

## 逆向设计的三波长功率分束解复用器\*

马汉斯<sup>1)†</sup> 孙樊<sup>1)</sup> 曹翊<sup>1)</sup> 童咏东<sup>1)</sup> 林振<sup>1)</sup> 邝应乐<sup>1)</sup>罗依茜<sup>1)</sup> 肖海川<sup>1)</sup> 高慧琴<sup>2)</sup> 杨静<sup>3)</sup> 杨俊波<sup>2)‡</sup>

1) (湖南工商大学微电子与物理学院, 长沙 410205)

2) (国防科技大学理学院, 长沙 410073)

3) (襄阳职业技术学院, 襄阳 441050)

(2026年2月21日收到; 2026年3月24日收到修改稿)

传统通信频段资源短缺导致波分复用器无法实现对光谱的有效利用. 针对这一挑战, 利用逆向设计算法设计了一种超紧凑的三波长功率分束解复用器 (three-wavelength power-splitting (de)multiplexer, 3W-PSDM). 该器件不仅可以同时实现功率分束和波分解复用的功能, 而且工作带宽覆盖 1310, 1550 和 2000 nm 波长. 在 1310, 1550 和 2000 nm 波长处, 对应单通道的仿真插入损耗 (insertion loss, IL) 分别约为 3.7, 3.6 和 3.6 dB, 仿真串扰 (crosstalk, CT) 分别小于 -23.2, -23.4 和 -22.0 dB, 3 dB 带宽分别约为 56, 54 和 893 nm. 此外, 提出了工作在不同波段的光子晶体带通滤波器, 与 3W-PSDM 对应的输出波导连接, 能够进一步减小 3 dB 带宽. 结合对应波长的带通滤波器后, 在 1310, 1550 和 2000 nm 波长处, 3W-PSDM 的仿真 IL 分别约为 4.0, 4.8 和 4.1 dB, 仿真 CT 分别小于 -19.6, -15.1 和 -26.2 dB, 3 dB 带宽分别约为 2, 6 和 8 nm.

**关键词:** 逆向设计算法, 三波长功率分束解复用器, 光子晶体带通滤波器**DOI:** 10.7498/aps.75.20260265**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260265

## 1 引言

在全球数字化加速、人工智能技术迅猛发展的背景下, 数据量与计算量正呈现出爆炸式增长的状态. 这一趋势对通信网络的传输容量和传输效率提出了前所未有的严苛要求<sup>[1,2]</sup>. 绝缘体上硅 (silicon on insulator, SOI) 材料, 由于其与互补金属氧化物半导体工艺相兼容和高折射率差优势, 已成为支撑大容量通信的核心平台. 在此背景下, 波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM)<sup>[3,4]</sup>、模分复用<sup>[5,6]</sup>、偏振复用<sup>[7,8]</sup> 等技术, 凭借并行传输信

息的能力获得迅猛发展. 尤其是 WDM 技术, 通过在单一光波导中对不同波长进行高效复用和解复用, 显著地提升了光波导的信息传输效率.

作为 WDM 系统中的核心器件, 波分复用器承担着将不同波长的光信号精准合并与分离的关键任务, 其工作带宽直接决定了整个 WDM 系统的传输容量. 目前大多数光子器件的工作波长集中在 1310 和 1550 nm 常用通信波段附近, 但从当前的发展态势来看, 1310 和 1550 nm 波段已无法满足通信需求. 为了应对现状, 通信波段正加速向新波段拓展. 其中备受关注的 2000 nm 波段, 是一个极具发展前景的新兴通信窗口, 已商用的掺铒光纤放

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF0706005)、国家自然科学基金 (批准号: 62305387, 12305268, 12075014)、国防科技大学基金 (批准号: ZK23-03)、湖南省自然科学基金 (批准号: 2023JJ40683, 2023JJ40223, 2024JJ6184, 2023JJ30195)、湖南省教育厅科研基金 (批准号: 24B0575, 22B0655, 22A0435) 和湖北省自然科学基金 (批准号: 2024AFB525) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mahansi2024@163.com

‡ 通信作者. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

大器为其提供了大带宽、高增益的信号放大支持<sup>[9]</sup>. Rouified 等<sup>[10]</sup>利用多模干涉耦合器 (multimode interference, MMI) 设计了支持 1550 和 2000 nm 波分复用器, 在目标波长下, 插入损耗 (insertion loss, IL) 分别为 0.14 和 1.2 dB, 串扰 (crosstalk, CT) 小于 -18.83 dB, 但其尺寸高达 293  $\mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ . 在 MMI 结构的基础上, Wang 等<sup>[11]</sup>通过引入亚波长光栅 (subwavelength gratings, SWG), 设计了支持 1550 和 2000 nm 波分复用器, 其 IL 小于 0.24 dB, CT 小于 -15.2 dB, 同时器件长度缩减为 34.48  $\mu\text{m}$ . 显然, 采用传统方法设计的波分解复用器因器件尺寸较大, 在大规模光子集成电路中的应用受到限制. 此外, 兼容 1310, 1550 和 2000 nm 三个重要波段的波分解复用器仍然缺乏.

近期, 受益于纳米尺度下对折射率的灵活调控能力, 逆向设计方法为优化超紧凑器件的设计提供了有效的途径, 已经广泛应用于超紧凑、高性能和多功能纳米光子器件的设计<sup>[12-14]</sup>. Huang 等<sup>[15]</sup>利用目标优先算法优化了尺寸仅为 2.4  $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  的聚焦双通道波分解复用器, 该器件直接与光栅耦合器连接, 可同步实现光栅耦合和波分解复用功能. 可以看出, 采用逆向设计方法可显著减小光子器件的尺寸. 与此同时, 基于该设计方法构建的波分解复用器具备与其他光子器件有效集成的能力. Sun 等<sup>[16]</sup>采用直接二进制搜索 (direct binary search, DBS) 算法设计了尺寸仅为 7.8  $\mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$  的双波段功率分束解复用器, 同时实现 1310 与 1550 nm 波长分离与功率分束功能. 在同一个波导尺寸下, 1310 与 1550 nm 波长跨度小, 二者模场分布与传输特性差异并不显著, 易于在同一结构中实现较为匹配的传输与调控. 然而, 1310—2000 nm 的波长间隔高达 700 nm, 短波长光场局域性极强, 而长波的模场由于衍射极限较大, 极易泄露到包层. 因此, 在同一器件内同时实现波长跨度差异显著的三个波段的功率分束与波分复用, 仍面临较大技术挑战.

针对该挑战, 利用 DBS 算法优化了一种超紧凑的三波长功率分束解复用器 (three-wavelength power-splitting (de)multiplexer, 3W-PSDM), 该器件不仅可以同时实现功率分束和波分解复用的功能, 而且工作带宽覆盖 1310, 1550 和 2000 nm 波长. 此外, 提出了光子晶体带通滤波器 (photonic crystal bandpass filter, PHC-BPF), 与 3W-PSDM

对应的输出波导连接, 能够进一步减小 3 dB 带宽. 此项工作为 WDM 系统实现高密度集成以及提高带宽利用率提供了坚实的理论依据和可靠的器件支持.

## 2 设计理论与器件仿真

### 2.1 设计理论

在逆向设计方法中, 为降低算法对初始结构的敏感性并提升优化效率, 通常利用等效理论模型构建高质量的初始结构, 为智能算法提供物理启发式的导向. 在功率分束器的设计中, Y 分支是常用的基础构型<sup>[17]</sup>. 本研究中的 3W-PSDM 旨在将三种波长分离至两个对称的输出波导中. 不同波长在同一波导内的有效折射率存在差异, 导致光束的空间分离位置各异. 基于这一特性, 可以参考功率分束器的设计模型, 采用如图 1 所示的“级联 Y 型分支”作为基础结构. 其中, 黑色、蓝色、红色实线分别表示 Y 分支物理模型. 在此物理模型的基础上, 进一步提取出离散等效理论模型, 并将其作为后续优化的初始结构.

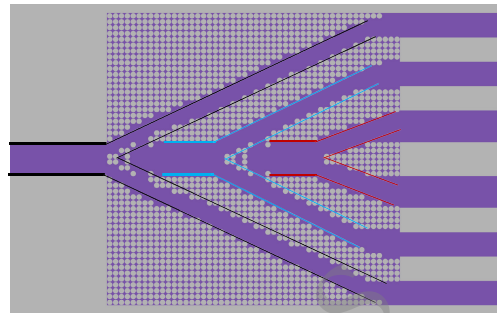


图 1 3W-PSDM 初始结构  
Fig. 1. 3W-PSDM initial structure.

传统波导结构只能线性地对光进行调控, 通常需要较长的耦合或干涉区域以达到目标. 相比之下, 逆向设计的离散结构能够在波导内构建复杂且非均匀的有效折射率场, 为光学调控带来新的可能. 当光波经过时, 亚波长尺度的离散结构会产生强烈的局域散射, 从而打破线性调控的限制, 实现对局部波长、振幅和模式等光学特性的精确调控, 能够在极大缩小尺寸的同时提升性能.

本文先基于 Y 分支理论设置高质量的初始结构, 随后利用 DBS 算法对局部区域进行离散化逆向优化. 该算法通过离散的结构为设计区域赋予充

足的自由度, 凭借其出色的搜索能力使设计区域的优化过程快速收敛. DBS 算法优化流程如图 2 所示, 算法开始前会将设计区域离散成像素矩阵, 每个像素通过材料的调控而拥有“0”和“1”两种状态. 算法开始后, 首先会随机选择一个像素, 计算该像素在两种状态下器件的品质因子 (figures of merit, FOM), FOM 可以根据优化目标进行编码; 其次, 比较像素在两种状态下器件的 FOM 值, 保留性能更优的状态; 最后, 算法继续搜索像素, 重复上述计算. 按照一定顺序完成所有像素的计算为一次迭代, 循环迭代直至器件性能不再提升, 算法停止.

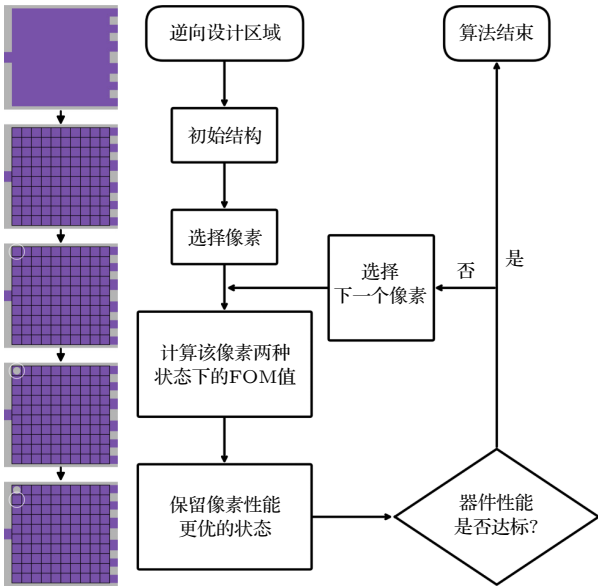


图 2 DBS 算法流程图  
 Fig. 2. DBS algorithm flowchart.

## 2.2 宽带 3 W-PSDM

3W-PSDM 旨在将 1310, 1550 和 2000 nm 波长分离至各自波导, 并实现各波长 1:1 的功率分束. 图 3 为 3W-PSDM 三维结构示意图, 该器件由输入波导 Port 0、设计区域和输出波导阵列 Port 1—6 组成. 指定带宽光束从输入波导 Port 0 注入器件, 随后进入逆向设计区域完成功率均分与波长分离, 最终从对应的输出波导输出. 其中, 1310 nm 波段光束从 Port 2 和 Port 5 输出; 1550 nm 波段光束从 Port 1 和 Port 6 输出; 2000 nm 波段光束则从 Port 3 和 Port 4 输出.

3W-PSDM 基于 SOI 平台设计, 顶层硅厚度为 220 nm, 包层材料为 SiO<sub>2</sub>. 图 4(a) 展示了波长分别为 1310, 1550 和 2000 nm 时, 波导有效折射率

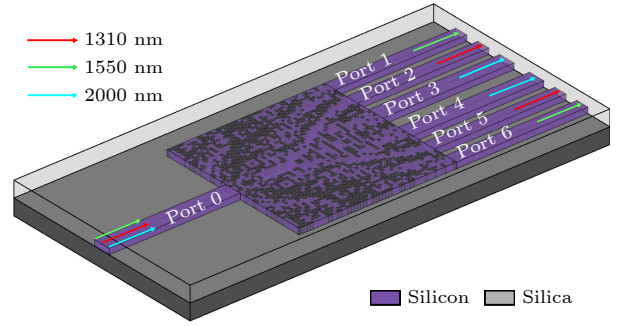


图 3 3W-PSDM 三维结构示意图  
 Fig. 3. 3D schematic diagram of 3W-PSDM.

随波导宽度的变化曲线. 由于长波模场受衍射极限影响更为显著, 模场极易泄露至包层中, 如图 4(b) 所示. 为此, Port 0, Port 3 和 Port 4 的波导宽度设为 650 nm, 以支持 2000 nm 波长的有效传输; Port 1, Port 2, Port 5 和 Port 6 的宽度设为 500 nm, 以满足 1310 和 1550 nm 波长的稳定传输. 此外, 为避免相邻波导间发生模式耦合, 同时保证设计区域可被均匀划分为整数个像素单元, 将 Port 1 与 Port 2, Port 2 与 Port 3, Port 4 与 Port 5, Port 5 与 Port 6 的间距均设为 500 nm, Port 3 与 Port 4 的间距设为 700 nm. 整个器件设计区域尺寸为 6 μm × 6 μm, 被离散为 50 pixel × 50 pixel 的像素矩阵, 单个像素单元大小为 120 nm × 120 nm. 像素单元的“1”状态为填充硅材料, “0”状态则是在“1”状态的中心刻蚀一个直径为 90 nm, 高为 220 nm 的圆柱, 并在该圆柱内填充二氧化硅材料. 像素单元的尺寸与状态的设定综合考虑了工艺经验与器件性能需求, 且完全兼容现有微纳加工工艺.

DBS 算法对设计区域进行优化时, 采用 ANSYS Lumerical 仿真软件中的时域有限差分算法进行电磁场模拟计算. 优化过程中, 网格步长为  $d_x = 30$  nm,  $d_y = 30$  nm,  $d_z = 30$  nm. 3W-PSDM 的 FOM 函数定义为

$$\text{FOM} = \alpha \sum_{\substack{i,j=1 \\ i=j}}^3 \lambda_{ij} - (1 - \alpha) \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^3 \lambda_{ij}, \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为权重因子;  $\lambda_{ij}$  为  $i$  波导中  $j$  波长的透过率. 对于 3W-PSDM,  $\lambda_{i1}$ ,  $\lambda_{i2}$ ,  $\lambda_{i3}$  分别为 1550 nm, 1310 nm, 2000 nm 波长. 在优化过程中, 设计区域以图 3 中黑色虚线对称, 这样不仅可以实现完美的 1:1 功率分束, 而且大幅度降低计算复杂度和迭代时间. 经过优化, 3 W-PSDM 的最终结构、光场

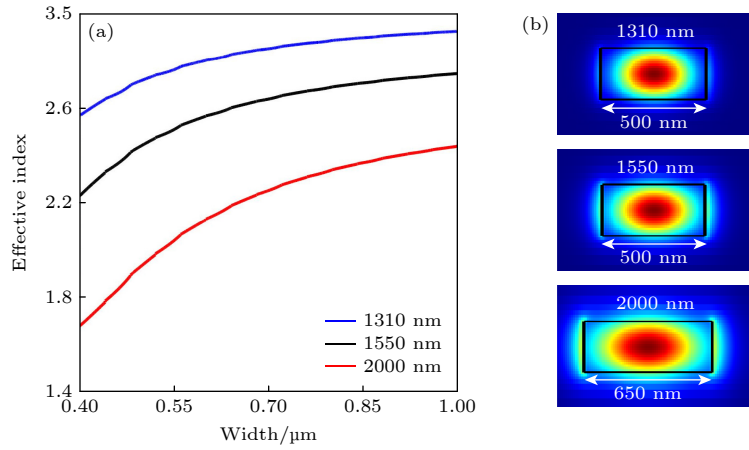


图 4 220 nm 厚的硅波导有效折射率 (a) 波长为 1310, 1550 和 2000 nm 时波导有效折射率; (b) 1310, 1550 和 2000 nm 波长的模场分布

Fig. 4. Effective refractive index of 220 nm-thick silicon waveguide: (a) Waveguide effective refractive index at 1310, 1550 and 2000 nm; (b) mode field distribution at 1310, 1550 and 2000 nm.

分布和仿真结果分别如图 5(a)—(c) 所示. 在 1310, 1550, 2000 nm 波长处, 对应单通道的仿真 IL 分别约为 3.7, 3.6 和 3.6 dB, 仿真 CT 分别小于 -23.2, -23.4 和 -22.0 dB, 3 dB 带宽分别约为 56, 54 和 893 nm. 通过改变 FOM 目标函数以及权重因子, 还能进一步对器件的 IL, CT 及带宽等性能进行调节.

### 2.3 窄带 3W-PSDM

3W-PSDM 的 3 dB 带宽偏大, 尤其在 2000 nm 波段更为明显, 不利于密集波分复用系统应用. 为进一步降低 3W-PSDM 的 3 dB 带宽, 提出在其各输出端口分别级联对应波长的光子晶体带通滤波

器 (photonic crystal bandpass filter, PHC-BPF). 各 PHC-BPF 均与 3W-PSDM 对应输出波导直接相连, 因此波导宽度 ( $W$ ) 与对应输出波导保持一致. 每个 PHC-BPF 均由两个不同周期的 PHC 阵列串联构成. PHC 阵列都具备带阻特性, 中心过滤波长由布拉格共振条件计算:

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为布拉格中心波长;  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率;  $\Lambda$  为 PHC 阵列的周期.

以输出波导 Port 1 和 Port 6 处的 PHC-BPF 为例. 每个 PHC 单元均是直径为  $D = 90$  nm 的二氧化硅圆柱, 这样其结构参数可以与 3 W-PSDM 保持一致. 为实现  $\lambda_3 = 1550$  nm 带通功能, 设计了

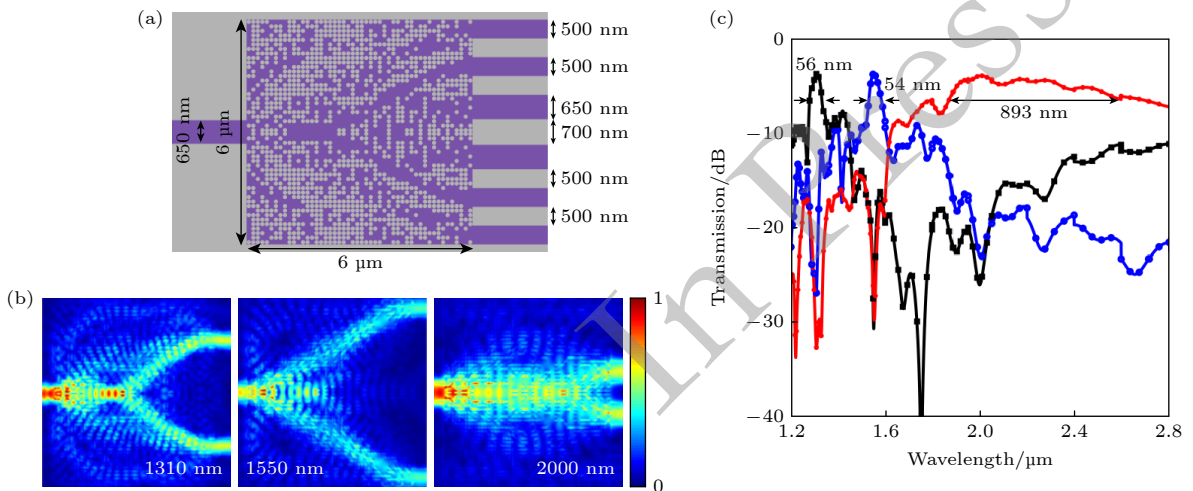


图 5 3W-PSDM 仿真结果 (a) 最终结构; (b) 光场分布; (c) 透射光谱

Fig. 5. 3W-PSDM simulated results: (a) Final structure; (b) optical field distribution; (c) transmission spectra.

两个中心波长分别为  $\lambda_1 = 1500$  nm 和  $\lambda_2 = 1600$  nm 的带阻 PHC 阵列, 透射光谱分别如图 6(a) 和图 6(b) 所示. 当两个 PHC 阵列的周期分别为  $\Lambda_1 = 315$  nm 和  $\Lambda_2 = 353$  nm, 且圆柱单元为  $N_1 = N_2 = 30$  时, 其中心波长分别对应 1500 和 1600 nm, 插入损耗分别约为 28.4 和 23.7 dB.

由上述两组带阻 PHC 阵列级联, 可构成中心波长 1550 nm 的 PHC-BPF, 其结构示意图、光场分布及透射谱分别如图 7(a)—(c) 所示. 结果表明, 1500 与 1600 nm 波长被有效反射, 而 1550 nm 波长可高效传输. 该滤波器中心波长为 1550 nm, 其 IL 约为 0.5 dB; 在 1455—1543 nm 与 1557—1645 nm 阻带范围内, IL 均大于 25 dB, 3 dB 带宽仅为 6 nm.

按照相同设计思路, 可完成其余输出端口对应 PHC-BPF 的参数优化, 具体结构参数如表 1 所列. 其中, Port 2 与 Port 5 处的 1310 nm 带通 PHC-BPF 由中心阻带波长 1260 nm 和 1360 nm 的两组 PHC 阵列构成, 圆柱单元数分别为 38 和 32; Port 3 与 Port 4 处的 2000 nm 带通 PHC-BPF 由中心阻带波长 1960 和 2040 nm 的两组 PHC 阵列构成, 单元数均为 40.

通过结合 3W-PSDM 和 PHC-BPF 可以实现 3 dB 带宽的减小, 结构如图 8(a) 所示, 其尺寸约为  $6 \mu\text{m} \times 47 \mu\text{m}$ . 该结构的光场分布和透射光谱分别如图 8(b)—(e) 所示, 在 1310, 1550, 2000 nm 波长处, 对应单通道的仿真 IL 分别约为 4.0, 4.8 和 4.1 dB, 仿真 CT 分别小于 -19.6, -15.1 和 -26.2 dB,

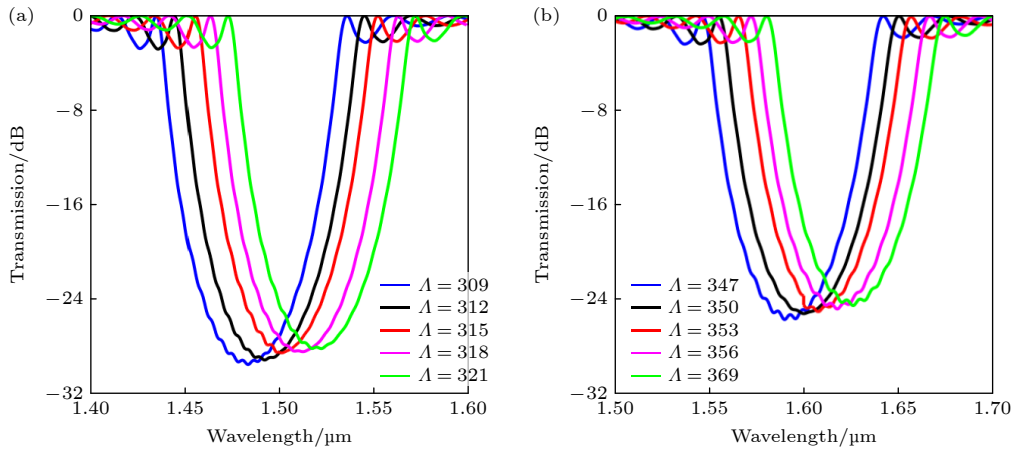


图 6 1500 和 1600 带阻 PHC 阵列仿真结果 (a) 1500 nm 带阻 PHC 阵列的透射光谱; (b) 1600 nm 带阻 PHC 阵列的透射光谱  
Fig. 6. Simulated results of 1500 and 1600 nm band stop PHC arrays: (a) Transmission spectra of 1500 nm band stop PHC array; (b) transmission spectra of 1600 nm band stop PHC array.

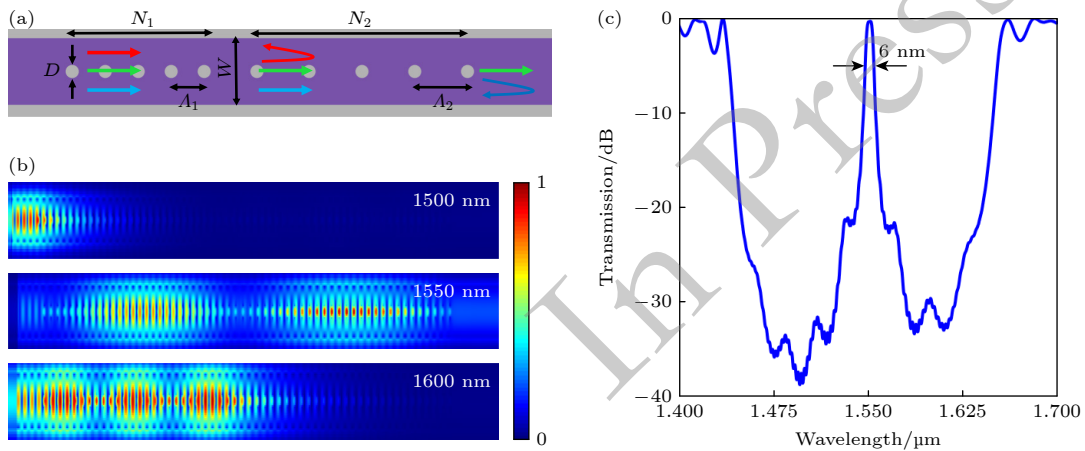


图 7 1550 nm 带通的 PHC-BPF 仿真结果 (a) 示意图; (b) 光场分布; (c) 透射光谱

Fig. 7. Simulated results of 1550 nm band pass PHC-BPF: (a) Schematic diagram; (b) optical field distribution; (c) transmission spectra.

表 1 PHC-BPF 的参数  
 Table 1. PHC-BPF parameters.

Parameters	$\lambda_1/\text{nm}$	$\lambda_2/\text{nm}$	$\lambda_3/\text{nm}$	$A_1/\text{nm}$	$A_2/\text{nm}$	$D/\text{nm}$	$N_1$	$N_2$	$W/\text{nm}$
Port 1/Port 6	1500	1600	1550	315	353	90	30	30	500
Port 2/Port 5	1260	1360	1310	242	274	90	38	32	500
Port 3/Port 4	1960	2040	2000	451	485	90	40	40	650

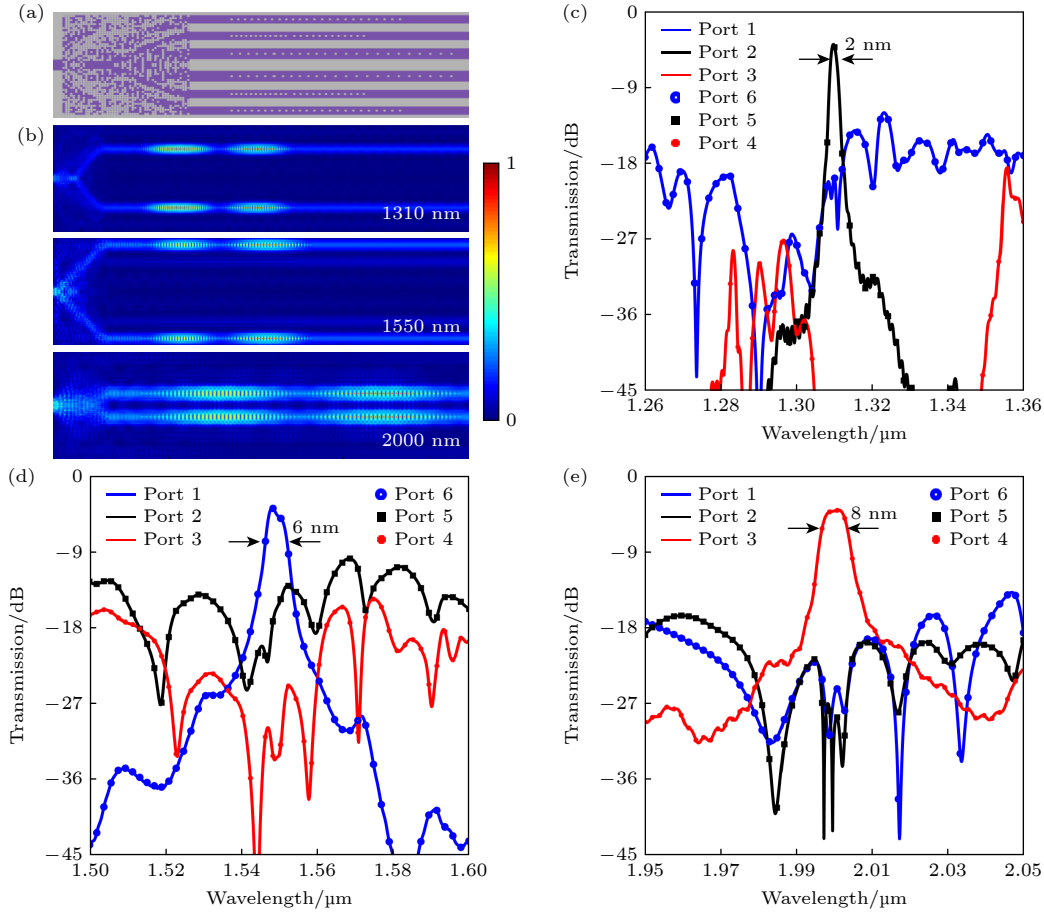


图 8 连接 PHC-BPF 的 3W-PSDM 的仿真结果 (a) 3 结构示意图; (b) 光场分布; (c)–(e) 透射光谱

Fig. 8. Simulated results of 3W-PSDM connected with PHC-BPFs: (a) Schematic diagram; (b) optical field distribution; (c)–(e) transmission spectra.

3 dB 带宽分别约为 2, 6 和 8 nm. 与未集成 PHC-BPF 的 3W-PSDM 相比, 虽然器件尺寸和损耗有所增加, 但是 3 dB 带宽得到有效的减小.

## 3 讨论

### 3.1 加工容差

为确保器件性能的稳健性, 必须充分考虑实际制备中的随机误差, 开展加工容差分析. 在 1310, 1550, 2000 nm 波长下, 3W-PSDM 性能随像素单元大小的变化情况分别如图 9(a)–(c) 所示. 当像素单元尺寸在  $-5$ – $5$  nm 范围内变动时, 对器件性

能产生的影响较小, 在 1310, 1550, 2000 nm 波长处, 对应单通道的仿真 IL 仍分别小于 6.5, 6.4 和 4.2 dB, 所有通道的仿真 CT 皆小于  $-12.6$  dB. 因此, 在像素单元直径存在一定制备偏差的情况下, 3W-PSDM 依然能够保持相对稳定的性能表现, 具有相对较高的加工鲁棒性.

### 3.2 性能对比

在物理层面上, 光信号处理包括时间、振幅、波长、空间和偏振五个维度 [18]. 其中, 波分复用器作为处理波长维度信息的重要器件, 能够实现不同波长信号的复用与解复用功能. 如表 2 所列, Routed

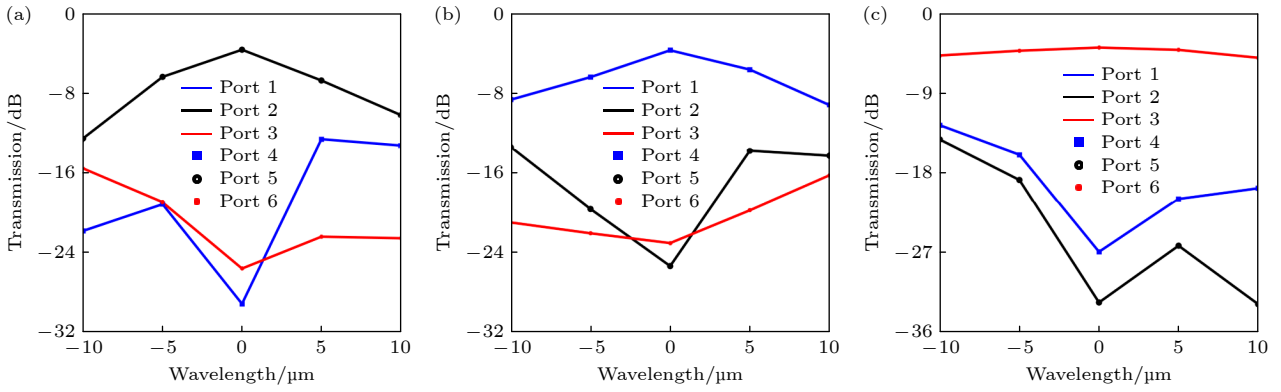


图 9 3W-PSDM 的加工容差分析 (a)–(c) 器件性能随像素单元大小的变化

Fig. 9. 3W-PSDM fabrication tolerances: (a)–(c) Device performance varies with rib thickness and pixel size.

表 2 波分解复用器性能对比

Table 2. Performance comparison of wavelength division multiplexers.

Structure	Function	Design scheme	Footprint/ $\mu\text{m}$	Wavelength/nm	Performance/dB
[11]	Wavelength division multiplexing	MMI	$2 \times 34.48$	1 310 and 1 550	Simulated IL < 0.24
[19]	Wavelength division multiplexing	DBS algorithm	$7.2 \times 12$	1500, 1520, 1540, 1560, 1580 and 1600	Simulated IL < 0.25
[20]	Wavelength division multiplexing	Topology optimization	$3 \times 12$	1550 and 2000	Measured IL < 1.2
[16]	Power splitting and wavelength division multiplexing	DBS algorithm	$7.8 \times 5.2$	1 310 and 1 550	Measured IL < 0.37
This work	Power splitting and wavelength division multiplexing	DBS algorithm	$6 \times 6$	1 310, 1 550, and 2000	Measured single-channel IL < 3.7

等<sup>[11]</sup>引入 SWG 结构,设计了一种支持 1550 和 2000 nm 双波段工作的波分复用器,其尺寸为  $34.48 \mu\text{m}$ . 为缩小器件尺寸, Wu 等<sup>[19]</sup>采用逆向设计算法,优化得到尺寸仅为  $7.2 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$  的 6 通道波分复用器,所有通道的 IL 均小于 2.5 dB. 同样基于逆向设计方法, Deng 等<sup>[20]</sup>进一步将工作波段扩展至 2000 nm,实现了尺寸为  $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$  的 2 通道波分复用器,所有通道的 IL 均小于 1.2 dB. 此外,波分复用器还可以与其他维度融合,拓展其功能性. 例如, Sun 等<sup>[16]</sup>将波分解复用功能与偏振维度相结合,实现了 1310 nm 与 1550 nm 波长分离及功率分束功能. 相比之下,本文提出的 3 W-PSDM 器件具有超紧凑尺寸,支持功率分束与波分解复用功能,并覆盖 1310, 1550 和 2000 nm 三个重要波段.

## 4 结 论

波分复用器的工作带宽是衡量整个 WDM 系统传输容量的关键指标. 然而,传统 1310 和 1550 nm 通信频段资源日益紧张,使得波分复用器难以实现对光谱的有效利用. 为了将通信频段扩展

到 2000 nm 波段,利用逆向设计算法设计了一种超紧凑的 3W-PSDM,其不仅可以同时实现功率分束和波分解复用的功能,而且工作带宽覆盖 1310, 1550 和 2000 nm 波长. 在这三个波长处,对应单通道的仿真 IL 分别约为 3.7, 3.6 和 3.6 dB,仿真 CT 分别小于  $-23.2$ ,  $-23.4$  和  $-22.0$  dB. 此外,为了进一步减小 3 dB 带宽,提出了工作在不同波段的光子晶体带通滤波器. 通过将对应输出波导与光子晶体带通滤波器连接,在 1310, 1550 和 2000 nm 波长, 3W-PSDM 的仿真 IL 分别约为 4.0, 4.8 和 4.1 dB,仿真 CT 分别小于  $-19.6$ ,  $-15.1$  dB 和  $-26.2$  dB, 3 dB 带宽分别约为 2, 6 和 8 nm. 上述研究对推动 WDM 系统向更高性能、更集成化、更多带宽方向发展具有重要意义.

## 参考文献

- [1] Deng M, Cotrufo M, Wang J, Dong J J, Ruan Z C, Alù A, Chen L 2024 *Nat. Commun.* **15** 2237
- [2] Dai D X, Bowers J E 2014 *Nanophotonics* **3** 283
- [3] Hulyal S U, Hu J Q, Wang C L, Cai J C, Lihachev G, Kippenberg T J 2025 *Optica* **12** 978
- [4] Xu L H, Wang Y, Mao D, El-Fiky E, Xing Z P, Kumar A, Saber M G, Jacques M X, Plant D V 2019 *Opt. Lett.* **44** 1770
- [5] Sun A L, Xing S Z, Deng X Y, Shen R Y, Yan A, Hu F C,

- Yuan Y Q, Dong B Y, Zhao J H, Huang O H, Li Z W, Shi J Y, Zhou Y J, Shen C, Zhao Y H, Hong B Z, Chu W, Zhang J W, Cai H W, Chi N 2025 *Nat. Commun.* **16** 2372.
- [6] Jiang W F, Mao S Q, Hu J Z 2023 *Opt. Express* **31** 33253
- [7] Liu S W, Huo Y J, Cheng C, Niu J Q, Fu X, Yang L 2024 *J. Lightwave Technol.* **42** 1
- [8] Ma H S, Lin Z, He X, Hou H L, Li X L, He L F, Gan L F, Zhao N, Xu H, Zhou L J, Wu J G, Yang J B 2026 *Acta Phys. Sin.* **75** 040401 (in Chinese) [马汉斯, 林振, 何新, 侯海良, 李雪垒, 贺龙辉, 甘龙飞, 赵娜, 许辉, 周灵钧, 吴加贵, 杨俊波 2026 物理学报 **75** 040401]
- [9] Li Z, Heidt A M, Simakov N, Jung Y, Daniel J M O, Alam S U, Richardson D J 2013 *Opt. Express* **21** 26450
- [10] Rouified M S, Littlejohns C G, Tina G X, Qiu H, Soler Penades J, Nedeljkovic M, Zhang Z, Liu C, Thomson D J, Mashanovich G Z, Reed G T, Wang H 2017 *Opt. Express* **25** 10893
- [11] Wang F L, Xu X, Sun C L, Zhao J 2021 *Opt. Eng.* **60** 087104
- [12] Shen R Y, Hu F C, Hong B Z, Wang X, Sun A L, Zhang J W, Zhao H B, Chi N, Chu W, Cai H W, Huang W P 2024 *Photonics Res.* **12** 2891
- [13] Digiorgio V, Senica U, Micheletti P, Beck M, Faist J, Scalari G 2025 *Nat. Commun.* **16** 62557
- [14] Pita Ruiz J L, Dalvand N, Ménard M 2025 *Nat. Commun.* **16** 64359
- [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 2019 *Nanophotonics* **9** 159
- [16] Sun A L, Deng X Y, Xing S Z, Li Z Y, Jia J L, Li G Q, Yan A, Luo P H, Li Y X, Luo Z T, Shi J Y, Li Z W, Shen C, Hong B Z, Chu W, Xiao X, Chi N, Zhang J W 2023 *Opt. Express* **31** 25415
- [17] Wang Z C, Peng Z, Zhang Y Q, Wu Y L, Hu Y Q, Wu J G, Yang J B 2023 *Opt. Express* **31** 15904
- [18] Huang Z R, Wang Z Y, Cheng Y Z, Li X C, Wang J, Zhou L, Xu H X, Luo X G, Chen L 2025 *Sci. China Phys. Mech.* **68** 274201
- [19] Wu R, Ding F Y, Li F, Liu Y J 2024 *J. Lightwave Technol.* **42** 4899
- [20] Deng X Y, Sun A L, Yi Q Y, Cheng G L, Xing S Z, Shi J Y, Li Z W, Shen C, Zou Y, Shen L, Zhang J W, Chi N 2024 *J. Lightw. Technol.* **42** 5231

## Inverse-designed three-wavelength power-splitting (de)multiplexer\*

MA Hansi<sup>1)†</sup> SUN Fan<sup>1)</sup> CAO Yi<sup>1)</sup> TONG Yongdong<sup>1)</sup> LIN Zhen<sup>1)</sup>  
 KUANG Yingle<sup>1)</sup> LUO Yiqian<sup>1)</sup> XIAO Haichuan<sup>1)</sup> GAO Huiqin<sup>2)</sup>  
 YANG Jing<sup>3)</sup> YANG Junbo<sup>2)‡</sup>

1) (School of Microelectronics and Physics, Hunan University of Technology and Business, Changsha, Hunan 410205, China)

2) (Department of Physics, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

3) (Xiangyang Polytechnic, Xiangyang, Hubei 441050, China)

(Received 21 February 2026; revised manuscript received 24 March 2026)

### Abstract

Multiplexing technology has rapidly developed due to its ability for parallel information transmission. In particular, wavelength division multiplexing (WDM) technologies significantly improve the information transmission efficiency by effectively multiplexing and demultiplexing different wavelengths in a single optical waveguide. As the core device in the WDM system, the wavelength division multiplexer undertakes the key task of accurately combining and separating optical signals of different wavelengths. Its working bandwidth directly determines the transmission capacity of the entire WDM system. To address the challenge that

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFF0706005), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62305387, 12305268, 12075014), the National University of Defense Technology Foundation, China (Grant No. ZK23-03), the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant Nos. 2023JJ40683, 2023JJ40223, 2024JJ6184, 2023JJ30195), the Scientific Research Foundation of the Education Department of Hunan Province, China (Grant Nos. 24B0575, 22B0655, 22A0435), the Natural Science Foundation of Hubei Province, China (Grant No. 2024AFB525).

† Corresponding author. E-mail: mahansi2024@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

conventional wavelength division multiplexers cannot effectively utilize the spectrum due to limited traditional communication band resources, an ultra-compact three-wavelength power-splitting (de)multiplexer (3W-PSDM) is designed using an inverse design algorithm. The device not only performs power splitting and wavelength division multiplexing simultaneously, but also operates at 1310, 1550, and 2000 nm. The simulated insertion losses (ILs) for the corresponding channels are about 3.7, 3.6 and 3.6 dB at 1310, 1550 and 2000 nm, respectively. The simulated crosstalks (CTs) are lower than  $-23.2$ ,  $-23.4$ , and  $-22.0$  dB, respectively. The 3 dB bandwidths are about 56, 54, and 893 nm, respectively. In addition, photonic crystal bandpass filters operating at different wavebands are proposed, which can be connected with the corresponding output waveguides of 3W-PSDM to reduce 3 dB bandwidths. When combined with photonic crystal bandpass filters, 3W-PSDM exhibits that the simulated ILs are about 4.0, 4.8 and 4.1 dB at 1310, 1550, and 2000 nm, respectively. The simulated CTs are lower than  $-19.6$ ,  $-15.1$ , and  $-26.2$  dB, respectively. In addition, 3 dB bandwidths are about 2, 6, and 8 nm, respectively.

**Keywords:** inverse design algorithm, three-wavelength power-splitting demultiplexer, photonic crystal bandpass filters

**DOI:** [10.7498/aps.75.20260265](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260265)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20260265](https://cstr.net.cn/ipac/32037.14.aps.75.20260265)

In Press