

基于伴随法逆向设计的硅基分模器

陈涛, 毛思强, 万洪丹, 汪静丽*, 蒋卫锋**

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

摘要 基于伴随优化设计算法逆向设计了一种高集成度硅基分模器。通过优化设计得到横电模 TE_0 和 TE_1 双模分模器的尺寸仅为 $5.5\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$, 其可在不改变模阶数的情况下实现模式高效分离。理论结果显示: 当输入 TE_0 模式时, 中心波长处的插入损耗和串扰分别为 0.14 dB 和 -23.8 dB; 当输入 TE_1 模式时, 插入损耗和串扰分别为 0.48 dB 和 -22.45 dB; 工作带宽覆盖 150 nm 时, TE_0 和 TE_1 模式的插入损耗分别低于 0.44 dB 和 1.16 dB。基于全矢量三维有限时域差分法分析了 $\pm 15\ \text{nm}$ 制备容差, 两种模式的插入损耗低于 0.79 dB, 串扰低于 -18.37 dB。所提出的紧凑型硅基分模器可应用于片上模分复用系统, 为大容量片上光通信和光互联提供可行器件。

关键词 集成光学; 硅基光电子学; 硅基分模器; 逆向设计; 伴随法

中图分类号 TN252; TN256 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231143

1 引言

随着互联网技术、移动互联网业务、大数据和人工智能的快速发展, 光纤通信容量的需求一直呈指数级增长。受限于香农极限和光纤非线性效应, 基于单模光纤的波分复用(WDM)技术的传输容量即将达到瓶颈^[1]。为突破传输容量的限制, 空分复用(SDM)技术应运而生。SDM包括多芯光纤和模分复用(MDM)两种技术路线。其中, MDM技术是实现空分复用的重要技术路线。MDM技术因其能够提供更高的信息密度、传输成本低和能耗低等多方面的优势, 被认为是具有研究前景的技术。

不同于基于单模光纤中的WDM技术, MDM技术可以实现单波长多模式共同传输。这些模式相互正交, 因此可以作为独立信道传输信息, 进而增加光纤的传输容量和提高光频谱的利用率。MDM实现的平台可以分为以下三类: 空间光学元件^[2]、光纤^[3]和平面光波导(PLC)^[4]。其中基于PLC的片上MDM技术具有制作工艺成熟、集成度高和结构多样等优势, 受到了广泛的关注。绝缘体上硅(SOI)平台受益于较大的折射率差, 可以实现紧凑的结构和稳定的性能, 且与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容, 成为实现片上MDM系统最具潜力的工艺平台。

为了实现硅基片上MDM系统, 多种光子集成器件相继被提出, 包括分模器^[5-9]、模式(解)复用器^[10]、模式转换器^[11]、滤模器^[12-13]、多模交叉回路^[14-15]、模式选择

开关^[16-17]等。其中, 分模器用于将不同阶数的模式分离到不同的信号中且模阶数不变。在MDM系统中, 模式敏感元件对输入和输出波导模式具有选择性, 传统基于模式解复用器的模式分路难以满足要求。因此使用不改变模式顺序的分模器是提高MDM系统灵活性的重要方法。分模的挑战在于: 在同一波导中, 高阶模式的有效折射率总是小于低阶模式的有效折射率, 因此在不改变模式阶数的情况下很难实现模式分离。近期关于硅基分模器有少量报道, 主要包括基于非定向耦合器的分模器^[5]、基于定向耦合器的分模器^[6]和基于桥型亚波长光栅(BSWG)的分模器^[7-8]。2016年, 张文富团队^[5]提出并理论设计了一种基于非对称定向耦合器的硅基分模器。该分模器引入槽波导, 使得分支波导和槽波导中的横电(TE_1)模满足相位匹配条件(PMC), 从而实现 TE_0 模式和 TE_1 模式的分离。理论仿真结果显示在 100 nm 带宽范围内, 该分模器实现的插入损耗和串扰分别小于 1 dB 和 -16 dB。但是该结构对制备工艺的精度要求比较高。2019年, Rahman教授团队^[6]提出并理论设计了一种基于对称定向耦合器(SDC)的分模器。该分模器由两个对称的槽波导构成, 通过调节波导和槽的尺寸, 实现 TE_0 模式和 TE_1 模式不改变模式阶数的分离。该分模器在 C 波段上实现分别大于 99.4% 的 TE_0 模式透射率和 98% 的 TE_1 模式透射率。2020年, 本团队^[7]报道了一种基于BSWG的大带宽分模器。该分模器的结构由两个基于BSWG的非定向耦合器和一个模式滤波器组成。

收稿日期: 2023-06-15; 修回日期: 2023-07-26; 录用日期: 2023-09-05; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11904178)

通信作者: *jlwang@njupt.edu.cn; **jwf@njupt.edu.cn

该结构基于相位控制原理,可以通过改变桥宽来调整横磁(TM_0)模的相位,由此实现 TM_0 和 TM_1 模式的分离。理论结果表明,所提出的分模器可以实现 $5.75\ \mu\text{m}$ 的紧凑耦合长度,其 TM_0 和 TM_1 模式的插入损耗和串扰分别低于 $0.53\ \text{dB}$ 和 $-19.6\ \text{dB}$,工作带宽分别可以达到 $430\ \text{nm}$ 和 $372\ \text{nm}$,且具有良好的制造容差。2021年,本团队^[8]又将基于BSWG的非定向耦合器和两个基于三波导耦合器(TWC)的模式(解)复用器相结合。经过实验证明,该方法得到的 $1550\ \text{nm}$ 处的插入损耗和串扰分别小于 $1.8\ \text{dB}$ 和 $-22.1\ \text{dB}$,在串扰小于 $-15\ \text{dB}$ 的情况下,可以实现 $84\ \text{nm}$ 和 $100\ \text{nm}$ 的工作波长。虽然上述报道的分模器实现了优异的性能,但由于要满足耦合模理论或相位匹配条件,分模器的尺寸都偏大,有的尺寸都达到了近 $50\ \mu\text{m}$ 。为进一步提高硅基光子器件的集成度和性能,逆向设计方法被提出并被广泛研究。

逆向设计方法是以目标为导向,通过算法反向设计各种结构的方法,其中包括直接二进制搜索法(DBS)^[18-19]、粒子群优化算法(PSO)^[20-21]、离散粒子群算法(BPSO)^[22]、遗传算法(GA)^[23]、水平集算法(LM)^[24]、模拟和数字拓扑优化(ADTO)^[25]等。目前,基于逆向设计算法提出多种光子集成器件,包括偏振分束器^[26]、光功率分配器^[27]、光栅耦合器^[28]等。2022年,本团队^[9]基于DBS提出并实验验证了基于亚单元辅助非对称定向耦合器的双模分模器,实现了 $5\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$ 的紧凑尺寸。实验结果表明,在 $1550\ \text{nm}$ 处,插入损耗和串扰分别小于 $3.04\ \text{dB}$ 和 $-13.34\ \text{dB}$ 。但以上算法存在计算量较大、设计周期长、容易陷于局部极值点、过于依赖初始结构等问题。近期,伴随法成为光子集成芯片逆向设计的热门算法^[29],该方法具有较高的设计效率,通过计算功能区内每个点的梯度来影响最终的结构,不容易陷入局部极值,并对初始结构的依赖度不高。

本文提出一种基于伴随法逆向设计的硅基双模分模器,可在不改变模式阶数的情况下分离 TE_0 和 TE_1 模式。伴随法的每一次迭代只需要进行两次模拟计

算,能够以更少的模拟次数和迭代次数来达到设计需求,从而提高器件的设计效率。使用三维全矢量有限时域差分法(3D-FV-FDTD)进行仿真验证,在 $1550\ \text{nm}$ 的工作波长下,传输 TE_1 模式的插入损耗和串扰分别为 $0.48\ \text{dB}$ 和 $-22.45\ \text{dB}$,传输 TE_0 模式的插入损耗和串扰分别为 $0.14\ \text{dB}$ 和 $-23.8\ \text{dB}$ 。为探究设计的分模器对制备工艺误差的容忍度,分析了误差范围为 $\pm 30\ \text{nm}$ 情况下的器件性能表现。

2 硅基分模器结构及工作原理

所提出的硅基分模器的结构示意图如图1所示,由三个矩形直波导和一个功能区组成。功能区的结构如图1中插图所示。所提出的分模器建立在SOI平台上,具有 $220\ \text{nm}$ 厚的硅波导。硅波导夹在二氧化硅下包层和二氧化硅上包层之间。在功能区内,一条直波导从输入波导连接到右上角的输出波导,以此来实现传输 TE_0 的功能。一条S形弯曲波导从输入波导连接到右下角的输出波导,以此来实现传输 TE_1 的功能。功能区中硅和二氧化硅的分布可以改变功能区的有效折射率,从锥形波导压入的 TE_1 模式受到功能区的扰动,从而在低损耗和不改变阶数的情况下通过功能区。此外,该功能区可以允许 TE_1 模式穿过,而 TE_0 模式不能穿过。

所提出的分模器的初始结构图如图2所示,由三个直波导和一个功能区构成。三个直波导用于光的输入和输出,且具有相同的宽度($W=0.8\ \mu\text{m}$)。基于全

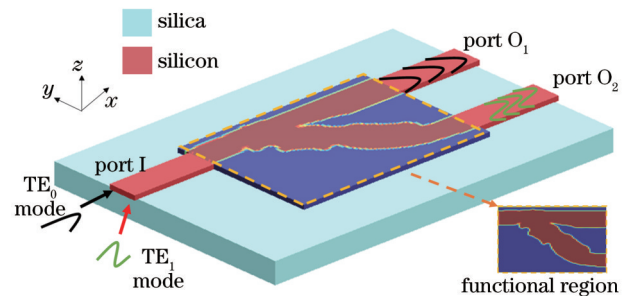


图1 分模器的三维结构示意图

Fig. 1 Three-dimensional structure diagram of mode splitter

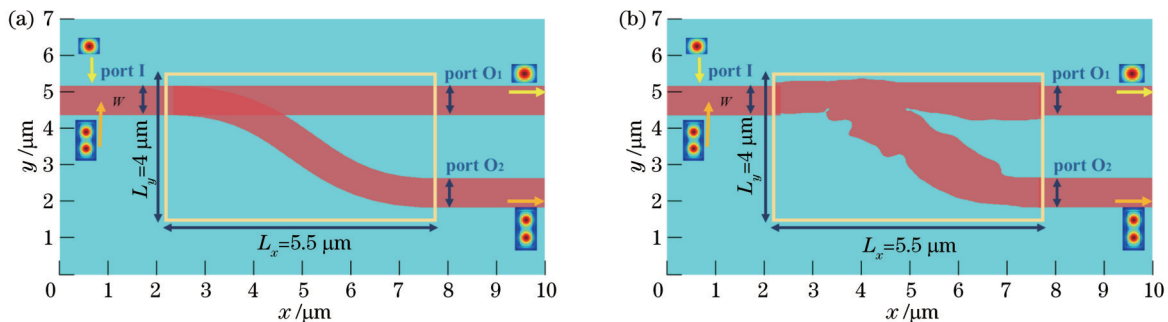


图2 分模器的初始结构图和优化后的分模器结构图。(a)分模器的初始结构图;(b)优化后的分模器结构图

Fig. 2 Initial structure of mode splitter and optimized structure of mode splitter. (a) Initial structure of mode splitter; (b) optimized structure of mode splitter

矢量有限元法(FV-FEM)开展了硅基光波导模式分析,在波导宽度为 $0.8\ \mu\text{m}$ 时,该波导可以同时支持 TE_0 和 TE_1 模式工作,而且不会支持更高阶的 TE 模式,从而可以最大程度地避免模式串扰的影响。功能区的长度和宽度分别为 $L_x=5.5\ \mu\text{m}$ 和 $L_y=4\ \mu\text{m}$ 。功能区包括一条直波导和一条S波导。直波导到功能区上边界的距离为 $0.3\ \mu\text{m}$,S波导到功能区下边界的距离也为 $0.3\ \mu\text{m}$ 。两个输出波导的宽度皆为 $0.8\ \mu\text{m}$,为尽量减小两者之间的串扰,本文设定两者的间距为 $1.8\ \mu\text{m}$ 。由此可见,功能区的宽度为 $4\ \mu\text{m}$ 。对于功能区的长度设置,长度太短,模式在功能区内不能实现完整的模式转换,长度太长虽然会使模式充分地转换,但器件的集成度会降低,综合考虑选择长度为 $5.5\ \mu\text{m}$ 。

3 硅基分模器逆向优化设计及制备容差分析

伴随法能够计算目标函数对于优化空间内每个点的导数,每次迭代需要进行两次仿真,即一次正向过程和一次逆向过程。FDTD用于计算设计区域中的电磁

场梯度。分模器的材料为介电常数为 ϵ_{in} 的硅,分模器周围的材料为介电常数为 ϵ_{out} 的二氧化硅,优化区域是由若干个离散优化的点组成的,其中每个点梯度的计算函数为

$$\frac{\Delta F_{\text{OM}}}{\Delta \epsilon_r(x)} = \text{Re}[E_{\text{adj}}(x)E_{\text{out}}(x)], \quad (1)$$

式中: F_{OM} 为该算法的品质因数; $\epsilon_r(x)$ 为该点的介电常数; $E_{\text{adj}}(x)$ 为逆向仿真时 x 点的场强; $E_{\text{out}}(x)$ 为正向仿真时 x 点的场强。根据式(1)计算该点对最终结果的影响,每个点的介电常数会根据梯度的变化在 ϵ_{in} 和 ϵ_{out} 之间变化,以此来形成下一个结构。利用FDTD仿真计算其目标函数值并进行迭代优化,直到达到设计目标并生成最后的器件布局图。

伴随法对目标器件进行逆向设计的过程如图3所示,分为以下5个步骤:1)确定设计目标并定义设计区域的初始结构;2)根据梯度优化像素点的介电常数,当优化达到设计目标或者无法继续优化时,停止迭代;3)对离散的介电常数进行二值化处理,得到只有硅和二氧化硅的结构;4)对优化后的结构进行可制备性约束;5)生成并输出最终的器件结构图。

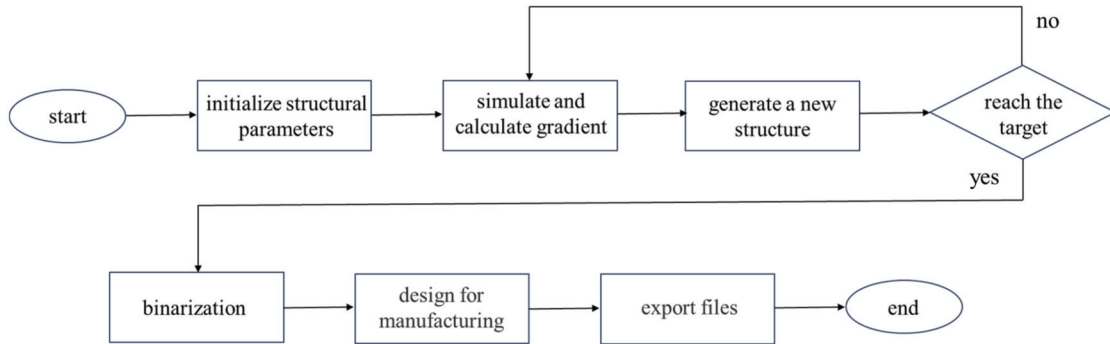


图3 逆向设计的流程图

Fig. 3 Flowchart diagram of inverse design

采用逆向设计算法和FDTD对器件进行设计和仿真,首先确定设计区域和品质因数。品质因数为两个输出端口接收到对应模式的透射率之和,在输入 TE_1 时记录右下矩形波导接收 TE_1 模式的透射率,在输入 TE_0 时记录右上矩形波导接收 TE_0 模式的透射率,通过FDTD仿真方法计算目标模式的透射率作为评估器件性能的重要因素。FOM可表示为

$$F_{\text{OM}} = \frac{T_{\text{portO}_1\text{TE}_0}}{T_{\text{portI}\text{TE}_0}} + \frac{T_{\text{portO}_2\text{TE}_1}}{T_{\text{portI}\text{TE}_1}}, \quad (2)$$

式中: $T_{\text{portO}_1\text{TE}_0}$ 表示从端口I输入 TE_0 模式时,输出端口 O_1 输出 TE_0 模式的透射率; $T_{\text{portI}\text{TE}_0}$ 表示在端口Port I输入 TE_0 时的透射率; $T_{\text{portO}_2\text{TE}_1}$ 表示从端口I输入 TE_1 模式时,输出端口 O_2 输出 TE_1 模式的透射率; $T_{\text{portI}\text{TE}_1}$ 表示在端口Port I输入 TE_1 时的透射率。优化后的结构如图2(b)所示。迭代次数与FOM的线性图如图4(a)所

示,经过148次的迭代后,分模器的FOM由最初的1.1优化为1.87。图4(b)描述了由于介电常数的轻微扰动引起的梯度场。介电常数的变化代表了器件结构的变化方向。优化后,介电常数如图4(c)所示,通过介电常数的分布可以得到不规则的结构图。图4(d)则显示了最后结构的电场的前向传输分布图。

优化设计后分模器的 TE_0 模式和 TE_1 模式的磁场分布分别如图5(a)和5(b)所示。在端口I处输入 TE_0 模式,光可以直接沿着波导传播而不改变模式阶数,并在端口 O_1 处输出。在端口I处输入 TE_1 模式, TE_1 模式经由锥形波导被挤压到功能区中。硅和二氧化硅在功能区的分布扰动了 TE_1 模式。因此 TE_1 模式可以直接穿过功能区,且模式没有变化。最后, TE_1 模式由锥形波导引导并从端口 O_2 输出。

基于3D-FV-FDTD方法计算得到端口I处输入 TE_0 模式和 TE_1 模式时的透射光谱,如图6所示。在

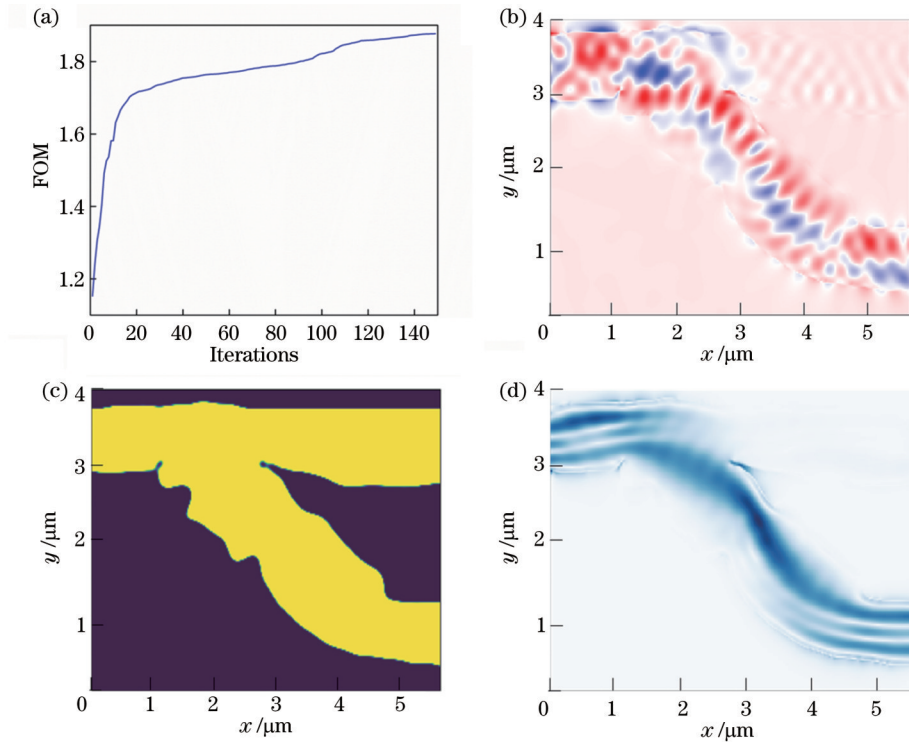


图 4 逆设计的过程图。(a)迭代次数与品质因子的线性图;(b)梯度场的扰动图;(c)介电常数分布;(d)结构器件内的正向场分布
Fig. 4 Process diagram of inverse design. (a) FOM varying with iteration number; (b) perturbation of gradient field; (c) permittivity distribution; (d) forward direction field distribution within device

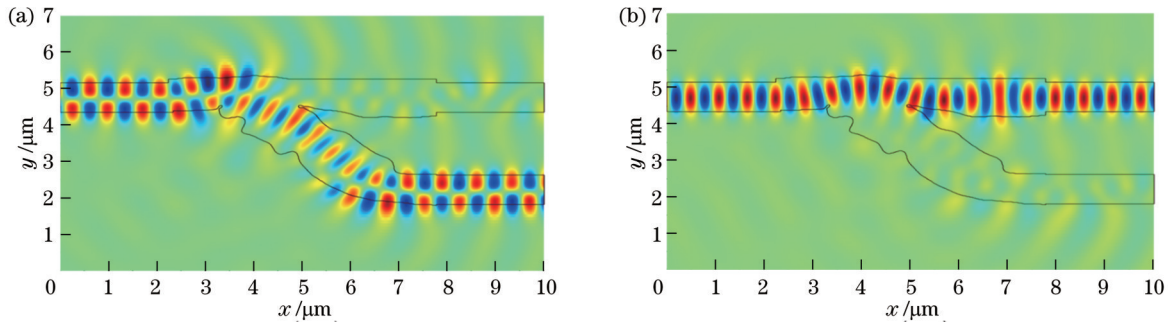


图 5 在端口 I 输入中心波长为 1550 nm 的 TE_0 模式和 TE_1 模式的 H_y 磁场分布。(a) TE_1 模式;(b) TE_0 模式
Fig. 5 H_y fields of TE_1 mode and TE_0 mode input in port I at wavelength of 1550 nm. (a) TE_1 mode; (b) TE_0 mode

1550 nm 的工作波长下,当输入 TE_1 模式时,该结构的插入损耗和串扰分别为 0.48 dB 和 -22.45 dB。对于输入 TE_0 模式,在 1550 nm 处,插入损耗和串扰分别为 0.14 dB 和 -23.8 dB。在 $1.5 \mu\text{m}$ 至 $1.65 \mu\text{m}$ 的波长范围内,输入 TE_1 模式的插入损耗和串扰分别低于 1.16 dB 和 -15.26 dB,输入 TE_0 模式的插入损耗和串扰分别低于 0.44 dB 和 -15.64 dB。因此可以得出,逆向设计的分模器可以提供超紧凑的结构、低串扰和相对较宽的带宽。

考虑到制造误差等因素的影响,分析器件的整体制造误差对性能的影响。分析了误差范围为 ± 30 nm 情况下的器件性能表现,并使用 3D-FV-FDTD 方法进行验证。误差分析过程中,按照施加的误差大小同时改变功能区内所有的结构尺寸。为体现误差对功能区

的影响,保持输入和输出波导尺寸不变。如图 7 所示:在中心波长处, TE_1 模式的插入损耗低于 1.59 dB,所对应的串扰低于 -10.45 dB;输入 TE_0 模式时,插入损耗低于 0.87 dB,所对应的串扰低于 -14.29 dB。当设计误差在 ± 30 nm 的范围内,在 1550 nm 的工作波长下,虽然分模器的插入损耗和串扰都有所下降,但都仍接近设计目标。这表明所设计的分模器在出现制造公差的情况下仍然具有较稳定的性能。

误差为 -15 nm 的结构透射光谱如图 8 所示。在 1550 nm 的工作波长下:当输入 TE_1 模式时,该结构的插入损耗和串扰分别为 0.79 dB 和 -18.37 dB;当输入 TE_0 模式时,插入损耗和串扰分别为 0.36 dB 和 -18.55 dB。在 $1.5 \mu\text{m}$ 至 $1.65 \mu\text{m}$ 的波长范围内:输入 TE_1 模式的插入损耗和串扰分别低于 2.04 dB 和

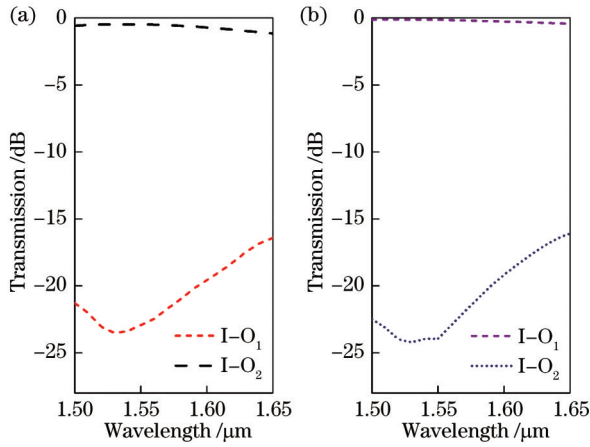


图 6 优化后的分模器传输谱。(a)输入 TE_1 模式;(b)输入 TE_0 模式

Fig. 6 Optimized transmittance spectra. (a) Inputting TE_1 mode; (b) inputting TE_0 mode

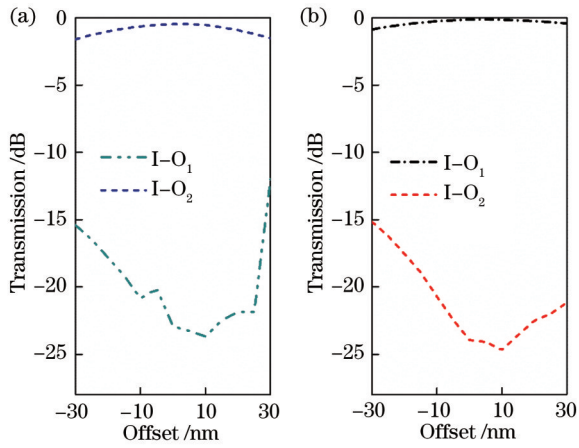


图 7 不同设计误差下的传输谱。(a)输入 TE_1 模式;(b)输入 TE_0 模式

Fig. 7 Transmittance spectra for different design error. (a) Inputting TE_1 mode; (b) inputting TE_0 mode

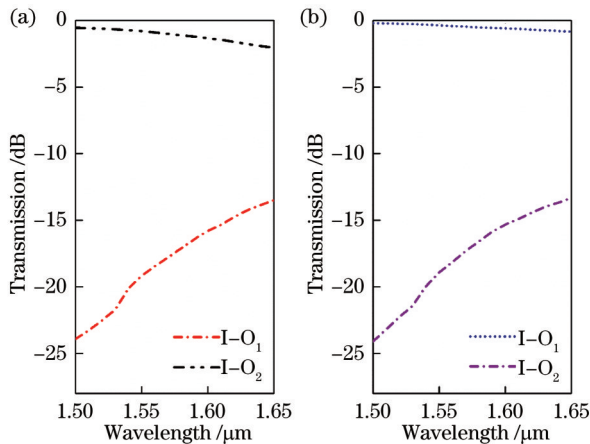


图 8 误差为 -15 nm 的器件传输谱。(a)输入 TE_1 模式;(b)输入 TE_0 模式

Fig. 8 Transmittance spectra for error of -15 nm. (a) Inputting TE_1 mode; (b) inputting TE_0 mode

-13.49 dB;输入 TE_0 模式的插入损耗和串扰分别低于 0.84 dB 和 -13.31 dB。

误差为 15 nm 的结构透射光谱如图 9 所示。在 1550 nm 的工作波长:当输入 TE_1 模式时,该结构的插入损耗和串扰分别为 0.71 dB 和 -21.75 dB;对于输入 TE_0 模式,插入损耗和串扰分别为 0.19 dB 和 -23.36 dB。在 $1.5 \mu\text{m}$ 至 $1.65 \mu\text{m}$ 的波长范围内:输入 TE_1 模式的插入损耗和串扰分别低于 1.23 dB 和 -18.7 dB;输入 TE_0 模式的插入损耗和串扰分别低于 0.29 dB 和 -20.28 dB。在 1550 nm 的波长下,传输 TE_0 和 TE_1 的插入损耗分别为 0.19 dB 和 0.71 dB。在 1550 nm 处,相应的模间串扰分别为 -23.36 dB 和 -21.75 dB。在制造公差为 -15 nm 和 15 nm 的情况下,虽然插入损耗和串扰相比于公差为 0 时有所降低,但这两种分模器仍然能保持较大的工作带宽,且性能仍然接近设计目标,这表明即使在制造公差较大的情况下,所设计器件的性能仍能满足设计目标,具有较高的鲁棒性。

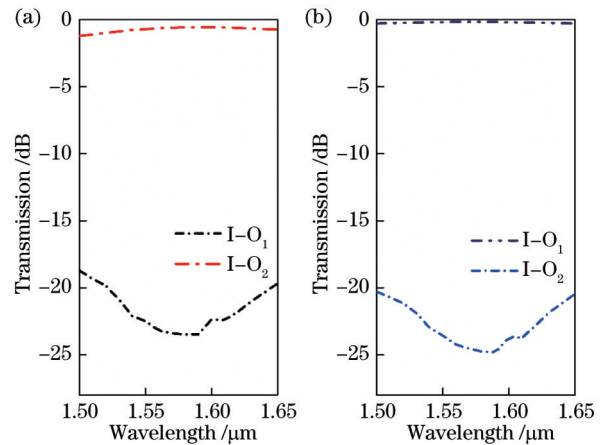


图 9 误差为 15 nm 的器件透射谱。(a)输入 TE_1 模式;(b)输入 TE_0 模式

Fig. 9 Transmittance spectra for error of 15 nm. (a) Inputting TE_1 mode; (b) inputting TE_0 mode

表 1 展示了近 5 年报道的硅基分模器的结构和性能。相比于基于 SDC 的分模器结构,所设计的结构将分模器的尺寸提升了一个数量级,并且具有更低的传输损耗和更大的制备容差。与 BSWG 结构相比,所提结构的尺寸同样提升了一个数量级,而且在传输损耗、模间串扰、制备容差等性能方面都有很大的提升。相比于同样采用逆向设计方法设计的分模器结构,本文设计结构的工作带宽、模间串扰、插入损耗和制备容差等性能都更优。

4 结 论

基于伴随法的逆向设计方法对分模器进行优化设计,实现了 $1500\sim 1650$ nm 的工作波长内分模器的高性能工作,所设计的分模器的插入损耗和模间串扰都

表 1 所设计的分模器与其他文献中的器件的性能对比
Table 1 Performance comparison of proposed splitter and reported mode splitters

Footprint/ ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	Bandwidth / nm	Crosstalk /dB		Insertion loss /dB		Fabrication tolerance / nm	Design method	Ref. No(type)
		Mode I	Mode II	Mode I	Mode II			
270 \times 4	35	-16.2	-27.3	0.0154	0.045	5	SDC	[6](simulation)
40 \times 12	430	-19.6	-27.8	0.26	1.47	20	BSWG	[7](simulation)
106 \times 20	84	-21.8	-22.1	0.99	1.8	—	BSWG	[8](experiment)
5 \times 3	95	-18.06	-21.09	1.13	0.54	20	DBS	[9](experiment)
5.5 \times 4	150	-23.8	-22.45	0.14	0.48	30	Adjoint method	Our work

达到了较优水平。分模器的设计最多只需要经过 148 次迭代过程即可达到目标值,且每次迭代过程只需要进行两次 FDTD 仿真即可实现。仿真结果表明,在中心波长 1550 nm 处,TE₀模式输入下插入损耗和码间串扰分别低于 0.14 dB、23.8 dB,TE₁模式输入下插入损耗和码间串扰分别低于 0.48 dB、-22.45 dB,因此所设计的分模器的插入损耗和码间串扰均满足设计目标。考虑到制作工艺等因素的影响会在制作器件时产生制造公差,针对分模器整体进行了误差情况的仿真分析,当分模器的整体误差为 ± 15 nm 时,两种分模器在带宽范围内的分模效率仍能达到设计目标,表现出较为稳定的性能。本文所设计的分模器具有 5.5 $\mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ 的小尺寸、大工作带宽。该设计方法还可以推广到模式(解)复用器、模式转换器、模式选择开关、多模交叉电路、模式滤波器的设计中,在光通信系统和大规模光子集成电路中有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Ellis A D, Zhao J, Cotter D. Approaching the non-linear Shannon limit[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 423-433.
- [2] Morizur J F, Nicholls L, Jian P, et al. Programmable unitary spatial mode manipulation[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(11): 2524-2531.
- [3] Chang S H, Chung H S, Fontaine N K, et al. Mode division multiplexed optical transmission enabled by all-fiber mode multiplexer[J]. Optics Express, 2014, 22(12): 14229-14236.
- [4] Hanzawa N, Saitoh K, Sakamoto T, et al. Two-mode PLC-based mode multi/demultiplexer for mode and wavelength division multiplexed transmission[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 25752-25760.
- [5] 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.
- [6] Hada S L, Rahman B M A. Design of compact mode splitters using identical coupled waveguides with slots[J]. OSA Continuum, 2019, 2(3): 848-861.
- [7] 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.
- [8] Jiang W F, Xu S Y. Experimental realization of broadband mode-splitting using bridged subwavelength grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(19): 6239-6245.
- [9] Mao S Q, Hu J Z, Zhang H Y, et al. Optimal design and experimental demonstration of a silicon-based ultra-compact mode splitter[J]. Optics Letters, 2022, 47(16): 4167-4170.
- [10] Ma Y X, Zhao Y, Shi Y C, et al. Silicon add-drop multiplexer based on π phase-shifted antisymmetric Bragg grating[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2021, 57(4): 8400308.
- [11] Guo Z Z, Wu S B, Xiao J B. Compact and flexible mode-order converter based on mode transitions composed of asymmetric tapers and subwavelength gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(17): 5563-5572.
- [12] Ahmed K T, Chan H P, Li B H. Scalable selective high order mode pass filter architecture with asymmetric directional couplers[J]. Optics Express, 2020, 28(19): 28465-28478.
- [13] Li Q, Hao X, Zhao Y L. Universal design of ultra-broadband and ultra-compact high order mode pass filters based on enhanced absorption in ultrathin metal layers[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 14(1): 2212608.
- [14] Priti R B, Bazargani H P, Xiong Y L, et al. Mode selecting switch using multimode interference for on-chip optical interconnects[J]. Optics Letters, 2017, 42(20): 4131-4134.
- [15] Priti R B, Liboiron-Ladouceur O. Reconfigurable and scalable multimode silicon photonics switch for energy-efficient mode-division-multiplexing systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(15): 3851-3860.
- [16] Wu H, Li C L, Song L J, et al. Ultra-sharp multimode waveguide bends with subwavelength gratings[J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(2): 1800119.
- [17] Sun C L, Yu Y, Chen G Y, et al. Ultra-compact bent multimode silicon waveguide with ultralow inter-mode crosstalk[J]. Optics Letters, 2017, 42(15): 3004-3007.
- [18] Xu Y H, Ma H S, Xie T, et al. Ultra-compact power splitters with low loss in arbitrary direction based on inverse design method[J]. Photonics, 2021, 8(11): 516.
- [19] Shen B, Wang P, Polson R, et al. Integrated metamaterials for efficient and compact free-space-to-waveguide coupling[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 27175-27182.
- [20] 韩丁, 马子寅, 王俊林, 等. 基于粒子群算法的超材料吸波体传感器逆向设计[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 1714001.
Han D, Ma Z Y, Wang J L, et al. Inverse design of metamaterial absorber sensor based on particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 1714001.
- [21] 李映函, 吕杰, 江琳, 等. 基于混合粒子群算法的光子器件逆向设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1113001.
Li Y H, Lü J, Jiang L, et al. Reverse design of photonic devices based on hybrid particle swarm optimization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1113001.
- [22] Ju X W, Zhu G F, Huang F, et al. Reverse design of pixel-type terahertz band-pass filters[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 957-965.
- [23] Zhang C, Kang G G, Wang J, et al. Inverse design of soliton microcomb based on genetic algorithm and deep learning[J]. Optics Express, 2022, 30(25): 44395-44407.
- [24] Vercrucysse D, Sapra N V, Su L, et al. Analytical level set fabrication constraints for inverse design[J]. Scientific Reports,

- 2019, 9: 8999.
- [25] Xu J F, Liu Y J, Guo X Y, et al. Inverse design of a dual-mode 3-dB optical power splitter with a 445 nm bandwidth[J]. Optics Express, 2022, 30(15): 26266-26274.
- [26] Shen B, Wang P, Polson R, et al. An integrated-nanophotonics polarization beam splitter with $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ footprint[J]. Nature Photonics, 2015, 9(6): 378-382.
- [27] Xu K, Liu L, Wen X, et al. Integrated photonic power divider with arbitrary power ratios[J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 855-858.
- [28] Piggott A Y, Lu J, Babinec T M, et al. Inverse design and implementation of a wavelength demultiplexing grating coupler[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 7210.
- [29] Wang K Y, Ren X S, Chang W J, et al. Inverse design of digital nanophotonic devices using the adjoint method[J]. Photonics Research, 2020, 8(4): 528-533.

Silicon Mode Splitter Obtained by Inverse Design Based on Adjoint Method

Chen Tao, Mao Siqiang, Wan Hongdan, Wang Jingli*, Jiang Weifeng**

College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract

Objective Space division multiplexing (SDM) technology has emerged to break through the transportation capacity limitations. As an important technical route to achieve SDM, mode division multiplexing (MDM) technology features high information density, low transmission cost, and low energy consumption. According to our investigation and research findings, there are many in-depth studies and reports on the implementation of various components in MDM systems. However, there is little research on the mode splitter. In MDM systems, mode-sensitive components have selectivity for input and output waveguide modes, and mode splitting based on a traditional mode demultiplexer is difficult to meet the requirements. Therefore, employing a mode splitter that does not change the mode order is an important method to improve the flexibility of MDM systems. The silicon-based mode splitter is a key device for constructing an on-chip MDM system to realize flexible routing of different modes. We propose a compact silicon-based mode splitter based on an adjoint optimization design algorithm and adopt the 3D full-vectorial finite-difference time domain (3D-FV-FDTD) for simulation verification. The simulated results show that the performance of the designed mode splitter meets the design targets, such as small size, low insertion loss and crosstalk, and large bandwidth. Thus the splitter can be applied to on-chip MDM systems, providing a viable device for high-capacity on-chip optical communications and optical interconnects.

Methods Traditional design depends on the researchers' experience to achieve design goals by optimizing structure parameters. By contrast, the inverse design method is a goal-oriented approach that utilizes inverse algorithms to design various structures, which could reduce design complexity and improve design efficiency. We leverage an inverse design method to optimize the structure. The whole design process is divided into five steps as shown in Fig. 3, including initializing structure parameters, simulating and calculating gradient, binarization, designing for manufacturing, and exporting files. Step 1 is determining the design target and initializing structure parameters. The designed mode splitter is composed of three rectangular waveguides and a functional region (Fig. 1). Step 2 is simulating and calculating gradients. The adjoint algorithm can calculate the derivatives of all points in the space and requires only two simulation processes in each iteration. The derivatives of all points could fine-tune the structure. Step 3 is forcing the material index to values at the upper and lower bounds to create a structure that can be defined by etching. Step 4 is designing for manufacturing. The minimum feature size in the design is constrained based on the target photolithography process. The final step is exporting the files, where the mode splitter based on inverse design can separate the TE_0 mode and TE_1 mode, and the characteristics such as crosstalk, insertion loss, and fabrication tolerance are analyzed by the 3D-FV-FDTD method.

Results and Discussions Simulation results show that the optimized mode splitter can efficiently separate the TE_0 mode and TE_1 mode. When the TE_0 mode is input, the insertion loss and crosstalk at the center wavelength are calculated to be 0.14 dB and -23.8 dB respectively, and when the TE_1 mode is input, the insertion loss and crosstalk are 0.48 dB and -22.45 dB respectively (Fig. 6). The operating bandwidth covers 150 nm, and the insertion losses of TE_0 and TE_1 modes are lower than 0.44 dB and 1.16 dB, respectively. Additionally, we analyze 13 mode splitters with fabrication errors from -30 nm to 30 nm. At the center wavelength, when the TE_0 mode is input, the insertion loss and crosstalk at the center wavelength are lower than 0.87 dB and -14.29 dB respectively, and when the TE_1 mode is input, the insertion loss and crosstalk are lower than 1.59 dB and -10.45 dB respectively (Fig. 6). The ± 15 nm fabrication tolerance is analyzed based on the 3D-FV-FDTD method. The insertion losses of the two modes are lower than 0.79 dB, with the

crosstalk lower than -18.37 dB (Fig. 7).

Conclusions We propose and optimally design an on-chip silicon mode splitter based on the inverse algorithm incorporating an adjoint algorithm. The high performances of insertion loss and mode crosstalk are achieved within the operating wavelength from 1500 nm to 1650 nm. The optimized mode splitter can be obtained within 148 iterations, in which each iteration only requires two FDTD simulation steps. The simulation results show that at the center wavelength, the insertion loss and mode crosstalk of the TE_0 mode are less than 0.14 dB and -23.8 dB respectively, and those of the TE_1 mode are less than 0.48 dB and -22.45 dB respectively. The fabrication tolerances of the optimized mode splitter are also investigated with the fabrication errors of ± 30 nm. A competitive performance can also be kept with an overall error of ± 15 nm. A compact footprint of only $5.5 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ and a wide operating bandwidth are realized. Our mode splitter could be applied to on-chip MDM systems, providing a viable device for high-capacity on-chip optical communications and optical interconnects.

Key words integrated optics; silicon optoelectronics; silicon mode splitter; inverse design; adjoint method