

07

© 1990

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ФАЗОВОГО ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА

С.И. Б о ж е в о л ь н ы й, Е.М. З о л о т о в,  
П.С. Р а д ь к о

Разработка интегральнооптических устройств на основе канальных волноводов и оптимизация их параметров требует знания профиля показателя преломления (ППП) волноводов. Основным неразрушающим методом определения ППП является восстановление ППП по измеренным модовым характеристикам волновода, что обеспечивает удовлетворительную точность только для многомодовых волноводов [1]. В настоящей работе предлагается универсальный метод определения параметров ППП канальных волноводов с помощью дифференциального фазового оптического микроскопа (ДФОМ) [2, 3]. Возможности метода демонстрируются на примере ионнообменных волноводов в стекле, ППП которых до сих пор не известен с достаточной определенностью [1].

Принцип работы ДФОМ заключается в измерении разности фаз двух пучков излучения, отраженных от близких участков исследуемой поверхности, при этом их частоты смещены на разные величины акустооптической ячейкой, что позволяет проводить измерение на разностной частоте с высокой точностью [2, 3]. Рассмотрим сканирование микроскопом канального волновода со стороны подложки перпендикулярно оси волновода (рис. 1, а). Представим ППП следующим образом:

$$n(x, y) = n + \Delta n f\left(\frac{x}{D}\right) g\left(\frac{y}{W}\right), \quad (1)$$

где  $n$  — показатель преломления подложки,  $D$  и  $W$  — характерные параметры ППП по глубине и ширине волновода. Можно показать, что для гауссовых пучков излучения измеряемая разность фаз  $\Delta\varphi$  определяется соотношениями:

$$\Delta\varphi = \varphi(\alpha - \beta) - \varphi(\alpha),$$

$$\varphi(\alpha) = \frac{4\sqrt{\pi} \Delta n D I}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-u^2} g\left[\frac{w(u - \alpha)}{W}\right] du, \quad (2)$$

$$I = \int_0^{\infty} f(t) dt, \quad \alpha = \frac{a}{\omega}, \quad \beta = \frac{b}{\omega}, \quad u = \frac{y}{\omega},$$

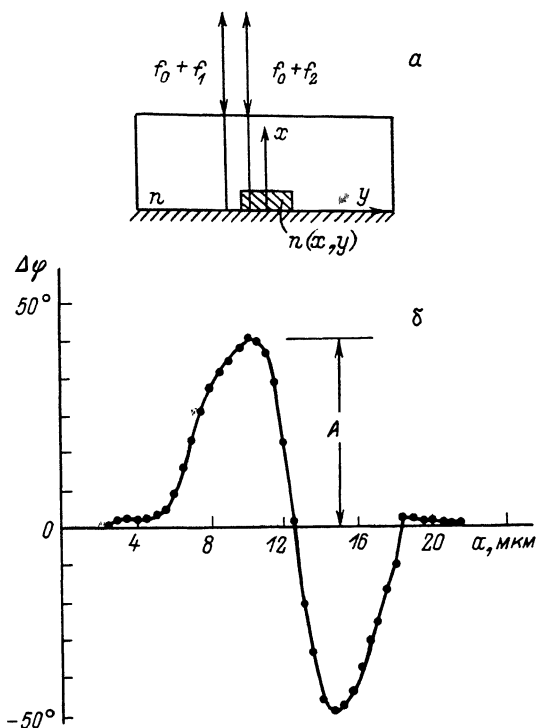


Рис. 1. Схема сканирования микроскопом образца с канальным волноводом (а) и измеренная с помощью 8<sup>x</sup>-кратного объектива зависимость разности фаз от координаты сканирования (б).

где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $b$  и  $\omega$  — расстояние между центрами пучков и их полуширина на поверхности волновода,  $a$  — координата сканирования. Таким образом, измеряемая величина  $A$  максимального изменения разности фаз  $\Delta\varphi$  при сканировании канального волновода (рис. 1, б) определяется параметрами  $\beta$ ,  $\omega/W$ ,  $\Delta n DI$  и профилем по ширине волновода  $g(t)$ . Измерения с помощью различных объективов для фокусировки излучения на поверхность волновода позволяют определить (при известных  $\beta$ ,  $\omega$ ) параметры  $W$ ,  $\Delta n DI$  и соответствие предполагаемого профиля  $g(t)$  реальному ППП.

Предлагаемый метод был использован для определения параметров ППП канальных волноводов, полученных в стекле путем ионного обмена в расплаве  $AgNO_3$  при температуре 330 °С в течение 100 с через маску с шириной просветов 3 мкм. Предположительным в этом случае является следующий ППП [1]:

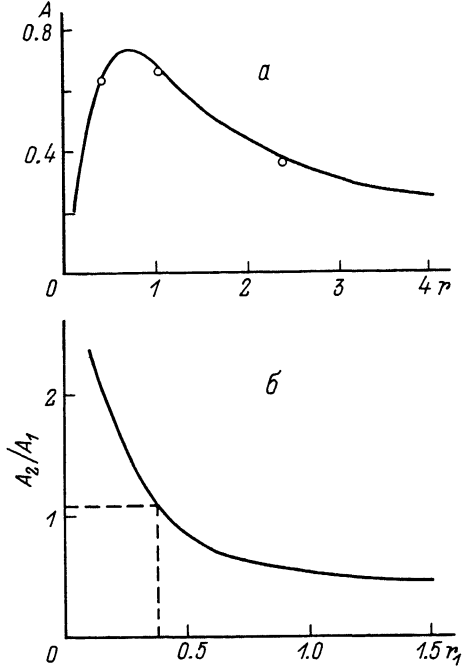


Рис. 2. Нормированная зависимость величины  $A$  максимального изменения разности фаз от параметра  $r$ , рассчитанная для гауссового профиля по ширине волновода вместе с экспериментальными результатами (а) и график отношения  $A_2/A_1$  при фиксированном значении  $r_2/r_1 \approx 2.67$  для определения ширины  $W$  волновода по измеренной величине этого отношения (б).

$$n(x, y) = n + \Delta n \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{D}\right) \exp\left(-\frac{4y^2}{W^2}\right), \quad (3)$$

где  $\operatorname{erfc}(t)$  - дополнительная функция ошибок. Тогда для фазы  $\varphi(\alpha)$  получаем, согласно соотношениям (2), (3),

$$\varphi(\alpha) = \frac{4 \Delta n D \sqrt{k}}{\lambda \sqrt{1+r^2}} \exp\left(-\frac{r^2 \alpha^2}{1+r^2}\right), \quad (4)$$

где  $r = 2 \omega / W$ . Нормированная зависимость  $A(r)$ , рассчитанная в соответствии с выражениями (2), (4) для параметра пространственного разрешения пучков  $\mathcal{B} = 2.5$ , представлена на рис. 2, а.

Экспериментальные измерения величины  $A$  производились с помощью ДФОМ, основные особенности которого сообщались ранее [3]. Излучение на длине волны  $\lambda = 0.633$  мкм после дифракции в акуст-

топтической ячейке на бегущих акустических волнах ( $f_1=78$  МГц и  $f_2=80$  МГц) представляет собой два пучка, которые фокусировались на исследуемую поверхность  $20\times$ ,  $8\times$  и  $3\times$ -кратными объективами в два пятна с полуширинами  $\omega_1=0.9$  мкм,  $\omega_2=2.4$  мкм,  $\omega_3=5.5$  мкм на расстояниях  $z=2.3, 6, 14$  мкм соответственно ( $\beta \approx 2.5$ ). Точность измерения разности фаз составляла  $0.2^\circ$  и сканирование поверхности образца с волноводами производилось с шагом  $0.5$  мкм (рис. 1, б). Измеренные величины  $A$  максимального изменения разности фаз составили при этом  $A=47^\circ, 50.5^\circ, 28.5^\circ$  для различных объективов соответственно.

Измерения величины  $A$  с помощью двух различных объективов, например  $20\times$ - и  $8\times$ -кратного, достаточно для определения ширины  $W$  и „оптической глубины“  $\Delta nD$  волновода. Для этого необходимо с помощью графика  $A(r)$  (рис. 2, а) построить зависимость отношения  $A_2/A_1$ , где  $A_1(z)=A(r_1(z))$ , от параметра  $r_1$  при фиксированном отношении  $r_2/r_1 = \omega_2/\omega_1 \approx 2.67$ , соответствующем экспериментально реализованной ситуации (рис. 2, б). Измеренное значение отношения  $A_2/A_1 \approx 1.07$  приводит к величине  $r_1=0.39$  (рис. 2, б). Таким образом, мы получаем ширину ППП волновода  $W=4.6$  мкм и „оптическую глубину“  $\Delta nD \approx 0.116$  мкм. То, что при этом значение  $A$ , измеренное с помощью  $3\times$ -кратного объектива, также согласуется с теоретической зависимостью  $A(r)$  (рис. 2, а) указывает на справедливость предположения о гауссовом распределении ППП по ширине (3). Измерения величины  $A$  с помощью целого ряда объективов позволит непосредственно восстанавливать функцию  $g(t)$ , исходя из соотношений (2) и определяя параметры аппроксимирующей функции из наилучшего совпадения с экспериментальными результатами.

Таким образом, в настоящей работе предложен и реализован метод определения параметров ППП канальных волноводов с помощью ДФОМ. Возможности метода показаны на примере канальных волноводов в стекле, ППП которых по ширине обнаружен достаточно близким к гауссовому распределению.

В заключение авторы выражают благодарность Д.Х. Нурлигареву за предоставление канальных волноводов в стекле для проведения измерений, а также Е.А. Божевольной за помощь в вычислениях.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] R a m a s w a m y R.V., S r i v a s t a v a R. // Journal of Lightwave Technology. 1988. V.6.N 6. P. 984-1001.
- [2] C h u n g H., W a l p i t a L.M., C h a n g W.S.C. // Appl. Opt. 1986. V. 25. N 18. P. 3014-3017.
- [3] Божевольный С.И., Золотов Е.М., Постников А.В., Радько П.С. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 12. С.1-5.

Поступило в Редакцию  
19 февраля 1990 г.