

# 硅基槽波导级联多模干涉耦合器型偏振分束器

王嘉源, 肖金标\*, 孙小菡

(东南大学 光传感/通信综合网络国家地方联合工程研究中心, 江苏 南京 210096)

**摘要:**提出了一种基于硅基槽波导的级联多模干涉(MMI)耦合器型偏振分束器,由锥形及矩形结构 MMI 耦合器构成.级联结构使器件长度无需为两偏振模自镜像长度的公倍数,不仅能有效减小器件尺寸,而且提高设计灵活性.同时,利用槽波导的高双折射特性及 MMI 耦合器的锥形结构,可进一步缩短器件尺寸.分析结果表明,所提器件能够有效实现偏振束分离,两级 MMI 工作区总长度仅为 42  $\mu\text{m}$ ,准 TE 与准 TM 模的偏振消光比分别为 29.8 和 31.4 dB,1.55  $\mu\text{m}$  波长下的插入损耗分别为 0.395 和 0.699 dB,偏振消光比大于 20 dB 时光带宽为 43 nm,覆盖整个 C 波段.最后,详细分析了器件关键参数的制造误差对器件性能的影响.

**关键词:**光学;偏振分束器;槽波导;多模干涉耦合器

**中图分类号:**TN256 **文献标识码:**A

## Compact polarization splitter based on tapered cascaded multimode interference couplers in slot waveguide structures

WANG Jia-Yuan, XIAO Jin-Biao\*, SUN Xiao-Han

(National Research Center for Optical Sensing/Communications Integrated Networking,  
Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** A compact polarization splitter (PS) based on tapered cascaded multimode interference (MMI) couplers in slot waveguide structures was proposed and characterized. By utilizing two cascaded MMI couplers, the two orthogonal polarizations, quasi-TE mode and quasi-TM mode, are efficiently separated without the necessary that the total length of the MMI must be common multiple of the self-imaging lengths of the two polarizations. This greatly reduces the length of the PS and improves the design flexibility. Meanwhile, the high birefringence of slot waveguides and the tapered MMI structure can further shorten the device length. Results show that a PS with a length of 42  $\mu\text{m}$  in the MMI sections can be achieved, where the polarization extinction ratios (ERs) for the quasi-TE and quasi-TM modes are 29.8 and 31.4 dB, respectively. Optical bandwidth of 43 nm is obtained for keeping the ER over 20 dB. Moreover, fabrication tolerances to the structural parameters were investigated, and field evolution along the propagation distance through the PS was also demonstrated.

**Key words:** optics, polarization splitter, slot waveguide, multimode interference coupler

**PACS:** 42.81. Gs, 42.79. Gn, 42.82. -m

## 引言

近年来,由于具有高折射率差和兼容 CMOS 工艺的特点,基于绝缘体上硅(silicon-on-insulator, SOI)平台的光子集成光路被人们广泛研究.高折射率差能大大缩小器件尺寸,增加系统的集成度.兼容

CMOS 工艺则使制造难度下降,大幅降低成本.然而,SOI 平台的高折射率差会产生巨大的结构双折射,在系统中引入偏振相关损耗和一些偏振相关的波长特性,进而影响器件性能.为了克服这一问题,偏振分集系统被提出来构建偏振无关的光子线路<sup>[1]</sup>,而偏振旋转器<sup>[2-3]</sup>和偏振分束器<sup>[4-8]</sup>是其中的

收稿日期:2014-09-28,修回日期:2015-05-06

Received date: 2014-09-28, revised date: 2015-05-06

基金项目:国家自然科学基金(60978005,11574046);江苏省自然科学基金(BK20141120)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (60978005,11574046); Jiangsu Provincial Natural Science Foundation (BK20141120)

作者简介(Biography): 王嘉源(1986-),男,江苏南通人,博士研究生,主要研究领域为光子器件设计和数值算法研究. E-mail: wjy\_86@hotmail.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: jbxiao@seu.edu.cn

关键组件. 偏振旋转器扭转输入光的轴向主要有两种方法: 一是利用绝热的模式演化, 如垂直条状波导到水平条状波导的线性变化<sup>[2]</sup>; 二是利用一段光轴倾斜的波导, 如不对称的混合等离子体波导<sup>[3]</sup>. 而偏振分束器按照结构可以分为定向耦合器型, 多模干涉(multimode interference, MMI)耦合器型, 马赫曾德干涉仪型以及光子晶体型等. 其中 MMI 耦合器具有制造简单, 光带宽高的特性, 是构成偏振分束器的良好选择.

基于 MMI 实现横向电场(transverse electric, TE)和横向磁场(transverse magnetic, TM)的有效分离, 传统方法是利用自镜像原理, 使器件长度正好等于两个偏振在 MMI 耦合器中的自镜像长度的公倍数, 这样在输出端恰好一个偏振态成直接像, 另一个偏振态成镜面像<sup>[4]</sup>. 然而, 该方法的缺点是需要很长的 MMI 段来满足公倍数的关系, 因此器件的尺寸较大. 利用近似的自镜像原理即所谓的准态自镜像可以减小器件长度<sup>[5]</sup>. 缺点是由于成像不是完美像, 会引入严重的额外损耗. 在 MMI 波导中插入金属-绝缘体-金属介质层<sup>[6]</sup>可以将某一偏振反射而不影响另一偏振在波导中的传输. 但是该方法需要复杂的制造工艺, 不易实现. 文献[7]在 MMI 耦合器的部分表面覆盖金属层, 利用混合等离子体波导实现小尺寸的偏振分束器. 尽管该方法能将尺寸控制得较小, 然而偏振消光比却小于 15 dB. 因此, 亟需开发一种兼具小尺寸, 高消光比, 低插入损耗等特点的偏振分束器.

本文中, 利用三维全矢量束传播法<sup>[9]</sup>, 基于硅基槽波导结构, 设计出一种级联 MMI 耦合器型的偏振分束器, 具有小尺寸、高消光比和低损耗的特性. 级联结构无需 MMI 耦合器长度满足两个偏振自镜像长度的公倍数, 而是两个自镜像长度之和, 大大减小器件尺寸并提高了设计灵活性. 利用锥形 MMI 波导结构可以缩小 MMI 耦合器的等效宽度, 进一步减小器件长度. 通过优化结构参数, 偏振分束器的 MMI 段总长度为 42  $\mu\text{m}$ , 准 TE 和准 TM 模的偏振消光比分别为 29.8 和 31.4 dB, 插入损耗分别为 0.395 和 0.699 dB, 保持消光比大于 20 dB 的光波长带宽为 43 nm. 还详细研究了结构参数的制造误差对器件性能的影响.

## 1 器件结构与工作原理

设计的偏振分束器结构如图 1(a)所示, 包括输入波导(端口 A), 第一级 MMI 耦合器(MMI1), 第二

级 MMI 耦合器(MMI2)以及输出波导(端口 B 和端口 C). MMI1 和 MMI2 的长度分别表示为  $L_1$  和  $L_2$ . MMI1 的宽度在传播方向上成锥形, 两端最大宽度为  $W_1$ , 中心最小宽度为  $W_0$ , MMI2 的宽度表示为  $W_2$ . 偏振分束器由槽波导构成, 其横截面如图 1(b)所示, 高折射率硅线中间夹一层纳米量级的低折射率槽区域<sup>[10]</sup>. 硅层的高度  $h_h$  和槽区域的高度  $h_s$  分别为 200 nm 和 50 nm, 折射率分别为  $n_h = 3.48$  和  $n_s = 1.46$ , 包层的折射率为  $n_c = 1.46$ . 器件的工作波长  $\lambda$  为 1.55  $\mu\text{m}$ .

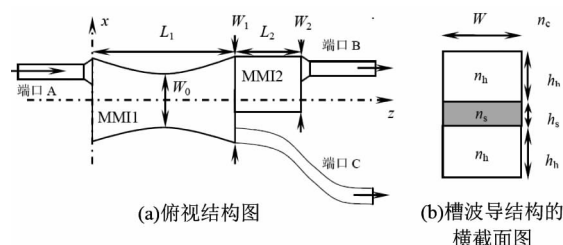


图 1 偏振分束器的原理图:(a) 俯视结构图;(b) 槽波导结构的横截面图

Fig. 1 Schematic layout of the proposed device: (a) top view and (b) cross-sectional view of a slot waveguide

由于水平槽波导材料之间的高折射率差, 准 TM 模的主分量在水平分界面上不连续, 槽区域与硅线的光场成  $n_h^2/n_s^2$  的比率, 因此光场主要集中在低折射率的槽区域. 而准 TE 模的场分布几乎不受槽的影响, 与普通硅线波导相似. 图 2(a)是槽波导 TE 和 TM 偏振最低三阶模的有效折射率与波导宽度的变化关系. 当波导宽度小于 300 nm 时, 只存在准 TE 和准 TM 模的基模. 因此我们将输入输出波导的宽度定为 250 nm 以确保单模工作. 而随着波导宽度的增大, 有效折射率也逐渐增大, 波导中开始存在高阶模式. 图 2(b)是槽波导和普通硅线波导的双折射  $B$  与波导宽度的变化关系,  $B$  定义为准 TE 与准 TM 基模的有效折射率差的绝对值. 从图中可以看出, 当波导宽度大于 330 nm 时槽波导的双折射一直大于相同宽度的普通硅线波导. 随着宽度增加, 双折射值趋于饱和, 最终槽波导的双折射达到普通硅线波导的 4 倍. 可见, 槽波导独特的光场分布特性造成了巨大的结构双折射, 有助于减小偏振分束器的尺寸.

MMI 型偏振分束器的工作原理基于自镜像效应<sup>[11]</sup>, 即多模波导中激励的导模经过干涉会沿着传播方向周期性地产生输入光的一个或多个像. 一般干涉原理下, 在 MMI 波导的自镜像长度  $L_{\text{MMI}} = p(3L_{\pi})$  处会形成输入场的像, 其中  $p$  为偶数时成直

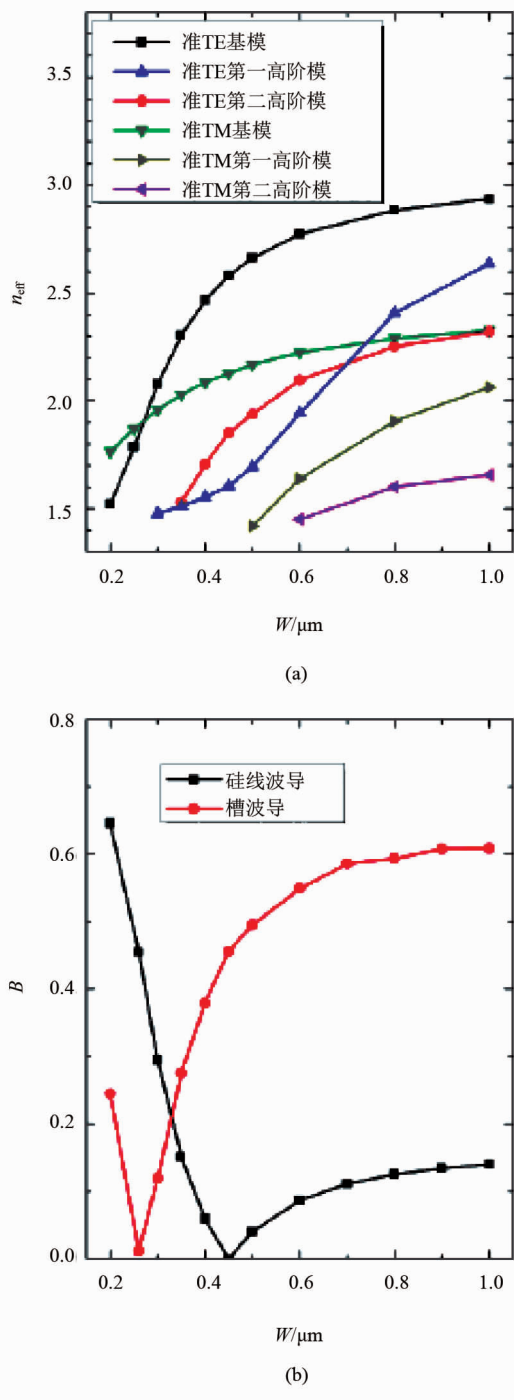


图2 (a)槽波导最低三阶导模的有效折射率和(b)槽波导与硅线波导的双折射关于波导宽度的变化关系  
 Fig.2 (a) The effective indices of the guided-modes of a slot waveguide and (b) the birefringence of the slot waveguide and regular silicon wire as a function of the waveguide width

接像,奇数时成镜面像, $L_\pi$ 是拍长,定义为<sup>[11]</sup>

$$L_\pi = \pi/(\beta_0 - \beta_1) \approx 4ngW_e^2/3\lambda \quad (1)$$

其中 $\beta_0$ 和 $\beta_1$ 分别是MMI波导基模和第一高阶模的传播常数, $n_g$ 是有效折射率, $W_e$ 是基模的有效宽度,

$\lambda$ 是自由空间的波长.图3是正交偏振光在宽度为 $2\mu\text{m}$ 的槽波导型MMI耦合器中的传输情况.由于槽波导的双折射,两正交偏振的自镜像长度不同,准TE和准TM模分别在 $40$ 和 $45\mu\text{m}$ 处成镜面像.若按传统方法取自镜像长度的公倍数,耦合器长度需要 $360\mu\text{m}$ 才能将两偏振模分离,且设计不够灵活.这里我们取MMI1的长度为准TM模的自镜像长度,如虚线处所示.输入的准TM模会在MMI1的末端成镜面像,并从右侧输出.而当准TE模输入时,光场传输到MMI1的末端时会集中在左侧.由于模斑较大,无法用一个单模波导将所有的光导出,因此需要级联一个宽度稍小的MMI2耦合器将准TE模的光场完全接收.准TE模在MMI2耦合器中经过多模干涉,最终在自镜像长度处成像并输出.这样,两个正交偏振模能够被有效地分离,MMI耦合器的总长度只需要为两个偏振的自镜像长度之和,设计灵活性也大大提高.

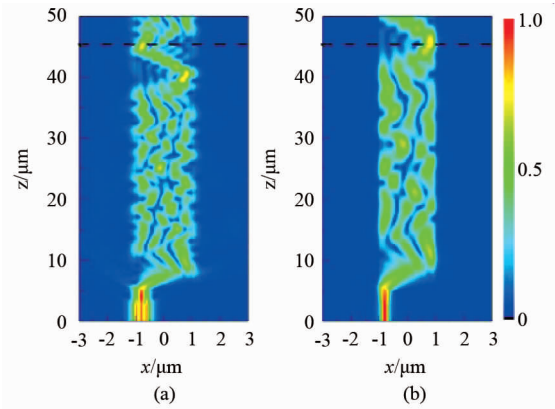


图3 光场在MMI耦合器中的传输情况(a)准TE模; (b)准TM模  
 Fig.3 The field propagation along the MMI coupler: (a) quasi-TE mode and (b) quasi-TM mode

## 2 数值结果与讨论

### 2.1 结构参数优化

我们利用三维全矢量束传播法对偏振分束器的结构参数进行优化.根据公式(1),减小MMI耦合器宽度能够控制器件长度,然而宽度太窄会造成输出端口之间的模式发生不必要的耦合.因此我们将MMI1设计为锥形,即两端较宽保证输出波导有足够的间距,中间较窄以减小公式(1)中的有效宽度 $W_e$ .从而减小器件长度<sup>[12]</sup>.根据下式来确定MMI1的宽度:

$$W(z) = W_e + (W_1 - W_0)(L_1/2 - Z)^2/(L_1/2)^2 \quad (2)$$

其中  $W_1$  是波导两端的最大宽度,  $W_0$  是波导中间的最小宽度. 首先考虑只有 MMI1 的情况下, MMI1 段的长度  $L_1$  (即准 TM 模在 MMI1 中的自镜像长度) 和两偏振模在端口 C 处的传输率 (transmission ratio,  $TR$ ) 随宽度比  $\eta = W_0/W_1$  的变化关系, 如图 4 所示, 其中  $W_1$  设定为  $2 \mu\text{m}$ ,  $TR$  定义为输出功率与输入功率之比. 从图中可见,  $L_1$  随着  $\eta$  的减小而线性缩短, 说明锥形的 MMI 波导能够有效减小器件长度. 准 TE 模由于不满足成像条件, 几乎没有能量从端口 C 输出. 由于波导弯曲造成的损耗, 准 TM 模的传输率随着  $\eta$  的减小而减小. 因此需要在波导长度和传输率之间做出权衡. 这里我们取  $\eta$  的值为 0.8, 此时 MMI1 波导的长度为  $31 \mu\text{m}$ , 准 TE 和准 TM 模的传输率分别为 0.005 和 0.838.

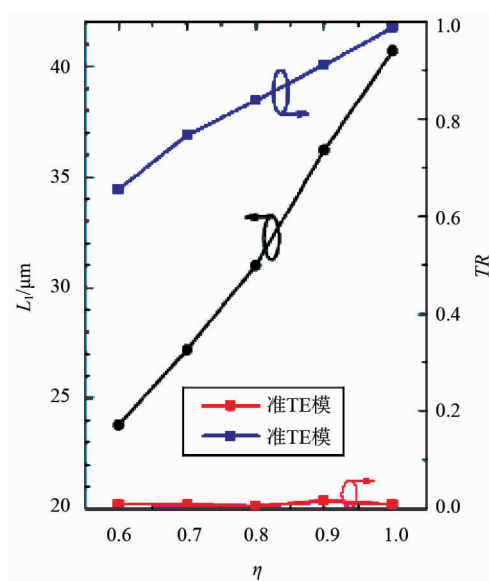


图 4 MMI1 的长度以及两偏振光的传输率关于  $\eta$  的变化关系

Fig. 4 The length of the MMI1 section and the transmission ratio ( $TR$ ) of both polarizations as a function of  $\eta = W_0/W_1$

我们在 MMI1 末端的左侧级联一个宽度稍小的 MMI2 耦合器来收集准 TE 模的光场. 由于 MMI2 的长度较短, 如果也采用锥形结构对波导长度的减小有限, 反而会引入较大的损耗, 因此 MMI2 采用直波导. 为了确定 MMI2 的宽度  $W_2$ , 我们研究了 MMI2 的长度  $L_2$  与两偏振模的插入损耗 (insert loss,  $IL$ ) 关于  $W_2$  的变化关系, 如图 5 所示.  $IL$  定义为  $IL = -10 \log \left( \frac{P_o}{P_i} \right)$ , 其中  $P_o$  是准 TE 模传输下端口 B 的功率或准 TM 模传输下端口 C 的功率,  $P_i$  是输入功率. 从图中

可见, 随着 MMI2 的宽度变窄, 有一部分准 TE 模的光场无法被 MMI2 接收而泄漏出去, 造成插入损耗逐渐增大. 对于准 TM 模, 当  $W_2$  比较小时很少有准 TM 模耦合入 MMI2, 因此插入损耗保持平缓. 另一方面, 由于 MMI2 的宽度增加使 MMI2 与输出端口 C 之间的间距变小, 加剧波导之间的耦合, 因此当  $W_2$  大于  $1.3 \mu\text{m}$  时, 两偏振模的插入损耗都会逐渐增大. 这里, 我们取  $W_2$  为  $1.3 \mu\text{m}$  以确保两偏振模的插入损耗都较小. 对应的波导长度  $L_2$  为  $11 \mu\text{m}$ . 因此, 整个器件的 MMI 工作区的总长度为  $42 \mu\text{m}$ , 相比取两偏振模自镜像长度公倍数的设计方法, 器件尺寸大大减小.

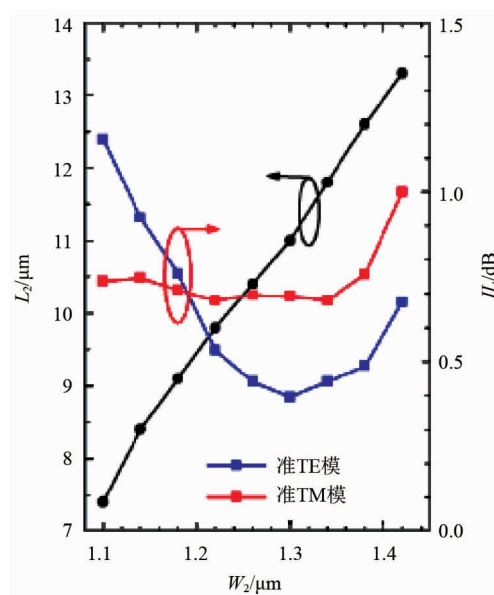


图 5 MMI2 的长度以及两偏振光的插入损耗关于 MMI2 宽度的变化关系

Fig. 5 The length of the MMI2 section and the insert loss ( $IL$ ) of both polarizations as a function of the MMI2 width

## 2.2 器件性能分析

我们利用偏振消光比 (extinction ratio,  $ER$ ) 这一参数来对设计的偏振分束器进行性能评估, 定义为  $ER = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$ , 其中  $P_1$  和  $P_2$  分别是准 TE 模传输下端口 B 的准 TE 和准 TM 模的功率, 或准 TM 模传输下端口 C 的准 TM 和准 TE 模的功率. 图 6(a) 给出了消光比关于 MMI1 长度  $L_1$  的变化关系. 从图中可见, 两偏振模的消光比受长度影响都很大, 当  $L_1$  偏离  $31 \mu\text{m}$  时性能下降非常明显. 参数  $L_1$  在  $30.55$  到  $31.29 \mu\text{m}$  之间时消光比始终大于  $20 \text{ dB}$ , 因此其制造容差为  $0.74 \mu\text{m}$ . 相比于  $L_1$ , MMI2 的长度  $L_2$  的

情况要稍复杂一些,如图 6(b)所示. 对于准 TM 模输入,消光比在  $L_2$  的参数范围内始终高于 23 dB,因为此时几乎没有准 TE 模进入端口 C,如图 3(a)虚线处所示. 由于 MMI2 与端口 C 的模式之间会产生微小的耦合,因此准 TM 模的消光比成周期性的变化. 另一方面,准 TE 模的消光比受  $L_2$  的影响相对较大,因为 MMI2 的长度会影响准 TE 模在其中的干涉情况. 对于参数  $L_2$ ,消光比大于 20 dB 的范围是 9.21 到 12.19  $\mu\text{m}$ ,即制造容差为 2.98  $\mu\text{m}$ . 消光比与波导宽度的制造误差的变化关系如图 6(c)所示. 我们假设输入输出波导和两个 MMI 波导由于制造误差造成的宽度变化相同,图中负值表示过刻蚀而正值表示刻蚀不足. 从图中可见,两偏振模的消光比对于宽度变化都很敏感. 宽度变化会导致自镜像长度与 MMI 波导长度不匹配,造成器件性能的下降,因此在刻蚀过程中要小心控制宽度. 令消光比高于 20 dB 的宽度误差范围在 -10 到 16 nm 之间,宽度的制造容差为 26 nm.

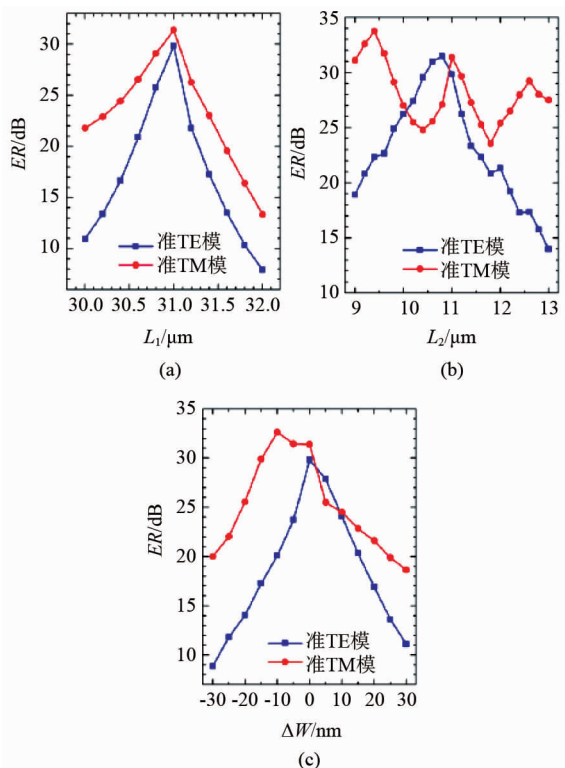


图 6 偏振消光比与结构参数的变化关系(a) MMI1 的长度;(b) MMI2 的长度;(c) 波导宽度的制造误差  
 Fig.6 The polarization ERs of the PS as functions of (a) the length of MMI1, (b) the length of MMI2, and (c) the fabrication error in widths

器件的波长相关性如图 7 所示,波长范围从 1.50 到 1.60  $\mu\text{m}$ . 可以看出两偏振模的性能对波长

都很敏感,准 TM 模的消光比要好于准 TE 模. 消光比高于 20 dB 的工作带宽为 43 nm,即波长范围从 1.527 到 1.570  $\mu\text{m}$ ,覆盖整个 C 波段. 我们同样研究了插入损耗与波长变化的关系. 从图 7(b)中看出,准TE模的插入损耗受波长影响更大,这与准TE

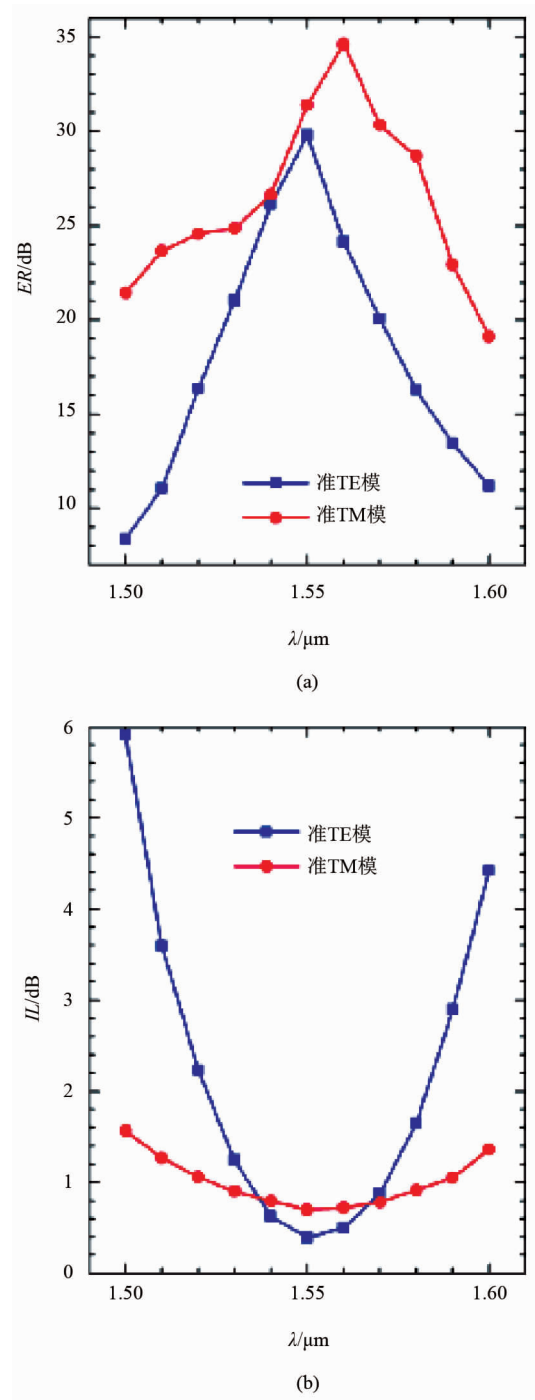


图 7 (a) 偏振消光比和(b)插入损耗关于工作波长的变化关系  
 Fig.7 (a) The extinction ratio and (b) the insert loss of the PS as a function of the operating wavelength  $\lambda$

(下转第 592 页)



cient photon conversion efficiency ammonia terahertz cavity laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009; **26**(6), 0642011 – 0642014.

[6] JIU Zhi-Xian, ZUO Du-Luo, MIAO Liang, *et al.* An efficient pulsed  $\text{CH}_3\text{OH}$  terahertz laser pumped by a TEA  $\text{CO}_2$  laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010; **27**(2): 0242111 – 0242113.

[7] QI Chun-Chao, ZUO Du-Luo, MENG Fan-Qi, *et al.* Theo-

retical design of a wedged output coupler coated by capacitive strip-grating for optically pumped terahertz lasers [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010; **27**(4), 0442051 – 0442054.

[8] Born M and Wolf E. *Principles of Optics* [M]. New York: Pergamon Press. 1959; 322 – 324.

[9] Loewenstein E V, Smith D R, Morgan R L. Optical constants of far infrared materials 2: crystalline solids [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(2): 398 – 406.

(上接 587 页)

模传播的路径长于准 TM 模有关. 波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时准 TE 和准 TM 模的插入损耗分别为 0.395 和 0.699 dB.

图 8 是两偏振光在偏振分束器中的传播情况, 相关参数如下:  $W_1 = 2 \mu\text{m}$ ,  $\eta = 0.8$ ,  $W_2 = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $L_1 = 31 \mu\text{m}$ ,  $L_2 = 11 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ . 准 TM 模在 MMI1 波导中经过干涉, 大部分能量从端口 C 输出; 而准 TE 模经过 MMI1 和 MMI2 两个耦合器的传输最终从端口 B 输出. 可见, 该器件有效地实现了偏振束分离.

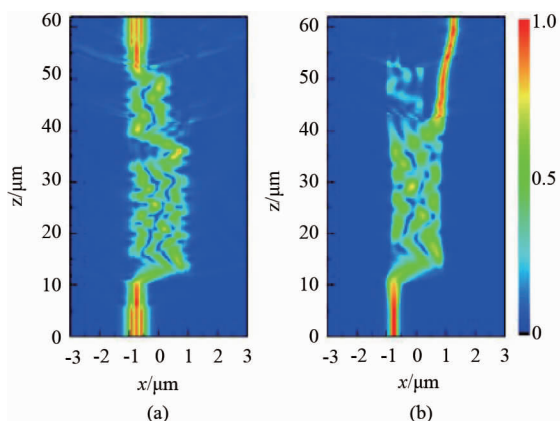


图 8 光场在偏振分束器中的传输情况: (a) 准 TE 模; (b) 准 TM 模

Fig. 8 The field evolution along the propagation distance through the designed PS: (a) quasi-TE mode and (b) quasi-TM mode

### 3 结论

基于槽波导结构, 提出了一种级联 MMI 耦合器型偏振分束器方案. 利用三维全矢量束传播法对关键参数进行了优化, 获得 MMI 工作区总长度为  $42 \mu\text{m}$ ; 准 TE 和准 TM 模的偏振消光比分别为 29.8 和 31.4 dB,  $1.55 \mu\text{m}$  波长下的插入损耗分别为 0.395 和 0.699 dB, 消光比大于 20 dB 时光带宽为 43 nm, 覆盖整个 C 波段; 最后详细分析了器件结构参数的制造容差, 为器件的研制提供参考. 本文提出的偏振分束器具有良好的偏振分离性能, 并且兼具结构紧凑, 偏振消光比高, 插入损耗小等优点, 有望在 SOI

光子集成光路的偏振控制中得到应用.

### References

- [1] BARWICZ T, WATTS M R, POPOVIC M A, *et al.* Polarization-transparent microphotonic devices in the strong confinement limit [J]. *Nat. Photonics*, 2007, **1**(1): 57 – 60.
- [2] ZHANG J, YU M, LO G, *et al.* Silicon-waveguide-based mode evolution polarization rotator [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2010, **16**(1): 53 – 60.
- [3] JIN L, CHEN Q, WEN L. Mode-coupling polarization rotator based on plasmonic waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 2014, **39**(9): 2798 – 2801.
- [4] MA Y, HUANG D. A compact silicon-on-insulator MMI-based polarization splitter: 2007 *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, OMENS*, 2007 [C]. 121 – 122.
- [5] HONG J M, RYU H H, PARK S R, *et al.* Design and fabrication of a significantly shortened multimode interference coupler for polarization splitter application [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(1): 72 – 74.
- [6] CHHEQNG V, LEE T, OH G, *et al.* Compact polarizing beam splitter based on a metal-insulator-metal inserted into multimode interference coupler [J]. *Opt. Express*, 2013, **21**(18): 20880 – 20887.
- [7] GUAN X, WU H, SHI Y, *et al.* Extremely small polarization beam splitter based on a multimode interference coupler with a silicon hybrid plasmonic waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 2014, **39**(2): 259 – 262.
- [8] ZHOU Fei, FEI Hong-Ming, YANG Yi-Biao, *et al.* Polarization beam splitter for Y type photonic crystal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周飞, 费宏明, 杨毅彪, 等. Y 型光子晶体偏振光分束器. *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(2): 154 – 157.
- [9] XIAO J, SUN X. A modified full-vectorial finite-difference beam propagation method based on  $H$ -fields for optical waveguides with step-index profiles [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **266**(2): 505 – 511.
- [10] ALMEIDA V R, XU Q, BARRIOS C A, *et al.* Guiding and confining light in void nanostructure [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11): 1209 – 1211.
- [11] SOLDANO L B, PENNING S E C M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 615 – 627.
- [12] LEVY D S, SCARMOZZINO R, Li Y, *et al.* Length reduction of tapered  $N \times N$  MMI devices [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 830 – 832.