

激光与光电子学进展

分光比可设计的偏振无关光功分器研究

汪静丽^{1*}, 刘海广¹, 张跃腾¹, 宋雨辰¹, 沈晗潇¹, 陈鹤鸣², 钟凯³¹南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)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;³天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电信息技术重点实验室, 天津 300072

摘要 基于三明治结构和绝热耦合器,设计了一种分光比可设计的偏振无关光功分器,对波长为 1550 nm 的光信号实现所需分光比的功率分配。通过调节三明治结构中间层材料 SiN_x 的折射率,使同一波长下横电(TE)和横磁(TM)偏振模的分光比相等,实现偏振无关,通过改变绝热耦合器波导间隙的不对称性,获得可设计的分光比。运用三维有限时域差分方法,对器件进行建模仿真,最终结果表明:所设计的器件耦合长度仅为 7 μm,可设计分光比的最大范围为 0.50~0.95,同时支持 TE 和 TM 偏振模,插入损耗均低于 0.31 dB,分光比容差在 ±0.01 内的带宽可达 100 nm,在未来光子集成光路系统中具有潜在的应用价值。

关键词 分光比可设计; 绝热耦合器; 三明治结构; 偏振无关; SiN_x

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222232

Polarization-Independent Optical Power Splitter with a Designable Splitting Ratio

Wang Jingli^{1*}, Liu Haiguang¹, Zhang Yueteng¹, Song Yuchen¹, Shen Hanxiao¹,
Chen Heming², Zhong Kai³¹College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;²Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;³Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, Jiangsu, China

Abstract Based on a sandwich structure and adiabatic coupler, a polarization-independent optical power splitter with a designable splitting ratio is designed to achieve power distribution for the 1550 nm wavelength optical signal with a designable splitting ratio. By adjusting the refractive index of the sandwiched middle layer material SiN_x, the splitting ratios of the transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarization modes are made equal at the same wavelength, and a polarization-independence function is realized. Next, the designable splitting ratio function is obtained by varying the asymmetry of the waveguide gaps in the adiabatic coupler. The three-dimensional finite-difference time-domain method is used for modeling and simulations. The results reveal that the coupling length of the proposed device is only 7 μm. The device can achieve designable splitting ratios ranging from 0.50 to 0.95 and simultaneously support the TE and TM polarization modes. The insertion loss value is lower than 0.31 dB. A 100 nm bandwidth can be obtained when the tolerance of the splitting ratio is within ±0.01. The proposed approach is potentially applicable to future photonic integrated circuit systems.

Key words designable splitting ratio; adiabatic coupler; sandwich structure; polarization-independent; SiN_x

1 引言

光子集成光路(Photonic integrated circuits, PICs)^[1]是下一代光网络中开发大容量、高速和宽带光互连的最佳选择之一。光功分器作为光子集成光路中的重要元件,被广泛地应用于纳米光子相控阵^[2]、信号检测与

收稿日期: 2022-07-03; 修回日期: 2022-08-04; 录用日期: 2022-09-13; 网络首发日期: 2022-09-23

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)

通信作者: *jlwang@njupt.edu.cn

反馈^[3-6]、非对称马赫-曾德尔干涉仪^[7]和波分复用系统^[8]等。在前三者的应用中,通常需要光功分器具有可自由选择的分光比。目前已经报道的具有分光比可设计功能的光功分器,主要采用如下结构:非对称多模干涉(Multimode interference, MMI)型^[9-11]、定向耦合器(Directional coupler, DC)型^[12-13]、Y型分支^[14]和绝热耦合器(Adiabatic coupler, AC)^[15-18]等。其中非对称多模干涉型虽然具有大带宽,但其插入损耗较大;定向耦合器型结构简单,但对波长和制造误差相对敏感;Y型分支对分支角敏感,容易造成过大的模式失匹损耗;而绝热耦合器型因其结构紧凑、带宽大、损耗小等优点,被广泛应用于分光比可设计的光功分器设计中。

但是,迄今为止所报道的分光比可设计的光功分器绝大多数都是偏振相关的,即所设计的器件仅能满足某一偏振态正常工作。实际中,光在光网络中传输时的偏振态是随机的,因此器件的偏振敏感性在一定程度上将限制其应用。

综上,本文提出了一种基于三明治结构的绝热耦合器型分光比可设计的偏振无关光功分器。通过改变三明治结构中间层 SiN_x 材料的折射率 n_{SiN_x} ,使同一波长下横电(TE)和横磁(TM)偏振模具有相同的分光比,实现偏振无关。同时,通过对绝热耦合器波导间隙的不对称性进行设计,实现可设计的分光比。采用三维有限时域差分法(Three-dimensional finite-difference time-domain, 3D-FDTD)进行建模和仿真,结果表明,所提的分光比可设计的偏振无关光功分器,可设计的分光比范围为 0.50~0.95,同时具有结构紧凑、损耗小、带宽大等优点,在未来的光子集成光路系统中具有潜在的应用价值。

2 器件结构与工作原理

2.1 器件结构设计

如图 1 所示,所提的分光比可设计的偏振无关光功分器由输入、输出波导和 AC 等 3 部分组成。其中输入波导为直波导,宽度 W_1 选择硅基波导的常见宽度 500 nm^[9,16];输出波导由 2 根完全相同的 S 型波导构成,其长度、宽度分别为 $L_s=10 \mu\text{m}$ 、 $W_s=3 \mu\text{m}$;AC 包括 3 根参数一致的锥形波导 AC1、AC2 和 AC3,其长度均为 L ,宽度由 $W_1=500 \text{ nm}$ 渐变为 $W_2=100 \text{ nm}$ ^[16],其中 AC1 与 AC2 和 AC3 之间的波导间隙分别为 g_1 和 g_2 ,考虑到制造工艺的局限性选择 $g_2=100 \text{ nm}$ ^[16]。如插图所示,器件中波导均采用 Si/SiN_x/Si 的三明治截面结构,其中 Si 层、SiN_x 层的厚度分别为 $h_1=200 \text{ nm}$ 、 $h_2=100 \text{ nm}$ ^[19];采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)方法或离子轰击法^[20-22],均能控制 N 和 Si 的比例,使得中间层折射率 n_{SiN_x} 在 1.72~3.43 之间可调。此外,器件芯层为三明治结构,上下包层材料厚度均为 2 μm 的 SiO₂。

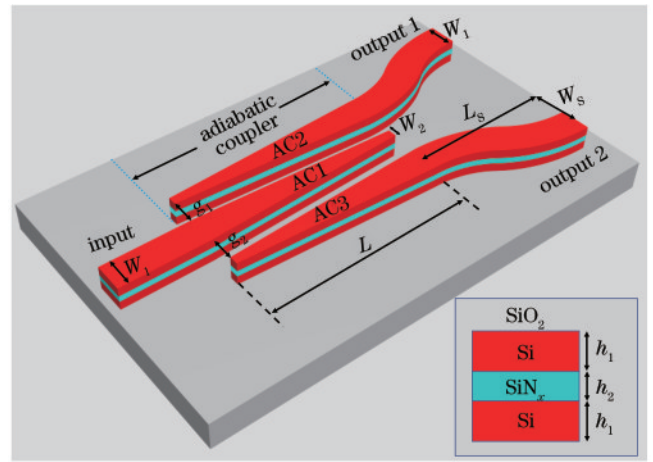


图 1 分光比可设计的偏振无关光功分器结构图。插图:波导截面示意图

Fig. 1 Structure diagram of the polarization-independent optical power splitter with designable splitting ratio.

Inset: section view of the sandwich structure

2.2 工作原理

根据耦合模理论^[23],耦合强度 κL 表示模式在两根波导间的耦合程度,其中 L 为耦合长度, κ 为耦合系数。当 L 确定时,耦合强度主要受 κ 影响,而 κ 主要取决于波导结构、周围介质、波导间隙及材料折射率。

一般情况下,TE 偏振模时 AC1 与 AC2(AC3) 间的耦合系数 $\kappa_{12}^{\text{TE}}(\kappa_{13}^{\text{TE}})$,与 TM 偏振模时 AC1 与 AC2(AC3) 间的耦合系数 $\kappa_{12}^{\text{TM}}(\kappa_{13}^{\text{TM}})$ 并不相等,使得器件具有明显的偏振相关性。拟采用三明治结构^[19,24-26],通过调节中间层折射率 n_{SiN_x} ,使同一波长下 $\kappa_{12}^{\text{TE}} = \kappa_{12}^{\text{TM}}$ 且 $\kappa_{13}^{\text{TE}} = \kappa_{13}^{\text{TM}}$,实现偏振无关。

在偏振无关的前提下,通过对 AC 波导间隙的不对称性进行设计,分别调整 $\kappa_{12}^{\text{TE}} = \kappa_{12}^{\text{TM}}$ 和 $\kappa_{13}^{\text{TE}} = \kappa_{13}^{\text{TM}}$ 的大小,使 AC1 耦合到 AC2 和 AC3 的能量比值可调,最终实现器件分光比可设计的功能。

3 器件功能实现与性能分析

由上文可知,在 L 确定的前提下,通过调节 κ 可以实现器件的偏振无关功能和分光比可设计功能。因此在调节 κ 之前,需确定器件中锥形波导的长度 L (即耦合长度)。

对光功分器而言,插入损耗 f_{il} 是衡量其性能的重要参数,其定义为

$$f_{\text{il}} = -10 \lg \left[(P_{\text{out1}} + P_{\text{out2}}) / P_{\text{in}} \right], \quad (1)$$

式中: P_{in} 为 input 端口的输入功率; P_{out1} 和 P_{out2} 分别为 output 1 端口和 output 2 端口的输出功率。

当图 1 中器件的参数为 $W_1=500 \text{ nm}$ 、 $W_2=100 \text{ nm}$ 、 $h_1=200 \text{ nm}$ 、 $h_2=100 \text{ nm}$ 、 $g_1=g_2=100 \text{ nm}$ 、 $n_{\text{SiN}_x}=2.6$ 、 $L_s=10 \mu\text{m}$ 和 $W_s=3 \mu\text{m}$ 保持不变时,改变 L 的大小,观察其对 f_{il} 的影响。如图 2 所示, L 从 2 μm 变化到 10

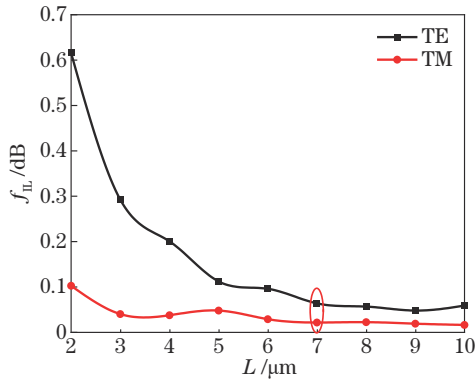


图 2 f_{IL} 随 L 的变化关系
Fig. 2 f_{IL} as functions of L

μm 的过程中, TE 偏振模的 f_{IL} 均大于 TM 偏振模的 f_{IL} ; 在 L 较小时, 二者的差别尤为明显。随着 L 的增大, TE、TM 的 f_{IL} 均随之减小, 且减小趋势随着 L 的增大而减缓; 当 $L > 7 \mu\text{m}$ 时, 二者趋于平稳。由于 f_{IL} 的值应尽量小, 小尺寸器件更易于集成, 因此 L 选择 $7 \mu\text{m}$ 。

3.1 偏振无关功能的实现

对一般的分光比可设计的光功分器而言, κ_{12}^{TE} (κ_{13}^{TE}) 与 κ_{12}^{TM} (κ_{13}^{TM}) 并不相等, 导致不同偏振模时器件的分光比不同, 具有偏振相关性, 在一定程度上限制了其应用范围。分光比 f_{SR} 定义为

$$f_{\text{SR}} = \left[\frac{P_{\text{out}2}}{P_{\text{out}1} + P_{\text{out}2}} \right]_0 \quad (2)$$

因此, 为了实现偏振无关功能, 就需对器件进行合理设计, 使其满足 $\kappa_{12}^{\text{TE}} = \kappa_{12}^{\text{TM}}$ 和 $\kappa_{13}^{\text{TE}} = \kappa_{13}^{\text{TM}}$ 。此时, 不论 TE 或 TM 偏振模, AC1 耦合到 AC2 和 AC3 的能量比值将相等。因此, 若要实现器件的偏振无关, 则需 TE 和 TM 偏振模对应的 f_{SR} 相等。

为了实现偏振无关功能, 拟采用三明治结构^[19, 23-25], 如图 1 插图所示, 其由 Si/SiN_x/Si 等 3 层材料沉积而成, 且 Si 的折射率 n_{Si} 大于 n_{SiN_x} 。由于高、低折射率材料间的电场不连续性, TE 和 TM 偏振模将分别限制在 Si 上下层和 SiN_x 中间层中传播, 如图 3(a)、图 3(b) 所示。当仅改变 n_{SiN_x} 时, 就可以改变在 SiN_x 中间层传输的 TM 偏振模 κ_{12}^{TM} 和 κ_{13}^{TM} 的大小, 而在 Si 上下层中传播的 TE 偏振模 κ_{12}^{TE} 和 κ_{13}^{TE} 受 n_{SiN_x} 影响较小,

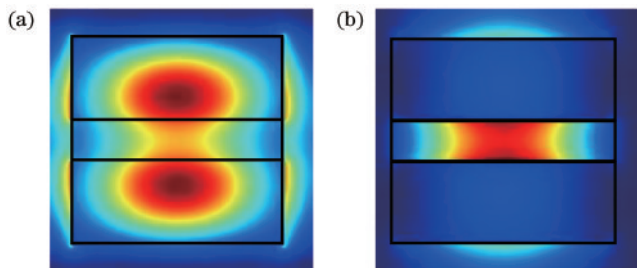


图 3 三明治结构中的场分布。(a) TE 偏振模; (b) TM 偏振模
Fig. 3 Field distribution in the sandwich structures. (a) TE polarization mode; (b) TM polarization mode

最终使得 $\kappa_{12}^{\text{TE}} = \kappa_{12}^{\text{TM}}$ 且 $\kappa_{13}^{\text{TE}} = \kappa_{13}^{\text{TM}}$, 满足 TE 和 TM 偏振模对应的 f_{SR} 相等, 实现偏振无关。

下面固定 $W_1=500 \text{ nm}$ 、 $W_2=100 \text{ nm}$ 、 $h_1=200 \text{ nm}$ 、 $h_2=100 \text{ nm}$ 、 $g_2=100 \text{ nm}$ 、 $L_s=10 \mu\text{m}$ 、 $W_s=3 \mu\text{m}$ 和 $L=7 \mu\text{m}$ 不变, 以 $g_1=140 \text{ nm}$ 为例, 讨论 TE 和 TM 偏振模对应的 f_{SR} 随 n_{SiN_x} 的变化关系, 结果如图 4 所示。当 n_{SiN_x} 增大时, TE 偏振模对应的 f_{SR} 缓慢减小; 当 n_{SiN_x} 增大时, TM 偏振模对应的 f_{SR} 快速增长。这是因为 TE 偏振模被限制在 Si 上下层中传输, 而 TM 偏振模则被限制在 SiN_x 中间层中传输, 所以 TM 偏振模更易受到 n_{SiN_x} 的影响。由图 4 可知, TE 和 TM 偏振模对应的 f_{SR} 存在交点, 满足偏振无关。

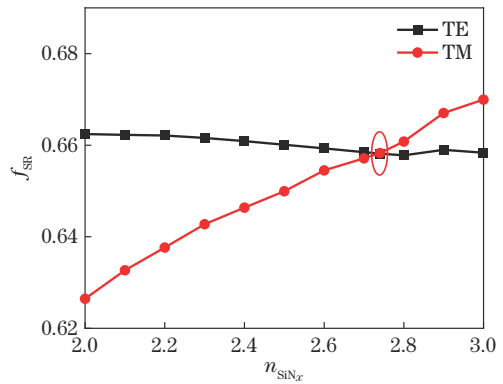


图 4 当 $g_1=140 \text{ nm}$, TE 和 TM 偏振模对应的 f_{SR} 随 n_{SiN_x} 的变化关系

Fig. 4 n_{SiN_x} corresponding to TE and TM polarization modes as a function of n_{SiN_x} , when $g_1=140 \text{ nm}$

前文仅展示了 $g_1=140 \text{ nm}$ 时, 存在一个特定的 n_{SiN_x} , 使 TE 和 TM 偏振模对应的 f_{SR} 相等。经过仿真计算, 发现 g_1 从 100 nm 增加到 350 nm 时, 均存在相对应的 n_{SiN_x} 使器件满足偏振无关, 并且随着 g_1 增大, n_{SiN_x} 逐渐减小, 如图 5 所示。这为后续通过改变 g_1 的大小, 实现器件的 f_{SR} 可设计功能提供了依据。值得注意的是, n_{SiN_x} 存在最小值 1.72, 受其限制 g_1 存在最大值 350 nm 。

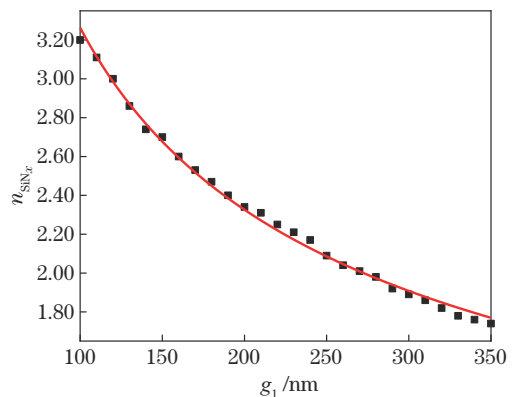


图 5 满足偏振无关条件时, n_{SiN_x} 随 g_1 的变化关系

Fig. 5 n_{SiN_x} as a function of g_1 when polarization-independent condition is satisfied

3.2 功分比可设计功能的实现

在偏振无关功能实现的前提下,可通过调整波导间隙改变 κ 的大小,实现器件的分光比可设计的功能。由图 1 可知,器件中存在两处波导间隙,分别为 g_1 和 g_2 ,固定 $g_2=100$ nm 不变,拟通过变化 g_1 ,分别改变 $\kappa_{12}^{\text{TE}}=\kappa_{12}^{\text{TM}}$ 和 $\kappa_{13}^{\text{TE}}=\kappa_{13}^{\text{TM}}$ 的大小,进而调整从锥形波导 AC1 耦合至 AC2 和 AC3 能量的比值,实现可设计的分光比。

采用图 5 中一一对应的 g_1 和 n_{SiN_x} ,讨论偏振无关

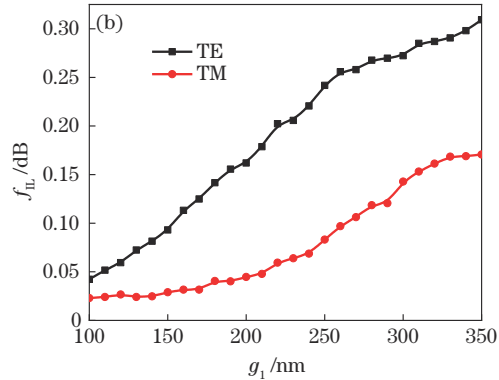
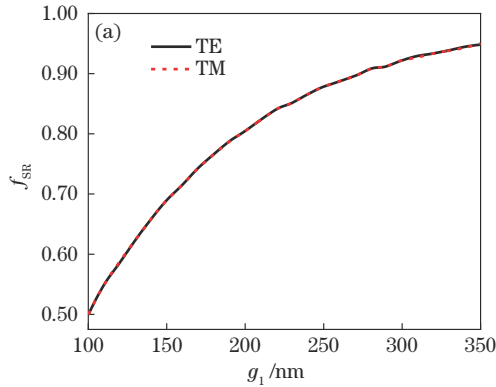


图 6 满足偏振无关条件。(a) f_{SR} 随 g_1 的变化关系;(b) f_{IL} 随 g_1 的变化关系

Fig. 6 Polarization-independent condition is satisfied. (a) f_{SR} as a function of g_1 ; (b) f_{IL} as a function of g_1

综上所述,已实现了 f_{SR} 可设计的偏振无关光功分器, g_1 从 100 nm 增至 350 nm 时, f_{SR} 从 0.50 变化至 0.95,并且均存在对应的 n_{SiN_x} 使器件偏振无关,同时具有较小的 f_{IL} 。

为了进一步说明器件的性能,若干 f_{SR} 所对应的 $P_{\text{out}1}:P_{\text{out}2}$ 、 g_1 、偏振无关时的 n_{SiN_x} 以及相应的 f_{IL} ,如表 1 所示。其对应的光场分布如图 7 所示,同一波长下 TE 和 TM 偏振模的能量均从 input 端口输入,并在 AC 中分裂成 f_{SR} 可设计的两部分,最后从 output 1 和 output 2 端口输出。

表 1 满足偏振无关条件时,不同 f_{SR} 对应的器件参数以及性能
Table 1 Parameters and performance of devices with different f_{SR} when polarization-independent condition is satisfied

f_{SR}	$P_{\text{out}1}:P_{\text{out}2}$	g_1 /nm	n_{SiN_x}	$f_{\text{IL}}(\text{TE})$ /dB	$f_{\text{IL}}(\text{TM})$ /dB
0.5	50:50	100	3.20	0.04	0.02
0.6	40:60	124	2.91	0.07	0.03
0.7	30:70	153	2.68	0.09	0.03
0.8	20:80	198	2.37	0.14	0.03
0.9	10:90	273	2.03	0.26	0.10

3.3 器件性能分析

由于 S 波导的结构会对器件输出性能产生影响,讨论了当 $W_1=500$ nm、 $W_2=100$ nm、 $h_1=200$ nm、 $h_2=100$ nm 以及 $g_2=100$ nm 时, L_s 和 W_s 对器件性能的影响,以 $P_{\text{out}1}:P_{\text{out}2}$ 为 30:70 和 10:90 时的器件为例,此时

时 f_{SR} 随 g_1 的变化关系。如图 6(a) 所示, g_1 在 100~350 nm 范围内变化时,TE 和 TM 偏振模对应的 f_{SR} 均相等,满足偏振无关;并且随着 g_1 的增大,TE 和 TM 偏振模对应的 f_{SR} 相等值从 0.50 连续变化至 0.95, g_1 较小时增长速度较快。此外,还讨论了 TE 和 TM 偏振模对应的 f_{IL} 随 g_1 的变化关系,如图 6(b) 所示, g_1 从 100 nm 增加至 350 nm 的过程中,TE 偏振模对应的 f_{IL} 均大于 TM 偏振模对应的 f_{IL} ;且 TE 和 TM 偏振模对应的 f_{IL} 均随着 g_1 的增大而增大,其值都小于 0.31 dB。

对应的 g_1 和 n_{SiN_x} 如表 1 所示。如图 8 所示,其中 $\overline{\Delta f_{\text{SR}}}$ 和 $\overline{f_{\text{IL}}}$ 分别为 TE 和 TM 偏振模 Δf_{SR} 和 f_{IL} 的平均值, Δf_{SR} 为 f_{SR} 容差,表示器件实际的 f_{SR} 与要求的 f_{SR} 之间的差值。如图 8(a)、图 8(c) 所示,当 W_s 在 2~4 μm 、 L_s 在 8~12 μm 范围内变化时,器件的 $\overline{\Delta f_{\text{SR}}}$ 均只发生小幅改变,最大 $\overline{\Delta f_{\text{SR}}}$ 仅为 0.012。这是由于器件的功率分配现象主要在绝热耦合器中完成,受 S 波导影响较小;如图 8(b)、图 8(d) 所示,随着 S 波导参数的改变, $\overline{f_{\text{IL}}}$ 产生明显的变化。这是因为不同的参数会引起 S 波导曲度的变化,带来不同的弯曲损耗, S 波导曲度越大,其弯曲损耗越大。因此在考虑 S 波导的参数时,需选择较小的 W_s 和较大的 L_s ,以获得较小的 S 波导曲度,但是较小的 W_s 和 L_s 有利于减小器件尺寸和增加系统的集成度。综上所述,综合考虑器件尺寸 $\overline{f_{\text{IL}}}$ 和 $\overline{\Delta f_{\text{SR}}}$,最佳 W_s 和 L_s 分别选择为 3 μm 和 10 μm ,此时器件相应的性能参数与表 1 一致。

由于在实际情况中,入射光并非单色光,因此还需讨论器件性能随波长的变化关系,图 9(a) 和图 9(b) 分别为当器件参数取 $P_{\text{out}1}:P_{\text{out}2}$ 分别为 50:50、40:60、30:70、20:80 和 10:90 时, f_{SR} 和 f_{IL} 随波长的变化关系。由图 9(a) 可知,在 1520~1620 nm 的波长范围内,不同 $P_{\text{out}1}:P_{\text{out}2}$ 时,TE 和 TM 偏振模的 Δf_{SR} 均在 ± 0.01 内(例如当 $P_{\text{out}1}:P_{\text{out}2}$ 为 90:10,则其实际 f_{SR} 的范围为 0.89~0.91),即器件带宽可达 100 nm。此外,由图 9(b) 可知,在此波长范围内,TE 偏振模的 f_{IL} 均大于 TM 偏振

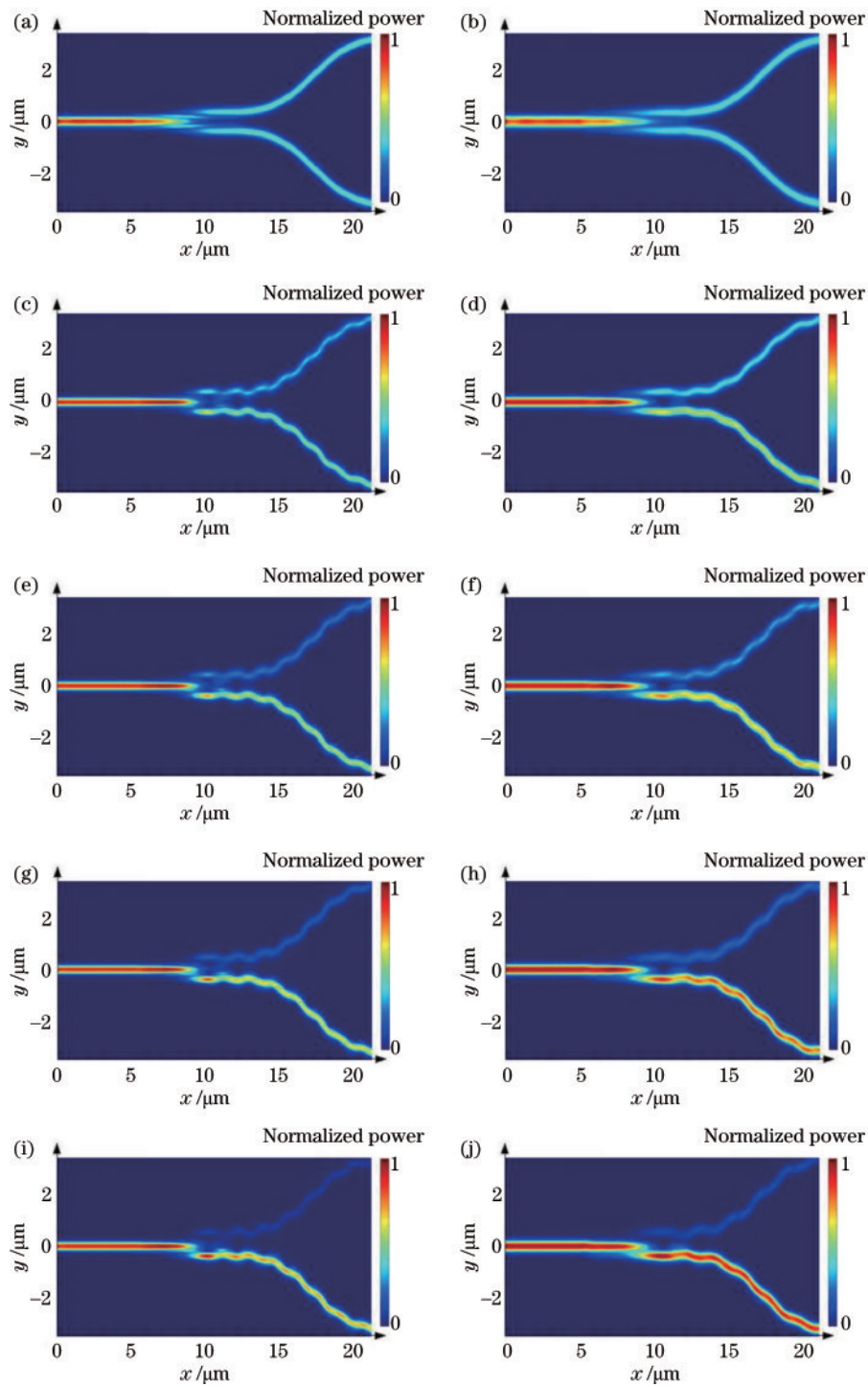


图 7 不同 $P_{out1}:P_{out2}$ 所对应的光场分布图。(a) 50:50, TE; (b) 50:50, TM; (c) 40:60, TE; (d) 40:60, TM; (e) 30:70, TE; (f) 30:70, TM; (g) 20:80, TE; (h) 20:80, TM; (i) 10:90, TE; (j) 10:90, TM

Fig. 7 Field distribution of devices with different $P_{out1}:P_{out2}$. (a) 50:50, TE; (b) 50:50, TM; (c) 40:60, TE; (d) 40:60, TM; (e) 30:70, TE; (f) 30:70, TM; (g) 20:80, TE; (h) 20:80, TM; (i) 10:90, TE; (j) 10:90, TM

模的 f_{IL} , 但二者随波长的变化趋势不大。此外, 当 $P_{out1}:P_{out2}$ 越大时其 f_{IL} 越大, 但均小于 0.3 dB, 并且在 $P_{out1}:P_{out2}$ 为 50:50 处, f_{IL} 取得最小值为 0.02 dB。

另外, 还将所提的器件与其他分光比可设计的光功分器进行了性能比较, 如表 2 所示。由表 2 可知, 与偏振相关的多种光功分器相比, 在实现了器件偏振无

关功能的前提下, 还能够确保其带宽与文献[14-16]相当, 甚至优于文献[11]; f_{IL} 的值相对文献[11, 14-15]更小; f_{SR} 的范围也达到了 0.9 以上。而与文献[13]报道的偏振无关光功分器相比, 所提的器件具有更小的尺寸, L 仅为 $7\ \mu\text{m}$ 。

此外, 目前大多数情况下, SiN_x 薄膜上仅能生长多

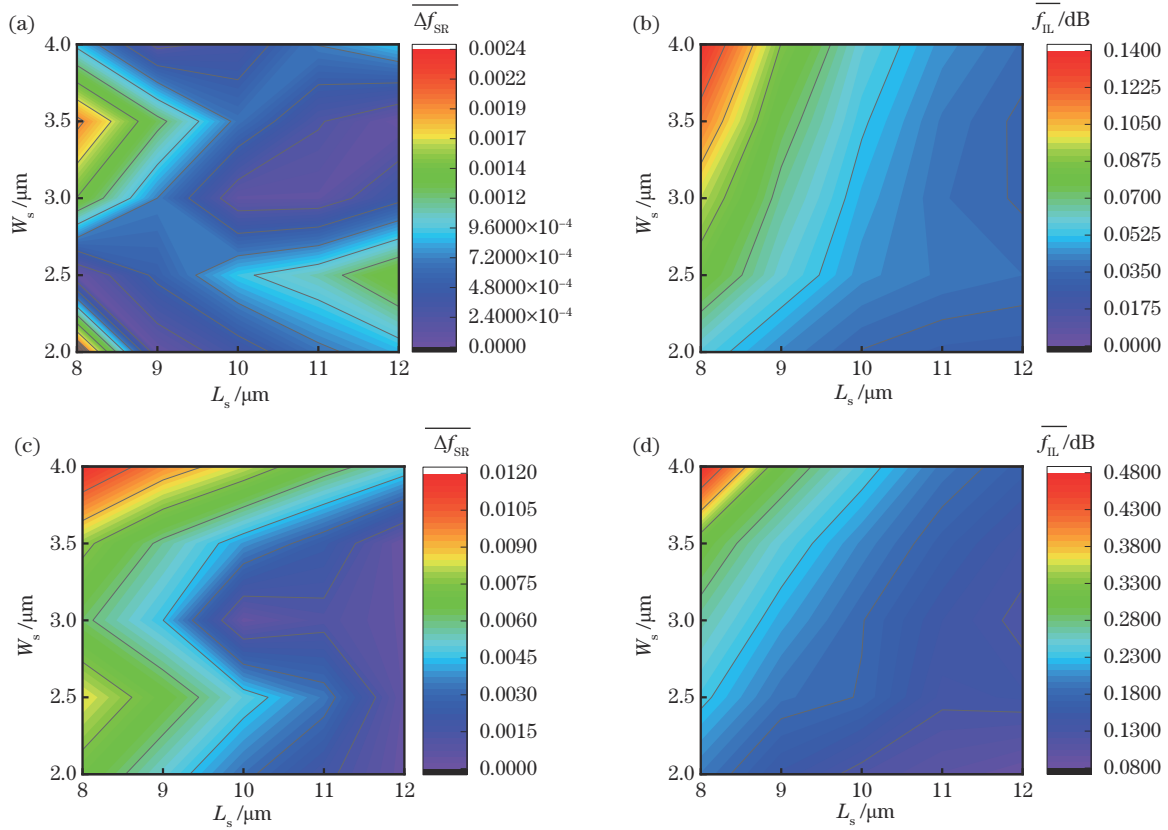


图 8 $\overline{\Delta f_{SR}}$ 和 $\overline{f_{IL}}$ 随 L_s 和 W_s 的变化关系。(a) 30:70, $\overline{\Delta f_{SR}}$; (b) 30:70, $\overline{f_{IL}}$; (c) 10:90, $\overline{\Delta f_{SR}}$; (d) 10:90, $\overline{f_{IL}}$ 。
 Fig. 8 $\overline{\Delta f_{SR}}$ and $\overline{f_{IL}}$ as functions of W_s and L_s . (a) 30:70, $\overline{\Delta f_{SR}}$; (b) 30:70, $\overline{f_{IL}}$; (c) 10:90, $\overline{\Delta f_{SR}}$; (d) 10:90, $\overline{f_{IL}}$.

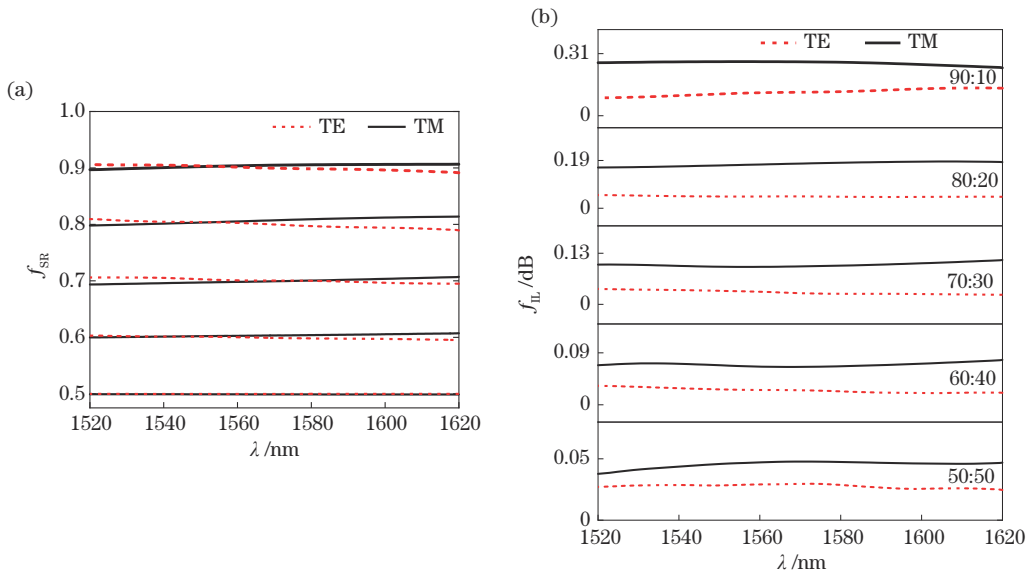


图 9 器件取 $P_{out1}:P_{out2}$ 分别为 50:50、40:60、20:70、20:80 和 10:90 时, f_{SR} 和 f_{IL} 随波长的变化关系。(a) f_{SR} ; (b) f_{IL} 。
 Fig. 9 f_{SR} and f_{IL} as a function of wavelength when the $P_{out1}:P_{out2}$ of device are 50:50, 40:60, 30:80, 20:80 and 10:90 respectively.
 (a) f_{SR} ; (b) f_{IL} .

晶 Si, 因此需考虑多晶 Si 的吸收损耗对器件性能的影响。引入多晶 Si 后, 按照表 1 所述的参数, 器件仍能实现偏振无关和分光比可设计的功能。但 f_{SR} 分别为

0.5、0.6、0.7、0.8 和 0.9 时, TE(TM) 偏振模下的 f_{IL} 增加至 1.4 dB(1.16 dB)、1.37 dB(1.18 dB)、1.39 dB(1.19 dB)、1.41 dB(1.22 dB) 和 1.45 dB(1.20 dB)。

表 2 f_{SR} 可设计的功分器性能参数的比较Table 2 Comparison of performance of optical power splitters with designable f_{SR}

Reference	Structure	Size	Range of f_{SR}	Bandwidth /nm	f_{IL} /dB	Polarization
[11]	MMI	$3.6 \mu\text{m} \times 3.6 \mu\text{m}$	0.50–0.80	30	0.97	dependent
[14]	Y-junction	$1.4 \mu\text{m} \times 2.3 \mu\text{m}$	0.50–0.98	100	0.36	dependent
[15]	AC	$4 \mu\text{m} \times 240 \mu\text{m}$	0.50–0.93	100	1.00	dependent
[16]	AC	$L=80 \mu\text{m}$	0.50–1.00	100	0.05	dependent
[13]	DC	$L<30 \mu\text{m}$	0.50–1.00	100 ($f_{SR}=0.50$)	0.10 ($f_{SR}=0.50$)	independent
Our work	Sandwich AC	$L=7 \mu\text{m}$	0.50–0.95	100	0.31(0.17)	independent

4 结 论

使用三明治结构和绝热耦合器,提出了一种分光比可设计的偏振无关光功分器。通过调节三明治结构中间层折射率 n_{SIN_x} ,使 2 个正交偏振模所对应的分光比相等,实现偏振无关。同时,通过对绝热耦合器 2 个波导间隙的不对称性进行设计,获得可设计的分光比。最终得出结论:每个 g_1 均存在一个对应的 n_{SIN_x} ,使器件偏振无关。 g_1 从 100 nm 增大至 350 nm 时,器件分光比从 0.50 持续增大至 0.95,对应的 n_{SIN_x} 则不断减少。此外,还列举了若干 $P_{\text{out}1}:P_{\text{out}2}$ 时的 g_1 、 n_{SIN_x} 、 f_{IL} 及相应的光场分布,并分析了 S 波导参数对器件性能的影响。最后,对器件进行了带宽分析和性能比较,结果表明,所设计的 f_{SR} 可调的偏振无关光功分器 L 仅为 $7 \mu\text{m}$, f_{IL} 均小于 0.31 dB, Δf_{SR} 均在 ± 0.01 内的带宽可达 100 nm,其在未来的光子集成光路系统中具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Dai D X, Bauters J, Bowers J E. Passive technologies for future large-scale photonic integrated circuits on silicon: polarization handling, light non-reciprocity and loss reduction[J]. Light: Science & Applications, 2012, 1(3): 1-12.
- [2] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. Nature, 2013, 493(7431): 195-199.
- [3] Doerr C R, Fontaine N K, Buhl L L. PDM-DQPSK silicon receiver with integrated monitor and minimum number of controls[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(8): 697-699.
- [4] Koren U, Miller B I, Young M G, et al. A 1.3- μm wavelength laser with an integrated output power monitor using a directional coupler optical power tap[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(3): 364-366.
- [5] Kasai K, Nakazawa M, Ishikawa M, et al. 8 kHz linewidth, 50 mW output, full C-band wavelength tunable DFB LD array with self-optical feedback[J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5675-5685.
- [6] Velha P, Soriano V, Preite M V, et al. Wide-band polarization controller for Si photonic integrated circuits [J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5656-5659.
- [7] Xu H N, Shi Y C. Flat-top CWDM (de)multiplexer based on MZI with bent directional couplers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(2): 169-172.
- [8] Qiu J F, Tian Y, Huang Z L, et al. Integrated in-band OSNR monitor based on asymmetrical parallel-MZIs for WDM signals[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(6): 467-472.
- [9] Li Z Z, Huang X R, Liu Y, et al. Ultra-compact low-loss variable-ratio 1×2 power splitter with ultra-low phase deviation based on asymmetric ladder-shaped multimode interference coupler[J]. Optics Express, 2020, 28(23): 34137-34146.
- [10] Cherchi M, Ylinen S, Harjanne M, et al. Unconstrained splitting ratios in compact double-MMI couplers[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9245-9253.
- [11] Xu K, Liu L, Wen X, et al. Integrated photonic power divider with arbitrary power ratios[J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 855-858.
- [12] Wang Y, Lu Z Q, Ma M L, et al. Compact broadband directional couplers using subwavelength gratings[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 7101408.
- [13] Lei Z, Xin F, Lin Y. Polarization-independent, lithium-niobate-on-insulator directional coupler based on a combined coupling-sections design[J]. Applied Optics, 2020, 59(28): 8668-8673.
- [14] Lin Z J, Shi W. Broadband, low-loss silicon photonic Y-junction with an arbitrary power splitting ratio[J]. Optics Express, 2019, 27(10): 14338-14343.
- [15] Mao D, Wang Y, El-Fiky E, et al. Adiabatic coupler with design-intended splitting ratio[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(24): 6147-6155.
- [16] Zhu J B, Chao Q, Huang H Y, et al. Compact, broadband, and low-loss silicon photonic arbitrary ratio power splitter using adiabatic taper[J]. Applied Optics, 2021, 60(2): 413-416.
- [17] Kim H, Shin H. Tailorable and broadband on-chip optical power splitter[J]. Applied Sciences, 2019, 9(20): 4239-4248.
- [18] Sia J X B, Wang W J, Guo X, et al. Mid-infrared, ultra-broadband, low-loss, compact arbitrary power splitter based on adiabatic mode evolution[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 6601111.
- [19] Fujisawa T, Koshiya M. Theoretical investigation of ultrasmall polarization-insensitive 1×2 multimode

- interference waveguides based on sandwiched structures [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(11): 1246-1248.
- [20] 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.
- [21] Guler I. Optical and structural characterization of silicon nitride thin films deposited by PECVD[J]. Materials Science and Engineering: B, 2019, 246: 21-26.
- [22] 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, May 21-23, 2016, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2016.
- [23] Haus H A, Huang W. Coupled-mode theory[J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(10): 1505-1518.
- [24] 汪静丽, 陈子玉, 陈鹤鸣. 基于夹层结构的偏振无关 1×2 定向耦合型解复用器的设计[J]. 物理学报, 2021, 70(1): 014202.
- Wang J L, Chen Z Y, Chen H M. Design of polarization-insensitive 1×2 directional coupler demultiplexer based on sandwiched structure[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(1): 014202.
- [25] 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.
- 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.
- [26] Wang J L, Huangfu L G, Chen H M. Design of compact polarization-insensitive multimode interference triplexer [J]. Journal of Modern Optics, 2021, 68(9): 496-506.