

# Катастрофическое разрушение волоконных световодов различного состава под действием лазерного излучения

Е.М.Дианов\*, И.А.Буфетов\*, А.А.Фролов\*, В.Г.Плотниченко\*,  
В.М.Машинский\*, М.Ф.Чурбанов\*\*, Г.Е.Снопатин\*\*

*Измерены пороговые интенсивности излучения, требуемые для поддержания волны оптического разряда в различных волоконных световодах на основе кварцевого стекла для разных длин волн лазерного излучения. Показано, что пороговая интенсивность в широком диапазоне экспериментальных условий определяется, главным образом, диаметром поля моды в световоде. Впервые исследован процесс разрушения халькогенидных и флюоридных световодов под действием лазерного излучения мощностью  $\sim 1$  Вт. В таких световодах волна оптического разряда не возникает, а разрушение носит характер термического разложения материала световода по всему поперечному сечению. Разрушение этих световодов характеризуется существенно более низкими пороговыми интенсивностями лазерного излучения, чем в случае световодов на основе кварцевого стекла.*

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

## 1. Введение

В настоящее время в связи с использованием волоконных оптических усилителей мощности излучения, передаваемые по одному волоконному световоду (ВС) в линии связи, приближаются к уровню  $\sim 1$  Вт. Этого оказывается достаточно для поддержания распространения волны разрушения по волоконным световодам, сделанным из различных материалов, в том числе по ВС на основе кварцевого стекла, формирующим современные линии связи. Представляет также интерес исследование разрушения под действием лазерного излучения халькогенидных (ХС) и флюоридных (ФС) световодов, которые могут использоваться или уже используются для создания оптических усилителей на ионах редкоземельных металлов. Нами исследовался процесс разрушения световодов всех этих типов.

## 2. Световоды на основе кварцевого стекла

В волоконных световодах на основе кварцевого стекла (СКС) под действием лазерного излучения по сердцевине световода распространяется волна оптического разряда, впервые наблюдавшаяся в [1] (см. также [2, 3] и обзор [4]). Подобный процесс исследовался ранее в объемных образцах стекла [5] и в газах [6]. Внешне явление выглядит следующим образом: при определенных условиях (иницирование) в области сердцевины световода (размер  $\sim 10$  мкм) возникает область яркого белого или голубоватого свечения (маленькая «звездочка» – волна оптического разряда), которая движется по световоду со

скоростью порядка 1 м/с навстречу лазерному излучению.

После прохождения волны оптического разряда световод внешне выглядит неповрежденным, однако в его сердцевине образуются полости (или пузыри) размерами порядка нескольких микрометров, причем иногда полости могут формировать периодическую структуру вдоль сердцевины световода (рис.1,а). Процесс может быть инициирован загрязнением торца световода, контактом торца световода с металлической поверхностью, нагреванием участка световода в электрической дуге.

Нами были измерены пороговые значения мощности лазерного излучения, необходимые для распространения волны разрушения по световоду (порогу соответствовала мощность, при которой волна оптического разряда в световоде останавливалась). Измерения были выполнены для одномодовых СКС различного состава, находящихся под действием излучения с различными длинами волн.

В табл.1 указаны состав сердцевины световода или его марка, максимальная разность показателей прелом-

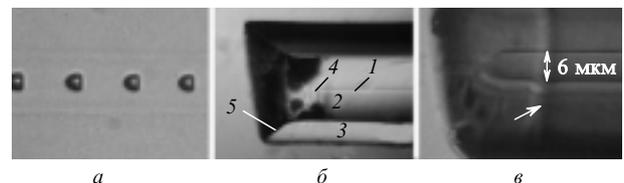


Рис.1. Фотографии повреждений световодов различного состава после остановки процесса разрушения:

а – пустоты, сформировавшиеся в сердцевине СКС (излучение с длиной волны 1.21 мкм распространялось справа налево, расстояние между пустотами  $\sim 14$  мкм); б – разрушившийся торец ФС после выключения лазерного излучения (полный диаметр световода в оболочке 250 мкм, 1 – сердцевина, 2 – оболочка, 3 – полимерное покрытие, 4 – расплавившееся и вновь застывшее флюоридное стекло, 5 – поврежденная полимерная оболочка); в – торец ХС после выключения лазерного излучения (диаметр сердцевины световода 6 мкм, стрелка указывает границу области, подвергшейся плавлению).

\*Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; тел.: 7 (095) 135 05 66, fax: 7 (095) 135 81 39, e-mail: dianov@fo.gpi.ru

\*\*Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603600 Н.-Новгород, ул. Тропинина, 49; тел.: 7 (831) 266 85 42, fax: 7 (831) 266 46 34, e-mail: churbanov@ihps.nnov.ru

Табл.1. Характеристики исследованных световодов.

Номер световода	Состав сердцевины	$\Delta n \times 10^2$	$\lambda_{cr}$ (мкм)
1	SiO <sub>2</sub> – P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.4	1.1
2	SiO <sub>2</sub> – GeO <sub>2</sub>	2.6	1.12
3	Flexcor (Corning)	0.65	0.9
4	SMF28 (Corning)	0.41	1.3
5	SiO <sub>2</sub> – GeO <sub>2</sub>	1.0	1.34
6	SiO <sub>2</sub> – GeO <sub>2</sub>	0.15	0.9
7	SiO <sub>2</sub> – GeO <sub>2</sub>	0.15	1.15
8	SiO <sub>2</sub> – GeO <sub>2</sub> (+ В в оболочке)	0.8	1.0
9	SiO <sub>2</sub> – GeO <sub>2</sub> (+ F в оболочке)	3.0	0.9
XC	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	–	~ 5
ФС	IR guide (LeVF)	–	1.2

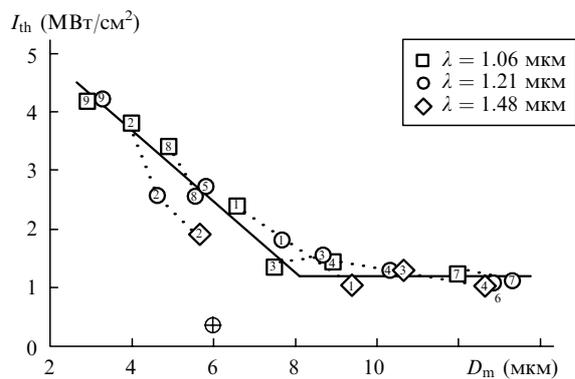


Рис.2. Зависимость пороговой интенсивности лазерного излучения, требуемой для поддержания волны оптического разряда, от диаметра поля моды для световодов различного состава и излучения с разными длинами волн. Цифрами обозначены световоды различного состава (см. табл.1), пунктирными линиями соединены точки, соответствующие одному и тому же световоду, находящемуся под действием излучения с разными длинами волн, сплошная линия – аппроксимация экспериментальных точек; ⊕ – ориентировочно указывает положение  $I_{th}(D_m)$  для исследованных ФС и XC.

мления сердцевины и оболочки  $\Delta n$  и длина волны отсечки второй моды  $\lambda_{cr}$ . Результаты измерений представлены на рис.2. В экспериментах использовалось излучение волоконных лазеров с длинами волн 1.06, 1.21 и 1.48 мкм. Все точки на рис.2 с некоторым разбросом ложатся на одну линию. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что диаметр поля моды  $D_m$  в световоде является определяющим при анализе процесса распространения волн оптического разряда.

### 3. Флюоридные и халькогенидные световоды

Совершенно иным образом выглядит процесс разрушения ВС на основе халькогенидного и флюоридного стекла. Нами исследовались световоды с диаметром оболочки 125 мкм. Световод из As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> в наших экспериментах был многомодовым – длина волны отсечки второй моды составляла около 5 мкм (диаметр сердцевины 6 мкм), световод из ФС – одномодовым ( $\lambda_{cr} = 1.2$  мкм).

После инициирования процесса разрушения этих световодов мы не наблюдали формирования волн оптического разряда, а происходило полное разрушение этих световодов (включая сердцевину, оболочку и иногда защитную полимерную оболочку) по всему поперечному сечению. Наличие или отсутствие защитной полимерной оболочки влияло на процесс разрушения. При мощнос-

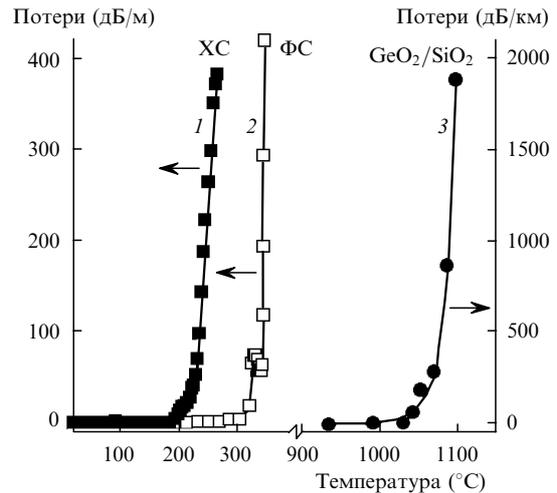


Рис.3. Температурные зависимости оптических потерь в ВС на длине волны 1.06 мкм для XC (1), ФС (2) и германосиликатного ВС (3) [1].

тях лазерного излучения, близких к пороговым, полимерная оболочка световодов не разрушалась и продукты разрушения сердцевины и оболочки оставались в ней. При повышении мощности лазерного излучения полимерная оболочка также подвергалась разрушению (рис.1,б).

В случае XC инициирование процесса разрушения вело к плавлению и затем термическому разложению стекла из As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> с образованием паров серы и окиси мышьяка (рис.1,в). В ряде экспериментов с ФС наблюдалось просто их плавление под действием лазерного излучения и, как следствие, формирование капли на конце световода.

Характерная скорость движения границы разрушения в XC составляла 3–4 мм/с при мощности излучения 0.2 Вт с  $\lambda = 1.06$  мкм, в ФС – 1 мм/с при мощности 0.5 Вт на  $\lambda = 1.21$  мкм. Пороговая мощность, требуемая для поддержания разрушения, зависела от внешних условий. При нормальных условиях пороговая мощность составляла для XC около 0.08 Вт на  $\lambda = 1.06$  мкм (маломодовый режим) и для ФС – около 0.1 Вт на  $\lambda = 1.21$  мкм (одномодовый режим с диаметром пятна моды около 5.7 мкм).

Световоды из данных материалов могут гореть в воздушной атмосфере, однако под действием лазерного излучения разрушение происходит также в атмосфере азота, в воде и в жидком азоте, т. е. без доступа кислорода. Характер разрушения (отсутствие волн оптического разряда) сохраняется во всем интервале интенсивностей, доступных нам в эксперименте (для ФС – вплоть до 10 МВт/см<sup>2</sup> на  $\lambda = 1.21$  мкм).

Поскольку на движение волны разрушения по световоду существенно влияет зависимость его оптических потерь от температуры, нами выполнены соответствующие измерения для XC и ФС (рис.3). Для сравнения на этом же рисунке приведены аналогичные данные для СКС из [1].

### 4. Обсуждение результатов

По-видимому, волна оптического разряда в XC и ФС не распространяется. Если даже допустить, что такой процесс в этих световодах имеет место, то, согласно [7], температура на поверхности световода достигает уровня

температуры стеклования для халькогенидного ( $185^{\circ}\text{C}$ ) и флюоридного ( $265^{\circ}\text{C}$ ) стекол, что ведет к снижению механической прочности оболочки световодов и к невозможности поддерживать высокое давление в плазме оптического разряда, что необходимо для распространения волны оптического разряда.

Наблюдаемая зависимость пороговой интенсивности от диаметра поля моды лазерного излучения в СКС (см. рис.2) и слабое влияние на нее таких факторов, как состав сердцевин и длина волны излучения, по крайней мере качественно согласуется с теплопроводностной моделью распространения оптического разряда [6]: пороговая интенсивность излучения  $I_{\text{th}}$  снижается примерно обратно пропорционально росту диаметра поля моды  $D_m$  ( $D_m = 3 - 8$  мкм). Наблюдаемая же при  $D_m = 8 - 14$  мкм стабилизация  $I_{\text{th}}$  может соответствовать такому режиму распространения волны оптического разряда, при котором радиальные потери тепла из фронта разряда несущественны и  $I_{\text{th}}$  определяется из условия достижения плазмой температуры, необходимой для обеспечения поглощения лазерного излучения на длине порядка  $D_m$ .

## 5. Заключение

Разрушение световодов под действием лазерного излучения ограничивает рост мощности в волоконных линиях связи. При использовании в линиях связи СКС с  $D_m > 10$  мкм область абсолютной устойчивости по от-

ношению к разрушению под действием лазерного излучения (когда не поддерживается распространение волны оптического разряда) ограничена сверху мощностью  $1 - 1.5$  Вт. При этом граница относительной устойчивости определяется условиями инициирования этой волны и может быть значительно выше. Процесс разрушения ХС и ФС качественно отличается от разрушения силикатных световодов – не наблюдается формирования плазмы, разрушается весь световод, а не только его сердцевина. Пороговые мощности излучения для распространения волны разрушения ХС и ФС гораздо ниже – около 100 мВт при  $D_m \approx 6$  мкм, что примерно в 10 раз меньше, чем для световодов на основе силикатного стекла. Данное обстоятельство может ограничивать возможности применения световодов данного типа в волоконных системах связи.

1. Kashyap R. In: *Proc. Intern. Conf. Lasers'87* (Lake Tahoe, Nevada, 1987, p. 859).
2. Hand D.P., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **13**, 767 (1988).
3. Dianov E.M., Mashinsky V.M., Myzina V.A., Sidorin Y.S., Streltsov A.M., Chickolini A.V. *Sov. Lightwave Commun.*, **2**, 293 (1992).
4. Davis D.D., Mettler S.C., DiGiovanni D.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2966**, 592 (1997).
5. Каск Н.Е. *Докт. дис.* (М., МГУ, 1985).
6. Райзер Ю.П. *Лазерная искра и распространение разрядов* (М.: Наука, 1974).
7. Kashyap R., Sayles A., Cornwell G.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2966**, 586 (1977).