文章编号:1001-5078(2011)11-1248-05 ·光子晶体·

吸收对镜像对称一维光子晶体透射谱的影响

蒙成举,苏 安
(河池学院物理与电子工程系,广西 宜州 546300)

摘 要:利用传输矩阵法理论,研究吸收对镜像对称结构一维光子晶体$(ABCB)_m(BCBA)_m$透射谱的影响。结果显示:各介质层吸收系数k的变化对光子晶体透射谱影响明显,其中B层介质的吸收对透射谱的影响最为强烈。具体表现为,当各层介质无吸收时,主禁带中出现一条透射率为100%的透射峰;随着B介质层系数k的增大,主禁带中透射峰的透射率迅速衰减,当$k=0.001$时,透射峰的透射率趋于0,而禁带两侧的通带透射率缓慢地趋于不完整的禁带;当A,B,C各层介质同时存在吸收时,透射峰及禁带两则通带的透射率急剧下降,$k=0.0006$时,透射峰透射率就已趋于0,禁带两边通带逐渐弱化。这些特性对设计新型光学器件有一定的参考价值。

关键词:光子晶体;镜像对称;透射吸收
中图分类号:O431 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2011.11.017

Absorption's influence on the transmission spectrum of mirror symmetry one-dimension photonic crystal

MENG Cheng-ju, SU An
(Department of Physics and Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China)

Abstract: Transfer matrix theory is used to study the influence of adsorption on mirror symmetry one-dimensional photonic crystals' transmission spectrum. The results show that the change of absorption coefficient k in dielectric layers obviously affects the transmission spectrum of photonic crystals, in which the absorption of layer B has the strongest influence on the transmission spectra. It shows that when there is no absorption in dielectric layers, the transmission peak with transmission rate of 100% appears in the main band. With the increasing of coefficient k in dielectric layer B, the peak transmission rate in the main transmission band decreases rapidly. When $k=0.001$, the rate of transmission peaks tends to 0, and the transmission rate of the pass band on both sides tends to be incomplete band. When absorption exists in layers A, B and C, the transmission rate of transmission peak and both sides of the pass band decline sharply. When $k=0.0006$, the transmission rate of the peak tends to 0, and both sides of the pass band is gradually weakened. These features have some reference values on the design of new optical device.

Key words: photonic crystal; mirror symmetry; transmission absorption

1 引 言

光子晶体[1-2]是介电常量周期性排列的人工微结构光学材料,其内部存在能量禁带,处于禁带区域的光子在光子晶体中是被禁止传播的。由于光子晶体在能带和带隙方面的特殊性质,使得光子晶体在光电子和光通信等领域有着重要的应用价值,例如制作光子晶体激光二极管,光子晶体宽带滤波器和超窄带滤波器,光子晶体光纤等[3-7]。镜像对称结构光子晶体模型,不仅其具有简单的多层介质膜镜像对称结构,而且其能带谱往往也对称分布。相对

基金项目:广西自然科学基金项目(No. 2011GXNSFA018145, No. 2011GXNSFA018140);广西教育厅科研项目(No. 201012MS206);广西高校优秀人才资助计划项目(桂教人[2011]40号);河池学院重点科研课题(No. 2011YAZ-N001)资助。

作者简介:蒙成举(1979-),男,实验师,主要从事光子晶体,原子核物理的研究。E-mail: mengchengju@163.com

收稿日期:2011-04-16;**修订日期**:2011-06-13

而言,镜像对称结构一维光子晶体带隙材料制备简单,可以用传统的镀膜工艺加工完成,具有广泛的应用前景。然而,在一般的研究报道中,往往把构成光子晶体的材料看成完全透明的材料来处理[3,5-6,8],事实上,任何透明材料都不是百分之百的透明,所以由这些材料构成的光子晶体对光也具有一定的吸收作用。这种吸收作用必然在某种程度上对一维光子晶体的透射率产生影响,从而导致光子晶体带隙结构的变化。因此,材料的吸收这一重要因素对于光子晶体的研究是不可忽略的。研究吸收时,通常是对构成光子晶体的材料中引入吸收杂质,此时材料的折射率为一个含正虚部的复数[9]。但目前报道关于吸收对一维光子晶体的影响,大多都集中于一般结构的一维光子晶体,有关镜像对称结构的相对甚少。

基于此,本文构造镜像对称结构一维光子晶体 $(ABCB)_m(BCBA)_m$ 模型,并用成熟的传输矩阵法理论,分别在无吸收、各层介质分别存在或是全部存在吸收时,对其透射谱进行计算模拟研究,找出吸收对镜像对称结构一维光子晶体光传输特性的影响规律,发现了一些有一定实际参考意义的现象,这些现象和结论为一维光子晶体材料的理论研究和实验制备具有一定的指导价值。

2　结构模型与研究理论

2.1　光子晶体结构模型及传输矩阵法

选定镜像对称结构一维光子晶体模型为 $(ABCB)_m(BCBA)_m$,其中 A,B 和 C 三种介质交替排列构成。各介质的折射率及厚度分别为 $n_A=2.38$, $n_B=1.38$, $n_C=1.445$, $d_A=89.3$ nm, $d_B=154.0$ nm, $d_C=147.1$ nm。m 是光子晶体的重复周期数,可为任意正整数。若光子晶体置于空气中,假设光从左向右垂直入射,此时不区分 TE 波和 TM 波,依据传输矩阵理论,光波与介质层的相互作用可由其特征矩阵描述。对于由分层介质周期性排列而成的一维光子晶体,可以逐层应用矩阵算式,总传输矩阵为各层矩阵之积[8,10]。因此,A,B,C,B 各层的特征矩阵 M_j 可表示为:

$$M_j=\begin{bmatrix}\cos\delta_j & -\mathrm{i}\eta_j^{-1}\sin\delta_j\\ -\mathrm{i}\eta_j\sin\delta_j & \cos\delta_j\end{bmatrix}\quad (j=\mathrm{A,B,C})\tag{1}$$

则光在镜像对称结构一维光子晶体 $(ABCB)_m(BCBA)_m$ 内传播的总传输矩阵 M 可表为:

$$M=(M_AM_BM_CM_B)_m(M_BM_CM_BM_A)_m=\begin{bmatrix}m_{11} & m_{12}\\ m_{21} & m_{22}\end{bmatrix}\tag{2}$$

通过 M 可得到 TE 或 TM 模光通过整个结构的透射系数和透射率分别为:

$$t=\frac{2\eta_0}{m_{11}\eta_0+m_{12}\eta_0\eta_l+m_{21}+m_{22}\eta_l},T=|t|^2\tag{3}$$

式中,η_0 和 η_l 分别为入射介质和出射介质的磁导率。当光子晶体置于空气中时,$\eta_l=\eta_0=\sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}$。

2.2　介质存在吸收时折射率的表示方法

对于存在吸收的介质,需要引入复折射率 $\hat{n}$ 和 $\hat{k}$ 复波数的概念[9,11]:

$$\hat{n}=n(1+\mathrm{i}k),\hat{k}=\frac{2\pi}{\lambda}\hat{n}\tag{4}$$

式中,n 为介质的折射率,描述其对光波的折射;k 为介质的吸收系数,描述其对光波的吸收;λ 为光波波长,在处理吸收介质中光的传播问题时,只需将透明介质对应公式中的折射率 n 换为复折射率 $\hat{n}$,波数 k 换为复数波 $\hat{k}$ 就可以解决问题。考虑到介质材料的吸收,可以令材料 A 的复折射率 $\hat{n}_A=n_A(1+\mathrm{i}k_A)$,B 的复折射率 $\hat{n}_B=n_B(1+\mathrm{i}k_B)$,材料 C 的复折射率 $\hat{n}_C=n_C(1+\mathrm{i}k_C)$,由式(1)~式(4)可计算出光子晶体各层介质的吸收对光子晶体透射谱的影响。

3　无吸收时对称结构光子晶体的透射能带谱

当各层介质无吸收(即 $k=0$)时,取 $m=3\sim7$,则通过 MATLAB 编程计算模拟,可得光子晶体 $(ABCB)_m(BCBA)_m$ 的透射谱如图 1 所示。

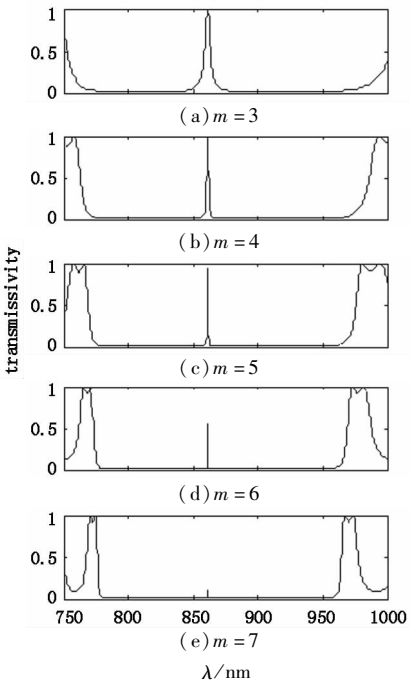

图 1　无吸收光子晶体($(ABCB)_m(BCBA)_m$)的透射谱

Fig. 1　transmission spectrum for photonic crystals ($(ABCB)_m(BCBA)_m$) without absorption

从图 1 可见,随着光子晶体重复周期数 m 的增大,透射能带谱中逐渐形成完整的禁带,且禁带中心都出现透射率为 100% 的单条透射峰。当周期数 m 从 3 增大到 5 时,禁带中心的透射带趋于精细,形成锋锐的窄带透射峰,且透射峰的透射率为 100%,如图 1(c)所示。若 m 继续增大,即 m 大于 5 时,禁带中心透射峰的透射率开始逐渐下降,当 $m=7$ 时禁带中心透射峰的透射率降为 20% 左右,如图 1(e)所示。很明显,$m=5$ 时的透射峰的频带最窄,且透射率也最高,在光子晶体实验设计上,可作为最佳周期数取值。禁带中心出现单条透射峰,是镜像对称结构一维光子晶体的透射谱特征之一[6,12]。

4 吸收对光子晶体透射谱的影响

为研究吸收对镜像对称一维光子晶体透射谱的影响,可固定光子晶体在最佳重复周期数 $m=5$,然后在各介质层分别或同时引入吸收情况下,分别模拟出相应的光子晶体透射能带谱,具体如下。为了便于研究,下面取吸收系 $k_A=k_B=k_C=k$。

4.1 A 介质具有吸收对晶体透射谱的影响

当 A 介质层引入吸收后,其中折射率为复折射率 $\hat{n}_A=n_A(1+ik)$,在其他参数不变的情况下,计算模拟出 A 层介质吸收对透射谱的影响,如图 2 所示。

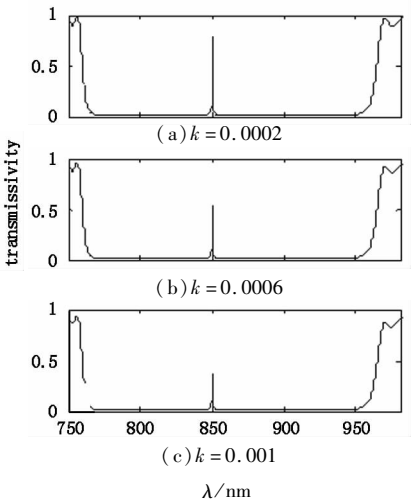

图 2 A 介质具有吸收光子晶体((ABCB)$_5$(BCBA)$_5$)的透射谱

Fig. 2 transmission spectrum for photonic crystals ((ABCB)$_5$(BCBA)$_5$) with absorption of A medium

由图 2 可以看到,当吸收系数 $k=0.0002$ 时,主禁带内透射峰的透射率降到 0.80 左右,而透射峰的宽度变化不明显,如图 2(a)所示。当 $k=0.0006$ 时,主禁带内透射峰的透射率降到 0.54 左右,主禁带两则通带的透射率无明显变化,如图 2(b)所示。当 $k=0.001$ 时,禁带内透射峰的透射率降到 0.39 左右,主禁带两则的通带透射率也没有明显变化,如图 2(c)所示。因此,当 A 介质存在吸收时,透射峰的宽度与无吸收时比较变化不明显,主禁带内透射峰的透射率随着吸收系数 k 的增大逐渐下降,而主禁带两则的通带透射率及禁带宽度随着 k 的增大变化不明显。

4.2 B 介质具有吸收对晶体透射谱的影响

在其他参数不变的情况下,B 介质层引入吸收,其折射率为 $\hat{n}_B=n_B(1+ik)$,则 B 吸收对光子晶体透射谱的影响如图 3 所示。

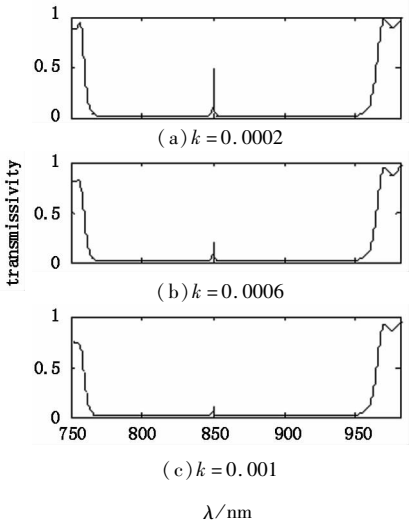

图 3 B 介质具有吸收光子晶体((ABCB)$_5$(BCBA)$_5$)的透射谱

Fig. 3 transmission spectrum for photonic crystals ((ABCB)$_5$(BCBA)$_5$) with absorption of B medium

由图 3 可以看到,当吸收系数 $k=0.0002$ 时,主禁带内透射峰的透射率迅速降到 0.48 左右,主禁带左侧透射带的透射率有下降趋势,而主禁带中透射峰的宽度也无明显变化,如图 2(a)所示。当 $k=0.0006$ 时,主禁带内透射峰的透射率降到约为 0.19,主禁带两则的通带透射率开始下降,如图 2(b)所示。当 $k=0.001$ 时,禁带内透射峰的透射率趋于 0,但主禁带两侧的通带透射率变化不明显,如图 2(c)所示。可见,当 B 介质存在吸收时,光子晶体主禁带内透射峰的透射率随着吸收系数 k 的增大迅速下降,表明光子晶体的光传输特性对 B 层介质的吸收反应很灵敏。

4.3 C 介质具有吸收对晶体透射谱的影响

当 C 介质层存在吸收时,吸收对光子晶体的光传输特性影响如图 4 所示。

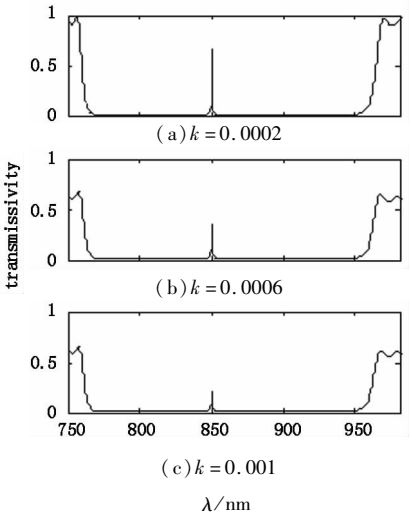

图 4　C 介质具有吸收光子晶体
((ABCB)$_5$(BCBA)$_5$)的透射谱

Fig. 4　transmission spectrum for photonic crystals
((ABCB)$_5$(BCBA)$_5$) with absorption of C medium

从图 4 可见,当吸收系数 $k = 0.0002$ 时,主禁带内透射峰的透射率降为 0.67 左右,如图 4(a)所示。当 $k = 0.0006$ 时,主禁带内透射峰的透射率降到 0.36 左右,而且主禁带两侧的通带透射率明显下降,如图 4(b)所示。当 $k = 0.001$ 时,禁带内透射峰的透射率降到约为 0.23,主禁带两侧的通带透射率变化不再明显,如图 4(c)所示。

比较图 2、图 3 和图 4 可知,单层介质存在吸收时,B 层介质吸收对光子晶体光传输特性影响最明显,C 介质的吸收的影响次之,A 层吸收的影响相对最弱,但 C 层介质的吸收对主禁带的影响则是最明显的,相对而言,A 层的吸收对主禁带的影响不明显。因为,随着各层介质吸收系数的相同变化,图 3 中的透射峰透射率下降速度最快,图 4 禁带两侧的透射带的透射率下降最明显,而图 2 中透射峰及禁带两侧透射带的透射率下降速度相对最慢。

4.3　A,B,C 介质同时具有吸收对晶体透射谱的影响

当 A,B 和 C 各层介质都存在吸收时,各介质层的折射率全部为复折射率,则吸收对光子晶体透射谱的影响结果如图 5 所示。

由图 5 可以看到,当吸收系数 $k = 0.0002$ 时,主禁带内透射峰的透射率急剧降到 0.32 左右,主禁带两侧的通带透射率开始下降,而透射峰宽度也无明显变化,如图 5(a)所示。当 $k = 0.0006$ 时,主禁带内透射峰的透射率迅速趋于 0,主禁带两侧通带的透射率明显下降,如图 5(b)所示。当 $k = 0.001$ 时,呈现不完整禁带的趋势,如图 5(c)所示。

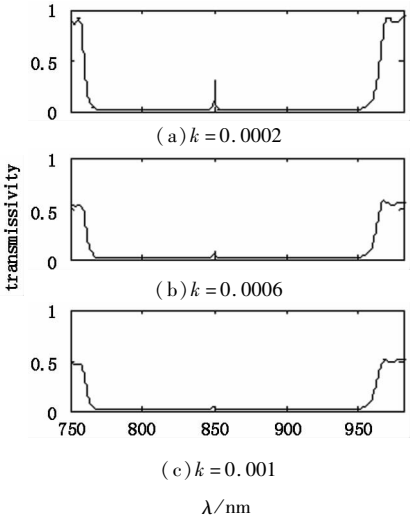

图 5　A,B,C 介质具有吸收光子晶体
((ABCB)$_5$(BCBA)$_5$)的透射谱

Fig. 5　transmission spectrum for photonic crystals
((ABCB)$_5$(BCBA)$_5$) with absorption of A,B and C medium

比较图 2、图 3、图 4 和图 5 可知,当 A,B,C 各层介质同时存在吸收时,光子晶体主禁带中透射峰的透射率随着吸收系数增加而快速下降,且下降的速度比任何单层介质存在吸收时的快。因此,根据吸收对镜像对称结构一维光子晶体光传输特性的影响规律,在实验制备样品时,可以针对性地对各层介质的吸收采取相应的措施,达到减少吸收对透射的影响,反而言之,当想获得一定的光透射衰减时,可以在相应的介质层中掺入一定比例的吸收杂质,从而获取实际所需的光子晶体透射率。

5　结　论

针对镜像对称结构一维光子晶体,用传输矩阵法理论计算研究了介质吸收对其传输特性的影响,并通过对比分析得出:各层介质的吸收对镜像对称结构光子晶体透射特性的影响程度不一样,个别介质层影响大些,各层同时存在吸收时影响最大。同时,吸收对光子晶体主禁带的影响与对透射峰的影响相似,某些介质层的吸收对禁带影响大,各层同时吸收时影响也是最明显的。

镜像对称结构一维光子晶体对介质吸收所表现出的这种特性和规律,为光子晶体制备不同光透射强度的光学器件提供理论参考,同时对光子晶体的理论研究也有一定的参考价值。

参考文献:

[1]　E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and elect ronics[J]. Phys. Rev. Lett. ,1987, 58(20):2059 - 2062.

[2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super-lattices[J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(23):2486 – 2489.

[3] Su An. Transmission spectrum of one-dimensional photonic crystal for realizing high-performance optical transmission function[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6):1101 – 1106. (in Chinese)
苏安. 实现高效光传输功能的一维光子晶体透射谱[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6):1101 – 1106.

[4] Hu Li. Absorption property of doing on the polarization wave of defect mode of positive-negative photonic crystal [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(10):1101 – 1105. (in Chinese)
胡莉. 含负折射率光子晶体缺陷模偏振态的吸收特性[J]. 激光与红外, 2010, 40(10):1101 – 1105.

[5] Su An, Li Xianji. Defect modes of one-dimensional photonic crystal for realizable multiple channeled filter[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(5):0532 – 0536. (in Chinese)
苏安, 李现基. 实现多种通道滤波功能的一维光子晶体缺陷模[J]. 激光与红外, 2010, 40(5):0532 – 0536.

[6] Du Guiqiang, Liu Nianhua. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(4):1905 – 1908. (in Chinese)
杜桂强, 刘念华. 具有镜像对称结构的一维光子晶体的透射谱[J]. 物理学报, 2004, 53(4):1905 – 1908.

[7] Li Zhenghua, Shen Tingen, Zheng Hao, et al. Study on the optical gain of photonic crystals fiber with active impurity [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2006, 12(2): 113 – 119. (in Chinese)
李正华, 沈廷根, 郑浩, 等. 掺杂光子晶体光纤自发辐射与掺杂激活杂质的光增益透射谱研究[J]. 量子光学学报, 2006, 12(2):113 – 119.

[8] Tang Jun, Yang Huajun, Xu Quan, et al. Analysis of the transfer characteristics of one-dimensional photonic crystal and its application with transfer matrix method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 39(1):76 – 80. (in Chinese)
唐军, 杨华军, 徐权, 等. 传输矩阵法分析一维光子晶体传输特性及其应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 39(1):76 – 80.

[9] Max Born, Emil Wolf. Principles of optics[M]. 7th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2005:615 – 617. (in Chinese)
马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 7版. 北京: 电子工业出版社, 2005:615 – 617.

[10] Qiao Feng, Zhang Chun, Wan Jun, et al. Photonic quantnm-well structures: multiple channeled filtering phenomena[J]. Appl Phys Lett, 2000, 77(23):3698 – 3700.

[11] Liu Qineng. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6):777 – 780. (in Chinese)
刘启能. 杂质吸收对一维光子晶体缺陷模的影响[J]. 中国激光, 2007, 34(6):777 – 780.

[12] Zhang Zhengren, Long Zheangwen, Yuan Yuqun, et al. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(1):587 – 591. (in Chinese)
张正仁, 隆正文, 袁玉群, 等. 对称型单负交替一维光子晶体的能带结构[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 587 – 591.