

06; 09; 12

© 1991 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ДИФФУЗИЕЙ ТИТАНА И МЕДИ

В. Л. Попов, В. М. Шандаров

Приведены результаты исследования влияния дополнительной диффузии меди на параметры профиля показателя преломления и фоторефрактивных свойства оптических волноводов, полученных в ниобате лития диффузией титана. Экспериментально показано, что легирование медью приводит к уменьшению показателя преломления в волноводной области, компенсация волноводного эффекта, обусловленного обратной диффузией окиси лития, и повышению фоторефрактивной чувствительности волноводов.

### Введение

При создании различных элементов интегральной оптики наиболее широко применяются оптические волноводы, формируемые в ниобате лития высокотемпературной диффузией титана.

В настоящее время сложилось мнение, что введение других примесей в ниобат лития приводит либо к незначительному увеличению его показателя преломления, недостаточному для формирования тонкого волноводного слоя, либо к уменьшению показателя преломления, т. е. формированию антиволноводного слоя (здесь речь не идет об ионообменных волноводах, в которых большую или меньшую роль играет введение в ниобат лития протонов). Тем не менее в работах [1-3] использовалась диффузия Fe и Mg для формирования волноводов в  $\text{LiNbO}_3$  или коррекции некоторых их характеристик.

Следует отметить, что Fe и Mg входят в число элементов, влияющих на фоторефрактивные свойства  $\text{LiNbO}_3$ , что представляет интерес с точки зрения создания волноводных голографических элементов. К этому же числу относится Си, поэтому в работе поставлена цель исследования влияния диффузии Си на параметры и фоторефрактивные свойства оптических волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$ .

### Методика изготовления волноводов

Процесс изготовления волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti} : \text{Si}$  включал две стадии. В качестве подложек использовались пластины ниобата лития Y-среза. На первой стадии проводилась диффузия титана из пленок толщиной 20.0—40.0 нм, нанесенных на поверхность  $\text{LiNbO}_3$  термическим распылением в вакууме. Диффузия проводилась при температуре 1000 °С в атмосфере воздуха. На второй стадии процесса осуществлялось легирование волноводного слоя медью. Для этого также использовалась высокотемпературная диффузия. Пленки Си имели толщину 20.0—80.0 нм и наносились на поверхность волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$ , как и титан, термическим распылением в вакууме. Диффузия проводилась на воздухе при температуре 900—950 °С. Отжиг волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti} : \text{Si}$  повторялся многократно для выяснения динамики изменения структурных параметров профиля показателя преломления и фоторефрактивных свойств волноводов.

В экспериментах исследовалось влияние легирования волноводного слоя  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$  медью на структурные параметры профилией показателя преломления и фоторефрактивные свойства волноводов.

Для этого проводилось измерение углов ввода света в волновод с помощью призмных элементов из титаната стронция или ниобата лития на длинах волн гелий-неонового и аргонового лазеров. По величине углов ввода рассчитывались значения эффективных показателей преломления волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$  и  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti} : \text{Cu}$ .

Фоторефрактивные свойства волноводов оценивались по характеристикам записи волноводными модами голографических решеток до диффузии  $\text{Cu}$  и после диффузии при разных временах отжига. Запись решеток осуществлялась на длине волны  $\lambda = 0.63$  мкм по двухпучковой схеме, аналогичной использованной в [3]. Угол схождения лучей в волноводе составлял  $6^\circ$ , мощность каждого из пучков 1 мВт. По кривым кинетики записи голографических решеток анализировалось изменение фоторефрактивной чувствительности волноводов. Влияние легирования  $\text{Cu}$  на величину темновой проводимости кристалла, которая определяет время хранения голограмм в волноводной области, оценивалось по дифракционной эффективности при кратковременном считывании голограмм без их засветки во время интервалов между актами считывания.

### Результаты и обсуждение

При проведении диффузии  $\text{Ti}$  в  $\text{LiNbO}_3$  специальные меры по подавлению обратной диффузии не принимались, поэтому в формирование волноводного слоя давали вклад оба процесса: диффузия  $\text{Ti}$  в  $\text{LiNbO}_3$  и out-диффузия  $\text{Li}_2\text{O}$  из  $\text{LiNbO}_3$ . Это иллюстрируется значениями эффективных показателей преломления  $TE$ -мод одного из волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$  на длинах волн  $\lambda = 0.633, 0.477$  мкм (табл. 1). Резкое уменьшение величины  $\delta n_m^* = n_m^* - n_{m+1}^*$  для  $m = 2, 3$

Т а б л и ц а 1

| $\lambda$ , мкм | $n_m^*$ (эксперимент) | $n_m^*$ (расчет) | Параметры профилией III                              | $\Delta n$ |
|-----------------|-----------------------|------------------|--|------------|
| 0.6328          | 2.2176                | 2.2177           | $A=0.735$<br>$B=0.265$<br>$h=1.47$ мкм<br>$K_1=3.25$ | 0.0282     |
|                 | 2.2070                | 2.2071           |  |            |
|                 | 2.2043                | 2.2043           |  |            |
|                 | 2.2032                | 2.2031           |  |            |
|                 | 2.2024                | 2.2025           |  |            |
| 0.4765          | 2.2868                | 2.2868           |  | 0.0341     |
|                 | 2.2759                | 2.2756           |  |            |
|                 | 2.2687                | 2.2690           |  |            |
|                 | 2.2670                | 2.2668           |  |            |
|                 | 2.2657                | 2.2656           |  |            |
|                 | 2.2649                | 2.2649           |  |            |
|                 | 2.2643                | 2.2644           |  |            |

при  $\lambda = 0.63$  мкм и  $m = 2-5$  при  $\lambda = 0.477$  мкм по сравнению с ее значением для  $m = 0$ ; 1 указывает на наличие экспоненциального «хвоста» в функции, описывающей профиль показателя преломления (III) волновода. В работе [4] профиль III  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$  волноводов для  $TE$ -мод аппроксимировался двойной функцией Гаусса. Мы использовали для аппроксимации профиля III зависимость вида

$$n(y) = n_s + \Delta n \cdot \left[ A \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{h^2}\right) + B \cdot \exp\left(-\frac{y}{K_1 h}\right) \right], \quad (1)$$

где  $n_s$  — значение III подложки;  $\Delta n (A+B)$  — величина приращения показателя преломления на поверхности волновода;  $A, B$  — численные коэффици-

циенты, учитывающие относительный вклад диффузии Ti и обратной диффузии в формирование профиля ПП:  $h$ ,  $K_1 h$  — масштабные коэффициенты, характеризующие глубину диффузионного и out-диффузионного слоев.

Для восстановления структурных параметров профиля ПП использовалась методика, основанная на приближенном их определении путем численного решения дисперсионного уравнения градиентного волновода в ВКБ приближении. Найденные этим методом величины структурных параметров служили исходными значениями для более точного их определения путем численного

Таблица 2

| $\lambda$ , мкм | $\Delta n$ |
|-----------------|------------|
| 0.4765          | 0.0341     |
| 0.488           | 0.0336     |
| 0.4965          | 0.0332     |
| 0.5145          | 0.0322     |
| 0.6328          | 0.0282     |

Таблица 3

| $\lambda$ , мкм | $n_m^*$<br>(эксперимент) | $n_m^*$<br>(расчет) |
|-----------------|--------------------------|---------------------|
| 0.6328          | 2.2132                   | 2.2132              |
|                 | 2.2037                   | 2.2037              |
|                 | 2.2027                   | 2.2027              |
|                 | 2.2023                   | 2.2023              |
|                 | 2.2796                   | 2.2799              |
| 0.0488          | 2.2698                   | 2.2695              |
|                 | 2.2646                   | 2.2645              |
|                 | 2.2639                   | 2.2638              |
|                 |                          |                     |

решения волнового уравнения для TE-мод волновода с данным профилем методом Рунге—Кутты [5]. При проведении расчетов предполагалось, что параметры  $A$ ,  $B$ ,  $K_1$ ,  $h$  не зависят от длины волны света, так как связаны лишь с распределением концентрации титана и степенью обеднения поверхностного слоя окисью лития. Изменение спектров эффективных показателей преломления

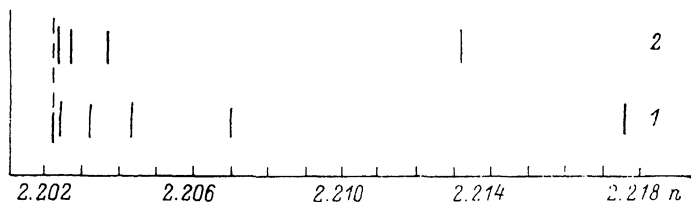


Рис. 1. Спектры эффективных показателей преломления мод волновода до диффузии меди (1) и после нее (2).

в зависимости от длины волны связывалось с дисперсией приращения показателя преломления в области волноводного слоя и изменением масштабного коэффициента  $h$  относительно длины волны. В табл. 1 представлены найденные по этой методике значения структурных параметров и расчетные величины  $n_m^*$  волновода с данным профилем и найденными параметрами. Такое же хорошее согласие между экспериментальными и расчетными значениями  $n_m^*$  получено и для длин волн света 0.488, 0.497, 0.514 мкм. Значения величины приращения ПП на поверхности данного волновода в зависимости от длины волны света, полученные при восстановлении профиля ПП, приведены в табл. 2.

Измерение спектров  $n_m^*$  волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$  после диффузии показало что количество поддерживаемых волноводом TE-мод в этом случае уменьшается. Так, на рис. 1 приведены для сравнения спектры  $n_m^*$  волновода  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$  и того же волновода после диффузии Si из пленки толщиной 20.0 нм в течение 0.5 ч при температуре 920 °С. Как показывают эксперименты, при таких условиях (малом времени отжига при данной температуре) распределение концентрации титана в волноводной области практически не изменяется и изменения спектра  $n_m^*$  могут быть объяснены только легированием этой области медью. Уменьшение числа волноводных мод указывает на то, что введение меди приводит к уменьшению показателя преломления  $\text{LiNbO}_3$  в волноводной области.

Для описания вклада диффузии Si в формирование профиля ПП использовались функция Гаусса и экспоненциальная функция. Первая, как изве-

стно, соответствует распределению примеси при диффузии из мгновенного источника, вторая может использоваться для аппроксимации дополнительной функции ошибок, описывающей распределение концентрации примеси при диффузии из слоя конечной толщины и малом времени диффузии [6]. Расчеты по методике, описанной выше, показали, что профиль ПП волновода с учетом диффузии Cu для времени диффузии 0.5 ч достаточно точно описывается выражением

$$n(y) = n_s + \Delta n \cdot \left[ A \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{h^2}\right) + B \cdot \exp\left(-\frac{y}{K_1 h}\right) + C \cdot \exp\left(-\frac{y}{K_2 h}\right) \right], \quad (2)$$

где  $C=0.2$ ,  $K_2=2.8$ , а значения  $A$ ,  $B$ ,  $K_1$ ,  $h$  приведены в табл. 1.

В табл. 3 представлены экспериментально измеренные и расчетные значения  $n_m^*$  данного волновода после диффузии Cu на двух длинах волн, иллюстрирующие соответствие модельного профиля ПП реальному.

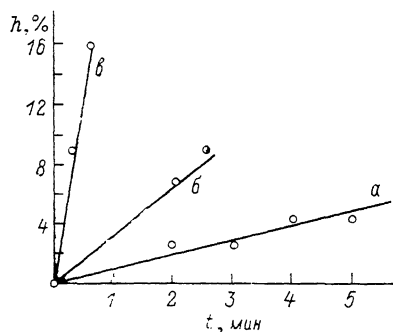


Рис. 2. Кинетика записи голографических решеток.

а — в волноводе  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$ , б — в волноводе с низкой концентрацией меди, в — в волноводе с высокой концентрацией меди.

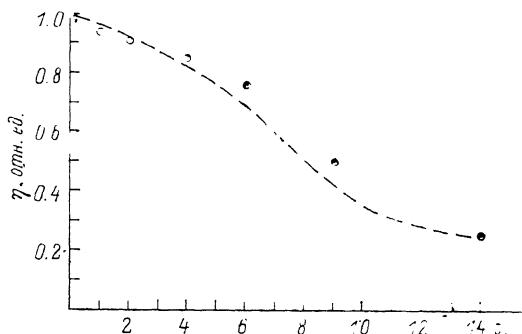


Рис. 3. Изменение дифракционной эффективности решетки при ее релаксации.

Таким образом, при диффузии меди уменьшение показателя преломления на поверхности составило 0.00564 на длине волны 0.63 мкм. Определенные параметры профиля ПП данного и двух других волноводов позволили оценить величину коэффициента диффузии меди в ниобате лития. Для температуры диффузии  $920^\circ\text{C}$   $D_{\text{Cu}} = 2.3 - 2.8 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>/с. Эта величина почти на порядок превышает коэффициент диффузии железа и почти на два порядка коэффициент диффузии титана при  $T = 1000^\circ\text{C}$  [7]. Сравнивая значения  $n_m^*$  для данного волновода до и после диффузии, можно сделать вывод о частичной компенсации экспоненциального «хвоста» исходного профиля ПП волновода за счет вклада диффузии меди. Дальнейший отжиг волновода в течение 2 ч показал практически полную их компенсацию (причем в этом случае вклад меди более точно описывался функцией Гаусса), а при последующем увеличении времени отжига наблюдались увеличение числа мод, поддерживаемых волноводом, и уменьшение величины межмодовых расстояний  $n_m^* - n_{m+1}^*$  для низших мод. Это объясняется существенным снижением влияния распределения концентрации меди на параметры волновода при больших временах отжига вследствие большой разницы в коэффициентах диффузии меди и титана. Указанные изменения в спектрах  $n_m^*$  обусловлены изменениями в распределении концентрации титана в волноводе, что подтверждено численными расчетами.

Результаты исследования фоторефрактивных свойств волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti} : \text{Cu}$  иллюстрируются рис. 2 и 3. На рис. 2 представлены временные зависимости дифракционной эффективности при записи голографических решеток в волноводах  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$  (а) и  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti} : \text{Cu}$  (б, в), указывающие на значительное увеличение фоторефрактивной чувствительности при легировании волноводной области медью. Зависимость на рис. 3 характеризует релаксацию голографической решетки в волноводе  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti} : \text{Cu}$  из-за конечности темновой проводимости кристалла в волноводной области. Следует отметить, что

по фоторефрактивным свойствам волноводы  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti} : \text{Cu}$  существенно отличаются от волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$  и  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ . Так, в волноводах  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  при большой концентрации Fe очень сильно возрастает темновая проводимость и время релаксации голограмм может составлять от единиц мин до нескольких с [3]. Волноводы  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti}$  при более низкой фоторефрактивной чувствительности имеют характерное время релаксации голограмм от десятков до сотен ч.

Таким образом, в данной работе изучены основные особенности диффузионных оптических волноводов  $\text{LiNbO}_3 : \text{Ti} : \text{Cu}$ . Результаты исследования показали возможность использования таких волноводов при создании голографических элементов волноводно-оптических процессоров.

### Список литературы

- [1] *Войтенко И. Г.* // ВЕСЦІ АН БССР. Сер. фіз.-мат. наук. 1980. № 1. С. 80—82.
- [2] *Komatsu K., Kondo Y., Ohta Y.* // Electron. Lett. 1986. Vol. 22. N 17. P. 881.
- [3] *Шандаров В. М., Шандаров С. М.* // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 1. С. 48—51.
- [4] *Yerominck H., Tremblay R.* // Opt. Appl. 1984. Vol. XIV. N 3. P. 365—373.
- [5] *Колосовский Е. А., Петров Д. В., Царев А. В.* // Квантовая электрон. 1979. Т. 6. № 9. С. 1896—1902.
- [6] *Schmidt R. V., Kaminov I. P.* // Appl. Phys. Lett. 1974. Vol. 25. N 8. P. 458—460.
- [7] *Башкиров А. И., Шандаров В. М.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 8. С. 66—69.

Томский институт  
автоматизированных систем управления  
и радиоэлектроники

Поступило в Редакцию  
10 октября 1990 г.