

УДК 681.7.068

ДВУХМОДОВЫЙ ХАРАКТЕР СТАТИСТИКИ ПРОЧНОСТИ СВЕТОВОДОВ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

© 2007 г. П. А. Злобин*, М. А. Ероньян**, доктор техн. наук; А. В. Хохлов**

* Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-Петербург

** ФГУП Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения
ВНЦ "ГОИ им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

E-mail: eronyan@mail.ru

Показано, что двухмодовый характер статистики прочности кварцевых световодов определяется окислительно-восстановительными условиями их изготовления и обусловлен физико-химическим состоянием микропримесей. Растворимые и не растворимые в стекле примеси определяют соответственно высокопрочное и низкопрочное состояния стекловолокна.

Коды OCIS: 060.2340.

Поступила в редакцию 01.03.2007.

Прочность даже очень коротких кварцевых волоконных световодов (ВС) длиной не более 1 мм определяется статистикой распределения дефектов, обусловленных химической микронеоднородностью стекла [1]. Вероятность разрушения стекловолокна F зависит от его длины L и приложенного напряжения σ [2]:

$$\ln \ln[(1 - F)^{-1}] = \ln L + (1/v) \ln \sigma. \quad (1)$$

Коэффициент вариации v определяется разбросом данных по прочности. Он имеет, как правило, два значения, характеризующих высокопрочное и низкопрочное состояния волокна.

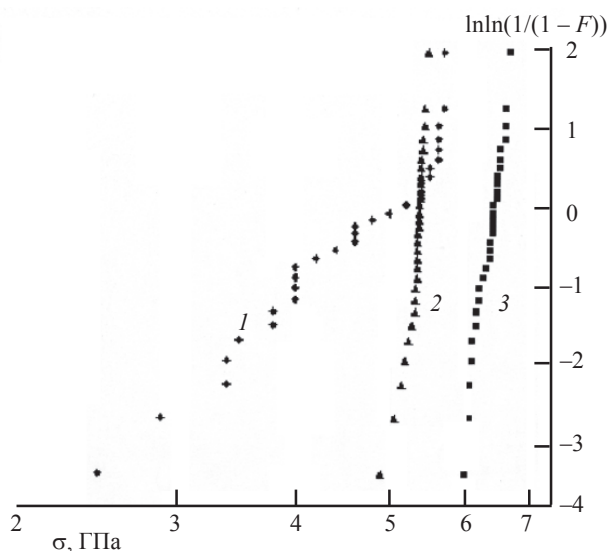
Электронно-микроскопические исследования распределения по размерам микронеоднородностей в кварцевом стекле [3] показали, что на поверхности даже миллиметровых отрезков волокна диаметром 125 мкм гарантированно присутствуют дефекты размером, существенно превышающим глубину критической трещины (6 нм), которой соответствует прочность, равная 6 ГПа. Микронеоднородности кварцевого стекла обусловлены в основном двумя физико-химическими процессами образования дисперсной фазы: ликвацией и сегрегацией примесей. Второй процесс связан с восстановлением примесей. Он в большей степени, чем ликвация, снижает величину разрушающего напряжения световодов с 6 до 0,49 ГПа [3].

Целью настоящей работы является исследование влияния окислительно-восстановительных условий процесса изготовления заготовок на статистику прочности кварцевых ВС.

Заготовки ВС изготавливали методом модифицированного химического парового осаждения. Использовались разные опорные кварцевые трубы, стекломасса которых получена в восстановительных и в нейтральных условиях наплава кварцевой крупки для заготовок типа 1 и 2 соответственно. Перед вытягиванием волокна заготовки подвергали пламенной обработке при 2050 °С в кислородо-водородном пламени стехиометрического состава горючей смеси и при 10%-ном избытке кислорода для заготовок типа 1 и 2 соответственно. ВС вытягивали при нагреве заготовки до 2100 °С на установке с графитовым нагревателем в атмосфере аргона, содержавшего 0,0002 об. % кислорода. В процессе вытягивания на волокно наносили эпоксиакрилатное покрытие, отверждаемое ультрафиолетовым облучением.

Прочность ВС измеряли методом испытания на разрыв метровых отрезков и методом двухточечного изгиба [4]. Для более точной сопоставительной оценки прочностных свойств определяли долговечность ВС с диаметром стекловолокна 125 мкм, изогнутого до диаметра нейтральной оси 2,4 мм. Ошибка в оценке напряжений, связанная с нестабильностью диаметра стекловолокна диаметром 125 и 80 мкм, составляла 0,8 и 1,2% соответственно. Все измерения проводили при 21 °С и относительной влажности 35%.

Испытания на разрыв ВС, полученных из заготовок типа 1, с диаметром стекловолокна 80 мкм выявили двухмодовый характер распределения прочности в координатах Вейбулла $\ln \sigma - \ln \ln(1/(1 - F))$



Распределение прочности ВС в координатах Вейбулла. 1, 3 – ВС из заготовок типа 1 с диаметром стекловолокна 80 мкм; 2 – ВС из заготовок типа 2 с диаметром стекловолокна 125 мкм; 1, 2 – метод разрыва; 3 – метод двухточечного изгиба.

(рисунок, кривая 1) с коэффициентом вариации 2,2 и 30% соответственно для высокопрочного и низкопрочного состояний волокна. Статистика прочности для коротких отрезков ВС (рисунок, кривая 3) отражает только высокопрочное состояние с таким же коэффициентом вариации, как и для длинных отрезков. Однако значение разрушающего напряжения увеличивается в соответствии с соотношением, полученным из уравнения (1) $(1/v)\ln(\sigma_1/\sigma_2) = \ln(S_2/S_1)$, где S – площадь поверхности напряженного участка волокна, индексы 1 и 2 относятся к коротким и длинным образцам соответственно.

Измерения прочности на разрыв световодов, полученных из заготовок типа 2, с диаметром стекловолокна 125 мкм отражают только высокопрочное состояние (рисунок, кривая 2). Среднеарифметические значения из 50 измерений долговечности этих волокон для разных режимов вытягивания находились в узком диапазоне 9,5–11,5 с. Доверительные интервалы среднеарифметического значения долговечности при 99% вероятности и квантиле распределения Стьюдента, равном 2,4, перекрывались для волокон, полученных при разных температурах 1920, 2100 и 2200 °С и усилиях вытягивания 15–100 г. Из этого можно сделать вывод, что изменение параметров вытягивания в указанном диапазоне не влияет на прочность ВС, полученных из заготовок типа 2.

Низкопрочное состояние ВС обусловлено, вероятно, тугоплавкими частицами (Mo, W, C и др.), не

растворимыми в кварцевом стекле. По сравнению с ним они обладают более высоким коэффициентом термического расширения (КТР). Поэтому при вытягивании волокна эти дефекты создают растягивающие напряжения при температуре ниже температуры стеклования кварцевого стекла, равной 1200 °С. С охлаждением волокна растягивающие напряжения растут, что приводит к образованию трещин, скорость роста которых зависит от усилия вытягивания волокна и влажности окружающей среды.

Высокопрочное состояние ВС определяется дефектами, связанными с примесями, которые растворяются в кварцевом стекле, чему способствуют окислительные условия получения заготовок типа 2. Напряжения в этих областях микронеоднородности стекла возникают после их перехода в упругое состояние при температуре существенно ниже 1200 °С. КТР этих неоднородностей мало отличается от основного материала волокна, поэтому микронапряжения будут существенно ниже по сравнению с предыдущим случаем. При этом трещины не образуются и изменение температуры с 1920 до 2200 °С, а также усилия вытягивания с 15 до 100 г не оказывают влияния на прочность ВС.

Таким образом, результаты исследования статистики прочности ВС показали, что окислительная атмосфера высокотемпературного процесса его получения обеспечивает высокопрочное состояние кварцевого волокна.

Авторы выражают признательность директору НИТИОМ ВНЦ “ГОИ им. С.И. Вавилова” К.В. Дукельскому за предоставленную возможность проведения экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давидович Н.М., Пух В.П., Хотимченко В.С., Байкова Л.Г., Песина Т.И., Радеева Е.Н. Влияние условий получения на прочность световодов из кварцевого стекла // Физ. и хим. стекла. 1989. Т. 15. № 1. С. 73–78.
2. Лeko В.К., Мазурин О.В. Свойства кварцевого стекла. Л.: Наука, 1985. 166 с.
3. Ероньян М.А., Злобин П.А., Козлова М.А., Левит Л.Г., Ромашова Е.И., Хохлов А.В., Цибиногина М.К. Влияние физико-химического состояния примесей на прочность кварцевого волокна // Физ. и хим. стекла. 2006. Т. 22. № 6. С. 855–862.
4. Bogatyryov V.A., Bubnov M.M., Dianov E.M., Makarenko A.Y., Rumyantsev S.D., Semjonov S.L., Sysoljatin A.A. High-strength hermetically tin-coated optical fibers. Technical digest. Optical Fiber Communication Conf., San Diego CA, 1991. P. 115.