных на лабораторных станциях для тейпирования и сращивания специальных ОВ [13, 18–21, 24, 28, 29, 31], но и на типовых коммерчески доступных штатных комплектах сварочных аппаратов, предназначенных непосредственно для полевого монтажа волокон оптических кабелей связи [14–17, 22, 23, 25, 29, 30, 32].

Важно, что соответствующий подбор, адаптация, коррекция и комбинация оптимальных значений параметров режима сварки (ток дуги, время подачи дуги, опциональный ввод прецизионного рассогласования, позиционирование с прецизионным смещением относительно положения электродов и др.) и, в ряде случаев, модификация и дополнение самой процеду-

ры выполнения сварного соединения (многократная повторная подача дуги [15, 16], серия интервальных повторных сварок с «подсветкой» лазером [17], вварка дополнительного согласующего волоконного световода [16, 22, 30, 31]) за счет выравнивания диаметров пятна моды и, самое главное, существенного уменьшения вплоть до полного нивелирования деформации MOF, позволяют добиться впечатляющих результатов по минимизации вносимых потерь на сварных соединениях. Так, согласно [14–17, 22, 23, 25, 29], несмотря на принципиально разную конфигурацию сращиваемых ОВ, потери в сварках MOF/PCF–SMF/MMF, выполненных с помощью полевых аппаратов, могут быть уменьшены до 0,3–0,5 дБ и менее. Причем, если практически во всех вышеперечисленных публикациях оценка вносимых потерь на стыках волокон осуществлялась с помощью комплектов оптических тестеров (когерентный источник оптического излучения на заданной длине волны, измеритель оптической мощности), то в [20, 21, 32] контроль и измерение вносимых потерь на сварных соединениях MOF–SMF/MMF выполнялись методом обратного рассеяния во временной области с помощью оптического рефлектометра (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR), а отрезки MOF непосредственно включались в состав макетных волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), протяженность которых составляла от 1 км и более.

Таким образом, анализ результатов исследований, приведенных в работах [13–31], демонстрирует потенциальную возможность выполнения сварного соединения кварцевых MOF и телекоммуникационных ОВ даже с помощью полевых сварочных аппаратов, а соответствующий подбор комбинации отдельных параметров программы сварки может обеспечить существенное снижение вносимых потерь на стыке.

Кварцевое MOF с гексагональной конфигурацией

Исследовались кварцевые MOF с гексагональной конфигурацией, которые, в отличие от известных прототипов (LMA-5/10 [16], ESM-12-01/02 [23, 25] (NKT Photonics, Дания)), ориентированных для применения в частных приложениях сенсорики и интерферометрии, позиционируются непосредственно как новый класс направляющих систем линий связи мультигигабитных компактных оптических сетей передачи данных. В качестве примера таких сетей можно привести соединительные линии кабельных систем дата-центров, сетей хранения данных, вычислительных центров, а также бортовых и промышленных сетей. Активное оборудование систем связи для компактных оптических сетей преимущественно реализуется на базе когерентных источников оптического излучения — лазеров с вертикальным объемным резонатором, функционирующих непосредственно в области длин волн первого окна прозрачности $\lambda = 850$ нм. Отметим, что, такие оптические сети все чаще используют технологию коротковолнового мультиплексирования.

Структура предлагаемого MOF является «классической» (рис. 1, а), включает в себя уменьшенное до 5

¹ Comcore PFS-500(S) Universal Polarization Maintaining (PM) Fiber Fusion Splicer. Comcore Technologies. Products [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.comcore.com/products-detail13-en.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 01.10.2025).

² ГОСТ Р МЭК 60793-2-10-2018 (ISO/IEC 60793-2-10) Волокна оптические. Часть 2-10. Технические требования к изделию. Групповые технические требования к многомодовым оптическим волокнам категории A1. Введ. 04.10.2018. М.: Стандартинформ, 2018. 41 с.

³ Рекомендация МСЭ-T 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. Введ. 08.2024. Женева: Международный Союз Электросвязи. Сектор стандартизации, 2025. 30 с.

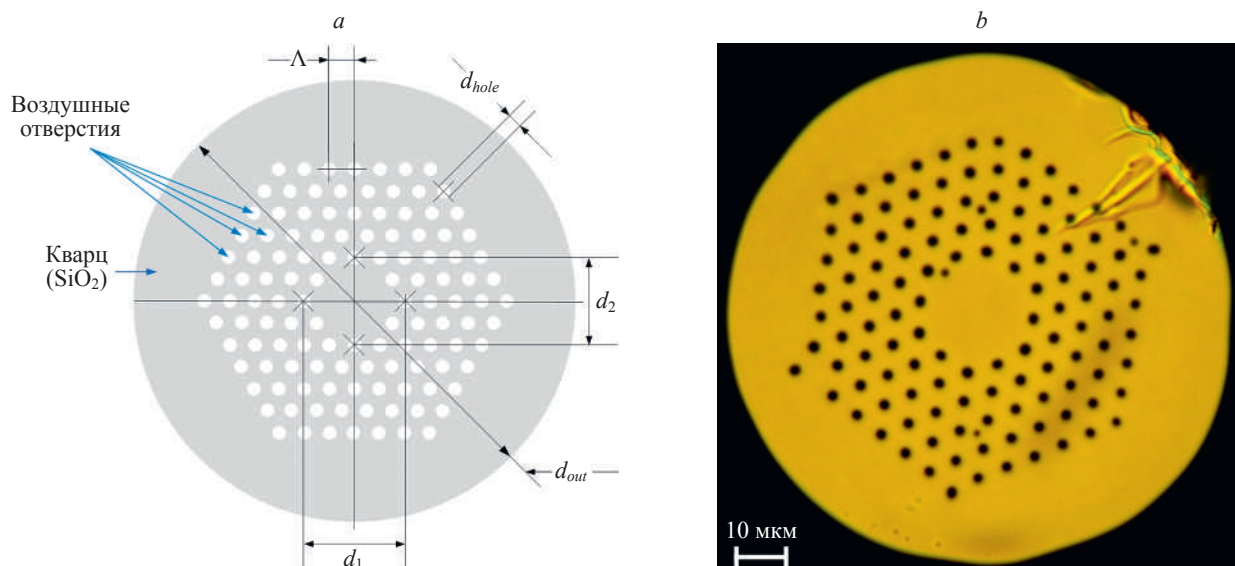


Рис. 1. Опытный образец кварцевого микроструктурированного оптического волокна: модельная конфигурация (a); изготовленный опытный образец (b)

Fig. 1. Pilot sample of silica microstructured optical fiber: sketch (model configuration) (a); fabricated sample (b)

(вместо 6 или 7, по сравнению с аналогами [16, 23, 25]), число циклов воздушных отверстий (всего 116), размещенных по типовой гексагональной схеме вокруг центральной световедущей области («сердцевины»). На основании результатов проведенной серии предварительного теоретического моделирования [33, 34] были определены оптимальные, с точки зрения обеспечения искомого одномодового режима передачи оптического излучения в области коротких длин волн, параметры конфигурации и локализованы технологические допуски на них с учетом масштабирования на искомый внешний «телекоммуникационный» диаметр $d_{out} = 125$ мкм. Так, рекомендуемый диапазон значений диаметра воздушных отверстий составил $d_{hole} = 2,4\text{--}2,5$ мкм для шага их размещения по гексагональной схеме $\Lambda = 7,21$ мкм при габаритах «сердцевины» (также увеличена, относительно прототипов [16, 23, 25]) $d_1 = 26,34\text{--}26,44$ мкм («длинная» диагональ) и $d_2 = 22,47\text{--}22,57$ мкм («короткая» диагональ).

Перечисленные параметры рассматривались как опорные значения и далее использовались для отработки технологических режимов фабрикации MOF описанной конфигурации. В результате методом «Stack-and-Draw» были изготовлены несколько опытных образцов ОВ длиной по 100 м каждый (рис. 1, b). Образцы несколько отличались от искомой конфигурации неидеальной несимметричной структурой при следующих полученных геометрических характеристиках: внешний диаметр $d_{out} = 125 \pm 3$ 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.

Поскольку основной акцент при изготовлении первой партии опытных образцов MOF был сделан на отработку технологических режимов, были использованы 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-01¹, 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. Все это в результате оказало влияние на итоговое увеличение собственных потерь изготовленных опытных образцов MOF. Например, согласно результатам измерений методом обрыва, коэффициенты затухания MOF (рис. 1, b), на длинах волн $\lambda = 850, 1310$ и 1550 нм составили $\alpha = 0,11, 0,80$ и $0,40$ дБ/м соответственно. По этой причине в измерительной схеме для оценивания вносимых потерь на сварных соединениях при подборе параметров программы сварки использовались короткие отрезки данного MOF длиной до 1,5 м.

Методы и средства измерения вносимых потерь на сварном соединении MOF–MMF: описание эксперимента

Напомним, что разрабатываемое MOF предназначено для применения в соединительных линиях мультигигабитных компактных сетей передачи данных. Следовательно, подключение к измерительному оборудованию для тестирования линейного тракта ВОЛП с такими MOF, и к трансиверам оборудования систем связи требует выполнения соединения со штатными пигтейлами с MMF ратифицированных категорий ISO/IEC²,

¹ ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Введ. 01.01.88. М.: Изд-во стандартов, 1987. 30 с.

² ГОСТ Р МЭК 60793-2-10-2018 (ISO/IEC 60793-2-10) Волокна оптические. Часть 2-10. Технические требования к изделию. Групповые технические требования к многомодовым оптическим волокнам категории A1. Введ. 04.10.2018. М.: Стандартинформ, 2018. 41 с.

оконцованными оптическими коннекторами соответствующего типа.

Проведенная серия экспериментальных исследований направлена на отработку технологических режимов монтажа сварного соединения опытного образца MOF и MMF категорий ISO/IEC OM2+/OM3 с помощью доступного комплекта полевого сварочного аппарата Fujikura-36S. Данная модель оснащена системой юстировки по V-образным канавкам и позиционируется непосредственно для монтажа ОВ волоконно-оптических сегментов сетей широкополосного доступа, структурированных кабельных систем и городских сетей связи, отличающихся сравнительно малой протяженностью соединительных кабельных линий.

Исследовались потенциальные возможности минимизации вносимых потерь на стыке путем подбора и соответствующей комбинации параметров программы режима сварки. В частности, программное обеспечение аппарата Fujikura-36S позволяет варьировать ток и время подачи дуги в диапазонах $STD \pm 100$ усл. ед. (стандартное значение ± 100 усл. ед.) и $t = 100-3000$ мс (значение по умолчанию в автоматическом режиме «MM AUTO» $t = 3000$ мс) соответственно.

Схема проведения измерений представлена на рис. 2. Здесь контроль затухания, а также качества провара стыка (помимо визуального анализа изображения зоны обжига на экране сварочного аппарата) было предложено осуществлять методом обратного рассеяния во временной области с помощью OTDR EXFO AXS-110 (EXFO, Канада) с одномодовым оптическим модулем на длине волны $\lambda = 1310$ нм. В отличие от комплекта оптических тестеров, OTDR позволяет выявить сварные соединения с габаритным дефектом (сильным «непроваром»), который, фактически, являясь глубокой микротрещиной, приближающейся к границе раздела сердцевина/оболочка ОВ, непосредственно формирует

на характеристике обратного рассеяния, измеряемой с помощью OTDR, в локации стыка характерные всплески френелевского отражения. Поскольку отработка технологических режимов сращивания проводилась на коротком (до 1,5 м) отрезке тестируемого MOF, для адекватной оценки итоговых вносимых потерь (две сварки и собственное затухание MOF) по характеристике обратного рассеяния образец MOF вваривался между двумя катушками MMF категории ISO/IEC¹ OM2+/OM3 длиной по примерно по 1 км каждая, которые, в свою очередь, были соединены с катушками со стандартными SMF рекомендации ITU-T G.652² протяженностью 3 и 5 км соответственно.

На первом этапе обе сварки MOF–MMF №1 и №2 выполнялись в штатном режиме «MM AUTO», и далее измеренное методом обратного рассеяния значение итоговых вносимых потерь рассматривалось как опорное (далее на рис. 3 эта рефлектограмма обозначена как «REF»). Затем соединение №2 демонтировалось, и сварка повторно выполнялась уже с заданной коррекцией тока дуги и времени подачи дуги. После этого вновь с помощью OTDR определялось результирующее затухание на обоих стыках, и далее проводилась оценка его изменения относительно референсного значения для последующего определения оптимальных, с точки

¹ ГОСТ Р МЭК 60793-2-10-2018 (ISO/IEC 60793-2-10) Волокна оптические. Часть 2-10. Технические требования к изделию. Групповые технические требования к многомодовым оптическим волокнам категории A1. Введ. 04.10.2018. М.: Стандартинформ, 2018. 41 с.

² Рекомендация МСЭ-T 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. Введ. 08.2024. Женева: Международный Союз Электросвязи. Сектор стандартизации, 2025. 30 с.

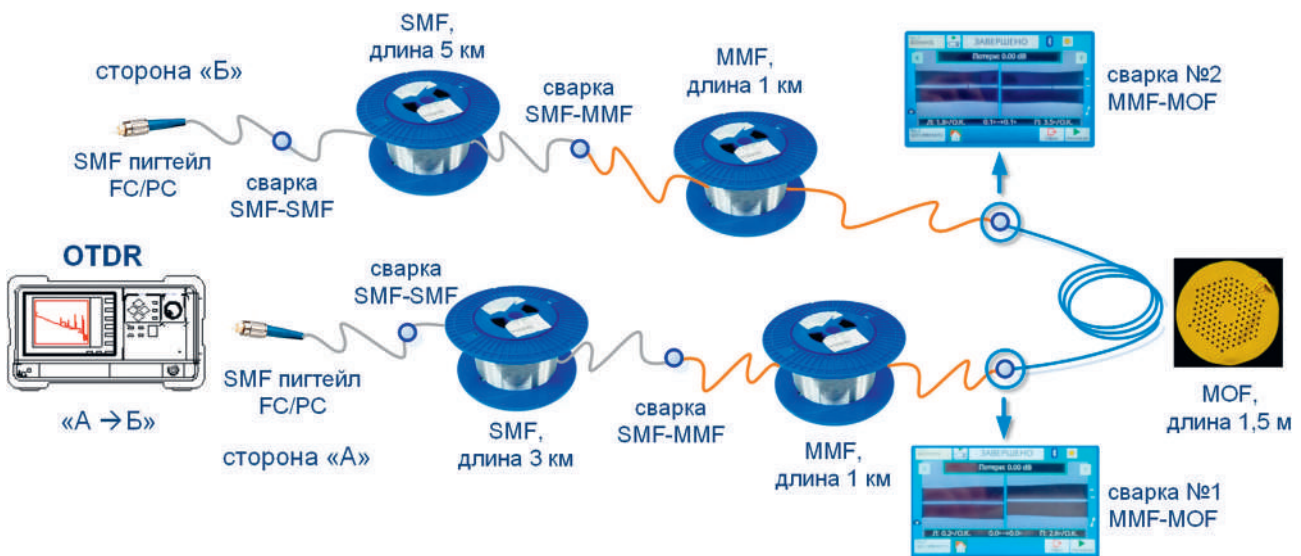


Рис. 2. Схема измерения вносимых потерь на сварных соединениях кварцевого микроструктурированного и телекоммуникационного многомодового оптических волокон (оптический рефлектометр подключен в направлении «А → Б»)

Fig. 2. Scheme of insertion loss measurement at fusion splice of silica microstructured and telecommunication multimode optical fibers (optical reflectometer connected to «A → B» direction)

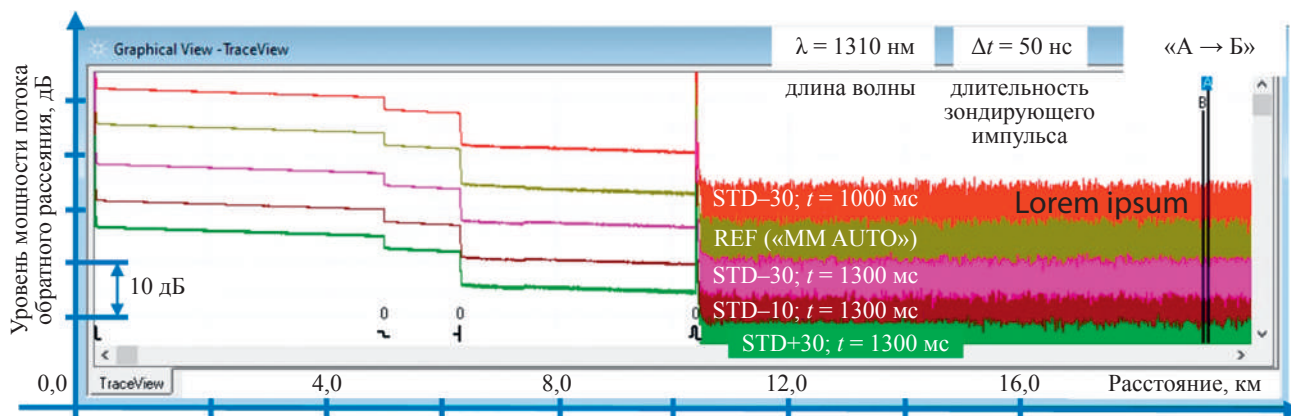


Рис. 3. Примеры результатов измерений характеристик обратного рассеяния в направлении «А → Б»

Fig. 3. Overlapped samples of measured traces along “A → B” direction

зрения потенциальной минимизации потерь на сварках MOF–MMF, указанных параметров программы. Всего было выполнено более 50 испытаний. Некоторые примеры измеренных в направлении «А → Б» характеристик обратного рассеяния (в частности, опорная рефлектограмма «REF») и рефлектограммы, соответствующие четырем разным комбинациям тока дуги и времени подачи) макетной ВОЛП, одновременно выведенные и разнесенные для удобства визуального

просмотра в пространстве рабочего окна программного обеспечения OTDR, представлены на рис. 3.

Результаты и обсуждение

В целом, визуальный контроль качества сварных соединений MOF–MMF, смонтированных даже в автоматическом режиме «MM AUTO» продемонстрировал потенциальную возможность реализации такого стыка

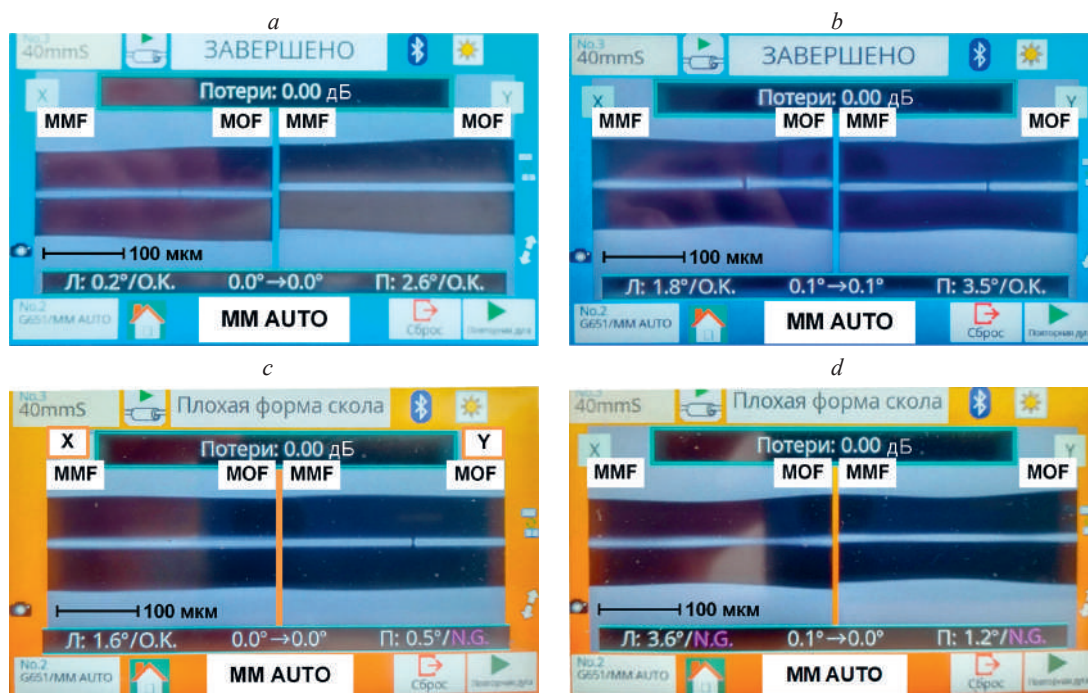


Рис. 4. Примеры изображений сварных соединений MOF–MMF на экране сварочного аппарата Fujikura-36S, выполненные в автоматическом режиме «MM AUTO», при различной интерпретации качества скола ОБ системой видеодиагностики: угол скола MMF 0,2° относительно нормали, MOF — 2,6°, оценка качества скола «удовлетворительно» (a); MMF — 1,8°, MOF — 3,5°, оценка качества скола «удовлетворительно» (b); MMF — 1,6°, MOF — 0,5°, оценка качества скола «неудовлетворительно» (зарегистрирован дефект на торце MOF) (c); MMF — 3,6°, MOF — 1,2°, оценка качества скола «неудовлетворительно» (зарегистрированы дефекты на торцах MMF и MOF) (d)

Fig. 4. Samples of Fujikura-36S images of MOF–MMF some typical fusion splices, performed in auto mode “MM AUTO” under various cleaving quality interpretation by image processing system: cleave angle of MMF is 0.2° in relation to normal, MOF — 2.6°, cleave angle and end-face quality are correct (a); MMF — 0.2°, MOF — 3.5°, cleave angle and end-face quality are correct (b); MMF — 1.6°, MOF — 0.5°, cleave angle and end-face quality of MOF are not good, chip or lick are detected (c); MMF — 3.6°, MOF — 1.2°, cleave angle and end-face quality of both MMF and MOF are not good, chip or lick are detected (d)

штатным оборудованием с адекватным затуханием. На рис. 4 показаны некоторые примеры изображений зоны обжига выполненных в режиме «ММ AUTO» сварных соединений MOF–MMF в проекциях плоскостей «X» и «Y» (разделены вертикальной линией) камер сварочного аппарата Fujikura-36S, которые были полученные с его экрана при различной интерпретации качества скола ОВ системой видеодиагностики.

Во всех случаях эти референсные значения вносимых потерь, оценка которых проводилась по соответствующим измеренным опорным рефлектограммам, не превысили 7,0 дБ и варьировались в диапазоне 6,051–6,723 дБ при среднем значении 6,338 дБ, что, с учетом двух выполненных сварок и без поправки на собственное затухание ввариваемого отрезка MOF (которое достигает $\alpha = 0,8$ дБ/м на длине волны $\lambda = 1310$ нм), составит не более 3,2 дБ на соединение.

Далее была проведена серия тестов, направленная на исследование влияния тока дуги на вносимые потери при фиксированном времени подачи дуги, установленного «по умолчанию» в режиме «ММ AUTO» ($t = 3,0$ с). Результаты оценки изменения затухания Δa_{LOSS} относительно опорного значения показаны на рис. 5. Для визуализации линейного тренда проведена аппроксимация полученных значений Δa_{LOSS} методом наименьших квадратов.

$$y(x) = 0,0075x - 0,1229.$$

Как и ожидалось, увеличение тока дуги относительно стандартного (STD «по умолчанию» в режиме «ММ AUTO») приводит к росту потерь, что полностью согласуется с данными экспериментальных исследо-

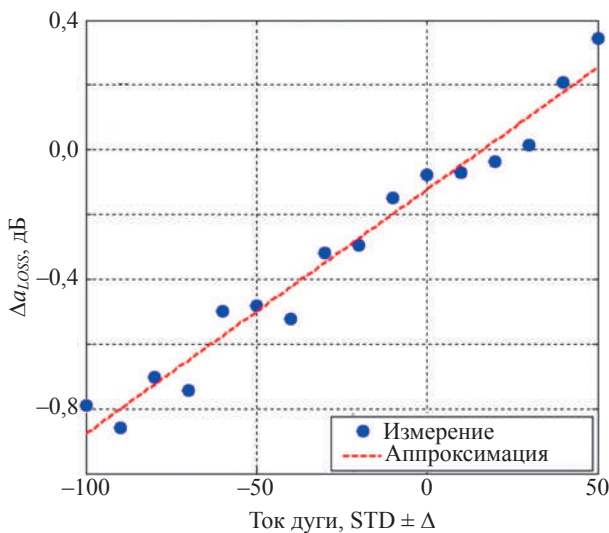


Рис. 5. Результаты оценки изменения затухания Δa_{LOSS} относительно опорного значения при вариации тока дуги относительно «стандартного» STD на величину «Δ» в диапазоне от –100 до +50 усл. ед. и фиксированном времени подачи дуги $t = 3000$ мс

Fig. 5. Results of estimation of loss deviation Δa_{LOSS} from the reference value under arc current deviation “Δ” in alternative units (a.u.) range –100...+50 from the standard value STD and fixed fusion time $t = 3000$ ms

ваний, представленными в работах [13–31], где дано объяснение о расширении зоны схлопывания капилляров MOF за счет подачи дуги большей мощности. В данной серии испытаний установка параметра STD на +50 усл. ед. привела к росту потерь более чем на 0,3 дБ относительно референсного значения (рис. 6, а).

На основании работ [13–31], снижение тока дуги до возможного минимума не только уменьшает зону коллапсирования капилляров MOF, но и потенциально позволяет практически нивелировать этот негативный, с точки зрения роста вносимых потерь, эффект. Например, в настоящей работе установка тока дуги на минимум (минус 90–минус 100 усл. ед.) обеспечила снижение затухания на 0,8 дБ и более. Отметим, что для стыков, выполненных при минимальной мощности дуги STD–100, система видеодиагностики сварочного аппарата сигнализировала о наличии дефекта в соединении (рис. 6, б), а показатели, с точки зрения снижения потерь, были хуже почти на 0,07 дБ, относительно сварки, реализованной при STD–90.

Исходя из этого, для следующей серии испытаний, посвященной исследованию влияния времени подачи дуги на вносимые потери при фиксированном токе дуги, данный параметр устанавливался уже равным STD–90. На рис. 7 приведена диаграмма с результатами оценки изменения затухания на стыке и аппроксимирующая ее кривая, полученная методом наименьших квадратов с подбором коэффициентов полинома 5-й степени:

$$y(x) = -2,2372 \cdot 10^{-18}x^5 + 2,5225 \cdot 10^{-14}x^4 - 1,1315 \cdot 10^{-10}x^3 + 2,5666 \cdot 10^{-10}x^2 - 3,0826 \cdot 10^{-4}x + 0,1847.$$

Выбор нижней границы исследуемого диапазона времени подачи дуги не 100 мс, а 700 мс обусловлен обрывом волокна в месте соединения при проведении штатного теста на разрыв, осуществляемого аппаратом после окончания проведения сварки. Все стыки, выполненные с установленными током STD–90 и малыми значениями времени подачи дуги $t = 100–600$ мс не прошли данную проверку механической прочности выполненного соединения.

Из рис. 7 видно, что построенная по результатам измерений диаграмма носит периодический характер. Анализ полученных данных позволяет локализовать оптимальную, с точки зрения обеспечения минимальных вносимых потерь на стыке, уменьшенных относительно опорного значения на 0,81 дБ, комбинацию параметров программы сварки: ток дуги STD–90, время подачи дуги $t = 1300$ мс. Фотография полученного сварного соединения показана на рис. 8, а.

На рис. 8, б на фрагментах характеристик обратного рассеяния с неоднородностями, соответствующими двум выполненным сварным соединениям отрезка MOF между катушками MMF, визуально различаются характерные пики френелевского отражения, которые свидетельствуют о наличии дефекта («непровара») стыка, реализованного при заниженных параметрах программы сварки. Учитывая ориентированность разрабатываемых MOF на практическое применение в полевых условиях,

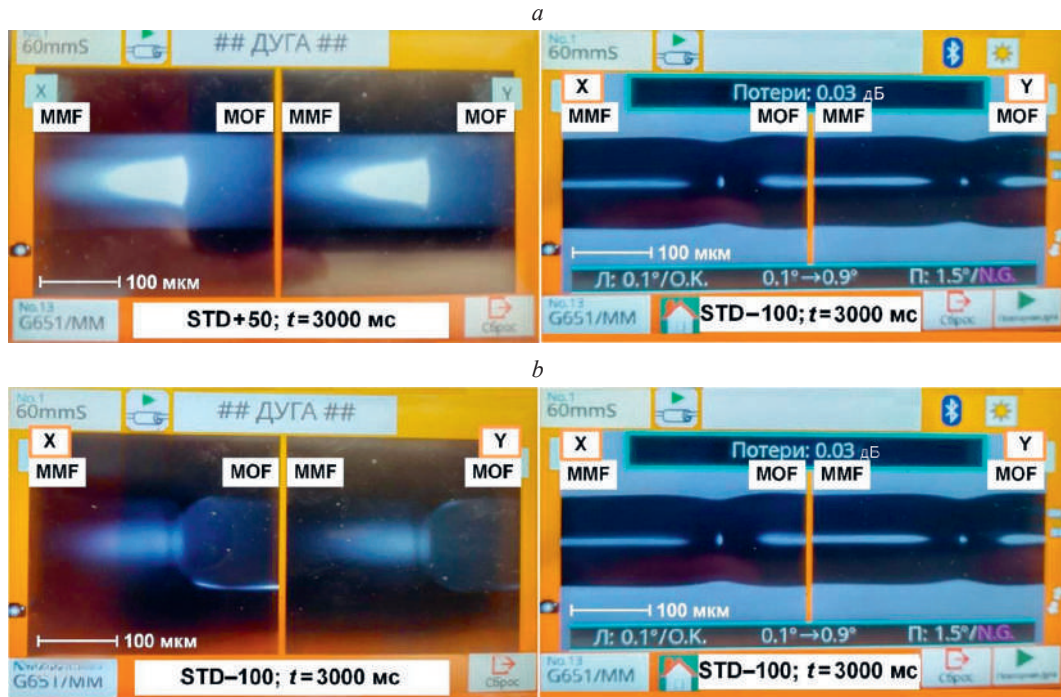


Рис. 6. Процесс сварки и результирующее изображение сварного соединения MOF–MMF, выполненные при времени подачи дуги $t = 3000$ мс и токах дуги: STD+50 (a); STD–100 (b)

Fig. 6. Fusion process and resulted image of MOF–MMF fusion splice, performed under fusion time $t = 3000$ ms and arc current: STD+50 (a); STD–100 (b)

включая монтаж и техническую эксплуатацию оконечных устройств коммутации, такие дефекты на стыках «линейное ОВ–пигтейл» являются неприемлемыми (несмотря на потенциально сниженные потери), поскольку могут привести к усталостному разрушению ОВ в месте соединения. По этой причине следующий цикл экспериментальных исследований был направлен на поиск компромисса между предельно заниженными параметрами программы сварки и выполнением стыка без дефекта (рис. 9).

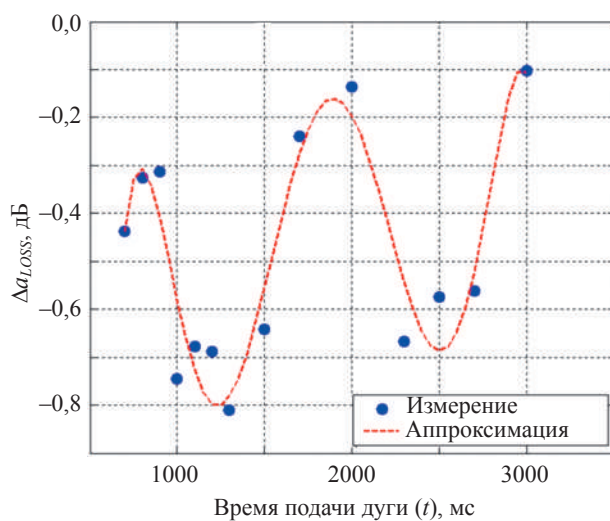


Рис. 7. Результаты оценки изменения затухания относительно опорного значения при вариации времени подачи дуги и фиксированном токе дуги STD–90

Fig. 7. Results of estimation of loss deviation from the reference value under deviation of fusion time and fixed arc current STD–90

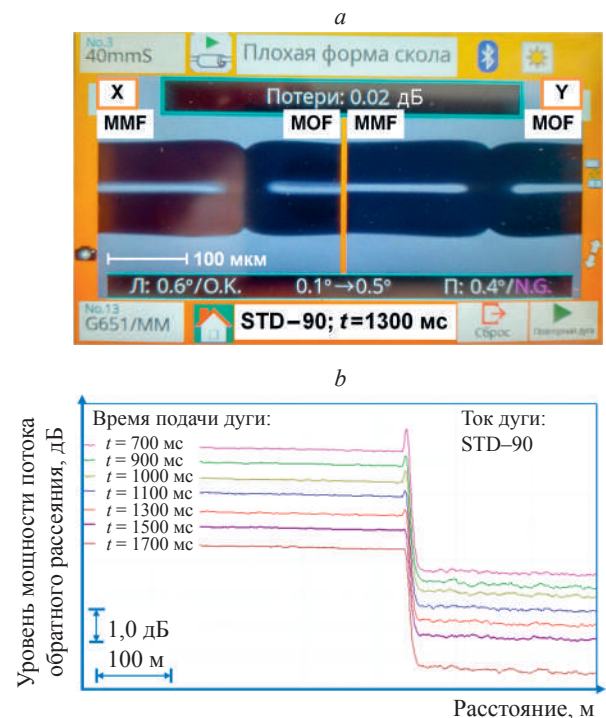


Рис. 8. Сварное соединение, выполненное с дефектом при заниженном токе (STD–90) и времени подачи дуги ($t = 1300$ мс): фотография стыка (a); фрагменты рефлектограмм, масштабированные в области неоднородности, соответствующей стыку с дефектом, с характерными пиками френелевского отражения (b)

Fig. 8. Fusion splice with defect, performed under low arc current (STD–90) and low fusion time ($t = 1300$ ms): splice image (a); measured trace fragments, scaled to event with Fresnel reflection, corresponding to splice with defect (b)

На первом этапе аналогично разделу «Методы и средства измерения вносимых потерь на сварном соединении MOF–MMF: описание эксперимента» исследовались вариации установки тока дуги при фиксированном локализованном времени сварки $t = 1300$ мс как потенциально обеспечивающем максимальное снижение потерь. На рис. 9, а представлена диаграмма оценки изменения затухания, построенная по результатам измерений, и аппроксимирующая ее кривая, полученная методом наименьших квадратов с подбором коэффициентов полинома 5-й степени:

$$y(x) = 6,7780 \cdot 10^{-12}x^5 + 2,2060 \cdot 10^{-10}x^4 - 1,7708 \cdot 10^{-7}x^3 - 1,5736 \cdot 10^{-5}x^2 - 1,6537 \cdot 10^{-4}x + 0,1224.$$

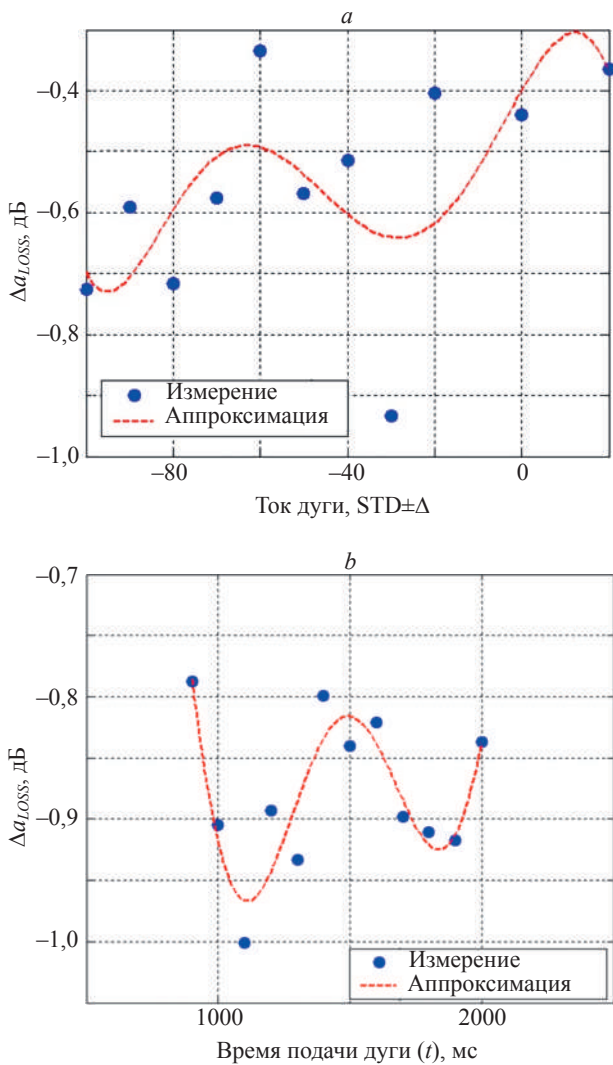


Рис. 9. Результаты оценки изменения затухания относительно опорного значения при двух вариациях: тока дуги (усл. ед.) и фиксированного времени подачи дуги $t = 1300$ мс (а); времени подачи дуги и фиксированном токе дуги STD–30 (б)

Fig. 9. Results of the assessment of the change in attenuation relative to the reference value with variation of: arc current (conventional units) and a fixed arc firing time $t = 1300$ ms (a); arc firing time and a fixed arc current STD–30 (b)

При этом для установок тока дуги в диапазоне (STD–100)–(STD–70) система видеодиагностики аппарата регистрировала выполнение сварки с дефектом. Анализ полученных результатов (рис. 9, а), позволяет выявить значение тока дуги STD–30, при котором достигается anomalous уменьшение вносимых потерь на 0,93 дБ относительно референсного, по сравнению с прочими выборками комбинаций установок параметров программы сварки. Поэтому далее значение тока дуги STD–30 рассматривалось как опорное, и следующая серия испытаний проводилась уже с вариацией временем подачи дуги при этом фиксированном токе.

На рис. 9, б приведена диаграмма оценки изменения затухания при указанных условиях, построенная по результатам измерений, и аппроксимирующая ее кривая, полученная методом наименьших квадратов с подбором коэффициентов полинома 6-й степени:

$$y(x) = -9,7467 \cdot 10^{-18}x^6 + 8,5859 \cdot 10^{-14}x^5 - 3,0518 \cdot 10^{-10}x^4 + 5,5805 \cdot 10^{-7}x^3 - 5,5101 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,2769x - 55,7465.$$

Анализ полученных результатов позволяет определить оптимальную, с точки зрения минимизации потерь, комбинацию параметров программы сварки. Так, для установленных тока дуги STD–30 и времени

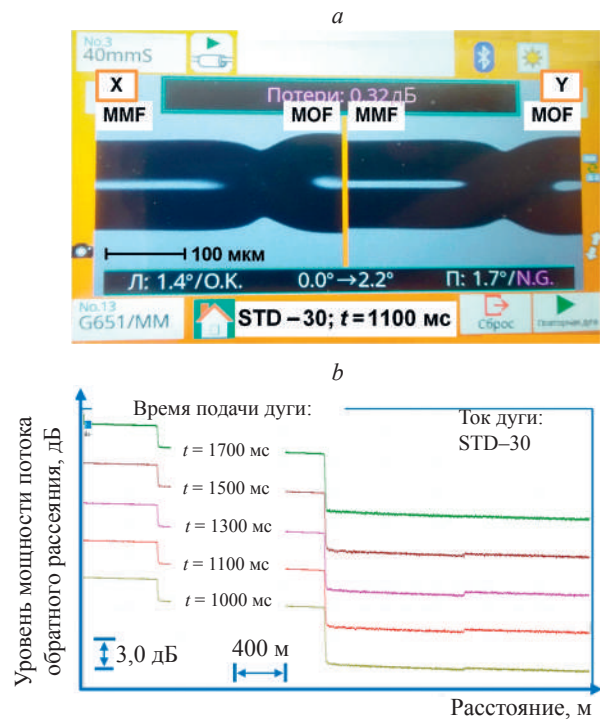


Рис. 10. Сварное соединение, выполненное при установленном токе дуги STD–30: фотография стыка при локализованной оптимальной комбинации STD–30 и $t = 1100$ мс (а); фрагменты рефлектограмм, масштабированные в области сварок MOF–MMF при разных значениях времени подачи дуги (б)

Fig. 10. Fusion splice reset arc current STD–30: splice image under localized optimal parameters STD–30 and $t = 1100$ ms (a); measured trace fragments, scaled to event, corresponding to MOF–MMF splices under various fusion time (b)

подачи дуги $t = 1100$ мс, заниженных относительно базовых («по умолчанию» — режим «MM AUTO»), достигается уменьшение вносимых потерь на 1,001 дБ (5,721 дБ при опорном 6,722 дБ), но при этом сварное соединение (рис. 10, а), реализуется без габаритного дефекта, который идентифицируется на характеристике обратного рассеяния макетной ВОЛП по характерным пикам френелевского отражения на неоднородности, соответствующей сваркам отрезка MOF и катушек с MMF (рис. 10, б).

Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты показали потенциальную возможность выполнения сварных соединений MOF гексагональной конфигурации и типовых MMF категории ISO/IEC OM2+/OM3 и снижения вносимых потерь на 1,0 дБ относительно опорного значения путем установки соответствующих, уменьшенных относительно базовых параметров программы, времени подачи дуги и тока дуги.

Заключение

В работе представлены результаты разработки и экспериментальной апробации технологических приемов сварки градиентных многомодовых и кварцевых микроструктурированных оптических волокон с внешним «телекоммуникационным» диаметром 125 мкм и гексагональной конфигурацией, ориентированных на применение в качестве направляющих систем линий связи компактных мультигиабитных оптических сетей передачи данных, с помощью штатного комплекта полевого сварочного аппарата Fujikura-36S (Fujikura Ltd., Япония).

Экспериментально подтверждена потенциальная возможность выполнения сварных соединений кварцевых микроструктурированных оптических волокон и типовых многомодовых оптических волокон категории ISO/IEC OM2+/OM3 с адекватным опорным значением вносимых потерь (до 3,2 дБ на стык) и сохранением световедущих свойств, а также снижения вносимых потерь на 0,8–1,0 дБ относительно референсного значения путем установки соответствующих, уменьшенных относительно базовых параметров программы, тока дуги и времени подачи дуги.

Литература

1. Желтиков А.М. Микроструктурированные световоды для нового поколения волоконно-оптических источников и преобразователей световых импульсов // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 7. С. 737–762.
2. Hayes J.R., Petrovich M.N., Poletti F., Horak P., Broderick N.G., Feng X., et al. Recent advances in microstructured fibers for laser delivery and generation // Proceedings of SPIE. 2010. V. 7580. P. 758010. <https://doi.org/10.1117/12.847923>
3. Kaur B., Kumar S., Kaushik B.K. (INVITED) Advances in photonic crystal fiber: sensing and supercontinuum generation applications // Optical Fiber Technology. 2022. V. 72. P. 102982. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102982>
4. Tang Z., Zheng Z., Li B., Wei Z., Sun J. Applications of microstructured optical fibers in ultrafast optics: a review // Photonics. 2024. V. 11. N 2. P. 151. <https://doi.org/10.3390/photonics11020151>
5. Pinto A.M.R., Lopez-Amo M. Photonic crystal fibers for sensing applications // Journal of Sensors. 2012. V. 2012. P. 598178. <https://doi.org/10.1155/2012/598178>
6. De M., Gangopadhyay T.K., Singh V.K. Prospects of photonic crystal fiber as physical sensor: an overview // Sensors. 2019. V. 19. N 3. P. 464. <https://doi.org/10.3390/s19030464>
7. Portosi V., Laneve D., Falconi M.C., Prudenzano F. Advances on photonic crystal fiber sensors and applications // Sensors. 2019. V. 19. N 8. P. 1892. <https://doi.org/10.3390/s19081892>
8. Butt M.A., Kazanskiy N.L., Khonina S.N., Voronkov G.S., Grakhova E.P., Kutluyarov R.V. A review on photonic sensing technologies: status and outlook // Biosensors. 2023. V. 13. N 5. P. 568. <https://doi.org/10.3390/bios13050568>
9. Li B., Zhao Y., Zhang Y., Zhang A., Li X., Gu J., Xi Sh., Zhou G. Functionalized micro structured optical fibers and devices for sensing applications: a review // Journal of Lightwave Technology. 2021. V. 39. N 12. P. 3812–3823. <https://doi.org/10.1109/jlt.2020.3043842>
10. Zhang H., Zhang X., Li H., Deng Y., Xi L., Tang X., Zhang W. The orbital angular momentum modes supporting fibers based on the photonic crystal fiber structure // Crystals. 2017. V. 7. N 10. P. 286. <https://doi.org/10.3390/cryst7100286>
11. Zhang H., Mao B., Han Y., Wang Z., Yue Y., Liu Y. Generation of orbital angular momentum modes using fiber systems // Applied Sciences. 2019. V. 9. N 5. P. 1033. <https://doi.org/10.3390/app9051033>

References

1. Zheltikov A.M. Microstructure optical fibers for a new generation of fiber-optic sources and converters of light pulses. *Physics Uspekhi*, 2007, vol. 50, no. 7, pp. 705–727. <https://doi.org/10.1070/pt2007v050n07abeh006324>
2. Hayes J.R., Petrovich M.N., Poletti F., Horak P., Broderick N.G., Feng X., et al. Recent advances in microstructured fibers for laser delivery and generation. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7580, pp. 758010. <https://doi.org/10.1117/12.847923>
3. Kaur B., Kumar S., Kaushik B.K. (INVITED) Advances in photonic crystal fiber: sensing and supercontinuum generation applications. *Optical Fiber Technology*, 2022, vol. 72, pp. 102982. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102982>
4. Tang Z., Zheng Z., Li B., Wei Z., Sun J. Applications of microstructured optical fibers in ultrafast optics: a review. *Photonics*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 151. <https://doi.org/10.3390/photonics11020151>
5. Pinto A.M.R., Lopez-Amo M. Photonic crystal fibers for sensing applications. *Journal of Sensors*, 2012, vol. 2012, pp. 598178. <https://doi.org/10.1155/2012/598178>
6. De M., Gangopadhyay T.K., Singh V.K. Prospects of photonic crystal fiber as physical sensor: an overview. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 464. <https://doi.org/10.3390/s19030464>
7. Portosi V., Laneve D., Falconi M.C., Prudenzano F. Advances on photonic crystal fiber sensors and applications. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 8, pp. 1892. <https://doi.org/10.3390/s19081892>
8. Butt M.A., Kazanskiy N.L., Khonina S.N., Voronkov G.S., Grakhova E.P., Kutluyarov R.V. A review on photonic sensing technologies: status and outlook. *Biosensors*, 2023, vol. 13, no. 5, pp. 568. <https://doi.org/10.3390/bios13050568>
9. Li B., Zhao Y., Zhang Y., Zhang A., Li X., Gu J., Xi Sh., Zhou G. Functionalized micro structured optical fibers and devices for sensing applications: a review. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, vol. 39, no. 12, pp. 3812–3823. <https://doi.org/10.1109/jlt.2020.3043842>
10. Zhang H., Zhang X., Li H., Deng Y., Xi L., Tang X., Zhang W. The orbital angular momentum modes supporting fibers based on the photonic crystal fiber structure. *Crystals*, 2017, vol. 7, no. 10, pp. 286. <https://doi.org/10.3390/cryst7100286>
11. Zhang H., Mao B., Han Y., Wang Z., Yue Y., Liu Y. Generation of orbital angular momentum modes using fiber systems. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 5, pp. 1033. <https://doi.org/10.3390/app9051033>

12. Eggleton B.J., Kerbage C., Westbrook P.S., Windeler R.S., Hale A. Microstructured optical fiber devices // *Optics Express*. 2001. V. 9. N 13. P. 698–713. <https://doi.org/10.1364/oe.9.000698>
13. Chong J.H., Rao M.K. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber // *Optics Express*. 2003. V. 11. N 12. P. 1365–1370. <https://doi.org/10.1364/oe.11.001365>
14. Thapa R., Knabe K., Corwin K.L., Washburn B.R. Arc fusion splicing of hollow-core photonic bandgap fibers for gas-filled fiber cells // *Optics Express*. 2006. V. 14. N 21. P. 9576–9583. <https://doi.org/10.1364/oe.14.009576>
15. Xiao L., Jin W., Demokan M.S. Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges // *Optics Letters*. 2007. V. 32. N 2. P. 115–117. <https://doi.org/10.1364/ol.32.000115>
16. Xiao L., Demokan M.S., Jin W., Wang Y., Zhao Ch.-L. Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect // *Journal of Lightwave Technology*. 2007. V. 25. N 11. P. 3563–3574. <https://doi.org/10.1109/jlt.2007.907787>
17. Kristensen J.T., Houmann A., Liu X., Turchinovich D. Low-loss polarization-maintaining fusion splicing of single-mode fibers and hollow-core photonic crystal fibers, relevant for monolithic fiber laser pulse compression // *Optics Express*. 2008. V. 16. N 13. P. 9986–9995. <https://doi.org/10.1364/oe.16.009986>
18. Carvalho J.P., Magalhães F., Frazão O., Santos J.L., Araújo F.M., Ferreira L.A. Splicing and coupling losses in hollow-core photonic crystal glass fibers // *Solid State Phenomena*. 2010. V. 161. P. 43–49. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.161.43>
19. Zhou X., Chen Z., Chen H., Hou J. Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by controlled air hole collapse // *Optics Communications*. 2012. V. 285. N 24. P. 5283–5286. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.06.090>
20. Borzycki K., Schuster K. Arc fusion splicing of photonic crystal fibers // *Photonic Crystals — Introduction, Applications and Theory*. 2012. P. 175–200. <https://doi.org/10.5772/35252>
21. Borzycki K., Schuster K. Characterization and fusion splicing of single-mode photonic crystal fibers // *Proc. of the IEEE International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2013)*. 2013. P. 31–34. <https://doi.org/10.1109/caol.2013.6657516>
22. Tiburcio B.D., Fernandes G.M., Pinto A.N. Extremely small-core photonic crystal fiber fusion splicing with a single-mode fiber // *Proceedings of SPIE*. 2013. V. 8785. P. 8785FF. <https://doi.org/10.1117/12.2027586>
23. Mehde M.S., Taha S.A.A., Ahmed A.A. The optimum conditions for arc fusion to splice photonic crystal fiber and single mode optical fiber // *Engineering and Technology Journal*. 2015. V. 33. N 1A. P. 101–113. <https://doi.org/10.30684/etj.33.1a.9>
24. Song N., Wua Ch., Luo W., Zhang Z., Li W. High strength fusion splicing of hollow core photonic crystal fiber and single-mode fiber by large offset reheating // *Optical Fiber Technology*. 2016. V. 32. P. 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2016.10.008>
25. Adnan S.A., Abdulwahha A.W., Ismail Sh.N. Fusion splicing: the penalty of increasing the collapse length of the air holes in ESM-12B photonic crystal fibers // *Optica Applicata*. 2016. V. 46. N 2. P. 265–275.
26. Sharma D.K., Sharma A., Tripathi S.M. Optimum splicing of high-index core microstructured optical fibers and traditional single-mode fibers using improved field model // *Optics and Laser Technology*. 2019. V. 109. P. 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.004>
27. Wang C., Yu R., Xiong C., Zhu J., Xiao L. Ultralow-loss fusion splicing between antiresonant hollow-core fibers and antireflection-coated single-mode fibers with low return loss // *Optics Letters*. 2023. V. 48. N 5. P. 1120–1123. <https://doi.org/10.1364/ol.481190>
28. Kelly T.W., Mousavi M., Shi B., Poletti F., Wheeler N.V., Slavik R. Coupling into higher order modes of a hollow-core fiber due to fusion splicing // *CLEO 2024, Technical Digest Series (Optica Publishing Group)*. 2024. P. JW2A.73 https://doi.org/10.1364/cleo_at.2024.jw2a.73
29. Wen Y., Zhang X., Song W., Yao J., Cui M., Zhang Q., Gu S., Wang P. Low-loss, low-back-reflection fusion splicing of large-mode-area fibers with nested hollow-core antiresonant fibers for all-fiber high-power, single-frequency fiber laser transmission // *Journal of Lightwave Technology*. 2025. V. 43. N 9. P. 4422–4428. <https://doi.org/10.1109/jlt.2025.3533696>
30. Stawska H.I., Popena M.A., Beres-Pawlik E. Combining hollow core photonic crystal fibers with multimode, solid core fiber couplers
12. Eggleton B.J., Kerbage C., Westbrook P.S., Windeler R.S., Hale A. Microstructured optical fiber devices. *Optics Express*, 2001, vol. 9, no. 13, pp. 698–713. <https://doi.org/10.1364/oe.9.000698>
13. Chong J.H., Rao M.K. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber. *Optics Express*, 2003, vol. 11, no. 12, pp. 1365–1370. <https://doi.org/10.1364/oe.11.001365>
14. Thapa R., Knabe K., Corwin K.L., Washburn B.R. Arc fusion splicing of hollow-core photonic bandgap fibers for gas-filled fiber cells. *Optics Express*, 2006, vol. 14, no. 21, pp. 9576–9583. <https://doi.org/10.1364/oe.14.009576>
15. Xiao L., Jin W., Demokan M.S. Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges. *Optics Letters*, 2007, vol. 32, no. 2, pp. 115–117. <https://doi.org/10.1364/ol.32.000115>
16. Xiao L., Demokan M.S., Jin W., Wang Y., Zhao Ch.-L. Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, vol. 25, no. 11, pp. 3563–3574. <https://doi.org/10.1109/jlt.2007.907787>
17. Kristensen J.T., Houmann A., Liu X., Turchinovich D. Low-loss polarization-maintaining fusion splicing of single-mode fibers and hollow-core photonic crystal fibers, relevant for monolithic fiber laser pulse compression. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 13, pp. 9986–9995. <https://doi.org/10.1364/oe.16.009986>
18. Carvalho J.P., Magalhães F., Frazão O., Santos J.L., Araújo F.M., Ferreira L.A. Splicing and coupling losses in hollow-core photonic crystal glass fibers. *Solid State Phenomena*, 2010, vol. 161, pp. 43–49. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.161.43>
19. Zhou X., Chen Z., Chen H., Hou J. Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by controlled air hole collapse. *Optics Communications*, 2012, vol. 285, no. 24, pp. 5283–5286. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.06.090>
20. Borzycki K., Schuster K. Arc fusion splicing of photonic crystal fibers. *Photonic Crystals — Introduction, Applications and Theory*, 2012, pp. 175–200. <https://doi.org/10.5772/35252>
21. Borzycki K., Schuster K. Characterization and fusion splicing of single-mode photonic crystal fibers. *Proc. of the IEEE International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2013)*, 2013, pp. 31–34. <https://doi.org/10.1109/caol.2013.6657516>
22. Tiburcio B.D., Fernandes G.M., Pinto A.N. Extremely small-core photonic crystal fiber fusion splicing with a single-mode fiber. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8785, pp. 8785FF. <https://doi.org/10.1117/12.2027586>
23. Mehde M.S., Taha S.A.A., Ahmed A.A. The optimum conditions for arc fusion to splice photonic crystal fiber and single mode optical fiber. *Engineering and Technology Journal*, 2015, vol. 33, no. 1A, pp. 101–113. <https://doi.org/10.30684/etj.33.1a.9>
24. Song N., Wua Ch., Luo W., Zhang Z., Li W. High strength fusion splicing of hollow core photonic crystal fiber and single-mode fiber by large offset reheating. *Optical Fiber Technology*, 2016, vol. 32, pp. 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2016.10.008>
25. Adnan S.A., Abdulwahha A.W., Ismail Sh.N. Fusion splicing: the penalty of increasing the collapse length of the air holes in ESM-12B photonic crystal fibers. *Optica Applicata*, 2016, vol. 46, no. 2, pp. 265–275.
26. Sharma D.K., Sharma A., Tripathi S.M. Optimum splicing of high-index core microstructured optical fibers and traditional single-mode fibers using improved field model. *Optics and Laser Technology*, 2019, vol. 109, pp. 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.004>
27. Wang C., Yu R., Xiong C., Zhu J., Xiao L. Ultralow-loss fusion splicing between antiresonant hollow-core fibers and antireflection-coated single-mode fibers with low return loss. *Optics Letters*, 2023, vol. 48, no. 5, pp. 1120–1123. <https://doi.org/10.1364/ol.481190>
28. Kelly T.W., Mousavi M., Shi B., Poletti F., Wheeler N.V., Slavik R. Coupling into higher order modes of a hollow-core fiber due to fusion splicing. *CLEO 2024, Technical Digest Series (Optica Publishing Group)*, 2024, pp. JW2A.73 https://doi.org/10.1364/cleo_at.2024.jw2a.73
29. Wen Y., Zhang X., Song W., Yao J., Cui M., Zhang Q., Gu S., Wang P. Low-loss, low-back-reflection fusion splicing of large-mode-area fibers with nested hollow-core antiresonant fibers for all-fiber high-power, single-frequency fiber laser transmission. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, vol. 43, no. 9, pp. 4422–4428. <https://doi.org/10.1109/jlt.2025.3533696>
30. Stawska H.I., Popena M.A., Beres-Pawlik E. Combining hollow core photonic crystal fibers with multimode, solid core fiber couplers

- through arc fusion splicing for the miniaturization of nonlinear spectroscopy sensing devices // *Fibers*. 2018. V. 6. N 4. P. 77. <https://doi.org/10.3390/fib6040077>
31. Ma X., Li C., Song C., Zhao Z., Liu H., Zhang W., et al. Low-loss fusion splice of hollow-core antiresonant fiber and single mode fiber based on GIMF // *Opto-Electronic Engineering*. 2025. V. 52. N 1. P. 240225. <https://doi.org/10.12086/oe.2025.240225>
 32. Nesterov V.G., Orlov M.A., Bourdine A.V., Evtushenko A.A., Khadjaev M.S., Brazovskii G.R., et al. Practical experience in joining of silica microstructured and telecommunication optical fibers by using field arc fusion splicer kits // *Proceedings of SPIE*. 2025. V. 13738. P. 137380Y. <https://doi.org/10.1117/12.3082077>
 33. Бурдин А.В., Евтущенко А.С., Дашков М.В., Демидов В.В., Зайцева Е.С., Тер-Нерсисянц Е.В. Результаты моделирования кварцевых микроструктурированных оптических волокон, обеспечивающих одномодовый режим функционирования в области коротких длин волн // *Труды 10-й Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2025)*. 2025. С. 669–671.
 34. Бурдин А.В., Евтущенко А.С., Орлов М.А., Пашин С.С., Жулидова М.О., Дашков М.В. [и др.] Разработка и тестирование кварцевых микроструктурированных оптических волокон для линий связи компактных высокоскоростных сетей передачи данных разного назначения // *Труды 10-й Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2025)*. 2025. С. 90–93.

Авторы

Бурдин Антон Владимирович — доктор технических наук, доцент, советник генерального директора по инновациям, АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация; профессор, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443090, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, [sc 6701518987](https://orcid.org/0000-0001-8737-5486), <https://orcid.org/0000-0001-8737-5486>, bourdine@yandex.ru

Нестеров Вячеслав Геннадьевич — инженер, студент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, [sc 60079915500](https://orcid.org/0009-0007-7699-4450), <https://orcid.org/0009-0007-7699-4450>, nesterovnonstop@gmail.com

Орлов Михаил Алексеевич — инженер, студент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0001-3075-9558>, miha5033@yandex.ru

Евтущенко Александр Сергеевич — инженер, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443090, Российская Федерация, [sc 57194429376](https://orcid.org/0000-0001-5677-7802), <https://orcid.org/0000-0001-5677-7802>, alex2194ru@yandex.com

Пашин Станислав Сергеевич — кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 57190843183](https://orcid.org/0000-0002-7898-974X), <https://orcid.org/0000-0002-7898-974X>, pashinstanislav@outlook.com

Зайцева Елена Сергеевна — инженер, секретарь кафедры, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, 443090, Российская Федерация, [sc 57202782183](https://orcid.org/0000-0003-4696-9258), <https://orcid.org/0000-0003-4696-9258>, zaytzewa@inbox.ru

Беляев Андрей Александрович — младший научный сотрудник, АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация; аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0000-3250-3786>, adresat240@gmail.com

Шурупов Дмитрий Николаевич — младший научный сотрудник, АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 57220054404](https://orcid.org/0000-0001-5223-2354), <https://orcid.org/0000-0001-5223-2354>, shurupoff.dm@yandex.ru

Демидов Владимир Витальевич — руководитель по направлению «Кварцевые стекла», АО «Научно-производственное объединение

through arc fusion splicing for the miniaturization of nonlinear spectroscopy sensing devices. *Fibers*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 77. <https://doi.org/10.3390/fib6040077>

31. Ma X., Li C., Song C., Zhao Z., Liu H., Zhang W., et al. Low-loss fusion splice of hollow-core antiresonant fiber and single mode fiber based on GIMF. *Opto-Electronic Engineering*, 2025, vol. 52, no. 1, pp. 240225. <https://doi.org/10.12086/oe.2025.240225>
32. Nesterov V.G., Orlov M.A., Bourdine A.V., Evtushenko A.A., Khadjaev M.S., Brazovskii G.R., et al. Practical experience in joining of silica microstructured and telecommunication optical fibers by using field arc fusion splicer kits. *Proceedings of SPIE*, 2025, vol. 13738, pp. 137380Y. <https://doi.org/10.1117/12.3082077>
33. Burdin A.V., Evtushenko A.S., Dashkov M.V., Demidov V.V., Zaitceva E.S., Ter-Nersesiantc E.V. Results of quartz microstructured optical fibers modeling with single-mode operation in the short wavelength region. *Proc. of the 10th All-Russian Dianov Conference on Fiber Optics*, 2025, pp. 669–671. (in Russian)
34. Burdin A.V., Evtushenko A.S., Orlov M.A., Pashin S.S., Zhulidova M.O., Dashkov M.V., et al. Development and testing of the quartz microstructured optical fibers for communication lines of compact high-speed data transmission networks for various purposes. *Proc. of the 10th All-Russian Dianov Conference on Fiber Optics*, 2025, pp. 90–93. (in Russian)

Authors

Anton V. Bourdine — D.Sc., Associate Professor, Advisor to the Director General for Innovations, JSC “Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I.”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation; Professor, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443090, Russian Federation; Professor, Saint Petersburg State University of Telecommunications named after M.A. Bonch-Bruevich, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation, [sc 6701518987](https://orcid.org/0000-0001-8737-5486), <https://orcid.org/0000-0001-8737-5486>, bourdine@yandex.ru

Vyacheslav G. Nesterov — Engineer, Student, Saint Petersburg State University of Telecommunications named after M.A. Bonch-Bruevich, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation, [sc 60079915500](https://orcid.org/0009-0007-7699-4450), <https://orcid.org/0009-0007-7699-4450>, nesterovnonstop@gmail.com

Mikhail A. Orlov — Engineer, Student, Saint Petersburg State University of Telecommunications named after M.A. Bonch-Bruevich, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-3075-9558>, miha5033@yandex.ru

Alexander S. Evtushenko — Engineer, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443090, Russian Federation, [sc 57194429376](https://orcid.org/0000-0001-5677-7802), <https://orcid.org/0000-0001-5677-7802>, alex2194ru@yandex.com

Stanislav S. Pashin — PhD, Head of Department, JSC “Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I.”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 57190843183](https://orcid.org/0000-0002-7898-974X), <https://orcid.org/0000-0002-7898-974X>, pashinstanislav@outlook.com

Elena S. Zaitseva — Engineer, Secretary of Department, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443090, Russian Federation, [sc 57202782183](https://orcid.org/0000-0003-4696-9258), <https://orcid.org/0000-0003-4696-9258>, zaytzewa@inbox.ru

Andrei A. Belyaev — Junior Researcher, JSC “Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I.”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation; PhD Student, Saint Petersburg State University of Telecommunications named after M.A. Bonch-Bruevich, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-3250-3786>, adresat240@gmail.com

Dmitrii N. Shurupov — Junior Researcher, JSC “Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I.”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 57220054404](https://orcid.org/0000-0001-5223-2354), <https://orcid.org/0000-0001-5223-2354>, shurupoff.dm@yandex.ru

Vladimir V. Demidov — Head of the Branch “Silica Glasses”, JSC “Scientific Production Association State Optical Institute Named

Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 7202284575](https://orcid.org/0000-0003-2545-2487), <https://orcid.org/0000-0003-2545-2487>, demidov@goi.ru

Тер-Нерсесянц Егеше Вавикович — кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе, начальник научного отделения, АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 16033624500](https://orcid.org/0009-0008-2280-6474), <https://orcid.org/0009-0008-2280-6474>, ter@goi.ru

Дукельский Константин Владимирович — доктор технических наук, доцент, научный руководитель, АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, [sc 6602633236](https://orcid.org/0000-0002-1627-7499), <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>, kdukel@goi.ru

Полищук Григорий Сергеевич — кандидат технических наук, генеральный директор, АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, [sc 25926044900](https://orcid.org/0009-0005-9358-6040), <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>, g.polishchuk@goi.ru

after Vavilov S.I.”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 7202284575](https://orcid.org/0000-0003-2545-2487), <https://orcid.org/0000-0003-2545-2487>, demidov@goi.ru

Egishe V. Ter-Nersesyants — PhD, Deputy Director General for Scientific Activity, Head of Scientific Department, “Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I.”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 16033624500](https://orcid.org/0009-0008-2280-6474), <https://orcid.org/0009-0008-2280-6474>, ter@goi.ru

Konstantin V. Dukelskii — D.Sc., Associate Professor, Scientific Supervisor, JSC “Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I.”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation; Professor, Saint Petersburg State University of Telecommunications named after M.A. Bonch-Bruевич, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation, [sc 6602633236](https://orcid.org/0000-0002-1627-7499), <https://orcid.org/0000-0002-1627-7499>, kdukel@goi.ru

Grigorii S. Polishchuk — PhD, General Director, JSC “Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I.”, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, [sc 25926044900](https://orcid.org/0009-0005-9358-6040), <https://orcid.org/0009-0005-9358-6040>, g.polishchuk@goi.ru

Статья поступила в редакцию 06.11.2025

Одобрена после рецензирования 27.11.2025

Принята к печати 25.01.2026

Received 06.11.2025

Approved after reviewing 27.11.2025

Accepted 25.01.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»