

引用本文: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.

基于二维光子晶体的四通道滤波器设计

钟亮,苏慕阳,闫中胜,吴聪,孙晶*

(吉首大学 物理与机电工程学院,湖南 吉首 416000)

摘要:为实现光电信息器件的高集成度和高效输出,提高光电信息处理能力,设计了一种基于二维光子晶体的四通道滤波器,根据4个点缺陷微腔与线缺陷波导耦合原理,引入反射异质结并调整微腔与反射结的距离,提高输出效率,对滤波器1 403、1 426、1 449、1 508 nm四波长的波分复用功能进行仿真。仿真结果表明:该器件可实现高效传输,四波长透射率均超过95%,插入损耗均小于0.23 dB,通道间串扰均小于-8.7 dB。

关键词:二维光子晶体;波分复用器;反射异质结;二维时域有限差分法

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)04-0026-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.04.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of four-channel filter based on two-dimensional photonic crystal

ZHONG Liang, SU Muiyang, YAN Zhongsheng, WU Cong, SUN Jing*

(College of Physics and Electromechanical Engineering, Jishou University, Jishou Hunan 416000, China)

Abstract: In order to achieve high integration and efficient output of optoelectronic information devices, and improve the optoelectronic information processing ability, a four-channel filter based on two-dimensional photonic crystals is designed. According to the coupling principle of four point defect microcavities and line defect waveguides, the reflection heterojunction is introduced and the distance between the micro-cavity and the reflection junction is adjusted to improve the output efficiency. The wavelength division multiplexing function of four-wavelength of 1 403, 1 426, 1 449 and 1 508 nm is simulated. The simulation results show that the device can achieve efficient transmission, the transmission of all four wavelengths is more than 95%, the insertion loss is less than 0.23 dB, and the cross-talk between channels is less than -8.7 dB.

Key words: two-dimensional photonic crystal, wave division multiplexer, reflection junction, two-dimensional time domain finite difference method

0 引言

光子晶体^[1-2]是一种介电常数周期性排列的人造材料,由于某些特定频率的光不能在光子晶体内部传播,即能带之间存在带隙^[3-4],因此可利用光子晶体的带隙特征设计特定的光学器件。通过在周期性排列的光子晶体介质中引入缺陷,可以控制特定的电磁波传

输,此原理常被运用在光开关^[5]、逻辑门^[6]、滤波器^[7-10]、光纤通信^[11]、光子晶体分束器^[12]等方面。ZHZANG T等人^[13]在正方晶格中引入了点缺陷,通过波导与4个不同参数微腔的耦合,实现了四波长的波分解复用功能,透射率最高可达100%,但最低仅为85.6%。ZHZANG J等人^[14]设计了一种由双环形谐振腔和主波导组成的六通道光子晶体滤波器,透射率最高为93.99%,最低只有84.24%。FOROUGHIFAR A等人^[15]设计了一种以环形腔与点缺陷为主体的四通道滤波器,其最高透射率达到了98%,最低仅有56%。现有的滤波器在实现高透射率的同时也普遍存在透射率较低的问题。基于此,本文设计一种基于二维光子晶体的四通道波分复用器,将微腔与主波导耦合并引入反射异质结,调整反射异质结与微腔之间的距离,提高各通道的透射率。

收稿日期:2023-02-17。

基金项目:吉首大学研究生科研项目(Jdy22045)资助。

作者简介:钟亮(1998—),男,湖南益阳人,吉首大学物理与机电工程学院硕士研究生,主要研究方向为非线性光学,主持了吉首大学校级课题1项。

*通信作者:孙晶(1982—),女,博士,副教授,主要研究方向为信息光学、光与物质相互作用、光电功能材料等。



1 结构设计与理论分析

光子晶体滤波器的主要原理是利用光子晶体存在带隙的特性,按照缺陷、微腔的耦合特性挑选特定的频率。首先,通过调整介质柱参数获得特定的禁带范围;其次,引入缺陷波导控制光的传输;最后,通过谐振腔滤出特定波长的光。为实现特定波长输出和提高输出效率,本文对主波导输出端口、微腔、微腔位置进行设计优化。

在空气介质下将光子晶体按三角晶格排列,晶格常数 $a=560\text{ nm}$, 介质柱折射率为 3.6, 背景折射率为 1。波导输出端口不加反射结构,如图 1 所示。优化后的波导结构如图 2 所示,由输入端、主波导(PC_1)、微腔、输出端和反射异质结(PC_2)构成。

本文利用平面波展开(PWM)法^[16]计算在 TE(横模)模式下晶格带隙结构,如图 3~图 6 所示。其中,横坐标 Γ 、M、K 分别表示第一布里渊区的 3 个坐标,纵坐标表示归一化频率。在主波导 PC_1 中,圆介质柱半径 $r=80\text{ nm}$,能

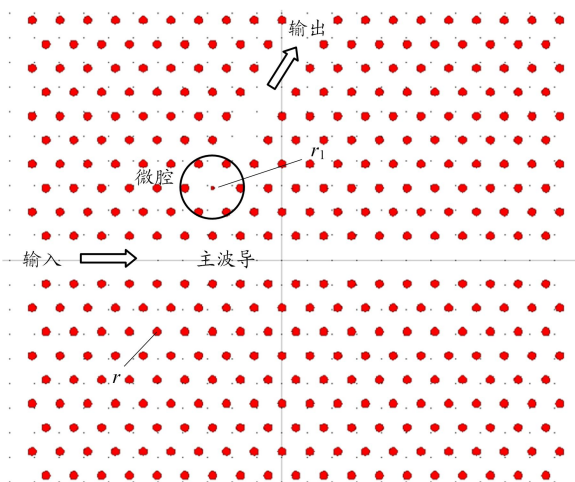


图 1 无反射结构的滤波器图

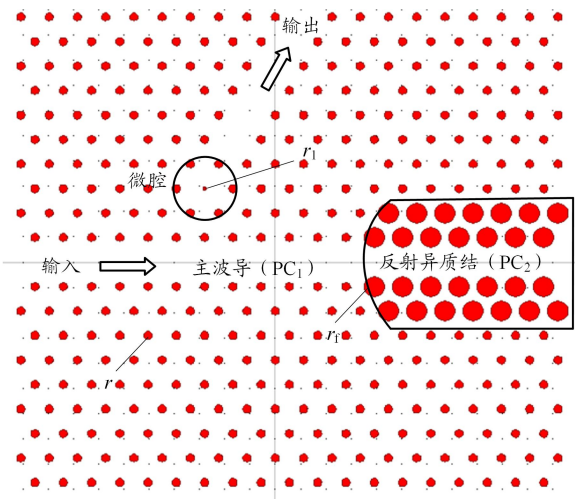


图 2 优化后的滤波器图

带图如图 3 所示,阴影部分为禁带,归一化频率为 $0.322\sim 0.528\text{ }a/\lambda$ 。引入线缺陷波导,其能带图如图 4 所示,缺陷态导模归一化频率为 $0.361\sim 0.446\text{ }a/\lambda$,对应的波长为 $1\,255\sim 1\,551\text{ nm}$ 。在反射异质结 PC_2 中,圆介质柱半径(反射异质结的介质柱部分) $r_f=200\text{ nm}$,反射异质结的能带图如图 5 所示。选取中间最宽的禁带进行分析,其归一化频率为 $0.357\sim 0.435\text{ }a/\lambda$,引入线缺陷后能带图如图 6 所示,缺陷态导模归一化频率为 $0.405\sim 0.430\text{ }a/\lambda$,其对应

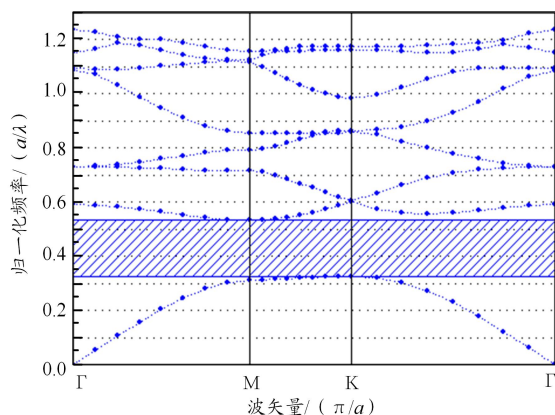


图 3 PC_1 在 TE 模式下的能带图

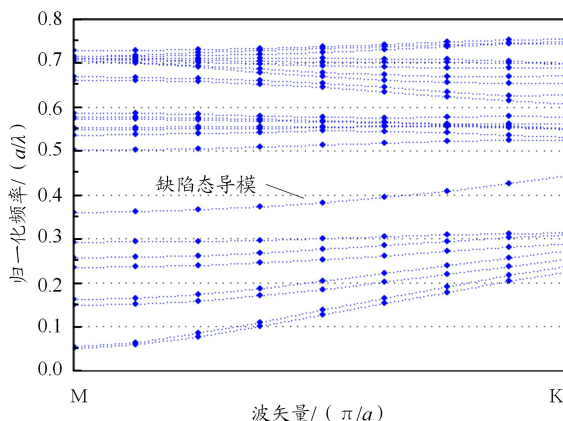


图 4 PC_1 波导的能带图

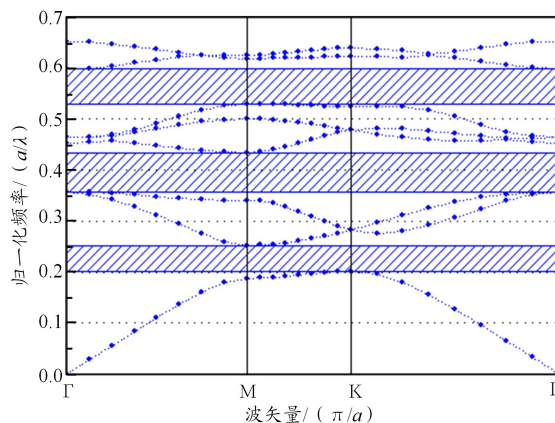


图 5 PC_2 在 TE 模式下的能带图

钟亮,苏慕阳,闫中胜,等.基于二维光子晶体的四通滤波器设计

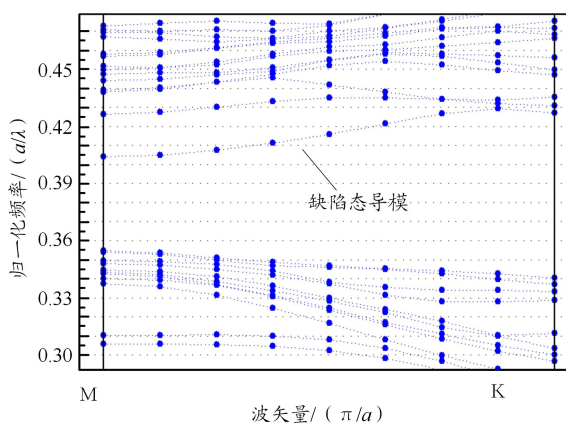


图6 PC₂波导的能带图

的波长为1 302~1 382 nm。

由于 $0.361 \sim 0.405 a/\lambda$ 内的光只能在 PC₁ 波导中传播,禁止在 PC₂ 中传播,当光传输到 PC₂ 前端时,光会反向传播,从而与微腔再次耦合,既能降低能量损耗又能提高耦合效率。因此,本文选择 $0.361 \sim 0.405 a/\lambda$ 为研究区间,其对应波长为 1 382~1 551 nm。

本文利用时域有限差分(FDTD)法研究微腔内介质柱的半径与谐振峰之间的关系发现,在一定范围内,随着半径的减小,谐振峰会往短波移动。根据该原理,调节微腔内介质柱的半径大小即可对不同波长的光实现谐振。

图7为耦合结构图,其微腔内的归一化频率对时间的微分表达式为

$$\frac{dA}{dt} = j\omega_0 A - \left(\frac{2}{\tau_b} + \frac{1}{\tau_d} \right) A + e^{j\theta_1} \sqrt{\frac{2}{\tau_b}} S_{+1} + e^{j\theta_2} \sqrt{\frac{2}{\tau_b}} S_{+2} + e^{j\theta_3} \sqrt{\frac{2}{\tau_d}} S_{+3} \quad (1)$$

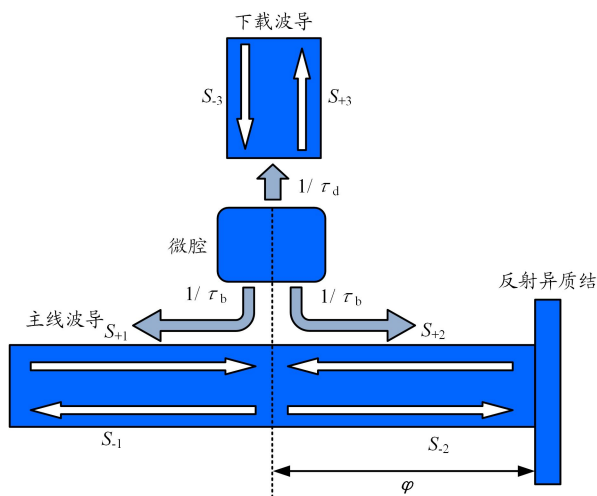


图7 波导与微腔耦合结构图

其中, A 表示微腔归一化信号幅度, $|A|^2$ 表示腔内的能量; t 表示时间, ω_0 表示谐振频率, $2/\tau_b$ 表示微腔耦合到主线波导的衰减率, $1/\tau_b$ 表示微腔耦合到主线波导的衰减率, $1/\tau_d$ 表示微腔耦合到输出波导的衰减率; $\theta_i (i=1,2,3)$ 表示参考面到三端口的相位差,参考面在波导的中间位置,保证 $\theta_1=\theta_2$ 。在波导中,输入波与输出波的关系表示为

$$S_{-1} = S_{+2} - e^{-j\theta_1} \sqrt{\frac{2}{\tau_b}} A \quad (2)$$

$$S_{-2} = S_{+1} - e^{-j\theta_2} \sqrt{\frac{2}{\tau_b}} A \quad (3)$$

$$S_{-3} = -S_{+3} - e^{-j\theta_3} \sqrt{\frac{2}{\tau_d}} A \quad (4)$$

其中, $S_{+i} (i=1,2,3)$ 分别表示 3 个端口的输入波振幅, $S_{-i} (i=1,2,3)$ 分别表示 3 个端口的输出波振幅。右侧端口为反射异质结,可以实现全反射,所以有 $S_{+2}=e^{-j\varphi} S_{-2}$, φ 表示参考面到反射异质结的相位差。若 $S_{+3}=0$,应用傅里叶变换可以计算反射系数和传输系数分别为

$$T(\omega) = \left| \frac{\tilde{S}_{-3}}{\tilde{S}_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{e^{-j(\theta_1-\theta_2)} \sqrt{\frac{2}{\tau_b}} \sqrt{\frac{2}{\tau_d}} (1+e^{-j\varphi})}{j(\omega-\omega_0) + \frac{2}{\tau_b} (1+e^{-j\varphi}) + \frac{1}{\tau_d}} \right|^2 \quad (5)$$

$$R(\omega) = \left| \frac{\tilde{S}_{-1}}{\tilde{S}_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{(\omega-\omega_0) + \frac{2}{\tau_b} (1+e^{-j\varphi}) + \frac{1}{\tau_d}}{j(\omega-\omega_0) + \frac{2}{\tau_b} (1+e^{-j\varphi}) + \frac{1}{\tau_d}} \right|^2 \quad (6)$$

其中, $\tilde{S}_{+i}$ 是 S_{+i} 的傅里叶变换, $|S_{+i}|^2$ 表示信号功率。由式(5)、式(6)可知,若 $\tau_b/\tau_d=4$ 和 $\varphi=2m\pi (m$ 为整数),有 $T(\omega)=1$ 和 $R(\omega)=0$ 。由此,本文可以通过调节谐振腔与反射异质结之间的距离实现高透射率。

优化前,无反射异质结时的透射率如图8所示。可以看出,透射率较差且低。优化后,有反射异质结,调整谐振腔与反射异质结之间的距离为 $9a$ 时的透射率如

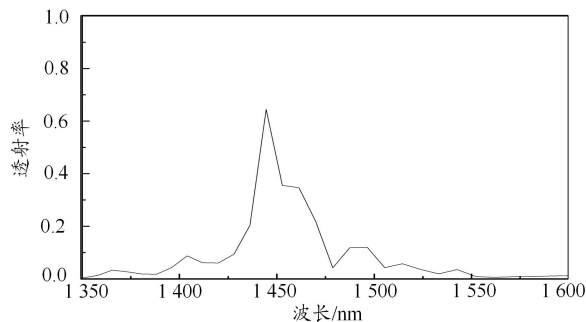


图8 优化前的透射率

图 9 所示。可以看出,透射率已大幅提高。对比图 8 和图 9 可知,优化后,波长为 1 449 nm 时入射光的透射率显著增强,达到 99%。稳定输入波长为 1 449 nm 时入射光的光场图如图 10 所示。可以看出,由点缺陷和异质结所组合的结构对目标光的局域效果较好。因此,基于上述结构设计滤波器具有一定的可行性。

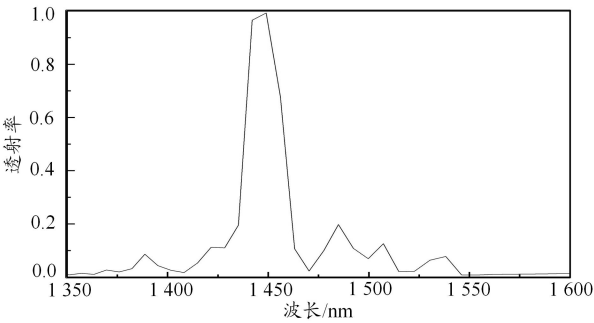


图 9 优化后的透射率

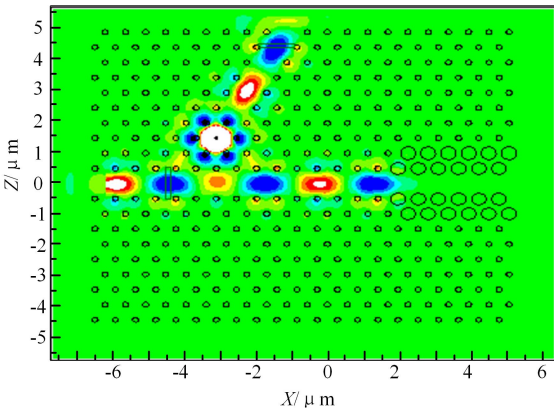


图 10 稳定输入波长为 1 449 nm 时的入射光的光场图

2 设计与仿真

2.1 模型设计

本文通过调节微腔内部介质柱半径,增加反射异质结以及调节反射异质结与谐振腔之间的距离,获得了不同的谐振频率,并提高了透射率。基于此原理,本文设计一种四通道波滤波器件,结构图、参数分别如图 11、表 1 所示。

四通道的透射率情况如图 12 所示。可以看出,该四通道波分复用器在 1 449、1 403、1 426、1 508 nm 这 4 个波长的透射率分别为 99%、95%、99%、97%, 均在 95% 以上,可实现高透射率输出。将 4 个波长的光分别持续输入主波导中, 得到稳定的光场分布图如图 13 所示。可以看出,对应波长的光能较好地局域在对应的波导中。综上所述,本文提出的四通道滤波器可以实现高效的滤波效果。

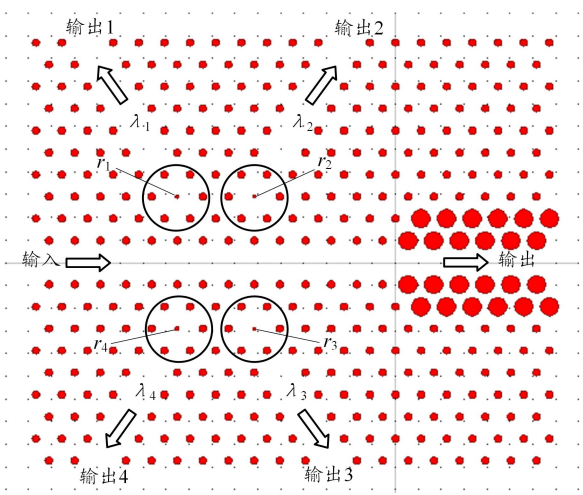


图 11 四通道波分复用器结构图

表 1 四通道波分复用器参数表

输出端口	微腔半径/nm	与反射异质结的距离	谐振波长/nm	透射率
1	0.43r	9a	1 449	99%
2	0.33r	6a	1 403	95%
3	0.39r	6a	1 426	99%
4	0.527r	9a	1 508	97%

2.2 性能与分析

滤波器的性能通常用插入损耗 I 和信道串扰 C 来评价。其中,插入损耗 I 表示信号经过滤波器之后传输损耗,单位为 dB,计算公式如下:

$$I=-10\lg\frac{P_0}{P_i} \tag{7}$$

其中, P_0 表示输出端口的光功率, P_i 表示输入端口的光功率。信道串扰 C 表示其它通道对目标通道的串扰,单位为 dB,计算公式如下:

$$C=10\lg\frac{S}{T} \tag{8}$$

其中, S 表示相邻信道间干扰的归一化传输功率, T 表示传输信道的最大归一化传输功率。

将仿真结果代入式(7)、式(8),计算得出的具体结果如表 2、表 3 所示。可以看出,各通道的插入损耗较小,最大值仅为 0.23 dB;各个信道之间的串扰较低,最大值仅为 -8.7 dB。以上数据表明,本文所设计的四通道滤波器具有较好的性能。

表 2 各波长之间的插入损耗

输出波长/nm	插入损耗/dB
1 403	0.11
1 426	0.23
1 449	0.12
1 508	0.04

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

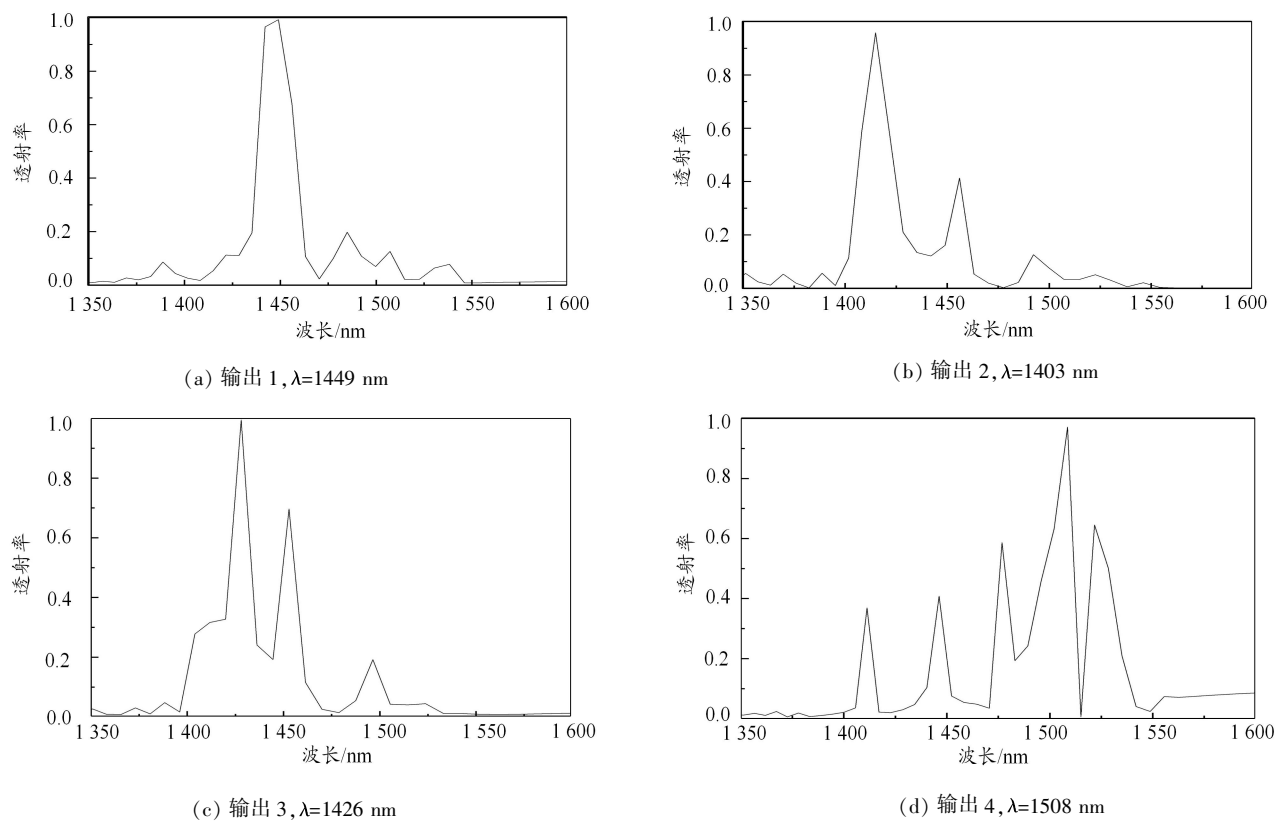


图 12 四通道波分复用器各通道透射谱

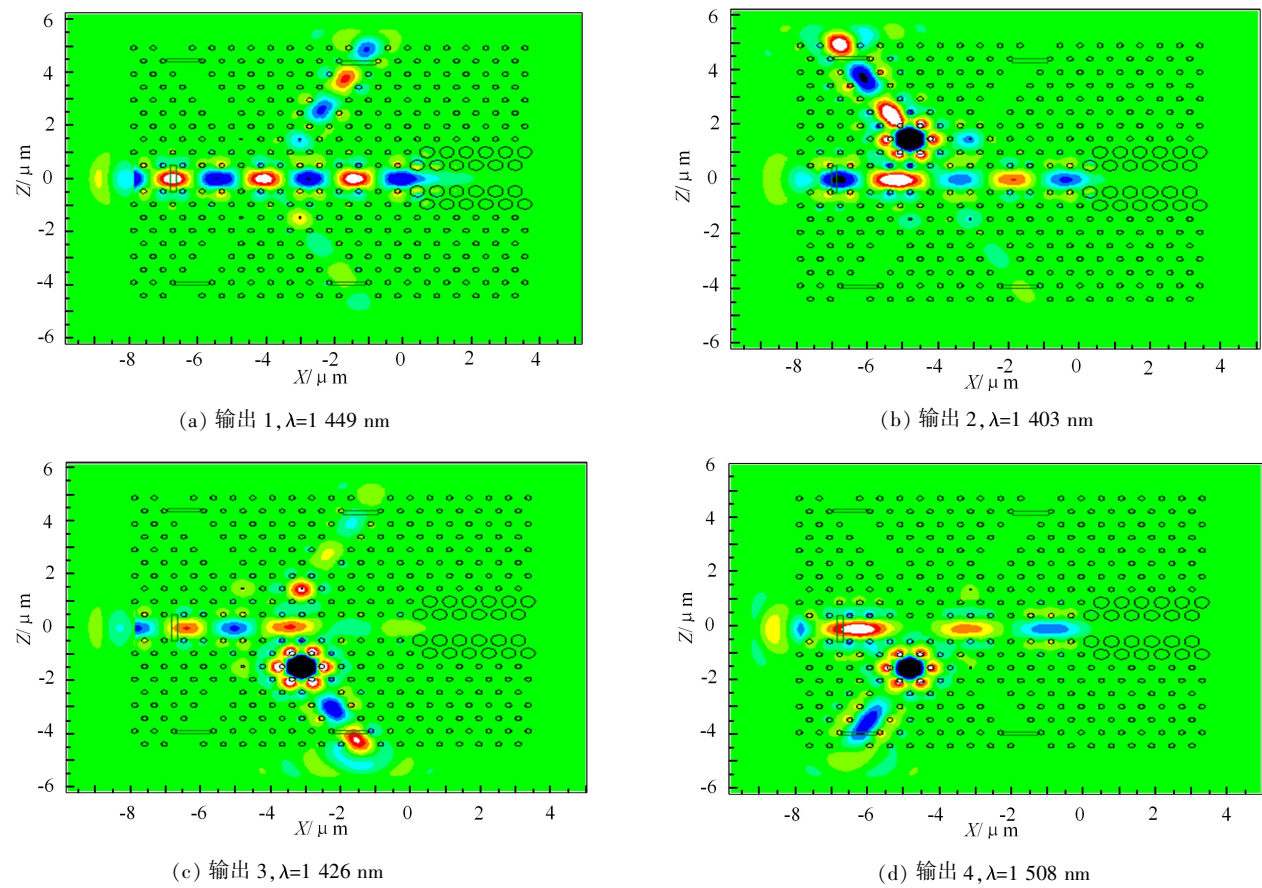


图 13 四通道波分复用器的光场分布图

表3 各信道之间的信道串扰值

信道	串扰值/dB			
	输出1	输出2	输出3	输出4
输出1	—	-17.7	-18.6	-29.7
输出2	-31.3	—	-8.7	-32.1
输出3	-18.3	-9.3	—	-19.3
输出4	-26.6	-19.5	-15.6	—

3 结束语

本文基于光微腔与波导的耦合效应,通过引入反射异质结以及调整微腔与反射异质结之间的距离,设计了一种基于二维光子晶体的四通道滤波器。仿真结果表明:本文提出的滤波器可以实现四波长的波分复用,各通道的输出波长分别为1 403、1 426、1 449、1 508 nm,透射率均在95%以上,最大插入损耗仅为0.23 dB,最大信道串扰为-8.7 dB。这种四通道滤波器在光通信应用中具有较好的适用性和可推广性。

参考文献:

- [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] PLIHAL M, MARADUDIN A A. Photonic band structure of two-dimensional systems: the triangular lattice[J]. Phys Rev B Condens Matter, 1991, 44(16): 8565–8571.
- [4] YABLONOVITCH E, GMITTER T J. Photonic band structure: the face-centered-cubic case[J]. Physical Review Letters, 1989, 63(18): 1950–1953.
- [5] RAJASEKAR R, PARAMESHWARI K, ROBINSON S. Nano-optical switch based on photonic crystal ring resonator[J]. Plasmonics, 2019, 14(6): 1687–1697.
- [6] VEISI E, SEIFOURI M, OLYAEE S. A novel design of all-optical high speed and ultra-compact photonic crystal AND logic gate based on the Kerr effect [J]. Applied Physics B, 2021, 127(5): 1–9.
- [7] KANNAIYAN V, SAVARIMUTHU R, DHAMODHARAN S K. Investigation of 2D-photonic crystal resonant cavity based WDM demultiplexer [J]. Opto-Electronics Review, 2018, 26(2): 108–115.
- [8] TAVOUSHI A. Wavelength-division demultiplexer based on hetero-structure octagonal-shape photonic crystal ring resonators [J]. Optik, 2019, 179: 1169–1179.
- [9] YIFEI W, MENG MENG W, FENG W, et al. Three-channel wavelength division demultiplexer based on photonic crystal [J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(12): 27–29.
- [10] SARANYA D, MOHAN S, RAJESH 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.
- [11] DE M, GANGOPADHYAY T K, SINGH V K. Prospects of photonic crystal fiber as physical sensor: an overview[J]. Sensors, 2019, 19(3): 1–27.
- [12] YANG Z, CHEN K, WANG C-G, et al. A photonic crystal beam splitter used for light path multi-plexing: synergy of TIR and PBG light guiding [J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(2): 1–8.
- [13] ZHANG T, SUN J, YANG Y. Design of WDM based on photonic crystal[J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(3): 33–35.
- [14] ZHANG J, ZHANG M, LIU H, et al. Compact photonic crystal multi-channel drop filter for CWDM systems [J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2019, 37: 100732–100732.
- [15] FOROUGHIFAR A, SAGHAEI H, VEISI E. Design and analysis of a novel four - channel optical filter using ring resonators and line defects in photonic crystal microstructure[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(2): 1–12.
- [16] YEE K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302–307.