

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА К-8, ПОЛУЧЕННЫХ ТЕРМОРАДИАЦИОННЫМ ИОННЫМ ОБМЕНОМ

© 2023 г. Иззатилло Нуритдинов^{2, *}, Аъзамкул Анорбоевич Эшбеков^{1, **},
Бекзод Нуриддинович Туйманов¹

¹Самаркандский государственный университет,
Университетский бульвар, 15, Самарканд, 140100 Узбекистан

²Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан,
поселок Улугбек, Ташкент, 100214 Узбекистан

*e-mail: izzatilloh@yahoo.com

**e-mail: eshbekov-a@mail.ru

Поступила в редакцию 12.09.2022 г.

После доработки 24.01.2023 г.

Принята к публикации 08.02.2023 г.

Произведена низкотемпературная термообработка стекла К-8 при температурах 350–500°C в щелочных расплавах солей NaNO_3 и CsNO_3 как в поле гамма-излучения источника ^{60}Co при мощности дозы 3000 Р/с, так и вне поля. Под влиянием терморadiационной обработки вследствие ионообменной диффузии $\text{Na}_{\text{стекла}}^+ \leftrightarrow \text{Cs}_{\text{расплав}}^+$ в поверхностном слое стекла создавались механические сжимающие напряжения, которые приводили к формированию волноводного слоя заданной толщины, увеличению прироста показателя преломления, количества волноводных мод и глубины волноводного слоя.

Ключевые слова: стекло, терморadiационная обработка, обмен щелочными ионами, глубокие волноводные слои, волноводные моды

DOI: 10.31857/S0132665123600085, **EDN:** SQOSCT

ВВЕДЕНИЕ

Силикатные стекла с ионами щелочных металлов являются перспективными материалами для устройств интегральной оптики [1, 2]. Они технологичны и обладают высокими оптическими и механическими характеристиками.

В настоящее время низкотемпературная обработка стекол посредством ионного обмена, в частности ионообменная обработка в расплаве солей $A + \text{стекло} \leftrightarrow B + \text{расплав соли}$ ($A + \text{стекло}$ — одновалентные катионы, содержащихся в матрице стекла, $B + \text{расплав соли}$ — одновалентные катионы солевого расплава), является актуальной и востребованной в оптической и стекольной промышленности. Низкотемпературный ионный обмен заключается в замене ионов стекла на ионы из расплавов или растворов солей при температурах ниже интервала стеклования. При низкотемпературном ионном обмене изменяются механические и оптические свойства стекла как за счет модификации химического состава стекла, так и под влиянием действующих в них макроскопических и микроскопических напряжений [1, 2]. Макроскопические напряжения, определяющие прирост твердости, показателя преломления (ПП) в ионообменном слое и двойное лучепреломление, возникают в результате взаимодействия ионообменного слоя и незатронутой диффузией подложки, а при взаимодействии иона диф-

фузианта со своим непосредственным окружением возникают микроскопические напряжения, которые определяют изотропный прирост ПП [3–6].

Для формирования поверхностного ионообменного слоя стеклянная пластина приводится в соприкосновение с расплавом соли, содержащей ионы, способные обмениваться с ионами стекла. Механические и оптические свойства ионообменных слоев зависят от типа обменивающихся катионов, температуры и длительности ионообменного процесса [1, 2, 7].

Ионный обмен является процессом диффузионным. Параметрами ионообменной диффузии являются: время контакта стекла с соевым расплавом, температура процесса с учетом коэффициента взаимодиффузии ионов стекла и соли, а также температура размягчения стекла [1, 2].

Следует отметить, что раньше ионообменная обработка применялась исключительно для повышения механической прочности посуды, стеклотары и оконного стекла [2, 5–7]. Сегодня она, наряду с повышением механической прочности сверхтонких (50–200 мкм) стекол для дисплеев мобильных телефонов и планшетов, а также с созданием сверхгибких экранов и “рулонной оптики”, используется для создания поверхностных [8], заглубленных [9, 10], канальных [11] оптических волноводов, дифракционных элементов [12, 13], микролинз [14], разветвителей светового сигнала [15], градиантов [16], фотоуправляемых планарных волноводных структур [17], селективных волноводных мод [18], планарных волноводных усилителей [19] и др.

Из-за того, что в процессе ионного обмена сохраняется высокое качество полированной поверхности стекол и за счет отсутствия резкой границы волновод–подложка низки потери на границе с подложкой, изучение ионообменных процессов в системах “стекло–расплав соли” в течение многих лет остается одной из важнейших задач физической химии стекол [20, 21], так как, помимо несомненной практической ценности, исследование ионного обмена позволяет определить важные термодинамические и структурные [22] характеристики стекол. Недостатком данного способа является длительное формирование многомодового волноводного слоя [23, 24].

В литературе имеются данные о том, что ионизирующая радиация приводит к сильному изменению характера диффузионных явлений, в том числе и процесса формирования волноводных слоев на силикатном стекле при ионообменном замещении ионов Na^+ на K^+ [24]. Было показано, что обработка образцов стекла в поле гамма-излучения источника ^{60}Co уже при температурах $T < 350^\circ\text{C}$ приводит к медленному формированию волноводного слоя, процесс ускоряется с повышением температуры, а также с увеличением дозы и мощности дозы облучения.

Формирование волноводных слоев и их свойства сильно зависят от ионных размеров щелочных ионов, участвующих в ионообменном процессе. Исследование сопряженного воздействия температуры и ионизирующей радиации (терморadiационной обработки) на процесс ионообменной диффузии ионов разного радиуса $\text{Na}_{\text{стекла}}^+ \leftrightarrow \text{K}_{\text{расплав}}^+$ при $T = 350^\circ\text{C}$ показало, что в поверхностном слое создаются механические сжимающие напряжения, которые за счет эффекта фотоупругости приводят к формированию волноводного слоя. Было обнаружено увеличение коэффициента взаимодиффузии щелочных катионов Na^+ и K^+ под действием γ -облучения по сравнению с термическим ионным обменом [25]. Однако это явление еще в достаточной степени не исследовано.

Целью настоящей работы является сравнительное исследование процесса формирования и свойств волноводных слоев в поверхностной области силикатного стекла типа К-8, получаемых ионным обменом $\text{Na}_{\text{стекла}}^+ \rightleftharpoons \text{Cs}_{\text{расплав}}^+$ под влиянием термической и терморadiационной обработок.

Таблица 1. Температуры плавления T_m (в °C) некоторых солей щелочных металлов (по [2])

Ион	Нитрат	Хлорид	Сульфат
Li^+	253	610	859
Na^+	307	801	884
K^+	335	770	1074
Rb^+	313	718	1066
Cs^+	414	645	1019

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Формирование в пластинках стекол поверхностного слоя с повышенным ПП осуществлялось методом ионообменной диффузии в кварцевых тиглях в соприкосновении поверхности стекла с расплавом, содержащим ионы, способные обмениваться с ионами стекла. Расплав представляет собой соль (или смесь солей) иона-диффузанта, нагретую выше температуры плавления. Для проведения низкотемпературного ионного обмена температура расплава должна быть ниже температуры стеклования, именно это требование определяет применимость той или иной соли для ионного обмена. Среди различных солей щелочных и переходных металлов нитраты отличаются относительно низкими температурами плавления T_m (табл. 1), что и обеспечивает их широкое использование [2].

Определенные требования предъявляются и к стеклам при проведении ионного обмена. В первую очередь, стекло должно содержать подвижные ионы, способные к обмену. Кроме того, стекло должно иметь высокую химическую устойчивость к расплавам солей, так как расплавы нитратов и других солей являются агрессивной средой и могут приводить к ухудшению качества поверхности или даже полному растворению стекла [2].

Для получения волноводных слоев были использованы полированные образцы промышленного оптического бесцветного силикатного стекла К-8 сложного состава размерами $40 \times 10 \times 3$ мм. Состав исследованного стекла приведен в табл. 2. Полированные образцы стекол термически обрабатывались в щелочном расплаве солей, низкотемпературный ($T < T_g$, где T_g — температура стеклования) ионный обмен в которых приводит к формированию волноводного слоя. Из-за того, что наличие пыли или следов органических веществ могут оказать существенное влияние на диффузионные процессы, для получения равномерного распределения профиля внедряемых ионов по всей площади поверхности стеклянной подложки поверхности образцов тщательно очищались спиртом. Параметрами ионообменной диффузии являлись время контакта t стекла с солевым расплавом, температура T процесса диффузии, время (доза) и мощность дозы P гамма-облучения (время термообработки в поле радиации равно времени облучения образцов).

Диффузия стекол проводилась в кварцевых тиглях. Образцы термообрабатывались в расплавах солей KNO_3 и CsNO_3 в течение 0.5–12 ч при температурах 350–500°C, как в поле гамма-излучения источника ^{60}Co при мощности дозы 3000 Р/с, так и вне поля. Температурно-временные характеристики образцов выбирались из условия формирования волноводного слоя заданной толщины при сохранении высокого качества поверхности образцов.

Параметры полученных волноводов определялись методом резонансного возбуждения волноводных мод с помощью призмной системы ввода–вывода излучения на длине волны He-Ne лазера ($\lambda = 0.63$ мкм) [2, 3]. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки для измерения параметров волноводов. Волновод устанавлива-

Таблица 2. Состав и некоторые свойства стекла марки К-8 (по [29, 30])

Тип стекла	Оптическое бесцветное стекло.					
Физические свойства	Температурный коэффициент линейного расширения: $\alpha = 84 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ Температура размягчения: 557°C (1011Пз) Показатель преломления ($\lambda_d = 587.6 \text{ нм}$): $n = 1.516$					
Химический состав	SiO ₂	As ₂ O ₃	B ₂ O ₃	BaO	K ₂ O	Na ₂ O
	73.75%	0.12%	9.83%	1.28%	4.28%	10.74%
Химическая стойкость	Группа устойчивости к влажной атмосфере: А (высокая) (влажность 85%, длительность 20 ч) Группа устойчивости к кислотам: 1 (высокая) (рН-2,8, длительность 300 мин.)					

ется на поворотном столике с помощью призмы ввода, ПП которой больше показателя преломления образца, и лазерное излучение вводится в волновод. Изменяя угол падения излучения на призму ввода, дискретно возбуждаются волноводные моды, при этом на поверхности волновода наблюдается равномерно светящийся трек. По лимбу столика определяются резонансные углы возбуждения волновода, которые представляют собой угол между нормалью к входной грани призмы и ее положением при наблюдении равномерно светящегося тракта. Зная резонансные углы, ПП призмы и угол при ее основании, по традиционной формуле рассчитываются эффективные показатели преломления (ЭПП) n_m ($m = 0, 1, 2$ — номер моды) волноводных мод [9]:

$$n_m = n_p \sin \left[p \pm \arcsin \frac{\sin \phi_m}{n_p} \right],$$

где n_p — показатель преломления призмы; p — угол при основании призмы; ϕ_m — резонансный угол возбуждения волновода. Призмы ввода и вывода были сделаны на стекле ТФ-5 ($n_p = 1.74971$). Угол призмы ввода был измерен на гониометре ГС-5, угол между основанием и входной гранью призмы $p = 50^\circ 32' 49'' \pm 5''$. Ошибка измерения угла θ_c составила ± 1 , при этом ошибка определения эффективного ПП n_m составляла величину $\pm 2 \times 10^{-4}$.

С помощью полученных результатов с применением метода Вентцеля—Крамерса—Бриллюэна (ВКБ) [26], с использованием кусочно-линейной аппроксимации, реализованного в среде MatchCad, рассчитывалась зависимость значения ПП n от глубины волноводного слоя h .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При температурах обработки образцов $T < T_m$ и в гамма-поле, и вне поля воздействия радиации, ионный обмен на поверхности стекол К-8 практически отсутствует, а в температурном интервале $T_m < T < T_g$ образуются волноводные слои, обусловленные сжимающей деформацией и изменением показателя преломления n_p на поверхностном слое стекла в результате обмена ионами разных размеров в стекле и расплавах.

Результаты изменения ПП на поверхностном слое стекол при термообработке в расплаве KNO₃ приведены на рис. 2, 3, а в расплаве CsNO₃ на рис. 4. Как видно из рисунков, характеристики волноводного слоя зависят от типа расплавов (температур плавления солей и размеров диффундирующих ионов), температуры и времени обработки стекол, а также типа поляризации света по электрическим TE и магнитным TM векторам. Так как для описания явлений с участием поляризованного света достаточ-

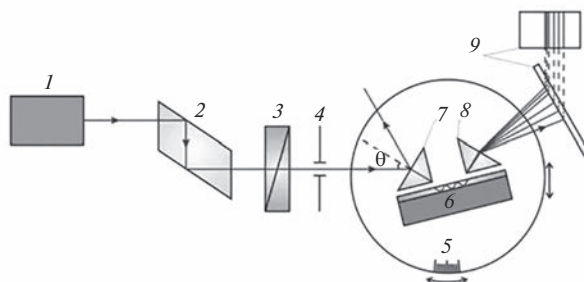


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения параметров волноводов: 1 – одномодовый He-Ne лазер (ЛГ-52-2), $\lambda = 0.6328$ мкм, 2 – Ромб Френеля, 3 – поляризатор, 4 – диафрагма, 5 – поворотный столик с лимбом (стрелками показаны возможные перемещения поворотного столика), 6 – исследуемый планарный волновод, 7–8 – призмы ввода и вывода, 9 – экран.

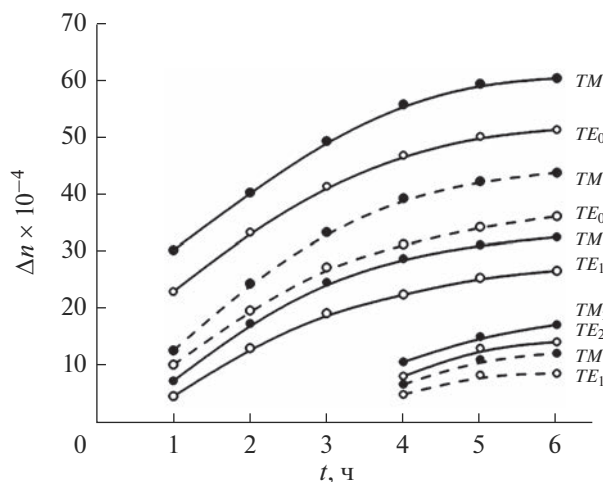


Рис. 2. Зависимости прироста показателя преломления Δn волноводных мод от времени термообработки (t) при 350°C . Штриховыми кривыми показаны зависимости прироста показателя преломления волноводных мод для TE и TM поляризаций от времени термообработки в отсутствии гамма-поля, а сплошными кривыми – при термообработке в гамма-поле.

но знать положение только одного из векторов E или M [27], а также учитывая, что прирост ПП Δn_o больше для света M поляризации, в дальнейшем при обсуждении мы используем экспериментальные результаты, полученные в M поляризации света. (На рис. 2, 3 приведены результаты и для E поляризации).

После 1 ч обработки пластинок стекол в расплаве KNO_3 при 350°C без приложения гамма-поля появляется одна волноводная мода, прирост ПП Δn которой увеличивается с повышением времени термообработки (рис. 2). В начале термообработки прирост ПП Δn высокий, со временем он замедляется, и через 6 ч обработки стремится к уровню насыщения $\Delta n_{\text{max}} \approx 45 \times 10^{-4}$. После четырехчасовой обработки на поверхности

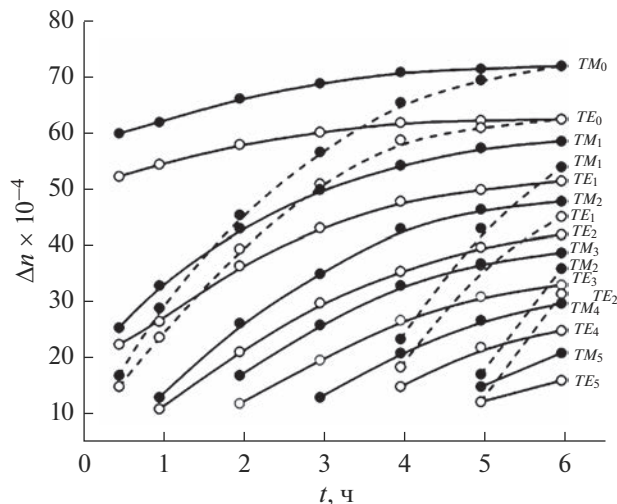


Рис. 3. Зависимости прироста показателя преломления Δn волноводных мод от времени термообработки (t) при 450°C . Штриховыми кривыми показаны зависимости прироста показателя преломления волноводных мод для TE и TM поляризаций от времени термообработки в отсутствие гамма-поля, а сплошными кривыми — при термообработке в гамма-поле.

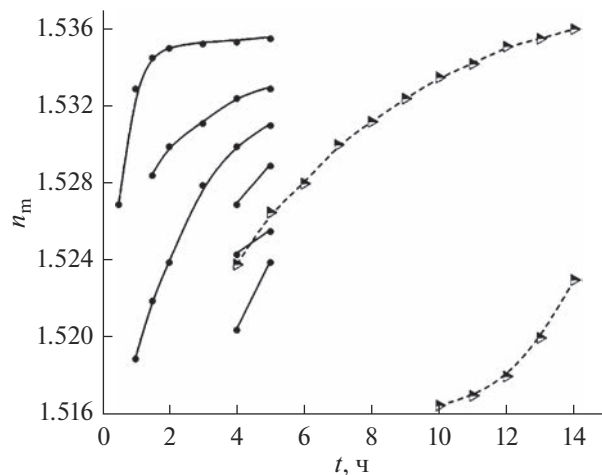


Рис. 4. Зависимости изменения показателя преломления n волноводных мод TM поляризации от времени t ионообменной термообработки в расплаве CsNO_3 при $T = 500^\circ\text{C}$: сплошные линии — в гамма-поле, пунктирные — вне гамма-поля.

стекла появляется вторая волноводная мода (табл. 3), прирост ПП которой так же с повышением времени обработки стремятся к насыщению, однако значение уровня насыщения $\Delta n_{\text{max}} \approx 8 \times 10^{-4}$ отличается от первой моды (рис. 2). Увеличение времени термообработки до 6 ч не привело к созданию новых дополнительных волноводных мод.

Таблица 3. Число сформированных волноводных мод n_m при обработке стекол К-8 в расплаве соли KNO_3

Время термообработки, ч		0.5		1		2		3		4		6	
		вне поля	в γ -поле	вне поля	в γ -поле	вне поля	в γ -поле	вне поля	в γ -поле	вне поля	в γ -поле	вне поля	в γ -поле
Температура обработки, °C	350	—	—	1	2	1	2	1	2	2	3	2	3
	400	—	1	1	2	1	2	1	2	2	3	3	4
	450	1	2	1	3	1	4	1	5	2	5	3	6

Таблица 4. Формирование волноводных слоев на поверхности стекол К-8 при температуре обработки 500°C в расплаве соли CsNO_3

Время обработки в расплаве соли, ч		0.5	1	1.5	3	4	5	6	8	10	12
Число волно-водных мод, n_m	вне гамма-поля	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
	в гамма-поле	1	2	3	3	6	6	6	7	7	8

При одинаковом времени обработки увеличение температуры приводит к увеличению прироста ПП (рис. 2, 3). Если при температуре обработки 350°C после 1 ч обработки появился волноводный слой TM_0 с приростом ПП $\Delta n \approx 14 \times 10^{-4}$ и после 6 часовой обработки достиг значения $\sim 44 \times 10^{-4}$, то при температуре обработки 450°C через 1 ч и через 6 ч Δn достиг значений соответственно $\sim 59 \times 10^{-4}$ и $\sim 73 \times 10^{-4}$. Увеличение температуры обработки привело также к увеличению количества волноводных мод (табл. 3): если шестичасовая обработка при температуре 350°C привела к образованию двух волноводных мод, то такая шестичасовая обработка при 450°C — к образованию трех мод. Увеличение размера диффузанта, т.е. замена расплава соли KNO_3 на CsNO_3 , привело к замедлению процесса ионного обмена, что проявляется в появлении волноводного слоя на поверхности стекла при более высокой температуре (350°C в расплаве KNO_3 и 500°C в расплаве CsNO_3) и в более позднем времени обработки (1 ч в KNO_3 и 4 ч в CsNO_3 , табл. 3 и 4).

Терморadiационное воздействие, т.е. сопряженное воздействие температуры и ионизирующей радиации, резко изменяет ионообменный процесс. Во-первых, при термообработке в поле гамма-излучения укорачивается время образования волноводных мод: если при температуре 350°C после 1 ч обработки вне поля образуется одна мода, то при терморadiационной обработке при этой температуре образуются сразу 2 моды. Во-вторых, увеличивается прирост ПП в волноводных модах: если при температуре обработки 350°C вне поля излучения после 1 ч обработки появился волноводный слой TM_0 с $\Delta n \approx 14 \times 10^{-4}$ и после 6 часовой обработки достиг значения $\Delta n \sim 44 \times 10^{-4}$, то при терморadiационной обработке при этой же температуре 1 ч и 6 ч Δn достиг значений соответственно $\sim 28 \times 10^{-4}$ и $\sim 60 \times 10^{-4}$, повышение температуры терморadiационной обработки приводит к увеличению числа волноводных мод и прироста их ПП (рис. 3, табл. 3). При этом наблюдается очень сильное увеличение значения Δn в начале термообработки, которое, при повышении температуры, стремиться к насыщению. При температуре 450°C значение Δn достигает почти уровня насыщения. Аналогичные изменения наблюдаются и при терморadiационной обработке стекол в расплавах CsNO_3 (рис. 4, табл. 4).

На рис. 5 показаны изменения ПП по глубине h в ионообменном процессе при 500°C в термически- (1) и терморadiационно-обработанных (2) в расплаве CsNO_3

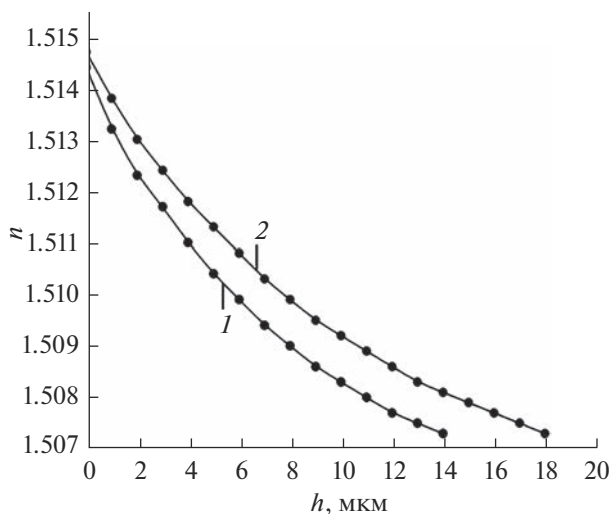


Рис. 5. Изменение показателя преломления n по глубине h в ионообменном процессе при 500°C в термически- (1) и терморadiационно-обработанных (2) в расплаве CsNO_3 стеклах.

стеклах К-8, откуда видно, что при терморadiационной обработке увеличивается глубина изменения ПП. Так как между концентрацией диффузанта в стекле и изменением показателя преломления имеется линейная связь [28], этот результат однозначно свидетельствует об ускорении (увеличении коэффициента) диффузии в стекле в процессе гамма-облучения, т.е. о возникновении радиационно-стимулированной диффузии в силикатных стеклах.

Из вышеприведенных экспериментальных результатов видно, что формирование диффузионного ионообменного волноводного слоя в стеклах при терморadiационной обработке в расплаве щелочных солей происходит за меньшее время по сравнению с простой термообработкой при фиксированной температуре. Учитывая, что основной вклад в изменение ПП щелочно-силикатного стекла при ионообменной диффузии щелочных ионов связано с изменением химического состава стекла, можно сделать вывод о том, что под действием γ -излучения происходит увеличение коэффициента взаимодиффузии щелочных компонентов. Предполагаем, что диффузия обусловлена присоединением щелочных ионов к поверхностным немостиковым атомам кислорода (НАК) $\equiv\text{Si}-\text{O}-$ и дальнейшим их движением путем переключения из одного немостикового атома в другой. При терморadiационной обработке стекол происходит разрыв мостиковых $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ связей с образованием множества радиационных дефектов типа E' -центров и НАК не только на поверхности стекол, но и в их объеме, что приводит к усилению диффузии щелочных ионов и проникновению в более глубокие слои стекла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально установлена возможность радиационно-стимулированной диффузии щелочных ионов в силикатных стеклах и использования этого явления для увеличения скорости ионообменного формирования в них волноводных слоев, расширения диапазонов варьирования их свойств: ускорению процесса получения волноводного слоя заданной толщины, увеличению прироста показателя преломления, количества волноводных мод и глубины волноводного слоя, обусловленных дополни-

тельным стимулированием диффузии щелочных ионов из-за создания новых радиационных дефектов типа НАКИ переключением ионов по этим разорванным дефектным состоянием. Эффект ускорения ионообменной диффузии под действием γ -поля может быть практически использован при ионообменной диффузии стеклообразных оптических элементов.

Авторы выражают глубокую благодарность д. ф-м. н., проф. Н.В. Никонорову за методическую помощь при выполнении экспериментов и за обсуждение результатов.

Работа выполнена по фундаментальной научно-исследовательской теме № ПП-4526 Института ядерной физики Академии Наук Республики Узбекистан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никоноров Н.В., Петровский Г.Т. Стекла для ионного обмена в интегральной оптике: современное состояние и тенденции дальнейшего развития (обзор) // Физика и химия стекла. 1999. Т. 25. № 1. С. 21–69.
2. Никоноров Н.В., Сгибнев Е.М., Сидоров А.И., Евстропьев С.К. Ионный обмен в щелочесодержащих стеклах: технологии, механизмы, применения. Часть 1. Серебряные, медные и таллиевые катионы. Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2020. 103 с.
3. Giallorenzi T.G., West E.L., Kirk R., Ginter R., Andrews B.A. Formation and Characteristics of graded-index optical waveguides buried in glass // Appl. Opt. 1973. V. 12. № 6. P. 1240–1245.
4. Евстропьев С.К., Икрамов Г.И., Петровский Г.Т., Эшбеков А.А. Структурные микронапряжения в щелочносиликатном стекле, подвергнутом низкотемпературному ионному обмену // Физика и химия стекла. 1992. Т. 18. № 2. С. 169–173.
5. Kistler S.S. Stresses in glass produced by non uniform exchange of monovalent ions // J. American Ceramic Society. 1962. V. 45. P. 59–68.
6. Бургеаф А. Механическая прочность щелочно-силикатных стекол после ионного обмена Прочность стекла / Под ред. В.А. Степанова. М.: Мир, 1969. С. 238–339.
7. Бумаев А.М. Прочность стекла. Ионообменное упрочнение Махачкала, 1967. 226 с.
8. Steward G., Millar C.A., Laybourn P.J.R., Wilkinson C.D.W., De La Rue R.M. Planar optical waveguides formed by silver-ion migration // IEEE J. Quantum Electronics. 1977. V. QE-13. P. 192–200.
9. Chartier G., Collier P., Guez A., Jaussand P., Won Y. Graded-index surface or buried waveguides by ion-exchange in glass // Applied Optics. 1980. V. 19. № 7. P. 1092–1095.
10. Madasamy P., West B.R., Morrell M.M., Geraghty D.F., Honkanen S., Peyghambarian N. Buried ion-exchanged glass waveguides: burial depth dependence on the waveguide width // Optics Letters. 2003. V. 28. P. 1132–1134.
11. Ayas P., Conti G.N., Honkanen S., Peyghambarian N. Birefringence control for ion-exchanged channel glass waveguides // Applied Optics. 1998. V. 37. № 36. P. 8400–8405.
12. Epun Y.B., Yi-Yan A. Fabrication of periodic waveguides by ion-exchange // Applied Physics Letters. 1981. V. 38. № 9. P. 673–674.
13. Журихина В.В. Диффузионные фазовые дифракционные решетки // Оптика и спектроскопия. 2000. Т. 89. № 6. С. 1000–1004.
14. Bähr J., Brenner K.H. Realization and optimization of planar refracting microlenses by Ag-Na ion exchange techniques // Applied Optics. 1996. V. 35. № 25. P. 5102–5116.
15. Gordova M.R., Liñares J., Lipovskii A.A., Zhurikhina V.V., Tagantsev D.K., Tatarintsev B.V., Turunen J. A prototype of hybrid diffractive/graded-index splitter for fiber optics // Optical Engineering. 2001. V. 40. № 8. P. 1507–1512.
16. Таганцев Д.К. Физико-химические основы разработки стеклообразных материалов и элементов для фотоники: дис. ... д-р хим. наук. СПб., 2010. 430 с.
17. Петровский Г.Т., Асафонова К.А., Мишин А.В., Никоноров Н.В. Фотоуправляемые планарные волноводы на основе фотохромного стекла // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 10. С. 2266–2268.
18. Глебов Л.Б., Никоноров Н.В., Петровский Г.Т. Модовые селекторы на основе поглощающих масок, автоматически согласованных с полем моды в диффузионных фотохромных волноводах // Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 60. № 3. С. 617–621.
19. Бабукова М.В., Беренберг В.А., Глебов Л.Б., Никоноров Н.В., Петровский Г.Т., Терпугов В.С. Исследование диффузионных волноводов на неодимовых силикатных стеклах // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 9. С. 1973–1975.
20. Моисеев В.В. Ионообменные свойства и строение стекла. // В кн.: Проблемы химии силикатов. Л. 1974. С. 204–218.
21. Ботвинкин О.К., Денисенко О.Н., Черняков Т.Г. Ионный обмен в стеклоделии. В кн.: // Неорганические ионообменные материалы. Л. 1974. Вып. 1. С. 265–273.

22. Моисеев В.В., Пермякова Т.В., Шешуков Г.Е. Ионнообменные равновесия в системе стекло-расплавленная соль // Физика и химия стекла. 1977. Т. 3. № 1. С. 19–22.
23. Глебов Л.Б., Никаноров Н.В., Петровский Г.Т., Филипова М.Н. Влияние напряжений на показатель преломления градиентных слоев стекла, полученных методом ионнообменной диффузии // Физика и химия стекла. 1983. Т. 9. № 6. С. 683–688.
24. Арзикулов Э.У., Исаев И.Х., Эшбеков А.А., Туйманов Б.Н., Сафаров О.Ж. Ускоренный процесс преобразования волноводных слоев на основе силикатного стекла. Научный вестник Самаркандского государственного университета. 2021. № 1. С. 147–154.
25. <http://www.tegs.ru/wp-content/uplcads/2018/07/k-8.pdf>
26. Chiang K.S. Simplified Universal Dispersion Curves for Graded-Index Planar Waveguides Based on the WKB Method // J. Lightwave Technol. 1995. V. 13. № 2. P. 158–162.
27. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие для вузов, 11 изд., М.: Академия, 2006. 560 с.
28. Журихина В.В., Петров М.И., Соколов К.С., Шустова О.В. Ионнообменные характеристики натриево-кальциево-силикатного стекла: определение по модовым спектрам. Журн. технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 58–63.
29. Лист технических данных. Стекло марки К-8. <http://www.tegs.ru/wp-content/uploads/2018/07/K-8.pdf>, Дата обращения 21.01.2023.
30. Бесцветное оптическое стекло К8 (ГОСТ 351-94). <http://optics.spb.ru/materialy/bestsvetnoe-opticheskoe-steklo-k8-gost-3514-94/>. Дата обращения 21.01.2023.