

Распространение оптического разряда по волоконным световодам с поллой сердцевиной

А.Н.Колядин, А.Ф.Косолапов, И.А.Буфетов

Впервые наблюдалось распространение оптического разряда по револьверному волоконному световоду с поллой сердцевиной под действием лазерного излучения. Источником излучения служил импульсно-периодический Nd:YAG-лазер со средней мощностью до 4 Вт, генерирующий наносекундные пакеты пикосекундных импульсов. После инициирования оптического разряда наблюдалось движение плазменного образования по волоконному световоду навстречу лазерному излучению со средней скоростью около 1 м/с. Обнаружено, что в процессе распространения оптического разряда формируется квазипериодическая структура разрушения капиллярной отражающей оболочки световода с периодом около 170 мкм. Полученные результаты показывают, что наблюдаемое в наших экспериментах распространение оптического разряда представляет собой процесс периодического возбуждения пикосекундными импульсами светодетонационной волны в воздухе, заполняющем сердцевину. В результате оптический разряд движется по световоду в течение наносекундного пакета лазерных импульсов со скоростями от 100 до 10 км/с.

Ключевые слова: револьверный световод, световод с поллой сердцевиной, оптический разряд, световая детонация.

1. Введение

По мере увеличения мощности лазерного излучения, распространяющегося по волоконному световоду, возникает ряд нелинейных явлений (например, вынужденное рассеяние Манделъштама–Бриллюэна, рамановское рассеяние, четырехволновое смешение), ограничивающих мощность передаваемого излучения. Существует еще один явно нелинейный эффект, который очевидным образом ограничивает возможности волоконных световодов, – это явление разрушения волоконных световодов под действием излучения высокой интенсивности. Впервые оно было обнаружено в световодах на основе кварцевого стекла [1, 2] и получило в англоязычной литературе название «fuse-effect». Его исследованию посвящено значительное число работ (см. обзор [3] и ссылки в нем). Оказалось, что данный процесс представляет собой движение со скоростью от 1 до 10 м/с по сердцевине световода из кварцевого стекла ярко светящегося оптического разряда (ОР) (т.е. плазменного образования, поддерживаемого оптическим излучением) с температурой $\sim 10^4$ К. Распространение ОР приводит к разрушению волноводных свойств волоконного световода из-за формирования в его сердцевине после распространения ОР последовательности пустот, рассеивающих лазерное излучение. Распространение ОР под действием непрерывного лазерного излучения наблюдалось в диапазоне интенсивностей излучения в сердцевине 10^6 – 10^9 Вт/см². Физическим механизмом, определяющим распространение ОР, в таком случае является теплопроводный перенос энергии от горячей области ОР к холодному материалу сердцевины навстречу потоку лазерного излучения.

Поэтому процесс распространения ОР в указанном диапазоне интенсивностей подобен процессу медленного химического горения [4].

При увеличении интенсивности лазерного излучения в сердцевине из кварцевого стекла до величин более 10^9 Вт/см² реализуется другой режим распространения ОР – детонационный [5]. В этом случае зона энерговыделения движется по световоду навстречу лазерному излучению вместе с ударной волной (как в случае химической детонации). Распространение ударной волны поддерживается поглощением на ее фронте лазерного излучения. Скорости движения ОР в этом случае значительно выше, чем в медленном теплопроводном режиме, и достигают около 3 км/с. При использовании импульсных лазеров со средней мощностью в несколько ватт средняя скорость движения ОР оказывается равной ~ 1 м/с. Распространение оптической детонационной волны по световоду сопровождается развитием трещин в его стекле и полным разрушением световода стандартного диаметра (125 мкм). Картину разрушений после прохождения волны ОР удалось зафиксировать в [5] только используя специальный кварцевый световод с увеличенным диаметром оболочки (600 мкм). В нем образовавшиеся трещины не достигали внешней поверхности, и он сохранял свою форму.

В волоконных световодах из стекла с низкими температурами стеклования (таких как стекло для среднего ИК диапазона – халькогенидные и флюоридные) ОР под действием излучения мощностью ~ 1 Вт не поддерживается. Но разрушение световода при воздействии лазерного излучения имеет место и носит характер термохимического разложения материала световода по всему его поперечному сечению [6]. Пороговые мощности и интенсивности разрушения таких световодов примерно на порядок ниже, чем световодов на основе кварцевого стекла. Здесь и далее под пороговой величиной процесса разрушения мы подразумеваем мощность (интенсивность) излучения, соответствующую нулевой скорости распространения волны разрушения (см. [7]).

А.Н.Колядин, А.Ф.Косолапов, И.А.Буфетов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: iabuf@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 9 октября 2018 г.

Одной из возможностей увеличения пороговых мощностей распространения ОР оказалось использование световодов из кварцевого стекла с микроструктурированной оболочкой [8]. Наличие капилляров, заполненных воздухом, вблизи твердотельной сердцевины световода обеспечивает дополнительную возможность увеличения объема ОР с соответствующим снижением его плотности, коэффициента поглощения лазерного излучения и, как следствие, повышения пороговой интенсивности поддержания ОР примерно на порядок.

Создание кварцевых световодов с поллой сердцевиной открыло новые перспективы для передачи мощного лазерного излучения. В настоящее время оптические кабели на основе таких световодов для передачи сверхкоротких мощных лазерных импульсов начинают производиться промышленностью (см., напр., [9]). Эти световоды также имеют некоторые значения мощности и интенсивности излучения, при превышении которых начинается процесс их разрушения [10, 11]. Так, при транспортировке наносекундных импульсов по световодам с поллой сердцевиной (световод типа «Кагоме») в [11] в нескольких экспериментах наблюдалось разрушение световода при интенсивностях излучения в сердцевине около 10^{10} Вт/см², после чего волна разрушения распространялась по световоду со скоростью ~ 5 см/с. В работе [12] была показана возможность доставки импульсов с длительностью ~ 100 фс и интенсивностью до 10^{11} Вт/см² по световоду с поллой сердцевиной (световод револьверного типа) на расстояние 10 м без деградации параметров импульсов. При этом порог разрушения световода не был достигнут.

Изучение процессов, протекающих при распространении волны разрушения по волоконным световодам с поллой сердцевиной (ВСПС), с одной стороны, расширит наши знания о взаимодействии излучения с веществом в таких условиях, а с другой – позволит использовать полученную информацию для создания более совершенных световодов. В настоящей работе впервые исследовался процесс разрушения пологого волоконного световода, изготовленного из кварцевого стекла, с сердцевиной, заполненной воздухом при атмосферном давлении, под действием лазерного излучения высокой интенсивности после инициирования оптического разряда в поллой сердцевине.

2. Экспериментальная установка

В наших экспериментах по исследованию распространения ОР по ВСПС в качестве световодов использовались две разновидности ВСПС револьверного типа (револьверный световод (РС)): РС1 и РС2 [13]. Их поперечные сечения и размеры представлены на рис.1 и в подписи к нему. Особенностью РС является то, что их отражающая оболочка имеет сравнительно простую конструкцию и состоит из одного слоя капилляров, которые могут как касаться друг друга (РС1), так и располагаться на некотором расстоянии (РС2). Оба световода были сконструированы таким образом, что длина волны источника лазерного излучения (1064 нм) находилась в зоне прозрачности световода.

В качестве источника лазерного излучения использовался одномодовый Nd:YAG-лазер (Antares, Coherent). Он мог работать в следующих режимах: непрерывная генерация с выходной мощностью до 10 Вт (режим 1); импульсно-периодическая генерация наносекундных им-

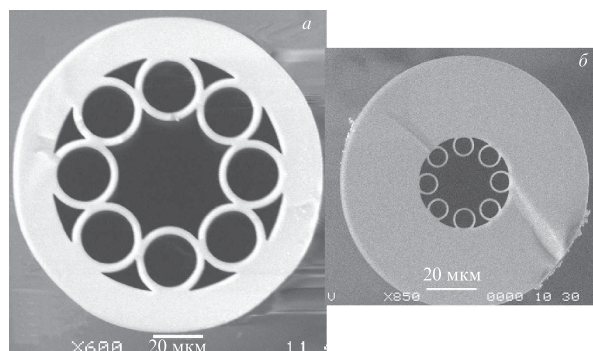


Рис.1. Изображения поперечных сечений РС1 (а) и РС2 (б). Основные геометрические размеры (РС1/РС2): внешний диаметр опорной трубы 125/100 мкм, диаметр поллой сердцевины 42/20 мкм, внутренний диаметр опорной трубы 93/36 мкм, толщина стенки капилляров в отражающей оболочке 3.1/0.8 мкм, толщина стенки опорной трубы 16/32 мкм.

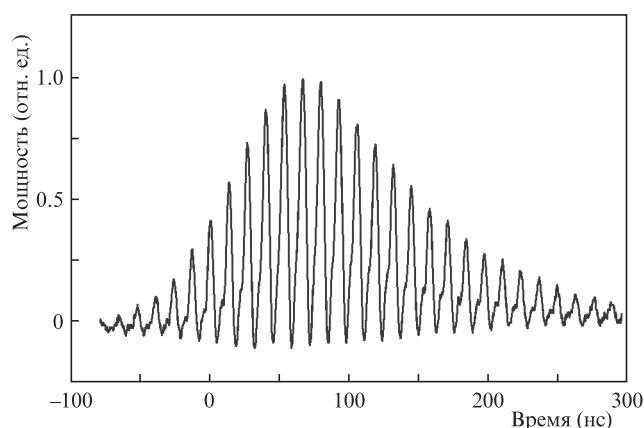


Рис.2. Осциллограмма наносекундного пакета пикосекундных лазерных импульсов (режим 3), состоящего из последовательности импульсов длительностью 100 пс, следующих с периодом 13 нс. Реальная длительность пикосекундных импульсов на данной осциллограмме не отображается из-за частотных ограничений приемника излучения.

пульсов за счет модуляции добротности резонатора со средней выходной мощностью до 7 Вт (длительность импульсов $\tau_p = 130$ нс по уровню 0.5, частота следования $\nu_p = 1200$ Гц) (режим 2); режим модуляции добротности, аналогичный режиму 2, но с дополнительной синхронизацией мод (режим 3). В результате генерируемое излучение представляло собой наносекундные пакеты пикосекундных импульсов (НППИ): длительность пакета 130 нс, длительность пикосекундных импульсов (ПИ) $\tau_p = 100$ пс с частотой следования $\nu_p = 76$ МГц (период 13 нс, рис.2), заполняющих огибающую наносекундных импульсов с теми же параметрами, что и в режиме 2. Средняя мощность достигала 5 Вт. Инициировать распространение ОР по волоконному световоду нам удалось только в случае, когда лазер работал в режиме 3.

Схема эксперимента представлена на рис.3. Лазерное излучение через линзу *l* вводилось в сердцевину РС, который представлял собой покрытую полимерной оболочкой конструкцию из кварцевого стекла (ее поперечное сечение см. на рис.1). Юстировкой положения входного торца РС достигался максимальный (до 80%) коэффициент ввода лазерного излучения в полую сердцевину РС, что контролировалось с помощью измерителя мощности *7*. В ряде экспериментов на участке 3 РС было удале-

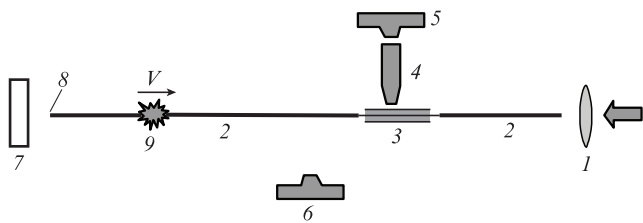


Рис.3. Схема эксперимента.

но полимерное покрытие для помещения этого участка в иммерсионную жидкость и наблюдения процесса распространения ОР с помощью микроскопа 4. Изображение фиксировалось фотоаппаратом 5, затвор которого был открыт в течение всего времени движения ОР в его поле зрения. Кроме того, общая картина распространения ОР записывалась на телекамеру 6 с частотой до 240 кадр./с. После инициирования ОР 9 около выходного торца световода 8 начиналось движение ОР по сердцевине волновода 2, заполненного воздухом, со скоростью V . Стрелкой обозначено направление распространения ОР.

3. Результаты экспериментов

Средняя мощность лазерного излучения на выходе РС при инициировании ОР составляла около 4 Вт для РС1 и около 2 Вт для РС2. При этом максимальная средняя мощность наносекундных импульсов на выходе РС1/РС2 была равна 16/8 кВт, а в максимумах пикосекундных импульсов достигала 2.0/1.0 МВт. Это соответствует следующим интенсивностям лазерного излучения на оси сердцевины световодов РС1/РС2: средней по НППИ – $2.4 \times 10^9/5.2 \times 10^9$ Вт/см², максимальной в пикосекундном импульсе – $3.2 \times 10^{11}/7.0 \times 10^{11}$ Вт/см².

Длина отрезка световода, в который вводилось излучение, составляла от 35 до 70 см. Излучение с указанными выше параметрами проходило по РС без каких-либо существенных возмущений. Поэтому, как и в большинстве работ по исследованию распространения ОР (см., напр., [7]), разряд специально инициировался. В данных экспериментах для инициации ОР к выходному торцу РС параллельно ему подносилась плоская поглощающая металлическая поверхность. Плазма, образующаяся на такой мишени, начинала поглощать лазерное излучение, распространяющееся по сердцевине РС. В результате передачи энергии от плазмы на мишени возникала ионизация молекул воздуха в световоде, и они в свою очередь начинали поглощать лазерное излучение, что давало старт распространению ОР по световоду. Аналогичный, но гораздо более масштабный процесс инициирования ОР в стеклянной трубке диаметром 7 мм, превышающим диаметр РС на 2.5 порядка, экспериментально наблюдался в работе [14] (см. в [14] рис.7).

Все эксперименты были выполнены при работе лазера в режиме НППИ. После введения в РС1 лазерного излучения мощностью 4 Вт, в РС2 – 2 Вт оптический разряд инициировался и начал распространяться по световоду со средней скоростью ~ 1 м/с. ОР представлял собой ярко светящееся в видимом диапазоне длин волн пятно, движущееся по световоду навстречу лазерному излучению. Несмотря на то что лазер работал в импульсном режиме и длительность НППИ составляла $\sim 10^{-4}$ времени между ними, в среднем ОР движется по световоду с примерно

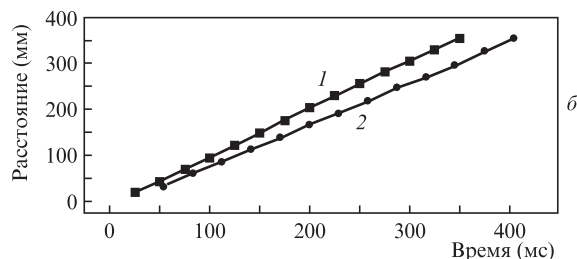
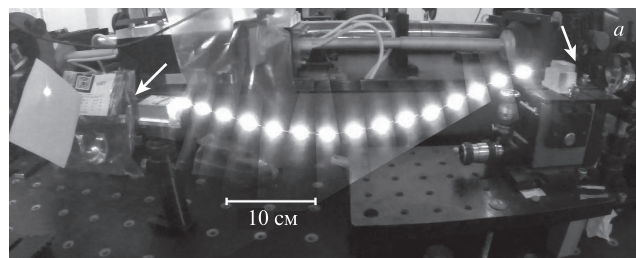


Рис.4. Распространение ОР по РС1: 15 совмещенных кадров ОР, сделанных с интервалом 25 мс (точка ввода лазерного излучения в РС1 – справа, точка инициирования ОР – слева) (а) и зависимости расстояния, пройденного ОР по РС1 (1) и по РС2 (2), от времени (точки начала отсчета выбирались произвольным образом) (б).

постоянной средней (усредненной по нескольким периодам между НППИ) скоростью. Интересно, что по порядку величины она оказывается примерно равной скорости движения ОР по стандартным световодам из кварцевого стекла с твердой сердцевиной под действием непрерывного лазерного излучения такой же средней мощности [15].

На рис.4,а представлен набор из 15 последовательных, наложенных друг на друга (переэкспонированных по отношению к яркости ОР) кадров, снятых камерой 6 (рис.3) в эксперименте с РС1. Они показывают положение ОР через каждые 25 мс. На рис.4,б представлены зависимости расстояния, пройденного ОР в световодах РС1 и РС2, от времени. Несмотря на значительное различие в диаметрах сердцевины световодов, средние скорости распространения ОР по РС1 и РС2 оказались близкими: они составляют 1.0 м/с для РС1 и 0.91 м/с для РС2.

Существенно различались последствия прохождения ОР по световодам РС1 и РС2. В случае РС1 кварцевая конструкция световода после прохождения ОР полностью разрушалась, и осколки ее удерживались вместе только полимерной оболочкой. В случае световода РС2, имеющего в два раза более толстую опорную трубу (см. рис.1), световод внешне сохранялся как целое.

На рис.5,а приведены фотографии одного и того же участка световода РС2 до, во время и после прохождения по нему ОР, сделанные с помощью камеры 5 (см. рис.3). До прохождения ОР световод однороден по длине (кадр I). Интегральная по времени фотография свечения плазмы ОР (кадр II) свидетельствует о том, что ОР на представленном участке распространялся непрерывно по полой сердцевине РС2. Положение светящейся области ОР относительно сердцевины световода иллюстрируется зависимостью интенсивности свечения ОР от координаты вдоль диаметра световода (рис.5,б). На фотографии, сделанной после прохождения ОР (кадр III), зафиксированы разрушения отражающей оболочки РС2, представляющие собой квазипериодическую структуру с периодом около 170 мкм. Причем в пределах этого периода участки со значительными разрушениями (светлые) чередуются с менее поврежденными (темные).

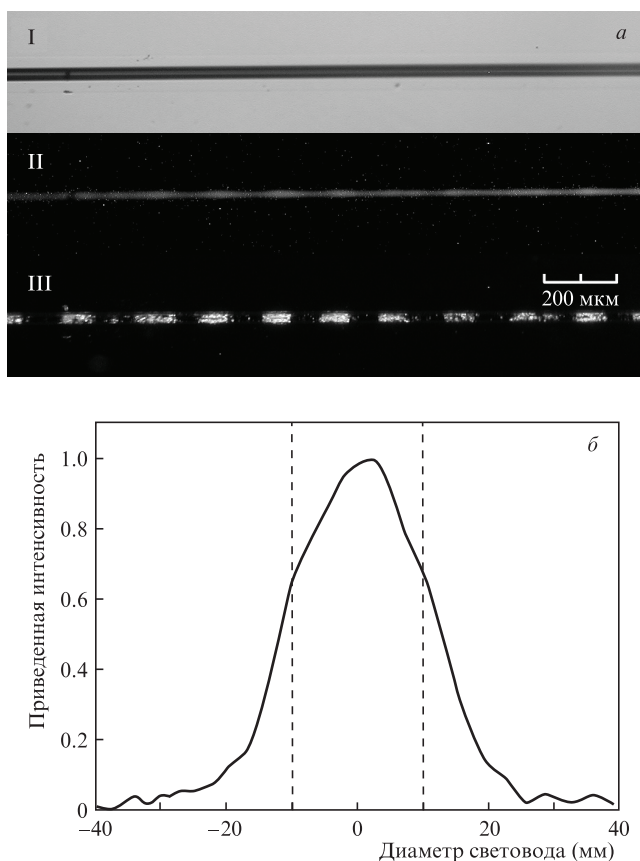


Рис.5. Фотографии одного и того же участка световода PC2 до (I, подсветка снизу), во время (II, собственное свечение ОР) и после (III, подсветка сбоку) прохождения по нему ОР (световод без полимерной оболочки находился в иммерсионной жидкости) (а), а также распределение интенсивности излучения плазмы ОР в поперечном сечении PC2, измеренное по денситограмме кадра II. Штриховыми линиями обозначены границы поллой сердцевины PC2 (б).

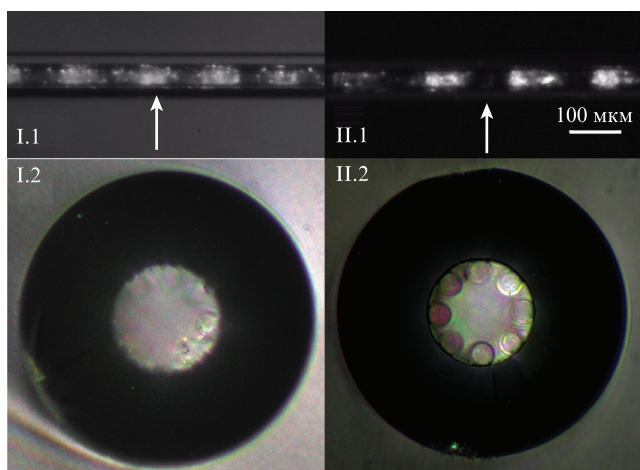


Рис.6. Световод PC2 после прохождения по нему оптического разряда:

I.1, II.1 – вид сбоку, стрелками указаны места скола; I.2, II.2 – фотографии поперечного сечения световода соответствующие местам, указанным на I.1, II.1. Фотографии I.1 и II.1 выполнены без иммерсии, поэтому масштаб по вертикали отличается от указанного для I.1 и II.1 масштаба по горизонтали. На I.2 и II.2 внешний диаметр световода равен 100 мкм.

На рис.6 приведены увеличенные фотографии таких участков (I.1 и II.1), а также фотографии сколов световода PC2, сделанных после прохождения ОР через разру-

шенный и менее разрушенный участки (I.2 и II.2). Видно, что на рис.6 (II.2) наблюдается сохранившаяся структура капилляров отражающей оболочки, тогда как на рис.6 (I.2) она полностью отсутствует.

4. Обсуждение результатов

Наблюдаемое в наших экспериментах непрерывное распространение ОР по полую волоконному световоду со средней скоростью ~ 1 м/с под действием периодической последовательности НППИ в действительности представляет собой сочетание движения светодетонационной волны по световоду в течение каждого ПИ, движения затухающей ударной волны (УВ) между ПИ, релаксации плазмы разряда в течение миллисекундного промежутка времени [16] между НППИ и пробоя релаксирующей плазмы одним из первых ПИ следующего НППИ. После чего процесс повторяется. Похожий процесс реализуется в обычных световодах с сердцевиной из кварцевого стекла под действием последовательности наносекундных лазерных импульсов [5].

Относительно начала движения ОР при приходе каждого следующего НППИ (после первого, когда ОР инициируется с помощью металлической поверхности) следует сказать следующее. Порог оптического пробоя воздуха составляет около 10^{11} Вт/см² на длине волны неодимового лазера при атмосферном давлении [17]. Такие интенсивности достигались в наших экспериментах в максимумах ПИ, но ни в одном эксперименте оптический пробой не возникал. Таким образом, мы не достигали порога оптического пробоя в наших условиях в полном световоде. Однако после инициирования ОР во всех экспериментах он проходил полностью всю доступную длину световода. Возможными причинами надежного «рестарта» ОР после миллисекундных интервалов между НППИ является известный эффект снижения порога оптического пробоя газа при повышении его давления [18] и увеличение напряженности электрического поля световой волны на остриях осколков капилляров в области разрушения.

Области полного разрушения капилляров отражающей оболочки в PC2 (рис.5 и 6) соответствуют, по-видимому, областям распространения УВ с максимальным скачком давления на фронте, т.е. распространению светодетонационной волны под действием ПИ и сразу после его окончания. Расстояние между областями разрушения составляет в среднем ~ 170 мкм (рис.5 и 6), и УВ проходит ее за 13 нс (период ПИ), что позволяет оценить среднюю скорость распространения ОР между ПИ в 13 км/с.

Согласно оценке скорость распространения ОР как светодетонационной волны [4, 19, 20] во время действия ПИ (при энергии в одном ПИ ~ 0.1 мДж) составляет ~ 160 км/с. По окончании ПИ для описания распространения мощной УВ по полую световоду можно в некотором приближении использовать решение модельной одномерной задачи о сильном взрыве [21]. Если считать, что энергия единичного ПИ выделяется в сечении полого световода мгновенно, то через 100 пс (длительность ПИ) скорость УВ в таком приближении составит ~ 100 км/с, а через 13 нс (расстояние между ПИ) – 20 км/с (расчетная средняя скорость распространения УВ за указанный промежуток времени около 30 км/с). Приближение одномерной задачи о сильном взрыве, таким образом, дает правильные по порядку величины, но завышенные до трех раз значения скорости ОР. По-видимому, это является

следствием отличия поперечного сечения полого световода от трубы с диаметром, равным диаметру сердцевинны (такое приближение использовалось в оценках), а также пренебрежения потерями энергии на разрушение капилляров оболочки и нагрев внешней трубы капилляра.

Если предположить, что под действием каждого ПИ, превышающего по интенсивности $1/2$ от интенсивности самого мощного ПИ в НППИ, ОР проходит расстояние ~ 170 мкм (см. рис.5) и ОР самостоятельно инициируется каждым таким ПИ, то средняя скорость движения ОР составит ~ 2 м/с, что является хорошей оценкой для наблюдаемых $V \approx 1$ м/с. Меньшая средняя скорость распространения ОР по сравнению с оценкой может наблюдаться вследствие того, что ОР инициируется только ПИ с большей интенсивностью, чем $1/2$ максимальной.

Таким образом, в настоящей работе впервые наблюдалось распространение ОР по РС с полой сердцевинной под действием импульсно-периодического излучения неодимового одномодового лазера. Полученные данные по средней скорости распространения ОР и картина повреждений отражающей оболочки световода позволяют сделать вывод о том, что процесс распространения разряда складывается из процесса распространения оптической детонационной волны (под действием ПИ с интенсивностью $\sim 10^{11}$ Вт/см²), движения мощной УВ между ПИ (период 13 нс) и релаксации УВ между НППИ за время около 1 мс с последующим инициированием детонационной волны следующим ПИ.

Полученные результаты показывают, что скорости разрушения световодов с полой сердцевинной при транспортировке излучения высокой пиковой и средней мощностей могут достигать километров в секунду при полном разрушении волоконного световода. Исключение возможности случайного инициирования ОР расширяет диапазон рабочих мощностей и интенсивностей излучения волоконных систем с полой сердцевинной. С другой стороны, использование полых световодов позволяет проводить модельные эксперименты по распространению различных типов горения (медленного, т.е. теплопроводного, и детонационного) в одномерной геометрии (по трубе).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-00324 и программы Президиума РАН I.7 «Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов».

1. Kashyap R. *Proc. Internat. Conf. Lasers'87* (Nevada, Lake Tahoe, USA, Dec. 7–11, 1987, p. 859).
2. Hand D.P., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **13**, 767 (1988).
3. Kashyap R. *Opt. Express*, **21**, 6422 (2013).
4. Райзер Ю.П. *Лазерная искра и распространение разрядов* (М.: Наука, 1974).
5. Дианов Е.М., Фортов В.Е., Буфетов И.А., Ефремов В.П., Фролов А.А., Щелев М.Я., Лозовой В.И. *Письма в ЖЭТФ*, **83**, 84 (2006).
6. Дианов Е.М., Буфетов И.А., Фролов А.А., Плотниченко В.Г., Машинский В.М., Чурбанов М.Ф., Снопатин Г.Е. *Квантовая электроника*, **32**, 476 (2002) [*Quantum Electron.*, **32**, 476 (2002)].
7. Dianov E.M., Bufetov I.A., Frolov A.A. *J. Opt.*, **33**, 171 (2004).
8. Дианов Е.М., Фролов А.А., Буфетов И.А., Семенов С.Л., Чаморовский Ю.К., Иванов Г.А., Воробьев И.Л. *Квантовая электроника*, **34**, 59 (2004) [*Quantum Electron.*, **34**, 59 (2004)].
9. <https://www.photonic-tools.de/products/llk-ultrafast/>
10. Tauer J., Orban F., Kofler H., Fedotov A.B., Fedotov I.V., Mitrokhin V.P., Zheltikov A.M., Wintner E. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 444 (2007).
11. Dumitrache C., Rath J., Yalin A. P. *Materials*, **7**, 5700 (2014).
12. Крылов А. А., Сазонкин С. Г., Косолапов А. Ф., Прямиков А. Д., Колядин А. Н., Буфетов И. А. *Квантовая электроника*, **48**, 589 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 589 (2018)].
13. Bufetov I.A., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Gladyshev A.V., Kolyadin A.N., Krylov A.A., Yatsenko Y.P., Biriukov A.S. *Fibers*, **6**, 39 (2018).
14. Буфетов И.А., Федоров В.Б., Фомин В.К. *Физика горения и взрыва*, №3, 18 (1986).
15. Буфетов И.А., Дианов Е.М. *УФН*, **175**, 100 (2005).
16. Буфетов И.А., Прохоров А.М., Федоров В.Б., Фомин В.К. *Письма в ЖЭТФ*, **32**, 281 (1980).
17. Tomlinson R.G., Damon E.K., Buscher H.T., in *Physics of Quantum Electronics* (New York: McGraw-Hill, 1966, p. 520).
18. Gill D H., Dougal A.A. *Phys. Rev. Lett.*, **15**, 845 (1965).
19. Ramsden S.A., Savic P. *Nature*, **203**, 1217 (1964).
20. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Гидродинамика* (М.: Наука, 1986).
21. Седов Л.И. *Методы подобия и размерности в механике* (М.: Наука, 1981).