

УДК 621.372.8.029.7

А. В. Казакевич, Д. Г. Санников

(Ульяновск)

ТЕРМОДИФфуЗИОННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛЯННЫХ ВОЛНОВОДОВ

Проведено измерение параметров диффузионного процесса, имеющего место при термоотжиге градиентного Ag^+ -волновода в стекле. Выявлена динамика изменения профиля показателя преломления и получена пространственно-временная зависимость относительной концентрации катионов серебра в волноводной области. Обнаружено, что процесс формирования волноводной структуры носит нерегулярный характер и может быть разделен на три этапа. Определены коэффициенты диффузии для реального и теоретически предполагаемого процессов и проведен их сравнительный анализ.

Развитие оптоэлектроники, создание элементной базы интегральной оптики для передачи и обработки оптических сигналов требуют исследования методов формирования пассивных волноводных структур. Одним из широко используемых методов является метод ионного обмена в стекле из расплавов, содержащих соли $AgNO_3$, KNO_3 и $NaNO_3$ в различных соотношениях [1]. Для изготовления ионно-обменных волноводов с заданным распределением показателя преломления (ПП) необходимо эффективное управление параметрами диффузионного процесса как на этапе формирования волноводных структур из расплавов, так и при последующем отжиге. Это особенно актуально в связи с тем, что высокая скорость ионно-обменного процесса приводит к низкой температурной стабильности диффузионных параметров [2]. Цель настоящей работы – измерение параметров процесса диффузии, имеющей место при термоотжиге градиентного Ag^+ -волновода в стекле, и изучение динамики изменения его характеристик.

Исследуемая диффузионная волноводная структура формировалась в стекле типа К8, легированном преимущественно натрием. Подложка помещалась в керамический тигель с расплавом $AgNO_3$ при температуре 673 К на 21 мин. Спектр эффективных ПП волноводных мод полученного волновода измерялся на длине волны 0,6328 мкм с помощью стандартной методики [3] непосредственно после его изготовления. Затем при температуре 573 К проводилась серия отжигов продолжительностью ~ 45 мин каждый. После каждого термоотжига измерение эффективных ПП повторялось. В результате была выявлена динамика изменения профиля ПП, зависящего от времени t и координаты x (глубины диффузии или глубины волновода). Относительная концентрация ионов серебра $C(x, t)$ и изменение ПП $\Delta N = N(x, t) - N_s$, вызванное ионно-обменными процессами, связаны линейно до $\Delta N = 0,075$

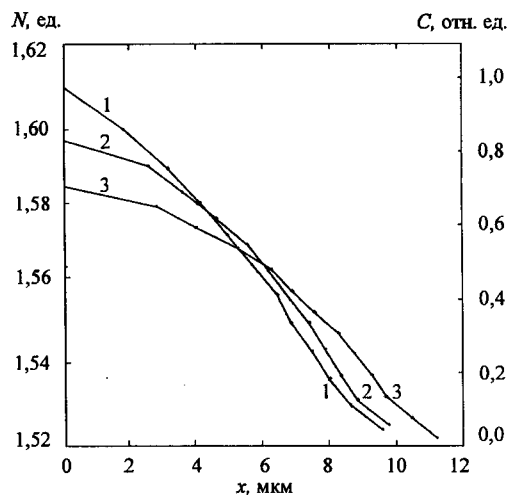


Рис. 1. Профили показателя преломления волновода $N(x, t)$ и относительная концентрация $C(x, t)$ ионов серебра для последовательной серии отжигов $t = 43, 86, 175$ мин (кривые 1–3 соответственно)

[4]. Для исследуемой структуры наибольшее значение ΔN не превышает 0,097, поэтому для большинства точек профиля ПП можно считать, что изменение ПП пропорционально относительной концентрации ионов Ag^+ , т. е. $C(x, t) \sim \Delta N / (N_c - N_s)$, где N_c – ПП на поверхности волновода.

На рис. 1 представлено распределение профиля ПП и относительной концентрации ионов серебра по глубине волновода. Как видно из рисунка, при отжиге ионы серебра с приповерхностной области перемещались в глубь образца. При этом изменялись как значения ПП или $C(x, t)$ вдоль волноводного профиля, так и толщина волновода. Динамика изменения относительной концентрации Ag^+ в процессе отжига для различных глубин профиля ПП x (сплошные кривые) и условной толщины волновода L (пунктирная кривая) представлена на рис. 2. Величина L определялась глубиной профиля ПП, при

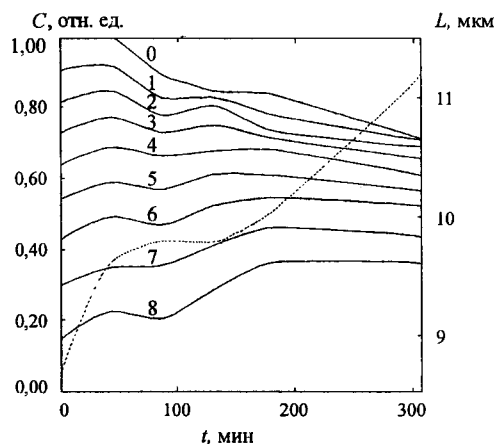


Рис. 2. Динамика изменения относительной концентрации ионов серебра для глубины волновода $x = 0 \div 8$ мкм (кривые 0–8 соответственно) и толщина волновода L (10^{-6} м) (пунктирная кривая) при последовательной серии отжигов

которой значение ПП равнялось эффективному ПП волноводной моды с наибольшим индексом. Этот процесс можно разделить на три этапа. На первом этапе в течение первых двух отжигов начальный рост толщины волновода L обусловлен оттоком ионов серебра из приповерхностных областей с высокой концентрацией Ag^+ . Второй этап характеризуется дальнейшим, в течение третьего отжига, уменьшением концентрации Ag^+ в верхних слоях волновода, которое вызывает достаточно резкое увеличение ПП нижележащих областей. При этом отток ионов в подложку практически отсутствует (плато кривой $L(t)$). На протяжении четвертого отжига наблюдается anomальное изменение $C(t)$: уменьшение ПП нижних волноводных слоев и незначительное его увеличение в верхней части профиля ПП. На этом отрезке времени проникновение ионов серебра в подложку реализуется за счет оттока последних из прилегающей к подложке области градиентной волноводной структуры. На последнем этапе ($t > 175$ мин) увеличение ПП нижележащих слоев и толщины волновода происходит за счет снижения концентрации ионов серебра в верхних слоях волновода. Представленные зависимости демонстрируют нерегулярность процесса формирования волноводных структур, которая отмечена в [4] для маломодовых стеклянных волноводов. Следует также отметить, что изменения концентрации Ag^+ на различных участках профиля ПП оказывались неодинаковыми. Наибольшие изменения относительной концентрации ($\Delta C(x, t) \sim 38\text{--}50\%$) имели место в пограничных областях волноводной структуры (см. кривые для $x = 0$ и 8 мкм на рис. 2). В средней части профиля ПП в процессе отжига изменение $C(x, t)$ было незначительным, и на глубине x порядка $4\text{--}5$ мкм оно составляло $1\text{--}5\%$.

Полученные экспериментально значения профиля ПП при различных временах отжига (см. рис. 1), а фактически пространственная и временная зависимости относительной концентрации ионов серебра $C(x, t)$ позволяют решить обратную задачу диффузии. Уравнение одномерной диффузии имеет вид [5]:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x, t) \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right). \quad (1)$$

Коэффициент диффузии $D(x, t)$ в общем случае зависит от концентрации, благодаря чему и сам является функцией времени и координаты. Для его нахождения использовано представление $D(x, t) = a(C(x, t))^b$, где a и b – подгоночные параметры. Зависимости коэффициента диффузии $D(x, t)$, соответствующие оптимальным значениям параметров $a = 0,17$ и $b = 1,9$, представлены на рис. 3 сплошными кривыми. Максимальное значение коэффициента диффузии $0,164 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{мин}$. Из рисунка видно, что при малых временах отжига ($t < 175$ мин) зависимость $D(x, t)$ близка к экспоненциальной. С увеличением времени отжига ($t > 175$ мин) коэффициент диффузии становится практически линейной функцией координаты x . При этом максимальные изменения коэффициента диффузии в процессе отжига наблюдаются в пограничных областях волноводного профиля: уменьшение $D(x, t)$ на поверхности и небольшой рост коэффициента диффузии в волноводных слоях, лежащих вблизи подложки.

Поскольку в основе формирования волноводов на стеклянных подложках лежит обмен ионов $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$, можно предположить, что в этом случае

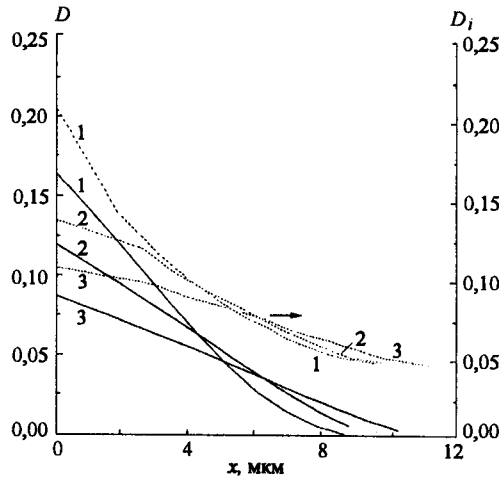


Рис. 3. Коэффициенты взаимной диффузии (пунктирные линии), диффузии реального процесса ($10^{-12} \text{ м}^2/\text{мин}$) (сплошные кривые) для времен отжига $t = 43, 129, 307 \text{ мин}$ (кривые 1–3 соответственно) в зависимости от глубины волноводной области

имеет место взаимная диффузия [6], коэффициент которой определяется следующим образом [7]:

$$D_i(x, t) = \frac{D_A}{1 - \alpha C(x, t)}. \quad (2)$$

Здесь $\alpha = 1 - D_A/D_B$, где D_A, D_B – коэффициенты диффузии внедряемого и замещаемого ионов соответственно.

Рассчитанные значения $D_i(x, t)$ представлены на рис. 3 пунктирными кривыми. Для расчетов $D_i(x, t)$ в соответствии с [7] взяты следующие значения коэффициентов диффузии внедряемых и замещаемых ионов: $D_{\text{Ag}} = 4,704 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{мин}$ и $D_{\text{Na}} = 2,190 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{мин}$, а также экспериментальные значения $C(x, t)$. Как видно из рис. 3, динамики изменения по координате x и со временем отжига t коэффициента $D(x, t)$, характеризующего реальный процесс диффузии, и коэффициента $D_i(x, t)$ сходны. Коэффициент диффузии реализованного на практике процесса имеет значения, на 14–89 % меньшие по сравнению с $D_i(x, t)$, причем расхождение увеличивается по мере увеличения x (с глубиной волновода). Указанное расхождение связано, в первую очередь, с использованием в расчетах значений D_{Ag} и D_{Na} , которые могут отличаться от имеющихся в исследуемых структурах коэффициентов диффузии Ag и Na, поскольку последние определяются и химическим составом, и технологией изготовления подложки и волновода. Кроме того, за распределение ионов серебра в подложке ответственны иные факторы, сдерживающие подвижность внедряемых ионов. Одним из таких факторов может быть влияние процесса миграции замещенных ионов Na^+ внутрь образца [4].

Таким образом, проведенный анализ динамики термодиффузии при отжиге Ag^+ -волновода показал, что формирование многомодовых волноводных структур в стекле носит нерегулярный и поэтапный характер. Реализованный процесс диффузии протекает медленнее, чем предполагает теория. Вероятнее всего, это связано с меньшими подвижностями ионов серебра и натрия, которые уменьшаются с глубиной волновода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов Е. Т., Липовский А. А., Павленко А. В., Сотникова Г. Ю. Исследование оптических волноводов, сформированных диффузией из расплавов смесей нитратов // ЖТФ. 1981. 51, № 12. С. 874.
2. Кузьминов Ю. С., Лындин Н. М., Прохоров А. М. и др. Диффузионные волноводы в стеклах и электрооптических кристаллах // Квантовая электрон. 1975. 2, № 10. С. 2309.
3. White M., Heidrich P. F. Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis // Appl. Opt. 1976. 15, N 1. P. 151.
4. Лындин Н. М., Нурлигареев Д. Х., Сычугов В. А., Тищенко А. В. Параметры одно-модовых ионно-обменных Ag^+ -волноводов в стекле // Квантовая электрон. 1992. 19, № 4. С. 365.
5. Павлов П. В., Хохлов А. Ф. Физика твердого тела. Н.-Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та, 1993. С. 249.
6. Чеботин В. Н. Химическая диффузия в твердых телах. М.: Наука, 1989. С. 151.
7. Kapila D., Plawsky J. L. Integrated optical waveguides: refractive index profile control by temperature and electric-field programming // Appl. Opt. 1995. 34, N 34. P. 8011.

Ульяновский государственный университет,
E-mail: sements@sv.unev.ru

Поступило в редакцию
30 марта 1999 г.