

# 二元复合缺陷对一维光子晶体光学特性的影响

何杰<sup>1</sup> 宋立涛<sup>2\*</sup> 郭涛<sup>3</sup> 刘秀英<sup>1</sup> 杨武<sup>1</sup> 刘琨<sup>1</sup>

<sup>1</sup>河南工业大学理学院, 河南 郑州 450001

<sup>2</sup>郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450001

<sup>3</sup>石家庄经济学院数理学院, 河北 石家庄 050031

**摘要** 利用传输矩阵法对二元复合缺陷光子晶体的光学特性进行了研究,重点讨论了光子晶体由二元复合缺陷结构过渡到复合光子晶体结构的过程及其光学特性的变化规律。研究表明,通过改变二元复合缺陷的结构和层数,可以控制禁带中缺陷模式的有无和调节其波长在禁带中的位置,并可使缺陷模恰好位于禁带中心波长处,由此可实现高性能的光学窄带滤波或光子晶体的禁带展宽。该研究结果可为二元复合缺陷光子晶体微腔的设计及其在滤波器、激光器等光学器件中的应用提供参考。

**关键词** 材料; 光子晶体; 传输矩阵; 复合缺陷; 光学特性

中图分类号 O431; O734

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.031602

## Optical Characteristics of One-Dimensional Photonic Crystals with Two Element Compound Defect Layers

He Jie<sup>1</sup> Song Litao<sup>2</sup> Guo Tao<sup>3</sup> Liu Xiuying<sup>1</sup> Yang Wu<sup>1</sup> Liu Kun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of science, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China

<sup>2</sup>Physical Engineering college, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

<sup>3</sup>College of Mathematics and Physics, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang, Hebei 050031, China

**Abstract** The optical characteristics of one-dimensional photonic crystals with two element compound defect layers is studied by transfer matrix method. The process and optical characteristics, which changed from one-dimensional photonic crystals with two element compound defect layers to one-dimensional compound photonic crystals, are mainly discussed. The results indicate that the defect mode and its wavelength can be controlled by the number of layers and structures of the two element compound defects. Thereby it can be realized that optical narrowband filter with high quality or bandgap extension. The results can provide reference for the design of one-dimensional photonic crystals micro cavity with two element compound defect layers, which can be used for making filter, laser, etc.

**Key words** materials; photonic crystal; transfer matrix method; compound defect; optical characteristics

**OCIS codes** 160.5298; 160.4670; 160.4760

## 1 引言

光子晶体是介电材料在空间周期排列而形成的光子学材料,其体积小,可作为光子集成和光电集成的基础材料。光子晶体的基本特征是具有光子禁带和光子局域。频率落在禁带中的光波被禁止传播,引入缺陷破坏其对称性,在带隙中会出现缺陷模,缺陷模光子态被限制在缺陷位置,一旦偏离,场振幅迅速衰减。缺陷的引入和不同缺陷的模式耦合是多数光子晶体器件得以实际应用的物理基础,也是光子晶体器件设计和研究最重要的内容。一维光子晶体由于制作简单,可具有类似三维的全向能隙结构,能用于高维光子晶体器件的设计,从而备受青睐。一维光子晶体中引入的缺陷多为点缺陷。点缺陷相当于微腔,利用点缺陷

收稿日期: 2014-09-15; 收到修改稿日期: 2014-10-15; 网络出版日期: 2015-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(11304079)、河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A140195)

作者简介: 何杰(1978—),女,博士,副教授,主要从事光学及光学器件设计等方面的研究。E-mail: hejiehb@163.com

\*通信联系人。E-mail: songlt12@zzu.edu.cn

可将光“俘获”在某个特定的位置。光子晶体微腔在光子晶体激光器<sup>[1]</sup>、滤波器<sup>[2]</sup>、波导<sup>[3]</sup>、开关<sup>[4-5]</sup>、双稳态、限幅、二次谐波产生、传感器等器件中起着重要的作用。

针对一维含缺陷光子晶体的理论和实验研究已经很多<sup>[4-10]</sup>,但其研究主要集中于一元缺陷,对二元缺陷,尤其是二元复合缺陷的研究则很少。本文利用传输矩阵法<sup>[11-12]</sup>对含有二元复合缺陷的一维光子晶体光学特性进行了数值研究,重点讨论了光子晶体由二元复合缺陷结构过渡到复合光子晶体结构的过程及其光学传输特性的变化规律。其结论可为二元复合缺陷光子晶体微腔的设计及其在滤波器、激光器、光学开关等光学器件中的应用提供参考。

## 2 光子晶体结构和传输矩阵法

为了研究二元复合结构对光子晶体禁带和缺陷模式的影响,利用C和D两种介质构造了两种二元复合缺陷结构,分别为(CD)<sup>m</sup>C和(DC)<sup>n</sup>D,都具有对称结构。其中,C为碲化铅(PbTe),D为氟化锂(LiF),折射率分别为 $n_c=4.1$ , $n_d=1.36$ , $m$ 和 $n$ 为从0开始的整数,表示层数,当 $m=0$ 和 $n=0$ 时,相当于一元缺陷。一维光子晶体由A和B两种介质构成,结构为(AB)<sup>q</sup>A,其中A为硫化砷(AsS),B为二氧化硅(SiO<sub>2</sub>),折射率分别为 $n_a=2.6$ , $n_b=1.465$ 。用复合缺陷替换光子晶体中的某一层介质,即可得到二元复合缺陷光子晶体。研究4种结构的二元复合缺陷光子晶体,并按替换某一层A或B分为两组,替换B的为(AB)<sup>p</sup>A(CD)<sup>m</sup>C(AB)<sup>q</sup>A、(AB)<sup>p</sup>A(DC)<sup>n</sup>D(AB)<sup>q</sup>A,替换A的为(AB)<sup>p</sup>(CD)<sup>m</sup>C(BA)<sup>q</sup>、(AB)<sup>p</sup>(DC)<sup>n</sup>D(BA)<sup>q</sup>,其中 $p$ 和 $q$ 为层数。当 $p=q$ 时,4种结构均呈中心对称。假设 $p=q$ ,光子晶体的带隙中心波长 $\lambda_0=550$  nm,A、B、C和D 4种材料的光学厚度均为 $\lambda_0/4$ 。

研究理论采用传输矩阵法<sup>[11-12]</sup>,各层介质的特征矩阵 $M_j(j=A, B, C, D)$ 可表示为

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j / \lambda, \quad (2)$$

式中 $q_j$ 、 $h_j$ 、 $n_j$ 、 $d_j$ 分别为各层介质的折射角、导纳、折射率和厚度,总传输矩阵 $M$ 为各层介质特征矩阵的乘积。设入射介质和出射介质均为空气,取其折射率为1,则透射率为

$$T = \frac{4}{|M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}|^2}. \quad (3)$$

计算中均假设光波垂直入射,此时各层的 $\theta_j=0$ ,横向电场(TE)模式和横向磁场(TM)模式具有相同的透射谱。

## 3 结果与讨论

为便于后面研究光子晶体禁带随二元复合缺陷的变化,图1给出了结构为(AB)<sup>12</sup>A的光子晶体的透射谱,可以看出在462~682 nm之间存在一个220 nm宽的光子禁带,该禁带边峰陡峭。

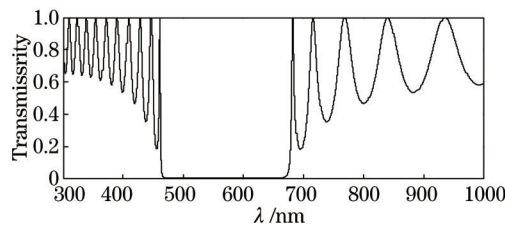


图1 结构为(AB)<sup>12</sup>A的光子晶体的透射谱

Fig.1 Transmission spectrum of photonic crystal with (AB)<sup>12</sup>A structure

先讨论替换中间层B的情况,设 $p=q=6$ ,则其结构分别为(AB)<sup>6</sup>A(CD)<sup>m</sup>C(AB)<sup>6</sup>A和(AB)<sup>6</sup>A(DC)<sup>n</sup>D(AB)<sup>6</sup>A。图2为(CD)<sup>m</sup>C作为缺陷的透射谱,从上到下 $m$ 的取值依次为0、1、2、6、7、8、10。可以看出,在 $m=0$ ,即C作为一元缺陷时,透射谱中存在两个缺陷峰,波长分别为489.15 nm和628.14 nm; $m=1$ 时,两缺陷峰向中心波长移动,同时带隙边峰透射率变低; $m=2$ 时,两缺陷峰继续向中心波长移动,带隙第一边峰透射率已很低;增加到 $m=6$ 时,谱中的两个缺陷峰均已移到中心波长附近,且已部分重叠(如图4所示),原带隙第一边峰消失,带隙展宽,第二边峰透射率也已很低,更宽的带隙结构初具雏形; $m=7$ 时,两缺陷模式均移到中心波长位置,

出现模式简并,透射率稍有降低,新带隙基本形成; $m=8$ 时,缺陷峰仍位于中心波长处,半峰全宽变窄,透射率进一步降低,带隙已无明显变化; $m=10$ 时,缺陷模透射率已经很低,图3中已观察不到,带隙无变化,边峰变陡;继续增加 $m$ ,二元复合缺陷光子晶体过渡成为复合结构光子晶体,禁带展宽为420 nm。

图3为(DC)<sup>n</sup>D结构作为缺陷的透射谱,从上到下 $n$ 的取值分别为0、1、2、4、8、10。可以看出,在 $n=0$ 时,即D作为一元缺陷时,由于其折射率和B的折射率接近,光学厚度一样,透射谱中未出现缺陷模式; $n=1$ 时,带隙稍展宽,边峰透射率为1;随着 $n$ 值增大,第一和第二边峰透射率逐渐降低,当 $n=4$ 时,第一和第二边峰透射率已很低,第一边峰几近消失,原带隙向更宽的带隙过渡; $n=8$ 时,第一和第二边峰消失,新带隙形成; $n=10$ 时,带隙基本无变化,二元复合缺陷光子晶体过渡成为复合结构光子晶体,带隙同样展宽为420 nm。

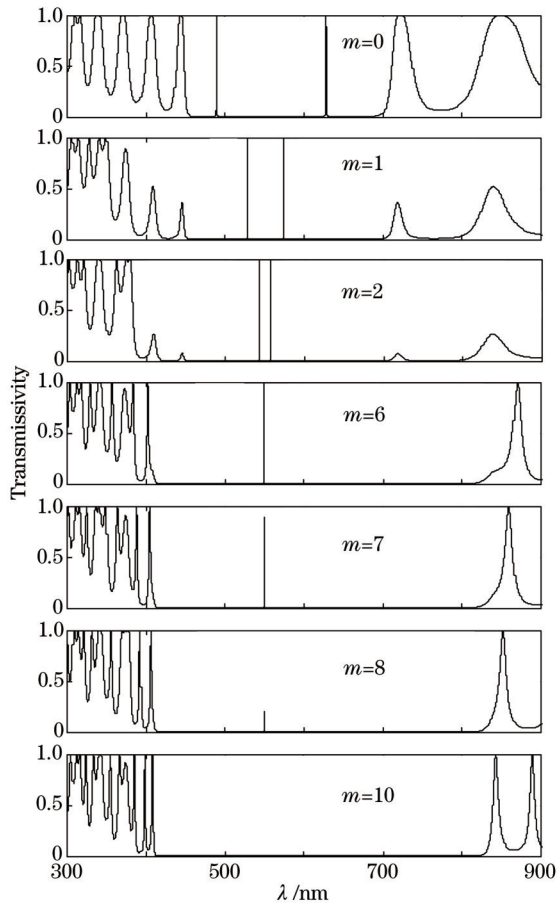


图2 (CD)<sup>m</sup>C作为缺陷层的透射谱

Fig.2 Transmission spectra of photonic crystals with defect layers of (CD)<sup>m</sup>C

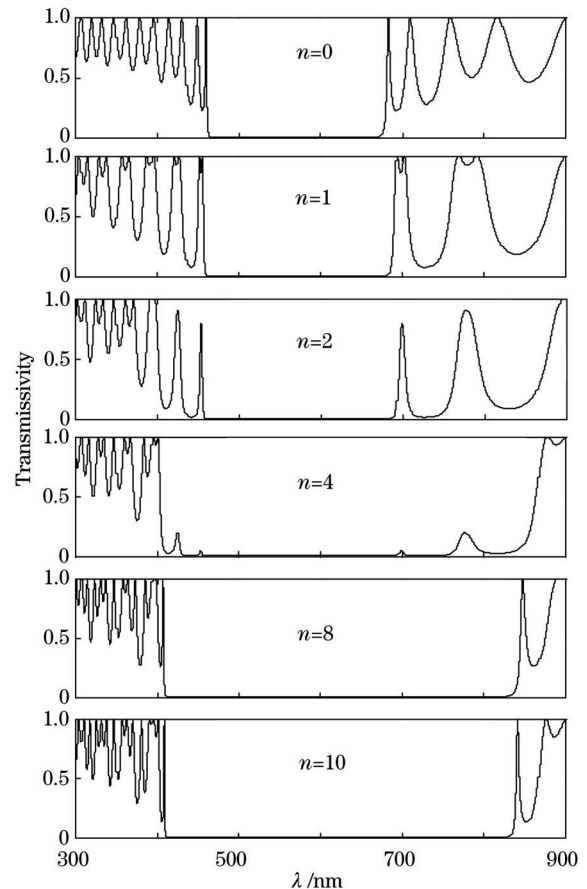


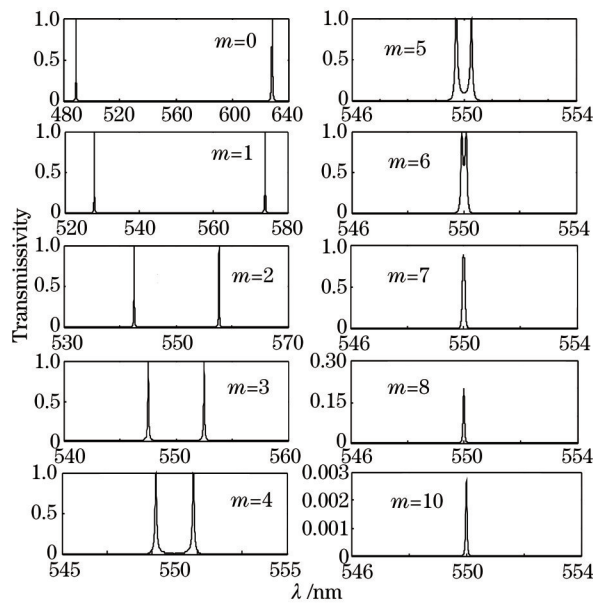
图3 (DC)<sup>n</sup>D作为缺陷层的透射谱

Fig.3 Transmission spectra of photonic crystals with defect layers of (DC)<sup>n</sup>D

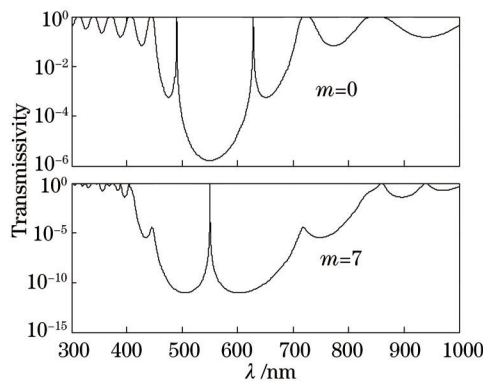
图4给出了(CD)<sup>m</sup>C作为缺陷时,缺陷模及其透射率随 $m$ 变化的透射谱, $m$ 取值依次为0、1、2、3、4、5、6、7、8和10。可以发现, $m$ 值较小时缺陷模有两个,分别位于带隙中心波长的两侧,长波一侧距中心波长稍远。随 $m$ 值的增加,两缺陷模波长均向中心波长靠拢,即长波缺陷模蓝移,短波缺陷模红移,最终在 $m=7$ 时,于中心波长处重叠,发生简并。此外, $m < 7$ 时,两缺陷模透射率一直为1, $m=7$ 时,降低为0.893,下降了约10%; $m > 7$ 时,随 $m$ 增加,透射率迅速降低,到 $m=10$ 时,透射率已低于0.003。

对比可以发现,用复合缺陷替换介质B(低折射率介质)时,如果是C(高折射率介质)作为复合缺陷的外层,透射谱中出现缺陷模式,复合缺陷的层数 $m$ 较小时,缺陷模有两个,其模式波长随 $m$ 的增加向带隙中心波长移动,并在中心波长处发生模式简并,进一步增加 $m$ ,模式波长不再发生变化,但其透射率会迅速降低,并随 $m$ 增加很快消失;D(低折射率介质)作为复合缺陷的外层时,透射谱中始终不出现缺陷模式。

图5给出了(CD)<sup>m</sup>C作为缺陷, $m=0$ 和 $m=7$ 时,纵坐标为对数坐标的透射谱。对比可以发现,复合缺陷光子晶体比一元缺陷光子晶体的带隙更深,其带隙深度从 $m=0$ 时高于 $10^{-6}$ 降低到 $m=7$ 时低于 $10^{-11}$ ,且 $m=7$ 时缺

图4  $(CD)^m C$ 作为缺陷层时放大后的透射谱Fig.4 Amplified transmission spectra of photonic crystals with defect layers of  $(CD)^m C$ 

陷模式恰好位于中心波长处,即位于带隙最深处,故作为谐振腔时,其滤波性能要远优于一元缺陷光子晶体。

图5  $(CD)^m C$ 为缺陷层时,  $m=0$ 和 $m=7$ 的透射谱Fig.5 Transmission spectra of photonic crystals with defect layers of  $(CD)^m C$  ( $m=0, 7$ )

对于用二元复合缺陷替换中间层A(高折射率介质)的两种结构,同样设 $p=q=6$ ,则其具体结构分别为 $(AB)^6(CD)^m C(BA)^6$ 和 $(AB)^6(DC)^n D(BA)^6$ 。计算表明, $(DC)^n D$ 结构,即D(低折射率介质)作为复合缺陷的外层时,透射谱中出现缺陷峰, $n$ 较小时,缺陷峰有两个,其模式波长随 $n$ 的增加向带隙中心波长移动,并在中心波长处发生模式简并,进一步增加 $n$ ,模式波长不再发生变化,其透射率迅速降低,并很快消失; $(CD)^m C$ 结构,即C(高折射率介质)作为复合缺陷的外层时,透射谱中始终不出现缺陷模式。由于具体的变化过程和规律与替换B时基本相似,不再赘述。

## 4 结 论

由上述分析可知,二元复合缺陷的结构和层数对光子晶体的带隙和缺陷模式有着重要影响。用二元复合缺陷替换光子晶体中间层的低折射率介质时,若复合缺陷的外层为高折射率介质,透射谱中出现缺陷模式,反之没有;用其替换光子晶体中间层的高折射率介质时,情况则刚好相反。

对于存在缺陷模的结构,即 $(AB)^6 A(CD)^m C(AB)^6 A$ 和 $(AB)^6(DC)^n D(BA)^6$ 两种结构,复合缺陷的层数较少时,缺陷模式有两个,分别位于带隙中心波长的两侧,两缺陷模式随缺陷层数增加均向中心波长移动,最终在中心波长处发生模式简并;简并后,缺陷模的透射率随缺陷层数的进一步增加迅速降低,并很快消失,二元复合缺陷光子晶体过渡成为复合结构光子晶体。

可见通过控制二元复合缺陷的层数,可调节缺陷模在带隙中的位置;控制二元复合缺陷到合适的层数,

可得到模式波长在带隙中心的高性能光子晶体微腔,用于窄带滤波;进一步增加复合缺陷的层数,二元复合缺陷光子晶体过渡成为带隙展宽的复合结构光子晶体。该研究结果可为二元复合缺陷光子晶体微腔的设计及其在滤波器、激光器、光学开关等光学器件中的应用提供参考。

### 参考文献

- 1 A V Giannopoulos, Y J Li, C M Long, *et al.*. Optical properties of photonic crystal heterostructure cavity lasers[J]. *Opt Express*, 2009, 17(7): 5379–5390.
- 2 H C Hung, C J Wu, S J Chang. Infrared tunable multichannel filter in a doped emiconductor–dielectric photonic crystal heterostructure[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2012, 48(3): 361–366.
- 3 T H Pei, Y T Huang. The high–transmission photonic crystal heterostructure Y–branch waveguide operating at photonic band region[J]. *J Appl Phys*, 2011, 109(3): 034504.
- 4 R Ozaki, H Moritake, K Yoshino. Analysis of defect mode switching response in one–dimensional photonic crystal with a nematic liquid crystal defect layer[J]. *J Appl Phys*, 2007, 101(3): 033503/
- 5 C Y Wu, Y H Zou, I Timofeev, *et al.*. Tunable bi–functional photonic device based on one–dimensional photonic crystal infiltrated with a bistable liquid–crystal layer[J]. *Opt Express*, 2011, 19(8): 7349–7355.
- 6 R Ozaki, H Moritake. Wavelength and bandwidth tunable photonic stopband of ferroelectric liquid crystals[J]. *Opt Express*, 2012, 20(6): 6191–6196.
- 7 Song Litao, He Jie, Wang Hualei, *et al.*. Optical performance of photonic crystal filter with liquid crystal layer[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(11): 2834–2837.  
宋立涛, 何杰, 王华磊, 等. 液晶缺陷光子晶体滤波器的光学特性[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2834–2837.
- 8 He Jie, Song Litao, Wang Hualei, *et al.*. Transmission modes with varying incident angle for photonic crystal filter with liquid crystal layer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 102301.  
何杰, 宋立涛, 王华磊, 等. 入射角对液晶缺陷光子晶体滤波器透射谱的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(10): 102301.
- 9 Liu Qineng. Interference theory of the defect mode in one–dimensional doped photonic crystal[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0806001.  
刘启能. 一维掺杂光子晶体缺陷模的干涉理论[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0806001.
- 10 Chen Weidong, Dong Xinyu, Chen Ying, *et al.*. Analysis of the tunable filtering properties of a photonic crystal with symmetric dual defects[J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(15): 154207.  
陈卫东, 董昕宇, 陈颖, 等. 对称双缺陷光子晶体的可调谐滤波特性分析[J]. *物理学报*, 2014, 63(15): 154207.
- 11 J B Pendry, A Mackinnon. Calculation of photon dispersion relations[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 69(19): 2772–2775.
- 12 Wang Hui, Li Yongping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals[J]. *Acta Phys Sin*, 2001, 50(11): 2172–2178.  
王辉, 李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. *物理学报*, 2001, 50(11): 2172–2178.

栏目编辑: 张浩佳