

应用于 CWDM 的四通道角度多模干涉耦合器的仿真设计

张赞允^{1,2}, 程倩¹, 刘宏伟^{1,2}, 李鸿强^{1,2}

(1.天津工业大学 电子与信息工程学院,天津 西青 300387;2.天津工业大学 天津市光电检测技术与系统重点实验室,天津 西青 300387)

摘要 波分复用技术(WDM)能够扩展信道带宽,提高信道容量,降低成本,从而改善光通信系统的性能,成为现代通讯网络拥堵的一种理想解决方案。角度多模干涉型耦合器(AMMI)是利用多模波导色散自映像原理设计的一种新型 WDM 器件,其具有插入损耗小,串扰低,易于制造,且对于制造误差不敏感等优势,在提高电信和数据通信系统的容量和质量方面有望获得广泛应用。本文基于 SOI 平台设计了两组应用于稀疏波分复用(CWDM)的四通道角度多模干涉型耦合器,为与当前主流的 MPW 硅基光电子工艺相兼容,本设计基于 220 nm 顶层硅厚度、2 μm 埋氧层厚度,工作波长在 1550 nm 附近,输入输出波导倾斜角为 $\theta=19^\circ$ 时,输入输出波导宽度分别为 8 μm 和 9 μm 的两组设计能够实现通道间隔为 12 nm 和 14 nm 的波分复用/解复用,器件插入损耗为 0.51 dB 和 0.32 dB,通道非均匀度小于 0.1 dB,平均串扰低于 -27 dB。同时,本文还给出了 $\theta=15^\circ$,其余参数不变的两对照组,对照组的插入损耗低至 0.29 dB 和 0.17 dB,平均串扰小于 -25 dB 和 -20 dB,只能实现最小通道间隔为 15 nm 和 18 nm 的波分复用解复用。

关键词 色散自映像;光子集成技术;波分复用技术;多模干涉

中图分类号 TN256

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Simulation and Design of 4-channel Angled MMI for Coarse Wavelength Division(de) Multiplexing

ZHANG Zanyun^{1,2}, CHENG Qian¹, LIU Hongwei^{1,2}, LI Hongqiang^{1,2}

(1.School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2.Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract Wavelength division multiplexing(WDM) technology is an ideal solution for modern communication networks congestion, which can expand channel bandwidth, increase channel capacity, reduce costs and improve the performance of optical communication systems. Angled multimode interferometer (AMMI), as a novel WDM structure utilizing the principle of dispersive self-imaging, is expected to be widely applied in raising the capacity and quality of telecommunication and data communication systems with a series of advantages including low- insertion-loss, low-crosstalk, ease of fabrication, and good tolerance to fabrication error. In this paper, 4-channel angled multimode interferometers for coarse wavelength division

收稿日期:2020-08-08

基金项目:国家自然科学基金项目(61675154)资助

通讯作者:张赞允,男,汉族,博士,副教授,研究方向:硅基光电子器件与集成, E-mail: zhangzanyun@tiangong.edu.cn。

multiplexing(CWDM) based on the SOI platform are investigated and designed. To be compatible with the current mainstream MPW silicon photonic process, the devices are designed based on the SOI platform with silicon thickness of 220 nm and buried oxide thickness of 2 μm . For input/output inclination angle $\theta=19^\circ$, two AMMI designs with input/output waveguide width of 8 μm and 9 μm realized wavelength division(de) multiplexing with minimum channel spacing of 12 nm and 14 nm, and the insertion loss of 0.51 dB and 0.32 dB respectively. The channel uniformity for two designs are both less than 0.1 dB and the average crosstalk are less than -27 dB. For comparison, another two designs with $\theta=15^\circ$ while the others parameters remaining unchanged are also simulated. These two designs achieved insertion loss of 0.29 dB and 0.17 dB, crosstalk less than -25 dB 和 -20 dB, and minimum channel spacing of 15 nm and 18 nm respectively.

Key words dispersive self-imaging; photonic integration technology; wavelength division multiplexing technology; multimode interference

0 引言

近年来,信息产业的发展势头迅猛,并由此带动了光电子通信技术不断取得突破。光波分复用器件是光电子通信技术中关键的元器件之一,它能够有效提高电信和数据通信系统的容量和质量,从而改善整个光通信系统的性能。随着成熟的硅光子技术逐渐走向商业化,通信系统对 WDM 器件的性能提出了更高的要求。低成本、大容量、低插入损耗和串扰、具有较强制造容差能力且易于集成的高性能 WDM 器件成为硅基光电子器件研究热点之一。

之前,波分复用器件通常应用于砷化镓(GaAs)和磷化铟(InP)等低折射率差的非硅基平台,随着 SOI 技术的发展成熟,WDM 器件近年来已成功地应用于高折射率差的 SOI 平台。当前主流的波分复用器件如阵列波导光栅(AWG_s)^[1]、平面凹面光栅(PCG_s)^[2]、微环谐振腔(RR)^[3]等在输入输出及自由传播区域的表面,往往需要设计复杂的浅刻蚀结构来抑制波导模式失配带来的插入损耗和串扰。同时这些光栅和微环结构对于制造误差非常敏感,其光谱移动敏感度约为 100 GHz/nm 量级。如此高的制造误差灵敏度会导致实际应用中需要采用热调谐或相位补偿技术来校准波长,这会额外增加制造复杂度和成本。1995 年, Lucas B. Sodano 等人提出了基于多模干涉耦合器(MMI)的波分复用器件^[4]物理模型,器件结构简单,只需单步刻蚀即可实现波分复用,然而 MMI 只能实现大通道间隔的波分复用/解复用,无法满足更小通道间隔的需求。2011 年, Y. Hu 等人首次提出并实验验证了基于角度多模干涉型耦合器(AMMI)^[5]实现四通道波分复用/解复用功能。AMMI 器件是对 MMI 的改良,同样只需单步刻蚀,消除了多个光刻步骤之间的对准要求。相比其他 WDM 器件, AMMI 具有结构简单、易于设计和制造、制造容差大等优点。测试结果显示器件的插入损耗小于 2 dB, 平均串扰小于 -20 dB, 然而该器件基于 400 nm 顶层硅厚度晶圆制造,限制了其与其他硅基光电子器件进一步集成的能力。此后,为了提高通道数量同时避免尺寸过大, Y. Hu 等人又基于相同波导平台进一步设计了一组八通道交错型 AMMI 器件^[6],它由一个非等臂的马赫曾德干涉仪(MZI)和两个滤波波长互补的四通道 AMMI 组合而成,实现了约为 3 dB 的插入损耗和约为 -20 dB 的通道串扰。为了面向不同的应用需求, AMMI 器件也被不断拓展到不同的工作波段和不同的材料平台并被实验验证。2015 年, Milos Nedeljkovic 等人基于硅基锗材料平台验证了通道间隔为 20nm 的五通道 AMMI^[7],其插入损耗为 3 dB,串扰为 -10 dB,测试波导传输损耗为 1.4 ± 0.24 dB/cm。由于硅的热光系数高,基于 SOI 平台上制造的 AMMI 在近红外范围内对于温度变化十分敏感,相较硅材料,氮化硅在近红外波段具有较好的热稳定性。2017 年, T. D. Bucio 等人基于氮化硅平台设计并验证了一种用于近红外波段的 AMMI^[8],其插入损耗和串扰分别小于 2.5 dB 和 -30 dB,尺寸误差灵敏度低于 120 pm/nm,波长随温度的偏移小于 10 pm/ $^\circ\text{C}$ 。同年, J. H. Song 等人基于氮化硅平台设计并验证了工作在可见光波段面向荧光传感应用的 AMMI 波分复用解复用器件^[9]。该工作同时设计并实验验证了一个两通道和一个三通道的波分复用器件,器件插入损耗分别为 1.7 dB 和 2.7 dB,通道串扰小于 -22 dB 和 -17 dB。虽然已报道的关于 AMMI 的研究工作已经取得了较大的进展,但令人遗憾的是这些器件的工艺平台均不兼容于主流的硅基光电子工艺平台(220 nm 顶层硅厚度),无法实现与其他光电子器件的大规模集成;其次,上述 AMMI 器件的插入损耗和串扰等性能相比其它较为

成熟的 WDM 器件而言还有待进一步的改善。

基于此,我们对基于 220 nm 顶层硅厚度的 SOI 平台对四通道角度多模干涉型耦合器进行了较为系统的研究,该器件主要由大尺寸的多模干涉波导和较宽的输入输出波导组成。光在多模波导中传输时,在波导侧壁的光强和在波导分界面处的散射引起的损耗相较于单模波导更低,因此,器件的插入损耗相较于其它波分复用器件小得多。而输入输出波导的宽度大,有效避免了与多模波导及其它集成器件连接时的模场失配,进一步减小了插入损耗。我们通过采用本征模式扩展(EME)算法对器件的结构进行优化仿真计算,设计了两组通道间隔不同的 AMMI,器件面积在 6 mm² 左右,仿真结果显示两组 AMMI 的四个通道的光谱响应良好,插入损耗分别低至 0.51 dB 和 0.32 dB,−3 dB 带宽均为 6 nm,几乎能够与 AWG 和串联微环结构相媲美,通道的非均匀度小于 0.1 dB,串扰均在 −27 dB 以下。这表明基于该设计的 AMMI 作为四通道波分复用器件性能优良,能够实现低损耗稀疏光波分复用的功能,有望在硅基光收发、光学传感等领域获得应用。

1 多模波导色散自映像原理及四通道波分复用器件的设计

角度多模干涉耦合器(AMMI)的结构示意图如图 1 所示,本器件设计基于 2 μm 埋氧层厚度,220 nm 硅波导厚度和 130 nm 脊型波导刻蚀深度。器件由三部分组成:宽度为 b 的多模波导、宽度为 a 的输入和输出波导。当入射光从输入波导以倾斜角 θ 斜入射进入多模波导后,沿波导传播方向,将周期性的复制出输入场的单像或多像^[10],最终在光场传输方向特定的距离 L 处,出现输入场的反向自映像点,设置输出波导,可获得稳定的输出。其中, L_i 是输入波导至第 i 个输出波导的长度, X_{\min} 是两相邻输出波导侧壁间的垂直距离,整个器件我们采用本征模式扩展算法(EME)建模仿真,并对输入输出波导的宽度 a 和倾斜角 θ 进行了详细优化。

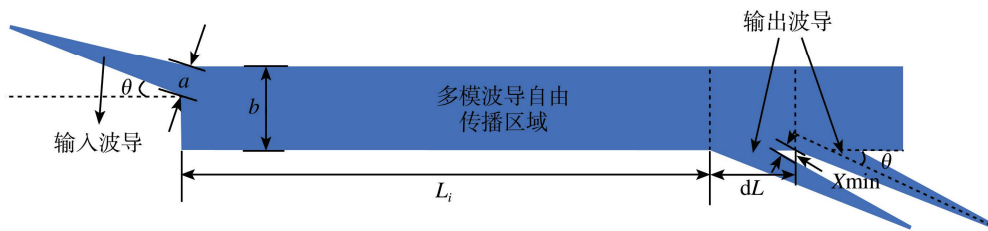


图 1 角度多模干涉耦合器的结构示意图

1.1 四通道波分复用器件的设计

根据设计目标,要实现波长 1550 nm 附近四通道的光波分复用功能,我们在多模波导的输出端放置四个相互平行的输出波导,输出波导的位置的选择是为了匹配不同波长输入场的反向自映像点,工作波长为 λ_i 的基模输入场的反向自映像点的位置由色散方程^[4]给出

$$L_i = \frac{4mn_{\text{eff}}b^2}{\lambda_i}, \quad (1)$$

其中 $m=1,2,3,\dots$, b 是多模波导的宽度, λ_i 是第 i 个输出通道的工作波长, n_{eff} 是多模波导区域基模的有效折射率,可通过光学仿真软件 Lumerical Mode solutions 快速计算得出, m 是多模波导自映像的级次。为了减小器件的长度,我们通常取 $m=1$ 。将公式(1)对波长进行微分,可得由波长变化量 $d\lambda$ 引起的相邻输出波导间距的变化量

$$dL = -4n_{\text{eff}}\left(\frac{b}{\lambda}\right)^2 d\lambda. \quad (2)$$

由图 1 可知, $dL = \frac{a + x_{\min}}{\sin\theta}$ 代入公式(2),可得相邻两输出波导间的最小通道间隔为

$$\delta\lambda_{\sin} = \frac{1}{4n_{\text{eff}}}\left(\frac{\lambda}{b}\right)^2 \frac{a + X_{\min}}{\sin\theta}, \quad (3)$$

其中 X_{\min} 应足够大,才能保证相邻输出波导之间串扰可忽略不计。公式(1)-(3)给出了 AMMI 设计的一般原则,其主要设计参数有:多模波导的宽度 b ,输入输出波导的宽度 a 和倾斜角 θ 。但是,上述公式只有在其模式相位系数的幅值满足傍轴近似时才能得到基模输入场的高质量自映像点,多模波导的第 p 个激发模式的相位系数^[5]为

$$\beta_p = \frac{2n_{\text{eff}}\pi}{\lambda} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{p\lambda}{2n_{\text{eff}}b} \right)^2 \right\}. \quad (4)$$

在此条件下, $m=1$ 的公式(1)代表的多模波导传播平面内所有对称模式的相位差为 2π 的整数倍, 所有的反对称模式相位差为 π 的整数倍, 对称模式和反对称模式的相位相差 π 。因此, 器件在特定工作波长下能呈现出完美的反像, 实现各个输出波导处的功率耦合。公式(4)是由下式给出的相位系数表达式的完整解析形式二项式展开的前两个项

$$\beta_p \frac{2n_{\text{eff}}\pi}{\lambda} \left\{ 1 - \left(\frac{p\lambda}{2n_{\text{eff}}b} \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

需要注意的是, 公式(1)-(3)只有 $(p\lambda/2n_{\text{eff}}b)^2 \leq 1$ 时才是精确的。因此, 只凭公式计算结果设计 AMMI 器件可能会存在误差, 具体设计参数还需要进一步的建模仿真才能确定, 上述公式能快速计算得出器件的大致长度及通道间隔, 作为精确设计器件参数的建模参考。

为了快速对器件进行优化设计, 我们首先选定多模波导宽度 b , 将其初值设置为 $20 \mu\text{m}$ 。经计算, 该波导宽度下多模波导有效折射率 $n_{\text{eff}}=2.85$, 根据公式(1)我们计算得出 1550 nm 工作波长处的多模波导长度 L 理论值为 $2942 \mu\text{m}$ 。为了避免相邻输出波导间的光串扰, 我们将输出波导侧壁间的垂直间距 X_{min} 设定为 $1 \mu\text{m}$ 。在确定了以上设计参数后, 我们对输入输出波导的宽度以及倾斜角进行优化以得到最好的器件性能。

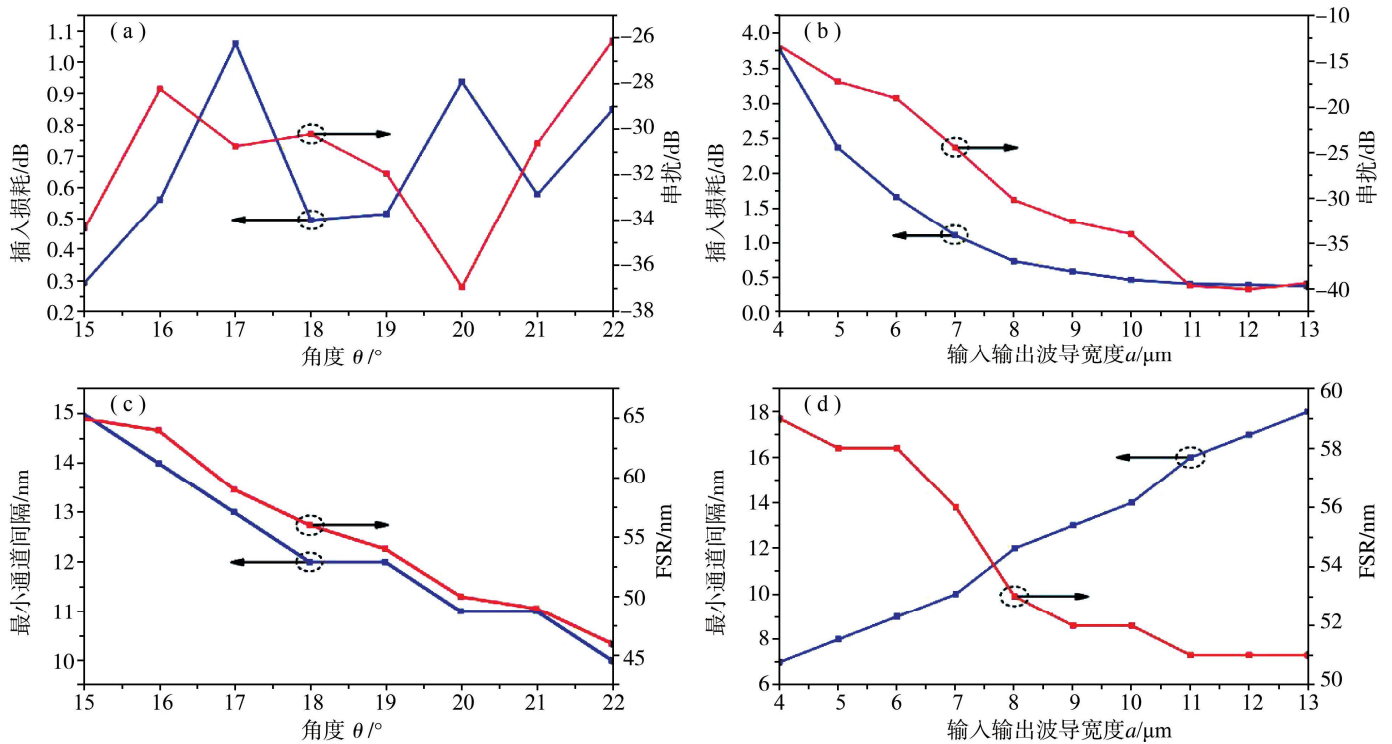


图2 (a)输入输出波导倾斜角 θ 对插入损耗和串扰的影响;(b)输入输出波导宽度 a 对插入损耗和串扰的影响;(c)输入输出波导倾斜角 θ 对最小通道间隔及 FSR 的影响(d)输入输出波导宽度 a 对最小通道间隔及 FSR 的影响

由于设计参数较多, 我们假定其余参数不变, 只改变一个参数来分析其对器件性能的影响, 参考 Y. Hu 等人的设计^[11]并结合之前的设计经验, 我们将输入输出波导宽度 a 设定为 $8 \mu\text{m}$, 多模波导的长度设定为公式估算值 $2942 \mu\text{m}$, 对不同的输入输出波导的倾斜角 θ 分别进行仿真, 再通过扫描多模波导的长度找到不同角度下的最佳成像点, 并基于该长度进一步扫描波长, 最终计算出不同角度下器件的传输光谱, 进而分析得到插入损耗、通道串扰、最小通道间隔、自由光谱范围(FSR)等性能指标。角度对器件性能的影响如图 2(a)和(c)所示, 其中图 2(c)左轴表示计算得到的器件两相邻输出波导间的最小通道间隔, 是设定 $a=8 \mu\text{m}$ 、 $X_{\text{min}}=1 \mu\text{m}$ 时不同输入输出波导倾斜角对应的相邻两通道中心滤之差, 它代表器件实现波分复用的频谱利用能力。右轴表示的自由光谱范围(FSR)是指同一通道的光谱响应曲线相邻两波峰之间的距离, 决定着可利用的波长范围, 低串扰波分复用器件的 FSR 应大于等于通道数 N 与最小通道间隔 $\delta\lambda_{\text{min}}$ 的乘积, 即 $\text{FSR} \geq N \times \delta\lambda_{\text{min}}$ 。结合两图可以看出, 15° 时器件的插入损耗和串扰最小, 但其最小通道间隔为 15 nm 。 19° 和 21° 两处的插入损耗和串扰均较小, 然而角度的增加会导致多模波导相位逐渐不满足傍轴近似条件, 成像质量恶化。所以综合考虑插入损耗、串扰和通道间隔的折衷设计, 我们选择 19° 作为输入输出波导的倾斜角, 进行下一

步的优化。

输入输出波导的宽度与器件性能的关系如图 2(b)和(d)所示,随着 a 的不断增大,器件的插入损耗和串扰都随之减小。这表明输入输出波导的宽度越大,器件的波长选择特性越好。由图 2(d)可以看出,随着 a 的增加,器件的最小通道间隔增加,同时自由光谱范围逐渐降低。图 3 为不同输入输出波导宽度下器件的光场图,(a)-(b)-(c)三幅子图分别为输入输出波导宽度 $a=4\ \mu\text{m}$ 、 $a=8\ \mu\text{m}$ 和 $a=13\ \mu\text{m}$ 时的器件光场分布图,由图可知, $a=4\ \mu\text{m}$ 的输入光场在进入多模波导后的成像较为杂乱,勉强看出三重像的位置。 $a=8\ \mu\text{m}$ 和 $a=13\ \mu\text{m}$ 时波导的成像点排布整齐,接近波导末端的输出端,明显出现了稳定且清晰的一重像,在这个位置放置输出波导,可得到稳定的输出信号,中心位置出现了二重像,完全符合多模波导成像点的规律。这是因为输入输出波导的宽度越大,与多模波导连接时由模场失配引起的损耗就越小。但是由于 a 与 dL 的值成正比,由图 2(d)和公式(3),器件的最小通道间隔随 a 的增大而增大。因此,在进行器件设计时,一方面我们可以通过增大输入输出波导宽度来改善器件插入损耗、通道串扰等性能;另一方面我们也要保证 a 的值满足器件通道间隔的设计要求。

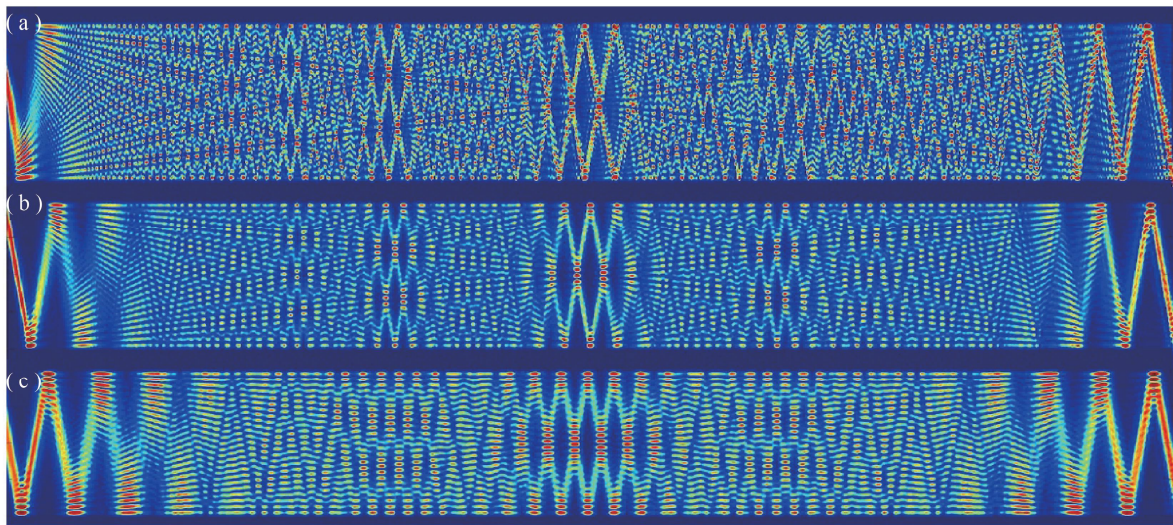


图 3 (a) $a=4\ \mu\text{m}$, 1550 nm 处单通道的 AMMI 的光场图;(b) $a=8\ \mu\text{m}$, 1550 nm 处单通道的 AMMI 的光场图;
(c) $a=13\ \mu\text{m}$, 1550 nm 处单通道的 AMMI 的光场图

此外,由于输入输出波导的宽度较大,入射光在经由输入波导进入多模波导时,可以简单的用线性光学的理论进行分析,根据线性光学,器件的最大通道数 $N_{\max}^{[11]}$ 应满足条件

$$N_{\max} < \frac{2b \cos\theta}{a}, \quad (6)$$

b 和 θ 的值已经确定,而本器件的设计目标是一个四通道的波分复用器件,所以 a 的值应小于等于 $9\ \mu\text{m}$ 。我们既要满足低插入损耗和串扰的要求,又要保持较小的通道间隔。表 1 是综合考量上述分析结果后,选取 $a=8\ \mu\text{m}$ 和 $a=9\ \mu\text{m}$ 设计的两组 AMMI 参数,两组结构分别对应 12 nm 和 14 nm 通道间隔

表 1 四通道 AMMI 的设计参数

	$L_4/\mu\text{m}$	$L_3/\mu\text{m}$	$L_2/\mu\text{m}$	$L_1/\mu\text{m}$
$a=8\ \mu\text{m}$	2550	2578	2606	2634
$a=9\ \mu\text{m}$	2535	2566	2598	2631

注: $b=20\ \mu\text{m}$, $X_{\min}=1\ \mu\text{m}$, $\theta=19^\circ$ 。

1.2 输入输出波导 taper 的优化

在与光栅、电光调制器等其它器件进行集成时,通常需要用宽度较小的单模波导进行连接。为了解决 AMMI 输入输出波导与单模波导之间模场失配等问题,我们通常需要在多模波导和单模波导之间采用一种绝热锥形波导结构,以下简称 taper。它能减小多模/单模波导之间模式转换光损耗,同时还可以减小多模波导自映像的模式相位差从而提高成像质量。对于 130 nm 刻蚀深度、500 nm 宽的脊形单模波导,我们同样采用本征模式扩展分析法(EME)分别对 $a=8\ \mu\text{m}$ 和 $a=9\ \mu\text{m}$ 所对应的两组 taper 进行了建模仿真。

图 4 中内嵌图(a)为 taper 的结构示意图,其宽度为 a 的一侧接 AMMI 的输入输出多模波导,另一侧接

宽度为 500 nm 的单模波导,宽度从大到小呈线性变化。由 taper 长度与损耗的关系可知,宽度为 $9\ \mu\text{m}$ 的 taper 比 $8\ \mu\text{m}$ 的 taper 需要的长度更大,才能获得同样高的模式转换效率。例如,如果想要实现 0.03 dB 的 taper 插入损耗,采用 $8\ \mu\text{m}$ 输入输出波导宽度相比 $9\ \mu\text{m}$ 宽度可以将 taper 长度有效缩短 $25\ \mu\text{m}$ 。内嵌图(b)为计算得到 $a=8\ \mu\text{m}$ 、taper 长度为 $176\ \mu\text{m}$ 时 taper 内光场分布图,图中可以看出光在不同尺寸光波导之间的模斑转换和绝热光传输过程。采用抛物线型 taper 结构^[12,13] 可以更加有效降低 taper 长度,使得 AMMI 器件整体更加紧凑同时更加易于集成。

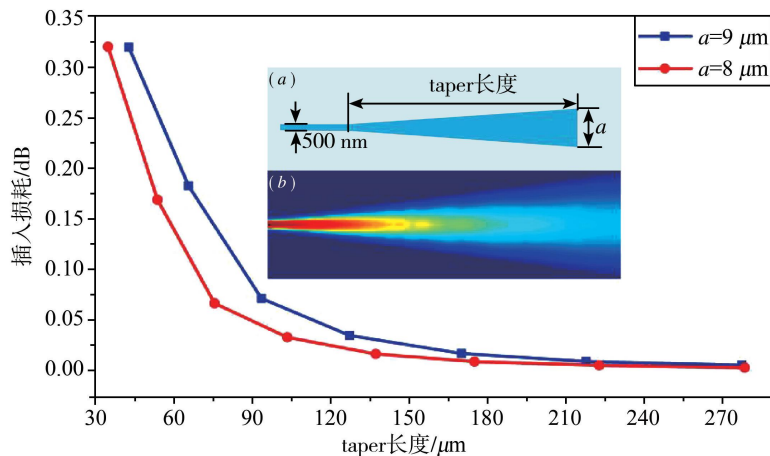


图4 taper 长度对插入损耗的影响

2 结果讨论分析

通过采用 EME 算法对器件结构进行一系列的仿真分析,最终我们确定了两组 AMMI 的设计参数:多模波导宽度为 $20\ \mu\text{m}$,输入输出波导宽度分别为 $8\ \mu\text{m}$ 和 $9\ \mu\text{m}$,倾斜角为 19° ,我们选定 1530、1542、1554、1566 nm 作为 $a=8\ \mu\text{m}$ 时的目标通道波长,1530、1544、1558 和 1572 nm 作为 $a=9\ \mu\text{m}$ 时的目标通道波长。两组器件的总长度约为 3 mm,taper 的长度 $282\ \mu\text{m}$,此长度下,两组 taper 的损耗小于 0.001%。

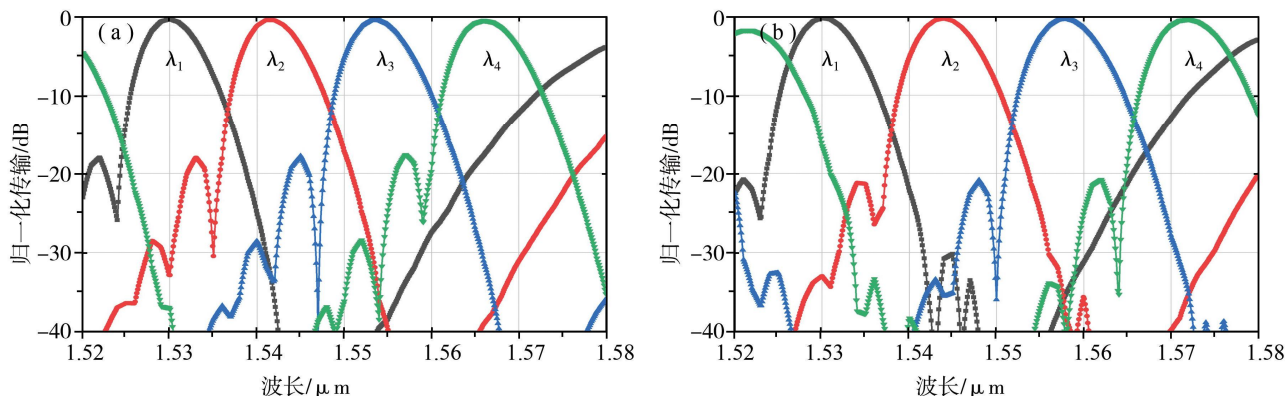


图5 (a) $\theta=19^\circ$, $a=8\ \mu\text{m}$ 时四通道 AMMI 的光谱响应;(b) $\theta=19^\circ$, $a=9\ \mu\text{m}$ 时四通道 AMMI 的光谱响应

图 5(a)和(b)分别对应两组 AMMI 设计的光谱响应,图中可以看出,当 a 的宽度分别为 $8\ \mu\text{m}$ 和 $9\ \mu\text{m}$ 时,通道非均匀度均小于 0.1 dB,器件插入损耗分别为 0.51 dB 和 0.32 dB,平均通道串扰约为 $-25\ \text{dB}$ 和 $-20\ \text{dB}$, $-3\ \text{dB}$ 带宽为 6 nm,整个器件的面积在 $0.06\ \text{mm}^2$ 量级。随着输入输出波导宽度从 $8\ \mu\text{m}$ 增大到 $9\ \mu\text{m}$,器件的插入损耗和平均串扰都有所降低,最小通道间隔从 12 nm 增至 14 nm,同时 FSR 从 53 nm 减小到 52 nm,对于 $a=8\ \mu\text{m}$,FSR 能够满足要求,但是当 $a=9\ \mu\text{m}$ 时,FSR 至少需要 56 nm 才能实现通道之间的低串扰,所以由图 5(b),通道 1 和通道 4 之间的相互串扰显著增加。在实际应用中,若要实现更加密集的波分复用,可以考虑增大角度或者减小输入输出波导的宽度,基于我们之前的分析,这在一定程度上会以插入损耗和串扰的恶化为代价。同理若要减小器件的插入损耗,降低串扰,可以考虑减小角度(或增加 a 的值)。

若不考虑器件的最小通道间隔,我们可以通过减小角度改善器件的插入损耗和串扰。图 6 是输入输出波导角度为 15° , $a=8\ \mu\text{m}$ 和 $a=9\ \mu\text{m}$ 时 AMMI 的光谱响应。从图中可以看出,两组器件的插入损耗分别为 0.29 dB 和 0.17 dB,通道间的平均串扰约为 $-34\ \text{dB}$,相比 19° 的 AMMI 更低,最小通道间隔分别为 15 nm 和 18 nm,对于此通道间隔,满足低串扰要求下需要的最小 FSR 分别为 60 nm 和 72 nm,但当 $a=9\ \mu\text{m}$ 时,实际的 FSR 只有 65 nm,所以与 $\theta=19^\circ$ 时一样,通道 1 和通道 4 之间的相互串扰增加。 15° 时 AMMI-3 dB 带宽为 7 nm,比 19° 高出 1 nm,所以角度减小的同时带宽增加。

综合图 5 和图 6 可以发现,减小角度或者增大输入输出波导宽度都可以在一定程度上减小插入损耗,但同时通道间隔也会增加,特别是对于输入输出波导宽度增加的情况,不断减小的自由光谱范围会导致通道间的串扰恶化,不利于器件性能的提升。因此,在设计时应全面考虑器件的性能指标,选择合适倾斜角和输入

输出波导宽度。

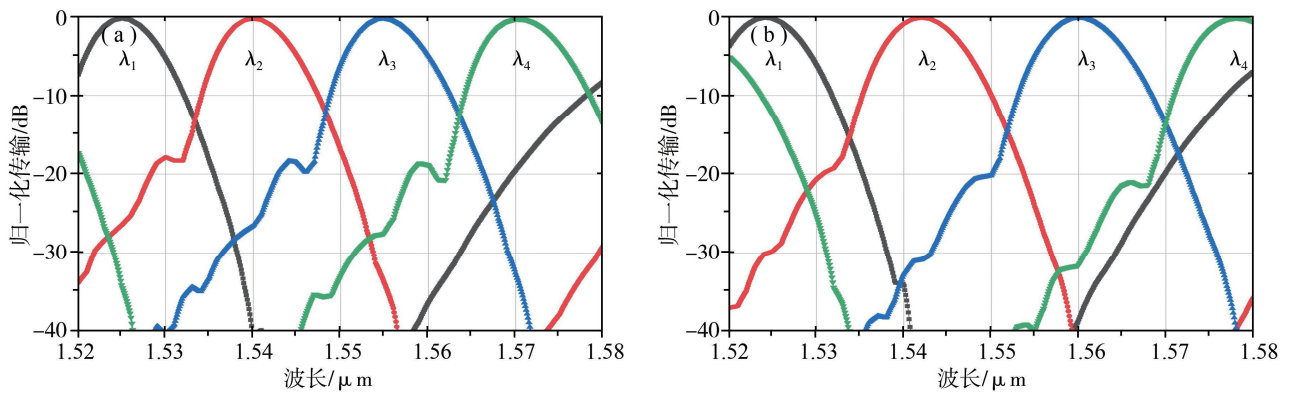


图 6 (a) $\theta=15^\circ, a=8 \mu\text{m}$ 时四通道 AMMI 的光谱响应; (b) $\theta=15^\circ, a=9 \mu\text{m}$ 时四通道 AMMI 的光谱响应

3 结论

本文基于本征模式扩展算法仿真分析了应用于 CWDM 的角度 MMI 四通道波分复用器件,基于多模波导的色散自映像原理,该器件能有效实现 C 波段的波分复用解复用功能,具有良好的波长选择特性,器件面积在 0.06 mm^2 量级。我们主要仿真分析了输入输出波导倾斜角和宽度对角度 MMI 性能的影响。经过计算扫描并综合考虑各个性能指标设计需求,我们确定了输入输出波导角度为 19° 、输入输出波导宽度分别为 $8 \mu\text{m}$ 和 $9 \mu\text{m}$ 时的两组器件为目标器件,分别实现了目标通道间隔为 12 nm 和 14 nm 的波分复用/解复用,插入损耗仅为 0.51 dB 和 0.32 dB ,平均串扰低于 -27 dB 。由于输入输出波导宽度为 $9 \mu\text{m}$ 时,AMMI 自由光谱范围变小使得第二组器件通道 1 和通道 4 之间存在较大串扰。同时本文还仿真了输入输出波导角度为 15° 时的两组对照组器件,仿真结果显示,对照组插入损耗更低,然而对应的最小通道间隔同比增加 3 nm 和 4 nm 。该器件设计基于主流的 220 nm 顶层硅厚度的 SOI 平台,具有制造工艺简单,容差能力强,易于集成等优势,有望应用于对稳定性要求高,大规模集成的 WDM 系统中。

参 考 文 献

- [1] WIM B, PIETER D, DRIES V T, et al. Compact wavelength-selective functions in silicon-on-insulator photonic wires[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(6): 1394-1401.
- [2] BROUCKAERT J, BOGAERTS W, DUMON P, et al. Planar concave grating demultiplexer fabricated on a nanophotonic silicon-on-insulator platform[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(5): 1269-1275.
- [3] GENG M, JIA L, ZHANG L, et al. Four-channel reconfigurable optical add-drop multiplexer based on photonic wire waveguide[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5502-5516.
- [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] HU Y, JENKINS R M, GARDES F Y, et al. Wavelength division(de) multiplexing based on dispersive self-imaging[J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4488-4490.
- [6] HU Y, GARDES F Y, THOMSON D J, et al. Interleaved angled MMI CWDM structure on the SOI platform[C]. Group IV Photonics (GFP), 2013.
- [7] MILOS N, CALLUM G, HU Y F, et al. Angled MMI CWDM structure on Germanium on Silicon[C]. // 2015 conference on lasers and electro-optics europe, 2015.
- [8] THAL A D B, ALI Z K, GORAN Z M, et al. Athermal silicon nitride angled MMI wavelength division(de) multiplexers for the near-infrared[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27310-27320.
- [9] JEONG H S, TANGLA D K, NASER H, et al. Angled-MMI-based wavelength splitters on silicon nitride waveguide platforms for fluorescence sensing[J]. Applied Optics, 2017, 56(29): 8055-8060.
- [10] 马慧莲, 王明华. 多模干涉型集成光学器件研究进展[J]. 光电子·激光, 2003(4): 435-440.
- [11] HU Y, THOMSON D J, GARDES F Y, et al. The evolution of angled MMI structure on the SOI platform[C]. // Proc of SPIE, 2014.
- [12] OKAMOTO K, SUGITA A. Flat spectral response arrayed-waveguide grating multiplexer with parabolic waveguide horns[J]. IEEE Electron Lett, 1996, 32(18): 1661-1662.
- [13] YE T, FU Y F, QIAO L, et al. Low-crosstalk Si arrayed waveguide grating with parabolic tapers[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 31899-31906.