

УДК 681.7.068

А.Н. Колядин, А.Ф. Косолапов, Ю.П. Яценко, И.А. Буфетов

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

**ТЕМПЕРАТУРА ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПОЛЫХ
ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ ПРИ ИНТЕНСИВНОСТЯХ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, БЛИЗКИХ К ПОРОГОВЫМ**

Впервые измерена температура плазмы поддерживаемого лазерным излучением оптического разряда в полой сердцевине волоконного световода. Оптический разряд поддерживался излучением импульсно-периодического лазера с пиковой мощностью ~1 МВт. Температура разряда определялась по спектру излучения плазмы в двух зонах прозрачности волоконного световода в предположении, что спектр свечения плазмы соответствует спектру черного тела. Показано, что средняя по времени определенная таким образом температура плазмы оптического разряда достигает величины около 15 кК.

Ключевые слова: волоконные световоды с полой сердцевиной, револьверные волоконные световоды, оптический разряд, разрушение волоконных световодов под действием лазерного излучения.

A.N. Kolyadin, A.F. Kosolapov, Yu.P. Yatsenko, I.A. Bufetov

Fiber Optics Research Center of RAS, Moscow, Russian Federation

**TEMPERATURE OF THE OPTICAL DISCHARGE
IN HOLLOW-CORE OPTICAL FIBERS AT NEAR THRESHOLD
INTENSITIES OF LASER RADIATION**

The plasma temperature of an optical discharge supported by laser radiation in the hollow core of an optical fiber was measured for the first time. The optical discharge was supported by radiation from a pulse periodic laser with a peak power of ~ 1 MW. The discharge temperature was determined from the plasma radiation spectrum in two transparency zones of the fiber under the assumption that the plasma emission spectrum corresponds to the blackbody spectrum. It was shown that the time average temperature of the optical discharge plasma determined in this way reaches a value of about 15 kK.

Keywords: Hollow-core optical fibers, revolver fibers, optical discharge, fiber fuse effect.

Введение

Создание волоконных световодов с полой сердцевиной (ВСПС) открыло новые возможности для передачи мощного лазерного излучения [1] по сравнению с обычными волоконными световодами на осно-

ве кварцевого стекла (с твердотельной сердцевиной). В отличие от них в ВСПС излучение сосредоточено главным образом в поллой сердцеви- не (в газе, ее заполняющем), и материал, из которого сделан световод, не подвергается действию лазерного излучения такой высокой интен- сивности, которая имеет место на оси поллой сердцевины. Кроме того, пороги нелинейных эффектов в таких световодах также значительно выше, чем в твердотельных световодах, просто по той причине, что плотность газа, заполняющего сердцевину ВСПС, обычно на ≈ 3 поряд- ка ниже, чем плотность твердого тела. В результате ВСПС способны пропускать излучение значительно более высокой интенсивности, чем полностью твердотельные световоды. В настоящее время оптические кабели на основе ВСПС для передачи сверхкоротких мощных лазер- ных импульсов уже начинают производиться промышленностью (см. например, [2]). Но, как недавно было показано [3, 4], и в таких световодах при высоких интенсивностях лазерного излучения возника- ет лазерная плазма и начинается процесс распространения оптического разряда (ОР). Понимание физических явлений, происходящих при раз- рушении ВСПС, необходимо для их корректного использования при высоких интенсивностях транспортируемого лазерного излучения.

Обычно наиболее простая картина взаимодействия лазерного из- лучения с сердцевиной световода при движении волны разрушения по световоду наблюдается при использовании непрерывного лазерного излучения [5, 6]. Но до настоящего времени распространение ОР по ВСПС под действием непрерывного лазерного излучения не наблюда- лось. Оценки, приведенные в [4], показывают, что для наблюдения за таким явлением в световоде с диаметром поллой сердцевины около 80 мкм требуется непрерывный лазер мощностью порядка киловатта (поскольку пороговая мощность P_{th} в таком случае пропорциональна диаметру полого световода d_c). Для лазеров с меньшей средней мощ- ностью наблюдение за формированием плазмы и распространением по ВСПС также возможно, если использовать импульсно-периодический режим генерации, что и было продемонстрировано в [3, 4]. В этих ра- ботах наблюдалось распространение ОР по ПВС со средней скоростью около 1 м/с под действием излучения импульсно-периодического лазе- ра со средней мощностью всего 2 Вт (на длине волны 1064 нм). При этом интенсивность лазерного излучения на оси сердцевины достигала $\approx 10^{12}$ Вт/см² в максимумах импульсов. Но самопроизвольно плазма

при таких условиях облучения в сердцевине ВСПС не возникала, оптический пробой в РС не наблюдался. Поэтому ОР необходимо было специально инициировать для наблюдения за явлением разрушения световода (как и в большинстве подобных экспериментов с обычными световодами с твердотельной сердцевиной, см. например [7]). На основании исследования кинетических параметров движения плазмы по волоконному световоду и изучения повреждений световода после прохождения ОР в [4] была предложена физическая картина данного процесса. Целью настоящей работы было дальнейшее изучение процесса формирования плазмы в ВСПС под действием лазерного излучения, а именно измерение температуры плазмы в световоде, формирующейся в РС, путем анализа спектров ее излучения.

Описание эксперимента

На постановку эксперимента существенное влияние оказали следующие обстоятельства:

1. В качестве ВСПС нами использовались револьверные волоконные световоды (РС, см. рис. 1), изготовленные в НЦВО РАН [8]. Учитывая, что основные процессы, влияющие на формирование плазмы в полый сердцевине, определяются именно процессами взаимодействия лазерного излучения с газом и твердотельными стенками сердцевины, можно ожидать, что полученные результаты в значительной степени могут быть отнесены и к ВСПС других типов.

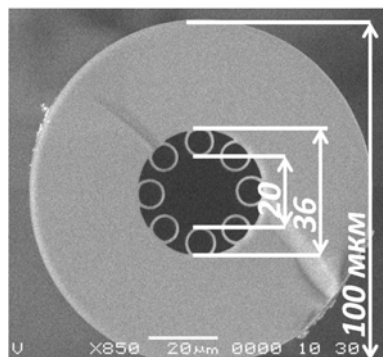


Рис. 1. Поперечное сечение револьверного световода с полый сердцевиной, который был использован в данной работе (основные геометрические размеры РС: внешний диаметр опорной трубы 100 мкм, диаметр полый сердцевины 20 мкм, внутренний диаметр опорной трубы 36 мкм, толщина стенки капилляров в отражающей оболочке 0,89 мкм, толщина стенки опорной трубы 32 мкм)

2. Для создания плазмы в полости сердцевине использовался импульсно-периодический лазер (рис. 2, а).

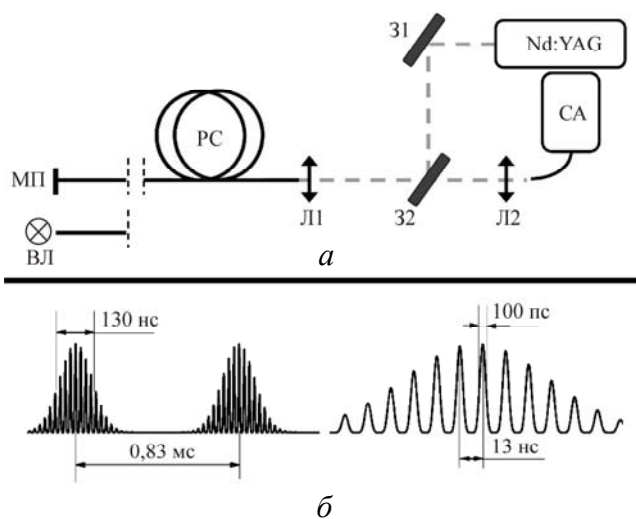


Рис. 2. Схема эксперимента (а): РС – револьверный световод, Л1, Л2 – линзы, 31,32 – зеркала, СА – спектроанализатор, МП – металлическая пластинка для иницирования ОР, ВЛ – калибровочная вольфрамовая лампа; параметры лазерного излучения (б): слева – параметры наносекундных пакетов пикосекундных импульсов, справа – параметры пикосекундных импульсов (не в масштабе)

3. Для измерения температуры плазмы ОР в сердцевине ВСПС, заполненной воздухом, использовался метод определения температуры по спектру излучения ОР [9, 10].

4. Учитывая, что согласно модели, предложенной в [4], температура плазмы ОР может существенно изменяться во времени при поддержании плазмы импульсно-периодическим лазером в течение времени $\sim 10^{-10}$ с (максимальные значения электронной температуры в плазме лазерной искры могут достигать $\sim 10^6$ К [11]), а время регистрации спектра в имеющихся в распоряжении авторов спектроанализаторах составляет не менее 10 мс, то в данной работе измерялось некоторое среднее значение температуры плазмы ОР. При частоте генерации наносекундных импульсов 1200 Гц (рис. 2, б) в течение этого времени генерировалось 12 таких импульсов, и каждый полученный спектр фактически является интегральным спектром излучения плазмы ОР за это время (10 мс). И значение температуры, которое мы определили по каждому из таких спектров, является некоторым средним значением за

время наносекундного импульса. То, что суммируется излучение за 12 импульсов, приводит только к усреднению величины температуры за это количество импульсов. Промежутки времени между наносекундными импульсами, когда ОР гаснет (рис. 3, б), не дают вклада в регистрируемые спектры.

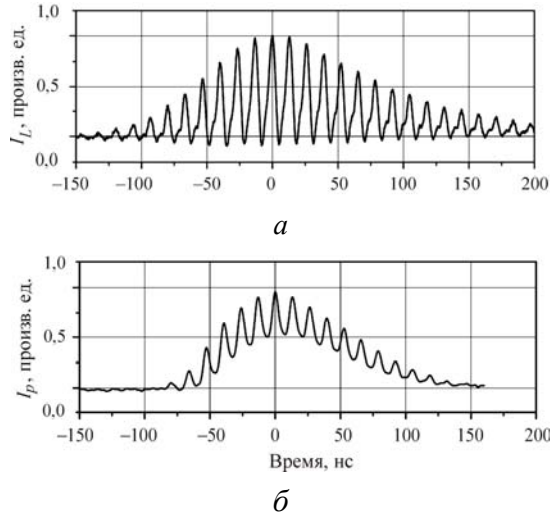


Рис. 3. Осциллограммы: а – лазерного наносекундного пакета пикосекундных импульсов (длительность ПИ отображается некорректно из-за ограниченной полосы частот схемы регистрации); б – интенсивности свечения ОР в РС в видимом диапазоне длин волн под действием НППИ (регистрация через боковую поверхность РС)

Схема эксперимента представлена на рис. 2, а. Источником одномодового излучения служил Nd:YAG-лазер. Он работал в совмещенном Q-switch и mode-lock (модуляция добротности + синхронизация мод) режиме, генерируя наносекундные пакеты пикосекундных импульсов (НППИ) с параметрами, указанными на рис. 2, б. Осциллограмма одного НППИ представлена на рис. 3, а, соответствующая ей осциллограмма свечения плазмы ОР в видимом диапазоне – на рис. 3, б. Средняя мощность лазерного излучения P_{AV} на выходе РС при инициировании ОР составляла около 2 Вт. При этом средняя мощность в наносекундных импульсах составляла на выходе РС 8 кВт, а в максимумах пикосекундных импульсов (ПИ) достигала 1,00 МВт. Это соответствует интенсивностям лазерного излучения на оси сердцевины световода средней по НППИ $5,2 \cdot 10^9$ Вт/см² и максимальной в ПИ $7,0 \cdot 10^{11}$ Вт/см² соответственно.

Излучение Nd:YAG-лазера после отражения от спектрально-селективных зеркал 31 и 32 через линзу Л1 вводилось в сердцевину РС с коэффициентом ввода до 80 % (см. рис. 2, *a*). Длина РС составляла около 50 см. Световод представлял собой покрытую полимерной оболочкой конструкцию из кварцевого стекла, поперечное сечение которой представлено на рис. 1.

Длина волны излучения Nd:YAG-лазера ($\lambda = 1064$ нм) находилась в зоне прозрачности световода. Оптические потери в световоде на этой длине волны составляли менее 1 дБ/м и фактически не влияли на прохождение излучения через используемые короткие отрезки РС.

При измерении спектров ОР в волоконном световоде их регистрация через боковую поверхность световода затруднена из-за перемещения ОР относительно входа спектроанализатора. Именно по этой причине в [12] в аналогичных экспериментах с непрерывным лазером и обычными световодами на основе кварцевого стекла регистрировался спектр теплового излучения, распространяющегося от ОР по волоконному световоду навстречу лазерному излучению. Похожая схема была применена и в настоящей работе. Тепловое излучение ОР, находящегося недалеко от точки инициирования (выходной торец РС), распространяется, вообще говоря, по всем направлениям, в том числе и по РС в направлении к линзе Л1 (см. рис. 2, *a*). Это излучение после выхода из торца РС коллимируется линзой Л1, и та его часть, которая по длинам волн не попадает в полосу отражения зеркала 32, фокусируется линзой Л2 в сердцевину многомодового световода на входе в спектроанализатор (Ocean Optics 65000).

В отличие от [12] в экспериментах с ВСПС при движении ОР по световоду существенно изменяется уровень оптических потерь в ВСПС из-за изменения длины световода между ОР и спектроанализатором. А калибровка канала регистрации производится путем ввода излучения вольфрамовой лампы с известной температурой излучающей поверхности 3110 К в выходной торец РС (см. рис. 2, *a*). Поэтому, строго говоря, такая калибровка справедлива только для полной длины световода. Для того чтобы положение ОР существенно не изменялось в процессе эксперимента, мы проводили измерения при мощности лазерного излучения, как можно более близкой к порогу распространения ОР. Оказалось, что в таких условиях ОР при касании металлической пластинкой выходного торца РС (процесс инициирования) под-

жигается, но каждый новый НППИ инициирует ОР практически на том же месте, что и предыдущий (в отличие от [3, 4]), и в течение ~ 2 с ОР проходит расстояние не более 5 мм. Данный режим неустойчив, ОР полностью гаснет через несколько секунд, но это время достаточно для регистрации спектра его собственного свечения.

Экспериментальные результаты

Для калибровки перед инициированием оптического разряда в исследуемый световод вводилось излучение вольфрамовой лампы с известной температурой (3110 К) и эмиссионной способностью, которое после прохождения исследуемого и лазерного световодов регистрировалось с помощью спектроанализатора. Соответствующий спектр представлен на рис. 4, линия 1. По нему видно, что в нашем эксперименте регистрируется излучение в видимом диапазоне только в сравнительно узких поддиапазонах 500–560 и 660–770 нм. Такое ограничение спектра обусловлено наличием в рассматриваемом диапазоне двух зон прозрачности РС (их положение обозначено на рис. 4, линия 2 (см., например [13])). Кроме того, в формирование спектра пропускания канала регистрации вносит свой вклад и спектр пропускания спектрально-селективного зеркала 32 (см. рис. 2, а).

Спектр собственного свечения лазерной плазмы в полой сердцевине световода после инициирования представлен на рис. 4, линия 3. Качественно он подобен спектру вольфрамовой лампы. Поэтому, полагая, что спектр излучения ОР в сердцевине световода близок к излучению абсолютно черного тела (АЧТ), мы по измеренным спектрам свечения ОР определяем температуру такого АЧТ. Поскольку мы определяем интенсивности свечения плазмы ОР в двух сравнительно узких диапазонах длин волн, то для определения значения температуры АЧТ, соответствующей полученным спектрам, в настоящей работе мы воспользовались известным в пирометрии методом, основанном на измерении отношения спектральных плотностей сигнала на двух длинах волн (см. [9, 10]). Для выбранных нами длин волн, лежащих в центре полос пропускания РС: 544 и 698,5 нм, отношение спектральных интенсивностей АЧТ на этих длинах волн возрастает с увеличением температуры и при больших ее значениях ($\sim 10^5$ К и более) стремится к величине 2,71 (рис. 5, линия 2). Поэтому диапазон измерения температуры по отношению к спектральным плотностям излучения для указанных длин волн ограничен сверху величиной около $5 \cdot 10^4$ К.

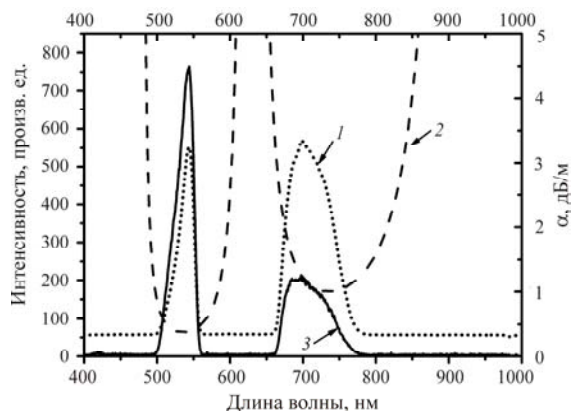


Рис. 4. Диаграммы: 1 – спектра излучения калибровочной вольфрамовой лампы, зарегистрированный спектроанализатора SA (см. рис. 1) при введении излучения лампы в выходной конец световода; 2 – расчетной кривой оптических потерь в РС; 3 – спектра излучения плазмы при размещении у выходного торца световода металлической пластинки для ее инициирования в РС через 2 с после включения лазера

На рис. 5, линия 1, представлены результаты измерения отношения спектральных интенсивностей излучения ОР на длинах волн 544 и 698,5 нм (R_{CORR}) в течение промежутка времени около 3 с после инициирования. Величина R_{CORR} уже скорректирована на коэффициент пропускания канала регистрации на указанных длинах волн. Средняя мощность лазерного излучения на выходе РС перед иницированием составляла около 2 Вт. Величина R_{CORR} после некоторого переходного периода стабилизируется и затем резко уменьшается при прекращении свечения ОР.

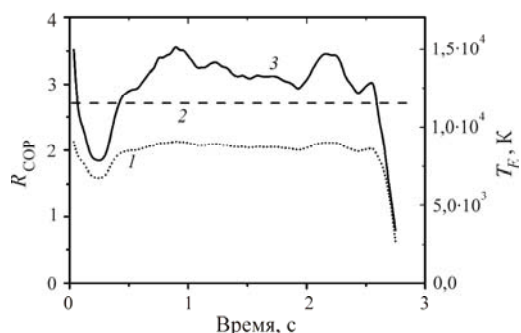


Рис. 5. Диаграммы зависимости: 1 – отношения величин максимумов спектральной плотности излучения плазмы в полосах пропускания схемы регистрации (см. рис. 1) от времени после включения лазерного излучения; 2 – предельного значения отношения спектральных интенсивностей излучения АЧТ на длинах волн 544 и 698,5 нм; 3 – рассчитанных по кривой (1) значений средней температуры плазмы ОР в интервале времени, соответствующем времени регистрации спектра (10 мс)

Тот факт, что R_{CORR} в течение всего временного интервала изменений оказывается существенно меньше, чем 2,71, указывает на то, что по величине этого отношения возможно определение эффективной температуры T_{eff} ОР. Результаты численных расчетов величины T_{eff} по значениям R_{CORR} представлены на рис. 5 (линия 3). Сразу после инициирования эффективная температура плазмы составляет 15 кК, затем следует некоторый переходной процесс длительностью около 0,5 с, в течение которого T_{eff} сначала снижается до $\approx 7,8$ кК, после увеличивается до $\approx 13,5$ кК и колеблется около этого значения с размахом примерно ± 2 %. Через $\approx 2,6$ с после инициирования свечение ОР начинает гаснуть, что объясняется, по-видимому, вариацией интенсивности лазерного излучения со временем. Даже сравнительно небольшое снижение интенсивности лазерного излучения вблизи порогового значения для поддержания ОР может привести к его погасанию.

Вопрос о точности определения величины T_{eff} в подобных экспериментах требует отдельного обсуждения и наличия более широких массивов экспериментальных данных. С одной стороны, сам метод определения температуры АЧТ по отношению интенсивности излучения на двух длинах волн может быть достаточно точным, и его сравнительно простая реализация в настоящей работе позволяет определять температуру с точностью около 2 %. Но, во-первых, величина T_{eff} есть некоторая средняя величина температуры ОР, физический смысл которой необходимо выяснить в последующих исследованиях. И, во-вторых, вопрос о соответствии полного спектра излучения ОР в полном световоде спектру АЧТ, что важно для интерпретации величины T_{eff} , требует тщательного экспериментального изучения.

Заключение

В настоящей работе впервые выполнены эксперименты по измерению температуры ОР в волоконном световоде с полый сердцевинной, заполненной лабораторным воздухом. Показано, что средняя (в смысле, определенном выше) температура плазмы ОР при интенсивности лазерного излучения, близкой к пороговой, составляет около 13,5 кК. Это значение выше, чем температура ОР, распространяющегося по волоконным световодам на основе плавленого кварца с твердотельной сердцевинной в непрерывном режиме при мощности лазера от 4 до 40 Вт [12]. Там температура составляла от 4 до 10 кК. С другой сторо-

ны, полученное значение ниже, чем температура плазмы ОР, поддерживаемого в атмосферном воздухе лазером с такой же длиной волны, но в отсутствие световода и диаметром луча около 1 см [14]. В этой работе при отсутствии твердых стенок, ограничивающих разлет газа, давление в плазме ОР не отличалось от атмосферного, и в таких условиях температура ОР составила около 20 кК. В настоящих экспериментах давление воздуха в полой сердцевине, несомненно, превышает атмосферное, что ведет к повышению коэффициента поглощения лазерного излучения и к соответствующему снижению эффективной температуры плазмы, как это показано в [15].

Тот факт, что в РС эффективная температура плазмы достигает 15 кК, позволяет использовать ОР в полой сердцевине световода в качестве источника излучения в УФ области около 200 нм и короче. Сама структура световода (полая сердцевина) облегчает вывод этого излучения из световода для дальнейшего использования. Применение газов с более высокими потенциалами ионизации (по сравнению с воздухом) позволит получить ОР в полых световодах с более высокими температурами.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований № 18-02-00324 и Программы Президиума РАН № 5 «Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов».

Список литературы

1. Single-Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air / R.F. Cregan, B.J. Mangan, J.C. Knight, T.A. Birks, P.St.J. Russell, P.J. Roberts, D.C. Allan // Science. – 1999. – 285 (3 September). – 1537–1539.
2. Laser light cable for industrial ultrafast lasers LLK-UKP. Photonicstools. – URL: <https://www.photonicstools.de/products/llk-ultrafast/>
3. Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Буфетов И.А. Распространение оптического разряда по волоконным световодам с полой сердцевинной // Квантовая электроника. – 2018. – 48(12). – 1138–1142.
4. Catastrophic damage in hollow core optical fibers under high power laser radiation / I.A. Bufetov, A.N. Kolyadin, A.F. Kosolapov, V.P. Efremov, V.E. Fortov // Optics Express. – 2019. – 27(13). – 18296–18311.

5. Kashyap R. The Fiber Fuse – from a curious effect to a critical issue: A 25th year retrospective // *Opt. Express*. – 2013. – 21(5). – 6422–6441.

6. Shin-ichi Todoroki, Fiber Fuse. Light-Induced Continuous Breakdown of Silica Glass Optical Fibers. – Tokyo, Heidelberg, New York, London: Springer, 2014.

7. Dianov E.M., Bufetov I.A., Frolov A.A. Catastrophic damage in specialty optical fibers under CW medium-power laser radiation // *J. Opt.* – 2004. – 33(3). – 171–180.

8. Revolver Hollow Core Optical Fibers / I.A. Bufetov, A.F. Kosolapov, A.D. Pryamikov, A.V. Gladyshev, A.N. Kolyadin, A.A. Krylov, Yu.P. Yatsenko, A.S. Biriukov // *Revolver Hollow Core Optical Fibers, Fibers (Basel)*. – 2018. – 6(2). – 39.

9. Температурные измерения: справочник / О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, А.К. Еремина, В.И. Лях, Я.Т. Луцик, В.И. Пуцыло, В.И. Стаднюк, И.А. Ярышев; отв. ред. О.А. Геращенко; АН УССР. Ин-т проблем энергосбережения. – Киев: Наукова думка, 1989. – 704 с.

10. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия // *Приборы и техника эксперимента*. – 2009. – № 4. – С. 5–28.

11. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. – М.: Наука, 1974. – 308 с.

12. High-Speed Photography, Spectra, and Temperature of Optical Discharge in Silica-Based Fibers / E.M. Dianov, V.E. Fortov, I.A. Bufetov, V.P. Efremov, A.E. Rakitin, M.A. Melkumov, M.I. Kulish, A.A. Frolov // *IEEE Photonics Technology Letter*. – 2006. – 18, no. 6. – March 15.

13. Прямиков А.Д., Алагашев Г.К., Буфетов И.А. Математическое моделирование свойств револьверных световодов и оптимальная конструкция световода для рамановского лазера 1,56→4,4 мкм // *Прикладная фотоника*. – 2017. – 22(6). – 64–79.

14. Диагностика плазмы оптического разряда, поддерживаемого излучением неодимового лазера в атмосферном воздухе / И.А. Буфетов, В.В. Жердиенко, В.Б. Федоров, В.К. Фомин // *Квантовая электроника*. – 1986. – 13(9). – 1876–1884.

15. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1987. – 592 с.

References

1. Cregan R.F., Mangan B.J., Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Roberts P.J., Allan D.C. Single-mode photonic band gap guidance of light in air. *Science*, 1999, 285, pp. 1537-1539.

2. Laser light cable for industrial ultrafast lasers LLK-UKP. Photonicstools, available et: <https://www.photonicstools.de/products/llk-ultrafast> (accessed: 12 September 2019).

3. Koliadin A.N., Kosolapov A.F., Bufetov I.A. Rasprostranenie opticheskogo razriada po volokonnyim svetovodam s poloi serdtsevinoi [Optical discharge propagation through hollow core fiber waveguides]. *Kvantovaya elektronika*, 2018, 48(12), pp.1138-1142.

4. Bufetov I.A., Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Efremov V.P., Fortov V.E. Catastrophic damage in hollow core optical fibers under high power laser radiation. *Optics Express*, 2019, 27(13), pp. 18296-18311.

5. Kashyap R. The fiber fuse – from a curious effect to a critical issue: A 25th year retrospective. *Opt. Express*, 2013, 21(5), pp. 6422-6441.

6. Shin-ichi Todoroki. Fiber fuse. Light-induced continuous breakdown of silica glass optical fibers. Tokyo, Heidelberg, New York, London, Springer, 2014.

7. Dianov E.M., Bufetov I.A., Frolov A.A. Catastrophic damage in specialty optical fibers under CW medium-power laser radiation. *J. Opt.*, 2004, 33(3), pp. 171-180.

8. Bufetov I.A., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Gladyshev A.V., Kolyadin A.N., Krylov A.A., Yatsenko Yu.P., Biriukov A.S. Revolver hollow core optical fibers. *Fibers (Basel)*, 2018, 6(2), p. 39.

9. Gerashchenko O.A., Gordov A.N., Eremina A.K., Liakh V.I., Lutsik Ia.T., Putsylo V.I., Stadniuk V.I., Iaryshev I.A. Temperaturnye izmereniia [Temperature measurement]: spravochnik. Ed. O.A. Gerashchenko. Kiev, Naukova dumka, 1989, 704 c.

10. Magunov A.N. Spektralnaia pirometriia [Spectral pyrometry]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2009, no. 4, pp. 5-28.

11. Raizer Iu.P. Lazernaia iskra i rasprostranenie razriadov [Laser spark and discharge propagation]. Moscow, Nauka, 1974, 308 p.

12. Dianov E.M., Fortov V.E., Bufetov I.A., Efremov V.P., Rakitin A.E., Melkumov M.A., Kulish M.I., Frolov A.A. High-speed photography, spectra, and temperature of optical discharge in silica-based fibers. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2006, 18, no. 6.

13. Priamikov A.D., Alagashev G.K., Bufetov I.A. Matematicheskoe modelirovanie svoistv revolvernykh svetovodov i optimalnaia konstruktsiia svetovoda dlia ramanovskogo lazera 1.56→4.4 mkm [Mathematical model-

ing of revolving optical fibers properties and optimal fiber design for a Raman laser 1.56→4.4 μm]. *Applied photonics*, 2017, 22(6), pp. 64-79.

14. Bufetov I.A., Zherdienko V.V., Fedorov V.B., Fomin V.K. Diagnostika plazmy opticheskogo razriada, podderzhivaemogo izlucheniem neodimovogo lazera v atmosfernom vozdukhe [Diagnostics of an optical discharge plasma supported by neodymium laser radiation in atmospheric air]. *Kvantovaiia elektronika*, 1986, 13(9), pp.1876-1884.

15. Raizer Iu.P. Fizika gazovogo razriada [Gas discharge physics]. Moscow, Nauka, 1987, 592 p.

Получено 20.11.19