

## 对称双缺陷对光子晶体光传输特性的调制

潘继环<sup>1</sup>, 苏安<sup>1</sup>, 赵宏斌<sup>1</sup>, 韦永相<sup>1</sup>, 高英俊<sup>2</sup>

(1. 河池学院 物理与机电工程学院, 广西 宜州 546300;

2. 广西大学 物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 为研究和设计高性能、高品质的新型光学滤波和光学开关等器件, 利用传输矩阵法理论, 研究了对称双缺陷对光子晶体  $(AB)_5AC_n(BABAB)C_nA(BA)_5$  光传输特性的调制规律。结果发现, 对称双缺陷一维光子晶体  $(AB)_5AC_n(BABAB)C_nA(BA)_5$  可实现高透射率高品质的光学滤波和光学开关功能。随着缺陷周期数  $n$  和光波入射角  $\theta$  的增大, 双滤波通道向短波方向移动产生蓝移现象, 且两滤波通道之间的距离变短, 但两滤波通道蓝移的速度和双通道间距变小速度不一样。随着缺陷物理厚度  $d_c$  和折射率  $n_c$  的增大, 光子晶体双滤波通道向长波方向移动产生红移现象, 两滤波通道之间的距离变大, 但两滤波通道红移速度和双通道间距变大的速度不同。随着缺陷周期数  $n$ 、物理厚度  $d_c$ 、折射率  $n_c$  和光波入射角  $\theta$  的增大, 双通道滤波的透射率保持 100% 不变。对称双缺陷光子晶体的光传输特性, 可指导高透射率、高性能和高品质的双通道光学滤波器件, 以及高灵敏度的光学开关的研究和设计。

**关键词:** 对称双缺陷; 光子晶体; 透射谱; 滤波; 光开关

**中图分类号:** O431 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S121001

## Modulation of photonic crystal optical transmission characteristics by symmetrical double defects

Pan Jihuan<sup>1</sup>, Su An<sup>1</sup>, Zhao Hongbin<sup>1</sup>, Wei Yongxiang<sup>1</sup>, Gao Yingjun<sup>2</sup>

(1. Department of Physics and Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China;

2. College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The transfer matrix method was used to study and design new optical filters and optical switches with high performance and quality, the modulation of optical transmission characteristics of photonic crystal  $(AB)_5AC_n(BABAB)C_nA(BA)_5$  by symmetrical double defects were also studied. The result showed that symmetric double defect one-dimensional photonic crystal  $(AB)_5AC_n(BABAB)C_nA(BA)_5$  can achieve the function with high transmission, high quality optical filtering and optical switchings. Besides, with the increase of defect period  $n$  and incident angle  $\theta$ , the blue shift phenomenon occurred when the dual-filter channel moved towards the short wave direction, and the distance between the two channels became shorter, but the speed of blue shift of the two channels was different from that of the two channels. With the increase of defect physical thickness  $d_c$  and refractive index  $n_c$ , the photonic crystal

收稿日期: 2018-11-10; 修订日期: 2018-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(51161003); 河池学院 2018 年高层次人才科研启动费项目(XJ2018GKQ017); 2018 年度广西高校中青年教师基础能力提升项目(2018KY0501); 2019 年国家大学生创新创业项目(201910605016); 2017 年广西大学生创新创业项目(201710605067)

作者简介: 潘继环(1972-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事光子晶体方面的研究。Email: panjihuan@163.com

通讯作者: 苏安(1973-), 男, 教授, 硕士, 主要从事光子晶体方面的研究。Email: suan3283395@163.com

dual-filter channel moved towards long-wave direction, resulting in red shift phenomenon, and the distance between the two filter channels increased, the redshift speed of the two filter channels was different from that of the distance between the two channels. With the increase of defect period  $n$ , physical thickness  $d_c$ , refractive index  $n_c$  and incident angle  $\theta$ , the transmittance of the two-channel filter remained unchanged at 100%. The optical transmission characteristics of symmetrical double-defect photonic crystals can guide the research and design of high transmittance, high performance and high quality dual-channel optical filters and high sensitivity optical switches.

**Key words:** symmetrical double defect; photonic crystal; transmission spectrum; filtering; optical switch

## 0 引言

光子晶体的概念是 20 世纪 80 年代末提出的,它的最根本特性是具有类似于电子半导体能带结构中的禁带——光子禁带,频率落在禁带中的光被禁止传播。光子晶体独特的光学特性和潜在的应用前景吸引着越来越多的学者进行深入的研究。大量研究结果已经表明,光子晶体在光滤波器、光学开关、光波导等光学器件的设计上发挥着巨大的作用,特别是为现代信息传输技术的革新和发展提供了坚实的理论基础<sup>[1-12]</sup>。

从研究的报道可见,科研工作者们已经深入研究了各参数,即周期数、折射率比值、中心波长(频率)、填充因子、角度等对一维光子晶体光传输特性的影响,如排列周期数越大带隙结构越完整宽度越宽,不同中心波长对应不同的禁带范围,基元介质高低折射率比值越大带隙越宽等。当周期性排列的光子晶体中置入不同于基元介质的其他介质时,光子晶体周期性排列结构完整性受到破坏,可使禁带中出现缺陷模(透射峰),调整缺陷的位置或参数即可改变缺陷模的频率位置或性能<sup>[7-12]</sup>。在已有的文献报道中,往往都是在光子晶体组成介质的某个部位插入单缺陷,而在双缺陷特别是在光子晶体中插入对称双缺陷的研究还很少见。当在光子晶体中加入对称双缺陷时,双缺陷可增强光子晶体对入射到其中光场的局域限制作用,从而改变光子晶体透射谱的特性。基于这种思路,在构造光子晶体 $(AB)_5A(BA)_5$ 的基础上,插入双缺陷层形成 $(AB)_5AC_n(BABAB)C_nA(BA)_5$ 光子晶体结构模型,并通过传输矩阵法理论<sup>[2,8-12]</sup>与计算机数值计算模拟的方式,研究双缺陷层介质各种参数变化对光子晶体带隙的影响,找出对称双缺陷

对光子晶体光传输特性的调制规律,为光子晶体的理论研究和实际设计提供参考。

## 1 研究模型及计算结果分析

### 1.1 对称双缺陷光子晶体结构模型

构建的对称双缺陷一维光子晶体的结构模型为 $(AB)_5AC_n(BABAB)C_nA(BA)_5$ ,  $n$  为缺陷自身的重复排列周期数,基元介质材料 A,B 的折射率和物理厚度分别是  $n_a=1.48, n_b=3.42, d_a=84 \text{ nm}, d_b=36 \text{ nm}$ , 缺陷层介质的折射率等于  $n_c=2.9$ , 物理厚度  $d_c=40 \text{ nm}$ 。研究时假设光是垂直入射到光子晶体中,则在其他参数不变的情况下,取缺陷自身排列周期数为  $n=1$  时,利用 Matlab 计算软件编程数值计算模拟,可绘制出光子晶体 $(AB)_5AC(BABAB)CA(BA)_5$ 透射谱,如图 1 所示。

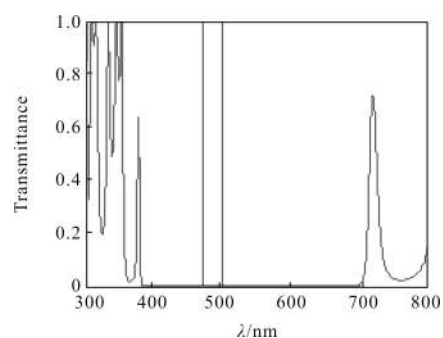


图 1 光子晶体 $(AB)_5AC(BABAB)CA(BA)_5$ 的透射谱  
Fig.1 Transmission spectrum for photonic crystals  
 $(AB)_5AC(BABAB)CA(BA)_5$

从图 1 可见,光子晶体 $(AB)_5AC(BABAB)CA(BA)_5$ 在 350~800 nm 波长范围内出现一个宽度为  $\Delta\lambda=450 \text{ nm}$  禁带,且在禁带的  $\lambda=471.1 \text{ nm}$  和  $\lambda=500.5 \text{ nm}$  的波长两个位置处出现了两条精细的窄缺陷模(透射峰),这两条缺陷模正是对称的两处缺陷产生的。这说明,当在光子晶体中合理地插入缺陷

时,可以使缺陷处的光子态密度增强,即有大量的光场被局域在光子晶体的缺陷位置处,进而增强缺陷位置的自发辐射,最终光场可以通过隧穿的方式通过光子晶体,形成透射谱中精细的缺陷模。因此,所构造的光子晶体模型的这种光学传输特性,对设计高品质的光学滤波器件具有理论和实际设计指导意义。即光子晶体 $(AB)_5AC(BABAB)CA(BA)_5$ 可实现双通道光学滤波功能。因此,下面以这两条透射峰为对象,研究对称缺陷 C 介质参数变化时透射峰特性的变化情况。

### 1.2 缺陷周期数 $n$ 对传输特性的调制

保持光子晶体的其他结构参数不变,缺陷自身周期数取  $n=1, 3, 5, 7, 9$  依次递增,可得光子晶体 $(AB)_5AC_n(BABAB)C_nA(BA)_5$ 的透射谱,如图 2 所示。

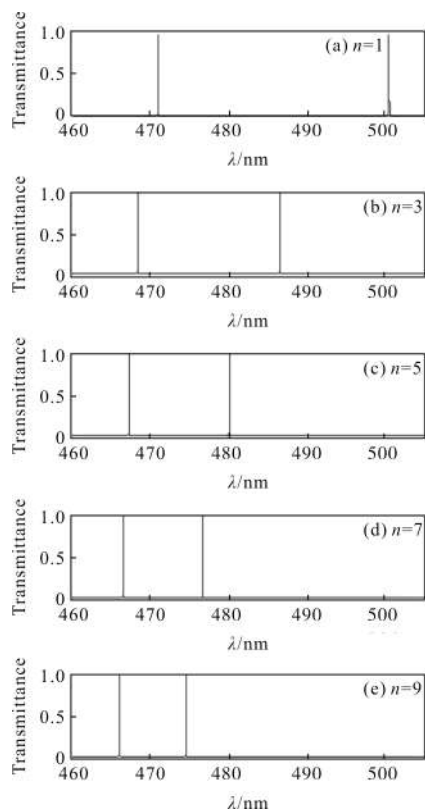


图 2 周期数  $n$  对传输特性的调制

Fig.2 Light propagation characteristic versus period  $n$

从图 2 可见,随着对称缺陷 C 自身重复排列周期数  $n$  增大,光子晶体的禁带中出现的透射峰数目不变,仍然保持两条,而且缺陷模透射率一直保持 100%。但随  $n$  增大,透射谱中的两条缺陷模越来越精细,且两缺陷模之间距离越来越短。同时,周期数  $n$  增大两缺陷模均向短波方向移动,即产生蓝移现象,

但长波方向的缺陷模蓝移的速度快于短波方向的缺陷模。如: $n=1$  时,两缺陷模分别处于  $\lambda_L=471.1$  nm 和  $\lambda_R=500.5$  nm 波长位置,两者的距离为  $\Delta\lambda_1=29.4$  nm; $n=3$  时,两缺陷模分别处于  $\lambda_L=468.6$  nm 和  $\lambda_R=486.7$  nm 波长位置,两者的距离为  $\Delta\lambda_3=18.1$  nm; $n=5$  时,两缺陷模分别处于  $\lambda_L=467.4$  nm 和  $\lambda_R=480.5$  nm 波长位置,两者的距离为  $\Delta\lambda_5=13.1$  nm; $n=7$  时,两缺陷模分别处于  $\lambda_L=466.7$  nm 和  $\lambda_R=476.9$  nm 波长位置,两者的距离为  $\Delta\lambda_7=10.2$  nm; $n=9$  时,两缺陷模分别处于  $\lambda_L=466.1$  nm 和  $\lambda_R=474.7$  nm 波长位置,两者的距离为  $\Delta\lambda_9=8.6$  nm,如图 2(a)~(e)所示。缺陷 C 自身重复排列周期数对光子晶体  $(AB)_5AC_n(BABAB)C_nA(BA)_5$  光传输特性的调制规律,对光子晶体设计制作新型光学滤波器件及光学开关等均具有参考价值。

### 1.3 缺陷厚度 $d_c$ 对传输特性的调制

仍然保持光子晶体的其他结构参数不变,取对称缺陷 C 自身重复排列周期数  $n=1$ ,缺陷的物理厚度则取  $d_c=40, 42, 44, 46, 48$  nm 依次增大,可得光子晶体 $(AB)_5AC(BABAB)CA(BA)_5$ 的透射谱,如图 3 所示。

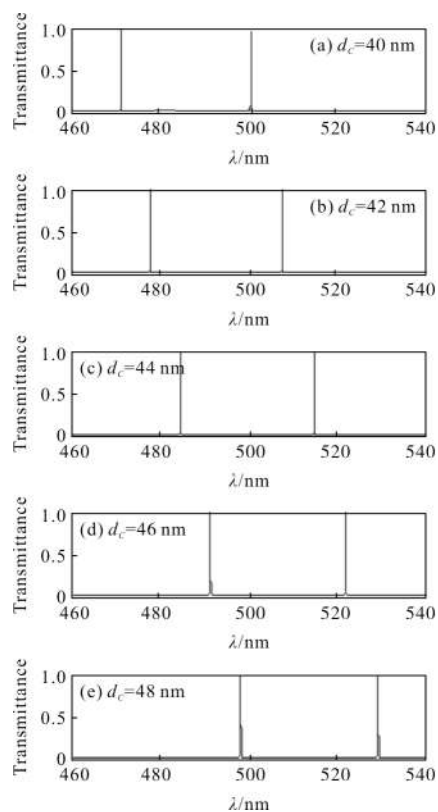


图 3 缺陷厚度  $d_c$  对传输特性的调制

Fig.3 Light propagation characteristic versus thickness  $d_c$

从图 3 可见, 随着对称缺陷 C 介质层物理厚度  $d_c$  增大, 光子晶体的禁带中的缺陷模数目保持两条不变, 而且缺陷模透射率一直保持 100% 不变, 但两缺陷模的带宽却慢慢地变宽。但随  $d_c$  增大, 透射谱中的两条缺陷模之间距离慢慢地变大。同时, 随着  $d_c$  增大两缺陷模均向长波方向移动, 即产生红移现象, 而且红移的速度相差不大。如:  $d_c=40$  nm 时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=471.1$  nm 和  $\lambda_R=500.5$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{40}=29.4$  nm;  $d_c=42$  nm 时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=478.0$  nm 和  $\lambda_R=507.7$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{42}=29.7$  nm;  $d_c=44$  nm 时, 缺陷模分别处于  $\lambda_L=484.8$  nm 和  $\lambda_R=515.0$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{44}=30.2$  nm;  $d_c=46$  nm 时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=491.6$  nm 和  $\lambda_R=522.2$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{46}=30.6$  nm;  $d_c=48$  nm 时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=498.3$  nm 和  $\lambda_R=529.4$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{48}=31.1$  nm, 如图 3(a)~(e) 所示。可见, 对称缺陷 C 介质层物理厚度  $d_c$  可调制光子晶体 (AB)<sub>5</sub>AC (BABAB)CA(BA)<sub>5</sub> 两缺陷模所处的波长位置, 但对两缺陷模的透射率及其之间的距离调制作用不明显。这个特性对实现高透射率的双通道光学滤波功能和光学开关等也具有参考意义。

#### 1.4 缺陷折射率 $n_c$ 对传输特性的调制

仍然保持光子晶体的其他结构参数不变, 取对称缺陷 C 自身重复排列周期数  $n=1$ , 而对称缺陷 C 的折射率则取  $n_c=2.9, 3.1, 3.3, 3.5, 3.7$  依次增大, 可得光子晶体 (AB)<sub>5</sub>AC (BABAB)CA(BA)<sub>5</sub> 的透射谱, 如图 4 所示。

对比图 4 和图 3 可知, 与缺陷 C 的物理厚度取  $d_c$  的调制作用类似, 与随着对称缺陷 C 的折射率  $n_c$  增大, 光子晶体的禁带中的缺陷模数目也保持两条不变, 且缺陷模透射率也一直保持 100% 不变, 以及随  $n_c$  增大透射谱中的两条缺陷模之间距离则变大。同时, 随着  $n_c$  增大两缺陷模也均向长波方向产生红移现象。但相比  $d_c$  的调制作用, 在折射率  $n_c$  增大的作用下, 两缺陷模向波长方向红移的速度和两者之间的距离增大速度更加快些。如:  $n_c=2.9$  时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=471.1$  nm 和  $\lambda_R=500.5$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{2.9}=29.4$  nm;  $n_c=3.1$  时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=479.7$  nm 和  $\lambda_R=511.3$  nm 波长位置, 两者

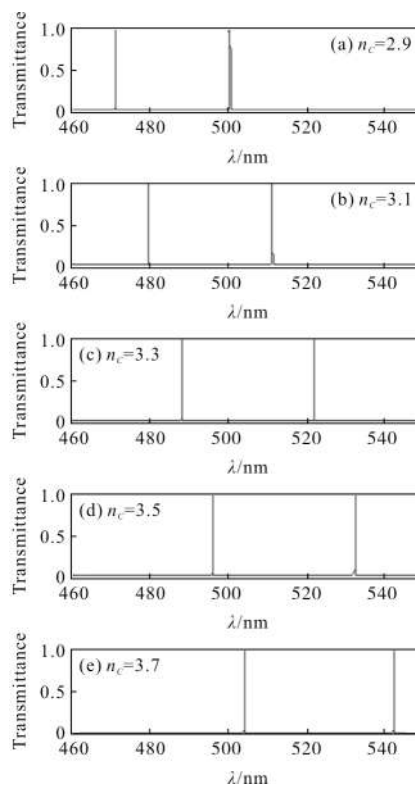


图 4 缺陷折射率  $n_c$  对传输特性的调制

Fig.4 Light propagation characteristic versus  $n_c$

的距离为  $\Delta\lambda_{3.1}=31.6$  nm;  $n_c=3.3$  时, 缺陷模分别处于  $\lambda_L=488.1$  nm 和  $\lambda_R=521.9$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{3.3}=33.8$  nm;  $n_c=3.5$  时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=496.1$  nm 和  $\lambda_R=532.2$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{3.5}=36.1$  nm;  $n_c=3.7$  时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=503.9$  nm 和  $\lambda_R=542.1$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{3.7}=38.2$  nm, 如图 4(a)~(e) 所示。可见, 对称缺陷 C 介质层折射率  $n_c$  不仅可调制光子晶体两缺陷模所处的波长位置, 同时也可以调制两缺陷之间的距离。这个特性不仅可实现高透射率的双通道光学滤波功能, 而且对光学开关的研究和设计更加具有参考价值。

#### 1.5 入射角 $\theta$ 对传输特性的调制

当光不是垂直入射到光子晶体中时, 入射方向对缺陷模又会产生怎样的影响呢? 仍然保持光子晶体的其他结构参数不同样, 并取对称缺陷 C 自身重复排列周期数  $n=1$ , 而取光的入射角  $\theta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$  依次增大, 根据 TE 偏振的传输矩阵, 为计算可得光子晶体 (AB)<sub>5</sub>AC (BABAB)CA(BA)<sub>5</sub> 的透射谱, 如图 5 所示。

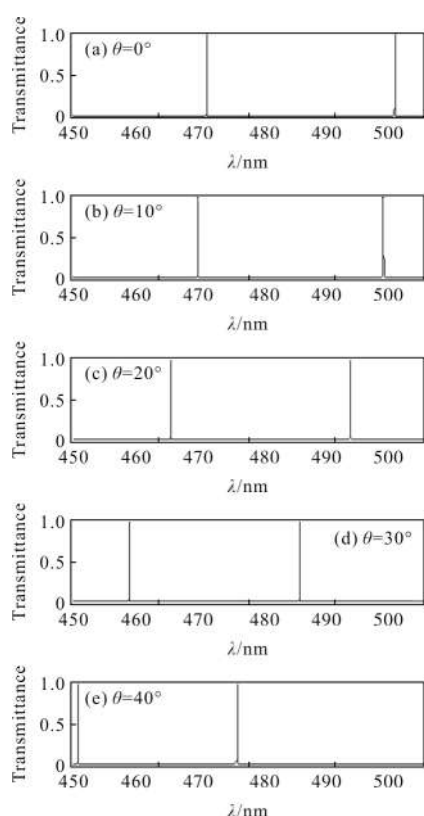


图 5 入射角  $\theta$  对传输特性的调制

Fig.5 Light propagation characteristic versus incident angle  $\theta$

对比图 5 和图 2 可知, 对称缺陷 C 自身重复排列周期数  $n$  的调制作用类似, 与随着入射角  $\theta$  增大, 光子晶体的禁带中的缺陷模数目保持两条不变, 且缺陷模透射率一直保持 100% 不变, 以及随  $\theta$  增大透射谱中的两条缺陷模之间距离则变小。同时, 随着  $\theta$  增大两缺陷模也均向长波方向移动即产生蓝移现象。但相比周期数  $n$  的调制作用, 在入射角  $\theta$  增大的作用下, 两缺陷模向波长方向蓝移的速度和两者之间的距离减小速度稍慢些。如:  $\theta=0^\circ$  时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=471.1$  nm 和  $\lambda_R=500.5$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_0=29.4$  nm;  $\theta=10^\circ$  时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=469.7$  nm 和  $\lambda_R=498.7$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{10}=29.0$  nm;  $\theta=20^\circ$  时, 缺陷模分别处于  $\lambda_L=465.4$  nm 和  $\lambda_R=493.6$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{20}=28.2$  nm;  $\theta=30^\circ$  时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=459.0$  nm 和  $\lambda_R=485.7$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{30}=26.7$  nm;  $\theta=40^\circ$  时, 两缺陷模分别处于  $\lambda_L=450.9$  nm 和  $\lambda_R=475.8$  nm 波长位置, 两者的距离为  $\Delta\lambda_{40}=24.9$  nm, 如图 5(a~e) 所示。可见, 对于对称双

缺陷光子晶体  $(AB)_5AC(BABAB)CA(BA)_5$ , 入射光波的入射角  $\theta$  同样可以调制光子晶体两缺陷模所处的波长位置和两缺陷之间的距离。这个特性同样可为光学滤波和光学开关等器件的研究和设计提供理论依据。

## 2 结论

利用传输矩阵法理论, 通过数值计算模拟的方法, 研究对称双缺陷对一维光子晶体  $(AB)_5AC_n(BABAB)C_nA(BA)_5$  光传输特性的调制作用, 得出如下结论:

(1) 含对称双缺陷一维光子晶体  $(AB)_5AC_n(BABAB)C_nA(BA)_5$  可以实现高透射率高品质的双通道光学滤波功能。

(2) 缺陷周期数  $n$  和光波入射角  $\theta$  可使光子晶体双滤波通道向短波方向产生蓝移, 以及使两通道之间的距离变短, 但两者对蓝移和双通道间距大小的调制作用速度不一样。

(3) 缺陷物理厚度  $d_c$  和折射率  $n_c$  可使光子晶体双滤波通道向长波方向产生红移, 以及使两通道之间的距离变大, 但两者对红移和双通道间距大小的调制作用速度不同。

(4) 缺陷周期数  $n$ 、物理厚度  $d_c$  和折射率  $n_c$ , 以及光波入射角  $\theta$ , 对双通道滤波的透射率均不产生影响。

对称双缺陷光子晶体的光传输特性, 对研究和设计高透射率、高性能和高品质的双通道光学滤波器件, 以及高灵敏度的光学开关等, 均具有重要的理论指导意义和潜在的应用价值。

## 参考文献:

- [1] Yuan Jun, Zhang Zhengping, Xie Yiyang. Study of single-fundamental-mode square-lattice photonic crystal vertical cavity surface emitting laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0606005. (in Chinese)
- [2] Pan Jihuan, Su An, Lv Linshi, et al. Tunable channel filter function of four-heterostructure photonic crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S121001. (in Chinese)
- [3] Liu Jie, Tie Shengnian, Lu Huidong. Multi-channel drop filter based on two-dimensional photonic crystal [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (5): 1021-1027. (in Chinese)

- Chinese)
- [4] Feng Di, Zhao Zhengqi, Fang Qimeng, et al. Analysis of end face damage in lapping for photonic crystal fiber [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(11): 2895–2903. (in Chinese)
- [5] Yang Jing, Gong Cheng, Zhao Jiayu, et al. Fabrication of terahertz device by 3D printing technology [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 77–85. (in Chinese)
- [6] Li Tianqi, Mao Xiaojie, Lei Jian, et al. Analysis and comparison of solid-state lasers and fiber lasers on the coupling of rod-type photonic crystal fiber [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 0958–0973. (in Chinese)
- [7] Liu Jiping, Li Haibo, Meng Xiangdong, et al. Eigenfield distribution of two-dimensional functional photonic crystals with point defects [J]. *Chinese J Lasers*, 2018, 45(8): 0803001. (in Chinese)
- [8] Su An, Wang Gaofeng, Meng Chengju, et al. Light propagation characteristic of dual defect microcavity of photonic crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0620004. (in Chinese)
- [9] Su An, Gao Yingjun. Light propagation characteristics of one-dimensional photonic crystal with double-barrier quantum well [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 234208. (in Chinese)
- [10] Su An, Meng Chengju, Gao Yingjun, et al. Modulation of activated impurity on filter property of photonic crystal quantum well [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 0306001. (in Chinese)
- [11] Meng Chengju, Su An, Gao Yingjun. Photonic crystal quantum well with active impurity possessing high-efficient optical filtering and amplifying functions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3702–3707. (in Chinese)
- [12] Chen Ying, Cao Huiying, Han Shuaitao, et al. Sensing property of photonic crystal fabry-pérot heterogeneous structure with absorption medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0223003. (in Chinese)