

Поля в каждой из двух структур вычислялись с помощью разложения по ортонормированным модам. Коэффициенты разложения рассчитывались из обычных граничных условий. Отраженной от границ линзы волной пренебрегали. В таком случае эффективность перекачки мод  $\eta$  определяется интегралом перекрытия полей в световоде и в области ДПО. На рис. 2 представлена зависимость  $\eta$  от толщины  $d$  световодной области ДПО, рассчитанная для характерного параметра  $D=2.0$  мкм гауссова профиля ПП световода  $H:LiNbO_3$ .

Х а р а к т е р и с т и к и Д П О л и н з

№ образца	Коэффициент пропускания через линзу, %	Размер фокального пятна по уровню 3 дБ, мкм	Уровень первого бокового лепестка, дБ
1	70	30	11
2	80	30	12
3	80	30	11

В наших экспериментах использовались линзы с таким ходом лучей, при котором параллельный пучок из  $H:LiNbO_3$  световода падает на их плоскую границу. Эта схема, выбранная и описанная ранее для ТИРЕ-линз [7], оказалась весьма эффективной. В таблице представлены некоторые характеристики изготовленных линз ДПО.

Линзы ДПО, как следует из сопоставления этих данных и данных работы [7], не уступают по своим параметрам линзам ТИРЕ. Учитывая важные преимущества в способе получения ДПО линз, можно ожидать существенные прикладные и научные результаты при разработке интегрально-оптических элементов такого типа.

#### Список литературы

- [1] Zang D. Y. // Opt. Commun. 1983. Vol. 47. N 4. P. 248—250.
- [2] Zang P. Y., Tsai C. S. // Appl. Phys. Lett. 1985. Vol. 46. N 8. P. 703—705.
- [3] Tsai C. S., Zang D. Y., Le P. // Appl. Phys. Lett. 1985. Vol. 47. N 6. P. 549—551.
- [4] Zang D. Y., Tsai C. S. // Appl. Optics. 1986. Vol. 25. N 14. P. 2264—2271.
- [5] Subara T., Fujiwara Sh., Nishibara H. // Appl. Optics. 1986. Vol. 25. N 19. P. 3379—3383.
- [6] Ганьшин В. А., Коркишко Ю. Н. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 4. С. 827—829.
- [7] Волков В. А., Вьрелкин В. П., Ганьшин В. А. и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 6. С. 1224—1223.
- [8] Jackel J. L., Rice C. E., Veselka J. J. // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 41. N 7. P. 607—608.
- [9] Ганьшин В. А., Иванов В. Ш., Коркишко Ю. Н., Петрова В. З. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 7. С. 1354—1362.
- [10] Гончаренко А. М., Редько В. П. Введение в интегральную оптику. Минск: Наука и техника, 1975. 148 с.

Московский институт  
электронной техники

Поступило в Редакцию  
3 июля 1987 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ДИФФУЗИЕЙ ЖЕЛЕЗА

А. И. Башкиров, В. М. Шандаров

Планарные оптические волноводы являются базовыми элементами широкого класса устройств интегральной оптики. Электрооптические и акустооптические модуляторы и переключатели, акустооптические корреляторы и анализаторы спектра, аналого-цифровые преобразователи — вот далеко не полный перечень уже реализованных устройств с использованием оптических волноводов [1]. В интегральной акустооптике в настоящее время основ-

ным материалом является ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) благодаря сочетанию таких его свойств, как высокая пьезоактивность, низкие акустические потери, хорошие оптические и акустооптические свойства. На практике наиболее часто волноводы в ниобате лития формируют путем высокотемпературной диффузии титана. Как указывается в [2], достаточно высокое оптическое качество имеют волноводы  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ , однако детально параметры и свойства их не изучались. Исследование таких волноводов представляет интерес, так как легированный железом ниобат лития является материалом, перспективным для создания голографических устройств записи при обработке информации.

В данной работе приведены результаты исследований характеристик планарных оптических волноводов, полученных термодиффузией железа в ниобат лития X-, Y- и Z-срезов, и определены параметры процесса диффузии.

Планарные волноводы  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  формировались следующим образом. На поверхность пластин  $\text{LiNbO}_3$  методом вакуумного термического испарения наносилась пленка Fe толщиной  $\sim 25$  нм. Химически чистое железо напылялось с вольфрамового испарителя, диффузия проводилась в атмосфере воздуха при температуре  $T=1000$  °C.

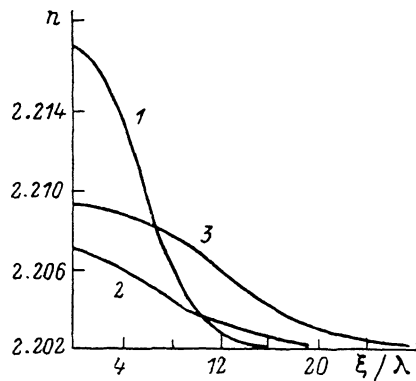
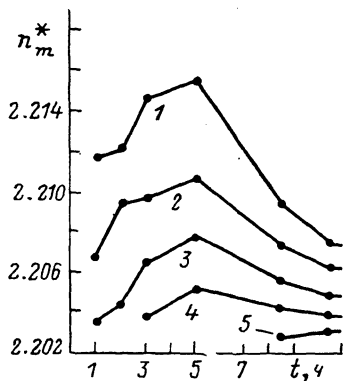


Рис. 1. Зависимость спектров эффективных показателей преломления волноводных TE-мод от времени диффузии железа в Y-срезу  $\text{LiNbO}_3$ .

Рис. 2. Профили ПП для необыкновенных волн полученных волноводов на Y- (1), X- (2), Z-срезах (3).

Как известно [3], информация о параметрах процесса диффузии может быть получена из анализа профиля показателя преломления (ПП) оптических волноводов, который в свою очередь с достаточной степенью точности можно восстановить по спектру эффективных ПП волноводных мод. Экспериментально значения эффективных ПП волноводных мод  $n_m^*$  определялись по углам ввода света в волновод с использованием призм связи из фосфида галлия на длине волны  $\lambda=0.63$  мкм. По измеренным спектрам  $n_m^*$  восстанавливались профили исследуемых волноводов. Для этого использовались полученные зависимости нормированного эффективного ПП от нормированного модового индекса [4].

При исследовании диффузии железа в ниобат лития Y-срезу высокотемпературный отжиг проводился в несколько этапов. После каждого отжига (продолжительностью 1—3 ч) пластина остывала до комнатной температуры, после чего измерялись спектры эффективных ПП волноводных мод. На рис. 1 представлены зависимости эффективных ПП для мод  $TE_0$ — $TE_4$  (кривые 1—5 соответственно), возбуждаемых в направлении X, от времени отжига  $t$ . Как видно из рис. 1, при увеличении времени отжига до 5 ч значения  $n_m^*$  возрастают, а при  $t > 5$  ч они начинают уменьшаться.

Согласно полученным в [5] результатам, можно сделать вывод, что время  $\tau$ , необходимое для полного проникновения пленки Fe в подложку при данной температуре, составляет около 5 ч. При времени диффузии  $t \geq \tau$  профиль ПП для TE-мод достаточно хорошо аппроксимируется функцией Гаусса. Наибольшее значение приращения ПП волновода на границе с воздухом получено для времени диффузии  $t=5$  ч ( $\Delta n_e \approx 0.015$ ). Распределение ПП в направлении, перпендикулярном плоскости волновода, представлено на рис. 2 (кривая 1). Коэффициент диффузии  $D$  железа в Y-срезу ниобата лития при  $T=1000$  °C, определенный для необыкновенных волн из известного соотношения  $d_s = 2\sqrt{Dt}$ , где  $d_s$  — параметр глубины волновода, имеет значение  $D \approx 3-5 \cdot 10^{-4}$  мкм<sup>2</sup>/с. Эта величина почти на порядок превышает коэффициент диффузии титана в  $\text{LiNbO}_3$  при этой температуре  $D \approx 5-9 \cdot 10^{-5}$  мкм<sup>2</sup>/с [3].

Исследовались также оптические волноводы, полученные диффузией железа в пластины  $\text{LiNbO}_3$  X- и Z-срезов. На рис. 2 показаны профили ПП полученных волноводов для волн необыкновенной поляризации (кривые 2, 3 соответственно) при времени диффузии  $t=5$  ч. В полученных волноводах на основе трех чистых срезов  $\text{LiNbO}_3$  возбуждались как необыкновенные, так и обыкновенные волны. Некоторые параметры волноводов занесены в таблицу.

Срез	$t$ , ч	Количество мод	$\Delta n_e, d_e$ ; мкм	$\Delta n_o, d_o$ ; мкм	$\frac{\Delta n_o}{\Delta n_e}$
Y	5	4TE	0.015 5	—	—
	8.5	5TE 7TM	0.01 7.5	0.01 12.3	1.0
X	5	4TE	0.0054	0.0042	0.8
		4TM	6.3	8.7	
Z	5	7TM	0.008	0.0086	1.1
		5TE	9.5	11.4	

Характерным для волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  является резкое различие спектров  $n_m^*$  TE- и TM-мод. Например, на рис. 3, а, б показаны спектры эффективных ПП обыкновенных и необыкновенных волн волновода на Z-срезе  $\text{LiNbO}_3$  ( $t=5$  ч). Численные расчеты методом ВКБ показали, что профиль ПП для обыкновенных волн достаточно точно описывается выражением

$$n(\xi) = n_0 + \Delta n_o \left( 1 - \frac{\xi^2}{a^2} + \frac{\xi^3}{b^3} \right), \quad (1)$$

где  $n_0$  — ПП подложки для обыкновенного луча;  $d_0$  и  $b$  — параметры, характеризующие глубину волноводного слоя;  $Vn_0$  — приращение ПП для обыкновенных волн.

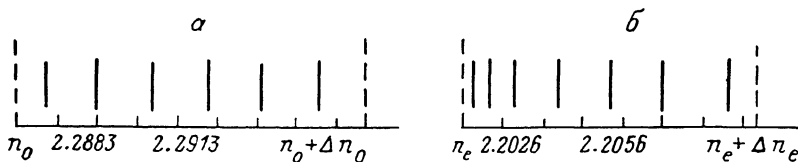


Рис. 3. Спектры эффективных ПП волновода на Z-срезе  $\text{LiNbO}_3$  для обыкновенных (а) и необыкновенных (б) волн.

Выяснено, что степень отличия профиля (1) от параболического зависит от условий диффузии. Например, для волновода на основе Z-среза  $\text{LiNbO}_3$  (см. таблицу) отношение параметров профиля (1) составило величину  $d_0/b \approx 0.6$ .

Важной особенностью волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  является отличие величины отношения приращений ПП  $\Delta n_o/\Delta n_e$  на поверхности волновода от таковой для волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$  ( $\Delta n_e$  — приращение ПП для необыкновенного луча). Как видно из таблицы, эта величина для всех ориентаций волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  составляет 0.8—1.1. Для волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$   $\Delta n_o/\Delta n_e$ , по данным авторов [5] и других работ, изменяется от 0.4 до 0.5. Этот факт указывает на возможное отличие механизмов формирования волноводного слоя при диффузии в ниобат лития железа и титана.

Исследовано затухание света в изготовленных волноводах на длинах волн  $\lambda=0.44$  и 0.63 мкм. При  $\lambda=0.44$  мкм для низших мод затухание составляло более 30 дБ·см<sup>-1</sup>, что обусловлено поглощением света в тонком приповерхностном слое с высокой концентрацией железа. Потери для высших мод составляли 10—20 дБ·см<sup>-1</sup> и были обусловлены в основном внутриплоскостным рассеянием света вследствие высокой чувствительности данных волноводов к фоторефрактивному эффекту [6]. При  $\lambda=0.63$  мкм затухание для низших мод уменьшалось до 3—5 дБ·см<sup>-1</sup>, а интенсивность внутриплоскостного рассеяния света была не больше, чем в волноводах  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$ . С ростом номера мод затухание снижалось, что объясняется соответствующим уменьшением средней концентрации железа в области локализации поля волноводных мод.

Таким образом, в результате исследований изучены характеристики диффузионных оптических волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ . Особенности таких волноводов могут быть использованы при проектировании и построении конкретных элементов и устройств интегральной оптики.

В заключение авторы выражают благодарность Е. А. Колосовскому за помощь в определении параметров профиля ПП волноводов.

### Список литературы

- [1] Голубков В. С., Емизиев Н. Н., Папуловский В. Ф. Интегральная оптика в информационной технике. М.: Энергоиздат, 1985. 152 с.
- [2] Войтенко И. Г. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. 1980. № 1. С. 80—82.
- [3] Зилинг К. К., Покровский Л. Д., Шашкин В. В. // Автметрия. 1978. № 1. С. 103—108.
- [4] Колосовский Е. А., Петров Д. В., Царев А. В. // Квантовая электрон. 1981. Т. 8. № 12. С. 2557—2568.
- [5] Tsonev L., Savatinova I., Simova P. // Appl. Phys. 1981. N 3. P. 205—209.
- [6] Шандаров В. М., Шандаров С. М. // Письма в ЖТФ. Т. 12. Вып. 1. С. 48—51.

Томский институт  
автоматизированных систем управления  
и радиотехники

Поступило в Редакцию  
6 июля 1987 г.

06; 07

Журнал технической физики, т. 59, в. 8, 1989

## ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА $\text{H} : \text{LiTaO}_3$ СВЕТОВОДОВ

В. А. Ганьшин, Ю. Н. Коркишко, Т. В. Морозова, В. З. Петрова

### Введение

Танталат лития (ТЛ) является базовым материалом интегральной оптики. В ряде случаев, в частности там, где используется излучение большой мощности и требуется высокая частотная стабильность, использование ТЛ более эффективно по сравнению с ниобатом лития (НЛ).

Существуют различные методы получения планарных световодов в кристаллах ТЛ, однако единственным методом получения качественных структур при температуре ниже точки Кюри является ионный обмен, и в частности протонолитиевый обмен (ПЛО) [1, 2]. В отличие от ПЛО в ниобате лития [3—5] этот процесс в ТЛ практически не исследован с физико-химической точки зрения. Кроме того, световоды были получены только на Z-срезе кристалла.

Целью данной работы является комплексное исследование процесса формирования  $\text{H} : \text{LiTaO}_3$  световодов на пластинах различных ориентаций.

Исследования искажений кристаллической структуры и фазообразования в легированной области проводились соответственно на двухкристальном дифрактометре ДРОН-0.5 и дифрактометре Д-2 «Rigaki Denki» аналогично описанному в [3, 4]. Показатели преломления и толщины структур определялись по данным волноводно-оптических измерений методом призмленного ввода (призма из GaP, длина волны  $\lambda = 0.633$  мкм). Толщины слоев оценивались также по интенсивности сигналов на кривых качания. Для исследований применялись ИК спектроскопия, оптическая и фазово-контрастная микроскопия.

Нами разработан ряд составов легирующих расплавов на основе неорганических соединений, в которых возможно проведение процессов легирования в открытых объемах на воздухе. Все известные и разработанные расплавы классифицированы с точки зрения интенсивности протекания процесса ПЛО на сильнокислотные и слабокислотные. Установлено, что механизм процесса существенно зависит от типа расплава и выбранного кристаллического среза. Рассмотрим подробно влияние этих факторов.

### Слабокислотное легирование

Рассмотрим этот процесс на примере легирования в расплаве стеариновой кислоты [6]. На поверхности пластин X-среза ТЛ при увеличении времени легирования последовательно формируются фазы  $\alpha_x$ ,  $\beta_x$ ,  $\gamma_x$  (рис. 1) состава  $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{TaO}_3$ , имеющие структуру типа ТЛ, но