

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы  
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 681.7.068

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-49-55>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Двухволновые WDM-мультиплексоры на основе комбинированных волоконных структур

**Д.А. Иванов<sup>@</sup>, В.И. Нефедов**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>@</sup> Автор для переписки, e-mail: [d.ivanov@tmvos.com](mailto:d.ivanov@tmvos.com)

**Резюме.** Одно из основных направлений развития систем оптической связи связано с использованием оптического волокна (ОВ) для приема и передачи данных. Поэтому производители уделяют особое внимание созданию новых марок ОВ, улучшая их оптические и эксплуатационные характеристики. Это дает возможность совершенствования существующих волоконно-оптических компонентов, использующих ОВ в качестве активной среды. Наиболее широкое распространение получили двухволновые WDM-мультиплексоры/демультиплексоры типа  $1 \times 2$ , предназначенные для разделения и объединения оптических несущих с длинами волн 1310 и 1550 нм, соответствующими 2-му и 3-му окнам прозрачности кварцевого ОВ. Следует отметить, что под мультиплексорами и демультиплексорами подразумеваются одни и те же оптические устройства, представляющие собой разветвители спектрально-селективного вида. Такие устройства отличаются достаточно высоким уровнем оптических характеристик при относительно низкой стоимости изделий. Однако анализ выпускаемых в последние годы мультиплексоров показывает, что характеристики данных устройств недостаточно соответствуют совокупности современных требований, предъявляемых большинством разработчиков систем, в частности, по допустимым величинам внешних воздействующих факторов, вносимым потерям и величине оптической изоляции каналов. Поэтому разработка и исследование WDM-мультиплексоров с улучшенными оптическими характеристиками являются актуальными. Одним из возможных путей оптимизации таких устройств является применение новых типов ОВ со стойкостью к изгибным потерям, из которых можно было бы изготовить WDM-мультиплексоры. В настоящей работе рассмотрены возможности создания сплавных одномодовых мультиплексоров/демультиплексоров на основе комбинированных волоконных структур. Представлены технология и оборудование для изготовления данных устройств. Исследованы оптические характеристики экспериментальных образцов WDM-мультиплексоров. Приведены результаты испытания на воздействие температуры.

**Ключевые слова:** ВОСС, ОВ, WDM-мультиплексор, FBT-технология, область связи, коэффициент деления

• Поступила: 23.03.2021 • Доработана: 11.05.2021 • Принята к опубликованию: 20.05.2021

**Для цитирования:** Иванов Д.А., Нефедов В.И. Двухволновые WDM-мультиплексоры на основе комбинированных волоконных структур. *Российский технологический журнал*. 2021;9(4):49–55. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-49-55>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

## Two-wavelength WDM multiplexers based on combined fiber structures

Dmitry A. Ivanov<sup>®</sup>, Victor I. Nefedov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>®</sup> Corresponding author, e-mail: d.ivanov@tmvos.com

**Abstract.** One of the main directions in the development of optical communication systems is associated with the use of optical fiber (OF) for data reception and transmission. Therefore, manufacturers began to pay special attention to the creation of new brands of OF, improving their optical and operational characteristics. This makes it possible to improve existing optical fiber components that use OF as an active medium. The most widely used are two-wavelength  $1 \times 2$  WDM multiplexers/demultiplexers designed to separate and combine optical carriers with wavelengths of 1310 and 1550 nm, corresponding to the second and third transparency windows of quartz OF. It should be noted that multiplexers and demultiplexers are the same optical devices, which are spectrally selective splitters. Such devices are distinguished by a sufficiently high level of optical characteristics at a relatively low cost of products. However, an analysis of the multiplexers produced in recent years shows that the characteristics of these devices do not sufficiently correspond to the set of modern requirements imposed by most system developers, in particular on permissible values of external influencing factors, insertion loss and the value of optical isolation of channels. Therefore, the development and research of WDM multiplexers with improved optical characteristics is relevant. One of the possible ways of optimizing such devices using new types of OF with resistance to bending losses, of which WDM multiplexers could be made. In this paper, we consider the possibilities of realizing fused single-mode multiplexers/demultiplexers based on combined fiber structures. The technology and equipment for the manufacture of these devices are presented. The optical characteristics of experimental samples of WDM multiplexers are investigated. The results of testing for the effect of temperature are given.

**Keywords:** FOCS, OF, WDM-multiplexer, FBT technology, coupling length, coupling ratio

• Submitted: 23.03.2021 • Revised: 11.05.2021 • Accepted: 20.05.2021

**For citation:** Ivanov D.A., Nefedov V.I. Two-wavelength WDM multiplexers based on combined fiber structures. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(4):49–55 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-49-55>

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

The authors declare no conflicts of interest.

### ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические системы связи (ВОСС) со спектральным уплотнением каналов находят все более широкое применение в информационно-управляющих комплексах различного рода подвижных объектов: наземных и морских транспортных средств, аэрокосмических аппаратов [1]. Для реализации таких систем используются сплавные одномодовые WDM-мультиплексоры со спектральным уплотнением и разуплотнением по длинам волн 1310 и 1550 нм [2], используемые, в частности, для организации дуплексной связи с передачей информации по одному ОВ одновременно в обоих направлениях. Для изготовления таких устройств обычно применяется технология сплавной

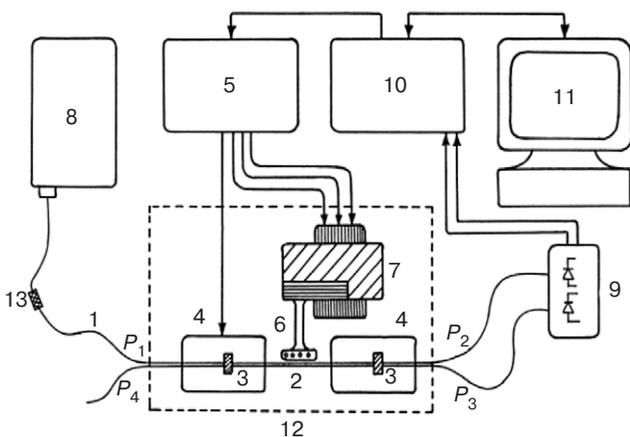
биконической вытяжки (FBT), позволяющей достичь низких вносимых потерь одновременно с высокой степенью изоляции каналов в широком диапазоне температур [3]. При изготовлении FBT-мультиплексоров основными критериями являются высокое значение коэффициента оптической изоляции каналов при демультиплексировании и малое значение вносимых потерь. Вместе с тем, мультиплексоры очень чувствительны к изменению механических напряжений в сплавленной биконической структуре, возникающих из-за различия температурных коэффициентов расширения световодной структуры материалов, из которых формируется WDM-разветвитель. Поэтому очень важно, чтобы во время эксплуатации такие устройства были стойкими к воздействию внешних факторов, в

частности, к изменению температуры в широком диапазоне от  $-60$  до  $+85$  °С.

В настоящей работе рассмотрены вопросы технологии изготовления и формирования мультиплексоров на основе комбинирования одномодовых волокон Corning SMF-28e и Corning Clearcurve ZBL [4], представлены результаты изготовления и исследования оптических характеристик, а также температурных испытаний экспериментальных образцов WDM-мультиплексоров.

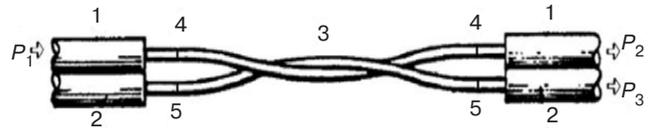
### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПЛАВНЫХ WDM-МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ СТРУКТУР

Технология изготовления сплавных WDM-мультиплексоров основана на сплавлении двух отрезков одномодовых волокон SMF-28e, подваренных в место разрыва волокон ZBL, и растяжении зоны соединения с целью получения плавного биконического перехода, необходимого для оптической связи между волокнами [5]. Двухканальные мультиплексоры/демультиплексоры с выходными волноводами из волокон ZBL могут найти применение в различных устройствах систем связи, где важны такие параметры, как потери на макроизгибах [6–7], а также уменьшение габаритов корпусов для многокаскадного соединения разветвителей. Благодаря одномодовым волокнам ZBL можно добиться малого радиуса изгиба оптических выводов сплавных мультиплексоров и значительно уменьшить влияние дополнительных потерь изгибов ОВ на оптические параметры данных устройств [8]. Метод создания двухканального волоконного мультиплексора иллюстрируется на рис. 1 [9].



**Рис. 1.** Структурная схема установки для изготовления сплавных WDM-мультиплексоров: 1 – волокна ZBL; 2 – участки волокон SMF-28e, подваренных к волокнам ZBL; 3 – узлы прижима волокон; 4 – подвижные каретки; 5 – блок электропривода; 6 – нагреватель; 7 – блок питания нагревателя; 8 – источник оптического излучения; 9 – фотоприемники; 10 – блок управления; 11 – компьютер; 12 – устройство растяжки; 13 – место сварки пигтейла с волокном ZBL

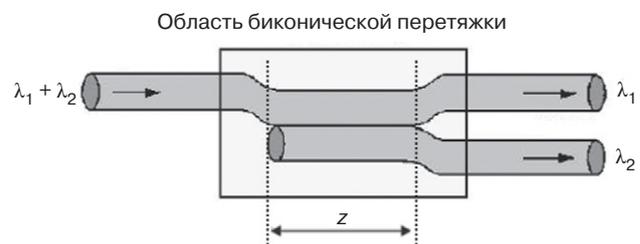
Два подготовленных отрезка волокон SMF-28e с очищенными на длине  $\approx 35$  мм от буферной оболочки участками подвариваются в место разрыва волокон ZBL, соединяются между собой с помощью скрутки (рис. 2), обеспечивающей плотное соединение волокон между собой, закрепляются на подвижных каретках устройства растяжки и помещаются в зону нагрева керамического нагревателя [10].



**Рис. 2.** Схематическое изображение скрутки волоконных световодов: 1, 2 – волокна ZBL; 3 – скрутка волокон SMF-28e; 4, 5 – место сварки участков волокон SMF-28e с волокнами ZBL

После нагрева до температуры, обеспечивающей сплавление волокон, производится растяжение участка разветвления с целью получения плавного биконического сужения.

В процессе растяжения зоны сплавления измеряются на рабочей длине волны текущие значения мощности излучения  $P_2$  и  $P_3$  в выходных портах мультиплексора [11]. Процесс останавливается при определенной длине биконической перетяжки, необходимой для демультиплексирования двух длин волн (рис. 3).



**Рис. 3.** Простейший сплавной FBT-разветвитель

Основная мода волокна, которая распространяется по сердцевине одного из ОВ, в области биконической перетяжки ( $z$ ) частично проникает в сердцевину второго волокна, и постепенно, по мере распространения вдоль этой области, происходит перетекание моды из одного волокна во второе [12]. После того, как оптическое излучение полностью перейдет из одного волокна во второе, процесс идет в противоположном направлении. Поэтому, изменяя длину перетяжки, можно добиться вывода практически всего потока на длине волны  $\lambda_1$  через один выход, а потока на длине волны  $\lambda_2$  – через другой.

Коэффициент деления зависит от биконической области  $z$  и выглядит следующим образом:

$$\alpha = F^2 \sin\left(\frac{K}{F}(z - z_0)\right), \quad (1)$$

где  $F \leq 1$  – максимальный коэффициент разделения оптической мощности, который зависит от основного разделения двух волокон и равномерности диаметра сердцевин в биконической области;  $z_0$  – длина сплавного участка перед растяжкой;  $K$  – параметр, определяющий периодичность коэффициента разделения.

Формула для расчета  $K$ , полученная опытным путем, имеет следующий вид:

$$K \approx \frac{21\lambda^{5/2}}{a^{7/2}}, \quad (2)$$

где  $a$  – радиус волокна в области биконической перетяжки;  $\lambda$  – длина волны оптического сигнала.

Поскольку радиус волокна уменьшается, когда волокна растягивают и сплавляют, то параметр  $K$  является функцией, зависящей от  $z$ . Например, если радиус волокна до растяжения равен  $a_0$ , то соотношение между  $a$  и  $z$  выглядит так [13]:

$$a \approx \sqrt{a_0^2 z_0 / z}. \quad (3)$$

Одними из основных характеристик WDM-мультиплексоров являются вносимые потери  $A$  и коэффициент изоляции  $K_{из}$ . Для двухканального устройства указанные параметры определяются следующими выражениями:

$$A = 10 \lg \frac{P_1}{P_i}; K_{из} = 10 \lg \frac{P_1}{P_j}, \quad j \neq i = 2, 3, \quad (4)$$

где  $P_1$  – оптическая мощность во входном канале на длине волны  $\lambda_i$ ;  $P_i$  – оптическая мощность на выходе  $i$ -го (основного) канала на длине волны  $\lambda_i$ ;  $P_j$  – оптическая мощность в  $j$ -м (неосновном) канале на длине волны  $\lambda_i$ .

На практике из-за отражения оптической мощности, вызываемого несовершенством биконической области, возникают оптические обратные отражения к входным портам. Уровень мощности обратного отражения определяется как

$$K_{обр} = 10 \lg \frac{P_1}{P_{обр}}, \quad (5)$$

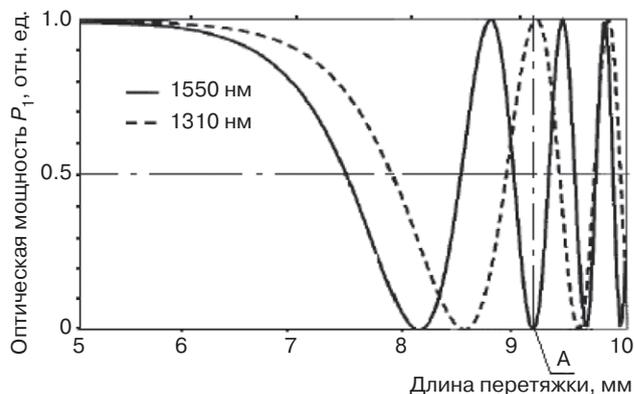
где  $P_{обр}$  – оптическая мощность, распространяющаяся обратно во входной канал.

В высококачественных волоконных разветвителях обратные отражения, как правило, меньше –55 дБ.

На рис. 4 представлена зависимость оптической мощности  $P_1$  в выходном канале мультиплексора от длины перетяжки для излучения с длиной волны 1310 нм и 1550 нм.

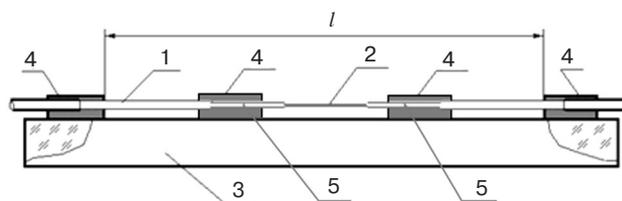
Как видно из рис. 4, при определенной длине перетяжки (точка А) достигается разделение двух длин

волн, т.е. режим демультиплексирования. Таким образом, изготавливая разветвитель с областью связи определенной длины, можно добиться объединения или разделения длин волн [14]. На практике полное демультиплексирование рабочих длин волн происходит после четвертой осцилляции, что улучшает оптические характеристики получившихся мультиплексоров.



**Рис. 4.** Зависимость относительной мощности оптического излучения в выходном канале WDM-мультиплексора от длины перетяжки для двух длин волн (1310 и 1550 нм)

После окончания процесса изготовления WDM-мультиплексора участок биконической перетяжки закрепляется на подложке из кварцевого стекла с использованием клеевого полимерного компаунда (рис. 5) и затем помещается в герметичный корпус.



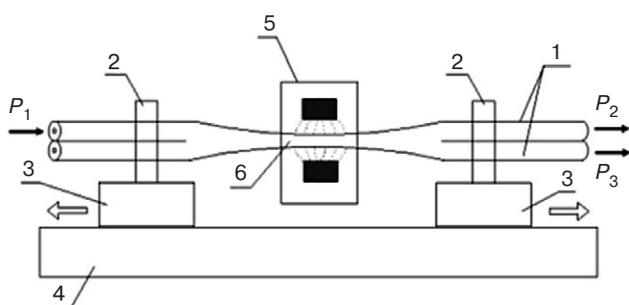
**Рис. 5.** Схематическое изображение укладки участка биконической перетяжки сплавного WDM-мультиплексора на кварцевой подложке: 1 – волокна ZBL; 2 – сплавной биконический участок; 3 – кварцевая подложка; 4 – клеевой полимерный компаунд; 5 – место сварки участков волокон SMF-28e с волокнами ZBL

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В эксперименте FBT-мультиплексоры изготавливались на промышленной установке FCI-0201 фирмы NTT AT (Япония), в которой для нагрева волокон используется керамический микронагреватель [15]. Его использование позволяет повысить стабильность температуры в зоне нагрева, что улучшает воспроизводимость процесса. Длина биконического

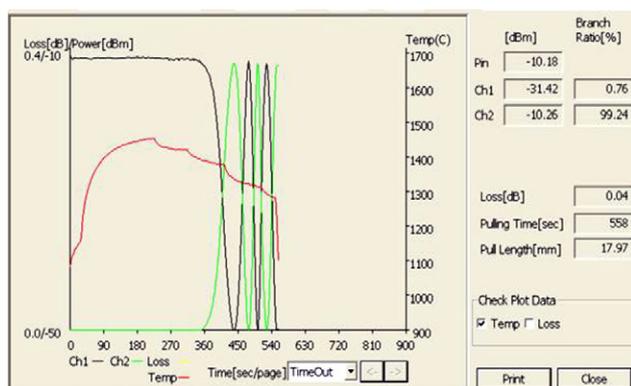
участка составляла 50 мм. Температура нагрева зоны сплавления волокон составляла 1500–1550 °С, скорость растяжения уменьшалась с 60 мкм/с в начале процесса до 10 мкм/с – в конце (рис. 6).

Для обеспечения низких потерь при растяжении должен быть обеспечен адиабатический режим перехода световой моды из стандартного волокна с сердцевинной около 9 мкм в область его утончения и обратно. Реализация такого процесса требует точной настройки нагревателя и скорости вытяжки волокон с учетом температуры и влажности воздуха в рабочем помещении.



**Рис. 6.** Метод изготовления сплавных волоконных демультиплексоров: 1 – оптические волокна; 2 – зажимы; 3 – подвижные каретки; 4 – устройство растяжки; 5 – нагреватель; 6 – зона сплавления

В процессе растяжения участка сплавления отображалась зависимость относительной мощности оптического излучения в его выходных каналах  $P_2/P_1$  и  $P_3/P_1$  от времени процесса растяжения (рис. 7), а также проводился непрерывный анализ спектральной характеристики формируемого WDM-мультиплексора.



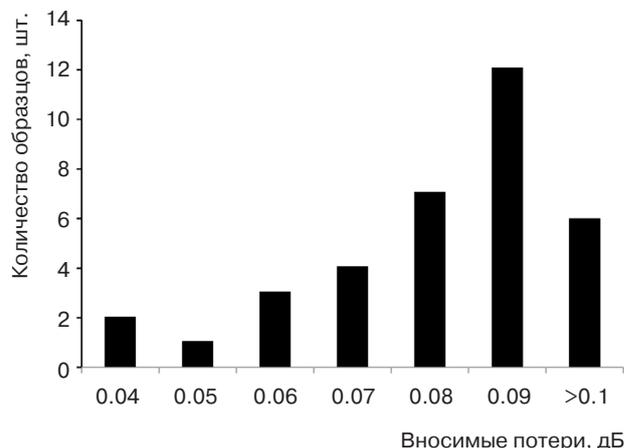
**Рис. 7.** Результат изготовления WDM-мультиплексора на установке FCI-0201

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дементьев С.Г., Ключник Н.Т., Кузнецов В.А., Яковлев М.Я. Температурная стабильность двухканальных WDM-мультиплексоров на основе биконических

Вносимые потери изготовленного образца составили 0.04 дБ, а оптическая изоляция каналов мультиплексора – 18–20 дБ.

Всего в эксперименте было изготовлено 35 образцов WDM-мультиплексоров. На рис. 8 приведена гистограмма распределения вносимых потерь мультиплексоров, полученная на основе измерений образцов.



**Рис. 8.** Гистограмма распределения вносимых потерь сплавных мультиплексоров

Анализ гистограммы показывает, что 80% от общего количества изготовленных образцов мультиплексоров имеют потери, не превышающие 0.09 дБ.

Были проведены испытания WDM-мультиплексоров на воздействие рабочих температур в диапазоне от –60 до +85 °С. Изменение величины вносимых потерь в указанном диапазоне температур не превышало 0.1 дБ, а изменение коэффициента оптической изоляции не превышало 1 дБ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведен метод изготовления сплавных одномодовых мультиплексоров на основе комбинированных волоконных структур Corning Clearcurve ZBL и Corning SMF-28e. Исследованы оптические характеристики изготовленных образцов. Экспериментально показана возможность создания мультиплексоров с потерями, не превышающими 0.1 дБ.

**Вклад авторов.** Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

**Authors' contribution.** All authors equally contributed to the research work.

### REFERENCES

1. Dement'ev S.G., Klyuchnik N.T., Kuznetsov V.A., Yakovlev M.Ya. Temperature stability of two-channel WDM-multiplexers based on biconical splitters.

- разветвителей. В сб.: *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*: мат. международной научно-технической конф. «INTERMATIC – 2012». М.: МИРЭА; 2012. Ч. 2. С. 107–110. URL: <https://conf.mirea.ru/CD2012/pdf/p4/26.pdf>
- Иванов В.И. *Применение технологии WDM в современных сетях передачи информации*. Казань: ЗАО «Новое знание»; 2012. 223 с. ISBN 978-5-89347-679-8
  - Наний О.Е. Основы технологии спектрального мультиплексирования каналов передачи (WDM). *Lightwave Russian Edition*. 2004;2:47–52. URL: <https://t8.ru/wp-content/uploads/2012/01/23.pdf>
  - SMF-28® Ultra Optical Fibers. URL: <https://www.corning.com/ru/ru/products/communication-networks/products/fiber/smf-28-ultra.html>
  - Рождественский Ю.В. Сплавные волоконно-оптические мультиплексоры/демультиплексоры и их применение в телекоммуникационных системах. *Фотон-Экспресс*. 2004;1(31):16–18.
  - Matthijse P., Kuyt G. Влияние изгибов оптических волокон на их характеристики. *Кабели и провода*. 2005;4(293):17–22. URL: [http://www.kp-info.ru/images/File/2005\\_4\\_17-22.pdf](http://www.kp-info.ru/images/File/2005_4_17-22.pdf)
  - 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>
  - Беспрозванных В.Г., Мосунова И.Д. Оптические характеристики одномодовых изгибоустойчивых волокон при укладке в малых замкнутых объектах. *Инновационная наука*. 2019;1:19–23.
  - Roychaudhuri P., Shenoy M.R., Pal B.P. Flame-fused optical fiber directional couplers: Fabrication and automated process control. *IETE Journal of Research*. 1997;43(6):433–438. <https://doi.org/10.1080/03772063.1997.11416014>
  - Берикашвили В.Ш., Елизаров С.Г., Ключник Н.Т., Кузнецов В.А., Яковлев М.Я. Волоконные WDM-мультиплексоры с уменьшенным спектральным интервалом между каналами. В сб.: *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*: мат. международной научно-технической конф. «INTERMATIC – 2014». М.: МИРЭА; 2014. Ч. 5. С. 112–115. URL: <https://conf.mirea.ru/CD2014/pdf/p5/29.pdf>
  - Иванов А.Б. *Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения*. М.: Сайрус Системс; 1999. 663 с. ISBN 5-88230-080-0
  - Marcuse D. *Theory of dielectric optical waveguides*. Boston: Academic Press; 1991. 380 p.
  - Hui R., O’Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier; 2009. 672 p. ISBN: 978-0-12-373865-3
  - Берикашвили В.Ш., Демет’ев С.Г., Ключник Н.Т., Яковлев М.Я. Спектрально-селективные оптические разветвители с повышенной изоляцией каналов. В сб.: *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*: мат. международной научно-технической конф. «INTERMATIC – 2011». М.: МИРЭА; 2011. Ч. 1. С. 190–193. URL: <https://conf.mirea.ru/CD2011/pdf/p1/43.pdf>
  - In: *Konferentsiya Fundamental’nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya “INTERMATIC – 2012” (Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction. Proc. of the International Scientific and Technical Conference “INTERMATIC – 2012”)*. Moscow: MIREA; 2012. V. 4, p. 107–110. (in Russ.). Available from URL: <https://conf.mirea.ru/CD2012/pdf/p4/26.pdf>
  - 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. ISBN 978-5-89347-679-8
  - Nanii O.E. Fundamentals of the technology of spectral multiplexing of transmission channels (WDM). *Lightwave Russian Edition*. 2004;2:47–52 (in Russ.). Available from URL: <https://t8.ru/wp-content/uploads/2012/01/23.pdf>
  - SMF-28® Ultra Optical Fibers. Available from URL: <https://www.corning.com/ru/ru/products/communication-networks/products/fiber/smf-28-ultra.html>
  - Rozhdestvenskii Yu.V. Fusion fiber-optic multiplexers/demultiplexers and their application in telecommunication systems. *Foton-Express*. 2004;1(31):16–18 (in Russ.).
  - Matthijse 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.).
  - Dorozhkin A., Nanii O., Treshchikov V., Shikhaliiev I. Low bending loss 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>
  - 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.).
  - Roychaudhuri P., Shenoy M.R., Pal B.P. Flame-fused optical fiber directional couplers: Fabrication and automated process control. *IETE Journal of Research*. 1997;43(6):433–438. <https://doi.org/10.1080/03772063.1997.11416014>
  - Berikashvili V.Sh., Elizarov S.G., Klyuchnik N.T., Kuznetsov V.A., Yakovlev M.Ya. WDM fiber multiplexers with reduced spectral spacing between channels. In: *Konferentsiya Fundamental’nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya “INTERMATIC – 2014” (Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction. Proc. of the International Scientific and Technical Conference “INTERMATIC – 2014”)*. Moscow: MIREA; 2014. V. 5, p. 112–115. (in Russ.). Available from URL: <https://conf.mirea.ru/CD2014/pdf/p5/29.pdf>
  - Ivanov A.B. *Volokonnaya optika. Komponenty, sistemy peredachi, izmereniya (Fiber optics. Components, transmission systems, measurements)*. Moscow: Sairus Systems; 1999. 663 p. (in Russ.). ISBN 5-88230-080-0
  - Marcuse D. *Theory of dielectric optical waveguides*. Boston: Academic Press; 1991. 380 p.
  - Hui R., O’Sullivan M. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier; 2009. 672 p. ISBN: 978-0-12-373865-3
  - Berikashvili V.Sh., Dement’ev S.G., Klyuchnik N.T., Yakovlev M.Ya. Spectral selective optical splitters with increased channel isolation. In: *Konferentsiya*

15. Ключник Н.Т., Дементьев С.Г., Кузнецов В.А., Яковлев М.Я. Одномодовые спектрально-селективные разветвители с повышенной механической стойкостью. В сб.: *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*: мат. VII международной научно-технической конф. «INTERMATIC – 2010». М.: МИРЭА; 2010. Ч. 1. С. 164–167. URL: <https://conf.mirea.ru/CD2010/pdf/p1/36.pdf>
- Fundamental'nye problemy radioelektronного priborostroeniya "INTERMATIC – 2011" (Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction. Proc. of the International Scientific and Technical Conference "INTERMATIC – 2011").* Moscow: MIREA; 2011. V. 1, p. 190–193. (in Russ.). Available from URL: <https://conf.mirea.ru/CD2011/pdf/p1/43.pdf>
15. Dement'ev S.G., Klyuchnik N.T., Kuznetsov V.A., Yakovlev M.Ya. Singlemode wavelength-selective splitters with increased mechanical resistance. In: *Konferentsiya Fundamental'nye problemy radioelektronного priborostroeniya "INTERMATIC – 2010" (Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction. Proc. of the International Scientific and Technical Conference "INTERMATIC – 2010").* Moscow: MIREA; 2010. V. 1, p. 164–167. (in Russ.). Available from URL: <https://conf.mirea.ru/CD2010/pdf/p1/36.pdf>

#### Об авторах

**Нефедов Виктор Иванович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой систем связи и телекоммуникаций Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: [nefedov@mirea.ru](mailto:nefedov@mirea.ru).

**Иванов Дмитрий Александрович**, аспирант, кафедра систем связи и телекоммуникаций Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: [d.ivanov@tmvos.com](mailto:d.ivanov@tmvos.com). <https://orcid.org/0000-0001-5437-7522>

#### About the authors

**Victor I. Nefedov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Communication Systems and Telecommunications, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: [nefedov@mirea.ru](mailto:nefedov@mirea.ru).

**Dmitry A. Ivanov**, Postgraduate Student, Department of Communication Systems and Telecommunications, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: [d.ivanov@tmvos.com](mailto:d.ivanov@tmvos.com). <https://orcid.org/0000-0001-5437-7522>