

06;07;12

©1995

## ОБРАТНЫЙ ОБМЕН В ОТОЖЖЕННЫХ H:LiNbO<sub>3</sub> ВОЛНОВОДАХ

*Ю.Н.Коркишко, В.А.Федоров*

Оптические волноводы в кристаллах ниобата лития, изготавливаемые методом протонного обмена [1], характеризуются низкими оптическими потерями и высокой стойкостью к оптическому пробое. Улучшение качества структур достигается путем постобменного отжига [2]. В результате значительно снижаются оптические потери и практически полностью восстанавливаются электрооптические [2] и нелинейные коэффициенты [3]. Это делает использование отожженных протонообменных волноводов (ОПОВ) в LiNbO<sub>3</sub> весьма привлекательным в устройствах интегральной оптики.

Однако профиль показателя преломления (ППП) в ОПОВ является асимметричным, что затрудняет согласование полей волноводных мод в планарном и волоконном световоде при их стыковке. Очевидно, эту задачу можно решить путем формирования заглубленных волноводов в ОПОВ в LiNbO<sub>3</sub>.

Ранее мы сообщали о возможности протекания обратного обмена в кристаллах LiNbO<sub>3</sub> в расплаве нитрата лития [4,5]. Позднее близкие результаты были получены авторами работ [6,7]. Отметим, что все опубликованные результаты касались только H:LiNbO<sub>3</sub> структур со ступенчатыми ППП, однако по вышеуказанным причинам именно отожженные волноводы с градиентными ППП являются наиболее привлекательными для интегральной оптики.

В данной работе показана возможность протекания обратного обмена в отожженных H:LiNbO<sub>3</sub> структурах для изготовления заглубленных волноводов.

ППП по глубине определялись по спектрам эффективных показателей преломления (ЭПП) волноводных мод на длине волны  $\lambda = 663$  нм, используя алгоритм [8].

В экспериментах использовались пластины X- и Z-срезов LiNbO<sub>3</sub>. В качестве расплавов-источников протонного обмена применялись раствор KHSO<sub>4</sub> в глицерине, бензойная кислота и дигидрофосфат аммония (NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>). Процесс обратного протонного обмена проводился в расплавах LiNO<sub>3</sub> (37.5 мол.%)–KNO<sub>3</sub> (44.5 мол.%)–NaNO<sub>3</sub>, а также чистого LiNO<sub>3</sub>.

Ранее сообщалось, что свойства ОИОВ в  $\text{LiNbO}_3$  существенно зависят от температуры отжига [9]. Это связано с температурным фазовым переходом вблизи  $350^\circ\text{C}$  [9]. Поэтому в работе исследовались  $\text{H}:\text{LiNbO}_3$  волноводы, отожженные при температурах  $T_a = 320^\circ\text{C}$  и  $T_a = 400^\circ\text{C}$ , когда образуются соответственно низкотемпературная  $\alpha^{LT}$  и высокотемпературная  $\alpha^{HT}$  фазы [9].

Первоначально формировались глубокие волноводы толщиной более 5 мкм путем длительного протонного обмена. После этого образцы отжигались при температурах  $T_a$  от 320 до  $400^\circ\text{C}$  вплоть до достижения приращения показателя преломления (ПП) на поверхности  $\Delta n_e = 0.070$ , что соответствует верхней границе обеих модификаций  $\alpha$ -фазы  $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$  [9,10]. Затем каждый образец разрезался на две части, одна часть помещалась в расплав  $\text{LiNO}_3\text{--KNO}_3\text{--NaNO}_3$  или чистого нитрата лития при температуре  $300^\circ\text{C}$  ("образец"), где проводился обратный обмен, а вторая отжигалась при той же температуре в течение точно такого же времени ("спутник"). После протекания обменной реакции  $\text{Li}^+ \rightarrow \text{H}^+$  поверхностная область обедняется протонами по сравнению с глубинной частью, что приводит к повышению ПП необыкновенного луча ( $e$ -луча) и к снижению ПП обыкновенного ( $o$ -луча) [11]. Поэтому после частичного обратного обмена  $\text{Li}^+ \rightarrow \text{H}^+$  поверхностная область может являться световодом для мод обыкновенной поляризации.

Измерялись ЭПП мод обыкновенной поляризации в "образце" и необыкновенной поляризации в "спутнике", и восстанавливались соответствующие ППП (рис. 1). Из них определялась поворотная точка последней моды  $o$ -луча в "образце" и на этой же глубине из профиля в "спутнике" определялся ПП  $e$ -луча. Взаимозависимость этих величин представлена на рис. 2. Так как оба профиля достаточно градиентны, то представленные на рис. 2 зависимости отражают фундаментальную взаимосвязь между показателями преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в различных температурных модификациях  $\alpha$ -фазы  $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ .

Из рис. 2 видно, что зависимость  $\Delta n_o$  от  $\Delta n_e$  для волноводов, отожженных при  $320\text{--}330^\circ\text{C}$  ( $\alpha^{LT}$ -фаза [9]) претерпевает разрыв вблизи  $\Delta n_e = 0.025$ , что указывает на существование новой  $\alpha_0$  фазы в области значений  $\Delta n_e$  менее  $330^\circ\text{C}$ . Наличие такой фазы представляется весьма вероятным, так как хорошо известно, что непосредственный протонный обмен при температурах  $150\text{--}250^\circ\text{C}$  (без дополнительного отжига) позволяет формировать волноводы только с  $\Delta n_e < 0.025$  или  $\Delta n_e > 0.08$  [12]. Волноводы с промежу-

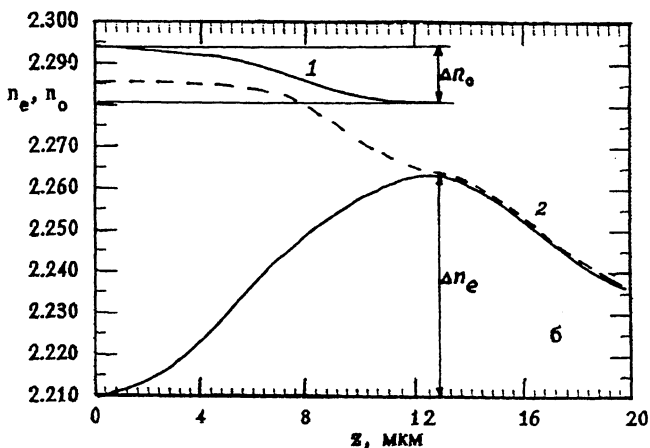
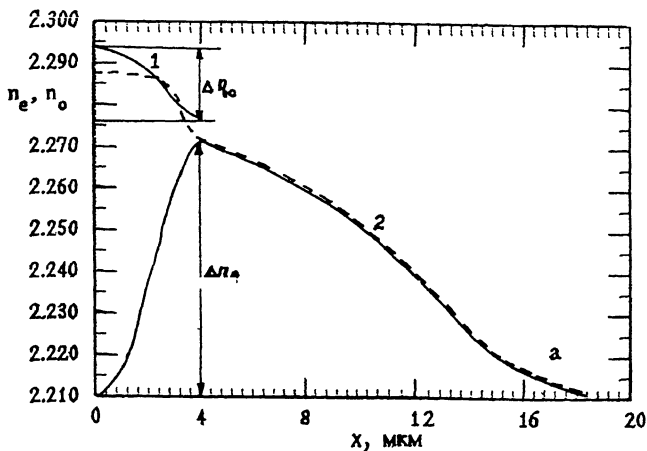
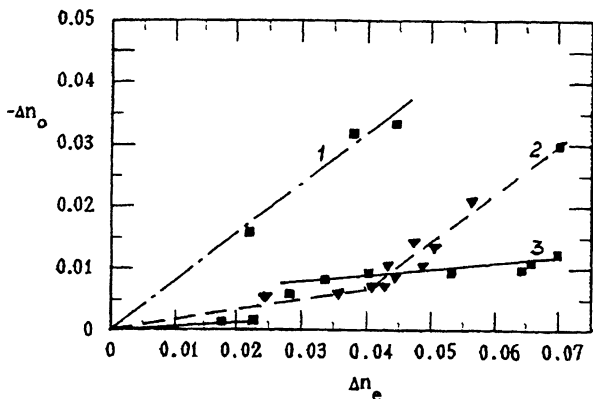


Рис. 1. Профили показателя преломления  $o$ -(1) и  $o$ -(2) лучей в структурах, полученных обработкой отожженных  $\text{H}:\text{LiNbO}_3$  волноводов в расплаве  $\text{LiNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_3$ . Пунктирная линия — ППП  $e$ -луча в "спутнике".  $a$  —  $X$ -срез, расплав бензойной кислоты,  $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $t = 24$  ч; отжиг:  $T = 330^\circ\text{C}$ ,  $t = 100$  ч; обратный обмен:  $T = 300^\circ\text{C}$ ,  $t = 70$  ч.  $b$  —  $Z$ -срез, расплав  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $T = 220^\circ\text{C}$ ,  $t = 10$  ч; отжиг:  $T = 330^\circ\text{C}$ ,  $t = 80$  ч; обратный обмен:  $T = 300^\circ\text{C}$ ,  $t = 70$  ч.

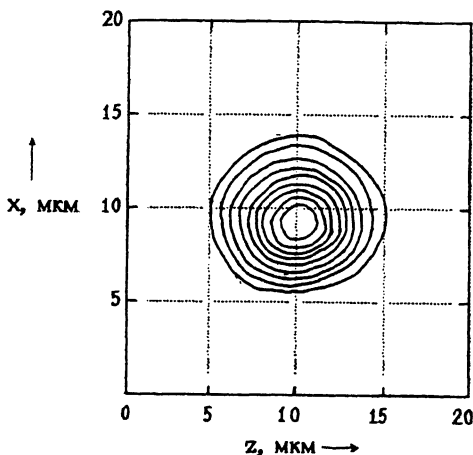
точными значениями  $\Delta n_e$  формируются только с использованием постобменного отжига. Вероятно, как раз значение  $\Delta n_0 = 0.025$  и соответствует межфазной границе.

Для структур, отожженных при  $400^\circ\text{C}$ , подобное поведение зависимости  $\Delta n_0$  от  $\Delta n_e$  не наблюдается (рис. 2). Существование только одной высокотемпературной  $\alpha^{\text{HT}}$ -фазы в области значений  $\Delta n_e = 0 \dots 0.07$  подтверждается и тем фактом, что при температуре  $400^\circ\text{C}$  непосредственным протонным обменом в расплаве  $\text{ZnSO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4\text{-KHSO}_4$



**Рис. 2.** Взаимозависимость приращений показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в отожженных H:LiNbO<sub>3</sub> волноводах.

Температура отжига: 1 —  $T_a = 320^\circ\text{C}$ , 2 —  $T_a = 355^\circ\text{C}$ , 3 —  $T_a = 400^\circ\text{C}$ .  
 ■ — X-срез, ▼ — Z-срез LiNbO<sub>3</sub>.



**Рис. 3.** Профиль распределения моды в канальном волноводе, изготовленном методом обратного обмена на X-срезе LiNbO<sub>3</sub>. Каждая линия равной интенсивности отличается от предыдущей на 10%.

удаётся непрерывно изменять приращение ПП на поверхности волноводов путем изменения концентрации протонов [13]. Отметим, что зависимость  $\Delta n_o$  от  $\Delta n_e$  для H:LiNbO<sub>3</sub> волноводов, отожженных при температуре  $355^\circ\text{C}$  (промежуточное состояние), имеет излом вблизи  $\Delta n_e = 0.04$ .

Формировались и исследовались также канальные обрат-  
нообменные волноводы. Канал шириной 8 мкм формировал-  
ся методом фотолитографии по предварительно нанесенной  
на поверхность ниобата лития пленке титана. Далее обра-  
зец помещался в раствор гидросульфата калия в глицерине  
(концентрация 1 г/л), который выводился на температуру  
215°C и выдерживался в течение 12 ч. После удаления ти-  
тановой маски проводился постобменный отжиг при темпе-  
ратуре 320°C в течение 67 ч. Затем образец помещался в  
расплав  $\text{LiNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_3$  при 300°C, где выдерживался  
в течение 47 ч.

На рис. 3 показано распределение интенсивности излуче-  
ния в сформированном одномодовом заглубленном каналь-  
ном волноводе. Видно, что профиль моды близок к кругово-  
му профилю волоконного световода, что, очевидно, приве-  
дет к существенному снижению оптических потерь на сты-  
ковке.

Авторы благодарят специалистов фирмы *Pirelli Cavi*  
(Милан, Италия) за помощь в исследовании канальных вол-  
новодов.

### Список литературы

- [1] *Jackel J.L., Rice C.E., Veselka J.J.* // *Appl. Phys. Lett.* 1982. V. 41. P. 607-608.
- [2] *Suchoski P.G., Findakly T.K., Leonberger F.J.* // *Jpt. Lett.* 1988. V. 13. P. 1050-1052.
- [3] *Keys R.W., Loni A., De La Rue R.M.* // *Electr. Lett.* 1990. V. 26. P. 625-626.
- [4] *Ганшин В.А., Коркишко Ю.Н., Петрова В.З.* // *ЖТФ.* 1988. Т. 58. В. 6. С. 1168-1170.
- [5] *Ганшин В.А., Коркишко Ю.Н.* // *ЖТФ.* 1990. Т. 60. В. 9. С. 153-156.
- [6] *Jackel J.L., Johnson J.J.* // *Electr. Lett.* 1991. V. 27. N 15. P. 1360-1361.
- [7] *Olivares J., Cabrera J.M.* // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 62. N 20. P. 2468-2470.
- [8] *White J.M., Heidrich P.F.* // *Appl. Opt.* 1976. V. 15. N 1. P. 151-155.
- [9] *Fedorov V.A., Korkishko Yu.N.* // *Proc. SPIE.* 1994. V. 2291. P. 243-254.
- [10] *Коркишко Ю.Н., Федоров В.А.* // *ЖТФ.* 1994. Е. 64. В. 2. С. 122-136.
- [11] *De Micheli M.* // *J. Opt. Commun.* 1983. V. 4. N 1. P. 25-31.
- [12] *Li M.J., De Micheli M.P., Ostrowsky D.B., Papuchon M.* // *J. Optics.* 1987. V. 18. P. 139-143.
- [13] *Ganshin V.A., Korkishko Yu.N.* // *Phys. status solidi (a).* 1990. V. 119. N 1. P. 11-25.

Поступило в Редакцию  
23 февраля 1995 г.