

07; 12

© 1991

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ КАНАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ФАЗОВОГО ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА

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

Определение профиля показателя преломления (ППП) канальных волноводов является одной из актуальных задач интегральной оптики, возникающей при разработке различного рода волноводных устройств и оптимизации их параметров. Недавно нами был предложен параметрический метод определения ППП канальных волноводов на основе измерений дифференциальным фазовым оптическим микроскопом (ДФОМ) с различными объективами [1]. Однако при этом необходимо предварительно задавать форму ППП исследуемого волновода, параметры которого затем находятся по экспериментальным данным, что существенно ограничивает область применения метода. В настоящей работе предлагается прямой метод непосредственного восстановления ППП канальных волноводов с помощью ДФОМ, в котором не требуется наличия предварительной информации об измеряемой структуре.

Принцип работы ДФОМ заключается в измерении с высокой точностью разности фаз двух пучков лазерного излучения, отраженных от близких участков исследуемой поверхности, при этом используется техника оптического гетеродинамирования [2, 3]. Рассмотрим сканирование микроскопом волноводной структуры со стороны подложки (рис. 1, а), полагая, что распределение показателя преломления ее можно представить в виде $n(x, y) = n + \Delta n f(y)g(x)$, где n — показатель преломления подложки, разделение переменных здесь не является обязательным, но упрощает дальнейшее изложение метода. Следуя результатам работы [1], измеряемая ДФОМ разность фаз $\Delta\varphi$ выражается для гауссовых пучков излучения следующим образом:

$$\Delta\varphi(u) = \frac{4\sqrt{\pi}\Delta n I}{\lambda\omega} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x+u) \left[\exp\left[-\frac{(x-b/2)^2}{\omega^2}\right] - \exp\left[-\frac{(x+b/2)^2}{\omega^2}\right] \right] dx, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения, $I = \int_{-\infty}^0 f(y) dy$, b и ω — расстояние между центрами пучков и их полуширина на поверхности

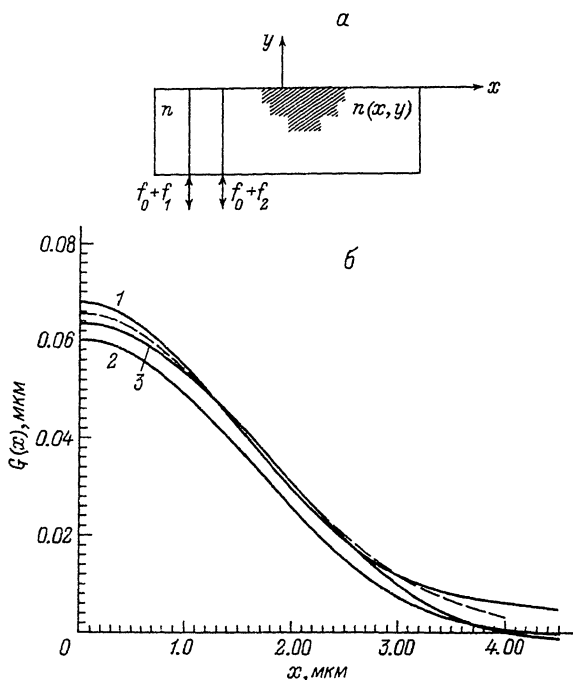


Рис. 1. Схема сканирования микроскопом образца с каналным волноводом (а) и восстановленные ППП по ширине различных волноводов (б) на основе измерений ДФОМ (кривые 1, 2, 3) вместе с ППП по ширине, полученным параметрическим методом (пунктир) [1].

волновода, u — координата середины отрезка, соединяющего центры сканирующих поверхность пучков излучения.

Нахождение ППП волновода по ширине $G(x) = \Delta n \lg(x)$ по измеренной зависимости разности фаз $\Delta\varphi(u)$ на основе соотношения (1) относится к классу задач теории линейных приборов [4]. Формально решение интегрального уравнения типа свертки (1) можно представить в аналитическом виде, наиболее простом для случая четной функции $g(x)$:

$$G(x) = \frac{\lambda}{4\pi^2} \int_0^{\infty} K^{-1}(z) \cos(xz) dz \int_0^{\infty} \Delta\varphi(u) \sin(uz) dz, \quad (2)$$

где $K(z) = \sin(bz/2) \exp(-z^2\omega^2/4)$. Однако непосредственное использование соотношения (2) для определения $G(x)$ приводит к про-

блеме выбора верхнего предела внешнего интеграла, что играет большую роль из-за наличия в этом интеграле быстро растущей экспоненты. Возникающая проблема хорошо известна в теории решения некорректных задач [5] и связана с невозможностью абсолютно точно измерить зависимость $\Delta\varphi(u)$, которая согласно выражению (1) должна быть отлична от нуля для любых значений u . Это затруднение можно преодолеть используя в качестве множителя во внешнем интеграле выражения (2) стабилизирующую функцию $f(z)$, например следующего вида:

$$f(z) = \frac{K^2(z)}{K^2(z) + \alpha z^2}, \quad (3)$$

где α — параметр регуляризации, который находится из условия минимизации среднеквадратичной невязки между измеренной зависимостью $\Delta\varphi(u)$ и рассчитанной согласно соотношению (1) для восстановленного (по формуле (2) с учетом стабилизирующей функции (3)) ППП по ширине волноводной структуры.

Предлагаемый метод был опробован на образце с полученными в стекле путем ионного обмена в расплаве $AgNO_3$ канальными волноводами, параметры ППП которых определялись в предыдущей работе [1], где было установлено, что ППП волновода по ширине достаточно близок к гауссовому распределению $G(x) = 0.065 \exp(-x^2/d^2)$, $d = 2.3$ мкм. Основные особенности используемого в настоящем эксперименте ДФОМ для измерения разности фаз $\Delta\varphi(u)$ сообщались ранее [3]. Излучение на длине волны $\lambda = 0.633$ мкм после дифракции в акустооптической ячейке на бегущих акустических волнах ($f_1 = 78$ МГц и $f_2 = 80$ МГц) представляет собой два пучка, фокусируемых на поверхность волновода со стороны подложки 20- \times кратным объективом в два пятна с полуширинами $\omega = 1.7$ мкм на расстоянии $b = 3$ мкм. Для непосредственного восстановления ППП по указанной методике большое значение имеет точность измерения зависимости $\Delta\varphi(u)$, поэтому для сканирования образца использовалось пьезоэлектрическое перемещение с точностью 0.1 мкм. Точность измерения разности фаз в статическом режиме ($u = \text{const}$) и регистрации максимального изменения разности фаз при многократном сканировании ступеньки рельефа составляла 0.25' [3]. Однако при сканировании номинально однородных участков стеклянной подложки разброс показаний фазометра достигал 3'–5', что связано, по-видимому, с неоднородностями показателя преломления и формы поверхности подложки. Фактически эта величина определяет случайную ошибку при измерении волноводной структуры. Восстановление функции $G(x)$ по симулированной зависимости $\Delta\varphi(u)$ с различным уровнем случайной ошибки показало, что относительный разброс значений $G(x)$ примерно равен относительной величине задаваемой ошибки. Таким образом, ошибка при восстановлении ППП по ширине в нашем случае не должна превышать 10 %.

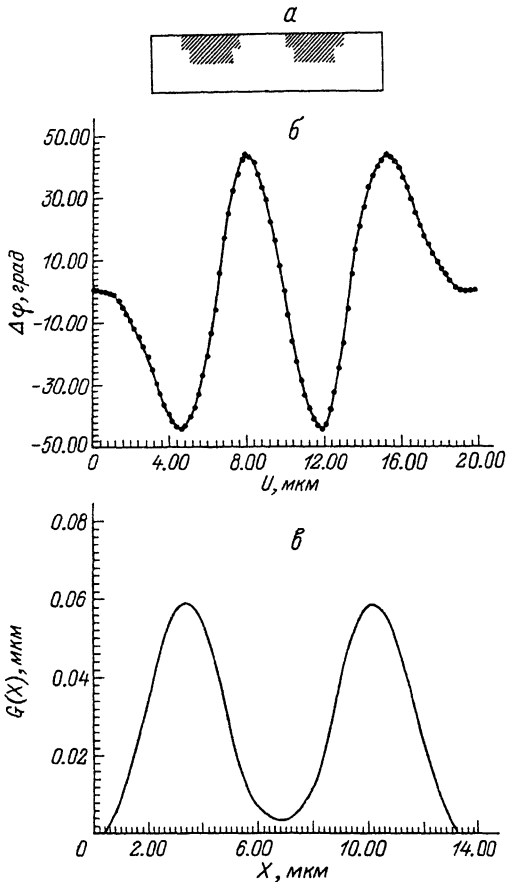


Рис. 2. Восстановленный ППП по ширине волноводной структуры (в), по измеренной зависимости разности фаз (б), при сканировании ДФОМ связанных канальных волноводов (а).

При сканировании различных участков разных волноводов образца восстановленные ППП по ширине отличались друг от друга несколько больше чем на 10 % (рис. 1, б), что может быть связано с неодинаковостью ширины просветов маски, через которую проводилась диффузия, а также с неоднородностью распределения концентрации ионов серебра в расплаве. В целом, восстановленные профили $G(x)$ близки к гауссовому распределению, полученному в предыдущей работе [1], что свидетельствует об адекватности параметрического подхода [1] и непосредственного восстановления функции $G(x)$. Следует заметить, что в параметрическом методе решающее значение имеет точность измерения максимального значения разности фаз, тогда как при непосредственном восстановлении роль случайной ошибки сводится к минимуму вследствие интегрального характера метода.

Для демонстрации возможности используемого метода при восстановлении ППП сложных волноводных структур были исследованы два близко расположенных канальных волновода в этом же образце (рис. 2, а). Определение ППП по ширине для таких волноводов необходимо для расчета длины связи при создании направленных ответвителей, которые являются ключевыми элементами современных интегральнооптических структур. Функция $\zeta(x)$ связанных волноводов (рис. 2, в), восстановленная на основе измеренной зависимости разности фаз $\Delta\varphi(u)$ (рис. 2, б) при сканировании связанных волноводов (2, а), хорошо согласуется с ППП по ширине отдельных волноводов (рис. 1, б).

Таким образом, в настоящей работе предложен и реализован метод непосредственного восстановления ППП по ширине произвольных волноводных структур с помощью ДФОМ. Возможности метода показаны на примере одиночных и связанных канальных ионообменных волноводов в стекле. Предложенный метод позволяет автоматизировать процесс восстановления ППП волноводов и может быть также использован для определения профиля мелкомасштабных неоднородностей отражающей поверхности.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Божевольный С.И., Золотов Е.М., Радько П.С. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 10. С. 30-34.
- [2] Chung H., Walpita L.M., Chang W.S.C. Appl. Opt. 1986. V. 25. N 18. P. 3014-3017.
- [3] Божевольный С.И., Золотов Е.М., Радько П.С. // ЖТФ. 1991. Т. 61. № 2. С. 109.
- [4] Хургин Я.И., Яковлев В.П. Финитные функции в физике и технике. М.: Наука, 1971. 408 с.
- [5] Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.

Поступило в Редакцию
22 февраля 1991 г.
В окончательной редакции
6 сентября 1991 г.