

05;07

О формировании ионообменных волноводов в стеклах при использовании серебросодержащих расплавов

© А.А. Подвязный, Д.В. Свистунов

ВНЦ „Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова“,
С.-Петербург
E-mail: svistunov@hotmail.com

*Поступило в Редакцию 6 ноября 2002 г.
В окончательной редакции 31 января 2003 г.*

Представлены результаты определения энергии активации и вида концентрационной зависимости коэффициента ионообменной диффузии в оптическом стекле К8 при использовании серебросодержащих солевых ванн. Экспериментально определена зависимость показателя преломления на поверхности формируемого градиентного волновода от состава солевого расплава. Эти данные позволяют проводить априорное моделирование оптических параметров волновода и оптимизировать режимы диффузионного процесса.

Для создания пассивных интегрально-оптических устройств, в частности пассивных элементов для волоконно-оптических систем, а также планарных датчиков физических величин, широко используются оптические стекла. Одним из основных методов формирования волноводов в стеклах является ионный обмен, проводимый в расплавах, содержащих соли серебра, обычно азотнокислое серебро. При этом используется целый ряд оптических стекол, как промышленных, так и специально разработанных, из которых одним из самых удобных является промышленное стекло К8. В составе этого стекла имеется достаточное количество щелочных компонентов, которые могут служить эффузантами при ионном обмене. Кроме того, оно наиболее доступно, обладает достаточно высокой химической устойчивостью и для него хорошо отработаны процессы оптической обработки для получения качественных поверхностей. Вопрос формирования оптических волноводов в стекле К8 при использовании серебросодержащих расплавов рассматривался в ряде работ, например, [1–4]. В них, в частности,

исследовались модовые спектры и восстановленные по ним профили показателя преломления (ПП) в поперечном сечении волноводов, оптические потери и другие характеристики. В то же время многие вопросы кинетики образования волноводного слоя изучены недостаточно. Так, вид получаемых профилей ПП свидетельствует о концентрационно-зависимой диффузии. В литературе, однако, приведено лишь качественное обсуждение некоторых вопросов изменения этого профиля и модового состава в процессе диффузии, которое не дает возможности проводить априорный выбор технологических режимов ионного обмена (температура и время диффузии, состав солевой ванны) для получения волноводов с заранее заданными оптическими параметрами (значения постоянных распространения и глубины проникновения волноводных мод, величина ПП на поверхности волновода).

В данной работе приведены результаты определения диффузионных характеристик, позволяющие проводить для стекла К8 априорное моделирование профиля ПП, создаваемого при ионообменной диффузии в серебросодержащих расплавах.

Значения приращения ПП, обычно получаемые в результате ионного обмена вида $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ в стекле К8, пропорциональны концентрации иона-диффузанта в стекле [4]. Это позволяет использовать представленный в работах [5,6] подход, основанный на взаимозаменяемости нормированных профилей концентрации иона-диффузанта C/C_{\max} и показателя преломления $\Delta n/\Delta n_{\max}$. Согласно [6], коэффициент ионообменной диффузии D представляется в виде

$$D(T, C) = D_0 \cdot f(T) \cdot g(\Delta n),$$

где $f(T) = \exp[-H/(kT)]$, H — энергия активации диффузии, $D_0 = \text{const}$. Множитель $g(\Delta n)$ описывает концентрационную зависимость коэффициента диффузии. Вид зависимости $g(\Delta n)$ определяется посредством применения метода Больцмана к профилю ПП, восстанавливаемому в результате расчета по стандартному методу [7] на основании данных измерений постоянных распространения волноводных мод. Процедура применения метода Больцмана описана, например, в [5,8]. При этом в формуле Больцмана также осуществляется замена концентрации диффузанта C на величину Δn .

Для изготовления волноводов использовался расплав $\text{KNO}_3 - \text{NaNO}_3$ эвтектического состава с добавлением AgNO_3 в концентрации 5% mol.

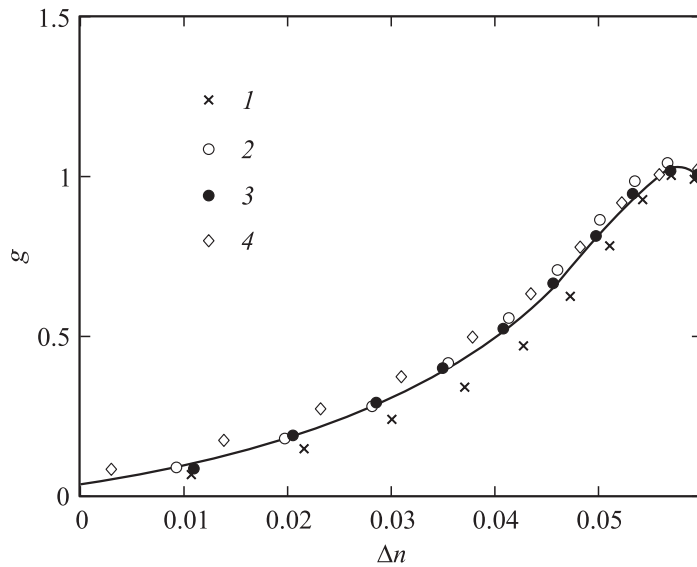


Рис. 1. Концентрационная составляющая коэффициента ионообменной диффузии $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ в стекле К8. $T, ^\circ\text{C}$: 1 — 263; 2 — 300; 3 — 329; 4 — 351. t, h : 1 — 66; 2 — 67.5; 3 — 40.5; 4 — 20.

Продолжительность ионного обмена — от 20 до 70 h, температура — от 260 до 350°C.

На рис. 1 представлены полученные зависимости $g(\Delta n)$ для нескольких образцов волноводов. Видно достаточно хорошее совпадение данных. При этом зависимость $g(\Delta n)$ может быть аппроксимирована полиномом

$$g(\Delta n) = a_0 + a_1 \cdot \Delta n + a_2 \cdot (\Delta n)^2 + a_3 \cdot (\Delta n)^3 + a_4 \cdot (\Delta n)^4 + a_5 \cdot (\Delta n)^5 + a_6 \cdot (\Delta n)^6 + a_7 \cdot (\Delta n)^7,$$

где $a_0 = 0.03$; $a_1 = 6.036$; $a_2 = 51.642$; $a_3 = -1.247 \cdot 10^4$; $a_4 = 1.811 \cdot 10^6$; $a_5 = -8.214 \cdot 10^7$; $a_6 = 1.585 \cdot 10^9$; $a_7 = -1.087 \cdot 10^{10}$.

Пользуясь стандартной методикой, по коэффициентам диффузии, найденным при температурах 263, 300, 329 и 351°C, получаем: $H = 1.67 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, $D_0 = 7.87 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$.

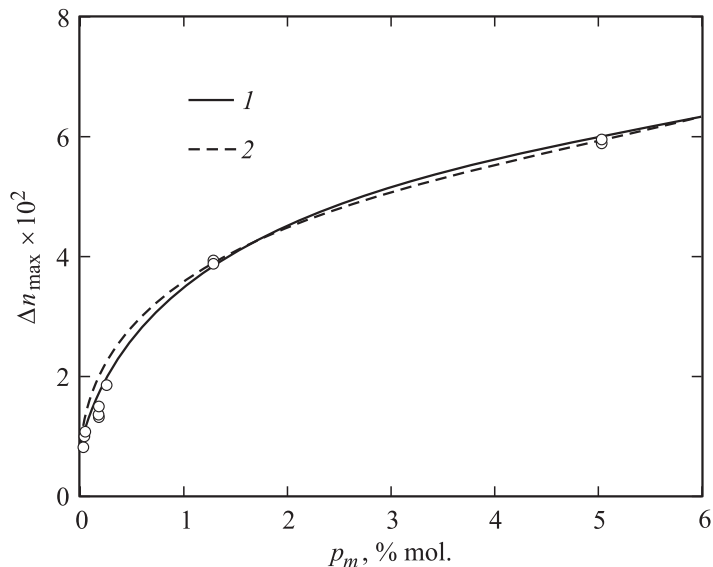


Рис. 2. Максимальное приращение показателя преломления в стекле К8 в зависимости от содержания AgNO_3 в расплаве. 1 — логарифмическая аппроксимация, 2 — кубическое приближение.

В работе [6] предлагается априорно моделировать получаемый в процессе ионного обмена профиль ПП путем решения уравнения, аналогичного уравнению диффузии:

$$\partial(\Delta n)/\partial t = \text{div}[D(\Delta n)\text{grad}(\Delta n)].$$

Согласно [9], величина ПП на поверхности волновода устанавливается в ходе ионного обмена $\text{Ag}_m^+ - \text{Na}_g^+$ (Ag_m^+ — расплав; Na_g^+ — стекло) за время порядка десятков секунд и в дальнейшем почти не изменяется. С другой стороны, времена процесса формирования в стекле К8 волнопроводов с требуемыми на практике параметрами составляют десятки минут. Поэтому при решении указанного уравнения в качестве граничного условия можно задавать максимальное приращение ПП на поверхности волновода Δn_{max} , обеспечиваемое используемым составом солевой ванны.

Для априорной оценки величины Δn_{\max} были дополнены данные работы [10], где приведена эмпирическая зависимость приращения ПП от содержания азотнокислого серебра в расплаве. Полученная дополнительная зависимость показана на рис. 2. Эта зависимость может быть представлена выражением

$$\Delta n_{\max} \cdot 10^2 = 1.8 \cdot \ln(p_m + 0.3) + 3,$$

где p_m — содержание азотнокислого серебра в расплаве в мольных процентах, или выражением

$$\Delta n_{\max} \cdot 10^2 = 1.8 \cdot \ln(p_w + 0.4) + 2,$$

где p_w — содержание азотнокислого серебра в расплаве в весовых процентах. Примерную оценку можно проводить простым выражением в кубическом приближении

$$\Delta n_{\max} \approx 3.5 \cdot 10^{-2} \cdot (p_m)^{1/3}.$$

На рис. 2 видно хорошее совпадение эмпирической зависимости и графиков предложенных аппроксимирующих функций.

Представленные результаты позволяют проводить моделирование процесса изготовления волноводов в стекле К8 и заранее рассчитывать профиль ПП в зависимости от технологических режимов ионного обмена. Это дает возможность априорно оптимизировать режимы процесса для получения волноводов с оптическими параметрами, наиболее близкими к заданным.

Авторы выражают признательность Д.К. Таганцеву за содержательное обсуждение полученных данных.

Список литературы

- [1] Кузьминов Ю.С., Лындин Н.М., Прохоров А.М., Спихальский А.А., Сычугов В.А., Шипуло Г.П. // Квантовая электроника. 1975. Т. 2. № 10. С. 2309–2314.
- [2] Петровский Г.Т., Агафонова К.А., Мишин А.В., Никоноров Н.В. // Физика и химия стекла. 1981. Т. 7. № 1. С. 98–102.
- [3] Томов А.В. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 14. С. 60–62.
- [4] Ланда К.А., Петровский Г.Т. Аморфные планарные волноводы. Красноярск: изд. Красноярского ун-та, 1987.

- [5] *Евстропьев К.К.* Диффузионные процессы в стекле. Л.: Стройиздат, 1970.
- [6] *Карапетян Г.О., Журихина В.В., Липовский А.А., Таганцев Д.К., Татаринцев Б.В.* // Физика и химия стекла. 2000. Т. 26. № 2. С. 179–186.
- [7] *Chiang K.S.* // J. Lightwave Technology. 1985. V. 3. N 2. P. 385–391.
- [8] *Малкович Р.Ш.* Математика диффузии в полупроводниках. СПб: Наука, 1999.
- [9] *Лындин Н.М., Нурлигареев Д.Х., Сычугов В.А., Тищенко А.В.* // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 4. С. 379–384.
- [10] *Ветров А.А., Волконский В.Б., Свистунов Д.В.* // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 5. С. 57–63.