

镜像对称一维光子晶体带隙特征

白改艳 冯志芳*

(北京化工大学 理学院, 北京 100029)

摘要: 为了研究一维镜像对称光子晶体的传输特性,用特征矩阵法计算了其透射谱。由观察透射谱可以发现缺陷模的位置会随着介质的光学厚度和折射率的增加都往长波方向移动,缺陷模的数量会随着缺陷位置与对称轴的距离增加而逐渐由 2 个减为 1 个,说明光子晶体的带隙与它的光学厚度的大小和折射率的大小以及缺陷模与对称轴的位置都有密切的关系。

关键词: 光子晶体; 一维; 镜像对称; 晶体缺陷

中图分类号: O451

引言

光子晶体概念是 1987 年提出的^[1-2],由于其潜在的应用价值,人们对其进行了广泛的理论模拟和实验研究。本文研究的光子晶体指介电常数周期性变化的人造晶体,当光通过光子晶体时,某些频率范围内的光会受到抑制,形成光子禁带^[3],这一禁带的形成类似于半导体材料中电子的能带结构^[4-5],从而被广泛应用于制作各种光子器件,例如光波导^[6]。电子能带结构是由于周期性势场的存在,而光子晶体能带的出现是由于介电常数周期性调节作用。光子晶体除具有光子禁带以外,还具有各种缺陷态,如点缺陷,线缺陷,面缺陷等^[7]。通过在晶体中引入各种缺陷或者缺陷组合,可以制作各种类型的光集成器件,如任意角度弯曲的波导,通道下载滤波器,波分复用器等^[8-9]。

有关一维光子晶体中缺陷的研究已经存在大量的理论和实验研究^[3-13],主要是通过改变周期结构中某一层或两层介质的厚度或者折射率的方式引入缺陷,这种方式引入的缺陷,随意性比较强,缺少一定的规律性。而当引入缺陷具有一定的规律性时,对缺陷形成的本质及其变化规律还有待进一步探讨。有关镜像对称的一维光子晶体也有相关的报

道^[9-10],但由于其选取镜像对称位置的特殊性,即在对称位置两侧放置同种厚度的介质,形成镜像缺陷层结构,使得带隙中出现的透射峰实际是由于镜像对称位置引入的缺陷形成的^[11]。

本文采用不同的镜像对称法,即对称位置选在某一介质的中心位置,这样可以有效地消除镜像缺陷层引入的缺陷模。针对两种不同对称变化研究了一维光子晶体的传输特性。

1 一维光子晶体特征矩阵的理论基础

图 1 是简单的一维光子晶体结构示意图,它是由折射率和厚度不同的两种介质 A 和 B 交替排列形成的,排列方式为 $(AB)_n(ABA)(BA)_n$ 。设波从左侧以一定的角度 θ 入射。

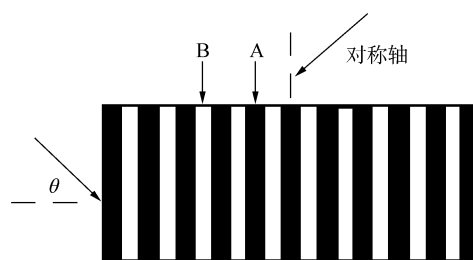


图 1 一维镜像对称光子晶体结构示意图

Fig. 1 Structure of the one-dimensional photonic crystal

一维光子晶体中光的传播可以用 Maxwell 方程及相应的边界条件决定,应用特征矩阵法^[12-13],对 TE 波,单介质层的特征矩阵可写成为

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

收稿日期: 2009-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(10704006);北京化工大学青年博士基金(2007)

第一作者: 女,1986 年生,硕士生

* 通讯联系人

E-mail: fengzf@mail.buct.edu.cn

其中 $\delta_j = 2\pi n_j h_j \cos\theta_j / \lambda$ (2)

$$\eta_j = \sqrt{\varepsilon_j / \mu_j} \cos\theta_j \quad (3)$$

对于一维光子晶体,当晶体包含 N 层介质时,整个晶体系统的特征矩阵 M 可以由各个介质的特征矩阵 M_j 的连乘求得

$$M = \prod_{j=1}^N M_j = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过矩阵 M 可得出晶体的透射系数 t 和透过率 T , 计算表达式如下

$$t = 2\eta_0 / (A\eta_0 + B\eta_0^2 + C + D\eta_0) \quad (5)$$

$$T = |t|^2 \quad (6)$$

上述模型结构的两侧均为空气,故 $\eta_0 = \eta_b$ 。

2 厚度镜像对称变化对透射谱的影响

2.1 标准周期光子晶体的禁带

图 1 所示晶体的结构参数如下: $n_a = 2.5$, $n_b = 1.2$, $a = 60 \text{ nm}$, $b = 150 \text{ nm}$, $n = 5$ 。运用特征矩阵方法,将这些参数代入(1)至(6)式模拟计算了波垂直晶体入射时的透射谱,结果如图 2 所示。

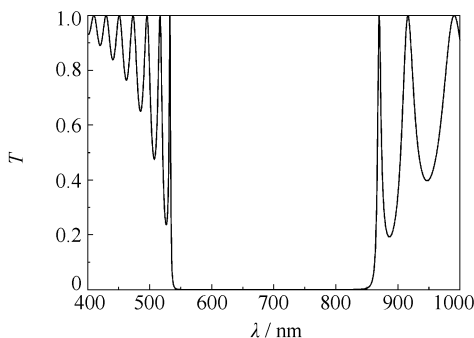


图 2 一维光子晶体透射谱

Fig. 2 Transmission of the one-dimensional photonic crystal

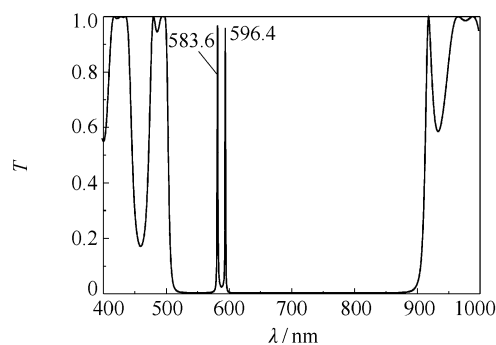
可看出,在波长为 535 ~ 865 nm 的范围,光子晶体具有很好的光子禁带。大量的研究已经证明^[3-9],缺陷模的存在对于用光子晶体制作超窄带滤波特性的滤波器、宽带阻波器等有重要的意义。一维光子晶体中缺陷的引入通常是改变某一层的光学厚度或折射率、或掺杂、或加入高折射率介质等。

针对镜像对称结构的特殊性,对其中两种缺陷模式分别进行了理论模拟。对于光学厚度的改变,从两个方面进行理论模拟。

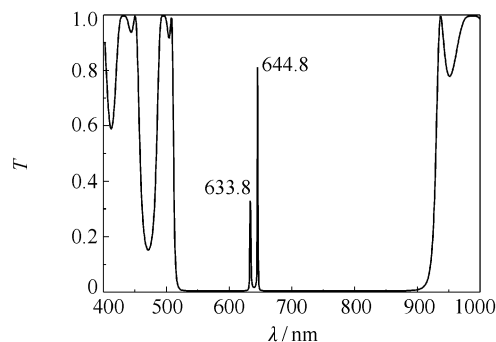
2.2 固定缺陷位置,逐渐增加介质 A 的厚度

在 $n = 2$ 的位置改变介质 A 的厚度,改变量分别为 40, 60 和 80 nm,如图 3 所示。

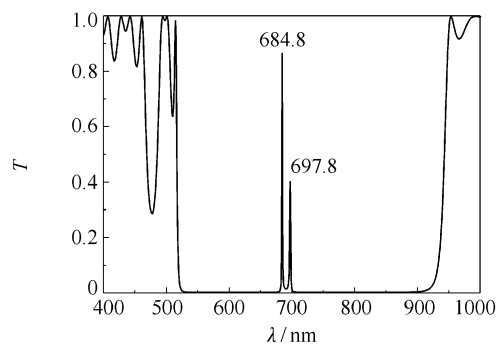
从图 3 中可看出,在带隙中始终存在两个窄的



(a) $h = 40 \text{ nm}$



(b) $h = 60 \text{ nm}$



(c) $h = 80 \text{ nm}$

图 3 透射谱随着 $n = 2$ 位置处介质 A 厚度的改变量 h 的变化

Fig. 3 Change in the thickness of A for $n = 2$

缺陷模,介质 A 的厚度增加使晶体整体增厚,光入射后的光程增长使形成的缺陷模会随着介质 A 厚度的增加而整体向长波方向移动,这种缺陷模的出现可以用来制作双频道滤波。

对于缺陷模位置随厚度变化的模拟发现随着厚度的增加,缺陷模逐渐向长波方向移动,且他们之间的变化近似于线性变化,如图 4 所示。

2.3 介质 A 厚度的改变量相同,但引入缺陷的位置逐渐远离对称轴

研究了 n 分别为 1, 2, 3 时,介质 A 的厚度改变相同时缺陷模的情况如图 5 所示。

在这些位置,介质 A 的厚度均增加 40 nm,当

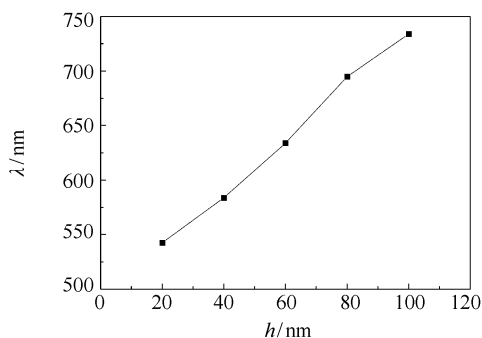


图 4 厚度改变量 h 与透射峰波长 λ 的相关性
Fig. 4 Relationship between change in thickness h and wavelength of the defect mode.

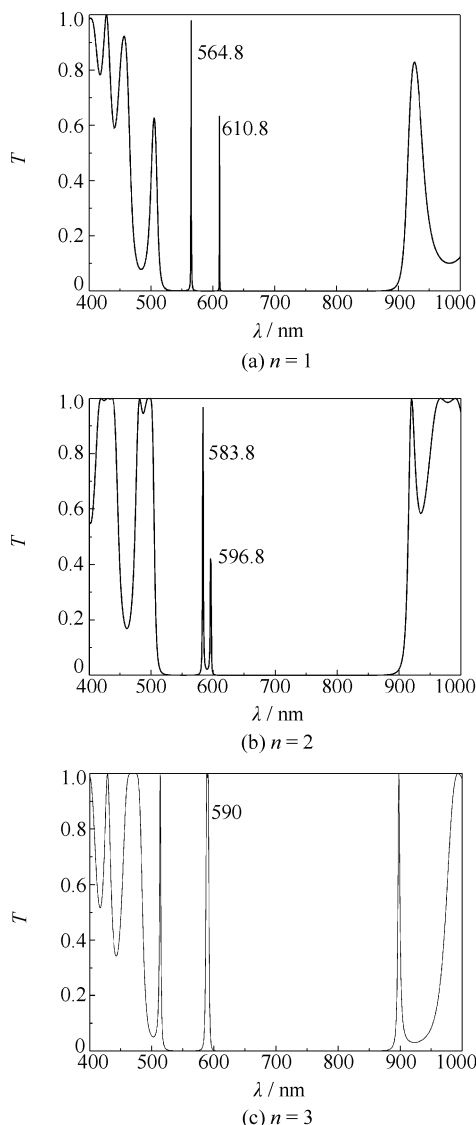


图 5 介质 A 厚度改变量 h 为 40 nm, 介质位置为 n

Fig. 5 Changes in of the thickness for $A = 40$ nm

$n = 1$ 时, 带隙中存在两个缺陷模, 对应的波长分别

为 564.8 和 610.8 nm; 当 $n = 2$ 时, 两缺陷模相互靠近, 波长分别为 583.8 和 596.8 nm; 而 $n = 3$ 时, 缺陷模彼此交叠, 形成了较宽的通带。

通过模拟可以知道, 出现的缺陷模的个数和位置除了与引入缺陷的位置和介质厚度的改变量都有关。当厚度的改变量相同而缺陷之间的距离较远时, 缺陷之间的耦合比较小, 所以带隙中只存在一个由镜像对称缺陷引起的缺陷模; 当缺陷之间的距离减小时, 缺陷之间的耦合增强, 在带隙中出现了两个缺陷模。对于同一位置处介质厚度改变不同时可以看出, 带隙中始终存在两个缺陷模, 一个是耦合模, 另一个是由缺陷的引入而产生的缺陷模。

3 折射率镜像变化对透射谱的影响

对折射率进行了类似厚度的变化: 首先考虑 $n = 2$ 位置处介质 A 折射率的改变。折射率的改变量分别 1.0, 1.5 和 2.0, 结果如图 6 所示。

可以看出, 当介质 A 的折射率改变时, 带隙中始终存在两个透射峰, 且缺陷模的位置会随着折射率的不断增加向长波方向移。

接着研究了 n 分别为 1, 2, 3 时, 介质 A 的厚度改变 1.5 时缺陷模的情况, 结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出, 随着缺陷位置远离对称中心, 透射峰对应的频率在发生变化, 且由原来的 2 个减少到 1 个。通过比较发现, 光学厚度变化和折射率改变得出的结果是完全相同的, 这也充分证明了理论结果的准确性。

4 结论

(1) 当某一层对称位置的光学厚度不断增加时, 带隙中始终存在两个缺陷模, 一个是缺陷本身产生的缺陷模, 另一个是耦合模, 且缺陷模会随着厚度的增加整体向长波方向移动; 当光学厚度改变相同, 而缺陷位置逐渐远离对称轴时, 缺陷模由原来的 2 个减少为 1 个。

(2) 当某一层对称位置的折射率不断增加时, 缺陷模会随着折射率的增加向长波方向移动; 当某一层折射率改变相同, 而缺陷位置逐渐远离对称轴时, 缺陷模由原来的 2 个减少为 1 个, 缺陷之间的耦合模消失。通过对镜像对称一维光子晶体带隙特性研究, 发现与一般的周期结构不同, 带隙中出现的缺陷模不完全是由介质光学厚度改变或者折射率改变引起的, 有可能还存在两个缺陷之间耦合的耦合模,

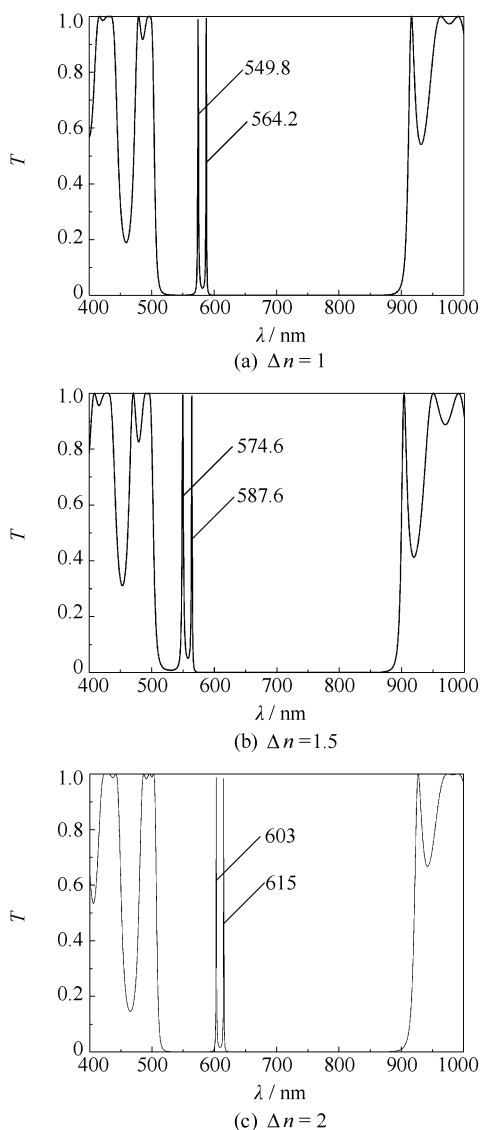


图6 $n=2$ 位置处介质 A 折射率改变量为 Δn
Fig. 6 Changes in the refractive index of A for $n=2$

耦合模会随着缺陷之间的距离增加而减弱甚至消失。这一规律的提出,可以为通道下载滤波载器结构的优化设计提供很好的理论指导。

参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059–2062.
- [2] John S. Strong localization of photon in certain disordered dielectric super lattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486–2489.
- [3] 顾国昌,李洪强,陈洪涛,等. 一维光子晶体材料中的光学传输特性[J]. 光学学报, 2000, 20(6): 728–734.

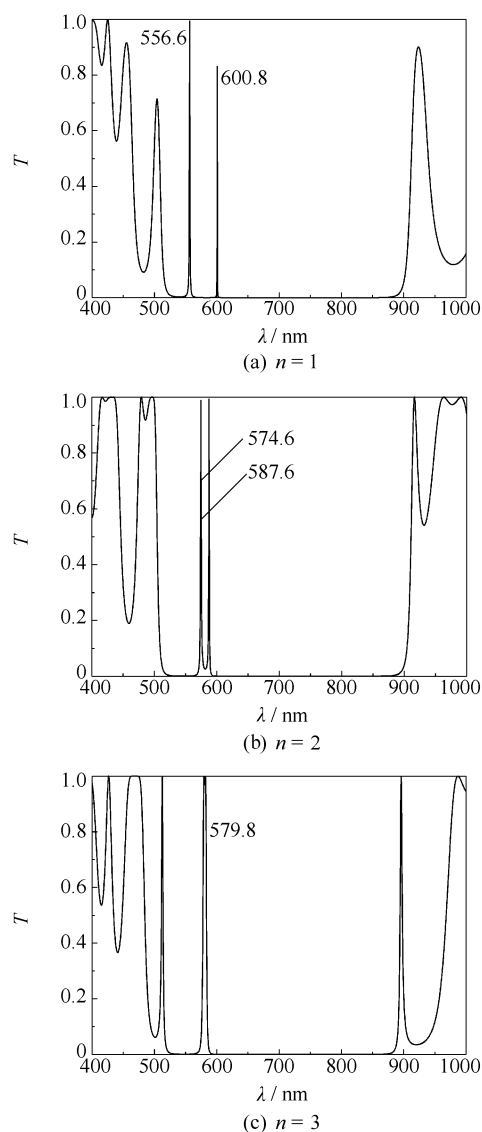


图7 介质 A 折射率改变量为 1.5
Fig. 7 Added value for refractive index of A is 1.5

- Gu G C, Li H Q, Chen H T, et al. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 728–734. (in Chinese)
- [4] 王旭东,刘芳,闫珂柱. 一维三元光子晶体的传输特性研究[J]. 光电子激光, 2004, 15(1): 104–107.
- Wang X D, Liu F, Yan K Z. Studies on the optical characteristics of 1D polybasic photonic crystal [J]. Optoelectronics Laser, 2004, 15(1): 104–107. (in Chinese).
- [5] 董海霞,江海涛,杨成全,等. 含双负缺陷的一维光子晶体耦合腔的杂质带特性[J]. 物理学报, 2006, 55(6): 2777–2780.
- Dong H X, Jiang H T, Yang C Q, et al. Properties of impurity band in one-dimensional photonic crystal coupled-resonator containing defect layers with negative re-

- fractive index[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(6): 2777–2780. (in Chinese)
- [6] 董建文, 陈溢杭, 汪河洲. 含奇异材料的掺杂一维光子晶体色散关系和空间局度理论[J]. *物理学报*, 2007, 56(1): 268–273.
- Dong J W, Chen Y H, Wang H Z. Dispersion and localization of defect state in one-dimensional photonic crystal consisting of metamaterial [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(1): 268–273. (in Chinese)
- [7] 方云团, 沈廷根, 谭锡林. 一维光子晶体掺杂缺陷模研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(11): 1557–1560.
- Fang Y T, Shen T G, Tan X L. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(11): 1557–1560. (in Chinese)
- [8] 欧阳征标, 李景镇, 张道中, 等. 多层光子晶体滤波器研究[J]. *光学学报*, 2002, 22(1): 80–84.
- Ouyang Z B, Li J Z, Zhang D Z, et al. Investigations on multi-layer photonic-crystal optical-filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(1): 80–84. (in Chinese)
- [9] 高英俊, 王玉玲, 陈华宁, 等. 镜像对称的光子晶体透射带特性[J]. *广西大学学报*, 2007, 32(4): 325–328.
- Gao Y J, Wang Y L, Chen H N, et al. Transmission band characteristics of photonic crystals with mirror symmetry[J]. *Journal of Guangxi University*, 2007, 32(4): 325–328. (in Chinese)
- [10] Chen Q, Allsopp D W E. One-dimensional coupled cavities photonic crystal filters with tapered Bragg mirrors [J]. *Optics Communications*, 2008, 281: 5771–5774.
- [11] Wang T B, Dong J W, Yin C P. Complete evanescent tunneling gaps in one-dimensional photonic crystals[J]. *Phys Lett A*, 2008, 373: 169–172.
- [12] 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.
- Wang H, Li Y P. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(11): 2172–2178. (in Chinese)
- [13] Uitham R, Hoenders B J. The electromagnetic Brillouin precursor in one-dimensional photonic crystals[J]. *Optics Communications*, 2008, 281: 5910–5918.

Band gap characteristics in a one-dimensional photonic crystal with mirror symmetry

BAI GaiYan FENG ZhiFang

(School of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to study the characteristics of the band gap of a photonic crystal, we deduce and summarize the transmission spectrum of a one-dimensional photonic crystal with mirror symmetry using characteristic matrix methods. The results show that band gap of a photonic crystal has a close correlation with its optical thickness and refractive index and the distance between the location of the defect mode and the symmetrical axis. The defect mode shows a regular shift to longer wavelength with increasing optical thickness or refractive index of the medium and the number of defect modes changes from two to one when the distance between the location of the defect mode and the symmetrical axis increases.

Key words: photonic crystals; one-dimensional; mirror symmetry; crystal defects