

## 多通道片上微纳波分解复用器的智能逆设计

常乐瑶,王慧琴\*,李家祥,董美彤,杨浩基

(上海工程技术大学 数理与统计学院,上海 201620)

**摘要:**为获得超小超密集的波分解复用器,提出多通道片上微纳波分解复用器的智能逆设计方法,引入序列二次规划(SQP)算法和有限元法(FEM),辅以插值、整形和二值化等技术手段,实现从功能需求到具体结构的逆向设计。通过该方法,成功设计出多种类型的波分解复用器,并对它们进行实验验证。实验结果表明,所设计的波分解复用器在尺寸、传输效率和消光比等方面均表现出色。

**关键词:**序列二次规划算法;逆向设计;片上集成;波分解复用器

**中图分类号:**O436 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)06-0040-06

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.06.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Intelligent inverse design of multi-channel on-chip micronano wavelength division demultiplexer

CHANG Leyao, WANG Huiqin\*, LI Jiaxiang, DONG Meitong, YANG Haoji

(School of Physics and Materials, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** To obtain ultra small and ultra dense wavelength division demultiplexer, an intelligent inverse design method for multi-channel on-chip micronano wavelength division demultiplexer is proposed. The sequential quadratic program (SQP) algorithm and finite element method (FEM) are introduced, supplemented by interpolation, shaping, and binarization techniques, to achieve reverse design from functional requirements to specific structures. Through this method, multiple types of wavelength division demultiplexers have been successfully designed and experimentally validated. The experimental results show that the designed wavelength division demultiplexer performs well in terms of size, transmission efficiency, and extinction ratio.

**Key words:** sequence quadratic program algorithm, inverse design, chip-integrated, wavelength division demultiplexer

## 0 引言

波分解复用器(以下简称波分器)是光通信系统的关键元件,用于分离不同波长的光信号到不同输出端口。传统波分器如阵列波导光栅(AWG)<sup>[1-3]</sup>在光纤通

收稿日期:2024-04-12。

**基金项目:**国家自然科学基金项目(62162041)资助;上海市大学生创新创业训练计划项目(CS2221004)资助;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(23XSZ001)资助。

**作者简介:**常乐瑶(2003—),女,本科生,现就读于上海工程技术大学光电信息科学与工程专业,主要研究方向为光电器件设计,主持上海市大学生创新创业训练计划项目,曾获得全国大学生数学竞赛校级三等奖、全国大学生物理实验竞赛二等奖,多次获得“上海工程技术大学优秀学生”奖学金。

\* **通信作者:**王慧琴(1968—),女,博士,教授,主要研究方向为微纳光学、智能计算和光子器件设计。



信中应用广泛,但尺寸较大。片上集成波分器作为光子芯片上的波长分束器,需要满足尺寸小、插损低、稳定性好等要求。常见的实现方式包括马赫-曾德尔干涉仪<sup>[4]</sup>、光学谐振腔<sup>[5]</sup>、光子晶体<sup>[6-7]</sup>和表面等离子激元(SPPs)<sup>[8]</sup>等。然而,这些方法各有优缺点。例如,马赫-曾德尔干涉仪和光学谐振腔的尺寸仍然偏大;光子晶体虽然分束效果好,但尺寸较大且加工要求高;SPPs虽然尺寸小,但依赖于金属材料,透明性差,且传输距离短、损耗大。目前,人们更多地关注半导体材料,特别是非线性材料如LiNbO<sub>3</sub>和SiC,以探索更高效的片上波分器实现方式。这些材料有可能提供新的解决方案,从而满足光子芯片对于尺寸、插入损耗和稳定性的需求。

随着光学与人工智能技术的深度融合,传统基于经验和直觉的器件设计方法已经无法满足现代科技

对高集成度、超小尺寸及高性能的迫切需求。在此背景下,逆向化、集成化及去模板化的智能设计方法应运而生,并正逐步成为设计领域的主流趋势。这种转变使得设计流程从“由结构到功能”转变为“由功能到结构”。通过这种方法设计出的微纳结构具有密度高、布局紧凑且性能优异等特点。目前,使用遗传算法<sup>[9]</sup>、粒子群优化算法<sup>[10]</sup>、二元搜索法<sup>[11]</sup>等智能搜索算法,以及基于伴随矩阵<sup>[12]</sup>、凸优化技术等优化方法,还有机器学习<sup>[14]</sup>等人工智能技术,均已取得了优秀的研究成果。这些研究工作已经广泛应用于光偏振分束器<sup>[15]</sup>、光功率分束器<sup>[16]</sup>、光波分/模分复用器<sup>[17-18]</sup>等光学器件的设计与优化中。例如:LU J等人<sup>[17]</sup>提出了一种结合交替乘子法和自定义有限差分频域求解器的方法,用于设计一个尺寸为 $2.8\ \mu\text{m}\times 2.8\ \mu\text{m}$ 的双通道波分复用器,该复用器在工作波长分别为 $1\ 310\ \text{nm}$ 和 $1\ 550\ \text{nm}$ 的情况下,两端口的传输效率分别达到了 $88.7\%$ 和 $77.4\%$ 。这是逆向设计方法在微纳波分复用器领域的一个早期应用实例。SU L等人<sup>[18]</sup>进一步提出了一种波长间隔为 $40\ \text{nm}$ 的三通道波分复用器,工作波长分别为 $1\ 500$ 、 $1\ 540$ 、 $1\ 580\ \text{nm}$ 。3个端口的传输效率分别为 $-1.56\ \text{dB}$  ( $69.8\%$ )、 $-1.68\ \text{dB}$  ( $67.9\%$ )和 $-1.53\ \text{dB}$  ( $70.3\%$ )。HAN J等人<sup>[19]</sup>提出了一种使用目标优先算法设计的四通道波分复用器,其工作波长范围为 $1\ 453\sim 1\ 639\ \text{nm}$ ,波长间隔为 $60\ \text{nm}$ 。4个端口的传输效率分别为 $-1.87\ \text{dB}$  ( $65.0\%$ )、 $-2.10\ \text{dB}$  ( $61.7\%$ )、 $-1.68\ \text{dB}$  ( $67.9\%$ )和 $-1.74\ \text{dB}$  ( $67.0\%$ )。YILMAZ Y A等人<sup>[20]</sup>提出了一种基于目标优先法设计的 $1\times 2$ 、 $1\times 4$ 和 $1\times 6$ 这3种T型结构波分复用器,其尺寸分别为 $2.80\ \mu\text{m}\times 2.80\ \mu\text{m}$ 、 $4.60\ \mu\text{m}\times 2.80\ \mu\text{m}$ 和 $6.95\ \mu\text{m}\times 2.80\ \mu\text{m}$ 。其中, $1\ 310\ \text{nm}/1\ 550\ \text{nm}$ 双通道波分复用器的传输效率分别为 $-0.3\ \text{dB}$  ( $93.3\%$ )和 $-0.54\ \text{dB}$  ( $88.3\%$ ),而四通道波分复用器的平均传输效率为 $-1.9\ \text{dB}$  ( $64.6\%$ )。由此可见,波分复用器在尺寸与效率方面仍有较大的提升空间。DENG Z Y等人<sup>[21]</sup>利用深度学习方法设计了三通道任意比例的功分器。这表明,智能化设计是一条实现更高设计效率和更优设计结果的有效途径,在微纳器件领域具有巨大的应用潜力。

本文在运用遗传算法、移动渐近线法等智能逆向设计方法,设计波长路由器<sup>[9]</sup>、功率分束器<sup>[22]</sup>、偏振分束器<sup>[23]</sup>、全光逻辑门<sup>[24]</sup>等元件的基础上,提出一种多通道上微纳波分器的智能逆设计方法。该方法结合序列二次规划(SQP)算法与有限元法(FEM),并辅以插值、整形和二值化等技术手段来简化系统结构。

## 1 设计方法原理

SQP算法<sup>[25]</sup>,作为一种有效的优化工具,主要应用于机械建筑结构的设计领域<sup>[26]</sup>。在优化过程中,通过引入梯度惩罚因子对输入样本进行扰动,使得原本离散的2种介质变得梯度化,从而获得性能优良的系统结构设计。由于介质被梯度化处理,优化后的结构在2种离散介质之间的边界处会出现过渡介质。如果直接使用这种结构作为加工掩模板的矢量图,可能会导致边界不够清晰的问题。因此,本文对初步设计的结构进行了边界整形处理,移除过渡介质以实现界面介质的二值化,并删除了一些非关键性的细微结构,最终得到了一种相对平滑且简洁的系统结构。

本文分别假定3个输入波长分别为 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ ,全局优化目标函数设置为

$$F=(\eta_1 T_{1,\lambda_1}+\eta_2 T_{2,\lambda_2}+\eta_3 T_{3,\lambda_3})_{\max} \quad (1)$$

其中, $T_{1,\lambda_1}$ 、 $T_{2,\lambda_2}$ 、 $T_{3,\lambda_3}$ 分别为各对应波长的传输效率, $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 为对应波长的调节系数,目的是为保证各输出端竞争均衡,使各波长得到相对接近的传输效率,即各通道输出的信号强弱接近。在设计中,如果各输出端口没有位置上的优势,即从光通道结构来看竞争力较为均衡,那么可以将调节系数均设为1。若在计算过程中观察到某一端口的传输效率总是高于其它端口,这意味着该端口拥有竞争优势,此时可以通过减小其调节系数来降低该端口的竞争优势,从而实现各通道输出的相对均衡。例如,在Y型双通道解复用器的设计中,2个输出端口对称分布,并不存在竞争优劣的问题,因此可以将它们的调节系数都设定为1。而在十字型三通道解复用器的情况下,可能会出现端口间竞争力不同的现象,尤其是与输入端成直线连接的那个输出端通常会表现出明显的优势。在这种情况下,需要调整这个具有优势端口的系数,使其有所下降,以达到整体性能的平衡。

以树型四通道波分器设计为例,在一块尺寸为 $1.5\ \mu\text{m}\times 1.8\ \mu\text{m}$ 的 $\text{SiO}_2$ 衬底的硅基片上,拟设计一个四通道密集排列于同侧的硅基波分复用器。该复用器的波长分别为 $800$ 、 $900$ 、 $1\ 000$ 、 $1\ 100\ \text{nm}$ 。输入端(In)位于基片左侧中央,输出端(四端口为 $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$ 、 $O_4$ )均位于右侧。输入和输出波导的宽度均为 $0.3\ \mu\text{m}$ 。四通道波分器的设计示意图如图1所示。

四通道波分器的结构变化和设计流程图如图2所示。界面的初始状态为全硅,如图2(a)所示。由于设计的结构需要在硅片上进行蚀刻,蚀刻后的部分将被

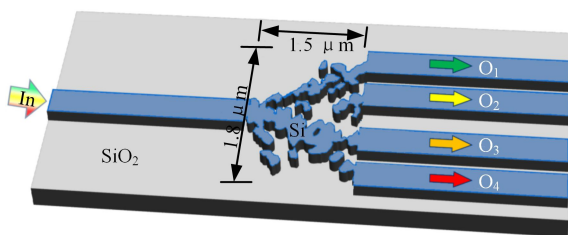


图1 四通道波分器的设计示意图

空气填充,因此在该设计中,另一种介质即为空气。设置好目标函数和梯度惩罚因子后,使用SQP算法进行结构优化,最终得到一个效果较好的初始优化结构,如图2(b)所示。在初结构中,发现一些微结构并不在光的传输路径中,这些结构对结果的影响可能不大。因此,为降低加工难度,本文删除了一些不重要的微结构,对系统结构进行了简化整形,得到一种简化后的最终结构,如图2(c)所示。四通道波分器设计流程图如图2(d)所示。

## 2 波分器的设计

本文采用SQP与FEM相结合的智能逆设计方法,设计出密集树形四通道波分器、异向输出四通道波分器、十字型三通道波分器、T型二通道波分器。

### 2.1 密集树形四通道波分器的波分效果

本文对简化后的波分器最终结构进行光场模拟和性能分析。密集树形四通道波分器不同波长的分束效果图如图3所示。可以看出,不同波长的光被清晰地分离并传输到指定的输出端口,表明该结构分束效果良好。

进一步对各波长的传输效率进行分析,设输入、输出端的功率分别为 $P_i$ 和 $P_o$ ,定义各波长的传输效率 $T$ 为该波长在指定端口的输出功率与输入功率之比,即

$$T = P_o / P_i \quad (2)$$

消光比(ER)用 $R$ 表示,定义为传输到目标端口的功率与串扰到其它端口的功率之比,即

$$R_{k, \lambda_k} = \frac{P_{k, \lambda_k}}{\sum_{i=1}^n P_{i, \lambda_k} - P_{k, \lambda_k}} \quad (3)$$

其中, $n$ 为输出端口总数; $k$ 为输出端口序号, $k=1,2,\dots,n$ ;  $P_{k, \lambda_k}$ 为波长 $\lambda_k$ 传输到 $k$ 端口的输出功率; $P_{i, \lambda_k}$ 为波长 $\lambda_k$ 传输到各输出端口的功率。

密集树形四通道波分器的传输效率和ER如图4所示。可以看出,四端口对应的传输效率峰值位置分别是在目标波长为800、900、1 000、1 100 nm上,

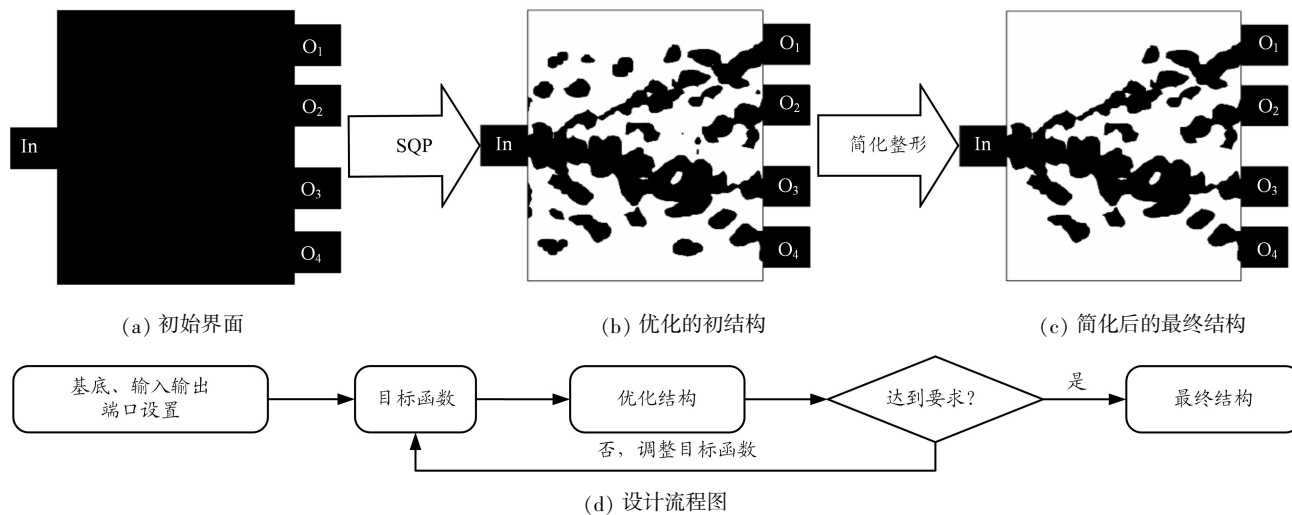


图2 四通道波分器的变化结构图及设计流程图

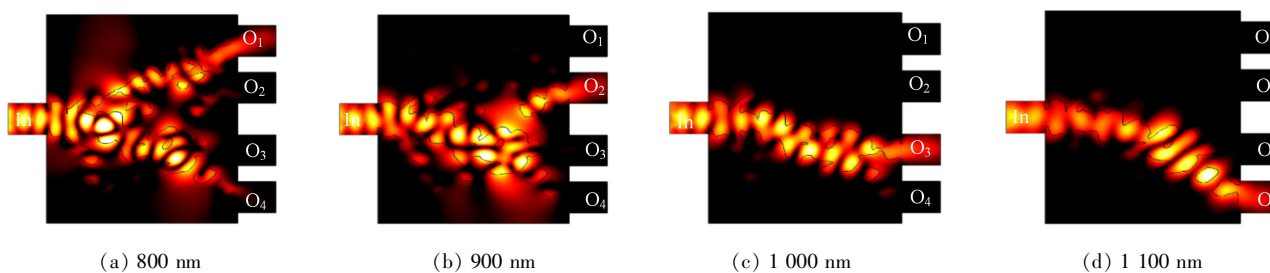


图3 密集树形四通道波分器不同波长的分束效果图

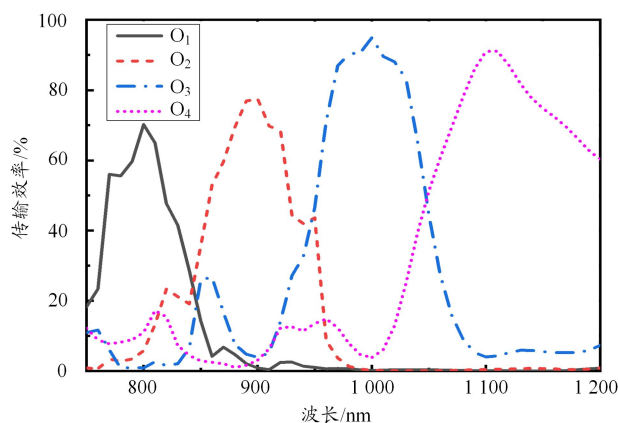


传输效率为 70%、77%、95%、91%，平均传输效率达到了 83.3%；四端口对应的 ER 峰值分别为 5.0(6.0 dB)、9.8(9.9 dB)、20.2(13.1 dB)和 20.0(13.0 dB)。这表明密集树形四通道波分器分束效果良好。

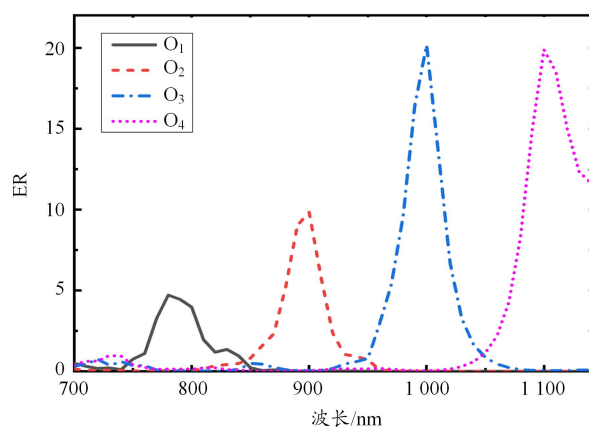
## 2.2 异向输出四通道波分器的设计结果

同样地,利用这种方法设计了一个尺寸为  $1.5\ \mu\text{m}\times 1.5\ \mu\text{m}$  的不同方向分束的硅基四通道波分器,输入输出波导宽度为  $0.4\ \mu\text{m}$ ,异向输出四通道波分器的结构

图和不同波长的分束效果图如图 5 所示。可以看出,不同波长的光被清晰地分离并传输到指定的输出端口。异向输出四通道波分器的传输效率和 ER 如图 6 所示。在波长为 790、890、990、1 090 nm 上,四端口的传输效率分别达到 85.8%、82.2%、80.7% 和 76.1%,平均传输效率达到了 81.2%,四端口对应的 ER 峰值分别为 726.9(28.6 dB)、45.3(17.1 dB)、378.8(25.8 dB)、134.9(21.3 dB)。这表明该波分器性能稳定。

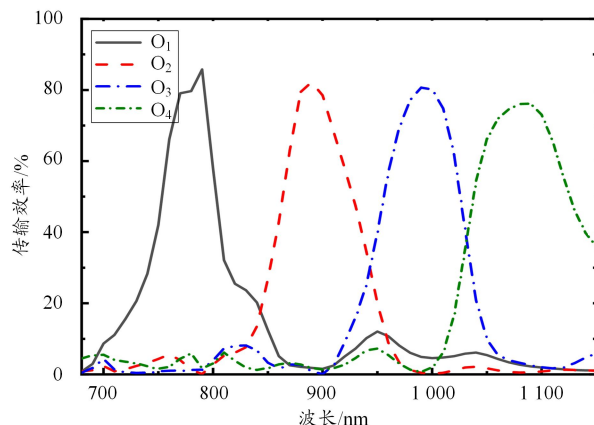


(a) 传输效率谱图

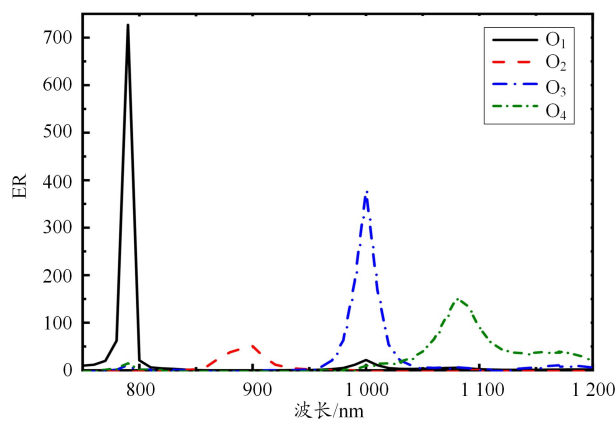


(b) ER 图

图 4 密集树形四通道波分器的传输效率和 ER



(a) 传输效率图



(b) ER 图

图 6 异向输出四通道波分器的传输效率和 ER

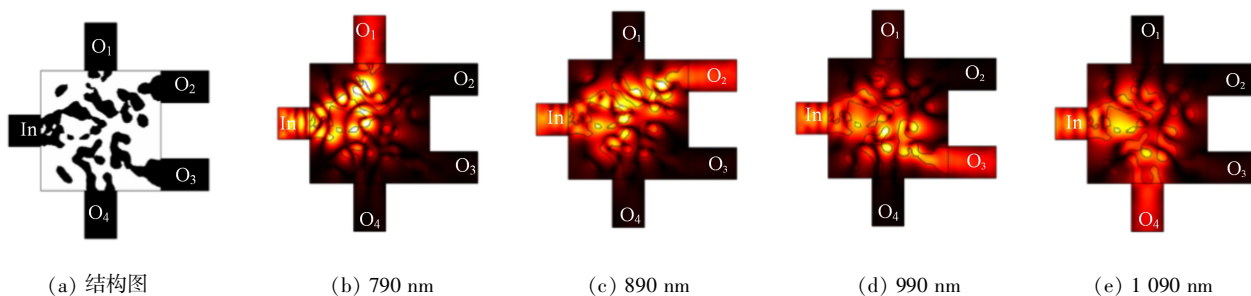


图 5 异向输出四通道波分器的结构图和不同波长的分束效果图

常乐瑶,王慧琴,李家祥,等:多通道片上微纳波分解复用器的智能逆设计

### 2.3 其它波分器的设计结果

本文还设计了其它二通道和三通道波分器。十字型三通道波分器的结构图和不同波长的分光效果图如图 7 所示。十字型三通道波分器的尺寸为  $1.5\ \mu\text{m} \times 1.5\ \mu\text{m}$ , 波导宽度为  $0.4\ \mu\text{m}$ , 实现了 770、870、970 nm

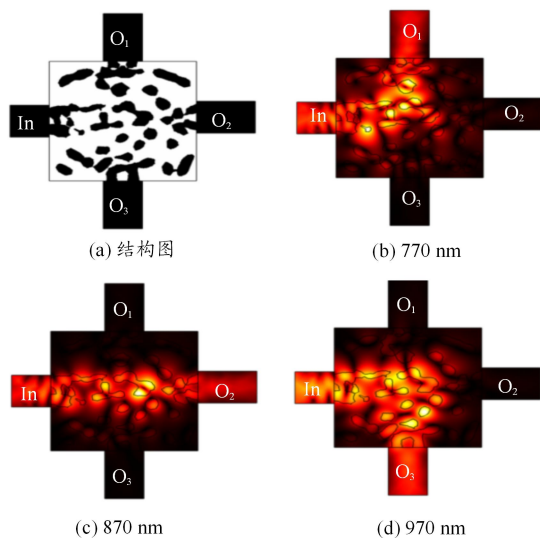
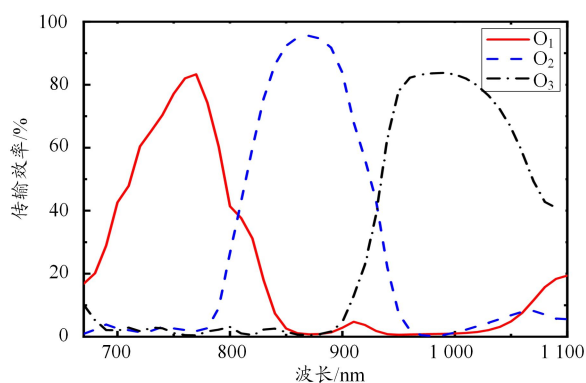
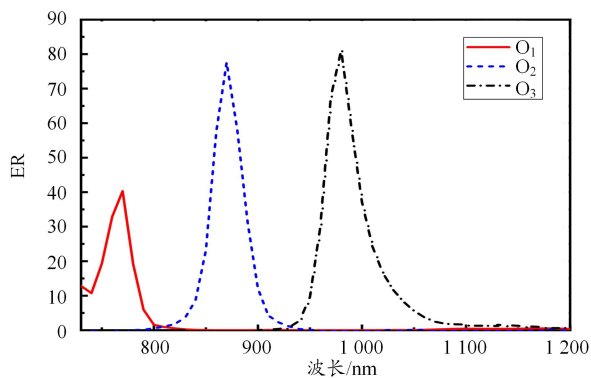


图 7 十字型三通道波分器的结构图和不同波长的分束效果图



(a) 传输效率图



(b) ER 图

图 8 十字型三通道硅基波分器的传输效率和 ER

三波长的分束。由图 7 可知,该结构的可见分束效果良好。十字型三通道波分器的传输效率和 ER 如图 8 所示。三波长的传输效率分别达到了 83%、96%和 83%, 平均传输效率达到了 87%, 对应的 ER 分别为 40.3 (16.0 dB)、77.6(18.9 dB)和 81.2(19.1 dB)。这表明该十字型波分器实现了三波长高效分束。

本文进一步缩小波长间隔,设计了尺寸为  $1.5\ \mu\text{m} \times 1.5\ \mu\text{m}$ 、波长间隔为 20 nm 的 T 型波分器,其输入、输出波导宽度分别为  $0.4\ \mu\text{m}$  和  $0.3\ \mu\text{m}$ , 实现了 790 nm 和 810 nm 两波长分束。T 型二通道波分器的结构图和分光效果如图 9 所示, 其传输效率和 ER 如图 10 所

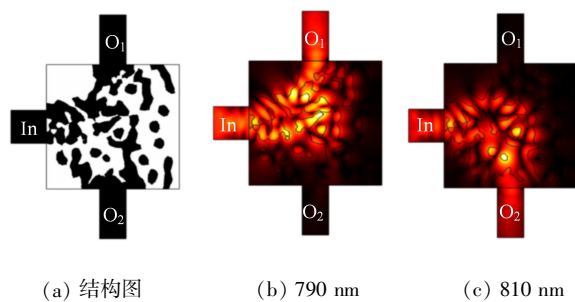
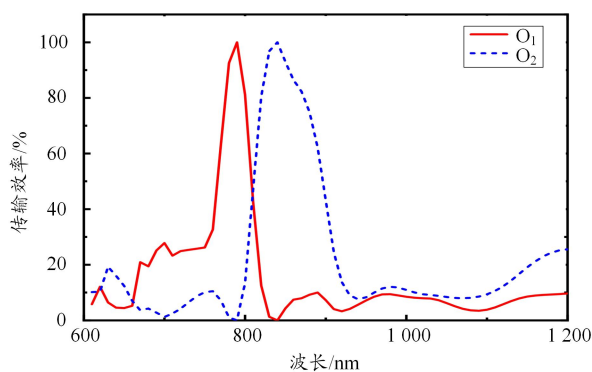
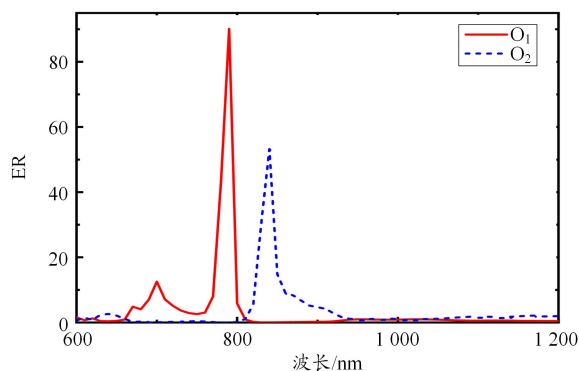


图 9 T 型二通道波分器的结构图和不同波长的分束效果图



(a) 传输效率图



(b) ER 图

图 10 T 型二通道波分器的传输效率和 ER

常乐瑶,王慧琴,李家祥,等:多通道片上微纳波分解复用器的智能逆设计

示。两波长的传输效率达到了 100%,ER 分别为 90.1 (19.5 dB)和 53.2(17.2 dB)。这表明该 T 型波分器实现了波长间隔仅为 20nm 的双光束大角度分离。

上述二、三、四通道波分器的尺寸均为目前文献报道中最小的,其性能均达到或超过了同类波分器的报道水平。器件内部的精细结构粒度大约在百纳米量级别,远高于当前硅片蚀刻工艺的尺寸要求。这表明所设计的器件不仅性能优良,而且具有良好的工艺兼容性。

### 3 结束语

本文提出了一种基于 SQP 算法的智能逆设计方法,并成功应用于波分器的设计。通过该方法,设计出了多种高效波分器,包括密集树型四通道波分器(平均传输效率为 83.3%)、异向输出的四通道波分器(平均传输效率为 81.2%)、十字型三通道波分器(平均传输效率为 87%)以及 T 型二通道波分器(波长间隔为 20 nm,传输效率为 100%)。这些波分器结构紧凑、性能优越,突破了传统设计方法的局限。智能逆设计方法具有对硬件需求低、鲁棒性好及适用性强等特点,为微纳光子器件设计提供了新思路,展现了其在片上集成光路领域的巨大潜力。

### 参考文献:

- [1] CHEN J Y. A broadband wavelength demultiplexer assisted by SWG-based directional couplers[J]. *Optik*, 2020, 202: 163602-1-163602-6.
- [2] PAN P, AN J, ZHANG J, et al. Flat-top AWG based on InP deep ridge waveguide[J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 376-381.
- [3] 桂聪,宋五洲,湛位,等.基于波长编码和阵列波导光栅解调的光纤位置传感器[J]. *光通信技术*, 2021, 45(10): 40-43.
- [4] 王婷婷,柯炜,王秀婷.基于并联游标效应的 MZ 光纤应变传感器增敏解调系统[J]. *光通信技术*, 2024, 48(1): 13-17.
- [5] JAYATILLEKA H, MURRAY K, CAVERLEY M, et al. Crosstalk in SOI microring resonator-based filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(12): 2886-2896.
- [6] AMMARI M, BENMERKHI A, BOUCHEMAT M. Four channel optical demultiplexer based on L2 photonic crystal microcavity[J]. *Optica Applicata*, 2022, 52(4): 613-625.
- [7] XU Y, ZHOU W, CHEN K H, et al. Y-branch wavelength demultiplexer based on topological valley photonic crystals[J]. *Optica & Laser Technology*, 2022, 155: 108422-1-108422-5.
- [8] FAGHANI A A, RAFIEE Z, AMANZADEH H, et al. Tunable band-pass plasmonic filter and wavelength triple-channel demultiplexer based on square nanodisk resonator in MIM waveguide[J]. *Optik*, 2022, 257: 168824-1-168824-8.
- [9] LIU Z H, LIU X H, LU C C, et al. Integrated nanophotonic wavelength router based on an intelligent algorithm[J]. *Optica*, 2019, 6(10): 1367-1373.
- [10] 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: 378-382.
- [11] PIGGOTTA Y, PETYKIEWICZ J, SU L, et al. Fabrication-constrained nanophotonic inverse design[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1786-1-1786-7.
- [12] MOLESKY S, LIN Z, PIGGOTT A Y, et al. Inverse design in nanophotonics[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12: 659-670.
- [13] SU L, PIGGOTT A Y, SAPRA N V, et al. Inverse design and demonstration of a compact on-chip narrowband three-channel wavelength demultiplexer[J]. *Acs Photonics*, 2018, 5(2): 301-305.
- [14] 黄名川,王旭东,吴楠.基于深度学习的室内可见光通信光源配置策略[J]. *光通信技术*, 2024, 48(2): 18-23.
- [15] 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.
- [16] MA H, HUANG J, ZHANG K, et al. Arbitrary-direction, multichannel and ultra-compact power splitters by inverse design method[J]. *Optics Communications*, 2020, 462: 125329-1-125329-7.
- [17] LU J, VUČKOVIĆ J. Nanophotonic computational design[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13351-13367.
- [18] SU L, PIGGOTT A Y, SAPRA N V, et al. Inverse design and demonstration of a compact on-chip narrowband three-channel wavelength demultiplexer[J]. *Acs Photonics*, 2018, 5(2): 301-305.
- [19] HAN J, HUANG J, WU J, et al. Inverse designed tunable four-channel wavelength demultiplexer[J]. *Optics Communications*, 2020, 465: 125606-1-125606-5.
- [20] YILMAZ Y A, ALPKILIC A M, YELTIK A, et al. Inverse design of efficient and compact  $1 \times N$  wavelength demultiplexer[J]. *Optics Communications*, 2020, 454: 124522-1-124522-7.
- [21] DENG Z Y, DANG Z Q, CHEN T, et al. 3-port beam splitter of arbitrary power ratio enabled by deep learning on a multimode waveguide[J]. *Optica & Laser Technology*, 2024, 169: 109950-1-109950-7.
- [22] WANG H Q, HUANG H, HU C Y, et al. Ultra-compact integrated 180-deg separation beam splitter on chip[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(11): 115102-1-115102-8.
- [23] HUANG H, XU H, WANG H, et al. Ultrabroadband and-compact chip-integrated polarization beam splitters based on intelligent inverse design method[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(1): 015105-1-015105-9.
- [24] WANG H Q, XU H Q, HUANG H, et al. Ultra-broadband and ultra-compact chip-integrated logic gates based on an inverse design method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 169: 110192-1-110192-9.
- [25] IZMAILOV A F, SOLODOV M V. On attraction of linearly constrained Lagrangian methods and of stabilized and quasi-Newton SQP methods to critical multipliers[J]. *Mathematical Programming*, 2011, 126(2): 231-257.
- [26] LABANDA S R, STOLPE M. An efficient second-order SQP method for structural topology optimization[J]. *Struct Multidisc Optim*, 2016, 53(6): 1315-1333.