

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-10-43-49

УДК 681.7.068

Разработка и исследование узкополосных спектральных фильтров на каскаде волоконных брэгговских решёток

Ю. И. Яндыбаева^{1✉}, С. В. Варжель², В. А. Якимук³, В. А. Комисаров⁴,
Д. В. Калязина⁵, А. А. Дмитриев⁶, М. В. Сковородкина⁷, А. В. Куликов⁸

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Корреспондирующий автор: Юлия Игоревна Яндыбаева iuiandybaeva@itmo.ru

Аннотация

Предмет исследования. Каскад узкополосных волоконных брэгговских решёток с высоким коэффициентом ослабления сигнала, соединённых друг с другом через волоконно-оптический изолятор. **Цель работы.** Создание узкополосного спектрального фильтра на каскаде волоконных брэгговских решёток с шириной полосы пропускания 82 пм. **Метод.** Для записи волоконных брэгговских решёток использовался метод фазовой маски со сканирующим пучком излучения эксимерного лазера COHERENT COMPexPro 102F на фториде криптона (KrF) с целью получения длинных решёток с узкой полосой пропускания. Две решётки с одинаковой центральной длиной волны брэгговского резонанса подключались друг к другу последовательно через волоконно-оптический изолятор, чтобы избежать появления интерференционных эффектов. **Основные результаты.** По спектрам пропускания полученного каскада волоконных брэгговских решёток определена ширина полосы пропускания фильтра по уровню -3 дБ, равная 82 пм, а также максимальное значение ослабления, равное 46 дБ. Центральная длина волны минимума пропускания фильтра составила 1549,9 нм. Для сравнения ширина полосы пропускания решёток той же длины с аналогичным значением ослабления составила 123 пм по уровню -3 дБ, что значительно превышает значение ширины полосы пропускания фильтра на каскаде волоконных брэгговских решёток. **Практическая значимость.** Полученный в работе узкополосный фильтр на каскаде волоконных брэгговских решёток подходит для внедрения в системы квантового распределения ключей на боковых частотах для отсекающей несущей длины волны сигнала от боковых, а также для других систем линий связи, где необходимо выделение узкой спектральной полосы.

Ключевые слова: волоконные брэгговские решётки, узкополосные спектральные фильтры, каскад волоконных брэгговских решёток, волоконно-оптический изолятор, система квантового распределения ключей на боковых частотах

Благодарность: работа была выполнена по заказу ОАО «Российские железные дороги».

Ссылка для цитирования: Яндыбаева Ю.И., Варжель С.В., Якимук В.А., Комисаров В.А., Калязина Д.В., Дмитриев А.А., Сковородкина М.В., Куликов А.В. Разработка и исследование узкополосных спектральных фильтров на каскаде волоконных брэгговских решёток // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 43–49. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-43-49>

Коды OCIS: 060.3735, 060.2340, 060.5565

Development and research of narrowband spectral filters on a cascade of fiber Bragg gratings

Y. I. YANDYBAEVA^{1✉}, S. V. VARZHEL², V. A. YAKIMUK³, V. A. KOMISAROV⁴,
D. V. KALIAZINA⁵, A. A. DMITRIEV⁶, M. V. SKOVORODKINA⁷, A. V. KULIKOV⁸

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Yulia I. Yandybaeva iuiandybaeva@itmo.ru

Abstract

Subject of study. A cascade of narrowband fiber Bragg gratings with a high attenuation connected to each other through a fiber-optic isolator. **Aim of study.** Fabrication of a narrowband spectral filter on a cascade of fiber Bragg gratings with a bandwidth of 82 pm. **Method.** The phase mask method with a scanning beam of KrF excimer laser COHERENT COMPexPro 102F radiation was used for inscribing of long fiber Bragg gratings in order to obtain a narrow bandwidth. Two gratings with the same central wavelength of the Bragg resonance were connected to each other in series through a fiber-optic isolator to avoid interference effects. **Main results.** According to the transmission spectra of the obtained cascade of fiber Bragg gratings, the filter transmission bandwidth at the level of –3 dB was determined as 82 pm, as well as the maximum attenuation value of 46 dB. The central wavelength of the minimum transmission of the filter was 1549.9 nm. For comparison, the bandwidth of gratings with the same length and similar attenuation value was 123 pm at the level of –3 dB, which significantly exceeds the bandwidth of the filter on the cascade of fiber Bragg gratings. **Practical significance.** The obtained narrowband filter on a cascade of fiber Bragg gratings is suitable for integration into the subcarrier wave quantum key distribution systems to cut off the carrier wavelength of the signal from the side ones, as well as for other communication line systems where it is necessary to select a narrow spectral band.

Keywords: fiber Bragg gratings, narrowband spectral filters, cascade of fiber Bragg gratings, fiber-optic isolator, subcarrier wave quantum key distribution system

Acknowledgment: the work was done by order of JSCo “Russian Railways”.

For citation: Yandybaeva Y.I., Varzhel S.V., Yakimuk V.A., Komisarov V.A., Kaliazina D.V., Dmitriev A.A., Skovorodkina M.V., Kulikov A.V. Development and research of narrowband spectral filters on a cascade of fiber Bragg gratings [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 10. P. 43–49. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-43-49>

OCIS codes: 060.3735, 060.2340, 060.5565

ВВЕДЕНИЕ

Спектральные фильтры на волоконных брэгговских решётках (ВБР) нашли широкое применение в линиях связи, например, выравнивающие спектр усилителя GFF-фильтры [1], в системах с мощным лазерным излучением для исключения сигнала комбинационного рассеяния [2]. Фильтрация может происходить как в широких диапазонах длин волн, так и в узких. Узкополосные фильтры актуальны для задач создания систем квантового распределения ключей различных конфигураций, например, на боковых частотах [3–5]. В такой системе появляется необходимость отсечения центральной длины волны от боковых максимумов. Как правило к таким филь-

трам устанавливаются специальные требования, такие как очень узкая полоса пропускания менее 80 пм [6, 7] и при этом большое значение ослабления сигнала более 40 дБ [8], что является трудновыполнимой задачей.

Одним из способов уменьшения ширины полосы пропускания ВБР является увеличение её длины и уменьшение модуляции показателя преломления [9, 10]. Однако длина ВБР зависит от ограничений, накладываемых способом записи, например, размером зеркал в интерферометрическом методе или размером пучка в методе фазовой маски. С другой стороны, метод фазовой маски позволяет производить запись не только неподвижным лазерным пучком, но и с помощью сканирова-

ния пучка вдоль длины фазовой маски. В таком случае длина ВБР становится ограничена только размерами фазовой маски и ходом автоматизированной подвижки.

Достижение большого ослабления сигнала на одной длинной ВБР и сохранение узкой полосы пропускания при этом остаётся трудной задачей. Решить её можно путём создания каскада ВБР различных конфигураций [11, 12] с одинаковой центральной длиной волны. В таком случае в спектре пропускания может наблюдаться сложение ослабления от каждой ВБР, но возникает интерферометр Фабри–Перо [13, 14], который вносит свои ограничения. Для предотвращения интерференционных явлений между ВБР можно внедрить волоконно-оптический изолятор, который будет поглощать излучение, отражённое обратно от второй решётки. Таким образом, каскад, состоящий из двух ВБР и изолятором между ними, будет работать как узкополосный фильтр на пропускание. Преимуществом такой конфигурации является упрощённое требование к ослаблению каждой ВБР, но появляется необходимость подгонки центральных длин волн к одинаковому значению, что может быть выполнено с помощью дополнительного теплового воздействия [13].

Целью данной работы является создание узкополосного спектрального волоконного фильтра на каскаде ВБР с шириной полосы пропускания 82 нм. Отличительными особенностями ВБР являются большая длина и высокое значение ослабления, получаемые путём записи методом фазовой маски со сканирующим лазерным пучком.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Оптоволокно

Создание спектральных фильтров и запись ВБР производились в телекоммуникационном одномодовом оптическом волокне стандарта G.657.A2. Оптическое волокно данного стандарта было выбрано в виду того, что при дальнейшем внедрении разрабатываемого фильтра в системы линий связи каскад ВБР необходимо укладывать в корпус малых размеров. В связи с этим оптоволокно должно укладываться с небольшим радиусом кривизны и, соответственно, обладать меньшими потерями

на изгибе. С точки зрения записи ВБР волокно указанного стандарта, по сравнению с оптическим волокном стандарта G.652, не обладает какими-либо отличиями, так как разницы в фоточувствительности этих волокон также нет.

Для дополнительного повышения фоточувствительности волокно предварительно подвергали воздействию водорода в течение двух недель при температуре 50 °С и давлении около 105 атм [15, 16]. После записи ВБР подвергались термической обработке для выхода водорода из структуры.

2. Экспериментальная установка

Для задачи создания узкополосных волоконных фильтров была рассмотрена технология записи ВБР с помощью метода фазовой маски и сканирующего лазерного пучка. Схема установки для записи изображена на рис. 1а.

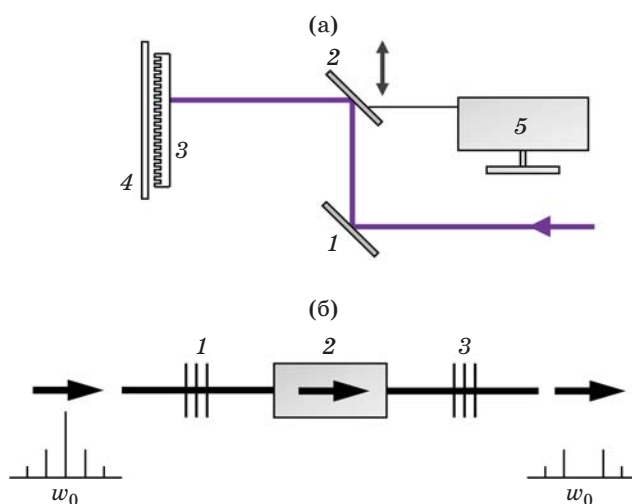


Рис. 1. (а) Схема лабораторной установки для лазерной записи ВБР (1 — зеркало, 2 — транслирующее зеркало (двойной стрелкой обозначено направление движения), 3 — фазовая маска, 4 — волокно, 5 — система управления подвижкой); (б) схема узкополосного фильтра на каскаде ВБР (1 — ВБР-1, 2 — оптический изолятор, 3 — ВБР-2, стрелками обозначены входной и выходной сигналы)

Fig. 1. (a) Schematic view of the setup for laser inscribing of FBG (1 — mirror, 2 — translating mirror (double arrow indicates the direction of movement), 3 — phase mask, 4 — fiber, 5 — motion control system); (b) schematic view of a narrowband filter on the FBG cascade (1 — FBG-1, 2 — optical isolator, 3 — FBG-2, the arrows indicate the input and output signals)

В качестве источника излучения использовался эксимерный лазер COHERENT COMPexPro 102F на фториде криптона (KrF) с центральной длиной волны 248 нм. Также использовались зеркала с интерференционным покрытием на 248 нм 1, линейная подвижка с ходом 100 мм с прикреплённым к ней зеркалом 2, фазовая маска Ibsen Photonics ± 1 порядка дифракции (период 1071,5 нм, размер 70×10 мм) 3, к которой вплотную устанавливалось волокно 4. Сканирование лазерным пучком производилось путём трансляции автоматизированной подвижки. Лазерный пучок имел размер 20×6 мм, поэтому перемещение подвижки на 30 мм обеспечивало запись решётки длиной 50 мм.

3. Измерительное оборудование

Для измерения спектров отражения и пропускания брэгговских решёток использовался бриллюэновский анализатор спектра высокого разрешения BOSA 100, Aragon Photonics с максимальным разрешением длины волны 0,08 пм и внешний перестраиваемый источник лазерного излучения Yenista TUNICS T100S-HP.

Измерение потерь вне центрального минимума пропускания происходило с помощью одномодового перестраиваемого источника лазерного излучения Santec ECL200 с диапазоном перестройки 1530–1630 нм. Фильтр с конструкцией, указанной на рис. 16, подключался к лазеру через дополнительный изолятор и к измерителю оптической мощности Рубин 202.

4. Предлагаемая схема узкополосного волоконного фильтра

Для создания узкополосного волоконного фильтра была предложена схема, указанная на рис. 16. Данная схема включает в себя волокна с ВБР-1 1 и ВБР-2 3, подключённые друг к другу через оптический изолятор 2. В системе использовался изолятор ISO-S-P-1550-1-007-5.5x34-1M, LightComm с рабочей длиной волны 1550 нм и вносимыми потерями в прямом направлении не более 0,42 дБ.

Таким образом, входной сигнал от источника излучения входит в фильтрующую систему, затем сильноотражающая ВБР-1 отражает часть излучения на длине волны 1550 нм, а небольшая часть проходит дальше через оптический изолятор и попадает на вторую сильноотражающую ВБР-2. При этом изолятор не

позволяет пройти отражённому излучению назад на ВБР-1, благодаря чему сигнал паразитной интерференции между решётками не появляется. Данная система позволяет достигать требуемого ослабления более –40 дБ на центральной длине волны, а узкий характер полосы пропускания способствует прохождению боковых частот входного излучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для обеспечения узкой полосы пропускания и высокого значения ослабления сигнала были опробованы различные параметры лазерного излучения и движения автоматизированной подвижки, однако выполнение одновременно двух указанных условий на одной ВБР не представлялось возможным. При лазерной записи решёток с частотой следования импульсов 2 Гц, энергии в импульсе 204,5 мДж и скорости сканирования пучка 0,016 мм/с было достигнуто уменьшение пропускания до –45,1 дБ, однако ширина минимума по уровню –3 дБ стала равна 136,2 пм, что является высоким значением для узкополосного фильтра. Спектр пропускания данной ВБР представлен на рис. 2а.

Предлагаемым решением указанной проблемы является последовательное подключение нескольких ВБР с высоким коэффициентом отражения по схеме на рис. 16. При этом, как говорилось ранее, во избежание возникновения интерференционных эффектов необходимо вставить оптический изолятор между двумя решётками. Для эксперимента была выбрана пара решёток с одинаковой центральной длиной волны брэгговского резонанса 1549,88 нм и минимальной величиной пропускания –24,8 и –22,2 дБ. Спектры пропускания решёток указаны на рис. 2в, 2г. Для записи ВБР использовались следующие параметры лазерного излучения и движения подвижки: частота следования импульсов 12 Гц и 11 Гц для первой и второй решётки соответственно, энергия в импульсе 221 мДж, скорость сканирования 0,137 мм/с.

После объединения указанных ВБР в одну оптическую схему с изолятором был проанализирован спектр пропускания полученного узкополосного фильтра (рис. 2б). Суммарное значение ослабления сигнала от каскада ВБР составило 45,7 дБ, а ширина спектрального

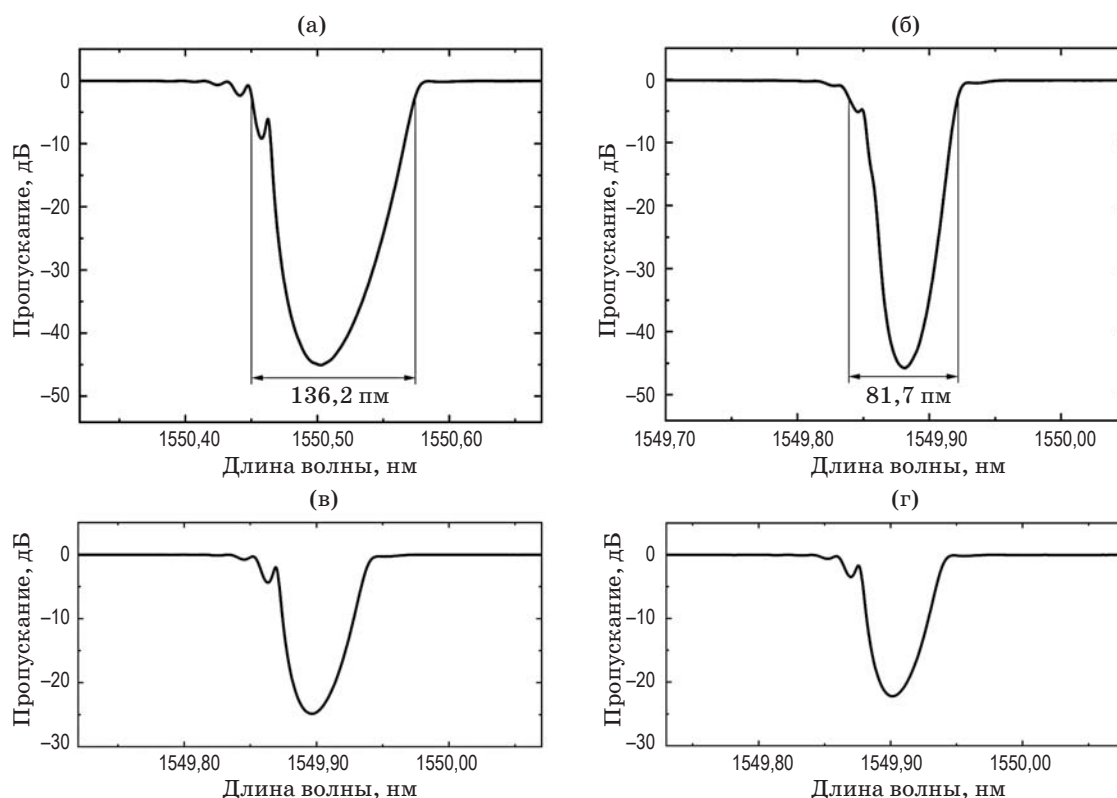


Рис. 2. Спектры пропускания единичной ВБР (а), фильтра на каскаде ВБР (б), первой ВБР (в) и второй ВБР (г) в составе фильтра

Fig. 2. Transmission spectra of a single FBG (a), a filter on the FBG cascade (б), the first FBG (в) and the second FBG (г) as part of the filter

минимума по уровню -3 дБ — $81,7$ пм. При этом при соединении двух ВБР происходит незначительное уширение минимума пропускания по сравнению с параметрами этих решёток без соединения, поскольку центральные длины волн брэгговского резонанса каждой ВБР могут частично не совпадать.

Сравнение каскада ВБР с единичной решёткой показывает, что при одинаковой длине ВБР и значении ослабления ширина минимума пропускания каскада ВБР уменьшается в $1,6$ раза. Полученные результаты и сравнение параметров решёток сведены в таблице.

Также стоит отметить, что по сравнению с единичной решёткой с таким же значением ослабления фильтр на каскаде ВБР имеет менее выраженные боковые минимумы пропускания. По принципу, описанному ранее, были измерены потери оптического излучения, проходящего через фильтр. Было определено, что за пределами центрального минимума пропускания оптические потери полученного узкополосного фильтра не превышают $0,54$ дБ.

Параметры ВБР
FBG parameters

ВБР	Ослабление, дБ	Ширина минимума пропускания по уровню -3 дБ, пм
Единичная ВБР	45,1	136,2
Каскад из двух ВБР	45,7	81,7
ВБР-1 в составе фильтра	24,8	77,3
ВБР-2 в составе фильтра	22,2	69,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе был продемонстрирован способ создания узкополосного спектрального фильтра на каскаде ВБР, соединённых друг с другом через оптический

изолятор. Для получения узкой полосы пропускания были записаны ВБР большой длины с помощью метода фазовой маски и сканирующего лазерного пучка. Запись одной длинной решётки смогла обеспечить ослабление сигнала 45 дБ, однако ширина минимума увеличилась до 136,2 нм. С другой стороны, для уменьшения ширины полосы пропускания была собрана схема, состоящая из

каскада ВБР и оптического изолятора. Соединение решёток с ослаблением 24,8 дБ и 22,2 дБ позволило получить фильтр с минимальной величиной пропускания –45,7 дБ, узкой полосой 81,7 нм по уровню –3 дБ и центральной длиной волны 1549,9 нм. Измерение потерь оптического излучения при прохождении через фильтр показало, что за пределами основного минимума потери составляют не более 0,54 дБ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rashed A.N.Z., Tabbour M.S.F., El-Meadawy S. Optimum flat gain with optical amplification technique based on both gain flattening filters and fiber Bragg grating methods // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 2018. V. 13. № 5. P. 665–676. <https://doi.org/10.1166/jno.2018.2168>
2. Dochow S., Latka I., Becker M., Spittel R., Kobelke J., Schuster K., Graf A., Brückner S., Unger S., Rothhardt M., Dietzek B., Krafft C., Popp J. Multicore fiber with integrated fiber Bragg gratings for background-free Raman sensing // *Optics Express*. 2012. V. 20. № 18. P. 20156–20169. <https://doi.org/10.1364/OE.20.020156>
3. Goncharov R., Samsonov E., Kiselev A.D. Subcarrier wave quantum key distribution system with gaussian modulation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2103. № 1. P. 012169. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012169>
4. Mora J., Ruiz-Alba A., Amaya W., Martínez A., García-Muñoz V., Calvo D., Capmany J. Experimental demonstration of subcarrier multiplexed quantum key distribution system // *Optics Letters*. 2012. V. 37. № 11. P. 2031–2033. <https://doi.org/10.1364/OL.37.002031>
5. Gleim A.V., Nazarov Y.V., Egorov V.I., Smirnov S.V., Bannik O.I., Chistyakov V.V., Kynev S.M., Anisimov A.A., Kozlov S.A., Vasiliev V.N. Subcarrier wave quantum key distribution in telecommunication network with bitrate 800 kbit/s // *EPJ Web of Conferences*. 2015. V. 103. P. 10005. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201510310005>
6. Walenta N., Burg A., Caselunghe D., Constantin J., Gins N., Guinnard O., Houlmann R., Junod P., Korzh B., Kulesza N. A fast and versatile quantum key distribution system with hardware key distillation and wavelength multiplexing // *New Journal of Physics*. 2014. V. 16. № 1. P. 013047. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/1/013047>
7. Han L., Li Y., Xu P., Tao X., Luo W., Cai W., Liao S., Peng C. Integrated Fabry–Perot filter with wideband noise suppression for satellite-based daytime quantum key distribution // *Applied Optics*. 2022. V. 61. № 3. P. 812–817. <https://doi.org/10.1364/AO.447785>
8. Rosenberg D., Nam S.W., Hiskett P.A., Peterson C.G., Hughes R.J., Nordholt J.E., Lita A.E., Miller A.J. Quantum key distribution at telecom wavelengths with noise-free detectors // *Applied Physics Letters*. 2006. V. 88. № 2. P. 021108. <https://doi.org/10.1063/1.2164307>
9. Tawfik N.I., Eldeeb W.S., El-Mashade M.B., Abdelnaem A.E. Optimization of uniform fiber Bragg grating reflection spectra for maximum reflectivity and narrow bandwidth // *Int. J. Comput. Eng. Res.* 2015. V. 5. P. 53–61.
10. Toba M., Mustafa F.M., Barakat T.M. New simulation and analysis fiber Bragg grating: narrow bandwidth without side lobes // *Journal of Physics Communications*. 2020. V. 4. № 7. P. 075018. <https://doi.org/10.1088/2399-6528/ab0600>
11. Fan Z., Zeng X., Cao C., Feng Z., Lai Z., Dang W. Novel structure of an ultra-narrow-bandwidth fibre laser based on cascade filters: PGFBG and SA // *Optics Communications*. 2016. V. 368. P. 150–154. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.02.013>
12. Bhaskar C.V.N., Pal S., Pattnaik P.K. Narrow-band optical band-pass filter using dual cascaded chirped FBGs // *Optik*. 2022. V. 262. P. 168979. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168979>
13. Singer C., Goetz A., Prasad A.S., Becker M., Rothhardt M., Skoff S.M. Thermal tuning of a fiber-integrated Fabry–Pérot cavity // *Optics Express*. 2021. V. 29. № 18. P. 28778–28786. <https://doi.org/10.1364/OE.433094>
14. Wang J. Research on dynamic grating cascaded fiber Bragg grating Fabry–Perot cavity // *2020 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS)*. 2020. P. 5–8. <https://doi.org/10.1109/TOCS50858.2020.9339738>
15. Lemaire P., Atkins R., Mizrahi V., Reed W. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibers // *Electronics Letters*. 1993. V. 29. P. 1191–1193. <https://doi.org/10.1049/el:19930796>
16. Варжель С.В., Мунько А.С., Коннов К.А., Грибаев А.И., Куликов А.В. Запись решёток Брэгга в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой, подвергнутом водородной обработке // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 10. С. 74–78.
Varzhel S.V., Mun'ko A.S., Konnov K.A., Gribaev A.I., Kulikov A.V. Recording Bragg gratings in hydrogenated birefringent optical fiber with elliptical stress cladding // *Journal of Optical Technology*. 2016. V. 83. № 10. P. 638–641. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000638>

АВТОРЫ

Юлия Игоревна Яндыбаева — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57426281000; <https://orcid.org/0000-0002-1451-7102>; iuiandybaeva@itmo.ru

Сергей Владимирович Варжель — канд. физ.-мат наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 55247304200; <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>; svvarzhel@itmo.ru

Вероника Андреевна Якимук — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57426182500; <https://orcid.org/0000-0002-1810-847X>; yakimuk2001@mail.ru

Владислав Александрович Комисаров — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 6506005713; <https://orcid.org/0000-0003-3577-0964>; vladkomisarov2070@outlook.com

Дарья Владимировна Калязина — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 58759435800; <https://orcid.org/0000-0002-7195-435X>; zina.koliazina@gmail.com

Андрей Анатольевич Дмитриев — канд. техн. наук, начальник группы, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57215003358; <https://orcid.org/0000-0002-0674-8381>; aadmitriev@itmo.ru

Маргарита Владимировна Сковородкина — инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0008-7800-0154>; mvs@itmo.ru

Андрей Владимирович Куликов — канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией, директор института "Высшая инженерно-техническая школа", Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 7103154362; <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>; avkulikov@itmo.ru

AUTHORS

Yulia I. Yandybaeva — Engineer, ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 57426281000; <https://orcid.org/0000-0002-1451-7102>; iuiandybaeva@itmo.ru

Sergey V. Varzhel — PhD, Docent, Head of Laboratory, ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 55247304200; <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>; svvarzhel@itmo.ru

Veronika A. Yakimuk — Engineer, ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 57426182500; <https://orcid.org/0000-0002-1810-847X>; yakimuk2001@mail.ru

Vladislav A. Komisarov — Engineer, ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 6506005713; <https://orcid.org/0000-0003-3577-0964>; vladkomisarov2070@outlook.com

Daria V. Kaliazina — Engineer, ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 58759435800; <https://orcid.org/0000-0002-7195-435X>; zina.koliazina@gmail.com

Andrei A. Dmitriev — PhD, Head of the Group, ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 57215003358; <https://orcid.org/0000-0002-0674-8381>; aadmitriev@itmo.ru

Margarita V. Skovorodkina — Engineer, ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0008-7800-0154>; mvs@itmo.ru

Andrey V. Kulikov — PhD, Docent, Head of Laboratory, Director of Higher School for Engineering and Technology, ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 7103154362; <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>; avkulikov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 30.03.2024

Одобрена после рецензирования 20.04.2024

Принята к печати 30.08.2024

The article was submitted to the editorial office 30.03.2024

Approved after review 20.04.2024

Accepted for publication 30.08.2024