

## 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<sup>+</sup>, В. И. Лозовой<sup>+</sup>*

*ИЦВО при ИОФ им. А. М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия*

*\*ИТЭС ОИВТ РАН, 127412 Москва, Россия*

*<sup>+</sup>ИОФ им. А. М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 16 декабря 2005 г.

Наблюдается “быстрый” – детонационно-подобный режим распространения оптического разряда по волоконному световоду на основе плавленного кварца со скоростями до 3 км/с при интенсивности лазерного излучения в сердцевине до 40 Вт/мкм<sup>2</sup>.

PACS: 52.50.Jm, 62.50.+p

Зона ярко светящейся плазмы, поддерживаемая непрерывным лазерным излучением и распространяющаяся навстречу излучению, может существовать в световодах на основе кварцевого стекла уже при интенсивностях излучения  $\geq 1$  МВт/см<sup>2</sup> [1]. Такие интенсивности достигаются в стандартных световодах с диаметром поля моды  $\approx 10$  мкм при мощности введенного в сердцевину световода оптического излучения около 1 Вт. Впервые распространение оптического разряда по волоконному световоду наблюдалось в 1987 г. [2] и в англоязычной литературе получило название catastrophic damage или fuse-effect. При указанных интенсивностях лазерного излучения фронт разряда движется навстречу лазерному излучению по световоду со скоростью несколько метров в секунду. Механизм распространения в этом случае аналогичен процессу распространения оптического разряда в режиме медленного горения в газах [3]. При повышении интенсивности лазерного излучения в газах наблюдается переход от режима медленного горения к режиму световой детонации [4] уже при  $I \approx 5$  МВт/см<sup>2</sup> (при распространении разряда по лабораторному воздуху в трубе из кварцевого стекла). Целью настоящей работы было исследование режимов распространения оптического разряда в световодах на основе плавленного кварца при увеличении интенсивности лазерного излучения в сердцевине световода на 2 порядка по сравнению с ранее выполненными экспериментами [1]. Предварительные результаты настоящих исследований были представлены на ЕССОС’2005 [5].

В наших экспериментах для поддержания разряда использовалось излучение Nd:YAG-лазера с длиной

волны 1.064 мкм, работающего в режиме модуляции добротности. Частота следования импульсов составляла 5 кГц, длительность импульса 250 нс по уровню 1/2, энергия в импульсе до 0.6 мДж, максимальная мощность в импульсе  $P_{\max} = 3.0$  кВт (средняя мощность 3.8 Вт), что позволяло получать в сердцевине световодов интенсивности лазерного излучения до  $I \approx 40$  Вт/мкм<sup>2</sup> (или, что то же, 4 ГВт/см<sup>2</sup>).

Излучение лазера вводилось в световод с помощью микрообъектива. Оптический разряд (ОР) инициировался в световоде путем касания выходным торцом световода металлической поверхности, поглощающей лазерное излучение. Возникающий при этом нагрев сердцевины приводил к поглощению излучения в ней, вследствие чего возникал ОР.

После инициирования ОР распространялся по световоду навстречу лазерному излучению. Внешне это выглядело как движение ярко светящейся плазмы по сердцевине световода со скоростью около 1 м/с, как и в случае распространения ОР под действием непрерывного лазерного излучения такой же средней мощности. Но в настоящих экспериментах собственно процесс движения разряда по световоду имел место, разумеется, только во время действия лазерного импульса, за которое он смещался на расстояние  $\approx 500 \div 700$  мкм. При снижении мощности лазерного излучения во второй половине импульса ОР останавливался и гас. После прихода следующего импульса разряд снова инициировался за счет поглощения излучения на неоднородностях в точке остановки, и процесс возобновлялся.

Для исследования параметров процесса от состава стекла в экспериментах использовались два типа

( $F1$  и  $F2$ ) волоконных световодов на основе плавленного кварца. В световоде  $F1$  превышение показателя преломления сердцевинки световода над показателем преломления оболочки ( $\Delta n$ ) достигалось путем легирования плавленного кварца в области сердцевинки двуокисью германия с концентрацией  $\approx 12$  мол. % ( $\Delta n \approx 0.016$ ). В световоде  $F2$  сердцевина содержала легирующие добавки:  $Al_2O_3$  (2 мол. %),  $GeO_2$  (1 мол. %) и  $Nd_2O_3$  (0.1 мол. %), что приводило к величине  $\Delta n \approx 0.006$ . Диаметр сердцевинки и диаметр кварцевой отражающей оболочки составляли в световоде  $F1$  7 и 125 мкм, а в световоде  $F2$  9.5 и 600 мкм соответственно.

На рис.1 представлены фотографии световодов типа  $F2$ , сделанные с помощью оптического микроскопа.

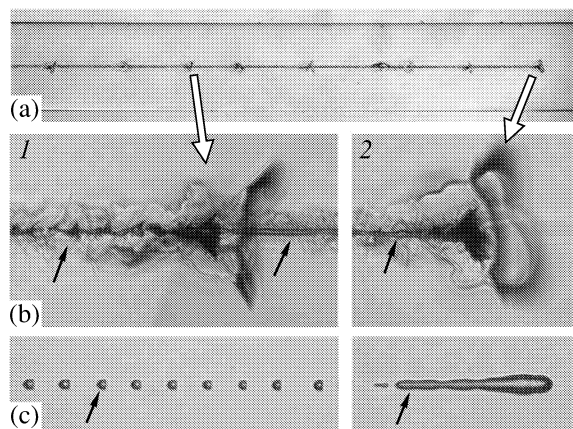


Рис.1. Фотографии световода  $F2$  после распространения по его сердцевине волны оптического разряда. Лазерное излучение на всех кадрах распространялось справа налево. (а) Разрушения сердцевинки после прохождения “быстрой” волны ОР, видимый на фотографии диаметр световода составлял 600 мкм. (б) Разрушения сердцевинки световода в увеличенном масштабе (высота кадра соответствует 100 мкм): (б) 1 – область промежуточной остановки ОР между лазерными импульсами, (б) 2 – точка конечной остановки ОР. (с) Для сравнения: повреждения сердцевинки такого же световода после распространения по нему “медленной” волны ОР: (с) 1 – в 1 мм от точки остановки, (с) 2 – точка остановки после перекрытия лазерного луча механическим затвором; масштаб такой же, как в (б)

па, после прохождения по световоду оптического разряда. Для устранения искажений изображения сердцевинки вследствие преломления световых лучей при переходе из оболочки световода в воздух при фотографировании световод помещался в иммерсионную жидкость (глицерин). На рис.1а представлен общий вид разрушений в световоде после прохождения по нему серии импульсов с максимальной мощностью

2.4 кВт. Отчетливо наблюдаются точки остановки разряда между импульсами. Крайняя справа точка соответствует остановке разряда после перекрытия лазерного луча механическим затвором.

На рис.1б в более крупном масштабе представлен вид разрушенного световода. Распространение разряда сопровождается формированием трещин в области сердцевинки, идущих в основном в радиальном направлении и занимающих объем диаметром  $\approx 25$  мкм (рис.1б, 1, правая часть). В точках остановки разряда между импульсами формируются более крупные трещины диаметром до 120 мкм. Такие трещины, как правило, доходят до внешней поверхности волоконного световода  $F1$  диаметром 125 мкм, вызывая его разрушение после прохождения разряда. Поэтому на рис.1 представлены только фотографии световода диаметром 600 мкм. Кроме того, на рис.1б наблюдаются расположенные, главным образом, по оси сердцевинки световода темные образования (отмеченные черными стрелками), аналогичные пустотам или пузырькам, формирующимся в сердцевине световода при распространении по нему оптического разряда в режиме медленного горения под действием непрерывного лазерного излучения (см. рис.1с). “Негладкая” форма пустот в левой части рис.1б, 1 свидетельствует, что в данной области (незадолго до остановки разряда) трещины вокруг нагретой лазерным излучением сердцевинки формируются до окончания тепловой релаксации, то есть скорость их образования сравнима со скоростью движения разряда на этом участке.

Скорость распространения фронта разряда вдоль световода регистрировалась двумя способами: А) регистрацией непрерывной развертки движения ОР с помощью щелевой электронно-оптической камеры (ЭОК) и Б) по времени пробега ОР расстояния  $\sim 100$  мкм, которое задавалось положением двух щелей в экране, расположенном в плоскости промежуточного изображения световода в оптической системе микроскопа.

На рис.2 представлена схема эксперимента по измерению скорости распространения ОР с помощью ЭОК в течение отдельного лазерного импульса. Изображение сердцевинки световода, расположенного параллельно входной щели ЭОК, с увеличением проецировалось на эту щель. Таким образом, ЭОК регистрировала излучение, исходящее из сердцевинки световода в направлении, примерно перпендикулярном оси световода. Изображение на экране ЭОК фиксировалось с помощью фотоаппарата. Между ЭОК и световодом размещались светофильтры, с помощью

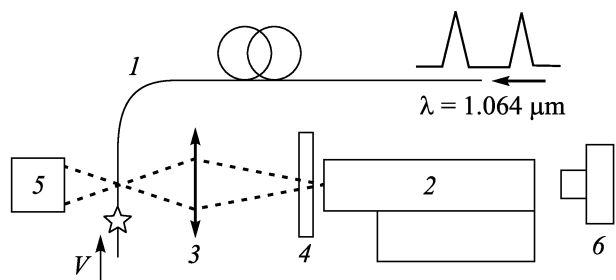


Рис.2. Схема эксперимента по измерению скорости распространения ОР по световоду: 1 – исследуемый световод, 2 – ЭОК, 3 – объектив, отображающий участок сердцевины световода на входную щель ЭОК, 4 – светофильтр, 5 – фотоприемник, 6 – фотоаппарат. Распространяющийся ОР условно обозначен “звездочкой”

которых для регистрации выделялось излучение различных диапазонов длин волн. Такое же излучение, только исходящее из сердцевины световода в противоположном направлении, регистрировалось (уже без пространственного разрешения) с помощью фотоприемника (германиевого лавинного фотодиода) и осциллографа. Одновременно с помощью такого же фотодиода регистрировалась зависимость мощности лазерного импульса от времени. Временная разрешающая способность ЭОК в данной схеме составляла  $\sim 5$  нс, канала фотодиод+осциллограф – около 2 нс. Запуск развертки ЭОК производился до начала распространения ОР.

Пример развертки распространения ОР в световоде  $F1$  (при  $P_{\max} = 1.5$  кВт) в течение лазерного импульса представлен на рис.3а. В данном случае в схеме (рис.2, поз.4) использовался светофильтр ИКС7, пропускающий лазерное излучение и поглощающий видимое излучение плазмы ОР. На развертке лазерное излучение было направлено сверху вниз, соответственно ОР двигался снизу вверх, а ось времени направлена горизонтально слева направо. На рис.3 приведены также совмещенные между собой и с разверткой (Рис.3а) по времени осциллограммы лазерного импульса и рассеянного лазерного излучения. На развертке (рис.3а) при  $t < 0$  наблюдается нарастающее по интенсивности рассеянное лазерное излучение (нижняя горизонтальная линия). При  $t = 0$  инициируется оптический разряд, интенсивность рассеянного излучения резко снижается. Это фиксируется как по развертке, так и по осциллограмме. Фронт оптического разряда движется навстречу лазерному излучению со скоростью  $\approx 2.6$  км/с в начале импульса, в средней части импульса скорость возрастает до  $\approx 3.2$  км/с, а перед остановкой снижается, и за  $\sim 10$  нс до нее составляет  $\approx 2.2$  км/с. Путь, пройденный разрядом за импульс, составил  $\approx 700$  мкм.

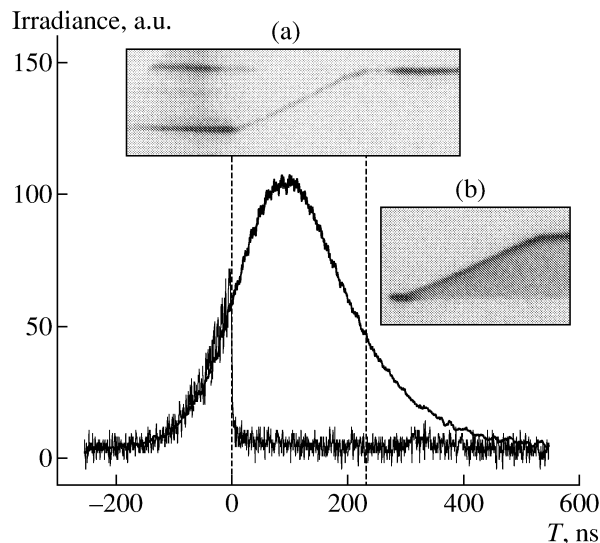


Рис.3. Осциллограммы лазерного импульса и лазерного излучения, рассеянного вбок до инициирования разряда, во время его движения и после остановки. Ноль шкалы времени совпадает с моментом инициирования. (а) Развертка движения оптического разряда в том же масштабе времени (негатив, фиксировалось рассеянное лазерное излучение); (б) развертка движения ОР (негатив, в том же масштабе, фиксировалось только собственное свечение плазмы ОР в диапазоне 400–500 нм). Направление распространения лазерного излучения на развертках сверху вниз

Лазерное излучение еще в течение  $\sim 200$  нс или более после остановки ОР сохраняет мощность более нескольких ватт, необходимую для поддержания оптического разряда в режиме “медленного” горения, и плазма продолжает поглощать большую часть мощности лазерного излучения. Существенно, что восстановление высокой интенсивности рассеяния (это наблюдается по развертке ЭОК) происходит через сравнительно небольшое время ( $\approx 35$  нс) после прекращения движения со скоростью  $\sim 1$  км/с. Данное обстоятельство может быть объяснено, по-видимому, тем, что это время необходимо на образование крупной трещины в точке остановки разряда (здесь мы не учитываем движение со скоростью  $\sim 1$  м/с). В верхней части рис.3а слева наблюдается трек рассеяния последующего лазерного импульса на точке остановки ОР (при повторном запуске ЭОК). Но новый лазерный импульс в этом случае не приводит к инициированию разряда.

Данные рис.3 показывают, что интенсивность инициирования “быстрого” оптического разряда составляет примерно половину от максимальной, достигаемой в световоде во время импульса, и составляет  $\approx 20$  Вт/мкм<sup>2</sup>. Момент остановки разря-

да указывает минимальную (пороговую) интенсивность поддержания разряда, которая несколько ниже интенсивности инициирования и составляет около  $15 \text{ Вт/мкм}^2$ .

Развертка собственного свечения плазмы ОР в аналогичном эксперименте (световод  $F1$ ,  $P_{\text{max}} = 1.5 \text{ кВт}$ ) представлена на рис.3б. В этом случае регистрировалось только излучение в диапазоне длин волн  $400\text{--}500 \text{ нм}$  через светофильтр СЗС22. Свечение возникает непосредственно перед началом распространения ОР: задержка между возникновением яркого свечения и началом движения ОР со скоростью более  $1 \text{ км/с}$  составляет  $\sim 30 \text{ нс}$ . Кроме свечения фронта ОР, в этом случае наблюдается менее яркое свечение всего объема плазмы. В эксперименте, показанном на этом рисунке, фронт плазмы прошел расстояние  $650 \text{ мкм}$  за  $240 \text{ нс}$  со средней скоростью  $V \approx 2.7 \text{ км/с}$ , то есть передвижение ОР составило  $\approx 110$  диаметров зоны первоначального выделения энергии. При этом средний энерговклад в материал сердцевины световода составил  $\approx 6 \text{ МДж/кг}$ , что сравнимо с плотностью энергии, выделяющейся при детонации тротила, которая составляет  $4.2 \text{ МДж/кг}$ .

Измерение средней скорости распространения ОР по времени прохождения им отрезка длиной  $\sim 100 \text{ мкм}$  дало результаты, в пределах точности измерений не отличающиеся от результатов, полученных с помощью ЭОК. Скорости распространения разряда были измерены также в световоде  $F2$ , и их средние величины за импульс оказались равными  $2.3$  и  $2.6 \text{ км/с}$  при мощности лазерного излучения в световоде  $P_{\text{max}} = 2.4 \text{ кВт}$  и  $P_{\text{max}} = 3.0 \text{ кВт}$  соответственно. Полученные значения средней скорости за время распространения приведены на рис.4 в зависимости от максимального значения интенсивности лазерного излучения в сердцевине световода. Скорости распространения ОР в световодах с различным легированием сердцевины ( $F1$  и  $F2$ ) оказались близкими, что указывает на слабую зависимость скорости ОР от состава стекла для исследованных световодов.

Если сопоставить данные по скорости распространения “медленного” оптического горения в световодах со скоростями “быстрого” (рис.4), то очевидно, что “быстрому” режиму соответствуют скорости, приблизительно на два порядка более высокие, чем определяемые по экстраполяции данных для “медленного” режима. И, следовательно, “быстрый” режим обусловлен другими физическими процессами. О другой физической природе “быстрого” режима свидетельствует также качественное различие кар-

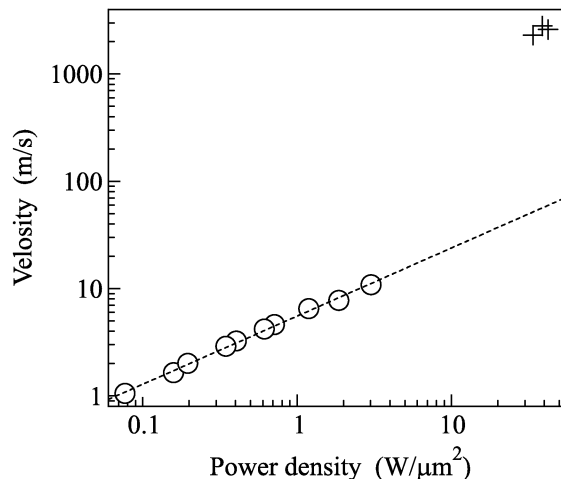


Рис.4. Зависимость скорости движения ОР от интенсивности лазерного излучения. ○ – результаты наших измерений скорости распространения разряда по световоду в режиме медленного горения (в том числе результаты [1]), + – режим быстрого распространения оптического разряда. Пунктир – аппроксимация зависимости  $V(I)$  для режима медленного горения ( $V = 5.6 \cdot I^{0.635}$ ), где скорость распространения  $V$  в м/с, а интенсивность излучения в  $\text{Вт}/\mu\text{м}^2$ ), экстраполированная в область высоких интенсивностей

тин повреждений световодов после прохождения волн разрядов различных типов (сравни рис.1б и рис.1с).

Наблюдаемая скорость распространения разряда ( $\sim 3 \text{ км/с}$ ) существенно превышает скорость медленного горения оптического разряда в световоде, поэтому обычная теплопроводность не может быть основным механизмом, обеспечивающим распространение разряда вдоль сердцевины световода. По аналогии с процессами химического горения следующим, более быстрым механизмом распространения, является детонационный. Но наблюдаемые скорости распространения ниже продольной скорости звука в твердом кварцевом стекле (которая равна  $\sim 6 \text{ км/с}$ ), что не позволяет использовать для описания данного процесса модель обычной детонации. Поэтому вопрос об адекватной физической модели наблюдаемого процесса требует дополнительных исследований.

Таким образом, в настоящей работе в волоконных световодах на основе кварцевого стекла обнаружен режим распространения фронта оптического разряда со скоростью, сравнимой со скоростью звука в стекле, при воздействии лазерного излучения мощностью около  $1 \text{ кВт}$ . Определена пороговая интенсивность лазерного излучения для инициирования и поддержания детонационно-подобного режима распространения оптического разряда в волоконном световоде. Измеренная скорость распространения фронта плаз-

мы составила 3.2 км/с при интенсивности излучения 40 Вт/мкм<sup>2</sup>.

Работа выполнена при частичной поддержке Программ президиума РАН “Теплофизика и механика интенсивных энергетических воздействий” и “Фундаментальные основы высокочистых оптических материалов”, а также фонда Max Plank Award Cooperation (Research Project “Physics of High Energy Density Plasmas”).

1. И. А. Буфетов, Е. М. Дианов. УФН **175**, 100 (2005).

2. Raman Kashyap, *Self-propelled self-focusing damage in optical fibers*, Proc. Internat. Conf. Lasers'87, Lake Tahoe, Nevada, Dec. 7-11, 1987, p. 859.
3. Ф. В. Бункин, В. И. Конов, А. М. Прохоров, В. Б. Федоров, Письма в ЖЭТФ **9**, 609(1969).
4. И. А. Буфетов, А. М. Прохоров, В. Б. Федоров, В. К. Фомин, Письма в ЖЭТФ **39**, 216 (1984).
5. I. A. Bufetov, A. A. Frolov, V. P. Efremov et al., *Fast Optical Discharge Propagation through Optical Fibres under kW-Range Laser Radiation*, in Technical Digest of 31st European Conf. on Optical Commun. (ECOC), Glasgow, UK, 25-29 September 2005, paper Th4.4.2(PD).