

## ПРОЦЕССЫ ДИФФУЗИИ ИОНОВ НА ГРАНИЦЕ СПАЕВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Левицкий, И.А., Дяденко М.В., Козловская А.А.

УО «Белорусский государственный технологический университет» г. Минск  
*levitskii@belstu.by*

Жесткое оптическое волокно включает световедущую жилу, светоотражающую и защитную (окрашенную) оболочки.

На границе раздела стекол при их спаивании не должно наблюдаться фазового разделения и образования неоднородностей в виде пузырей и других дефектов.

Основной задачей при разработке указанных стекол является обеспечение высокотемпературной вязкости, а также требуемых температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) при значительной разнице в показателях преломления.

Перетяжка, спаивание и отжиг отдельных волокон и их блоков при изготовлении волоконно-оптических элементов приводит к длительному процессу их термообработки при повышенных температурах. Это вызывает взаимную диффузию ионов на границе спая двух стекол систем «световедущая жила – светоотражающая оболочка» и «светоотражающая оболочка – защитная оболочка».

Целью данных исследований являлось изучение миграции ионов стеклообразователей, модификаторов и красителей для обеспечения стабильности составов стекол и повышения качества оптических волоконных изделий.

Исследования проводились на образцах спаев пары стекол указанных выше систем в виде пластин толщиной 8 – 10 мм. Спаивание производилось в интервале температур 760 – 850 °С в зависимости от температуры размягчения стекол, установленной методом дифференциально-сканирующей калориметрии, выполняемой с помощью измерительного блока DSC 404 F3 Pegasus (Германия) при скорости нагрева 10 °С/ч. Изотермическая выдержка в области максимальных температур спаивания составляла 15–20 мин. Спаянные образцы подвергались отжигу при температуре  $650 \pm 5$  °С в муфельной электрической печи.

Химический состав на границе спаев исследовался на сканирующем микроскопе типа JEOL JSM – 5160 LV с системой химического анализа EDX JED – 2001 JEOL, а для ионов бора – на растровом электронном микроскопе-микроанализаторе HITACHI TM 3000 (Япония).

Исследования с помощью металлографического инвертированного микроскопа Микромед МЕТ позволили установить характер формирующихся спаев. В большинстве стекол на границе спая отсутствовали какие-либо изменения структуры. В некоторых образцах установлено наличие неоднородностей ликвационного разделения на границе спаев, что наблюдалось для обеих систем. Данные составы исключались из анализа процессов диффузии.

Для световедущей жилы использовался состав WY-7, синтезированный в системе  $\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{La}_2\text{O}_3-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{ZrO}_2-\text{Nb}_2\text{O}_5$  и модифицированный  $\text{WO}_3$ . ТКЛР его составлял  $77,8 \pm 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ , показатель преломления –  $1,8050 \pm 0,010$ . Температурный интервал изменения вязкости в диапазоне  $10^{10} - 10^{4,5} \text{ Па} \cdot \text{с}$  составлял  $145 \pm 2$  °С. Величина светопропускания при длине волны  $450 \pm 5 \text{ нм}$  –  $84 \pm 2 \%$  [1].

Для светоотражающей оболочки, синтезированной в системе  $\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  [1], значения ТКЛР составляли  $55,5 \pm 0,3 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ , показатель преломления –  $1,4785 \pm 0,0010$ . Температурный интервал изменения вязкости в диапазоне  $10^{10} - 10^5 \text{ Па}$  составил  $340 \pm 2,5$  °С.

Стекло для защитной оболочки получено в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  с добавкой оксидов – модификаторов  $\text{CaO}$ ,  $\text{ZnO}$  и  $\text{BaO}$ , а в качестве красителей – оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (сверх 100 % составляющих) [2]. ТКЛР данного стекла составил  $75,8 \pm 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ .

Все стекла обладали устойчивостью к длительным температурным воздействиям в интервале 600 – 1000 °С в течение 24 ч.

Определено, что в процессе спаивания наблюдалась активная взаимная диффузия ионов на границе раздела системы «световедущая жила – светозащитная оболочка» для иона кремния, которая составляла от 1,01 до 3,43 % (здесь и далее по тексту приведено массовое содержание). Также достаточно активно отмечалась диффузия для иона бора, составляющая от 0,07 до 0,50 %.

Из световедущей жилы в светоотражающую оболочку наблюдалась диффузия иона лантана в количестве 0,01 – 0,06 %, менее значимо иона ниобия – 0,01 – 0,04 % и иона титана – от 0,02 до 0,25 %.

Диффузия иона вольфрама составляла 0,01 – 0,02 %. Ион калия также подвержен диффузии из светоотражающей оболочки в световедущую жилу в количестве от 0,43 до 1,14 %.

Процесс диффузии ионов наблюдался также из стекол светоотражающей в защитную оболочку. Диффузия ионов кремния и алюминия составляла 0,01 – 0,03 %.

Более заметна диффузия ионов из стекол светоотражающей была в защитную оболочку и для иона бора она составляла от 0,06 до 2,12 %. Диффузия иона натрия из защитной оболочки в светоотражающую – от 2,01 до 2,42 %, а иона калия – 0,13 – 0,86 %.

Для красящих ионов защитной оболочки также характерен процесс диффузии в светоотражающую оболочку. Ион кобальта и марганца диффундировали в количестве 0,01 – 0,02 %, ион хрома – 0,01 – 0,04, а ион железа – 0,02 – 0,04 %.

Исследованиями установлено, что повышение температуры спаивания стекол от 610 до 700 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение  $20 \pm 2$  мин приводит к активизации процесса диффузии. Наиболее значима эта величина для иона  $\text{Si}^{4+}$ , наблюдаемая из светоотражающей оболочки в световедущую жилу, составляющая от 0,52 до 2,74 %.

Ионы лантана и титана из световедущей жилы в светоотражающую оболочку диффундировали в количестве 0,01 – 0,05 и 0,06 – 0,32 % соответственно. Диффузия иона бора в зависимости от его преобладания в стеклах составляла от 0,01 до 0,32 %.

Наблюдалась также миграция иона калия из светоотражающей оболочки в защитную и составляла 0,23 – 1,22 %.

При этом количество оксида лантана возрастало незначительно и составляло 0,01 – 0,05, а  $\text{Ti}^{4+}$  – от 0,06 до 0,28 %. Диффузия ионов ниобия и иттрия находилось в интервале 0,01 – 0,03 %.

Определено, что временные режимы спаивания стекол оказывали менее существенное влияние на процессы миграции ионов в сравнении с температурными. Так, продолжительность выдержки спаев в течение 15, 20 и 30 мин не приводило к росту процента диффузии всех ионов. Изотермическая выдержка спаев в течение 72 ч также не оказывала заметного повышения количества диффундирующих ионов.

Проведенные исследования позволили подтвердить, что процесс миграции ионов стеклообразователей модификаторов и красящих оксидов происходил в соответствии с размером ионного радиуса: уменьшение ионного радиуса приводило к росту процессов диффузии на границе спая стекол[3].

Это необходимо учитывать при разработке их составов для оптических волоконных изделий.

### Литература

1. Дяденко М.В. Влияние структуры стекол системы  $\text{BaO-La}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-Nb}_2\text{O}_5$  на термическое расширение и технологические характеристики / М.В. Дяденко, И.А. Левицкий, А.Г. Сидоревич // Физика и химия стекла. – 2022 – Т. 48. – №5. – С. 495 – 508.
2. Левицкий И.А. Стекла для защитной оболочки оптического волокна / И.А. Левицкий, М.В. Дяденко // Актуальные проблемы создания и использования высоких технологий переработки минерально-сырьевой базы Узбекистана: Матер. Науч. – техн. конф. 16 – 17 ноября 2023 г., АН Республики Узбекистан, ин-т общей и неорганической химии. – Ташкент: АНРУ, 2023. – С. 190 – 192.
3. Татаринцев, Б.В. Диффузия на границе между сердцевиной и оболочкой при вытягивании стекловолокна / Б.В. Татаринцев / Физика и химия стекла. – 1984. – Т. 10, № 4. – С. 461 – 467.