

УДК 622.276.001

**Ю.А. Конин¹, В.А. Щербакова², С.С. Стариков²,
А.И. Гаранин¹, Я.Д. Токарева¹**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ, СОЗДАННОГО ПРИ ЭФФЕКТЕ ПЛАВЛЕНИЯ СЕРДЦЕВИНЫ

Сегодня отдельным направлением волоконной оптики являются разработка и исследование датчиков на основе оптических световодов. Актуальным направлением – создание датчиков в сердцевине волокна с помощью эффекта плавления сердцевины, а также комбинирование датчика температуры с волоконным рассеивателем. Существующие медицинские волоконно-оптические зонды для терапии не имеют встроенных температурных датчиков. Для этих целей используются отдельные зонды-датчики. Поэтому актуальным является создание устройств, которые сочетают в себе свойства датчика и терапевтического зонда. Целью исследования является исследование температурной чувствительности терапевтического зонда с цилиндрическим рассеивателем. Для создания рассеивателей на основе fuse-эффекта был изготовлен волоконный лазер, легированный оксидами иттербия. Зонд был создан на многомодовом волокне 62,5/125 мкм. Формирование рассеивающей структуры и датчика происходит под действием эффекта плавления сердцевины. В ходе эксперимента рассеиватель света помещался в термокамеру, в которой температура каждые 10 мин скачкообразно повышалась на 1 град в диапазоне от 30 до 42 °С. Сдвиг спектральной характеристики датчика под воздействием температуры определяет его чувствительность. Для упрощения анализирующей схемы в опорное плечо интеррогатора была внедрена решетка Брэгга. В результате исследования характеристик одномодового рассеивателя получен калибровочный график зависимости амплитуды мощности обратного излучения от температуры. Это доказывает, что разработанный и изготовленный рассеиватель может применяться как датчик температуры. Точность определения температуры составила 1,25 °С. Чтобы использовать такой датчик в медицинских целях, рекомендуется увеличить точность до 0,1 °С

Ключевые слова: датчик, оптическое волокно, эффект плавления, лазер.

**Yu.A. Konin¹, V.A. Scherbakova², S.S. Starikov²,
A.I. Garanin¹, Ia.D. Tokareva¹**

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

RESEARCH THE THERMAL SENSITIVITY OF A FIBER OPTIC SENSOR CREATED WITH THE CATASTROPHIC FUSE

Today, a separate direction of fiber optics is the development and research of sensors based on optical fibers. The actual direction is the creation of sensors in the core of the fiber, using the fuse effect as well as the combination of a temperature sensor with a fiber diffuser. Existing medical therapy fiber probes do not have built-in temperature sensors. For these purposes, separate probes are used. Therefore, it is urgent to create devices that combine the properties of the sensor and therapeutic probe. The purpose of the study is to study the temperature sensitivity of a therapeutic probe with a cylindrical lens. A fiber laser doped with ytterbium oxides was manufactured for creating diffusers based on the fuse effect. The probe was created on a multimode 62,5/125 μm fiber. The formation of the scattering structure and the sensor occurs under the action of the melting effect of the core. During the experiment, the light diffuser was placed in a heat chamber, in which the temperature increased every 10 minutes abruptly by 1 degree in the range from 30 to 42 °C. The shift of the spectral characteristic of the sensor under the influence of temperature determines its sensitivity. To simplify the analyzing circuit, a Bragg grating was introduced into the support arm of the interrogator. As a result, of the study of the characteristics of a single-mode diffuser, a calibration graph was obtained for the dependence of the amplitude of the power of reverse radiation on temperature. This proves that the developed and manufactured diffuser can be used as a temperature sensor. The accuracy of determining the temperature was 1,25 °C. To use such a sensor for medical purposes, it is recommended to increase the accuracy to 0,1 °C

Keywords: sensor, fiber optic, fuse-effect, laser.

Введение. На сегодняшний день отдельным направлением волоконной оптики являются разработка и исследование датчиков на основе оптических световодов [1, 2]. Настоящая статья посвящена исследованию возможности использования френелевского рассеяния в сердцевине оптического световода волоконного рассеивателя для создания датчика температуры [3, 4]. В качестве рассеивателя можно использовать оптические неоднородности сердцевины, образующиеся при fuse-эффекте [5, 6].

Впервые информация о разрушении одномодовых световодов на силикатной основе под действием оптического излучения была опубликована в 1987 г. [7]. Внешне явление выглядит следующим образом: если в одномодовый световод вводится лазерное излучение порядка 1 Вт, то при определенных условиях (при иницировании) в области сердцевины световода (масштаб порядка 1 μm) возникает область

яркого белого или голубоватого свечения (искра), которая движется навстречу лазерному излучению по световоду со скоростью порядка 1 м/с [8, 9]. В сердцевине световода после «пробегания» искры в большинстве случаев образуются микрополости (или пузыри, или каверны) размерами несколько микрометров [10, 11]. Среди возможностей применения данного эффекта находится создание различных оптических датчиков, которые могут работать в опасных или враждебных средах [12, 13]. В настоящей статье была исследована чувствительность волоконно-оптического датчика, созданного при помощи катастрофического разрушения сердцевины волокна, к изменению температуры.

1. Разработка и создание макета иттербиевого лазера для создания рассеивателей на основе fuse-эффекта. Для создания рассеивателей на основе fuse-эффекта был изготовлен волоконный лазер, легированный оксидами иттербия, схема которого предоставлена на рис. 1.

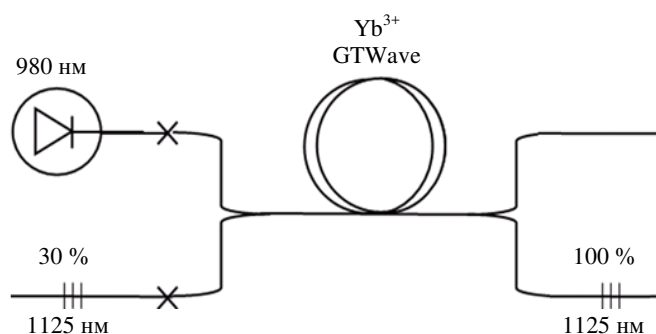


Рис. 1. Схема волоконного лазера, легированного ионами иттербия

Она состоит из диода накачки (BWT F13041654 29,5w) на 980 нм, участка активного волокна (24 м), легированного иттербием, и двух брэгговских решеток. Излучение лазерного диода методом боковой накачки подводится к волокну, легированному оксидами иттербия. В волокне появляются вынужденно возбужденные электроны. При переходе из возбужденного состояния в основное они выпускают фотоны с различной длиной волны от 900 до 1200 нм. Справа стоит 100 % брэгговская решетка, отражающая фотоны, на резонансной длине волны 1125 нм. Остальные длины волн проходят сквозь нее и рассеиваются в воздухе. Часть генерируемого когерентного излучения с длиной волны 1125 нм проходит вправо сквозь 30 % брэгговскую решетку, что обеспечивает непрерывную работу лазера на 1125 нм.

2. Методика создания рассеивателя на основе fuse-эффекта.

Следующим этапом экспериментальной части было создание рассеивателей излучения на основе fuse-эффекта. После сборки макета волоконного иттербиевого лазера были созданы рассеивающие оптическое излучение неоднородности. Для этого к открытому выходному концу оптического волокна вплотную подводился металлический отражатель. В качестве него была использована плоская поверхность стриппера. Возникшее детонационное разрушение приводило к образованию микрополостей в сердцевине волокна.

Для контроля процесса образования микрополостей движение искры в сторону лазерного диода (fuse-эффект) записывалось на видеокамеру. Эксперименты проводились при различной силе тока диода накачки для изучения зависимости скорости распространения искры, которая видна визуально, от мощности лазера. Создание микрополостей проводилось в сердцевинах оптических волокон двух типов: SMF28 и GIMM62,5/125. Были испытаны и другие методы инициации fuse-эффекта – нагрев и обрыв волокна. Было установлено, что в обоих случаях возникал эффект оптического пробоя. Однако первый метод более предпочтителен ввиду его простоты.

3. Разработка и создание макета для проверки чувствительности рассеивателей к изменению температуры. Для проверки чувствительности рассеивателя к изменению температуры был разработан макет, состоящий из лазерного диода накачки, разветвителя, волоконной брэгговской решетки и свободного конца волновода, к которому приваривались различные рассеиватели излучения. Мощность отраженного излучения измерялась при помощи анализатора спектра Yokogawa AQ6319. На рис. 2 приведена схема разработанного макета.

В ходе эксперимента рассеиватель света помещался в термокамеру, в которой температура каждые 10 мин скачкообразно повышалась на 1 град в диапазоне от 30 до 42 °С. Первоначально в схеме отсутствовала волоконная брэгговская решетка. Результаты, полученные без использования ВБР, представлены на рис. 3, 4. По горизонтальной оси отложена длина волны отраженного излучения в нм, по вертикальной – мощность в относительных единицах dB. Тринадцать зависимостей различного цвета относятся к температурам, при которых проводились эксперименты. Затем ВБР была приварена (как показано на рис. 2.), и опыт повторился при температурах 30, 32,5, 35, 37,5 и 40 °С. Результаты приведены на рис. 5.

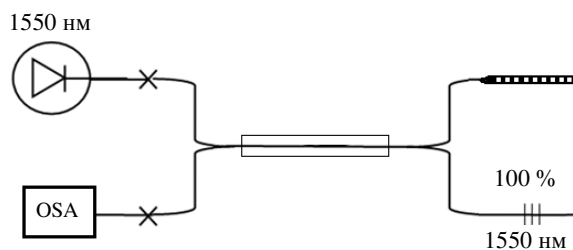
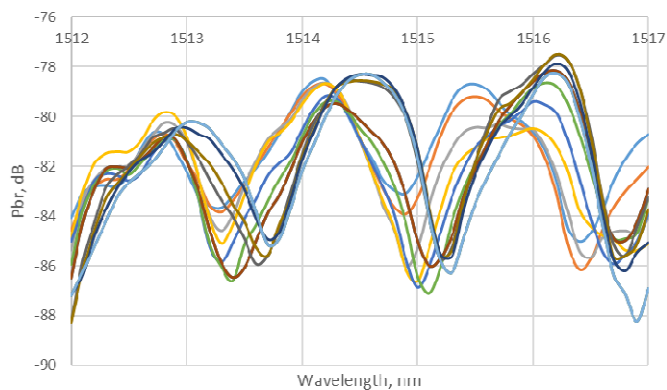
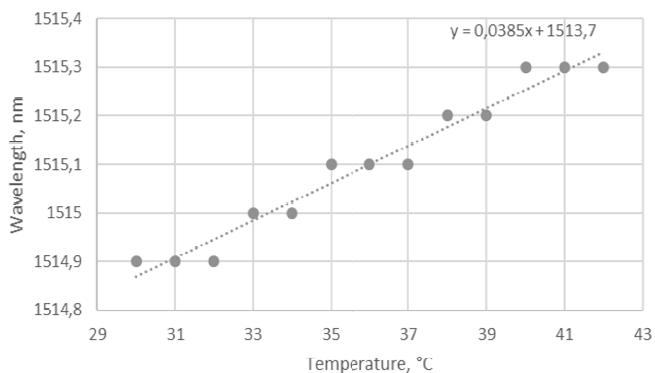


Рис. 2. Схема макета для проверки чувствительности рассеивателей к изменению температуры

На рис. 3, *a* представлен спектр излучения при разных температурах для рассеивателя излучения на многомодовом волокне с использованием широкополосного источника.



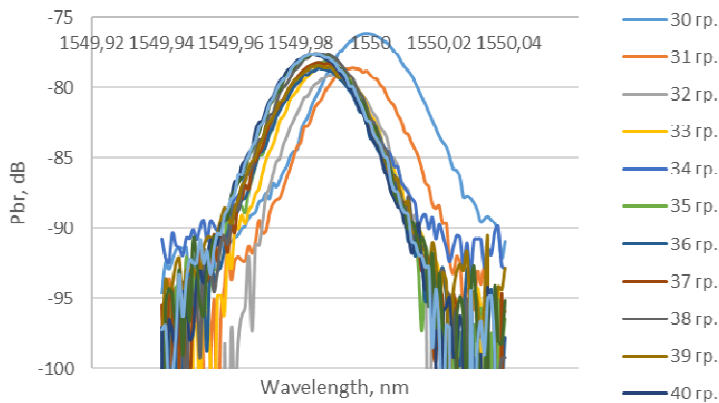
a



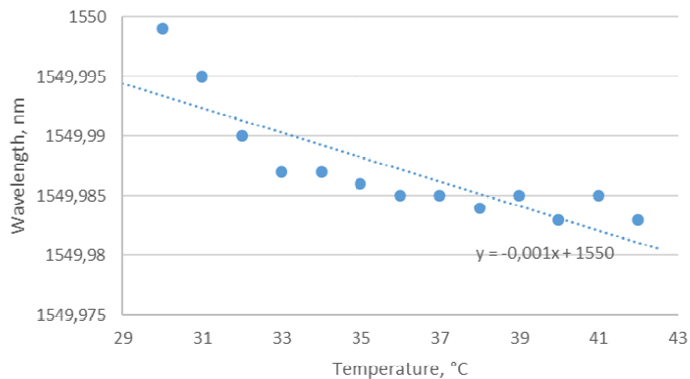
б

Рис. 3. Зависимость мощности от длины волны для рассеивателя на многомодовом волокне с использованием широкополосного источника (*a*); сдвиг минимума интерференции в диапазоне 1514,5–1515,5 нм (*б*)

На рис. 3, *а* наблюдаются пики интерференции Фабри–Перо, что связано с использованием широкополосного источника излучения. Также на рисунке присутствует интерференция от разных мод, прошедших через рассеиватель. Мощность в пиках интерференционных максимумов Фабри–Перо больше мощностей интерференционных максимумов различных мод. Зависимость сдвига минимума от температуры представлена на рис. 3, *б*. Эти два обстоятельства усложняют анализ чувствительности рассеивателя к изменению температуры.



а



б

Рис. 4. Зависимость мощности от длины волны для рассеивателя на одномодовом волокне с использованием узкополосного источника (*а*); сдвиг максимума интерференции в диапазоне 1514,5–1515,5 нм (*б*)

Для облегчения анализа необходимо уменьшить шум интерференционной картины. Проще всего избавиться от многомодовой интерференции путем замены многомодового волокна одномодовым. Для

уменьшения ширины интерференционной картины Фабри–Перо широкополосный источник излучения был заменён узкополосным. Результаты исследования температурной зависимости рассеивателя излучения на одномодовом оптическом волокне с использованием узкополосного источника излучения приведены на рис. 4, а.

На рис. 4 отсутствуют дополнительные пики интерференции Фабри–Перо, что даёт возможность наблюдать за изменением параметров только одного пика. Зависимость сдвига минимума от температуры представлена на рис. 4, б.

Однако при изменении температуры у отражённого сигнала изменяются два параметра: длина волны и мощность. Вследствие чего зависимости накладываются друг на друга, что затрудняет анализ.

Необходимо изготовить установку, в которой при изменении температуры у отражённого сигнала изменяется только один параметр: или длина волны, или мощность. Длину волны отражённого излучения можно достаточно просто зафиксировать путем установки ВБР на открытом конце оптического волокна, как показано на рис. 2. Результаты экспериментов приведены на рис. 5.

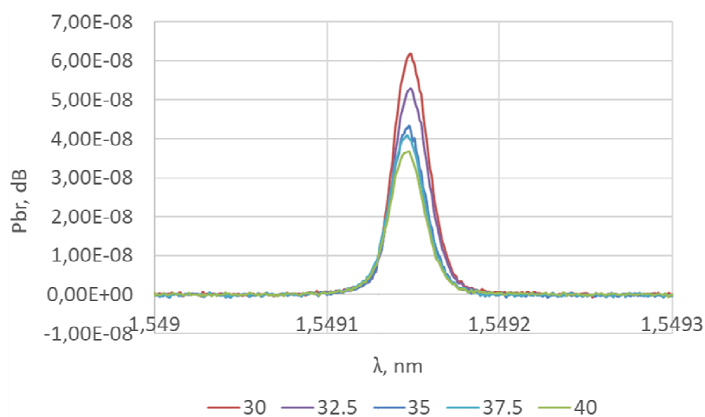


Рис. 5. Зависимость мощности от длины волны для рассеивателя излучения на одномодовом волокне с использованием узкополосного источника и волоконной брэгговской решетки

На рис. 5 представлен спектр излучения рассеивателя на одномодовом волокне с использованием узкополосного источника излучения и волоконной брэгговской решетки. Опыты проведены при температурах 30, 32,5, 35, 37,5 и 40 °C. Волоконная брэгговская решетка с $\lambda = 1549,15$ нм была выбрана с учетом того, что ее узкий спектр по-

падает на пологую часть спектра источника излучения. Как видно из рис. 5, при увеличении температуры спектр обратного отражения оптического сигнала от рассеивателя излучения сдвигается вправо, поэтому мощность отраженного излучения, измеренного анализатором спектра, уменьшается, что и наблюдается на рис. 5.

На рис. 6 представлен график зависимости мощности отражённого излучения от температуры. На графике через пять полученных точек проведена линия тренда.

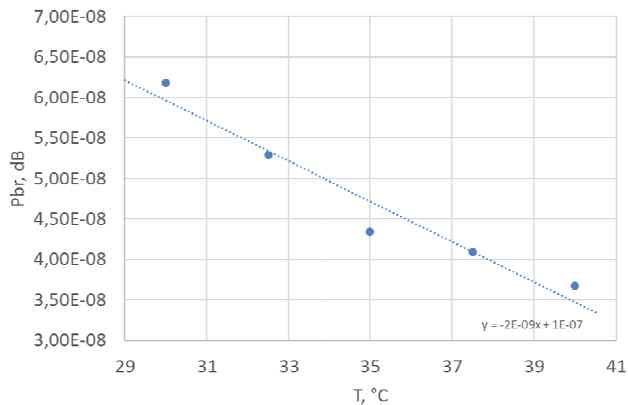


Рис. 6. Зависимость амплитуды мощности излучения обратных отражений от температуры

Таким образом, по амплитуде мощности излучения обратных отражений можно определить температуру в месте расположения рассеивателя с точностью до 1,25 °С. Планируется продолжение экспериментов на других температурах в интервале 30–42 °С, что позволит увеличить точность измерений температуры.

Выводы. В настоящее время волоконно-оптические датчики являются наиболее перспективными средствами измерения благодаря своим преимуществам по сравнению с традиционными электронными устройствами, такими как невосприимчивость к электромагнитным помехам, электрическая изоляция, уменьшенный вес и объем, долговечность и устойчивость к агрессивным воздействиям окружающей среды. В настоящей работе обоснована возможность использования волоконно-оптического рассеивателя, созданного на основе катастрофического разрушения сердцевинки как датчика температуры. В ходе исследования была выявлена зависимость амплитуды мощности излучения обратных отражений от температуры.

В ходе исследования разработан и собран волоконный лазер, легированный оксидами иттербия. При его использовании за счёт детонационного разрушения сердцевины оптического волокна были созданы рассеиватели излучения на двух видах волокна: многомодовом GIMM 62,5/125 мкм и одномодовом SMF28. Разработан и собран специальный макет для проверки чувствительности рассеивателей к изменению температуры [14–20].

При проведении экспериментов с разными компонентами макета (источники излучения, наличие или отсутствие волоконной брэгговской решетки) для проверки чувствительности рассеивателей излучения к изменению температуры были сделаны несколько выводов. Во-первых, в схеме без волоконной брэгговской решетки сложно отследить зависимость между разными температурами на одной длине волны, так как эти графики накладываются друг на друга. Волоконная брэгговская решетка позволяет отследить долю обратно отраженного излучения на одной фиксированной длине волны. Это происходит за счет того, что она пропускает фотоны с длиной волны, отличающейся от ее номинала, и отражает фотоны с длиной волны 1550 нм. Во-вторых, в эксперименте были использованы два разных источника: один – широкополосный, второй – узкополосный. В первом случае наблюдаются характерные для резонатора Фабри–Перо пики, что создает дополнительные трудности при анализе графиков. Во втором случае – ширина спектра излучения меньше, чем спектра пиков резонатора Фабри–Перо, и анализировать данные становится удобнее.

В результате исследования характеристик одномодового рассеивателя получен калибровочный график зависимости амплитуды мощности обратного излучения от температуры. Это доказывает, что разработанный и изготовленный рассеиватель может применяться как датчик температуры.

Библиографический список

1. Буфетов И.А., Дианов Е.М. Оптический разряд в волоконных световодах // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175, № 1. – С. 100–103.
2. Кашиап Р. Самодвижущееся самофокусирующееся повреждение в оптических волокнах // Электроника. – 1988. – Т. 24, № 1. – С. 47–49.

3. Жидкостный оптический датчик гидростатического давления на основе микрополости, создаваемой катастрофическим эффектом плавления / М.Ф. Домингуес, Е.Ф. Теixeира, Н. Алберто, А.Р. Фряс, Р.А. Феррейра, Н. Варум // *IEEE Sensors Journal*. – Октябрь 2015. – Т. 15. – Вып. 10. – С. 5654–5658.

4. Хэнд Д.П., Рассел П.С. Одиночные тепловые ударные волны и оптические повреждения в оптических волокнах: эффект плавления // *Оптика Письма*. – 1988. – Т. 13, № 9. – С. 767–769.

5. Высокочувствительный высокотемпературный оптоволоконный датчик Фабри-Перо, созданный на эффекте плавления / М.Ф. Домингуес, Е.Ф. Теixeира, Н. Алберто, А.Р. Фряс, Р.А. Феррейра, Н. Варум // *Труды SPIE*. – 2015. – Т. 9634 96345М-4.

6. Датчик гидростатического давления на основе микрополостей, созданный в результате эффекта плавления / М.Ф. Домингуес, Е.Ф. Теixeира, Н. Алберто, А.Р. Фряс, Р.А. Феррейра, Н. Варум // *Труды SPIE*. – 2015. – Т. 9634 96345М-4.

7. Микрополость с кончиком волокна для измерения температуры и поперечной нагрузки // *Opt. Express*. – 2011. – Т. 19, № 13. – С. 12418–12426.

8. Пинет Е. Волоконно-оптические датчики Фабри-Перо для измерения физических параметров в сложных условиях // *Журнал сенсоров*. – 2009. – № 2. – С. 1–9.

9. Данилейко Ю.К. Тепловой взрыв – механизм лазерного разрушения оптических материалов с поглощающими включениями // *Советский журнал квантовой электроники*. – 1989. – Т. 8, № 1. – С. 503–506.

10. Вуд Р.М. Лазерные пороги повреждения и уровни лазерной безопасности. У единиц измерения имеют значение // *Оптические и лазерные технологии*. – 1998. – Т. 29, № 8. – С. 517–522.

11. Полость Перо на основе диафрагменной кварцевой трубки с полый сердцевиной / М.С. Феррейра, Л. Коэльо, К. Шустер, Дж. Кобельке, Дж.Л. Сантос, О. Фразан // *Оптика Письма*. – 2011. – Т. 36, № 20. – С. 4029–4031.

12. Ляо С.Р., Ху Т.Ю., Ван Д.Н. Полость оптического волокна интерферометра Фабри–Перо, изготовленная с помощью фемтосекундной лазерной микрообработки и сварочного плавления для определения

показателя преломления // *Opt. Express.* – 2012. – Т. 20, № 20. – С. 22813–22818.

13. Внутренний оптоволоконный датчик температуры Фабри–Перо, изготовленный фемтосекундным лазером, изготовленный с помощью фемтосекундного лазера / W.Y. Wang, F.F. Pang, X.B. Zhang, T.Y. Wang // *Атмосферная химия и физика.* – 2010. – Т. A247. – С. 529–551.

14. Конин Ю.А., Гаранин А.И, Щербакова В.А. Оптическое разрушение волокна в оптоволоконных линиях связи // *Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы конф.* – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – С. 239–245.

15. Конин Ю.А., Гаранин А.И., Нурмухаметов Д.И. Исследование температурной чувствительности волоконных рассеивателей // *VIII Всерос. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр.* – М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2019. – С. 135–136.

16. Исследование термочувствительности волоконно-оптического датчика, созданного в результате эффекта плавления / Ю.А. Конин, А.И. Гаранин, Д.И. Нурмухаметов, С.Ф. Тюрин, В.А. Щербакова // *Материалы конф. молодых ученых-исследователей в обл. электротехники и электроники (ElConRus).* – 2019. – С. 902–905.

17. Исследование эффекта плавления сердцевин оптического волокна для создания сенсорной структуры / Ю.А., Конин, А.И. Гаранин, Д.И. Нурмухаметов, С.Ф. Тюрин, В.А. Щербакова // *Материалы конф. молодых ученых-исследователей в области электротехники и электроники (ElConRus).* – 2019. – С. 906–907.

18. ДеНеф П., Лашинский Х. Модель Ван-дер-Поля для неустойчивых волн в системе пучок-плазма // *Physical Review Letters.* – 1973. – Т. 31, № 17. – С. 1039–1041.

19. Накамура Ю. Подавление и возбуждение колебаний электронов в системе пучок-плазма // *Журнал Физического общества Японии.* – 1971. – Вып. 31, № 1. – С. 273–279.

20. Дэвис Д.Д., Меттлер С.С., Ди Д.Дж. Джованни. Сравнительная оценка модели эффекта плавления // *Труды Общества инженеров фотооптического приборостроения.* – 1966. – Вып. 2966. – С. 592–606.

References

1. Bufetov I.A., Dianov E.M. Opticheskii razriad v volokonnykh svetovodakh [Optical discharge in optical fibers]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2005, vol. 175, iss. 1, pp. 100-103.

2. Kashiap R. Samodvizhushcheesia samofokusiruiushcheesia povrezhdenie v opticheskikh voloknakh [Self-propelled self-focusing damage in optical fibers]. *Elektronika*, 1988, vol. 24, iss. 1, pp. 47-49.

3. Domingues M.F., Teixeira E.F., Alberto N., Frias A.R., Ferreira R.A., Varum H. Zhidkostnyi opticheskii datchik gidrostaticheskogo davleniia na osnove mikropolosti, sozdavaemoi katastroficheskim efektom plavleniia [Liquid Hydrostatic Pressure Optical Sensor Based on Micro-Cavity Produced by the Catastrophic Fuse Effect]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, vol. 15, iss. 10, pp. 5654-5658.

4. Khend D.P., Rassel P.S. Odinochnye teplovye udarnye volny i opticheskie povrezhdeniia v opticheskikh voloknakh: effekt plavleniia [Solitary thermal shock waves and optical damage in optical fibers: the fiber fuse]. *Optika Pis'ma*, 1988, vol. 13, no. 9, pp. 767-769.

5. Domingues M.F., Teixeira E.F., Alberto N., Frias A.R., Ferreira R.A., Varum H. Vysokochuvstvitel'nyi vysokotemperaturnyi optovolokonnyi datchik Fabri-Pero, sozdannyi na effekte plavleniia [Enhanced sensitivity high temperature optical fiber FPI sensor created with the catastrophic fuse effect]. *Trudy SPIE*, 2015, vol. 9634 96345M-4.

6. Domingues M.F., Teixeira E.F., Alberto N., Frias A.R., Ferreira R.A., Varum H. Datchik gidrostaticheskogo davleniia na osnove mikropolostei, sozdannyi v rezul'tate effekta plavleniia [Hydrostatic pressure sensor based on micro-cavities developed by the catastrophic fuse effect]. *Trudy SPIE*, 2015, vol. 9634 96345M-4.

7. Mikropolost' s konchikom volokna dlia izmereniia temperatury i poperechnoi nagruzki [Fiber-tip micro-cavity for temperature and transverse load sensing]. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, iss. 13, pp. 12418-12426.

8. Pinet E. Volokonno-opticheskie datchiki Fabri-Pero dlia izmereniia fizicheskikh parametrov v slozhnykh usloviiah [Fabry-Perot Fiber-Optic Sensors for Physical Parameters Measurement in Challenging Conditions]. *J. Sensors*, 2009, vol. 2, pp. 1-9.

9. Danileiko Iu.K. Teplovoi vzryv - mekhanizm lazernogo razrusheniia opticheskikh materialov s pogloshchaiushchimi vklucheniiami [Thermal explosion - the mechanism of laser destruction of optical materials with absorbing inclusions]. *Sov. J. Quant. Elect.*, 1989, vol. 8, iss. 1, pp. 503-506.

10. Vud R.M. Lazernye porogi povrezhdeniia i urovni lazernoi bezopasnosti. U edinitz izmereniia imeiut znachenie [Laser induced damage thresholds and laser safety levels. Do the units of measurement matter]. *Opticheskie i lazernye tekhnologii*, 1998, vol. 29, iss. 8, pp. 517-522.

11. Ferreira M.S., Koel'o L., Shuster K., Kobel'ke Dzh., Santos Dzh.L., Frazan O. Polost' Pero na osnove diafragmennoi kvartsevoi trubki s poloi serdtsevinoi [Perot cavity based on a diaphragm-free hollow-core silica tube]. *Optika Pis'ma*, 2011, vol. 36, iss. 20, pp. 4029-4031.

12. Liao S.R., Khu T.Iu., Van D.N. Polost' opticheskogo volokna interferometra Fabry–Pero, izgotovlennaia s pomoshch'iu femtosekundnoi lazernoi mikroobrabotki i svarochного plavleniia dlia opredeleniia pokazatelei [Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser micromachining and fusion splicing for refractive index sensing]. *Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 20, pp. 22813-22818.

13. Wang W.Y., Pang F.F., Zhang X.B., Wang T.Y. Vnutrennii optovolokonnyi datchik temperatury Fabri-Pero, izgotovlenniy femtosekundnym lazerom, izgotovlenniy s pomoshch'iu femtosekundnogo lazera [Intrinsic fiber Fabry-Perot temperature sensor fabricated by a femtosecond laser]. *Atmosferaia khimiia i fizika*, 2010, vol. A247, pp. 529-551.

14. Konin Iu.A., Garanin A.I., Shcherbakova V.A. Opticheskoe razrushenie volokna v optovolokonnykh liniakh sviazi [Optical destruction of fibers in fiber-optic communication lines]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy konferentsii*. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2018, pp. 239-245.

15. Konin Iu.A., Garanin A.I., Nurmukhametov D.I. Issledovanie temperaturnoi chuvstvitel'nosti volokonnykh rasseivatelei [Investigation of the temperature sensitivity of fiber diffusers]. *VIII Vserossiiskaia konferentsiia po fotonike i informatsionnoi optike. Sbornik nauchnykh trudov*. Moscow: Natsional'nyi issledovatel'skii iadernyi universitet «MIFI», 2019, pp. 135-136.

16. Konin Iu.A., Garanin A.I., Nurmukhametov D.I., Tiurin S.F., Shcherbakova V.A. Issledovanie termochuvstvitel'nosti volokonno-opticheskogo datchika, sozdannogo v rezul'tate efekta plavleniia [Research the Thermal Sensitivity of a Fiber Optic Sensor Created with the Catastrophic Fuse]. *Materialy konferentsii molodykh uchenykh-issledovatelei v oblasti elektrotekhniki i elektroniki (ElConRus)*, 2019, pp. 902-905.

17. Konin Iu.A., Garanin A.I., Nurmukhametov D.I., Tiurin S.F., Shcherbakova V.A. Issledovanie effekta plavleniia serdtsevinu opticheskogo volokna dlia sozdaniia sensornoi struktury [Fuse Effect Investigation in Optical Fiber for Creation Optical Sensor Structure]. *Materialy konferentsii molodykh uchenykh-issledovatelei v oblasti elektrotekhniki i elektroniki (ElConRus)*, 2019, pp. 906-907.

18. DeNef P., Lashinskii Kh. Model' Van-der-Pol'ia dlia neustoichivykh voln v sisteme puchok-plazma [Van der Pol model for unstable waves on a beam-plasma system]. *Physical Review Letters*, 1973, vol. 31, no. 17, pp. 1039-1041.

19. Nakamura Iu. Podavlenie i vozbuzhdenie kolebaniy elektronov v sisteme puchok-plazma [Suppression and excitation of electron oscillation in a beam-plasma system]. *Zhurnal Fizicheskogo obshchestva Iaponii*, 1971, iss. 31, no. 1, pp. 273-279.

20. Devis D.D., Mettler S.S., Di D.Dzh. Dzhovanni. Sravnitel'naia otsenka modeli effekta plavleniia [A comparative evaluation of fiber fuse models]. *Trudy Obshchestva inzhenerov fotoopticheskogo priborostroeniia*, 1966, iss. 2966, pp. 592-606.

Сведения об авторах

Конин Юрий Александрович (Пермь, Россия) – аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: yurikonin@yandex.ru).

Щербакова Виктория Александровна (Пермь, Россия) – магистрант Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: scherbackova.vict@mail.ru).

Стариков Сергей Сергеевич (Пермь, Россия) – магистрант Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: seregastar46@bk.ru).

Гаранин Андрей Иванович (Пермь, Россия) – аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kigaranin@yandex.ru).

Токарева Янина Дмитриевна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Yanoti@yandex.ru).

About the authors

Konin Yuri Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: yuri-konin@yandex.ru).

Scherbakova Viktoria Alexandrovna (Perm, Russian Federation) is a Master Student of Perm State National Research University (614990, Perm, 15, Bukirev str., e-mail: scherbackova.vict@mail.ru).

Starikov Sergey Sergeevich (Perm, Russian Federation) is a Master Student of Perm State National Research University (614990, Perm, 15, Bukirev str., e-mail: seregastar46@bk.ru).

Garanin Andrew Ivanovich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kigaranin@yandex.ru).

Tokareva Ianina Dmitrievna (Perm, Russian Federation) is a Student of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: Yanoti@yandex.ru).

Получено 30.10.2019