

Устойчивый к погрешностям изготовления интегральный поляризационный делитель на основе каскада интерферометров Маха–Цендера

А.Ю.Кошелев, А.Ю.Гольцов

Представлена конструкция устойчивого к погрешностям изготовления поляризационного делителя на основе каскада интерферометров Маха–Цендера. Использование данной конструкции позволяет в 2–3 раза (по уровню 20 дБ) увеличить допустимую погрешность в набеге фаз по сравнению с единичным интерферометром. В качестве примера приведен численный расчет прибора на основе планарного волновода из Si_3N_4 для центральной длины волны 650 нм. Допустимые отклонения ширины канальных волноводов от расчётных значений составляют $\sim 8\%$ (~ 30 нм) для ТЕ поляризации и $\sim 30\%$ (100 нм) для ТМ поляризации (по уровню 20 дБ для коэффициента экстинкции).

Ключевые слова: интегральная оптика, поляризационный делитель, интерферометр Маха–Цендера, нитрид кремния, метод распространения пучка (ВРМ).

1. Введение

Одним из ограничений приборов на основе интегральной оптики является их поляризационная чувствительность, которая, например, в демультимплексорах и спектрометрах-на-чипе приводит к неоднозначности восстановления спектра излучения [1, 2]. Одним из способов преодоления поляризационной чувствительности является создание отдельных интегрально-оптических схем для каждой из поляризаций [3]. Центральным элементом данного подхода – интегрально-оптический поляризационный делитель.

Для создания поляризационных делителей используются различные структуры: многомодовые интерференционные элементы [4], направленные ответвители [5, 6], интерферометры Маха–Цендера (ИМЦ) [7], фотонные кристаллы [8] и т. д. В основном подобные приборы предназначены для применений в области кремниевой фотоники и работают на длине волны 1.5 мкм. Одним из недостатков таких приборов является их чувствительность к погрешностям изготовления. Значительный интерес представляет их использование в видимом диапазоне длин волн, что с практической точки зрения означает переход к волноводам с меньшим контрастом (скачком показателя преломления). Это приводит к уменьшению двулучепреломления и еще больше затрудняет разделение поляризаций. Чувствительность приборов к погрешностям изготовления при этом только возрастает, что вызывает необходимость индуцировать двулучепреломление при помощи дополнительного травления [9] или нанесения металла [10]. Задачей настоящей работы была разработка конструкции устойчивого к погрешностям изготовления

поляризационного делителя для видимого света на планарном волноводе с умеренным контрастом (нитрид кремния, $n_{\text{core}} = 2$, $n_{\text{clad}} = 1.45$) при помощи структур с одной глубиной травления и без использования дополнительных структур на поверхности волноводного слоя.

За основу прибора был взят поляризационный делитель на основе ИМЦ [7]. Для уменьшения чувствительности к погрешностям несколько таких интерферометров объединялись в каскад при помощи направленных ответвителей. Данный подход применялся ранее для создания устойчивых к погрешностям изготовления делителей света [11] и интерливеров [12].

2. Устройство поляризационного делителя

Схема стандартного поляризационного делителя на основе ИМЦ приведена на рис. 1. Свет поступает в поляризационный делитель по одному из каналов и разделяется на две равные части при помощи направленного ответвителя, который часто заменяют многомодовым интерференционным элементом. Канальные волноводы в плечах ИМЦ имеют одинаковую длину, но разную ширину. Отметим, что в таком приборе двулучепреломление усиливается за счет различия в зависимостях эффективных показателей преломления волноводных ТЕ и ТМ мод от ширины канального волновода. Параметры волново-

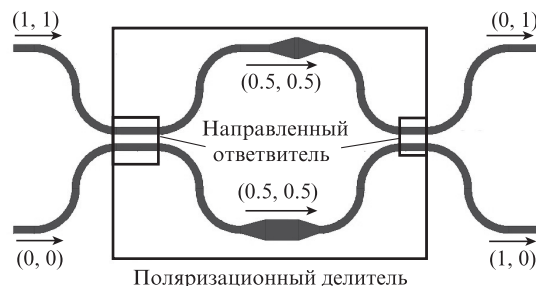


Рис. 1. Принципиальная схема стандартного поляризационного делителя на основе ИМЦ. Цифры в скобках – относительная доля света в данном волноводе для ТМ и ТЕ поляризаций.

А.Ю.Кошелев, А.Ю.Гольцов. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: koshelev@phystech.edu, goltsovalalexander@gmail.com

Поступила в редакцию 28 августа 2013 г., после доработки – 9 октября 2013 г.

дов подбираются такими, чтобы разность набега фаз в плечах интерферометра составляла 2π для ТМ поляризации и π для ТЕ поляризации. Таким образом, свет с ТМ поляризацией перейдет в перекрестный канал, а ТЕ поляризация останется в прямом. Подобная структура позволяет добиться высоких коэффициентов экстинкции, однако она очень чувствительна к погрешностям изготовления, которые приводят к изменению разности набега фаз в плечах интерферометра.

В предыдущих работах для компенсации изменения разности набега фаз в плечах интерферометра предлагалось использовать нагреватели [13]. Этот подход, однако, заметно усложняет прибор. Для уменьшения чувствительности поляризационного делителя мы предлагаем объединить 4 интерферометра в каскад. При этом будем использовать интерферометры и направленные ответвители, выбирая надлежащим образом набеги фаз и коэффициенты деления. Предположим сначала, что коэффициенты деления для обеих поляризаций одинаковы, а разность набега фаз различна и может быть произвольной. (На самом деле коэффициент деления для ТЕ поляризации меньше, чем для ТМ, однако, как будет показано далее, это приведет только к повышению устойчивости системы.) Задача заключается в подборе таких коэффициентов деления и разностей набега фаз, при которых деление поляризаций будет наименее чувствительно к погрешности в разности набега фаз ~ 1 рад. Для упрощения оптимизации было решено использовать два типа направленных ответвителей с коэффициентами деления $K_{1,2} = \sin^2(2\pi\theta_{1,2})$, где $\theta_{1,2}$ – угловые коэффициенты деления, и одинаковые интерферометры с разностью набега фаз φ . При этом было выбрано антисимметричное расположение интерферометров. Блок-схема прибора приведена на рис.2.

Функции преобразования направленного ответвителя и интерферометра имеют вид

$$\begin{pmatrix} E_0^{\text{out}} \\ E_1^{\text{out}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -i \sin \theta \\ -i \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0^{\text{in}} \\ E_1^{\text{in}} \end{pmatrix} = A(\theta) \begin{pmatrix} E_0^{\text{in}} \\ E_1^{\text{in}} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} E_0^{\text{out}} \\ E_1^{\text{out}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-i\varphi} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0^{\text{in}} \\ E_1^{\text{in}} \end{pmatrix} = B(\varphi) \begin{pmatrix} E_0^{\text{in}} \\ E_1^{\text{in}} \end{pmatrix},$$

где $E_{0,1}^{\text{in}}$ и $E_{0,1}^{\text{out}}$ – амплитуды излучения в нулевом и первом каналах на входе и выходе соответственно; θ – угловой коэффициент деления.

Пусть на входе все излучение находится в нулевом канале. Тогда функция преобразования прибора

$$\begin{pmatrix} E_0^{\text{out}} \\ E_1^{\text{out}} \end{pmatrix} = A(\theta_1) B(-\varphi) A(\theta_2) B(-\varphi) A(\theta_1) B(\varphi) \times A(\theta_2) B(\varphi) A(\theta_1) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

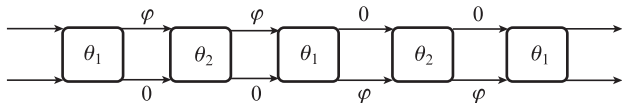


Рис.2. Блок-схема ИМЦ. Направленные ответвители обозначены прямоугольниками, где θ_1 и θ_2 – угловые коэффициенты деления. Стрелками обозначены плечи интерферометра; φ и 0 – разности фаз.

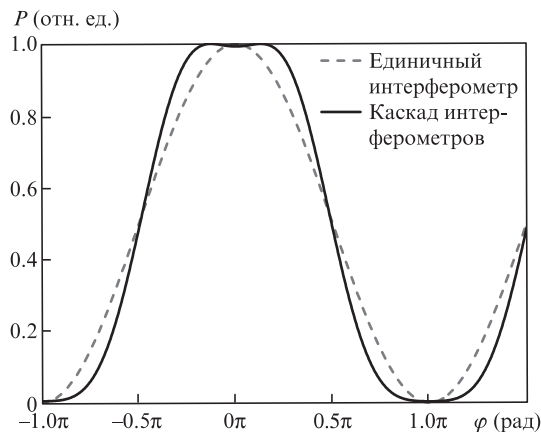


Рис.3. Зависимости мощности излучения в перекрестном канале от разности набега фаз в ИМЦ для единичного интерферометра и каскада интерферометров.

Мощность излучения в прямом канале $P_0 = |E_0^{\text{out}}|^2$, а в перекрестном, следовательно, $P_1 = 1 - P_0$.

Для анализа зависимости сигналов в выходных каналах от разности набега фаз с целью поиска пиков со сглаженными вершинами были выбраны параметры $\theta_1 = 0.29$ рад и $\theta_2 = 0.4$ рад. Полученная при этом зависимость мощности в перекрестном канале от разности набега фаз приведена на рис.3. Для сравнения здесь приведена зависимость $P(\varphi)$ для стандартного поляризационного делителя. Видно, что в районе пиков, где происходит полное разделение поляризаций, зависимость функции пропускания для каскада интерферометров более плавная.

На рис.4 представлена зависимость коэффициента экстинкции от ошибки в разности набега фаз в интерферометре (номинальный набег фазы для прямого канала равен π , для перекрестного – 0). Видно, что допустимое отклонение в разности набега фаз по уровню 20 дБ для каскада интерферометров составляет ± 0.39 рад (ТЕ поляризация) и ± 0.61 рад (ТМ поляризация). Для стандартного интерферометра допустимое отклонение равно ± 0.20 рад. Таким образом, применение каскада интерферометров позволило повысить допустимую погрешность изготовления в 2–3 раза.

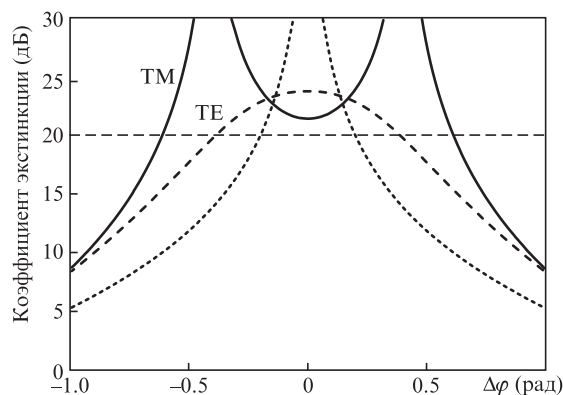


Рис.4. Зависимости коэффициента экстинкции от девиации разности набега фаз в интерферометре. Допустимое отклонение (по уровню 20 дБ для коэффициента экстинкции) для каскада интерферометров (сплошная и штриховая кривые) составляет ± 0.39 рад (ТЕ поляризация) и ± 0.61 рад (ТМ поляризация). Для стандартного интерферометра (пунктир) допустимое отклонение равно ± 0.20 рад.

3. Численный расчет и обсуждение результатов

Для демонстрации метода были проведены расчеты предложенной конструкции поляризационного делителя с центральной длины волны 650 нм, изготовленного на основе стандартного планарного волновода из Si₃N₄ ($n \sim 2$) с толщиной волноводного слоя 160 нм. Канальные волноводы образованы травлением на всю толщину волноводного слоя, чтобы избежать неопределённости, связанных с погрешностями по глубине травления. В качестве верхнего и нижнего обкладочных слоев использовался SiO₂ ($n \sim 1.45$). Для расчета эффективных показателей преломления мод применялся метод распространения пучка (BPM). Результаты расчета приведены на рис.5.

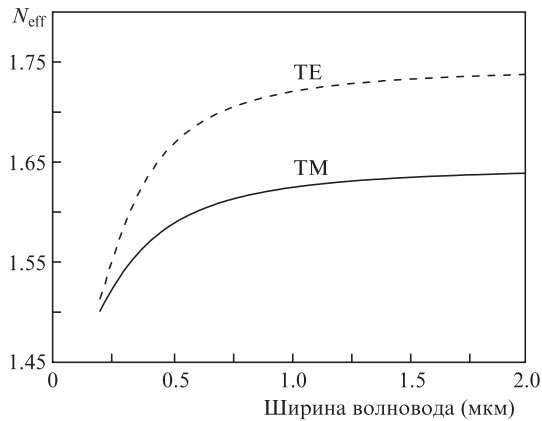


Рис.5. Зависимости эффективного показателя преломления от ширины канального волновода.

С учетом набега фаз в интерферометре для ТЕ и ТМ поляризаций имеем

$$n^{TE}(w_1)L_1 - n^{TE}(w_2)L_2 = \lambda/2, \tag{2}$$

$$n^{TM}(w_1)L_1 - n^{TM}(w_2)L_2 = 0,$$

где $w_{1,2}$ – ширины волноводов; $L_{1,2}$ – их длины.

Решения этого уравнения для различных пар w_1 и w_2 приведены на рис.6. Основным источником ошибок при изготовлении канальных волноводов является отклонение их ширин от расчётных. Характерное изменение разности набега фаз было вычислено как среднее квадратичное от её изменения при увеличении и уменьшении ширин волноводов на 10%. Исходя из практических соображений – достаточно большие ширины волноводов, небольшая длина плеч интерферометра, устойчивость к изменению ширины – были выбраны значения $w_1 = 445$ нм, $w_2 = 370$ нм, $L_1 = 29.7$ мкм, $L_2 = 30$ мкм. Зависимости разности набега фаз от девиации ширин волноводов приведены на рис.7.

Изменение ширин волноводов приводит к изменению коэффициентов деления направленных ответвителей. При выборе параметров направленного ответвителя d, l для заданного коэффициента деления (d – расстояние между волноводами, l – длина взаимодействия) предпочтительнее меньшие длины, т.к. при этом увеличивается спектральный диапазон прибора. С практической точки зрения эффективная длина взаимодействия ограничивается радиусами подводящих искривленных волноводов. В данном случае мы выбрали радиус 60 мкм, чтобы избежать потерь на поворотах. Параметры d, l также зависят от ширин волноводов. Для каждого значения d существует опти-

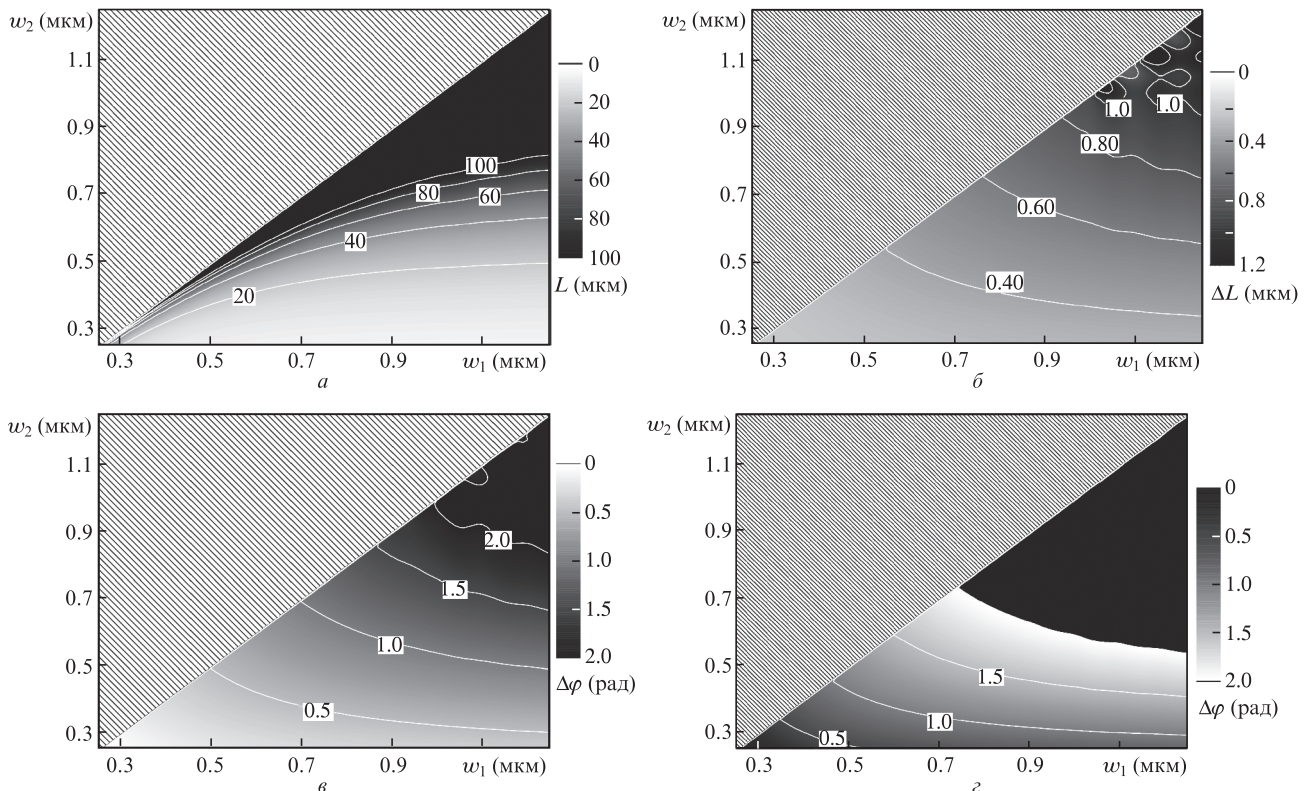


Рис.6. Средняя длина плеч интерферометра $L = (L_1 + L_2)/2$ (а) и разность длин плеч $\Delta L = (L_1 - L_2)/2$ (б) как функции ширин волноводов w_1 и w_2 , а также характерное изменение разности набега фаз в плечах интерферометра при изменении w_1 и w_2 на 10% для ТМ (в) и ТЕ (г) поляризаций.

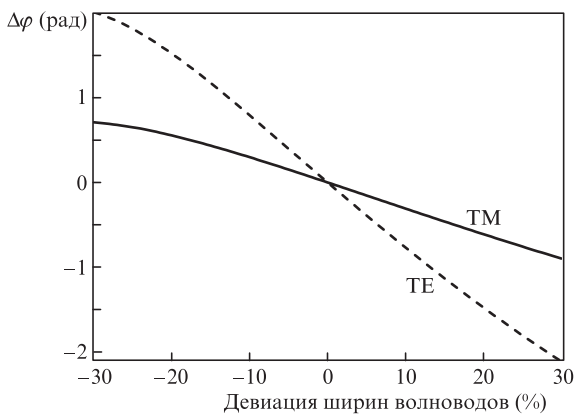


Рис.7. Зависимости изменения набега фаз в интерферометре при девиации ширин волноводов.

мальная ширина волновода, при которой коэффициент обмена будет минимальным, и в случае выбора такой ширины погрешность в ширине волновода в первом приближении не приводит к изменению коэффициента деления. Руководствуясь этими соображениями, мы выбрали следующие параметры направленных ответвителей: $d_1 = d_2 = 370$ нм, $l_1 = 0.13$ мкм, $l_2 = 2.71$ мкм при $w_1 = w_2 = 370$ нм. Зависимости коэффициентов деления $K_{1,2} = \sin^2(\theta_{1,2})$ и вычисленные по формуле (1) зависимости коэффициента экстинкции от девиации ширины волновода приведены на рис.8 и 9.

Отметим, что конструкция устойчивого к ошибкам изготовления поляризационного делителя подразумевает увеличение его длины примерно в 4 раза по сравнению с обычным делителем. Это может привести к росту потерь. В поляризационном делителе их можно условно разделить на два типа: потери в канальных волноводах (затухание в материале, рассеяние на шероховатостях вертикальных стенок) и потери на элементах конструкции. Потери в канальном волноводе зависят от качества изготовления; их характерные значения составляют 0.5–1 дБ/см [14, 15], что приводит к незначительным (менее 0.1 дБ) потерям на длине поляризатора (~700 мкм). Потери на элементах конструкции состоят из потерь на криволинейных участках и на адиабатических расширениях волновода. Поскольку предполагается, что ширины волноводов из-за ошибок изготовления изменяются равномерно (плавно в пределах изготавливаемой структуры), то

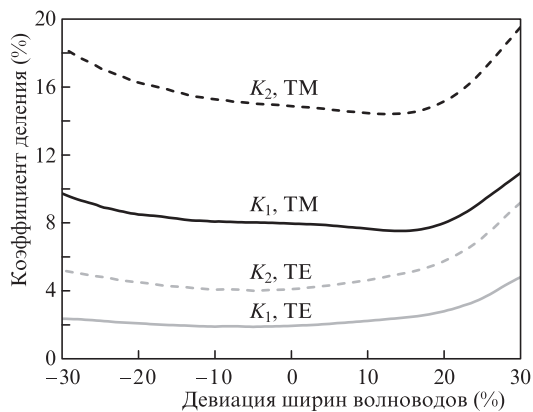


Рис.8. Зависимости коэффициентов деления направленных ответвителей от девиации ширин волноводов для света TE и TM поляризаций.

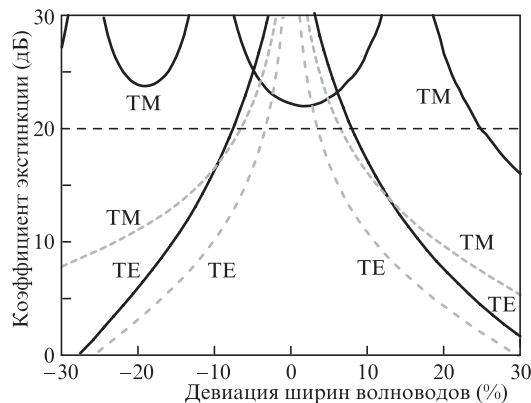


Рис.9. Зависимости коэффициента экстинкции от девиации ширин волноводов с учетом изменения коэффициента деления направленных ответвителей. Допустимая девиация ширины (по уровню 20 дБ для коэффициента экстинкции) для каскада интерферометров (сплошные кривые) составляет $\pm 7.6\%$ (TE поляризация) и $\sim \pm 30\%$ (TM поляризация). Для стандартного интерферометра (штриховые кривые) допустимая девиация равна $\pm 3.3\%$ (TE поляризация) и $\pm 6.2\%$ (TM поляризация).

изменение потерь на элементах структуры будет связано, в основном, с отклонением ширин криволинейных волноводов от оптимальной для данного радиуса поворота. Расчет обусловленных этим дополнительных потерь света с TE и TM поляризациями при переходе к предложенной конструкции приведен на рис.10. Видно, что дополнительные потери не превышают 0.7 дБ, что вполне приемлемо. Разумеется, потери могут быть уменьшены за счет увеличения радиусов кривизны и длин адиабатических переходов.

На рис.11 представлены результаты моделирования данной структуры при помощи BPM-кода. Заметим, что из-за наличия в рассматриваемой структуре углов распространения света, отличных от нуля, расчет распространения света должен давать в общем случае менее точные результаты, чем формула (1).

Стоит отметить, что используемое в численном расчете предположение о равномерном изменении ширин волноводов как источнике ошибки может не выполняться в реальном процессе изготовления. Однако применение каскада интерферометров, как следует из рис.4, позволяет получить лучшие результаты независимо от причины отклонений разности набега фаз в интерферометре.

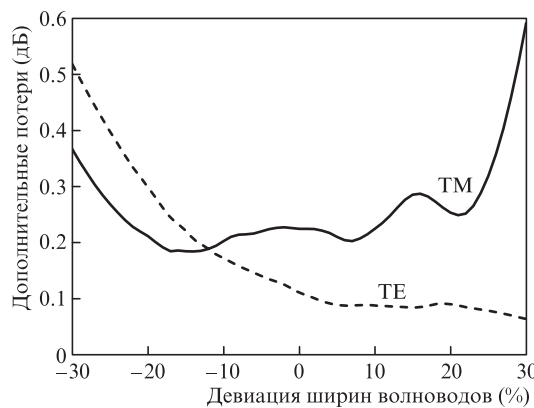


Рис.10. Зависимости дополнительных потерь света TE и TM поляризации при переходе к предложенной конструкции поляризационного делителя от девиации ширин волноводов.

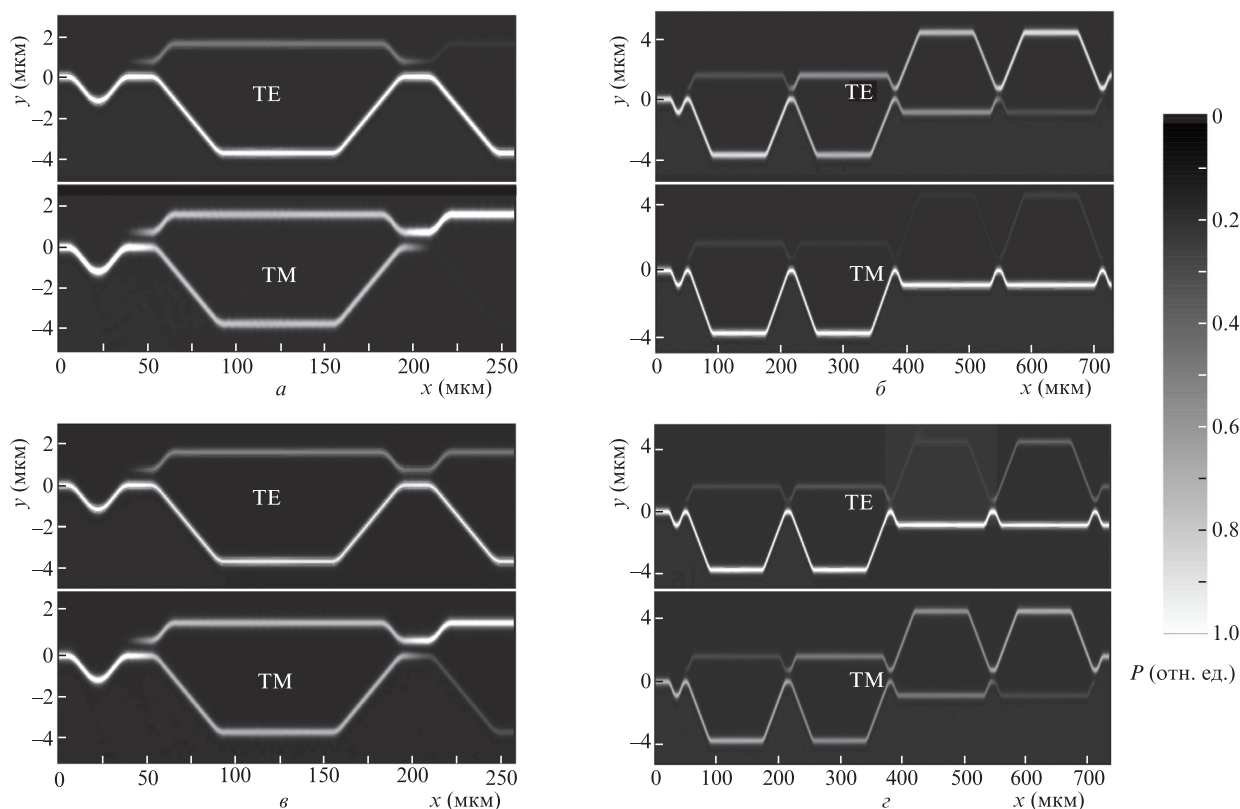


Рис. 11. Результаты моделирования распространения мощности света P по стандартному поляризационному делителю с номинальными параметрами (а), по каскаду интерферометров с номинальными параметрами (б) и по стандартному поляризационному делителю и каскаду интерферометров в случае, когда все ширины волноводов уменьшены на 20% (в и з соответственно).

4. Заключение

Представлена конструкция устойчивого к погрешностям изготовления поляризационного делителя на основе каскада интерферометров Маха–Цендера. Использование данной конструкции позволяет увеличить допустимую погрешность в набеге фазы в интерферометре в 2 раза для света ТЕ поляризации и в 3 раза для света ТМ поляризации по сравнению с единичным интерферометром.

В качестве примера применения данного подхода приведен численный расчет прибора для центральной длины волны 650 нм на основе планарного волновода из Si_3N_4 . Допустимое отклонение ширины канального волновода составляет 7.6% (~ 30 нм) для ТЕ поляризации и $\sim 30\%$ (100 нм) для ТМ поляризации (по уровню 20 дБ для коэффициента экстинкции).

Показано, что увеличение суммарной длины прибора (до ~ 1 мм) по сравнению с обычными делителями приводит к незначительному (менее 1 дБ) возрастанию потерь.

Применение предложенного подхода для расчета поляризационных делителей позволяет упростить создание поляризационно-нечувствительных приборов на волноводах с умеренным контрастом для видимого и ближнего ИК диапазонов.

Работа выполнена при поддержке фонда «Сколково» (грант № 86).

1. Sherwood N., Nitkowski A., Preston K., Berkeley A., Schmidt B.S., Hajian A. *Conf. Advanced Photonics 2013*. OSA Techn. Dig.(online) (Opt. Soc. Am., 2013, paper IW4A.6).
2. Peroz C., Calo C., Goltsov A., Dhuey S., Koshelev A., Sasorov P., Ivonin I., Babin S., Cabrini S., Yankov V. *Opt. Lett.*, **37**, 695 (2012).
3. Barwicz T., Watts M.R., Popovic P.A., Rakich P.T., Socci L., Kartner F.X., Ippen E.P., Smith H.I. *Nat. Photonics*, **1**, 57 (2007).
4. Hong J.M., Ryu H.H., Park S.R., Jeong J.W., Lee S.G., Lee E.-H., Park S.-G., Woo D., Kim S., O B.-H. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 72 (2003).
5. Augustin L.M., van der Tol J.J.G.M., Hanfoug R., De Laat W.J.M., et al. *J. Lightwave Technol.*, **25**, 740 (2007).
6. Dai D., Bowers J. *Opt. Express*, **19**, 18614 (2011).
7. Dai D., Wang Z., Peters J., Bowers J.E. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **24**, 673 (2012).
8. Shi Y., Dai D., He S. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **19** (11), 825 (2007).
9. Watts M.R., Haus H.A., Ippen E.P. *Opt. Lett.*, **30**, 967 (2005).
10. Albrecht P., Hamacher M., Heidrich H., Hoffmann D., Nolting H., Weinert C.M. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **2**, 114 (1990).
11. Chang S.-J., Liu K.-W. *Opt. Eng.*, **51** (9), 094603 (2012).
12. Cherchi M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **23**, 1752 (2006).
13. Dai D., Wang Z., Bowers J.E. *J. Lightwave Technol.*, **29** (12), 1808 (2011).
14. Romero-Garcia S., Merget F., Zhong F., Finkelstein H., Witzens J. *Opt. Express*, **21**, 14036 (2013).
15. Gorin A., Jaouad A., Grondin E., Aimez V., Charette P. *Opt. Express*, **16**, 13509 (2008).