

Таким образом, нами предложена модель ассоциативной памяти с несимметричной матрицей для троичной системы счисления и оптическая схема для ее реализации на основе жидкокристаллического модулятора и бихроматического источника света.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кохонен Т. Ассоциативная память.— М.: Мир, 1980.
2. Hopfield J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // Proc. Natl. Acad. Sci. USA.— 1982. — 79.— P. 2554.
3. Farhat N., Psaltis D., Prata A., Pack E. Optical implementation of the Hopfield model // Appl. Opt.— 1986.— 24, N 10.— P. 1469.
4. Карцев М. А. Арифметика цифровых машин.— М.: Наука, 1969.
5. Воеводкин Г. Г., Дианов Е. М., Кузнецов А. А., Педфедов С. М. Символьная подстановка и элемент Фредкина на основе структуры МДП — ЖК // Автоматрия.— 1989.— № 3.
6. Сивуха В. И., Редько В. И. Модель ассоциативной памяти на мультистабильных элементах // Весті Академії наук БССР.— 1989.— № 1.
7. Gindi G. R., Gmitro A. F., Parthasarathy K. Hopfield model associative memory with nonzero-diagonal terms in memory matrix // Appl. Opt.— 1988.— 27.— P. 429.
8. Воеводкин Г. Г., Дианов Е. М., Кузнецов А. А. и др. Обратная связь в устройствах на основе оптически управляемого пространственного модулятора // Квантовая электрон.— 1988.— 15, № 4.

Поступило в редакцию 19 января 1990 г.

УДК 539.23 : 539.216 : 546.02

В. В. АТУЧИН, И. П. БОБКОВ, К. К. ЗИЛИНГ,  
А. Е. ПЛОТНИКОВ, В. П. СЕМЕНЕНКО, И. В. ТЕРПУГОВ  
(Новосибирск)

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ Cs:KTiOPO<sub>4</sub>

Кристалл KTiOPO<sub>4</sub> (КТР) представляет интерес для построения интегрально-оптических приборов благодаря своим высоким электрооптическим коэффициентам, низким диэлектрическим постоянным и отсутствию наведенных оптических неоднородностей [1]. В последние годы появились сообщения о том, что волноводные слои на основе КТР могут быть получены замещением части калия, содержащегося в кристалле, на рубидий, цезий или таллий с помощью ионного обмена в расплавах соответствующих нитратов [2, 3]. Однако имеющиеся в литературе сведения о свойствах таких волноводов носят крайне фрагментарный характер и фактически исчерпываются оценками достижимых приращений показателей преломления, составляющих величины от ~0,02 (Rb, Cs) до ~0,2 (Tl), и примерными значениями рабочих температур 320—450 °С, при которых процессе обмена идет достаточно активно.

Целью настоящей работы является определение физических величин, ответственных за оптические характеристики волноводов на основе Cs:КТР, в частности, установление количественной связи приращений показателей преломления с концентрацией легирующего элемента и оценка параметров диффузии. Монокристаллы КТР были выращены с помощью модифицированного метода Чохральского из раствора-расплава на основе K<sub>2</sub>O — P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — TiO<sub>2</sub> [4]. Эксперимент проводился на подложках Z-среза с показателями преломления:  $n_x = 1,7626$ ;  $n_y = 1,7716$ ;  $n_z = 1,8653$ . Ионный обмен осуществлялся в расплаве CsNO<sub>3</sub> при температуре  $430 \pm 5$  °С в течение времени  $t_0 = 1-4$  ч. Показатели преломления подложек и эффективные показатели волноводных мод измерялись в условиях призмного ввода. В качестве эталона использовались призма из SrTiO<sub>3</sub> с  $n = 2,3887 \pm \pm 0,0002$ . Все оптические измерения проводились на длине волны света  $\lambda = 0,6328$  мкм. Профили приращений показателей преломления  $\Delta n(x)$  восстанавливались с помощью обратного ВКБ-метода [5, 6]. Концентрация Cs и K в приповерхностном слое кристалла опре-

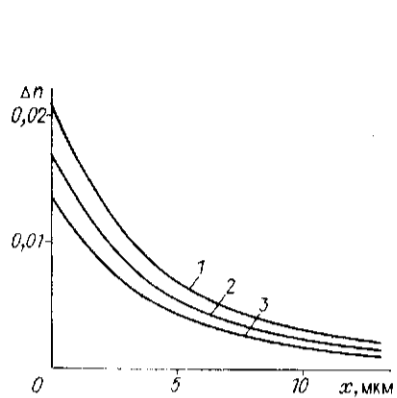


Рис. 1. Профили  $\Delta n(x)$  волновода, полученного при  $t_0 = 2$  ч:  
1 —  $\Delta n_x$ ; 2 —  $\Delta n_y$ ; 3 —  $\Delta n_z$

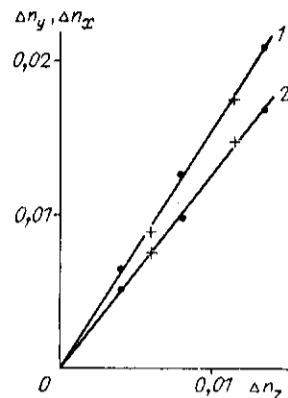


Рис. 2. Зависимости от  $\Delta n_z$ :  
1 —  $\Delta n_x$ ; 2 —  $\Delta n_y$  (· —  $\Delta n$  для волновода, полученного при  $t_0 = 2$  ч; + —  $\Delta n$  при  $t_0 = 4$  ч)

делалась методом рентгеноспектрального анализа, в качестве эталонов использовались кристаллы  $\text{CsNO}_3$  и  $\text{KTiOPO}_4$  соответственно.

На рис. 1 представлены профили  $\Delta n(x)$  волновода, полученного при  $t_0 = 2$  ч. Число мод составляло 8,7 и 6 для направлений электрического вектора световой волны вдоль осей X, Y и Z. Из приведенных кривых видно, что  $\Delta n_x > \Delta n_y > \Delta n_z$  в отличие от результата работы [3], в которой утверждается равенство  $\Delta n$  для всех трех показателей преломления при фиксированной концентрации Cs.

В [2] для системы Rb:KTP было отмечено существенное различие в параметрах волноводов, полученных на Z(+)- и Z(-)-плоскостях. Проверка показала, что в системе Cs:KTP данный эффект не наблюдается.

Как показано на рис. 2, приращения показателей преломления в волноводных слоях Cs:KTP связаны между собой линейной зависимостью, причем  $\Delta n_x : \Delta n_y : \Delta n_z = 1,55 : 1,25 : 1$ . Из пропорциональности  $\Delta n$  друг другу следует, что функции, связывающие  $\Delta n$  с содержанием цезия, имеют идентичный вид для всех трех показателей преломления и отличаются лишь постоянным множителем.

С целью определения конкретного вида функции, связывающей  $\Delta n$  с мольной долей цезия  $y$ , один из волноводов был подвергнут дополнительному отжигу при  $500^\circ\text{C}$  в течение  $t = 1$  ч. Соответствующие профили  $\Delta n_x(x)$  представлены на рис. 3. Проведенный анализ показал, что при существенном изменении распределения Cs по глубине площадь под профилем  $\Delta n$  сохраняется, и, следовательно, приращения показате-

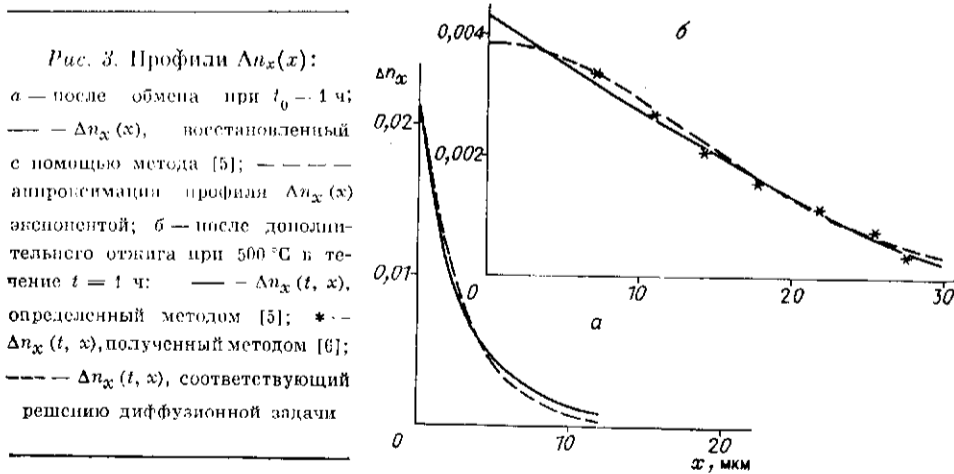


Рис. 3. Профили  $\Delta n_x(x)$ :  
a — после обмена при  $t_0 = 1$  ч; — —  $\Delta n_x(x)$ , восстановленный с помощью метода [5]; ····· аппроксимация профили  $\Delta n_x(x)$  экспонентой; б — после дополнительного отжига при  $500^\circ\text{C}$  в течение  $t = 1$  ч: — —  $\Delta n_x(t, x)$ , определенный методом [5]; \* —  $\Delta n_x(t, x)$ , полученный методом [6]; — — —  $\Delta n_x(t, x)$ , соответствующий решению диффузионной задачи

лей преломления в системе Cs:KTP пропорциональны содержанию цезия. Соответствующие выражения запишутся в виде  $\Delta n = Ay$ , где  $A$  — постоянный для данного показателя преломления коэффициент.

Коэффициенты  $A$  определялись из сопоставления  $\Delta n(0)$  и величины  $y$  на поверхности волновода. С целью снижения ошибки для измерений использовался образец, ранее подвергнутый дополнительному отжигу и имеющий минимальное изменение содержания Cs в поверхностном слое, анализируемом с помощью рентгеноспектрального анализа. Концентрация Cs составила 2,8 мол.%, причем введение цезия в KTP сопровождалось соответствующим снижением содержания калия. Вычисленные коэффициенты имели следующие значения:  $A_x = 0,16$ ;  $A_y = 0,13$ ;  $A_z = 0,10$ ; следует отметить, что ошибка их определения, составляющая величину  $\sim 10\%$ , в основном связана с разбросом в значениях  $\Delta n(0)$ , полученных с помощью различных вариантов ВКБ-метода [5, 6].

Как известно, изменение показателей преломления в сегнетоэлектриках может быть представлено в виде суммы трех вкладов: за счет непостоянства молекулярной рефракции  $R$ , члена, связанного с вариациями спонтанной поляризации при легировании, и вклада упругооптического эффекта [7]. Рефракционный вклад в коэффициент  $A$  для случая  $\Delta n \ll n$  можно записать в виде [8]

$$A^R = \frac{(n^2 + 2)^2 \Delta R}{6nV y},$$

где  $V$  — мольный объем KTP;  $n$  — среднее значение его показателей преломления;  $\Delta R$  — изменение рефракции при легировании.

С учетом результатов рентгеноспектрального анализа можно предположить, что химическая формула твердого раствора имеет вид  $\text{Cs}_y\text{K}_{1-y}\text{TiOPO}_4$ . Тогда, используя приведенные в [9] значения рефракций окислов  $R(\text{K}_2\text{O}) = 11,2 \text{ см}^3$  и  $R(\text{Cs}_2\text{O}) = 20,5 \text{ см}^3$ , получим  $A^R = 0,18$ . Вычисление двух других вкладов не представляется возможным ввиду отсутствия в литературе необходимых данных об изменении параметров решетки и спонтанной поляризации в системе Cs:KTP при различных уровнях легирования. Из сопоставления величины  $A^R$  и экспериментально определенных выше значений  $A$  видно, что, во-первых, приращение показателей преломления при легировании KTP цезием в основном происходит благодаря увеличению рефракции; во-вторых, сумма двух других вкладов отрицательна. Последнее, с учетом имеющей обычно место малости упругооптического члена, по-видимому, свидетельствует о возрастании спонтанной поляризации при введении Cs в KTP.

Для волноводных слоев типа Rb:KTP, полученных в условиях, близких к используемым в настоящей работе, показано в [2], что распределение Rb по глубине описывается комплементарной функцией ошибок, т. е. соответствует модели диффузии при постоянной концентрации диффузанта на поверхности. В нашем случае профили  $\Delta n(x)$  и, следовательно, профили распределения Cs по глубине описываются функцией, близкой к экспоненте, что может определяться либо непостоянством граничных условий, возможным, когда время нагрева до рабочей температуры ( $\sim 1$  ч) сравнимо с  $t_0$ , либо зависимостью коэффициента диффузии  $\mathcal{D}$  от концентрации Cs. Проверим правомерность последнего предположения.

Задача диффузии в полубесконечной среде при начальном распределении диффузанта в виде экспоненты и постоянном  $\mathcal{D}$  может быть решена аналитически [10]. Если в качестве начального условия взять распределение примеси  $c(0, x)$ , соответствующее аппроксимации профиля  $\Delta n_x(x)$  в волноводе, сформированном при  $t_0 = 1$  ч, в виде  $\Delta n(0, x) = \Delta n_x(0, 0) \exp(-0,33x)$ , то, как видно из рис. 3, распределение  $c(t, x)$ , соответствующее экспериментально определенному профилю  $\Delta n_x(t, x)$  в том же образце после дополнительного отжига при

500 °С в течение  $t = 1$  ч, может быть получено при  $\mathcal{D} = 0,24 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с, что свидетельствует о независимости  $\mathcal{D}$  от уровня легирования при достигнутых концентрациях Cs.

центрациях  $\sim 3$  мол. % является постоянной величиной и при  $500$  °С равен  $0,24 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bierlein J. D., Arweiler C. B. Electro-optic and dielectric properties of KTiOPO<sub>4</sub> // Appl. Phys. Lett.— 1986.— 49, N 15.— P. 917.
2. Bierlein J. D., Ferretti A., Brixner I. H., Hsu W. Y. Fabrication and characterization of optical waveguides in KTiOPO<sub>4</sub> // Appl. Phys. Lett.— 1987.— 50, N 18.— P. 1216.
3. Bierlein J. D., Vanherzele H. Potassium titanyl phosphate: properties and new applications // JOSA. B.— 1989.— 6, N 4.— P. 622.
4. Александровский А. Л., Ахманов С. А., Дьяков В. А. и др. Эффективные нелинейно-оптические преобразователи на кристаллах калий титанил-фосфата // Квантовая электрон.— 1985.— 12, № 7.
5. Пацькин В. Г., Пчелкин В. Ю., Шапкин В. В. О применении ВКБ-метода для определения профиля показателя преломления в плоских диффузионных волноводах // Квантовая электрон.— 1977.— 4, № 7.
6. Колосовский Е. А., Петров Д. В., Царев А. В. Численный метод восстановления профиля показателя преломления диффузных волноводов // Квантовая электрон.— 1981.— 8, № 12.
7. Atuchin V. V., Ziling C. C., Shipilova D. P., Beizel N. F. Crystallographic, ferroelectric and optical properties of TiO<sub>2</sub>-doped LiNbO<sub>3</sub> crystals // Ferroelectrics.— 1989.— 100.— P. 261.
8. Зилинг К. К., Надолинный В. А., Шапкин В. В. Диффузия титана в LiNbO<sub>3</sub> и ее влияние на оптические свойства // Неорг. материалы.— 1980.— 16, № 4.
9. Бацапов С. С. Структурная рефрактометрия.— М.: Высш. шк., 1976.
10. Карелю Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел.— М.: Наука, 1964.

Поступила в редакцию 19 февраля 1990 г.