

ЭЛЕМЕНТЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.383

М. М. Векшин, О. А. Кулиш, Н. А. Яковенко

(Краснодар)

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ТЕ- И ТМ-ВОЛН
В ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОМ Y-РАЗВЕТВИТЕЛЕ
НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗОТРОПНЫХ СЛОЕВ**

Предложен новый тип пространственного разделителя поляризаций, реализованного на основе элементной базы интегральной оптики. Принцип работы базируется на значительном модовом двулучепреломлении четырехслойного Y-разветвителя из изотропных слоев со специально подобранными параметрами. Искусственная анизотропия сформирована путем сочетания слабо направляющего и резко неоднородного волноводов. Проведен расчет параметров устройства конечно-разностным методом распространяющегося пучка.

Для поляризационно-независимого детектирования и поляризационно-разнесенного мультиплексирования в волоконно-оптических системах телекоммуникаций и обработки сигналов и информации требуются устройства, позволяющие разделить различные поляризационные компоненты излучения в пространстве. Интегрально-оптические схемы имеют преимущество перед волоконными или объемными аналогами, так как появляется возможность размещения большого количества элементов в единой интегральной схеме с целью создания многоканальных систем.

Все известные интегрально-оптические разделители поляризаций используют один из двух физических принципов, лежащих в основе их функционирования: резонансную связь оптических волн, реализуемую в волноводных направленных ответвителях, и эффект модовой селекции в асимметричных Y-разветвителях.

Резонансная направленная связь предполагает выполнение условий фазового синхронизма для эффективного обмена энергией между каналами той поляризационной составляющей, которую планируется перевести в другой канал. Способы разнесения констант распространения с целью эффективной развязки основываются на использовании различных по параметрам волноводов как полностью диэлектрических [1], так и с дополнительными металлическими слоями [2].

Для создания поляризационных разделителей может быть использован эффект селекции мод в Y-разветвителях, реализуемый в различных формах. Установлено [3], что если входной двухмодовый волновод разделяется на два

одномодовых канала с различными параметрами, то существует возможность пространственного разделения мод по различным каналам. Количественно условия такого перераспределения направленных волн определяются введением коэффициента модового преобразования MCF (mode conversion factor), $MCF = (\beta_1 - \beta_2)/\theta\gamma$, где β_1, β_2 – константы распространения волноводных мод в выходных каналах 1 и 2; θ – угол разветвления; параметр γ определяется следующим образом:

$$\gamma = \sqrt{\frac{(\beta_1 + \beta_2)^2}{4} - k_0^2 n_s^2}$$

(здесь n_s – показатель преломления подложки, в которой сформированы волноводы; $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны излучения в вакууме). На основе теории связанных мод доказывается, что если коэффициент MCF по модулю больше чем 0,43, то разветвитель обладает свойствами модового селектора: фундаментальная мода ответвляется в канал с большей константой распространения, а мода первого порядка направляется в канал с меньшей константой распространения. С целью разделения поляризаций данный принцип используется следующим образом. В области разветвления формируется двухмодовый рупорообразный участок, который далее разделяется на два одномодовых канала. Коэффициент MCF должен быть достаточно большим ($\gg 0,43$), но с противоположными знаками обеих поляризаций. Произвольным образом поляризованное входное излучение возбуждает локальные фундаментальные ТЕ- и ТМ-моды в двухмодовом волноводе. Далее эти моды распределяются по разным каналам, так как для ТЕ- и ТМ-волн выходные волноводы с наибольшей константой распространения различны.

Для стандартного Y-разветвителя на основе типового титан-диффузионного волновода в ниобате лития разделение поляризаций можно организовать способом введения электродов, с помощью которых меняется показатель преломления в рупорообразной части разветвителя и в выходных каналах вблизи области разветвления [4]. Другой способ основан на использовании в составе пространственного разделителя поляризаций волноводов с различными оптико-физическими параметрами. Это можно реализовать, используя единую технологию изготовления титан-диффузионных волноводов в ниобате лития, меняя геометрию шаблона и время диффузии [5] и формируя комбинированные составные волноводы, получаемые внедрением в ниобат лития различных диффузантов: титана, никеля и оксида магния [6]. Существует вариант разделителя поляризаций, в котором используется фотоиндуцированная анизотропия полимерного материала – основы канального Y-разветвителя [7].

На основе метода поляризационной селекции оптического излучения [8] может быть создано устройство для пространственного разделения ортогонально поляризованных мод. Метод разделения ТЕ- и ТМ-волн по разным каналам базируется на описанном выше принципе модовой селекции в асимметричном Y-разветвителе, однако модовое двулучепреломление можно организовать совершенно иным образом, т. е. подбором параметров волноводов на основе диэлектрических изотропных слоев. В работе [8] показано, что модовое двулучепреломление четырехслойного волновода, состоящего из слабо направляющего канала в стекле, покрытого тонкой изотропной диэлектрической пленкой с высоким показателем преломления, может привес-

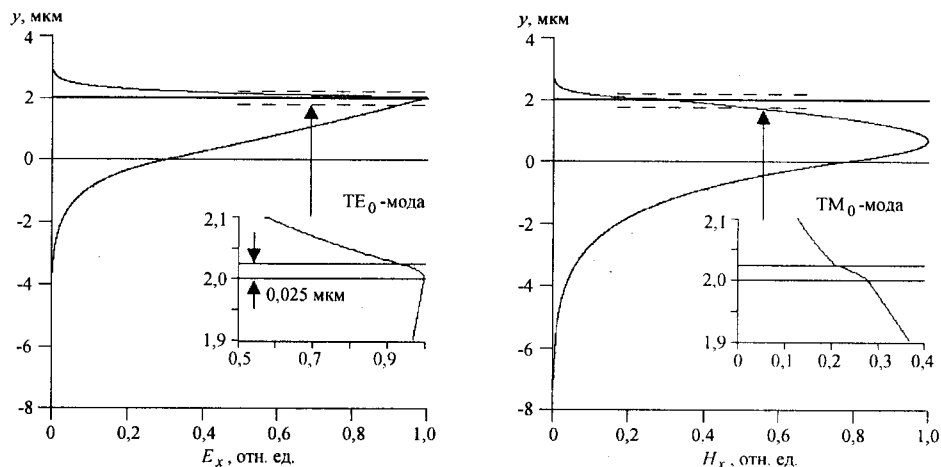


Рис. 1. Распределение полей TE_0 - и TM_0 -мод четырехслойного планарного волновода

ти к существенному разнесению в пространстве полей TE - и TM -мод (рис. 1). Это свойство и было использовано при создании универсальных TE - и TM -поляризаторов. Расчетные параметры волновода (см. рис. 1): показатель преломления подложки 1,51, волноводного канала 1,52, высокопреломляющей пленки 2,5. Толщина канала под пленкой 1,3 мкм, толщина пленки 0,03 мкм. Рабочая длина волны 0,63 мкм. Толщина пленки соответствует условию отсечки моды TE_1 четырехслойного волновода.

Конструкция предлагаемого поляризационного разделителя показана на рис. 2. Устройство представляет собой асимметричный Y -разветвитель на основе канальных волноводов в стекле, сформированных методом ионного обмена. Основной частью волноводной структуры является расширяющийся (по координате X) канальный волновод, начало и конец которого обозначены на рисунке как a и b . Входной и выходной канал 1 покрывается высокопреломляющей пленкой (показатель преломления $\sim 2,5$) определенной толщины для формирования области с резко различными константами распространения для обеих поляризаций. Таким образом, достигается условие $\beta_1^{(TE)} > \beta_2^{(TE)}$ для констант распространения TE -поляризованных волн.

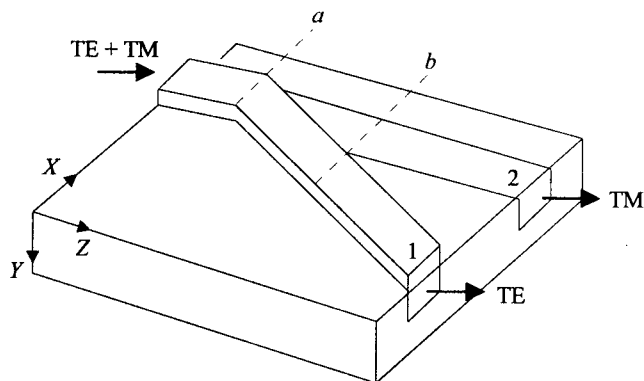


Рис. 2. Вид пространственного разделителя TE - и TM -волн на основе интегрально-оптического асимметричного Y -разветвителя

Чтобы выполнялось условие $\beta_1^{(\text{TM})} < \beta_2^{(\text{TM})}$ для ТМ-волн, выходное плечо разветвителя, не покрытое пленкой (см. рис. 2, канал 2), должно иметь несколько другие параметры, чем входной канал и другое плечо. Одно из простых решений состоит в некотором увеличении толщины волновода при равной ширине всех каналов. Указанные ограничения, накладываемые на константы распространения, приводят к необходимости поиска компромисса для одновременного выполнения обоих условий: $\beta_1^{(\text{TE})} > \beta_2^{(\text{TE})}$ и $\beta_1^{(\text{TM})} < \beta_2^{(\text{TM})}$. Простой вариант решения состоит в подборе толщины одного из выходных каналов.

Для подтверждения предлагаемого способа разделения поляризации и с целью определения параметров расщепителя теоретический анализ проводился с помощью метода распространяющегося пучка. Для большей наглядности был использован метод эффективного показателя преломления для сведения трехмерной задачи к двумерной, при этом исследуемая волноводная структура на основе канального волновода представляется в виде суперпозиции двух планарных волноводов.

Рассмотрим отдельно случай квази-ТЕ-волн. Согласно методу эффективного показателя преломления поперечную компоненту электрического поля разделим по поперечным пространственным координатам: $E_x = Y(y)X(x, z)$. Исходное волновое уравнение для квази-ТЕ-волн заменим двумя уравнениями:

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} + k_0^2 (n^2(y) - N^2) Y = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 X}{dz^2} + \frac{d^2 X}{dx^2} + k_0^2 n_{\text{экв}}^2(x, z) X = 0. \quad (2)$$

Уравнение (1) означает, что функция $Y(y)$ является решением волнового уравнения для ТЕ-мод с распределением показателя преломления по оси Y , описываемой функцией $n(y)$. Для входной секции разветвителя функция $Y(y)$ является распределением поля моды четырехслойного волновода и эквивалентный планарный волновод является трехслойным. $n_{\text{экв}}$ – распределение показателя преломления эквивалентного планарного волновода (по оси X). Для выходной части разветвителя уравнение (1) решается для каждого из каналов и эквивалентный волновод является пятислойным. Для трех- и четырехслойных частей рупорообразного сегмента разветвителя уравнение (1) необходимо решать отдельно. Функция $X(x)$ является решением волнового уравнения (2) в случае продольно-неоднородного волновода.

Аналогично для квази-ТМ-волн поперечная компонента H_x представляется как $H_x = Y(y)X(x, z)$, где функции $Y(y)$ и $X(x)$ являются соответственно решениями уравнений

$$n^2(y) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{n^2(y)} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) + k_0^2 (n^2(y) - N^2) Y = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 X}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} - \frac{1}{n_{\text{ЭКВ}}^2(x, z)} \frac{\partial n_{\text{ЭКВ}}^2(x, z)}{\partial x} \left(\frac{\partial X}{\partial x} \right) + k_0^2 n_{\text{ЭКВ}}^2(x, z) X = 0. \quad (4)$$

Функция $Y(y)$ в данном случае является решением волнового уравнения (3) для ТМ-мод.

Таким образом, трехмерная задача была сведена к двумерной. Y -разветвителю на основе канального волновода ставится в соответствие эквивалентный планарный волновод. Далее использовался анализ парааксиально распространяющегося пучка, основанный на введении медленно меняющегося волнового пакета с константой распространения $\beta = k_0 n_0$ (n_0 – средний эффективный показатель преломления). Исходная задача сводится к решению уравнений

$$2ik_0 n_0 \frac{\partial X}{\partial z} = \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + k_0^2 (n_{\text{ЭКВ}}^2(x, z) - n_0^2) X, \quad (5)$$

$$2ik_0 n_0 \frac{\partial X}{\partial z} = n_{\text{ЭКВ}}^2(x, z) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{n_{\text{ЭКВ}}^2(x, z)} \frac{\partial X}{\partial x} \right) + k_0^2 (n_{\text{ЭКВ}}^2(x, z) - n_0^2) X \quad (6)$$

для ТЕ- и ТМ-волн соответственно.

Уравнения (5) и (6) были решены конечно-разностным методом распространяющегося пучка [9] с прозрачными граничными условиями [10]. Расчетные параметры волноводной структуры такие же, как на рис. 1. Угол разветвления 2° . На рис. 3 показан профиль показателя преломления расширяющегося эквивалентного планарного волновода.

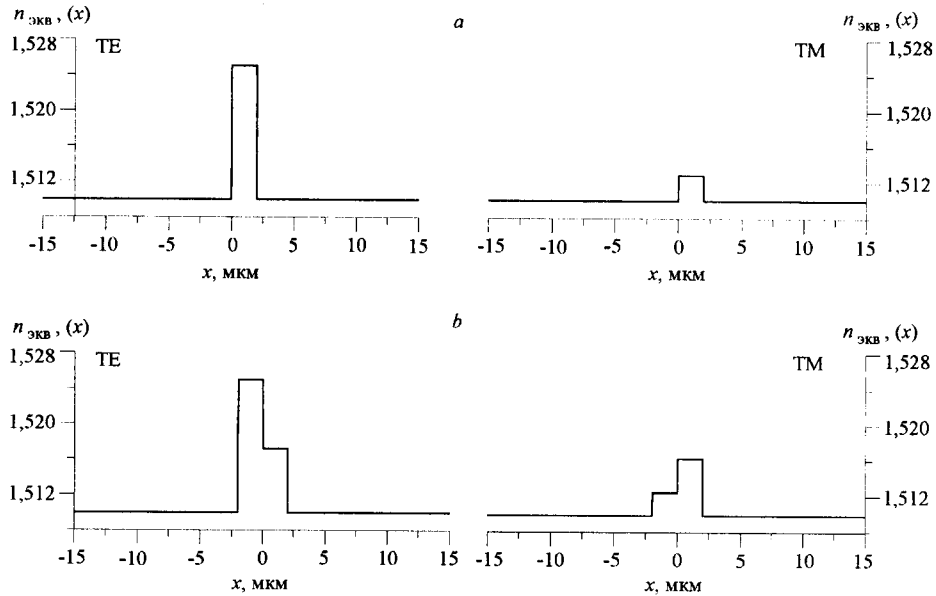


Рис. 3. Распределение показателя преломления эквивалентного планарного волновода поляризационного расщепителя пучка: на входе (а) и выходе (б) рупорообразного участка

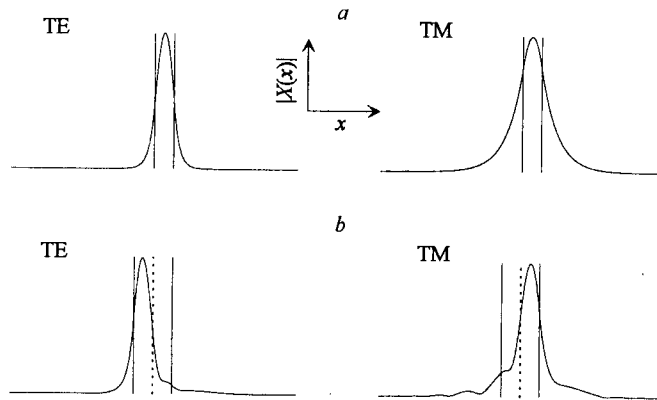


Рис. 4. Распределение полей ТЕ- и ТМ-волн: на входе (а) и выходе (б) рупорообразного участка расщепителя поляризаций

На рис. 4 показано распределение горизонтальной составляющей поля на входе и выходе рупорообразного участка поляризационного разделителя для ТЕ- и ТМ-волн при возбуждении входа данного участка его локальной собственной модой. Как видно, происходит разделение волн по разным каналам. На рис. 5 и рис. 6 показаны картины распространения направленных ТЕ- и ТМ-волн в Y-разветвителе на расстоянии 200 мкм вдоль оси Z (набор распределений модуля горизонтальной составляющей напряженности электрического и магнитного полей (для ТЕ- и ТМ-волн соответственно) по оси X). Эффективность развязки между каналами, определяемая по отношению мощностей волноводных мод на выходе каналов 1 и 2, составляет 28 дБ для ТЕ-поляризованных волн и 25 дБ для ТМ-поляризованных волн; вносимые потери для обеих поляризаций не превышают 0,05 дБ.

Таким образом, на основе асимметричного Y-разветвителя с использованием канальных волноводов в стекле, покрытых высокопреломляющей диэлектрической пленкой, может быть создано эффективное устройство для пространственного разделения различных поляризационных компонент

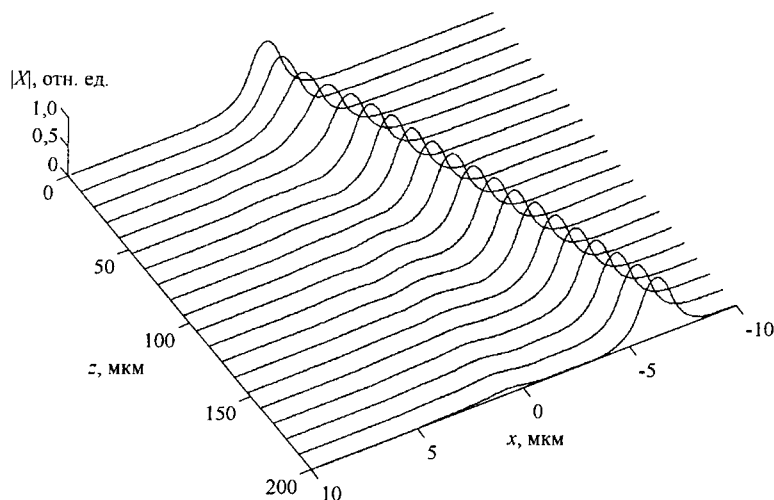


Рис. 5. Картина распространения ТЕ-волн

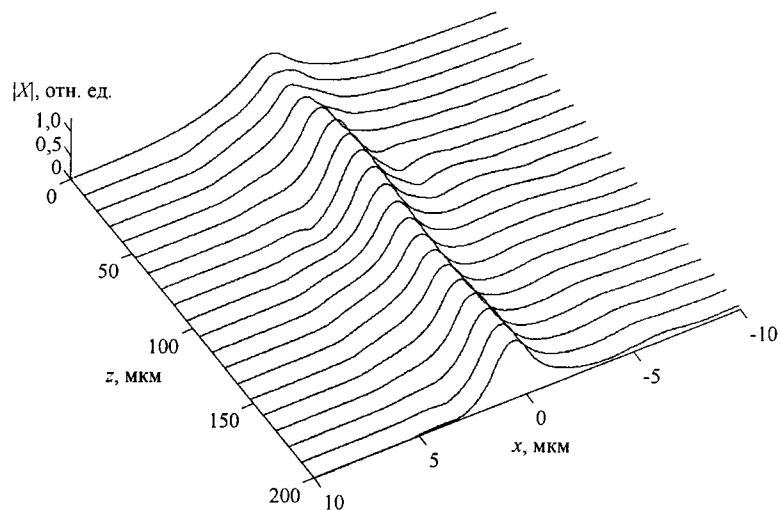


Рис. 6. Картина распространения ТМ-волн

оптического излучения с эффективностью развязки между каналами более 25 дБ практически при отсутствии вносимых потерь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Miliou A. N., Srivasta R., Ramaswamy R. V.** A 1.3 μm directional coupler polarization splitter by ion exchange // Journ. Lightwave Technol. 1993. **11**, N 2. P. 220.
2. **Maruyama H., Haruna M., Nishinara H.** TE-TM mode splitter using directional coupling between heterogeneous waveguides in LiNbO₃ // Journ. Lightwave Technol. 1995. **13**, N 7. P. 1550.
3. **Burns W. K., Milton A. F.** Mode conversion in planar dielectric separating waveguides // IEEE Journ. Quant. Electron. 1975. **11**, N 1. P. 32.
4. **Masuda M., Yip G. L.** An optical TE-TM mode splitter using an LiNbO₃ branching waveguide // Appl. Phys. Lett. 1980. **37**, N 1. P. 20.
5. **Van der Tol J. J., Laarhuis J. H.** A polarization splitter on LiNbO₃ using only titanium diffusion // Journ. Lightwave Technol. 1991. **9**, N 7. P. 879.
6. **Wei P. K., Wang W. S.** A TE-TM mode splitter on LiNbO₃ using Ti, Ni, and MgO diffusions // IEEE Photon. Technol. Lett. 1994. **6**, N 2. P. 245.
7. **Lee S.-S., Garner S., Steier W., Shin S.-Y.** Integrated optical polarization splitter based on photobleaching-induced birefringence in azo dye polymers // Appl. Opt. 1999. **38**, N 3. P. 530.
8. **Векшин М. М., Гладкий В. П., Никитин В. А., Яковенко Н. А.** Интегрально-оптические поляризаторы на основе многослойных диэлектрических волноводов // Автоматрия. 1998. № 5. С. 58.
9. **Huang W. P., Xu C. L.** Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method // IEEE Journ. Quant. Electron. 1993. **29**, N 10. P. 2639.
10. **Hadley R. G.** Transparent boundary condition for beam propagation method // IEEE Journ. Quant. Electron. 1992. **28**, N 1. P. 363.

Кубанский государственный университет,
E-mail: vekshin@phys.kubsu.ru

Поступила в редакцию
29 июля 2003 г.