第44卷第4期
2025年8月

红外与毫米波学报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 44, No. 4
August, 2025

文章编号:1001-9014(2025)04-0569-08 DOI:10.11972/j.issn.1001-9014.2025.04.012

新型光子晶体波导多功能出射光集束器件

柳泽坤, 华昌洲*
(宁波大学 信息科学与工程学院,浙江 宁波 315211)

摘要:基于二维三角晶格光子晶体,本文设计了一款新型二维光子晶体波导出射光集束的多功能器件,可以实现融合出射光集束和特定波长的高效滤波。该出射光集束结构类似于光栅结构,通过多通道之间的相互干涉原理使出射光呈集束状态,提高了出射光的辐射效率和距离,利用时域有限差分法可得,在1.447 μm的入射波长下具有高达450 μm的有效传播距离。该结构设计对在范围1.435~1.465 μm内的入射光具有很好的集束能力。同时,在波导两边还有两个六边形的耦合滤波结构,对于中心波长为1.490 μm和1.510 μm的入射光波,分别接近98.4%和97.3%的透射效率。该融合结构成功实现了滤波和集束功能。

关 键 词:光子晶体波导;滤波功能;出射光集束;时域有限差分法
中图分类号:TN256 **文献标识码**:A

A novel photonic crystal waveguide multifunctional light-emitting beaming device

LIU Ze-Kun, HUA Chang-Zhou*
(Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on two-dimensional triangular lattice photonic crystal, a multi-functional device of two-dimensional photonic crystal waveguide light-emitting beaming with integrated filtering function is designed, which can achieve the fusion of outgoing light beaming and specific wavelength efficient filtering. The beam structure of the emitting light is similar to the grating structure, and the beam is in the state of clustering through the mutual interference principle between the multi-channel, which improves the radiation efficiency and distance of the emitting light. The finite difference time domain method can be used to obtain the effective propagation distance of 450 μm at the incident wavelength of 1.447 μm. The structure design has a good beaming ability for incident light in the range of 1.435-1.465 μm. At the same time, there are two hexagonal coupled filtering structures on either side of the waveguide, the transmission efficiencies for incident light waves are close to 98.4% and 97.3% with central wavelengths of 1.490 μm and 1.510 μm, respectively. The fusion structure successfully realizes the filtering and clustering functions.

Key words: photonic crystal waveguide, filtering function, light-emitting beaming, finite-difference

引言

光子晶体作为一种人工设计的周期性结构材料,通常其微观结构的基本单元尺寸与光波的波长相当,因此能够对光波进行调制。这种材料的周期性排列可以影响光波的传播方式,包括反射、折射、衍射和引导等。光子晶体的显著特性之一是光子带隙(photonic bandgap),这是一类能够阻止特定波长或波段的光波传播的频率范围[1-3]。这种特性使得光子晶体在光学器件的设计和应用中具有重要的价值,例如在制作光子晶体激光器、光纤、滤波器、分束器等设备时发挥关键作用。

光子晶体在众多领域内应用广泛。在2018年,

收稿日期:2024-10-29,**修回日期**:2025-02-26 **Received date**:2024-10-29,**Revised date**:2025-02-26
基金项目:国家自然科学基金项目(62271273)、宁波市青年科技创新领军人才项目(2024QL043)
Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62271273) and the Youth Science and Technology Innovation Leading Talent Project of Ningbo, China (2024QL043)
作者简介(Biography):华昌洲(1984—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事多功能融合光子晶体器件一体化设计研究. E-mail: huachangzhou@nbu.edu.cn
* **通讯作者**(Corresponding author): E-mail: huachangzhou@nbu.edu.cn

梁龙学等人基于太赫兹磁光子晶体设计了基于石榴石型铁氧体磁性材料的光子晶体滤波器和光开关[4]。在之后的2020年，黄慧敏利用光子晶体结构设计了一种基于表面等离子体共振的高灵敏度磁场敏感光子晶体光纤传感器，可以控制光的传播模式，用于高分辨率成像和传感[5]。同年，赵丽娟等人设计了光子晶体光纤的基本结构，包括周期性的孔洞排列和包层设计[6]。

在这些器件中，对滤波器的研究是最为普遍和发展较为完善的。李韵嘉提出了一种基于波导耦合到环形腔的多通道光子晶体滤波器[7]，给出了对该类型滤波器的一种良好应用。而吴立恒和王明红研究了一种谐振腔侧边介质柱调谐的光子晶体滤波器，可以通过改变谐振腔侧边介质柱的尺寸，调谐滤波器的工作波段，实现对特定波长光的过滤[8]。

在出射光集束方面，国内外研究者们一直在为提高出射光的有效传播距离和出射光的集束性做努力[9-10]。胡峰等人基于Y形缺陷结构设计出的多分支光子晶体光束器件，其有效传播距离达到了110.0 μm，不过其多级支路的设计过于复杂，生产难度较大[9]。在文献[10]中研究者们通过在二维三角晶格光子晶体的出光区域附近引入一列微腔，形成了线缺陷结构。这种设计使得出射光具有了明显的指向性，其有效传播距离达到了大约61.5 μm。虽然这种结构在简化光路设计方面表现出了优势，但在增加光的传播距离方面还有待进一步优化。

在光子晶体领域，尤其是针对多功能器件的研究，目前还相对较少，该领域在最近几年才开始受到广泛关注和初步探索。在2020年，吴聪设计了一款由环形缺陷和线缺陷组成的三端口二维三角晶格光子晶体双功能器件，调节环形腔中心柱数量为5时，可实现波长1.346 μm、1.455 μm的滤波功能与波长1.414 μm的波束均分功能[11]。

综上，由于目前报道的光子晶体器件大多为单一功能，当遇到多功能应用需求时，需要将这些单一功能的器件进行级联，这将导致整体器件集成度降低，面积增大，从而降低效率，增加成本。为了提高多功能光子晶体器件的集成度并减小面积，进而提升整体效率、降低成本，本文针对出射光集束的性能以及多功能器件，基于二维三角晶格光子晶体出射端口和环形腔的原理，设计了一款集成滤波功能的二维光子晶体波导出射光集束的多功能器件，融合了出射光集束和滤波功能，不仅提高多功能光子晶体器件的整体效率和集成度，同时减少了整体面积、降低了成本。仿真结果显示，本文提出的多功能光子晶体器件，不仅拥有较好的集束性和有效传播距离，还能实现双端口高效率的滤波。

1 实验仿真和分析

1.1 分析方法

本文主要运用Rsoft软件中Band SOLVE模块对应的平面波展开法和Full WAVE模块对应的时域有限差分法分析该多功能器件的传输特性曲线和光场分布。

光子晶体平面波展开法(plane wave expansion method, PWEM)基于傅里叶级数的原理，将电磁场展开为一系列平面波的叠加。每个平面波都有特定的波矢和频率，这些波矢和频率由光子晶体的周期性结构决定。通过求解这些展开系数，可以得到光子晶体中电磁波的传播特性[12]。

光子晶体时域有限差分法(finite difference time domain，FDTD)通过在时间和空间上对麦克斯韦方程进行离散化，将连续的电磁场问题转化为一系列可以数值求解的差分方程。这种方法不需要对媒质的周期性做出任何假设，因此它非常适用于复杂结构的光子晶体和其他光学材料的模拟[13]。

1.2 初始结构

以二维三角晶格光子晶体结构为基础，其晶格常数$a = 0.57$ μm，选择折射率n_a为1.0的空气作为背景介质材料，以及折射率n_b为3.4的圆形介质柱，其半径$r=0.2a$。再使用Rsoft软件中的Band SOLVE模块进行仿真分析，得到光子晶体的能带[12]，结果如图1所示。

图1展示了在横电极化波条件下的光子带隙结构。该图揭示了两条明显的光子带隙，它们代表了光子晶体禁止特定频率光波传播的频率范围。这些带隙的归一化频率范围分别是0.280~0.454和0.572~0.596。为了进行后续的仿真分析，本文选择了较宽的频率带隙进行研究。这一选择是基于对光子晶体光子带隙的详细分析，旨在利用这些带隙实现特定的光学功能。具体的归一化频率计算可以通过以下公式进行：

$$F = \frac{\omega a}{2\pi c} = \frac{a}{\lambda} \quad , \quad (1)$$

其中，F为归一化频率，ω为工作角频率，a为晶格常数，c为光速，λ为工作波长。通过这个公式，可以

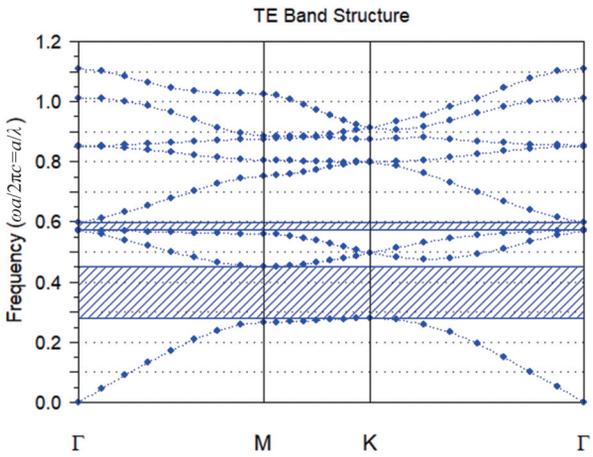

图1　TE 色散曲线图

Fig. 1　TE dispersion plot

计算得到对应与特定频率带隙的工作波长为1.256~2.036 μm。

本文设计集成滤波功能的二维光子晶体波导出射光集束,以多通道出射端口和六边形环形腔滤波结构为基础结构,初始基础结构如图2所示。在单波导旁引入两个六边形内柱环形腔,将第三层内柱往里移动,使第三层内柱形成圆形,通过调整环形腔中心柱可以变更滤出的波长,这两个环形腔中心柱半径R_{in1}和R_{in2}分别为0.032 9 μm和0.044 1 μm,再分别在两个环形腔六个角添加六个分散柱,半径R_{in11}和R_{in22}分别为0.026 8 μm和0.021 μm。随后,出射光初步设计部分引用了文献[17]中的8出射口多支路型设计,可以利用两层Y型拐角多通道线缺陷,使其可以在最后通道内互相干涉,完成初步集束功能。本文的基础模型采取的是三角晶格,在波导尾部引入一个耦合柱半径为0.114 μm的小型耦合腔,并进行了大幅度结构调整,调整后的结构即为图2的初始基础模型,相比于原文结构,这样不仅可以显著提高其有效传输距离,还加强了出射光的集束性。这两个结构共同组成这个集成滤波和出射光集束的多功能结构。

2　模型性能分析和结构优化

2.1　出射端集束性能分析

将输出光源设定为连续波导(continuous waveguide, CW)高斯光波,波长设定为1.447 μm,从输入端口输入,在Rsoft软件中的Full WAVE部分,运用时域差分有限法对该结构出射端后的光场分布进行仿真,得到图3的光场图(图中右边图例不同颜色横线的左边数字代表不同的光波能量强度,比如

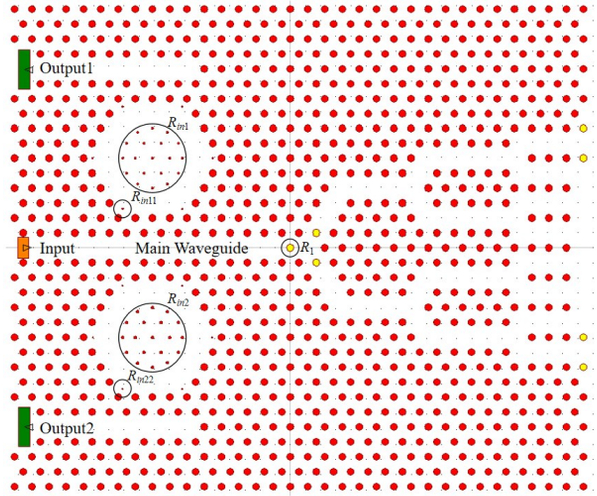

图2　光子晶体初始基础模型

Fig. 2　Initial model of photonic crystal

绿色线条左边的数字0.1代表的含义为光波能量强度10%,其他颜色代表更大的光波能量强度)。

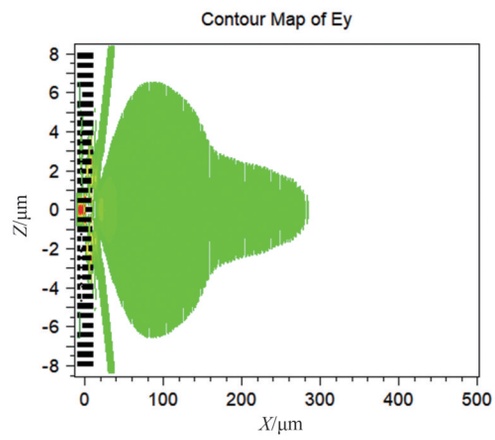

图3　初始模型的出射光集束仿真

Fig. 3　Simulation of the initial model of the light-emitting beaming

通过该仿真数据,我们可以清晰地看到该出射光可以达到290 μm的有效传输距离(指满足光场能量大于等于入射光能量的10%,距离出射端的最远距离),相较于文献[17]的仅仅只有88 μm的辐射距离,该结构具有更优良的集束性能和更远的有效传播距离。不过明显可见该结构的集束性能还可以优化增强,从仿真结果可以看到有部分能量向两侧传播损耗了,并且有效传播距离不够理想,可以优化结构,减少损耗,以提高集束性能和有效传播距离。

2.2　滤波性能分析

依旧选择CW高斯光波为输入光源,输入波长

范围设定在1.40~1.58 μm。在输出端口1和2设置监测器，同样利用时域有限差分法对输入光波进行仿真。

初始基础结构光子晶体的滤波结构性能如图4所示。

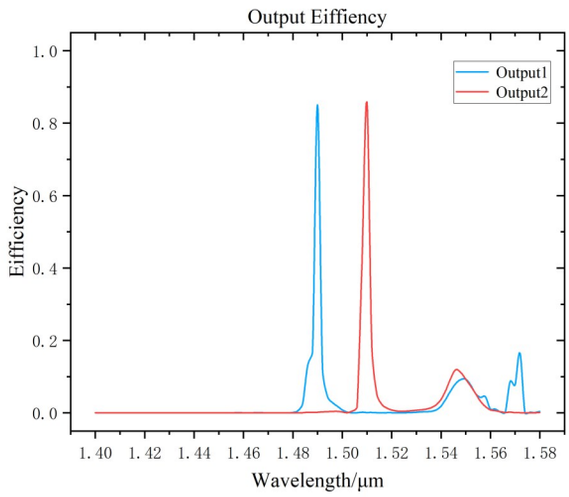

图4 初始模型的滤波性能仿真

Fig. 4 Simulation of filtering performance of the initial model

从图4中我们可以得知，该滤波结构可以87.6%和88.1%的效率分别从输出端口1和2中滤出波长为1.490 μm和1.510 μm的输入光波，可见当环形腔与波导之间的耦合达到最优状态时，环形腔展现出了筛选特定波长频率的能力。这意味着，在这个耦合效率最大化的条件下，环形腔能够有效地从混合光波中选择并传输特定波长的光，而阻止或减弱其他波长的光通过。不过，同样也可以看到，滤波效率不够高，主要是因为光波在环形腔内做非线性传播时会损失部分能量，从而导致滤波效率变差，需要对分散柱半径调整，减少能量损耗。

2.3 出射端集束结构优化

目的是优化光子晶体出射光结构部分以提高出射光的有效传播距离和出射光的集束性，提高整体性能。但三角晶格光子晶体在界面区域的不平整性倾向于捕获光波，导致其在结构表面易形成表面波。这些表面波会将部分光波能量限制在三角晶格结构的外围，从而引起能量损耗，这不仅降低出射光的有效传播距离，对集束性也有很大的影响。因此，我们需要采取措施来抑制表面波的形成，或将这些表面波的能量重新引导回辐射模式，以提高整体的出射光效率。初始结构对消除这部分的影响较为轻微，我们可以看到初始结构的有效传播距离仅仅达到285 μm，并且其在这种距离上集束性还不够好，原出射端口的集束性全部由多通道线缺陷的相互干涉来实现但不够理想，对三角晶格光子晶体的表面波能量损耗问题并没有什么实质的影响，解决这个问题可以达到更好的有效传播距离。现对出射端结构进行调整，如图5所示，删除或者增加最后一排的上下两侧的介质柱数量，由于初始结构的最后一排介质柱数量为4个，所以选择使其数量分别为6个、2个和0个，当介质柱数量合适的时候可以使上下两侧的出射光拥有更好的相互干涉从而抵消表面波的影响，便可以提高集束性，减少出射光能量往两边的辐射。

在图6的仿真结果中看到（与图3类似，每个小图右边图例不同颜色横线的左边数字代表不同的

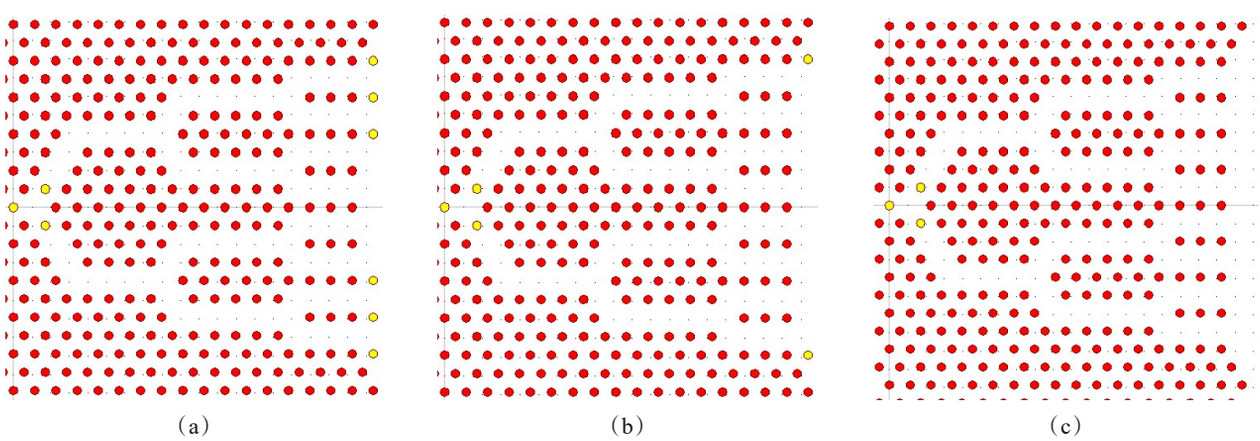

图5 调整后的出射端结构：(a) 6个介质柱；(b) 2个介质柱；(c) 0个介质柱

Fig. 5 The structure of the emitting end after adjustment: (a) 6 medium columns; (b) 2 medium columns; (c) 0 medium columns

光波能量强度,比如绿色线条左边的数字0.1代表的含义为光波能量强度10%,其他颜色代表更大的光波能量强度),介质柱数量不同,对应的仿真结果也不一样,当介质柱数量在2个时,可以发现,该结构的集束性能最好,传播距离最远,可达到450 μm的有效传播距离。但当介质柱数量在6个时,其传播距离大幅度减少,而当介质柱数量在0个时,集束性能和传播距离不如图5(b)结构的性能。因此,我们最后选择图5(b),介质柱数量为2个的结构,该结构散射角度更小,辐射到两侧的能量更少,拥有良好的集束性。可见,在出射口的结构调整变相解决了三角晶格光子晶体的表面波能量损耗问题。

此外,该结构对1.350~1.465 μm的入射光也具有一定的集束性定向辐射,图7和图8显示了入射波长为1.440 μm和1.462 μm的出射光集束仿真结果。

可见,在入射波长为1.440 μm和1.462 μm的出射光下,也分别有65 μm和350 μm的有效传播距离以及良好的集束性能,说明该结构也能提供一定的集束性定向辐射。

2.4　滤波性能优化

由于能量损耗,我们需要对分散柱半径调整,减少能量损耗,以达到最佳的滤波效果[14-16]。

先选取波长为1.490 μm的输入光波,选定上侧环形腔中心柱半径R_{in1}为0.032 9 μm。调整其对应的环形腔分散柱半径R_{in11},选择步长为0.000 2 μm,表1给出滤波结构输出端口1的滤波效率随分散柱半径R_{in11}从0.026 0 μm到0.028 2 μm的变化表。

从表1中我们可以看到,当选定环形腔中心柱半径R_{in1}为0.032 9 μm时,其对应的环形腔分散柱半径R_{in11}从小到大的过程中,端口1的滤波效率呈现先增大后减小的趋势。可见,当环形腔分散柱半径R_{in11}为0.027 4 μm时,滤波效率最高,接近98.4%,说明该半径下的分散柱可以很好地减少能量在环形腔的损耗,从而提高了滤波效率,具体的仿真结果如图9所示。

确定好上侧的环形腔分散柱半径R_{in22},已经可以达到接近99.8%的滤波效率,再研究下侧环形腔分散柱半径R_{in22}与滤波效率的关系图。

同理,选取波长为1.510 μm的输入光波,选定下侧环形腔中心柱半径R_{in2}为0.044 1 μm。依旧选择步长为0.000 2 μm,当分散柱半径R_{in22}从0.021 μm到0.023 2 μm变化时,可以得到滤波结构输出端口2的滤波效率的变化,如表2所示。

从表2中我们可以看到,当选定环形腔中心柱半径R_{in22}为0.044 1 μm时,其对应的环形腔分散柱半径R_{in22}从小到大的过程中,端口2的滤波效率也是呈现先增大后减小的趋势。所以,当环形腔分散柱半径R_{in22}为0.022 0 μm时,滤波效率最高,接近97.3%,说明该半径下的分散柱也是可以很好地减少能量在环形腔的损耗,提高了滤波效率,具体的仿真结果如图10所示。

确定好两侧的环形腔分散柱半径R_{in22},需要考虑下侧环形腔分散柱半径R_{in22}变化是否会对上侧环形腔滤波效率产生影响。选择波段为1.40~1.58 μm,步长为0.002 μm,图11给出了两个滤波结构在该波段的滤波效果。

从滤波效果来看,在波长为1.490 μm时,滤波效率接近98.4%,在波长为1.510 μm时,滤波效率依旧接近97.3%,可见调整后的下侧环形腔分散柱

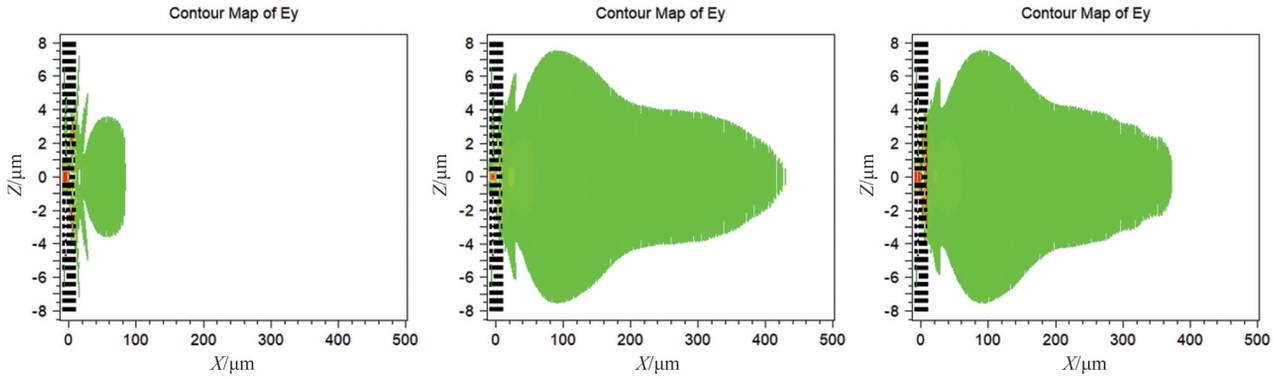

图6　优化后结构的出射光集束仿真:(a) 6个介质柱;(b) 2个介质柱;(c) 0个介质柱

Fig. 6　Simulation of the light-emitting beaming of the optimized structure: (a) 6 medium columns; (b) 2 medium columns; (c) 0 medium columns

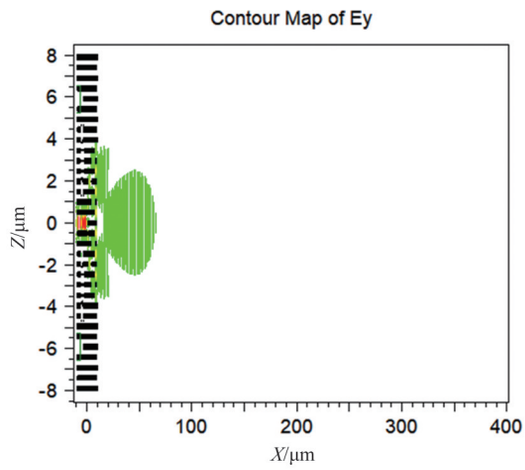

图7 1.440 μm的出射光集束仿真

Fig. 7 Simulation of the light-emitting beaming of 1.440 μm

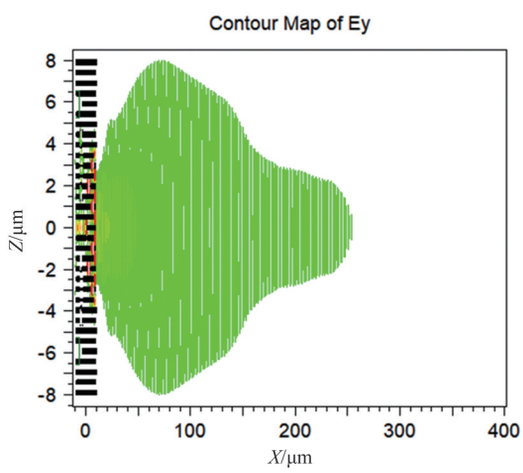

图8 1.462 μm的出射光集束仿真

Fig. 8 Simulation of the light-emitting beaming of 1.462 μm

表1 分散柱半径 R_{in11} 对端口1透射率的影响

Table 1 Effect of the dispersion column radius R_{in11} on the transmission rate of port 1

R_{in11}/μm	Efficiency/%
0.026 0	43.1
0.026 2	55.9
0.026 4	65.8
0.026 6	75.4
0.026 8	85.0
0.027 0	91.1
0.027 2	96.2
0.027 4	98.4
0.027 6	97.8
0.027 8	95.5
0.028 0	90.4
0.028 2	85.7

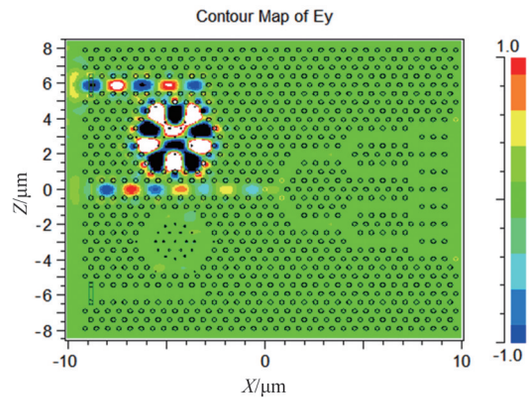

图9 1.490 μm波长滤波结构光场分布

Fig. 9 Light field distribution of the filtering structure at the wavelength of 1.490 μm

表2 分散柱半径 R_{in22} 对端口2透射率的影响

Table 2 Effect of the dispersion column radius R_{in22} on the transmission rate of port 2

R_{in22}/μm	Efficiency/%
0.021 0	86.1
0.021 2	89.2
0.021 4	93.1
0.021 6	95.3
0.021 8	96.5
0.022 0	97.3
0.022 2	96.6
0.022 4	95.7
0.022 6	93.8
0.022 8	91.4
0.023 0	88.7
0.023 2	83.9

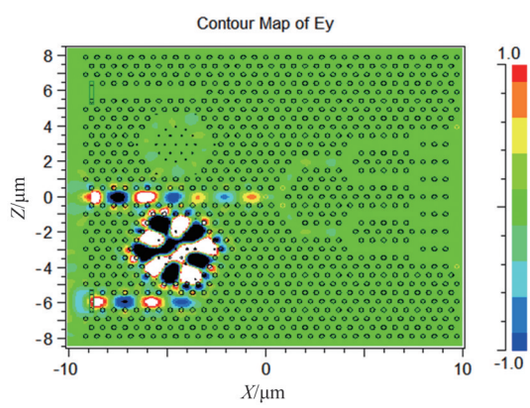

图10 1.510 μm波长滤波结构光场分布

Fig. 10 Light field distribution of the filtering structure at the wavelength of 1.510 μm

半径 R_{in22} 变化不会对上侧环形腔滤波效率产生影响。

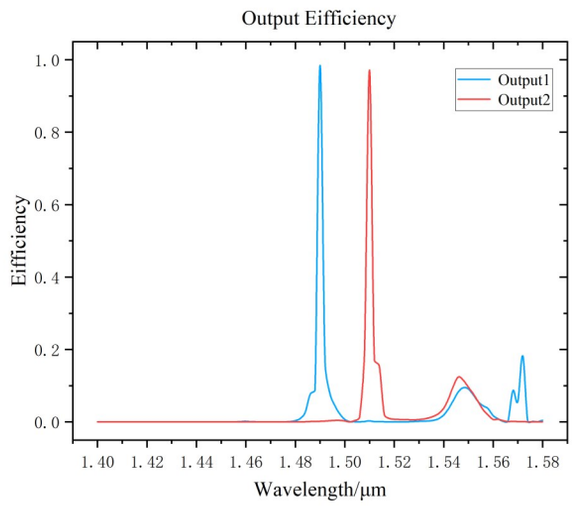

图 11　优化后的滤波性能

Fig. 11　Optimized filtering performance

当前,微纳米加工技术已经能够达到 10 nm 级别的加工精度,介质柱尺寸的微小变化能对光子晶体器件的滤波效果产生显著影响。优化后的结构参数的滤波结构,可以拥有最佳的性能。这样的设计使得器件能够精确地筛选出用户所需的特定信号波长,满足实际应用中对特定波长光能量的需求。这项技术的进步为精确控制光波传播提供了强有力的工具。

3　结语

本文提出了一款集成滤波功能的二维光子晶体波导出射光集束的多功能器件,通过调整环形腔中心柱和分散柱半径,可以实现良好的滤波效果,当环形腔中心柱 R_{in1} 和 R_{in2} 分别为 0.032 9 μm 和 0.044 1 μm、分散柱半径 R_{in11} 和 R_{in22} 分别为 0.027 4 μm 和 0.022 0 μm 时,可以在波段为 1.40~1.58 μm 的入射光中以接近 98.4% 和 97.3% 的效率滤去 1.490 μm 和 1.510 μm 波长的入射光。此外,出射端结构通过多通道之间的相互干涉原理使出射光呈集束状态,对在 1.435~1.465 μm 范围内的入射光具有很好的集束能力,更在 1.447 μm 的入射波长下具有高达 450 μm 的有效传播距离。本研究成功地将光子晶体的高效滤波功能和定向出射光束的高性能集束功能整合到一个单一的器件中。这种设计不仅实现了高度集成化,而且确保了两个功能的高效协同工作。在光子晶体集成器件的研究领域,这项工作展示了重要的创新价值,为未来多功能集成光子器件的发展提供了新的设计思路。

References

[1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.

[2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.

[3] YAN Xin, SUN Yan, LIU Jie. Design and Characteristics Research of Photonic Crystals waveguide [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2012, 29(2): 707-709.
(闫昕,孙岩,刘洁,等. 光子晶体波导的设计与特性[J]. 光谱实验室), 2012, 29(2): 707-709.

[4] LIANG Long Xue, ZHANG Xiao Jin, WU Xiao Suo, et al. The filter and optical switch based on magnetic photonic crystals [J]. Journal of Optics, 2018, 38(5): 138-143.
(梁龙学, 张晓金, 吴小所, 等. 基于磁光子晶体的太赫兹滤波器和光开关[J]. 光学学报), 2018, 38(5): 138-143.

[5] HUANG Hong Mei, ZHANG Zhi Rong, YU Yang, et al. A highly magnetic field sensitive photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance [J]. Sensors, 2020, 20(18): 5193.
(黄红梅,张志荣,于洋,等. 基于表面等离子体共振的高度磁场敏感光子晶体光纤[J]. 传感器),2020, 20(18): 5193.

[6] ZHAO Li Juan, LIANG Ruo Yu, XU Zhi Niu. Review of the design and application of photonic crystal optical fibers [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41 (4): 464-471.
(赵丽娟, 梁若愚, 徐志钮. 光子晶体光纤的设计与应用研究综述[J]. 半导体光电), 2020, 41(4): 464-471.

[7] LI Yun Jia, LI Jun, WEN Hua Feng, et al. Multichannel photonic crystal filter based on a waveguide coupled to an annular cavity [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2021, 32(5): 443-450.
(李韵嘉, 李军, 文化锋, 等. 基于波导与环形腔耦合的多通道光子晶体滤波器[J]. 光电子·激光), 2021, 32(5): 443 -450.

[8] WU Li Heng, WANG Ming Hong. Resonator side 1×5 medium column tuning photonic crystal filter [J]. Strong Laser and Particle Beam, 2019, 31(1): 50-56.
(吴立恒, 王明红. 谐振腔侧边 1×5 介质柱调谐光子晶体滤波器[J]. 强激光与粒子束), 2019, 31(1): 50-56.

[9] HU Fan, WEN Hua Feng, ZHOU Hua Ying, et al. Multi-branch photonic crystal exiting light bundle based on Y-shaped defect [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 206-212.
(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.

[10] ZHOU Hua Ying, WEN Hua Feng, HU Fan, et al. A two-dimensional triangular lattice photonic crystal directional radiation structure based on surface wave modulation [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(4):421-425.
(周华英,文化锋,胡帆,等. 基于表面波调制的二维三角晶格光子晶体定向辐射[J]. 光电子·激光), 2020, 31(4): 421-425.

[11] WU Cong, SUN Jing, SU Mu Yang, et al. Design of the

filter and beam-splitting device based on the ring cavity of a photonic crystal [J]. Journal of Jishou University (Natural Science Edition), 2022, 43(2): 38-44.
(吴聪,孙晶,苏慕阳,等.基于光子晶体环形腔的滤波与分束器件设计[J].吉首大学学报(自然科版)), 2022, 43(02): 38-44.

[12] Lima V, Villani L, Camino J, et al. Band gap optimization of one-dimension elastic waveguides using spatial Fourier plane wave expansion coefficients [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235 (14): 2594-2609.

[13] BAI Xi Xian. Finite-difference time-domain method for Maxwell's equations in complex dispersive medium: analysis and applications [D]. Jinan: Shandong University, 2021: 37-82.
(白希贤.复杂色散介质中麦克斯韦方程组的时域有限差分法:分析与应用[D].济南:山东大学), 2021: 37-82.

[14] JIN Yi Qun, WEN Hua Feng, LI Yun Jia, et al. Two-dimensional triangular lattice photonic crystal beam splitter based on multimode interference [J]. Photoelectron Laser, 2021, 32(3): 281-286.
(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.

[15] WU Qing Tao. Study on the coupled waveguide beam splitter and propagation of two-dimensional photonic crystals [D]. Ningbo: Ningbo University, 2021:30-32.
(武晴涛.二维光子晶体耦合型波导分束器及传播研究[D].宁波:宁波大学), 2021: 30-32.

[16] LI Long Fei. Study and application of the transport characteristics of a 2D photonic crystal resonator [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021: 29-34.
(李龙飞.二维光子晶体谐振腔的传输特性研究与应用[D].兰州:兰州交通大学),2021: 29-34.

[17] ZHOU Hua Ying. A Research on Two-dimensional Photonic Crystal Multi-channel Filter and the Coupling Characteristics of Outgoing Light [D].Ningbo: Ningbo University, 2021.
(周华英.二维光子晶体多通道滤波器及出射光耦合特性研究[D].宁波:宁波大学), 2021.