

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ

В. И. Аникин, А. П. Горобец и А. Н. Половинкин

Предложен способ определения функции распределения показателя преломления $n(x)$ в плоских диффузионных волноводах. Приведены теоретические и экспериментальные результаты исследования $n(x)$ и ее параметров в волноводах, изготовленных методом твердотельной диффузии пленки РbO в подложку из стекла, для различных режимов изготовления.

Интенсивное развитие технологических методов изготовления оптических волнопроводов как базовых элементов интегральной оптики привело к созданию целого класса так называемых диффузионных волнопроводов [1-6]. Одним из методов изготовления подобных волнопроводов является метод твердотельной диффузии [1-3]. Формирование волноводного слоя в этом случае происходит за счет диффузии примеси из пленки, предварительно нанесенной на поверхность подложки. Сравнительная простота технологии изготовления, возможность точного контроля количества диффузанта, малые оптические потери (< 1 дБ/см), широкий выбор материалов, а также возможность использования известных методов фотолитографии для создания оптических интегральных схем и устройств — все это свидетельствует о перспективности указанных волнопроводов и необходимости их детального исследования.

В настоящей работе сообщаются результаты расчета параметров диффузионных волнопроводов, изготовленных методом твердотельной диффузии пленки РbO в подложку из стекла, которые были экспериментально исследованы в работе [6].

Особенностью диффузионных волнопроводов является неоднородное распределение показателя преломления в поперечном сечении несущего слоя $n(x)$. Для расчета и построения конкретных устройств на основе подобных волнопроводов необходимо прежде всего точно знать вид функции $n(x)$ (она определяет дисперсионные свойства волновода), а также ее основные параметры.

Как известно, присутствие примеси влияет на поляризуемость вещества, причем при малых концентрациях примеси (что, как правило, и реализуется в эксперименте) изменение показателя преломления пропорционально ее величине. Таким образом, можно говорить об однозначном соответствии распределения концентрации примеси $C(x)$ и функции $n(x)$. Строгое решение уравнения Фика для случая диффузии из пленки имеет вид [7]

$$C(x,t) = \frac{Q}{2h_0} \{ \operatorname{erf} [(x - h_0)/2\sqrt{Dt}] + \operatorname{erf} [(x + h_0)/2\sqrt{Dt}] \}, \quad (1)$$

где Q — нормирующий множитель, равный общему количеству диффузанта; h_0 — начальная толщина пленки; D и t — коэффициент и время диффузии.

При малых значениях h_0 возможна аппроксимация функции (1) следующим выражением:

$$C_{(x,t)} = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp(-x^2/4Dt). \quad (2)$$

Однако на практике не всегда можно учесть все факторы, влияющие на $n_{(x)}$. Поэтому встает вопрос о сопоставлении реально получаемых $n_{(x)}$ с теоретическими.

Для устройств интегральной оптики практический интерес, как правило, представляют волноводы с минимальным количеством мод. Нами исследовались волноводы, в которых распространялось не более 2 мод одной поляризации. Такая постановка задачи не позволяет использовать известный метод определения $n_{(x)}$ путем сопоставления экспериментально полученных спектров фазовых замедлений волноводных мод γ_m с теоретическими [рассчитанными для предполагаемой $n_{(x)}$], который используется для многомодовых волноводов [4, 5].

Нами предлагается в подобных случаях использовать следующий метод. Характеристические параметры функции $n_{(x)}$ в волноводе в процессе диффузии изменяются. Соответственно видоизменяется во времени и спектр γ_m . Это изменение однозначно определяется видом функции $n_{(x)}$. Таким образом, определив экспериментально зависимость $\gamma_{m(t)}$ от времени диффузии, можно идентифицировать функцию $n_{(x)}$ (сравнивая экспериментальную зависимость с теоретической) даже в случае одномодового волновода.

При теоретическом расчете спектра фазовых замедлений использовалось дисперсионное уравнение для H -волн, полученное при решении волнового уравнения в приближении ВКБ [5],

$$k_0 \int_0^{x_1} \sqrt{n_{(x)}^2 - \gamma^2} dx = \text{arctg} \sqrt{\frac{\gamma^2 - n_0^2}{n_0^2 - \gamma^2}} + \frac{\pi}{4} + m\pi, \quad (3)$$

где n_1 — показатель преломления подложки, $m=0, 1, 2, 3, \dots$ — номер моды, x_1 — точка поворота, определяемая из соотношения $n_{(x)} = \gamma$. Для волноводов, изготовленных диффузией пленки РbO в подложку из стекла с $n_1=1.51$, в работе [6] приведены экспериментально полученные зависимости $\gamma_{(x)}$ от времени диффузии. Нами были теоретически рассчитаны подобные зависимости для ряда функций. Результаты вычислений приведены на рис. 1. Там же для сравнения изображены и экспериментальные результаты для одного из волноводов. Как видно из рис. 1, хорошо согласуются с экспериментом только кривые $\gamma_{(t)}$, рассчитанные для функций (1) и (2). Причем, как показали расчеты, для $h_0 < 1000 \text{ \AA}$, которые использовались в эксперименте, и $t > 1$ ч расхождение в определении величины γ для волноводов с $n_{(t)}$, описываемой этими функциями, не более 10^{-5} . Исходя из этого, можно утверждать, что реальная функция $n_{(x)}$ для исследованных волноводов описывается выражением (1) и, кроме того, для величин h_0 и t , указанных выше, справедлива аппроксимация (2).

Для определения характеристических параметров функции $n_{(x)}$ максимального изменения показателя преломления $\Delta n = n_{(0)} - n_1$ и эффективной глубины волновода $l_{\text{эфф.}} = 2\sqrt{Dt}$ нами использован следующий метод. При известной $n_{(x)}$ и наличии в изготовленном волноводе по крайней мере двух мод одной поляризации можно получить систему нелинейных уравнений относительно неизвестных параметров Δn и $l_{\text{(эфф.)}}$, подставив экспериментально измеренные значения γ_1 и γ_2 в уравнение (3). Математические методы решения подобных систем на ЭВМ в настоящее время хорошо разработаны [8]. В результате вычислений находим значения искомых величин с точностью, определяемой в принципе точностью измерения γ ($\sim 10^{-4}$).

Для исследованных волноводов были найдены зависимости величины $\gamma(t)$ от времени диффузии для различных значений h_0 . Типичные зависимости $\gamma(t)$ и $\Delta n(t)$ приведены на рис. 2. С помощью подобных кривых с высокой степенью точности можно определить режим изготовления волноводов с необходимыми параметрами.

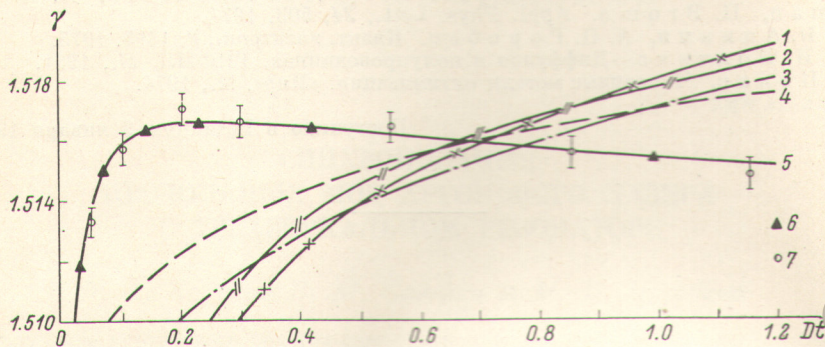


Рис. 1. Изменение фазового замедления моды TE_0 в зависимости от времени диффузии для волноводов с различными функциями распределения показателя преломления в поперечном сечении.

1 — линейное, 2 — параболическое, 3 — $\text{erf } c(x/2\sqrt{Dt})$, 4 — экспоненциальное, 5 — $\{\text{erf} [(x - h_0)/2\sqrt{Dt}] + \text{erf} [(x + h_0)/2\sqrt{Dt}]\}$, 6 — гауссово, 7 — экспериментальные точки.

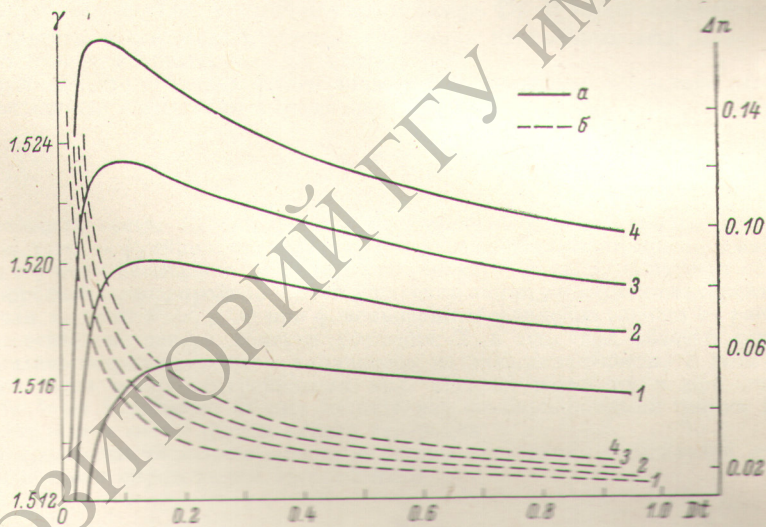


Рис. 2. Зависимость от времени диффузии коэффициента фазового замедления моды TE_0 (а) и Δn (б) для исследованных волноводов с разными начальными толщинами пленки PbO .

1 — $h_0 = 625$, 2 — 750, 3 — 850, 4 — 950 Å.

По известному из эксперимента времени диффузии t при проведении расчетов нами было найдено значение коэффициента взаимной диффузии D для указанных материалов. Для температуры $T = 500^\circ \text{C}$, при которой проводились эксперименты, значение D , по нашим расчетам, равно $3.47 \pm \pm 0.05 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$.

В заключение заметим, что предложенная методика определения $n(x)$ и ее параметров, по-видимому, может быть применена для исследования и других типов диффузионных волноводов.

Литература

- [1] M. Minakata, I. Noda, N. Uchida. Appl. Phys. Lett., 26, 395, 1975.
- [2] J. Nishimura, A. Otsuka. Opto-electronics, 5, 309, 1973.
- [3] R. V. Schmidt, L. P. Kaminov. Appl. Phys. Lett., 25, 458, 1974.
- [4] Ю. С. Кузьминов, Н. М. Лындин, А. М. Прохоров, А. А. Спихальский, В. А. Сычугов, Г. П. Шипуло. Квант. электрон., 2, 2309, 1975.
- [5] P. K. Tien, S. Riva-Sanseverino, R. J. Martin, A. A. Ballman, H. Bromn. Appl. Phys. Lett., 24, 503, 1974.
- [6] В. И. Аникин, А. П. Горобец. Квант. электрон., 2, 1465, 1975.
- [7] Б. И. Болтакс. Диффузия в полупроводниках. ГИФМЛ, М., 1961.
- [8] Э. Полак. Численные методы оптимизации. «Мир», М., 1974.

Поступило в Редакцию 3 января 1977 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. СКОРИНЫ