

## Эффект катастрофического разрушения в микроструктурированном световоде

Е.М.Дианов, А.А.Фролов, И.А.Буфетов, С.Л.Семенов,  
Ю.К.Чаморовский, Г.А.Иванов, И.Л.Воробьев

*Впервые наблюдался эффект катастрофического разрушения в микроструктурированном световоде под действием лазерного излучения. Пороговые интенсивности излучения, необходимые для его реализации в данном типе световода, на порядок выше, чем в стандартных световодах на основе кварцевого стекла.*

**Ключевые слова:** волоконный световод, оптический разряд, лазерное разрушение.

Эффект катастрофического разрушения световодов впервые наблюдался в одномодовых световодах в 1987 г. [1] и впоследствии исследовался многими авторами [2–4]. Суть явления состоит в возникновении в сердцевине световода под действием лазерного излучения оптического разряда, который распространяется по световоду навстречу лазерному излучению со скоростью  $\sim 1$  м/с в виде уединенной волны оптического разряда. Механическая прочность стекла обеспечивает поддержание в оптическом разряде плазмы с высокой плотностью и температурой более  $5000^\circ\text{C}$ . Плазма эффективно поглощает лазерное излучение на длине порядка диаметра сердцевины световода. Основным механизмом распространения волны оптического разряда является теплопроводностная передача энергии из области разряда вдоль световода навстречу лазерному излучению. Аналогичное явление – распространение границы плазменного образования при оптическом пробое в объемных образцах стекол при импульсном лазерном воздействии – ранее подробно рассматривалось в [5].

Типичные значения интенсивности лазерного излучения в сердцевине световода, необходимые для поддержания волны оптического разряда в световодах на основе кварцевого стекла, составляют порядка  $1\text{--}5$  МВт/см<sup>2</sup> (для стандартного телекоммуникационного световода это соответствует оптической мощности порядка 1 Вт) [3]. После прохождения оптического разряда световод утрачивает световодящие свойства из-за образования в сердцевине пустот, заполненных газом. В результате распространения оптического разряда в направлении источника излучения протяженность поврежденного световода может составлять многие километры. Однако для возникновения разряда необходимо внешнее инициирование, т. е. создание области с повышенным поглощением лазерного излучения, т. к. порог оптического про-

боя кварцевого стекла при диаметре облучаемой области  $\sim 10$  мкм составляет  $7 \times 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> [5]. Увеличение поглощения происходит при нагреве сердцевины световода. Причем необходимо, чтобы энерговыделение в этой области при поглощении лазерного излучения превысило потери энергии из нее.

Такое условие для световодов на основе кварцевого стекла выполняется при  $T \geq 1000^\circ\text{C}$  и вызывает тепловой взрыв – скачкообразное повышение температуры и давления, которое приводит к возникновению плазмы. Инициирование волны оптического разряда может быть произведено как с помощью внешних тепловых источников (пламя горелки, электрический разряд), так и в результате поглощения излучения, распространяющегося по световоду, например на загрязненном торце световода или в полимерном покрытии при сильном изгибе.

Перечень типов волоконных световодов, используемых в современных технологиях, все время пополняется. Применение новых материалов и конструкций для световодов ведет к отличию их механических и теплофизических свойств от свойств стандартных световодов на основе кварцевого стекла. Это различие также должно проявляться в особенностях их катастрофического разрушения. Ранее нами исследовались флюоридные и халькогенидные световоды [6], разрушение которых идет без возникновения волны оптического разряда и характеризуется значительно меньшими пороговыми значениями интенсивности и значительно меньшей скоростью распространения разрушения.

В настоящее время интенсивно исследуются микроструктурированные световоды (МС), т. к. в ряде случаев их практическое использование может оказаться более предпочтительным в силу их уникальных характеристик [7]. Наличие воздушных отверстий в конструкции МС существенно изменяет механические и теплофизическими свойствами световода. В этой работе мы впервые сообщаем о наблюдении эффекта катастрофического разрушения в МС.

Световоды, использовавшиеся в наших экспериментах, были изготовлены из плавленного кварца методом сверления отверстий в преформе. После вытяжки внешний диаметр световодов составлял 125 или 150 мкм (световоды с диаметром 150 мкм использовались для измерения прочностных характеристик). На рис.1,а предста-

Е.М.Дианов, А.А.Фролов, И.А.Буфетов, С.Л.Семенов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: sls@fo.gpi.ru

Ю.К.Чаморовский, Г.А.Иванов, И.Л.Воробьев. Институт радиотехники и электроники РАН, Россия, 101999 Москва, ул. Моховая, 11, корп.7

Поступила в редакцию 1 июля 2003 г.

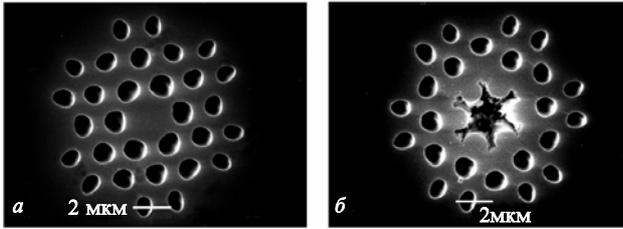


Рис.1. Фотография центральной части скела МС до (а) и после (б) прохождения волны оптического разряда.

влена фотография центральной части скела световода, перпендикулярного его оси. Диаметр отверстий был около 1 мкм, расстояние между их центрами составляло примерно 2 мкм.

Как известно, снижение прочности световодов обусловлено главным образом концентрацией напряжений на поверхностных трещинах. Наличие в конструкции световода отверстий значительно увеличивает площадь поверхности, а следовательно, может сильно повлиять на их прочность. Для МС были проведены измерения прочности на разрыв. Измерения проводились для световода с внешним диаметром 150 мкм (диаметр световода с защитным эпоксиакрилатным покрытием составлял 250 мкм) на отрезках длиной 25 см при скорости растяжения 100 мм/мин и при относительной влажности 50 %. Результаты измерений представлены на рис.2 в виде диаграммы Вейбулла, из которой видно, что прочность МС для большей части тестов практически равна прочности стандартного высокопрочного световода. Наличие нескольких точек в области пониженной прочности показывает, что на больших длинах прочность такого световода еще низка. Но малое их количество и совпадение основной моды прочности МС с прочностью стандартного световода говорит о том, что технология получения таких световодов потенциально пригодна для производства высокопрочных МС большой длины.

В экспериментах по катастрофическому разрушению использовались отрезки МС длиной 1.5–2 м. В качестве источников излучения применялись непрерывный Nd:YAG-лазер с  $\lambda = 1.064$  мкм (Antares, Coherent) и непрерывный аргоновый ионный лазер с длинами волн вблизи 0.5 мкм (Beamlock, Spectra Physics). МС были одномодовыми на  $\lambda = 1.064$  мкм, для  $\lambda = 0.5$  мкм световод оказался маломодовым, но юстировкой ввода излучения в световод можно было добиться, чтобы 80 %

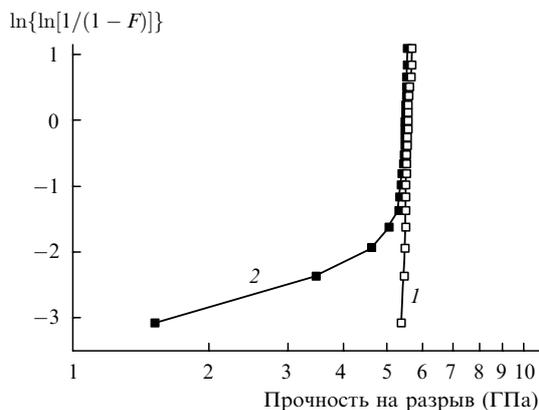


Рис.2. Диаграмма Вейбулла для стандартного световода (1) и МС (2);  $F$  – кумулятивная вероятность разрыва.

мощности распространялось в основной моде. Оценка диаметра поля моды (ДПМ) по уровню  $1/e^2$  осуществлялась путем фоторегистрации распределения интенсивности излучения по поперечному сечению с помощью микроскопа. Оказалось, что ДПМ равен приблизительно 2 мкм как при  $\lambda = 1.064$  мкм, так и при  $\lambda = 0.5$  мкм. Излучение вводилось в световод с помощью микрообъектива, при этом удавалось получить на выходе двухметрового отрезка МС до 9 Вт на  $\lambda = 1.064$  мкм и до 4 Вт в случае излучения аргонового лазера. Для иницирования оптического разряда к торцу световода (в отсутствие лазерного излучения) подводилась вольфрамовая игла, после чего в световод подавалось лазерное излучение.

Было обнаружено, что волна оптического разряда возникала в указанных выше условиях только в опытах с коротковолновым излучением. Эффект уверенно воспроизводился при мощности 4 Вт на выходе из МС. При этом скорость распространения волны была всего около 2 м/с в отличие от ожидаемого значения 10 м/с, характерного для стандартного световода при тех же условиях (это значение получено экстраполяцией данных работы [4]). Кроме того, пороговое значение интенсивности лазерного излучения, при которой происходит возникновение волны оптического разряда, составляло не менее 100 МВт/см<sup>2</sup> (при мощности 3 Вт эффект отсутствовал), что на порядок выше, чем в стандартных световодах с таким же ДПМ [3]. После распространения разряда МС так же, как и стандартный световод, терял свои световодящие свойства.

На рис.1,б представлен вид поперечного сечения МС после прохождения по нему волны оптического разряда (скел, перпендикулярный оси световода). В центральной части световода сформировался сплошной капилляр, имеющий поперечное сечение в виде шестилучевой звезды (по числу располагавшихся там ранее шести отверстий). При погружении конца такого световода в жидкость, смачивающую стекло (глицерин), все капилляры, как входящие в конструкцию световода, так и образовавшийся в результате распространения оптического разряда, заполняются ею. В этом случае при наблюдении сбоку видна полностью прозрачная структура, что свидетельствует об отсутствии образования каких-либо сильно окрашенных веществ в результате распространения оптического разряда по кварцевому стеклу и о непрерывности образовавшегося в центре капилляра.

На рис.1,б также видно значительное перемещение расплавленных масс стекла в ходе распространения волны оптического разряда. В свою очередь это приводит к более значительному расширению плазмы в МС по сравнению со стандартным световодом. Расширение плазмы и, как следствие, снижение в ней поглощения лазерного излучения ведут к росту оптической мощности, необходимой для поддержания волны оптического разряда в данном типе световода. Таким образом, из-за наличия в области оптического разряда границы кварцевого стекла с воздухом возникает дополнительный механизм потерь энергии разряда (расширение плазмы) и существенно затрудняется распространение волны оптического разряда.

При воздействии излучения Nd:YAG-лазера на МС ни в одном из опытов не наблюдалось иницирования и распространения разряда. Ранее нами было установлено, что для излучения с  $\lambda = 1.064$  мкм (по сравнению с излучением с  $\lambda = 0.5$  мкм) пороговое значение оптической мощности, необходимой для возникновения волны

оптического разряда в стандартном световоде, выше в 2–6 раз (в зависимости от типа световода). По-видимому, это может объяснить отсутствие исследуемого эффекта в МС для длинноволнового излучения в диапазоне достижимых в нашем эксперименте мощностей, т. е. вплоть до 9 Вт.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрировано, что эффект катастрофического разрушения под действием лазерного излучения имеет место и в МС, но пороговые значения интенсивности примерно на порядок выше, чем для стандартных световодов на основе кварцевого стекла. Для излучения с  $\lambda = 1.064$  мкм распространение волны оптического разряда для данных световодов не наблюдалось, по крайней мере, вплоть до входной мощности излучения 9 Вт. Эти особенности обусловлены конструкцией МС, а именно наличием воздушных отверстий вблизи области локализации плазменного образования.

Благодаря тому, что в МС пороговые значения интенсивности для волны оптического разряда значительно выше, отрезок такого световода может выступать в роли устройства, защищающего участки волоконно-оптических линий от катастрофического разрушения.

1. Kashyap R. In *Proc. Int. Conf. Lasers'87* (Lake Tahoe, NV, USA, 1987, p. 859); Kashyap R., Blow K.J. *Electron. Lett.*, **24**, 47 (1988).
2. Davis D.D., Mettler S.C., DiGiovanni D.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2966**, 592 (1997).
3. 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).
4. Hand D.P., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **13**, 767 (1988).
5. Каск Н.Е. *Докт. дисс.* (НИЯФ, Москва, 1985).
6. Dianov E.M., Bufetov I.A., Frolov A.A., Mashinsky V.M., Plotnichenko V.G., Churbanov M.F., Snopatin G.E. *Electron. Lett.*, **38**, 783 (2002).
7. Russell P. *Laser Focus World*, September, 77 (2002).