

基于边界逆向优化算法的任意分光比耦合器设计

廖俊鹏¹, 田野^{1*}, 杨子荣¹, 康哲², 郑紫薇³, 金庆辉¹, 张晓伟¹¹宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;²浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310058;³浙江万里学院数字产业研究院, 浙江 宁波 315100

摘要 光子集成技术的高速发展对功能器件的设计效率提出了较高的要求。逆向设计利用优化算法实现器件结构的智能设计,从而可有效降低设计复杂度,提升设计效率。利用基于伴随法的逆向设计算法对硅平台上的光耦合器进行结构设计,通过优化器件的边界形状,实现了高效率、任意分光比输出。仿真验证了三种 1×2 光耦合器的性能,其分光比分别为 1:2、1:4 和 1:8 (3 dB、6 dB 和 9 dB)。器件的设计尺寸仅为 $4 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$,且可以通过一步刻蚀完成。在 1550 nm 波长处,所设计的耦合器均可达到设计目标,且最大插入损耗仅有 0.12 dB。在 1500~1600 nm 波长范围内,三种耦合器的分光比相对于设计目标的误差均保持在 ± 1 dB 以内,并且三种耦合器的插入损耗均低于 0.28 dB。针对制作工艺误差等问题,对器件的制作公差进行了分析。结果表明,当耦合器的整体宽度变化 ± 20 nm 时,三种耦合器在 1550 nm 波长处的分光比的误差仍能保持在 ± 1 dB 以内。此外,制造了分光比为 1:2 的耦合器,且实验结果符合设计目标。

关键词 集成光学; 全光器件; 耦合器; 逆向设计

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221241

1 引言

光子集成技术的高速发展催生了众多热点研究领域,如光学互连^[1-2]、片上光测量^[3-4]和光学计算^[5-6]等。基于绝缘体上硅(SOI)的平台因其高集成密度和与互补金属氧化物半导体器件(CMOS)工艺兼容等特性而成为实现光子集成环路的理想平台,备受科研界和产业界的关注。在基于该平台的诸多集成光学器件中,光耦合器是一种最基础和最重要的元器件,可用于实现光信号路由、功率分配和耦合控制等^[7-9]。目前,大部分的光耦合器被设计为均匀分光。然而,灵活的功率分配方式可以有效减少系统复杂度,并促使光子环路满足更多特定需求,如功率分配^[10]、无源光网络^[11]和信号监测^[12]等。因此,研究具有任意分光比的光耦合器设计具有重要意义。目前,传统的设计方案主要有:1)基于多模干涉耦合器(MMI)的结构,如 Deng 等^[13]基于特殊设计的非对称 MMI 结构实现了 1×2 光耦合器的任意分光比设计,而 Tian 等^[14]通过级联多个 MMI 也实现了任意分光比;2)基于定向耦合器(DC)的结构,如 Zhao 等^[15]利用具有亚波长结构的定向耦合器设计了具有任意分光比的 1×2 耦合器;3)基于 Y 分支的结构,如 Lin 等^[16]利用非对称的 Y 分支结构实现了低

损耗的任意分光比光耦合器。以上设计方案往往依赖于设计人员的经验,需要在结构设计和参数优化上耗费大量时间。此外,当设计目标(分光比)发生变化时,往往需要针对结构重新进行设计和优化,大量的重复性工作会导致设计效率较低。

随着计算技术的发展,智能逆向设计方法被广泛应用于光子器件的结构设计中,以减少器件的设计成本,提高设计效率。逆向设计是从设计目标出发,通过智能算法反向求解所需器件结构的方法。目前已有多个研究工作通过不同的逆向设计方法得到了光耦合器,按照算法分类可分为直接二进制搜索法(DBS)^[17-18]、目标优先法(objective-first)^[19]和伴随法^[20-21]等,其中:DBS 是一种伪随机的暴力式搜索算法,会让计算的迭代次数变多,从而增加了器件设计的耗时,降低了设计效率;目标优先法对计算机的性能要求较高,并且设计的器件在实际刻蚀制备时还会面临着因图形特征尺寸较小而无法实现的难题,对制作工艺的要求较高;伴随法被广泛应用来设计空间较大的结构,每次迭代只需进行两次模拟计算,能够以更少的模拟次数和迭代次数来达到设计需求^[22],从而提高了器件的设计效率,并且该方法对计算机的性能要求也相对较低。按照算法优化后的器件结构分类,器件可

收稿日期: 2022-06-02; 修回日期: 2022-06-21; 录用日期: 2022-07-04; 网络首发日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(62105167, 62075188, 61974078)、浙江省自然科学基金(LQ22F050008, LY21F050007, LY21F040002)、江苏省重点研发计划(BE2021082)、宁波市自然科学基金(2021J074, 2021J059)

通信作者: *tianye@nbu.edu.cn

分为内部打孔型^[23-26]和边界优化型^[27-28],其中:内部打孔型的器件结构中有大量的孔洞,光在器件中传输时,这些孔洞容易引起光的反射从而导致传输损耗相对较大;边界优化型的器件结构主要是对器件的边界进行调整,结构中不存在孔洞,故损耗相对较小。

综上所述,本文利用基于伴随法的逆向设计方法,通过优化器件的边界形状,在 SOI 平台上实现了具有任意分光比的 1×2 光耦合器的高效设计。本文展示了所设计的分光比分别为 1:2、1:4 和 1:8 (3 dB、6 dB 和 9 dB) 的三种光耦合器。仿真结果表明,在 1500~1600 nm 波长范围内,三种耦合器的分光比与设计目标的误差均在 -1 dB~ 1 dB 范围内,且此波段范围内三个器件的最大插入损耗仅有 0.28 dB。本文还对制作误差的影响进行了分析,结果表明在器件的整体宽度变化 ± 20 nm 时,三种耦合器在 1550 nm 波长处的分光比依旧能满足设计目标,证明该类器件结构对制作

误差有较高的鲁棒性。此外,对分光比为 1:2 的耦合器进行了制作,实验测试得到其工作带宽为 65 nm、插入损耗为 0.9 dB。

2 基本原理

2.1 基于伴随法的边界优化原理

伴随法能够计算目标函数对整个空间中所有点的导数,且每次迭代只需要经历两次模拟过程,即一次正向模拟过程和一次逆向模拟过程^[29]。利用 1×2 耦合器的优化机理来说明伴随法的两次模拟过程,并利用两次模拟过程来说明边界优化的原理。在图 1 中,结构左侧为一个输入波导,中间为设计区域 Ω ,在 Ω 内耦合器直接连接输入波导和输出波导,耦合器材料是介电常数为 ϵ_{in} 的硅,耦合器周围的材料是介电常数为 ϵ_{out} 的二氧化硅。耦合器上下边界处插入若干个离散优化点 x ,结构右侧为两个输出波导。

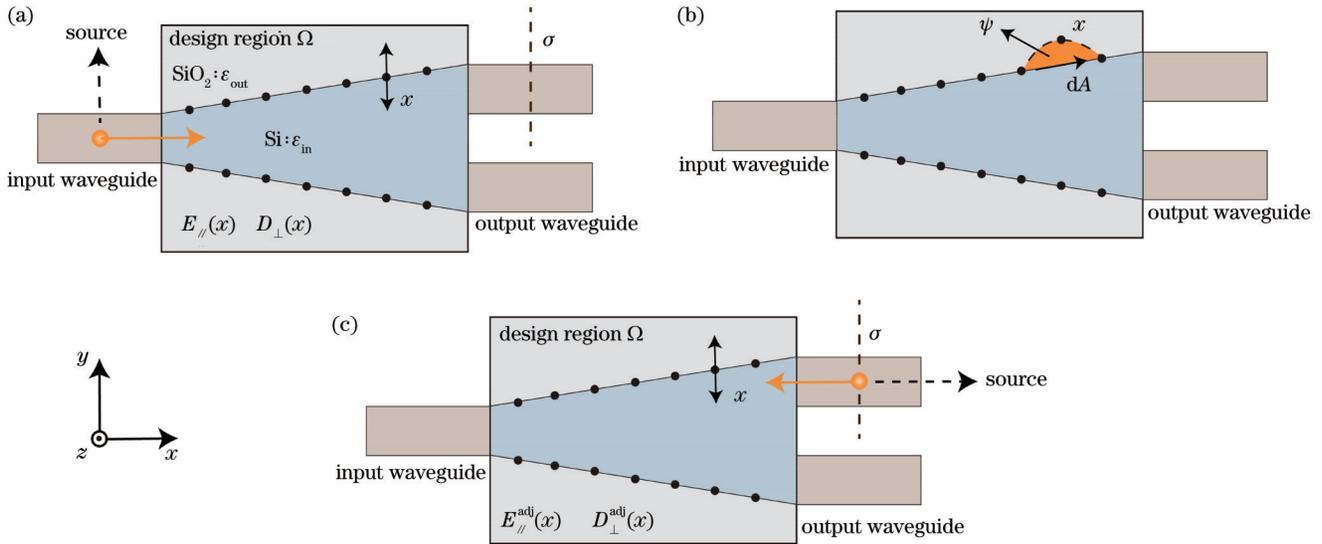


图 1 基于伴随法的边界优化原理图。(a)第一次正向传输模拟;(b)耦合器边界变化;(c)第二次逆向传输模拟

Fig. 1 Schematic diagram of boundary optimization based on adjoint method. (a) First forward transmission simulation; (b) boundary change of coupler; (c) second inverse transmission simulation

横向电场基模 (TE_0) 是硅基集成光子环路中最重要也是最基础的模式之一。因此,为了设计光耦合器的分光比,将用于逆向设计的品质因数 (FOM) 定义为传输到输出波导中的横向电场基模的归一化光功率。根据文献^[29], FOM 可表示为

$$V_{\text{FOM}} = \frac{1}{4} \frac{\left| \int_{\sigma} (E \times \bar{H}_m + \bar{E}_m \times H) \cdot d\sigma \right|^2}{\int_{\sigma} \text{Re}(E_m \times \bar{H}_m) \cdot d\sigma}, \quad (1)$$

式中: σ 是上方输出波导的横截面; E_m 和 H_m 是截面 σ 处 TE_0 模式的目标电场和目标磁场; E 和 H 是截面 σ 处 TE_0 模式的实际电场和实际磁场; \bar{E}_m 和 \bar{H}_m 是 E_m 和 H_m 的复共轭; $\text{Re}(\cdot)$ 为取实部函数。

在 Ω 中, 当调整优化点 x 在 y 轴方向上的位置时,

器件的边界形状发生变化, 在边界形状变化的区域 ψ 中介电常数发生改变, 最终引起 FOM 变化。伴随法能够根据麦克斯韦传播方程的解计算与几何参数相关的 FOM 的梯度^[30], 即

$$\frac{\Delta V_{\text{FOM}}}{\Delta d(x)} = 2\text{Re} \int (\epsilon_{in} - \epsilon_{out}) E_{\parallel}(x) \cdot E_{\parallel}^{\text{adj}}(x) + \left(\frac{1}{\epsilon_{out}} - \frac{1}{\epsilon_{in}} \right) D_{\perp}(x) \cdot D_{\perp}^{\text{adj}} dA, \quad (2)$$

式中: A 是初始形状边界; $\Delta d(x)$ 是边界优化点 x 在沿边界法线方向上的形变大小; $E_{\parallel}(x)$ 和 $D_{\perp}(x)$ 是光从输入波导上正向传输后 x 处的初始电场的切向分量和 x 处的初始电位移矢量的法向分量, 如图 1(a) 所示; $E_{\parallel}^{\text{adj}}(x)$ 和 $D_{\perp}^{\text{adj}}(x)$ 是将相同的光源放置在输出波导上逆向传输后 x 处的电场的切向分量和 x 处的电位移矢

量的法向分量,如图 1(c)所示。

因此,通过对光耦合器进行正反两次传输模拟,可以计算 FOM 相对于优化点 x 的梯度。利用 FOM 相对于优化点 x 的梯度并结合梯度下降法能以相对较快的收敛速度改变 x 在 y 轴方向上的位置,优化器件的边界形状,使得 FOM 最大化,即最大化传输到输出波导中的 TE_0 模式的光功率。

2.2 基于伴随法边界优化原理的任意分光比耦合器设计方法

基于伴随法的边界优化原理,逆向设计了具有任意分光比的 1×2 光耦合器,以分光比为 1:2 的耦合器为例说明器件的设计方法。器件的初始结构示意图如图 2(a)所示,输入波导和输出波导的宽度均为 500 nm ,输出波导之间的间隙为 $1 \mu\text{m}$ 。采用了尺寸为 $4 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 的设计区域,在设计区域内耦合器直接连接输入波导和输出波导。为了对器件边缘进行更精细的调节以达到更好的设计效果,并避免因优化点间隔较小而导致器件边界产生过于尖锐的结构,选择在耦合器上下边界处各插入 100 个离散边界优化点,通过调整其在 y 轴方向上的位置来进行边界形状的优化。FOM₁ 和 FOM₂ 分别表示传输到上下两个输出波导中

的 TE_0 模式的归一化功率。利用三维有限差分时域法 (3D FDTD) 能分析在某一波长下传输到波导中的任意模式的归一化功率,此时 FOM₁ 和 FOM₂ 可以表示为

$$V_{\text{FOM}_1} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |T_1^*(\lambda)| d\lambda - \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |T_1(\lambda) - T_1^*(\lambda)| d\lambda, \quad (3)$$

$$V_{\text{FOM}_2} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |T_2^*(\lambda)| d\lambda - \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |T_2(\lambda) - T_2^*(\lambda)| d\lambda, \quad (4)$$

式中: $T_1(\lambda)$ 和 $T_2(\lambda)$ 是利用 3D FDTD 算法分析得到的在波长 λ 处传输到上下波导中的 TE_0 模式的归一化功率; $T_1^*(\lambda)$ 和 $T_2^*(\lambda)$ 是在波长 λ 处传输到上下两个波导中的目标归一化功率; λ_1 和 λ_2 是设计的目标带宽范围的上下限。因为最终是利用梯度下降法最大化 FOM 值,所以 $|T(\lambda) - T^*(\lambda)|$ 会趋近于 0,通过设置目标归一化功率 $T^*(\lambda)$ 的值即可使得波导中 TE_0 模式的归一化功率 $T(\lambda)$ 趋近于设计目标。对于分光比为 1:2 的耦合器,可以设置上方输出波导的目标归一化功率为 $1/3$,下方输出波导的目标归一化功率为 $2/3$ 。

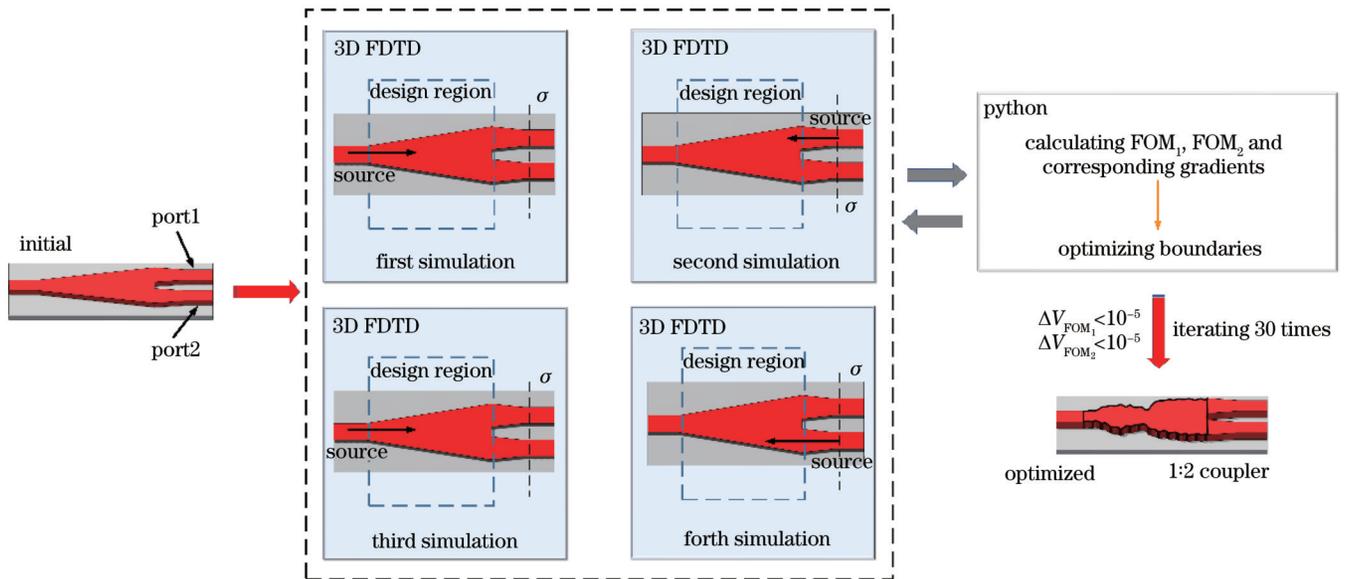


图 2 基于伴随边界优化原理设计任意分光比光耦合器的流程图

Fig. 2 Flow chart of designing optical coupler with arbitrary splitting ratio based on principle of adjoint boundary optimization

采用 3D FDTD 和 Python 联合的仿真环境对器件进行逆设计。利用 3D FDTD 方法对光耦合器进行正反两次传输仿真。FOM 的计算、相应梯度的计算和边界参数的优化在 Python 中进行。首先,将耦合器的目标带宽设为 $1500 \sim 1600 \text{ nm}$,上下两个输出波导的目标输出归一化功率分别为 $T_1^*(\lambda) = 1/3$ 和 $T_2^*(\lambda) = 2/3$ 。器件的具体设计流程如图 2 所示,针对上方输出波导,先进行一次正向传输仿真,再将光源设置在上方输出波导处进行一次逆向传输仿真,下方输出波导同理,故

共计进行了 4 次仿真。在 Python 中调用两次正向仿真的结果,计算传输到上下波导中的 TE_0 模式的归一化功率 $T_1(\lambda)$ 和 $T_2(\lambda)$,根据式 (3) 和式 (4) 计算 FOM₁ 和 FOM₂,并提取正向传输仿真得到的 $E(x)$ 和 $D(x)$,计算切向分量 $E_{//}(x)$ 和法向分量 $D_{\perp}(x)$ 。在 Python 中调用两次逆向传输仿真的结果,提取 $E^{\text{adi}}(x)$ 和 $D^{\text{adi}}(x)$,计算切向分量 $E_{//}^{\text{adi}}(x)$ 和法向分量 $D_{\perp}^{\text{adi}}(x)$,根据式 (2) 分别计算 FOM₁ 和 FOM₂ 相对于优化点 x 的梯度。利用计算得到的梯度结合梯度下降法调整优化

点 x 在 y 轴上的位置,使得 FOM_1 和 FOM_2 的值最大化。利用样条插值将优化后的点 x 拟合成曲线获得新的器件边界形状。重复运行并经过多次迭代,传输到上下输出波导中 TE_0 模式的归一化功率 $T_1(\lambda)$ 和 $T_2(\lambda)$ 均趋近于目标归一化功率 $T_1^*(\lambda)$ 和 $T_2^*(\lambda)$,即 $T_1(\lambda) \rightarrow 1/3, T_2(\lambda) \rightarrow 2/3$ 。当相邻两次迭代间的 FOM 变化值 ($\Delta V_{FOM_1}, \Delta V_{FOM_2}$) 小于 10^{-5} 或者迭代次数达到设定值时停止迭代,此时边界优化达到最优。根据上述过程所设计的 1:2 分光比的耦合器如图 2 右下

角图所示。

改变设定的上下两个输出波导的目标归一化功率 $T_1^*(\lambda)$ 和 $T_2^*(\lambda)$ 的值,利用相同的设计方法设计了分光比分别为 1:4 和 1:8 的两种光耦合器。在设计过程中,三种耦合器的 FOM 随迭代次数的变化趋势如图 3 所示。可以发现:经过约 5 次迭代后总的 FOM 均可达到 0.9;只经过 30 次左右的迭代, FOM_1 和 FOM_2 就均逼近于设计目标并收敛,实现了所需分光比耦合器的设计。图 4 展示了最终优化得到的三种耦合器的几何结构。

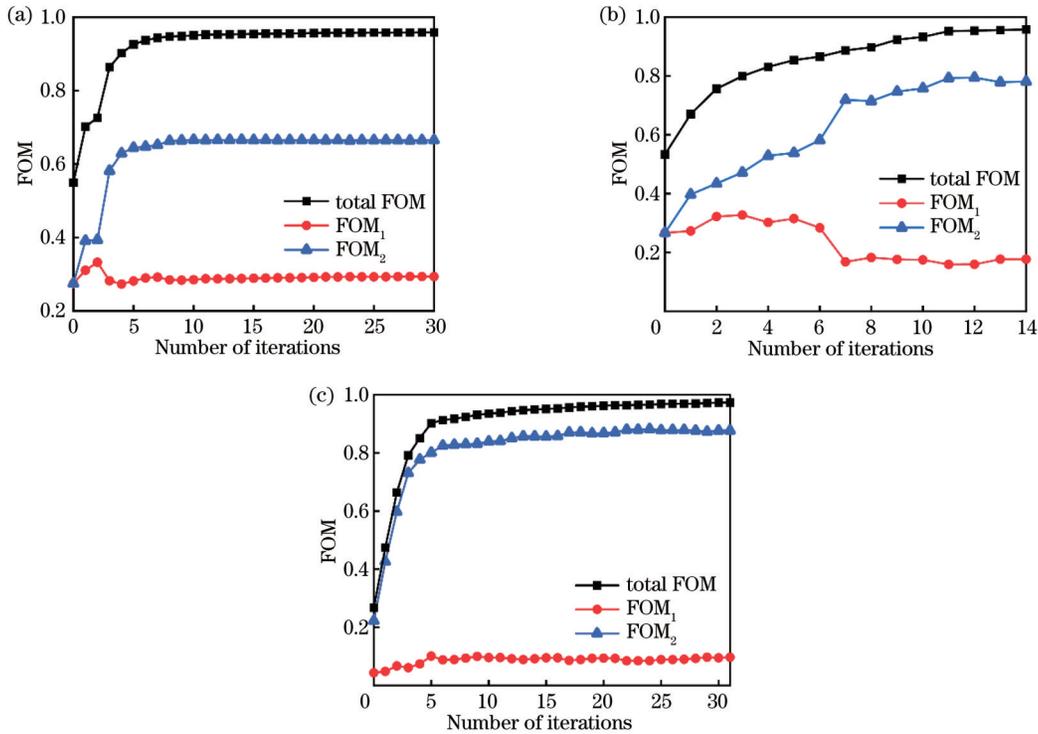


图 3 三种光耦合器的 FOM 演化曲线。(a) 1:2 耦合器; (b) 1:4 耦合器; (c) 1:8 耦合器

Fig. 3 FOM evolution curves of three couplers. (a) 1:2 coupler; (b) 1:4 coupler; (c) 1:8 coupler

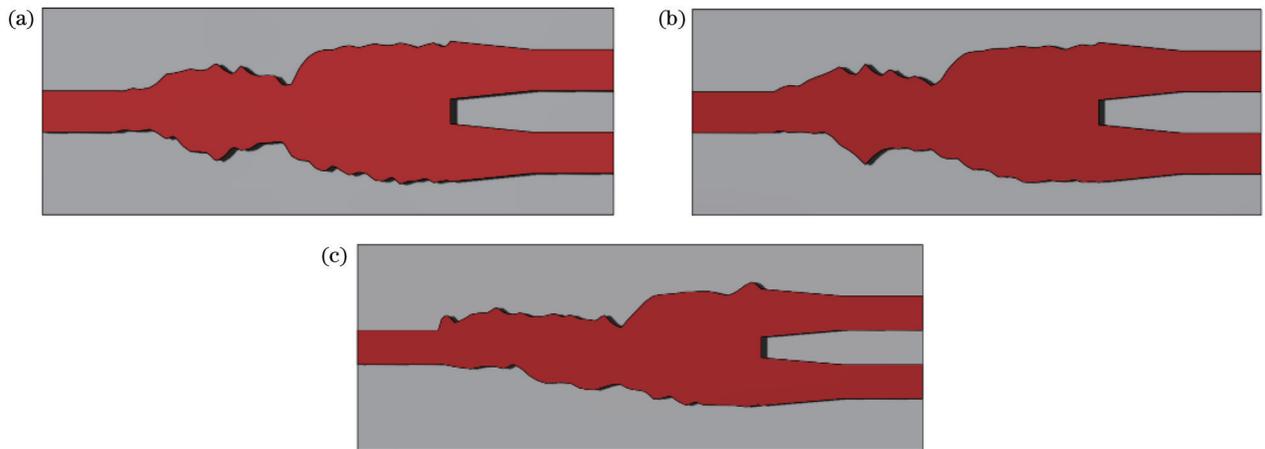


图 4 三种耦合器的几何结构示意图。(a) 1:2 耦合器; (b) 1:4 耦合器; (c) 1:8 耦合器

Fig. 4 Geometry of three couplers. (a) 1:2 coupler; (b) 1:4 coupler; (c) 1:8 coupler

3 仿真实验

3.1 器件的性能仿真

利用 3D FDTD 方法对设计的器件进行了仿真验证。图 5 给出了三种分光比耦合器在入射波长为 1550 nm 时的电场分布图, 1:2 耦合器上下两个端口的

归一化光输出功率分别为 0.327 (P_{upper}) 和 0.654 (P_{lower}), 1:4 耦合器上下两个端口的归一化光输出功率分别为 0.196 和 0.779, 1:8 耦合器上下两个端口的归一化光输出功率分别为 0.106 和 0.866, 实际分光比分别为 1:2、1:3.97 和 1:8.17, 均满足或接近理想分光比 1:2、1:4 和 1:8 (3 dB、6 dB 和 9 dB) 的设计目标。

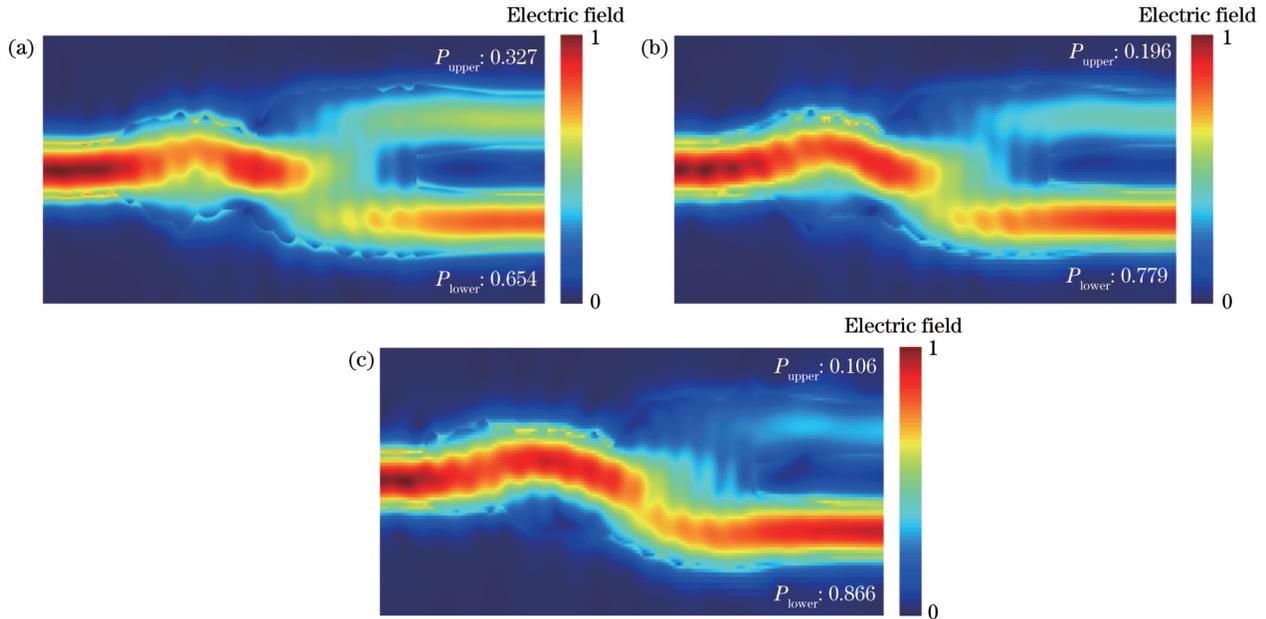


图 5 三种耦合器在波长 1550 nm 处电场分布图。(a) 1:2 耦合器; (b) 1:4 耦合器; (c) 1:8 耦合器

Fig. 5 Electric field distribution of three couplers at wavelength of 1550 nm. (a) 1:2 coupler; (b) 1:4 coupler; (c) 1:8 coupler

图 6 给出了三种耦合器在 1500~1600 nm 波长范围内各个输出端口的光传输效率曲线, 上下端口的归一化输出功率均在理想值(虚线)附近波动, 其中: 1:2 耦合器上下端口的归一化输出功率与理想值(0.333 和 0.667)的偏差仅在 0.033 内; 1:4 耦合器上下端口的归一化输出功率与理想值(0.200 和 0.800)的偏差均在 0.054 之内; 1:8 耦合器上下端口的归一化输出功率与理想值(0.111 和 0.889)的偏差均在 0.080 之内。此外, 三种耦合器的总归一化输出功率在该波段范围内均大于 0.93。

三种耦合器的分光比曲线和插入损耗曲线分别如图 7(a)、(b) 所示。在 1500~1600 nm 波长范围内, 三种耦合器的分光比分别在设计目标 3 dB、6 dB 和 9 dB (虚线) 附近波动, 其中 1:2 耦合器的分光比与 3 dB 的误差范围为 $-0.2 \text{ dB} \sim 0.5 \text{ dB}$, 1:4 耦合器的分光比与 6 dB 的误差范围为 $-0.5 \text{ dB} \sim 0.8 \text{ dB}$, 1:8 耦合器的分光比与 9 dB 的误差范围为 $-1.0 \text{ dB} \sim 0.8 \text{ dB}$ 。三种光耦合器在 1500~1600 nm 波长范围内, 分光比接近设计目标, 误差均保持在 $\pm 1 \text{ dB}$ 之内, 很好地满足了设计需求。此外, 三种耦合器的插入损耗在 1500~1600 nm 的带宽范围内均低于 0.28 dB, 中心波长 1550 nm 处的最大插入损耗仅有 0.12 dB, 整体表现优良。

3.2 容差仿真

考虑到制作工艺误差等影响, 分析器件的整体宽度变化 Δw 对器件性能的影响。将 1:2、1:4 和 1:8 分光比耦合器的整体宽度分别增加和减少 5、10、15、20 nm ($\Delta w = \pm 5, \pm 10, \pm 15, \pm 20 \text{ nm}$) 进行仿真分析, 仿真结果如图 8 所示。

可以看到: 当器件的整体宽度增加时, 在 1500~1600 nm 波长范围内器件的分光比减小; 当器件的整体宽度减小时, 在 1500~1600 nm 波长范围内器件的分光比增大。从图 8(a) 可以发现: 当 Δw 在 $-20 \sim 20 \text{ nm}$ 范围内时, 1:2 耦合器在中心波长 1550 nm 处的分光比都接近设计目标, 与 3 dB 的误差均在 $\pm 0.5 \text{ dB}$ 以内; 在 1500~1600 nm 波长范围内, 1:2 耦合器的分光比与 3 dB 的误差仍能保持在 $\pm 1.0 \text{ dB}$ 以内; 在器件整体宽度变化 20 nm 的情况下, 1:2 耦合器的分光比依旧能满足设计要求。从图 8(b) 可以发现: 当 Δw 在 $-20 \sim 20 \text{ nm}$ 范围内时, 1:4 耦合器在波长 1550 nm 处的分光比都接近设计目标, 与 6 dB 的误差均在 $\pm 0.8 \text{ dB}$ 以内; 在 1500~1600 nm 波长范围内, 1:4 耦合器的部分分光比与 6 dB 的误差较大, 分光比的误差难以保持在 $\pm 1.0 \text{ dB}$ 以内。从图 8(c) 可以发现: 当 Δw 在 $-20 \sim 20 \text{ nm}$ 范围内时, 1:8 耦合器在波长 1550 nm 处的分光比与设计目标 9 dB 的误差均在

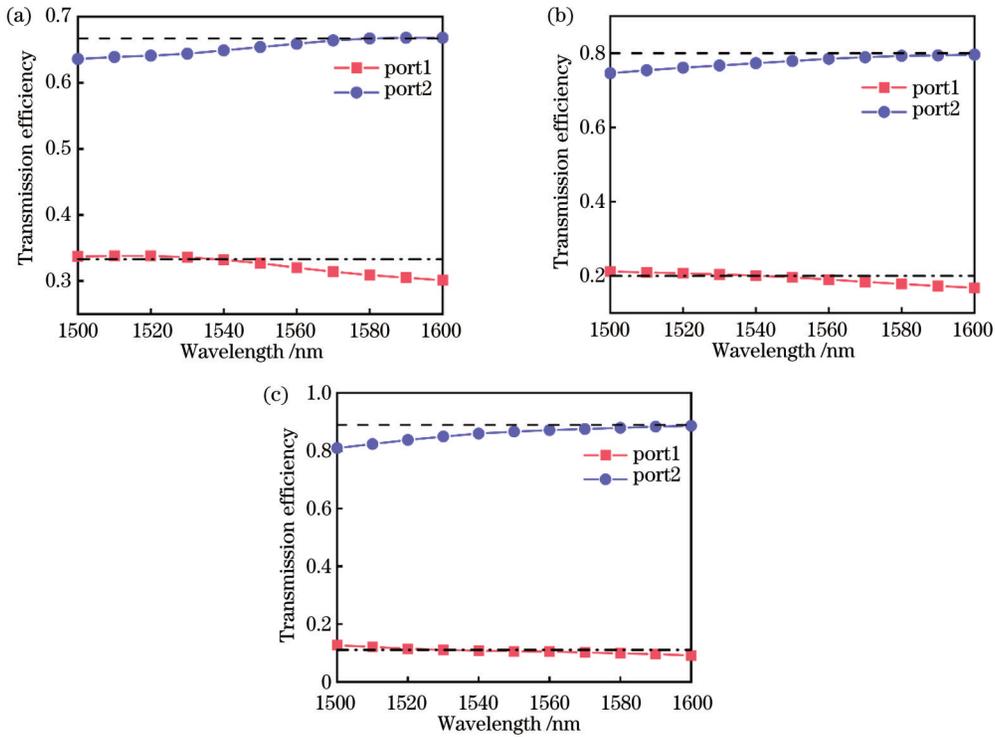


图 6 三种耦合器在 1500~1600 nm 波长范围内的传输效率曲线。(a) 1:2 耦合器; (b) 1:4 耦合器; (c) 1:8 耦合器
 Fig. 6 Transmission efficiency curves for three couplers at wavelength range of 1500-1600 nm. (a) 1:2 coupler; (b) 1:4 coupler; (c) 1:8 coupler

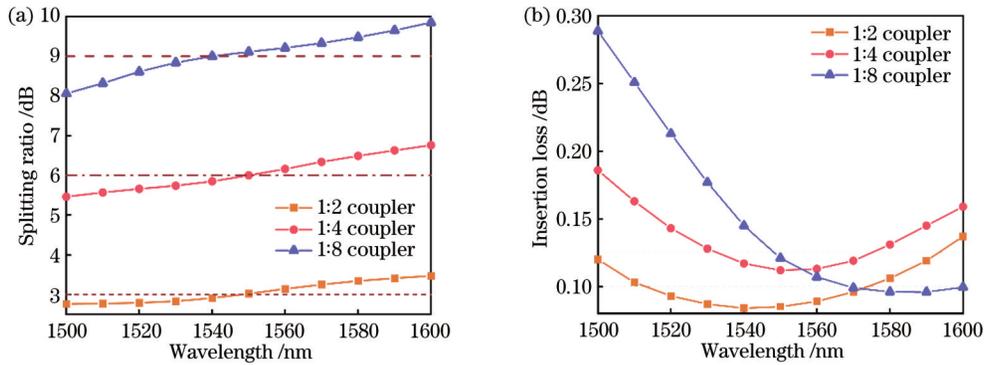


图 7 三种耦合器的分光比曲线和插入损耗曲线。(a) 分光比曲线; (b) 插入损耗曲线
 Fig. 7 Splitting ratio curves and insertion loss curves of three couplers. (a) Splitting ratio curve; (b) insertion loss curve

±0.9 dB 以内; 在 1500~1600 nm 波长范围内, 1:8 耦合器的分光比与 9 dB 的误差难以保持在 ±1.0 dB 以内。因此, 在整体宽度变化的情况下, 1:4 耦合器和 1:8 耦合器的工作带宽均有所减小。当 Δw 在 -20~20 nm 范围内时, 虽然 1:4 耦合器和 1:8 耦合器的工作带宽有所减小, 但是三种耦合器在 1550 nm 波长处的分光比仍接近于设计目标, 这表明设计的三种光耦合器在出现制作误差的情况下仍可以得到较稳定的性能, 为制作器件的性能符合预期提供了保障, 具有较高的鲁棒性。

4 器件制作与测试

4.1 性能测试

基于 1:2 光耦合器的仿真结果, 本文对 1:2 光耦合

器进行了制作和测试。器件的制作由中国科学院微电子研究所代工完成。该制作基于 200 nm 厚的 SOI 衬底 [二氧化硅掩埋 (BOX) 层的厚度为 2 μm , 顶层硅的厚度为 220 nm], 光刻精度为 180 nm。在器件的输入端和输出端, 采用了光栅垂直耦合器作为光路输入/输出通道, 每个端面的耦合损耗约为 5 dB。器件的扫描电子显微镜 (SEM) 图如图 9 所示。

受限于光源带宽和光栅耦合器对波长的敏感性, 将对器件的测试限定在 1500~1580 nm 波长范围内。经数据处理去除光栅耦合器对结果的影响, 所得两输出端口的透射曲线如图 10(a) 所示。由图 10(a) 可知, 在 1550~1565 nm 波长范围内, 耦合器两个输出端口的功率差接近 3 dB, 与设计目标 (虚线) 较吻合。然

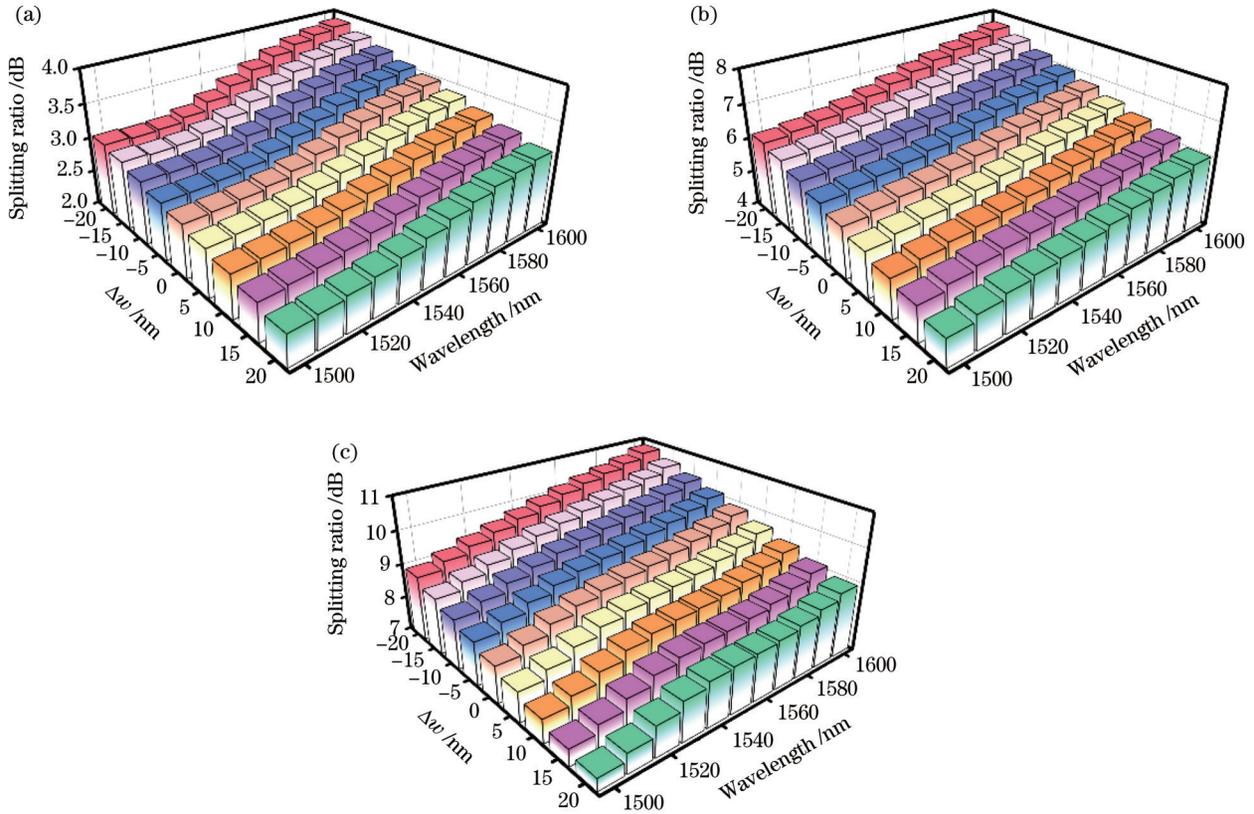


图 8 三种耦合器的制作误差对分光比的影响。(a) 1:2 耦合器; (b) 1:4 耦合器; (c) 1:8 耦合器

Fig. 8 Effect of fabrication errors of three couplers on splitting ratio. (a) 1:2 coupler; (b) 1:4 coupler; (c) 1:8 coupler

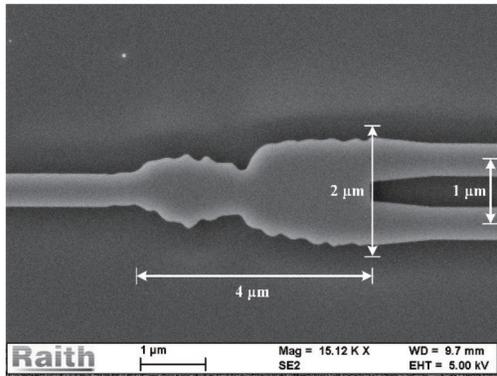


图 9 分光比为 1:2 的光耦合器的 SEM 图

Fig. 9 SEM image of optical coupler with splitting ratio of 1:2
而,在波长超过 1565 nm 的情况下,器件的性能会迅速

下降,部分原因是光栅耦合器的带宽限制引起该波段范围内的入射光强较弱(小于 -30 dBm)。此外,测试所用的激光器也有一定的带宽限制,在波长大于 1580 nm 以后,激光器的输出功率急剧下降,从而造成测试结果不准确。耦合器的插入损耗如图 10(b)所示。可以看到,在整个测试波段范围内耦合器的插入损耗均小于 0.9 dB。以上结果验证了基于伴随法的器件边界优化方法可以实现高性能、分光比可调的光耦合器逆设计。

4.2 性能对比

表 1 展示了近 5 年利用传统设计或逆设计方法设计的任意分光比 1×2 光耦合器。相比之下,本文利用基于伴随法的边界优化逆设计方法设计的 1×2 光耦合器可兼顾紧凑的器件尺寸和较大的工作带宽。

表 1 所设计的任意分光比耦合器与其他文献中器件的性能对比

Table 1 Performance comparison of designed coupler with arbitrary split ratio in this paper and devices in other literatures

Footprint / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	Bandwidth /nm		Insertion loss /dB		Designed method	Ref.
	Simulated	Measured	Simulated	Measured		
11.5×1.315	85	85	< 0.13	< 0.9	Directional coupler	[15]
1.4×2.3	100	37	< 0.36	< 0.5	Y-junction	[16]
10.5×3	40	40	< 0.30	< 0.8	MMI	[31]
3.6×3.6	30	30	< 0.90	< 0.9	Fast search method	[32]
4×2	100	65 or 80	< 0.28	< 0.9	Adjoint method	Our work

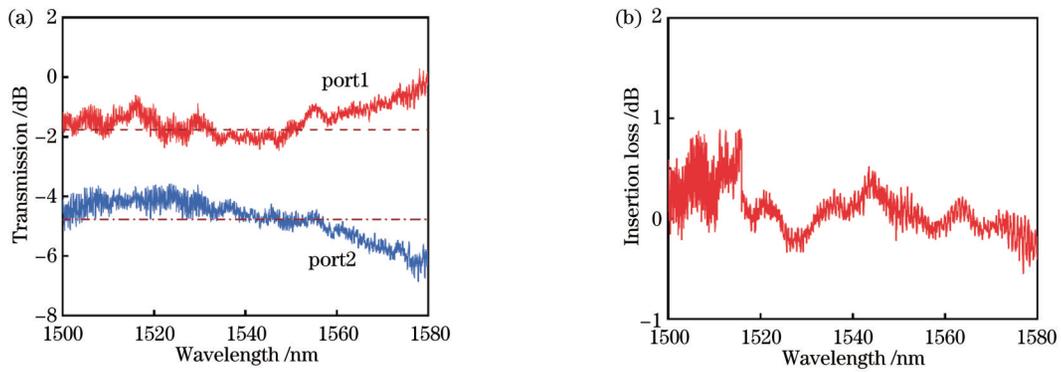


图 10 分光比为 1:2 的光耦合器的传输曲线和插入损耗曲线。(a) 传输曲线; (b) 插入损耗曲线

Fig. 10 Transmission curve and insertion loss curve of optical coupler with splitting ratio of 1:2. (a) Transmission curve; (b) insertion loss curve

5 结 论

利用基于伴随法的逆向设计方法对光耦合器的边界形状进行优化,实现了对任意分光比的 1×2 光耦合器的高效设计,展示了所设计的分光比分别为 1:2、1:4 和 1:8 (3 dB、6 dB 和 9 dB) 的三种光耦合器。三种耦合器的设计最多只需要经过 31 次迭代过程即可逼近理想值,且每次迭代过程只需进行两次仿真模拟就可实现。仿真结果表明,中心波长 1550 nm 处三种耦合器的分光比均满足设计目标,且损耗低于 0.12 dB。在 1500~1600 nm 波长范围内,1:2 耦合器、1:4 耦合器和 1:8 耦合器的分光比相对于设计目标的误差均保持在 ± 1 dB 以内。考虑到制作工艺等因素会在制作器件的实际参数中引入随机性误差,针对耦合器整体宽度变化的情况进行了仿真分析,当耦合器整体宽度变化为 ± 20 nm 时,三种耦合器在 1550 nm 波长处的分光比仍能接近设计目标,表现出较为稳定的性能。对分光比为 1:2 的耦合器进行了制作,实验测得在 1500~1565 nm 波长范围内,分光比满足设计目标,且插入损耗均小于 0.9 dB。最后,与已报道工作中的其他设计方法制作得到的 1×2 光耦合器进行了对比,所设计的器件可同时兼顾紧凑尺寸和较大的工作带宽。所提设计方法对低损耗、宽工作带宽的任意分光比耦合器的高效设计具有积极的指导作用,尤其在降低设计复杂度和提高设计效率方面更具优势,在集成光学中有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Subbaraman H, Xu X C, Hosseini A, et al. Recent advances in silicon-based passive and active optical interconnects[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2487-2511.
- [2] Bie Y Q, Grosso G, Heuck M, et al. A MoTe_2 -based light-emitting diode and photodetector for silicon photonic integrated circuits[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(12): 1124-1129.
- [3] Sun X C, Zhang L X, Zhang Q H, et al. Si photonics for practical LiDAR solutions[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(20): 4225.
- [4] Poulton C V, Byrd M J, Raval M, et al. Large-scale silicon nitride nanophotonic phased arrays at infrared and visible wavelengths[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 21-24.
- [5] Feng L, Ayache M, Huang J Q, et al. Nonreciprocal light propagation in a silicon photonic circuit[J]. *Science*, 2011, 333(6043): 729-733.
- [6] Feldmann J, Youngblood N, Wright C D, et al. All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning capabilities[J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 208-214.
- [7] 廖莎莎, 廖柯, 包航, 等. 功率分配比大范围可调的光功率分配器集成芯片[J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0623001. Liao S S, Liao K, Bao H, et al. Optical power splitter integrated chip with large tunable range of power splitting ratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0623001.
- [8] 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 a hybrid particle swarm algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1113001.
- [9] 汪静丽, 皇甫利国, 陈鹤鸣. 偏振无关多模干涉型 1×3 光功分器的设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0713001. Wang J L, Huangpu L G, Chen H M. Design of polarization-insensitive multimode interference 1×3 optical power splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0713001.
- [10] Lin Z J, Rusch L, Chen Y X, et al. Chip-scale, full-Stokes polarimeter[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4867-4877.
- [11] Wang H T, Chen C F, Chi S E. A numerical solution for broadband PLC splitter with variable splitting ratio based on asymmetric three waveguide structures[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(9): 1892.
- [12] Tian Y, Huang Z L, Qiu J F, et al. On-chip OSNR monitoring system based on power-balanced Mach-Zehnder interferometers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 141: 107157.
- [13] Deng Q Z, Liu L, Li X B, et al. Arbitrary-ratio 1×2 power splitter based on asymmetric multimode interference[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(19): 5590-5593.
- [14] Tian Y, Qiu J F, Yu M B, et al. Broadband 1×3 couplers with variable splitting ratio using cascaded step-size MMI[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 6601008.
- [15] Zhao S, Liu W X, Chen J Y, et al. Broadband arbitrary ratio power splitters based on directional couplers with subwavelength structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(10): 479-482.
- [16] 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.
- [17] 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.

- [18] 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.
- [19] Lu J, Vučković J. Nanophotonic computational design[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13351-13367.
- [20] 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.
- [21] Piggott A Y, Petykiewicz J, Su L, et al. Fabrication-constrained nanophotonic inverse design[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1786.
- [22] Hughes T W, Minkov M, Williamson I A D, et al. Adjoint method and inverse design for nonlinear nanophotonic devices[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(12): 4781-4787.
- [23] Shen B, Wang P, Polson R, et al. An integrated-nanophotonics polarization beamsplitter with $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ footprint[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6): 378-382.
- [24] Tahersima M H, Kojima K, Koike-Akino T, et al. Deep neural network inverse design of integrated photonic power splitters[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 1368.
- [25] Frellsen L F, Ding Y H, Sigmund O, et al. Topology optimized mode multiplexing in silicon-on-insulator photonic wire waveguides[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16866-16873.
- [26] Piggott A Y, Lu J, Lagoudakis K G, et al. Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6): 374-377.
- [27] Sakamaki Y, Saida T, Hashimoto T, et al. Loss reduction of waveguide crossings by wavefront matching method and their application to integrated optical circuits[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(13): 2257-2263.
- [28] Ren Y M, Zhang L X, Wang W Q, et al. Genetic-algorithm-based deep neural networks for highly efficient photonic device design[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(6): B247-B252.
- [29] Lalau-Keraly C M, Bhargava S, Miller O D, et al. Adjoint shape optimization applied to electromagnetic design[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21693-21701.
- [30] Miller O D. Photonic design: from fundamental solar cell physics to computational inverse design[M]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2012.
- [31] Zanzi A, Brimont A, Griol A, et al. Compact and low-loss asymmetrical multimode interference splitter for power monitoring applications[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 227-229.
- [32] Xu K, Liu L, Wen X, et al. Integrated photonic power divider with arbitrary power ratios[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 855-858.

Inverse Design of Optical Couplers with Arbitrary Splitting Ratio Based on Boundary Inverse Optimization Algorithm

Liao Junpeng¹, Tian Ye^{1*}, Yang Zirong¹, Kang Zhe², Zheng Ziwei³, Jin Qinghui¹,
Zhang Xiaowei¹

¹*Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;*

²*College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;*

³*Digital Industry Research Institute, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, Zhejiang, China*

Abstract

Objective Photonic integrated circuits (PICs) based on silicon-on-insulator (SOI) platforms have attracted much attention due to their high integration density and compatibility with complementary metal-oxide-semiconductor transistor (CMOS) processes. Among the various integrated optical devices on the SOI platforms, optical couplers with arbitrary splitting ratios are widely used for power distribution, passive optical networks, and signal monitoring. Traditional device design methods are limited by the experience of designers and spend a lot of time on structural design and parameter optimization. In addition, when the design targets change, the structure often needs to be redesigned and optimized, which makes the design less efficient due to the large amount of repetitive work. In contrast, inverse design methods use intelligent algorithms to generate desired device structures, and they can effectively reduce design complexity and improve design efficiency. Specifically, the adjoint method is able to calculate the shape derivatives of all points in the space and requires only two simulation processes in each iteration. It can achieve design targets with fewer simulations and iterations, and further improve the design efficiency of devices. The device structures of inverse design can be divided into internal perforation type and boundary optimization type. Internally perforated devices have a large number of holes in their structures, and when light is transmitted in these devices, these holes tend to cause light reflection and thus lead to relatively large transmission losses. The boundary-optimized device structure mainly adjusts the boundary of devices, so it can avoid the existence of a large number of holes in the structure. In this paper, an inverse design method based on the adjoint method is adopted, and an efficient design method for realizing 1×2 optical couplers with arbitrary splitting ratios by optimizing the boundary shapes of devices is proposed. Various optical couplers with different splitting ratios are automatically designed to verify the feasibility. The analysis results show that the performance of the designed optical couplers has met the design targets, and characteristics such as small size, low insertion loss, and large bandwidth are obtained.

Methods Optical couplers with arbitrary splitting ratios can be realized by optimizing the boundary shapes of devices through an inverse design method based on the adjoint method. First, the initial structure of optical couplers is defined, and multiple discrete boundary optimization points are inserted at both top and bottom boundaries of the devices. By using the adjoint method combined with gradient descent, the positions of the optimization points can be effectively adjusted in the y -axis direction to approach design targets. The boundary shape can be defined by fitting the optimized points into a curve through spline interpolation. By the adjoint method, the number of simulations is effectively reduced, and design efficiency is improved. Three optical couplers with splitting ratios of 1 : 2, 1 : 4, and 1 : 8 (i. e. , 3 dB, 6 dB, and 9 dB) are designed, and the characteristics such as splitting ratio, insertion loss, and fabrication tolerance are numerically analyzed. One of the couplers is fabricated through a commercial multi-project wafer (MPW) program. By measuring the power from output ports within a bandwidth range, the performance can be fully characterized.

Results and Discussions Simulation results show that the splitting ratios of the three couplers are 1 : 2, 1 : 3.97, and 1 : 8.17 at 1550 nm, which well match the design targets (Fig. 5). For all the couplers, the simulated insertion loss is less than 0.12 dB at 1550 nm. When the wavelength ranges from 1500 nm to 1600 nm, the splitting ratio deviations are kept within ± 1 dB, and the insertion loss is less than 0.28 dB (Fig. 7). In addition, the fabrication tolerance of the three couplers is analyzed by controlling the width within ± 20 nm, and the splitting ratio deviations are still kept within ± 1 dB compared with the design targets, which indicates a stable performance (Fig. 8). Experimental tests show that the designed optical coupler with a splitting ratio of 1 : 2 meets the design targets in a wavelength range of 1500–1565 nm, and the insertion loss is less than 0.9 dB (Fig. 10).

Conclusions In summary, 1×2 optical couplers with arbitrary splitting ratios are efficiently designed by using the inverse design method based on the adjoint method. The simulation results show that when the wavelength ranges from 1500 nm to 1600 nm, the splitting ratio deviations of the three designed optical couplers are kept within ± 1 dB, and the insertion loss is less than 0.28 dB. The experimental tests show that when the wavelength ranges from 1500 nm to 1565 nm, the designed optical coupler with a splitting ratio of 1:2 meets the design targets, and the insertion loss is less than 0.9 dB. Compared with recently designed optical couplers with arbitrary splitting ratios, the proposed design has advantages in small footprint and large operating bandwidth. The proposed design method paves the way for the efficient design of couplers with arbitrary splitting ratios, low insertion loss, and large operating bandwidth.

Key words integrated optics; all-optical devices; couplers; inverse design