

Численное моделирование делителя поляризации в конфигурации направленного разветвителя с нулевым зазором на основе тонких пленок нитрида кремния

© И.В. Кузнецов, А.С. Перин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634034 Томск, Россия

e-mail: anton.s.perin@tusur.ru

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

В окончательной редакции 06.10.2023 г.

Принята к публикации 30.10.2023 г.

Представлены результаты численного моделирования делителя поляризации на основе тонких пленок нитрида кремния в конфигурации направленного разветвителя с нулевым зазором. Длина области двухмодовой интерференции делителя составила $14.5 \mu\text{m}$. Величина переходной помехи равняется -15 dB для ТМ-моды и -10.4 dB для ТЕ-моды. Коэффициент передачи составил 43%.

Ключевые слова: нитрид кремния, делитель поляризации, направленный разветвитель, двухмодовая интерференция, фотонная интегральная схема.

DOI: 10.61011/OS.2023.11.57020.5003-23

Делитель поляризации (ДП) — пассивное оптическое устройство, выполняющее пространственное разделение ТЕ- и ТМ-мод. ДП может использоваться как элемент в системах связи, использующих разделение каналов по поляризации или в качестве элемента фотонной интегральной схемы (ФИС), обеспечивающего стыковку поляризационно-зависимых элементов ФИС [1–3].

Наибольшее распространение получили интегральные поляризационные делители на платформе кремний на изоляторе (SOI) [1–3]. Платформа SOI обеспечивает малые потери на рассеяние излучения в оболочку за счет высокого контраста показателей преломления. Также одним из преимуществ SOI является совместимость с CMOS-технологиями. Недостаток платформы SOI заключается в непрозрачности кремния в видимой части оптического спектра, что не позволяет использовать ФИС на базе SOI в устройствах, использующих видимый свет [4–6]. Кроме того, в кремнии могут возникать нелинейные оптические потери, вызываемые двухфотонным поглощением в ближнем инфракрасном диапазоне [6–8].

Таким образом, актуальной задачей является исследование применения альтернативных материалов для разработки и производства пассивных элементов ФИС. Одним из перспективных соединений является нитрид кремния (Si_3N_4). Как и кремний, Si_3N_4 является CMOS-совместимым материалом, но не подвержен двухфотонному поглощению, обладает более широким спектром оптической прозрачности, меньшей шероховатостью стенок [6]. В настоящее время Si_3N_4 используется при создании различных пассивных элементов ФИС, например, таких как кольцевые резонаторы, конверторы мод, элементы ввода-вывода, оптические фильтры и др. [9].

Целью настоящей работы является численное моделирование делителя поляризации на основе гребен-

чатых волноводов из тонких пленок Si_3N_4 . Основная задача — определение конфигурации, соответствующей наибольшей эффективности деления, наименьшей длине и переходной помехе.

Из литературы известны способы реализации интегральных поляризационных делителей на основе направленных разветвителей [10,11]. Направленный разветвитель представляет из себя два волновода, имеющих участок связи длиной L и характеризующихся расстоянием между волноводами вдоль участка связи (w_g). Схема такого разветвителя представлена на рис. 1, *a*.

В настоящей работе рассматривается поляризационный делитель на основе модифицированной схемы направленного разветвителя, отличающейся тем, что вместо двух близко расположенных параллельных волноводов, между которыми наблюдается перетекание мод, формируется один волновод, ширина которого в 2 раза превышает ширину входных и выходных волноводов (w).

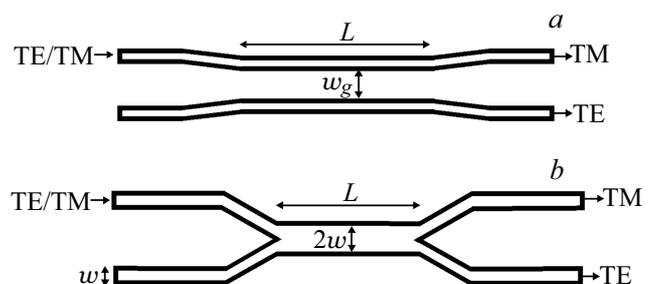


Рис. 1. Типовые схемы делителя поляризации: *a* — поляризационный делитель на основе традиционного направленного разветвителя, *b* — поляризационный делитель на основе направленного разветвителя с нулевым зазором.

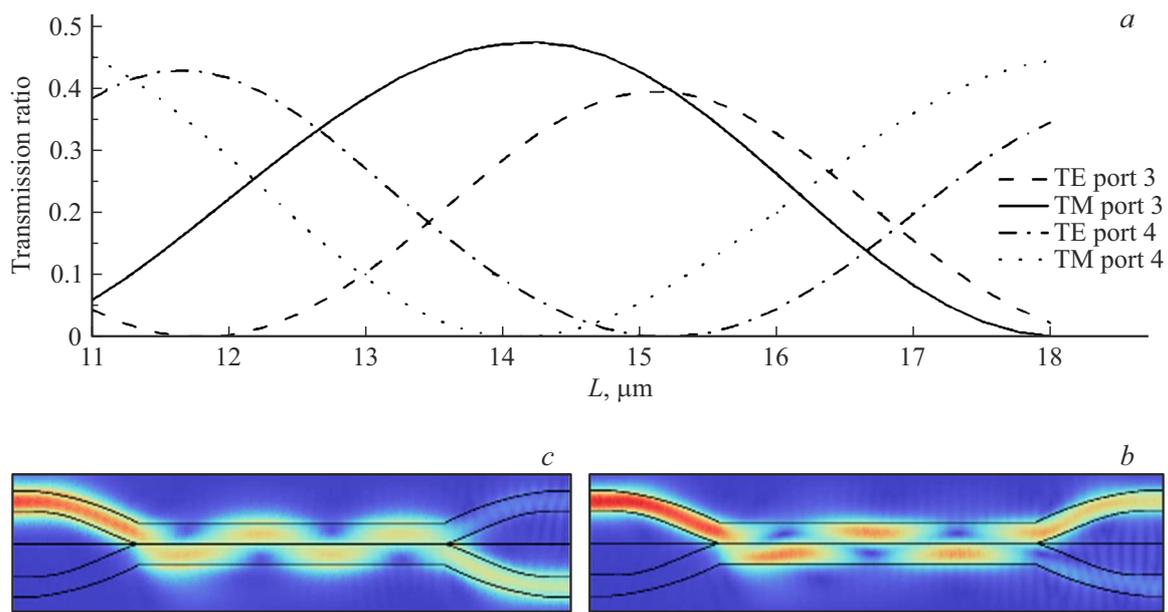


Рис. 2. Результаты численного моделирования: *a* — зависимость коэффициента передачи портов от типа моды и длины зоны двухмодовой интерференции, *b* — расчет распространения ТЕ-моды при длине зоны двухмодовой интерференции 14.5 μm , *c* — расчет распространения ТМ-моды при длине зоны двухмодовой интерференции 14.5 μm .

Таблица 1. Параметры моделирования

Параметр	Значение параметра
Ширина волновода w , nm	600
Высота волновода, nm	800
Показатель преломления Si_3N_4	2 [15]
Показатель SiO_2	1.44 [16]
Длина волны излучения, μm	1.55

Таблица 2. Результаты расчетов длин связи

$n_{\text{ef}}^{\text{TE0}}$	$n_{\text{ef}}^{\text{TM0}}$	$n_{\text{ef}}^{\text{TE1}}$	$n_{\text{ef}}^{\text{TM1}}$	ΔN^{TE}	ΔN^{TM}	L_c^{TE}	L_c^{TM}
1.7823	1.8053	1.5746	1.5843	0.208	0.221	3.731 μm	3.507 μm

Схема такого поляризационного делителя представлена на рис. 1, *b*.

Одним из главных достоинств схемы поляризационного делителя на основе направленного разветвителя с нулевым зазором является отсутствие дополнительных внутренних стенок волнопроводов в области их связи. А шероховатостями границ раздела сред, как известно [12,13], обуславливается большая часть оптических потерь в гребенчатых волноводах, выполненных методом плазмохимического травления [14]. Эффект разделения поляризации в таком волноводе достигается за счет интерференции симметричной (фундаментальной) и асимметричной (моды первого порядка) мод [11]. Поскольку ТЕ- и ТМ-моды имеют разные эффективные показатели преломления (ЭПП), они формируют разные интерференционные картины, соответственно длина зо-

ны двухмодовой интерференции L определяет перетекание излучения в один из выходных волнопроводов.

Рассматриваемая модель поляризационного делителя построена на основе гребенчатых волнопроводов, сформированных из тонких пленок Si_3N_4 , окруженных диоксидом кремния (SiO_2). Параметры численного моделирования приведены в табл. 1.

Выбор параметров, приведенных в табл. 1, обусловлен существующими технологическими ограничениями и соответствует современным данным по изготовлению гребенчатых волнопроводов на основе Si_3N_4 [17,18].

Для расчета длин связи ТЕ- и ТМ-мод обратимся к формуле [10,11]

$$L_c^{\text{TE}} = \frac{\lambda}{2\Delta N^{\text{TE}}}, \quad L_c^{\text{TM}} = \frac{\lambda}{2\Delta N^{\text{TM}}},$$

где λ — длина волны, ΔN^{TE} , ΔN^{TM} — разница между ЭПП фундаментальной ТЕ/ТМ-моды и ЭПП ТЕ/ТМ-моды первого порядка соответственно. ЭПП мод были рассчитаны по методу конечных разностей [19]. Результаты расчетов длин связи приведены в табл. 2.

Реальная длина области двухмодовой интерференции может быть найдена по формуле [5]

$$L = mL_c^{\text{TE/TM}},$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$, $L_c^{\text{TE/TM}}$ — длина связи соответствующей моды.

При моделировании использовалось граничное условие, предотвращающее отражение излучения обратно от внешних границ модели. На рис. 2, *a* приведена зависимость коэффициента передачи выходных портов

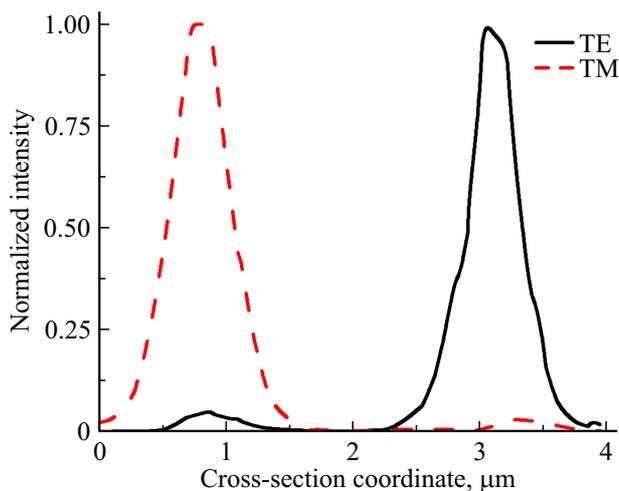


Рис. 3. Нормированное распределение интенсивности на выходном торце делителя поляризации для TE- и TM-мод.

от моды и длины зоны двухмодовой интерференции, полученная в результате численного моделирования. На рис. 2, *b* представлен расчет распространения света через делитель поляризации.

По рис. 2, *a–c* видно, что при длине зоны двухмодовой интерференции $L = 14.5 \mu\text{m}$ достигается разделение TE/TM-мод по разным портам. На рис. 3 приведено распределение интенсивности на выходном торце делителя поляризации для TE- и TM-мод при $L = 14.5 \mu\text{m}$.

Рассчитанная переходная погрешность для TM-моды составляет -15 dB , для TE-моды -10.4 dB , коэффициент передачи составил 43%. Полученные переходные погрешности превосходят результат, достигнутый аналогичной конфигурацией на основе ниобата лития [11]. Разработанная модель делителя поляризации может быть использована в дальнейшем для разработки ФИС на основе Si_3N_4 или гибридной платформы $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ [6].

Таким образом, была продемонстрирована возможность реализации делителя поляризации на основе гребенчатых волноводов из тонких пленок Si_3N_4 в конфигурации направленного разветвителя с нулевым зазором с длиной области двухмодовой интерференции, равной $14.5 \mu\text{m}$. Полученные переходные погрешности составили -15 dB для TM-моды и -10.4 dB для TE-моды.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2022-0004 „Исследование и разработка способов изготовления интегральных оптических волноводов и элементов на их основе“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C.W. Hsu, T.K. Chang, J.Y. Chen, Y.C. Cheng. *Appl. Optics*, **55** (12), 3313 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.003313
- [2] L. Liu, Y. Ding, K. Yvind, J.M. Hvam. *Optics Express*, **19** (13), 12646 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.012646
- [3] D. Dai, J.E. Bowers. *Optics Express*, **19** (19), 18614 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.018614
- [4] L. Matheus, A. Viera, L.F.M. Viera, M.A.M. Viera, O. Gnawali. *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, **21** (4), 3204 (2019). DOI: 10.1109/COMST.2019.2913348
- [5] H. Fukuzawa, J. Yoshinari, H. Hara, K. Sasaki, H. Take, M. Yoshida, T. Kikukawa. *AIP Advances*, **12** (6), 065029 (2022). DOI: 10.1063/5.0088842
- [6] T. Sharma, J. Wang, B.K. Kaushik, Z. Cheng, R. Kumar, Z. Wei, X. Li. *IEEE Access*, **8**, 195436 (2020). DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032186
- [7] A.Z. Subramanian, P. Neutens, A. Dhakal, R. Jansen, T. Claes, X. Rottenberg, F. Peyskens, S. Selvaraja, P. Helin, B. DuBois, K. Leysens, S. Severi, P. Deshpande, R. Baets, P. Van Dorpe. *IEEE Photonics. J.*, **5** (6), 2202809 (2013). DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2292698
- [8] H. Ying, S. Junfeng, L. Xianshu, L. Tsung-Yang, L. Guo-Qiang. *Opt. Express*, **22** (18), 21859 (2014).
- [9] D.J. Blumenthal, R. Heideman, D. Geuzebroek, A. Leinse, C. Roeloffzen. *Proc. IEEE*, **106** (12), 2209 (2018). DOI: 10.1109/JPROC.2018.2861576
- [10] M. Kuznetsov. *Optics Lett.*, **8** (9), 499 (1983). DOI: 10.1364/OL.8.000499
- [11] R. Sattibabu, P.K. Dey, B.N. Bhaktha, P. Ganguly. *Results in Optics*, **8**, 100262 (2022). DOI: 10.1016/j.rjo.2022.100262
- [12] F.P. Payne, J.P.R. Lacey. *Optical and Quantum Electronics*, **26**, 977 (1994). DOI: 10.1007/BF00708339
- [13] E. Jaberansary, T.M.B. Masaud, M.M. Milosevic, M. Nedeljko, G.Z. Mashanovich, H.M.H. Chong. *IEEE Photonics J.*, **5** (3), 6601010 (2013). DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2251869
- [14] B.E.E. Kastenmeier, P.J. Matsuo, G.S. Oehrlein. *J. Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, **17** (6), 3179 (1999). DOI: 10.1116/1.582097
- [15] H.R. Philipp. *J. Electrochemical Society*, **120** (2), 295 (1973). DOI: 10.1149/1.2403440
- [16] I.H. Malitson. *JOSA*, **55** (10), 1205 (1965). DOI: 10.1364/JOSA.55.001205
- [17] J.C. Mak, W.D. Sacher, H. Ying, X. Luo, P.G.Q. Lo, J.K. Poon. *Optics Express*, **26** (23), 30623 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.030623
- [18] Y. Chen, T.D. Bucio, A.Z. Khokhar, M. Banakar, K. Grabska, F.Y. Gardes, R. Halir, I. Molina-Fernández, P. Cheben, J.J. He. *Optics Lett.*, **42** (18), 3566 (2017). DOI: 10.1364/OL.42.003566
- [19] A.B. Fallahkhair, K.S. Li, T.E. Murphy. *J. Lightwave Technology*, **26** (11), 1423 (2008).