

**ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ/OPTICAL AND
OPTOELECTRONIC DEVICES AND COMPLEXES**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.36>

**СПЕКТРАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВНУТРИВОЛОКОННОЙ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОЛОСТНОЙ
СТРУКТУРЫ**

Научная статья

Луценко А.С.^{1,*}, Первадчук В.П.², Смертин Р.М.³

^{1, 2, 3} Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (andrew-lucenko[at]yandex.ru)

Аннотация

В работе рассматриваются аспекты создания и применения внутриволоконных квазипериодических полостных структур, формирующихся за один этап при помощи торцевого ввода излучения без нарушения целостности защитно-упрочняющего покрытия. Впервые продемонстрировано, что спектральные компоненты отраженного и рассеянного излучения в одномодовом изотропном световоде зависят от количества элементов внутриволоконных квазипериодических полостных структур за счет различной глубины проникновения. Используемый метод спектрального зондирования демонстрирует потенциал применения оптических волокон с подобными структурами в качестве индикаторов или датчиков для систем контроля износа объектов с возможностью температурного контроля.

Ключевые слова: оптическое волокно, внутриволоконная структура, спектральное зондирование, износ.

SPECTRAL PROBING OF AN INTRAFIBROUS QUASI-PERIODIC HOLLOW STRUCTURE

Research article

Lutsenko A.S.^{1,*}, Pervadchuk V.P.², Smertin R.M.³

^{1, 2, 3} Perm National Research Polytechnic University, Пермь, Russian Federation

* Corresponding author (andrew-lucenko[at]yandex.ru)

Abstract

The paper examines aspects of creation and application of intrafibrous quasi-periodic hollow structures formed in one step by means of end cap of radiation without breaking the integrity of the protective-strengthening coating. It is demonstrated for the first time that the spectral components of reflected and scattered radiation in a single-mode isotropic light guide depend on the number of elements of intrafibrous quasi-periodic hollow structures due to different penetration depths. The used method of spectral sensing demonstrates the potential of application of optical fibres with such structures as indicators or sensors for wear monitoring systems of objects with the possibility of temperature control.

Keywords: optical fibre, intrafibrous structure, spectral probing, wear and tear.

Введение

За последние десять лет был найден ряд прикладных применений внутриволоконным квазипериодическим полостным структурам (ВКПС), сформированным в сердцевине изотропных оптических волокон благодаря прохождению оптического разряда, инициированного лазерным излучением в режиме медленного горения. Примерами применений являются волоконно-оптические рассеиватели излучения [1], [2], созданные для фотодинамической терапии и лазерной кардиостимуляции, индикаторы и датчики для контроля температуры жидкых, газообразных и твердых сред [3], [4], [5], а также сенсоры измерения деформации [6] и давления [7].

Практически все волоконные элементы имеют существенные преимущества над их электрическими аналогами и вышеописанные структуры не являются исключением, поскольку также обладают электрической пассивностью, устойчивостью к электромагнитным помехам, химической инертностью, малым весом, гибкостью и множеством других свойств, делающих оптические волокна привлекательными для использования в задачах мониторинга среды и биомедицины.

Формирование ВКПС требует меньше технологических операций по сравнению с методами изготовления иных волоконно-оптических интерференционных чувствительных элементов, что обеспечивает технико-экономический выигрыш при их изготовлении.

В процессе формирования ВКПС задействовано излучение высокой мощности, вызывающее нелинейную концентрацию энергии, приводящую к локальному нагреву сердцевины до нескольких тысяч градусов из-за чего в материале образуется ионизированный газ — плазма. В процессе разогрева волокно локально расплавляется и заполняется газом, расширяющимся за счет внутреннего давления, однако этот участок волокна быстро застывает благодаря теплопроводности, лежащей в основе механизма распространения оптического разряда навстречу источнику.

Защитно-упрочняющее покрытие, сохраняемое при формировании ВКПС, определяет основные эксплуатационные характеристики устройств на основе ВКПС, а также существенно влияет на чувствительность к внешнему воздействию. Например, с целью увеличения рабочего температурного диапазона и чувствительности к температуре, по сравнению с акрилатными и полиимидными составами, имеет смысл использовать металлические покрытия на основе олова, меди, алюминия, золота и некоторых сплавов, однако при этом будет уменьшаться чувствительность к механическим воздействиям.

ВКПС в одномодовом изотропном оптическом волокне состоит из множества полостей, каждая из которых заполнена газообразными продуктами реакции температурной диссоциации молекул вследствие прохождения лазер-индуцированной плазмы. Так, например, автором работы [8] обнаружены при помощи метода рамановской спектроскопии колебательные моды кислорода в образуемых полостях. Размеры элементов структуры в одномодовом волокне составляют порядка 3–6 мкм, при этом они расположены вдоль оптической оси световода с периодом 15±4 мкм. Каждый из элементов представляет собой интерферометр Фабри-Перо конфокального типа за счет наличия двух границ раздела сред.

Оптический сигнал отражения от ВКПС крайне мал и находится на среднем уровне -40 дБ для структур в одномодовых волокнах, что обуславливается рассеянием большей части попадающего излучения в оболочку. Это накладывает определенные требования к мощности вводимого излучения, поскольку оно может нагревать или разрушать защитно-упрочняющее покрытие [9]. Сигнал отражения от ВКПС состоит из двух основных типов интерференции — внутриволостных и перекрестных, при этом интерференционный контраст может варьироваться в широких пределах.

В работе предложен и обоснован метод спектрального зондирования ВКПС, позволяющий контролировать состояние элементов структуры.

Формирование внутриволоконных квазипериодических полостных структур

Лазерное излучение, распространяющееся по сердцевине оптического волокна, из-за большой плотности мощности (порядка 5 МВт/см²), способно инициировать оптический пробой, приводящий к распространению оптического разряда, движущегося навстречу излучению и оставляющему после себя квазипериодические структуры в сердцевине [10], [11], [12].

В основе явления лежит лавинная ионизация, при этом затравочные электроны могут появляться как из материала оптического волокна, так и извне, в случае контакта с материалом, имеющим меньшую энергию ионизации. Процессу присуща следующая стадийность:

- ионизация материала и образование свободных электронов;
- электроны, ускоряемые в сильном световом поле, сталкиваются с атомами и развиваются лавинообразный процесс увеличения концентрации свободных носителей заряда;
- образование плазмы, поглощающей и рассеивающей свет;
- поддержание излучением неравновесной плазмы;
- поддержание излучением равновесной плазмы.

В достаточной мере образование внутриволоконных полостей можно феноменологически объяснить явлением кавитации, однако с допущением, что газ появляется за счет разрыва связей SiO_2 и (или) легирующих примесей. Для вышеуказанного кавитационно-подобного сравнения характерны высокие значения температуры и давления внутри полости, а также высокие скорости движения поверхности раздела сред. Создаваемая полость сначала расширяется и её радиус достигает максимального значения, после чего она начинает сжиматься за счет поверхностного натяжения и внешнего воздействия остывающего материала.

На рисунке 1 представлена фотография образца одномодового изотропного оптического волокна, в сердцевине которого создана ВКПС. При фотографировании боковой поверхности образец был помещен в глицерин с показателем преломления близким к показателю преломления диоксида кремния с целью устранения эффекта линзы.

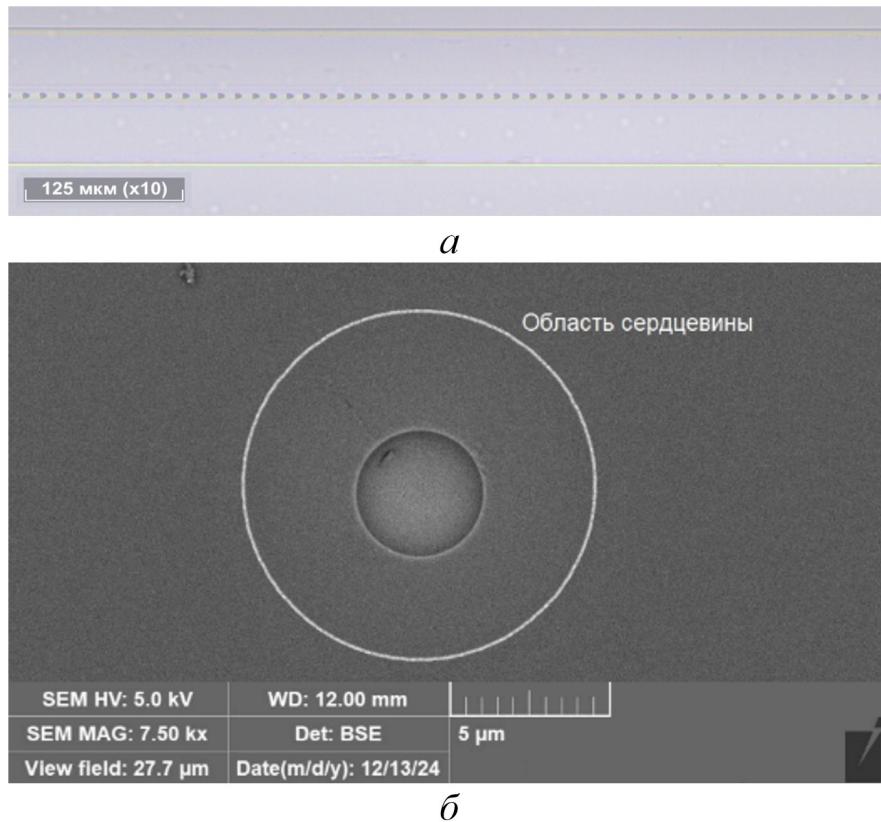


Рисунок 1 - Изображение внутриволоконных квазипериодических полостных структур:
 а – фотография боковой поверхности образца в иммерсионной жидкости; б – СЭМ-изображение сколотого торца образца

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.36.1>

Заметно, что в радиальном сечении полость имеет практически идеальную окружность, однако продольные размеры могут варьироваться от условий распространения плазменного образования. При правильном подборе параметром оптического излучения для конкретного вида оптического волокна возможно управление как продольными, так и радиальными размерами полостей.

Моделирование отражения и рассеяния на элементах структуры

Для оценки значений параметров отражения и рассеяния на ВКПС была построена математическая модель в среде численного моделирования Comsol Multiphysics. Постановка задачи осуществлялась в терминах волновой оптики.

Геометрия модели включала сердцевину ($\phi 8$ мкм), оболочку ($\phi 125$ мкм) и акрилатное защитно-упрочняющее покрытие ($\phi 250$ мкм), а также идеализированный вид элементов структуры — пять сфер ($\phi 4$ мкм), заполненных газообразным кислородом O_2 с равномерным распределением. При этом ореол вокруг элементов, имеющий в реальности увеличенный показатель преломления вследствие отрыва кислорода от диоксидов кремния и германия, не рассматривался, что являлось принятым допущением. В модели отсутствовали температурные градиенты. Параметры материалов были взяты из [13].

Использовалась осесимметричная постановка задачи, при этом максимальный размер треугольных элементов сетки был менее 0,2 от длины волны, а расчет напряженности поля происходил в каждом её элементе. На внешние границы модели были установлены PML-слои (*Perfectly Matched Layers*, идеально согласованные слои), имитирующие полное поглощение и устраняющие вклад отражений от границ раздела сред. Плоская волна, распространяющаяся по сердцевине оптического волокна слева направо описывалась уравнением:

$$\vec{E}(x, z, t) = \vec{E}_0 \cdot e^{i(k_x \cdot x + k_z \cdot z - \omega \cdot t + \varphi_0)},$$

где \vec{E}_0 — постоянный вектор напряженности электрического поля, k_x и k_z — волновые числа, x и z — координаты, ω — круговая частота, t — время, φ_0 — начальная фаза.

Вектор напряженности электрического поля в декартовой системе координат рассчитывался согласно следующему выражению:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \cdot e_r \cdot \vec{E} = 0,$$

где ∇ — оператор набла, \vec{E} — вектор напряженности электрического поля, k_0 — волновое число, e_r — электрическая проницаемость среды.

Задача рассчитывалась для трех основных длин волн, каждой из которых соответствовал гауссовый профиль поля моды. Первая длина волны выбиралась вблизи длины волны отсечки [11] волокна, в дальнейшем используемого для экспериментов:

$$\lambda_1 = \frac{d_{\text{core}} \cdot \pi}{V} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{8 \cdot \pi}{2,405} \sqrt{1,450^2 - 1,444^2} \approx 1,378 \text{ мкм}$$

где d_{core} — диаметр сердцевины, V — нормированная частота фундаментальной моды, n_1 — показатель преломления сердцевины, n_2 — показатель преломления оболочки.

Вторая и третья длины волн были выбраны на границах оптического С-диапазона ($\lambda_2=1,530$ мкм, $\lambda_3=1,565$ мкм), в котором работает большинство волоконно-оптических компонентов и устройств, например циркуляторы и эрбьевые усилители.

Границные условия задавались на основе непрерывности тангенциальных компонент поля. Результатом моделирования являлось распределение электрического поля, суммарной мощность 50 мВт, демонстрирующее отражение и рассеяние на элементах ВКПС (см. рис. 2).

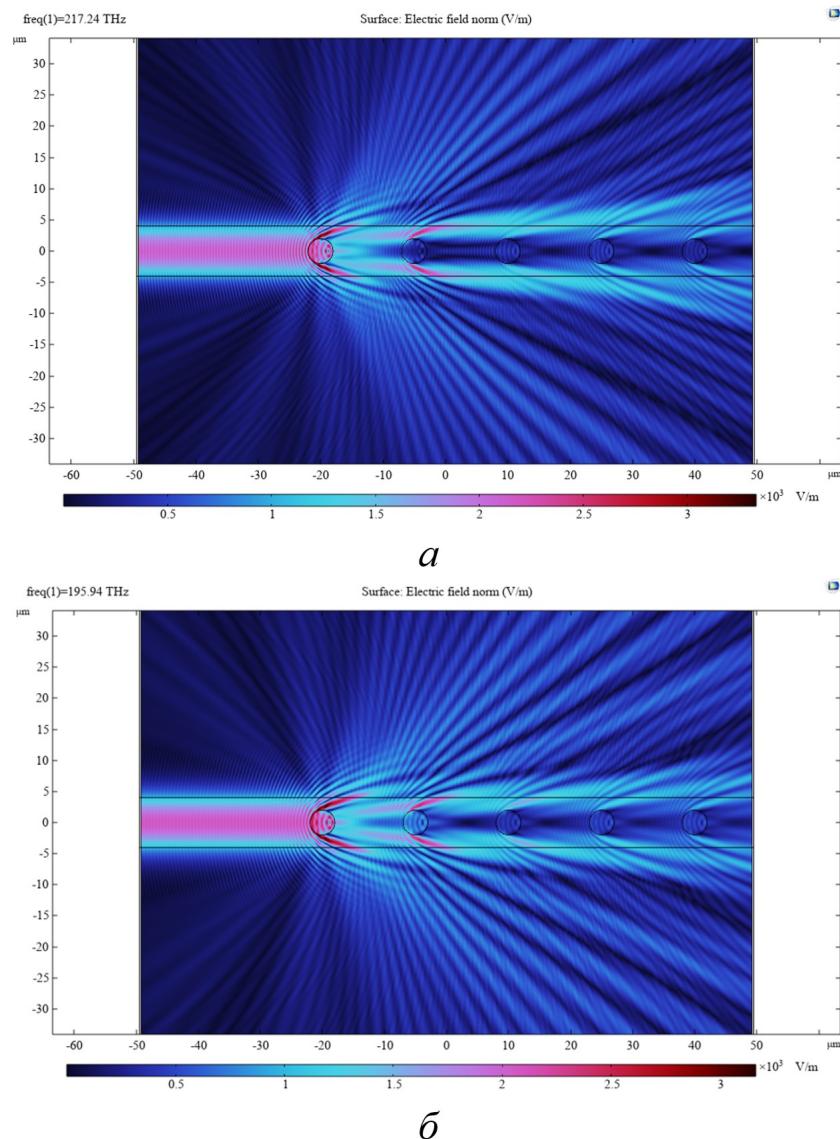


Рисунок 2 - Результаты численного моделирования напряженности электрического поля в оптическом волокне с полостными структурами:

а – длина волны 1380 нм (217,2409 ТГц); б – длина волны 1530 нм (195,9428 ТГц)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.36.2>

Таблица 1 - Значения отраженного и прошедшего излучения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.36.3>

Длина волны, нм	Отраженное излучение, В/м	Прошедшее излучение, В/м
1380	0,00197	0,04532
1530	0,00256	0,03713
1565	0,00349	0,03399

Примечание: усреднение выполнено в диапазоне ± 5 нм с шагом 1 нм с целью сглаживания формируемой интерференционной картины излучения

С целью выявления причин обнаруженной обратной зависимости мощности проходящего излучения от длины волны были получены характеристики рассеиваемого и отраженного излучения в радиальном направлении (см. рис. 3), для чего напряженность электрического поля фиксировалась на расстоянии 60 мкм от оптической оси волокна, т.е. вблизи границы с защитно-упрочняющим покрытием.

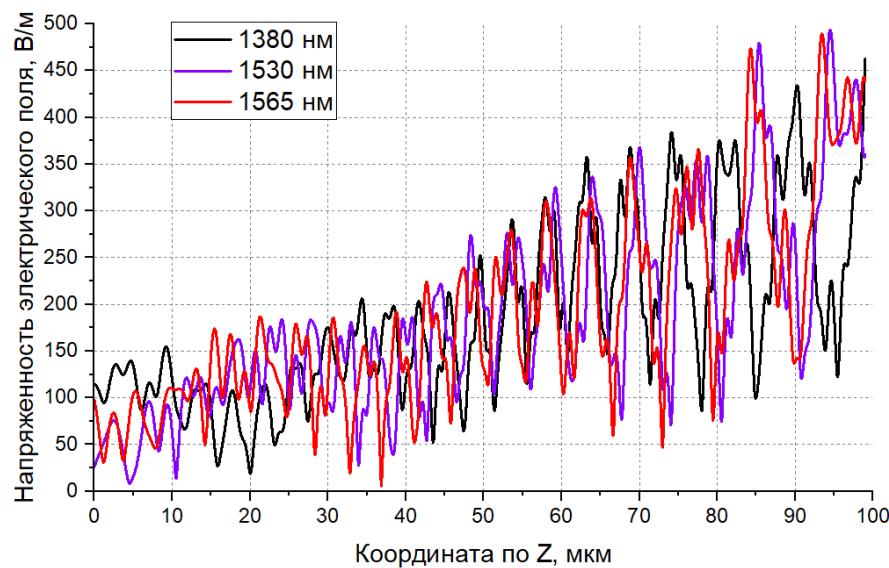


Рисунок 3 - Напряженность электрического поля на расстоянии 60 мкм от оптической оси
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.36.4>

Распределение излучения имеет сильную асимметрию, при этом рассеяние направлено преимущественно по пути распространения излучения, что характерно для рассеяния Ми [14]. С увеличением длины волны общая величина рассеяния на элементах структуры незначительно повышается, что может служить объяснением снижения общей пропускной способности структур.

Метод обработки сигнала

Был поставлен эксперимент, нацеленный на изучение влияния длины ВКПС на её спектральные характеристики. Для чего были сформированы полостные структуры путем формирования оптического разряда на заданную длину в сердцевине одномодового изотропного оптического волокна со следующими характеристиками: диаметры сердцевины $d_{core}=8$ мкм, оболочки $d_{shell}=125$ мкм и акрилатного защитно-упрочняющего покрытия $d_{coat}=250$ мкм, числовая апертура NA=0,13.

Образец с ВКПС подключался к лабораторной установке (см. рис. 4), представляющей собой широкополосный источник излучения (суперлюминесцентный диод EXS210108-01), волоконно-оптический циркулятор (GR-CIRC-55) и оптический анализатор спектра (Yokogawa AQ6370D).

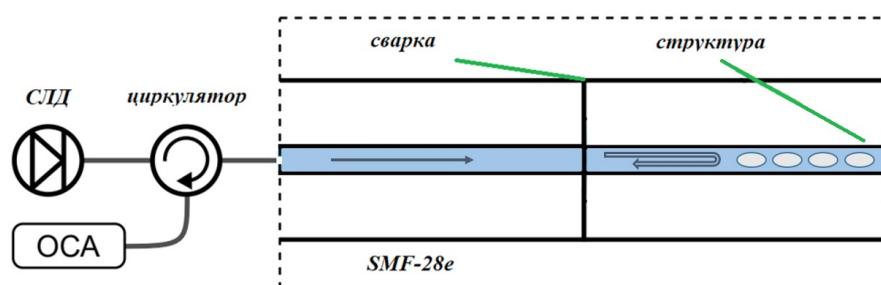


Рисунок 4 - Схема лабораторной установки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.36.5>



Рисунок 5 - Процесс стачивания полостной структуры
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.36.6>

Образец с ВКПС фиксировался kleевым составом на каркас, после чего определялась зона его начала при помощи лазера видимого диапазона и фиксировались реперные точки. Затем ВКПС укорачивалась при помощи шлифовальной установки на заданную длину (см. рис. 5) и производилась запись спектра (см. рис. 6).

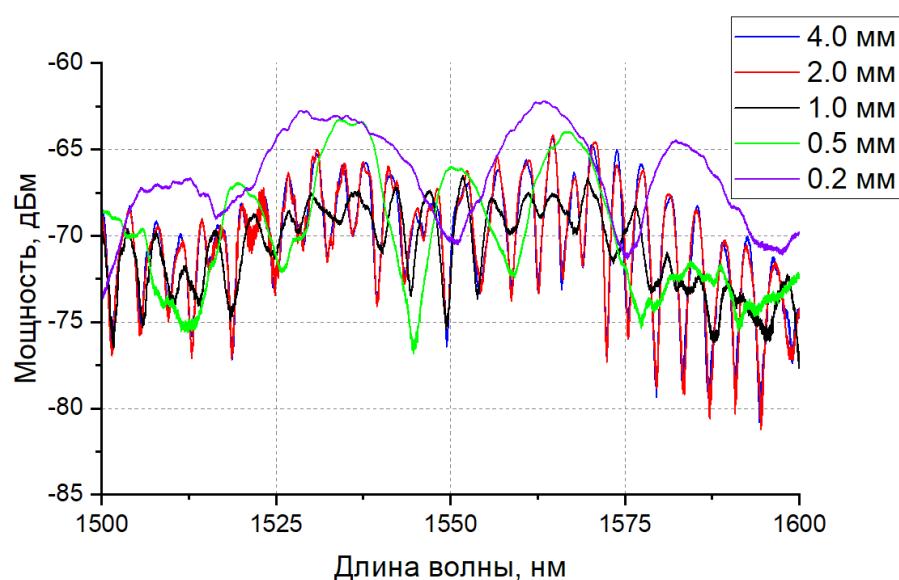


Рисунок 6 - Оптический спектр отражения от структуры различной длины
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.36.7>

Анализ спектральных данных проводился в диапазоне длин волн от 1530 до 1565 нм и включал в себя оценку усредненного FSR (*Free Spectral Range*, свободный спектральный диапазон), полученного из алгоритма быстрого преобразования Фурье, максимального интерференционного контраста и общей спектральной мощности. Данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Спектральные характеристики

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.36.8>

Длина структуры, мм	FSR, нм	Контраст, дБ	Мощность, отн. ед.
4,0	3,703	12.192	1,553
2,0	3,704	12.714	1,563
1,0	4,992	8.566	1,298
0,5	16,664	13.561	1,862
0,2	24,996	8.287	3,313

Заметно, что при стачивании структуры увеличивается свободный спектральный диапазон, при этом мощность отражения возрастает, что связано с уменьшением количества взаимодействующих внутриволоконных полостей и влиянием отражения от торца структуры оболочечных мод. Интерференционный контраст слабо зависит от длины структуры.

Для полученных в эксперименте структур с продольными размерами от 4 до 1 мм возможен температурный контроль [3], [4], поскольку на получаемые спектральные характеристики будут влиять термооптический и термоупругий эффекты. При этом величина свободного спектрального диапазона определяет масштаб фазовой чувствительности — чем он меньше, тем быстрее накапливается фаза при приложении теплового поля, и тем точнее определяется температура.

Заключение

В работе рассмотрен процесс структурного изменения сердцевины оптического волокна под действием излучения большой мощности с целью создания чувствительных элементов для волоконно-оптических индикаторов и датчиков. В результате моделирования продемонстрировано, что наибольшее рассеяние и отражение происходит на первом элементе структуры. Последующие элементы ВКПС играют роль для коротковолнового оптического диапазона в меньшей степени, при этом общую глубину взаимодействия со всей структурой ограничивает рассеяние МИ, доминирующее для длинноволновой части спектра.

Показано, что при изменении продольных размеров ВКПС существенно изменяется усредненный свободный спектральный диапазон и мощность отражаемого излучения, при этом зависимость величины контраста интерференционной картины от длины структуры не установлена. Полученные результаты могут быть применены при разработке простых в изготовлении интерферометрических устройств для систем измерения износа объектов с возможностью температурного контроля.

В дальнейшем планируется исследовать формирование ВКПС в оптических волокнах с металлическим покрытием, при этом в схему опроса будет включен волоконно-оптический эрбийевый усилитель для повышения соотношения сигнал/шум, а также апробирован фазо-частотный алгоритм обработки спектров при температурных испытаниях.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

- Петухова, А.Ю. Получение рассеивающей структуры методом оптического пробоя в специальных волокнах / А.Ю. Петухова, Ю.А. Конин, А.В. Перминов // Прикладная фотоника. — 2022. — Т. 9. — № 1. — С. 26–53.
- Конин Ю.А. Математическая модель рассеяния излучения на квазипериодической структуре в оптическом волокне / Ю.А. Конин, В.А. Старикова, А.Ю. Петухова [и др.] // Прикладная фотоника. — 2023. — Т. 10. — № 2. — С. 42–55.
- Konin Y.A. Fiber Optic Sensor for Cryogenic Liquids / Y.A. Konin, A.A. Petrov, A.V. Perminov [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2024. — Vol. 88. — № 6. — P. 983–985.
- Konin Y.A. Wide Temperature Range Fiber Optic Sensor / Y.A. Konin, A.A. Petrov, V.A. Starikova [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2022. — Vol. 86. — Suppl.1. — P. S100–S103.

5. Луценко А.С. Процесс структурного изменения сердцевины градиентного оптического волокна под действием излучения большой мощности / А.С. Луценко, Д.И. Нурмухаметов, В.П. Первадчук // Фотон экспресс — 2023. — № 7 (191).
6. Antunes P. F. C. Optical fiber microcavity strain sensors produced by the catastrophic fuse effect / P.F.C. Antunes, M.F.F. Domingues, N.J. Alberto [et al.] // IEEE Photonics Technol. Lett. — 2014. — № 26 (1). — P. 78–81.
7. Morozov O. Fiber-Optic Hydraulic Sensor Based on an End-Face Fabry — Perot Interferometer with an Open Cavity / O. Morozov, T. Agliullin, A. Sakhabutdinov [et al.] // Photonics. — 2024. — № 11 (1). — P. 22. — DOI: 10.3390/photonics11010022.
8. Kashyap R. Self-propelled self-focusing damage in optical fibers / R. Kashyap // Proceedings of the Tenth International Conference on Lasers and Applications. — 1987.
9. Yamada M. Heating and burning of optical fiber by light scattered from bubble train formed by optical fiber fuse / M. Yamada, O. Koyama, Y. Katsuyama [et al.] // Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011, OSA Technical Digest (CD). — Optica Publishing Group, 2011. — JThA1.
10. Bufetov I.A. Optical discharge in fibre light guides / I.A. Bufetov, E.M. Dianov // Adv. of Physical Sciences. — 2005. — Vol. 175. — № 1. — P. 100–103.
11. Беспрозванных В.Г. Нелинейные эффекты в волоконной оптике: учеб. пособие / В.Г. Беспрозванных, В.П. Первадчук. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. — 228 с.
12. Shuto Yo. Fiber Fuse Phenomenon (3rd Edition) / Yo. Shuto. — 2021.
13. Fleming J.W. Dispersion in $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ glasses / J.W. Fleming // Appl. Opt. — 1984. — № 23. — P. 4486–4493.
14. Bunge C.-A. Rayleigh and Mie Scattering in polymer optical fibers / C.-A. Bunge, R. Kruglov, H. Poisel // Journal of Lightwave Technology. — 2006. — Vol. 24. — № 8. — P. 3137–3146.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Petuhova, A.Ju. Poluchenie rasseivajushhej struktury metodom opticheskogo proboja v special'nyh voloknah [Preparation of the scattering structure by optical breakdown in special fibres] / A.Ju. Petuhova, Ju.A. Konin, A.V. Perminov // Prikladnaja fotonika [Applied Photonics]. — 2022. — Vol. 9. — № 1. — P. 26–53. [in Russian]
2. Konin Ju.A. Matematicheskaja model' rassejanija izlucheniya na kvaziperiodicheskoy strukture v opticheskem volokne [Mathematical model of radiation scattering on quasi-periodic structure in optical fibre] / Ju.A. Konin, V.A. Starikova, A.Ju. Petuhova [et al.] // Prikladnaja fotonika [Applied Photonics]. — 2023. — Vol. 10. — № 2. — P. 42–55. [in Russian]
3. Konin Y.A. Fiber Optic Sensor for Cryogenic Liquids / Y.A. Konin, A.A. Petrov, A.V. Perminov [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2024. — Vol. 88. — № 6. — P. 983–985.
4. Konin Y.A. Wide Temperature Range Fiber Optic Sensor / Y.A. Konin, A.A. Petrov, V.A. Starikova [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2022. — Vol. 86. — Suppl.1. — P. S100–S103.
5. Lucenko A.S. Process strukturnogo izmenenija serdceviny gradientnogo opticheskogo volokna pod dejstviem izlucheniya bol'shoj moshhnosti [Process of structural change in the core of a gradient optical fibre under the action of high-power radiation] / A.S. Lucenko, D.I. Nurmuhamedov, V.P. Pervadchuk // Foton jekspres [Photon Express] — 2023. — № 7 (191). [in Russian]
6. Antunes P. F. C. Optical fiber microcavity strain sensors produced by the catastrophic fuse effect / P.F.C. Antunes, M.F.F. Domingues, N.J. Alberto [et al.] // IEEE Photonics Technol. Lett. — 2014. — № 26 (1). — P. 78–81.
7. Morozov O. Fiber-Optic Hydraulic Sensor Based on an End-Face Fabry — Perot Interferometer with an Open Cavity / O. Morozov, T. Agliullin, A. Sakhabutdinov [et al.] // Photonics. — 2024. — № 11 (1). — P. 22. — DOI: 10.3390/photonics11010022.
8. Kashyap R. Self-propelled self-focusing damage in optical fibers / R. Kashyap // Proceedings of the Tenth International Conference on Lasers and Applications. — 1987.
9. Yamada M. Heating and burning of optical fiber by light scattered from bubble train formed by optical fiber fuse / M. Yamada, O. Koyama, Y. Katsuyama [et al.] // Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011, OSA Technical Digest (CD). — Optica Publishing Group, 2011. — JThA1.
10. Bufetov I.A. Optical discharge in fibre light guides / I.A. Bufetov, E.M. Dianov // Adv. of Physical Sciences. — 2005. — Vol. 175. — № 1. — P. 100–103.
11. Besprozvannyh V.G. Nelinejnye jeffekty v volokonnoj optike: ucheb. posobie [Nonlinear effects in fibre optics: textbook] / V.G. Besprozvannyh, V.P. Pervadchuk. — Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2011. — 228 p. [in Russian]
12. Shuto Yo. Fiber Fuse Phenomenon (3rd Edition) / Yo. Shuto. — 2021.
13. Fleming J.W. Dispersion in $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ glasses / J.W. Fleming // Appl. Opt. — 1984. — № 23. — P. 4486–4493.
14. Bunge C.-A. Rayleigh and Mie Scattering in polymer optical fibers / C.-A. Bunge, R. Kruglov, H. Poisel // Journal of Lightwave Technology. — 2006. — Vol. 24. — № 8. — P. 3137–3146.