

УДК 681.7.06

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПУТЁМ КОНВЕРСИИ МОД TM_0 – TE_1 В ИОНООБМЕННОМ СТЕКЛЯННОМ ВОЛНОВОДЕ

© М. М. Векшин, Н. А. Яковенко

Кубанский государственный университет,
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149
E-mail: vek-shin@mail.ru

Проведено исследование модового состава четырёхслойного оптического волновода, состоящего из ионообменного канального волновода в стекле, покрытого высокопреломляющей наноразмерной диэлектрической плёнкой. Установлено, что вторая и третья моды волновода при варьировании геометрических размеров плёнки изменяют свое состояние поляризации: мода TM_0 трансформируется в моду TE_1 , а мода TE_1 становится модой TM_0 . На основе данных закономерностей предложена и экспериментально подтверждена новая методика построения волноводного преобразователя поляризаций.

Ключевые слова: интегральная оптика, поляризация оптического излучения, волноводная мода.

DOI: 10.15372/AUT20190107

Введение. В настоящее время большое значение имеют исследования, направленные на создание элементной базы интегрально-оптических схем для поляризационно-разнесённой обработки данных в фотонных информационных системах [1, 2]. Существуют различные подходы к построению преобразователей и разделителей поляризаций излучения [2].

Многослойные интегрально-оптические волноводы востребованы для построения различных многофункциональных элементов интегральной оптики [3]. Цель предлагаемой работы состоит в исследовании модовой структуры и поляризационных характеристик мод слабонаправляющего канального интегрально-оптического волновода и разработке новой конструкции пассивных преобразователей поляризации оптического излучения, использующей особенности этих характеристик.

Разработка оптического поляризационного преобразователя. Форма поперечного сечения такого волновода показана на рис. 1, где $2d_x$ и d_y — эквивалентные ширина и толщина волноводного канала; w и h — ширина и толщина плёнки; n_s , n_f , n_c — показатели преломления подложки, покровной плёнки и внешней среды соответственно; $n(x, y)$ — показатель преломления канала. Ионообменный канальный волновод [4] имеет градиентный профиль показателя преломления и для ионного обмена $K^+ \leftrightarrow Na^+$ в стекле типа К8 аппроксимируется функцией [5]

$$n(x, y) = n_s + \Delta n \exp\left(-\frac{x^2}{d_x^2}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{y}{d_y}\right),$$

где Δn — максимальное приращение показателя преломления волновода относительно подложки. Для расчётов использовались следующие данные: $n_s = 1,5151$, $\Delta n = 0,0072$, показатель преломления внешней среды $n_c = 1$ (воздух), $2d_x = 3,75$ мкм, $d_y = 2,5$ мкм. При указанных условиях волновод (без плёнки) является одномодовым на длине волны $\lambda = 0,85$ мкм. В качестве высокопреломляющей плёнки использована плёнка сульфида мышьяка As_2S_3 с показателем преломления $n_f = 2,4$.

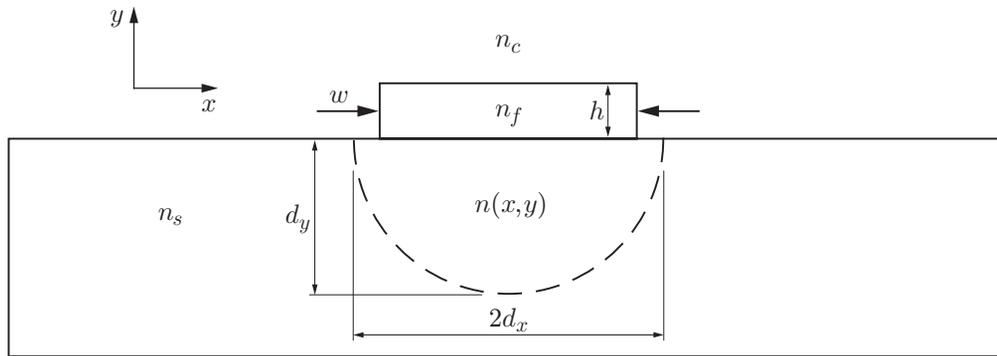


Рис. 1. Форма поперечного сечения канального оптического волновода в стекле с покровной плёнкой

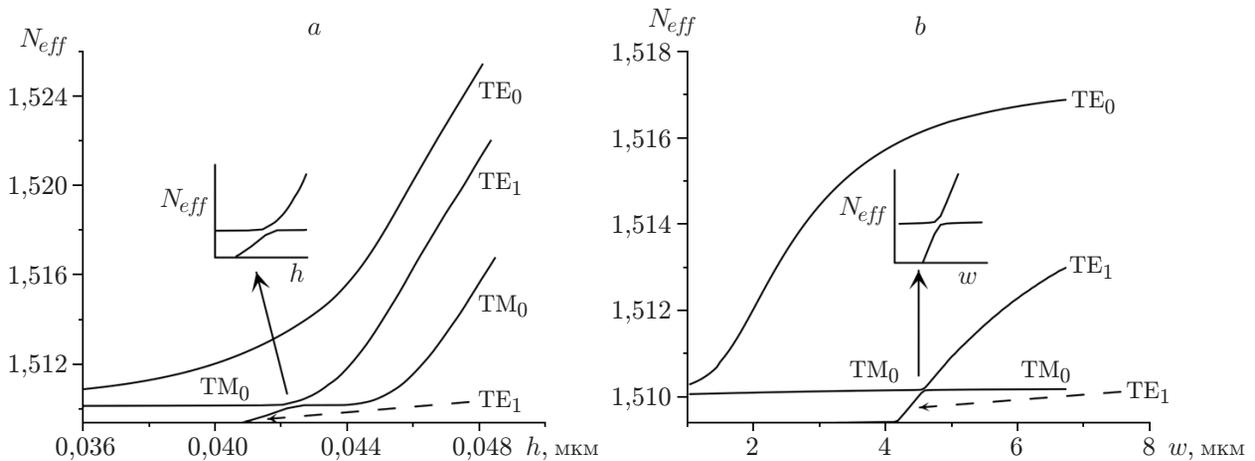


Рис. 2. Зависимости эффективных показателей преломления мод волновода: от толщины высокопреломляющей покровной плёнки (а) и от ширины плёнки (б)

Расчёт характеристик мод волновода осуществлялся путём решения двумерного векторного волнового уравнения в Н-формулировке [6], которое полностью учитывает поляризационные характеристики мод. Результатами расчёта, проведённого с помощью метода конечных разностей, являлись значения эффективного показателя преломления волноводных мод и распределения поперечных компонент полей в области волновода и вблизи него. Волновод содержит в себе слои размерами, различающимися на 2 порядка, поэтому для проведения точных расчётов применялась дискретизация неравномерной сеткой.

На рис. 2, а показаны расчётные зависимости эффективных показателей преломления мод волновода по мере их зарождения от толщины высокопреломляющей покровной плёнки шириной w , равной эффективной ширине волноводного канала $w = 2d_x$. Толщина плёнки h варьировалась в диапазоне 0,036–0,052 мкм.

Мода TE_0 является линейно-поляризованной во всём диапазоне расчётных толщин плёнки, вектор напряжённости магнитного поля направлен вдоль оси y . Для второй и третьей мод волновода, если расположить их по мере убывания эффективных показателей преломления, существует область толщин плёнки, в которой они сближаются друг с другом (см. вставку на рис. 2, а). Вторая мода волновода в диапазоне толщин плёнки менее 0,042 мкм, т. е. до области сближения двух кривых на графике, является модой TM_0 , а вектор напряжённости магнитного поля направлен вдоль оси x . Однако эта же мода после прохождения области сближения кривых изменяет свою поляризацию и пространственную

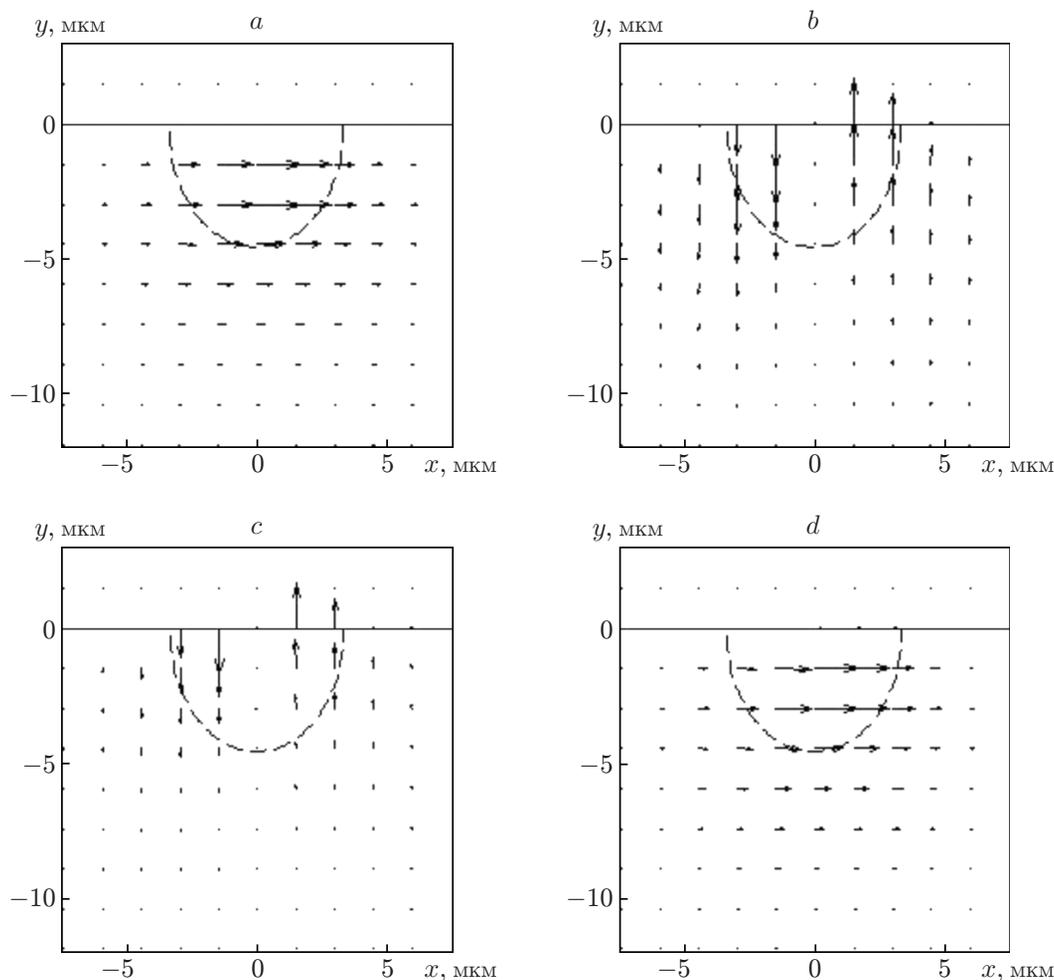


Рис. 3. Поляризации второй и третьей мод волновода: при толщине плёнки 42 нм (*a, b*) и при толщине 45 нм (*c, d*)

структуру поля и переходит в моду TE_1 , которая поляризована так же, как и мода TE_0 , но имеет два максимума интенсивности поля в своём распределении по горизонтальной оси. Третья мода волновода ведёт себя аналогичным образом: до области сближения эффективных показателей преломления является линейно-поляризованной модой TE_1 , а за этой областью трансформируется в моду TM_0 .

На рис. 2, *b* и на вставке показаны аналогичные зависимости эффективных показателей преломления мод волновода от вариации ширины плёнки при её постоянной толщине 45 нм. Расчёт модового состава такого волновода выявил те же особенности поляризаций мод, которые наблюдались для волновода с переменной толщиной плёнки. При ширине плёнки около 4,6 мкм происходит трансформация моды TM_0 в моду TE_1 .

На рис. 3 показаны поляризации второй и третьей мод волновода (пространственное распределение напряжённости магнитного поля) при толщинах плёнки 42 и 45 нм и постоянной ширине 3,75 мкм. Как видно из графиков, моды изменяют свою поляризацию на ортогональную. В области максимального сближения вторая и третья моды волновода являются гибридными и имеют циркулярную поляризацию со взаимно противоположными направлениями.

Таким образом, результаты анализа поляризационных характеристик волновода показывают, что вторая и третья моды волновода по мере увеличения толщины или ширины

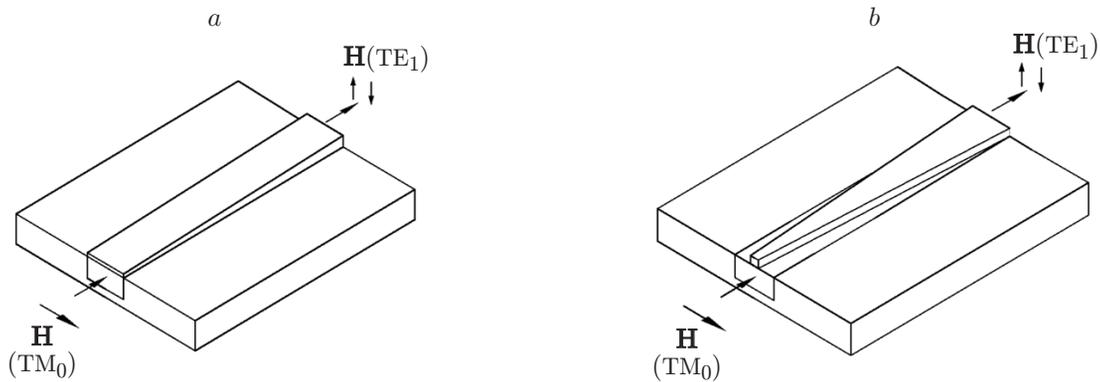


Рис. 4. Схемы оптического пассивного преобразователя поляризации оптического излучения, функционирующего на основе принципа модовой эволюции: с плёнкой клинообразной (а) и рупорообразной формы (b)

плёнки поворачивают свою поляризацию на 90° . На основе этого факта и с использованием фундаментального принципа модовой эволюции [7] можно создать эффективное устройство для пассивного преобразования плоскости поляризации световой волны (рис. 4). Принцип работы такого преобразователя можно пояснить следующим образом. Входное поляризованное ТМ-излучение возбуждает в волноводе моду ТМ₀. При распространении моды в волноводе за счёт плавного адиабатического увеличения толщины (рис. 4, а) и ширины (рис. 4, b) плёнки, покрывающей волновод, её поляризация изменяется на 90° и на выходе волновода будет существовать ТЕ-мода 1-го порядка (см. рис. 4, b).

Расчёты показывают, что спектральный диапазон преобразователя достаточно широкий и составляет 0,77–0,87 мкм. Он ограничен появлением по мере уменьшения длины волны четвёртой моды ТМ₁, что приводит к ухудшению поляризационных характеристик.

В подложках оптического стекла К8 были сформированы одномодовые каналные волноводы на длине волны 0,85 мкм путём ионного обмена $K^+ \leftrightarrow Na^+$ из расплава соли KNO_3 . На поверхность подложки клином вдоль волноводов методом термовакuumного напыления наносилась плёнка A_2S_3 .

Исследования поляризационных характеристик преобразователей осуществлялись при торцевой стыковке с волноводом. Проведена серия исследований образцов с плёнками, имеющими различную крутизну клина. Установлено, что у образцов с начальной толщиной плёнки 30 нм на одном краю волноводов и толщиной 55 нм на противоположном краю при длине плёнки 10 мм наблюдается предсказанный эффект поворота плоскости поляризации. Измеренная эффективность преобразования поляризаций составляла 95 %.

Вследствие необходимости выбора устройства приемлемо небольшой длины эффективность поляризационного преобразования ограничена из-за откочки части энергии из второй моды в третью при прохождении волноводным клином или рупором области толщины или ширины плёнки с близкими константами распространения второй и третьей мод. Также некоторый вклад в потери будет вносить откочка энергии в четвёртую моду волновода ТМ₁, если неточности технологии позволили ей уже сформироваться.

Заключение. Таким образом, установлено, что в слабонаправляющем оптическом канальном волноводе, сформированном в стекле с покровной наноразмерной (~ 40 нм) плёнкой из высокопреломляющего диэлектрического материала, собственные моды меняют свои состояние линейной поляризации и тип при изменении геометрических параметров плёнки. На основе этих закономерностей предложена методика построения пассивного преобразователя плоскости поляризации и изготовлен макет поляризационного преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сосунов А. В., Пономарев Р. С., Юрьев В. А., Волынцев А. Б.** Влияние структуры и механических свойств приповерхностного слоя монокристалла ниобата лития на процесс производства интегрально-оптических схем // Автометрия. 2017. **53**, № 1. С. 100–106.
2. **Dai D., Liu L., Gao S. et al.** Polarization management for silicon photonic integrated circuits // Laser & Photon. Rev. 2013. **7**, N 3. P. 303–328.
3. **Madrigal J. B., Tellez-Limon R., Gardillou F. et al.** Hybrid integrated optical waveguides in glass for enhanced visible photoluminescence of nanoemitters // Appl. Opt. 2016. **55**, N 36. P. 10263–10268.
4. **Никитин В. А., Яковенко Н. А.** Электростимулированная миграция ионов в интегральной оптике. Краснодар: КубГУ, 2013. 245 с.
5. **Weiss M. N., Srivastava R.** Determination of ion exchanged channel waveguide profile parameters by mode index measurements // Appl. Opt. 1995. **34**, N 3. P. 455–458.
6. **Lüsse P., Stuwe P., Schüle J., Unger H. G.** Analysis of vectorial mode fields in optical waveguides by a new finite difference method // Journ. Lightwave Technol. 1994. **12**, N 8. P. 487–494.
7. **Watts M. R., Haus H. A.** Integrated mode-evolution based polarization rotators // Opt. Lett. 2005. **30**, N 2. P. 138–140.

Поступила в редакцию 16.07.2018

После доработки 25.09.2018

Принята к публикации 01.10.2018
