

06; 07; 12

ПЛАНАРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ В СТЕКЛЕ, ОБРАЗОВАННЫЕ ИОНООБМЕННОЙ ДИФФУЗИЕЙ ЦЕЗИЯ

Л. Б. Глебов, С. К. Евстропьев, Н. В. Никоноров, Г. Т. Петровский

Показана возможность получения цезиевых волноводов на щелочноборосиликатных и щелочноцирконосиликатных стеклах путем низкотемпературной ионообменной диффузии. Использование этих стекол позволяет получать цезиевые планарные диффузионные волноводы с высокими приростами показателей преломления за сравнительно небольшие времена полного обмена. Показано, что формирование показателя преломления в цезиевых диффузионных волноводах определяется главным образом изменением состава стекла.

Одним из перспективных направлений в интегральной оптике является создание планарных оптических волноводов на стеклах методом ионообменной диффузии. В настоящее время большое количество работ направлено на исследование влияния типа иона-диффузанта на оптические свойства ионообменных волноводов: прирост показателя преломления (ПП), Δn , профиль ПП $n(x)$, толщину h , анизотропию ПП $\delta n = n^{TM} - n^{TE}$ (TM и TE — ортогональные поляризации света) — двойное лучепреломление.

В качестве ионов-диффузантов обычно используются одновалентные ионы, обладающие заметной подвижностью в стекле: Ag^+ , Tl^+ , Li^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+ [1]. Одним из распространенных ионов-диффузантов является Ag^+ . Применение этого иона позволяет получать высокие приросты ПП ($\Delta n = 90 \cdot 10^{-3}$) [1]. Двойное лучепреломление и толщина слоя составляют $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ и ~ 20 мкм [2]. Однако Ag^+ диффузионные волноводы обладают рядом существенных недостатков, которые ограничивают их использование в интегральной оптике: большое затухание света (более 1 дБ/см), низкие пороги оптического пробоя, низкая термо- и фотохимическая устойчивость [3]. Использование иона K^+ позволяет получать волноводы хорошего оптического качества с малыми потерями (0.2 дБ/см) [4]. Кроме того, образцы стекла, обработанные в расплаве KNO_3 , обладают повышенной механической прочностью, термостойкостью, абразивоустойчивостью, химической устойчивостью, микротвердостью, оптической прочностью [5, 6]. Однако прирост ПП, двойное лучепреломление и толщина для K^+ диффузионных волноводов невысоки: $\Delta n = 8 \cdot 10^{-3}$, $\delta n = 2 \cdot 10^{-3}$, $h = 20$ мкм [4, 7]. Увеличение прироста ПП достигается при использовании иона Li^+ . В Li^+ диффузионных волноводах прирост ПП и толщина составляют $15 \cdot 10^{-3}$ и 60 мкм [1, 8]. Взаимодействие стекол-ионообменников с литиевыми расплавами приводит к ухудшению оптического качества поверхности и увеличению потерь в волноводах, что ограничивает их использование в интегральной оптике. Наибольшие приросты ПП достигаются при использовании иона Tl^+ . В Tl^+ диффузионных волноводах $\Delta n = 10 \cdot 10^{-2}$, $\delta n = 3 \cdot 10^{-3}$ и $h \sim 10$ мкм, потери менее 0.1 дБ/см [9, 10]. В то же время сильная токсичность соединений Tl^+ ограничивает массовое производство таких волноводов [1].

Cs^+ диффузионные волноводы близки по некоторым параметрам к Ag^+ , Li^+ и Tl^+ волноводам ($\Delta n = 43 \cdot 10^{-3}$, $h = 8$ мкм, потери менее 1 дБ/см) [11, 12]. Однако исследованию Cs^+ диффузионных волноводов посвящены единичные работы [1]. Создание таких волноводов затруднительно ввиду того, что боль-

шая величина радиуса иона-диффузанта Cs^+ (1.65 Å) по сравнению с другими щелочными ионами в стекле-ионообменнике, например Na^+ (0.95 Å) или K^+ (1.33 Å), приводит к низкой подвижности иона Cs^+ в стеклах и соответственно к увеличению времени диффузионной обработки для создания волноводного слоя (20—40 ч). В настоящей работе сообщается о создании Cs^+ диффузионных волноводов на синтезированных стеклах и исследовании их оптических свойств.

Для создания волноводов в работе использовались в качестве стекло-ионообменников синтезированные калиево- и натриевоборосиликатные стекла $20\text{K}_2\text{O}-10\text{B}_2\text{O}_3-70\text{SiO}_2$ и $20\text{Na}_2\text{O}-10\text{B}_2\text{O}_3-70\text{SiO}_2$, а также натриевоцирконосиликатные стекла, содержащие 20 мол. % Na_2O . Полированные образцы размером $50 \times 30 \times 4$ мм обрабатывались в расплавах KNO_3 и CsNO_3 при температурах $T = 350-550^\circ\text{C}$, т. е. ниже температуры стеклования T_g ($T_g = 560^\circ\text{C}$ для щелочноборосиликатных стекол, $T_g = 900^\circ\text{C}$ для щелочоцирконосиликатных). В результате обменов $\text{Na}_{\text{стекло}}^+ \rightleftharpoons \text{K}_{\text{расплав}}^+$ и $\text{K}_{\text{стекло}}^+ \rightleftharpoons \text{Cs}_{\text{расплав}}^+$ ПП в ионообменном слое увеличивался и этот слой обладал волноводными свойствами. Параметры волноводов измерялись с помощью резонансного возбуждения волноводных мод при использовании призмной системы ввода излучения. По измеренным на длине волны 0.63 мкм эффективным ПП волноводных мод n_m восстанавливался профиль ПП в слое методом Вентцеля—Крамерса—Бриллюена [13].

На рис. 1 показана зависимость приростов эффективных ПП от времени диффузии при $T = 500^\circ\text{C}$ для Cs^+ (а, б, в) и K^+ диффузионных волноводов (г), сформированных на калиево- (а) и натриевоборосиликатных (б, г) стеклах, а также на натриевоцирконосиликатных стеклах (в). Видно, что с увеличением времени диффузии увеличиваются ПП в поверхностных слоях стекла и число волноводных мод. Для Cs^+ диффузионных волноводов приросты ПП достигают $30-35 \cdot 10^{-3}$ для обмена $\text{Na}_{\text{стекло}}^+ \rightleftharpoons \text{Cs}_{\text{расплав}}^+$ и $26 \cdot 10^{-3}$ для обмена $\text{K}_{\text{стекло}}^+ \rightleftharpoons \text{Cs}_{\text{расплав}}^+$. В то же время для K^+ диффузионных волноводов прирост ПП достигает $3.5 \cdot 10^{-3}$. Видно, что величина прироста ПП для Cs^+ диффузионных волноводов на порядок превосходит величину прироста ПП для K^+ диффузионных волноводов.

На рис. 2 показаны профили ПП волноводов. Глубина Cs^+ диффузионных волноводов на натриевоборосиликатных стеклах составляла ~ 3 мкм, а на натриевоцирконосиликатных стеклах ~ 10 мкм. Для аналогичных технологических режимов глубина K^+ диффузионных волноводов составляла ~ 20 мкм на натриевоборосиликатных стеклах и 30 мкм на натриевоцирконосиликатных. Следует также отметить, что анизотропия ПП для Cs^+ диффузионных волноводов составляет менее $2 \cdot 10^{-4}$, для K^+ диффузионных волноводов эта величина достигает $10 \cdot 10^{-4}$ для натриевоборосиликатных стекол и $30 \cdot 10^{-4}$ для натриевоцирконосиликатных. Таким образом, использование щелочноборосиликатных и щелочоцирконосиликатных стекол позволяет получать Cs^+ диффузионные волноводы с высокими приростами ПП и толщиной до 10 мкм за сравнительно короткие времена ионного обмена (1—4 ч).

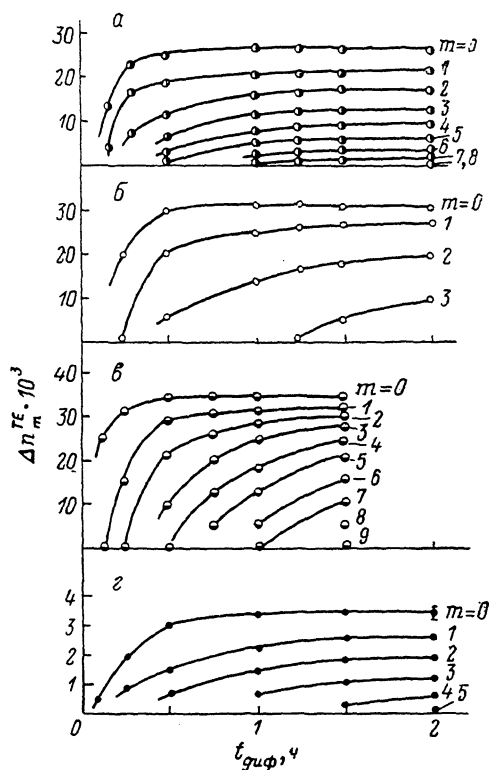


Рис. 1.

Известно [14], что величина коэффициентов взаимодиффузии уменьшается по мере увеличения разницы в радиусах обменивающихся ионов. Это проявляется в том, что при близком значении перепада ПП для обменов $K^+_{\text{стекло}} \rightleftharpoons Cs^+_{\text{расплав}}$ и $Na^+_{\text{стекло}} \rightleftharpoons Cs^+_{\text{расплав}}$ количество волноводных мод и глубина волноводного слоя больше для случая обмена $K^+_{\text{стекло}} \rightleftharpoons Cs^+_{\text{расплав}}$ (рис. 1, 2).

На рис. 3 показана зависимость прироста ПП от температуры обмена при фиксированном времени диффузии ($t_{\text{диф}} = 2$ ч) для обменов $Na^+_{\text{стекло}} \rightleftharpoons K^+_{\text{расплав}}$ (кривая 1) и $Na^+_{\text{стекло}} \rightleftharpoons Cs^+_{\text{расплав}}$ (кривая 2). Из рисунка видно, что для K^+ диффузионных слоев зависимость прироста ПП носит экстремальный характер, т. е. увеличивается в температурном интервале 350—430 °С, а при приближении к T_g уменьшается. Для Cs^+ диффузионных слоев величина прироста ПП растет с увеличением температуры обмена.

Отличия в оптических свойствах K^+ и Cs^+ диффузионных волноводов объясняются различными механизмами формирования ПП. Для K^+ диффузионных

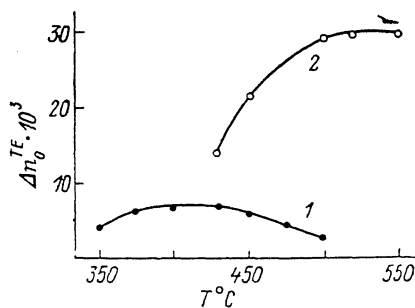
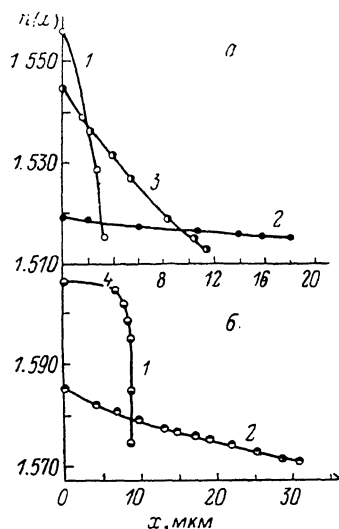


Рис. 2. Профили ПП для волноводов на натриево- и калиевоборосиликатных (а) и натриево-цирконосиликатных (б) стеклах, полученные обменами ионов $Na^+_{\text{стекло}} \rightleftharpoons Cs^+_{\text{расплав}}$ (1), $Na^+_{\text{стекло}} \rightleftharpoons K^+_{\text{расплав}}$ (2), $K^+_{\text{стекло}} \rightleftharpoons Cs^+_{\text{расплав}}$ (3) при $T = 500$ °С и $t_{\text{диф}} = 2$ ч.

Рис. 3. Зависимость прироста эффективных ПП волноводных мод ($m=0$) от температуры ионного обмена для K^+ (1) и Cs^+ (2) волноводов на натриевоборосиликатном стекле.

волноводов такой механизм подробно изучен в работе [7], где показано, что изменение ПП при ионном обмене обусловлено действующими в поверхностном слое стекла напряжениями и изменением состава

$$I = I_t + I_s,$$

где I_t и I_s — тензорный и структурный инкременты ПП (приращение ПП на один мольный процент иона-диффузанта).

При этом формирование K^+ волноводного слоя и его высокая анизотропия обусловлены действующими в поверхностном слое диффузионными напряжениями, т. е. эффектом фотоупругости. Сжимающие напряжения возникают при низкотемпературном $T < T_g$ обмене ионов разных радиусов $Na^+_{\text{стекло}} \rightleftharpoons K^+_{\text{расплав}}$. Изменение состава при таком обмене приводит к незначительному уменьшению ПП. В итоге суммарный прирост ПП для K^+ диффузионных волноводов положителен. По мере приближения температуры диффузии к T_g величина напряжений уменьшается из-за протекания релаксационных процессов. Экстремальный характер зависимости на рис. 3 (кривая 1) для K^+ диффузионных волноводных слоев объясняется протеканием двух процессов: массопереносом и релаксацией напряжений. В температурном интервале от 350 до 430 °С Δn возрастает, т. е. скорость массопереноса больше, чем скорость релаксации напряжений. При приближении температуры диффузии к T_g скорость релаксационных процессов возрастает, что приводит к уменьшению Δn .

Для Cs^+ диффузионных волноводов величина анизотропии ПП, по которой можно судить о напряжениях в поверхностном слое [15], сравнительно мала. Следовательно, можно сделать вывод о том, что диффузионные напряжения не вносят заметного вклада в прирост ПП. Расчет структурного инкремента ПП, согласно работе [7], для обменов $Na^+_{стекло} \rightleftharpoons Cs^+_{расплав}$ и $K^+_{стекло} \rightleftharpoons Cs^+_{расплав}$ показывает, что I_s положителен и прирост ПП достигает $36 \cdot 10^{-3}$ и $38 \cdot 10^{-3}$ соответственно. Расчетные значения приростов ПП близки к экспериментальным. В [12] показано, что в Cs^+ диффузионных волноводах формы профилей ПП и концентрации иона-диффузанта близки. Таким образом, можно полагать, что формирование Cs^+ диффузионных волноводов определяется главным образом изменением состава стекла. Это иллюстрируется также монотонным возрастанием Δn с увеличением температуры ионообменной диффузии (рис. 3, кривая 2). При приближении температуры диффузии к T_g релаксационные процессы для Cs^+ волноводов не наблюдаются, т. е. на изменение ПП главным образом влияет массоперенос.

Таким образом, показана возможность получения Cs^+ волноводов на щелочноборосиликатных и щелочноцирконосиликатных стеклах путем низкотемпературной ионообменной диффузии. Использование этих стекол позволяет получать Cs^+ диффузионные волноводы с высокими приростами показателей преломления за сравнительно небольшие времена ионного обмена. Формирование показателя преломления в Cs^+ диффузионных волноводах определяется изменением состава стекла.

Авторы благодарят А. Н. Замятина за помощь в синтезе щелочноцирконосиликатных стекол.

Литература

- [1] Findakly T. // Opt. Engineering. 1985. Vol. 24. N 2. P. 244—250.
- [2] Лындин Н. М., Сычугов В. А., Тищенко А. В. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 5. Вып. 8. С. 501—504.
- [3] Глебов Л. Б., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 12. С. 2403—2405.
- [4] Аксенов Е. Т., Кузарев А. В., Липовский А. А., Павленко А. В. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 12. С. 2389—2393.
- [5] Глебов Л. Б., Державин С. Н., Иванов А. В. и др. // Физика и химия стекла. 1984. Т. 10. № 3. С. 301—304.
- [6] Глебов Л. Б., Ефимов О. М., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т. // Квантовая электрон. 1985. Т. 12. № 10. С. 2144—2148.
- [7] Глебов Л. Б., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т., Филиппова М. Н. // Физика и химия стекла. Т. 9. № 6. С. 683—688.
- [8] Петровский Г. Т., Агафонова К. А., Мишин А. В. и др. // Физика и химия стекла. 1982. Т. 8. № 3. С. 306—310.
- [9] Isawa T., Nakagome H. // Appl. Phys. Lett. 1972. Vol. 21. N 12. P. 584—586.
- [10] Ланда К. А., Ланда Л. М., Мишин А. В., Петровский Г. Т. // ДАН СССР. 1983. Т. 269. № 6. С. 1355—1357.
- [11] Neuman V., Parriax O., Walpita L. // Electron. Lett. 1979. Vol. 15. N 22. P. 704—706.
- [12] Betts R. A., Pitt C. W., Riddle K. R., Walpita L. M. // Appl. Phys. 1983. Vol. A31. N 1. P. 29—35.
- [13] White J. M., Heidrick P. F. // Appl. Opt. 1976. Vol. 15. N 1. P. 151—155.
- [14] Негодаев Г. Д., Малинин В. Р. // Тр. III Всесоюз. симп. «Стеклообразное состояние. Электрические свойства и строение стекла». Ереван, 1974. С. 146—151.
- [15] Глебов Л. Б., Морозова И. С., Петровский Г. Т. // Физика и химия стекла. 1984. Т. 10. № 2. С. 194—198.

Поступило в Редакцию
14 августа 1987 г.