

УДК 538.8(075.8)

**Ю.А. Конин^{2,3}, В.А. Старикова^{1,2}, А.Ю. Петухова²,
Н.А. Грачёв², А.А. Петров³, А.В. Перминов¹**

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАССЕЙАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

Рассматривается сформированная под действием эффекта плавления оптического волокна квазипериодическая структура микронеоднородностей, которая может быть использована как чувствительный элемент для оптического датчика на основе интерферометра Фабри–Перо или оптического рассеивателя излучения с улучшенными параметрами гибкости и прочности. Математическое моделирование процесса прохождения и отражения излучения на микрополостях внутриволоконной структуры позволит спрогнозировать характеристики разрабатываемых сенсоров. Моделирование производилось в пакете моделирования COMSOL Multyphysics. Рассмотрен участок одномодового волокна SMF-28e с размещенными в сердцевине микронеоднородностями, размеры которых были измерены в ходе эмпирического исследования. Для решения задачи составлена система уравнений, описывающая распространение плоской электромагнитной волны в веществе. Полученные результаты показали, что расчетный спектр отражения качественно совпадает с измеренным значением, но не описывает его с высокой точностью. Это может быть связано с тем, что модель не учитывает межмодовую интерференцию в волокне и не имеет введенной зоны расплава вокруг микрополостей, так как такая зона расплава имеет сложное распределение показателя преломления и состав.

Ключевые слова: модель, оптический пробой, интерферометр Фабри–Перо, рассеиватель, эффект плавления, структура.

**Yu.A. Konin^{2,3}, V.A. Starikova^{1,2}, A.Yu. Petukhova²,
N.A. Grachev², A.A. Petrov³, A.V. Perminov¹**

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

² Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company,
Perm, Russian Federation

³ ITMO University, St. Petersburg, Russia

MATHEMATICAL MODEL OF RADIATION SCATTERING ON A QUASI – PERIODIC STRUCTURE IN AN OPTICAL FIBER

The paper considers a quasi – periodic microheterogeneity structure formed under the effect of optical fiber melting, which can be used as a sensitive element for an optical sensor based on a Fabry – Perot interferometer or an optical radiation scatterer with improved flexibility and strength parameters. Mathematical modeling of the process of transmission and reflection of radiation on the microcavities of the intrafiber structure will make it possible to predict the characteristics of the developed sensors. The simulation was carried out in the COMSOL Multiphysics simulation package. A section of a single – mode SMF-28e fiber with microinhomogeneities located in the core, the dimensions of which were measured in the course of an empirical study, is considered. To solve the problem, a system of equations was compiled that describes the propagation of a plane electromagnetic wave in matter. The results obtained showed that the calculated reflection spectrum qualitatively coincides with the measured value, but does not describe it with high accuracy. This may be due to the fact that the model does not take into account intermode interference in the fiber, and does not have an introduced melt zone around microcavities, since such a melt zone has a complex refractive index distribution and composition.

Keywords: model, optical breakdown, Fabry – Perot interferometer, scatterer, fuse effect, structure.

Введение

Эффект оптического пробоя оптического волокна, как правило, считают негативным процессом, который может уничтожать оптические линии с помощью распространяющейся плазменной искры [1]. При распространении плазменной искры происходит плавление сердцевины волокна и образование замкнутых цепочечных структур из микропузырьков, заполненных кислородом под давлением от 4 до 10 атм. Кислород в пузырьках образуется за счет разложения диоксида кремния на монооксид кремния и кислород в плазменной искре, дальнейшее разделение и формирование микропузыря происходят за счет микроперемешивания плазмы, расплавленного монооксида кремния и кислорода, а также давления внутри этой смеси [2].

Данный эффект известен практически с начала изобретения лазера и оптического волокна, и многие специалисты научились, с ним бороться [3]. С другой стороны, эффект оптического пробоя можно применять как более дешевую альтернативу традиционным методам для создания внутриволоконных сенсорных структур [4]. Например,

одна из научных групп Авейрусского университета под руководством Фатимы Домингес занимается разработкой различных датчиков, созданных при помощи оптического пробоя [5].

Кроме того, внутриволоконные структуры можно использовать в качестве рассеивателя излучения или комбинировать свойства рассеивателя и датчика. Авторы настоящей статьи в более ранних работах исследовали сенсорные свойства внутриволоконных структур при продольных деформациях волокна и температурных изменениях, а также прочностные свойства волокон [6] и параметры внутриволоконных структур, сформированных под воздействием магнитного поля [7].

Анализ результатов исследований оптических спектров отражения прототипа рассеивателя, изготовленного на базе одномодового волокна типа Corning SMF-28e, показал, что микрополости (центры рассеяния), сформированные в рассеивающей части волокна, представляют собой чувствительный интерферометр Фабри–Перо. Разработка модели сенсорной структуры, сформированной в процессе оптического пробоя, поможет понять работу интерферометра Фабри–Перо и проанализировать его характеристики. Такая модель будет полезна при прогнозировании характеристик разрабатываемых сенсоров.

Моделирование структуры производилось в пакете конечно-элементного моделирования COMSOL Multyphysics. Модель рассчитывалась в диапазоне длин волн излучения $\lambda_0 = 1540 \dots 1560$ нм, который соответствует диапазону экспериментальных данных. В обозначенном диапазоне длин волн рассчитывался коэффициент отражения для нескольких значений длин волн с целью получения спектральной зависимости коэффициента отражения структуры микронеоднородностей.

1. Геометрия

В рамках двумерной математической модели рассматривается плоский волновод бесконечный вдоль координаты z (рис. 1). Геометрические размеры волновода вдоль оси y соответствуют спецификации исследуемого волокна SMF-28e: сердцевина волокна имеет диаметр $d_{\text{core}} = 8,2$ мкм, оболочка волокна $d_{\text{cladding}} = 125$ мкм. Длина участка волновода составила $L = 200$ мкм, что достаточно для анализа распространения излучения по волокну до и после микрополостей. Квазипериодическая структура из 4 микрополостей имеет протяженность вдоль оси x примерно 50 мкм. Начало координат связано с центром волновода и левым концом первой микрополости (рис. 2).

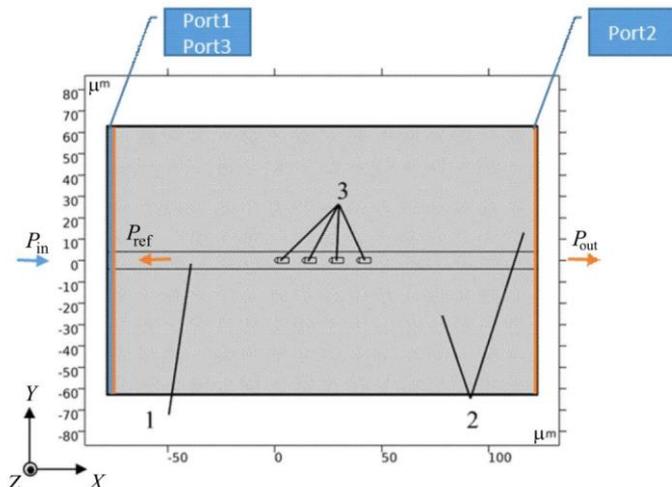


Рис. 1. Геометрия модели волокна с квазипериодической структурой микронеоднородностей, где 1 – оболочка волокна, 2 – сердцевина волокна, 3 – микрополости заполненные кислородом, P_{in} – входящее излучение с мощностью 1 Вт, P_{ref} – отраженное от микроструктуры излучение, P_{out} – выходящее излучение

Геометрия микрополостей представлена на рис. 2. Размеры и форма микрополостей в математической модели соответствовали наблюдаемым в эксперименте [6]. Каждая из микрополостей имеет пулеобразную форму и задается в модели при помощи двух частей: наконечника, имеющего форму полусферы диаметром $d_m = 2,576$ мкм, и цилиндрического тела микрополости. Длина тела микрополости $l_m = 6,589$ мкм. Период квазипериодической структуры $l_d = 12,756$ мкм.

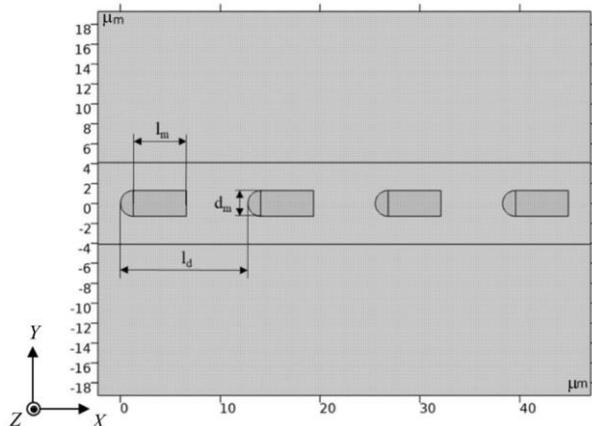


Рис. 2. Геометрия микрополостей

2. Материалы

Физические свойства материалов, использованные в математической модели оптоволокна, взяты из справочника «Библиотека свойств материалов» COMSOL Multiphysics®. Показатели преломления сердцевины и оболочки исследуемого коммерчески доступного волокна были получены из справочника свойств материалов [8–10] и сравнивались со спецификациями волокна. Наличие легирующей примеси в сердцевине волокна увеличивает показатель преломления материала оболочки на 0,36 %, по сравнению с кварцевой оболочкой (из спецификации волокна SMF – 28e). Значения показателей преломления для математической модели приведены в таблице.

Показатели преломления для материалов волокна SMF – 28e

Наименование	Материал	Показатель преломления
Сердцевина	Расплавленный кварц SiO ₂	1,47
Оболочка	Расплавленный кварц SiO ₂	1,46
Микродефект	кислород O ₂	1,00

3. Математическая модель

Для моделирования задачи рассеяния в одномодовом волокне использовались постановка задачи в терминах волновой оптики, блок Electromagnetic Waves, Frequency Domain в COMSOL Multiphysics. Уравнение для вектора напряженности электрического поля \vec{E} , описывающее распространение плоской электромагнитной волны в веществе в декартовой системе координат, имеет вид:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \vec{E}) - \left(\frac{\omega n}{c_0} \right)^2 \vec{E} = 0, \quad (1)$$

где ∇ – оператор набла, μ_r – магнитная проницаемость среды, $\mu_r = 1$, c_0 – скорость света в вакууме, ω – частота электромагнитных колебаний, μ – магнитная постоянная.

Представим решение уравнения (1) в виде плоской периодической вдоль оси z волны:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \tilde{\vec{E}}(x, y) e^{ik_z z} e^{-i\omega t}, \quad (2)$$

где k_z – волновое число.

Внешним горизонтальным границам модели были присвоены свойства абсолютного поглощения излучения, так называемые Perfect Matching Layer – PML-слои. Данные PML-слои используются для имитации полного прохождения излучения за границу расчетной области, чтобы избежать отражения на виртуальной границе и неправильного толкования интерференционных процессов в модели. Для поглощающих слоев (PML) была выбрана толщина $t_{\text{PML}} = 1,5$ мкм, равная длине волны излучения, для исключения переотражений излучения внутри расчетной области и полного поглощения излучения, выходящего из оптического волокна. Интенсивность излучения, рассеявшегося в окружающем пространстве, можно оценить по поглощённой слоями PML мощности.

На вертикальных границах расчетной области (см. рис. 1) (за вычетом толщины поглощающих PML-слоёв) ставились условия типа Port. Левая граница объявлялась входным портом (Port1) с мощностью входного излучения 1 Вт, правая – выходным (Port2), кроме того, левой границе присваивались дополнительные свойства выходного порта (Port3) для анализа отраженного от дефектов излучения.

Тип портов – численный, т.е. распределение электрического поля на границе модели задаётся на основе численного решения системы уравнений для каждого порта для случая фундаментальной моды излучения, распространяющейся по исследуемому волокну:

$$\vec{n} \times \nabla \times \vec{E} = 0, \quad (3)$$

где \vec{n} – вектор нормали, \vec{E} – вектор электрического поля фундаментальной моды.

Расчет напряженности электрического поля на входном порте производился через следующую систему уравнений:

$$P = SA_{\text{eff}} = \frac{E^2}{\eta} A_{\text{eff}};$$

$$\eta = -\frac{E_y}{H_x} = \frac{E_x}{H_y};$$

$$E = \sqrt{\eta \frac{P}{A_{eff}}}, \quad (4)$$

где S – модуль вектора Умова – Пойнтинга, P – мощность входного излучения, $P = 1$ Вт, заданная распределением Гаусса на площади модового пятна, A_{eff} – площадь модового пятна, $A_{eff} = \frac{\pi d^2}{4}$, диаметр модового пятна $d = 10,2$ мкм, η – волновое сопротивление среды, $\eta = 6400$ Ом, E – напряженность электрического поля фундаментальной моды.

Излучение, задаваемое с входного порта (Port1), распространялось по волокну слева – направо и имело диапазон длин волн $\lambda_0 = 1540 \dots 1560$ нм, с шагом $\Delta\lambda = 0,5$ нм. Для каждого значения длины волны λ_0 решалась граничная задача по определению электрического поля фундаментальной моды для исследуемого волновода (Boundary Mode Analysis) для каждого порта. Поиск решения происходил для каждого значения длины волны λ_0 , рассчитывалась напряженность электрического поля в каждом узле модели. Суммарная напряженность электрического поля отраженной волны суммировалась на выходном порте (Port3) для всего диапазона длин волн λ_0 и выводилась в виде графика спектра отражения структуры, который будет приведен ниже.

4. Сетка

Расчетная сетка для численных расчетов в рамках представленной математической модели строилась из соображений того, что на длину волны в вакууме $\lambda_{0_min} = 1,54$ мкм в сердцевине волокна должно приходиться минимум 5 элементов. Таким образом, минимальный линейный размер одного элемента составил:

$$e_{min} = \frac{\lambda_{0_min}}{5n_{core}(\lambda_{0_min})} \approx 0,2 \text{ мкм}. \quad (5)$$

Внутри микрополостей и в пограничном слое вокруг них минимальный линейный размер одного элемента задавался как $e_{min} = 0,1$ мкм для лучшего разрешения. Выделенная область сетки модели вокруг

микрополости приведена на рис. 3. Общее количество элементов сетки составило примерно $2 \cdot 10^6$.

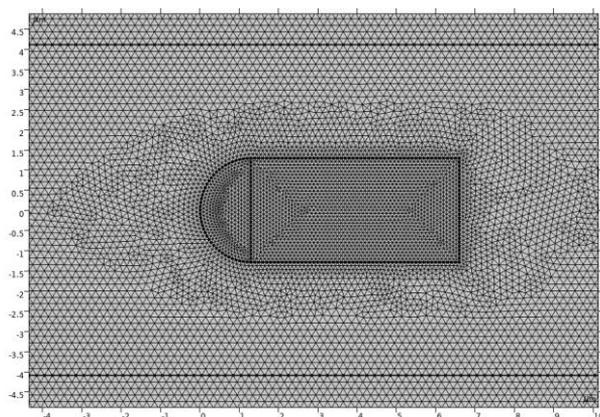


Рис. 3. Сетка вблизи микрополости

5. Результаты

Распределение модуля напряженности электрического поля для значения длины волны излучения $\lambda_0 = 1550$ нм представлено на рис. 4, где отчётливо видно рассеивание излучения на микрополостях, включённых в сердцевину волокна.

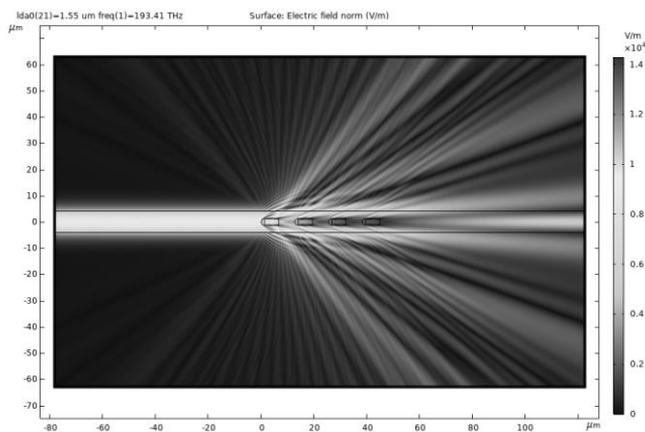


Рис. 4. Распределение модуля напряженности электрического поля для длины волны $\lambda_0 = 1550$ нм

На рис. 5 представлена увеличенная область с распределением модуля напряжённости электрического поля вблизи первой микрополости.

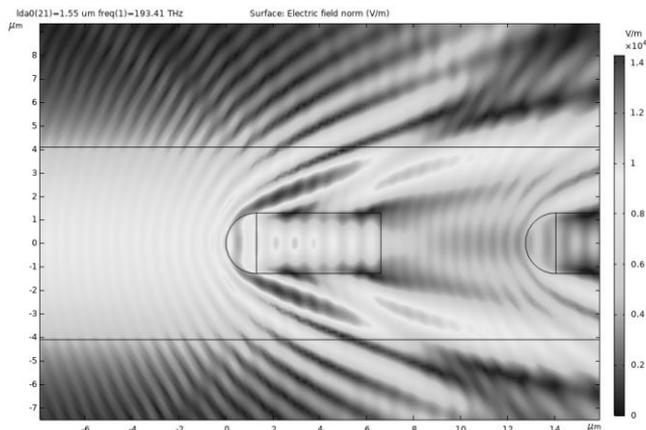


Рис. 5. Распределение модуля напряженности электрического поля вблизи первой микрополости для длины волны $\lambda_0 = 1550$ нм

На рис. 5 можно заметить интерференцию падающей на микрополость волны и отраженной от неё, т.е. каждая микрополость работает как интерферометр Фабри–Перо, что соответствует теоретическим работам и экспериментальным данным. При этом промежутки между микрополостями работают так же, как вторичные интерферометры.

Как видно из рис. 5 и 6, напряженность поля велика у первой микрополости и спадает на следующих, соответственно, наибольший вклад в отраженную мощность вносят первые 4–5 дефектов, что было подтверждено экспериментально на рефлектометре Luna OBR 4600.

В результате моделирования был определен спектр отражения квазипериодической структуры из микрополостей, представленный на рис. 6. Расчетный спектр отражения (отмечен ромбами) сопоставлялся с экспериментальным спектром отражения (линия с треугольниками), полученным с сенсорной структуры, сформированной на волокне SMF – 28.

Как видно из рис. 6, расчетный спектр качественно хорошо совпадает с экспериментальным, что свидетельствует об адекватности математической модели. Количественное несовпадение спектров может быть связано с тем, что геометрия модели является упрощенной, т.е. не отвечает реальной форме волокна, также не учитывается межмодовая интерференция света в волокне. В модели не учтена тонкая неоднородная зона, образующаяся вокруг микрополостей в процессе их формирования. Такая зона имеет сложное распределение показателя преломления.

Спектр отражения

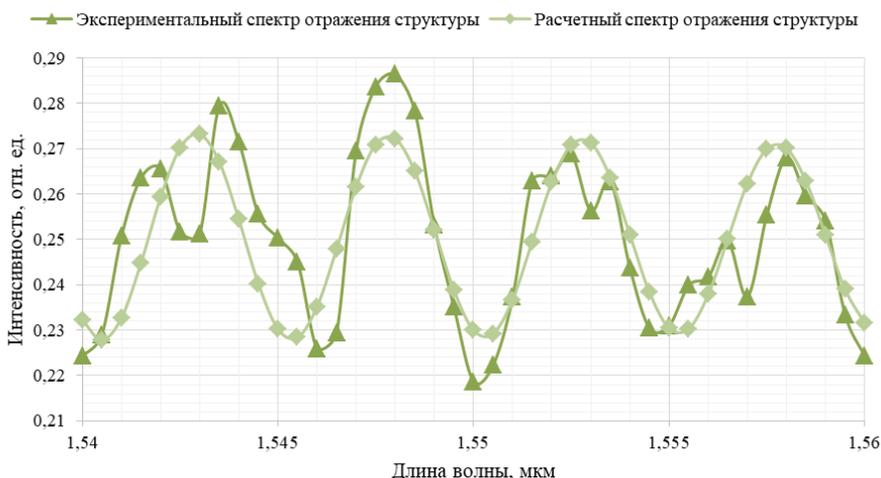


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных значений спектра отражения в зависимости от длины волны, где линия с Δ – измеренный спектр отражения, линия с \diamond – рассчитанный спектр отражения

Выводы

В работе предложена математическая модель рассеяния излучения на квазипериодической структуре микрополостей, сформированных в сердцевине одномодового волокна SMF – 28 в результате оптического пробоя. Моделирование проводилось в пакете конечно-элементного моделирования COMSOL Multyphysics. В результате расчётов получены распределения электрического поля в объеме оптоволокна. Показано, что квазипериодическая структура микрополостей работает как последовательная цепочка интерферометров Фабри–Перо. Был рассчитан спектр отражения от квазипериодической структуры, который сравнивался с экспериментальными данными. Сравнение расчетного и экспериментального спектров показало их хорошее качественное совпадение. В дальнейшем планируется усовершенствование математической модели в части геометрии и учета различных оптических эффектов, например, многомодовой интерференции в волокне. Кроме того, планируется исследовать интерференцию в моделях с разной квазипериодической структурой, образованной различными по форме дефектами.

Список литературы

1. Bufetov I.A., Dianov E.M. Optical discharge in fibre light guides // *Adv. of Physical Sciences*. – 2005. – Т. 175. – № 1. – С. 100–103.
2. Shuto Yoshito. *Fiber Fuse Phenomenon*. – 3rd edition. – 2021.
3. Hitz B. How to save fiber from 'the fuse' // *Photonics Spectra*. – 2004. – 38.
4. Domingues Fatima, Radwan Ayman. *Optical Fiber Sensors for IoT and Smart Devices*. – 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-47349-9.
5. Hydrostatic pressure sensor based on micro – cavities developed by the catastrophic fuse effect / M.F. Domingues, T. Paixão, E. Mesquita, N. Alberto, P. Antunes, H. Varum, P.S. André // Instituto de Telecomunicações – Aveiro. Campus de Santiago, 3810 – 193 Aveiro, Portugal. – Proc. of SPIE. – Vol. 9634 96345M-4.
6. Structural characteristics of internal microcavities produced in optical fiber via the fuse effect / Y.A. Konin, V.A. Scherbakova, M.I. Bulatov, N.V. Malkov, A.S. Lucenko, S.S. Starikov, N. Grachev, A.V. Perminov, A.A. Petrov // *Journal of Optical Technology*. – 2021. – Vol. 88, No. 11. – P. 672–677.
7. Study of micro – cavities formed by optical breakdown under the influence of a magnetic field / Yu.A. Konin, V.A. Scherbakova, A.V. Perminov, A.Yu. Petuhova // *Optics Communications*. – 2022. – Vol. 517. – 128242. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128242>.
8. Payne D.N., Gambling W.A. Zero material dispersion in optical fibres // *Electron. Lett.* – 1975. – Vol. 11, No. 4. – P. 176–178.
8. L.G. Cohen, C. Lin, W.G. French Total dispersion in step – index monomode fibres // *Electron. Lett.* – 1979. – Vol. 15, No. 13. – P. 394–395.
9. Cohen L.G., Lin C., French W.G. Tailoring zero chromatic dispersion into the 1.5–1.6 μm low-loss spectral region of single-mode fibres // *Electron. Lett.* – 1979. – Vol. 15, No. 12. – P. 334–335.

References

1. Bufetov I.A., Dianov E.M. Optical discharge in fibre light guides. *Adv. of Physical Sciences*, 2005, vol. 175, no. 1, pp. 100-103.
2. Shuto Yoshito. *Fiber Fuse Phenomenon*. 3rd edition, 2021.
3. Hitz B. How to save fiber from 'the fuse'. *Photonics Spectra*, 2004, 38.

4. Domingues Fatima, Radwan Ayman. Optical Fiber Sensors for IoT and Smart Devices, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-47349-9

5. Domingues M.F., Paixão T., Mesquita E., Alberto N., Antunes P., Varum H., André P.S. Hydrostatic pressure sensor based on micro - cavities developed by the catastrophic fuse effect. Instituto de Telecomunicações - Aveiro. Campus de Santiago, 3810 - 193 Aveiro, Portugal. Proc. of SPIE Vol. 9634 96345M-4.

6. Konin Y.A., Scherbakova V.A., Bulatov M.I., Malkov N.V., Lucenko A.S., Starikov S.S., Grachev N., Perminov A.V., Petrov A.A. Structural characteristics of internal microcavities produced in optical fiber via the fuse effect. *Journal of Optical Technology*, 2021, vol. 88, no. 11, pp. 672-677.

7. Konin Yu.A., Scherbakova V.A., Perminov A.V., Petuhova A.Yu. Study of micro - cavities formed by optical breakdown under the influence of a magnetic field. *Optics Communications*, 2022, vol. 517, 128242, available at: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128242>

8. Payne D.N., Gambling W.A. Zero material dispersion in optical fibres. *Electron. Lett.*, 1975, vol. 11, no. 4, pp. 176-178.

8. Cohen L.G., Lin C., French W.G. Total dispersion in step - index monomode fibres. *Electron. Lett.*, 1979, vol. 15, no. 13, pp. 394-395.

9. Cohen L.G., Lin C., French W.G. Tailoring zero chromatic dispersion into the 1.5-1.6 μm low-loss spectral region of single-mode fibres. *Electron. Lett.*, 1979, vol. 15, no. 12, pp. 334-335.

Сведения об авторах

КОНИН Ю.А.

e-mail: yuri-konin@ya.ru

Аспирант кафедры лазерной фотоники и оптоэлектроники Санкт-Петербургского университета ИТМО, инженер-исследователь лаборатории волоконных лазеров ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь

ГРАЧЁВ Н.А.

e-mail: GrachevNA@pnppk.ru

Инженер-исследователь лаборатории волоконных лазеров ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь

About the authors

KONIN YU.A.

e-mail: yuri-konin@ya.ru

Postgraduate student of the Department of Laser Photonics and Optoelectronics, St. Petersburg University ITMO, Engineer Researcher of the Fiber Laser Laboratory of PJSC PNPPK, Perm

GRACHEV N.A.

e-mail: GrachevNA@pnppk.ru

Engineer Researcher of the Fiber Laser Laboratory of PJSC PNPPK, Perm

СТАРИКОВА В.А.

e-mail: scherbakova.vict@mail.ru

Аспирантка Пермского национального исследовательского политехнического университета, инженер-исследователь лаборатории волоконных лазеров ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь

STARIKOVA V.A.

e-mail: scherbakova.vict@mail.ru

Postgraduate student of Perm National Research Polytechnic University, Engineer Researcher of the Fiber Laser Laboratory of the PJSC PNPPK, Perm

ПЕТУХОВА А.Ю.

e-mail: umalia.ookami.98@mail.ru

Инженер-исследователь лаборатории волоконных лазеров ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь

PETUKHOVA A.YU.

e-mail: umalia.ookami.98@mail.ru

Engineer Researcher of the Fiber Laser Laboratory of the PJSC PNPPK, Perm

ПЕРМИНОВ А.В.

e-mail: perminov1973@mail.ru

Доктор физико-математических наук, ведущий кафедрой «Общая физика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь

PERMINOV A.V.

e-mail: perminov1973@mail.ru

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University, Perm

ПЕТРОВ А.А.

e-mail: aapetrov@itmo.ru

Старший преподаватель, научный сотрудник Института лазерных технологий Университета ИТМО, Санкт-Петербург

PETROV A.A.

e-mail: aapetrov@itmo.ru

Senior Lecturer, Research Fellow, Institute of Laser Technologies, ITMO University, St. Petersburg

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00169, <https://rscf.ru/project/23-21-00169/>, руководитель А.В. Перминов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 21.02.2023

Одобрена: 24.02.2023

Принята к публикации: 01.03.2023

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 21/02/2023

Approved: 24/02/2023

Accepted for publication: 01/03/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Математическая модель рассеяния излучения на квазипериодической структуре в оптическом волокне / Ю.А. Конин, В.А. Старикова, А.Ю. Петухова, Н.А. Грачёв, А.А. Петров, А.В. Перминов // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 42–55.

Please cite this article in English as: Konin Yu.A., Starikova V.A., Petukhova A.Yu., Grachev N.A., Petrov A.A., Perminov A.V. Mathematical model of radiation scattering on a quasi – periodic structure in an optical fiber // Applied photonics, 2023, no. 2, pp. 42-55.