

偏振无关多模干涉型 1×3 光功分器的设计

汪静丽^{1*}, 皇甫利国¹, 陈鹤鸣²

¹南京邮电大学电子与光学工程学院, 微电子学院, 江苏 南京 210023;

²南京邮电大学贝尔英才学院, 江苏 南京 210023

摘要 设计具有宽带性能的偏振无关 1×3 光功分器, 采用离子辅助沉积方法调节三明治结构芯层 SiN_x 的折射率, 使得正交偏振模的拍长相等而实现偏振无关; 梯形多模干涉波导与锥形波导的组合可实现器件宽带宽、低损耗及良好的分光均匀性。运用有限时域差分法进行建模仿真及参数优化, 结果表明: 器件的多模干涉波导长度仅为 $13.2 \mu\text{m}$, 附加损耗低于 0.07 dB , 不均匀度低于 0.03 dB , 0.5 dB 带宽高达 255 nm , 可覆盖 S、C、L、U 以及部分 E 波段, 在未来集成光学系统中具有较高的应用价值。

关键词 集成光学; 多模干涉; 偏振无关; 三明治结构

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0713001

Design of Polarization-Insensitive Multimode Interference 1×3 Optical Power Splitter

Wang Jingli^{1*}, Huangfu Ligu¹, Chen Heming²

¹College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

²Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract We proposed a polarization-insensitive 1×3 optical power splitter with broadband performance. Ion assisted deposition was used to change the refractive index of the core SiN_x in a sandwiched structure, so that the beat lengths of the orthogonal polarization modes were equal and thus polarization insensitivity was achieved. A combined structure of trapezoidal multimode interference waveguide and tapered waveguide was introduced to realize broad bandwidth, low loss, and good beam splitting uniformity. Furthermore, a finite-difference time-domain method was applied to simulation and optimization, and the results demonstrate that the length of the multimode interference waveguide is only $13.2 \mu\text{m}$; the excess loss and imbalance of the splitter are lower than 0.07 dB and 0.03 dB , respectively. In addition, the 0.5 dB -loss bandwidth is as high as 255 nm , which can cover S, C, L, U, and part of E bands. Therefore, the proposed splitter has potential application value in the future integrated optical systems.

Key words integrated optics; multimode interference; polarization-insensitive; sandwiched structure

OCIS codes 130.3120; 260.3160; 230.7370

1 引言

近年来, 基于绝缘体上硅(SOI)材料的集成光

学器件, 由于其尺寸小、损耗低及与传统的 CMOS 工艺兼容等优势, 在光通信领域发挥着越来越重要的作用^[1]。基于 SOI 材料的光功分器是光通信网

收稿日期: 2020-09-04; 修回日期: 2020-09-15; 录用日期: 2020-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(61571237)、江苏省自然科学基金(BK20151509)、南京邮电大学校级科研基金(NY217047)

* E-mail: jlwang@njupt.edu.cn

络中关键的集成器件之一,常见的光功分器结构包括 Y 分支型^[2]、定向耦合器(DC)型^[3]和多模干涉(MMI)型^[4-5]等。其中:Y 分支型光功分器由于分支尖角工艺难度大,容易引起模式失配损耗;DC 型光功分器的工艺容差非常小;而 MMI 型光功分器因其损耗低及工艺容差性良好在集成光学领域得到了广泛应用。

目前,绝大多数 MMI 型光功分器侧重于实现器件的低损耗^[6-7]和小尺寸^[8-9]等,对于增大带宽的研究却很少,而具有宽带性能的光功分器可拓展其应用范围,满足目前光纤通信高速、大容量且低成本的发展需求。实现 MMI 型光功分器的宽带性能,可采用的方法是使用亚波长光栅结构的 MMI 波导^[10],但该方法存在工艺复杂、容差小及偏振敏感等问题。此外,大部分 MMI 型光功分器是偏振敏感的,会限制其应用范围。一般可通过引入金属作为覆盖层材料^[11]、调节 MMI 波导宽度^[12]或采用弧形 MMI 波导^[13]等方法实现偏振无关。然而前者会导致器件损耗增大,后两者会导致器件带宽窄且制作容差小,其应用范围受限。

综上,本文提出一种基于新结构的偏振无关宽带 1×3 光功分器。器件采用 Si/SiN_x/Si 三明治结构实现偏振无关,并且引入梯形 MMI 波导与锥形波导的新型组合结构:通过调整梯形上底宽度和腰边倾斜角度,可实现宽带宽及良好的分光均匀性;通过采用锥形结构的输入/输出波导,可进一步降低器件损耗并改善器件分光均匀性。采用有限时域差分法^[14](FDTD)进行建模仿真,在空间域和时间域上对电场 E 、磁场 H 进行离散处理并进行交替抽样,能直接模拟出电磁场的分布情况,精度高,是目前使用较多的数值模拟方法之一。结果表明:与同类器件相比,所提出的器件尺寸小、损耗低、工作带宽大且偏振无关,在未来集成光学系统中具有较高的应用价值。

2 工作原理及器件结构设计

2.1 MMI 工作原理

基于 MMI 型波导中的自成像效应^[4]可以确定 MMI 波导的长度 L_{MMI} ,对称干涉情况下, $1 \times N$ 的 MMI 波导中 N 重像点所对应的长度表示为 $L_{\text{MMI}} = \frac{3L_{\pi}}{4N}$,因此当 $N = 3$ 时,MMI 波导中三重像点所对应的长度为

$$L_{\text{MMI}} = L_{\pi}/4, \quad (1)$$

式中 L_{π} 为基模与一阶模的拍长,定义为

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4n_{\text{eff}}W_e^2}{3\lambda_0}, \quad (2)$$

其中 β_0 和 β_1 表示 MMI 波导中基模与一阶模的传播常数, n_{eff} 为有效折射率, λ_0 为光在真空中传输的波长, W_e 为基模的等效宽度。

2.2 器件结构的设计

如图 1(a) 所示,所设计的偏振无关 MMI 型 1×3 光功分器由 MMI 波导和输入、输出波导构成,且上述波导均采用如图 1(b) 所示的三明治截面结构。其中,Si 层和 SiN_x 层厚度分别是 $h(\text{Si}) = 0.25 \mu\text{m}$ 和 $h(\text{SiN}_x) = 0.1 \mu\text{m}$;Si^[15-16] 的折射率为 3.47,芯层 SiN_x^[17-19] 的折射率 $n(\text{SiN}_x)$ 可由离子辅助沉积法将范围调节为 1.72~3.43。器件中位于 MMI 波导中心处的输入波导和输出波导均为单模直波导和锥形波导的组合结构,其中单模直波导长度和宽度分别为 $L_0 = 5 \mu\text{m}$ 和 $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$ 。输入波导中锥形波导长度为 $L_{\text{taper_in}} = 5 \mu\text{m}$,宽度由 $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$ 渐变为 $W_{10} = 1 \mu\text{m}$,符合绝热条件^[20];输出波导中三根锥形波导长度均为 $L_{\text{taper_out}} = 5 \mu\text{m}$,宽度由 W_0 分别渐变为 W_{11} 、 W_{12} 和 W_{13} ,此外三根输出波导的间距为 W_g 。MMI 波导采用等腰梯形结构,其中腰边的倾斜角度为 θ ,上底和下底宽度分别为 W_1 和 W_2 ,梯形的高也即 MMI 波导的长度,为 L_{MMI} 。

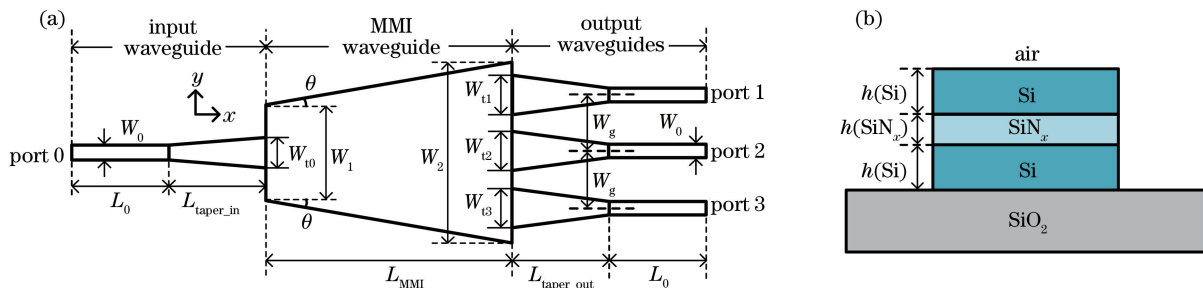


图 1 光功分器结构示意图。(a)俯视图;(b)波导截面示意图

Fig. 1 Schematic configuration of the optical power splitter structure. (a) Top view; (b) Cross section of the waveguide

3 器件参数的优化及性能分析

3.1 梯形 MMI 波导的优化

梯形 MMI 波导是实现器件偏振无关性能的关键。因为三明治结构中不同折射率材料之间具有电场不连续性^[21], TE 和 TM 偏振模的光场分别被限制于 Si 层和 SiN_x 层中。通过改变芯层 SiN_x 材料的折射率 $n(\text{SiN}_x)$, 可调节同一波长所对应的正交偏振模的拍长, 使其相等, 即

$$L_{\pi}(\lambda, \text{TE}) = L_{\pi}(\lambda, \text{TM}), \quad (3)$$

其中 $L_{\pi}(\lambda, \text{TE})$ 和 $L_{\pi}(\lambda, \text{TM})$ 分别表示波长为 λ 时的 TE 和 TM 偏振模的拍长。

由(1)式和(3)式可知, 要实现 MMI 型 1×3 光功分器的偏振无关性, 需要满足

$$\begin{aligned} L_{\text{MMI}}(\lambda, \text{TE}) &= L_{\pi}(\lambda, \text{TE})/4 = \\ L_{\text{MMI}}(\lambda, \text{TM}) &= L_{\pi}(\lambda, \text{TM})/4, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $L_{\text{MMI}}(\lambda, \text{TE})$ 和 $L_{\text{MMI}}(\lambda, \text{TM})$ 分别表示同一波长下两正交偏振模的三重像点所对应的长度。

此外, 梯形 MMI 波导中的 W_1 和 θ 决定了基于自成像效应产生干涉后的成像质量, 也会影响器件的分光均匀性和带宽性能。需将 W_1 和 θ 同时引入梯形 MMI 波导的优化中, 令其变化范围分别为 $2.5 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $0^\circ \sim 8^\circ$, 且需要保证任意一组 W_1 和 θ 时, 梯形 MMI 波导都具有偏振无关性。

下面以 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 、 $W_1 = 4 \mu\text{m}$ 和 $\theta = 3^\circ$ 为例, 讨论 $L_{\text{MMI}}(\lambda, \text{TE})$ 和 $L_{\text{MMI}}(\lambda, \text{TM})$ 随 $n(\text{SiN}_x)$ 的变化关系。由图 2 可知, 随着 $n(\text{SiN}_x)$ 的增大, 输入的 1550 nm 波长信号所对应的正交偏振模的 L_{MMI} 随之单调增加, 且 $L_{\text{MMI}}(\lambda, \text{TM})$ 的增长幅度大于 $L_{\text{MMI}}(\lambda, \text{TE})$, 这是因为 TM 偏振模主要被限制在芯层 SiN_x 中传输, 所以 $n(\text{SiN}_x)$ 增加时, TM 偏振模的有效折射率增长幅度变大。这使得两者存在交叉点(如图 2 中虚线所圈处), 当 $n(\text{SiN}_x) = 2.5$ 时, $L_{\text{MMI}}(\lambda, \text{TE}) = L_{\text{MMI}}(\lambda, \text{TM})$, 实现了偏振无关。并且当 $n(\text{SiN}_x)$ 在 $1.8 \sim 2.8$ 范围内变化时, Si/SiN_x/Si 的波导结构中 TE 和 TM 偏振模的光场分别被限制于 Si 层和 SiN_x 层中, 即说明 $n(\text{SiN}_x)$ 变化过程中, 器件波导依然对两正交偏振模的光场有较强的束缚能力。

取值范围内的任意一组 W_1 和 θ , 都需要通过调节三明治结构中 $n(\text{SiN}_x)$ 的大小, 实现偏振无关。图 3 给出了不同 W_1 情况下 $n(\text{SiN}_x)$ 随 θ 的变化关系: $n(\text{SiN}_x)$ 随着 W_1 增加而增加; 当 W_1 固定时, $n(\text{SiN}_x)$ 随着 θ 增加而减小。

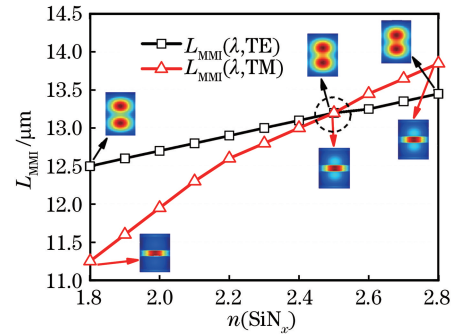


图 2 L_{MMI} 随 $n(\text{SiN}_x)$ 的变化, 其中插图表示当 $n(\text{SiN}_x)$ 分别为 1.8、2.5 和 2.8 时波导中的光场分布

Fig. 2 L_{MMI} as a function of $n(\text{SiN}_x)$, in which the inset shows the optical field distribution in the waveguide when $n(\text{SiN}_x)$ is 1.8, 2.5 and 2.8, respectively

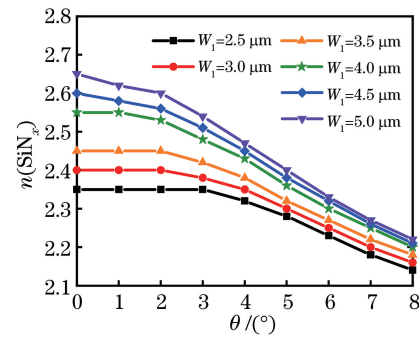


图 3 MMI 波导满足偏振无关时, 不同 W_1 情况下 $n(\text{SiN}_x)$ 随 θ 的变化

Fig. 3 $n(\text{SiN}_x)$ as a function of θ under different W_1 when the MMI waveguide is polarization-insensitive

为了衡量器件的带宽及分光均匀性, 需要计算不同 W_1 和 θ 时器件的关键性能: 不均匀度 (IM, ρ_{IM} , 单位 dB) 和 0.5 dB 带宽。通过分析其变化规律, 选取合适的 W_1 和 θ 。其中 0.5 dB 带宽是指当器件附加损耗 (EL, α_{EL} , 单位 dB) 小于 0.5 dB 时, 所对应的工作波长范围。IM 和 EL 分别定义为

$$\rho_{\text{IM}} = -10 \lg(\min P_i / \max P_i), \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{EL}} = -10 \lg\left(\sum_{i=1}^3 P_i / P_{\text{IN}}\right), \quad (6)$$

式中: $\min P_i$ 和 $\max P_i$ 分别表示各输出端口光功率中的最小和最大值; P_{IN} 是 Port0 端口的输入光功率; $\sum_{i=1}^3 P_i$ 是 Port1 至 Port3 输出端口的光功率和。

首先, 分析不同 W_1 、不同偏振模时器件的不均匀度随 θ 的变化关系, 如图 4(a) 和图 4(b) 所示: 不同 W_1 时, 不均匀度随 θ 的变化较为平缓; 当 W_1 较小时, 不均匀度较大, 尤其当 $W_1 = 2.5 \mu\text{m}$ 和 $3.0 \mu\text{m}$ 时, $\rho_{\text{IM}} \geq 0.6 \text{ dB}$, 器件分光均匀性较差, 这

主要是 MMI 波导中三重像点的能量分布不均匀所致;当 W_1 逐渐增大时,不均匀度随之减小;而当

$W_1 \geq 4 \mu\text{m}$ 时, $\rho_{\text{IM}} \leq 0.2 \text{ dB}$, 器件分光均匀性较好。因此 W_1 须大于等于 $4 \mu\text{m}$ 。

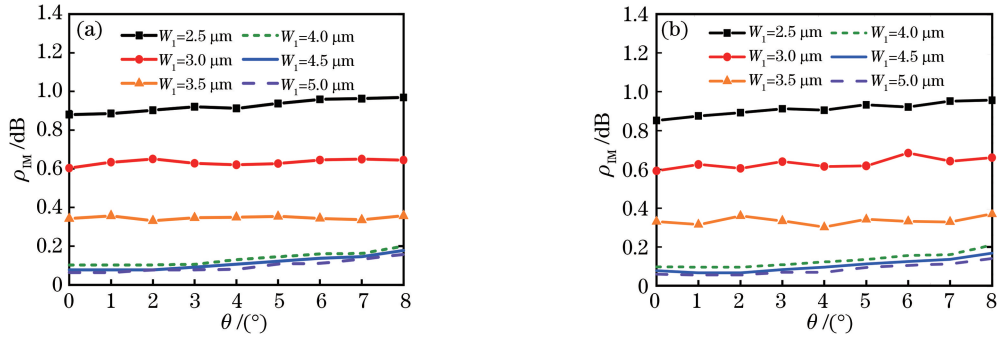


图 4 不同 W_1 时器件 IM 随 θ 的变化。(a) TE 偏振模;(b) TM 偏振模

Fig. 4 IM of the splitter as a function of θ under different W_1 . (a) TE mode; (b) TM mode

然后,分析不同 W_1 、不同偏振模时器件的 0.5 dB 带宽随 θ 的变化关系,如图 5(a)和图 5(b)所示。当 θ 较小时,器件带宽相对较小;随着 θ 逐渐增大至 3° 时,带宽达到峰值;而当 θ 继续增大时,带宽逐渐减小。其原因是 θ 较大时三重像点宽度增

加,光信号在锥形波导中传输过渡至 $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$ 的单模波导,损耗增多。此外,当 θ 固定时,0.5 dB 带宽随 W_1 的增大而减小,尤其当 $W_1 \geq 4.5 \mu\text{m}$ 时,带宽相对较小,因此需选取较小的 W_1 以实现器件的宽带宽性能。

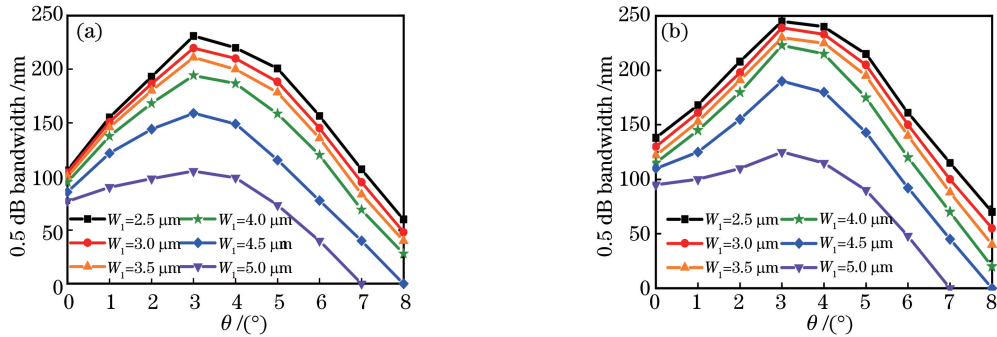


图 5 不同 W_1 时器件 0.5 dB 带宽随 θ 的变化。(a) TE 偏振模;(b) TM 偏振模

Fig. 5 0.5 dB bandwidth of the splitter as a function of θ under different W_1 . (a) TE mode; (b) TM mode

综上所述,可选取 $W_1 = 4 \mu\text{m}$, $\theta = 3^\circ$, 由此可确定 $n(\text{SiN}_x) = 2.5$, $W_2 = 5.38 \mu\text{m}$, $L_{\text{MMI}} = 13.2 \mu\text{m}$, $W_{t1} = W_{t2} = W_{t3} = 1.3 \mu\text{m}$, $W_g = 1.8 \mu\text{m}$ 。此时,TE (TM) 偏振模对应的 $\rho_{\text{IM}} = 0.106 \text{ dB}$ (0.098 dB), 0.5 dB 带宽为 205 nm (223 nm)。

3.2 锥形波导的优化

此外,在梯形 MMI 波导的优化过程中,当 θ 由 0° 增至 3° 时,干涉所形成的三重像点在 y 方向的宽度增加,如果只通过 $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$ 的单模直波导输出,则会造成部分光信号能量泄露,增加器件损耗。因此本研究采用锥形波导与梯形 MMI 波导的组合结构,并通过锥形结构的参数优化来提升器件性能。

首先,依次对 $L_{\text{taper_in}}$ 和 $L_{\text{taper_out}}$ 在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内优化,当 $L_{\text{taper_in}}$ 和 $L_{\text{taper_out}}$ 均等于 $6.5 \mu\text{m}$ 时

器件损耗较低,TE (TM) 偏振模对应的 EL 为 0.083 dB (0.076 dB)。

其次,输出侧锥形波导宽度 (W_{t1} 、 W_{t2} 和 W_{t3}) 的合理选择可有效减少输出光信号的能量泄露,需对其进行进一步优化,以降低器件损耗并提高分光均匀性。由于该器件 MMI 波导中产生对称干涉,因此 $W_{t1} = W_{t3}$ 。下面将 W_{t1} 和 W_{t3} 作为同一变量, W_{t2} 作为另一变量, W_{t1} 和 W_{t3} 的取值范围均为 $0.8 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 分析其与器件的 IM 和 EL 的关系。

不同偏振模时器件的 IM 随 W_{t1} 、 W_{t2} 和 W_{t3} 的变化关系,如图 6(a)和图 6(b)所示:当 W_{t1} 、 W_{t2} 和 W_{t3} 较小时,除了 $W_{t1} = W_{t2} = W_{t3}$ 外,器件的 IM 均较大,即均匀性较差;当三个宽度均逐渐增大时,器件的 IM 随之减小,即均匀性逐渐改善;而当宽度继

续增大时,均匀性则略微变差。在 W_{t1} 、 W_{t2} 和 W_{t3} 变化范围内,共有三处(如图 6 中箭头所指 A、B 和 C 点) IM 在 TE 和 TM 偏振模时较低:当 $W_{t1} = W_{t3} = 1.4 \mu\text{m}$ 、 $W_{t2} = 1.5 \mu\text{m}$ 时,IM 分别为

0.029 dB 和 0.024 dB;当 $W_{t1} = W_{t3} = 1.4 \mu\text{m}$ 、 $W_{t2} = 1.6 \mu\text{m}$ 时,IM 分别为 0.022 dB 和 0.027 dB;当 $W_{t1} = W_{t3} = 1.4 \mu\text{m}$ 、 $W_{t2} = 1.7 \mu\text{m}$ 时,IM 分别为 0.021 dB 和 0.027 dB。

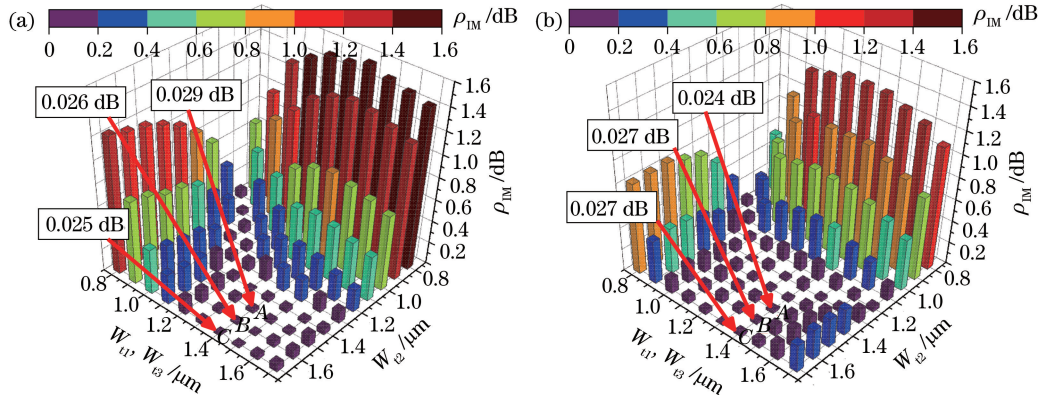


图 6 器件 IM 随 W_{t1} 、 W_{t2} 和 W_{t3} 的变化。(a) TE 偏振模;(b) TM 偏振模

Fig. 6 IM of the splitter as a function of W_{t1} , W_{t2} and W_{t3} . (a) TE mode; (b) TM mode

不同偏振模时器件的 EL 随 W_{t1} 、 W_{t2} 和 W_{t3} 的变化关系,如图 7(a)和图 7(b)所示:当 W_{t1} 、 W_{t2} 和 W_{t3} 较小时,器件 EL 较大;当宽度逐渐增大时,EL 逐渐减小;而当宽度更大时,由于光信号在锥形波导中传输过渡至单模波导,损耗增加,EL 相应增大。在 W_{t1} 、 W_{t2} 和 W_{t3} 变化范围内,当 $W_{t1} = W_{t3} =$

$1.4 \mu\text{m}$ 、 $W_{t2} = 1.5 \mu\text{m}$ 时(如图 7 中箭头所指 A 点,且与图 6 中 A 点相同),EL 在 TE 和 TM 偏振模时均取得最小值,分别为 0.064 dB 和 0.062 dB。而图 6 中所指出的 IM 较小的 B、C 两点处的损耗略大,在 TE(TM)偏振模时,EL 分别为 0.092 dB(0.088 dB)和 0.106 dB(0.114 dB)。

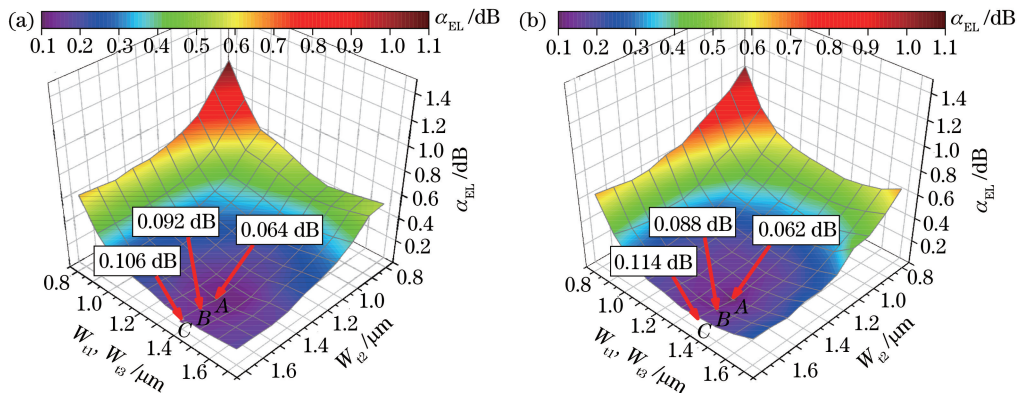


图 7 器件 EL 随 W_{t1} 、 W_{t2} 和 W_{t3} 的变化。(a) TE 偏振模;(b) TM 偏振模

Fig. 7 EL of the splitter as a function of W_{t1} , W_{t2} and W_{t3} . (a) TE mode; (b) TM mode

综合比较器件的 IM 和 EL,当 $W_{t1} = W_{t3} = 1.4 \mu\text{m}$ 、 $W_{t2} = 1.5 \mu\text{m}$ 时性能较好,此时器件在 TE(TM)偏振模的 IM 为 0.029 dB(0.024 dB),EL 为 0.064 dB(0.062 dB)。

3.3 性能分析

综上所述,优化后的器件参数为: $W_1 = 4 \mu\text{m}$, $W_2 = 5.38 \mu\text{m}$, $\theta = 3^\circ$, $L_{\text{MMI}} = 13.2 \mu\text{m}$, $n(\text{SiN}_x) = 2.5$, $W_g = 1.8 \mu\text{m}$, $L_{\text{taper_in}} = L_{\text{taper_out}} = 6.5 \mu\text{m}$,

$W_{t1} = W_{t3} = 1.4 \mu\text{m}$, $W_{t2} = 1.5 \mu\text{m}$ 。图 8 给出了两正交偏振模时 1550 nm 波长光信号在器件中的传输光场分布,该器件完成了 1550 nm 波长光信号的 1×3 均匀功分,同时也实现了偏振无关。此时,TE(TM)偏振模时器件 IM 为 0.029 dB(0.024 dB),EL 为 0.064 dB(0.062 dB),该器件损耗低于近年提出的 1×3 光功分器^[22-23],同时分光均匀性较好。

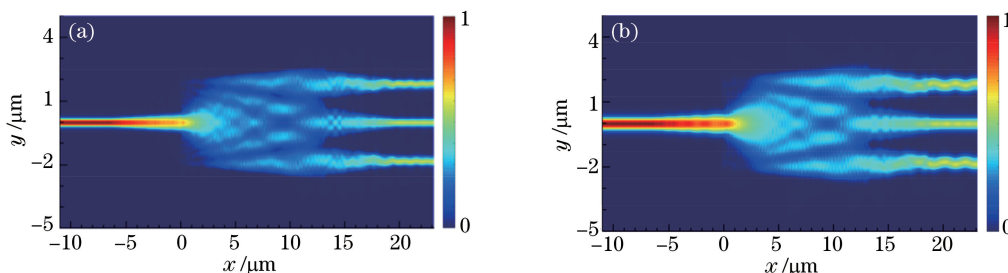


图 8 MMI 型 1×3 光功分器光场分布图。(a) TE 偏振模;(b) TM 偏振模

Fig. 8 Field distributions of the MMI 1×3 optical power splitter. (a) TE mode; (b) TM mode

实际上,光源并不是单色光,需要考虑光源谱宽对器件性能的影响。图 9(a)和图 9(b)分析了当光源谱宽为 20 nm 时,光波长变化对干涉长度 L_{MMI} 、附加损耗 α_{EL} 以及分光不均匀度 ρ_{IM} 的影响。由图 9(a)可知, L_{MMI} 随着波长的增大而小幅度减小,同时 TE 和 TM 偏振模时其取值几乎相同。当 $\lambda = 1540$ nm, $L_{MMI} = 13.3 \mu\text{m}$ 时,TE(TM)偏振模下

$\alpha_{EL} = 0.1$ dB(0.09 dB), $\rho_{IM} = 0.042$ dB(0.035 dB); 当 $\lambda = 1545$ nm, $L_{MMI} = 13.25 \mu\text{m}$ 时,TE(TM)偏振模下 $\alpha_{EL} = 0.075$ dB(0.07 dB), $\rho_{IM} = 0.035$ dB(0.031 dB)。可以发现,光源谱宽为 20 nm 时,所计算的各性能参数值与 $\lambda = 1550$ nm 时相差很小,即波长变化对器件的干涉长度、附加损耗及分光不均匀度的影响较小。

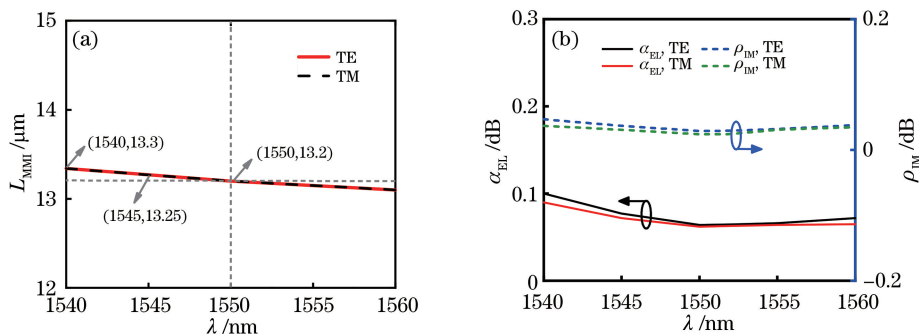


图 9 性能参数随波长的变化。(a) L_{MMI} ; (b) EL 和 IM

Fig. 9 Performance parameters of the splitter as functions of wavelength. (a) L_{MMI} ; (b) EL and IM

文献[19]表明: SiN_x 材料折射率在红外波段随波长变化不敏感,即随着波长的变化,三明治结构中芯层材料的折射率几乎保持不变,对器件的偏振无关特性没有影响。图 10 给出了器件 EL、IM 和偏振相关损耗(PDL, α_{PDL})随光波长的变化关系,波长范围为 300 nm。结果表明:无论是 TE 还是 TM 偏振

模,器件 1550 nm 波长处 EL 均小于 0.07 dB,且其 PDL 小于 0.01 dB;TE 和 TM 偏振模的 0.5 dB 带宽分别为 255 nm (1445~1700 nm) 和 285 nm (1415~1700 nm),可覆盖 S、C、L、U 以及部分 E 波段,且该带宽范围内 IM 均小于 0.2 dB。该器件与文献[12]和文献[13]所提的偏振无关 MMI 型光功

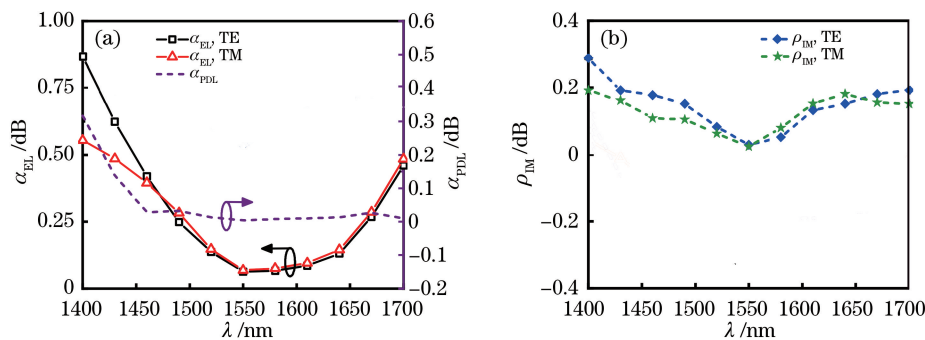


图 10 性能参数 EL、PDL 及 IM 随波长的变化(a) EL 和 PDL;(b) IM

Fig. 10 Performance parameters including EL, PDL and IM as functions of wavelength. (a) EL and PDL; (b) IM

分器相比, EL 和 IM 更低, 且 0.5 dB 带宽被拓宽 4 倍以上。

由于器件在工艺制作中会存在一定的偏差, 因此需考察工艺偏差对其光学性能的影响。依次对梯形 MMI 波导上、下底宽度 W_1 和 W_2 以及高 L_{MMI} 进行容差分析, 结果表明: 器件对 W_1 的工艺容差性较好, 当 W_1 从 $3.7 \mu\text{m}$ 增加到 $4.2 \mu\text{m}$ 时, $\alpha_{\text{EL}} < 0.5 \text{ dB}$, $\rho_{\text{IM}} < 0.2 \text{ dB}$; 器件对 W_2 的工艺容差性同样较好, 当 W_2 从 $5.0 \mu\text{m}$ 增加到 $5.6 \mu\text{m}$ 时, $\alpha_{\text{EL}} < 0.5 \text{ dB}$, $\rho_{\text{IM}} < 0.25 \text{ dB}$; 当 L_{MMI} 有 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的误差时, 器件仍然有良好的性能, 尤其当 L_{MMI} 在 $13 \mu\text{m}$ 至 $14 \mu\text{m}$ 范围内变化时, $\alpha_{\text{EL}} < 0.2 \text{ dB}$, $\rho_{\text{IM}} < 0.15 \text{ dB}$ 。该器件表现出的容差性能优于同类型光功分器^[12-13]。

此外, 目前大多数情况下, SiN_x 材料上生长出的晶体均为多晶 Si, 需要考虑材料的吸收损耗对器件性能的影响。针对上述情况, 进一步对所提结构进行参数优化, 结果表明: 当 $h(\text{Si}) = 0.1 \mu\text{m}$, $h(\text{SiN}_x) = 0.1 \mu\text{m}$, $n(\text{SiN}_x) = 2.5$, $W_1 = 4 \mu\text{m}$, $W_2 = 5.38 \mu\text{m}$, $\theta = 3.5^\circ$, $L_{\text{MMI}} = 13.5 \mu\text{m}$, $W_g = 1.8 \mu\text{m}$, $W_{t1} = W_{t3} = 1.4 \mu\text{m}$, $W_{t2} = 1.5 \mu\text{m}$, $L_{\text{taper}} = 6.5 \mu\text{m}$ 时, 器件性能最优。此时 TE(TM) 偏振模的 ρ_{IM} 为 0.035 dB (0.028 dB); α_{EL} 为 1.56 dB (1.33 dB), 与 SiN_x 上生长单晶 Si 时器件损耗 (α_{EL} 为 0.064 dB 和 0.062 dB) 相比, 有所增加。近期有研究表明^[24], 可以在 SiN_x 薄膜上生长出单晶 Si 量子点, 未来随着技术不断提高, 有望在 SiN_x 薄膜上生长出单晶 Si。Si/ SiN_x /Si 结构应用于器件时具有优势^[15-16], 故此类器件将会有广阔的应用前景。

4 结 论

设计了一种偏振无关 MMI 型 1×3 光功分器。讨论了利用 Si/ SiN_x /Si 三明治结构实现梯形 MMI 波导的偏振无关的方法。通过离子辅助沉积方法调整 $n(\text{SiN}_x)$, 使得同一波长下正交偏振模的拍长相等等而实现偏振无关。然后对梯形 MMI 波导与锥形波导的组合结构进行了设计, 并分别对梯形 MMI 波导上底宽度、腰边倾斜角度和锥形波导宽度等参数进行了优化。最后对器件的性能分析表明, 该光功分器 TE 和 TM 偏振模时的 EL 分别为 0.064 dB 和 0.062 dB , IM 分别为 0.029 dB 和 0.024 dB , 0.5 dB 带宽可达 255 nm 和 285 nm 。器件结构紧凑, 性能优越, 在未来集成光学系统中有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Xu Z Y, Lyu T, Sun X H. Interleaved subwavelength gratings strip waveguide based TM pass polarizer on SOI platform[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1-10.
- [2] Tao S H, Fang Q, Song J F, et al. Cascade wide-angle Y-junction 1×16 optical power splitter based on silicon wire waveguides on silicon-on-insulator[J]. Optics Express, 2008, 16(26): 21456-21461.
- [3] Yamada H, Chu T, Ishida S, et al. Optical directional coupler based on Si-wire waveguides[C]// First IEEE International Conference on Group IV Photonics, September 29-October 1, 2004, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2004: 145-147.
- [4] 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.
- [5] Sheng Z, Wang Z Q, Qiu C, et al. A compact and low-loss MMI coupler fabricated with CMOS technology[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(6): 2272-2277.
- [6] Roth J P, Kühler T, Griese E. A comparison of higher-order graded-index MMI-based splitters in thin glass sheets for PCB integration[C]//2018 IEEE 22nd Workshop on Signal and Power Integrity (SPI), May 22-25, 2018, Brest, France. New York: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [7] Ren F, Chen W, Zhangsun T W, et al. Variable-ratio mode-insensitive 1×2 power splitter based on MMI couplers and phase shifters[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(5): 1-12.
- [8] Xu Y, Xiao J B. An ultracompact polarization-insensitive silicon-based strip-to-slot power splitter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(4): 536-539.
- [9] Meng C, Qiu J F, Tian Y, et al. A broadband compact 1×3 power splitter designed with inverse design method [C] // 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), September 24-27, 2016, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [10] Maese-Novo A, Halir R, Romero-García S, et al. Wavelength independent multimode interference coupler[J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7033-7040.
- [11] Pan C, Rahman B M A. Compact polarization-independent MMI-based 1×2 power splitter using metal-cap silicon-on-insulator waveguide [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 1-14.

- [12] Dai D, He S. Optimization of ultracompact polarization-insensitive multimode interference couplers based on Si nanowire waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(19): 2017-2019.
- [13] Dai D X, He S L. Proposal for diminishment of the polarization-dependency in a Si-nanowire multimode interference (MMI) coupler by tapering the MMI section [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(8): 599-601.
- [14] Zhou T Y, Li L J, Ren J J, et al. Pulsed terahertz nondestructive testing of glass fiber reinforced plastics based on FDTD [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1226002.
周桐宇, 李丽娟, 任姣姣, 等. 基于 FDTD 的玻璃纤维增强复合材料脉冲太赫兹无损检测 [J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1226002.
- [15] Shi Y C, Anand S, He S L. A polarization-insensitive 1310/1550-nm demultiplexer based on sandwiched multimode interference waveguides [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(22): 1789-1791.
- [16] Wang Z C, Dai D X, He S L. Polarization-insensitive ultrasmall microring resonator design based on optimized Si sandwich nanowires[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(20): 1580-1582.
- [17] Lee C C, Chen H L, Hsu J C, et al. Interference coatings based on synthesized silicon nitride [J]. Applied Optics, 1999, 38(10): 2078-2082.
- [18] Guler I. Optical and structural characterization of silicon nitride thin films deposited by PECVD [J]. Materials Science and Engineering: B, 2019, 246: 21-26.
- [19] Wang Q F, Liu S, Tang H H, et al. Study on a-Si: H and SiN_x films for tunable filter [C] //2016 25th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), May 21-23, 2016, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [20] Fu Y F, Ye T, Tang W J, et al. Efficient adiabatic silicon-on-insulator waveguide taper [J]. Photonics Research, 2014, 2(3): A41-A44.
- [21] Wang J L, Chen Z Y, Chen H M. Design of polarization-insensitive 1×2 multimode interference demultiplexer based on Si₃N₄/SiN_x/Si₃N₄ sandwiched structure[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(5): 054206.
汪静丽, 陈子玉, 陈鹤鸣. 基于 Si₃N₄/SiN_x/Si₃N₄ 三明治结构的偏振无关 1×2 多模干涉型解复用器的设计 [J]. 物理学报, 2020, 69(5): 054206.
- [22] W Li P L, Chen Y, Zhang Y F, et al. Polarization independent 1×3 equal optical power splitter based on self-collimation effect in two-dimensional photonic crystal [J]. Optical Engineering, 2019, 58(9): 097103.
- [23] Han X M, Yu Y L. Optimization of a thermally tuned silicon-based reconfigurable optical power splitter with thermal isolations [J]. Optical Engineering, 2017, 56(1): 017106.
- [24] Liu J, Zhang W J, Liu S Z. H₂-Ar dilution for improved c-Si quantum dots in P-doped SiN_x: H thin film matrix[J]. Applied Surface Science, 2017, 396: 235-242.