

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 681.7.068
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-7-13>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Волоконно-оптические WDM-мультиплексоры/демультиплексоры с малыми изгибными потерями

Д.А. Иванов [®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: d.ivanov@tmvos.com

Резюме

Цели. Одной из актуальных задач развития радиоэлектронных систем различного назначения является резкое увеличение объема и скорости передачи информации между элементами этих систем. Такая задача наиболее успешно решается с использованием средств волоконно-оптической техники, не имеющих альтернативы по ряду показателей. Применение оптических волокон (ОВ) в качестве физической среды позволило осуществить передачу больших потоков информации на значительные расстояния. Увеличение пропускной способности систем связи подталкивает производителей к разработке новых марок ОВ с улучшенными оптическими и эксплуатационными характеристиками, что позволяет усовершенствовать различные оптические компоненты, которые используют волоконный световод в качестве активной среды передачи информации. Наиболее широко используемыми в волоконно-оптических системах связи (ВОСС) являются двухканальные одномодовые WDM-мультиплексоры/демультиплексоры, представляющие собой вид спектрально-селективных разветвителей. Среди преимуществ WDM-мультиплексирования стоит отметить передачу большого объема информации по одному ОВ за счет организации каналов на разных длинах волн, возможность передавать по одному ОВ одновременно в обоих направлениях сигналы нескольких длин волн, которые не взаимодействуют друг с другом (дуплексная связь). В процессе эксплуатации WDM-мультиплексоры могут подвергаться различным внешним воздействиям, влияющим на работу и стабильность параметров устройства. В настоящее время отсутствуют данные по влиянию изгибов ОВ на оптические характеристики WDM-мультиплексоров. В связи с этим актуальным является исследование данной зависимости, которое включает в себя измерение параметров оптической изоляции и вносимых потерь. Цель работы – отработка технологии изготовления и исследование изготовленных WDM-мультиплексоров на основе определенных видов ОВ, устойчивых к изгибу.

Методы. Для формирования двухволновых WDM-мультиплексоров использована технология сплавной биконической вытяжки (FBT), позволяющей достичь низких вносимых потерь одновременно с высокой степенью изоляции каналов в широком диапазоне температур.

Результаты. В работе рассмотрены возможности изготовления волоконных мультиплексоров на основе изгибоустойчивого волокна Corning SMF-28 Ultra. Представлены результаты изготовления и исследования оптических характеристик экспериментальных образцов WDM-мультиплексоров. Установлено, что применение кварцевого волокна SMF-28 Ultra позволило существенно снизить девиацию оптической изоляции каналов при возникновении механических напряжений в световодной структуре мультиплексоров.

Выводы. Экспериментально показана возможность создания двухволновых мультиплексоров с малыми изгибными потерями и оптической изоляцией до 20–22 дБ. Рассмотрены возможные механизмы влияния скручивания волоконных выводов мультиплексора на оптическую изоляцию каналов. Полученные

результаты показывают, что при возникновении механических напряжений в сплавленной структуре мультиплексора изменение коэффициента оптической изоляции на двух рабочих длинах волн не превышало 1 дБ.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы связи, изгибоустойчивое оптическое волокно, мультиплексор, WDM-мультиплексор, FBT-технология, область связи

• Поступила: 18.06.2021 • Доработана: 19.10.2021 • Принята к опубликованию: 23.02.2022

Для цитирования: Иванов Д.А. Волоконно-оптические WDM-мультиплексоры/демультиплексоры с малыми изгибными потерями. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):7–13. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-7-13>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Fiber optical WDM multiplexers/demultiplexers with low bending losses

Dmitry A. Ivanov @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ *Corresponding author, e-mail: d.ivanov@tmvos.com*

Abstract

Objectives. One of the topical tasks in the development of radio electronic systems for various purposes is a sharp increase in the volume and data transfer rate between the elements of the system. This problem is most successfully solved using fiber optic technology, which has no alternative to meet a number of indicators. The use of optical fibers (OF) as a physical medium made it possible to transfer large information flows over considerable distances. Increasing the capacity of communication systems is pushing manufacturers to develop new OF brands with improved optical and operational characteristics, which makes it possible to improve various optical components that use an OF as an active information transmission medium. The dual-channel single-mode wavelength division multiplexing (WDM) multiplexers/demultiplexers, which are one of spectral selective splitters types, are most widely used in fiber-optic communication systems. Among the advantages of WDM, it is worth to note the transmission of a large amount of information over one OF by the arrangement of channels at different wavelengths and the ability to transmit signals of several wavelengths simultaneously in both directions via one OF that do not interact with each other (duplex communication). During operation, WDM multiplexers can be subjected to various external influences that affect the operation and stability of the device parameters. Currently, there are no data on the effect of OF bending on the optical characteristics of WDM multiplexers. In this regard, it is important to study this dependence, which includes measuring the parameters of optical isolation and insertion loss. The purpose of the study is to work out the manufacturing technology and investigate the manufactured WDM multiplexers based on certain types of bend-resistant OF.

Methods. For the formation of two-channel WDM multiplexers, the technology of fused biconical tapering was used, which makes it possible to achieve low insertion loss along with a high degree of channel isolation in the wide temperature range.

Results. In the paper, the possibilities of manufacturing fiber multiplexers based on bend-resistant fiber Corning SMF-28 Ultra were discussed. The results of manufacturing and studying the experimental samples of WDM multiplexers optical characteristics were presented. It was established that the use of SMF-28 Ultra quartz fiber made it possible to significantly reduce the deviation of the channel optical isolation in the event of mechanical stresses in the multiplexers OF structure.

Conclusions. The possibility of creating two-channel multiplexers with low bending losses and optical isolation up to 20–22 dB was experimentally shown. Possible mechanisms of the influence of the multiplexer fiber twisting on the optical isolation of channels were considered. The results obtained showed that when mechanical stresses in the fused structure of the multiplexer occur, the change in the optical isolation coefficient at two operating wavelengths does not exceed 1 dB.

Keywords: fiber-optic communication systems, bend-resistant optical fiber, multiplexer, WDM multiplexer, fused biconical taper technology, coupling region

• Submitted: 18.06.2021 • Revised: 19.10.2021 • Accepted: 23.02.2022

For citation: Ivanov D.A. Fiber optical WDM multiplexers/demultiplexers with low bending losses. *Russ. Technol. J.* 2022;10(2):7–13. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-7-13>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Современные волоконно-оптические системы связи (ВОСС) характеризуются постоянным ростом пропускной способности, совершенствованием эксплуатационных характеристик оптических компонентов и все более широким внедрением оптоволоконных устройств в аппаратуру специальной техники. Это предъявляет повышенные требования к надежности, миниатюризации и эксплуатационным характеристикам компонентов ВОСС [1].

В последние годы ВОСС со спектральным уплотнением каналов активно применяются в различных телекоммуникационных системах. Для реализации таких систем часто используются специальные пассивные оптические устройства – сплавные WDM-мультиплексоры/демультиплексоры (англ. Wavelength Division Multiplexing, WDM), предназначенные для объединения и разделения нескольких информационных сигналов с длинами волн 1.31 мкм и 1.55 мкм и передачи их по одному оптическому волокну (ОВ) [2]. Такие устройства давно используются на рынке и хорошо зарекомендовали себя благодаря достаточно высокому уровню характеристик и невысокой стоимости. Выпускаемые в настоящее время рядом ведущих фирм и предприятий мультиплексоры обычно изготавливаются из стандартного волокна Corning SMF-28e+ категории G.652.D, которое активно применяется для использования в городских сетях и сетях доступа. Однако у такого волокна есть один существенный недостаток – это прирост потерь, вызванный макроизгибами, которые ухудшают качество связи при передаче и приеме данных [3–5]. Поэтому мультиплексоры на основе этого волокна тоже подвержены влиянию изгибов волоконных выводов и, как следствие, ухудшению своих оптических характеристик.

В работе рассмотрены вопросы технологии изготовления и возможность формирования сплавных

мультиплексоров на основе изгибоустойчивого одномодового волокна Corning SMF-28 Ultra¹, представлены результаты изготовления и исследования оптических характеристик экспериментальных образцов WDM-мультиплексоров.

КВАРЦЕВОЕ ИЗГИБОУСТОЙЧИВОЕ ВОЛОКНО CORNING SMF-28 ULTRA

Одномодовое волокно Corning SMF-28 Ultra с улучшенными оптическими характеристиками по затуханию и стойкостью к изгибным потерям, превышающими требования ITU-T G.657.A1, дает возможность для модернизации существующих волоконно-оптических устройств телекоммуникаций, в частности, двухволновых WDM-мультиплексоров, световодная структура которых чувствительна к различным воздействующим факторам.

На рис. 1 показана зависимость затухания от изгибов в стандартном волокне G.652.D и в изгибоустойчивом волокне SMF-28 Ultra [6].

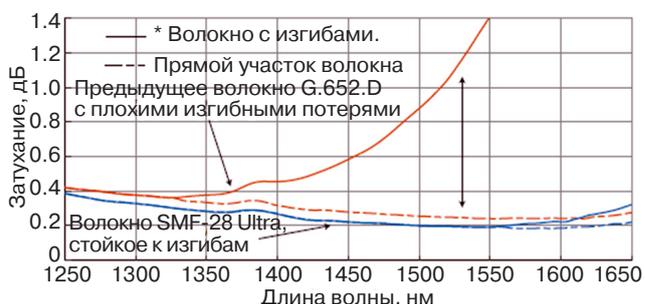


Рис. 1. Прирост затухания на изгибах в стандартном волокне G.652.D и в изгибоустойчивом волокне SMF-28 Ultra

¹ SMF-28[®] Ultra Optical Fibers. URL: <https://www.corning.com/ru/ru/products/communication-networks/products/fiber/smf-28-ultra.html>, дата обращения 07.06.2021. [SMF-28[®] Ultra Optical Fibers. URL: <https://www.corning.com/ru/ru/products/communication-networks/products/fiber/smf-28-ultra.html>. Accessed June, 7, 2021. (in Russ.)]

Из рис. 1 видно, что при больших длинах волн, когда оптический сигнал в меньшей степени зависит от сердцевины одномодового ОВ, потери на изгиб значительно возрастают в волокне G.652.D по сравнению с изгибоустойчивым волокном SMF-28 Ultra.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ WDM-МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКНА CORNING SMF-28 ULTRA

Технология изготовления волоконно-оптических двухволновых WDM-мультиплексоров с малыми изгибными потерями основана на сплавлении двух нечувствительных к изгибу волокон SMF-28 Ultra с одновременным растяжением участка разветвления с целью получения плавного биконического сужения, необходимого для эффективной волноводной связи между волокнами (технология Fused Biconical Taper, FBT) [7].

Метод создания одномодового WDM-мультиплексора иллюстрируется на рис. 2 [8].

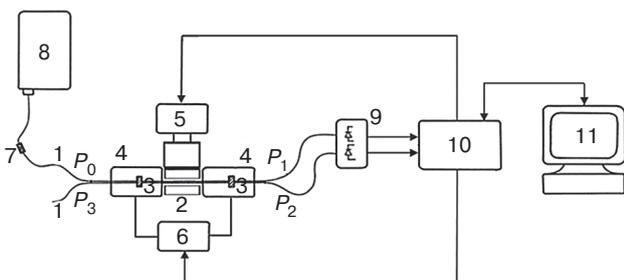


Рис. 2. Структурная схема устройства для изготовления сплавных WDM-мультиплексоров:

- 1 – оптические волокна SMF-28 Ultra;
- 2 – высокотемпературный нагреватель; 3 – узлы прижима волокон; 4 – подвижные каретки; 5 – блок питания нагревателя; 6 – блок электропривода;
- 7 – место сварки пигтейла с волокном SMF-28 Ultra;
- 8 – источник оптического излучения; 9 – фотодетектор; 10 – блок управления; 11 – персональный компьютер

Заранее подготовленные и очищенные на длине ≈ 35 мм от защитного внешнего покрытия участки волокон SMF-28 Ultra соединялись между собой с помощью скрутки вокруг продольной оси на один полный оборот (рис. 3), образуя участок разветвления для формирования мультиплексора, закреплялись на каретках и помещались в нагреватель.

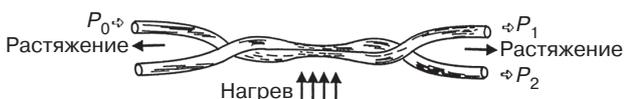


Рис. 3. Участок разветвления из двух скрученных ОВ

Во время изготовления мультиплексоров контролировались текущие значения мощности излучения P_1 и P_2 , поступающего с выходных каналов

мультиплексора на фотоприемники компьютеризированной измерительной системы [9]. Процесс прекращался при достижении определенной длины области связи (z), необходимой для спектральной селекции двух длин волн (рис. 4) [10, 11].

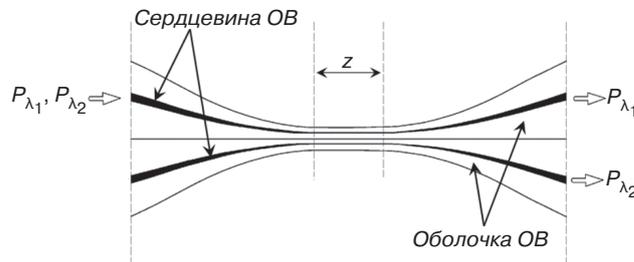


Рис. 4. Схематическое изображение FBT-мультиплексора

Одними из основных характеристик сплавных WDM-мультиплексоров являются вносимые потери $A_{вн}$ и коэффициент изоляции $K_{из}$, который определяет уровень ослабления сигнала в каналах, где этот сигнал не является основным. Для данного устройства указанные выше параметры определяются следующими выражениями:

$$A_{вн} = 10 \lg \frac{P_0}{P_i}; K_{из} = 10 \lg \frac{P_0}{P_j}; j \neq i = 1, 2, \quad (1)$$

где P_0 – оптическая мощность во входном канале на длине волны λ_i ; P_i – оптическая мощность на выходе i -го (основного) канала на длине волны λ_i ; P_j – оптическая мощность в j -м (неосновном) канале на длине волны λ_j .

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к оптическим разветвителям для систем спектрального уплотнения, являются обеспечение заданного коэффициента деления между каналами с минимальными отклонениями от заданного значения и минимальная величина вносимого затухания в пределах всего рабочего спектрального диапазона [12, 13].

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ WDM-МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ

В настоящей работе FBT-мультиплексоры изготавливались на японской установке FCI-0201 фирмы NTT AT с керамическим микронагревателем [14–16].

На рис. 5 представлен метод формирования световодных биконических структур [17].

Для успешного изготовления WDM-мультиплексоров на основе волокна SMF-28 Ultra была отработана технология с оптимальными температурно-временными параметрами процесса. Температура нагрева зоны сплавления волокон составляла 1500–1550 °С, скорость растяжения уменьшалась с 60 мкм/с в начале процесса до 10 мкм/с в конце.

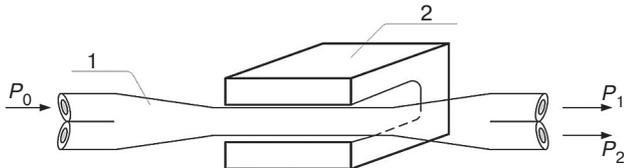


Рис. 5. Метод изготовления мультиплексоров:
1 – оптические волокна SMF-28 Ultra;
2 – керамический микронагреватель

В процессе растяжения и формирования биконической перетяжки отображалось изменение мощности излучения P_1 и P_2 в волоконных выходах мультиплексора, и контролировались вносимые потери для длины волны 1550 нм (рис. 6). Время растяжения образца при сплавлении составляло около 431 с. Длина биконического сужения после сплавления составляла 17.26 мм, а общая длина световодной структуры мультиплексора – 53 мм. Вносимые потери изготовленного образца не превышали 0.1 дБ. Коэффициент оптической изоляции каналов WDM-мультиплексора составил 20–22 дБ.

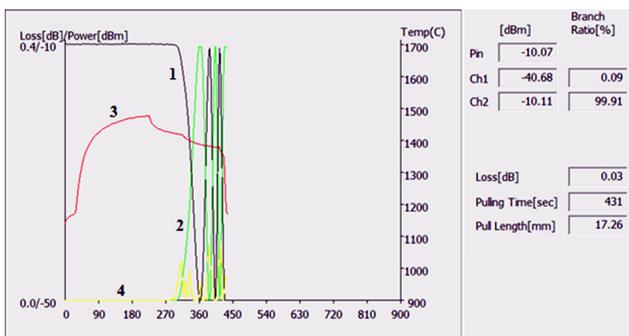


Рис. 6. Результат изготовления WDM-мультиплексора:

- 1 – мощность излучения P_1 на выходе канала Ch1;
- 2 – мощность излучения P_2 на выходе канала Ch2;
- 3 – температура нагрева зоны сплавления волокон;
- 4 – вносимые потери

Стабильность характеристик WDM-мультиплексоров в условиях эксплуатации в значительной степени зависит от их световодной структуры. Различные механические воздействия, которым может подвергаться мультиплексор в процессе эксплуатации, могут приводить к деформации его биконической структуры и, как следствие, к уменьшению коэффициента изоляции и нарушению работы линии передачи [18].

Одним из возможных механических воздействий, влияющих на перераспределение оптической мощности в каналах и изменение величины оптической изоляции, может являться скручивание

световодной структуры сформированных мультиплексоров. Такой эффект наблюдался при исследовании мультиплексоров на основе стандартного волокна SMF-28e+ [19].

Был проведен эксперимент с мультиплексорами, изготовленными на основе изгибоустойчивых волокон SMF-28 Ultra, по исследованию влияния скручивания сплавной структуры на оптическую изоляцию каналов. Для этого один участок (1) волоконных выводов (2) мультиплексора со стороны источника оптического излучения вращался вокруг оптической оси биконической структуры, а другой участок (3) со стороны оптического приемника был зафиксирован (рис. 7). Расстояние l между участками 1 и 2 волокон составляло 200 мм. В процессе эксперимента проводилось непрерывное измерение коэффициентов изоляции на двух рабочих длинах волн $\lambda_1 = 1310$ нм и $\lambda_2 = 1550$ нм.

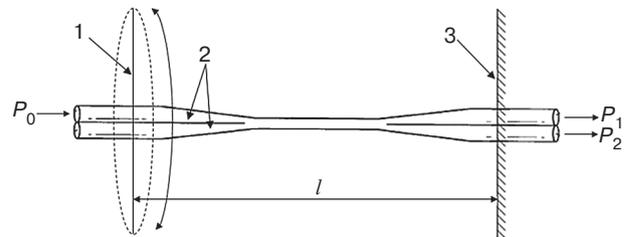


Рис. 7. Схематическое изображение скручивания волоконной структуры WDM-мультиплексора

В результате проведенного исследования установлено, что при возникновении механических напряжений в сплавленной структуре мультиплексора изменение коэффициента оптической изоляции на двух рабочих длинах волн не превышало 1 дБ. Применение кварцевых волокон SMF-28 Ultra позволило существенно снизить девиацию оптической изоляции каналов при возникновении механических напряжений в световодной структуре мультиплексоров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведен метод изготовления сплавных одномодовых мультиплексоров из волокна Corning SMF-28 Ultra. Исследованы оптические характеристики изготовленных образцов. Рассмотрены возможные механизмы влияния скручивания волоконных выводов мультиплексора на оптическую изоляцию каналов. Экспериментально показана возможность создания двухволновых мультиплексоров с малыми изгибными потерями и оптической изоляцией до 20–22 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лутченко С.С., Копытов Е.Ю., Богачков И.В. Оценка надежности ВОЛС с учетом влияния внешних факторов. *Динамика систем, механизмов и машин*. 2017;5(4):34–39. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2017-5-4-34-39>
2. Иванов В.И. *Применение технологии WDM в современных сетях передачи информации*. Казань: ЗАО «Новое знание»; 2012. 223 с. ISBN 978-5-89347-679-8
3. Беспрозванных В.Г., Мосунова И.Д. Оптические характеристики одномодовых изгибоустойчивых волокон при укладке в малых замкнутых объектах. *Инновационная наука*. 2019;1:19–23.
4. Мосунова И.Д., Селезнев Д.А., Ременникова М.В. Исследование спектрального пропускания оптического волокна при малых изгибах. *Прикладная фотоника*. 2019;6(1–2):17–23.
5. Matthijsse P., Kuyt G. Влияние изгибов оптических волокон на их характеристики. *Кабели и провода*. 2005;4(293):17–22.
6. Дорожкин А., Наний О., Трещиков В., Шихалиев И. Волокно с малыми изгибными потерями – новая жизнь для систем связи диапазона C+L. *Первая Миля*. 2018;8(77):48–53. <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2018.77.8.48.53>
7. Рождественский Ю.В. Сплавные волоконно-оптические мультиплексоры/демультиплексоры и их применение в телекоммуникационных системах. *Фотон-Экспресс*. 2004;1(31):16–18.
8. Берикашвили В.Ш., Елизаров С.Г., Ключник Н.Т., Кузнецов В.А., Яковлев М.Я. Волоконные WDM-мультиплексоры с уменьшенным спектральным интервалом между каналами. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2014;14(5):112–115.
9. Басиладзе Г.Д., Бержанский В.Н., Долгов А.И., Милукова Е.Т. Преобразование сердцевин волокон в условиях слабого и сильного сплавления оптического разветвителя. *Вестник Физико-технического института Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского*. 2010;23(62):75–80.
10. Берикашвили В.Ш., Дементьев С.Г., Ключник Н.Т., Яковлев М.Я. Спектрально-селективные оптические разветвители с повышенной изоляцией каналов. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2011;11(1):190–193.
11. Hui R., O’Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier; 2009. 672 p. ISBN: 978-0-12-373865-3
12. Базакуца П.В., Боев М.А., Никитин А.И. Исследование спектральных характеристик оптических разветвителей. *Фотон-Экспресс*. 2019;6(158):178–179. <https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16089>
13. Шестаков И.И. Анализ применимости FBT-разветвителей 1×2 в сетях PON. *Век качества*. 2019;3:137–148.
14. Takeuchi Y., et al. Characteristics of ceramic microheater for fiber coupler fabrication. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998;37(6):3665–3668. <https://doi.org/10.1143/JJAP.37.3665>
15. Takeuchi Y., Horiguchi M. Microheater control of wavelength-flattened fiber coupler properties. *Appl. Opt.* 1994;33(6):1029–1034. <https://doi.org/10.1364/AO.33.001029>

REFERENCES

1. Lutchenko S.S., Kopytov E.Yu., Bogachkov I.V. Evaluation of FOCL reliability taking into account the impact of external factors. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin = Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2017;5(4):34–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2017-5-4-34-39>
2. Ivanov V.I. *Primenenie tekhnologii WDM v sovremennykh setyakh peredachi informatsii (Application of WDM technology in modern information transmission networks)*. Kazan: Novoe znanie; 2012. 223 p. (in Russ.). ISBN 978-5-89347-679-8
3. Besprozvannykh V.G., Mosunova I.D. Optical characteristics of single-mode bend-resistant fibers at construction in small closed objects. *Innovatsionnaya Nauka = Innovation Science*. 2019;1:19–23 (in Russ.).
4. Mosunova I.D., Seleznev D.A., Remennikova M.V. Research of the spectral transmittance of optical fibers at small bends. *Prikladnaya fotonika = Applied Photonics*. 2019;6(1–2):17–23 (in Russ.).
5. Matthijsse P., Kuyt G. Influence of bending of optical fibers on their characteristics. *Kabeli i Provoda = Cables and Wires*. 2005;4(293):17–22 (in Russ.).
6. Dorozhkin A., Nanii O., Treshchikov V., Shikhaliev I. Low bendingloss fiber – a new life for C+L communication systems. *Pervaya Milya = Last Mile*. 2018;8(77):48–53 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2018.77.8.48.53>
7. Rozhdestvenskii Yu.V. Fusion fiber-optic multiplexers/demultiplexers and their application in telecommunication systems. *Foton-Express*. 2004;1(31):16–18 (in Russ.).
8. Berikashvili V.Sh., Elizarov S.G., Klyuchnik N.T., Kuznetsov V.A., Yakovlev M.Ya. WDM fiber multiplexers with reduced spectral spacing between channels. *Fundamental’nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya = Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction*. 2014;5:112–115 (in Russ.).
9. Basiladze G.D., Berzhanskiy V.N., Dolgov A.I., Milyukova E.T. Transformation of the fiber cores under conditions of weak and strong fusing of optical coupler. *Vestnik Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Physics and Mathematics Sciences*. 2010;23(62):75–80 (in Russ.).
10. Berikashvili V.Sh., Dement’ev S.G., Klyuchnik N.T., Yakovlev M.Ya. Spectral selective optical splitters with increased channel isolation. *Fundamental’nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya = Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction*. 2011;11(1):190–193 (in Russ.).
11. Hui R., O’Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier; 2009. 672 p. ISBN: 978-0-12-373865-3
12. Bazakutsa P.V., Boyev M.A., Nikitin A.I. Investigation of the spectral characteristics of optical splitters. *Foton-Express = Foton-Express*. 2019;6(158):178–179 (in Russ.). <https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16089>
13. Shestakov I.I. Analysis of applicability of FBT 1×2 splitters on PON networks. *Vek kachestva = Age of Quality*. 2019;3:137–148 (in Russ.).

16. Takeuchi Y. Characteristics analysis of wavelength-division-multiplexing fiber couplers fabricated with a microheater. *Appl. Opt.* 1996;35(9):1478–1484. <https://doi.org/10.1364/ao.35.001478>
17. Дементьев С.Г., Ключник Н.Т., Кузнецов В.А., Яковлев М.Я. Волоконно-оптические демультиплексоры для систем передачи информации. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2010;2:43–46.
18. Беспрозванных В.Г., Мосунова И.Д., Носова Е.А., Кривошеев А.И. Исследование характеристик сплавных волоконных разветвителей на основе изгибоустойчивого волокна. *Прикладная фотоника*. 2021;8(1):51–67.
19. Ключник Н.Т., Дементьев С.Г., Кузнецов В.А., Яковлев М.Я. Одномодовые спектрально-селективные разветвители с повышенной механической стойкостью. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2010;10(1):164–167.
14. Takeuchi Y., et al. Characteristics of ceramic microheater for fiber coupler fabrication. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998;37(6):3665–3668. <https://doi.org/10.1143/JJAP37.3665>
15. Takeuchi Y., Horiguchi M. Microheater control of wavelength-flattened fiber coupler properties. *Appl. Opt.* 1994;33(6):1029–1034. <https://doi.org/10.1364/AO.33.001029>
16. Takeuchi Y. Characteristics analysis of wavelength-division-multiplexing fiber couplers fabricated with a microheater. *Appl. Opt.* 1996;35(9):1478–1484. <https://doi.org/10.1364/ao.35.001478>
17. Dement'ev S.G., Klyuchnik N.T., Kuznetsov V.A., Yakovlev M.Ya. Fiber-optic demultiplexers for information transmission systems. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature = Technology and Design in Electronic Equipment*. 2010;2:43–36 (in Russ.).
18. Besprozvannykh V.G., Mosunova I.D., Nosova E.A., Krivosheev A.I. Investigation of the characteristics of fusion fiber splitters based on bend-resistant fiber. *Prikladnaya fotonika = Applied Photonics*. 2021;8(1):51–67 (in Russ.).
19. Dement'ev S.G., Klyuchnik N.T., Kuznetsov V.A., Yakovlev M.Ya. Singlemode wavelength-selective splitters with increased mechanical resistance. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya = Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction*. 2010;10(1):164–167 (in Russ.).

Об авторе

Иванов Дмитрий Александрович, аспирант кафедры оптико-электронных приборов и систем Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: d.ivanov@tmvos.com. <https://orcid.org/0000-0001-5437-7522>

About the author

Dmitry A. Ivanov, Postgraduate Student, Department of Optoelectronic Devices and Systems, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: d.ivanov@tmvos.com. <https://orcid.org/0000-0001-5437-7522>