

УДК 538.8(075.8)

А.Ю. Петухова^{1,2}, Ю.А. Конин², А.В. Перминов¹¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия²ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная
компания», Пермь, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ РАССЕИВАЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОЛОКНАХ

Описывается методика изготовления образцов волоконных диффузоров на основе волокон с градиентным профилем показателя преломления и с двойной оболочкой. Волоконные диффузоры могут использоваться в медицине, например, в качестве источников подводящего излучения в фотодинамической терапии или источников тепла в фототерапевтических устройствах, таких как повязки или одеяла. В работе описаны эксперименты по созданию внутри оптических волокон квазипериодических и неперидических структур из микродефектов посредством оптического пробоя и последующего плавления сердцевины волокна движущейся плазменной искрой. На основе экспериментальных данных определены оптимальные типы волокон для создания диффузоров с необходимыми свойствами. Были выполнены оценки энергетических характеристик лазерного диода, необходимого для записи структур из микродефектов, а также представлены результаты измерений параметров микродефектов.

Ключевые слова: диффузор, специальные волокна, волокно с двойной оболочкой, градиентное волокно, метод пробоя, плавление сердцевины.

A.Yu. Petukhova^{1,2}, Yu.A. Konin², A.V. Perminov¹¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia²Perm Research and Production Instrument-Making
Company "PNPPK", Perm, Russia

OBTAINING A SCATTERING STRUCTURE BY THE METHOD OF OPTICAL BREAKDOWN IN SPECIAL FIBERS

The paper describes a technique for manufacturing samples of fiber diffusers based on fibers with a gradient refractive index profile and a double cladding. Fiber diffusers can be used in medicine, for example, as sources of input radiation in photodynamic therapy or heat sources in phototherapeutic devices such as dressings or blankets. The paper describes experiments on creating quasi-periodic and non-periodic structures from microdefects inside optical fibers by means of optical breakdown and subsequent melting of the fiber core by a moving plasma spark. On the basis of experimental data, the optimal types of fibers were determined to create diffusers with the required properties. The energy characteristics of the laser diode necessary for writing structures from microdefects were estimated, and the results of measuring the parameters of microdefects were presented.

Keywords: diffuser, special fibers, double-clad fiber, gradient fiber, breakdown method, fuse-effect.

Введение

Сегодня в медицинских процедурах для воздействия на ткани организма пациента используется лазерная энергия, которая доставляется через волоконно-оптическую сборку. Благодаря своей гибкости и тонкости оптоволокно можно легко подводить к требуемой области через небольшой надрез и эффективно доставить световую энергию к ткани. Таким образом, медицинские процедуры с использованием оптоволоконной доставки являются минимально инвазивными.

Одним из множества оптических устройств, используемых для доставки света к обрабатываемой области, является волоконный оптический рассеиватель (или по-другому, диффузор), имеющий цилиндрическую форму. Свет в таком устройстве рассеивается вдоль всей длины активной части оптического волокна и используется для облучения пораженных участков тела.

Для изготовления волоконно-оптических рассеивателей существует несколько различных технологий создания области волоконного световода, выводящей излучение из его сердцевины. В работе рассеиватель формируется по методу пробоя, с помощью которого в сердцевине оптического волокна образуется рассеивающая структура. Рассеивающая структура состоит из серии микродефектов, расположенных на равном расстоянии от друг друга. В соответствии с техническим назначением рассеивателя в его конструкции могут быть использованы различные типы волокон, выбор которых влияет на рассеивающую структуру.

В работе в качестве рассеивающей структуры будем рассматривать микрополости, сформированные в сердцевинах специальных оптических волокон. В основном использовались градиентные волокна 62,5/125 мкм и волокна с двойной оболочкой (Double Clad) 10/130/245 мкм. Данные типы волокон обеспечивают длину рассеивающей части от 10 см и более. Диффузоры с такой определенной длиной могут найти свое применение в медицине в качестве источников подводящего излучения в фотодинамической терапии или источников тепла в фототерапевтических устройствах, например, в повязках или одеялах.

Исследования, связанные с разработкой волоконных диффузоров, ведутся уже несколько лет, за это время уже было опубликовано множество работ [1–5]. Они были посвящены возможности ис-

пользования рассеяния Френеля в сердцевине оптического волокна для создания рассеивающей части диффузора.

Данная статья посвящена созданию длинных диффузоров с рассеивающей частью от 10 см и более, записанной в специальных волокнах. В ней описаны экспериментальные данные исследований, процесс записи и сравнение характеристик волокон.

Определение и применение волоконно-оптических рассеивателей

Волоконно-оптические рассеиватели представляют собой волоконно-оптические устройства с квазипериодической или непериодической структурой микронеоднородностей (микроростов) внутри сердцевины волокна, которая обеспечивает рассеивание излучения в инструменте. На рис. 1 представлена структура волоконно-оптического рассеивателя.

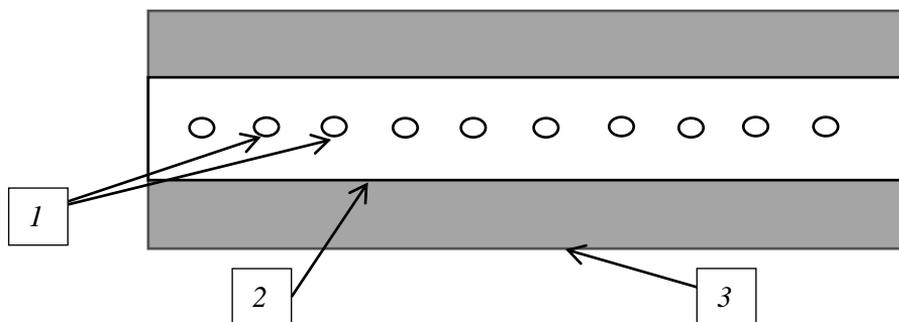


Рис. 1. Схема структуры волоконно-оптического рассеивателя:
1 – квазипериодическая рассеивающая структура, 2 – сердцевина ОВ,
3 – защитная оболочка ОВ

В медицинских приложениях волоконные диффузоры могут быть использованы для двух различных классов процедур в организме человека.

Для первого класса процедур диффузор представляет собой рассеиватель излучения, который способствует фотохимическим реакциям в организме. Общепринятым термином для процедур с использованием рассеивателя излучения для стимуляции фотохимических реакций является «фотодинамическая терапия» (ФДТ). Второй класс

процедур направлен на использование общей структуры цилиндрического диффузора в качестве устройства подачи тепла [6, 7].

В процедурах ФДТ, а также в других видах биомедицинского применения оптические волноводы используются для доставки световой энергии к внутренним областям человеческого тела, к которым источник света не имеет прямого доступа. В ряде медицинских процедур, таких как облучение кровеносных сосудов, необходимы излучатели цилиндрической формы, обеспечивающие равномерное облучение достаточно протяженных участков тканей, что существенно влияет на качество лечения пациента.

Существует множество различных методов изготовления волоконных рассеивателей, в которых происходит формирование области рассеяния: плавление сердцевинки волокна с помощью фемтосекундных или ультрафиолетовых лазерных импульсов (метод лазерной абляции); химическое или механическое травление оптического волокна в его сердцевине с последующей защитой обработанной поверхности тефлоном или медицинским поликарбонатом; замещение защитного покрытия волокна с низким показателем преломления на покрытие с более высоким показателем преломления (применимо для кварц-полимерного оптического волокна) [8].

Метод инициации искры

Метод инициации искры, или метод оптического пробоя с последующим проплавлением сердцевинки волокна – малоизвестный способ изготовления волоконных рассеивателей. Данный метод не требует снятия защитного упрочняющего покрытия (ЗУП) с исследуемого волокна, что сохраняет прочность волокна и предотвращает в дальнейшем отслаивание оболочки. Метод можно успешно применять на тонких волокнах диаметром от 150 до 250 мкм.

Для создания диффузора по методу инициации искры с одного конца оптического волокна заводится лазерное излучение определенной мощности, а другого – конец волокна приводится с некоторой поглощающей поверхностью, например, загрязненным стеклом или металлом. В месте контакта возникает оптический пробой, в результате которого образуется плазменная искра, движущаяся по сердцевине волокна навстречу излучению [9, 10]. Оптический пробой представляет собой быстрый и необратимый процесс, в результате

которого прозрачная среда под действием излучения превращается в сильно поглощающую, что сопровождается разрушением структуры среды [11, 12]. Начало оптического пробоя связано с переходом от линейного к нелинейному поглощению, которое может оказаться на несколько порядков выше. У данного физического явления имеется нескольких последовательных физических процессов (для твердого тела):

- ионизация атомов кристаллической решетки и резкое увеличение концентрации свободных электронов;
- извлечение связанных электронов валентной зоны действием ускоренных свободных электронов;
- развитие электронной лавины, приводящей к образованию критической концентрации электронов для излучения заданной частоты;
- нелинейное поглощение излучения и быстрый нагрев среды, что приводит к увеличению давления и разрушению [13].

Благодаря эффекту оптического пробоя и последующего проплавления сердцевинки волокна плазменной искрой в ней образуется квазипериодическая структура микродефектов. Если в волокно с созданной (записанной) структурой микрополостей подать излучение, то оно рассеется на данной структуре, т.е. некоторый участок волокна будет представлять собой диффузор.

Процесс записи диффузоров методом пробоя

Для записи диффузоров был выбран изготовленный ранее в лаборатории волоконных систем опытный образец иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1125 нм, у которого в качестве активной среды используется специальное волокно с многокомпонентной сердцевиной GTWave, легированное ионами иттербия. Участок активного волокна составляет 24 м. Накачка производится лазерным диодом с мощностью 7 Вт через пассивную жилу волокна GTWave. К концу решетки с 30%-ным коэффициентом отражения приваривается волокно, на котором будет записываться будущий диффузор.

Диффузор создается при генерации излучения лазером и инициации искры посредством контакта загрязненной поверхности (грязное стекло) или металлического предмета (стриппер) с очищенным концом волокна. Схема инициации искры представлена на рис. 2.

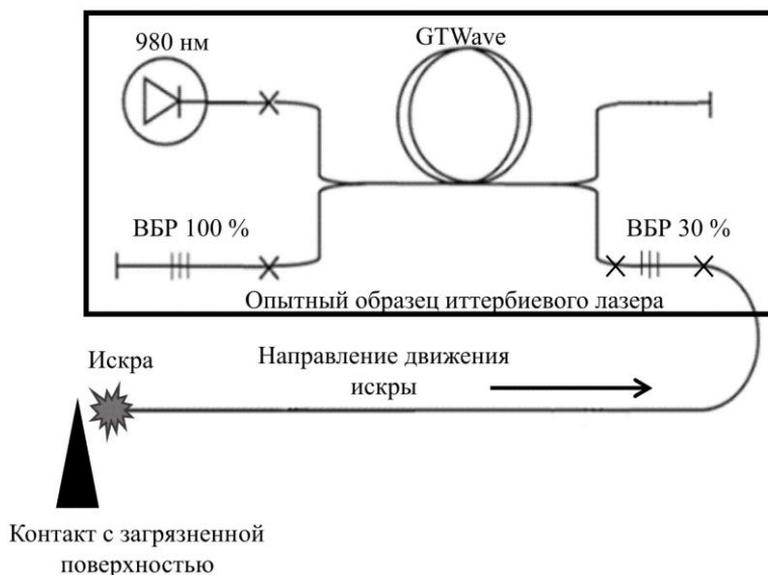


Рис. 2. Схема процесса инициации искры

Искра движется в сторону лазерного диода со скоростью, не превышающей 1 м/с, а температура и давление искры оцениваются соответственно $\sim 10^4$ К и $\sim 10^4$ атм. Прохождение искрой участка волокна будущего диффузора занимает не более секунды. Скорость распространения искры зависит от типа волокна, профиля показателя преломления и от мощности лазерного излучения, но практически не зависит от длины волны излучения и состава сердцевины.

В зависимости от мощности излучения процесс инициации может проходить быстрее или медленнее. Если мощность будет более 2 Вт, то при контакте сразу появится искра, и ее скорость будет достигать ~ 1 м/с. Если мощность будет менее 2 Вт, то процесс инициации может не произойти, но конец волокна оплавится. В ходе экспериментов было получено несколько образцов волоконных рассеивателей при различных мощностях с волоконного иттербиевого лазера.

На рис. 3 показана фотография внешнего вида одного из образцов волоконного рассеивателя, полученного методом инициации искры.

Во внутренней структуре волокна были образованы квазипериодические или неперидические пулевидные полости размером несколько микрометров, которые были получены в ходе прохождения искры по волноводу. Такие дефекты полностью нарушают волно-

водные свойства ОВ. Свет, попадая на такую полость, частично рассеивается, а частично проходит далее по волокну. В итоге описанные дефекты (полости) образуют структуру, как правило, квазипериодическую вдоль сердцевины волокна, которая является волоконным рассеивателем.



Рис. 3. Фотография диффузора, изготовленного методом пробоя

Методом пробоя можно получить волоконный рассеиватель (диффузор), неоспоримым преимуществом которого является более равномерное распределение интенсивности рассеянного излучения по длине рассеивателя. Еще одним из преимуществ является сохранение в процессе изготовления защитной оболочки, что увеличивает прочность волокна.

Эксперименты по определению диаметра дефекта и длины рассеивающей части диффузора

Для записи длинных диффузоров были проведены эксперименты для разных типов волокон по определению диаметра полости микро-структуры и определению длины рассеивающей части.

Эксперимент 1. Измерение диаметра дефекта

Для измерения диаметра дефекта были использованы микроскоп Leica DMI8 и соответствующее ему программное обеспечение.

Алгоритм эксперимента:

1. В нескольких образцах волокон (одномодовое волокно SMF-28, градиентное волокно Corning MM 62/125, волокно с двойной оболочкой DC 10/130/250) методом пробоя были записаны микро-структуры, образующие диффузоры.

2. Каждый образец с записанной рассеивающей частью скалывался в местах дефектов. В месте скола с помощью микроскопа исследовались дефекты. С торцевой поверхности фиксировался кадр и проводились замеры диаметра пузырька. Измерения проводились для каждого образца волокна по 5 раз.

3. Для каждого образца проводился расчет погрешности по методу Стьюдента.

На рис. 4 представлены примеры изображений торцевой поверхности образца волокна и дефекта в сердцевине.

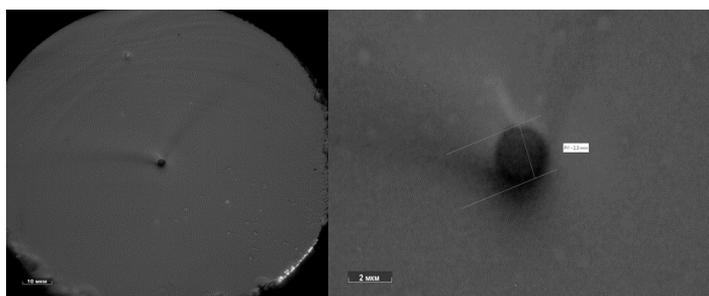


Рис. 4. Фотографии торцевой поверхности исследуемого одномодового волокна с микроскопа Leica DMI8

Значения диаметров дефектов в виде доверительных интервалов для каждого типа волокна представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений диаметра микронеоднородностей на разных волокнах

Наименование	Одномодовое волокно 8/125 мкм	Градиентное волокно 62,5/125 мкм	Волокно DC 10/130 мкм
Диаметр дефекта, мкм	$2,58 \pm 0,03$	$3,54 \pm 0,07$	$3,72 \pm 0,05$

Анализируя результаты, можно заметить, что значение диаметра дефекта во всех волокнах варьируется в пределах от 2,5 до 3,7 мкм.

Эксперимент 2. Измерение длины рассеивающей части диффузора

В эксперименте было использовано несколько видов оптических волокон: одномодовые (SMF-28), многомодовые волокна с градиентным профилем показателя преломления (Corning MM 62/125) и волокна с двойной оболочкой (DC 10/130/250). Оптические волокна «пробивались» при оптической мощности лазера порядка 3 Вт.

Для определения длины диффузора в волокно с записанной структурой из микрополостей подавалось излучение. Длина светящейся части диффузора в каждом волокне измерялась с помощью линейки. На рис.5 представлена фотография замера длины диффузора в волокне DC 10/130/250.

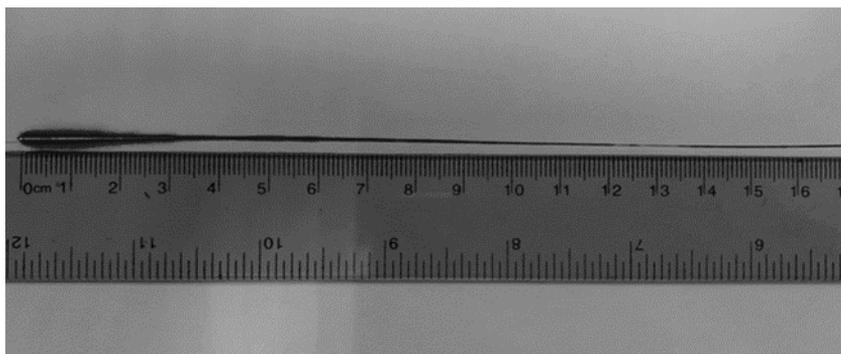


Рис. 5. Фотография замеров длины рассеивающей части волокна DC

В табл. 2 приведены результаты замеров длины диффузоров, на которых была осуществлена запись рассеивающих структур. В различных типах волокон наблюдается различная длина диффузора. Ниже будет выполнен анализ степени рассеяния для каждого вида волокна.

Таблица 2

Результаты измерений длины рассеивающей структуры на разных волокнах

Наименование	Одномодовое волокно 8/125 мкм	Градиентное волокно 62,5/125 мкм	Волокно DC 10/130 мкм
Длина рассеивающей части, мм	15,2	70,5	200,4

Анализ параметров для выбора оптимального типа волокна

Эксперименты показали, что периодическое распределение дефектов в волокне обеспечивает экспоненциальный характер рассеивания, т.е. интенсивность рассеянного излучения убывает по закону $\sim e^{-r}$, где r – расстояние вдоль волокна, измеренное от первого дефекта [14]. Непериодическая структура дефектов позволяет выровнять профиль рассеивания, т.е. закон убывания интенсивности вдоль диффузора близок к линейному. Более подробно этот эффект описывается ниже.

Чтобы вычислить долю рассеянного излучения от дефектов (степень рассеяния светового луча), необходимо воспользоваться формулой:

$$B = \frac{D_{\text{неодн}}}{D_{\text{серд}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где B – доля рассеянного излучения первым дефектом, $D_{\text{неодн}}$ – диаметр полости, $D_{\text{серд}}$ – диаметр сердцевины ОВ. Смысл формулы (1) объясняется следующим образом. Представим, что без дефекта излучение полностью проходит через сердцевину ОВ, но если в сердцевине появляется дефект, то часть излучения рассеивается от дефекта, а часть пройдет дальше вдоль волокна. Для грубой оценки доли рассеянного от полости света можно вычислить отношение диаметра полости к диаметру сердцевины. Результаты оценки по формуле (1) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Расчет степени рассеивания для каждого вида волокна

Тип волокна	Длина рассеивающей части структуры L , мм	Диаметр d дефекта, мкм	Доля излучения B , %
Одномодовое ОВ 8/125 мкм	15,2	2,58	32,2
Градиентное ОВ 62,5/125 мкм	70,4	3,54	5,7
ОВ с двойной оболочкой 10/130/250 мкм	200,2	3,72	2,9

Различные типы волокон обеспечивают разную степень рассеивания и соответственно различную длину рассеивающей части диффузора. Самая короткая длина рассеивателя у одномодового волокна. Наибольшая доля рассеянного излучения в таком волокне приходится на первый дефект. Наиболее длинные диффузоры получаются в волокнах с двойной оболочкой, где на первых дефектах рассеивается существенно меньшее количество энергии, чем в других типах волокон. При небольшом диаметре сердцевины одномодового волокна первые дефекты перекрывают зону распространения излучения, что приводит к сильному рассеиванию излучения и короткой длине рассеивателя.

В волокне с двойной оболочкой часть излучения отводится во внутреннюю оболочку, что более равномерно распределяет рассеивание излучения. Первые дефекты слабо препятствуют прохождению света вдоль диффузора. Соответственно, излучение распространяется на большую длину волокна. В расчете доли излучения от первого дефекта B в волокне с двойной оболочкой учитывается не только диаметр сердцевины, но и диаметр внутренней оболочки, поскольку излучение распространяется не только в сердцевине, но и во внутренней оболочке. По сравнению с рассеивателем на волокне с двойной оболочкой градиентный рассеиватель получился короче, порядка 7 см. Однако рассеиватель на основе градиентного волокна также будет намного длиннее, чем на стандартном одномодовом волокне.

Исследование энергетических характеристик лазера для записи диффузоров

Для записи диффузоров, как и ранее, использовался опытный образец иттербиевого лазера. Инициация искры выполнялась посредством контакта металлического предмета с очищенным концом волокна.

Для исследования эффекта были выбраны несколько образцов волокон:

- 1) одномодовое волокно Corning SMF-28 10/125 мкм со ступенчатым профилем показателя преломления;
- 2) волокно с двойной оболочкой Double Clad 10/130 мкм;

3) многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления Corning 62.5/125;

4) многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления OFS 100/140;

5) одномодовое волокно PM 8/125 мкм со ступенчатым профилем показателя преломления;

6) многомодовое волокно Nufern 105/125 со ступенчатым профилем показателя преломления.

Образцы 1–4 имеют сердцевину, легированную германием, образцы 5–6 имеют нелегированную сердцевину, волноводные свойства в которой обеспечиваются фторированием оболочки.

Выходная оптическая мощность лазера варьировалась в пределах от 1 до 12 Вт. При инициации оптического пробоя в каждом образце фиксировалась пороговая оптическая мощность излучения.

Для определения энергетических характеристик, а точнее, для расчета плотности проходящего потока излучения необходимо ввести параметр диаметра поля моды (ДПМ). Этот параметр измеряется в микрометрах и обозначает диаметр зоны волокна, в которой распространяется лазерное излучение. ДПМ больше диаметра сердцевины, так как часть излучения распространяется в оболочке с убывающей по экспоненте в радиальном направлении интенсивностью. На рис. 6 представлена диаграмма распределения энергии излучения по сечению волокна.

Определение диаметра поля моды связано с понятием эффективной площади поля основной моды. Для расчета ДПМ необходимо воспользоваться формулой:

$$\text{ДПМ} = 2 \cdot \sqrt{A_{\text{eff}} I \pi}, \quad (2)$$

где A_{eff} – эффективная площадь поля моды, I – профиль распределения интенсивности излучения. В свою очередь, эффективная площадь поля основной моды A_{eff} для стандартного световода со ступенчатым профилем показателя преломления определяется, исходя из радиального профиля распределения интенсивности излучения:

$$A_{\text{eff}} = 2\pi \left(\int_0^\infty I(r) r dr \right)^2 / \int_0^\infty I^2(r) r dr, \quad (3)$$

где $I(r)$ – радиальный профиль распределения интенсивности излучения моды, r – радиус в полярной системе координат.

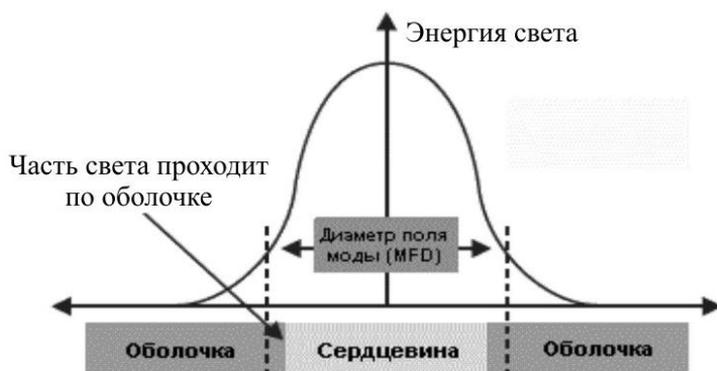


Рис. 6. Поле моды одномодового волокна [15]

Значение эффективной площади моды A_{eff} для рассматриваемых специальных волокон близко к площади сердцевины волокна S , поэтому

$$A_{eff} = S = \pi \cdot \frac{d^2}{4}. \quad (4)$$

Пороговая мощность излучения $P_{пор}$ определяется как минимальное (пороговое) значение мощности лазерного излучения, необходимого для поддержания распространения оптического разряда по волокну. Плотность мощности P_d – это отношение пороговой мощности излучения к эффективной площади поля моды лазерного излучения на данной длине волны излучения, Вт / см² :

$$P_d = \frac{P_{пор}}{A_{eff}}. \quad (5)$$

Результаты исследования энергетических характеристик приведены в табл. 4.

Анализ результатов показал:

- пороговая мощность излучения при возникновении искры в **образце 1** оказалась минимальной относительно других образцов, а плотность мощности выше, чем в **образце 3** и **образце 4**;

• в образце 2 пороговая мощность для регистрации структуры рассеяния составила 3,0 Вт. Среди других образцов с германатной сердцевиной образец 2 имеет наибольшую расчетную плотность мощности 3,8 МВт/см²;

Таблица 4

Результаты эксперимента

№ образца	Эффективная площадь поля моды ОВ, A_{eff} , см ²	Пороговая мощность, $P_{пор}$, Вт	Плотность мощности, P_d , МВт/см ²
Образцы волокон с сердцевиной легированной германием			
1	$7,8 \cdot 10^{-7}$ (SMF-28)	1,2	1,5
2	$7,8 \cdot 10^{-7}$ (DC)	3,0	3,8
3	$3,07 \cdot 10^{-5}$ (градиентное)	2,4	0,08
4	$7,8 \cdot 10^{-5}$ (градиентное)	5,0	0,06
Образцы волокон с сердцевиной без примесей			
5	$5,03 \cdot 10^{-7}$	9,8	19,5
6	$8,7 \cdot 10^{-5}$	–	–

• в образце 3 характер возникновения искры и скорость ее распространения близки к образцу 1, но рассчитанная плотность мощности на порядок меньше ~ 78 кВт/ см²;

• в образце 4 в начале процесса мощность составила 5,0 Вт, однако при распространении искры волокно начало разрушаться и процесс прекратился;

• в образце 5 выходная мощность достигла 9,8 Вт, а пороговая плотность мощности составляла 19,5 МВт/ см²;

• в образце 6 не удалось реализовать создание оптической искры, но торец волокна подвергался оплавлению в ходе загрязнения.

Согласно оценкам, приведенным в [15], для волокон с сердцевиной, легированной германием, плотность мощности P_d , при которой возникает оптический разряд, составляет более 1 МВт/см², что соответствует пороговой мощности излучения $P_{пор} \geq 1$ Вт. Для волокон с нелегированной сердцевиной плотность мощности P_d , при которой возникает оптический разряд, составляет более 40 МВт/см². Результаты наших экспериментов для волокон с легированной сердцевиной (образцы 1 – 4 в табл. 4) в целом совпадают с выводами работы [15], однако для образца 5 (см. табл. 4) с нелегированной

германием сердцевиной потребовалась в два раза меньшая плотность мощности, чем указана в [10].

Запись длинных рассеивателей на различных видах волокон и при различных мощностях лазерного излучения

Рассеивающая структура формируется в сердцевине волокна с помощью эффекта плавления сердцевины и представляет собой структуры микропузырьков или микрокапилляров. Для изготовления рассеивателей длиной до 7 см могут использоваться градиентные волокна с диаметром сердцевины до 62,5 мкм или одномодовые волокна 8/125 мкм.

Для коротких рассеивателей характерно убывание интенсивности рассеянного излучения по закону, близкому к экспоненциальному, изображенному на рис. 7 [8].

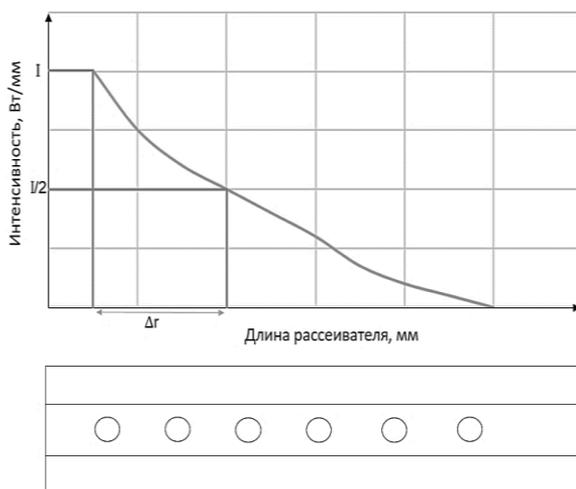


Рис. 7. Изменение интенсивности рассеивания для коротких рассеивателей

Внутренняя структура рассеивающей части квазипериодическая и имеет ограниченную длину.

Для эффективной работы длинных рассеивателей (от 10 см) необходимо, чтобы интенсивность излучения убывала по закону, близкому к линейному (рис. 8).

В этом случае рассеивающая часть длинного диффузора должна состоять из последовательности полостей (дефектов), которые могут отличаться друг от друга по форме, размерам и могут не формировать квазипериодическую структуру.

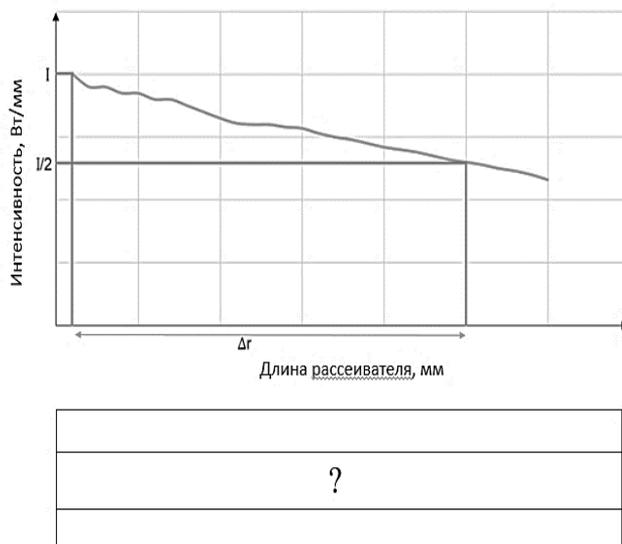


Рис. 8. График интенсивности для длинных рассеивателей

Для записи длинных рассеивателей в экспериментах использовались два типа оптического волокна: многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления Corning OM4 62,5/125 мкм и специальное волокно с двойной оболочкой Double clad 10/130 мкм.

С помощью метода инициации было записано несколько рассеивателей на разных типах волокон при разных мощностях лазерного излучения. После создания рассеивающей структуры микрополостей с помощью микроскопа Leica DMI8 и программного обеспечения была изучена внутренняя структура каждого полученного образца волоконного рассеивателя.

Микрополости рассматривались с боковой и торцевой поверхности. Для изучения структуры с торцевой поверхности необходимо сколоть волокно, очистить от загрязнений спиртовой безворсовой салфеткой и вместе со специальной шайбой вставить в микроскоп. Сфокусировать изображение и после захвата кадра поставить метки для определения диаметра. Для изучения структуры с боковой

поверхности необходимо уложить ровно волокно на подложку и для четкого изображения нанести вдоль исследуемой части эмульсию (бесцветная вязкая субстанция, необходимая для четкой фокусировки). Затем сфокусировать изображение и захватить кадр. Выбрать несколько дефектов и сделать замеры длины каждого дефекта и расстояния между концом одного дефекта и началом другого. Информация, полученная с торцевой поверхности, считалась более достоверной, так как оптическое волокно искажает волновой фронт подсветки микроскопа подобно цилиндрической линзе, что увеличивает поперечные пропорции микрополости.

Продольные геометрические размеры, такие как расстояния между дефектами и длина микропузырька, фиксируются с боковой поверхности, а его диаметр фиксируется с торцевой поверхности оптического волокна. Для каждого типа волокна измерения геометрических параметров микроструктуры были выполнены по 5 раз, надежность измерений полагалась равной 0,95. Оценка погрешности экспериментов оценивалась с помощью метода Стьюдента.

На рис. 9 приведена фотография образца исследуемого многомодового волокна (GIMM 62,5/125 мкм) с градиентным индексом, через которое прошла волна оптического разрушения. Как можно заметить, кроме пулеобразных дефектов наблюдаются вытянутые дефекты в форме капилляра с длиной от 15 до 300 мкм. Образование таких дефектов можно объяснить расширением модового пятна, увеличением диаметра зоны расплава и снижением скорости распространения плазменной искры.

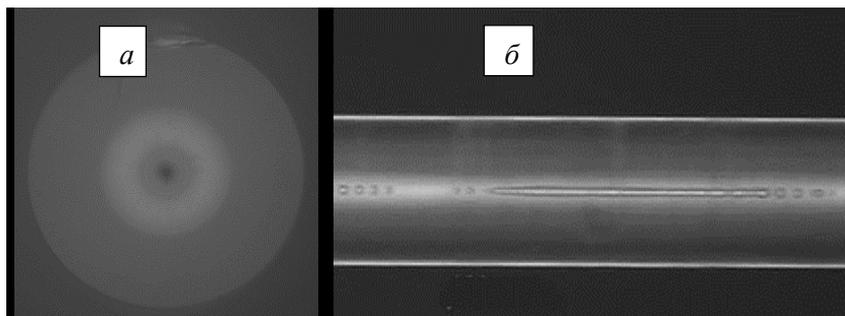


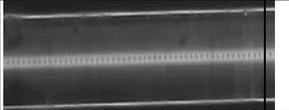
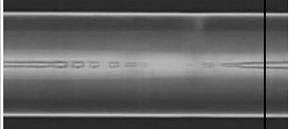
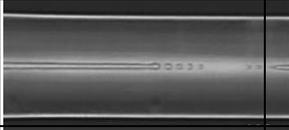
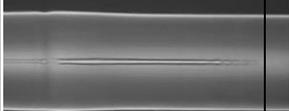
Рис. 9. Изображение внутренней структуры градиентного волокна 62,5/125 мкм: *а* – с торцевой поверхности; *б* – с боковой поверхности

Результаты измерений диаметра микрополости d , мкм, длины микрополости L , мкм, периодов микроструктур Δl , мкм, представлены в табл. 5.

В результате можно заметить, что при уменьшении мощности лазерного излучения дефекты растягиваются и сливаются в капилляр. Скорость искры сильно зависит от мощности излучения, а размер и форма дефектов зависят от скорости плазмы.

Таблица 5

Размеры микронеоднородностей в образцах
градиентных волокон

Мощность, Вт	Фото структуры	Диаметр d , мкм	Длина L , мкм	Период Δl , мкм
5		$2,81 \pm 0,05$	$6,92 \pm 0,03$	$13,22 \pm 0,09$
4		$3,02 \pm 0,07$	$10,57 \pm 0,07$	$15,40 \pm 0,08$
3		$3,42 \pm 0,06$	$237,71 \pm 0,09$	$319,11 \pm 0,03$
2		$4,54 \pm 0,04$	$317,1 \pm 0,06$	$490,24 \pm 0,11$

После замеров были сделаны фотографии свечения образцов волокна, записанных при разных мощностях. На рис. 10, а представлен образец с квазипериодической рассеивающей структурой, записанной при мощности 5 Вт. На рис. 10, б представлен образец волокна с неперидической структурой рассеянного света, записанный при мощности 2 Вт.

При визуальном анализе фотографий можно заметить, что яркость рассеянного излучения квазипериодической структуры градиентного волокна выглядит неравномерно, и на конце рассеивающей части диффузора излучение сильно ослабевает. Непериодическая

структура обеспечивает более равномерное распределение рассеянного света.

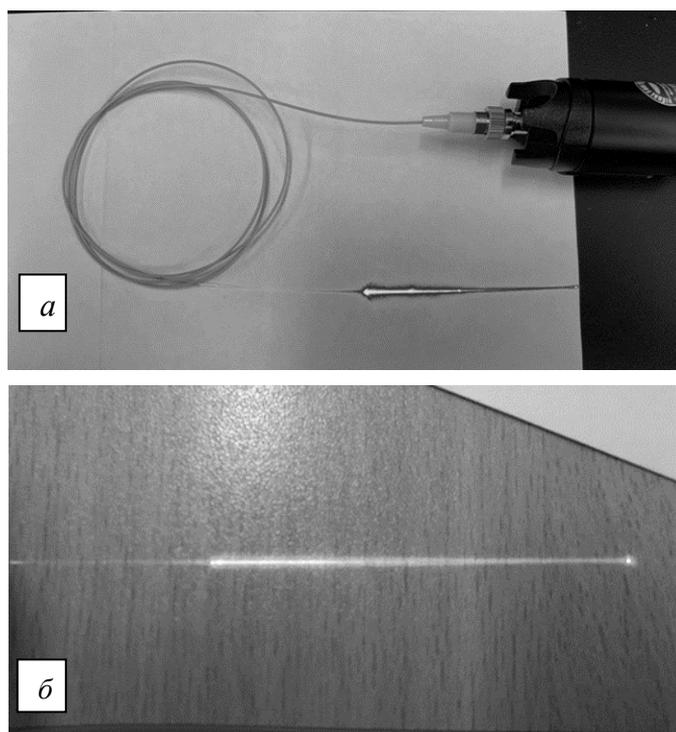


Рис. 10. Фотография свечения рассеивающей структуры градиентного волокна:
а – квазипериодическое расположение дефектов (длина структуры – 6,6 см);
б – неперриодическое расположение дефектов (длина структуры – 6,9 см)

На рис. 11 приведена фотография образца исследуемого волокна с двойной оболочкой (DC 10/130 мкм), через которое прошла волна оптического разрушения. В отличие от многомодового градиентного волокна в волокне с двойной оболочкой (DC) наблюдались преимущественно пулеобразные дефекты, которые образовывали квазипериодическую структуру. Однако с уменьшением мощности часть дефектов начинала сливаться друг с другом, квазипериодичность нарушалась. В результате были получены дефекты пулеобразной формы с длиной от 3,5 до 4,6 мкм. Образование таких дефектов можно объяснить особенностью строения волокна, где во внутреннюю оболочку уходит часть излучения, тем самым излучение перераспределяется и структура не деформируется.

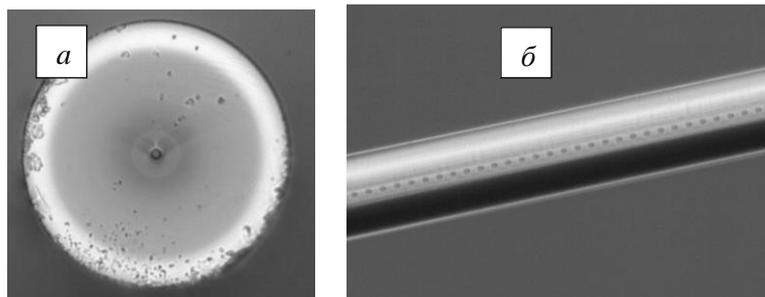


Рис. 11. Изображение внутренней структуры волокна DC 10/130 мкм: *a* – с торцевой поверхности; *б* – с боковой поверхности

С помощью метода инициации было записано несколько рассеивателей на волокне с двойной оболочкой при разных мощностях. Также были проведены измерения геометрических размеров структуры дефектов с боковой и торцевой поверхности. Форма структур и значения геометрических параметров представлены в табл. 6.

Таблица 6

Размеры микронеоднородностей в образцах волокон с двойной оболочкой

Мощность, Вт	Фото структуры	Диаметр d , мкм	Длина L , мкм	Период Δl , мкм
6		$3,51 \pm 0,02$	$3,56 \pm 0,03$	$8,52 \pm 0,11$
5		$3,59 \pm 0,05$	$3,84 \pm 0,05$	$7,79 \pm 0,07$
4		$3,78 \pm 0,02$	$4,27 \pm 0,05$	$7,65 \pm 0,05$
3		$3,82 \pm 0,04$	$4,55 \pm 0,07$	$7,43 \pm 0,06$

Анализируя табл. 6, можно заметить, что дефекты на волокне DC подверглись меньшему изменению, чем на градиентном волокне. Это связано со структурой волокон с двойной оболочкой. Сердцевина

волокна в данном случае работает как фильтр, т.е. мощность накачки дополнительно идет в первую оболочку и не сильно меняет структуру. Для того чтобы были изменения, как в градиентном волокне, необходимо уменьшать мощность, но при этом процесс записи затрудняется.

Были сделаны фотографии свечения образцов волокна ДС, записанных при разных мощностях. На рис. 12, *а* представлен образец с квазипериодической рассеивающей структурой, записанной при мощности 6 Вт. На рис. 12, *б* представлен образец волокна с непериодической структурой рассеянного света, записанный при мощности 3 Вт.

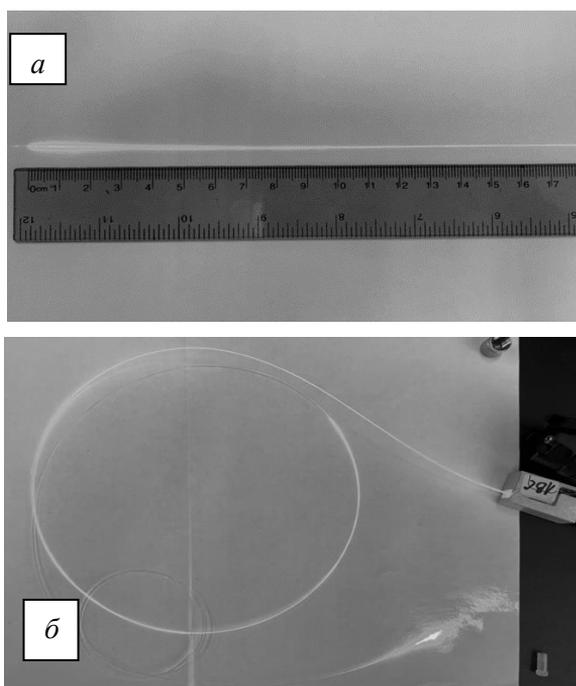


Рис. 12. Фотография свечения рассеивающей структуры волокна с двойной оболочкой: *а* – квазипериодическое расположение дефектов (длина структуры – 19,8 см); *б* – непериодическое расположение дефектов (длина структуры – 21,4 см)

При визуальном анализе фотографий можно заметить, что яркость рассеянного излучения квазипериодической структуры неравномерна вдоль волокна, но по сравнению с градиентным волокном рассеянное излучение более однородно. Непериодическая структура волокна с двойной оболочкой обеспечивает более однородное рассеянное излучение на протяжении всей рассеивающей части в отличие

от градиентного волокна, несмотря на малые изменения дефектов в структуре. Из анализа результатов записи на двух разных типах волокон следует, что образцы волокна DC дают наилучшее равномерное свечение по сравнению с образцами градиентных волокон. Длина рассеивающей части градиентного волокна уступает длине структуры волокон DC.

Для записи длинных диффузоров с характеристиками рассеяния, как на рис. 8, необходим подбор оптимальных видов дефектов для неперIODической структуры, который можно осуществить, например, с помощью варьирования мощности излучения. Как можно заметить на рис. 10 и 12, в начале структуры из микрополостей наблюдается более яркое свечение, т.е. излучение наиболее сильно рассеивается первыми дефектами диффузора.

Важную роль в равномерном распределении рассеянного излучения играет первый дефект структуры. На рис. 13 представлена фотография диффузора, на которой наблюдается интенсивное свечение в начале структуры. После первого дефекта интенсивность излучения вдоль волокна заметно снижается. Проблема первого дефекта заключается в выходе большей части рассеивающего излучения на первом дефекте, что приводит к быстрому затуханию проходящего излучения и к неравномерному рассеянию.

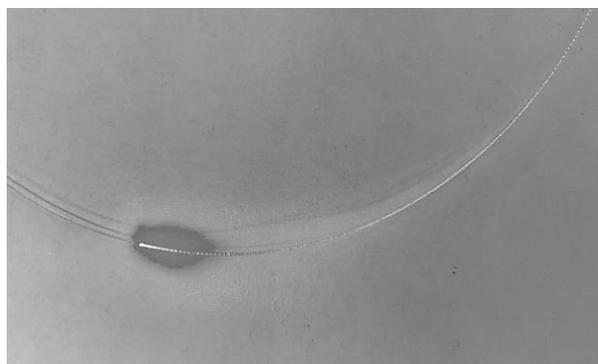


Рис. 13. Фотография диффузора со свечением от первого дефекта

Первый дефект может иметь разную форму, от которой зависит дальнейший процесс распространения рассеянного света вдоль рассеивающей части диффузора. Исследования показали, что при форме первого дефекта, близкой к сферической, отражение излучения было

сильным, поэтому длина диффузора была невелика. При вытянутой эллиптической (капиллярной) форме первого дефекта отражение от него было умеренным. Диффузор удлинялся, а интенсивность рассеянного излучения более равномерно распределялась вдоль него. Проблема первого дефекта наблюдается практически у каждого волоконного рассеивателя, изготовленного современными методами записи диффузоров. Решение данной проблемы может быть найдено с помощью математического моделирования процесса рассеяния излучения с целью нахождения оптимальной формы и размеров первого дефекта.

Заключение

Рассмотренный в статье метод оптического пробоя с последующим проплавлением сердцевины позволяет создавать рассеиватели с сохранением механической прочности и изгибоустойчивости. Главным преимуществом данного метода является возможность изготовления диффузоров с равномерным распределением интенсивности рассеянного излучения по длине волокна и сохранением прочности и гибкости волокна.

Описанные эксперименты по определению длины рассеивающей части и диаметра пузырьков в структуре для различных типов волокон позволили оценить степень рассеянного излучения. В волокне с двойной оболочкой был создан наиболее длинный диффузор – 20 см, а степень рассеяния от первого дефекта в DC составила 2,9 %, что является наименьшим процентом отражения излучения среди испытанных волокон. Кроме волокна DC для записи использовалось градиентное волокно GINN 62,5/125 мкм. Для градиентного волокна длина рассеивающей структуры составила 7,5 см, а доля отражения – 4,8 %.

Для длинных волоконно-оптических рассеивателей необходимо было записать структуру, которая способствует равномерному рассеянию излучения на длине диффузора. Была произведена запись структуры методом пробоя на градиентных волокнах и на волокнах с двойной оболочкой. Для каждого типа волокна измерены параметры полученных дефектов: диаметр, длина и период. При записи на разных волокнах были получены квазипериодические и непериодические

рассеивающие структуры, которые содержали разные виды дефектов. Для градиентных волокон при уменьшении мощности излучения наблюдалось значительное изменение формы дефектов – они растягивались и сливались в капилляр, а форма и размеры дефектов сильно зависели от скорости плазмы.

Для волокон DC форма дефектов слабо изменялась с изменением мощности излучения лазера в отличие от дефектов структуры градиентного волокна. Благодаря своей структуре сердцевина волокна DC может работать как фильтр, т.е. часть излучения отсеивается в первую оболочку. В результате излучение перераспределяется и продолжает движение вдоль волокна, не деформируя дефекты. На основании фотографий светимости квазипериодических и непериодических структур обоих типов волокон был сделан вывод о том, что непериодическая структура волокна с двойной оболочкой рассеивала свет более равномерно по длине волокна. В градиентном волокне в начале структуры наблюдалось сильное свечение, а затем интенсивность рассеянного излучения сильно снижалась. В результате было установлено, что образцы волокна DC обеспечивают наилучшее равномерное свечение. Длина рассеивающей части градиентного и одномодового волокон значительно уступает длине структуры волокон DC.

Сильная светимость в начале структуры диффузоров объясняется проблемой первого дефекта рассеивающей части.

Список литературы

1. Замедление распространения оптического разряда в градиентном оптическом волокне / Ю.А. Конин, В.А. Щербакова, Д.А. Летов, А.Ю. Петухова // Тез. докл. (X Всерос. конгр. молод. ученых; 15–18 апреля 2021 г.). – 2021.

2. Оптическое измерение скорости разряда в волокне с градиентным показателем преломления / Ю.А. Конин, В.А. Щербакова, Е.В. Мошева, А.Ю. Петухова // Прикладная фотоника. – 2020. – Т. 7, № 4. – С. 102–107.

3. 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. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128242>.

4. Влияние геометрии оптического волокна на выходное лазерное излучение / Р.Р. Кашина, Ю.А. Конин, Ю.А. Великоцкий, А.Р. Рахматуллина, А.Ю. Петухова, В.А. Щербакова, В.Б. Ромашова // *Фотоника*. – 2021. – Т. 15. – № 2. – С. 144–151.

5. Исследование характеристик оптического волокна с внутренней структурой микронеоднородностей, сформированной с помощью эффекта плавления / Ю.А. Конин, В.А. Щербакова, М.И. Булатов [и др.] // *Оптический журнал*. – 2021. – Т. 88. – № 11. – С. 80–89. DOI 10.17586/1023-5086-2021-88-11-80-89.

6. Слесаревская М.Н., Соколов А.В. Фотодинамическая терапия: основные принципы и механизмы действия // *Журнал Санкт-Петербург. гос. мед. ун-та им. акад. И.П. Павлова*. – 2012. – Т. 2, № 3. DOI.org/10.17816/uroved2324-28;

7. Лазероиндуцированная термотерапия и фотодинамическая терапия в дерматологии: возможности и перспективы / А.В. Молочков, Ю.С. Романко, К.В. Казанцева, Т.Е. Сухова, В.В. Попучиев // *Альманах клинической медицины*. – М., 2014. – С. 30–35.

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

9. M.F. Domingues, T.B. Paixão, E.F.T. Mesquita, N. Alberto, A.R. Frias, R.A.S. Ferreira, H. Varum, P.F.C. Antunes // *IEEE Sensors J.* – 2015. – Vol. 15. – P. 5654.

10. Hand D.P., Russell P.St.J. Solitary thermal shock waves and optical damage in optical fibers: the fiber fuse // *Opt. Lett.* – 1988. – Vol. 13. – P. 767–769.

11. C.R. Liao, T.Y. Hu, D.N. Wang // *Opt. Express*. – 2012. – Vol. 20, №20. – P. 22813.

12. Kashyap R., Blow K.J. Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres // *Electron. Lett.* – 1988. – Vol. 24, № 1. – P. 47–49.

13. Детонационно-подобный режим разрушения волоконных световодов под действием интенсивного лазерного излучения /

Е.М. Дианов, В.Е. Фортов, И.А. Буфетов, В.П. Ефремов, А.А. Фролов, М.Я. Щелев, В.И. Лозовой // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т. 83, Вып. 2. – С. 84–88.

14. Reference Guide to Fiber Optic Testing / J. Laferriere, G. Lietaert, R. Taws, S. Wolszczak // Second edition. – JDS Uniphase Corporation, 2011.

15. Буфетов И.А., Дианов Е.М. Оптический разряд в волоконных световодах // УФН. – 2005. – 175:1. – 100–103; Phys. Usp. – 48:1. – P. 91–94.

References

1. Konin Iu.A., Shcherbakova V.A., Letov D.A., Petukhova A.Iu. Zamedlenie rasprostraneniia opticheskogo razriada v gradientnom opticheskom volokne [Slowing down the propagation of an optical discharge in a graded optical fiber]. *Tezisy dokladov (X Vserossiiskii kongress molodykh uchenykh, 15-18 April 2021)*, 2021.

2. Konin Iu.A., Shcherbakova V.A., Mosheva E.V., Petukhova A.Iu. Opticheskoe izmerenie skorosti razriada v volokne s gradientnym pokazatelem prelomleniia [Optical measurement of the discharge rate in graded-index fiber]. *Прикладная фотоника*, 2020, vol. 7, no. 4, pp. 102-107.

3. 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, available at: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128242>.

4. Kashina R.R., Konin Iu.A., Velikotskii Iu.A., Rakhmatullina A.R., Petukhova A.Iu., Shcherbakova V.A., Romashova V.B. Vliianie geometrii opticheskogo volokna na vykhodnoe lazernoe izluchenie [Influence of Optical Fiber Geometry on Output Laser Radiation]. *Fotonika*, 2021, vol. 15, no. 2, pp. 144-151.

5. Konin Iu.A., Shcherbakova V.A., Bulatov M.I. et al. Issledovanie kharakteristik opticheskogo volokna s vnutrennei strukturoi mikroneodnorodnosti, sformirovannoi s pomoshch'iu effekta plavleniia [Investigation of the characteristics of an optical fiber with an internal structure of microinhomogeneities formed using the melting effect]. *Opticheskii zhurnal*, 2021, vol. 88, no. 11, pp. 80-89. DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-11-80-89

6. Slesarevskaia M.N., Sokolov A.V. Fotodinamicheskaia terapiia: osnovnye printsipy i mekhanizmy deistviia [Photodynamic therapy: basic principles and mechanisms of action]. *Pervyi Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi meditsinskii universitet im. akademika I. P. Pavlova*, 2012, vol. 2, no. 3. DOI.org/10.17816/uroved2324-28

7. Molochkov A.V., Romanko Iu.S., Kazantseva K.V., Sukhova T.E., Popuchiev V.V. Lazeroindutsirovannaia termoterapiia i fotodinamicheskaia terapiia v dermatologii: vozmozhnosti i perspektivy [Laser-induced thermo-therapy and photodynamic therapy in dermatology: opportunities and prospects]. *Al'manakh klinicheskoi meditsiny*. Moscow, 2014, pp. 30-35.

8. Tokareva Ia.D., Konin Iu.A., Konnov K.A., Varzhel' S.V., Dmitriev A.A., Bochkova S.D. Eksperimental'noe issledovanie vliianiia opticheskoi moshchnosti na formirovanie struktury volokonno-opticheskogo rasseivatelia, poluchennogo putem plavleniia serdtseviny svetovoda [Experimental study of the effect of optical power on the formation of the structure of a fiber-optic diffuser obtained by melting the fiber core]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 494-499. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-494-499

9. Domingues M.F.F., Paixão T.B., Mesquita E.F.T., Alberto N., Frias A.R., Ferreira R.A.S., Varum H., Antunes P.F.C., André P.S. Liquid hydrostatic pressure optical sensor based on micro-cavity produced by the catastrophic fuse effect. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10), pp. 5654–5658, DOI: 10.1109/JSEN.2015.2446534

10. Hand D.P., Russell P.St.J. Solitary thermal shock waves and optical damage in optical fibers: the fiber fuse. *Opt. Lett.*, 1988, vol. 13, pp. 767-769.

11. Liao C.R., Hu T.Y., Wang D.N. 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, 22813 p.

12. Kashyap R., Blow K.J. Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres. *Electron. Lett.*, 1988, vol. 24, no. 1, pp. 47-49.

13. Dianov E.M., Fortov V.E., Bufetov I.A., Efremov V.P., Frolov A.A., Shchelev M.Ia., Lozovoi V.I. Detonatsionno-podobnyi rezhim razrusheniia volokonnykh svetovodov pod deistviem intensivnogo lazernogo izlucheniia [Detonation-like mode of destruction of optical fibers

under the action of intense laser radiation]. *Pis'ma v ZhETF*, 2006, vol. 83, iss. 2, pp. 84-88.

14. Laferriere J., Lietaert G., Taws R., Wolszczak S. "Reference Guide to Fiber Optic Testing", Second edition, 2011, JDS Uniphase Corporation.

15. Bufetov I.A., Dianov E.M. Opticheskii razriad v volokonnykh svetovodakh [Optical discharge in optical fibers]. *UFN*, 2005, 175:1, 100-103; *Phys. Usp.*, 48:1, pp. 91-94.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Получена: 12.01.2022

Одобрена: 22.03.2022

Принята к публикации: 01.09.2022

Funding: The study was not sponsored.

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

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

Received: 12/01/2022

Approved: 22/03/2022

Accepted for publication: 01/09/2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: 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.

Please cite this article in English as: Petukhova A.Yu., Konin Yu.A., Perminov A.V. Obtaining a Scattering Structure by the Method of Optical Breakdown in Special Fibers / Single-frequency high-peak-power pulsed fiber amplifiers at 1.55 μm // Applied photonics, 2022, no. 1, pp. 26-53.