

УДК 535.212:621.372.8:666.22

## СОЗДАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ НА ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ

С.С. Киселев, Н.В. Никоноров, А.И. Игнатьев

Созданы градиентные оптические волноводы на основе фото-термо-рефрактивного стекла методом эффузии и методом ионного обмена при разных температурно-временных режимах. Построены профили показателей преломления, исследовано влияние предварительной фото- и термообработки на оптические свойства полученных волноводов.

**Ключевые слова:** фото-термо-рефрактивные стекла, планарные волноводы, ионный обмен, эффузия.

### Введение

Фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла являются на сегодняшний день перспективным материалом для интегральной оптики. Используемые как эффективный фото-регистрирующий материал для записи объемных фазовых голограмм [1–3], ФТР стекла могут сочетать в себе одновременно лазерные и волноводные свойства, что открывает возможность создания на их основе полифункциональных устройств для интегральной оптики. Следует отметить, что технология получения планарных волноводов на основе ФТР стекла пока не разработана.

Целью данной работы являлось создание градиентных волноводов на ФТР стекле методом эффузии и методом низкотемпературного ионного обмена (НИО) при разных температурно-временных режимах, а также исследование оптических параметров полученных волноводных структур.

### Объект исследования и методика эксперимента

В качестве объекта исследования было использовано ФТР стекло [1]. Из сваренной були размером около  $120 \times 120 \times 40$  мм<sup>3</sup> изготавливались прямоугольные образцы  $40 \times 15 \times 3$  мм<sup>3</sup> с полированными гранями. Таким образом, все используемые образцы были получены из одной варки, что обеспечивает повторяемость всех свойств стекла в разных экспериментах.

Для создания градиентных волноводов на ФТР стекле методом эффузии [4] была выбрана температура 480°C. Термообработки проводились в муфельной печи, температура измерялась термопарой в непосредственной близости от образцов. Точность измерения и поддержания температуры составляла  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Продолжительности опытов составляли 6, 12, 18 и 24 часа. Кроме того, для каждого опыта использовалось два образца: один необлученный, другой облученный УФ лампой в течение 4 минут. Таким образом, для облученного образца термообработка являлась процессом, приводящим не только к образованию волновода, но и к проявлению скрытого изображения, возникшего после УФ облучения. Сравнивая волноводы, полученные на облученных и необлученных образцах, можно выявить влияние ФТР эффекта на свойства волноводов, полученных методом эффузии. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

Создание градиентных волноводов на ФТР стекле методом низкотемпературного ионного обмена [5]  $\text{K}^+$  (расплав)  $\leftrightarrow$   $\text{Na}^+$  (стекло) проводилось следующим образом: образцы стекла помещались внутри муфельной печи в расплав  $\text{KNO}_3$  и выдерживались в течение 3, 6 и 9 часов при температуре расплава 370°C. Для ионного обмена использовалось три образца ФТР стекла: 1) исходное, 2) термообработанное, 3) прошедшее УФ облучение и термообработку. Таким образом, помимо зависимости профиля показателя преломления волновода от времени ионного обмена, изучалось также влияние предва-

рительной термообработки и ФТР кристаллизации в объеме ФТР стекла на его ионообменные свойства. Следует также отметить: из предшествующих опытов было установлено, что при выдержках образцов стекла при температуре  $T=370^{\circ}\text{C}$  в течение длительного времени (до 24 часов) эффузионного волновода на поверхности образца не образуется. Схема эксперимента показана на рис. 2.

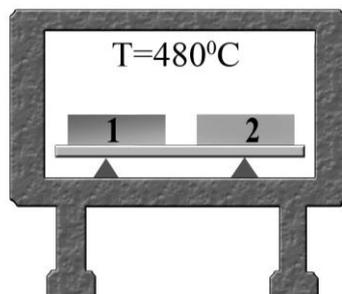


Рис. 1. Схема эксперимента по созданию градиентных волноводов на ФТР стекле методом эффузии: 1 – исходный образец ФТР стекла, 2 – УФ облученный образец ФТР стекла. Продолжительность термообработки – 6, 12, 18 и 24 часа

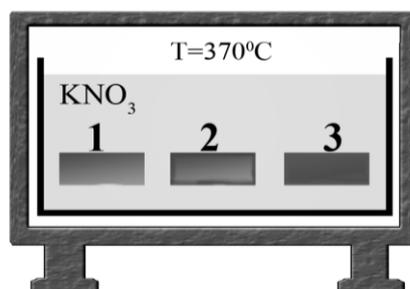


Рис. 2. Схема эксперимента по созданию градиентных волноводов на ФТР стекле методом низкотемпературного ионного обмена (НИО): 1 – исходный образец ФТР стекла, 2 – термообработанный образец ФТР стекла; 3 – УФ облученный и термообработанный образец ФТР стекла. Продолжительность НИО – 3, 6 и 9 часов

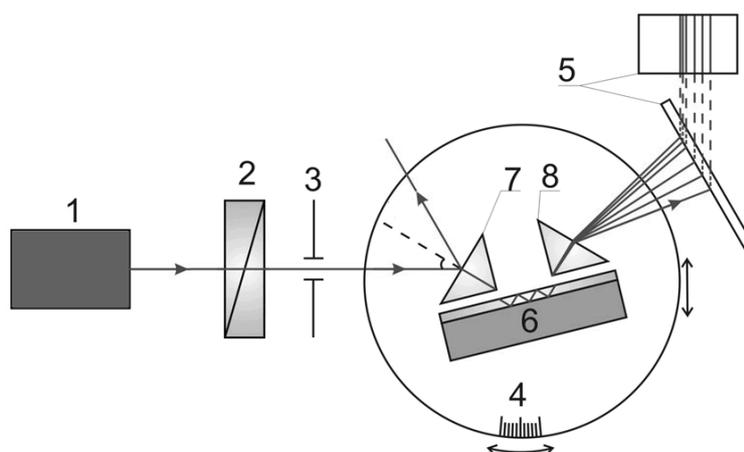


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для определения эффективных показателей преломления волноводных мод: 1 – He-Ne лазер ( $\lambda = 0,6328$  мкм), 2 – поляризатор; 3 – диафрагма; 4 – поворотный столик с лимбом; 5 – экран; 6 – исследуемый волновод; 7, 8 – призмы ввода и вывода

Экспериментальное исследование полученных на ФТР стекле волноводов заключалось в измерении эффективных показателей преломления (ПП) волноводных мод методом их селективного резонансного возбуждения при помощи призмных устройств ввода/вывода лазерного излучения в волноводный слой. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Погрешность измерения ПП составляла  $2 \times 10^{-4}$ . По измеренным данным с помощью метода Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна (ВКБ) с использованием кусочно-линейной аппроксимации, реализованного в среде MathCad, рассчитывался профиль показателя преломления волновода, т.е. зависимость значения ПП от глубины волноводного слоя.

### Результаты

Профили показателей преломления волноводов, полученных на ФТР стекле методом эффузии, приведены на рис. 4. Как видно из рис. 4, максимальное изменение глубины волноводного слоя происходит за 18 часов термообработки. Наибольший прирост ПП составил  $\Delta n = 5,5 \times 10^{-3}$  ( $\Delta n = n_0 - n_s$ , где  $n_0$  – ПП поверхности,  $n_s$  – ПП подложки). Следует также отметить, что у всех волноводов, полученных методом эффузии, наблюдалось уменьшение ПП подложки по сравнению с исходным стеклом на  $\Delta n_s = 1,6 \times 10^{-3}$  ( $n_{исх} = 1,4942$ ), что, вероятно, связано с релаксационными процессами в стекле при нагревании. У волноводов, полученных на предварительно УФ облученном стекле, наблюдалось увеличение ПП на поверхности в среднем на  $7 \times 10^{-4}$  и незначительное уменьшение ПП подложки в среднем на  $3 \times 10^{-4}$ . Таким образом, прирост ПП был увеличен на  $1 \times 10^{-3}$  по сравнению с необлученным стеклом.

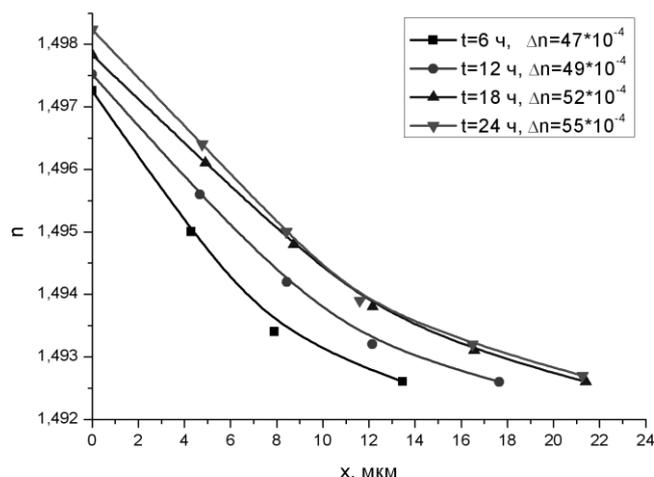


Рис. 4. Профили показателей преломления волноводов, полученных на ФТР стекле методом эффузии при температуре  $T=480^\circ\text{C}$  и времени термообработки 6, 12, 18 и 24 часа

Профили показателей преломления волноводов, полученных на исходном ФТР стекле методом  $\text{K}^+$ -ионного обмена, приведены на рис. 5. Максимальный прирост ПП был достигнут при трехчасовом ионном обмене и составил  $\Delta n = 11 \times 10^{-3}$  (для ТМ-поляризации), что не уступает волноводам, полученным аналогичным методом на основе промышленного стекла К8.

При создании волноводов методом ионного обмена на основе ФТР стекла, прошедшего предварительную термообработку при  $T=480^\circ\text{C}$  в течение 18 часов, увеличение ПП в поверхностных слоях образца происходило как за счет возникновения механических напряжений вследствие низкотемпературного ионного обмена ( $\text{Na}_c^+ \leftrightarrow \text{K}_p^+$ ),

так и за счет улетучивания фторидных компонентов с малой поляризуемостью, произошедшего при термообработке. Таким образом, у волноводов на ФТР стекле был получен максимальный прирост показателя преломления  $\Delta n = 17 \times 10^{-3}$  (рис. 6).

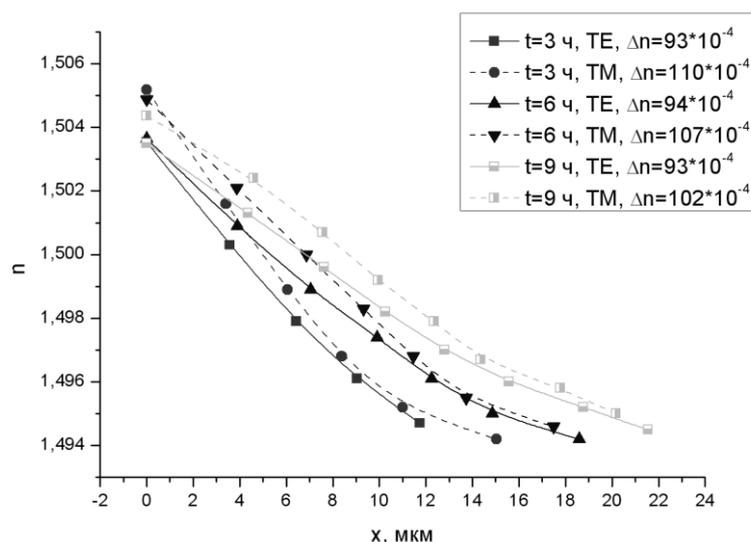


Рис. 5. Профили показателей преломления волноводов (для  $\lambda = 632,8$  нм), полученных на исходном ФТР стекле методом  $K^+$ -ионного обмена при температуре  $T = 370^\circ\text{C}$  и времени ионного обмена 3, 6 и 9 часов

Влияние ФТР кристаллизации в ФТР стекле на его ионообменные свойства в данном эксперименте выявлено не было (изменения профилей ПП – в пределах погрешности). Это связано с тем обстоятельством, что в поверхностных слоях стекла, где происходил ионный обмен, вследствие предварительной термообработки происходили процессы эффузии фторидных компонентов, т.е. уменьшение концентрации фторид-ионов, участвующих в ФТР кристаллизации.

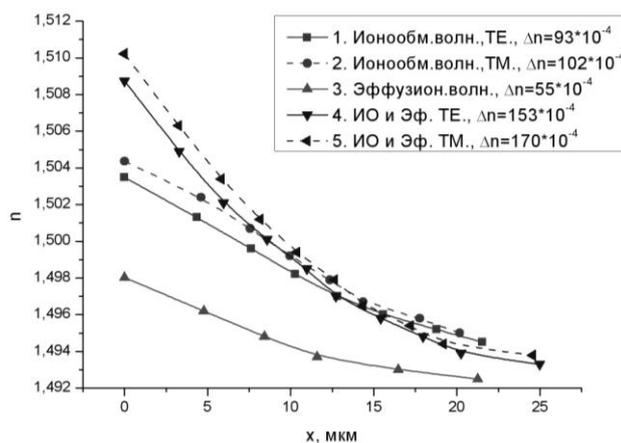


Рис. 6. Профили показателей преломления волноводов, полученных на исходном и прошедшем термообработку ФТР стекле методом  $K^+$ -ионного обмена при температуре  $T = 370^\circ\text{C}$  и времени ионного обмена 9 часов

### Заключение

В работе представлены основы технологии формирования планарных градиентных волноводов на основе ФТР стекла методами НИО и эффузии. Впервые на основе

ФТР стекла получены планарные градиентные волноводы за счет селективной эффузии фторидных компонент с поверхностных слоев стекла, при этом максимальный прирост показателя преломления составил  $\Delta n = 5,5 \times 10^{-3}$ . Также получены планарные градиентные волноводы методом НИО ( $K^+_{\text{p}} \leftrightarrow Na^+_{\text{c}}$ ) с  $\Delta n = 11 \times 10^{-3}$ , что не уступает волноводам, созданным аналогичным методом на основе промышленного стекла К8. Кроме этого, в работе показана возможность создания градиентных волноводов на основе ФТР стекла за счет последовательной комбинации методов эффузии и НИО с максимально достижимым  $\Delta n = 17 \times 10^{-3}$ .

### Литература

1. Nikonorov N.V. Volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glass // Proc. US-Russia Partnership Workshop «Communications, Electronics, Lasers, and Optics», St. Petersburg, 2004.
2. Efimov O.M., Glebov L.B., Glebova L.N., Smirnov V.I. Process for production of high efficiency volume diffractive elements in photo-thermo-refractive glass: US Patent. – № 6 586 141 B1; 2003.
3. O.M. Efimov, L.B. Glebov, V.I. Smirnov. High efficiency volume diffractive elements in photo-thermo-refractive glass : US Patent. – № 6 673 497 B2; 2004.
4. Редько В.П., Шляхтичев О.Д. Получение оптических волноводов методом эффузии // Письма в ЖТФ. – 1978. – Т. 4. – № 23. – С. 1414–1416.
5. Никоноров Н.В., Петровский Г.Т. Стекла для ионного обмена в интегральной оптике: современное состояние и тенденции дальнейшего развития (обзор) // Физ. и хим. стекла. – 1999. – Т. 25. – № 1. – С. 21–69.
6. Никоноров Н.В. Механизм формирования планарных диффузионных оптических волноводов на стеклах и образование в них центров окраски; дис. ... докт. техн. наук. – Л., 1985. – С. 36–43.
7. Никоноров Н.В. Влияние ионообменной обработки на физико-химические свойства поверхности стекол и волноводов // Физ. и хим. стекла. – 1999. – Т. 25. – № 3. – С. 271–308.

*Киселев Станислав Сергеевич*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kisel.stas@rambler.ru

*Никоноров Николай Валентинович*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, nikonogov@oi.ifmo.ru

*Игнатьев Александр Иванович*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, заведующий лабораторией, ignatiev@oi.ifmo.ru