

.05

© 1992

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОНООБМЕННЫХ СЛОЕВ В НИОБАТЕ И ТАНТАЛАТЕ ЛИТИЯ

А.В. Кухарев, А.А. Липовский

Протонный обмен используется для формирования в ниобате лития оптических волноводов со значительными ( $\sim 0.1$ ) перепадами показателя преломления между подложкой и диффузионным слоем, в качестве источника диффузанта обычно используется бензойная кислота. Профиль показателя преломления подобных структур близок к ступенчатому [1, 2], при этом увеличивается только показатель для необыкновенного луча  $n_e$ . При проектировании интегрально-оптических устройств на основе таких структур и при расчете их характеристик необходимо знать связь между условиями проведения и глубиной диффузии, дисперсионные характеристики протонообменных областей. Необходимо также рассчитывать эффективные показатели преломления и распределения полей волноводных мод. Для этого требуется информация о точном виде профиля показателя преломления протонообменной структуры.

Для определения диффузионных параметров сформированных нами в расплаве бензойной кислоты протонообменных структур использовалась интегрально-оптическая методика. При этом методом призмленного ввода измерялся спектр эффективных показателей преломления волноводных мод (TE для X- и Y-среза, TM для Z-среза ниобата лития). Далее подбирались пары  $d$  и  $N_f$  ( $d$  - глубина протонообменной области,  $N_f$  - ее показатель преломления), обеспечивающие наименьшую среднеквадратичную разницу между измеренным и рассчитанным согласно стандартным дисперсионным соотношениям для пленочного световода [3] наборами эффективных показателей преломления мод.

Процедура была реализована программным образом. При этом соответствующие трансцендентные уравнения решались численно для различных пар  $\{d, N_f\}$ , варьируемых до тех пор, пока среднеквадратичная разность  $A = \sum (N_m - \tilde{N}_m)^2$ , где  $N_m$  - вычисленные эффективные показатели преломления мод, не принимала минимального значения. Измерения, проведенные для одних и тех же образцов на различных длинах волн, дали результаты по глубине слоя  $d$ , совпадающие с точностью до второго знака после запятой, что говорит о достаточной точности измерений и пригодности ступенчатой аппроксимации для профиля функции  $\Delta n(x)$ .

Далее, исходя из параметров слоя (эквивалентного ступенчатого профиля показателя преломления), вычисленных для различных длин волн и условий диффузии, были определены спектральные зависимости

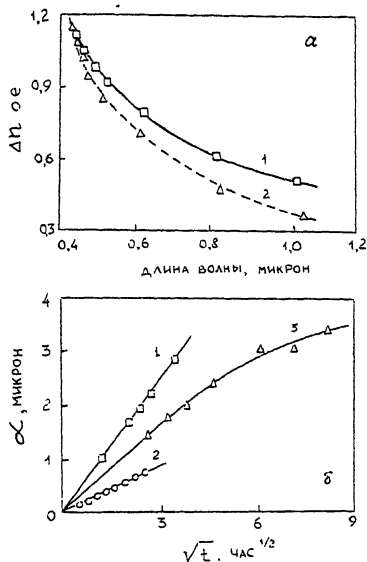


Рис. 1. а) Нормированные дисперсионные зависимости для  $\Delta n$  протонообменных слоев ниобата лития (1) и танталата лития (2). б) Зависимость глубины диффузии от времени протонного обмена для ниобата и танталата лития: 1 -  $\text{LiNbO}_3$ , 240 °C; 2 -  $\text{LiNbO}_3$ , 200 °C; 3 -  $\text{LiTaO}_3$ , 240 °C.

изменения показателя преломления, т.е. спектральная дисперсия структуры. Зависимости, определенные для протонообменных структур на основе ниобата и танталата лития, представлены на рис. 1, а. Хорошо заметно отличие хода дисперсионных кривых.

Ступенчатая аппроксимация профиля изменения показателя преломления и связанные с ней расчеты позволили также восстановить зависимость глубины диффузии от времени и температуры обработки. На основе этих измерений, исходя из соотношения  $d = (Dt)^{1/2}$  были оценены постоянные диффузии  $D$  для различных температур. Для ниобата лития  $D = 2.0 \text{ мкм}^2/\text{ч}$  для 240 °C и  $0.35 \text{ мкм}^2/\text{ч}$  для 200 °C, для танталата лития  $D = 0.3 \text{ мкм}^2/\text{ч}$  для 240 °C. Зависимости глубины от времени для ниобата лития (200 °C и 240 °C) и для танталата лития (240 °C) представлены на рис. 1, б

Глубина диффузии пропорциональна корню квадратному из времени обработки в расплаве во всех случаях, однако по мере увеличения глубины наблюдается искажение линейного характера зависимости, в случае ниобата лития - слабое. Это может быть связано как с изменением характера диффузионного профиля, так и с зарегистрированным при измерениях спектров поглощения перераспределением групп OH в кристалле.

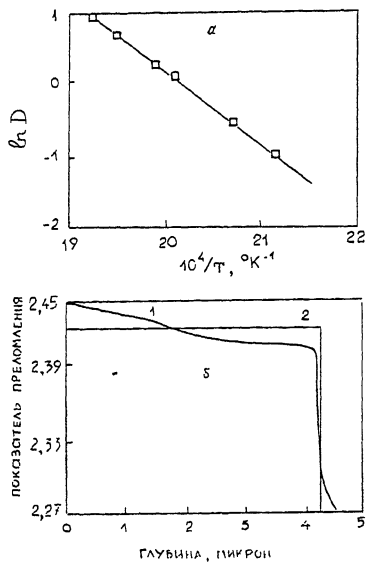


Рис. 2. а) Температурная зависимость коэффициента диффузии протонов для ниобата лития  $Z$ -среза.  
 б) Профиль показателя преломления (1) для протонообменного  $\text{LiNbO}_3$  световода ( $\lambda = 0.458$  мкм, 10 ч обмена при  $240^\circ\text{C}$ ) и наиболее близкий ступенчатый профиль (2).

Зависимость для  $\text{LiTaO}_3$  более нелинейна, но причиной этого может быть и более жесткий режим обработки танталата лития в расплаве, содержащем ионы водорода. Следует отметить, что величина  $\Delta n$  для  $\text{LiTaO}_3$  ( $\Delta n = 0.0167$  на  $\lambda = 0.488$  мкм) существенно меньше, чем для  $\text{LiNbO}_3$  ( $\Delta n = 0.1386$ ). Измеренная постоянная диффузии для танталата лития в 7 раз меньше, чем для ниобата лития при той же температуре. Величина изменения показателя преломления для  $\text{LiTaO}_3$  несколько уменьшается с увеличением времени обработки, оставаясь практически постоянной в течение первых 14 часов диффузии, и падая до 0.016 для образца, обработанного в расплаве бензойной кислоты в течение 65 часов. Возможно, это также связано с непрямоугольностью профиля показателя преломления.

Зависимость постоянной диффузии  $D$  от температуры для  $Z$ - $\text{LiNbO}_3$  структур представлена на рис. 2, б. Определенное на основании этой зависимости значение энергии активации составляет  $1.47 \cdot 10^{-19}$  Дж (0.92 эВ). Полученная зависимость находится в хорошем соответствии с данными работы [4]. При определении параметров для двухмодовых структур удавалось, разумеется, добиться точного совпадения  $N_m$  и  $N_m$ ; для оптических волноводов с большим количеством мод разница  $\Delta$  быстро увеличивалась

Эффективные показатели преломления и межмодовые перепады для планарного световода ( $\lambda = 0.4579$  мкм)

$m$	0	1	2	3	4	5
$N_m$	2.43490	2.42906	2.42000	2.41292	2.41066	2.40432
$\Delta N$	-	0.01034	0.00906	0.00708	0.00226	0.00634
$m$	6	7	8	8	10	11
$N_m$	2.39721	2.38852	2.37876	2.36733	2.35584	2.34243
$\Delta N$	0.00711	0.00869	0.01103	0.01103	0.01189	0.01341
$m$	12	13	14	15	подл.	
$N_m$	2.32791	2.31236	2.29525	2.27806	2.27200	
$\Delta N$	0.01452	0.01555	0.01711	0.01719	0.00606	

с увеличением числа мод, что говорит о некотором отличии профиля показателя преломления от ступенчатого. Отсюда можно сделать вывод о более сложном характере профиля изменения показателя преломления в протонообменной области. К сожалению, известные методы решения обратной WKВ задачи, используемые для восстановления профиля показателя преломления, либо требуют априорной информации о виде профиля изменения показателя преломления, либо пригодны для сравнительно медленно меняющихся по глубине показателей преломления [5]. В таблице приведен спектр эффективных показателей преломления мод  $N_m$  и перепадов между ними  $\Delta N = N_{m-1} - N_m$  для одного из планарных световодов.

Из представленных данных видно, что поведение группы мод низшего порядка (от  $m=0$  до  $m=4$ ) является более характерным для градиентного, а не пленочного световода – межмодовое расстояние уменьшается с увеличением номера моды, а поведение высших мод (от  $m=5$  до  $m=15$ ) типично для ступенчатого профиля показателя преломления, так как межмодовая разница  $\Delta N$  растет с увеличением номера  $m$ . Для восстановления профиля показателя преломления такого вида нами был использован комбинированный подход: вначале по методике [5] восстанавливалась градиентная часть профиля показателя преломления и определялось значение функции  $\Delta n(0)$ . После этого полученная величина использовалась для расчета полного профиля показателя преломления согласно методике, предложенной автором работы [6], которая хорошо зарекомендовала себя для быстро меняющихся профилей. Результаты восстановления для рассматриваемого образца представлены на рис. 2, б. Там же приводится оптимизированный профиль показателя преломления ступенчатого типа. Аналогичные профили были получены и для других образцов, способных каналировать достаточное число мод. Для маломодовых световодов, к сожалению, увеличение

показателя преломления для малых глубин диффузии не регистрировалось с помощью интегрально-оптических измерений. Таким образом, профиль показателя преломления, формирующийся в результате протонного обмена, носит более сложный, по сравнению с прямоугольным, характер.

Проведенные исследования иллюстрируют сложный характер процесса протонного обмена в ниобате лития и говорят о необходимости учета точного вида профиля показателя преломления при проведении расчетов электромагнитных полей и модовых спектров в случае достаточно глубоких волноводных структур.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Г а н ь ш и н В.А., К о р к и ш к о Ю.Н., П е т р о в а В.З. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 6. С. 1122-1127.
- [2] J a s k e l J.L., R i c e C.E., V e s e l - k a J.J. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. N 7. P. 607-609.
- [3] Б а р н о с к и М. Введение в интегральную оптику. М.: Мир, 1977. 367 с.
- [4] W o n g K.K. // Proc. SPIE. 1988. V. 933. P. 13-22.
- [5] W h i t e J.M., H e i d r i c h P.F. // Appl. Opt. 1976. V. 15. N 1. P. 151-155.
- [6] C h i a n g K.S. // IEEE J. Lightwaves Technology. 1985. V. LT-5. N 2. P. 385-391.

Поступило в Редакцию  
10 января 1992 г.