

激光与光电子学进展

无磁性光子晶体类 T 型非互易性双通道滤波器设计

徐聪, 陈德媛*, 李宜书, 葛士曾

南京邮电大学集成电路科学与工程学院, 江苏 南京 210023

摘要 基于无磁性二维光子晶体设计了一种由直线波导及矩形谐振腔构成的类 T 型非互易性双通道滤波器。矩形谐振腔具有局域多频率电磁波且电磁波传播方向可调的特性, 直线波导的结构尺寸决定了其对不同对称性电磁波的承载能力。利用矩形谐振腔和直线波导的特性实现了非互易性双通道滤波功能。实验结果表明: 正向传输情况下, 滤波器实现了中心波长分别为 1534 nm 和 1574 nm, 带宽分别为 16 nm 和 8 nm 的滤波传输, 对应的插入损耗分别为 0.4 dB 和 0.36 dB, 通道间隔离度为 33 dB 和 22 dB; 反向输入情况下, 电磁波对称模式的不匹配导致无法传输。这表明设计的双通道非互易滤波器滤波效果良好, 在未来全光通信集成领域具有潜在的应用价值。

关键词 光学器件; 光子晶体; 非互易性; 滤波器; 隔离度; 插入损耗

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220515

Design of T-Type Nonreciprocal Two Channel Filter Based on Non-Magnetic Photonic Crystal

Xu Cong, Chen Deyuan*, Li Yishu, Ge Shizeng

School of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract In this paper, a T-type nonreciprocal two-channel filter composed of straight waveguide and rectangular resonator is designed based on non-magnetic two-dimensional photonic crystal. The rectangular resonator has the characteristics of local multi-frequency electromagnetic wave and the electromagnetic wave propagation direction is adjustable, and the structure size of the straight waveguide determines the carrying capacity of the electromagnetic waves with different symmetries. Nonreciprocal two-channel filtering function is realized using the characteristics of the rectangular resonator and straight waveguide. The experimental results show that, in the case of forward transmission, the filter achieves filter transmission with central wavelengths of 1534 nm and 1574 nm, and 16 nm and 8 nm bandwidth, respectively, corresponding to the insertion loss of 0.4 dB and 0.36 dB, respectively, and inter-channel isolation of 33 dB and 22 dB. In the case of backward input, the mismatch of the electromagnetic wave symmetry mode causes no transmission, which shows that the designed dual-channel nonreciprocal filter has a good filtering effect and contributes to the development of the future all-optical communication integration field.

Key words optical devices; photonic crystal; nonreciprocal transmission; wave filter; isolation degree; insertion loss

1 引言

在光通信系统中, 为了保证光学系统的稳定性, 避免反射光对系统中器件的影响, 设置单向传输的光器件是非常必要的^[1-2]。目前, 实现光单向传输的方式主要有三种: 第一种是利用非线性材料的特性实现, 该方法需要高功率入射光, 导致该传输方式在很多领域受

到限制^[3]; 第二种是通过改变光子晶体的空间结构破坏其空间反演对称性, 以实现非互易性传输^[4-5]; 第三种是在外界直流磁场作用下, 将磁光材料与光子晶体结合实现旋光, 但常见的光电材料包括大多数半导体在内呈现出相对较弱的(甚至没有)磁光效应^[6-8]。

本文在线性光学的基础上, 应用无磁性材料实现非互易的光学滤波器结构。光子晶体具有光子带

收稿日期: 2022-01-01; 修回日期: 2022-01-17; 录用日期: 2022-01-20; 网络首发日期: 2022-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(61804090, 11974188)、江苏省自然科学基金(BK20161512)、中国博士后科学基金(2018M632345)

通信作者: *chendy@njupt.edu.cn

隙^[9]和光子局域^[10]等特点,在设计单向光传输器件中是非常好的选择。与传统滤波器^[11-13]相比,光子晶体滤波器具有尺寸小、能耗低、易于集成等特点,因此光子晶体滤波器的设计与研究在光通信中有很大的应用价值^[14-15]。本文基于二维光子晶体设计了一种 T 型结构的双通道非互易性滤波器,该结构中无非线性材料和磁性材料,结构简单且易于集成。实验结果表明,经过优化设计后的滤波器结构,在中心波长为 1534 nm 和 1574 nm 两个波段的正向透射率均达到 90% 以上,反向透射率几乎为 0,隔离度分别为 33 dB 和 22 dB。

2 非互易性单通道滤波器的设计

利用 COMSOL 软件在 XOZ 平面内建立二维 (2D) 柱形正方格子光子晶体结构,具体的结构参数:介质柱材料使用折射率为 3.4 的硅;背景介质使用折射率为 1 的空气;晶格常数 $a=630$ nm;介质柱半径 $R=0.2a$ 。利用 Rsoft 软件计算得到横电 (TE) 模在 $0.2860(f)\sim 0.4206(f)$ 范围存在光子带隙。在光子晶体四周用完美匹配层 (PML) 覆盖,以减小电磁波对界面反射率计算结果的影响。

本文设计的非互易性单通道滤波器结构如图 1 所示。两波导与谐振腔分别垂直连接构成耦合系统,其中谐振腔与波导 1 之间的介质柱为耦合介质柱 M ,波导 1 侧边的一个介质柱为介质柱 N 以及波导 1 两侧第一排介质柱为介质柱 S 。竖直方向的波导 1 是移除竖直方向一排介质柱,其色散关系曲线如图 2 所示。两侧第一排介质柱向外位移 $0.7a$,第二排介质柱向外位移 $0.35a$ 。可以发现,波导 1 为多模式波导,支持奇模式和偶模式的光传播,奇模式带的频率 f 范围为 $0.2462\sim 0.4214$,偶模式带的频率范围为 $0.3540\sim 0.4214$ 。水平方向的波导为单模波导 2,通过在水平方向移除一排介质柱形成,利用基于平面波展开法的 Rsoft 软件计算包含缺陷的超胞模型,得到波导 2 的色

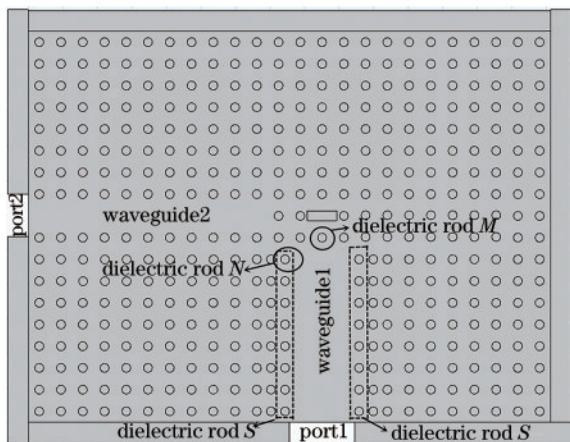


图 1 非互易性单通道滤波器的结构

Fig. 1 Structure of the nonreciprocal single channel filter

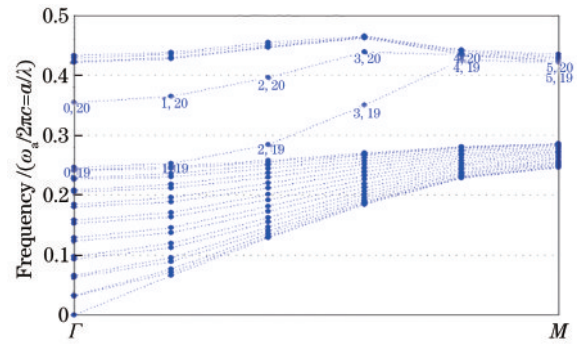


图 2 波导 1 的色散曲线

Fig. 2 Dispersion curve of the waveguide 1

散曲线如图 3 所示。可以发现,波导传输频率范围为 $0.3042\sim 0.4225$,光传输的模式为横向偶对称模式。矩形谐振腔的结构是将完美光子晶体中心移除一个介质柱,并在原位置加入一个矩形介质柱。矩形的边长分别为 $1.368a$ 和 $0.5a$,长边沿光子晶体的 ΓX 方向放置。该腔谐振频率有四个,分别为 0.3290 、 0.3372 、 0.4002 、 0.4106 。其中, 0.3290 和 0.3372 两个频率在横向与波导模式不匹配,输入输出都无法实现。频率为 0.4002 时电磁波在谐振腔中的电场分布具有水平方向和垂直方向的奇对称性,其场分布如图 4(a) 所示。频率为 0.4106 时电磁波的电场分布具有水平方向的偶对称性和垂直方向的奇对称性,其场分布如图 4(b) 所示。

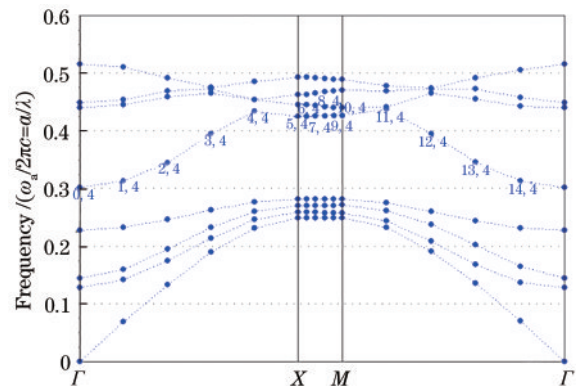


图 3 波导 2 的色散曲线

Fig. 3 Dispersion curve of waveguide 2

将波导 1 的下端口定义为端口 1,波导 2 的左端口定义为端口 2。将某种对称模式的电磁波由端口 1 入射,经过谐振腔的耦合最终到达端口 2 的过程定义为正向传输,则从端口 2 入射,经过谐振腔到达端口 1 的过程为反向传输。正向入射时,入射光波频率范围为 $0.3540\sim 0.4214$,入射模式为纵向奇模式,则频率为 0.4106 的电磁波先耦合到谐振腔,然后耦合到波导 2,再到达端口 2 输出,从而实现奇偶模式的转换功能。如果以纵向偶模式电磁波从端口 1 入射,入射光模式

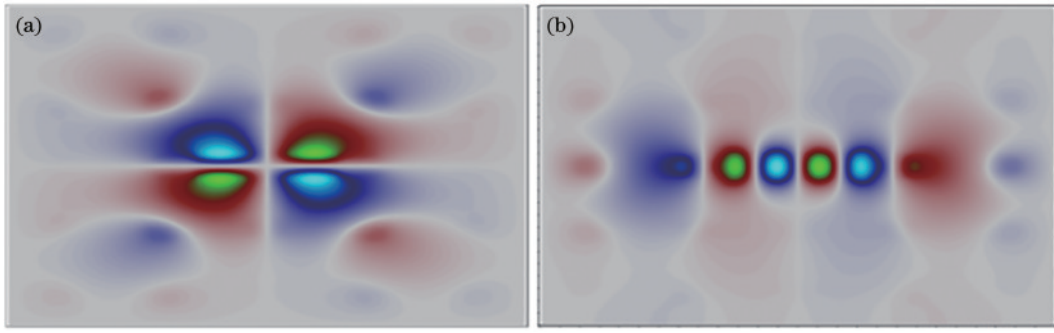


图 4 电磁波在谐振腔中的电场分布。(a)频率为 0.4002;(b)频率为 0.4106

Fig. 4 Electric field distribution of electromagnetic waves in the resonator. (a) Frequency is 0.4002; (b) frequency is 0.4106

虽然与谐振腔模式在入射端匹配,但无法与横向波导 2 的传输模式相匹配,导致无法输出。

分析发现,谐振腔内矩形介质柱、谐振腔与波导 1 之间的耦合介质柱 M 以及波导 1 两侧第一排介质柱 S 的尺寸会影响正向透射率,透射率为输出信道光功率与输入信道光功率之比。图 5 为非互易性单通道滤波器正反向透射率,纵坐标 T 为透射率,横坐标 f 为入射光频率。可以发现,优化后谐振腔内矩形介质柱的两个边长分别为 $1.368a$ 和 $0.5a$,外介质柱 M 的半径 R_M 为 $0.25a$,波导 1 两侧的第一排介质柱 S 的半径 R_S 为 $0.115a$,最优正向透射率为 93.7%,反向透射率几乎为 0。图 6 为奇模式光正反向入射时的电场分布。可以发现,该单通道非互易性滤波器的滤波性能良好。

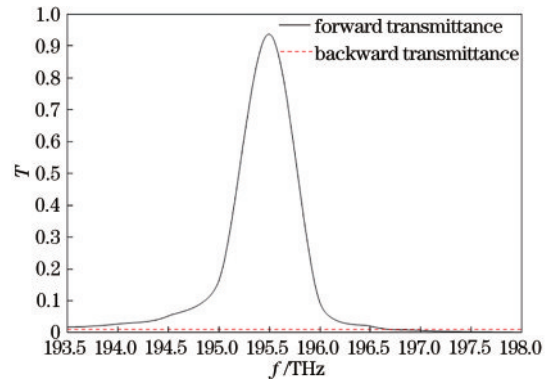


图 5 非互易性单通道滤波器的正反向透射率

Fig. 5 Forward and backward transmittance of the nonreciprocal single channel filter

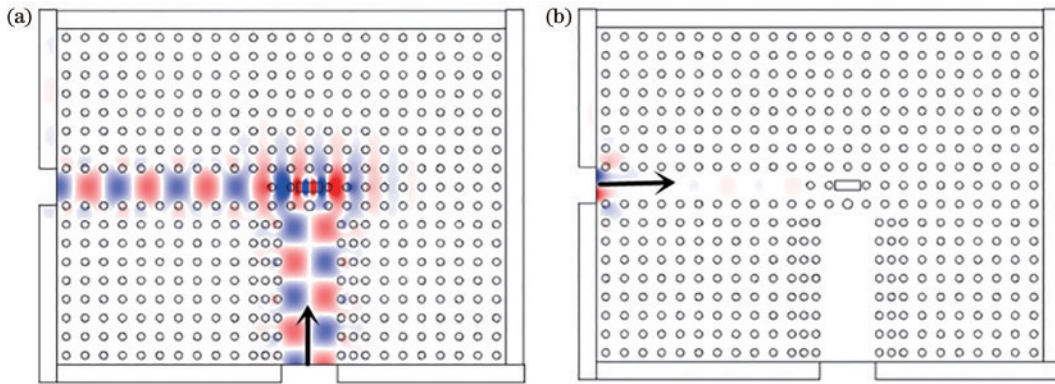


图 6 奇模式光正反向入射时的电场分布示意图。(a)正向入射;(b)反向入射

Fig. 6 Schematic diagram of electric field distribution when odd mode light is incident forward and backward. (a) Forward incidence; (b) backward incidence

3 非互易性双通道滤波器的设计

依据单通道的非互易性滤波原理设计双通道非互易性滤波器,其结构如图 7 所示。基于图 1 的单通道结构,在矩形谐振腔上方移除一排介质柱形成波导 3,该波导与波导 2 的结构和导波特性和相似。利用矩形谐振腔局域电磁波的纵向对称性与波导 3 导波特性的匹配度,实现了相应电磁波与波导 3 耦合输出。

由于介质柱的材料为硅,在波导与谐振腔耦合时会产生很大的反射损耗,对单通道的分析可知,矩形腔

与波导之间的耦合介质柱、正向输入波导的微结构等会严重影响滤波的单向透射率,对于双通道,除了透射率外,还会影响通道之间的隔离度。因此,对上述两部分的微结构进行讨论分析。

谐振腔与波导 1 之间的耦合介质柱 M 半径 R_M 为 $0.23a$ 、 $0.24a$ 、 $0.25a$ 、 $0.26a$ 时,两个通道的正向透射率如图 8 所示。其中,左侧透射峰对应的是通道 3 的正向透射率,右侧透射峰对应的是通道 2 的正向透射率。可以发现:当 $R_M=0.23a$ 和 $0.24a$ 时,波导 3 的透射率低于 20%;当 $R_M=0.26a$ 时,波导 3 透射率有明显增

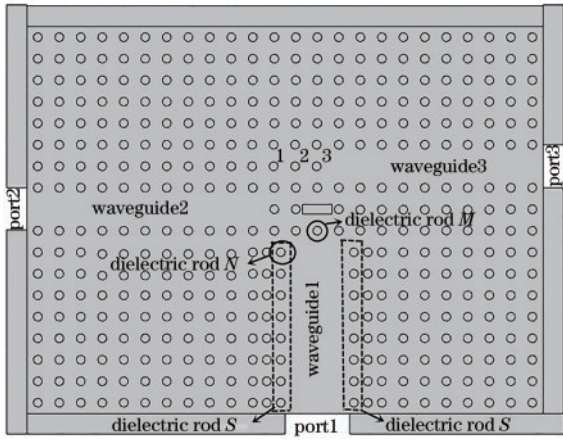


图 7 非互易性双通道滤波器示意图

Fig. 7 Schematic diagram of nonreciprocal dual-channel filter

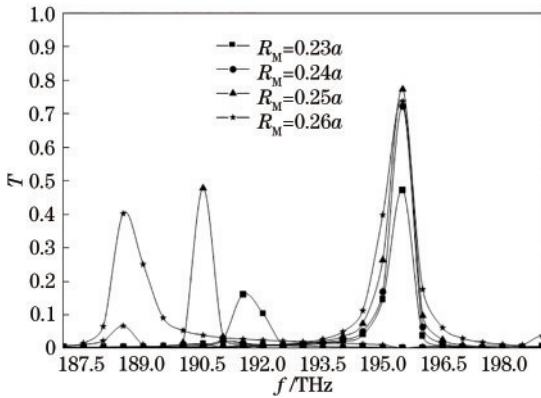


图 8 介质柱 M 半径的变化对正向透射率的影响

Fig. 8 Effect of the change of radius of dielectric column M on forward transmittance

加,但通道间串扰较大;当 $R_M=0.25a$ 时,两个波导透射率最佳,且无串扰。因此,选取的 $R_M=0.25a$ 。

当 R_S 为 $0.11a, 0.115a, 0.12a, 0.125a$ 时,输入波导 1 两侧第一排介质柱 S 的尺寸 R_S 对导波性能的影响如图 9 所示。可以发现,当 $R_S=0.115a$ 时,滤波器的正向透射率最优。

除了输入波导 1 两侧第一排介质柱 S 的尺寸 R_S 对

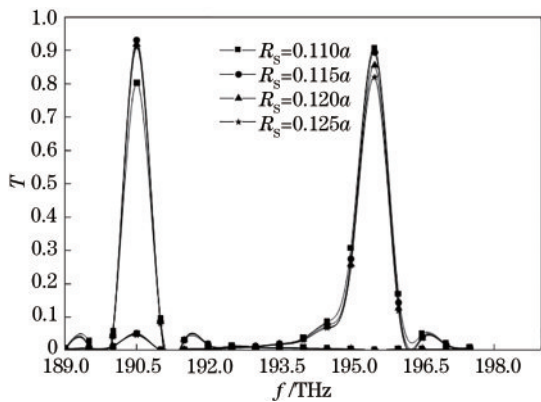


图 9 R_S 对滤波器正向透射率的影响

Fig. 9 Effect of R_S on the forward transmittance of the filter

导波性能的影响,波导的微结构也会对耦合效率产生影响。当 R_N 分别为 $0.18a, 0.19a, 0.2a$ 时,滤波器的透射率如图 10 所示。可以发现,当 $R_N=0.2a$ 时,双通道透射均超过 90%。

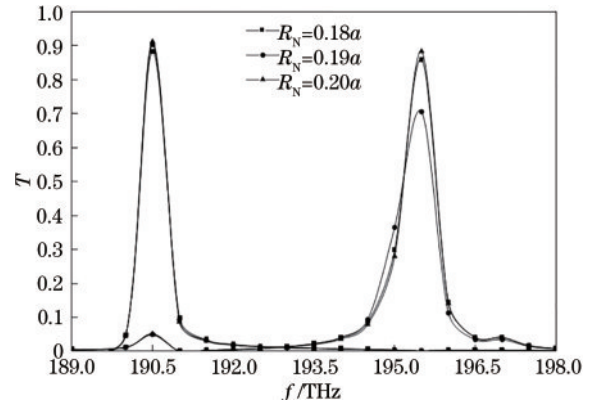


图 10 R_N 对滤波器正向透射率的影响

Fig. 10 Effect of R_N on the forward transmittance of the filter

波导 3 与谐振腔之间的耦合长度也会影响滤波器的正向透射率,考虑到没有介质柱 3 (情况 1)、没有介质柱 2、3 (情况 2) 和没有介质柱 1、2、3 (情况 3) 三种情况时,三种耦合长度的正向透射率如图 11 所示,可以发现:情况 1 中的波导 3 的透射率劣化;情况 3 中波导 3 的透射率有明显增加,但串扰严重,原因是耦合进入波导 2 的电磁波由于 1 号介质柱的缺失而耦合进入到波导 3 中,190.5 THz 处的小峰即为串扰;情况 2 中的串扰被抑制,且透射率最佳。

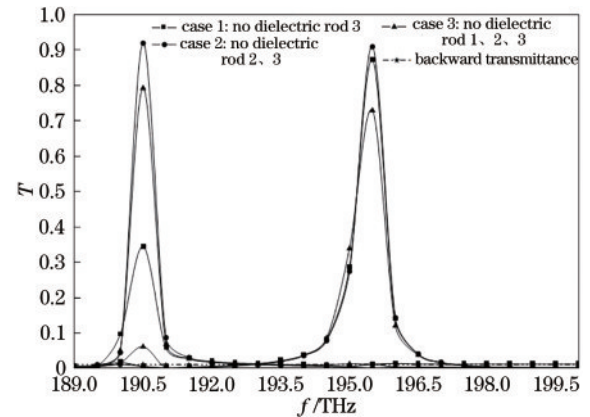


图 11 不同耦合长度对正向透射率的影响

Fig. 11 Effect of different coupling length on forward transmittance

采用上述最佳结构参数,即:矩形介质柱两个边长分别为 $1.368a$ 和 $0.5a$; R_M 为 $0.25a$, R_N 为 $0.2a$; R_S 为 $0.115a$, 实现了中心波长分别为 1534 nm 和 1574 nm 的单向滤波性能,正向透射率均在 90% 以上,反向透射率几乎为 0,两个通道隔离度最优结果分别为 33 dB 和 22 dB,有很好的非互易传输性能。奇模式光正反向入射时对应中心波长的场分布如图 12 所示。

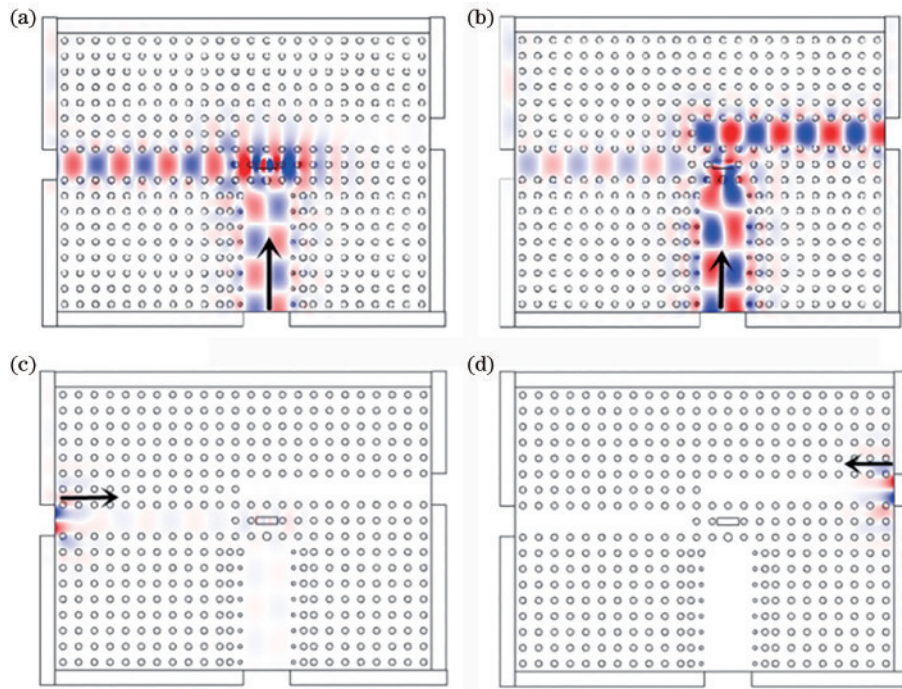


图 12 正反向入射时的电场分布。(a)从端口 1 正向入射(1574 nm);(b)从端口 1 正向入射(1534 nm);(c)从端口 2 反向入射;
(d)从端口 3 反向入射

Fig. 12 Electric field distribution at forward and backward incidence. (a) Normal incidence from port 1 (1574 nm); (b) normal incidence from port 1 (1534 nm); (c) backward incidence from port 2; (d) backward incidence from port 3

4 结 论

本文基于光子晶体模式耦合理论,在完美二维光子晶体中通过引入不同缺陷结构的方式引入波导、谐振腔结构。通过优化谐振腔内矩形介质柱、谐振腔与波导 1 之间的耦合介质柱 M 、波导 1 两侧第一排介质柱 S 以及波导侧柱 N 的尺寸提高正向透射率,实现了波长为 1534 nm、1574 nm 的双通道非互易性传输。利用 Rsoft 软件和 COMSOL 软件分别对其能带、传输特性及场分布进行分析。结果表明,该结构很好地实现了双通道非互易性滤波器的功能,两个通道的正向透射率均高于 90%,且各通道的隔离度较高。对于传统的磁光晶体实现非互易性传输,在器件集成化方面存在诸多问题,且磁光材料在光频范围内的传输时损耗较大,而本方案设计的结构只是破坏了光子晶体的结构对称性,器件尺寸小、结构简单易实现、集成度高、调制方法简单,在光通信以及光子晶体集成器件领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Fan L, Varghese L T, Wang J, et al. Silicon optical diode with 40 dB nonreciprocal transmission[J]. Optics Letters, 2013, 38(8): 1259-1261.
- [2] He C, Lu M H, Heng X, et al. Parity-time electromagnetic diodes in a two-dimensional nonreciprocal photonic crystal[J]. Physical Review B, 2011, 83(7): 075117.
- [3] Zhang Y, Li D P, Zeng C, et al. Silicon optical diode based on cascaded photonic crystal cavities[J]. Optics Letters, 2014, 39(6): 1370-1373.
- [4] Feng S, Wang Y Q. Unidirectional wavelength filtering characteristics of the two-dimensional triangular-lattice photonic crystal structures with elliptical defects[J]. Optical Materials, 2013, 35(12): 2166-2170.
- [5] 段亚丽, 陈德媛, 乔晶, 等. 基于光子晶体波导和腔耦合的光单向传输结构[J]. 固体电子学研究与进展, 2018, 38(4): 292-296, 300.
- [6] Duan Y L, Chen D Y, Qiao J, et al. Unidirectional light propagation structure based on coupling between photonic crystal waveguides and cavity[J]. Research & Progress of SSE, 2018, 38(4): 292-296, 300.
- [7] Ghanaatshoar M, Zamani M. Magneto-optical magnetic field sensors based on compact magnetophotonic crystals [J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2015, 28(4): 1365-1370.
- [8] Yu Z F, Veronis G, Wang Z, et al. One-way electromagnetic waveguide formed at the interface between a plasmonic metal under a static magnetic field and a photonic crystal[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(2): 023902.
- [9] Bi L, Hu J J, Jiang P, et al. On-chip optical isolation in monolithically integrated non-reciprocal optical resonators [J]. Nature Photonics, 2011, 5(12): 758-762.
- [10] Abram I, Bourdon G. Photonic-well microcavities for spontaneous emission control[J]. Physical Review A, 1996, 54(4): 3476-3479.

[10] Schwartz T, Bartal G, Fishman S, et al. Transport and

- Anderson localization in disordered two-dimensional photonic lattices[J]. *Nature*, 2007, 446(7131): 52-55.
- [11] Gomyo A, Ushida J, Shirane M. Highly drop-efficient channel-drop optical filters with Si-based photonic crystal slabs[J]. *Thin Solid Films*, 2006, 508(1/2): 422-425.
- [12] Djavid M, Abrishamian M S. Photonic crystal channel drop filters with mirror cavities[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2007, 39(14): 1183-1190.
- [13] Badaoui H A, Abri M. New design of integrated 2D photonic crystal narrow band filters using the FDTD-2D method[J]. *Frequenz*, 2014, 68(11/12): 511-518.
- [14] Mostafa S I, Rafat N H, El-Naggar S A. One-dimensional metallic-dielectric (Ag/SiO₂) photonic crystals filter for thermophotovoltaic applications[J]. *Renewable Energy*, 2012, 45: 245-250.
- [15] Mehr A, Emami F, Mohajeri F. Tunable photonic crystal filter with dispersive and non-dispersive chiral rods [J]. *Optics Communications*, 2013, 301/302: 88-95.