

УДК 536.248, 536.422.
PACS 02.60.Cb; 05.70.-a

Математическое моделирование температурных полей при пробое оптического волокна

В. А. Старикова^{1,2†}, Ю. А. Конин^{1,2,3‡}, А. Ю. Петухова^{1,2}, А. В. Перминов¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

† scherbackova.vict@mail.ru

‡ yuri-konin@yandex.ru

Рассматривается математическая модель оптического пробоя сердцевины оптического волокна, основанная на уравнении теплопроводности. В результате пробоя образуется плазменная искра, которая впоследствии движется вдоль волокна. Задача решается в осесимметричной постановке. Расчетная область состоит из четырех элементов с различными теплофизическими свойствами, на границах которых выполняются условия сопряжения. Слагаемое, описывающее источник тепла в модели, определяется длиной волны излучения и показателями преломления сердцевины и оболочки, а также включает в себя поглощение излучения на высвободившихся электронах при термической ионизации кварцевого стекла. Получены распределения температурных полей в оптическом волокне. Выполнена оценка скорости распространения поля температуры. На основании расчетов можно оценить время возникновения оптического пробоя и минимальную мощность при различных длинах волн вводимого в волокно излучения.

Ключевые слова: математическое моделирование; оптический пробой; оптическое волокно; уравнение теплопроводности

Поступила в редакцию 16.01.2024; после рецензии 23.01.2024; принята к опубликованию 23.01.2024

A mathematical model of optical breakdown of an optical fiber core

V. A. Starikova^{1,2}, Yu. A. Konin^{1,2,3}, A. Yu. Petukhova^{1,2}, A. V. Perminov¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

² Perm Research and Production Instrument-Making Company (PNPPK), Perm, Russia

³ ITMO University, St. Petersburg, Russia

† scherbackova.vict@mail.ru

‡ yuri-konin@yandex.ru

This article describes a mathematical model of an optical fiber core breakdown based on the thermal conductivity equation. The problem is solved in an axisymmetric formulation. The computational domain consists of four elements with different thermophysical properties at the boundaries of which conjugation conditions are fulfilled. The term describing a heat source in the model is defined by a radiation wavelength and refraction indexes of the core and the shell. It also includes absorption coefficient showing the absorption of radiation resulting from electron release due to the thermal ionization of a Ge-doped silica core. The distributions of temperature fields in optical fiber are obtained. The temperature field propagation velocity is estimated. Based on the calculations, it is possible to estimate the time of occurrence of optical breakdown for different wavelengths of radiation introduced into the fiber.

Keywords: optical fiber; optical breakdown; thermal conductivity equation; mathematical modeling

Received 16 January 2024; revised 23 January 2024; accepted 23 January 2024

doi: 10.17072/1994-3598-2024-1-24-32

1. Введение

Эффект оптического пробоя (плавления) сердцевины оптического волокна, оптический разряд или оптическая искра (fuse effect) – это феномен, возникающий в волоконно-оптических линиях при распространении излучения большой плотности мощности. В результате оптического пробоя в волокне возникает движущийся вдоль него навстречу источнику излучения плазменный разряд (искра), который разрушает значительные участки оптоволоконных линий (рис. 1). Впервые данный эффект был описан Кашьяпом и Блоу в 1987–1988 г. [1–3].

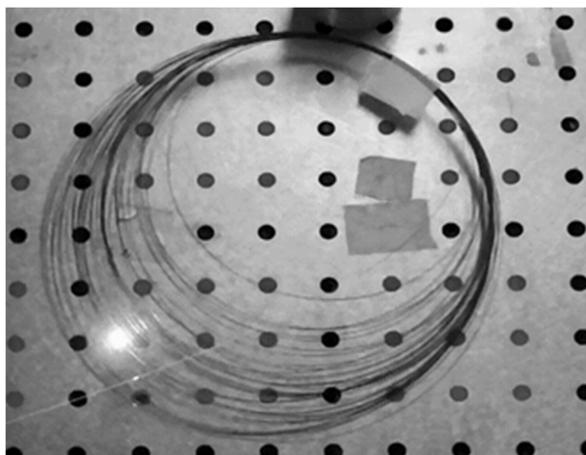


Рис. 1. Плазменная искра, движущаяся в оптическом волокне

В настоящее время изучение процессов пробоя оптического волокна и движения плазменной искры по нему является одной из актуальных задач в области разработки оптоволоконных устройств. Особый интерес в этой связи представляют квазипериодические структуры, возникающие в результате прохождения плазменной искры. Эти структуры могут быть использованы в качестве чувствительных элементов для сенсоров или рассеивателей излучения.

Известно несколько работ, связанных с явлением эффекта плавления, где описываются его физическая сущность и последствия для оптических волокон, а также методы его изучения. В [4] описываются оптический разряд в световодах и его взаимодействие с материалом волокна. Механизм возникновения оптического пробоя в волоконном световоде тесно связан с нелинейным поглощением кварцевого стекла [4–6]. Если плотность мощности достаточна для поддержания оптического пробоя, то возникающий очаг плазмы разгорается и начинает распространяться вдоль сердцевины волокна

[7, 9]. В работах *Y. Shuto* [5–8] изучается явление эффекта плавления, приводящее к уничтожению оптических волокон под влиянием высокой мощности лазерных импульсов. В статье [8] приводится описание формирования полостей в волокнах и их динамики в процессе распространения явления по волокну.

В целом, наиболее значимый вклад в исследование эффекта плавления волокна на фундаментальном уровне был внесен работами *Y. Shuto* [5–8], а также *S. Todoroki* [9–12]. Последний посвятил свои исследования экспериментальному подтверждению теоретических наработок. Наиболее интересной статьёй *S. Todoroki* в контексте настоящего исследования является работа [8], в которой были экспериментально исследованы времена инициации эффекта плавления волокна. Минимальное время запуска реакции составило 0.18 с, а минимальная мощность, при которой удалось запустить реакцию в волокне SMF-28, составила 0.4 Вт [8].

Статьи [9, 10] посвящены исследованию инициации эффекта оптического пробоя при наличии электрического разряда или загрязнения коннекторов оптического волокна. Приведенные источники углубляют наше понимание явления плавления волокна и могут быть полезны для разработки мер по его предотвращению или управлению.

Размеры полученной в ходе прохождения оптического разряда, внутренней квазипериодической структуры оптического волокна зависят от мощности излучения, его модового состава и типа волокна [11–13]. Как уже говорилось выше, эти структуры возможно использовать как чувствительный элемент для волоконно-оптического датчика на основе интерферометра Фабри–Перо или волоконно-оптического рассеивателя излучения [14–15]. Для различных датчиков и оптических рассеивателей излучения выдвигаются различные требования к геометрическим параметрам внутренней структуры [16–17].

В статье представлена относительно простая математическая модель начальной стадии процесса плавления (пробоя) оптического волокна, основанная на уравнении теплопроводности. В рамках модели исследуется распределение температурного поля в волокне, которое считается твердым телом, т.е. фазовыми переходами пренебрегается. В результате пробоя возникает плазменная искра. Расчёты позволяют оценить время формирования плазменной искры, которая спустя некоторое время должна отрываться от торца волокна и двигаться навстречу источнику излучения. Процесс движения плазменной искры по волокну на данном этапе не

рассматривался. Все расчеты выполнялись в программном пакете COMSOL Multiphysics®.

2. Математическая модель инициации плазменной искры

Оптическое волокно имеет цилиндрическую форму, поэтому разумно для моделирования использовать цилиндрические координаты, где ось z направлена вдоль оси волокна, ось r – по его радиусу. Расчетная область представлена на рис. 1. В рамках модели определялось поле температуры, не зависящее от полярного угла. Задача решалась в осесимметричной постановке, поэтому все расчеты проводились в плоскости « z – r » в половине волокна, на оси которого выполнялись условия симметрии решения. Расчетная область на рис. 1 состоит из пяти элементов, обладающих различными теплофизическими свойствами. На границах сопряжения элементов выполняются условия теплового баланса. О них будет сказано ниже.

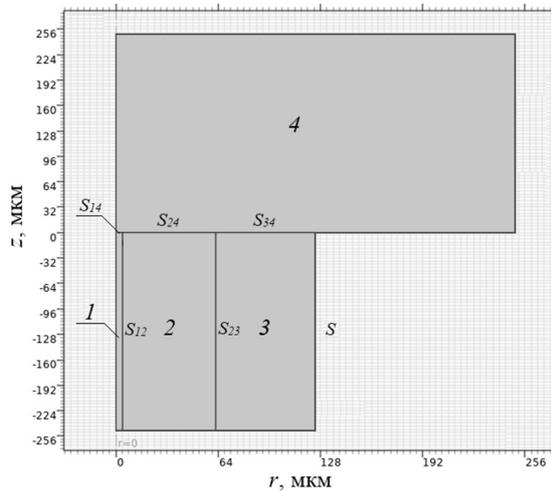


Рис. 2. Схема расчетной области, состоящая из сердцевины (1), оболочки (2), защитного покрытия оптического волокна (3) и металлической пластины (4)

Исследуется отрезок одномодового волокна со ступенчатым профилем показателя преломления SMF-28e (см. рис. 1), состоящий из сердцевины (1), оболочки (2) и защитного покрытия (3). Волокно плотно прижато к инициатору, в данном случае, пластине из дюралюминия (4). Начальная и окружающая температуры волокна и металлической пластины полагаются равными $T_0 = 293$ К.

В расчетах физические свойства оптического волокна задавались согласно спецификации волокна SMF-28e. Пластина дюралюминия Д16 – по ГОСТ 4784-97 или сплава 2024 международной организации по стандартизации (ISO).

Сердцевина волокна (1), его оболочка (2), защитно-упрочняющее покрытие (3) и пластина дюралюминия (4) на рис. 2 имеют границы контактов между собой S_{12} , S_{14} , S_{23} , S_{24} , S_{34} . Наружная граница

волокна и металлической пластины с окружающей средой обозначена S .

В рамках математической модели распределение температурного поля $T(r, z, t)$ в всей расчетной области (рис. 1) описывается уравнением теплопроводности [18]:

$$\rho_i c_{pi} \frac{\partial T}{\partial t} = k_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ – номера элементов в расчетной области (рис. 1), ρ_i – плотности [кг/м³], c_{pi} – удельные теплоемкости [Дж/(кг·К)], k_i – теплопроводности материалов [Вт/(м·К)], Q – источник тепла, интенсивность которого определяется заводимым в волокно оптическим излучением [Вт/м³].

Теплофизические параметры материалов, такие как плотности, удельные теплоемкости, теплопроводности задавались для каждого элемента расчетной области как некоторые функции температуры. Вид этих функций выбирался из библиотеки COMSOL Multiphysics®. Отдельный интерес представляют сердцевина и оболочка оптического волокна, распределение температуры в которых, может дать оценку временным и геометрическим параметрам возникновения плазменного очага. Необходимо отметить, что коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность кварцевого стекла имеют сильную нелинейную зависимость от температуры, таким образом уравнение теплопроводности (1) является фактически нелинейным.

На границах S_{12} , S_{14} , S_{23} , S_{24} , S_{34} соприкасающихся элементов расчетной схемы применяются условия сопряжения или баланса тепловых потоков:

$$\left(k_i \frac{\partial T}{\partial r} l_r + k_i \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right)_{S_{ij}} = \left(k_j \frac{\partial T}{\partial r} l_r + k_j \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right)_{S_{ij}}, \quad (2)$$

где l_r и l_z – проекции единичного вектора нормали к соответствующим поверхностям на координатные оси z и r . Внешняя граница расчетной области S считалась идеально теплопроводной и на ней задавалась температура окружающей среды $T_0 = 293$ К.

Слагаемое Q в уравнении (2) описывает тепловыделение, возникающее из-за взаимодействия оптического излучения, распространяющегося по волокну, с металлической пластиной, прижатой к торцу волокна. Полагается, что в месте контакта торца волокна и пластины воздушного зазора нет. После отражения в сердцевине образуется стоячая волна, энергия которой нелинейно поглощается веществом вблизи границы контакта. Интенсивность данного источника тепла зависит от оптической мощности, длины волны излучения и свойств волокна и рассчитывается по формуле:

$$Q = \alpha \frac{P}{A_{eff}} \cdot \Gamma, \quad (3)$$

где $\alpha = (\alpha_0 + \alpha_e)$ – коэффициент поглощения волокна [м⁻¹], P – вводимая мощность излучения [Вт]; Γ –

стандартное распределение Гаусса; A_{eff} – эффективная площадь модового пятна [м^2].

При детальном рассмотрении теплопроводности кварцевого стекла необходимо отметить, что теплообмен осуществляется двумя основными способами: теплопроводностью и электромагнитным излучением (лучистый теплообмен). В первом случае теплоперенос осуществляется за счет движения структурных элементов физической системы (молекул, ионов, электронов). Во втором случае перенос тепла объясняется способностью тел поглощать, отражать и излучать электромагнитное излучение. Данный механизм теплопереноса вносит существенный вклад в коэффициент поглощения α , который представляет собой сумму коэффициента поглощения при нормальных условиях α_0 (при температурах близких к 293 К) и коэффициента поглощения электронного газа α_e , появившегося в кварцевом волокне при температуре выше 1273 К. Коэффициент $\alpha_0 \approx 1 \text{ м}^{-1}$ [5] описывает нелинейное поглощение излучения на хаотично расположенных в волокне дефектах типа SiE' или GeE'. Такие дефекты или XE' центры (вместо X может быть германий Ge или кремний Si) связаны с образованием кислородных дырок в связях: Si - X \rightarrow Si-O-X. Дефекты появляются в сердцевине волокна в результате химических реакций при его изготовлении и распределяются в сердцевине хаотично [18, 19].

При нагревании концентрация GeE' центров остается постоянной, в то время как при температуре, превышающей 1000 К, концентрация SiE' снижается до нуля [9]. Когда температура сердцевины достигает 1273 К начинается термическая ионизация центров типа GeE' [19]. В результате в сердцевине волокна образуется электронный газ, т.е. большое количество свободных электронов. Концентрация высвободившихся электронов совпадает с концентрацией ионов GeE' центров.

Согласно [20] в волокне, легированном германием 4 мол%, концентрация ионов GeE' центров вычисляется следующим образом:

$$n_{GeE'} = n_p \exp\left(-\frac{E_f}{k_B T}\right), \quad (4)$$

где $E_f = 2.5 \text{ эВ}$ – энергия формирования GeE'; $n_p = 1.72 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ – концентрация GeE' центров при нормальной температуре; k_B – постоянная Больцмана [Дж/К]. Проводимость кварца за счет свободных электронов будет равна:

$$\sigma = e\mu_e n_e = e\mu_e n_p \exp\left(-\frac{E_f}{k_B T}\right), \quad (5)$$

где μ_e – это дрейфовая подвижность электронов, она варьируется от 7 до 63 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, расчетах эта величина полагалась равной 50 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [6], e – модуль заряда электрона [Кл], концентрация электронов $n_e = n_{GeE'}$. С учетом (5) коэффициент поглощения электронного газа в волокне в формуле (3) будет равен:

$$\alpha_e = \frac{k_B \cdot n_1}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_0 c_0 \sigma}{k_0 n_1^2}\right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \sim \frac{\mu_0 c_0 \sigma}{2n_1} = \frac{\mu_0 c_0}{2n_1} e\mu_e n_p \exp\left(-\frac{E_f}{k_B T}\right), \quad (6)$$

где n_1 – коэффициент преломления в сердцевине, μ_0 – магнитная постоянная; c_0 – скорость света в вакууме; k_0 – волновое число в вакууме.

Эффективная площадь модового пятна в (3) рассчитывается с помощью эффективного радиуса для каждой из длин волн [21]:

$$A_{eff} = \pi a^2 \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6}\right)^2, \quad (7)$$

где a – радиус сердцевины волокна. Параметр V определяет число переносимых мод заданного излучения в данной геометрии оптического волокна и рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (8)$$

где λ – длина волны переносимого излучения [нм]; n_1 – показатель преломления сердцевины волокна [ед]; n_2 – показатель преломления оболочки волокна [ед].

В табл. 1 представлены значения длин волн значения параметров V и A_{eff} , рассчитанные соответственно по формулам (7) и (6).

Таблица 1. Значения вводимых параметров для различных длин волн

λ , нм	V , ед	A_{eff} , мкм ²
1080	2.76	13.25
1310	2.17	15.29
1550	1.88	17.27
2050	1.39	23.49

Во всей расчетной области (рис. 1), кроме области вблизи границы S_{14} , где происходит интенсивный нагрев, вводилась расчетная сетка с одинаковыми по размерам элементами 2.5 мкм. Вблизи границы S_{14} выделялась небольшая область с линейными размерами равными радиусу сердцевины волокна, где для наилучшего разрешения поля температуры происходило измельчение расчетной сетки.

В ходе тестовых расчетов исследована сходимость результатов при увеличении количества сеточных элементов. Для этого была построена зависимость максимальной температуры T_{max} , которая достигается в волокне через 1 физическую миллисекунду, от количества сеточных элементов в расчетной области. Решение стабилизировалось около значения $T_{max} = 177200 \text{ К}$ при общем количестве элементов расчетной сетки более, чем 15000. При этом минимальный размер ячейки сетки составил 0.03 мкм, что позволяет проводить вычисления в рамках приближения сплошной среды.

3. Результаты моделирования

В ходе математического моделирования на основании уравнений (1)–(8) было рассчитано температурное поле в оптическом волокне и дюралюминиевой пластине и определены границы температурных фронтов, соответствующих областям, где возможно возникновение различных фазовых состояний кварцевого стекла, а именно: жидкое, газообразное и плазма. Температуре плавления кварца (оптического волокна) соответствует значение 1440 К, парообразованию в волокне соответствует температура 2706 К, образование плазмы начинается с температуры 5000 К.

На рис. 3 представлен пример рассчитанного температурного поля для излучения с длиной волны $\lambda_0 = 1080$ нм и мощностью $P = 1$ Вт через промежуток времени 1 мс после ввода излучения. Промежуток времени был выбран из экспериментальных данных [11]. Как видно, температурный фронт плазмообразования выходит из области сердцевины волокна в область оболочки, не достигая при этом защитно-упрочняющего покрытия, что соответствует экспериментальным данным [16].

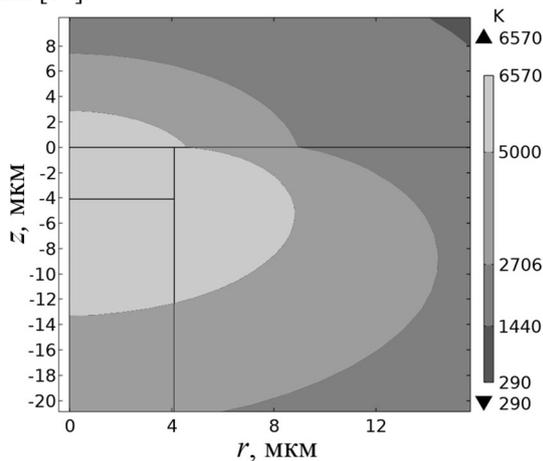
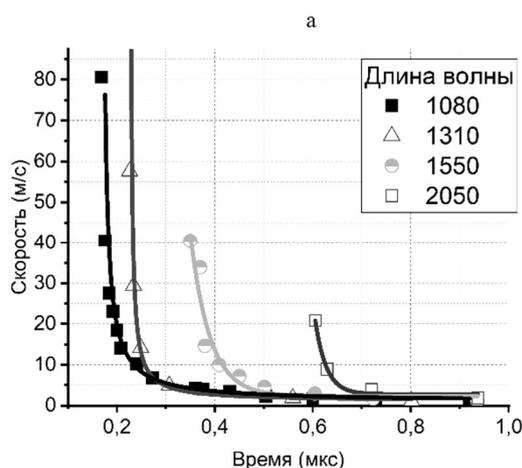


Рис. 3. Распределение поля температуры вблизи области нагрева через 1 с после ввода излучения в волокно



В рамках построенной модели можно оценить движение фронта плазмообразования, а именно его радиальную и осевую скорости в зависимости от времени. Графики зависимостей скоростей фронта плазмообразования от времени для четырех длин волн представлены на рис. 4

Как видно из рис. 4, радиальная и осевая скорости плазменного фронта имеют схожий характер: максимальная скорость соответствует моменту возникновения плазменного фронта, после чего скорость резко уменьшается до нуля. Стоит отметить, что максимальные значения радиальной скорости больше, чем соответствующие по длине волны максимальные значения осевой скорости плазменного фронта. При этом радиальная скорость снижается быстрее, чем осевая, что объясняется волновыми свойствами оптического волокна.

Для всех исследованных длин волн были измерены характерные времена фронта плазмообразования: t_0 – время возникновения области плазмообразования, t_1 – время достижения фронтом плазмообразования границы сердцевина-оболочка S_{12} , t_2 – время релаксации фронта плазмообразования, когда движение фронта прекращается. Все измеренные времена приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характерные времена фронта плазмообразования

λ , нм	1080	1310	1550	2050
t_0 , мкс	0.17	0.23	0.35	0.61
t_1 , мкс	0.73	0.92	1.1	1.2
t_2 , мкс	0.92	1.1	1.2	1.5

Эксперименты не позволяют оценить время возникновения оптического пробоя, однако эксперименты показывают, что размеры полученных после прохождения плазменной искры дефектов не превосходят размеров сердцевины волокна [16]. Это обстоятельство позволяет предположить, что оптический пробой, как процесс движения плазменной искры, начинается в промежутке времени от t_1 до t_2 .

В результате расчетов для различных длин волн были оценены минимальные значения мощностей

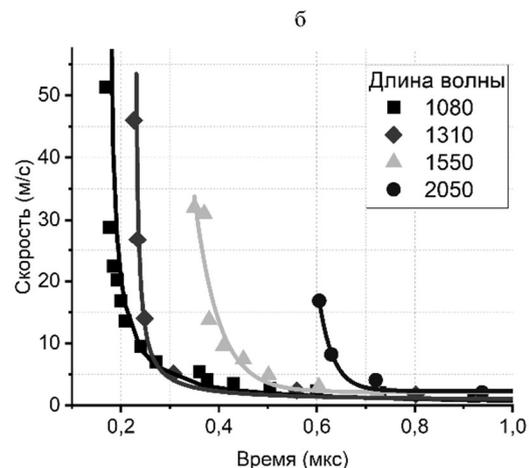


Рис. 4. Зависимости скоростей фронта плазмообразования от времени: а – радиальная скорость, б – осевая скорость

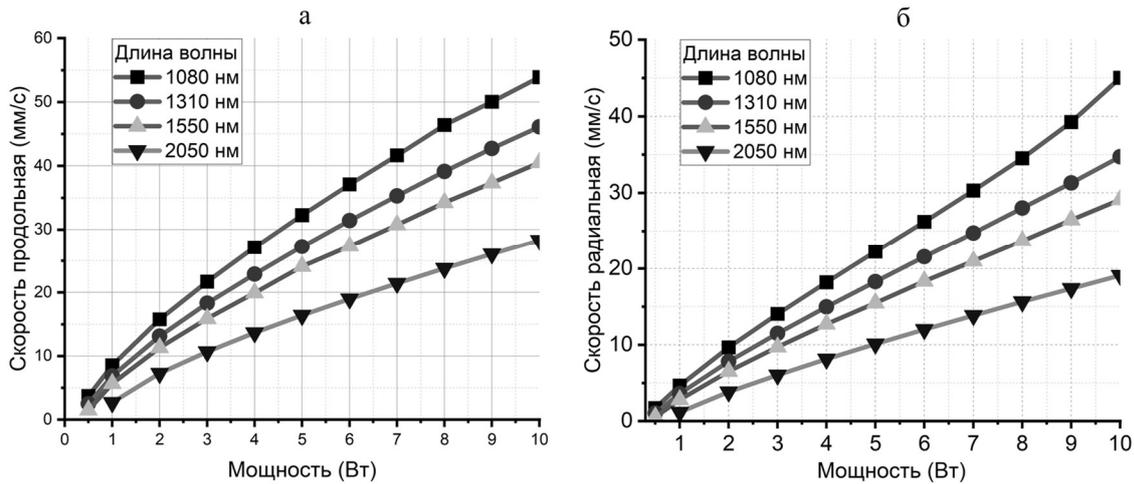


Рис. 5. Зависимости средних скоростей фронта плазмообразования от мощности: а – радиальная скорость, б – осевая скорость

P_{min} , необходимых для инициации оптического пробоя. Результаты расчетов приведены в табл. 3, из которой видно, что минимальная мощность P_{min} , необходимая для возникновения оптического пробоя, увеличивается с ростом длины волны λ .

Таблица 3. Минимальная мощность, необходимая для возникновения оптического пробоя

λ , нм	1080	1310	1550	2050
P_{min} , мВ	270	335	400	630

Необходимо отметить, что минимальная мощность (см. таб. 3) прямо зависит от длины волны подаваемого излучения. Так же в рамках построенной модели можно оценить зависимости радиальной и осевой скоростей в зависимости от подаваемой оптической мощности. Для этого были рассчитаны средние скорости в промежутке времени от t_1 до t_2 . Графики зависимостей средних скоростей фронта плазмообразования от времени для четырех длин волн представлены на рис. 5. Радиальная и осевая скорости возрастают с увеличением мощности оптического излучения и уменьшаются с ростом длины волны подаваемого излучения.

Так же можно отметить, что существует минимальное значение оптической мощности, при которой инициируется оптический пробой.

Однако стоит отметить, что при остановке фронта плазмообразования продолжается движение фронтов плавления и парообразования, возникающих в сердцевине волокна. На рис. 6 представлен пример рассчитанного температурного поля для излучения с длиной волны $\lambda_0 = 1080$ нм и мощностью $P = 1$ Вт в разные моменты времени: через 0.01 мс и 1.10 мс после ввода излучения в волокно.

Как видно из рис. 6, границы плазмообразования не изменились. Это объясняется тем, что оба времени больше, чем время релаксации фронта плазмообразования t_2 . В то время как границы плавления и парообразования сдвинулись в область оболочки волокна.

4. Заключение

В работе была разработана математическая модель, описывающая стадию возникновения оптического пробоя в одномодовом оптическом волокне. Были определены границы температурных фронтов, соответствующих областям, где возможно воз-

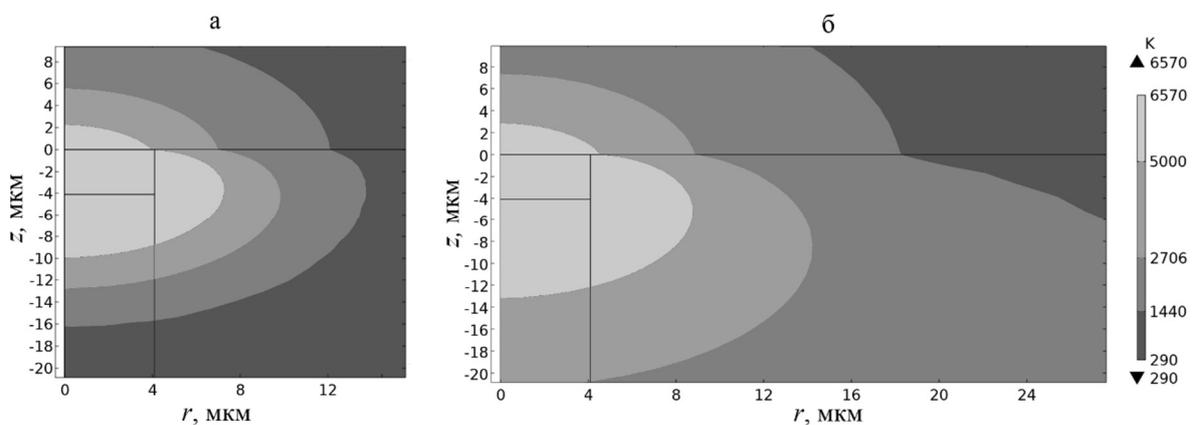


Рис. 6. Распределение поля температуры: а – через 0.01 мс после ввода излучения, б – через 1.10 мс после ввода излучения в волокно.

никновение различных фазовых состояний кварцевого стекла, а именно: жидкое, газообразное и плазма. Были оценены зависимости радиальной и осевой скоростей фронта плазмообразования от времени, и определен промежуток времени возникновения оптического пробоя для разных длин волн.

В результате расчетов для излучения разных длин волн были получены зависимости радиальной и осевой скоростей фронта плазмообразования от мощности. Получены минимальные значения мощностей излучений, необходимые для инициации оптического пробоя. При минимальных мощностях оптического излучения время инициации плазменной искры для различных длин волн оказывается примерно одинаковым и равным 1 мс.

Результаты настоящей работы могут быть применены для прогнозирования минимальных мощностей вводимого в волокно оптического излучения, необходимых для возникновения оптического пробоя в волокне при различных длинах волн. Сформулированная в работе математическая модель позволяет оценить время пробоя волокна (инициации плазменной искры), а также радиальный и продольный размеры плазменной искры и других областей прогрева волокна. Для улучшения прогностических свойств модели и уточнения результатов расчетов необходим более корректный учет теплофизических свойств материала волокна в областях, где реализуются различные фазовые состояния вещества. Кроме того, имеет смысл рассмотреть случай не идеального контакта волокна с металлической пластиной.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00169.

Список литературы

1. *Kashyap R.* Self-propelled self-focusing damage in optical fibers // Proc. of Xth Inter. Conf. on Lasers, Lake Tahoe, USA. 1987. P. 859–866.
2. *Kashyap R., Blow K. J.* Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres // Electron. Lett. 1988. Vol. 24. № 1. P. 47–49. DOI: 10.1049/el:19880032.
3. *Kashyap R., Sayles A. H., Cornwell G. F.* Heat flow modeling and visualization of catastrophic self-propagating damage in single-mode optical fibres at low powers // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2966. P. 586–591.
4. *Bufetov I. A., Dianov E. M.* Optical discharge in fibre light guides // Adv. of Physical Sciences. 2005. Vol. 175. № 1. P. 100–103.
5. *Shuto Y.* Elements of Fiber Fuse Phenomena. Design Egg, Inc., 2023. 390 p.
6. *Shuto Y., Yanagi S., Asakawa S., Kobayashi M., Nagase R.* Fiber fuse phenomenon in step-index single-mode optical fibers // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2004. Vol. 40. № 8. P. 1113–1121. DOI: 10.1109/JQE.2004.831635.
7. *Shuto Y.* Cavity pattern formation and its dynamics of fiber fuse in single-mode optical fibers // J. Informatics Math. Sci. 2020. Vol. 12. № 4. P. 271–288. DOI: 10.26713/jims.v12i4.1459.
8. *Shuto Y.* End face damage and fiber fuse phenomena in single mode fiber optic connectors // J. Photonics. 2016. Vol. 2016, 2781392. DOI: 10.26713/jims.v12i4.1459.
9. *Todoroki S.* Quantitative evaluation of fiber fuse initiation probability in typical single-mode fibers / Proc. of Optical Fiber Communications Conf. and Exhibition, Los Angeles, USA. 2015. P. 859–866. DOI: 10.1364/OFC.2015.W2A.33.
10. *Todoroki S.* Quantitative evaluation of fiber fuse initiation with exposure to arc discharge provided by a fusion splicer // Scientific Reports. 2006. Vol. 6, 25366. DOI: 10.1038/srep25366
11. *Todoroki S.* Fiber fuse propagation modes in typical single-mode fibers // OSA Technical Digest. 2013, JW2A.11. DOI: 10.1364/NFOEC.2013.JW2A.11.
12. *Todoroki S.* Modes and threshold power of fiber fuse propagation // IEICE Trans. Commun. 2013. Vol. J96-B. № 3. P. 243–248.
13. *Hanzawa T., Kurokawa K., Tsujikawa K., Mori T., Wada M., Yamamoto F.* Fiber fuse propagation in LP11 mode in few-mode fiber // OSA Technical Digest. 2015, W4I.5.
14. *André P. S., Domingues M. F., Antunes P., Alberto N., Frias A. R., Ferreira R. A. S.* Sensors based on recycled optical fibers destroyed by the catastrophic fuse effect // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9286, 92862U. DOI: 10.1117/12.2060191.
15. *Domingues A. P., 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 // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9634, 96345M. DOI: /10.1117/12.2195066.
16. *Konin Yu. A., Scherbakova V. A., Bulatov M. I., Malkov N. V., Lucenko A. S., Starikov S. S., Grachev N. A., 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. № 11. P. 672–677. DOI: 10.1364/JOT.88.000672.
17. *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, DOI: 10.1016/j.optcom.2022.128242.
18. *Carslaw H. S., Jaeger J. K.* Conduction of Heat in Solids, 2nd ed. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 1959. 517 p.
19. *Davis D. D., Mettler S. C., DiGiovanni D. J.* Experimental data on the fiber fuse // Proc. SPIE 2714 27th Annual Boulder Damage Symposium: Laser-Induced Damage in Optical Materials. 1995. Vol. 2714. P. 202–210. DOI: 10.1117/12.240382.
20. *Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F.* Formation mechanism of drawing-induced E centers in silica

- optical fibers // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 58. № 3. P. 1356–1361. DOI: 10.1063/1.336107.
21. Marcuse D. Loss analysis of single-mode fiber splices // *Bell Syst. Tech. J.* 1977. Vol. 56. № 5. P. 703–718. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1977.tb00534.
 22. Konin Y. A., Petrov A. A., Starikova V. A., Smolnikov A. G. Wide temperature range fiber optic sensor // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2022. Vol. 86. Suppl. 1. P. S100–S103. DOI: 10.3103/S1062873822700472
- ### References
1. Kashyap R. Self-propelled self-focusing damage in optical fibers. *Proc. of Xth Int. Conf. on Lasers*, Lake Tahoe, USA, 1987, pp. 859–866.
 2. 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. DOI: 10.1049/el:19880032.
 3. Kashyap R., Sayles A. H., Cornwell G. F. Heat flow modeling and visualization of catastrophic self-propagating damage in single-mode optical fibres at low powers. *Proc. SPIE*, 1996, vol. 2966, pp. 586–591.
 4. Bufetov I. A., Dianov E. M. Optical discharge in fibre light guides. *Adv. of Physical Sciences*, 2005, vol. 175. no. 1., pp. 100–103.
 5. Shuto Y. *Elements of Fiber Fuse Phenomena*. Design Egg, Inc., 2023. 390 p.
 6. Shuto Y., Yanagi S., Asakawa S., Kobayashi M., Nagase R. Fiber fuse phenomenon in step-index single-mode optical fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, vol. 40, no. 8, pp. 1113–1121. DOI: 10.1109/JQE.2004.831635.
 7. Shuto Y. Cavity pattern formation and its dynamics of fiber fuse in single-mode optical fibers. *J. Informatics Math. Sci.*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 271–288. DOI: 10.26713/jims.v12i4.1459.
 8. Shuto Y. End face damage and fiber fuse phenomena in single mode fiber optic connectors. *J. Photonics*, 2016, vol. 2016, 2781392. DOI: 10.26713/jims.v12i4.1459.
 9. Todoroki S. Quantitative evaluation of fiber fuse initiation probability in typical single-mode fibers. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, Los Angeles, USA. 2015, pp. 859–866. DOI: 10.1364/OFC.2015.W2A.33.
 10. Todoroki S. Quantitative evaluation of fiber fuse initiation with exposure to arc discharge provided by a fusion splicer. *Scientific Reports*, 2006, vol. 6, 25366. DOI: 10.1038/srep25366
 11. Todoroki S. Fiber fuse propagation modes in typical single-mode fibers. *OSA Technical Digest*, 2013, JW2A.11. DOI: 10.1364/NFOEC.2013.JW2A.11.
 12. Todoroki S. Modes and threshold power of fiber fuse propagation. *IEICE Trans. Commun*, 2013, vol. J96-B, no. 3, pp. 243–248.
 13. Hanzawa T., Kurokawa K., Tsujikawa K., Mori T., Wada M., Yamamoto F. Fiber fuse propagation in LP11 mode in few-mode fiber. *OSA Technical Digest*, 2015, W4I.5.
 14. André P. S., Domingues M. F., Antunes P., Alberto N., Frias A. R., Ferreira R. A. S. Sensors based on recycled optical fibers destroyed by the catastrophic fuse effect. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9286, 92862U. DOI: 10.1117/12.2060191.
 15. Domingues A. P., Paixão T., Mesquita E., Alberto N., Antunes P. P., Varum H., André P. S. Hydrostatic pressure sensor based on micro-cavities developed by the catastrophic fuse effect. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9634, 96345M. DOI: /10.1117/12.2195066.
 16. Konin Yu. A., Scherbakova V. A., Bulatov M. I., Malkov N. V., Lucenko A. S., Starikov S. S., Grachev N. A., 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. DOI: 10.1364/JOT.88.000672.
 17. 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. *Opt. Commun.*, 2022, vol. 517, 128242, DOI: 10.1016/j.optcom.2022.128242.
 18. Carslaw H. S., Jaeger J. K. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford: Oxford Univ. Press, 1959. 517 p.
 19. Davis D. D., Mettler S. C., DiGiovanni D. J. Experimental data on the fiber fuse. *Proc. SPIE*, 1995, vol. 2714, pp. 202–210. DOI: 10.1117/12.240382.
 20. Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F. Formation mechanism of drawing-induced E centers in silica optical fibers. *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 58, no. 3, pp. 1356–1361. DOI: 10.1063/1.336107.
 21. Marcuse D. Loss analysis of single-mode fiber splices. *Bell Syst. Tech. J.*, 1977, vol. 56, no. 5, pp. 703–718. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1977.tb00534.
 22. Konin Y. A., Petrov A. A., Starikova V. A., Smolnikov A. G. Wide temperature range fiber optic sensor. *Bull. of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2022, vol. 86, suppl. 1, pp. S100–S103. DOI: 10.3103/S1062873822700472

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Старикова В. А., Конин Ю. А., Петухова А. Ю., Перминов А. В. Математическое моделирование температурных полей при пробое оптического волокна // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2024. № 1. С. 24–32. doi: 10.17072/1994-3598-2024-1-24-32

Please cite this article in English as:

Starikova V. A., Konin Yu. A., Petukhova A. Yu., Perminov A. V. A mathematical model of optical breakdown of an optical fiber core. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 1, pp. 24–32. doi: 10.17072/1994-3598-2024-1-24-32

Сведения об авторах

1. *Виктория Александровна Старикова*, мл. науч. сотрудник и аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, Пермь, 614990; инженер-исследователь ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», 25 октября, 106, Пермь, 614007.
2. *Юрий Александрович Конин*, мл. науч. сотрудник, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, Пермь, 614990; инженер-исследователь ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», 25 октября, 106, Пермь, 614007; аспирант, Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101.
3. *Александра Юрьевна Петухова*, мл. науч. сотрудник и аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, Пермь, 614990; инженер-исследователь ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», 25 октября, 106, Пермь, 614007.
4. *Анатолий Викторович Перминов*, д-р. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой общей физики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, Пермь, 614990.

Author information

1. *Viktoriya A. Starikova*, Junior Researcher, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia; Research Engineer, Perm Research and Production Instrument-Making Company (PNPPK), PAO (PJSC); 106, 25th Oktyabrya st., Perm, 614007, Russia.
2. *Yuri A. Konin*, Junior Researcher, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia; Research Engineer, Perm Research and Production Instrument-Making Company (PNPPK), PAO (PJSC); 106, 25th Oktyabrya st., Perm, 614007, Russia; Postgraduate Student, ITMO University; 49, Kronverkskiy prospekt, St. Petersburg, 197101, Russia.
3. *Aleksandra Yu. Petukhova*, Junior Researcher, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia; Research Engineer, Perm Research and Production Instrument-Making Company (PNPPK), PAO (PJSC); 106, 25th Oktyabrya st., Perm, 614007, Russia.
4. *Anatoliy V. Perminov*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia.