

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СВЕТОВОДЫ  
В ГЕРМЕТИЧНОМ ПОКРЫТИИВ.А. Богатырёв, М.М. Бубнов,  
Е.М. Дианов, А.М. Прохоров,  
С.Д. Румянцев, С.Л. Семёнов

Растягивающая нагрузка, действующая в процессе эксплуатации на волоконный световод, вызывает в присутствии паров воды рост поверхностных микродефектов с постепенно возрастающей скоростью до тех пор, пока не произойдет разрушение световода. Это явление коррозии стекла под действием напряжения, известное под названием статической усталости, не только определяет срок службы световодов, но и ограничивает их максимальную разрывную нагрузку на уровне 5.5-7.2 ГПа.

Существенно (в 2-2.5 раза) повысить разрывную прочность однородных кварцевых волокон и световодов удастся только при условиях, исключающих действие влаги на поверхность стекла (в вакууме или при температуре жидкого азота) [1, 2]. Поэтому можно было ожидать, что нанесение на световоды влагонепроницаемых покрытий приведет к увеличению их разрывной нагрузки. Однако предельная прочность световодов с герметичными покрытиями из металлов (*Al*, *In*, *Ag*, *Sn*, *Ni*) или неорганических соединений типа *SiN<sub>3</sub>*, *SiC*, *TiC* [3-7] оказалась либо ниже, либо на уровне прочности световодов с полимерными покрытиями, что объясняется одной из следующих причин: 1) негерметичность покрытия [4]; 2) реакция расплавленного металла (алюминия) с кварцевым стеклом в процессе нанесения покрытия [5]; 3) разрыв керамической оболочки при растяжении, инициирующий разрушение световода [6]; 4) разупрочнение кварцевого стекла в результате повторного нагрева в металлизаторе [8].

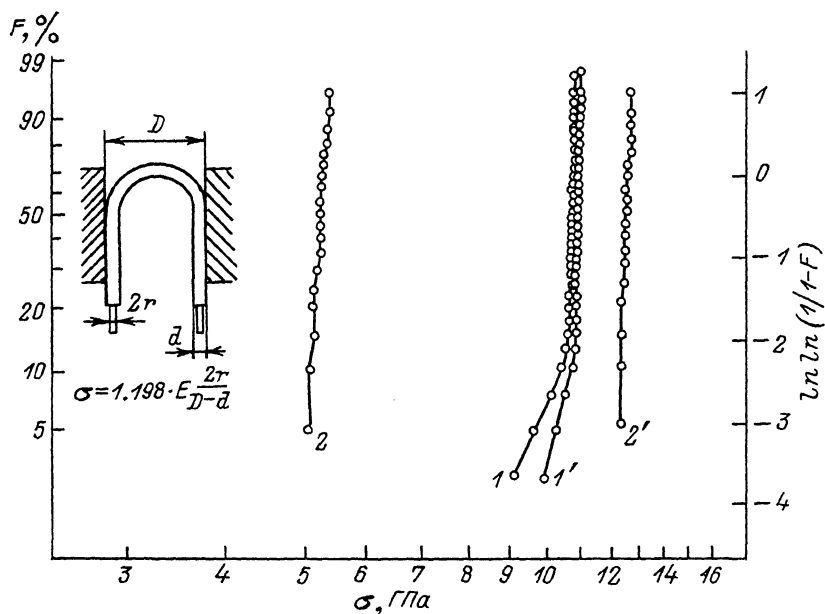


Рис. 1. Графики Вейбулла функции распределения прочности на изгиб образцов световодов: 1 - световод с оловянным покрытием, 2 - световод с кремнийорганическим покрытием (температура измерений  $T = 20^{\circ}$ ). 1' и 2' - прочность тех же образцов, измеренная при  $T = -196^{\circ}$ .

Учитывая в совокупности действие всех указанных выше факторов, мы попытались повысить прочность световодов с металлическим покрытием. В качестве материала покрытия было выбрано чистое олово. При его нанесении методом „намораживания“ [5] получалось относительно толстое (15 мкм), гладкое и блестящее покрытие без видимых нарушений целостности и однородности. Повторный нагрев световода в металлизаторе не превышал  $250^{\circ}\text{C}$ . Вытяжка световодов осуществлялась с помощью графитовой печи сопротивлений из заготовок, изготовленных методом химического осаждения из газовой фазы. Диаметр вытянутого световода равнялся 125 мкм с отклонениями  $\pm 1$  мкм. Для устранения контакта световода с атмосферным воздухом пространство между печью и металлизатором герметизировалось и продувалось обеспыленным и осушенным инертным газом. Вытянутые на этой же установке световоды с различными полимерными покрытиями обладали высокой однородной прочностью на разрыв 5,5 ГПа.

В данном исследовании основные измерения прочности световодов с металлическими и полимерными покрытиями производились методом изгиба между двумя пластинами (рис. 1). Скорость сближения пластин во всех измерениях была постоянна и составляла 5,47 мм/мин. В момент разрушения световода регистрировалось

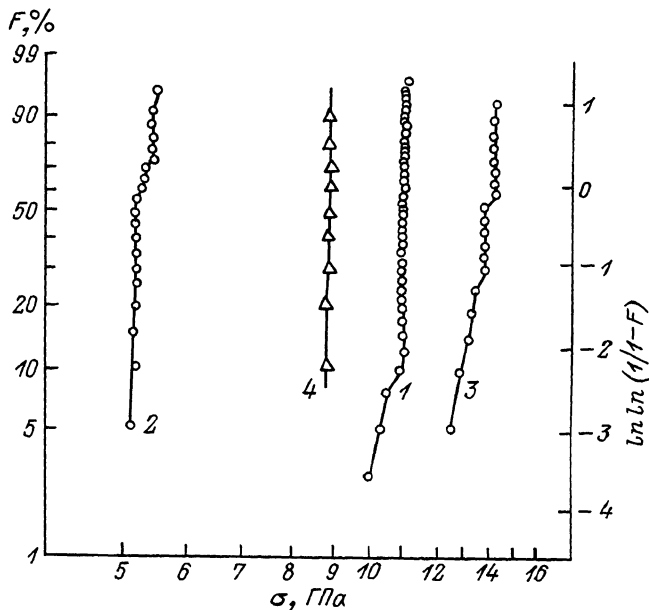


Рис. 2. Графики Вейбулла функции распределения прочности световода с оловянным покрытием: 1 - на изгиб ( $T = 20^{\circ}$ ); 2 - на изгиб, покрытие стравлено ( $T = 20^{\circ}$ ); 3 - на изгиб, покрытие стравлено ( $T = -196^{\circ}$ ); 4 - на разрыв ( $T = 20^{\circ}$ ).

расстояние между пластинами с точностью  $\pm 10$  мкм. Расчет разрушающих напряжений проводился по формуле, приведенной на рис. 1 [9]. В этой формуле:  $\sigma$  - максимальное растягивающее напряжение на поверхности изогнутого световода,  $E$  - модуль Юнга кварцевого стекла ( $E = 73$  ГПа),  $r$  - радиус световода,  $d$  - диаметр покрытия световода,  $D$  - расстояние между пластинами. Для устранения неопределенности в расчетах по этой формуле предполагалось, что металлическое покрытие не влияет на форму изогнутого световода, а в месте соприкосновения с сжимающими пластинками полимерное покрытие полностью продавливается, что, возможно, дает несколько заниженные значения разрушающих напряжений.

На рис. 1 приведены результаты измерений прочности на изгиб световодов с металлическим покрытием и световодов с полимерным кремнийорганическим покрытием при лабораторных условиях ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ) и при температуре жидкого азота ( $T = -196^{\circ}\text{C}$ ). Как видно из представленных результатов, при  $T = 20^{\circ}\text{C}$  максимальная прочность световодов с металлическим покрытием в два раза превышает прочность световодов с полимерным покрытием и составляет  $10.9$  ГПа. При  $T = -196^{\circ}\text{C}$  прочность световодов с полимерным покрытием возрастает до  $12.9$  ГПа, приближаясь к значениям прочности кварцевого стекла, полученным при аналогичных условиях в работах других авторов [1, 2]. При охлаждении до  $T = -196^{\circ}\text{C}$

прочность световодов с металлическим покрытием не увеличивалась, что может быть объяснено повреждениями поверхности световода в процессе его металлизации. Для проверки этого предположения на участке световода длиной 1 мм металлическое покрытие стравливалось в азотной кислоте и в этом месте измерялась прочность на изгиб при температурах  $T = 20^{\circ}\text{C}$  и  $T = -196^{\circ}\text{C}$ . Как показывают результаты этих измерений на рис. 2, прочность световода после стравливания металлического покрытия совпадает с прочностью световодов с полимерным покрытием. Это означает, что при нанесении металлического покрытия повреждения поверхности кварцевого стекла не происходило. Преждевременное разрушение световодов с металлическим покрытием при нагрузке 10,9 ГПа, по-видимому, инициировано либо концентрацией напряжений на поверхности кварцевого стекла при пластической деформации поликристаллического оловянного покрытия, либо разрушением этого покрытия. На рис. 2 приведены также результаты измерений разрывной прочности световодов с оловянным покрытием. Длина образцов составляла 1 м, скорость относительного удлинения  $10\% \text{ мин}^{-1}$ . Полученные значения разрывной нагрузки, возможно, также занижены, т.к. при таком уровне прочности трудно определить происходит разрушение образцов в зажимах разрывной машины или нет.

Таким образом, в результате оптимизации процесса нанесения металлического покрытия получены рекордные значения прочности световодов 10,9 ГПа. Дальнейшее исследование процессов, происходящих на границе раздела стекло-металл, позволит полностью реализовать потенциально высокую прочность световодов на основе кварцевого стекла и значительно повысить надежность систем волоконно-оптической связи.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Проктор Б., Уитти И., Джонсон Дж. В кн.: Прочность стекла, М.: Мир, 1969, с. 176-206.
- [2] France P.W., Paradine M.J., Reeve M.H., News G.R. - J.Mat.Sci., 1980, v.15, p.825-830.
- [3] Pinnow D.A., Robertson Jr.G.D. - Appl. Phys. Let., 1979, v. 34, p. 17-19.
- [4] Wysocki J.A., Lee A. - Techn. Dig. 3rd Int. Conf. 100C, San Francisco, 1981, p. 24.
- [5] Aridge R.G.C., Heywood D. - Brit. J. Appl. Phys., 1967, v. 18, p. 447-457.
- [6] Schantr C.A., Hanson E.G., Hiskes R. - Techn. Dig. 5th Top. Meet. Opt. Fiber Commun., Phoenix, 1982, p. 38.
- [7] Stein M.L., Aisenberg S. - Advances in Ceramics, v. 2, Ed. by Bendow B. and Mitra S.S. Am. Ceram. Soc., Columbus O.H. 1981, p. 124.

[8] П у х В.П. Прочность и разрушение стекла. Л.: Наука, 1973, 155 с.

[9] M a t t h e w s o n M.J., K u r k j i a n C.R., G u l a t i S.T. - J. Am. Ceram. Soc., 1986, v. 69, p. 815-821.

Институт общей  
физики АН СССР,  
Москва

Поступило в Редакцию  
6 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9

12 мая 1988 г.

## ПРОБЛЕМА НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАЗМЫ В УСКОРИТЕЛЕ НА БИЕНИЯХ

Л.М. Г о р б у н о в, Р.Р. Р а м а з а ш в и л и

В ускорителе на биениях быстрая ленгмюровская волна возбуждается в плазме двумя параллельными лазерными пучками с различными частотами [1]. Амплитуда возбуждаемой волны, определяющая темп ускорения, максимальна при выполнении резонансного условия, связывающего разность частот лазеров с плазменной частотой. Именно в этом случае размеры ускорителя на биениях, конкурентноспособного по отношению к имеющимся сейчас ускорителям, могут составлять от нескольких метров до нескольких десятков метров.

Неоднородность плазмы приводит к непостоянству плазменной частоты. Из-за этого резонансное условие выполняется только в определенных точках плазмы, при удалении от которых амплитуда ленгмюровской волны уменьшается, и темп ускорения снижается. Однако для ускорения еще более существенным является возникающее из-за неоднородности плазмы изменение фазы ленгмюровской волны в окрестности резонансной точки. Как показано ниже, даже небольшое изменение плотности плазмы может настолько изменить фазу волны, что частица в результате из ускоряющей фазы попадает в фазу торможения.

Чтобы проиллюстрировать сказанное выше и получить количественные оценки, рассмотрим возбуждение ленгмюровской волны двумя высокочастотными электромагнитными волнами с амплитудами  $E_i$  ( $i = 1, 2$ ), частотами  $\omega_i$  и волновыми векторами  $k_i$ . Пондеромоторная сила, действующая на электроны плазмы, равна [2]:

$$f = -\frac{kmc^2}{2} \alpha_1 \alpha_2 \sin(\omega t - kx - \varphi), \quad (1)$$

где  $k = k_1 - k_2$ ,  $\omega = \omega_1 - \omega_2$ ,  $\alpha_i = eE_i / mc\omega_i$ ,  $\varphi$  - начальная фаза. Под действием силы (1) в плазме возникает поле разделения