

基于序列二次规划算法的超小尺寸 微纳波长分束器的逆向设计*

李家祥¹⁾²⁾ 王慧琴^{1)†} 徐和庆³⁾ 张华²⁾ 冯艳²⁾ 董美彤¹⁾

1) (上海工程技术大学数理与统计学院, 上海 201620)

2) (上海工程技术大学机器人研究所, 上海 201620)

3) (上海展讯通信公司集成技术资源部, 上海 201203)

(2023年5月30日收到; 2023年8月7日收到修改稿)

微纳波长分束器是光子芯片中一种重要的分光器件. 本文运用序列二次规划智能算法, 设计了尺寸为 $1.5\ \mu\text{m} \times 1.5\ \mu\text{m}$ 的多个超小波长分束器, 其中 Y 型双通道分束器可同时实现 TE/TM 模式的双波长分束, TE 模 1140 和 1200 nm 两波长的传输效率分别为 80% 和 81%, 消光比分别为 18.1 和 16.3 dB, TM 模传输效率分别为 70% 和 67%, 消光比为 18.3 和 15.9 dB; T 型分束器实现了光束的 180° 相向分离, 待分波长 1100 和 1170 nm 的传输效率均达到了 88%, 消光比分别为 16.6 和 15.0 dB, 是目前尺寸最小的片上波分器; 十字型三通道分束器实现了波长间隔为 50 nm 的分束, 待分波长 1100, 1150 和 1200 nm 传输效率分别为 73%, 66% 和 70%, 消光比分别为 17.2, 13.8 和 13.8 dB; 非对称三通道分束器分束波长间隔仅为 20 nm, 待分波长 1200, 1220 和 1240 nm 的传输效率分别为 61%, 56% 和 57%, 消光比分别为 10.8, 7.9 和 8.9 dB. 本方法的设计周期短、设计效率高, 且所设计的结构简单、易加工, 本方法适用于多种片上集成元器件的设计, 为微纳片上集成光子器件的设计提供了一种新思路.

关键词: 序列二次规划算法, 智能设计, 片上集成, 波长分束器

PACS: 41.85.Ct, 42.15.Eq, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.72.20230892

1 引言

波长分束器(波分器)是用于将不同波长的复合光按波长进行分离的器件, 分束器作为片上集成的一个重要组成部分, 在光信号处理^[1]、光通信^[2]、量子计算^[3]、量子通信^[4]等领域均有广泛的应用. 波分器主要实现方式有基于光子晶体^[5,6]、表面等离子激元微腔型^[7]、阵列波导光栅^[8]、马赫曾德干涉^[9]、多模干涉耦合器^[10]和定向耦合器^[11]等. 其中, 表面等离子激元微腔型结构的尺寸小, 分束效果

较好, 适合片上集成, 被关注度高, 但表面等离子激元的传输损耗问题仍有待解决; 基于光子晶体谐振腔型器件尺寸较小, 分束效果好, 但加工容错度低, 在设计中对光场模拟计算的硬件要求高、耗时长^[12,13]; 阵列波导光栅型器件已商用化, 但尺寸大; 基于其他类型的光干涉、普通型谐振腔或耦合原理的结构同样尺寸大, 不适合片上集成.

智能逆设计可突破传统结构的局限, 设计出前所未有的紧凑的、调控能力强的一些新型结构, 因而得到了人们的广泛推崇, 如二元搜索法^[14]、最速下降法^[15]、伴随法^[16]、遗传算法^[17]、移动渐近线

* 上海工程技术大学高层次人才科研启动项目(批准号: 2023RC-GC09)和上海工程技术大学高水平地方高校建设创新人才培养项目(批准号: 23XSZ001)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wanghq@sues.edu.cn

法^[18,19]、目标优先法^[20]以及梯度下降算法^[21]等智能算法越来越多地应用于微纳光学器件的逆设计中,包括微纳波分器的设计^[22–27].例如在2018年,Su^[24]最早使用交替乘法设计了波长范围在1500–1580 nm,间隔为40 nm的三通道波分器,其尺寸为 $5.50\ \mu\text{m} \times 4.50\ \mu\text{m}$.2020年,Han等^[25]利用目标优先算法设计了波长间隔在65 nm左右尺寸为 $2.80\ \mu\text{m} \times 2.80\ \mu\text{m}$ 的四通道波分器.2020年,Yilmaz等^[26]利用目标优先法设计了波长间隔在100 nm左右的双通道、四通道和六通道的T型结构的波分器,尺寸分别为 $2.80\ \mu\text{m} \times 2.80\ \mu\text{m}$, $4.60\ \mu\text{m} \times 2.80\ \mu\text{m}$, $6.95\ \mu\text{m} \times 2.80\ \mu\text{m}$.2021年,Yuan等^[27]利用二元搜索法设计了波长间隔100 nm,尺寸为 $3.60\ \mu\text{m} \times 2.40\ \mu\text{m}$ 不对称结构双通道多模波分器.综上,微纳波分器设计智能化已有成效,如何进一步寻找更好的算法、提高器件密集度、提升设计效率是人们当下关注的问题.

序列二次规划算法(sequence quadratic program, SQP)^[28–30]常应用于机械拓扑和形状优化的工业设计和钢构框架设计^[29].本文将用于求解非线性约束问题的SQP首次引进到微纳光子器件的设计中,具体而言是选择了SQP算法家族中的稀疏非线性优化算法(sparse nonlinear optimization, SNOPT)^[31]进行设计,该算法多用于力学特性与几何形状问题的求解.本次是用SNOPT联合有限元法进行光场监控来执行几何形状的优化,对片上集成微纳波分器进行设计,设计了尺寸为 $1.5\ \mu\text{m} \times 1.5\ \mu\text{m}$ 的多个超小型的波分器,其中Y型双通道波分器可同时实现TE/TM模式的分束,模式适应度良好;T型双通道波分器实现了双波长大角度分束,传输效率均达到88%;同时还设计了小波长间隔的十字型和非对称型两种三通道波分器,两者相比,十字型波分器不仅分束角度更大,且传输效率更高,非对称三通道波长分束器的波长间隔更小仅为20 nm.所设计的波分器在尺寸、分束角等性能参数上均优于或达到现有方法的设计结果^[32,33],且本方法的设计周期短、设计效率高,适用于微纳光学器件的设计.与前期遗传算法和移动渐近线法等智能设计法^[17–19]相比,SQP逆设计法所设计的结构更为简洁、加工工艺要求更低.本方法将为光子器件的设计提供了一种新思路 and 借鉴,为器件结构的多样性和灵活性提供了更大的可能.

2 设计原理与方法

SQP算法是目前公认求解约束非线性优化问题的最有效方法之一,优点是收敛性好、计算效率高、边界搜索能力强,其基本思想是将复杂的约束非线性优化问题转化为简单的二次规划(QP)子问题,然后在每次迭代中求解一个或多个QP子问题.所谓QP子问题,就是利用泰勒展开,将非线性约束问题的目标函数在迭代点处简化成二次函数,将约束条件简化成线性函数,得到QP子问题,然后求解QP子问题,将其最优解作为原问题的下一次迭代的起点继续迭代计算.

该算法首先要设置好全局变量,例如拟设计一双通道波分器,待分波长分别为 λ_1 和 λ_2 ,则全局变量设为

$$F = (A \cdot W_{1,\lambda_1} + B \cdot W_{2,\lambda_2}), \quad (1)$$

式中, A 和 B 为双通道的调节系数,其目的是为了能根据设计要求对各输出端信号进行调节,使各端口之间达到一定的平衡. W_{1,λ_1} 和 W_{2,λ_2} 表示对应波长的传输效率.

为全局变量设定目标函数和约束条件:

$$\begin{cases} \min x^{(k)} = \mu(\varepsilon, \lambda), \\ -1 \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (2)$$

(2)式为约束条件,其中 $x^{(k)}$ 为目标函数, μ 是根据需求定义的最小损耗适应度函数, λ 为光波长, ε 为各点的介电常数,用来作为惩罚因子,定义 ε 为

$$\varepsilon(r) = \eta \cdot (\varepsilon_{\text{si}} - \varepsilon_{\text{air}}) + \varepsilon_{\text{air}}, \quad \eta = (1 + e^{-2px})^{-1}, \quad (3)$$

其中, r 为衬底坐标, η 为控制变量中的自由度, p 为阶跃系数,本文中 ε_{si} 和 ε_{air} 分别为硅和空气的介电常数 $\varepsilon_{\text{si}} = 3.48$, $\varepsilon_{\text{air}} = 1$.

SQP算法会生成一个迭代序列,这个迭代序列是基于拉格朗日函数的二次模型和非线性约束线性化定义的QP子问题的近似解,先设定一个变量 S :

$$\min \frac{1}{2} S^T \nabla^2 c^{(k)} + \nabla c^{(k)T} S, \quad \text{s.t. } \mathbf{H} \times S = 0. \quad (4)$$

其中 $c^{(k)}$ 为目标函数 $x^{(k)}$ 的值, $S = x - x^{(k)}$, \mathbf{H} 为约束矩阵.(4)式的最优可行性条件为

$$\nabla^2 c^{(k)} S + D^T \theta = -\nabla c^{(k)}, \quad \mathbf{H} \times S = 0. \quad (5)$$

从(5)式线性方程组的解中确定的最优解 $\tilde{S}^{(k)}$,可以表示为

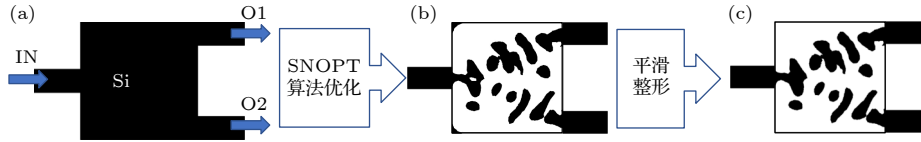


图 1 波分器的设计流程图 (a) 初始基片; (b) 优化结构; (c) 最终结构

Fig. 1. Design flow chart of the wave splitter: (a) Initial substrate; (b) optimized structure; (c) final structure.

$$\begin{pmatrix} \nabla^2 c^{(k)} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d^{(k)} \\ \theta^{(k)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\nabla c^{(k)} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

迭代后目标函数升级为

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha^{(k)} S^{(k)}, \quad (7)$$

其中参数 $\alpha^{(k)}$ 由迭代搜索过程中确定, 海森矩阵 $\nabla^2 c^{(k)}$ 可用近似值表示. 不断重复上述过程, 就可以得到原问题 $x^{(k)}$ 的最优解.

以 Y 型双通道波分器的设计为例, 器件的设计大体分成 3 个阶段: 第 1 阶段是器件的初始化设置, 本文选择 $1.5 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$ 尺寸的硅基片进行设计, 输入端 (IN) 位于基片的左侧中间位置; 输出端分别位于基底右部上侧 (O_1) 和下侧 (O_2), 分别对应着 1140 nm 和 1200 nm 的波长输出; 输入输出端的连接波导宽度为 $0.3 \mu\text{m}$, 如图 1(a) 所示. 第 2 阶段是目标函数和约束条件的设定及器件结构优化, 本次双通道波分器的设计期望是两波长的透过率能达到 70%. 在运用 SNOPT 算法进行器件结构逆设计的过程中, 每一次迭代, 程序都会调用有限元法对当下结构的分光能力进行评估, 若没达到设计期望将进入下一次结构迭代, 直到达到设计预期, 确定最优结构, 如图 1(b) 所示, 其中黑色部分为介质硅, 白色部分为空气, 即拟蚀刻掉的部分, 灰色部分介于硅与空气之间的介质. 第 3 阶段是二值化和整形, 初始结构中硅与空气的边界处存在少量灰色区域, 即存在少量中间介质, 过滤掉中间过度介质, 并对形成的新边界进行平滑整形, 再重新填充硅和空气两种介质, 输出最终结构, 如图 1(c) 所示.

3 光波分器的设计

3.1 双通道波分器

3.1.1 Y 型结构双通道波分器的性能

首先设计了 Y 型双通道波分器, 拟实现在 TE 模式下 1140 nm 和 1200 nm 双波长分束, 得到的结构如图 2(a) 所示. 图 2(b) 和图 2(c) 是该结构

在 1140 nm 和 1200 nm 波长下 TE 模的光场图, 可见该两波长的光分别被输送到了 O_1 和 O_2 端, 较好地实现了分光功能. 同时分析了该结构在 TM 模式的分束情况, 如图 2(f) 和图 2(g) 是 TM 模两波长的光场图, 结果表明该结构对 TM 光仍然有良好的分束效果.

定义输出输入端的功率之比为传输效率, 定义某波长 λ_k 对应的目标端口 k 的输出功率与该波长串扰到其他端口的功率的比值为波长 λ_k 对应端口的消光比 (extinction ratio, ER), 则传输效率和消光比分别可表示为

$$T = P_{\text{out}} / P_{\text{in}}, \quad (8)$$

$$\text{ER}_{\lambda_k} = \frac{P_{k, \lambda_k}}{\sum_{i=1}^n P_{i, \lambda_k} - P_{k, \lambda_k}}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

其中 P_{k, λ_k} 为波长 λ_k 传输到目标端口的输出功率, P_{i, λ_k} 为波长 λ_k 传输到各输出端口的功率, n 为输出端口总数.

图 2(d) 和图 2(h) 分别为 TE 和 TM 模式下两输出端在 1000—1400 nm 波长范围内的光谱图. 从图中可见, TE 模式下两波长的传输效率分别为 80% 和 81%, 半高宽分别为 34 和 47 nm; TM 模该两波长的传输效率分别为 70% 和 67%, 半高宽分别为 49 和 106 nm. 比较两模式的谱图可以发现, 两模式的峰值位置基本不变, TM 模较 TE 模的传输效率略有下降. 说明该结构在 TE 和 TM 模式下均可实现该两波长的分束, 且输出峰值没有漂移.

图 2(e) 和图 2(i) 分别为 TE 和 TM 模式下的消光比图, 在 TE 模式下两端口的消光比分别为 64 (18.1 dB) 和 43 (16.3 dB), 在 TM 模式下它们的消光比分别为 67 (18.3 dB) 和 39 (15.9 dB), 消光效果非常接近, 可见该结构偏振模式的适应性良好, 既能在 TE 模式下工作, 也能在 TM 模式下工作, 在混模环境下同样能工作良好, 实现了不同模式环境下工作的兼容.

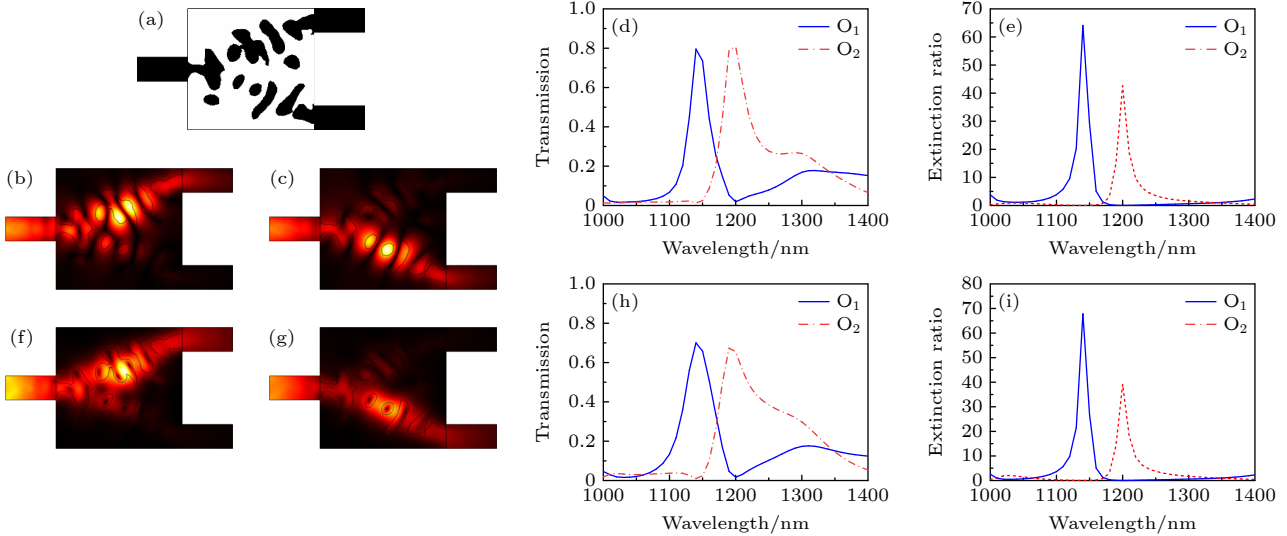


图 2 Y型双通道波分器 (a) 结构图; (b) TE 模 1140 nm 的光场分布; (c) TE 模 1200 nm 的光场分布; (d) TE 模传输效率图; (e) TE 模的消光比图; (f) TM 模 1140 nm 的光场分布; (g) TM 模 1200 nm 的光场分布; (h) TM 模传输效率图; (i) TM 模消光比图
 Fig. 2. Y-type dual-channel wavelength beam splitter: (a) Structure; (b) optical field distribution at 1140 nm in TE mode; (c) optical field distribution at 1200 nm in TE mode; (d) transmission efficiency in TE mode; (e) extinction ratio in TE mode; (f) optical field distribution at 1140 nm in TM mode; (g) optical field distribution at 1200 nm in TM mode; (h) transmission efficiency in TM mode; (i) extinction ratio in TM mode.

接下来进一步对器件结构与输入输出波导的匹配情况进行了分析, 波导宽度分别被设为 0.30, 0.35 和 0.40 μm , 计算它们的传输效率, 结果如图 3 所示. 从图 3 可见, 两端口的传输效率峰值波长位置不变, 峰值有微小上涨, 波导宽度适度增大时传输效率略有提高. 可见设计的器件核心部分与连接波导匹配度良好, 即便在加工过程出现了一定的误差, 对分束效果影响较小, 结构具有较好的容错度.

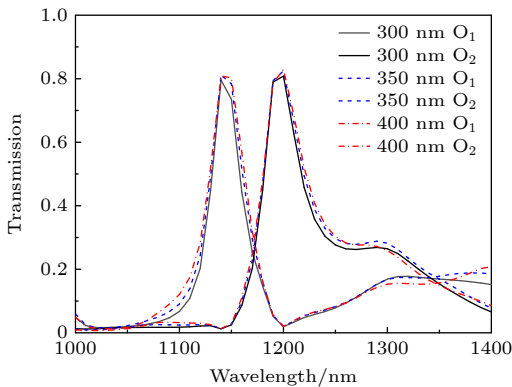


图 3 波导宽度对传输效率的影响

Fig. 3. Influence of the waveguide width on transmission efficiency.

3.1.2 T 型双通道波分器

同样设计的 T 型波分器拟实现 TE 模式下 1100 nm 和 1170 nm 波长分束, 波导宽度为 0.4 μm ,

图 4(a) 为其设计结构图. 图 4(b) 和图 4(c) 分别为 1100 和 1170 nm 的光场图, 图 4(d) 为其光谱图, 图 4(e) 为其消光比图. 由图可知, 两波长的传输效率达到了 88%, 半高宽分别为 334 和 115 nm, 在 1100 和 1170 nm 处的消光比分别为 46 (16.6 dB) 和 31 (15.0 dB).

一般情况下尺寸越小, 分束难度越大; 光束偏转角度越大, 分束难度越大. 该结构不仅在 1.5 $\mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$ 的尺寸内实现了波长分束, 而且将两波长的光 90° 偏转后 180° 相向分离, 传输效率达到了 88%, 分束效果极好, 而结构又并不复杂难加工, 充分体现该算法的优越性.

3.2 三通道波分器

同时设计了小波长间隔的十字型和不对称型两种三通道波分器. 图 5(a) 为十字型波分器的结构, 波导宽度为 0.4 μm , 拟实现波长间隔为 50 nm 的分束, 在 1100, 1150 和 1200 nm 三波长的分束. 图 5(b)–(d) 是该结构在对应三波长的光场分布图, 可见实现了良好的分束效果. 图 5(e) 为三输出端在 900–1400 nm 范围内的光谱图, 三波长的传输效率分别达到 73%, 66% 和 70%, 半高宽分别为 43, 28 和 42 nm. 图 5(f) 为其消光比图, 三输出端的消光比分别为 53 (17.2 dB), 24 (13.8 dB) 和 24 (13.8 dB).

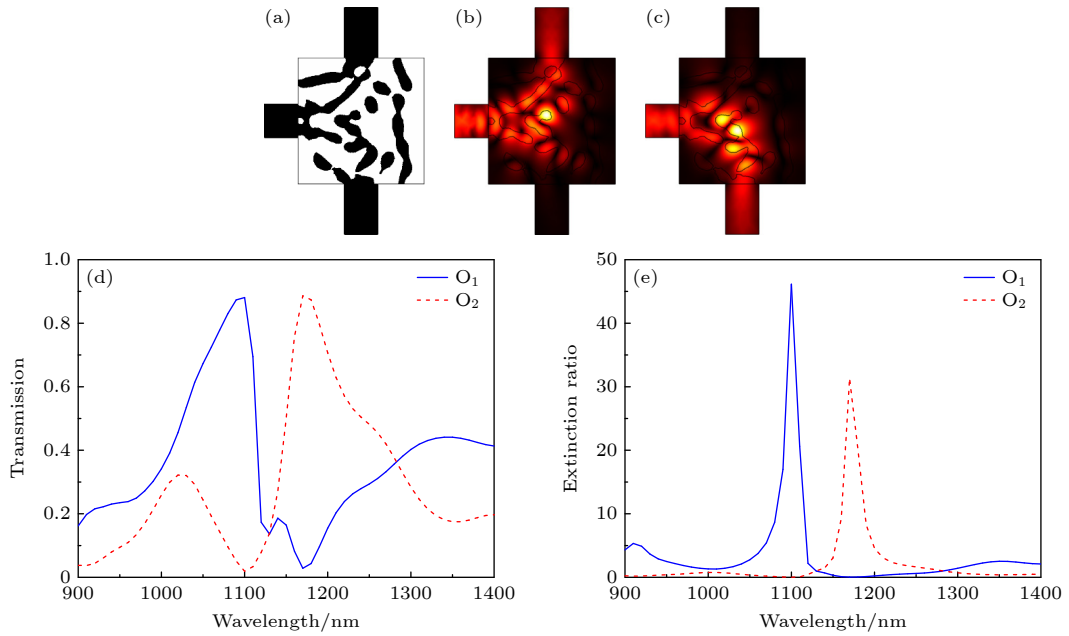


图 4 T 型双通道波分器 (a) 结构图; (b) 1100 nm 的光场分布; (c) 1170 nm 的光场分布; (d) 传输效率图; (e) 消光比图
 Fig. 4. T-type dual-channel wave beam splitter: (a) Structure; (b) optical field distribution at 1100 nm; (c) optical field distribution at 1170 nm; (d) transmission efficiency; (e) extinction ratio.

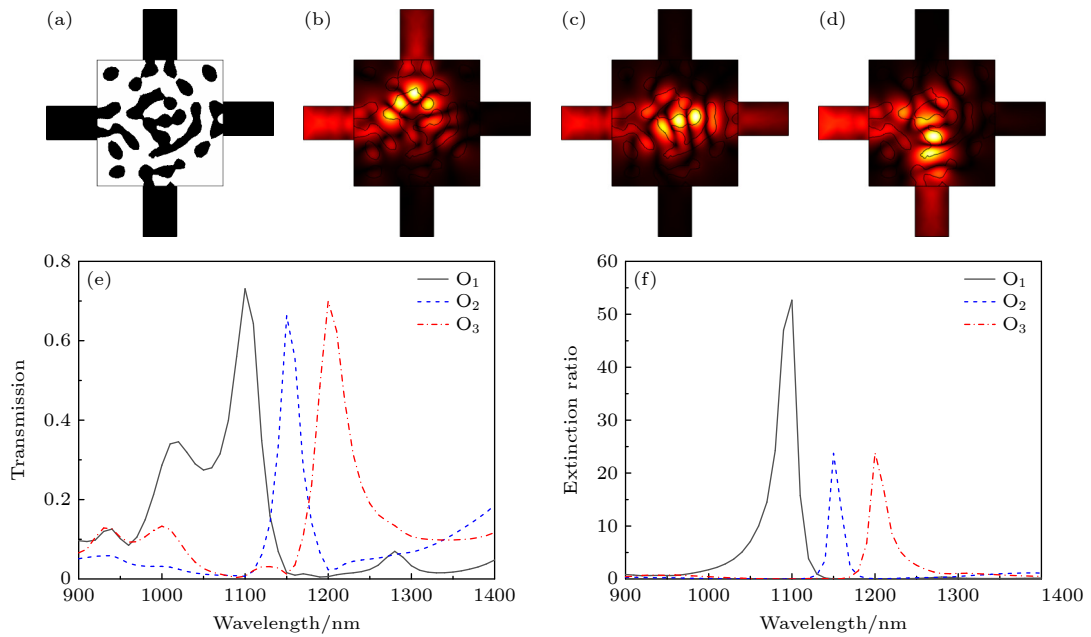


图 5 十字型三通道波分器 (a) 结构图; (b) 1100 nm 的光场分布; (c) 1150 nm 的光场分布; (d) 1200 nm 的光场分布; (e) 传输效率图; (f) 消光比
 Fig. 5. Cross-type three-channel wavelength beam splitter: (a) Structure; (b) optical field distribution at 1100 nm; (c) optical field distribution at 1150 nm; (d) optical field distribution at 1200 nm; (e) transmission efficiency; (f) extinction ratio.

图 6(a) 为非对称型三通道波分器的结构图, 波导宽度为 $0.4 \mu\text{m}$, 拟实现波长间隔为 20 nm, 在 1200, 1220 和 1240 nm 的分束. 图 6(b)—(d) 为对应三波长的光场分布图, 同样实现了良好的分束效果. 图 6(e) 为三输出端的光谱图, 三波长的传输效

率分别为 61%, 56% 和 57%, 半高宽分别为 28, 21 和 158 nm. 图 6(f) 所示的不对称结构波分器的消光比分别为 12 (10.8 dB), 6 (7.9 dB) 和 9 (8.9 dB), 相比于上述十字型波分器, 传输效率略低些, 串扰略大些.

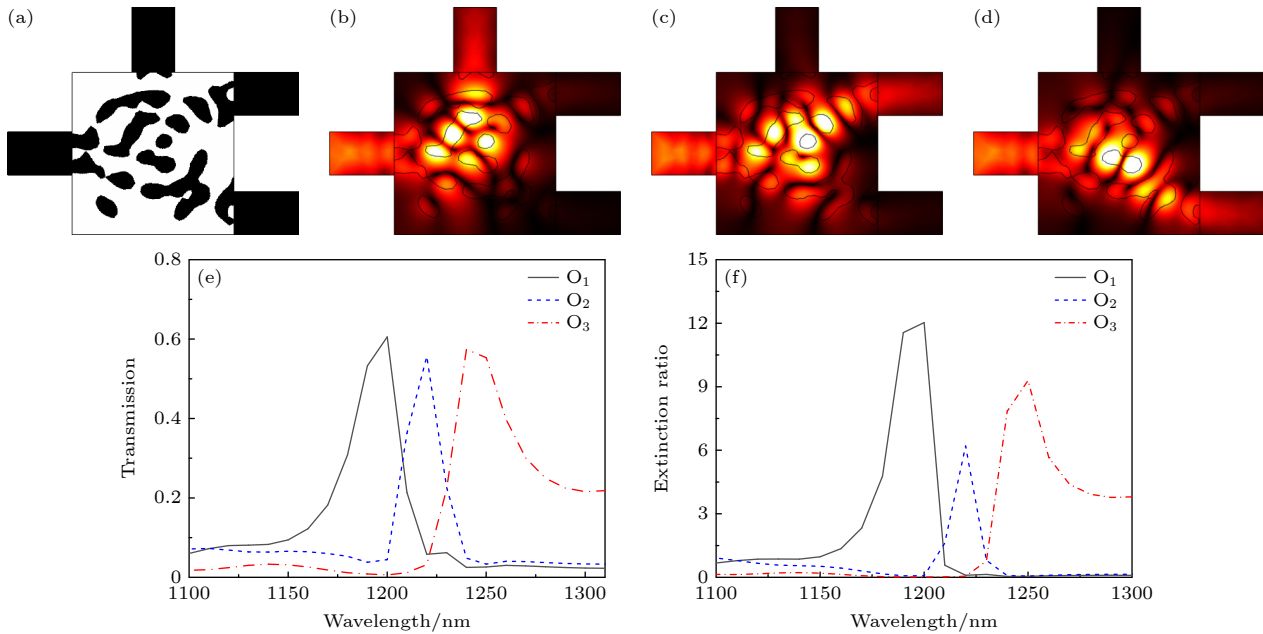


图6 不对称型结构三通道波分器 (a) 结构图; (b) 1200 nm 的光场分布; (c) 1220 nm 的光场分布; (d) 1240 nm 的光场分布; (e) 传输效率率图; (f) 消光比图

Fig. 6. Asymmetric structure three-channel wave splitter: (a) Structure; (b) optical field distribution at 1200 nm; (c) optical field distribution at 1220 nm; (d) optical field distribution at 1240 nm; (e) transmission efficiency; (f) extinction ratio.

4 结 论

本文将 SQP 算法引用到微纳光学器件的智能逆设计中, 设计了以 Si 为基底的尺寸为 $1.5 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$ 的多个超小型波分器. 其中 Y 型双通道波分器同时实现了 TE/TM 模式下 1140 和 1200 nm 两波长良好分束; T 型双通道波分器两波长的光 180° 相向分离, 1100 和 1170 nm 两波长的传输效率均达到了 88%; 同时设计了小波长间隔的十字型和非对称型两种三通道波分器, 其中十字型波分器实现了波长间隔 50 nm, 在 1100, 1150 和 1200 nm 三波长分束, 传输效率分别达到了 73%, 66% 和 70%; 非对称型波分器实现了波长间隔 20 nm, 在 1200, 1220 和 1240 nm 三波长分束, 传输效率分别达到 61%, 56% 和 57%. 以上所有波分器的消光比均在 20 dB 附近, 且器件性能稳定、与输入输出波导适配性良好. 设计结果充分表明该方法在片上集成波分器的设计中适用性良好, 所得器件结构均简洁、易加工, 且优化时间短、硬件需求低. 该反向智能设计方法可打破传统结构的壁垒, 为微纳光子器件提供更多的可能和更灵活的结构, 为光子芯片提供了更大的实现空间.

参考文献

[1] Yang Y, Huang H Y, Guo C S 2020 *Opt. Express* **28** 14762

- [2] Mehrabi K, Zarifkar A, Miri M 2021 *Opt. Commun.* **479** 126474
- [3] Tanomura R, Tanemura T, Nakano Y 2023 *Jpn. J. Appl. Phys.* **62** SC1029
- [4] Li D D, Tang Y L, Zhao Y K, Zhou L, Zhao Y, Tang S B 2022 *Photonics* **9** 527
- [5] Ammari M, Benmerkhi A, Bouchemat M 2022 *Opt. Appl.* **52** 613
- [6] Ke H, Li P L, Shi W H 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 144204 (in Chinese) [柯航, 李培丽, 施伟华 2022 物理学报 **71** 144204]
- [7] Faghani A A, Rafiee Z, Amanzadeh H, Yaghoubi E, Yaghoubi E 2022 *Optik* **257** 168824
- [8] Butt M A, Shalbaz M, Kozłowski L, Kazmierczak A, Piramidowicz R 2023 *Photonics* **10** 208
- [9] Melati D, Xu D X, Cheriton R, Wang S R, Vachon M, Schmid J H, Cheben P, Janz S 2022 *Opt. Express* **30** 14202
- [10] Butt M A, Kazanskiy N L, Khonina S N 2023 *Plasmonics* **18** 635
- [11] Wang J L, Chen Z Y, Chen H M 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 014202 (in Chinese) [汪静丽, 陈子玉, 陈鹤鸣 2021 物理学报 **70** 014202]
- [12] Andonegui I, Calvo I, Garcia-Adeva A J 2014 *Appl. Phys. A* **115** 433
- [13] Zhang J, Xu X M, He L J, Yu T B, Guo H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054213 (in Chinese) [张佳, 徐旭明, 何灵娟, 于天宝, 郭浩 2012 物理学报 **61** 054213]
- [14] Shen B, Wang P, Polson R, Menon R 2015 *Nat. Photonics* **9** 378
- [15] Huang J, Yang J B, Chen D B, Bai W, Han J M, Zhang Z J, Zhang J J, He X, Han Y X, Liang L M 2020 *Nanophotonics* **9** 159
- [16] Wang K Y, Ren X S, Chang W J, Lu L H, Liu D M, Zhang M M 2020 *Photonics Res.* **8** 528
- [17] Liu Z H, Liu X H, Xiao Z Y, Lu C C, Wang H Q, Wu Y, Hu X Y, Liu Y C, Zhang H Y, Zhang X D 2019 *Optica* **6** 1367

- [18] Huang H, Xu H Q, Wang H Q, Feng Y, Zhang H, Li J X 2022 *Opt. Eng.* **61** 015105
- [19] Huang H, Hu C Y, Tian Z C, Miu Q X, Wang H Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 234102 (in Chinese) [黄辉, 胡晨岩, 田梓聪, 缪秋霞, 王慧琴 2021 物理学报 **70** 234102]
- [20] Lu J, Vuckovic J 2012 *Opt. Express* **20** 7221
- [21] Qi H X, Du Z C, Hu X Y, Yang J Y, Chu S S, Gong Q H 2022 *Opto. Electron.* **5** 210061
- [22] Piggott A Y, Lu J, Lagoudakis K G, Petykiewicz J, Babinec T M, Vuckovic J 2015 *Nat. Photonics* **9** 374
- [23] Ma L F, Li J, Liu Z H, Zhang Y X, Zhang N N, Zheng S Q, Lu C C 2021 *Chin. Opt. Lett.* **19** 011301
- [24] Su L, Piggott A Y, Sapra N V, Petykiewicz J, Vuckovic J 2018 *ACS Photonics* **5** 301
- [25] Han J M, Huang J, Wu J G, Yang J B 2020 *Opt. Commun.* **465** 125606
- [26] Yilmaz Y A, Alpkilic A M, Yeltik A, Kurt H 2020 *Opt. Commun.* **454** 124522
- [27] Yuan H, Huang J, Wang Z H, Zhang J P, Deng Y, Lin G L, Wu J G, Yang J B 2021 *Results Phys.* **27** 104489
- [28] Rojas-Labanda S, Stolpe M 2016 *Struct. Multidiscipl. Optim.* **53** 1315
- [29] Gu Q, Barbato M, Conte J P, Gill P E, McKenna F 2012 *J. Struct. Eng.* **138** 822
- [30] Izmailov A F, Solodov M V 2011 *Math. Program* **126** 231
- [31] Azizi D, Gholami A 2013 *IEEE Electr. Insul. M.* **29** 69
- [32] Wang F L, Xu X, Zhang C, Sun C L, Zhao J 2022 *IEEE Photonics J.* **14** 6621606
- [33] Yuan M W, Yang G, Song S J, Zhou L P, Minasian R, Yi X K 2022 *Opt. Express* **30** 26201

Reverse design of ultracompact micro-nano wavelength beam splitter based on quadratic programming algorithm*

Li Jia-Xiang¹⁾²⁾ Wang Hui-Qin^{1)†} Xu He-Qing³⁾ Zhang Hua²⁾
Feng Yan²⁾ Dong Mei-Tong¹⁾

1) (*School of Mathematics, Physics & Statistics, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China*)

2) (*Institute of Robotics, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China*)

3) (*Spreadtrum Communications (Shanghai) Integrated Technology Resources Department, Shanghai 201203, China*)

(Received 30 May 2023; revised manuscript received 7 August 2023)

Abstract

Micro-nano wavelength beam splitter is an important beam-splitting device in photonic chips. In this study, the sequence quadratic program is used to design ultra-compact wavelength beam splitters with footprints of $1.5\ \mu\text{m} \times 1.5\ \mu\text{m}$. The Y-type dual channel beam splitter can realize TE/TM mode splitting at the same time, the transmissions of TE mode light at 1140 nm and 1200 nm are 80% and 81%, and the extinction ratios are 18.1 dB and 16.3 dB, respectively. The transmissions of TM mode light are 70% and 67%, and the extinction ratios are 18.3 dB and 15.9 dB, respectively. The T-type beam splitter realizes 180° separation angle splitting, and the transmissions of optical power at the wavelengths of 1100 nm and 1170 nm both reach 88%, and the extinction ratios are 16.6 dB and 15.0 dB, respectively. It is the smallest size chip-integrated wavelength beam splitter. The cross-type three-channel beam splitter realizes splitting with a wavelength interval of 50 nm. The transmissions at the wavelengths of 1100, 1150 and 1200 nm are 73%, 66% and 70%, and the extinction ratios are 17.2, 13.8 and 13.8 dB, respectively. The asymmetric three-channel beam splitter realizes splitting with the wavelength interval of 20 nm. The transmissions at the wavelengths of 1200, 1220 and 1240 nm are 61%, 56% and 57%, and the extinction ratios are 10.8, 7.9 and 8.9 dB, respectively. This method has the advantages of a short design period, high design efficiency, simple structure, easy processing, and suitability for designing chip-integrated photonic components. It is expected that it can provide a new idea for designing chip-integrated photonic devices.

Keywords: sequence quadratic program, intelligent design, on-chip integration, wavelength beam splitter

PACS: 41.85.Ct, 42.15.Eq, 42.82.-m

DOI: [10.7498/aps.72.20230892](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230892)

* Project supported by the High-Level Local University Construction Innovative Talents Training Program of Shanghai University of Engineering Science, China (Grant No. 2023RC-GC09) and the High-Level Local University Construction Innovative Talents Training Project of Shanghai University of Engineering Science, China (Grant No. 23XSZ001).

† Corresponding author. E-mail: wanghq@sues.edu.cn

基于序列二次规划算法的超小尺寸微纳波长分束器的逆向设计

李家祥 王慧琴 徐和庆 张华 冯艳 董美彤

Reverse design of ultracompact micro-nano wavelength beam splitter based on quadratic programming algorithm

Li Jia-Xiang Wang Hui-Qin Xu He-Qing Zhang Hua Feng Yan Dong Mei-Tong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 194101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230892

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230892>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于移动渐近线算法的大角度偏转分束器的智能设计

Intelligent design of large angle deflection beam splitter based on method of moving asymptotes

物理学报. 2021, 70(23): 234102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210117>

宽带高效聚焦的片上集成纳米透镜

Broadband efficient focusing on-chip integrated nano-lens

物理学报. 2020, 69(24): 244201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200948>

基于下山单纯形算法逆向设计二维光子晶体波导型1×5分束器

Two-dimensional photonic crystal waveguide 1×5 beam splitter reversely designed by downhill-simplex algorithm

物理学报. 2022, 71(14): 144204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220328>

基于自准直效应的光子晶体异质结偏振分束器

Heterojunction polarization beam splitter based on self-collimation in photonic crystal

物理学报. 2018, 67(3): 034204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171815>

基于金属狭缝阵列的各向异性偏振分束器

Anisotropic polarization beam splitter based on metal slit array

物理学报. 2018, 67(9): 094102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172292>

基于四波混频过程和线性分束器产生四组份纠缠

Generation of quadripartite entanglement based on four-wave mixing process and linear beam splitter

物理学报. 2020, 69(9): 090303 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200040>