

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации

(29 сентября 2004 г.)

29 сентября 2004 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Дианов Е.М., Буфетов И.А.** (Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва). *Волоконные лазеры — новый прорыв в лазерной физике.*

2. **Буфетов И.А., Дианов Е.М.** (Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва). *Оптический разряд в волоконных световодах.*

Краткое содержание второго доклада публикуется ниже.

PACS numbers: 42.55.Wd, 42.81.-i

### Оптический разряд в волоконных световодах

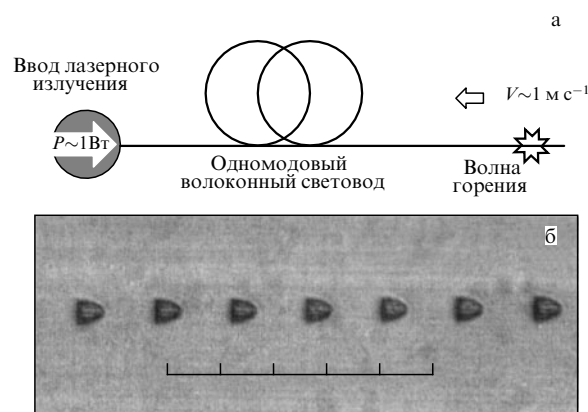
И.А. Буфетов, Е.М. Дианов

Увеличение пропускной способности волоконных оптических линий связи неизбежно приводит к повышению мощности излучения, распространяющегося по отдельному волоконному световоду. В настоящее время возрастание числа передаваемых каналов по одному световоду, применение оптических усилителей с высокой выходной мощностью с целью увеличения расстояния между усилителями, введение в световод излучения накачки (генерируемого волоконными лазерами) как эрбиевых, так и рамановских усилителей ведет к возрастанию мощности оптического излучения в световоде до уровня порядка 1 Вт. Существенно более высокие мощности излучения ( $> 1000$  Вт) достигнуты в непрерывных волоконных лазерах, предназначенных для использования в других областях техники, в частности для обработки материалов. При этом в одномодовой сердцевине световода достигаются интенсивности лазерного излучения  $\sim (10^7 - 10^8)$  Вт см<sup>-2</sup> и более.

При этих уровнях интенсивности нелинейные оптические эффекты, такие, как вынужденное рассеяние Ман-

дельштама–Бриллюэна и четырехволновое смешение, могут ограничивать возможности волоконных систем. Но существует еще один эффект, который гораздо более очевидным образом ограничивает работу световодов — это явление разрушения волоконных световодов под действием оптического излучения интенсивностью  $\gtrsim 1$  МВт см<sup>-2</sup> (при условии дополнительного инициирования процесса). В зарубежной литературе оно обозначается как catastrophic damage (катастрофическое разрушение) или fuse-effect. Второе обозначение можно перевести и как "эффект плавления", и как "эффект бикфордова шнура". Действительно, разрушение световода под действием непрерывного лазерного излучения напоминает горение огнестойкого шнура. Причем сам термин "горение", как оказывается, содержит указание на существенные черты данного процесса.

Впервые сообщение о разрушении одномодовых световодов на силикатной основе под действием оптического излучения было опубликовано в 1987 г. [1]. Внешне явление выглядит следующим образом (рис. 1): если в одномодовый световод вводится лазерное излучение мощностью порядка 1 Вт, то при определенных условиях (при инициировании) в области сердцевины све-



**Рис. 1.** (а) Схема эксперимента. (б) Фотография периодической структуры пустот в сердцевине световода (световод LEAF, Corning), образованной под действием излучения с длиной волны 1,06 мкм Nd:YAG-лазера мощностью 4,2 Вт. Излучение распространялось слева направо. Масштаб: каждое деление — 10 мкм.

товода (масштаб  $\sim 1$  мкм) возникает область яркого белого или голубоватого свечения (маленькая "звездочка"), которая движется навстречу лазерному излучению по световоду со скоростью  $\sim 1$  м с $^{-1}$ . Температура "звездочки" оценивалась по спектру ее свечения [2] и оказалась порядка 5400 К (по-видимому, эта оценка довольно грубая, и, учитывая цвет свечения, действительная температура может быть существенно выше).

В сердцевине световода после "пробегания" звездочки в большинстве случаев образуются полости (или пузыри, каверны) размерами несколько микрометров, причем полости иногда могут формировать периодическую структуру вдоль сердцевины световода (см. рис. 1) или сливаться в один длинный капилляр. При этом волноводные свойства световода полностью нарушаются. Таким образом могут разрушаться участки волоконных световодов большой длины — после инициирования, если не принимать никаких мер, будет разрушен весь участок световода от точки инициирования до лазера, а это могут быть и метры, и километры световода.

Явление поддерживается лазерным излучением мощностью всего лишь порядка 1Вт. Процесс может быть иницирован разными способами, например загрязнением торца световода, контактом торца световода с металлической поверхностью, нагреванием участка световода в электрической дуге, — но в любом случае требуется нагрев участка световода до температуры  $\sim 1000$  К. Среди указанных способов инициирования в первых двух нагрев сердцевины световода осуществлялся за счет поглощения лазерного излучения.

Процесс разрушения световодов исследовался в ряде последовавших за [1] работ (см. [3], обзор [4]). В качестве моделей для объяснения явления были рассмотрены: самофокусировка в сердцевине световода, иницирование химической реакции в сердцевине и тепловой механизм распространения [2]. Последний механизм (распространение разряда за счет предварительного нагрева стекла путем теплопроводности) согласуется, по-видимому, с большинством известных экспериментальных результатов.

До настоящего времени нет полного удовлетворительного объяснения формирования каверн. Мы исследовали данное явление с целью уточнения его физической природы и определения диапазона мощностей излучения, при которых оно не представляет опасности для волоконных систем. Кроме того, представляет интерес исследование условий формирования полостей в световоде после прохождения оптического разряда с тем, чтобы при необходимости использовать данное явление, например, для модификации структуры волоконных световодов.

Если волна представляет собой плазменное образование, имеющее температуру  $\sim 10^4$  К и распространяющееся по световоду под действием лазерного излучения со скоростью  $\sim 1$  м с $^{-1}$ , то она есть не что иное, как волна медленного оптического горения или, что то же, волна дозвукового оптического разряда, распространяющегося за счет переноса энергии теплопроводностью. В этом случае давление в области оптического разряда должно составлять  $\sim 10^4$  атм.

Недавно этот факт был экспериментально подтвержден, по крайней мере, качественно. А именно, в экспериментах [5] было продемонстрировано, что давление, развивающееся в области сердцевины, настолько

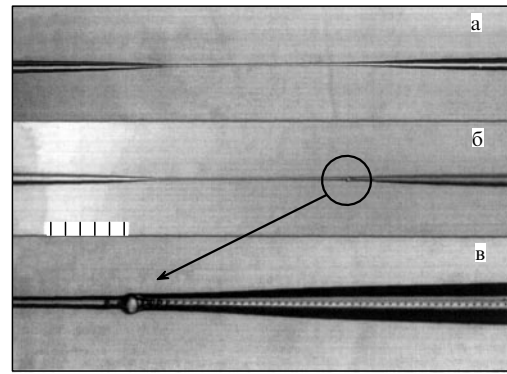


Рис. 2. Конусообразный участок волоконного световода с уменьшенной толщиной кварцевой оболочки: (а) до прохождения оптического разряда, (б, в) после процесса распространения. На рисунках (а, б) одно деление шкалы соответствует 0,1 мм, на рис. (в) полная ширина кадра соответствует 1 мм. Лазерное излучение распространялось слева направо. Фотографии получены без иммерсии.

велико, что способно при уменьшении толщины оболочки световода из кварцевого стекла разрушить эту оболочку. При разрушении оболочки наблюдалась остановка распространения оптического разряда, что можно объяснить снижением давления в плазме после разрушения оболочки и соответствующим снижением коэффициента поглощения лазерного излучения в оптическом разряде.

На рисунке 2 показана именно такая ситуация. На коротком ( $\sim 2$  мм) участке стандартного световода диаметр оболочки из кварцевого стекла был уменьшен от стандартного значения 125 мкм до  $\sim 30$  мкм путем травления оболочки в растворе плавиковой кислоты. При распространении оптического разряда плазменное образование достигло области световода с таким диаметром внешней кварцевой оболочки, которая уже не выдерживала воздействия давления и температуры плазмы. В результате наблюдалось резкое расширение плазменного образования, сопровождавшееся деформацией кварцевой оболочки, после чего процесс распространения оптического разряда останавливался. Таким образом, подобное устройство представляет собой своеобразный предохранитель для волоконных линий от распространения оптического разряда.

Действием высокого давления в области сердцевины световода объясняется и образование "лишнего" объема в этой области, приводящее затем к формированию полостей. Под действием давления  $\sim 10^4$  атм происходит пластическая деформация твердого стекла, окружающего область разряда, в результате которой увеличивается его плотность (известно, что под действием давления плотность плавящегося кварца может увеличиваться от 2,2 до 2,6 г см $^{-3}$ ). В итоге при охлаждении вещества должен остаться свободный объем, который мы и наблюдаем в виде полостей<sup>1</sup>.

Для определения факторов, существенно влияющих на параметры процесса разрушения волоконных световодов под действием лазерного излучения, нами были проведены исследования этого явления в возможно более

<sup>1</sup> Подобное явление, но в существенно меньшем масштабе, наблюдается при прохождении частиц с высокой энергией через металлы [6], на что обратил наше внимание С.И. Анисимов.

широком диапазоне экспериментальных условий. Процесс наблюдался в 30 типах волоконных световодов, отличающихся составом сердцевины (сердцевина из плавленного кварца с различными добавками:  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) при воздействии излучения с длинами волн 0,5; 1,06; 1,24 и 1,48 мкм. Оказалось, что общая картина повреждений световода зависит от состава сердцевины, длины волны и модового состава излучения. Периодические структуры полостей формируются преимущественно в одномодовых световодах с большим диаметром поля моды (более 5 мкм) и при мощностях излучения, существенно превышающих пороговые значения. Пороговыми здесь считаются условия эксперимента, в котором скорость распространения волны оптического разряда обращается в нуль, т.е. происходит остановка разряда.

В световодах с малыми значениями диаметра поля моды (ДПМ) или при мощностях излучения, близких к пороговым, полости имеют вид непрерывных капилляров диаметром  $\sim 1$  мкм, расположенных вдоль оси сердцевины. При распространении нескольких мод излучения в световоде наблюдаются неупорядоченные структуры полостей в сердцевине, не обладающие часто даже осью симметрии.

Измерения пороговых условий поддержания распространения волны разрушения в одномодовых световодах различных типов и измерения в них скорости распространения волны разрушения позволяют сделать следующие выводы.

1. Пороговые условия распространения оптического разряда по одномодовому волоконному световоду могут быть сформулированы с использованием диаметра поля моды световода и средней интенсивности лазерного излучения по этому диаметру и практически не зависят от состава сердцевины и длины волны излучения.

2. Скорость распространения определяется, главным образом, интенсивностью лазерного излучения в сердцевине и практически не зависит от состава сердцевины.

На рисунке 3а пороговая интенсивность лазерного излучения для поддержания распространения оптического разряда по волоконному световоду представлена в виде зависимости от диаметра поля моды излучения для различных одномодовых волоконных световодов и длин волн лазерного излучения. Все точки приблизительно легли на одну кривую. Это свидетельствует о том, что химический состав сердцевины световода и длина волны излучения (в диапазоне 1,0–1,5 мкм) не играют существенной роли в данном процессе. Зависимость же от ДПМ можно объяснить следующим образом: при малых значениях ДПМ тепловая энергия, выделяющаяся в области фронта оптического разряда, частично передается теплопроводностью навстречу лазерному излучению, обеспечивая продвижение разряда. Другая же часть передается теплопроводностью в радиальном направлении, представляя собой потери тепла из области фронта разряда. При увеличении ДПМ роль потерь уменьшается, и при ДПМ  $> 8$  мкм наблюдается стабилизация пороговой интенсивности распространения разряда, причем значение пороговой интенсивности в этой области  $\sim 1$  МВт  $\text{см}^{-2}$  определяется, по-видимому, из условия достижения достаточно большой величины коэффициента поглощения лазерного излучения в разряде. Из чисто геометрических соображений коэффициент поглощения должен быть  $\sim 1/\text{ДПМ}$ .

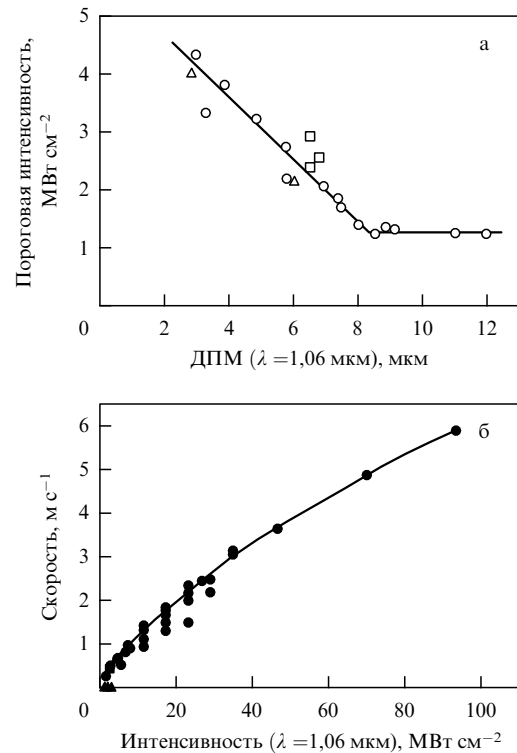
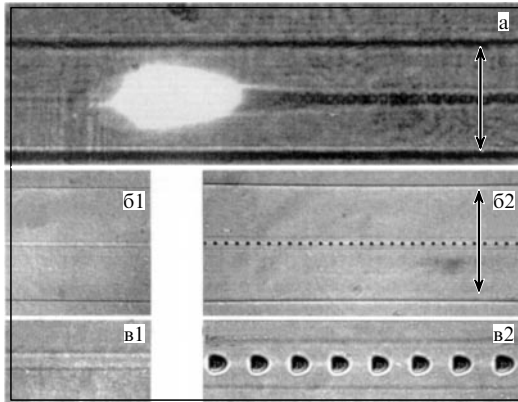


Рис. 3. (а) Пороговые интенсивности для световодов с германосиликатной (○), фосфоросиликатной и нитросиликатной (Δ) сердцевиной. (б) Зависимость скорости волны разрушения в световодах с германосиликатной сердцевиной от интенсивности лазерного излучения в сердцевине.

Зависимость скорости распространения оптического разряда от среднего значения интенсивности лазерного излучения в основной моде волоконного световода представлена на рис. 3б. Она содержит точки, относящиеся к экспериментам с длиной волны излучения 1,06 мкм и тремя световодами с сердцевиной из плавленного кварца, легированного различными количествами оксида германия. Величина ДПМ в них составляла 4,7; 8,1 и 9,5 мкм. С некоторым разбросом все экспериментальные точки ложатся на кривую  $V \approx 0,2I^{0,75}$ , если пренебречь пороговыми значениями интенсивности (здесь  $V$  — скорость, м  $\text{с}^{-1}$ ,  $I$  — средняя интенсивность лазерного излучения, МВт  $\text{см}^{-2}$ ). Оказывается, что скорость пропорциональна интенсивности в степени примерно 3/4, т.е. несколько отличается от зависимости  $V \sim I^{0,5}$ , следующей из описания распространения разряда теплопроводностью [7].

Однако несмотря на всю важность данного эффекта для систем волоконной связи и для волоконных лазерных систем излучения, до недавнего времени практически не было наблюдений распространения оптического разряда по световодам с достаточным временным разрешением. И в литературе также отсутствовали экспериментальные данные о релаксации нагретой области после прохождения волны разряда. Но именно в процессе остывания нагретой области можно ожидать формирования периодических последовательностей пустот в сердцевине световода, что и составляет одну из наиболее впечатляющих особенностей явления. Только недавно в работе [8] были получены покадровые развертки движения разряда по световоду с разрешением по времени, достаточным для



**Рис. 4.** (а) Фотография распространения оптического разряда по волоконному световоду, сделанная с временем экспозиции 10 мкс. (б) Статические фотографии того же световода с более высоким пространственным разрешением, полученные перед (б1) и после (б2) процесса распространения оптического разряда. (в) Увеличенное изображение центральной части того же световода до (в1, видна сердцевина световода) и после (в2, совершенно изменившаяся структура) процесса. Полная ширина кадра в1 соответствует 40 мкм, в2 – 90 мкм. Стрелки на рис. а и б обозначают диаметр световодов, равный 125 мкм.

оценки размеров области, занятой плазмой оптического разряда. При скоростной фотосъемке скорость движения разряда может быть определена по каждой паре соседних по времени кадров. Это позволило в экспериментах [8] установить, что скорость движения разряда постоянна в масштабе  $\geq 10$  мкм (а не только на отрезках световода длиной несколько десятков сантиметров, на которых обычно скорость измерялась в предшествующих работах).

Фотография оптического разряда, сделанная с помощью микрообъектива с выдержкой 10 мкс, представлена на рис. 4а (лазерное излучение распространяется слева направо,  $\lambda = 1,085$  мкм, мощность  $P = 5,9$  Вт, ДПМ = 5,1 мкм). Применение просвечивающей подсветки излучением второй гармоники непрерывного неодимового лазера позволяет наблюдать на этой фотографии не только область светящейся плазмы, но и оптические неоднородности в области сердцевины световода после прохождения разряда. Здесь светофильтры были подобраны таким образом, чтобы оптические неоднородности регистрировались в области нормальных экспозиций. При этом собственное свечение плазмы получилось переэкспонированным.

Формирование каверн в сердцевине наблюдалось не позднее, чем через 20 мкс после прохождения фронта плазмы, в экспериментах с  $P = 1$  Вт, и не позднее, чем через 70 мкс, при  $P = 5,9$  Вт. Сразу за областью разряда наблюдается темная область с начальным диаметром 30 мкм, в пределах которой постепенно "проявляются" изображения каверн.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что процесс разрушения световодов под действием лазерного излучения подобен процессу дозвукового химического горения и может рассматриваться как дозвуковой оптический разряд в сердцевине световода, т.е. как волна оптического горения. Такие явления исследовались ранее в газах [9] и стеклах [10] (в последнем случае только при импульсном воздействии).

Движение светящейся области вдоль световода навстречу лазерному излучению представляет собой движение плазменного образования с температурой порядка  $10^4$  К. Основной механизм продвижения нагретой области — теплопроводность, в том числе радиационная. Поглощение излучения на длине порядка диаметра сердцевины световода происходит в плазме с высокой плотностью частиц — порядка плотности твердого тела. После прохождения волны разряда остывающая плазма релаксирует. Происходит конденсация и дальнейшее остывание вещества стекла. Наблюдается уплотнение стекла в одних областях (см. рис. 4, в2) и образование пустот, в качестве компенсации, в других. Кроме того, формирование полостей сложной формы сопровождается гидродинамическим движением расплава в световоде. Разумеется, гидродинамика не может играть в этом случае такой большой роли, как при оптическом разряде в газах [11], но она была обнаружена в опытах с объемными образцами стекла [10].

Таким образом, формирование пустот имеет прямое отношение не к распространению волны оптического разряда по световоду, а только к релаксации нагретой области.

Для световодов с большой величиной  $\Delta n$  мощность поддержания распространения оптического разряда в световоде может быть менее 300 мВт (на длине волны  $\lambda = 1,06$  мкм) и менее 100 мВт (на длине волны  $\lambda = 0,5$  мкм), что представляет опасность для волоконных световодов. Но подчеркнем: это относится к порогам поддержания разряда. При этом предполагается, что разряд уже каким-либо образом инициирован в световоде. Все описанные до сих пор способы инициирования существенно отличаются от действий при нормальной эксплуатации волоконных световодов. В отсутствие специального инициирования оптического разряда световоды способны пропускать непрерывное лазерное излучение с плотностью мощности до  $(2-5) \times 10^9$  Вт см $^{-2}$  [12] при полной мощности в световоде до  $\sim 1$  кВт. Обсуждаемые в данной работе пороговые значения мощности распространения оптического разряда представляют собой границы абсолютной устойчивости световодов по отношению к данному процессу.

## Список литературы

1. Kashyap R, in *Proc. of the Intern. Conf. Lasers'87, Lake Tahoe, Nevada, December 7-11, 1987* (1987) 859
2. Hand D P, Russell P St J *Opt. Lett.* **13** 767 (1988)
3. Dianov E M et al. *Sov. Lightwave Commun.* **2** 293 (1992)
4. Davis D D (Jr), Mettler S C, DiGiovanni D J *Proc. SPIE* **2966** 592 (1997)
5. Dianov E M, Bufetov I A, Frolov A A *Opt. Lett.* **29** 1852 (2004)
6. Косевич А М, в сб. *Материалы школы по теории дефектов в кристаллах и радиационных нарушений, Тбилиси, 1966 г.* (Тбилиси, 1966) с. 291
7. Бункин Ф В и др. *Письма в ЖЭТФ* **9** 609 (1969)
8. Bufetov I A et al. "Dynamics of fiber fuse propagation", submitted to *Optical Fiber Communication Conf.: OFC'2005, 6-11 March 2005, Anaheim, CA, USA*
9. Райзер Ю П *Лазерная искра и распространение разрядов* (М., Наука, 1974)
10. Каск Н Е, Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (М.: МГУ, НИИ ЯФ, 1985)
11. Буфетов И А, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ФИАН, 1983)
12. Gapontsev V P, Scherbakov E A, in *2nd Intern. Symp. on High-Power Fiber Lasers and Their Applications, St.-Petersburg, Russia, 2003* (St.-Petersburg, 2003) Paper 2.1