

文章编号:1001-5078(2009)07-0765-04

· 光学材料器件与薄膜 ·

正负交替一维掺杂光子晶体缺陷模的特性

胡莉, 刘启能

(重庆工商大学计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

摘要:利用光学特征矩阵方法,研究了在正负折射率交替一维光子晶体中掺入正折射率介质后缺陷模的相关特性。结果表明:当杂质层的光学厚度不变时,随着杂质层折射率的增加,缺陷模的半高宽度随之增加,分布在禁带中心两侧的缺陷模分别向临近的透射谱方向移动,并与透射谱形成连续的透射带;随着折射率的增加,透射带的透射率逐渐增加,其半高宽度逐渐减小;而当杂质层折射率不变时,随着杂质层的光学厚度增加,缺陷模向长波方向平移,同时缺陷模的个数也随之增加,而由缺陷模和透射谱连成的透射带的带宽逐渐减小。

关键词:光子晶体;负折射率材料;缺陷模

中图分类号:077 **文献标识码:**A

Defect mode of doped one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer

HU Li, LIU Qi-neng

(College of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Defect mode of doped one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer are studied by using transfer matrix method. It is found that the FWHM of defect mode and the transmissivity of the transmission band are increased with the increase of dope's refractive index when the optics thickness dose not change of dope's. That the number of defect mode is reduced and the FWHM of defect mode is decreased with the increase of the dope's optics thickness when the dope's refractive index is invariable.

Key words: photonic crystal; negative refractive index material; defect mode

1 引言

负折射率材料,又称左手材料。自从2000年Smith^[1]合成了介电常量和磁导率同时小于0的负折射率材料以来,负折射率材料在实验上取得了重大进展,从而成为近来理论和应用研究的热点之一。负折射率材料的奇异特性弥补了很多传统材料(正折射率材料或右手材料)的不足,如可以产生反向多普勒频移和逆切伦科夫效应等^[2]。

光子晶体^[3-4]是指介质的折射率按一定周期发生变化的人工材料。光在这类材料中传播时具有类似于电子在半导体材料中的行为,如在一定频率范围内的光不能在光子晶体中传播,即存在光子带隙。

利用光子晶体的这些性质可以有效地控制光的传播。因此,光子晶体被广泛应用于制作各种光学器件。另外,如果在光子晶体中引入缺陷,在光子带隙内将形成缺陷模。与缺陷模频率相对应的光将被局域在缺陷层附近,使得该处的光场得到极大地增强,从而导致在光子带隙内出现频率范围窄、透射率高的透射峰。含缺陷的一维光子晶体已被广泛应用于

基金项目:重庆市教委科技项目基金(No. KJ080720);教育部工程研究中心基金(No. 07011302)资助。

作者简介:胡莉(1978-),讲师,主要从事光子晶体理论研究。E-mail: huli@ctbu.edu.cn

收稿日期:2008-12-21

包括多通道滤波器在内的各种窄带通道滤波器^[5-7]。

正负折射率交替一维光子晶体具有一些传统光子晶体所不具备的特性,相关文献^[8-9]已经作了研究。下面利用特征矩阵法,研究了掺杂层介质折射率和光学厚度的变化对缺陷模的影响,为相关光学器件的设计提供理论参考。

2 掺杂正负交替一维光子晶体的物理模型与计算理论

本文研究的掺杂光子晶体结构如图1所示,杂质层C两边的光子晶体是由A,B周期性叠加组成,介质层A是折射率为 n_1 ($n_1 > 0$)、厚度为 d_1 的正折射率材料,介质层B是折射率为 n_2 ($n_2 < 0$)、厚度为 d_2 的负折射率材料。两介质层的光学厚度相等,即 $|n_1 d_1| = |n_2 d_2|$,复周期数为 N 。两个光子晶体中间是掺杂层C,其介质折射率和厚度分别为 n_c, d_c 。即其结构为 $(AB)^N C (BA)^N$ 。该一维掺杂光子晶体置于空气中。

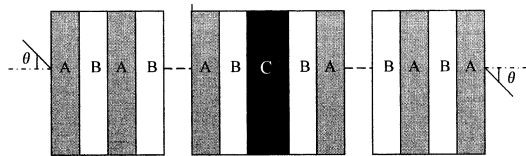


图1 正负交替一维掺杂光子晶体模型

根据薄膜光学理论^[10],光在每层介质中的传输特性可用一个 2×2 的特征矩阵表示,单层介质的特征矩阵为:

$$M_z = \begin{vmatrix} \cos\delta & -i \sin\delta/\eta \\ -i\eta \sin\delta & \cos\delta \end{vmatrix} \quad (1)$$

其中, $\delta = (2\pi\lambda)nd\cos\theta$,为介质层的相位厚度; θ 为入射光波与界面法线方向的夹角; λ 为入射光的波长; η 是介质层s偏振光和p偏振光的等效导纳 η_s 和 η_p ,为:

$$\eta = \begin{cases} \sigma n \cos\theta & (\text{s 偏振}) \\ \sigma n / \cos\theta & (\text{p 偏振}) \end{cases} \quad (2)$$

当 $\varepsilon > 0, \mu > 0$ 时, $n = \sqrt{\varepsilon\mu}, \sigma = 1$;当 $\varepsilon < 0, \mu < 0$ 时, $n = -\sqrt{\varepsilon\mu}, \sigma = -1$ 。

对于上述结构的正负交替一维掺杂光子晶体,可以逐层应用式(1),则整个具有对称结构的光子晶体的传输矩阵为:

$$M = \begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{vmatrix} = (M_A M_B)^N M_C (M_B M_A)^N \quad (3)$$

光子晶体的透射系数 t 为:

$$t = \frac{2n_0}{(M_{11} + M_{12}n_0)n_0 + (M_{21} + M_{22}n_0)} \quad (4)$$

其透射率 T 分别为:

$$T = |t|^2 \quad (5)$$

由式(1)~式(5)可以计算出正负交替一维掺杂光子晶体的特性。

3 正负交替一维掺杂光子晶体缺陷模的特性

对于图1所示的正负交替一维掺杂光子晶体,取光子晶体的光学厚度 $n_1 d_1 = -n_2 d_2 = \lambda_0$,正负折射率材料均为各向同性,无耗非磁非色散介质。其中, $n_1 = 2.0, n_2 = -2.4, \lambda_0 = 1550 \text{ nm}, N = 20$ 。光束垂直入射到光子晶体上,p偏振光和s偏振光传输矩阵相同。当正负折射率交替排列,没有掺杂层时,其透射谱如图2所示,在 λ_0/λ 为奇数处有很宽的禁带,而在 λ_0/λ 偶数处则有较窄的通带^[11],且通带的宽度随周期数的增加而减小。当掺入杂质后,各禁带内的特性相似,因此以下的分析以 λ_0/λ 在(0~2)区间为例说明。

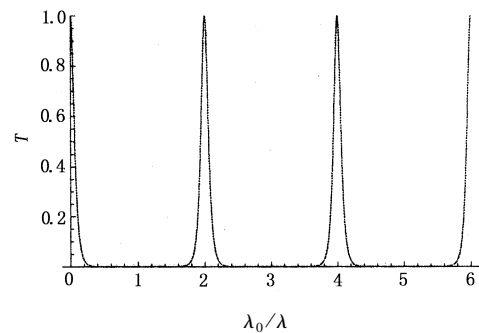


图2 正负交替一维光子晶体的透射谱

3.1 折射率 n_c 对缺陷模的影响

为了研究杂质层折射率对缺陷模的影响,由式(1)~式(5)进行数值模拟,得到光子晶体的透射率 T 随杂质层折射率 n_c 与入射光波长的变化关系,如图3所示。其中,杂质层的光学厚度不变,取 $n_c d_c = \lambda_0$ 。

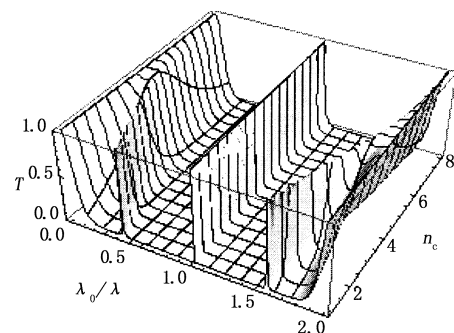


图3 透射率随杂质层折射率与入射波长变化的立体图

由图3可知,掺入光学厚度为 λ_0 的杂质层后,在禁带内出现三个缺陷模。其中,随着杂质层折射率 n_c 的增加,分布在禁带中心两侧的缺陷模分别向临近的透射谱方向移动,当 $n_c = 1.5$ 时,缺陷模与透

射谱重叠形成连续的透射带;随着 n_c 的逐渐增加,透射带的透射率逐渐增加,半高宽度逐渐减小。而无论 n_c 如何变化,禁带中心的缺陷模透射率始终为 1,但其半高宽度会随着 n_c 的增加而增加。

为了更清楚地反映杂质层折射率 n_c 对缺陷模的影响,分别取 $n_c = 1.0, 2.0, 4.0$ 作图 3 的切面图,得到透射率 T 随波长的变化曲线。如图 4 所示。

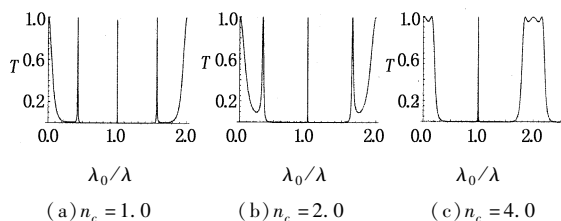


图 4 透射率随波长的变化曲线

由图 4 可知,当 $n_c = 1.0$ 时,禁带内三个透射率都为 1 的缺陷模;当 $n_c = 2.0$ 时,两侧的缺陷模已经和透射谱重叠形成透射带,但透射带内有些波长的透射率很低;而当 $n_c = 4.0$ 时,透射带的透射率大大提高,形成一个通带,随着折射率的进一步增加,通带的宽度逐渐减小,这种结构可以用于同时实现窄带滤波和宽带滤波。当 $n_c = 1.0, 2.0, 4.0$ 时,禁带中心缺陷模的半高宽度分别为 0.74 nm, 1.74 nm, 4.89 nm,即随着 n_c 的逐渐增加,其半高宽度逐渐增加。

3.2 杂质层的光学厚度 $n_c d_c$ 对缺陷模的影响

当杂质层的折射率确定时,由式(1)~式(5)可以计算得到光子晶体的透射率 T 随杂质层光学厚度 $n_c d_c$ 与入射光波长的变化关系,如图 5 所示。其中,杂质层的折射率不变,取 $n_c = 4.0$ 。

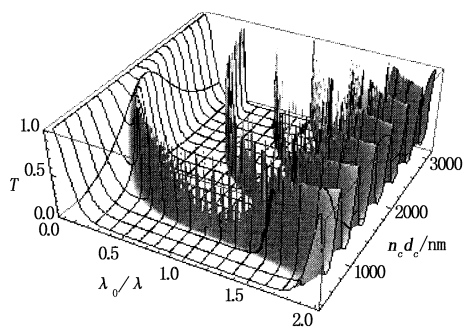


图 5 透射率随杂质层折射率与入射波长变化的立体图

由图 5 可知,杂质层的折射率不变时,随着光学厚度 $n_c d_c$ 的增加,缺陷模的个数不断增加,同时缺陷模向长波方向平移。

为了更清楚地反映杂质层光学厚度对缺陷模的影响,分别取 $n_c d_c = \lambda_0/2, \lambda_0, 5\lambda_0/4$ 作图 5 的切面图,得到透射率 T 随波长的变化曲线,如图 6 所示。

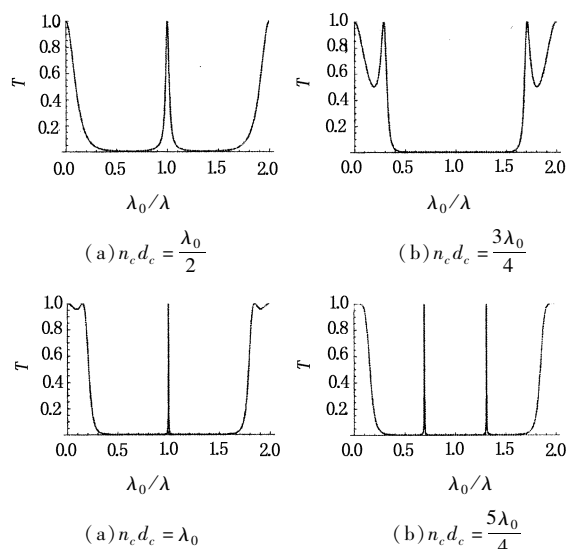


图 6 透射率随波长的变化曲线

由数值模拟可知,当杂质层光学厚度 $n_c d_c$ 为 $\lambda_0/4$ 时,禁带内没有缺陷,当 $n_c d_c$ 为 $\lambda_0/2$ 时,禁带内出现一个缺陷。随后, $n_c d_c$ 每增加 $\lambda_0/4$,其缺陷模增加一个,且缺陷模的透射率均为 1。由图 6 可知,当 $n_c d_c$ 为 $\lambda_0/4$ 的偶数倍时,在禁带中心处有缺陷模出现,而当 $n_c d_c$ 为 $\lambda_0/4$ 的奇数倍时,禁带中心没有缺陷模;同时缺陷模总是关于禁带中心对称分布;而随着 $n_c d_c$ 的增加,由缺陷模和透射谱连成的透射带的带宽逐渐减小。

4 结 论

利用光学传输矩阵方法,研究了在正负折射率交替一维光子晶体中掺入正折射率介质后缺陷模的相关特性。结果表明:当杂质层的光学厚度不变时,随着杂质层折射率的增加,缺陷模的半高宽度随之增加,分布在禁带中心两侧的缺陷模分别向临近的透射谱方向移动,并与透射谱形成连续的透射带;随着折射率的增加,透射带的透射率逐渐增加,其半高宽度逐渐减小。而当杂质层折射率不变时,随着杂质层的光学厚度增加,缺陷模向长波方向平移,同时缺陷模的个数也随之增加,而由缺陷模和透射谱连成的透射带的带宽逐渐减小。

正负折射率交替一维掺杂光子晶体的以上特性在光学器件的设计上有着非常重要的意义,可以为同时实现窄带滤波和宽带滤波双重滤波功能的滤波器、可调谐滤波器、多通道滤波器等的设计提供理论参考。

参考文献:

- [1] David R Smith, Norman Kroll. Negative refractive index in left-handed materials [J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85

- (14):2933-2936.
- [2] Xu Xuming, Fang Ligang, Liu Nianhua. Unusual photonic tunneling in multilayer system with a negative refraction index layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25 (12): 1676-1681. (in Chinese)
- [3] SAJEEV J. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58 (23): 2486-2489.
- [4] El Y. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58 (20): 2059-2061.
- [5] 许桂雯, 欧阳征标, 安鹤男, 等. 光子晶体缺陷模的带宽与品质因子研究 [J]. *光子学报*, 2003, 32 (9): 1079-1082.
- [6] 付灵丽, 陈慰宗, 郑新亮, 等. 入射角对光子晶体杂质模的调制 [J]. *激光杂志*, 2005, 26 (2): 22-25.
- [7] 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.
- [8] 张文富, 方强, 程益华, 等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器 [J]. *光学学报*, 2007, 27 (9): 1695-1699.
- [9] 罗仁华, 梁瑞生, 韦中超, 等. 对称型正负交替一维光子晶体超窄带滤波器 [J]. *激光与红外*, 2008, 38 (10): 1015-1018.
- [10] 波恩, E 沃耳夫. 光学原理 [M]. 北京: 北京科学出版社, 1978.
- [11] Yin Cheng-ping, Liu Nian-hua. Transmission properties of one-dimensional photonic crystals containing negative refraction materials [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2005, 26 (2): 173-177. (in Chinese)