

А. И. Войтенков, В. П. Редько

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОДНОМОДОВЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ВОЛНОВОДОВ

*Предложена модель профиля показателя преломления волноводных слоев, изготовленных диффузией металлического серебра в оптические стекла. Определены параметры волноводов и рассчитаны количественные характеристики процесса диффузии серебра в стекла К-8, БК-4, ЛФ-11.*

При изготовлении и исследовании диффузионных оптических волноводов стоит задача определения их параметров, эффективной толщины волновода и показателя преломления на его поверхности. Метод ВКБ, успешно применяемый для расчета параметров неоднородных многомодовых волноводов [1], для одномодовых волноводов не пригоден.

В работах [2, 3] параметры неоднородных одномодовых волноводов определялись по измеренным значениям волноводного показателя преломления на двух или более длинах волн. Расчеты проводились для предварительно заданного профиля показателя преломления волноводного слоя  $n(x)$ . Так, в [2] профиль  $n(x)$  волновода, изготовленного ионным обменом в расплаве  $\text{AgNO}_3$ , аппроксимировался прямоугольным профилем, а в [3] — комбинацией параболы и экспоненты.

В настоящей работе исследуются одномодовые волноводные слои, изготовленные диффузией серебра в стекла [4]. Распределение концентрации диффузанта в слое и его профиль показателя преломления описывают в данном случае функцией Гаусса [5]. Однако эта функция не допускает аналитического решения волнового уравнения [6] и поэтому заменялась практически эквивалентной ей функцией

$$n(x) = \begin{cases} \sqrt{n_0^2 - (n_0^2 - n_1^2) \operatorname{th}^2\left(\frac{x}{d}\right)}, & x \geq 0 \\ 1, & x < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $n_0$  — показатель преломления на поверхности волновода;  $n_1$  — показатель преломления подложки;  $d$  — толщина волновода.

Дисперсионное уравнение для ТЕ-волн, распространяющихся в волноводном слое (1) использовалось нами в следующем виде \*):

$$-\alpha = \frac{2}{\pi} \arctg \left[ \frac{k \sqrt{n^{*2} - 1}}{L (n_0^2 - n_1^2) - \sqrt{n^{*2} - n_1^2}} \right] + 2m, \quad (2)$$

\* Уравнение получено А. М. Гончаренко, В. А. Карпенко, В. Н. Могилевичем.

где

$$\alpha = L \sqrt{n^{*2} - n_1^2} + \frac{1}{2} - \sqrt{L^2 (n_0^2 - n_1^2) + \frac{1}{4}};$$

$$k = \left(1 - \frac{1}{2\alpha} - \frac{1}{2\alpha(2-\alpha)^2}\right)^{-1/2};$$

$L = 2\pi d/\lambda$ ;  $m = 0, 1, 2, \dots$  — номер моды;  $n^*$  — волноводный показатель преломления;  $\lambda$  — длина волны света.

Параметры исследуемых волноводов можно определить достаточно просто и надежно, измерив  $n^*$  на двух длинах волн и решив систему соответствующих дисперсионных уравнений при условии, что диффузانت не изменяет в зоне внедрения дисперсию материала подложки.

Экспериментальные исследования проводились на одномодовых волноводах, изготовленных в оптических стеклах БК-4, К-8, ЛФ-11 диффузией серебра из пленки металла толщиной 80 нм [4]. Диффузия осуществлялась при температуре отжига стеклов (560°C для БК-4, К-8 и 510°C для ЛФ-11). Измерения волноводного показателя преломления проводились на длинах волн 0,422 и 0,633 мкм с точностью  $1 \cdot 10^{-4}$ . Зависимость величины  $\Delta n^* = n^* - n_1$  от времени диффузии  $t$  приведена на рис. 1. Рассчитанные с помощью системы (2) величины  $d$  и  $\Delta n_0 = n_0 - n_1$  в зависимости от  $t$  представлены на рис. 2. Такие же значения параметров  $d$  и  $\Delta n_0$  получались при контрольных измерениях на длине волны 0,515 мкм.

Как и следовало ожидать, толщина волноводного слоя линейно зависит от  $\sqrt{t}$  и в пределах, определяемых точностью эксперимента, экстраполируется в начало координат. Подобные зависимости были рассчитаны и для неприемлемых в данном случае линейного и прямоугольного профилей показателя преломления. Оказалось, что зависимость  $d = f(\sqrt{t})$  и в этих случаях остается линейной, но не экстраполируется в начало координат. Этот факт можно считать одним из критериев правильности выбора модели профиля  $n(x)$  для расчета параметров исследуемых волноводных слоев.

По результатам эксперимента вычислены коэффициент диффузии и энергия активации диффузии серебра в указанные стекла, а также инкремент показателя преломления.

Коэффициент диффузии определялся по формуле  $D = d^2/4t$ . Найдено, что в стекле БК-4 он равен  $7,3 \cdot 10^{-12}$ , в К-8 —  $1,9 \cdot 10^{-12}$  и в ЛФ-11 —  $0,9 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>/с. Приводимые в литературе [7—9] значения коэффициента диффузии Ag в многощелочные силикатные стекла на порядок выше по сравнению с полученными. Это связано с наличием в исследуемых стеклах значительных количеств окислов бора и бария, существенно понижающих коэффициент диффузии серебра [7, 8]. Следует также учесть, что рассчитанная толщина волноводного слоя не совпадает с геометрической глубиной диффузии серебра.

Энергия активации процесса диффузии серебра в стекле К-8, БК-4 и ЛФ-11 находилась из температурной зависимости коэффициента диффузии серебра в интервале температур от 455 до 560°C (в стекле ЛФ-11 до 510°C). Для стекла К-8 она составляет 31, для БК-4 — 23,6, для ЛФ-11 — 17,6 ккал/моль. Предэкспоненциальный

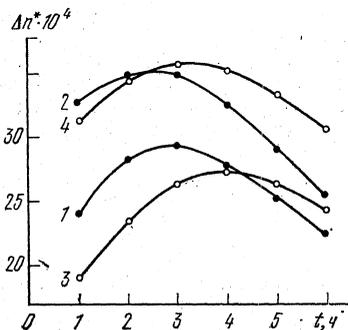


Рис. 1. Зависимость  $\Delta n^*$  от времени диффузии:

1, 3 —  $\lambda = 0,6328$ ; 2, 4 —  $\lambda = 0,4416$  мкм; кривые 1, 2 — подложка из стекла БК-4 ( $n_1 = 1,5285$  и  $1,5405$ ); кривые 3, 4 — подложка из стекла К-8 ( $n_1 = 1,5147$  и  $1,5257$ )

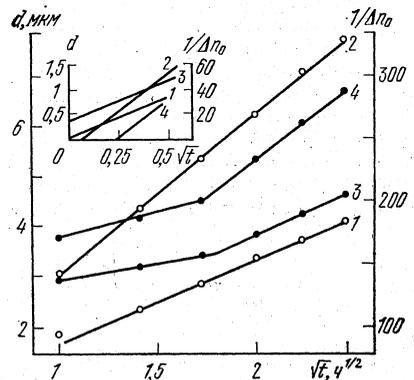


Рис. 2. Зависимость толщины волновода  $d$  (1, 2) и величины  $\Delta n_0$  (3, 4) от времени диффузии:

1, 3 — подложка из стекла К-8; 2, 4 — подложка из стекла БК-4. На вставке — экстраполяция зависимостей 1—4 в начало координат

множитель в формуле температурной зависимости коэффициента диффузии  $D = D_0 \times \exp(-E/RT)$  равен для исследованных стекол соответственно  $3 \cdot 10^{-4}$ ,  $8 \cdot 10^{-6}$ ,  $8 \cdot 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/с, что близко к данным [7, 8]. Из характера этой зависимости следует, что энергия активации слабо зависит от вида функции  $n(x)$  и вовсе не зависит от того, какой из характерных параметров диффузионного слоя выбран в качестве его толщины.

Известно, что в случае диффузии из ограниченного источника изменение концентрации диффузанта на поверхности подложки при  $t > h^2/D$  описывается выражением  $C(t) = C_0 h / \sqrt{\pi D t}$  [5], где  $h$  — толщина слоя диффузанта;  $C_0$  — начальная концентрация атомов в нем. Излом функции  $1/\Delta n_0 = \varphi(\sqrt{t})$  на графике, приведенном на рис. 2, можно связать с двумя стадиями процесса диффузии. На первой стадии происходит полная диффузия металла из пленки в подложку. На второй стадии ( $t > 3$  ч) процесс диффузии идет только внутри подложки. Часть графика, соответствующая этой стадии, экстраполируется в начало координат, и по ней может быть вычислен инкремент показателя преломления как отношение  $\Delta n_0(t)/C(t)$ . Для стекла БК-4 он оказался равным 0,031, для К-8 — 0,021, для ЛФ-11 — 0,015 (вес.%)<sup>-1</sup>. Плотность серебра в пленке принималось равной 10 г/см<sup>3</sup>.

В заключение отметим, что определенные в настоящей работе величины  $n_0$  и  $d$  совпадают с результатами, приведенными в работе [10] для гауссова профиля показателя преломления многомодового волновода. Таким образом, выбранная нами функция  $n(x)$  может с успехом моделировать реальные волноводные слои, получаемые диффузией из ограниченного источника.

1. P. K. Tien, S. Riva-Sanseverino, R. J. Martin, A. A. Ballman, H. Bromp. *Appl. Phys. Letts*, **24**, 503 (1974).
2. P. S. Chung. *Optica Acta*, **23**, 651 (1976).
3. Е. А. Золотов, В. А. Киселев, А. М. Прохоров, Е. А. Щербаков. *Квантовая электроника*, **3**, 1672 (1976).
4. Н. И. Алешкевич, А. И. Войтенков, В. П. Редько. *Квантовая электроника*, **4**, 2254 (1977).
5. Р. Бэррер. *Диффузия в твердых телах*. — М.: ИЛ, 1948.
6. А. М. Гончаренко, В. А. Карпенко, В. Н. Могилевич. *Изв. АН БССР, Сер. физ.-мат.*, № 3, 90 (1979).
7. J. L. Barton, M. Morain. *J. Non-Cryst. Solid.*, **3**, 115 (1970).
8. В. Р. Малинин, К. К. Евстропьев, В. А. Цехомский. *ЖЛХ*, **45**, 184 (1972).
9. I. Matousek. *Silikaty*, **12**, 89 (1967).
10. G. V. Hocker. *IEEE J.*, **QE-12**, 232 (1976).

Могилевский филиал  
института физики АН БССР

Поступило в редакцию  
21 февраля 1980 г.

#### A. I. Voitenkov, V. P. Red'ko. Determination of Parameters of Single-Mode Diffusion Waveguides.

A model is suggested of a refractive index profile for waveguide levels fabricated by metallic silver diffusion into optical glasses. Waveguide parameters are determined and quantitative characteristics are calculated of the process of silver diffusion into К8, БК4, ЛФ11 glasses.