

文章编号 1004-924X(2025)08-1190-12

二信道光子晶体滤波系统

刘杰^{1*}, 卢辉东², 赵俊¹, 董杰¹, 胡延梅¹, 温建蓉¹, 邢琪¹, 李鹏辉¹

(1. 山西电子科技学院 微电子学院, 山西 临汾 041000;

2. 青海大学 能源与电气工程学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 根据耦合模理论和线缺陷波导、点缺陷谐振腔的控光特性, 在二维四方晶格光子晶体中设计了一种由主波导、两个下载波导、两个谐振腔和两个反射腔组成的二信道滤波系统。基于平面波展开法计算了完整光子晶体、线缺陷波导的能带结构, 分析了点缺陷谐振腔的模式分布。基于时域有限差分法研究了滤波系统的传输特性, 分析了反射壁、反射腔到谐振腔所在参考平面的距离取值呈线性变化时对系统下载效率的影响, 并给出透射率峰值随它们的变化规律。根据计算结果指导滤波系统的仿真设计, 模拟结果表明: 该滤波系统能够把波长为 $\lambda_1=1561.2\text{ nm}$, $\lambda_2=1570.5\text{ nm}$ 的光信号较为精准地耦合到各自下载波导中, 对应的透射率分别为98.9%, 97.2%, 半峰全宽分别为3.3 nm, 3.5 nm, 品质因子分别为473, 449, 波长间隔为 $\Delta\lambda=9.3\text{ nm}$ 。该滤波系统的尺寸为 $20.88\text{ }\mu\text{m}\times 22.04\text{ }\mu\text{m}$, 设计结构简单, 工作波长容易调节, 有利于大规模集成, 可以为光通信领域光路集成设计提供一定的理论基础和思路。

关键词: 耦合模理论; 波导; 点缺陷谐振腔; 平面波展开法; 时域有限差分法; 滤波器

中图分类号: O43 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20253308.1190

CSTR: 32169.14.OPE.20253308.1190

Two-channel photonic crystal filter system

LIU Jie^{1*}, LU Huidong², ZHAO Jun¹, DONG Jie¹, HU Yanmei¹,

WEN Jianrong¹, XING Qi¹, LI Penghui¹

(1. School of Microelectronics, Shanxi University of Electronic Science and Technology,
Linfen 041000, China;

2. School of Energy and Electrical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

* Corresponding author, E-mail: jetliu1986@163.com

Abstract: Based on the temporal coupled-mode theory and the light-controlling characteristics of line-defect waveguides and point-defect resonant cavities, a two-channel filtering system composed of a main waveguide, two drop waveguides, two resonant cavities, and two reflecting cavities was designed using the two-dimensional square lattice photonic crystal. The band structures of the complete photonic crystal and the line-defect waveguide were calculated by the plane-wave expansion (PWE) method, and the modal distribution of the point-defect resonant cavity was analyzed. Using the Finite-Difference Time-Domain

收稿日期: 2025-01-22; 修订日期: 2025-03-21.

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目 (No. 2022JX04); 山西省高等学校科技创新项目 (No. 2024L461); 山西省高等学校科技创新项目 (No. 2022L639)

(FDTD) method, the transmission characteristics of the filtering system were investigated. The effects of linear variations in the distances from the reflector and reflection cavity to the reference plane of the resonant cavity on the system's download efficiency were analyzed. Additionally, the variation patterns of transmittance peaks with these distance parameters were elucidated. Guided by the calculation results, the simulation design of the filtering system was implemented. The simulation results demonstrate that the filtering system can couple the optical signals with wavelengths of 1 561.2 nm and 1 570.5 nm into their respective drop waveguides with relatively high precision. The transmission efficiencies of them are 98.9% and 97.2%. The full width at half maximum (FWHM) values are 3.3 nm and 3.5 nm. The quality factors are 473 and 449, and the wavelength interval is $\Delta\lambda=9.3$ nm. The proposed filtering system exhibits a compact footprint of merely $20.88\ \mu\text{m}\times 22.04\ \mu\text{m}$ with a structurally simple configuration. Featuring a tunable operating wavelength and high compatibility with large-scale integration, this study can provide certain theoretical foundations and conceptual insights for the design of integrated optical circuits in optical communications.

Key words: coupled mode theory; waveguide; point defect resonator; plane wave expansion method; Finite-Difference Time-Domain(FDTD); filter

1 引言

光子晶体自诞生以来因其优异的控光性能在微纳米结构设计领域被持续关注^[1]。基于其光子带隙和光子局域特性所设计的微纳米结构包括光子晶体波导、谐振腔、反射器、光纤、传感器、开关、偏振分束器、调制器等光学器件,还涉及可调谐工作波长的滤波系统和波分复用/解复用系统^[2-7]。光子晶体器件具有设计灵活、体积较小、灵敏度高、能耗低且容易实现大规模集成等特点,必将在未来光通信领域发挥重要作用^[8-10]。

光子晶体滤波器作为光通信器件中的核心元件,一直是人们研究的热点,目前已有多种设计方案。C. Manolatou等人早在1999年就提出了四端口滤波器的理论模型,并用模态耦合理论分析了滤波器的滤波性能^[11]。同时期的Fan等人在二维四方晶格光子晶体中提出了四端口滤波器验证了上述理论^[12],该滤波器由两条波导和两个单模点缺陷谐振腔组成,通过改变缺陷介质柱调谐工作频率,将两个谐振腔在两个波导间对称放置并调整它们之间的距离实现光信号近乎100%的下载;Sangin等人于2004年在二维四方晶格光子晶体中设计了带有反射谐振腔的三端口多信道滤波器^[13],给出了当反射

谐振腔与滤波谐振腔之间的往返相位延迟为 $\Delta\varphi=2m\pi$ (m 取非负整数)时,各下载端口的透射率均超过96%。Kuo等人同样在四方晶格中采用非对称光子晶体超胞谐振腔设计出了主波导末端增加反射壁的多信道三端口波分复用系统^[14],下载波导端的透射率超过90%,最小的半峰全宽为 $\Delta\lambda=1.4$ nm。但他们设计的系统普遍存在各信道间距较窄的问题,且器件结构复杂容易造成信号串扰。2006年,上海交通大学Ren等人提出了带有波长选择性反射谐振腔的三端口滤波器^[15],并用耦合模理论推导了实现100%下载效率的条件,该器件的特点是反射腔和谐振腔参数一样,彼此独立工作,相互不发生耦合,下载效率主要决定于两个条件,一是反射腔和谐振腔之间的距离(相位延迟),二是谐振腔到主波导和下载波导的耦合衰减系数比,该滤波器可实现100%下载效率,但只有一个信道。刘杰等人利用缺陷模之间的耦合原理在二维三角晶格结构光子晶体中将主波导、60°弯下载波导和环形谐振腔组合设计了两种多信道滤波系统^[16-17],各信道透射率均超过了90%,但环形腔并不是单模腔,无法消除杂信号。2023年,南京邮电大学胡宇宸等人以耦合模理论结果为指导,在二维三角晶格光子晶体中设计一种用于密波分复用系统的端口分插复用器^[18],可将

1 555.4 nm, 1 556.2 nm 的光波高效分离。

本文根据耦合模理论结合光子晶体线缺陷波导、点缺陷谐振腔的控光特性,在二维四方晶格光子晶体中设计了由主波导、两个下载波导、两个谐振腔和两个反射腔组成的二信道滤波系统。利用 MPB 计算了完整光子晶体、线缺陷波导能带结构(MPB 和下文中的 MEEP 均是由麻省理工学院基于平面波展开法和时域有限差分法开发的开源免费计算软件^[19]),分析了点缺陷谐振腔的谐振模态随缺陷介质柱半径 r_d 的变化规律,利用 MEEP 计算了光信号在滤波器下载波导端的透射谱和稳态场分布并对滤波器的结构进行了优化。研究表明,该滤波系统能够把波长为 $\lambda_1=1\,561.2\text{ nm}$, $\lambda_2=1\,570.5\text{ nm}$ 的光信号较为精准地剥离到各自下载波导中。所设计的光子晶体滤波系统由两个高效的两端口滤波器上下对称放置组成,尺寸为 $20.88\text{ }\mu\text{m}\times 22.04\text{ }\mu\text{m}$,器件结构简单,设计相对巧妙,工作波长易于调节,有利于大规模集成,可以为光通信领域光路集成设计提供一定的理论基础和思路。

2 结构模型的基础理论

完整的光子晶体可以产生光子带隙,带隙范围内相应频率的电磁波将被 100% 反射,因而不能在晶体中传播。若破坏晶体中某些位置的周期性,即将缺陷引入其中,按照能带理论,在带隙内将有相应的缺陷模出现。引入缺陷,可通过移除介质柱或改变介质柱的半径及材料等方式完成^[20]。

2.1 完整二维光子晶体及其能带

以空气为背景,晶格常数设为 a ,将半径为 $r=0.2a$ 的介质柱(视为无限长,介质材料为砷化镓,介电常数为 11.4^[20])按四方晶格在空间周期性排布即构成二维四方晶格光子晶体。利用 MPB 计算其能带,结果如图 1 所示,可知该晶体拥有光子带隙(TM 极化模式,场分量为: H_x, H_y, E_z),带隙的归一化频率范围为 $f=0.297\sim 0.442(\omega a/2\pi c)$,频率处于该范围内的电磁波被禁止在该晶体中传播。

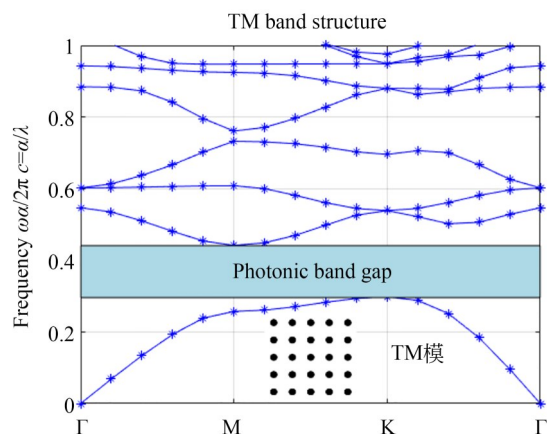


图 1 完整光子晶体能带

Fig. 1 TM band structure of the complete photonic crystal

2.2 线缺陷波导及其能带分析

通过在完整的光子晶体中沿水平方向移除一排介质柱形成线缺陷波导(波导模型如图 2 右下角所示)。利用 MPB 计算该波导的能带,结果如图 2 所示,可知线缺陷的引入导致在完整光子晶体的带隙内出现线缺陷导模(图 2 浅蓝色区域内红色点虚线,彩图见期刊电子版)。该导模为单模,它的归一化频率范围为 $f=0.305\sim 0.421(\omega a/2\pi c)$,其中两条黑色横线间的频段为优质导模频段^[20](对于信息传输,通常会远离导模斜率为 0 且不稳定的带区,即导模边缘区域。导模在 $f=0.35\sim 0.41$ 范围内近乎是一条直线,即斜率相对恒定,群速度 $v_p = d\omega/dk = c$ (c 为常数),满足信息传输条件,可以将光信号的损耗和失真降至最低^[20]),频率

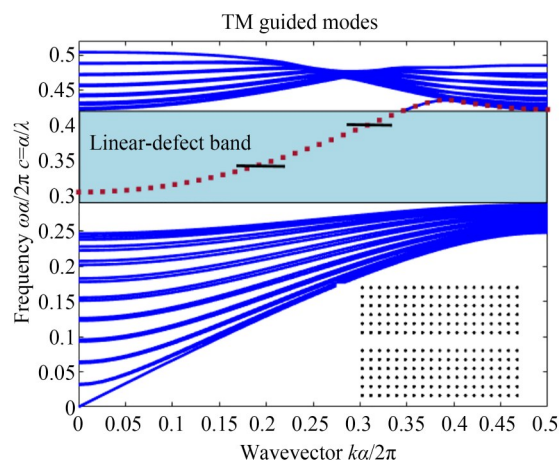


图 2 线缺陷波导能带

Fig. 2 Band structure of a line defect waveguide

与导模一致的光信号被允许存在于线缺陷波导中,即该光信号可以在波导中传播。需要指出的是,光子晶体线缺陷波导的导光机制是利用光子带隙将导模局域在缺陷处来实现光信号在低折射率介质(空气)中传播,故光信号的传输不依赖于线缺陷波导的几何形状,且光信号与介质柱相互作用极弱,理论上可实现光信号近乎无损耗传播。

2.3 点缺陷谐振腔及其模态分析

同样的,在完整光子晶体中移除一根介质柱或改变介质柱的半径形成点缺陷谐振腔(图3),点缺陷的引入导致在带隙内出现了点缺陷模,与点缺陷模频率一致的光信号将被光子带隙局域在点缺陷的位置。本文通过改变 5×5 晶格光子晶体中心处介质柱的半径得到一系列不同谐振频率的点缺陷(谐振腔),利用MPB计算了其谐振模频率随介质柱半径的变化规律,结果如图3所示,当介质柱半径在 $0 \leq r_d \leq 0.2a$ 范围内递增时,谐振腔内只存在一个缺陷模,这样的点缺陷称为单模谐振腔,它的归一化谐振频率从0.378 5递减至0.288 4,在此范围内对应的模态为单极模态,此类模态的 E_z 场分布具有单极对称性,图3中虚线左侧是 $r_d = 0.08a$ 时点缺陷谐振腔的结构模型和点缺陷模(谐振频率 $f=0.348\ 0$)的 E_z 分布图。若继续增大介质柱的半径($0.2a \leq r_d \leq 0.43a$),谐振腔处存在2个简并的缺陷模,频率从0.427 3递减

至0.288 5,此范围内对应的模态为简并偶极模态,此类模态的场分布具有偶极对称性,图3中虚线右侧是 $r_d = 0.3a$ 时点缺陷谐振腔的结构模型和点缺陷模(谐振频率 $f=0.364\ 9$)的 E_z 分布图。

3 滤波器模型的提出及优化

3.1 三端口滤波器

将线缺陷波导和点缺陷谐振腔对称放置,组成三端口滤波器,如图4所示,它由主波导、谐振腔、下载波导组成。主波导和下载波导允许线缺陷模上任意频率的光信号传播,但连接主波导和下载波导的谐振腔只对特定频率的光信号有局域作用,它可以从主波导中提取与自己谐振频率一致的光信号耦合到下载波导中,也可以把下载波导中与自己频率一致的光信号上载至主波导。本文利用MEEP,将信号源设置在主波导的输入端(信号源为中心频率 $f=0.355$,频率宽度 $df=0.2$ 的高斯脉冲源),设谐振腔的谐振频率为目标频率 $f_0=0.378\ 5$ (即去除谐振腔中心介质柱, $r=0$ 时谐振腔的谐振频率),与目标频率相同的光信号在下载波导端的透射率仅为 $T=0.24$ (图5(a))。图5(b)为目标频率光信号在下载过程中的稳态场分布,说明76%的光信号未能被谐振腔捕获而从主波导输出端流出。

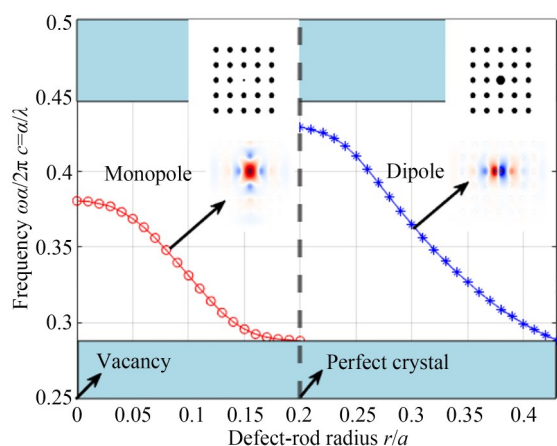


图3 点缺陷谐振腔模态分布图

Fig. 3 Modes distribution diagram of a point defect resonant cavity

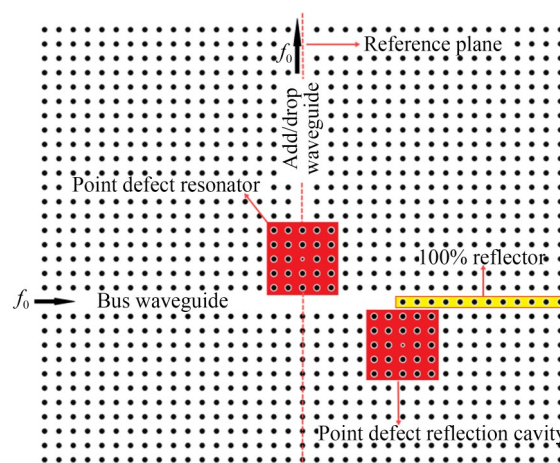
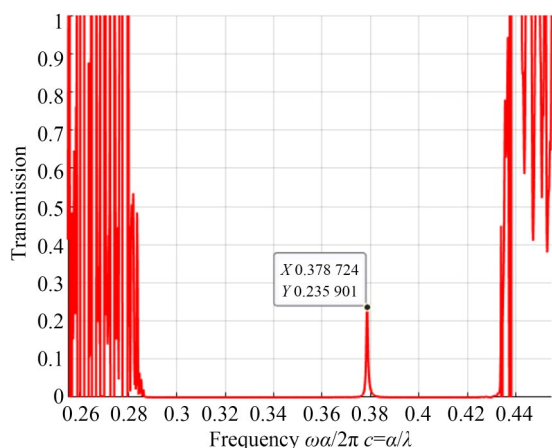
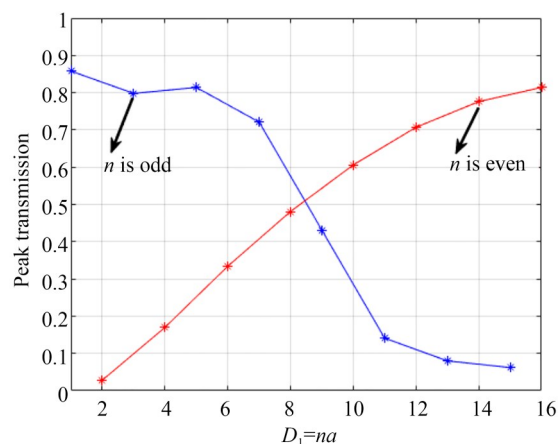


图4 滤波器结构示意图

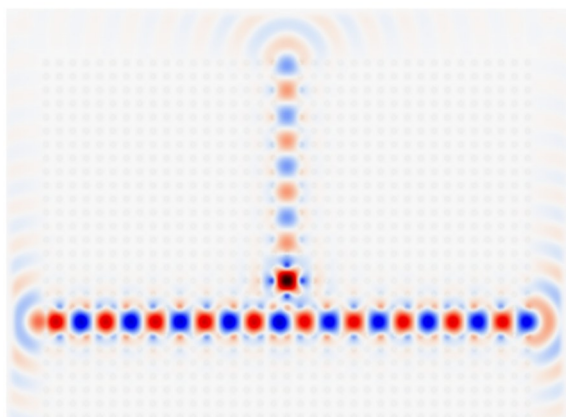
Fig. 4 Structure of photonic crystal filter



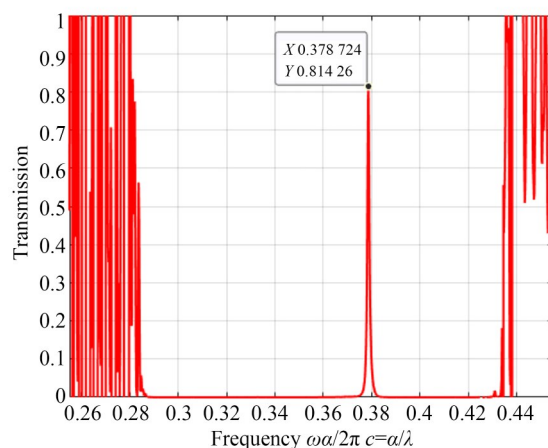
(a) 三端口滤波器的透射谱
(a) Transmission spectrum of of a three-port filter



(a) T_n 随 $D_1=na$ 的变化关系
(a) Relationship between T_n and $D_1=na$



(b) $f_0=0.378\ 5$ 的稳态场分布
(b) Distribution steady-state field with $f_0=0.378\ 5$



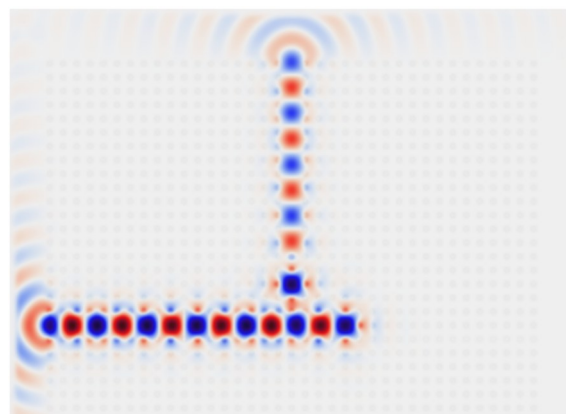
(b) 增加了反射壁的两端口滤波器的透射谱
(b) Transmission spectrum of the two-port filter with the addition of reflector

图 5 三端口滤波器及其性能

Fig. 5 Three-port filter and its performance

3.2 增加了反射壁的两端口滤波器

为提高下载波导端的透射率,首先考虑杜绝目标频率光信号在主波导输出端的能量输出,即在图 4 中主波导末端添加若干介质柱作为反射壁^[14]。反射壁和主波导、谐振腔、下载波导构成两端口滤波器。反射壁左端距谐振腔所在参考平面的距离为 $D_1=na$ (a 为晶格常数, $1 \leq n \leq 16$ 是正整数),使用 MEEP 计算了该结构在不同 $D_1=na$ 情况下目标频率光信号透射率的峰值 T_n ,得到 T_n 随 $D_1=na$ 的变化规律,如图 6(a)所示,从图上可以看出,当 n 为奇数时,下载波导端的峰值透射率由 $T_1=0.86$ 降至 $T_{15}=0.06$,当 n 为偶数时,峰值透射率则由 $T_2=0.028$ 递增至 $T_{16}=0.81$,说明



(c) $f_0=0.378\ 5$ 的稳态场分布
(c) Distribution steady-state field with $f_0=0.378\ 5$

图 6 增加了反射壁的两端口滤波器的性能

Fig. 6 Performance of two-port filter with the addition of reflector

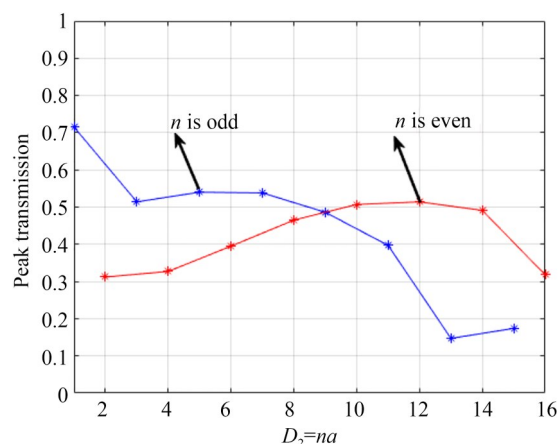
T_n 与 $D_1=na$ 有一定依赖关系。在文献^[13,15]中提到,当谐振腔与反射腔或反射壁之间的往返相位延迟需满足 $\Delta\varphi=2m\pi$ (m 取非负整数)时,在下载波导端可获得较高透射率。在本文中当 $n=5$,即 $D_1=5a$ 时满足上述条件, $f_0=0.3785$ 对应的光信号的透射率为 $T_5=0.814$,如图6(b)所示,较三端口滤波器的透射率增大了53%。图6(c)为目标频率 f_0 的光信号在下载过程中的稳态场分布。当 $8\leq n\leq 16$ 即 $8a\leq D_1\leq 16a$ 且 n 为偶数时, f_0 在下载波导端也能获得大于 $T_n=0.5$ 的透射率且呈逐渐上升趋势,说明 D_1 在该范围内变化时,也能满足上述相位延迟条件。总体来说,反射壁的存在能够增强光信号在下载波导端的透射率,且与 $D_1=na$ 有关。在设计器件结构时,可根据器件的几何特征来灵活调整 $D_1=na$ 值。

3.3 增加了反射腔的三端口滤波器

谐振腔对与其谐振频率一致的光有局域作用,考虑在图4中主波导右下侧引入点缺陷来当作反射腔^[15]。反射腔和主波导、谐振腔、下载波导构成增加了反射腔的三端口滤波器。反射腔与谐振腔的结构、介质柱参数完全相同,且二者中心所在参考平面之间的距离为 $D_2=na$ 。使用MEEP计算了该结构不同 $D_2=na$ 情况下对应目标频率光信号透射率的峰值 T'_n ,得到 T'_n 随 $D_2=na$ 的变化规律,如图7(a)所示,从图上可以看出 T'_n 随 D_2 的变化规律与图6(a)类似,但不如后者变化剧烈。反射腔起的作用是将未被谐振腔俘获的光信号局域在反射腔的位置并以一定的耦合衰减系数 γ ^[18,20]释放到主波导中再次被谐振腔俘获。当 $n=5$ 时,下载波导端的透射率最大,为 $T'_5=0.54$,如图7(b)所示,较三端口滤波器相比,说明反射腔的存在也能增强下载波导端的透射。图7(c)为目标频率光信号在下载过程中的稳态场分布。

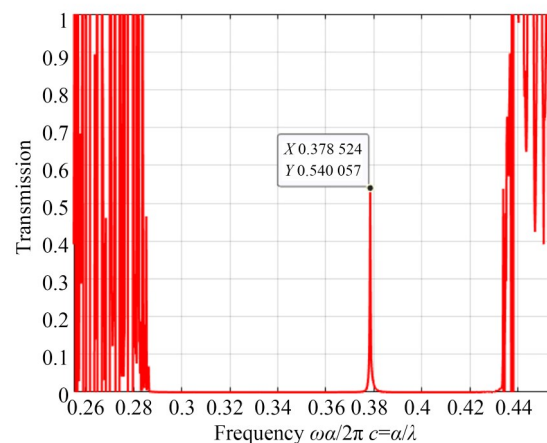
3.4 增加了反射壁和反射腔的两端口滤波器

为进一步提高 f_0 光信号在下载波导端的透射率,考虑将反射壁和反射腔毗邻放置构成增加了反射壁和反射腔的两端口滤波器(图4)。反射壁与反射腔到谐振腔所在参考平面的距离相等,即 $D_1=D_2=na$,使用MEEP计算了该结构不同 $D_1=D_2=na$ 情况下对应目标频率光信号透射率的峰



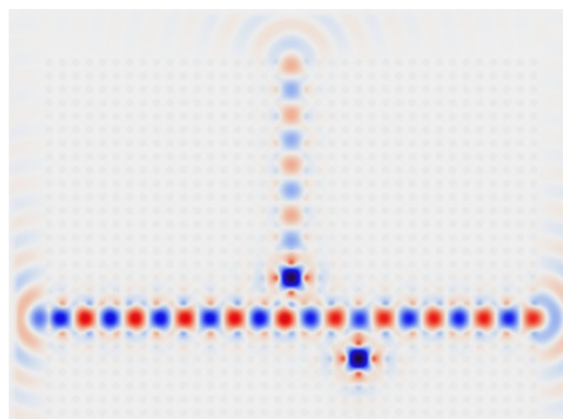
(a) T'_n 随 $D_2=na$ 的变化规律

(a) Relationship between T'_n and $D_2=na$



(b) 增加了反射腔的三端口滤波器的透射谱

(b) Transmission spectrum of the three-port filter with the addition of reflection cavity

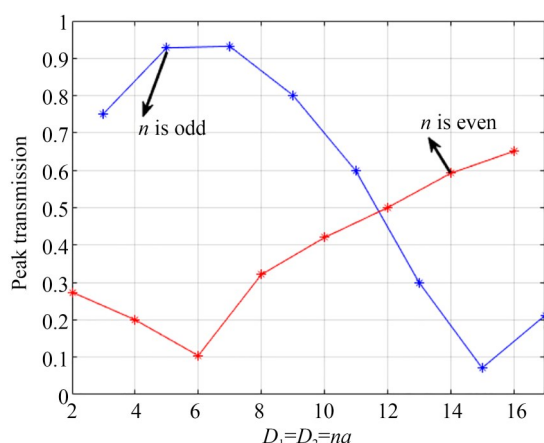


(c) $f_0=0.3785$ 的稳态场分布

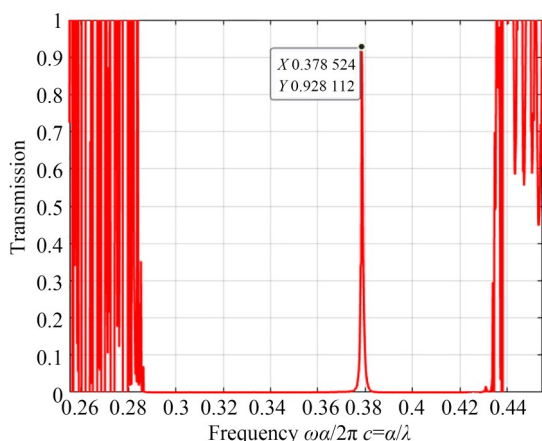
(c) Distribution steady-state field with $f_0=0.3785$

图7 增加了反射腔的三端口滤波器的性能

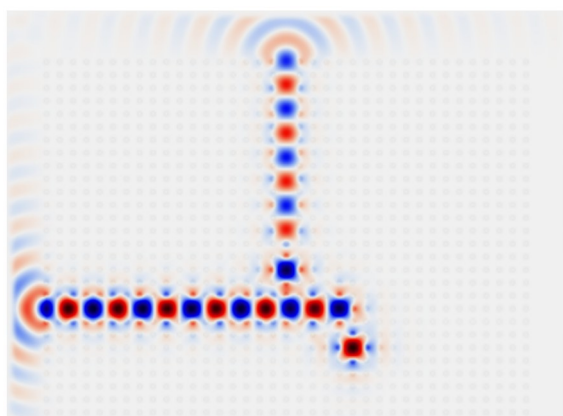
Fig. 7 Performance of two-port filter with the addition of reflection cavity



(a) T''_n 随 $D_1=D_2=na$ 的变化关系
(a) Relationship between T''_n and $D_1=D_2=na$



(b) 增加了反射腔、反射壁的两端口滤波器的透射谱
(b) Transmission spectrum of the three-port filter with the addition of reflection cavity and reflector



(c) $f_0=0.3785$ 的稳态场分布
(c) Distribution steady-state field with $f_0=0.3785$

图 8 增加了反射腔、反射壁的两端口滤波器的性能
Fig. 8 Performance of two-port filter with the addition of reflection cavity and reflector

值 T''_n , 得出 T''_n 随 $D_1=D_2=na$ 的变化规律图 (图 8a), 从图上可以看出, 当 n 为奇数时, 下载波导端的峰值透射率总体呈“S”分布, 当 n 为偶数时, 下载波导端的峰值透射率总体呈“√”分布, 尤其当 $n=5, 7$ 时, $f_0=0.3785$ 对应光信号的峰值透射率分别达到 $T''_5=0.928$, 如图 8(b) 所示, $T''_7=0.932$, 图 6(c) 为目标频率光信号在下载过程中的稳态场分布。说明反射腔、反射壁同时存在时, 下载波导端的透射率能达到最优。从图 5(a)、图 6(b)、图 7(b) 和图 8(b) 的透射谱上可以看到, 在光子禁带中只出现了一个尖锐的透射峰, 这是因为在设计器件结构时选择了单模波导和单模谐振腔的缘故, 这样设计能够排除杂波干扰, 有利于提高滤波器的整体性能^[20]。从图 8(a) 中可知, 当 $n=2, 3, 4$ 时对应的 T''_n 均较小, 因为反射腔与谐振腔距离太近不利于谐振腔与主波导、下载波导之间的耦合。因而在器件设计时, 反射壁和反射腔到谐振腔所在参考平面的距离选择为 $D_1=D_2 \geq 5a$ 。

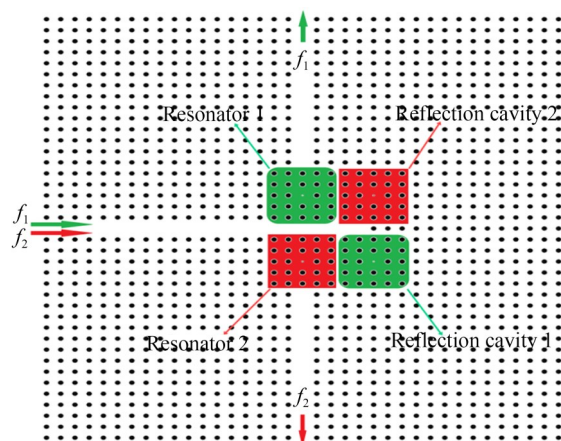
4 二信道滤波系统

4.1 二信道滤波器及拓展

根据上述器件结构的优化过程和计算结果, 设计了如图 9(a) 所示的二信道滤波系统, 该系统整体尺寸为 $36a \times 38a$, 由主波导、两个下载波导、两个谐振腔和两个反射腔组成。其中主波导末端封闭, 起到对光信号 100% 反射作用, 反射壁左端到参考平面的距离为 $D_1=5a$ 。两个反射腔所在的参考平面到两个谐振腔所在参考平面的距离为 $D_{21}=D_{22}=5a$ 。本文中谐振腔的谐振频率主要取决于谐振腔中心缺陷介质柱的半径 r_d 的大小, 因此, 在一定范围内, 可以通过改变 r_d 的大小来达到调谐滤波系统工作波长的目的。

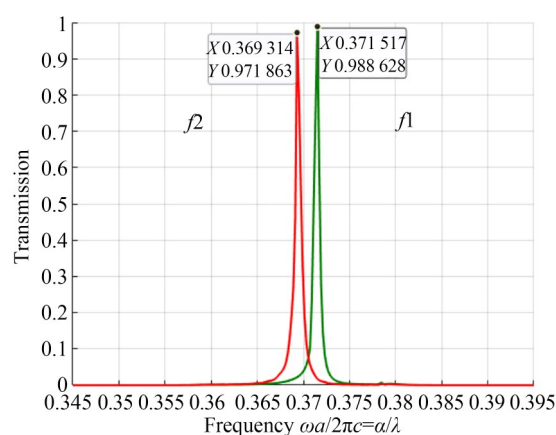
设谐振腔 1 和反射腔 1 中心介质柱的半径为 $r_{d1}=0.04a$ (图 9(a) 中绿色圆角方框内中心介质柱), 对应的谐振频率为 $f_1=0.3715$ 。谐振腔 2 和反射腔 2 中心缺陷处介质柱的半径设为 $r_{d2}=0.045a$ (图 9(a) 中红色方角角方框内中心介质柱), 对应的谐振频率为 $f_2=0.3693$ (彩图见期刊电子版)。使用 MEEP 对该系统计算, 信号源设

置如前所述,得到该系统的透射谱,如图9(b)所示,若设晶格常数 $a=580\text{ nm}$,则谐振腔1中心介质柱的半径为 $r_{d1}=0.04a=23.2\text{ nm}$, $f_1=0.3715$ 对应的工作波长为 $\lambda_1=1561.2\text{ nm}$,该信号由主波导输入端入射,经谐振腔1、反射壁、反射腔1共同作用下被耦合到下载波导中输出(绿色箭头导向),透射率高达98.9%,透射谱的半峰全宽约为3.3 nm,谐振腔1的品质因子为 $Q_1=\lambda_1/\Delta\lambda_1=473$;谐振腔2中心介质柱的半径 $r_{d2}=0.045a=26.1\text{ nm}$, $f_2=0.3693$ 对应的工作波长为 $\lambda_2=1570.5\text{ nm}$,该信号由主波导输入端入射,经谐振腔2、反射壁、反射腔2共同作用下被耦合到下载波导中输出(红色箭头导向),透射率高达97.2%,透射谱的半峰全宽约为3.5 nm,谐振腔2的品质因子为 $Q_2=\lambda_2/\Delta\lambda_2=449$ 。图9(c)和图9(d)为 λ_1, λ_2 的光信号在下载过程中的稳态场分布,说明所设计的滤波系统可以将波长为 $\lambda_1=1561.2\text{ nm}$, $\lambda_2=1570.5\text{ nm}$ 的光信号较为精准地剥离到各自下载波导中,波长间隔为 $\Delta\lambda=9.3\text{ nm}$ 。为了拓宽滤波系统对波长的选择范围,系统地改变谐振腔、反射腔中心介质柱的半径 r_d ,改变范围为 $0.04a \leq r_d \leq 0.048a$,使用MEEP对其计算,得出滤波系统在不同 r_d 下的各项参数,参见表1。



(a) 二信道滤波器结构示意图

(a) Schematic diagram of the two-channel filter structure



(b) 二信道滤波器的透射谱

(b) Transmission spectrum of the two-channel filter

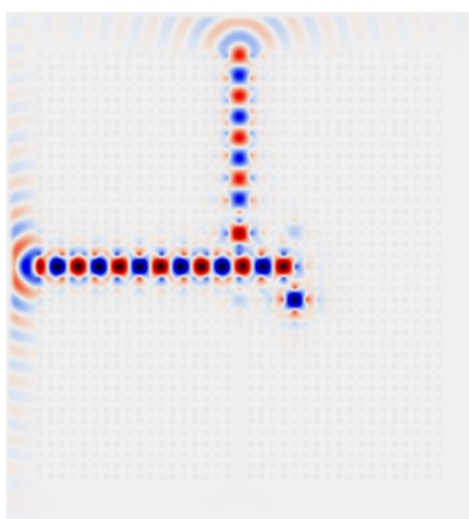
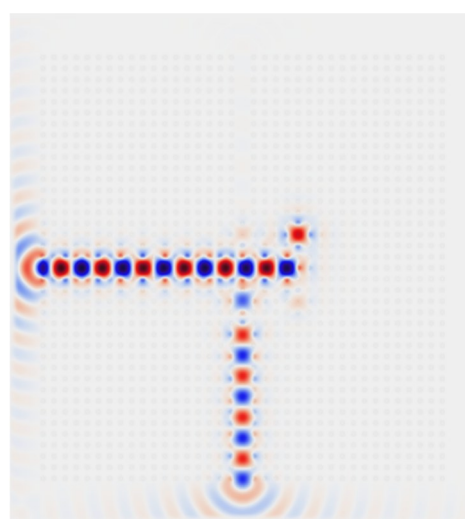
(c) $\lambda_1=1561.2\text{ nm}$ 的稳态场分布(c) Distribution steady-state field with $\lambda_1=1561.2\text{ nm}$ (d) $\lambda_1=1570.5\text{ nm}$ 的稳态场分布(d) Distribution steady-state field with $\lambda_1=1570.5\text{ nm}$

图9 增加了反射腔和反射壁的二信道滤波器的性能

Fig. 9 Performance of two-channel filter with reflection cavity and reflector

表 1 二信道滤波系统在 $0.04a \leq r_d \leq 0.048a$ 的性能参数

Tab. 1 Performance parameters of the two-channel filtering system in the range of $0.04a \leq r_d \leq 0.048a$

序号	点缺陷柱半径 r_d	谐振频率	工作波长/nm	透射率/100%	半峰全宽/nm	品质因子 Q
1	$0.040a$	0.371 5	1 561.2	98.9%	3.3	473
2	$0.041a$	0.371 1	1 562.9	91.5%	2.7	579
3	$0.042a$	0.370 7	1 564.6	91.5%	1.8	869
4	$0.043a$	0.370 3	1 566.3	81.1%	2.54	616
5	$0.044a$	0.369 7	1 568.8	84.2%	2.58	608
6	$0.045a$	0.369 3	1 570.5	97.2%	3.5	449
7	$0.046a$	0.368 9	1 572.2	95.5%	2.65	593
8	$0.047a$	0.368 5	1 573.9	84.9%	3.42	460
9	$0.048a$	0.368 1	1 575.7	82.2%	4.1	384

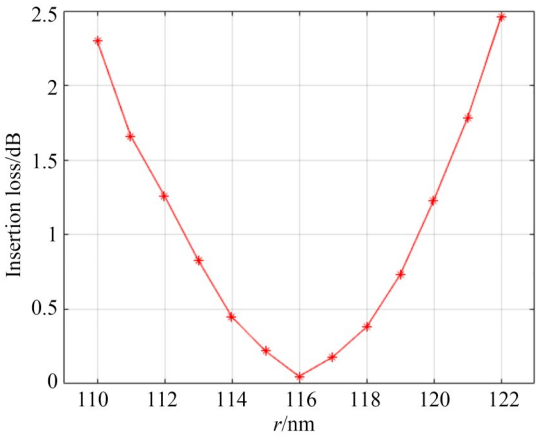
4.2 容差分析

目前,光子晶体器件的制备方法主要是光刻技术。在理想情况下,二次显影全息光刻及离轴光学光刻等新型光刻技术可以制备出最小特征尺寸为 30~50 nm 的结构,精度可达 0.1 nm^[5,21]。本文所设计结构中对器件性能影响较大的参数主要有光子晶体晶格常量 a 、介质柱的半径 r 、谐振腔反射腔中心介质柱的半径 r_d 。其中,晶格常量 a 和光子晶体介质柱的半径 r 决定了通带范围,谐振腔反射腔中心介质柱的半径 r_d 决定了滤波系统工作波长的大小。这些参数的变化会在不同程度上影响滤波系统的性能。

插入损耗是表征光子晶体滤波系统的重要性能指标,该定义为:

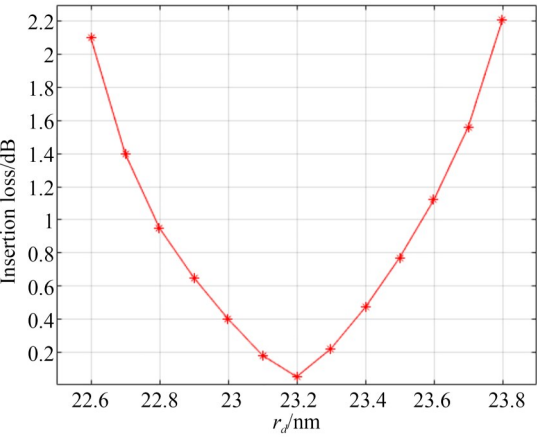
$$I = 10 \log I_{in}/I_{out}, \quad (1)$$

其中: I_{in} 为输入光波功率, I_{out} 为输出光波功率。根据公式(1)可得滤波系统将波长为 $\lambda_1=1\,561.2\,\text{nm}$, $\lambda_2=1\,570.5\,\text{nm}$ 的光信号下载到各自信道中的插入损耗为 0.048 dB,0.123 dB。光子晶体介质柱半径 r 和晶格常数 a 决定了光子晶体主波导和下载波导的通带范围,当目标光信号处于通带范围时,器件对光波的控制较强,滤波系统损耗较低,反之则损耗较大,系统传输性能降低,甚至无法有效传输光信号。将晶格常数固定为 580 nm,反射腔和谐振腔中心缺陷介质柱的半径设定为 $r_{d1}=0.04a=23.2\,\text{nm}$,通过逐步地改变 r 的大小考察系统滤波性能的变化。由图 10 (a)可知,当 r 从 113 nm 到 119 nm 的范围变化时,该滤波器对目标频率仍然具有良好的滤波性能,



(a) 插入损耗随 r 变化的关系

(a) Relationship between insertion loss and the radius of photonic crystal



(b) 插入损耗随 r_d 的变化关系

(b) Relationship between insertion loss and the radius of resonator and reflection cavity

图 10 滤波系统的容差分析

Fig. 10 Tolerance analysis of filter systems

下载波导端的透过率大于80%(插入损耗小于0.969 dB),当 $r=116$ nm时,插入损耗最低为0.048 dB,因此光子晶体介质柱半径 r 的工艺容差范围为6 nm。

图10(b)所示为插入损耗随谐振腔、反射腔中心介质柱半径 r_d 的变化关系。将晶格常数固定为580 nm,光子晶体介质柱设定为 $r=116$ nm,通过逐步改变 r_d 的大小来考察系统的传输性能。由图10(b)可知,当 r_d 在22.8 nm到23.5 nm的范围变化时,该滤波器对目标频率仍然具有良好的滤波性能,下载波导端的透过率大于80%(插入损耗小于0.969 dB),当 $r_d=23.2$ nm时,插入损耗最低为0.048 dB,因此光子晶体谐振腔中心介质柱半径 r_d 的工艺容差范围为0.7 nm。

5 结 论

本文根据耦合模理论结合二维四方晶格光子晶体线缺陷波导、点缺陷谐振腔的控光特性,设计了一种二信道光子晶体滤波系统,该系统由一个主波导、两个下载波导、两个谐振腔和两个反射腔组成。滤波系统的工作频率可以通过改变谐振腔中心缺陷介质柱的半径 r_d 来调谐。利

用MPB计算了完整光子晶体、线缺陷波导能带结构,分析了点缺陷谐振腔的谐振模态随缺陷介质柱半径 r_d 由0增大至 $0.43a$ 的变化规律,利用MEEP计算了光信号在滤波器下载波导端的透射谱和稳态场分布并对滤波器的结构进行了优化设计。研究了影响滤波系统对目标频率光信号下载效率的两个关键参数 D_1, D_2 ,并给出下载波导端透射谱峰值随 D_1, D_2 取值的变化规律。计算结果表明,该滤波系统能够把波长为 $\lambda_1=1561.2$ nm, $\lambda_2=1570.5$ nm的光信号较为精准地剥离到各自下载波导中,对应的透射率分别为98.9%, 97.2%, 半峰全宽分别为3.3 nm, 3.5 nm, 品质因子分别为473和449, 波长间隔为 $\Delta\lambda=9.3$ nm。最后为拓宽滤波系统对波长的选择范围,计算了滤波系统在不同 r_d 下的各项参数,并分析工艺误差对器件性能的影响以资设计参考。

作者贡献声明:

刘杰:器件结构的提出,论文构思和撰写;
卢辉东:数据分析整理和画图;
赵俊、董杰:论文审核与编辑写作;
温建蓉、胡延梅、邢琪、李鹏辉:数据校对

参考文献:

- [1] 何敏菲,朱大钊,王洪庆,等. 基于双光子直写的微纳光学器件研究进展[J/OL]. 光学学报, 2023: 1-16. (2023-08-04).
HE M F, ZHU D Z, WANG H Q, *et al.* Research Progress of Micro-Nano Optical Devices based on Two-Photon Direct Writing [J/OL]. *China Industrial Economics*, 2023: 1-16. (2023-08-04). (in Chinese)
- [2] 吴立恒,王明红. 基于光子晶体 1×3 谐振腔滤波器的研究[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(6): 761.
WU L H, WANG M H. Study on the filter based on photonic crystal 1×3 cavity[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(6): 761. (in Chinese)
- [3] 王海燕,张明达,费宏明,等. 遗传算法精确调谐的双通道光子晶体滤波器[J/OL]. 光学学报, 2024: 1-16. (2024-04-26).
WANG H Y, ZHANG M D, FEI H M, *et al.* Dual-Channel Photonic Crystal Filter Tuned Accurately by Genetic Algorithm [J/OL]. *China Industrial Economics*, 2024: 1-16. (2024-04-26). (in Chinese)
- [4] 沈威,徐许,高宏伟,等. 氮化镓基异质结构光子晶体微腔特性研究[J]. 光学精密工程, 2022, 30(24): 3097-3104.
SHEN W, XU X, GAO H W, *et al.* Study on the characteristics of Gallium Nitride based hetero-structure photonic crystal micro-cavity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(24): 3097-3104. (in Chinese)
- [5] 柯航,李培丽,施伟华. 基于下山单纯形算法逆向设计二维光子晶体波导型 1×5 分束器[J]. 物理学

- 报, 2022, 71(14): 137-146.
- KE H, LI P L, SHI W H. Two-dimensional photonic crystal waveguide 1×5 beam splitter reverse-ly designed by downhill-simplex algorithm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(14): 137-146. (in Chinese)
- [6] 林佳森, 项彤, 陈鹤鸣, 等. 光子晶体双波长光电调制和模分复用集成器件[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 200-210.
- LIN J M, XIANG T, CHEN H M, *et al.* Integrated device of dual-wavelength electro-optic modulating and mode-division multiplexing based on photonic crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(10): 200-210. (in Chinese)
- [7] 刘雪, 陈鹤鸣, 胡宇宸. 光子晶体光电调制和粗波分复用集成器件研究[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0306002.
- LIU X, CHEN H M, HU Y C. An integrated device for photonic-crystal electro-optic modulation and coarse wavelength-division multiplexing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(3): 0306002. (in Chinese)
- [8] ZHUANG Y Y, CHEN H M, JI K, *et al.* On-chip hybrid demultiplexer for mode and coarse wavelength division multiplexing[J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(1): 12.
- [9] 张若羽, 李培丽. 基于一维耦合腔光子晶体的声光可调谐平顶滤波器的研究[J]. 物理学报, 2021, 70(5): 175-183.
- ZHANG R Y, LI P L. Acousto-optic tunable flat top filter based on one-dimensional coupled-cavity photonic crystals [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2021, 70(5): 175-183. (in Chinese)
- [10] LIU L, LIAO S S. Low-power active tunable microwave photonic filter using photonic crystal nanocavities[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(16): 999-1002.
- [11] MANOLATOU C, KHAN M J, FAN S, *et al.* Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(9): 1322-1331.
- [12] FAN S H, VILLENEUVE P R, JOANNOPOULOS J D, *et al.* Channel drop tunneling through localized states[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(5): 960-963.
- [13] KIM S, PARK I, LIM H, *et al.* Highly efficient photonic crystal-based multichannel drop filters of three-port system with reflection feedback[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5518.
- [14] KUO C W, CHANG C F, CHEN M H, *et al.* A new approach of planar multi-channel wavelength division multiplexing system using asymmetric super-cell photonic crystal structures[J]. *Optics Express*, 2007, 15(1): 198.
- [15] REN H L, JIANG C, HU W S, *et al.* Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selective reflection micro-cavity [J]. *Optics Express*, 2006, 14(6): 2446-2458.
- [16] 沈宏君, 刘杰, 李婷, 等. 四通道二维光子晶体解波分复用系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 692.
- SHEN H J, LIU J, LI T, *et al.* Four-channel WDM system based on two-dimensional photonic crystal[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 692. (in Chinese)
- [17] 刘杰, 铁生年, 卢辉东. 多信道二维光子晶体滤波器[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1021-1027.
- LIU J, TIE S N, LU H D. Multi-channel drop filter based on two-dimensional photonic crystal[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1021-1027. (in Chinese)
- [18] 胡宇宸, 陈鹤鸣. 用于密集波分复用系统的光子晶体光分插复用器[J]. 光学学报, 2023, 43(2): 0223002.
- HU Y C, CHEN H M. Optical add-drop multiplexer for dense wavelength division multiplexing system based on photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(2): 0223002. (in Chinese)
- [19] OSKOOI A F, ROUNDY D, IBANESCU M, *et al.* Meep: a flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method[J]. *Computer Physics Communications*, 2010, 181(3): 687-702.
- [20] JOANNOPOULOS J D, JOHNSON S G,

WINN J N, *et al.* *Photonic Crystals*[M]. Princeton: Princeton University Press, 2011.

[21] KURUMA K, OTA Y, KAKUDA M, *et al.* Sur-

face-passivated high-Q GaAs photonic crystal nanocavity with quantum dots [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(4): 046106.

作者简介:



刘 杰(1986—),男,山西长治人,硕士,讲师,2015年于宁夏大学获得硕士学位,2015-2021年在青海大学工作,现为山西电子科技学院教师,主要从事光子晶体光通信方面的研究。E-mail: jetliu1986@163.com