

УДК 621.383

М.М. Векшин, О.А. Кулиш, Ф.Г. Хисамов, Н.А. Яковенко**АДИАБАТИЧЕСКИЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛИТЕЛИ
ТЕ/ТМ-ВОЛН**

Предложены интегрально-оптические разделители ТЕ- и ТМ-волн на основе ионообменных волноводов в стекле с использованием дополнительных пленок нанометровой толщины. Принцип действия разделителей поляризаций основан на модовом двулучепреломлении в асимметричных канальных Y-разветвителях с покровными слоями из высокопреломляющего диэлектрического изотропного материала. Приведены результаты расчета параметров разделителей поляризаций конечно-разностным методом распространяющегося пучка и картины распространения направленных ТЕ- и ТМ-волн в Y-разветвителе. Эффективность развязки между каналами разделителей составляет 28 дБ для ТЕ-поляризованных волн и 25 дБ для ТМ-поляризованных волн, вносимые потери для обеих поляризаций не превышают 0,05 дБ.

Интегральная оптика; поляризационный расщепитель; модовое двулучепреломление; метод распространяющегося пучка.

M.M. Vekshin, O.A. Culish, F.G. Khisamov, N.A. Yacovenko**ADIABATIC INTEGRATED-OPTIC TE/TM SPLITTERS**

Integrated-optic TE/TM mode polarization splitters, based on ion-exchange waveguides in glass with additional nanometer-size films, are proposed. The splitters working principle is based on modal birefringence of asymmetric Y-splitters with cladding layers of high-index dielectric isotropic material.

The results of parameters calculation, made by finite-difference beam propagation method, are presented. The splitting ratio between channels is 28 dB for TE-polarized waves and 25 dB for TM-polarized waves, inserted losses for both polarizations are less than 0.05 dB.

Integrated optics; polarization splitter; modal birefringence; beam propagation method.

Для поляризационно-независимого детектирования и поляризационно-разнесенного мультиплексирования в волоконно-оптических системах телекоммуникаций и обработки сигналов 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 для той поляризационной составляющей, которую планируется перевести в другой канал. Способы разнесения констант распространения для 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 2 различных по параметрам одномодовых канала, то существует возможность пространственного разделения мод. Количественно для определения условий такого перераспре-

деления направленных волн вводится коэффициент модового преобразования MCF (mode conversion factor), $MCF = (\beta_1 - \beta_2) / \vartheta \gamma$, где β_1, β_2 – константы распространения волноводных мод в выходных каналах 1 и 2, ϑ – угол разветвления, а параметр γ определяется следующим образом:

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

где 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. Для разделения поляризаций данный принцип используется следующим образом. В области разветвления формируется двухмодовый рупорообразный участок, который далее разделяется на 2 одномодовых канала. Коэффициент MCF должен быть достаточно большим ($\gg 0.43$), но противоположного знака для ортогональных поляризаций. Произвольным образом поляризованное входное излучение возбуждает локальные фундаментальные TE- и TM-моды в двухмодовом волноводе. Далее эти моды распределяются по разным каналам, так как для TE- и TM-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 путем введения электродов, с помощью которых меняется показатель преломления в рупорообразной части разветвителя и в выходных каналах вблизи области разветвления [4]. Другой способ разделения поляризаций основан на использовании волноводов с различными оптико-физическими параметрами. Это можно реализовать, как на основе единой технологии изготовления титан-диффузионных волноводов в ниобате лития, меняя геометрию шаблона и время диффузии [5], так и формированием комбинированных составных волноводов, получаемых 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 предложенного нами метода поляризационной селекции оптического излучения [8] может быть создано устройство для пространственного разделения ортогонально поляризованных мод. В основе метода разделения TE- и TM-волн по разным каналам лежит описанный выше принцип модовой селекции в асимметричном Y-разветвителе, однако модовое двулучепреломление можно организовать совершенно иным образом – путем подбора параметров волноводов на основе диэлектрических изотропных слоев. Ранее в работе [8] было показано, что модовое двулучепреломление четырехслойного волновода, состоящего из слабо-направляющего канала в стекле, покрытого тонкой изотропной диэлектрической пленкой с высоким показателем преломления, может приводить к существенному разнесению в пространстве полей TE- и TM-мод (рис. 1), что было использовано для создания универсальных TE- и TM-поляризаторов.

Расчетные параметры волновода: 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 TE₁ четырехслойного волновода.

Конструкция предлагаемого поляризационного разделителя показана на рис. 2.

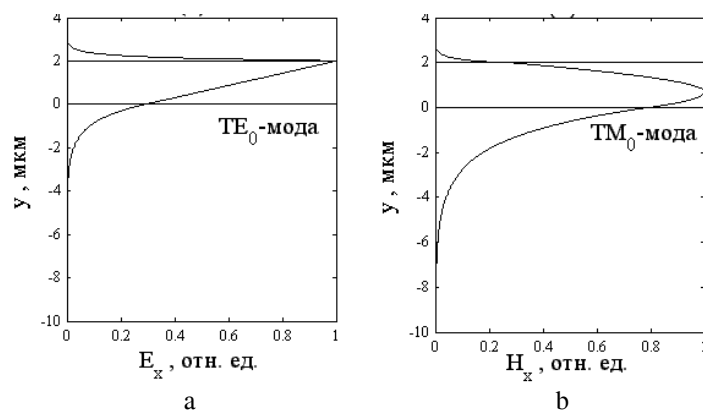


Рис. 1. Распределение полей TE_0 -моды и TM_0 -моды ((a) и (b), соответственно) четырехслойного планарного волновода

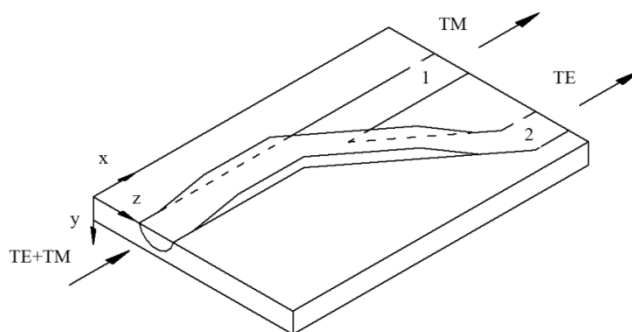


Рис. 2. Схематический вид пространственного разделителя TE/TM -волн на основе интегрально-оптического асимметричного Y -разветвителя

Устройство представляет собой асимметричный Y -разветвитель на основе канальных волноводов в стекле, сформированных методом ионного обмена. Часть входного канала и выходного канала 1 разветвителя покрывается высокопреломляющей пленкой (показатель преломления ~ 2.5) определенной толщины для формирования области с резко различными константами распространения для обеих поляризаций. Базовый принцип работы разветвителя основан на том, что фундаментальные TE и TM -моды в четырехслойном волноводе можно разделить в пространстве (в покровной пленке и под ней) и, следовательно, адиабатически развести далее по разным выходным каналам. Так как на моду с TM поляризацией диэлектрическая пленка не влияет, то TM поляризованное излучение распространяется по волноводу под пленкой и выходит в первый выходной канал разветвителя, TE поляризованное излучение направляется по диэлектрической пленке во второй выходной канал.

Для того чтобы иметь возможность сопрягать ответвитель с волоконно-оптическими световодами с достаточно малыми потерями, входное и выходное излучение необходимо локализовать именно в волноводах в стекле. Поэтому во входном волноводе и в выходном волноводе 1 часть покровной пленки должна быть нанесена в форме клина по высоте. За счет этого TE -поляризованное излучение, введенное в волновод, эволюционно переходит без потерь в верхний слой пленки. Аналогично, после разделения поляризаций необходимо вернуть TE -поляризованное излучение обратно в канал 2 в стекле.

Для обеспечения функционирования разветвителя необходимо, чтобы волновод в стекле, покрытый высокопреломляющей диэлектрической пленкой имел константу распространения ТЕ-моды канала 2, большую чем константа распространения той же моды у канала 1: $\beta_2^{(TE)} > \beta_1^{(TE)}$. Для выполнения другого условия $\beta_2^{(TM)} < \beta_1^{(TM)}$, накладываемого на константы распространения ТМ-волн, выходное плечо разветвителя, не покрытое пленкой, должно иметь несколько другие параметры, чем входной канал и другое плечо. Указанные ограничения, накладываемые на константы распространения, приводят к необходимости поиска компромисса для одновременного выполнения обоих условий – $\beta_2^{(TE)} > \beta_1^{(TE)}$ и $\beta_2^{(TM)} < \beta_1^{(TM)}$.

Для адиабатического перевода ТЕ-поляризованного излучения в пленку из канала в стекле на входе разделителя поляризаций и обратно в канал в стекле в выходном волноводе 2 может быть использован другой способ: высокопреломляющая пленка может образовывать не клин по вертикальной оси, а иметь рупорообразную форму, изменяясь по ширине относительно центра канала. Конструкция такого варианта пространственного разделителя поляризаций показана на рис. 3.

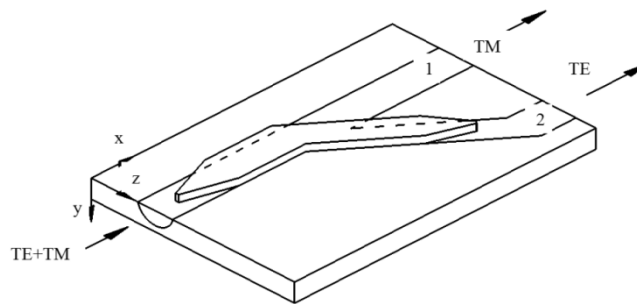


Рис. 3. Схема 2-го варианта интегрально-оптического разделителя ТЕ/ТМ-волн с покровным слоем переменной ширины

Для подтверждения предлагаемого способа разделения поляризаций и с целью определения параметров расщепителя теоретический анализ проводился с использованием метода распространяющегося пучка. Для большей наглядности был использован метод эффективного показателя преломления для сведения трехмерной задачи к двумерной. При использовании метода эффективного показателя преломления исследуемая волноводная структура на основе канального волновода представлялась в виде суперпозиции двух планарных волноводов. Расчет производился для 1-го варианта конструкции расщепителя, в котором ширина пленки над волноводом принималась равной ширине самого волновода. Клинообразные волноводные сегменты не учитывались. При расчете принималось, что увеличение толщины пленки происходит очень медленно, поэтому разделение ТЕ и ТМ-мод в вертикальной плоскости четырехслойного прямолинейного волновода идет без потерь оптической энергии.

Рассмотрим отдельно случай квази-ТЕ-волн. Согласно методу эффективного показателя преломления, поперечную компоненту электрического поля можно разделить по поперечным пространственным координатам:

$$E_x = Y(y) X(x, z).$$

Исходное волновое уравнение для квази-ТЕ-волн можно заменить двумя уравнениями:

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

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

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. $n_{\text{экс}}$ – 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 четырехслойной части рупорообразного сегмента разветвителя уравнение (1) необходимо решать отдельно. Функция $X(x)$ является решением волнового уравнения (2) для продольно-неоднородного волновода.

Аналогично, для квази-ТМ-волн поперечная компонента H_x представляется так:

$$H_x = Y(y)X(x, z),$$

где функции $Y(y)$ и $X(x)$ являются, соответственно, решениями уравнений:

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

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

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 ставился в соответствии эквивалентный планарный волновод. В дальнейшем использовался анализ параксиально 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 сводилась к решению уравнений:

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

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

для ТЕ- и ТМ-волн, соответственно.

Уравнения (5) и (6) были решены конечно-разностным методом распространяющегося пучка [9] с прозрачными граничными условиями [10]. При расчете был использован угол разветвления 2° . Параметры эквивалентного планарного волновода: показатель преломления подложки 1.51, волноводного канала в стекле 1.52, высокопреломляющей пленки 2.5. Толщина канала под пленкой 1.3 мкм. Толщина выходного канала без пленки 2 мкм, толщина пленки 0.03 мкм. Рабочая длина волны 0.63 мкм.

На рис. 4 и 5 показаны картины распространения направленных ТЕ- и ТМ-волн в Y-разветвителе на расстояние 200 мкм вдоль оси “Z” – набор распределений модуля горизонтальной составляющей напряженности электрического и магнитного поля (для ТЕ- и ТМ-волн, соответственно) по оси “X”.

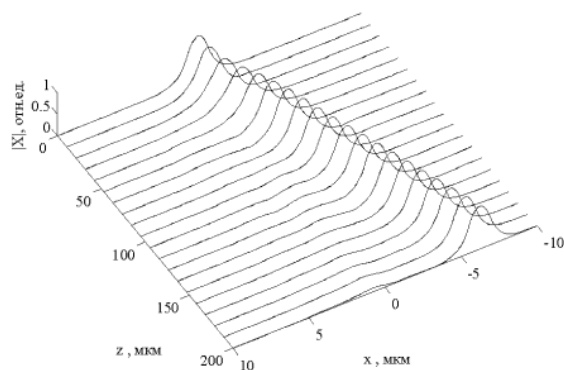


Рис. 4. Картина распространения ТЕ-волны в расщепителе

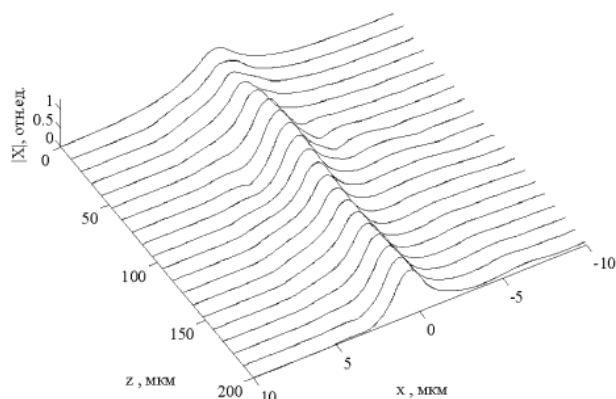


Рис. 5. Картина распространения ТМ-волны в расщепителе

Эффективность расщепления поляризаций контролируется по коэффициенту развязки между каналами. Он определяется как

$$\eta = \frac{P_{out}^{(1)}}{P_{out}^{(2)}},$$

где $P_{out}^{(1)}$, $P_{out}^{(2)}$ – мощности волноводных мод на выходе каналов 1 и 2, соответственно. Эффективность развязки между каналами 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 оптического излучения с эффективностью развязки между каналами более 25 дБ практически при отсутствии вносимых потерь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Miliou A.N., Srivasta R., Ramaswamy R.V. A 1.3 μm directional coupler polarization splitter by ion exchange // J. Lightwave Technol. – 1993. – Vol. 11, № 2. – P. 220-225.

2. *Maruyama H., Haruna M., Nishinara H.* TE-TM mode splitter using directional coupling between heterogeneous waveguides in LiNbO₃ // J. Lightwave Technol. – 1995. – V.13, № 7. – P. 1550-1554.
3. *Burns W.K., Milton A.F.* Mode conversion in planar dielectric separating waveguides // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1975. – Vol. 11, № 1. – P. 32-39.
4. *Masuda M., Yip G.L.* An optical TE-TM mode splitter using an LiNbO₃ branching waveguide // Applied Physics Letters. – 1980. – Vol. 37, № 1. – P. 20-22.
5. *Van der Tol J.J., Laarhius J.H.* A polarization splitter on LiNbO₃ using only titanium diffusion // Journal of Lightwave Technol. – 1991. – Vol. 9, № 7. – P. 879-886.
6. *Wei P.K., Wang W.S.* A TE-TM mode splitter on LiNbO₃ using Ti, Ni, and MgO diffusions // IEEE Photonics Technology Letters. – 1994. – Vol. 6, № 2. – P. 245-248.
7. *Lee S.-S., Garner S., Steier W., Shin S.-Y.* Integrated optical polarization splitter based on photobleaching-induced birefringence in azo dye polymers // Applied Optics. – 1999. – Vol. 38, № 3. – P. 530-533.
8. *Векшин М.М., Гладкий В.П., Никитин В.А., Яковенко Н.А.* Интегрально-оптические поляризаторы на основе многослойных диэлектрических волноводов // Автометрия. – 1998. – № 5. – С. 58-65.
9. *Huang W.P., Xu C.L.* Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1993. – Vol. 29, № 10. – P. 2639-2649.
10. *Hadley R.G.* Transparent boundary condition for beam propagation method // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1992. – Vol. 28, № 1. – P. 363-370.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор О.А. Акаткин.

Векшин Михаил Михайлович – Кубанский государственный университет; e-mail: vekshin@mail.ru; 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149; тел.: 88612199566; кафедра оптоэлектроники; к.ф.-м.н.; доцент.

Яковенко Николай Андреевич – e-mail: yna@phys.kubsu.ru; кафедра оптоэлектроники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Кулиш Ольга Александровна – Филиал Военной академии связи г. Краснодар; e-mail: culish_olga@mail.ru; 350035, г. Краснодар, ул. Красина, 4; тел.: 89615213577; кафедра криптографических средств защиты информации и математических основ криптологии; старший преподаватель; к.ф.-м.н.; доцент.

Хисамов Франгиз Гильфанетдинович – e-mail: kiiz@rambler.ru; тел.: 88612523031; кафедра специальной связи; д.т.н.; профессор.

Vekshin Mikhail Mikhailovich – Kuban State University; e-mail: vek-shin@mail.ru; 149, Stavropolskaya street, Krasnodar, 350040, Russia; phone: +78612199566; the department of optoelectronics; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Yacovenko Nickolay Andreevich – e-mail: yna@phys.kubsu.ru; the department of optoelectronics; head the department; dr. of eng. sc.; professor.

Culish Olga Aleksandrovna – Branch of the Military Academy of Communications, Krasnodar; e-mail: culish_olga@mail.ru; 4, Krasin street, Krasnodar, 350035, Russia; phone: +79615213577; the department of cryptographic systems for information protection and mathematical foundations of cryptology; senior lecturer; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Khisamov Frangiz Gilfanetdinovich – Branch of the Military Academy of Communications, Krasnodar; e-mail: kiiz@rambler.ru; phone: +78612523031; the department of special communications; dr. of eng. sc.; professor.