

小型化高性能光子晶体分束集束融合设计

冯俊杰,华昌洲*

(宁波大学 信息科学与工程学院,浙江 宁波 315211)

摘要:为克服光器件功能单一、传统出射光集束结构复杂与面积大的局限,基于二维三角晶格光子晶体波导,设计一种小型化高性能光子晶体分束集束器。该器件在结构中心引入耦合微腔实现分束功能,并在输出端两侧各设置2个微腔用于出射光集束。利用时域有限差分(FDTD)法仿真表明:通过调节中心微腔中2个介质柱半径 R_1 与 R_2 ,可在总透射率不低于99%的条件下,实现直通、上下对称输出及三通道均分等多种分束比例;同时,输出端的微腔结构使光波在简化设计中获得约70 μm 的稳定辐射距离,且无旁瓣产生。

关键词:光子晶体;光分束器;出射光集束;微腔;时域有限差分法

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0072-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.012

Miniaturized and high-performance integrated design of photonic crystal beam splitter and combiner

FENG Junjie, HUA Changzhou*

(Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China)

Abstract: To overcome the limitations of single functionality in photonic devices and the structural complexity and large footprint of conventional beam-combining/output-collecting architectures, a compact and high-performance photonic crystal beam splitter and combiner is designed based on a two-dimensional triangular-lattice photonic crystal waveguide. The device introduces a coupled micro-cavity at its center to achieve beam splitting, while two micro-cavities are placed on each side of the output ports for beam combining/collimating of the emitted light. Finite-difference time-domain (FDTD) simulations demonstrate that by adjusting the radii R_1 and R_2 of the two dielectric rods in the central micro-cavity, various splitting ratios—such as straight-through transmission, symmetric upper-lower output, and equal three-way splitting—can be realized with a total transmittance of no less than 99%. Meanwhile, the micro-cavity structures at the output enable the light waves to achieve a stable radiation distance of about 70 μm in a simplified design without generating side-lobes.

Key words: photonic crystal, optical beam splitter, output-beam combining, microcavity, finite-difference time-domain method

0 引言

光子晶体作为一种周期性介电结构材料,自Yablonovitch E^[1]和John S^[2]于1987年提出概念以来,因

收稿日期:2025-02-15。

基金项目:国家自然科学基金项目(62271273)资助;宁波市青年科技创新领军人才项目(2024QL043)资助。

作者简介:冯俊杰(2000—),男,硕士研究生,现就读于宁波大学信息科学与工程学院信息与通信工程专业,主要研究方向为光子晶体多功能光通信器件。

***通信作者:**华昌洲(1984—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为多功能融合光子晶体器件一体化。



其独特的光子禁带与局域特性,已成为光子集成领域的关键研究方向之一^[1-4]。通过灵活构造点缺陷与线缺陷,光子晶体能够实现光波的高效操控,衍生出如光子晶体光纤、滤波器及分束器等多种功能器件,在光通信、传感与集成光学中展现出巨大潜力^[5-7]。

在光子晶体分束器的设计中,学者们致力于提升其性能并推动器件小型化。例如:厉梦瑶等人^[8]实现了低损耗的1×5等比分束器,金铁群等人^[9]基于多模干涉实现了能量可调控的分束,许健等人^[10]则通过逆向设计获得了宽带低损耗的1×3分束器。然而,现有分束器结构往往在尺寸紧凑性或功能集成度方面仍有不足,难以同时满足高性能与小面积的需求。

另一方面,由于光波的衍射效应及光子晶体结构的亚波长尺度特征,光信号在出射端易产生大幅发散,限制了其定向传输距离与实用性。针对该问题,武晴涛等人^[11]采用喇叭口结构提升了辐射距离,胡帆等人^[12]通过Y型缺陷与多支路设计进一步延长了传输范围,李韵嘉等人^[13]利用锯齿结构实现了更远的辐射距离,但旁瓣干扰显著。尽管这些方法在一定程度上改善了出射性能,但其结构复杂、尺寸较大,不利于器件集成与功能融合。

目前,基于三角晶格的光子晶体出射端设计研究仍相对有限,且少有工作将分束功能与出射端集束进行一体化设计。为此,本文结合三角晶格与微腔谐振^[14-16]结构,设计一种小型化高性能光子晶体分束集束器,克服现有结构在尺寸与集成度方面的不足。

1 光子晶体结构设计

本文设计的小型化高性能光子晶体分束集束器以折射率为1的空气作为背景介质,在其中排列了 20×21 的折射率为3.4的圆形硅材质质柱,晶格常数 a 为625 nm,硅介质柱半径 R 为 $0.2a$,即125 nm。通过BandSOLVE模块可以得到未引入缺陷的完整光子晶体结构在横电模(TE模)下的能带图,如图1所示。

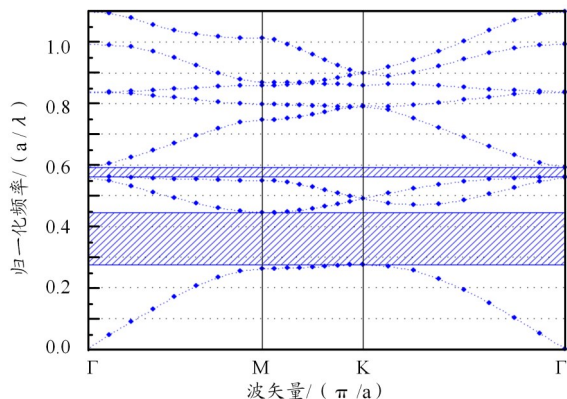


图1 TE模的能带图

从图1可以看出,TE模式下存在2条宽度不同的光子禁带。选择其中最宽的一条禁带,其归一化频率范围为 $0.274 \sim 0.445 a/\lambda$ 。根据 $a=625$ nm,可换算出对应波长 λ 为 $1.404 \sim 2.281 \mu\text{m}$,在此波长范围内的光波无法通过该光子晶体。常用的 $1.55 \mu\text{m}$ 光通信波长正好位于此光子禁带范围内,因此选择该波长作为后续所有工作的目标波长。

确定工作波长后,通过引入点缺陷与线缺陷,得到最终的小型化高性能二维三角晶格光子晶体分束

集束器结构,如图2所示。图中的A、B、C,在系统中同时作为光信号的输出端口和传输通道。其中,分束功能依赖于结构中间微腔中的2种介质柱:深蓝色介质柱半径为 R_1 ,深绿色介质柱半径为 R_2 。通过调节 R_1 和 R_2 的大小,可在一定范围内自由分配光波能量,并将能量输出至3个输出端口,从而实现不同的分束比。出射端的集束功能则依靠图2右侧实线框内的4个微腔实现。光子晶体微腔具有较高的品质因子和较小的模场体积,有利于增强光的相干性并提高光与物质的相互作用强度。光波信号进入微腔后,能量得到一定程度的聚合与增强,从而在出射端获得更远的辐射距离。

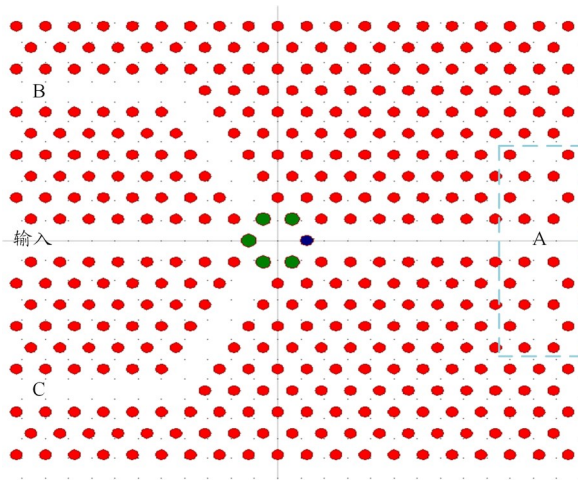


图2 小型化高性能光子晶体分束集束器结构

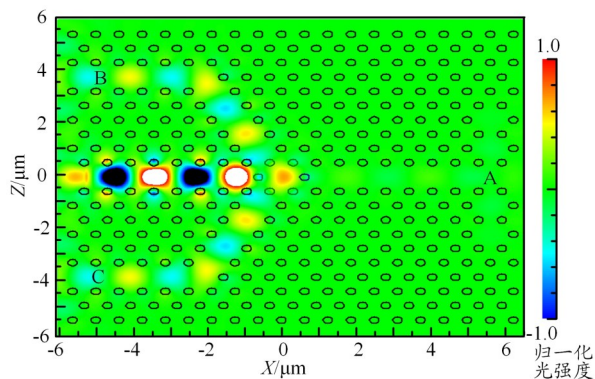
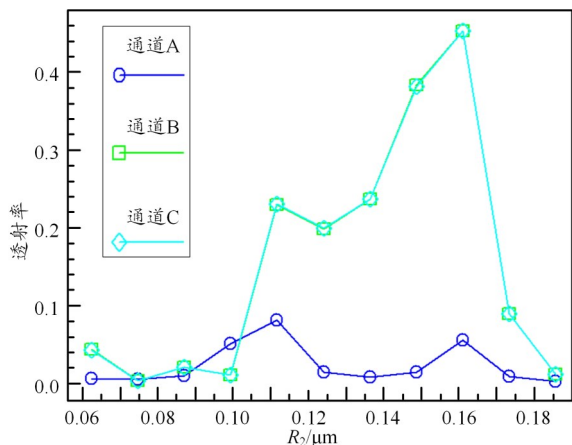
2 仿真结果分析

本文为分束集束多功能融合设计,仿真结果分为两部分:第一部分展示分束比可调的3种分束状态,分别为直通(端口A)、上下分路通(端口B、C)以及三通道均分(端口A、B、C);第二部分则针对直通(端口A)的分束情况,分析出射端辐射性能。所有仿真均基于时域有限差分(FDTD)法完成。

2.1 分束功能仿真结果与分析

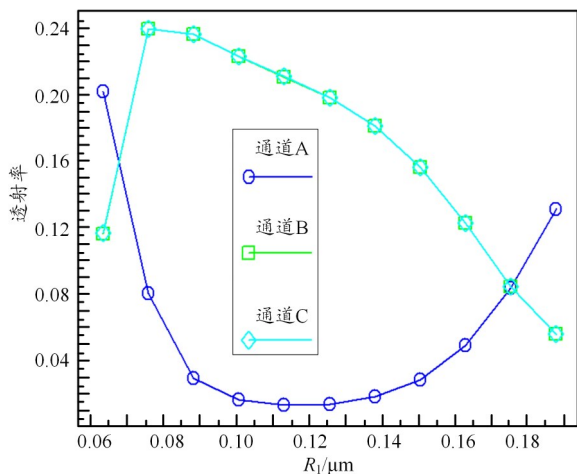
为获得不同分束比的结果,需研究 R_1 与 R_2 变化对分束性能的影响。当 $R_1=R_2=R$ 时,初始结构的分束效果如图3所示。可以看出,此时结构具有基本的上、下分束功能,但大部分能量被限制在输入通道的线缺陷中,未能进入中心耦合腔,仅少量能量传输至3个输出通道。随后分别改变 R_1 和 R_2 的大小,观察二者对分束效果的影响。

首先,固定 $R_1=125$ nm(R),改变 R_2 大小。当 R_2 在 $0.0625 \sim 0.1875 \mu\text{m}$ ($0.5R \sim 1.5R$)范围内以 $0.1R$ 步长进

图3 $R_1=R_2=R$ 时的能量分布图图4 R_2 变化时各通道的透射率变化情况

行参数扫描,得到各通道的透射率变化情况如图4所示。

接着,固定 $R_2=R$,将 R_1 在相同范围与步长下扫描,得到结果如图5所示。

图5 R_1 变化时各通道的透射率变化情况

对比图4与图5可知:当 $R_1=R$ 时,随着 R_2 从 $0.0625 \mu\text{m}$ 增大至 $0.1875 \mu\text{m}$,输出通道A的稳定透射率始终低于0.1,而输出通道B和C的透射率则波动上升,在 $R_2=$

$0.1625 \mu\text{m}(1.3R)$ 时达到最高值约0.452,随后下降;当 $R_2=R$ 时,随着 R_1 从 $0.0625 \mu\text{m}$ 增大至 $0.1875 \mu\text{m}$,输出通道A的透射率呈现“中间低、两端高”的趋势;输出通道B和C的透射率则在 $R_1=0.075 \mu\text{m}(0.6R)$ 处达到峰值约0.24,此后持续下降。

根据上述结果推测,在一定范围内, R_1 与 R_2 的差值越大,数值较大的参数在中心微腔中起主导作用。若 R_2 远大于 R_1 ,能量可能被 R_2 阻挡在输入通道波导中,难以进入中心微腔参与耦合,导致3个输出端口的透射率均很低;若 R_1 远大于 R_2 ,则 R_2 对光波阻挡作用较弱,大部分能量直接进入微腔,并因 R_1 的阻挡而被限制在输出通道A的左侧,最终从通道B、C均匀输出,形成上下分束的效果。仅当两者差值处于适当范围内时,能量才可在3个输出通道中均匀分配。

基于以上分析,通过调节 R_1 与 R_2 的尺寸,最终验证推测并获得以下3种分束状态:

1)直通状态:当 $R_1=1.09R$, $R_2=1.27R$ 时,各通道能量分布如图6所示。光波能量主要从端口A输出,端口B、C只有少量能量输出。此时端口A透射率为98.1%,端口B、C均为0.9%,表明光子晶体分束器能实现直通功能。

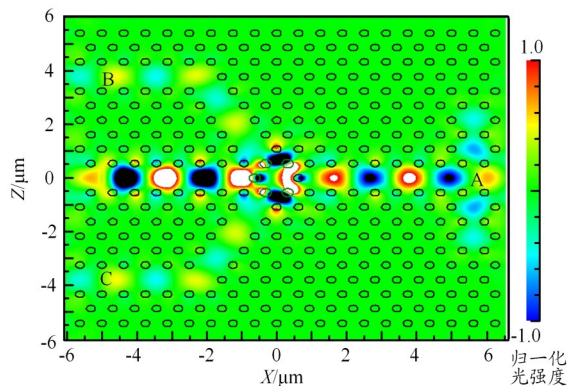


图6 直通状态下的能量分布图

2)上下通状态:当 $R_1=1.67R$, $R_2=0.22R$ 时,各通道的能量分布如图7所示。光波能量主要从端口B、C对称输出,只有少量能量从端口A输出。此时端口B、C的透射率均为49.6%,端口A为0.5%,表明光子晶体分束器能实现双分束功能。

3)三通道均分状态:当 $R_1=1.48R$, $R_2=1.3R$ 时,各通道稳定透射率如图8所示。光波能量在端口A、B、C间均匀输出。此时端口A的透射率为33.3%,端口B、C均为33.1%,表明光子晶体分束器能实现三分束功能。

2.2 集束功能仿真结果与分析

本文集束功能的实现依靠图2右侧4个微腔结

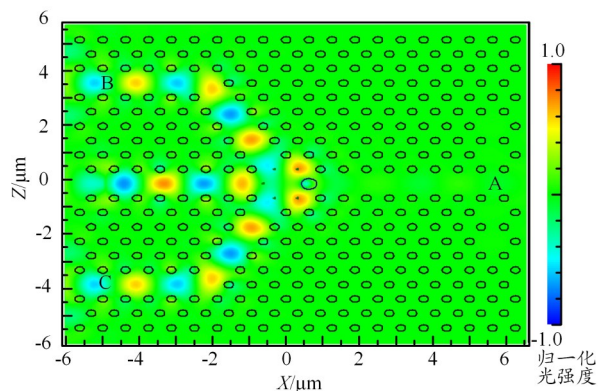


图7 上下通状态下的能量分布图

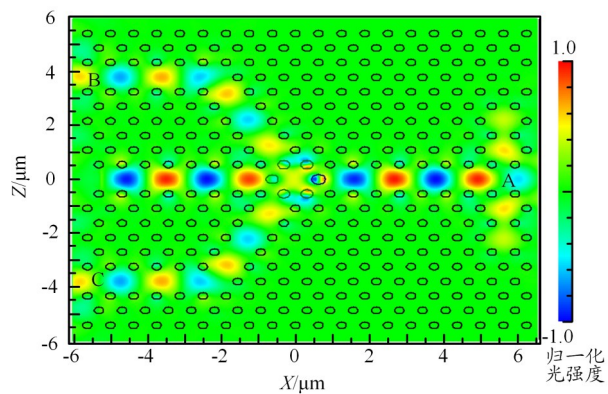


图8 3通道均分状态下的能量分布图

构。为具体验证微腔的作用,首先从其中2个微腔入手,初步观察其对光波集束效果的影响,仿真结果如图9所示。可以看出,微腔对光波出射波形具有明显集成作用,仅使用2个微腔即可实现约20 μm 的集束传输距离。进一步采用4个微腔构成图2所示出射端结构,并利用中心微腔对光信号的耦合增强作用,提升进入出射端的光波强度,得到的集束效果如图10所示。可以看出,在直通分束状态下,出射端的集束传输距离可达约70 μm ,且无旁瓣产生。

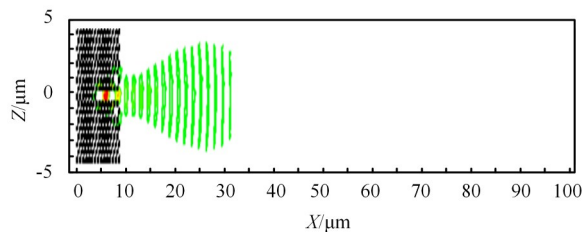


图9 出射端2个微腔的集束效果图

将本结构与相关出射端研究文献对比,结果如表1所示。本文设计的出射端具有最小的结构尺寸(仅164.06 μm^2),集束传输距离较文献[11]提升5 μm ,且相比文献[13]未出现任何旁瓣。这证明该结构在满

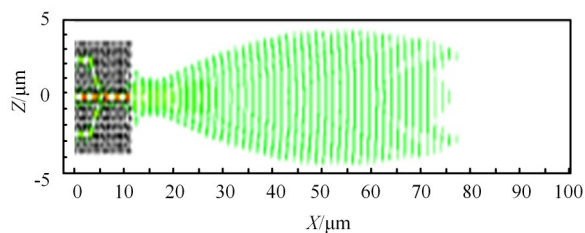


图10 出射端4个微腔的集束效果图

表1 不同文献的指标对比

文献	出射端的集束 传输距离/ μm	光器件尺寸/ μm^2	旁瓣数量/对
[11]	65	294.53	0
[12]	110	472.75	0
[13]	200	763.53	1
本文	70	164.06	0

足小型化要求的同时,实现了高性能的集束效果。

4 结束语

本文设计了一种小型化高性能光子晶体分束集束器件。该结构通过在中心及输出端口引入微腔,在实现空间紧凑布局的同时,具备了分束比可调的分束功能与辐射距离较远的集束功能。采用FDTD法对该结构进行仿真,结果表明,通过调整 R_1 与 R_2 的尺寸,光波能量可分配至不同输出端口,实现多种分光比例。与现有文献相比,本文设计的结构简洁、尺寸最小,在光子晶体多功能器件融合与集成化方面具有重要意义。

参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2059.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] 杨翔宇. 基于二维光子晶体环形谐振腔高Q值光滤波器的研究[D]. 天津:天津理工大学,2024.
- [4] Plihal M. Photonic band structure of two-dimensional systems:The triangular lattice[J]. Physical Review B, 1991, 44(16): 8565-8571.
- [5] Han J, Liu E, Liu J J. Circular gradient-diameter photonic crystal fiber with large mode[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2019, 36(4): 533-539.
- [6] Saranya D, Mohan S, Rajesh R A. Design and analysis of multi-channel drop filter using dual L defected hexagonal photonic crystal ring resonator [J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(1): 136-143.
- [7] Yang Z, Chen K, Wang C G, et al. A photonic crystal beam splitter

冯俊杰, 华昌洲: 小型化高性能光子晶体分束集束融合设计

used for light path multiplexing: synergy of TIR and PBG light guiding[J].

Optical and Quantum Electronic, 2020, 52(2): 36-39.

[8] 厉梦瑶, 徐光跃, 郑加金, 等. 基于二维光子晶体波导的1×5等比分束器[J]. 光电子·激光, 2021, 32(8): 799-805.

[9] 金轶群, 文化锋, 李韵嘉, 等. 基于多模干涉的二维三角晶格光子晶体分束器[J]. 光电子·激光, 2021, 32(3): 281-286.

[10] 许健, 施鹏程, 施伟华, 等. 基于下山单纯形算法的宽带光子晶体1×3分束器研究[J]. 中国激光, 2024, 51(2): 53-61.

[11] 武晴涛, 文化锋, 王红华, 等. 二维三角晶格光子晶体波导的出射光集束传播[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(12): 156-160.

[12] 胡帆, 文化锋, 周华英, 等. 基于Y缺陷的多支路型光子晶体出射光

集束[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 206-212.

[13] 李韵嘉, 李军, 文化锋, 等. 基于锯齿口和多支路的二维光子晶体出射光集束[J]. 光电子·激光, 2021, 32(10): 1105-1110.

[14] Sharma V, Saini S K, Sharma R. Design of channel ADD drop filter using photonic crystal ring resonator[C]//IEEE. Proceedings of International Conference on Computer, Communications and Electronics. New York: IEEE, 2017: 124-129.

[15] 罗子谦. 二维光子晶体波导出射光集束及偏转的相关研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[16] 冯先成, 何岩, 司擎华, 等. 点缺陷二维光子晶体波导的出射时光集束[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(3): 46-49.