

06.3;07

©1995

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЯЗИ НА БАЗЕ СКОШЕННЫХ ВОЛНОВОДОВ

*Д.В.Свистунов, Н.В.Зинченко*

Волноводы с переменной толщиной достаточно широко применяются в интегральной оптике. Они могут работать как устройства ввода/вывода излучения, преобразователи поперечных размеров волноводов, волноводные зеркала, согласующие элементы в межволноводных соединениях и при связи с оптическими волокнами и т. д. В данной статье представлены результаты разработок, направленных на улучшение функционирования этих элементов в качестве устройств ввода/вывода света в оптический волновод.

Главной проблемой устройств ввода/вывода излучения такого типа является большая угловая ширина диаграммы направленности (единицы градусов) реально получаемых элементов. Возможность существенного сужения диаграммы направленности связана с необходимостью уменьшения угла скоса толщины волновода до величин порядка  $10^{-4}$  рад. В данной работе для получения требуемых малых углов скоса была применена методика химического травления, предназначенная для создания косых срезов тонких пленок для целей анализа их параметров [1]. В процессе обработки уровень травителя в рабочем стакане постепенно повышается, и, ввиду разного времени травления различных участков поверхности вертикально установленной подложки, образуется скошенная по толщине область образца. Получаемый угол скоса  $\varepsilon$  определяется как  $\operatorname{tg} \varepsilon = v_e/v_r$ , где  $v_e$  — скорость травления материала пленки,  $v_r$  — скорость подъема уровня травителя в рабочем стакане.

В экспериментах использовались предварительно изготовленные равномерные ионообменные планарные волноводы  $K8 : K^+$ . Химическое травление проводилось при комнатной температуре в растворах HF с концентрациями в диапазоне 5–15%. Уровень травителя в процессе обработки повышался равномерно. В результате были получены образцы скошенных волноводов с углами скосов в диапазоне  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  рад. Максимальная глубина травления выбиралась по результатам предварительно проведенного восстановления профиля показателя преломления (ПП) по

спектру мод исходного волновода с тем, чтобы обеспечить отсечку мод на обрабатываемом участке волновода. При этом исходный профиль ПП по глубине подложки аппроксимировался гладкой сшивкой линейной и экспоненциальной функций [2].

На всех исследованных образцах наблюдался полный (100%) вывод света из волновода изготовленными элементами связи при достаточно узкой диаграмме направленности излучения.

В разных точках поверхности образца с  $\varepsilon \approx 10^{-4}$  рад были измерены изменения эффективных показателей преломления мод вдоль элемента связи и проведено сравнение с расчетными величинами. При равномерном подъеме уровня травителя получается близкий к линейному характер скоса поверхности образца. Тогда распределение вдоль скошенного волновода величины  $\Delta n(y)$ , характеризующей поперечный профиль ПП по глубине пластины  $y$ , имеет вид

$$\Delta n(y, l) = \begin{cases} \Delta n_0 \cdot [1 - (y + t)/a_0] & 0 \leq y \leq c - t, \\ \delta n_0 \cdot \exp[(c - t - y)/h_0] & y \geq c - t, \end{cases}$$

где  $t$  — толщина стравливаемого слоя,  $t = (l - l_0) \cdot \operatorname{tg} \varepsilon \approx (l - l_0) \cdot \varepsilon$ ,  $l$  — длина вдоль элемента связи,  $l_0$  — координата стыка равномерного и скошенного по толщине участков волновода,  $c$  — глубина точки сшивки функций. При  $t < c$  профиль ПП по глубине описывается гладкой сшивкой усеченной линейной части и полного экспоненциального “хвоста” исходного распределения. При  $t \geq c$  профиль ПП определяется только усеченной экспоненциальной частью распределения. В представленном виде записи  $\Delta n(y, l)$  учтено условие расположения начала оси  $Y$  на поверхности волновода в каждом поперечном сечении образца, т. е. при движении вдоль оси  $L$  начало оси  $Y$  опускается в глубь подложки от исходной поверхности равномерного волновода. Величины  $\Delta n_0$ ,  $\delta n_0$ ,  $a_0$ ,  $h_0$ ,  $c$  являются параметрами исходного равномерного волновода и определяются [2] как  $\Delta n_0 = \Delta n(y = 0) = n(0) - n_s$ ,  $c = 0.57 \cdot a_0$ ,  $\delta n_0 = 0.43 \cdot \Delta n_0$ ,  $h_0 = 0.43 \cdot a_0$ , где  $n_s$  — ПП подложки. Геометрия получаемой структуры и трансформация поперечного профиля ПП показаны на рис. 1. При расчете изменений эффективных ПП мод вдоль элемента связи  $n_m^*(l)$  решалось дисперсионное уравнение волновода для каждого значения  $l$ . Из замеренного спектра мод исходного равномерного волновода определялись параметры его профиля ПП, а затем эти параметры использовались в расчетах зависимости  $n_m^*(l)$ .

На рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные данные изменения постоянных распространения волновод-

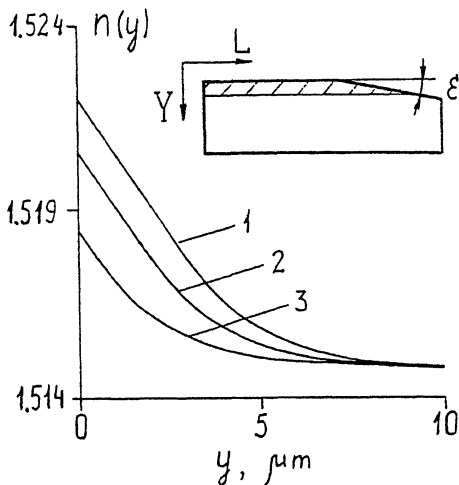


Рис. 1. Трансформация поперечного профиля ПП  $n(y)$  вдоль продольной оси  $L$ .

$\epsilon = 10^{-4}$  рад.  $l - l_0$ : 0 (1); 10 (2); 25 мм (3).

ных мод вдоль поверхности элемента в направлении распространения излучения. Близость расчетных и экспериментальных результатов говорит о хорошем соответствии реально полученного профиля скоса волноводного слоя заданному линейному и о возможности проведения достоверных

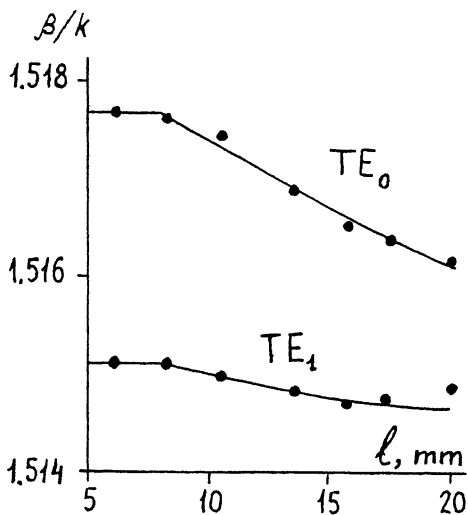


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные распределения постоянных распространения  $\beta$  волноводных мод вдоль скоса элемента связи.  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda = 633$  нм.

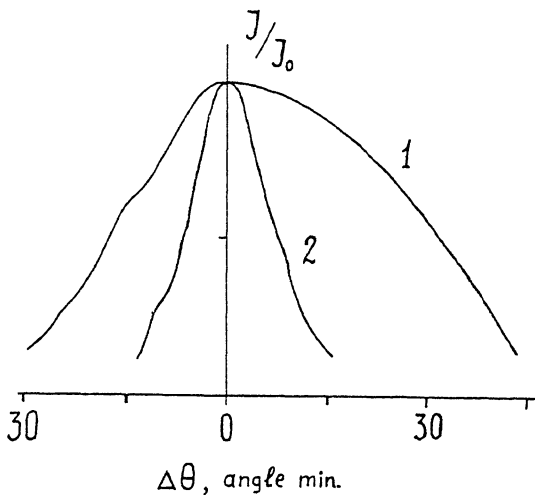


Рис. 3. Диаграммы направленности излучения моды  $TE_0$  для образцов с  $\epsilon = 4 \cdot 10^{-4}$  рад (1);  $\epsilon = 10^{-4}$  рад (2).

априорных расчетов характеристик таких элементов связи. При движении вдоль элемента от стыка скошенного и равномерного участков (при увеличении  $l$  и  $t$ ) виден небольшой рост измеренных значений постоянной распространения моды  $TE_1$  в области ее вывода из волновода. Это можно интерпретировать как переход волноводной моды  $TE_1$  в режим моды утечки через область несобственных мод, где возможно некоторое увеличение действительной продольной составляющей постоянной распространения [3].

На рис. 3 показаны измеренные для основной  $TE_0$  моды диаграммы направленности элементов при их работе в качестве устройств вывода света из волновода. Здесь проявляется сильная зависимость угловой ширины диаграммы от угла скоса волноводного слоя. Полученный для образца с  $\epsilon \approx 4 \cdot 10^{-4}$  рад несимметричный вид диаграммы направленности характерен для элементов типа "скошенный край" как продольных элементов связи [4,5]. Он свидетельствует о сильной локальной утечке моды при распространении вдоль скошенного волновода и, как следствие, недостаточно большой излучающей апертуре элемента, не позволяющей получить узкую диаграмму направленности. Другой образец со средним углом  $\epsilon \approx 10^{-4}$  рад демонстрирует диаграмму направленности шириной около 15 угловых минут по уровню мощности 0,5, что является очень хорошим результатом для такого типа элементов связи.

Отметим, что химическое вытравливание скоса волноводного слоя является универсальной методикой, применимой к планарным волноводам со ступенчатым или градиентными профилями ПП независимо от способов их изготовления. Эта методика пригодна и для других применений скошенных волноводов, помимо устройств ввода/вывода, поскольку обеспечивает получение угла скоса  $\varepsilon$  в широком диапазоне. Хорошее соответствие расчета и эксперимента позволяет заранее задавать требуемые параметры скошенных элементов в зависимости от их предназначения. Для рассматриваемого случая использования в качестве элементов ввода/вывода их наилучшие рабочие характеристики должны достигаться при таких условиях, чтобы участок вывода света из волновода был возможно более протяженным, а полный вывод света произошел до момента достижения толщины отсечки моды [5,6]. В экспериментах эти условия выполнялись для волноводов  $K_8:K^+$  со скосом поверхности  $\varepsilon \approx 10^{-4}$  рад. Оптимизацию параметров скоса для конкретного волновода можно проводить с использованием расчетов характеристик излучения моды по методикам [7,8]. Для согласующих адиабатических устройств, где происходит безызлучательная трансформация поперечных размеров волноводной моды, скос волновода следует выбирать из условия адиабатического изменения толщины волноводного слоя [9]. Изменяя в процессе химической обработки образца скорость подъема уровня травителя, можно получать заранее заданные нелинейные профили скоса толщины волноводного слоя и реализовать параболический [9], экспоненциальный [10] или синусоидальный [11] переходы на участках адиабатического уширения волноводных мод.

Таким образом, в данной работе получены волноводные элементы ввода/вывода излучения на базе скошенных волноводов, имеющие достаточно узкую диаграмму направленности, сравнимую по угловой ширине с характеристиками многих промышленных газовых лазеров.

### Список литературы

- [1] Гарцман К.Г., Дедегкаев Т.Т., Крюков И.И., Мошников В.А. // ПТЭ. 1979. В. 4. С. 271-272.
- [2] Золотов Е.М., Киселев В.А., Пелехатый В.М. // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. В. 11. С. 2376-2382.
- [3] Yamaguchi S., Hosono T. // Trans. Inst. Electronics, Information and Communication Engineers E. 1989. V. E72. N 10. P. 1032-1033.
- [4] Tien P.K., Smolinsky G., Martin R.J. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1975. МТТ-23. N 1. P. 79-85.
- [5] Золотов Е.М., Пелехатый В.М., Прохоров А.М. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. В. 7. С. 1478-1482.
- [6] Lipovskii A.A. // Optics Communications. 1987. V. 61. N 1. P. 11-15.

- [7] *Ескин К.Ф., Гришмановский А.Н., Магдина И.И.* // Оптика и спектроскопия. 1984. Т. 56. В. 1. С. 155-159.
- [8] *Старков А.С.* // Оптика и спектроскопия. 1990. Т. 68. В. 2. С. 447-451.
- [9] *Burns W.K., Milton A.F., Lee A.B.* // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 30. N 1. P. 28-30.
- [10] *Amitay N., Presby H.M., Dimarcello F.V., Nelson K.T.* // Electronics Lett. 1986. V. 22. N 13. P. 702-703.
- [11] *Love J.D., Henry W.M.* // Electronics Lett. 1986. V. 22. N 17. P. 912-914.

ВНЦ "ГОИ им. С.И. Вавилова"  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
6 декабря 1994 г.