

УДК 538.8(075.8)

**Ю.А. Конин<sup>1,2</sup>, А.А Петров<sup>1</sup>, А.С. Луценко<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

## **МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВСТРЕЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛОКНЕ**

Рассматривается взаимодействие двух высокоэнергетических оптических импульсов малой длительности, движущихся навстречу друг другу в оптическом волокне. Предполагаемый результат взаимодействия – структурное изменение сердцевины, продольные размеры которого соизмеримы с длиной импульса. Оптическое волокно с подобной структурой может быть использовано в качестве чувствительного элемента в сенсорном применении. Для решения задачи взаимодействия импульсов составлена система уравнений, описывающая распространение двух встречных плоских электромагнитных волн в диэлектрическом волноводе. Расчеты производились в среде численного моделирования COMSOL Multiphysics. Полученные результаты показали, что расчетное пространственное распределение имеет четыре явно выраженных центра. Приводится сравнение с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** модель, оптическое волокно, оптический пробой, встречные импульсы, структура.

**Yu.A. Konin<sup>1,2</sup>, A.A Petrov<sup>1</sup>, A.S. Lutsenko<sup>2</sup>**<sup>1</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russia<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

## **MODEL OF SPATIAL ENERGY DISTRIBUTION IN THE INTERACTION OF COUNTER OPTICAL PULSES IN A FIBER**

This paper considers the interaction of two high-energy optical pulses of short duration, moving towards each other in the optical fiber. The expected result of the interaction is a structural change in the core, the longitudinal dimensions of which are commensurate with the pulse length. Optical fiber with such a structure can be used as a sensitive element in sensory applications. To solve the problem of pulse interaction, a system of equations describing the propagation of two opposite plane electromagnetic waves in a dielectric waveguide was composed. The calculations were performed in the numerical simulation environment COMSOL Multiphysics. The results show that the calculated spatial distribution has four pronounced centers. A comparison with experimental data is given.

**Keywords:** model, optical fiber, optical breakdown, counter pulses, structure.

## Введение

Воздействие лазерного излучения высокой интенсивности на газовые и конденсированные среды может сопровождаться оптическим пробоем и, в случае твердых тел, нагревом локальной области вплоть до разрушения структуры [1, 2].

В рамках данной работы основной акцент сделан на оптический пробой конденсированных сред, а именно – оптического волокна, сердцевина которого легирована  $\text{GeO}_2$ .

Основной рассматриваемый механизм создания структурного изменения в данном случае – собственный оптический пробой, инициируемый в матрице и не связанный с наличием в материале дефектов. К механизмам собственного пробоя относят лавинную и многофотонную ионизацию исходно нейтральной среды, увеличение концентрации и энергии свободных электронов, уменьшение запрещенной зоны диэлектрика (вследствие повышения температуры) – кварцевое стекло из прозрачного для исходного спектрального диапазона становится поглощающим [3].

Эффект структурного изменения материала может наблюдаться как при непрерывном воздействии лазерного излучения, так и при импульсном. В случае, когда гауссов импульс, где интенсивность в центральной части больше, чем по краям, разделен на две составляющие, движущиеся навстречу друг к другу, в месте их пересечения коэффициент поглощения перестает описываться зависимостью Бугера – Ламберта – Бера и возникает нелинейное поглощение с изменением локальной области материала. Предполагается, что возникающий нагрев, при малой длительности воздействия излучения, может приводить к диффузии материала сердцевины в оболочку, за счет чего изменяется показатель преломления – появляется центр рассеяния.

Расчет пространственного распределения энергии производился в пакете конечно-элементного моделирования COMSOL Multyphysics. Модель рассчитывалась для длины волны 1080 нм. Длительность встречных импульсов составляла 28 фс.

В работе подтверждается, что созданная модель пространственного распределения энергии согласуется с экспериментальными данными и будет полезной при прогнозировании характеристик создаваемых структур.

Подобные внутриволоконные структуры можно использовать в качестве рассеивателя излучения для рефлектометрических применений как реперные точки или комбинировать данные структуры и получать оптические преобразователи внешнего воздействия, например интерферометр Фабри – Перо [4, 5].

## 1. Геометрия

В рамках двумерной математической модели рассматривается плоский волновод бесконечный вдоль координаты  $z$  (рис 1). Эта плоскость рассматривалась как осевое сечение оптического волокна. Геометрия волновода вдоль оси  $y$  соответствуют стандартному волокну 62,5/125 мкм, с апертурой 0,22. Для модели выбран участок волновода больше пространственного размера импульса с целью отслеживания распределения энергии встречных импульсов фс-длительности по волокну. Для экономии вычислительных мощностей в модели рассматривается только сердцевина волокна (см. рис. 1).

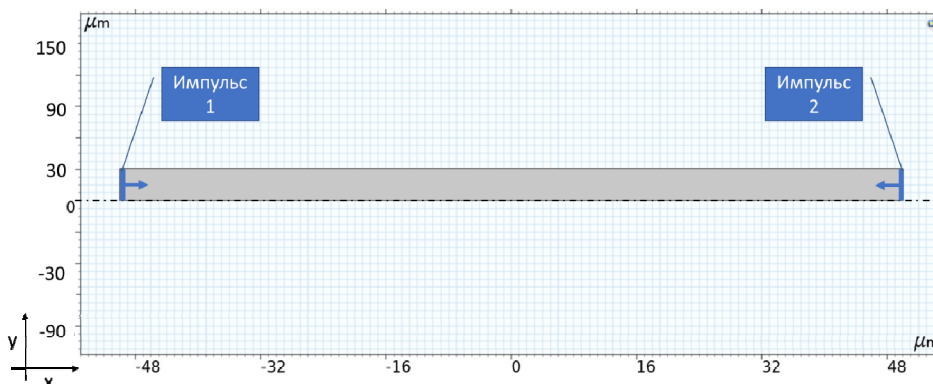


Рис. 1. Геометрия модели сердцевины волокна в осесимметричном виде, где 1 – левая и 2 – правая границы – входные порты импульсного лазерного излучения

Сетка модели была построена с помощью инструмента «Mapped». Размер минимального элемента сетки был построен из соображений того, что на длину волны в вакууме  $\lambda_0 = 1080$  нм в сердцевине волокна должно приходиться минимум 12 элементов. Таким образом, максимальный линейный размер одного элемента составил:

$$e_{\max} = \frac{\lambda_0}{12} \approx 90 \text{ нм.} \quad (1)$$

Минимальный размер сетки составил 60 нм. Выделенная область сетки модели приведена на рис.2. Общее количество элементов сетки составило примерно  $2,2 \cdot 10^6$ .

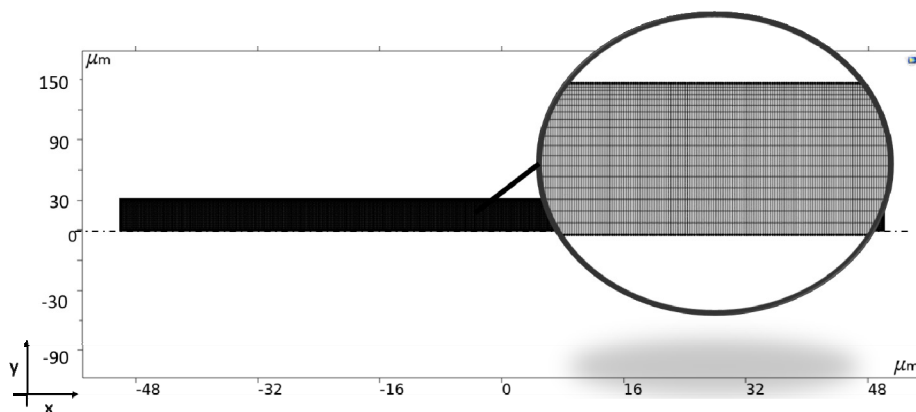


Рис. 2. Сетка модели

## 2. Материалы

В качестве материала сердцевины был выбран расплавленный диоксид германия GeO<sub>2</sub> (Germanium dioxide, Germania) (Fleming 1984: Fused germania;  $n$  0.36-4.3  $\mu\text{m}$ ). Его физические свойства взяты из справочника «Библиотека свойств материалов» COMSOL Multiphysics® [6]. Показатель преломления сердцевины исследуемого коммерчески доступного волокна составил 1,47.

## 3. Система уравнений и граничных условий

Для моделирования задачи столкновения двух лазерных импульсов в сердцевине волокна использовалась постановка задачи в терминах волновой оптики, блок Electromagnetic Waves, Transient (ewt) в COMSOL Multiphysics. Данный модуль в основном используется для моделирования распространения электромагнитных волн в различных средах и структурах, когда требуется решение во временной области.

Основным законом, описывающим распространение электромагнитной волны во временной области, является закон Максвелла – Ампера. В двумерном случае распространяющееся электромагнитное поле в плоскости  $x$  $y$  имеет ненулевое значение в направлении  $z$ . Поэтому уравнение, описывающее временную зависимость распро-

странения плоской электромагнитной волны в веществе в декартовой системе координат, имеет вид:

$$\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( n^2 \frac{\partial A_z}{\partial t} \right) + \nabla (\nabla A_z) = 0, \quad (2)$$

где  $\nabla$  – оператор набла;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $n$  – показатель преломления среды;  $A_z$  – векторный потенциал электромагнитного поля, который связан с напряженностью через соотношение  $E = -\frac{\partial A_z}{\partial t}$ .

При этом напряженность электрического поля задается следующим уравнением:

$$E(z) = E_0(x, y) e^{ik_z z} e^{-i\omega t}, \quad (3)$$

где  $k_z$  – волновое число;  $E_0$  – начальная интенсивность электрического поля.

Вертикальным границам модели были присвоены условия Scattering Boundary Condition, с левой и правой границы запускался лазерный импульс в сердцевину волокна (см. рис. 1). Импульсы двигались навстречу друг другу.

Верхней и нижней границе модели были присвоены условия Perfect Electric Conductor и Perfect Magnetic Conductor соответственно. Данные условия описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \vec{n} \times \vec{E} &= 0, \\ \vec{n} \times \vec{H} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\vec{n}$  – вектор нормали;  $\vec{E}$  – вектор электрического поля фундаментальной моды;  $\vec{H}$  – вектор напряженности магнитного поля. Данные условия описывают тангенциальные составляющие электрического поля и магнитного поля на границе модели.

Задача решалась во временной области, два импульса лазерного излучения с длиной волны  $\lambda_0 = 1080$  нм распространялись по сердцевине волокна навстречу друг другу в диапазоне времен  $t = 0-6$  нс с шагом 50 фс. Рассчитывалась напряженность электрического поля на каждом временном шаге. Анализировалось распределение напряженности электрического поля в момент перекрытия импульсов.

#### 4. Результаты

Поведение двух лазерных импульсов, распространяющихся навстречу друг другу, представлено на рис. 3. На рисунке отображено электрическое поле импульса.

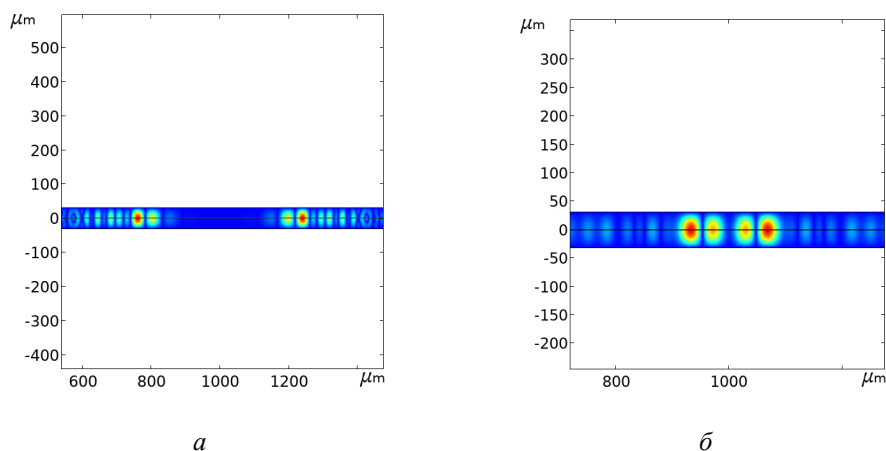


Рис. 3. Распространение встречных импульсов: *а* – в начальный момент времени; *б* – в момент перекрытия

В момент запуска импульс принимает форму, которая представлена на рис. 3, *а*, в момент перекрытия импульсов происходит резонанс импульсов, и напряженность электрического поля принимает практически стационарную форму, в которой явно выделяются 4 основных пика напряженности. Значение напряженности в этих точках гораздо выше, чем в неперекрытых частях импульсов. После прохождения импульсов друг через друга они принимают обычную форму.

На рис. 4 представлена увеличенная область сердцевинки волокна 62,5/125, в котором были получены дефекты при распространении встречных импульсов.

На рис. 4, *а* можно заметить 4 точечных дефекта, которые образовались в точке перекрытия, размер каждого дефекта близок к длине волны. На рис. 4, *б* отображены эти же дефекты, рассеивающие излучение подсветки от источника видимого излучения.

Как видно из рис. 3, *а* и *б*, в области перекрытия импульсов возникает стационарная интерференционная картина, в которой выделяются 4 основных пика. В результате резонанса напряженность поля этих пиков начинает значительно превышать напряженность

в основном импульсе. При сравнении с экспериментально полученным дефектом качественно выявлено, что дефекты образуются в соответствии с картиной интерференции в области перекрытия, т.е. структурные изменения сердцевины появляются в областях наибольшей напряженности электрического поля.

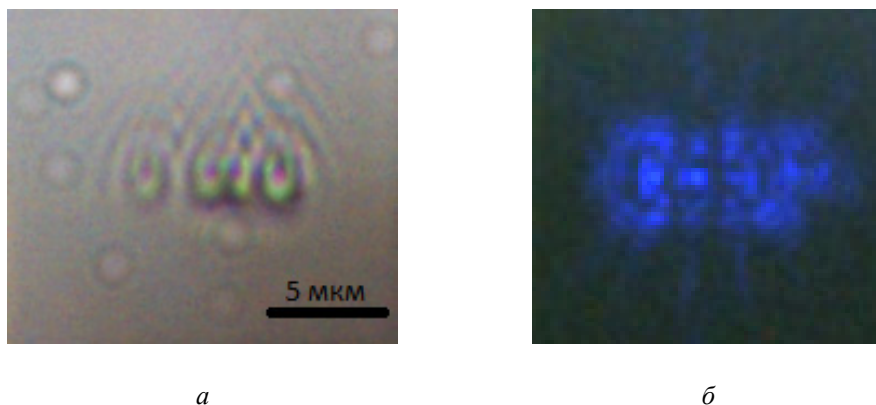


Рис. 4. Фотография дефекта, полученного при пробое во встречных импульсах:  
*а* – без подсветки; *б* – с подсветкой видимым источником на 450 нм

### Выводы

В работе предложена математическая модель столкновения двух одинаковых лазерных импульсов, распространяющихся навстречу друг другу по сердцевине оптического волокна 62,5/125. Моделирование проводилось в пакете конечно-элементного моделирования COMSOL Multyphysics блок Electromagnetic Waves, Transient (ewt). В результате расчётов получена картина распространения электрического поля по сердцевине оптоволокна. Показано, что импульсы интерферируют и резонируют друг с другом, образуя практически стационарную картину напряженности в области перекрытия импульсов. При этом не вся область перекрытия импульсов образует большую напряженность поля. Возникает только область с четырьмя основными максимумами напряженности. Качественно было показано, что высокая напряженность электрического поля создает дефекты в сердцевине волокна в соответствии с картиной интерференции. Но количественно значения не сходятся, возможно, это связано с тем, что в модели не учитываются возможности градиентного волновода. В дальнейшем

планируется усовершенствование математической модели в части геометрии – переход к трехмерности и учет образования структурного изменения в месте превышения пороговой напряженности электрического поля волны.

### Список литературы

1. Bufetov I.A., Dianov E.M. Optical discharge in fibre light guides // *Adv. of Physical Sciences*. – 2005. – Vol. 175, № 1. – P. 100–103.
2. Shuto, Yoshito. (2021). *Fiber Fuse Phenomenon* (3rd Edition).
3. Беспрозванных В.Г., Перадчук В.П. Нелинейные эффекты в волоконной оптике: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 228 с.
4. 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, № 11. – P. 672–677.
5. 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. – P. 128242. DOI: 10.1016/j.optcom.2022.128242
6. Fleming J.W. Dispersion in GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses // *Appl. Opt.* – 1984. – № 23. – P. 4486–4493.

### 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. (2021). *Fiber Fuse Phenomenon* (3rd Edition).
3. Besprozvannykh V.G., Pervadchuk V.P. Nelineinye efekty v volokonnoi optike [Nonlinear effects in fiber optics]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2011, 228 p.
4. 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.



5. 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 p. DOI: 10.1016/j.optcom.2022.128242

6. Fleming J.W. Dispersion in GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses. *Appl. Opt.*, 1984, no. 23, pp. 4486-4493.

### **Сведения об авторах**

#### **КОНИН Ю.А.**

e-mail: [yuri-konin@ya.ru](mailto:yuri-konin@ya.ru)

Аспирант кафедры лазерной фотоники и оптоэлектроники Санкт-Петербургского университета ИТМО, инженер-исследователь Лаборатории фотоники ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь.

#### **ПЕТРОВ А.А.**

e-mail: [aapetrov@itmo.ru](mailto:aapetrov@itmo.ru)

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

#### **ЛУЦЕНКО А.С.**

e-mail: [andrew-lucenko@yandex.ru](mailto:andrew-lucenko@yandex.ru)

Аспирант кафедры прикладной математики Пермского национального исследовательского политехнического университета, инженер-конструктор Лаборатории фотоники ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь.

### **About the authors**

#### **KONIN Yu.A.**

e-mail: [yuri-konin@ya.ru](mailto: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.

#### **PETROV A.A.**

e-mail: [aapetrov@itmo.ru](mailto:aapetrov@itmo.ru)

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

#### **LUTSENKO A.S.**

e-mail: [andrew-lucenko@yandex.ru](mailto:andrew-lucenko@yandex.ru)

Postgraduate student of the Department of Applied Mathematics of Perm National Research Polytechnic University, Design Engineer of the Photonics Laboratory of PJSC «PNPPK», Perm.

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

**Получена:** 01.07.2023

**Одобрена:** 03.07.2023

**Принята к публикации:** 05.07.2023

**Financing.** The study was carried out with financial support from a grant NIRMA FT MF ITMO University.

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

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

**Received:** 01/07/2023

**Approved:** 03/07/2023

**Accepted for publication:** 05/07/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Конин, Ю.А. Модель пространственного распределения энергии при взаимодействии встречных оптических импульсов в волокне / Ю.А. Конин, А.А. Петров, А.С. Луценко // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 4. – С. 79–88.

Please cite this article in English as: Konin Yu.A., Petrov A.A, Lutsenko A.S. Model of spatial energy distribution in the interaction of counter optical pulses in a fiber // Applied photonics, 2023, no. 4, pp. 79-88.