

抗干扰与光波集束多功能复合可控光子晶体分束器

刘锦浩,华昌洲*

(宁波大学 信息科学与工程学院,浙江 宁波 315211)

摘要:针对传统光子晶体器件功能单一、级联集成易导致尺寸增大与效率降低的问题,设计一种兼具抗干扰与光波集束功能复合可控光子晶体分束器。首先通过时域有限差分法分析光子晶体能带特性和光传输特性,进而在传输波导中引入菱形滤波腔、可调介质柱和喇叭形集束结构,最终实现了滤波、分束与集束的集成化设计。仿真结果表明:该分束器对工作波长 $1.448\text{ }\mu\text{m}$ 的光波透射率达99.5%,并能有效滤除杂波;通过调节分束路径前介质柱半径,可实现分束比例在1:1:1~2:2:1内的连续可控;输出端集束结构使光波辐射距离提升至 $56.5\text{ }\mu\text{m}$,较初始模型提高约5倍。

关键词:二维光子晶体;分束器;时域有限差分法;集束;多功能复合

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0077-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.013

Anti-interference and beam-combining multifunctional composite controllable photonic crystal beam splitter

LIU Jinhao, HUA Changzhou*

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

Abstract: To address the limitations of conventional photonic crystal devices, such as single functionality and the increased size and reduced efficiency resulting from cascaded integration, a multifunctional composite controllable photonic crystal beam splitter integrating both anti-interference and beam-combining capabilities is designed. Firstly, the band characteristics and optical transmission properties of the photonic crystal are analyzed using the finite-difference time-domain method. Subsequently, a diamond-shaped filtering cavity, adjustable dielectric columns, and a horn-shaped combining structure are introduced into the transmission waveguide. Ultimately, an integrated design for filtering, beam splitting, and combining is achieved. Simulation results show that the device achieves a transmission of 99.5% at the operating wavelength of $1.448\text{ }\mu\text{m}$ while effectively filtering out noise. The splitting ratio can be continuously tuned within the range of 1:1:1 to 2:2:1 by adjusting the radii of the dielectric rods in the splitting path. Moreover, the output combining structures extend the radiation distance of the light wave to $56.5\text{ }\mu\text{m}$, which is about five times that of the initial design.

Key words: two-dimensional photonic crystal, beam splitter, finite-difference time-domain method, beam combining, multifunctional composite

0 引言

光子晶体,即具有介电常数周期性排列的微结构

收稿日期:2025-02-24。

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:刘锦浩(2002—),男,硕士研究生,现就读于宁波大学信息科学与工程学院通信工程专业,主要研究方向为光子晶体融合一体化。

***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。



材料^[1],能够实现对光子传输的精准调控,为新一代集成光电子器件的研发提供了重要基础。自20世纪以来,随着制备工艺与理论研究的持续深入,基于光子晶体的各类功能器件(如分束器、滤波器与集束器等)逐渐成为光通信与前沿光学领域的研究热点,并在实际应用中展现出巨大潜力^[2]。例如:文献[3]利用微腔与谐振腔的耦合机制,设计了一种多通道光子晶体滤波器,可在 $1.3\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 波段实现8种波长的滤波输出,效率均高于80%;文献[4]提出一种多模干涉型波导分束器,对横电(TE)模和横磁(TM)模的透射率分别达到92.4%与91.8%;文献[5]则通过引入锯齿口与多支

刘锦浩, 华昌洲: 抗干扰与光波集束多功能复合可控光子晶体分束器

路结构,有效提升了二维光子晶体出射光的集束距离。

然而,现有研究多集中于实现滤波、分束或集束等单一功能,在面对复杂多功能应用需求时,往往需要将多个独立器件进行级联组合,这易导致系统整体尺寸增大、插入损耗上升、效率降低以及成本增加等问题。为此,本文旨在设计一种抗干扰与光波集束多功能可控光子晶体分束器(下文简称多功能可控光子晶体分束器),在确保各功能高效协同工作的同时,避免传统级联方式所带来的缺陷,从而为集成光子器件的小型化与多功能化提供新的解决方案。

1 模型设计与仿真

本文基于时域有限差分法的 Full WAVE 模块^[6-8]建立了初始模型,然后对此模型结构进行调整与优化,设计了多功能可控光子晶体分束器。本文在完整光子晶体正方晶格中引入点缺陷与线缺陷设计器件模型。其中,设定背景材料为空气(介电质数为1),晶格常数 $a = 0.6 \mu\text{m}$,介质柱材料选用适用于微波集成系统的 GaAs(折射率为3.57),半径 $R = 1.2 \mu\text{m}$ 。

1.1 初始模型

本文以三端口光分束器(图1)为基础设计光子晶体分束器,工作光波长设定为 $1.448 \mu\text{m}$ 。基于线缺陷能够有效引导光波传输的原理,构造宽度为 $2a$ 、长度为 $22a$ 的波导,并将其与3条等宽等长的输出路径连接(三端口光分束器的 L_1 、 L_2 、 L_3 ,在系统中同时作为光信号的接收器和传输路径)。3条输出路径呈十字交叉状布置于波导末端。

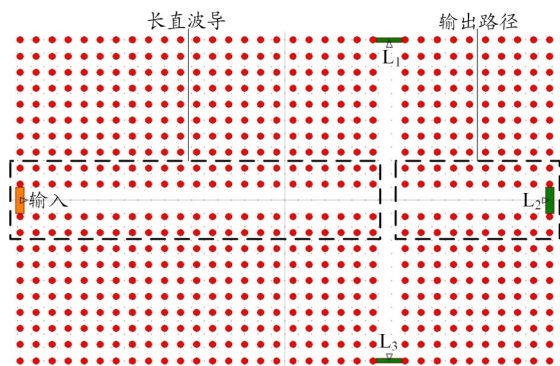


图1 三端口光分束器结构示意图

对器件周围光场分布进行仿真分析。在输入端口设置宽度等于路径宽度的光源,发射波长为 $1.448 \mu\text{m}$ 的等幅高斯光波。将能量观测距离设为 $80 \mu\text{m}$,出射光场达到稳态后的性能测试结构如图2所示。可以看出,各输出端口的信号最远辐射距离分别为 10.5 、 8 、 $10.5 \mu\text{m}$,且辐射方向较为发散,不利于接收。

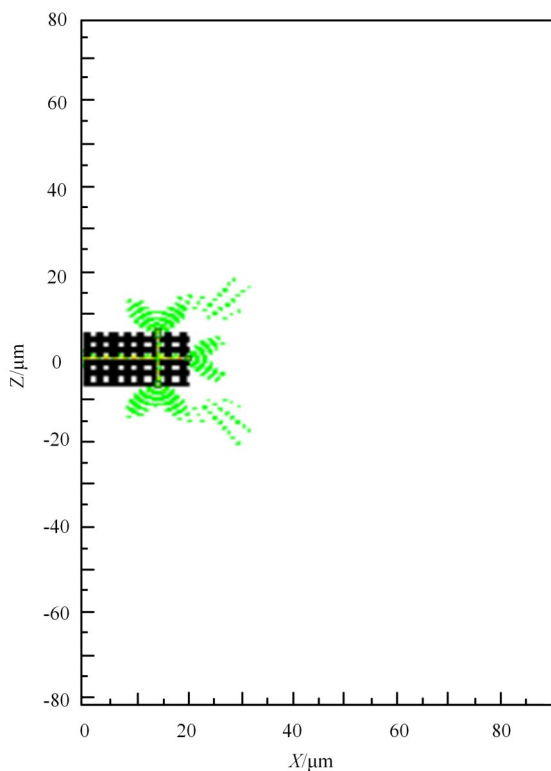


图2 初始模型性能测试图

通过上述对初始模型结构的性能测试可知,该器件虽能实现基本的光分束功能,但无法对各端口的光波输出比例进行可控调节,也难以抑制外界其它频率光波的干扰。此外,出射光的集束效果较差,在距离器件 $20 \mu\text{m}$ 以外的接收器难以有效接收信号。

1.2 多功能可控光子晶体分束器

1.2.1 器件整体结构优化设计

为改进初始模型的不足,并实现光子晶体器件的多功能化,本文对初始模型进行如下优化:首先,在传输波导中引入菱形滤波结构,通过调整菱形腔体内柱以及波导中临近滤波结构的特定介质柱半径,使分束器对 $1.448 \mu\text{m}$ 光波实现滤波,从而增强抗干扰能力;其次,在3条分束路径的前端分别添加一个半径可调的介质柱,用于灵活调节各输出端口的能量比例;最后,在分束路径末端增设喇叭形集束结构,以提升光波的辐射距离和集束效果。优化后的抗干扰与光波集束多功能可控光子晶体分束器整体结构如图3所示。

1.2.2 滤波结构设计及抗干扰性能分析

为提升器件的抗干扰性能,本文调整波导中临近菱形滤波结构的特定介质柱半径 $R_x = 0.522R$,并在滤波结构后方垂直传输路径处设置接收器 L_4 。通过改变菱形滤波结构内柱半径 R_{in1} ,可调节滤波波长及效率。对 R_{in1} 在 $0.97R \sim 1.07R$ 进行参数扫描,得到不同内柱半

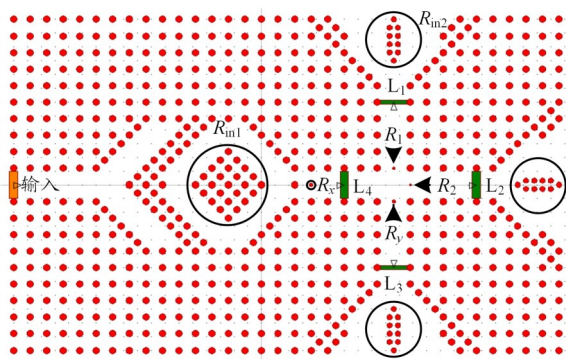


图3 多功能可控光子晶体分束器结构图

径下工作频率光波透射率如表1所示。可以看出,当 $R_{in1}=1.02R$ 时, $1.448\text{ }\mu\text{m}$ 工作光波透射率最高,达到 99.84%。

表1 不同内柱半径下工作频率光波透射率

$R_{in1}/\mu\text{m}$	透射率/%
0.97R	16.61
0.98R	22.89
0.99R	34.36
1.00R	52.45
1.01R	81.49
1.02R	99.84
1.03R	69.15
1.04R	37.36
1.05R	19.68
1.06R	11.10
1.07R	6.19

评估滤波结构性能时,除工作光波的透射率外,还需考察其它频率光波的传输特性。为此,本文将光源设置为发射 $1.4\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$ 内的等幅高斯光波,并对进行频段扫描,得到多功能可控光子晶体分束器的透射效果如图4所示。可以看出,仅有波长为 $1.448\text{ }\mu\text{m}$ 的工作光波透射率接近1,能够实现低损耗传输,其余波长光波的透射率均低于5%,表明该结构能有效提升分束器的抗干扰性能。

分析表1中数据能够看出, R_{in1} 由 $1.02R$ 变化到 $1.03R$ 时,透射率变化较为显著。为保证在实际使用中具有稳定的高透射率,本文对 R_{in1} 在 $1.02R \pm 0.005R$ 范围内 ($\pm 0.5\%$ 误差) 进行重新仿真,结果如图5所示。可以看出,在此误差范围内滤波结构的透射率仍能保持在94%以上。该容差范围处于现有微纳加工技术

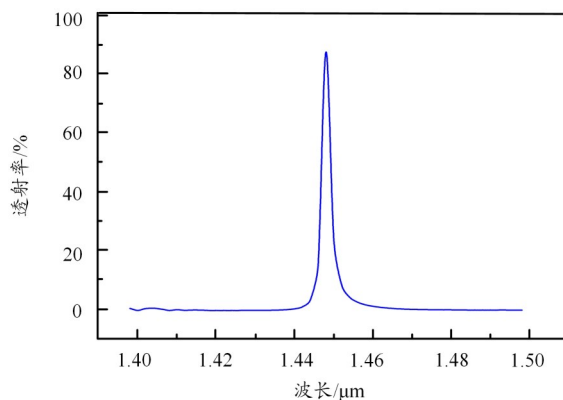


图4 多功能可控光子晶体分束器的透射效果

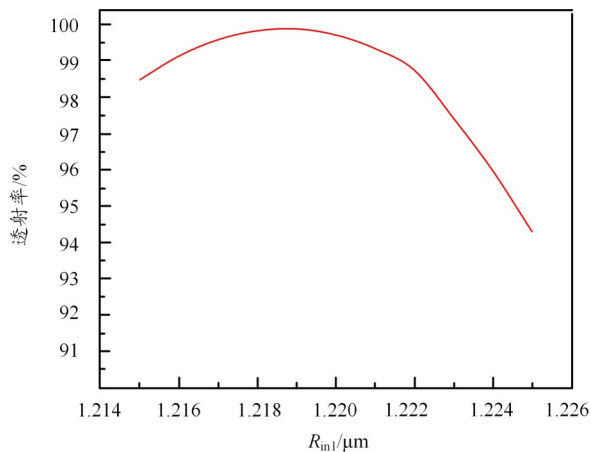
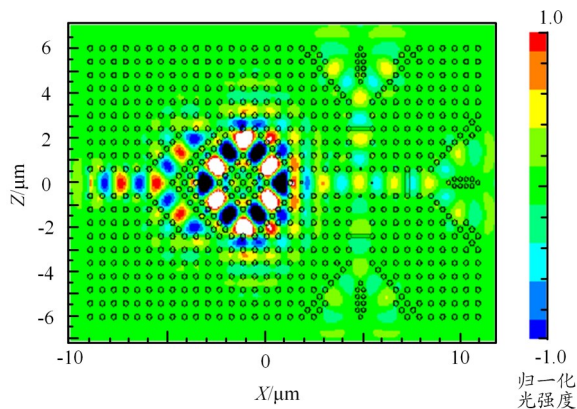


图5 内柱制造容差分析曲线

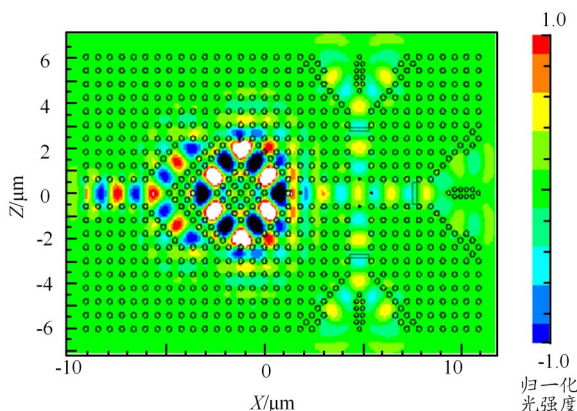
(如电子束光刻、反应离子刻蚀)的可控精度之内,具备工艺可行性。此外,透射率的变化源于内柱半径改变所引起的谐振点偏移,实际使用中通过微调工作光波频率亦可获得稳定的高透射率。

1.2.3 光分束比例调控机制与仿真验证

本文所设计的分束器可通过调节各分束路径前端特定介质柱的半径,控制各输出端口的能量(光强度)比例。光源仍采用波长为 $1.448\text{ }\mu\text{m}$ 的等幅高斯光波。首先,设各分束路径前端介质柱半径为 $R_1 = 0.4R$, $R_2 = 0.26R$, $R_3 = 0.51R$, 光场分布如图6(a)所示。可以看出,光波能量分别从接收器 L_1 、 L_2 、 L_3 输出,能量比例分别为 39.3%、39.5%、19.5% (分配比接近 2:2:1)。随后,将介质柱半径改为 $R_1=0.4R$, $R_2=0.31R$, $R_3=0.4R$, 光场分布如图6(b)所示。可以看出,光波能量分别从3个接收器 L_1 、 L_2 、 L_3 接近均匀输出,能量比例分别为 33.2%、33.2%、33.1% (分配比接近 1:1:1)。因此,通过微调光子晶体分束器中特定介质柱的结构参数(例如半径),可以实现对输出端口光能量比例的有效调控,



(a) 光分束比例为2:2:1



(b) 光分束比例为1:1:1

图6 不同光分束比下的光场分布

验证了该分束器在光功率分配上的灵活性与可设计性。

为考察比例调控的连续性,固定 R_1 与 R_2 (沿用光分束比为2:2:1时的设置),仅对 R_3 在 $0 \sim R$ 内进行参数扫描,扫描步长设定为 $0.02R$,得到不同 R_3 下器件对 $1.448 \mu\text{m}$ 工作光波的分束情况如图7所示。可以看

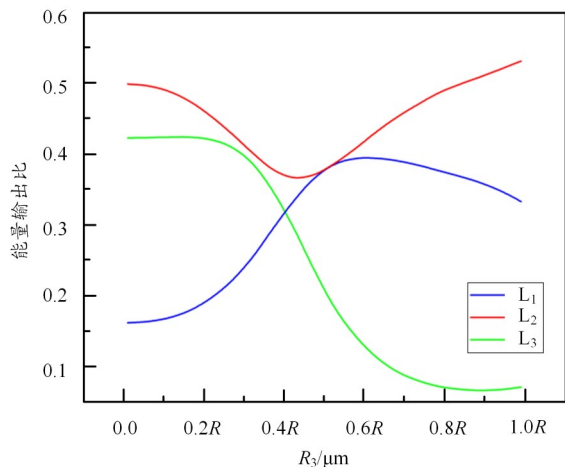


图7 比例调控连续性检验结果

出,随着 R_3 增大,各输出端口的能量比例呈连续变化,实现了光分束比例的可控调节。上述通过改变介质柱半径调控光分束比的方式属于静态调节,其原理是通过调整介质柱的等效折射率来改变相邻波导间的耦合效率。若需实现动态调控,可将各分束路径前端的介质柱替换为电光或热光材料(如铌酸锂),通过施加外部电压同样可改变其等效折射率,从而实现光分束比的实时电控调节。

1.2.4 输出集束结构及其效果验证

本文对器件末端的喇叭形集束结构进行了功能测试。设菱形内柱半径 $R_{in2} = 0.8R$,各端口出射信号的能量观测距离为 $80 \mu\text{m}$,在光分束比例为1:1:1($R_1 = 0.4R, R_2 = 0.31R, R_3 = 0.4R$)条件下对光场分布进行仿真,结果如图8所示。可以看出,分束器3个端口的信号最远辐射距离分别可达 $56.5, 38.3, 56.5 \mu\text{m}$ 。与初始模型相比,该器件不仅显著提高了光波的传输距离,同时使光束更为集中,更有利于信号接收。

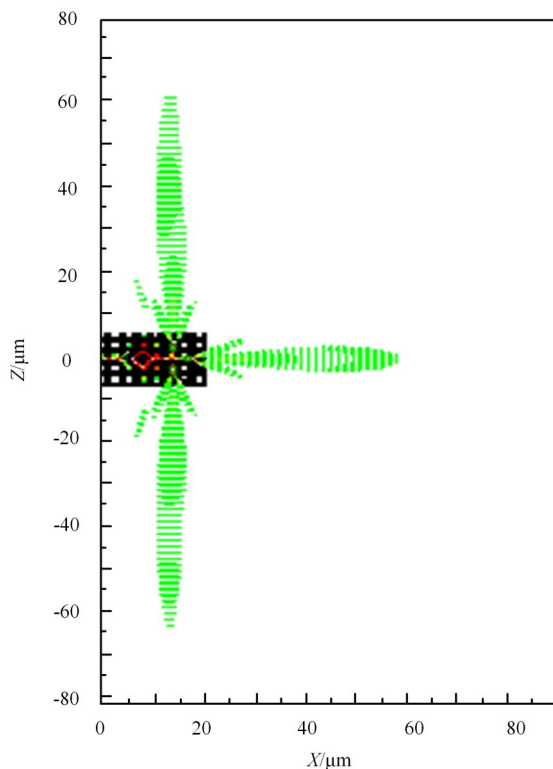


图8 输出端光波集束性能测试结果

1.2.5 关键结构容差分析

考虑到实际制造可能出现的偏差,本文亦分析了关键结构参数的容差范围,如表2所示。可以看出,在该容差范围内,所设计器件的各项性能仍能满足实际使用需求。

表2 介质柱半径容差分析

介质柱类别	允许偏差(半径)	性能分析	实际需求值
菱形滤波内柱	$\pm 0.005R$	透射率>94%	透射率>92%
分束路径调控柱	$\pm 0.01R$	分束比误差<2%	分束比误差<5%
喇叭形集束结构内柱	$\pm 0.02R$	辐射距离衰减<5%	辐射距离衰减<8%
其余介质柱	$\pm 0.02R$	整体影响<5%	整体影响<10%

3 结束语

本文设计并验证了一种多功能可控光子晶体分束器。该器件通过引入菱形滤波结构,在 1.448 μm 波长下实现 99.5% 的高透射率,并能有效抑制工作频段外杂波干扰;借助点缺陷介质柱半径的调节,实现了光分束比从 1:1:1~2:2:1 的可控分配;输出端的喇叭形集束结构将光波辐射距离提升至 56.5 μm ,较初始模型提高约 5 倍,显著改善了光信号的定向传输与接收

性能。研究结果表明,本设计成功实现了滤波、分束与集束的功能集成,为光子器件的小型化与多功能化提供了有效解决方案。

参考文献:

[1] Luo X, Lv J, Liu W, et al. Eccentric core photonic crystal fiber magnetic field sensor based on surface plasmon resonance with extremely high linearity[J]. Plasmonics, 2024, 20(7): 1-14.

[2] Jianxin Z, Jianhua Y. Design and optimization of 1×2 and 1×4 Y-shaped beam splitters in GaSb-based 2D photonic crystals[J]. Modern Physics Letters B, 2022, 36(11): 2250009.

[3] 闫升荣. 多通道光子晶体滤波器的研究与设计[D]. 兰州:兰州交通大学, 2023.

[4] 金铁群. 二维光子晶体多模干涉型波导分束器的研究[D]. 宁波:宁波大学, 2022.

[5] 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.

[6] 钟亮, 苏慕阳, 闫中胜, 等. 基于二维光子晶体的四通道滤波器设计[J]. 光通信技术, 2023, 47(4): 26-31.

[7] 李儒颂, 陆寰宇. 光子晶体面发射激光器阈值增益与输出光功率的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 171-177.

[8] 王周益, 文化锋, 徐薇, 等. 基于双环形谐振腔结构的二维光子晶体波分复用器[J]. 光通信技术, 2022, 46(2): 79-84.