

硅基二氧化硅偏振分束器的设计及误差分析

潘盼, 李伶俐, 蔡雪原

安庆师范大学物理与电气工程学院, 安徽 安庆 246133

摘要 设计了一种非对称臂马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型硅基二氧化硅偏振分束器(PBS),在 1535~1565 nm 波长范围内,其偏振消光比大于 20 dB,插入损耗大于-0.5 dB。采用有限差分-束传播法(FD-BPM)进行误差分析,分别计算了多模波导的宽度和长度以及非对称臂的宽度和长度误差对偏振分束器性能的影响。仿真结果表明,多模波导长度和非对称臂长度误差分别小于 $\pm 2 \mu\text{m}$ 和 $\pm 4 \mu\text{m}$ 时,偏振分束器的消光比和插入损耗仍能保持较好的结果;而要保持 20 dB 以上的偏振消光比,多模波导宽度误差应小于 $\pm 500 \text{ nm}$,非对称臂宽度误差应小于 $\pm 4 \text{ nm}$ (宽臂)和 $\pm 2.5 \text{ nm}$ (窄臂)。非对称臂宽度对工艺的要求比较高,拟利用热光效应改变波导折射率来补偿波导尺寸变化引起的相位误差,以便下一步制备出高性能的硅基二氧化硅偏振分束器。

关键词 光学器件; 硅基二氧化硅波导; 偏振分束器; 有限差分-束传播法; 误差分析

中图分类号 TN302 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.122301

Design and Error Analysis of Silica on Silicon Based Polarization Beam Splitter

Pan Pan, Li Lingli, Cai Xueyuan

School of Physics and Electrical Engineering, Anqing Normal University, Anqing, Anhui 246133, China

Abstract A polarization beam splitter (PBS) based on silica on silicon is designed by using asymmetric Mach-Zehnder interferometer (MZI). Within the wavelength range of 1535-1565 nm, the polarization extinction ratio is larger than 20 dB, and the insertion loss is larger than -0.5 dB. In addition, the finite difference-beam propagation method is adopted, the effect of errors of width/length of multimode waveguide and asymmetric arms on the performance of PBS is calculated, respectively. The simulation results indicate that, when the length errors of multimode waveguide and asymmetric arms are less than $\pm 2 \mu\text{m}$ and $\pm 4 \mu\text{m}$, respectively, the extinction ratio and the insertion loss are still well. To keep the polarization extinction ratio more than 20 dB, width error of multimode waveguide should be less than $\pm 500 \text{ nm}$, and width error of asymmetric arms should be less than $\pm 4 \text{ nm}$ (wide arm) and $\pm 2.5 \text{ nm}$ (narrow arm). The widths of asymmetric arms ask for high requirement in fabrication process. The thermo-optic effect should be used to regulate refractive index of the waveguide, thus compensating the phase error caused by waveguide dimensional change, so it can be used to fabricate high-performance silica on silicon PBS in the next step.

Key words optical devices; silica on silicon waveguide; polarization beam splitter; finite difference-beam propagation method; error analysis

OCIS codes 230.7380; 230.1360; 160.6030

1 引言

随着网络通信容量的剧增,如何有效利用当前线路资源扩充通信容量成为研究的热点问题。相干光通信技术能在不牺牲带宽的情况下增加传输速率,成为 100 Gb/s 及其以上光通信网络的主流技术^[1]。在相干

收稿日期: 2017-06-30; **收到修改稿日期:** 2017-07-26

基金项目: 2017 年度安徽省高校自然科学基金项目(KJ2017A366)

作者简介: 潘盼(1988—),女,博士,讲师,主要从事硅基、InP 基光波导器件及光电集成技术方面的研究。

E-mail: panpan1988@semi.ac.cn

光通信系统中,利用偏振分束器(PBS)可以实现 TE 和 TM 两种偏振态分解利用,使光通信容量扩充一倍^[2]。除此之外,偏振分束器还用于光纤陀螺仪、偏振控制仪等,因此偏振分束器具有重要的研究意义。

偏振分束器的类型有很多,包括多模干涉仪(MMI)型^[3]、非对称臂马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型^[4]、定向耦合器型^[5]、光子晶体型^[6]、光栅型^[7]以及定向耦合器与光子晶体结合型^[8]等。国内学者对基于多种结构和材料的偏振分束器都进行了研究^[9-10],并取得了一定的研究成果。但是, MZI 是现代光波导器件中常用的一种结构,除了设计臂长差可以实现波分复用^[11],还可以设计不同的臂宽实现偏振分束功能,该结构设计简单,是理想的偏振分束器结构。偏振分束器的材料有很多种类,目前常用的光波导材料主要有三种:硅基二氧化硅、绝缘体上的硅(SOI)和 InP 及其混合物材料。其中,SOI 可以制成纳米线波导,易于实现小型化集成芯片,但是工艺要求高、制备成本高;InP 及其混合物材料可以实现有源和无源器件的单片集成,但是材料价格昂贵且与传统微电子工艺不完全兼容;硅基二氧化硅波导制备工艺简单,适合产业化生产,在光通信行业,无源光波导分立器件仍以硅基二氧化硅材料为主。

本文基于有限差分-束传播法(FD-BPM)^[12],设计了一种非对称臂 MZI 型硅基二氧化硅偏振分束器。对设计的器件进行分析,得到其在 C 波段范围内均可实现偏振消光比(PER)大于 20 dB,插入损耗(IL)大于 -0.5 dB。考虑到半导体器件在工艺制备过程中不可避免会产生误差,本文对偏振分束器的关键参数在理想值附近作了误差分析,为其实验制备工艺的容错范围提供理论指导。

2 MZI 型偏振分束器设计

2.1 MZI 型偏振分束器原理

非对称臂 MZI 型偏振分束器结构如图 1 所示,包含两个 3-dB 耦合器(对称结构)和连接这两个 3-dB 耦合器的中间臂,两个中间臂为非对称波导结构。两个非对称臂具有不同的波导宽度,TE 和 TM 偏振光的有效折射率对波导宽度变化有不同的对应关系,经过非对称臂的传输使 TE 和 TM 光分别积累不同的相位差^[13];经过第一个 3-dB 耦合器两束 TE 和 TM 光分别获得了初始 $\pi/2$ 相位差,经非对称臂到达第二个 3-dB 耦合器时两束 TE 光保持 $\pi/2$ 相位差不变,耦合进入 cross 通道输出;两束 TM 偏振光增加 π 相位差即总相位差为 $-\pi/2$,耦合进入 bar 通道输出,从而实现偏振分束功能。

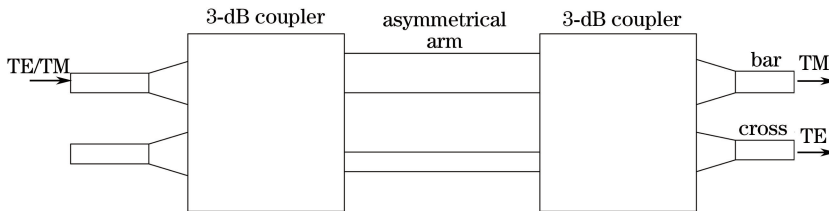


图 1 非对称臂 MZI 型偏振分束器结构图

Fig. 1 Structure chart of MZI type PBS based on asymmetrical arm

基于 2.5% 折射率差的硅基二氧化硅材料,采用掩埋矩形波导结构(芯层单模尺寸为 $3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$),设计一种基于非对称臂的 MZI 型偏振分束器。按照图 1 所示结构图,输入/输出波导采用单模波导结构,该偏振分束器的设计主要包括 2×2 3-dB 耦合器和非对称臂两部分。

2.2 2×2 3-dB 耦合器

在偏振分束器中, 2×2 3-dB 耦合器主要实现 1×2 的分束功能和 2×1 的合束功能。根据 MMI 的自映像原理^[14],要使 MMI 产生其二重像即一束光等分成两束,MMI 的长度需满足:

$$L = \frac{p}{2}(3L_{\pi}), p = 1, 3, 5, \dots, \quad (1)$$

式中 L_{π} 是两个最低阶模式的拍长,其公式为

$$L_{\pi} \cong \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \cong \frac{4n_r W_e^2}{3\lambda_0}, \quad (2)$$

式中 β_0 和 β_1 分别为基模和一阶模的传输常数, W_e 是 MMI 的有效宽度(考虑了波导的侧向渗透模场), n_r

是有效折射率, λ_0 是指自由传输波长, 这里选用 1550 nm。从(1)式可知, MMI 中二重像是周期性出现的, 为了减小器件尺寸, 选择第一个二重像出现的位置:

$$L_{\text{MMI}} = \frac{3}{2}L_{\pi}, \quad (3)$$

硅基二氧化硅波导尺寸较大, 对光场的限制能力较强, 光场侧向渗透较小, 因此:

$$W_e \approx W_{\text{MMI}}, \quad (4)$$

综合(1)~(4)式可以初步确定 2×2 MMI 的尺寸, 并进一步采用三维 FD-BPM 优化, 得到的 MMI 宽度和长度分别为 $W_{\text{MMI}} = 22 \mu\text{m}$, $L_{\text{MMI}} = 1062.5 \mu\text{m}$ 。如图 2 所示, 无论输入 TE 还是 TM 偏振光, 都可以得到很好的分束效果。



图 2 2×2 MMI 的 TE/TM 光分束效果图。(a)输入 TE 光;(b)输入 TM 光

Fig. 2 TE/TM beam splitting results of 2×2 MMI. (a) Input TE light; (b) input TM light

2.3 非对称臂设计

非对称臂的设计即选择不同双折射的波导, 使两臂中 TE 和 TM 偏振光分别积累不同的相位差。图 3 所示为波导中传输的 TE 和 TM 光有效折射率(n_{TE} 和 n_{TM})随波导宽度的变化曲线; 当波导宽度等于 $3.5 \mu\text{m}$ 时具有零双折射, 即 $n_{\text{TM}} - n_{\text{TE}} = 0$; 当波导宽度小于 $3.5 \mu\text{m}$ 时, $n_{\text{TM}} - n_{\text{TE}} > 0$; 当波导宽度大于 $3.5 \mu\text{m}$ 时, $n_{\text{TM}} - n_{\text{TE}} < 0$ 。要实现 TE 和 TM 光在两个长为 L 的非对称臂中积累不同的光程差 $(\Delta n)_{\text{TE}} \cdot L$ 和 $(\Delta n)_{\text{TM}} \cdot L$, 同时器件保持较小的尺寸(L 较短), 两个臂的宽度应在满足器件结构设计和工艺要求的情况下使 $(\Delta n)_{\text{TE}}$ 和 $(\Delta n)_{\text{TM}}$ 的差值尽可能大。该设计中选择两臂宽度分别为 $W_1 = 4.5 \mu\text{m}$ ($n_{1\text{TM}} - n_{1\text{TE}} = -3 \times 10^{-3}$) 和 $W_2 = 3 \mu\text{m}$ ($n_{2\text{TM}} - n_{2\text{TE}} = 2 \times 10^{-3}$), 可以实现 $(\Delta n)_{\text{TM}} - (\Delta n)_{\text{TE}} = -5 \times 10^3$ 。

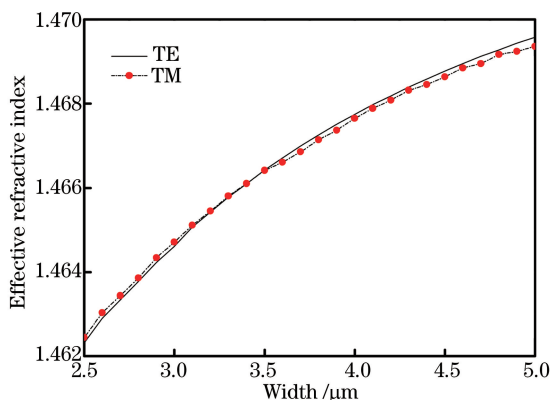


图 3 波导有效折射率随波导宽度变化的曲线

Fig. 3 Curves of effective refractive index of waveguide changing with waveguide width

两臂宽度确定后, 关键是选择合适的臂长 L 实现相应相位差的积累, 即光程差满足:

$$(\Delta n)_{\text{TE}} \cdot L = N \cdot \lambda, \quad (5)$$

$$(\Delta n)_{\text{TM}} \cdot L = \left(M + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda, \quad (6)$$

式中 N 和 M 为整数。通过公式计算初步确定 L 数值, 并采用三维 FD-BPM 进行优化, 在 MMI 和两臂连接处引入渐变波导减小耦合损耗(宽度渐变 $3/4.5 \sim 5 \mu\text{m}$, 长度 $106 \mu\text{m}$), 最终确定臂长(不包含渐变波导) $L =$

5974 μm , 器件总长度 8823 μm , 总宽度 22 μm (等于 MMI 的宽度)。至此, 完成了偏振分束器的结构设计, 主要参数见图 4。

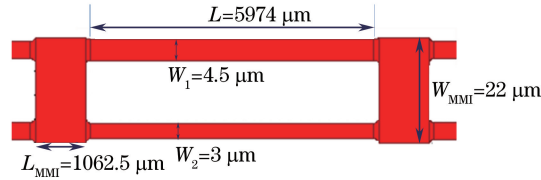


图 4 偏振分束器结构及对应参数

Fig. 4 Structure of PBS and its relative parameters

2.4 主要性能指标

偏振分束器的主要性能指标包括 TE 和 TM 模式的偏振消光比和插入损耗^[15], 分别定义为

$$R_{\text{PER-cross}} = 10 \log \frac{(P_{\text{TE}})_{\text{crossport}}}{P_{\text{TM}}}, R_{\text{PER-bar}} = 10 \log \frac{(P_{\text{TM}})_{\text{barport}}}{P_{\text{TE}}}, \quad (7)$$

$$L_{\text{TE}} = 10 \log \frac{(P_{\text{TE}})_{\text{crossport}}}{P_{\text{input}}}, L_{\text{TM}} = 10 \log \frac{(P_{\text{TM}})_{\text{barport}}}{P_{\text{input}}}, \quad (8)$$

式中 $R_{\text{PER-cross}}$ 、 $R_{\text{PER-bar}}$ 分别为 cross、bar 通道的偏振消光比, L_{TE} 、 L_{TM} 分别为 TE、TM 的插入损耗, P_{TE} 和 P_{TM} 分别指 TE 和 TM 输出光功率, P_{input} 指输入光功率。如图 5 所示, 经过计算偏振分束器 bar 和 cross 两个通道在 1535~1565 nm 的 30 nm 波长范围内, 偏振消光比大于 20 dB, 插入损耗大于 -0.5 dB, 实现了很好的偏振分束效果。在中心波长 1550 nm 处 cross 通道 (TE) 偏振消光比达到 55 dB bar 通道 (TM) 偏振消光比达到约 30 dB, 且插入损耗都大于 -0.2 dB。

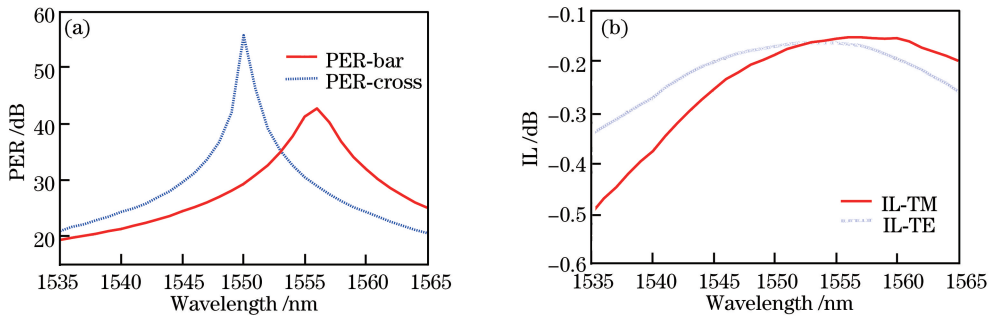


图 5 偏振分束器在 C 波段的性能变化图。(a) 偏振消光比; (b) 插入损耗

Fig. 5 Performance variation of PBS in C-band. (a) PER; (b) IL

3 MZI 型偏振分束器的误差分析

半导体器件需要通过微纳加工技术进行制备, 在制备过程中不可避免地会产生误差, 所以在设计时对器件进行误差分析可以指导工艺过程。偏振分束器的加工过程包括光刻和刻蚀等, 其尺寸偏离设计值主要是因为光刻时涂胶不均匀、显影时间过久或不够、光刻胶高温收缩等引起的图形变形, 以及刻蚀侧壁具有不均匀性等。

偏振分束器的尺寸主要包括 MMI 的长度 (L_{MMI}) 和宽度 (W_{MMI})、非对称臂的长度 (L) 和宽度 (W_1 和 W_2), 下面采用 FD-BPM 分析上述几个尺寸的变化对偏振分束器在 1550 nm 时偏振消光比和插入损耗的影响。设计的偏振分束器总尺寸为 8823 $\mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$, 长宽比很大, 长度和宽度变化范围不一样, 因此分开讨论。

3.1 长度变化

首先分析器件长度变化的影响, 从图 6 可以看出, MMI 的长度变化值 ΔL_{MMI} 在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 内, cross 通道 (TE) 消光比变化 ± 5 dB, 仍满足大于 50 dB, bar 通道 (TM) 消光比变化较小, 只有 ± 1 dB; TE 和 TM 光的插

入损耗变化均小于 ± 0.04 dB。图 7 为非对称臂的臂长 L 对器件性能的影响,因为 L 数值比较大,考虑 L 变化值 ΔL 在 $\pm 4 \mu\text{m}$ 范围内,cross 通道(TE)消光比最大变化为 ± 25 dB,仍满足大于 30 dB,而 bar 通道(TM)消光比变化小于 ± 10 dB,满足大于 24 dB;TE 和 TM 光的插入损耗变化小于 ± 0.04 dB。

综上分析,长度变化对插入损耗的影响较小,对偏振消光比影响较大,但结果仍可保证满足大于 20 dB。

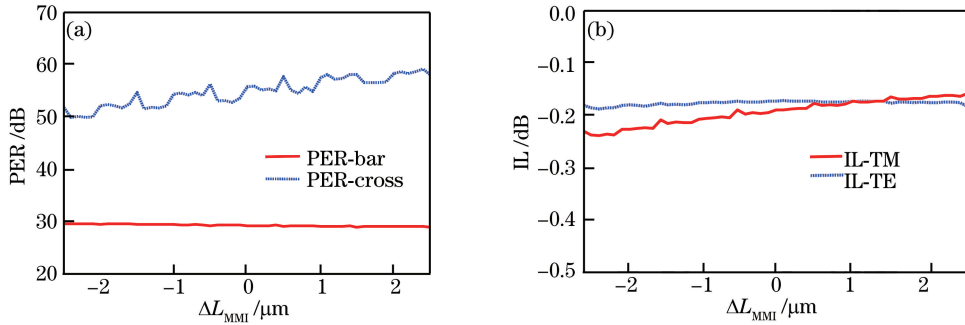


图 6 MMI 长度变化 ΔL_{MMI} 对偏振分束器性能的影响。(a)偏振消光比;(b)插入损耗

Fig. 6 Effect of the change of MMI length ΔL_{MMI} on the performance of PBS. (a) PER; (b) IL

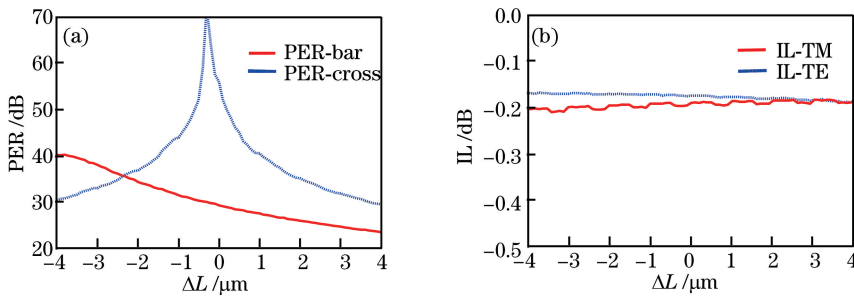


图 7 非对称臂长度变化 ΔL 对偏振分束器性能的影响。(a)偏振消光比;(b)插入损耗

Fig. 7 Effect of the change of unsymmetrical arm ΔL on the performance of PBS. (a) PER; (b) IL

3.2 宽度变化

MMI 的宽度设计值为 $22 \mu\text{m}$,如图 8 所示,考虑宽度变化 ΔW_{MMI} 在 ± 500 nm 范围内,cross 通道消光比变化显著,但仍满足大于 25 dB,bar 通道消光比变化稍缓,满足大于 23 dB;TE 和 TM 光的插入损耗下降明显,当 ΔW_{MMI} 等于 500 nm 时,TE 损耗为 -3.5 dB,TM 损耗为 -1.9 dB。

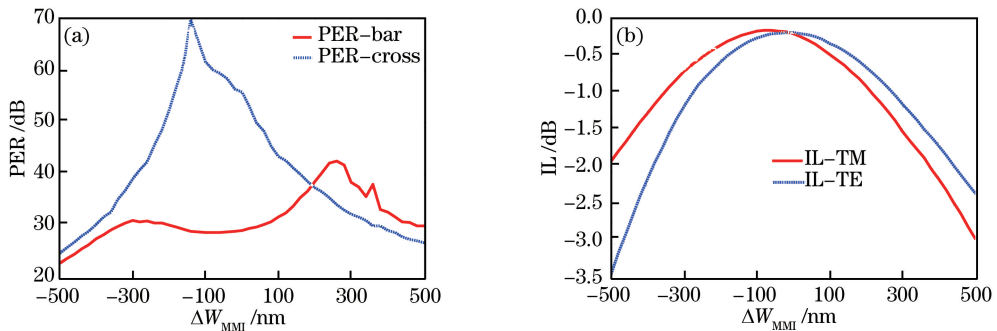


图 8 MMI 宽度变化 ΔW_{MMI} 对偏振分束器性能的影响。(a)偏振消光比;(b)插入损耗

Fig. 8 Effect of the change of MMI width ΔW_{MMI} on the performance of PBS. (a) PER; (b) IL

宽臂 W_1 设计值为 $4.5 \mu\text{m}$,其变化为 ΔW_1 。考虑 ± 100 nm 的范围(图 9),当 ΔW_1 约为 ± 4 nm 时,bar 和 cross 通道的偏振消光比下降到 20 dB;当 ΔW_1 大于 50 nm 时,插入损耗急速下降。 W_1 的变化对偏振消光比和插入损耗的影响都具有周期性,bar 通道变化周期为 145 nm,cross 通道变化周期为 140 nm。

窄臂宽度 W_2 设计值为 $3 \mu\text{m}$,其变化为 ΔW_2 。同样考虑 ± 100 nm 的变化范围(图 10),当 ΔW_2 分别为 ± 2.5 nm 和 ± 3.5 nm 时,bar 和 cross 通道的偏振消光比下降到 20 dB。当 ΔW_2 为 ± 25 nm 时,TE 和 TM

光插入损耗下降到 -10 dB。 W_2 的变化对偏振消光比的影响同样具有周期性,bar 通道和 cross 通道的变化周期均为 64 nm。

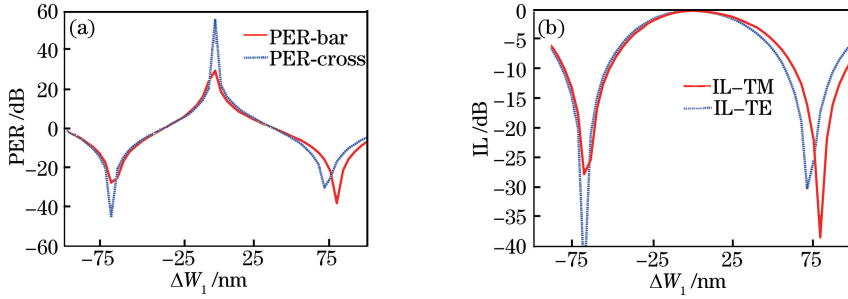


图 9 宽臂的宽度变化 ΔW_1 对偏振分束器性能的影响。(a)偏振消光比;(b)插入损耗

Fig. 9 Effect of the change of wide arm width ΔW_1 on the performance of PBS. (a) PER; (b) IL

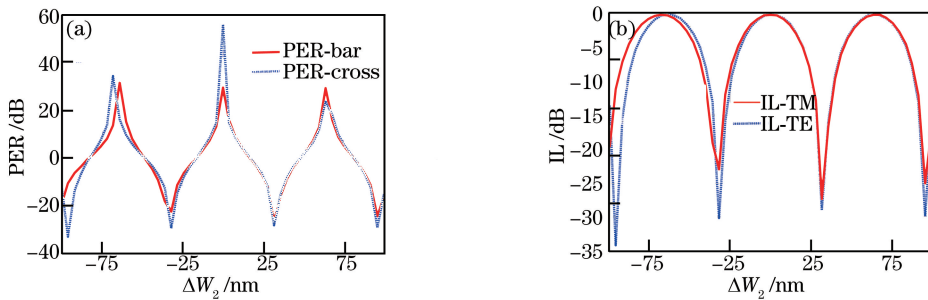


图 10 窄臂宽度变化 ΔW_2 对偏振分束器性能的影响。(a)偏振消光比;(b)插入损耗

Fig. 10 Effect of the change of narrow arm width ΔW_2 on the performance of PBS. (a) PER; (b) IL

4 分析与讨论

综上所述,要实现 20 dB 以上的偏振消光比,该偏振分束器对各部分长度容错范围为微米级,对 MMI 的宽度容错范围为 ± 500 nm,而对宽臂和窄臂的宽度容错范围分别只有 ± 4 nm 和 ± 2.5 nm。由此可见,非对称臂的宽度对工艺精度要求非常高,现有的微纳加工技术很难达到要求。为了下一步制备出高性能的硅基二氧化硅偏振分束器,拟采取热光调制的方法来补偿波导尺寸误差产生的影响。波导尺寸变化改变了波导折射率,影响相位差的积累值进而降低了器件性能。热光效应是指材料的折射率随着温度的变化而改变的一种物理效应,因此通过热光效应可以补偿波导尺寸偏差引起的折射率改变。该方法的具体做法是:分别在两个非对称臂上表面溅射一层电阻率高的金属材料(如 Ti),通过电阻率较低的引线(如 Al)将加热电极连接到直流电压源上,产生的热量传输到波导内部,使波导的折射率发生改变。二氧化硅的热光系数为 $dn/dT = 1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,其中 n 为折射率, T 为温度。考虑最差的情况,比如宽臂的宽度偏离设计值 -64 nm,即折射率减小 1.15×10^{-4} ,因此波导温度改变 $\Delta T = 11.5$ K 即可实现补偿。由于非对称臂的宽度变化对器件性能的影响具有周期性,所以不论波导宽度偏离值是多少,总能通过升高温度的方法补偿回来。

5 结 论

基于成本较低的硅基二氧化硅材料,设计了适合工业批量生产的非对称臂 MZI 型偏振分束器。该偏振分束器在 $1535 \sim 1565$ nm 波长范围内可实现偏振消光比大于 20 dB,插入损耗大于 -0.5 dB,能满足一般应用需求。除了基本的器件设计外,还针对器件加工过程中产生的误差,采用 FD-BPM 进行分析。结果表明,该器件对非对称臂的宽度变化非常敏感,增加了加工工艺难度,可利用热光效应补偿尺寸误差引起的折射率改变,有望进一步制备出高性能的硅基二氧化硅偏振分束器。

参 考 文 献

- [1] Nagatsuma T, Fujita Y, Yasuda Y, *et al.* Real-time 100-Gbit/s QPSK transmission using photonics-based 300-GHz-

- band wireless link[C]. 2016 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), 2016: 27-30.
- [2] Inoue T, Nara K. Ultrasmall PBS-integrated coherent mixer using 1.8 μm -delta silica-based planar lightwave circuit[C]. 2010 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 2010: 1-3.
- [3] Jiao Y Q, Dai D X, Shi Y C, *et al.* Shortened polarization beam splitters with two cascaded multimode interference sections[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(20): 1538-1540.
- [4] Dai D X, Wang Z, Peters J, *et al.* Compact polarization beam splitter using an asymmetrical Mach-Zehnder interferometer based on silicon-on-insulator waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(8): 673-675.
- [5] Wang J, Liang D, Tang Y, *et al.* Realization of an ultra-short silicon polarization beam splitter with an asymmetrical bent directional coupler[J]. Optics Letters, 2013, 38(1): 4-6.
- [6] Lin M, Jin X, Ouyang Z B, *et al.* Y-type polarization beam splitter based on polarization-selective defects within crystal waveguides in a square-lattice photonic crystal with solid rods[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(s1): s11301.
- [7] Xu Y, Xiao J B. Compact and high extinction ratio polarization beam splitter using subwavelength grating couplers[J]. Optics Letters, 2016, 41(4): 773-776.
- [8] Zhang Xinxiang, Chen Heming. Design and performance analysis of photonic crystal polarizing beam splitter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 011301.
张信祥, 陈鹤鸣. 光子晶体偏振分束器的设计与性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 011301.
- [9] Li Xuyou, Xu Zhenlong, Liu Pan, *et al.* Short polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber with ultra-high extinction ratio[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0605006.
李绪友, 许振龙, 刘攀, 等. 短长度超高消光比双芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605006.
- [10] Zhai Yumeng, Wang Jin, Lu Yunqing, *et al.* Polarization-beam splitter based on thin-film element hybridly integrated in polymer waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1113002.
翟羽萌, 王瑾, 陆云清, 等. 与聚合物光波导混合集成的薄膜偏振分束器[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1113002.
- [11] An Junming, Zhang Jiashun, Wang Yue, *et al.* Study on wavelength division multiplexer for silicon photonics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 110006.
安俊明, 张家顺, 王玥, 等. 硅光子中波分复用技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 110006.
- [12] Fogli F, Bellanca G, Bassi P. TBC and PML conditions for 2D and 3D BPM: a comparison[J]. Optical and Quantum Electronics, 1998, 30(5): 443-456.
- [13] Liang T K, Tsang H K. Integrated polarization beam splitter in high index contrast silicon-on-insulator waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(2): 393-395.
- [14] Soldano L B, Pennings E C M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(4): 615-627.
- [15] Tan K, Huang Y, Lo G Q, *et al.* Compact highly-efficient polarization splitter and rotator based on 90 $^\circ$ bends[J]. Optics Express, 2016, 24(13): 14506-14512.