

УДК 622.276.001

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-494-499

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО РАССЕИВАТЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО ПУТЕМ ПЛАВЛЕНИЯ СЕРДЦЕВИНЫ СВЕТОВОДА

Я.Д. Токарева^а, Ю.А. Конин^б, К.А. Коннов^а, С.В. Варжель^а, А.А. Дмитриев^а, С.Д. Бочкова^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^б Публичное акционерное общество «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, 614990, Российская Федерация

Адрес для переписки: yanoti@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.05.20, принята к печати 30.06.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Токарева Я.Д., Конин Ю.А., Коннов К.А., Варжель С.В., Дмитриев А.А., Бочкова С.Д. Экспериментальное исследование влияния оптической мощности на формирование структуры волоконно-оптического рассеивателя, полученного путем плавления сердцевин световода // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 494–499. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-494-499

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты экспериментального исследования структуры волоконно-оптического рассеивателя, сформированного путем плавления сердцевин оптического волокна. **Метод.** Продемонстрирована оптическая схема итербиевого волоконного лазера, основными компонентами которого являются: лазерный диод накачки (980 нм, мощностью до 30 Вт), активное GTWave волокно длиной 24 м, а также две волоконные брэгговские решетки с коэффициентами отражения 100 % и 30 %. Представленный итербиевый источник излучения используется для формирования периодической структуры микрополостей внутри сердцевин волоконного световода с помощью эффекта плавления материала. Применение описанной технологии позволяет создавать рассеивающие структуры с заданным периодом, не прибегая к снятию защитного акрилатного покрытия световода. Это исключает необходимость повторного покрытия оптического волокна полимерным составом и способствует сохранению его прочностных характеристик. **Основные результаты.** Разработанная в ходе исследования экспериментальная установка позволяет с помощью воздействия лазерного излучения осуществить запись рассеивающей структуры в сердцевине оптического волокна путем разрушения материала. С целью определения зависимости свойств создаваемых структур от мощности вводимого излучения получен ряд исследуемых образцов, записанных при различных характеристиках воздействующего излучения. Экспериментальным путем установлено, что при увеличении мощности лазерного излучения уменьшается период локализации микрополостей. Вместе с тем их размеры уменьшаются, и увеличивается однородность структуры. Установлено оптимальное значение мощности излучения для формирования рассеивающей структуры, которое составляет порядка 2 Вт. **Практическая значимость.** Исследуемые рассеивающие структуры могут быть применены в медицинских исследованиях, лазерной фотодинамической терапии, лазерной кардиостимуляции, флуоресцентной диагностике, а также в качестве подсветки при малоинвазивных операциях. Волоконно-оптический рассеиватель может находить применение в качестве датчика физических величин, в частности, для измерения высоких температур, поскольку верхний предел рабочей температуры рассеивателя сопоставим с температурой плавления кварцевой части оптического волокна.

Ключевые слова

волоконно-оптический рассеиватель, плавление сердцевин световода, оптический пробой, оптическое волокно, фотодинамическая терапия

EXPERIMENTAL STUDY OF OPTICAL POWER EFFECT ON THE STRUCTURE OF FIBER-OPTICAL DIFFUSER OBTAINED BY FIBER CORE MELTING

Ia.D. Tokareva^a, Yu.A. Konin^b, K.A. Konnov^a, S.V. Varzhel^a, A.A. Dmitriev^a, S.D. Bochkova^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company (PNPPK PJSC), Perm, 614990, Russian Federation

Corresponding author: yanoti@yandex.ru

Article info

Received 27.05.20, accepted 30.06.20

Article in Russian

For citation: Tokareva Ia.D., Konin Yu.A., Konnov K.A., Varzhel S.V., Dmitriev A.A., Bochkova S.D. Experimental study of optical power effect on the structure of fiber-optical diffuser obtained by fiber core melting. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 494–499 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-494-499

Abstract

Subject of Research. The paper presents experimental findings of a fiber-optic diffuser structure formed by optical fiber melting. **Method.** An optical scheme of ytterbium fiber laser is demonstrated consisting of such main components as: a laser pump diode (980 nm, with power up to 30 W), an active GTWave fiber (24 m), and two fiber Bragg gratings with reflection coefficients of 100 % and 30 %. The presented ytterbium radiation source is used to form a periodic structure of microcavities inside the fiber core using the melting effect of the material. The described technology application provides the creation of scattering structures with a given period without removing the protective acrylate fiber coating. Thus, there is no need for the optical fiber re-coating with a polymer composition, and its strength characteristics are maintained. **Main Results.** The experimental setup developed during the study gives the possibility to record the scattering structure in the core of the optical fiber by destroying the material using laser radiation. In order to determine the dependence of the properties of the created structures on the input radiation power, a number of samples was obtained recorded for various radiation characteristics. It was established experimentally that with an increase of laser radiation power, the period of localization of microcavities decreases. At the same time, their sizes are reduced, and the uniformity of the structure increases. The optimal radiation power value for the scattering structure formation is established to be about 2 W. **Practical Relevance.** The studied scattering structures can be used in medical research, laser photodynamic therapy, laser pacemakers, fluorescence diagnostics, and also as a backlight for minimally invasive operations. The fiber optic diffuser can be applicable as a sensor of physical quantities, in particular, for measuring high temperatures, since the upper limit of the diffuser working temperature is comparable to the melting temperature of the optical fiber quartz part.

Keywords

fiber optic diffuser, fiber core melting, optical-induced breakdown, optical fiber, photodynamic therapy

Введение

На сегодняшний день для создания рассеивающих микрополостей в сердцевине оптического волокна применяются технологии, подразумевающие снятие его защитного акрилатного покрытия. Проведение данной операции приводит к снижению механической прочности и изгибоустойчивости световода. Необходимая процедура восстановления покрытия оптического волокна не приводит к возврату его исходных параметров. Предложенная в данной работе технология формирования волоконно-оптических рассеивателей позволяет избежать снятия защитного полимерного покрытия и, как следствие, механического воздействия на световод, что приводит к сохранению его прочностных свойств.

Согласно оценкам, приведенным в отчете¹, мировой рынок фотодинамической терапии в 2019 году оценен более чем в 2,3 млрд долларов США со среднегодовым темпом роста выше 17 %, где применение одноразовых устройств (волоконных рассеивателей) от доли общего рынка фотодинамической терапии составляет 8,4 % или 193 млн долларов США. Применение таких устройств

на глобальном рынке разделяется на фотодинамическую терапию, фотоиммунотерапию, проведение неинвазивных операций, а также в качестве чувствительных элементов датчиков физических величин. Из приведенных областей рынка сегмент датчиков является самым большим, но в то же время обладает большим количеством конкурирующих технических решений и меньшими темпами роста, чем сегмент фотодинамической терапии². В работах [1–4] приведены примеры применения волоконно-оптических рассеивателей при регистрации изменений различных физических параметров.

Нейрохирурги, онкологи и специалисты смежных медицинских профессий заинтересованы в применении волоконных рассеивателей с малым диаметром при проведении операций. Например, в настоящее время нейрохирурги проводят операции на головном мозге, которые требуют создания отверстий в костной ткани диаметром 2 мм. В него вводится сопоставимый по размерам осветитель, который за счет своих размеров затрудняет специалисту визуальный обзор. Предлагаемая в работе технология позволяет решить описанную трудность и создавать рассеиватели в стан-

¹ Рынок фотодинамической терапии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.transparencymarketresearch.com/photodynamic-therapy-market.html> (дата обращения: 20.05.2020).

² Рынок датчиков давления [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/pressure-sensor.asp> (дата обращения: 20.05.2020).

дартных телекоммуникационных оптических волокнах с диаметром 250 мкм.

Кроме того, в литературе не освещен вопрос реализации волоконно-оптического распределенного датчика давления, реализованного на основе технологии плавления сердцевинки световода. Это направление может стать перспективной темой дальнейшего исследования.

Теоретические положения

На сегодняшний день существуют различные технологии создания области волоконного световода, выводящей излучение из его сердцевинки: плавление сердцевинки оптического волокна лазерными импульсами фемтосекундной длительности [5]; химическое или механическое травление оболочки оптического волокна до его сердцевинки с последующей защитой обработанной поверхности с применением тефлона или медицинского поликарбоната [6]; замещение защитного покрытия световода с низким показателем преломления на обладающее большим показателем преломления (применимо для кварц-полимерного оптического волокна) [7]; применение распределенных решеток Брэгга [8].

Основным недостатком всех существующих технологий является необходимость восстановления защитного акрилатного покрытия оптического волокна после его снятия. Это приводит к ухудшению прочностных характеристик рассеивателя, он становится менее изгибоустойчивым, и увеличиваются его размеры. В работе предложена технология, которая позволяет выводить оптическое излучение из сердцевинки световода без снятия акрилатного покрытия, что позволяет сохранить исходные механические свойства волокна.

В позвоночнике человека существуют естественные (фораминальные) отверстия с диаметром порядка 300 мкм [9], которые могут позволить проведение с их помощью неинвазивных операций. Однако коммерчески доступные рассеиватели, ввиду своих размеров (порядка 1 мм), не дают возможности проведения таких процедур. Предлагаемая в работе технология позволяет создавать волоконно-оптические рассеиватели для применений в медицине, используя световоды с диаметром до 250 мкм.

В ходе исследования продемонстрирована возможность создания волоконно-оптических рассеивателей, которая не требует снятия защитной полимерной оболочки волокна, и сохранения механической прочности и изгибоустойчивости устройства. Применена новая методика управления эффектом плавления сердцевинки световода, обеспечивающая равномерный вывод интенсивности излучения через боковую поверхность структуры.

Исследования данных параметров более подробно представлены в работах авторов [10–15].

Описание эксперимента

Для создания рассеивающей структуры в сердцевинке оптического волокна на основе эффекта плавления

материала, разработан макет иттербиевого волоконного лазера (рис. 1).

В состав лазера входят: диод накачки (BWT F13041654 29,5 W) с длиной волны генерируемого излучения 980 нм; активное GtWave волокно длиной 24 м, легированное иттербием; две волоконные решетки Брэгга с коэффициентами отражения 100 % и 30 %.

Подробное описание процесса записи волоконно-оптических рассеивателей представлено в [16].

С помощью разработанного макета посредством генерации лазерного излучения и реализации детонационного разрушения материала проводилась запись рассеивающей структуры в оптическом волокне. С целью определения зависимости периода создаваемой структуры от мощности воздействующего излучения к выходному порту волоконного лазера подключались образцы многомодового волокна (ММ 62,5/125 мкм). В результате получены восемь рассеивателей при различных мощностях воздействующего излучения. Изображения структур получены с помощью оптического микроскопа Zeiss Axio Scope A1.

Обсуждение результатов

Экспериментальным путем установлено, что при увеличении мощности воздействующего лазерного излучения период структур возрастает, а размеры полостей в сердцевинке оптического волокна уменьшаются. На рис. 2 представлены фотографические изображения полученных образцов рассеивателей, из которых видна закономерность изменения периода структуры от мощности лазерного излучения.

По фотографическим изображениям на рис. 2 можно установить, что значение мощности вводимого в световод излучения влияет на характеристики формируемой периодической структуры в сердцевинке оптического волокна. Чем выше мощность излучения используемого для реализации оптического пробоя, тем однородней получаемая структура внутренних полостей.

При вводе излучения мощностью 1,78 Вт (рис. 2, а), структура микрополостей формируется не на всем участке волокна, поскольку тепловой мощности, образуемой на торце волокна и идущей в обратном направлении, навстречу энергии светового импульса, не хватает для активации химической реакции [17] в сердцевинке волокна.

Ввод мощности от 3,5 Вт (рис. 2, в–з) образует в волокне ярко выраженные воздушные области, по-

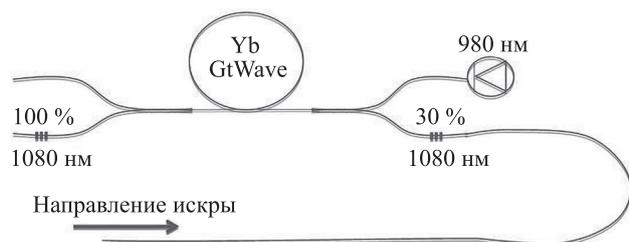


Рис. 1. Схема-макет иттербиевого волоконного лазера для записи волоконно-оптических рассеивателей

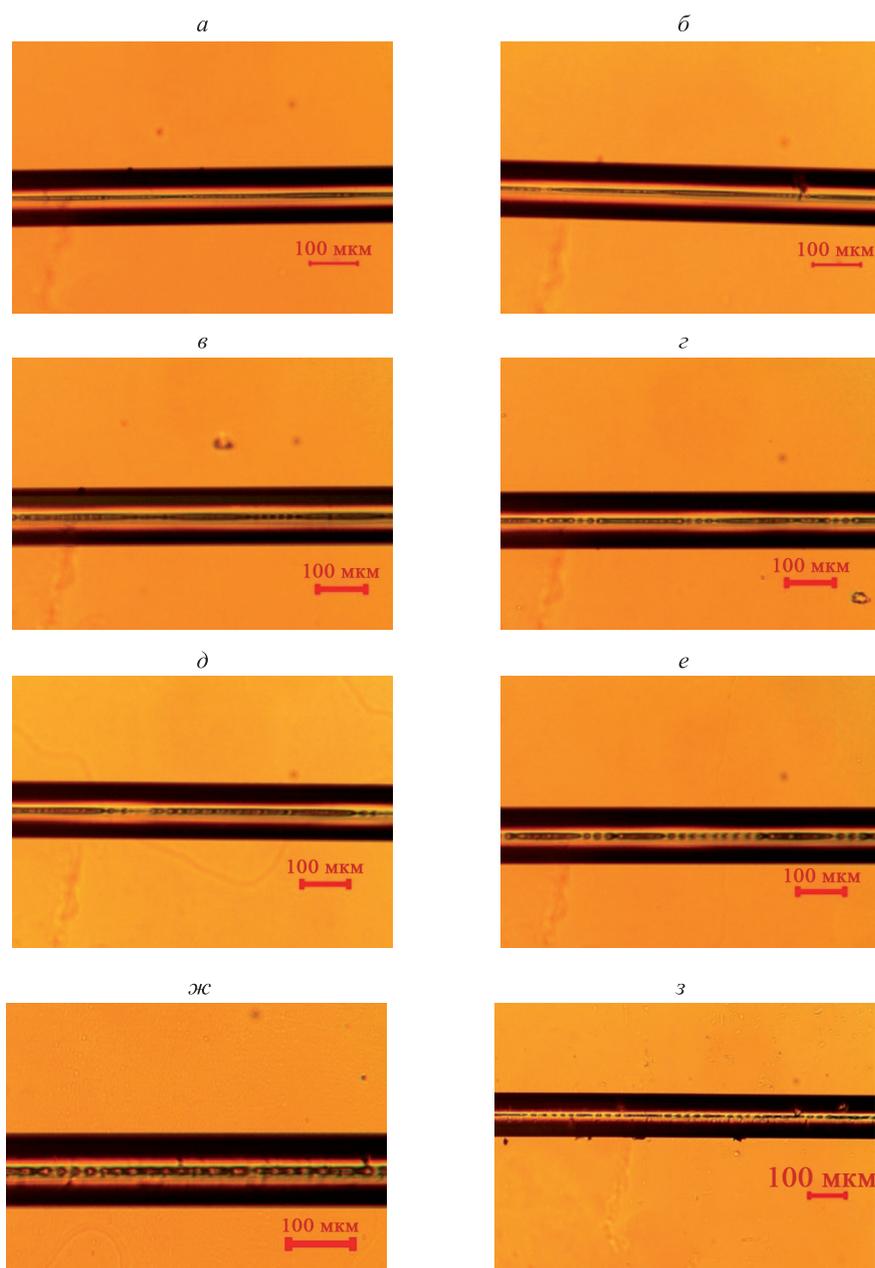


Рис. 2. Структура оптического пробоя волокна при различных мощностях воздействующего излучения, Вт: 1,78 (а); 2,28 (б); 2,78 (в); 3,38 (г); 4 (д); 4,5 (е); 5 (ж); 5,5 (з)

падая в которые, оптическое излучение рассеивается преимущественно в начальный момент прохождения структуры и не дает его равномерного выхода через боковую поверхность волокна. Это не удовлетворяет условиям проведения малоинвазивных операций при фотодинамической терапии. По этой причине для формирования структуры следует применять оптическую мощность порядка 2 Вт.

Учитывая, что исследуемые рассеиватели излучения применяются в медицинских целях, необходимо, чтобы вывод излучения был равномерным по всей длине (рис. 2, б, в). Выполнение этого условия необходимо для того, чтобы фотосенсибилизатор (при малоинвазивных операциях в фотодинамической терапии) был облучен в равной степени.

Заключение

В настоящее время фотодинамическая терапия активно развивается во всем мире. Оптические волоконные датчики также являются наиболее перспективными доступными сенсорными технологиями благодаря своим преимуществам, по сравнению с традиционными электронными устройствами (таким, как невосприимчивость к электромагнитным помехам, малый вес и размеры, долговечность и устойчивость к воздействиям окружающей среды). В работе представлена схема записи волоконного рассеивателя для применения в фотодинамической терапии и для измерения параметров физических величин.

С помощью оптического микроскопа исследованы изменения параметров микрополостей, получаемых в сердцевине оптического волокна с помощью ее плавления при различных значениях мощности воздействующего излучения. Установлено, что для использования в целях фотодинамической терапии оптимальные параме-

тры имеют рассеиватели, полученные при мощностях порядка 2 Вт (для используемого в работе волоконного световода ММ 62,5/125 мкм). Такие условия записи обеспечивают равномерный вывод излучения через боковую поверхность оптического волокна.

Литература

References

1. Wang R., Qiao X. Hybrid optical fiber Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of gas refractive index and temperature // *Applied Optics*, 2014. V. 53. N 32. P. 7724–7728. doi: 10.1364/AO.53.007724
2. Domingues M.D.F., Paixao T.D., Mesquita E.F.T., Alberto N., Frias A.R., Ferreira R.A.S., Varum H., Antunes P.F.D., Andre P.S.D. Liquid hydrostatic pressure optical sensor based on micro-cavity produced by the catastrophic fuse effect // *IEEE Sensors Journal*, 2015. V. 15. N 10. P. 5654–5658. doi: 10.1109/JSEN.2015.2446534
3. Alberto N., Tavares C., Domingues M.F., Correia S.F.H., Marques C., Antunes P., Pinto J.L., Ferreira R.A.S., André P.S. Relative humidity sensing using micro-cavities produced by the catastrophic fuse effect // *Optical and Quantum Electronics*, 2016. V. 48. N 3. P. 216. doi: 10.1007/s11082-016-0491-4
4. Domingues M.F., Antunes P., Alberto N., Frias R., Ferreira R.A.S., Andre P. Cost effective refractive index sensor based on optical fiber micro cavities produced by the catastrophic fuse effect // *Measurement*, 2016. V. 77. P. 265–268. doi: 10.1016/j.measurement.2015.07.031
5. Rychnovsky S.J., Shinn M.G. Fiber optic diffuser and method of manufacture. Patent WO 1999023041 A1. 1999.
6. Аргюшенко В.Г., Даниелян Г.Л., Мазайшвили К.В., Меерович Г.А. Устройство для облучения сосудов и полых органов. Патент RU 2571322. Бюл. 2015. № 35.
7. Brown D.C. Diffuser fiber incident energy concentrator and method of using same. Patent US 4733929 A. 1986.
8. Gu X., Tam R.C.H. Optical fiber diffuser. Patent US 6398778 B1. 1999.
9. Тома А.И., Анисимова Е.А. Вариантная анатомия отверстий позвонков в зависимости от уровня позвоночного столба // *Травматология и ортопедия России*, 2008. № 3(49). С. 115–116.
10. Scherbakova V.A., Starikov S.S., Garanin A.I., Tokareva I.D., Bochkova S.D. Research of the tensioning sensitivity of a fiber optic sensor created with the catastrophic fuse effect // *Proc. of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2020)*, 2020. P. 1126–1128. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039429
11. Конин Ю.А., Булатов М.И., Щербаклова В.А., Гаранин А.И., Токарева Я.Д., Мошева Е.В. Исследование свойств цельноволокнистого датчика температуры, созданного при помощи эффекта плавления // *Приборы и техника эксперимента*, 2020. № 4. С. 78–82. doi: 10.31857/S003281622004028X
12. Конин Ю.А., Гаранин А.И., Токарева Я.Д., Бочкова С.Д. Исследование цельноволокнистого датчика температуры // *Высокие технологии и инновации в науке: сборник статей международной научной конференции (СПб., 28 июля 2019 г.)*, 2019. С. 205–209.
13. Shcherbakova V.A., Starikov S.S., Konin Y.A., Garanin A.I., Nurmuhametov D.I. Fuse effect investigation in optical fiber for creation optical sensor structure // *Proc. of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2019)*, 2019. P. 914–916. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657220
14. Konin Y.A., Garanin A.I., Nurmuhametov D.I., Turin S.F., Shcherbakova V.A. Research the thermal sensitivity of a fiber optic sensor created with the catastrophic fuse // *Proc. of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2019)*, 2019. P. 897–900. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656714
15. Nurmuhametov D.I., Konin Y.A. Evaluation of parameters of an optical trap built based on tapered fiber for blood cells // *Proc. of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2019)*, 2019. P. 901–902. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657321
16. Конин Ю.А., Щербаклова В.А., Стариков С.С., Гаранин А.И., Токарева Я.Д. Исследование чувствительности датчика темпера-
1. Wang R., Qiao X. Hybrid optical fiber Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of gas refractive index and temperature. *Applied Optics*, 2014, vol. 53, no. 32, pp. 7724–7728. doi: 10.1364/AO.53.007724
2. Domingues M.D.F., Paixao T.D., Mesquita E.F.T., Alberto N., Frias A.R., Ferreira R.A.S., Varum H., Antunes P.F.D., Andre P.S.D. Liquid hydrostatic pressure optical sensor based on micro-cavity produced by the catastrophic fuse effect. *IEEE Sensors Journal*, 2015, vol. 15, no. 10, pp. 5654–5658. doi: 10.1109/JSEN.2015.2446534
3. Alberto N., Tavares C., Domingues M.F., Correia S.F.H., Marques C., Antunes P., Pinto J.L., Ferreira R.A.S., André P.S. Relative humidity sensing using micro-cavities produced by the catastrophic fuse effect. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, vol. 48, no. 3, pp. 216. doi: 10.1007/s11082-016-0491-4
4. Domingues M.F., Antunes P., Alberto N., Frias R., Ferreira R.A.S., Andre P. Cost effective refractive index sensor based on optical fiber micro cavities produced by the catastrophic fuse effect. *Measurement*, 2016, vol. 77, pp. 265–268. doi: 10.1016/j.measurement.2015.07.031
5. Rychnovsky S.J., Shinn M.G. Fiber optic diffuser and method of manufacture. *Patent WO 1999023041 A1*. 1999.
6. Artjushenko V.G., Danieljan G.L., Mazajshvili K.V., Meerovich G.A. Vessel and hollow organ radiation device. *Patent RU 2571322*, 2015. (in Russian)
7. Brown D.C. Diffuser fiber incident energy concentrator and method of using same. *Patent US 4733929 A*, 1986.
8. Gu X., Tam R.C.H. Optical fiber diffuser. *Patent US 6398778 B1*, 1999.
9. Toma A.I., Anisimova E.A. Vertebral foramen variant anatomy depending on column level. *Traumatology and Orthopedics of Russia*, 2008, no. 3(49), pp. 115–116. (in Russian)
10. Scherbakova V.A., Starikov S.S., Garanin A.I., Tokareva I.D., Bochkova S.D. Research of the tensioning sensitivity of a fiber optic sensor created with the catastrophic fuse effect. *Proc. of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2020)*, 2020, pp. 1126–1128. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039429
11. Konin Yu.A., Bulatov M.I., Shcherbakova V.A., Garanin A.I., Tokareva Ia.D., Mosheva E.V. Features of single continuous fiber temperature sensor created by melting effect. *Pribory i tehnika jeksperimenta*, 2020, no. 4, pp. 78–82. (in Russian). doi: 10.31857/S003281622004028X
12. Konin Y.A., Garanin A.I., Tokareva I.D., Bochkova S.D. Study the full-fiber temperature sensor. *Proc. of the International Scientific Conference High Technologies and Innovations in Science*, 2019, pp. 205–209. (in Russian)
13. Shcherbakova V.A., Starikov S.S., Konin Y.A., Garanin A.I., Nurmuhametov D.I. Fuse effect investigation in optical fiber for creation optical sensor structure. *Proc. of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2019)*, 2019, pp. 914–916. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657220
14. Konin Y.A., Garanin A.I., Nurmuhametov D.I., Turin S.F., Shcherbakova V.A. Research the thermal sensitivity of a fiber optic sensor created with the catastrophic fuse. *Proc. of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2019)*, 2019, pp. 897–900. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656714
15. Nurmuhametov D.I., Konin Y.A. Evaluation of parameters of an optical trap built based on tapered fiber for blood cells. *Proc. of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2019)*, 2019, pp. 901–902. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657321
16. Konin Yu.A., Scherbakova V.A., Starikov S.S., Garanin A.I., Tokareva Ia.D. Research the thermal sensitivity of a fiber optic sensor created with the catastrophic fuse. *PNRPU Bulletin. Electrotechnics*,

туры, созданного при эффекте плавления сердцевин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 32. С. 90–104. doi: 10.15593/2224-9397/2019.4.06

17. Shin-ichi T. Fiber fuse propagation behavior // *Selected Topics on Optical Fiber Technology*. 2012. P. 551–570. doi: 10.5772/26390

Informational Technologies, Control Systems, 2019, no. 32, pp. 90–104. (in Russian). doi: 10.15593/2224-9397/2019.4.06

17. Shin-ichi T. Fiber fuse propagation behavior. *Selected Topics on Optical Fiber Technology*, 2012, pp. 551–570. doi: 10.5772/26390

Авторы

Токарева Янина Дмитриевна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57214998978, ORCID ID: 0000-0002-1624-2659, yanoti@yandex.ru

Конин Юрий Александрович — инженер-исследователь, Публичное акционерное общество «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, 614990, Российская Федерация, Scopus ID: 5719-8798-064, ORCID ID: 0000-0002-6058-3872, Yuri-konin@ya.ru

Коннов Кирилл Александрович — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56032492300, ORCID ID: 0000-0002-8888-3527, kirillkonnov1991@gmail.com

Варжель Сергей Владимирович — кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55247304200, ORCID ID: 0000-0002-3120-8109, Vsv187@gmail.ru

Дмитриев Андрей Анатольевич — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0674-8381, dmitrievaa1994@yandex.ru

Бочкова Софья Дмитриевна — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57209362819, ORCID ID: 0000-0001-6614-3790, sooyfar@gmail.com

Authors

Ianina D. Tokareva — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57214998978, ORCID ID: 0000-0002-1624-2659, yanoti@yandex.ru

Yuri A. Konin — Research Engineer, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company (PNPPK PJSC), Perm, 614990, Russian Federation, Scopus ID: 5719-8798-064, ORCID ID: 0000-0002-6058-3872, Yuri-konin@ya.ru

Kirill A. Konnov — PhD, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56032492300, ORCID ID: 0000-0002-8888-3527, kirillkonnov1991@gmail.com

Sergey V. Varzhel — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55247304200, ORCID ID: 0000-0002-3120-8109, Vsv187@gmail.ru

Andrey A. Dmitriev — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0674-8381, dmitrievaa1994@yandex.ru

Sofya D. Bochkova — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57209362819, ORCID ID: 0000-0001-6614-3790, sooyfar@gmail.com