

基于混合表面等离子体弯曲波导的紧凑型宽带偏振分束转换器的设计研究

张 芳, 徐培鹏*, 徐铁峰

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 设计了一种宽带的基于混合表面等离子体弯曲波导的偏振分束转换器, 使用有限元法计算硅波导、混合表面等离子体波导的模式分布和有效折射率, 为器件建模仿真分析提供了依据. 使用时域有限差分法优化器件结构, 以获得最佳的性能参数. 由于混合表面等离子体波导的双折射增强, 设计获得的偏振分束转换器具有超小尺寸和宽带的工作特性. 仿真结果表明: 在 1 550 nm 的中心波长处消光比大于 23 dB, 插入损耗小于 0.8 dB; 在 80 nm 的带宽上, 横磁偏振光转换为横电偏振光的偏振转换效率大于 95%.

关键词: 集成光学器件; 偏振控制器件; 表面等离子体激元; 相位匹配

中图分类号: TN256

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 03-0045-05

基于绝缘体上硅(Silicon-on-insulator, SOI)的平面光子集成具有集成度高、制造成本低、与互补金属半导体氧化物(Complementary Metal-oxide-semiconductor, CMOS)兼容等优势, 引起了业界的极大关注, 普遍认为其具有实现大规模集成光路的潜力^[1]. 由于高折射率差, SOI 波导对光具有强限制能力, 有助于器件实现紧凑的结构尺寸和大规模集成度, 但其高双折射性质导致所有的硅纳米光子器件都存在偏振敏感问题. 目前常见的解决方案之一是利用固有的偏振无关器件以及引入片上偏振分集系统, 其中已被广泛应用的是偏振分束器(Polarization Beam Splitters, PBSs)^[2-4]、偏振旋转器(Polarization Rotators, PRs)^[5-7]和偏振分束转换器(Polarization Splitter-Rotators, PSRs)^[8-17]. 需要特别指出的是, 偏振分束转换器用于分离和转换 2 种正交偏振模式, 即横电(Transverse-electric, TE)和横磁(Transverse-magnetic, TM)偏振, 使用偏振分束转换器能够将 TM 模式光和 TE 模式光分开, 同时实现一种偏振向另一种偏振的波导模式转换. 因此, 整个器件只工作在一种偏振状态下, 从而使

其适合高密度集成的硅基光子集成回路.

通常情况下, 偏振分束转换器可以根据其工作机制分类为: 模式演变和模式耦合. 对于模式演变, TM 基模将转换为一阶 TE 模式, 然后通过非对称方向耦合器将一阶 TE 模式耦合为 TE 基模^[18-19]. 这种方案的主要缺点是绝热演变以器件尺寸为代价实现低插入损耗. 基于模式耦合的偏振分束转换器使用 TM 和 TE 之间的相位匹配条件来实现模式转换. 文献[20]提出了由 2 个平行的 SOI 线波导组成的偏振分束转换器, 但是该器件的耦合长度(L_c)为 36.8 μm . 利用槽型波导结构可降低耦合长度, 该结构将光场主要限制于槽周围, 刻蚀产生的槽波导侧壁粗糙带来的散射损耗将严重影响器件的性能^[13]. 亚波长光栅波导具有很强的各向异性和平坦色散, 并已经用于偏振分束转换器^[10,21]. 但是由于材料的固有局限性和弱的双折射性, 耦合长度仍有待进一步降低. 混合表面等离子体波导(Hybrid Plasmonic Waveguide, HPW)具有不同于传统介质波导的显著双折射效应, 在保持器件性能的同时还可以进一步减小器件尺寸^[22].

收稿日期: 2019-12-13.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(61875099, 61505092); 浙江省自然科学基金(LY18F050005); 宁波大学王宽诚幸福基金.

第一作者: 张芳(1994-), 女, 山东泰安人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 硅基偏振调控器件. E-mail: zhangfang_0123@163.com

*通信作者: 徐培鹏(1985-), 男, 浙江台州人, 副研究员, 主要研究方向: 集成光子器件. E-mail: xupeipeng@nbu.edu.cn

本文设计了一种利用介质波导(Dielectric Waveguide, DW)和HPW之间的弯曲方向耦合的偏振分束转换器. 当2种弯曲波导的相位匹配条件得以满足时, 通过交叉偏振耦合可以有效地实现TM和TE的转换. 本文所设计的器件具有高偏振转换效率(Polarization Conversion Efficiency, PCE)、高消光比和低插入损耗, 耦合长度约为 $12\ \mu\text{m}$.

1 器件设计

图1(a)显示了所研究器件的三维结构, 该器件由宽度分别为 W_1 和 W_2 的HPW和DW组成. SOI平台的硅厚度(H)为 $250\ \text{nm}$. 在HPW和DW中 SiO_2 作为覆盖层, 考虑到 SiO_2 层的厚度(h)影响光场限制和波导损耗, 取 $h=15\ \text{nm}$ 作为折中值. 金属层为Ag, 其厚度为 $h_m=90\ \text{nm}$. 为了实现有效模式耦合, 同时方便器件制作, 2个平行波导之间的间隙宽度 W_g 取 $150\ \text{nm}$. 弯曲方向耦合器中HPW和DW的弯曲半径分别为 R_1 和 R_2 , 圆心角为 θ , 解耦部分弯曲半径分别为 R_3 和 R_0 , 以确保可以最大程度上降低TM偏振光和TE偏振光的弯曲损耗(图1(b)). 仿真中使用的Ag、 SiO_2 和Si的折射率分别为 $0.143+11.364i$ ^[23]、 1.445 和 3.455 . 器件的上覆层为空气, 用于获取更高的TM-TE交叉偏振转换效率.

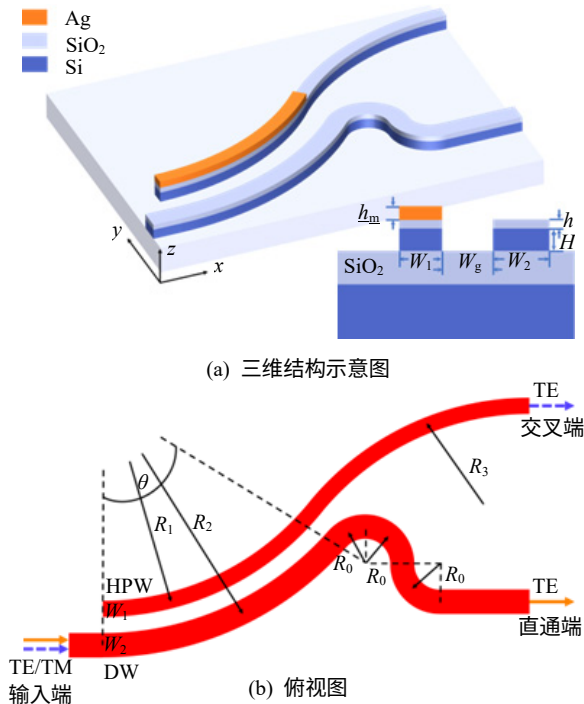


图1 偏振分束转换器

当平行波导相距较远时, 光信号各自独立地在相应的波导中传输, 此时平行波导之间没有发生模式耦合. 当平行波导间距慢慢缩小时, 相邻2条平行光波导发生倏逝波耦合, 即平行波导中发生能量交换. 满足模式匹配条件的平行波导, 经过一定的耦合长度, 一条波导中能量可以完全耦合到另一条波导中. 根据耦合模理论, 需要确定两波导结构参数使得某一模式匹配而另一模式失配. 使用有限元方法进行模式求解, 优化HPW和DW的波导宽度和弯曲半径, 以使DW中TM模式和HPW中TE模式具有等效的光程长度(Optical Path Lengths, OPL), 即满足相位匹配条件^[3,15,24]:

$$L_{\text{OPL}} = n_{1_TE} k_0 R_1 \theta = n_{2_TM} k_0 R_2 \theta, \quad (1)$$

式中: L_{OPL} 是光程长度; n_{1_TE} 和 n_{2_TM} 分别是HPW中基本TE模式和DW中基本TM模式的有效折射率; k_0 是真空中波数($k_0=2\pi/\lambda$); R_1 和 R_2 是弯曲半径, 用以确保降低TM偏振和TE偏振的弯曲损失, 使要耦合的偏振(例如此处的TE)的相位失配最大.

通过优化器件参数, 得到 $R_2=15\ \mu\text{m}$. 图2显示了当波导宽度不同时, TE和TM模式的光程长度 $L_{\text{OPL}}(\theta=1\ \text{rad})$. 其中DW_TM和DW_TE分别表示DW波导中TM和TE模式的光程长度, HPW_TM和HPW_TE分别表示HPW波导中TM和TE模式的光程长度. 为了满足相位匹配条件, 器件参数分别为 $W_1=377\ \text{nm}$, $W_2=500\ \text{nm}$, HPW的弯曲半径为 $R_1=R_2=(W_1+W_2)/2-W_g=14.4\ \mu\text{m}$, $L_{\text{OPL}}=111.2$. 在这种情况下, DW中的输入光TM偏振会高效地交叉耦合到HPW中, 并同时转换为TE偏振, 而2个波导之间的TM-TM耦合几乎被禁止. 而对于TE偏振, 等离子体激元波导具有强双折射, 使DW和HPW波导的TE模式无法满足相位匹配条件. 因此,

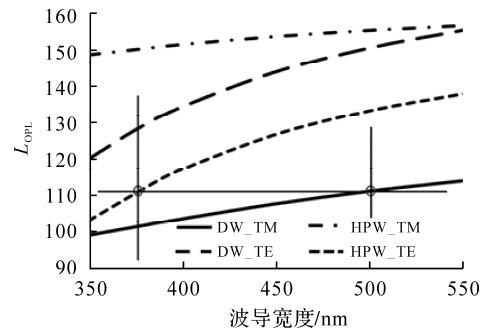


图2 硅基条形波导与混合表面等离子体波导中TE和TM模光程长度曲线

输入光几乎不会交叉耦合到相邻波导, 而是直接从直通端(Bar)输出。

耦合长度取决于耦合区域的圆心角(θ)。相应的耦合长度为 $L_c = R_1 \sin \theta = 12.28 \mu\text{m}$, 其中角度 θ 为 55° 。为了滤除不需要的 TM 偏振光, 并分离 2 个输出波导, S 形部分的弯曲半径为 $R_0 = 1 \mu\text{m}$ 。交叉端(Cross)端口弯曲波导的半径 $R_3 = 16 \mu\text{m}$, 以确保 TE 偏振和 S 形弯曲波导的损耗足够小。

2 器件性能分析

使用三维时域有限差分法建模仿真分析器件的光场传输特性。图 3 为所述偏振分束转换器在 1550 nm 中心波长下工作时 TE、TM 模式的光场传输。对于 TE 模式光的输入, 由于等离子体激元和弯曲结构引起的双折射, 相位失配非常明显, 因此大多数输入光在 DW 中传播, 而在耦合区域中从 DW 到 HPW 的交叉耦合很弱(图 3(a))。相比之下, 对于 TM 模式光的输入, DW 中的光通过 S 形弯曲波导逐渐转移到 HPW 中, 并转换为 TE 模式(图 3(b))。图 3(c)为在 TM 模式光输入时器件在不同位置横截面上的电场分布。在截面 i 中, DW 的模场分布主要以 TM 模式存在; 在截面 ii 中, 大部分光场仍存在于 DW 波导中, 此时有少部分光场能量倏逝耦合到 HPW 中; 在截面 iii 中, 大部分光场已从 DW 波导转换到 HPW 中; 当光传输到截面 iv 位置时, HPW 中越来越多的光场转换为 TE 模式; 在截面 v 中, 几乎所有光场都交叉耦合到 HPW 中, 实现了光场能量耦合到相邻波导, 并实现了模式的转换。决定偏振分束转换器性能的关键参数是偏振转换效率(P_{PCE}), 其计算公式为^[25]:

$$P_{\text{PCE}} = T_{\text{TE_Cross}} / (T_{\text{TE_Cross}} + T_{\text{TM_Bar}}), \quad (2)$$

式中: $T_{\text{TE_Cross}}$ 和 $T_{\text{TM_Bar}}$ 是 TM 模式输入时 TE 和 TM 模式分别在交叉端和直通端的透过。消光比(Extinction Ratio, ER)为同一输出端口上 2 个偏振模式之间的透过比, 其计算公式为:

$$E_{\text{ER_TM}} = 10 \log(T_{\text{TE_Cross}} / T_{\text{TM_Cross}}), \quad (3)$$

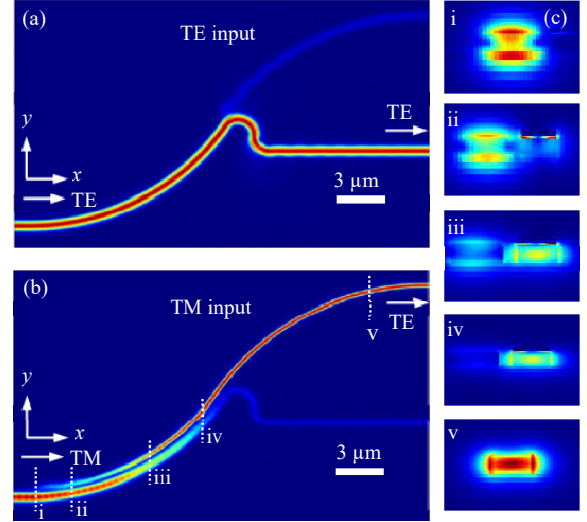
$$E_{\text{ER_TE}} = 10 \log(T_{\text{TE_Bar}} / T_{\text{TM_Bar}}), \quad (4)$$

式中: $T_{\text{TM_Cross}}$ 是 TM 模式输入时交叉端口处的透过; $T_{\text{TE_Bar}}$ 是 TE 模式输入时直通端端口处的透过。

插入损耗(Insertion Loss, IL)定义为:

$$I_{\text{IL_TM}} = -10 \log(T_{\text{TE_Cross}}), \quad (5)$$

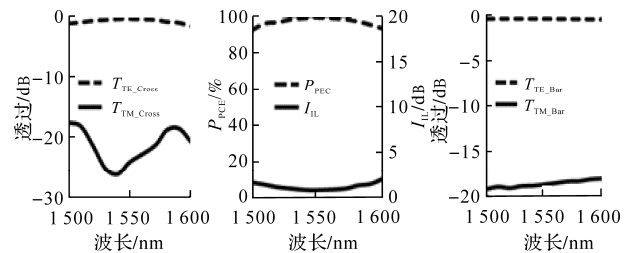
$$I_{\text{IL_TE}} = -10 \log(T_{\text{TE_Bar}}). \quad (6)$$



(a)为 TE 输入; (b)为 TM 输入;
(c)为 TM 模式下相应位置处的光场分布。

图 3 PSR 光场传输

图 4(a)和(b)分别为器件的 TE 和 TM 偏振光在交叉端和直通端端口处的透射光谱响应。对于 TM 模式输入, 高效的交叉耦合和模式转换(TM 到 TE)在 HPW 和 DW 相邻波导之间得以发生, 并且 $T_{\text{TM_Cross}}$ 和 $T_{\text{TE_Cross}}$ 与波长有关(图 4(a))。在波长为 $1505 \sim 1600 \text{ nm}$ 时, TM 模式的消光比高于 17 dB 。在 1550 nm 的中心波长处, TM 偏振光输入时的 P_{PCE} 高达 99.6% , $E_{\text{ER_TM}}$ 为 23.4 dB (图 4(b))。在波长为 $1510 \sim 1590 \text{ nm}$ 时, P_{PCE} 高于 95% , I_{IL} 低于 1.5 dB 。TE 偏振光输入时, 2 个波导之间的大相位失配表明, 耦合强度非常弱, 光没有发生耦合, 而是直接从直通端输出, 此时插入损耗非常低(图 4(c))。在波长为 $1500 \sim 1600 \text{ nm}$ 时, $E_{\text{ER_TE}}$ 超过 17 dB , 而 $I_{\text{IL_TE}}$ 低于 0.5 dB 。



(a) TM 输入传输响应 (b) TM 输入 P_{PCE} 和 I_{IL} 性能 (c) TE 输入传输响应

图 4 PSR 波长相关性

器件制备过程中首先用等离子体增强气相沉积,在SOI片上沉积SiO₂纳米层薄膜,然后采用电子束光刻和等离子体干法刻蚀得到硅波导;最后进行金属Ag的沉积和剥离,得到所需要的器件.考虑到在器件制作过程中波导宽度存在一定的偏差(ΔW),HPW和DW的宽度以及2个平行弯曲波导之间的距离应为 $W_1+\Delta W$ 、 $W_2+\Delta W$ 和 $W_g-\Delta W$.在这种情况下仿真该器件的性能,其制造容差如图5所示.从图5(a)可知, TM模式光输入时,由于HPW中TE模式的有效折射率对宽度变化较敏感,以及器件相位匹配条件不满足, ΔW 对传输有明显影响,在 ΔW 为 ± 10 nm时, E_{ER_TM} 高于16 dB, I_{IL_TM} 低于2.7 dB.对于TE模式,当 ΔW 为 ± 10 nm时,光场传输对 ΔW 不敏感, $E_{ER_TE} > 17$ dB, 且 $I_{IL_TE} < 0.42$ dB(图5(b)).

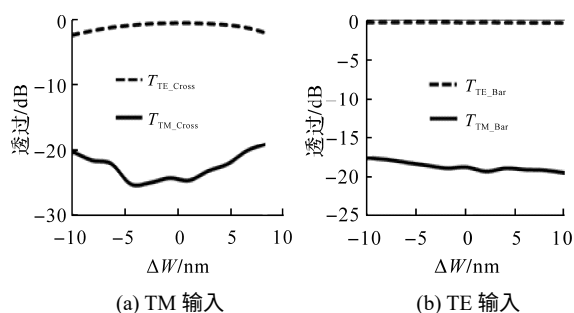


图5 PSR制作容差

表1为不同结构偏振分束转换器性能参数的对比结果.从表1可看出,本文设计的器件与已有的器件相比,在工作带宽、耦合长度、消光比及插入损耗上均有不同程度的优势,且各方面表现均衡,没有明显的短板.

表1 基于不同结构实现的偏振分束转换器性能参数对比

结构	工作带宽/nm	耦合长度/ μ m	消光比/dB	插入损耗/dB
本文设计	80	12.8	>17	<1.5
普通方向耦合器 ^[20]	常规波段	36.8	>12	0.6
锥形方向耦合器 ^[8]	常规波段	140.0	-	0.5
亚波长光栅耦合器 ^[10]	35	25.0	>10	0.4
双刻蚀方向耦合器 ^[17]	30	27.0	>20	<0.5
硅基弯曲方向耦合器 ^[15]	30	8.8	>18	<1.0

3 结论

本文设计了一种基于非对称弯曲方向耦合的等离子体辅助偏振分束转换器.通过适当优化耦

合区域的长度, TM偏振可以有效地交叉耦合为TE偏振, TE偏振直接传播到直通端,且几乎没有发生任何耦合.此外,波导宽度具有相当大的制造容差(大于 ± 10 nm).器件工作在1550 nm中心波长处,2种偏振的消光比大于23 dB,插入损耗小于0.8 dB.在波长为1510~1590 nm时, TM模式转换为TE模式的偏振转换效率大于95%.

参考文献:

- [1] Soref R. The past, present, and future of silicon photonics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(6):1678-1687.
- [2] Bai B W, Deng Q Z, Zhou Z P. Plasmonic-assisted polarization beam splitter based on bent directional coupling[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(7):599-602.
- [3] Dai D X, Bowers J E. Novel ultra-short and ultra-broadband polarization beam splitter based on a bent directional coupler[J]. Optics Express, 2011, 19(19):18614-18620.
- [4] Guan X W, Wu H, Shi Y C, et al. Ultracompact and broadband polarization beam splitter utilizing the evanescent coupling between a hybrid plasmonic waveguide and a silicon nanowire[J]. Optics Letters, 2013, 38(16):3005-3008.
- [5] Guan H, Ma Y J, Shi R Z, et al. Ultracompact silicon-on-insulator polarization rotator for polarization-diversified circuits[J]. Optics Letters, 2014, 39(16):4703-4706.
- [6] Chen L, Doerr C R, Chen Y K. Compact polarization rotator on silicon for polarization-diversified circuits[J]. Optics Letters, 2011, 36(4):469-471.
- [7] Aamer M, Gutierrez A M, Brimont A, et al. CMOS compatible silicon-on-insulator polarization rotator based on symmetry breaking of the waveguide cross section[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(22):2031-2034.
- [8] Ding Y H, Liu L, Peucheret C, et al. Fabrication tolerant polarization splitter and rotator based on a tapered directional coupler[J]. Optics Express, 2012, 20(18):20021-20027.
- [9] Xiong Y L, Xu D X, Schmid J H, et al. Fabrication tolerant and broadband polarization splitter and rotator based on a taper-etched directional coupler[J]. Optics Express, 2014, 22(14):17458-17465.
- [10] Xiong Y L, Wangüemert-Pérez J G, Xu D X, et al. Polarization splitter and rotator with subwavelength

- grating for enhanced fabrication tolerance[J]. Optics Letters, 2014, 39(24):6931-6934.
- [11] He Y, Zhang Y, Wang X D, et al. Silicon polarization splitter and rotator using a subwavelength grating based directional coupler[EB/OL]. [2019-10-12]. http://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=7bc7ed909fecb12092e4c07e2d2e4d6d&site=xueshu_seDaiDX,Bowers JE.Novelconceptforultracompactpolarizationsplitter-rotator based on silicon nanowires.
- [12] Fei Y H, Zhang L B, Cao T T, et al. Ultracompact polarization splitter-rotator based on an asymmetric directional coupler[J]. Applied Optics, 2012, 51(34): 8257-8261.
- [13] Tan K, Huang Y, Lo G Q, et al. Compact highly-efficient polarization splitter and rotator based on 90° bends[J]. Optics Express, 2016, 24(13):14506-14512.
- [14] Zhang Y, He Y, Jiang X H, et al. Ultra-compact and highly efficient silicon polarization splitter and rotator[J]. APL Photonics, 2016, 1(9):091304-1-6.
- [15] Bai B W, Liu L, Zhou Z P. Ultracompact, high extinction ratio polarization beam splitter-rotator based on hybrid plasmonic-dielectric directional coupling[J]. Optics Letters, 2017, 42(22):4752-4755.
- [16] Guan H, Novack A, Streshinsky M, et al. CMOS-compatible highly efficient polarization splitter and rotator based on a double-etched directional coupler[J]. Optics Express, 2014, 22(3):2489-2496.
- [17] Dai D X, Wu H. Realization of a compact polarization splitter-rotator on silicon[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2346-2349.
- [18] Xu H N, Shi Y C. Ultra-broadband silicon polarization splitter-rotator based on the multi-mode waveguide[J]. Optics Express, 2017, 25(15):18485-18491.
- [19] Liu L, Ding Y H, Yvind K, et al. Silicon-on-insulator polarization splitting and rotating device for polarization diversity circuits[J]. Optics Express, 2011, 19(13):12646-12651.
- [20] Wang Y, Ma M L, Yun H, et al. Ultra-compact sub-wavelength grating polarization splitter-rotator for silicon-on-insulator platform[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(6):1-9.
- [21] Dai D X, He S L. A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement[J]. Optics Express, 2009, 17(19):16646-16653.
- [22] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. Physical Review B, 1972, 6(12):4370-4379.
- [23] Chin M K, Ho S T. Design and modeling of waveguide-coupled single-mode microring resonators[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(8):1433-1446.
- [24] Deng H H, Yevick D O, Brooks C, et al. Design rules for slanted-angle polarization rotators[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1):432-445.

Compact broadband plasmonic-assisted polarization splitter-rotator based on bent directional couplers

ZHANG Fang, XU Peipeng*, XU Tiefeng

(Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: We propose a plasmonic-assisted polarization splitter-rotator (PSR) based on bent directional couplers. The finite element method is used to calculate the mode field distribution and effective refractive index of silicon waveguides, as well as hybrid surface plasmon waveguides, all of which provide an important basis for device modeling and analysis. We simulate light propagation in the proposed device by a three-dimensional finite-difference time-domain method. With the enhanced birefringence resulting from the plasmonic-assisted asymmetry, the present PSR features ultra-compact size and broadband operation. Our simulation results show an extinction ratio greater than 23 dB and an insertion loss lower than 0.8 dB at the central wavelength of 1 550 nm. The TM-to-TE polarization conversion efficiency is improved by more than 95% over a bandwidth of 80 nm.

Key words: integrated optics device; polarization-selective device; surface plasmon; phase matching

(责任编辑 史小丽)