

具有模式保持功能的片上模式分离器

廖莎莎*, 张伍浩, 赵帅, 赵薪程, 唐亮

重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

摘要 提出一种具有模式保持功能的片上模式分离器方案。该方案基于多模干涉耦合器(MMI),通过在 MMI 多模区加入微型热电极,并通过合理设计热电极的位置和精确控制热电极的加热温度,实现 TE₀、TE₁和 TE₂三种模式的分离,其插入损耗均低于 1.06 dB,模式串扰均低于 -15.38 dB。该方案具有模式分离数量多和可扩展的优势,可被广泛用于信号处理系统和通信系统中。

关键词 集成光学; 模式保持; 多模干涉耦合器; 模式分离器; 微型热电极

中图分类号 TN256 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231828

1 引言

近年来,人工智能、机器学习、物联网等新兴技术的出现,使得通信容量的需求不断增大,复用技术^[1-2]因此获得了广泛研究和长足的发展。在多种复用技术中,模分复用技术因其所有的模式通道都来自单个半导体激光器,具有低成本和低功耗的优势,成为众多复用技术中颇具应用前景的技术。随着集成技术的发展和工艺水平的提高,采用硅基集成器件可实现整个片上模分复用系统,其中包含的相关器件有模式复用器^[3-5]、模式分离器^[6-7]、模式不敏感功率分配器^[8]、模式转换器^[9]和模式选择开关^[10]等。其中,模式分离器在模分复用系统中用于将总线波导中的不同模式分离并导向不同波导传输。传统分离模式的方法多是基于绝热耦合器(AC)^[11]、非对称定向耦合器(ADC)^[12]、多模干涉耦合器(MMI)^[13]和 Y 分支^[14-15]等的模式解复用器方案,其实现原理是基于模式转换过程,即将输入的高阶模式转换成基模,从而使其从总线波导中分离出来。陈伟伟教授团队^[16]基于绝缘体上硅(SOI)平台设计了一款能够分离 4 个模式的锥形定向耦合器型(CTC)模式分离器,当输入光波长为 1550 nm 时,其模式串扰低于 -15.15 dB,耦合长度小于 10 μm。但该方案的插入损耗较高,为 4.73 dB。González-Andrade 团队^[17]设计了一款基于 MMI 的紧凑型模式分离器,该器件在 1520~1640 nm 的工作波长下的插入损耗低于 1.1 dB,模式串扰低于 -18 dB,整体尺寸仅为 38.6 μm×3.7 μm。该团队^[13]还设计了一款

基于 MMI 和 Y 分支的模式分离器,该器件包括 1 个 4×4 MMI、3 个移相器和 4 个 Y 分支。仿真结果显示该器件的插入损耗和串扰分别低于 1.18 dB 和 -20 dB。

上述方案适用于大多数模分复用系统,但在信号路由或是信号选择场景下,不同模式经分离后,常通过多模开关来实现对不同模式信号的切换或选择,若模式分离器的输出均为基模,则只能在模式分离器后添加额外部件以将分离出的基模又转回高阶模,再输入多模开关,这无疑增加了系统的复杂度。而在光隔离^[18]的场景下,常需要移除高阶模,仅保留基模正常传输,若模式分离器的输出均为基模,则不能满足实际应用要求。因此,如果能在实现模式分离的基础上保持原有模式不变,将极大简化系统结构、缩小系统尺寸。Liao 等^[19]设计了一款基于定向耦合器的具有模式保持功能的模式分离器,但是该器件只能分离两种模式,并且难以实现扩展。

综上所述,本文提出一种基于 MMI 的具有模式保持功能的片上模式分离器方案。该方案通过在 MMI 的多模干涉区域加入微型热电极,合理设计热电极的位置和精确控制热电极的温度,能在保持原有模式不变的情况下,实现 TE₀、TE₁和 TE₂三种模式的分离,其插入损耗均低于 1.06 dB,模式串扰均低于 -15.38 dB。该方案突破了常见模式分离器需要进行模式转换的缺点,并且随着加入更多微型热电极,该方案能实现更高阶模式的分离,提升模式分离器的灵活性和实用性。

收稿日期: 2023-11-23; 修回日期: 2023-12-01; 录用日期: 2023-12-11; 网络首发日期: 2023-12-21

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202200613)、国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U22A2018)

通信作者: *liaoss@cqupt.edu.cn

2 片上模式分离器的理论推导

MMI 是基础的硅基器件之一, 由于其紧凑的结构、较低的损耗和易于制造等优点, 被广泛用于制备激光器^[20]、光开关^[21-22]和光分束器^[23-24]等器件。MMI 的主要工作原理是多模干涉的自映像现象^[25]: 光信号经由一个或多个输入波导注入到多模波导区域中, 会激发出各阶模式; 不同模式的传输常数存在差异, 导致产生模间干涉, 从而在多模波导内部的某一特定位置会出现输入光场的一个或者多个像; 如果不同模式能在不同位置成像, 那么就能实现模式的分离。利用导模分析(MPA)法推导 MMI 成像过程。假设入射光从 $x=0$ 位置的输入端口进入多模波导, 其光场可以展开为各阶导模的线性叠加, 表示为

$$\psi(0, y) = \sum_v c_v \varphi_v(y), \quad (1)$$

式中: v 表示模式阶数; $\varphi_v(y)$ 是 v 阶模式的本征模式; c_v 是 v 阶模式的激励系数。根据模式正交性, 可得

$$c_v = \frac{\int \psi(0, y) \varphi_v(y) dy}{\int \varphi_v^2(y) dy}. \quad (2)$$

当输入场的空间谱足够窄并且没有激发非导模时, 可以得到在 L 位置处的光场分布为

$$\psi(L, y) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \varphi_v(y) \exp\left[j\pi \frac{v(v+2)}{3L_\pi} L\right], \quad (3)$$

式中: m 表示多模波导中传输的模式总数; L_π 为基模与一阶模的拍长, 可表示为

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

式中: β_0 和 β_1 分别表示基模和一阶模的传播常数; n_i 为波导的有效折射率; W_e 为基模的有效宽度; λ_0 为波长。

在相同的横截面尺寸下, 对于不同折射率分布的波导, 其传输导模的光场分布大不相同。对于如图 1 所示的 MMI, 假设输入波导位于多模波导区域的左上方, 波导宽度 $w_1=3 \mu\text{m}$, 多模波导宽度 $w_m=15 \mu\text{m}$ 、长度 $L_m=250 \mu\text{m}$ 。当多模干涉耦合区为均匀波导时, 多模波导中激发的前 4 个导模光场如图 2(a)、2(c)、2(e) 和 2(g) 所示, 激发的第 v 阶导模的模场函数为

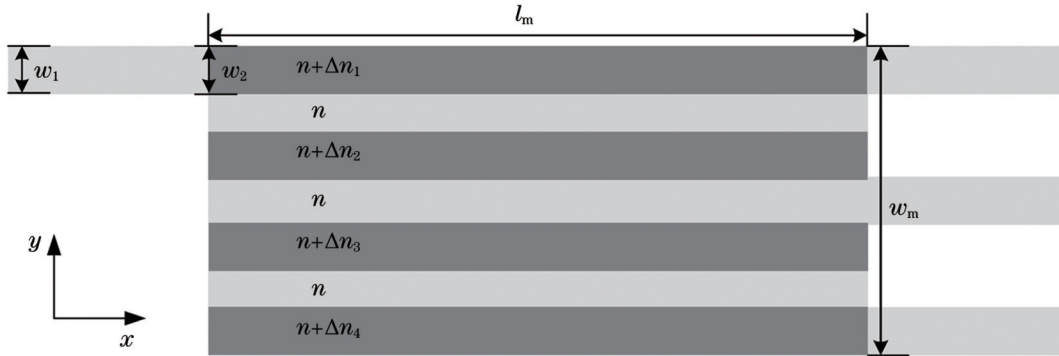


图 1 非均匀 MMI 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of non-uniform MMI

$$\varphi_v(y) = \sin\left[\pi(v+1)\frac{y}{15}\right], v=0, 1, 2, \dots. \quad (5)$$

当分别输入 TE0、TE1 和 TE2 模式时, 通过式(2)可计算出激发的 35 个导模的激励系数 c_v , 其中前 10 个导模的 c_v 如表 1 所示。而通过式(3)可以计算出多模波导末端光场强度随 y 方向的分布, 如图 3 所示。由于此时 L_m 远小于各个模式的自映像距离(约 $1500 \mu\text{m}$), 因此所有模式都未能产生自映像, 它们的光场完全重叠在一起, 无法分离。采用 FDTD 方法对上述结构进行仿真, 并将多模波导末端的模场分布绘制在图中, 可以发现, 两种方法得到的结果是一致的。

如果在多模波导中每隔 $1 \mu\text{m}$, 设置一个宽度 $w_2=3 \mu\text{m}$ 的折射率变化区域, 如图 1 所示, 其折射率变化量分别为 Δn_1 、 Δn_2 、 Δn_3 和 Δn_4 , 多模波导中激发导模的光场分布会发生很大变化。前 4 个导模的光场如

图 2(b)、2(d)、2(f) 和 2(h) 所示, 此时 $\Delta n_1=0.00552$, $\Delta n_2=0.00368$, $\Delta n_3=0$, $\Delta n_4=0.00736$, Si 波导的折射率 $n=3.48093$ 。同样地, 通过将非均匀多模波导中激发的 35 个导模的模场分布图拟合成模场函数, 并通过式(2)计算 35 个导模的激励系数 c'_v , 其中前 10 个导模的激励系数如表 2 所示, 由式(3)计算可得其 MMI 末端的模场分布如图 4 所示。

由图 4 可知, 在非均匀 MMI 中, 当输入 TE0 模式时, 多模波导末端中间形成了类似自映像的光场聚集。而输入 TE1 和 TE2 模式时, 光场没有聚集现象, 强度分布在多模波导两侧。同样采用 FDTD 方法对上述结构进行仿真, 并将多模波导末端的模场分布绘制在图中, 可以发现, 两种方法得到的结果是一致的, TE0 模式形成了类似自映像的模斑。因此, 采用非均匀多模波导不但能够有效改变光信号成像位置、缩短自映

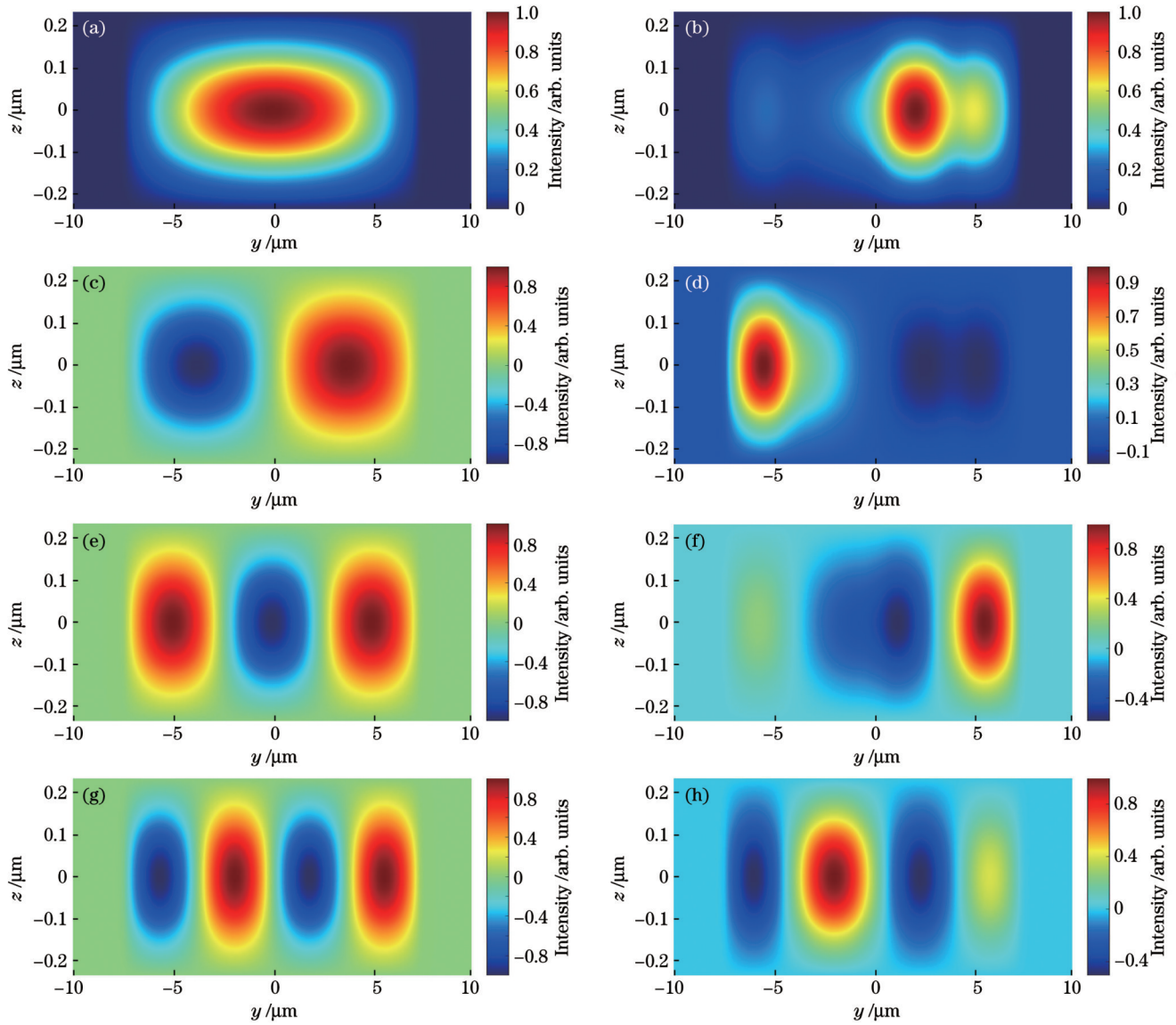


图 2 均匀 MMI 与非均匀 MMI 中前 4 个导模的光场图。(a)均匀 MMI 和(b)非均匀 MMI 中的导模 1;(c)均匀 MMI 和(d)非均匀 MMI 中的导模 2;(e)均匀 MMI 和(f)非均匀 MMI 中的导模 3;(g)均匀 MMI 和(h)非均匀 MMI 中的导模 4

Fig. 2 Optical field patterns of the first four guided modes in uniform and non-uniform MMIs. The first guided mode in (a) the uniform MMI and (b) the non-uniform MMI; the second guided mode in (c) the uniform MMI and (d) the non-uniform MMI; the third guided mode in (e) the uniform MMI and (f) the non-uniform MMI; the fourth guided mode in (g) the uniform MMI and (h) the non-uniform MMI

表 1 均匀 MMI 中前 10 个导模的激励系数

Table 1 Excitation coefficients of the first 10 guided modes in a uniform MMI

Mode	Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5	Mode6	Mode7	Mode8	Mode9	Mode10
TE0	0.078	0.144	0.189	0.208	0.200	0.170	0.126	0.078	0.033	0
TE1	-0.038	-0.063	-0.067	-0.045	0	0.058	0.119	0.168	0.197	0.200
TE2	0.025	0.041	0.042	0.027	0	-0.029	-0.052	-0.056	-0.056	0

像长度,还能使不同输入模式分离。对于图 4 的输出情况,通过在多模波导中间设置输出波导,就能输出 TE0 模式,而 TE1 和 TE2 模式几乎没有输出;同理,通过调整合适的折射率分布 ($\Delta n_1=0.001288, \Delta n_2=0, \Delta n_3=0.0092, \Delta n_4=0.003312$),也可以实现 TE1 模式

的分离,如图 5 所示。易知,采用同样的方法,可以实现 TE2 模式的分离。而折射率分布变化可以通过调控温度实现,因此通过在 MMI 多模波导区域设置微型热电极,可以改变不同输入模式的成像位置,达到模式分离的效果。

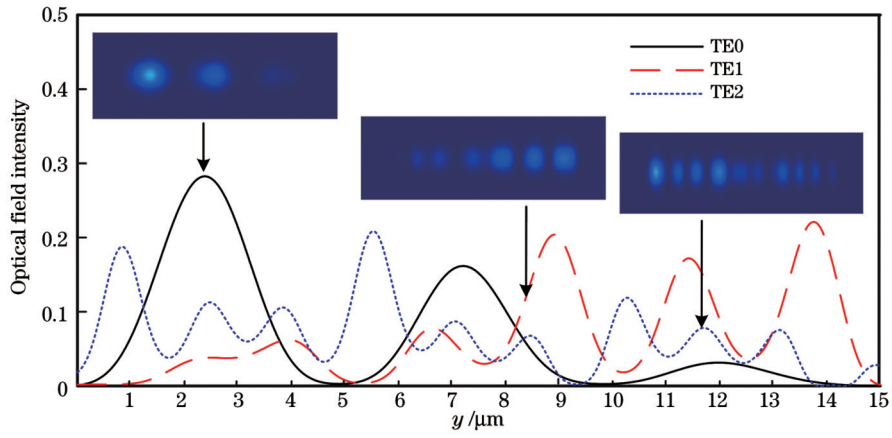


图 3 均匀 MMI 末端的光场强度的分布

Fig. 3 Distribution of the optical field intensity at the end of the uniform MMI

表 2 非均匀 MMI 中前 10 个导模的激励系数

Table 2 Excitation coefficients of the first 10 guided modes in non-uniform MMI

Mode	Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5	Mode6	Mode7	Mode8	Mode9	Mode10
TE0	0.133	0.887	0.134	-0.171	0.132	-0.136	-0.117	0.052	-0.015	-0.046
TE1	0.004	-0.002	0.044	-0.200	0.047	-0.117	-0.203	0.190	0.192	0.196
TE2	0.001	0.085	-0.027	-0.081	-0.014	0.034	0.040	-0.034	-0.025	0.017

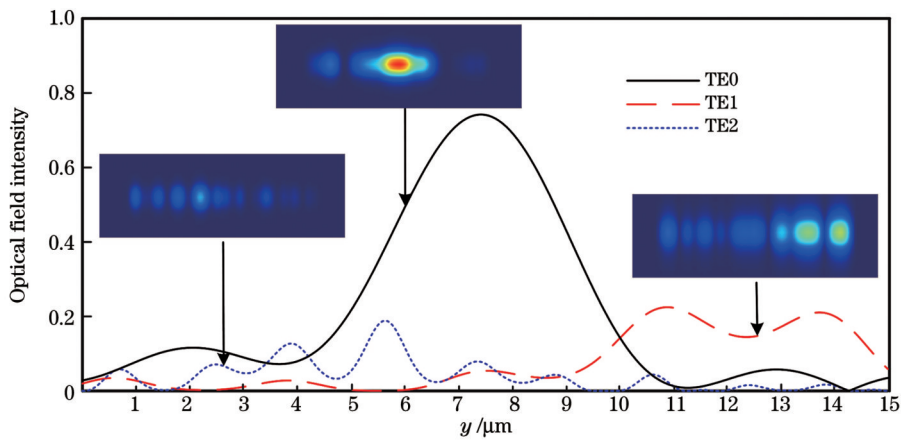


图 4 非均匀 MMI 末端的光场强度分布

Fig. 4 Distribution of the optical field intensity at the end of the non-uniform MMI

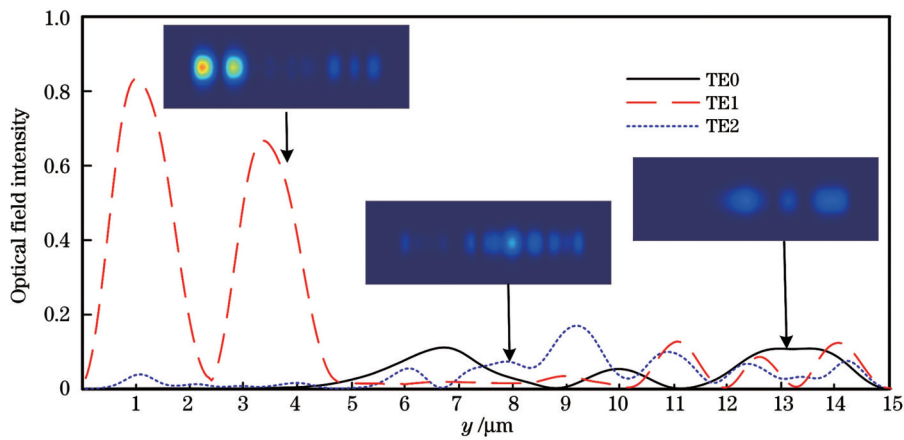


图 5 改变折射率后非均匀 MMI 末端光场强度的分布情况

Fig. 5 Distribution of the optical field intensity at the end of the non-uniform MMI after tuning the refractive index

3 片上模式分离器的设计与优化

基于第 2 节所述原理,本文提出一种 1×3 MMI 结构的模式分离器,其结构示意图如图 6 所示。由于对称干涉型 MMI 在多模区域中形成的光场是对称的,MMI 中传输的偶模会在多模区域中央产生自映像,而奇模的自映像都会均分在多模区域上下两端,难以实现分离。因此,本文将模式分离器的输入端口设置在多模区域的左上角。该模式分离

器采用硅层厚度 $h=0.22 \mu\text{m}$ 的 SOI 基片。为使波导能同时满足 TE0、TE1 和 TE2 三种模式的稳定传输,输入和输出直波导的宽度被设置为 $1.9 \mu\text{m}$,即 $w=w_1=w_2=w_3=1.9 \mu\text{m}$,长度 l 设置为 $10 \mu\text{m}$;并用长度为 l_{taper} 、宽度为 $w_{\text{taper}j}$ ($j=1,2,3$) 的锥形波导与多模区域相连,初始设置 $l_{\text{taper}}=60 \mu\text{m}$, $w_{\text{taper}j}=3.8 \mu\text{m}$ 。该锥形波导可以有效减小模式分离器的传输损耗,以防止工艺制备中宽度突变造成的波导断裂。

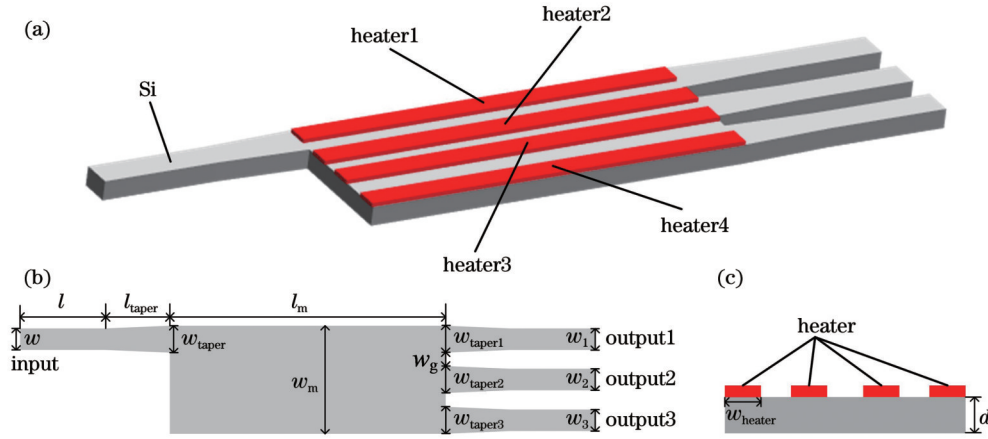


图 6 模式分离器结构示意图。(a)3 维结构示意图;(b)俯视图;(c)横截面图

Fig. 6 Schematic diagram of the mode splitter. (a) 3D structure diagram; (b) top view; (c) cross-section diagram

热调谐^[26]是一种简单且能灵活改变波导有效折射率的方式,该方式是在波导的正上方制作微型热电极,通过对电极施加电压使其发热。而由于热光效应的影响,波导的材料折射率将以 $1.84 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ 的速率随温度的变化而变化。通过改变其加热温度,就能调整多模区域的折射率分布。热电极的布局和温度的调控是该模式分离器的设计重点。由于热电极被设置在多模区域,因此多模区域的宽度需能容纳多个热电极。虽然热电极的数量越多,对有效折射率的调控就越精细,但过多的热电极也会增加多模区域的宽度,进而导致器件的尺寸增大。在综合考虑热电极制备的工艺要求、器件尺寸和热光调谐效果的基础上,本文在多模区域设置了 4 个微型热电极,每个微型热电极宽度 $w_{\text{heater}}=3 \mu\text{m}$,相邻微型热电极间隔 $1 \mu\text{m}$,此时,多模区域宽度 $w_m=15 \mu\text{m}$ 。而对于多模区域长度 l_m 的设计,初始设置为 $l_m=250 \mu\text{m}$ 。

本文采用 FDTD 算法进行仿真。为衡量该模式分离器的性能,计算了插入损耗 ($L_{\text{TE}i}$) 和模式串扰 ($C_{\text{TE}i}$):

$$L_{\text{TE}i} = -10 \lg T_{ii}, \quad i = 0, 1, 2, \quad (6)$$

$$C_{\text{TE}i} = 10 \lg \left(\sum_{j=0,1,2 \text{ and } j \neq i, k=0,1,2} T_{jk} \right), \quad i = 0, 1, 2, \quad (7)$$

式中:TE i ($i=0,1,2$) 分别表示 TE0、TE1 和 TE2 三种

模式; T_{jk} 表示从输入端口输入 TE j 模式时从目标输出端口输出 TE k 模式的透过率。由于热电极数量较多,热电极温度变化范围较大,本文采用粒子群算法 (PSO) 来优化 4 个微型热电极的温度,其目标是使 TE0、TE1 和 TE2 3 种模式的自映像位置分别出现在三个输出波导处。因此,各输出端口的损耗和串扰都应达到最小。本文设计的优化函数如下:

$$F_{\text{OM}} = T_{ii} - \left(\sum_{j=0,1,2 \text{ and } j \neq i, k=0,1,2} T_{jk} \right), \quad i = 0, 1, 2. \quad (8)$$

结合式 (6) 和式 (7) 可知, F_{OM} 的第一项与 $L_{\text{TE}i}$ 相关,第二项与 $C_{\text{TE}i}$ 相关。为提高模式分离器的性能, $L_{\text{TE}i}$ 和 $C_{\text{TE}i}$ 都应越小越好。此时, F_{OM} 的最大值为 1。因此,优化的目标简化为使 F_{OM} 达到最大。在使用 PSO 算法对加热温度进行优化时,设置 4 个微型热电极的温度扫描区间为 $0 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$,最大迭代数为 100,每一代迭代 20 次。通过反复迭代扫描,在权衡 3 种模式的 F_{OM} 值最大后,当多模区域的长度 $l_m=227 \mu\text{m}$ 时性能达到最优,此时热电极的温度设置如下:对于 TE0 模式,4 个微型热电极的加热温度分别为 $32 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $26.14 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $43.42 \text{ }^\circ\text{C}$;对于 TE1 模式,4 个微型热电极的加热温度分别为 $7.61 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $17.89 \text{ }^\circ\text{C}$;对于 TE2 模式,4 个微型热电极的加热温度分别为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $4.89 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。模式分离器传输谱如图 7 所示。由图 7 可知,当波长为 1550 nm 时:对于 TE0 模式,其 $L_{\text{TE}0}$ 为 1.9 dB , $C_{\text{TE}0}$ 为 -4.93 dB ;对于 TE1 模式,其 $L_{\text{TE}1}$ 为

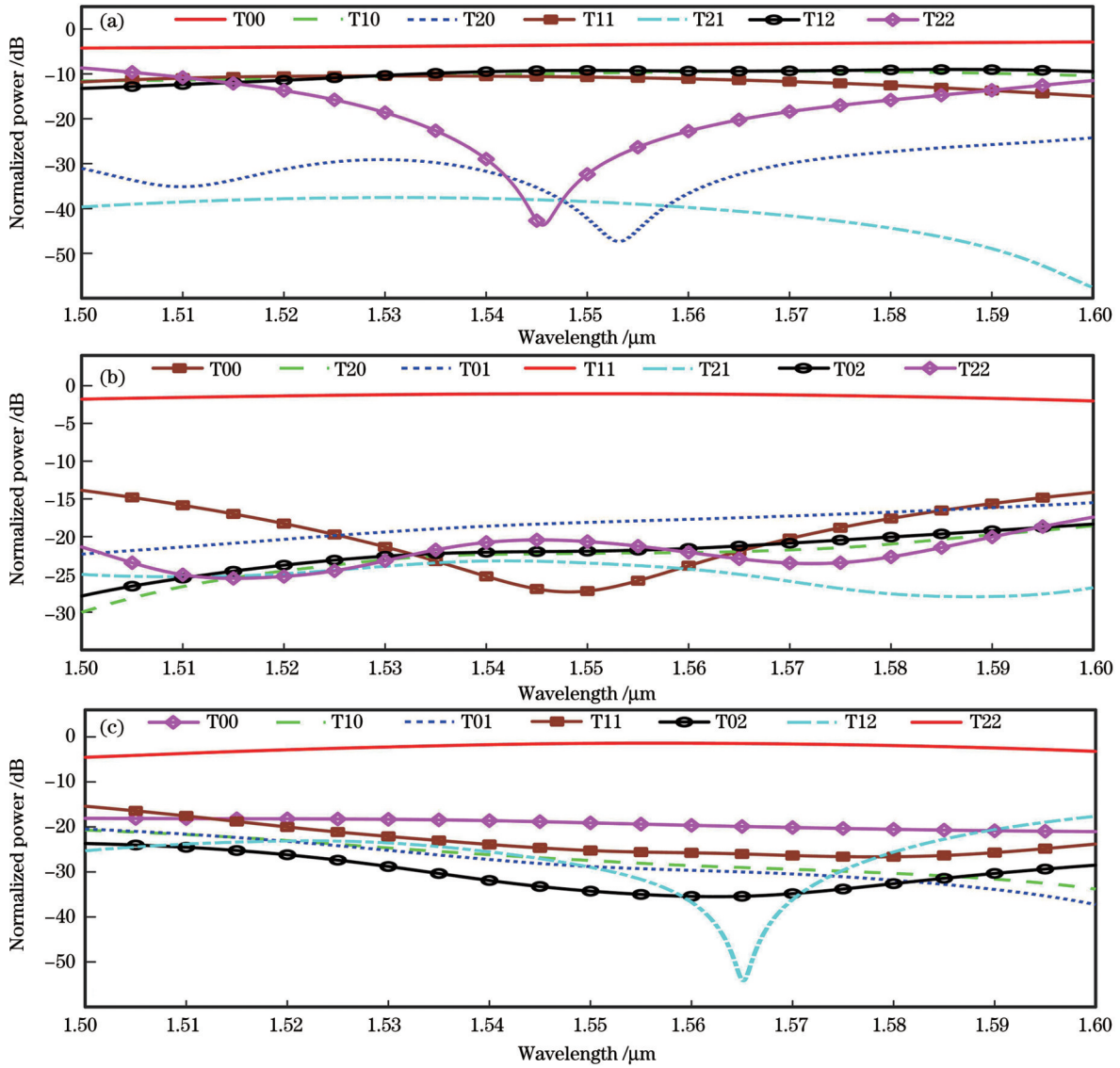


图 7 各输出端口的传输谱。(a)输出端口 2;(b)输出端口 1;(c)输出端口 3

Fig. 7 Transmission spectra of the output ports. (a) Output2; (b) output1; (c) output3

1.07 dB, C_{TE1} 为 -9.97 dB; 对于 TE2 模式, 其 L_{TE2} 为 1.44 dB, C_{TE2} 为 -16.98 dB。

上述结果虽然能分离 3 个 TE 模式, 但仍存在较大的插入损耗和模式串扰。为进一步提高该器件的性能, 对输入和输出波导的锥形区域以及直波导区域再次进行优化。经仿真后发现, 对于输入波导、输出波导 1 和输出波导 3, 当 $w_{\text{taper}} = w_{\text{taper1}} = w_{\text{taper3}} = 4.4 \mu\text{m}$ 时, 对应模式的插入损耗最低; 而对于输出 TE0 模式的输出端口 2, w_{taper2} 越大, 该模式的插入损耗越低。但是考虑到各输出波导之间需留下间隙, 以防止各输出波导之间的干扰, 将输出端口 2 的锥形波导宽度 w_{taper2} 设置为 $6 \mu\text{m}$, 此时输出波导间隔 w_g 变为 $0.1 \mu\text{m}$ 。而为了减小模式串扰, 可减小输出端口 2 的宽度, 使其无法支持 TE1 和 TE2 模式。经仿真后确定其宽度 $w_2 = 0.6 \mu\text{m}$ 。相应地, 将输出端口 1 的宽度 w_1 设计为 $0.9 \mu\text{m}$, 而输出端口 3 的宽度保持

不变。

优化上述参数后, 再次对模式分离器进行仿真, 其结果如图 8 所示, 当波长为 1550 nm 时, 对于 TE0、TE1 和 TE2 模式, 其插入损耗分别为 1.03 dB、1.04 dB 和 1.06 dB, 模式串扰分别为 -15.38 dB、 -17.5 dB 和 -20.4 dB, 且 3 dB 带宽均大于 97 nm。此时 3 个模式的传输光场图如图 9 所示。

该芯片的制备流程如图 10 所示, 由于该方案中存在微型热电极, 因此在常规硅基芯片制备的基础上还需增加制备热电极的流程。条形波导制备的工艺流程如下: 首先对 SOI 基片进行清洗, 将光刻胶旋涂其上; 然后按照版图用电子束照射待刻蚀区域, 待显影、定影后, 该区域的光刻胶就会被去掉; 再利用电感耦合等离子体刻蚀 (ICP) 技术刻蚀 220 nm, 形成条形波导, 最后去除剩余的光刻胶 (图 10 第一行)。热电极的制备工艺流程如下: 首先使用等离子体增强化学气相沉积技

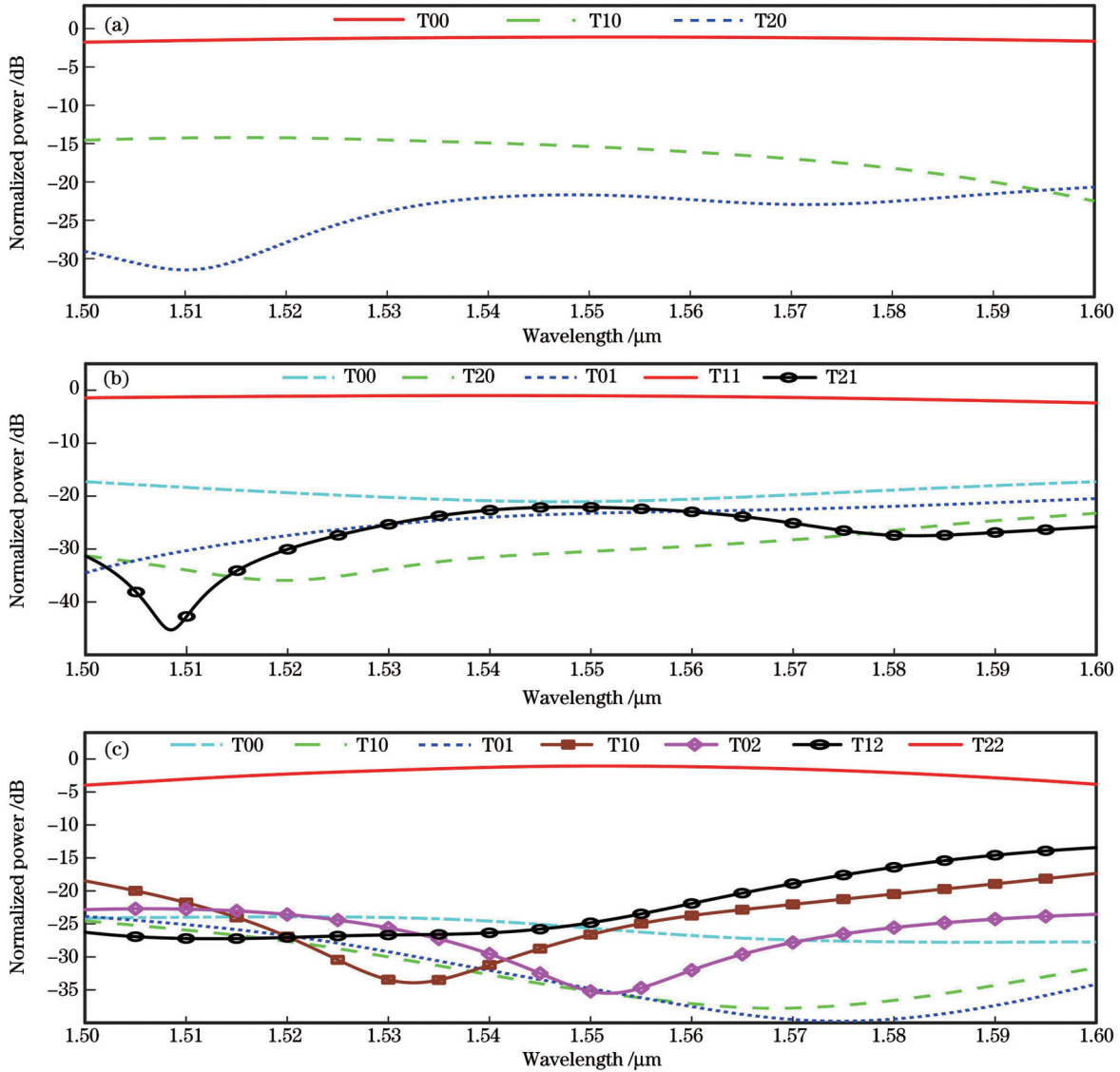


图 8 再次优化后各输出端口的传输谱。(a)输出端口 2;(b)输出端口 1;(c)输出端口 3

Fig. 8 Transmission spectra of the output ports after optimization. (a) Output2; (b) output1; (c) output3

术(PECVD)在芯片表面沉积 SiO_2 层,旋涂一层光刻胶,经第二次光刻后,通过金属蒸发沉积一层金属钛,最后通过剥离工艺完成热电极的制备(图 10 第二行)。

为了验证本文方案的可实现性,分析了工艺误差和温度控制误差对该模式分离器性能的影响。在常规工艺制备情况下,波导长度和宽度的误差应小于 100 nm,因此仿真了该器件多模波导长度、宽度偏差为 ± 100 nm 情况下,模式分离性能的变化情况,发现在长度偏差情况下,输入 TE0、TE1 和 TE2 模式时:插入损耗均小于 1.07 dB,插入损耗变化范围小于 0.01 dB;模式串扰均小于 -15.37 dB,串扰变化范围小于 0.01 dB。而在宽度偏差情况下,输入 TE0、TE1 和 TE2 模式时:插入损耗均小于 1.16 dB,插入损耗的变化范围分别为 0.02 dB、0.12 dB 和 0.05 dB;模式串扰均小于 -15.22 dB,串扰的变化范围分别为 0.16 dB、

0.1 dB 和 1.05 dB。由此可见,工艺误差对该器件性能的影响较小。除此之外,加热温度的偏差也会对该模式分离器的性能产生影响。模式分离器中包含 4 个热电极,假设所有的热电极温度均在最优值附近随机取值,选取不同的温度偏差范围,可以达到如图 11 所示的模式分离器的性能变化情况。

由图 11(a)可知,当 4 个热电极的温度偏差均在 0.5°C 以内时,三种模式输入情况下,插入损耗均小于 1.10 dB,其中:输入 TE0 模式时,插入损耗的变化范围最大,为 0.06 dB;TE2 模式的插入损耗变化范围最小,为 0.01 dB。而当温度偏差均在 1°C 、 1.5°C 和 2°C 以内时,插入损耗分别小于 1.16 dB、1.31 dB 和 1.45 dB,其中:输入 TE0 模式时插入损耗的变化范围最大,分别为 0.12 dB、0.27 dB 和 0.41 dB;输入 TE2 模式时插入损耗的变化范围最小,分别为 0.01 dB、0.02 dB 和 0.02 dB。模式串扰随温度偏差的变化情况如图 11(b)

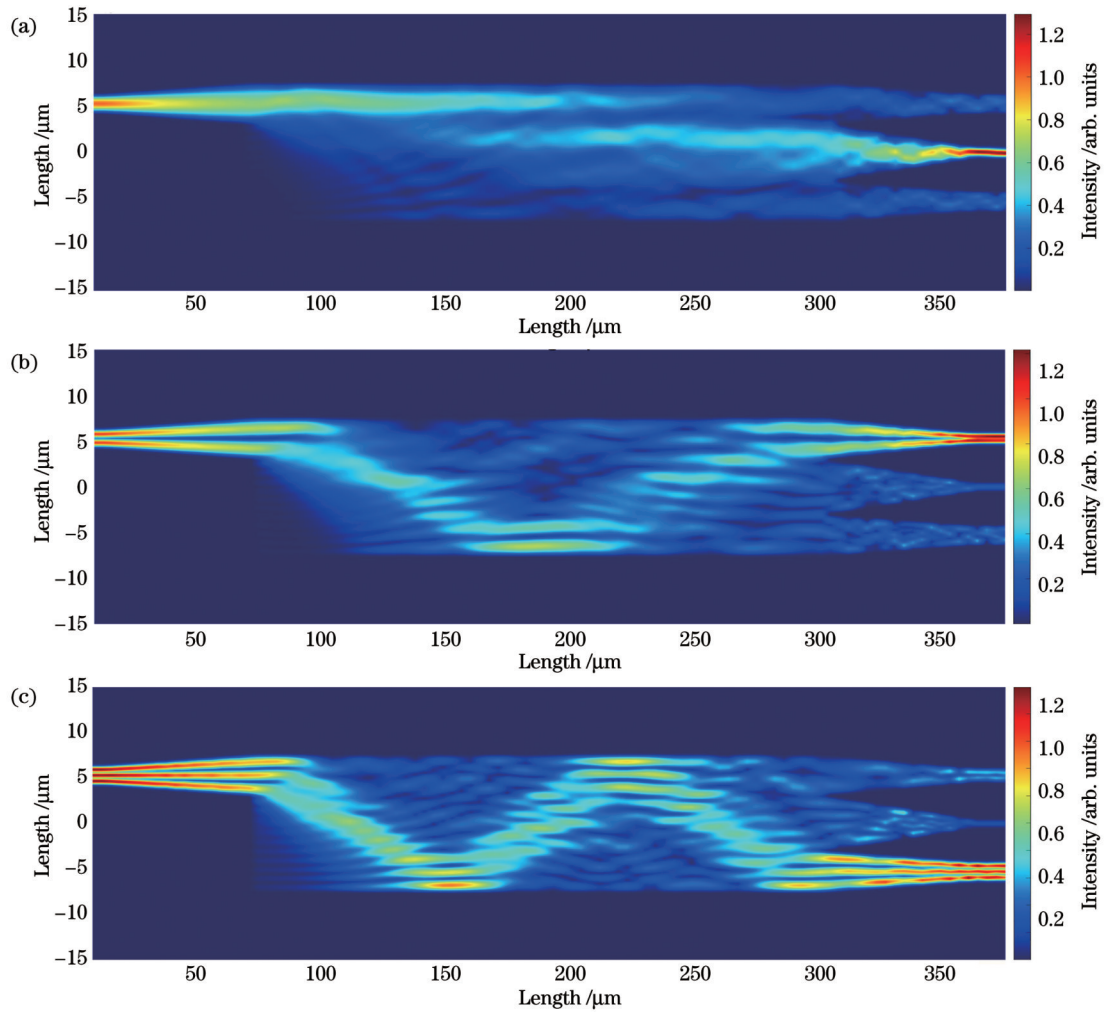


图 9 各模式传输光场图。(a)TE0;(b)TE1;(c)TE2

Fig. 9 Light field diagrams of each mode. (a) TE0; (b) TE1; (c) TE2

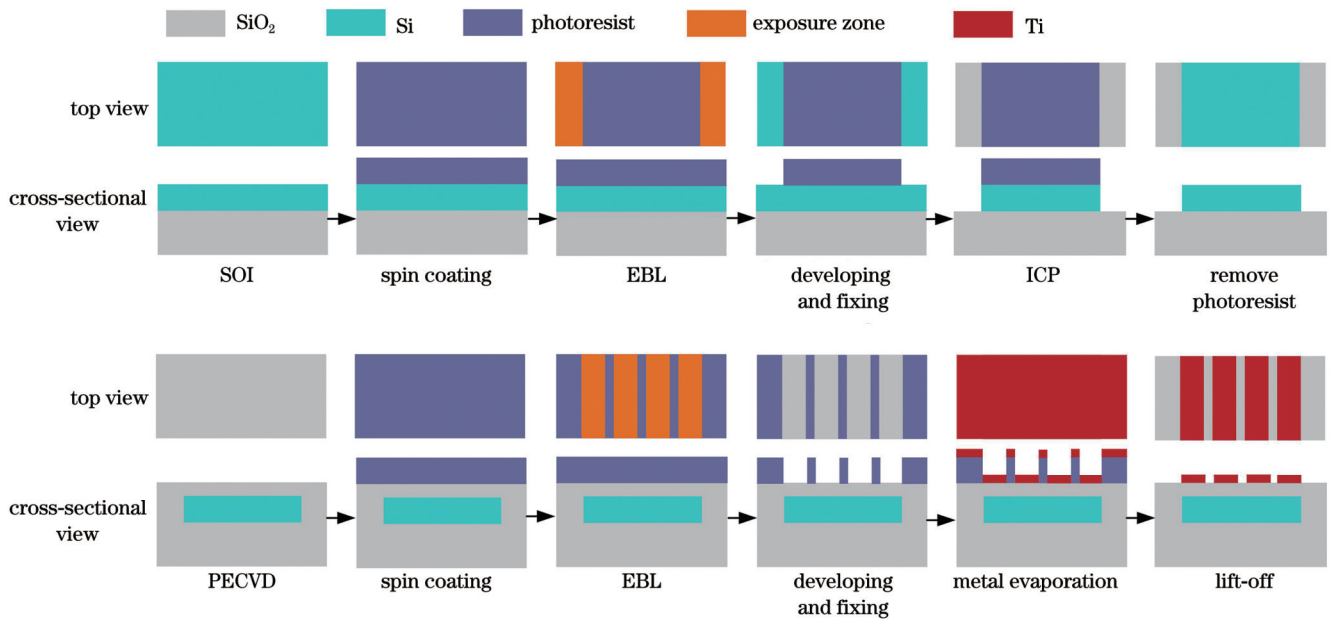


图 10 芯片工艺流程示意图(EBL:电子束光刻,ICP:电感耦合等离子体刻蚀,PECVD:等离子体增强化学气相沉积)

Fig. 10 Schematic diagram of the chip process (EBL: electron beam lithography, ICP: inductively coupled plasma etching, PECVD: plasma enhanced chemical vapor deposition)

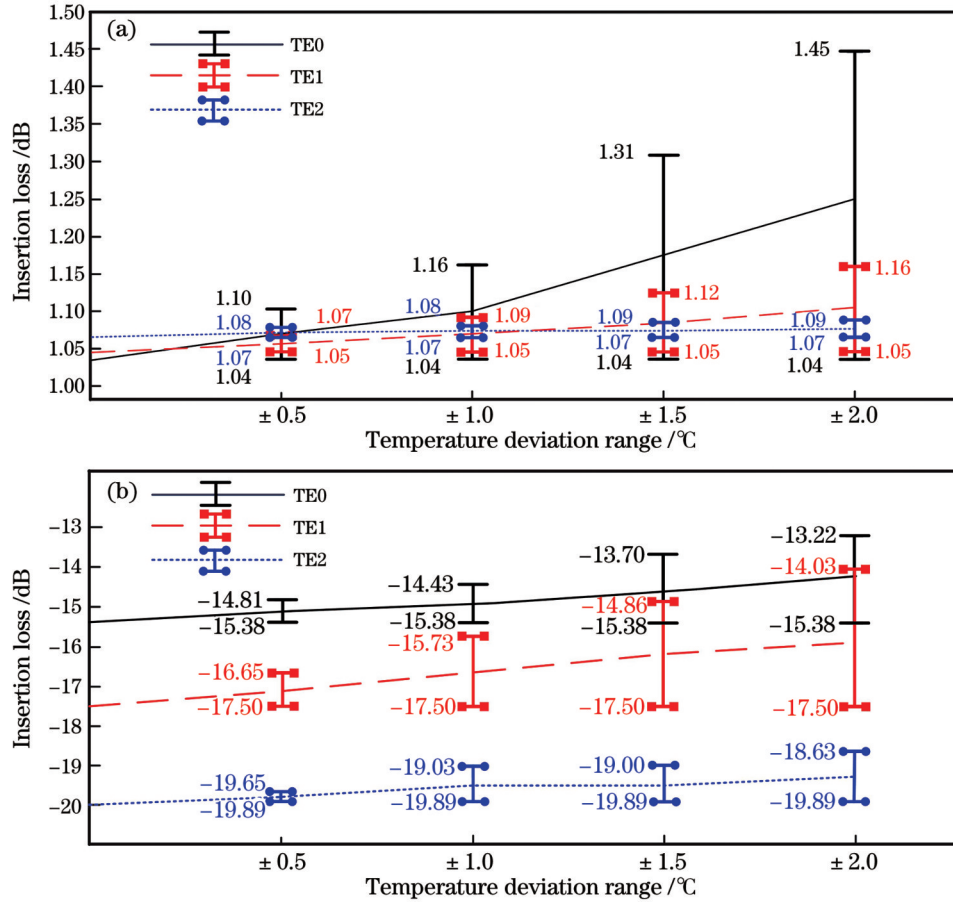


图 11 不同温度偏差范围内,模式分离器插入损耗和模式串扰的变化情况。(a)插入损耗;(b)模式串扰

Fig. 11 Variation ranges of insertion loss and crosstalk of mode splitter under different temperature deviation range. (a) Insertion loss; (b) mode crosstalk

所示。当4个热电极的温度偏差均在0.5 °C以内时,93种模式输入情况下,模式串扰均小于-14.81 dB,其中:输入TE1模式时,模式串扰变化范围最大,为0.85 dB;输入TE2模式时,模式串扰变化范围最小,为0.24 dB。而当温度偏差在1 °C、1.5 °C和2 °C以内时,模式串扰分别小于-14.43 dB、-13.70 dB和-13.22 dB,其中:输入TE1模式时,插入损耗变化范围最大,分别为1.77 dB、2.64 dB和3.47 dB;输入TE2模式时,插入损耗变化范围最小,分别为0.86 dB、0.89 dB和1.26 dB。

综上所述,当温度偏差在2 °C以内时,模式分离器

的插入损耗均小于1.45 dB,插入损耗的变化范围小于0.41 dB;模式串扰均低于-13.22 dB,模式串扰的变化范围小于3.47 dB。由此可见,细微的温度偏差对该模式分离器的性能影响不大,为使分离器满足模分复用系统的应用需求,只需保持2 °C以内的温度波动,这在实际操作中也是容易实现的。

本文设计的模式分离器方案与以往模式分离器方案的性能对比如表3所示。本文方案与传统的基于MMI的模式分离器方案相比,具有更多的模式分离数和更小的插入损耗;而相比于基于Y分支和ADC的模式分离器方案,本文方案具有更小的模式串扰。本文

表 3 不同模式分离器方案的性能比较

Table 3 Performance comparison of different mode splitter schemes

Ref. No	Structure	Mode separation counts	Insertion loss /dB	Cross talk /dB	Bandwidth /nm	Mode maintenance function
[13]	MMI	3	<1.18	<-20	—	No
[14]	Y-junction	2	<0.56	<-9.1	106	No
[16]	CTC	4	<4.73	<-15.15	66	No
[17]	MMI	2	<1.1	<-18	120	No
[3]	MMI	3	<1.1	<-10	90	No
This work	MMI	3	<1.06	<-15.38	97	Yes

方案最突出的特点是在模式分离时保持了原有的模式,这使其在模分复用系统中具有更广泛的应用。此外,通过增加加热电极和输出波导数量,本文方案可以实现更高阶、更多种模式的分离。

4 结 论

提出一种基于 MMI 的片上模式分离器方案,该器件能在模式保持的基础上,分离前 3 个 TE 模式 (TE₀, TE₁ 和 TE₂),当波长为 1550 nm 时,其插入损耗分别为 1.03 dB、1.04 dB 和 1.06 dB,模式串扰分别为 -15.38 dB、-17.5 dB 和 -20.4 dB,3 dB 带宽均大于 97 nm。此外,当保证温度的偏差在 2 °C 以内,各个模式的插入损耗均小于 1.45 dB,模式串扰均小于 -13.22 dB。相比于传统的基于模式解复用器的模式分离器,该方案无须将高阶模转换为基模就能实现模式分离,能极大地降低信号路由、模式切换等场景下的系统复杂度。而随着加入更多微型热电极,该方案可实现扩展,分离更高阶模式。同时,该模式分离器还具有集成度高、工艺难度低等优势,能被广泛应用于光通信系统中。

参 考 文 献

- [1] Yi X L, Zhao W K, Li C L, et al. Reconfigurable optical add-drop multiplexers for hybrid mode-/wavelength-division-multiplexing systems[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(6): 066004.
- [2] Guo J S, Yu L W, Xiang H T, et al. Realization of advanced passive silicon photonic devices with subwavelength grating structures developed by efficient inverse design[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(2): 026005.
- [3] Wang Z, Yao C H, Zhang Y, et al. Compact silicon three-mode multiplexer by refractive-index manipulation on a multi-mode interferometer[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13899-13907.
- [4] Liu Y J, Wang Z, Liu Y L, et al. Ultra-compact mode-division multiplexed photonic integrated circuit for dual polarizations[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(18): 5925-5932.
- [5] Su Y K, He Y, Chen H S, et al. Perspective on mode-division multiplexing[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(20): 200502.
- [6] Jiang W F, Wang X G. Ultra-broadband mode splitter based on phase controlling of bridged subwavelength grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(8): 2414-2422.
- [7] 陈涛, 毛思强, 万洪丹, 等. 基于伴随法逆向设计的硅基分模器[J]. *光学学报*, 2023, 43(23): 2313003.
Chen T, Mao S Q, Wan H D, et al. Silicon mode splitter obtained by inverse design based on adjoint method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(23): 2313003.
- [8] Nakamura K, Fujisawa T, Sakamoto T, et al. Tunable broadband mode power dividers based on a wavelength-insensitive coupler using the thermo-optic effect for flexible modal power adjustment in a mode-division multiplexing network [J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2021, 38(3): 946-952.
- [9] Guo J S, Ye C C, Liu C Y, et al. Ultra-compact and ultra-broadband guided-mode exchangers on silicon[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(7): 2000058.
- [10] Chen X J, Lin J, Wang K. A review of silicon-based integrated optical switches[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(4): 2200571.
- [11] Xing J J, Li Z Y, Xiao X, et al. Two-mode multiplexer and demultiplexer based on adiabatic couplers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3468-3470.
- [12] Paredes B, Mohammed Z, Villegas J, et al. Dual-band (O & C-bands) two-mode multiplexer on the SOI platform[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(3): 6600309.
- [13] González-Andrade D, Olivares I, de Cabo R F, et al. Broadband three-mode converter and multiplexer based on cascaded symmetric Y-junctions and subwavelength engineered MMI and phase shifters[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 164: 109513.
- [14] Chen W W, Wang P J, Yang T J, et al. Silicon three-mode (de) multiplexer based on cascaded asymmetric Y junctions[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2851-2854.
- [15] Driscoll J B, Grote R R, Souhan B, et al. Asymmetric Y junctions in silicon waveguides for on-chip mode-division multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1854-1856.
- [16] Chen W W, Li H X, Zhang B H, et al. Silicon mode (de) multiplexer based on cascaded particle-swarm-optimized counter-tapered couplers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(1): 6600210.
- [17] González-Andrade D, Dias A, Wangüemert-Pérez J G, et al. Experimental demonstration of a broadband mode converter and multiplexer based on subwavelength grating waveguides[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 129: 106297.
- [18] Feng L, Ayache M, Huang J Q, et al. Nonreciprocal light propagation in a silicon photonic circuit[J]. *Science*, 2011, 333(6043): 729-733.
- [19] Liao J W, Zhang L X, Liu M L, et al. Mode splitter without changing the mode order in SOI waveguide[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(22): 2597-2600.
- [20] Xie S Z, Jin L, Zhang H, et al. All-fiber high-power spatiotemporal mode-locked laser based on multimode interference filtering[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 2909-2917.
- [21] Jin M F, Wu G H, Zhou X, et al. Parabolic MMI coupler for 2×2 silicon optical switch with robustly high extinction ratio for four paths[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(13): 737-740.
- [22] 郑栋飞, 孔德军, 林健, 等. 相变材料辅助的非易失性硅基偏振不敏感 1×2 模式光开关 [J]. *光学学报*, 2023, 43(11): 1113001.
Zheng D F, Kong D J, Lin J, et al. Non-volatile polarization-insensitive silicon-based 1×2 optical mode switch using phase-change materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(11): 1113001.
- [23] Shi X D, Lu Y Q, Ou H Y. High-performance silicon carbide polarization beam splitting based on an asymmetric directional couplers for mode conversion[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(3): 616-619.
- [24] Xu L H, Mao D, Zhang J S, et al. Broadband polarization beam splitters based on MMI couplers with internal photonic crystals fabricated using 193 nm photolithography[C] // 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), June 6-10, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [25] 马彦豪. 宽带低损耗热光开关及其关键器件研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
Ma Y H. Research on broadband low-loss thermo-optical switch and its key devices[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [26] 廖莎莎, 张甜甜, 刘继伟, 等. 低纹波因数、高形状因子的片上光学平顶滤波器[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2413001.
Liao S S, Zhang T T, Liu J W, et al. On-chip optical flat-top filter with low ripple factor and high shape factor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2413001.

On-Chip Mode Splitter with Mode Maintenance Function

Liao Shasha*, Zhang Wuhao, Zhao Shuai, Zhao Xincheng, Tang Liang

School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract

Objective The mode splitter is employed in mode division multiplexing systems to separate and guide different modes in a bus waveguide. Traditional mode splitter methods are based on mode conversion processes, where the input higher-order modes are converted into the fundamental mode to separate them from the bus waveguide. This method is suitable for most mode division multiplexing systems, but in scenarios such as signal routing or signal selection, when different modes are separated, they are often switched or selected using multi-mode switches. If the mode splitter output is all in the fundamental mode, additional components should be added after the mode splitter to convert the separated fundamental mode back to higher-order modes before inputting them into multi-mode switches, which undoubtedly increases the system complexity. In the case of optical isolation, it is often necessary to remove the higher-order modes and just transmit the fundamental mode. If the mode splitter output is all in the fundamental mode, it cannot meet the requirements of practical applications. Therefore, if the original modes can be preserved with mode separation achieved, this will greatly simplify the system structure and reduce the system size.

Methods The multi-mode interference (MMI) coupler is a basic silicon-based device, that features a compact structure, low loss, and easy fabrication. However, traditional MMI-based mode splitters are difficult to extend the mode separation function to higher-order modes due to the highly symmetric structure and mode self-imaging principle. This scheme is based on the silicon-on-insulator (SOI) platform. According to the modal analysis method, it is derived that the refractive index distribution in the multi-mode region can not only change the imaging position and shorten the self-imaging length but also separate different input modes. Thermal tuning is achieved by fabricating heaters on top of the waveguide, and the waveguide material refractive index changes with the temperature at a rate of $1.84 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ due to the thermo-optic effect. Therefore, by adding micro heaters to the multi-mode region of the MMI, designing the positions of the heaters, and accurately controlling the heating temperature, the separation of three modes, TE0, TE1, and TE2 can be achieved.

Results and Discussions The designed structure is a 1×3 MMI, with the input port of the MMI located at the upper left of the multi-mode region, and four heaters are uniformly distributed in the multi-mode region. The optimized size parameters are $w = w_3 = 1.9 \text{ } \mu\text{m}$, $w_1 = 0.9 \text{ } \mu\text{m}$, $w_2 = 0.6 \text{ } \mu\text{m}$, $w_{\text{taper}} = w_{\text{taper1}} = w_{\text{taper3}} = 4.4 \text{ } \mu\text{m}$, $w_{\text{taper2}} = 6 \text{ } \mu\text{m}$, $w_m = 15 \text{ } \mu\text{m}$, and $l_m = 227 \text{ } \mu\text{m}$ (Fig. 6). The heating temperatures of the four heaters for the TE0 mode are $32 \text{ } ^\circ\text{C}$, $26.14 \text{ } ^\circ\text{C}$, $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, and $43.42 \text{ } ^\circ\text{C}$ respectively, temperatures for the TE1 mode are $7.61 \text{ } ^\circ\text{C}$, $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $50 \text{ } ^\circ\text{C}$, and $17.89 \text{ } ^\circ\text{C}$, and those for the TE2 mode are $50 \text{ } ^\circ\text{C}$, $50 \text{ } ^\circ\text{C}$, $4.89 \text{ } ^\circ\text{C}$, and $50 \text{ } ^\circ\text{C}$. Under the wavelength of 1550 nm , the insertion losses are 1.03 dB , 1.04 dB , and 1.06 dB for the three modes, the crosstalks are -15.38 dB , -17.5 dB , and -20.4 dB respectively, and all have a 3 dB bandwidth greater than 97 nm (Fig. 8). It is proven that compared with traditional mode splitters, the proposed scheme has a larger number of separated modes, smaller insertion losses, and smaller mode crosstalks. The most outstanding feature is that it preserves the original modes during mode separation, which makes it have a wider range of applications in mode division multiplexing systems. Additionally, by increasing the number of micro heaters and output waveguides, the proposed scheme can achieve the separation of higher-order and more modes.

Conclusions An MMI-based on-chip mode splitter scheme is proposed to separate the first three TE modes (TE0, TE1, and TE2) and preserve the modes. When the wavelength is 1550 nm , the insertion losses are 1.03 dB , 1.04 dB , and 1.06 dB , and the crosstalks are -15.38 dB , -17.5 dB , and -20.4 dB , with a 3 dB bandwidth greater than 97 nm . Meanwhile, when the temperature deviation is within $2 \text{ } ^\circ\text{C}$, the insertion loss of each mode is less than 1.45 dB , and the crosstalk is less than -13.22 dB . Compared with traditional mode splitters based on mode demultiplexers, the proposed scheme can achieve separation without converting high-order modes into fundamental modes, which can greatly reduce system complexity in scenarios such as signal routing or signal selection. As more heaters are added, the proposed scheme can be expanded to separate higher-order modes. At the same time, this mode splitter also has high integration and low process difficulty and can be widely employed in optical communication systems.

Key words integrated optics; mode maintenance; multi-mode interference coupler; mode splitter; micro heater