

文章编号: 1672 - 058X(2009)01 - 0076 - 04

吸收对对称性一维三元光子晶体能带的影响

胡 莉

(重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

摘 要:利用复折射率及传输矩阵理论,研究了光子晶体的吸收对对称性一维三元光子晶体能带及透射峰的影响,研究表明:在反射波中,禁带的反射率随消光系数的增加而迅速降低,当 k 增加到 0.005 时,禁带边缘模糊,不存在明显的禁带;在透射波中,随着消光系数的增大,禁带边缘逐渐模糊,当 k 增加为 0.003 时,透射率降为 0.35;光子晶体的消光系数对禁带内透射峰的透射率有着明显的影响,当 k 为 0.001 时,透射率下降到 0.15,随着消光系数的增加,透射峰的半峰全宽随之增加,但对透射峰的中心波长没有影响。

关键词:光子晶体;特征矩阵;消光系数;能带

中图分类号: O 436

文献标识码: A

自 1987 年分别由 S John^[1]和 E Yablonovitch^[2]提出光子晶体的概念以来,由于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,这一特点使得光子晶体在光电子和光通信中有着重要的应用价值^[3]。一维光子晶体由于其具有简单的多层介质膜结构,可以用传统的镀膜工艺加工完成,应用前景非常广泛。目前,在对一维光子晶体的众多研究中^[4-7],通常都把构成光子晶体的材料作为完全透明的材料在处理,而实际构成光子晶体的材料对光都具有一定的吸收作用,这种吸收作用必然对一维光子晶体的反射率和透射率产生极大的影响。因此,为了使光子晶体的理论研究对光子晶体的实际应用更具有指导意义,必须考虑光子晶体材料的吸收这一重要因素。对称结构的光子晶体在其主禁带内有极窄的透射带,与在对称结构光子晶体中引入一定尺寸范围的缺陷层有相似的效果。在处理光子晶体的吸收时引入复折射率的概念,同时结合特征矩阵法,对一种具有对称结构的一维三元光子晶体进行了理论分析和数值计算,研究了光子晶体材料的衰减指数 k 对对称性一维三元光子晶体的禁带及禁带内的透射峰的影响。

1 对称结构一维三元光子晶体能带的理论计算

设计一种具有对称结构的一维三元光子晶体,有 A、B、C 3 种具有吸收性的介质交替排列构成,如图 1 所示。其厚度分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 。此一维三元光子晶体的结构为 $(ABC)^N (CBA)^N$,置于空气中。在此研究光垂直入射的情况,不区分 TE 波和 TM 波。

根据薄膜光学理论,介质层与光波的相互作用可由其特征矩阵完全决定^[8]。

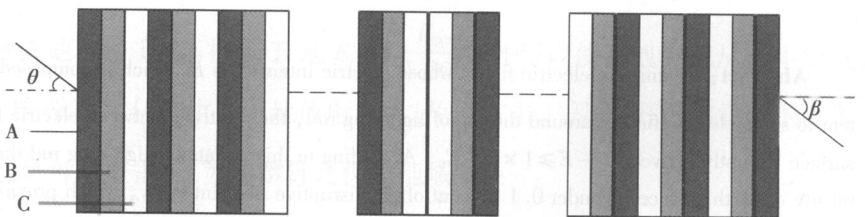


图 1 对称结构的一维三元光子晶体模型

收稿日期: 2008 - 11 - 16;修回日期: 2008 - 12 - 12。

基金项目:重庆市教委科技项目基金(KJ080720)。

作者简介:胡莉(1978-),女,重庆垫江人,讲师,从事光电子技术研究。

单层介质的特征矩阵为：

$$M_z = \begin{vmatrix} \cos & -i \sin / p \\ -i p \sin & \cos \end{vmatrix} \tag{1}$$

其中 $\theta = (2 /) n d \cos$, $p = n \cos$, 为光波的入射角。

对于对称结构的一维三元光子晶体,可以逐层应用式 (1),进而可写出一段 A、B、C 层介质特征矩阵为：

$$M = M_1 (A) M_2 (B) M_3 (C) \tag{2}$$

一段 C、B、A 层介质特征矩阵为：

$$M = M_1 (C) M_2 (B) M_3 (A) \tag{3}$$

则整个具有对称结构的光子晶体的传输矩阵为：

$$M = \begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{vmatrix} = (M)^N (M)^N \tag{4}$$

光子晶体对光波的反射系数 r 和透射系数 t 为：

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12} n_0) n_0 - (M_{21} + M_{22} n_0)}{(M_{11} + M_{12} n_0) n_0 + (M_{21} + M_{22} n_0)} \tag{5}$$

$$t = \frac{2 n_0}{(M_{11} + M_{12} n_0) n_0 + (M_{21} + M_{22} n_0)} \tag{6}$$

其反射率 R 和透射率 T 分别为：

$$R = |r|^2, T = |t|^2 \tag{7}$$

2 光在吸收介质中传播的处理方法

对于具有吸收的介质,为了同时描述其对光波的折射和吸收,需要引入复折射率 \hat{n} 和复波数 \hat{k} 的概念：

$$\hat{n} = n(1 + ik), \hat{k} = \frac{\omega}{c} \hat{n} \tag{8}$$

式 (8) 中, n 为介质的折射率,描述其对光波的折射, k 为介质的消光系数,描述其对光波的吸收, c 为真空中的光速, ω 为光的圆频率,在处理吸收介质中光的传播问题时,只需将透明介质对应的公式中的折射率 n 换为复折射率 \hat{n} ,波数 k 换为复数波 \hat{k} 就可以解决问题了^[9]。设 A 的复折射率 $\hat{n}_1 = n_1 (1 + ik_1)$,材料 B 的复折射率 $\hat{n}_2 = n_2 (1 + ik_2)$,材料 C 的复折射率 $\hat{n}_3 = n_3 (1 + ik_3)$,由式 (1) ~ (7) 可计算出光子晶体材料的吸收对光子晶体主禁带及禁带内透射谱的影响。

3 吸收对光子晶体主禁带及禁带内透射谱的影响

在数值计算中,取 $n_1 = 1.378, d_1 = 100 \text{ nm}, n_2 = 2.356, d_2 = 200 \text{ nm}, n_3 = 4.100, d_3 = 400 \text{ nm}, n_0 = 1.000, N = 5$,为了便于分析,取 $k_1 = k_2 = k_3 = k_0$ 。

3.1 消光系数对主禁带的影响

为了清楚地反映消光系数对晶体能带的影响,由式 (1) ~ (7) 计算出一维三元光子晶体的反射率 R 和透射率 T 随光子晶体的消光系数与入射光波长变化的关系。分别取 $k = 0$ (无吸收), $k = 0.001, k = 0.003$,得到反射率 R 和透射率 T 随入射波长的响应曲线,如图 2 和图 3。由图 2 可知:一维三元光子晶体的禁带在波长为 $2.010 \sim 2.600 \text{ nm}$ 之间,当 $k = 0$ 时,禁带的顶部平整,其反射率为 1,禁带边缘明显,且反射率为 0。当 $k = 0.001$ 时,禁带的顶部下降且不再平整,同时顶部变窄,反射率降为 0.9,其边缘的反射率不为零。当 $k = 0.003$ 时,禁带的顶部进一步下降并变斜变窄,其反射率下降为 0.8 左右,禁带边缘的反射率进一步增加。

由图 3 可知:在透射波中,当 $k = 0$ 时,禁带在波长为 $2.010 \sim 2.600 \text{ nm}$ 之间,禁带的底部平整,透射率为

0,禁带的边缘明显,透射率为 1。当 $k=0.001$ 时,禁带边缘降低,透射率变为 0.7。当 $k=0.003$ 时,禁带边缘进一步降低并变缓,透射率降为 0.35,禁带边缘模糊。

由图 2和图 3可以看出,在一元三维光子晶体中,介质的吸收对反射波和透射波的影响都很大,其中对透射波的影响更为强烈。

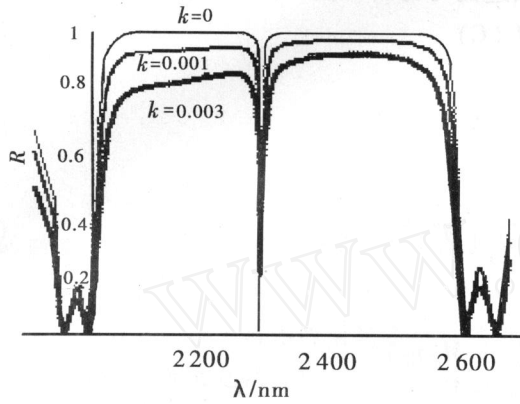


图 2 反射率随波长的响应曲线

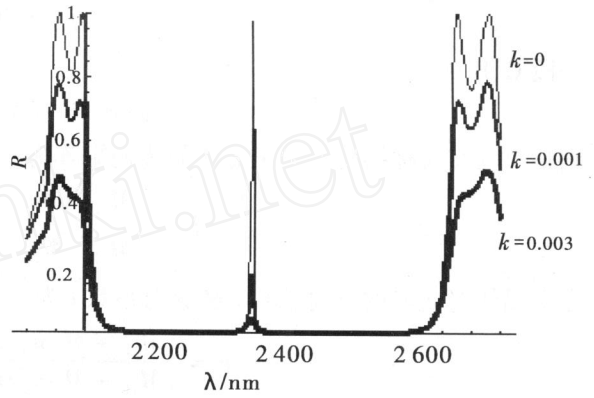


图 3 透射率随波长的响应曲线

3.2 消光系数对禁带内透射峰的影响

为了清楚地研究消光系数对透射谱的影响,下面计算了透射峰的透射率 T 随消光系数和入射光波长变化的立体图,如图 4所示。在波长为 2280 nm 处有一透射峰,其透射率随消光系数发生显著的变化。当 $k=0$ 时,透射峰的峰值为 0.968,当 $k=0.006$ 时,透射峰基本消失。

取波长为 2280 nm,得到透射峰的峰值随消光系数的变化曲线,如图 5所示。当 $k=0.001$ 时,透射峰迅速降为 0.15,当 k 为 0.006 时,透射峰基本消失。

分别取 $k=0, k=0.001, k=0.003$,得到透射峰的宽度随入射波长的响应曲线,如图 6所示。半峰全宽随 k 值的增加而增加,而透射峰的中心波长不变。

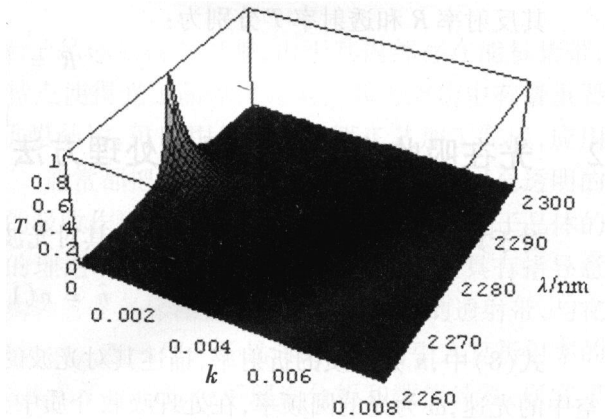


图 4 透射率随消光系数及波长变化的立体图

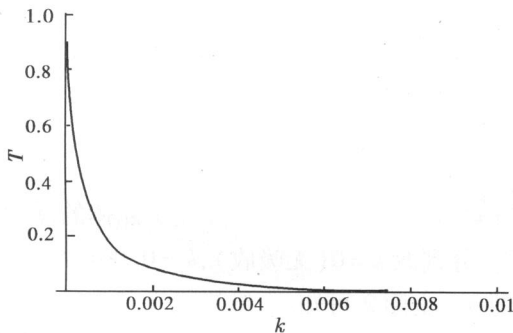


图 5 透射率随消光系数变化曲线

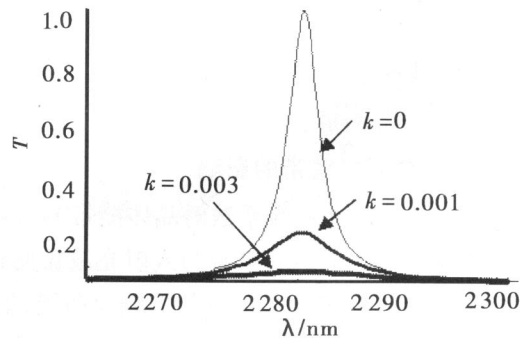


图 6 透射波的宽度随入射波长变化曲线

4 结 论

在此利用复折射率及传输矩阵理论,通过数值计算分析了消光系数对对称性一维三元光子晶体能带及透射峰的影响。光子晶体的消光系数对一维三元光子晶体的反射率和透射率有明显的影响,其中对透射率的影响更为强烈。在反射波中,禁带的反射率随消光系数的增加而迅速降低,当 k 增加到 0.005 时,禁带边缘模糊,不存在明显的禁带。在透射波中,随着消光系数的增大,禁带边缘逐渐模糊,当 $k=0.003$ 时,透射率降为 0.35;光子晶体的消光系数对透射峰的透射率有着明显的影响,当 k 为 0.001 时,透射率下降到 0.15,随着消光系数的增加,透射峰的半峰全宽随之增加,但对透射峰的中心波长没有影响。

由于介质吸收对光子晶体的禁带及禁带中透射峰均有着显著的影响,因此在利用这种对称性一维三元光子晶体设计滤波器时,必须考虑介质吸收这一重要因素,在选择相应的光子晶体材料时,应尽可能选择消光系数小的材料。

参考文献:

- [1] SAJEEV J. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486 - 2489
- [2] E I Y. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059 - 2061
- [3] 张玉萍,张会云. 超窄带和多通道窄带光子晶体滤波器[J]. 量子光学学报, 2004, 10(4): 173 - 175
- [4] 刘启能. 一维光子晶体禁带的全貌结构[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 65 - 68
- [5] 龚益玲,许震宇. 一维光子晶体的禁带的分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2004, 32(7): 720 - 723
- [6] 王旭东. 一维三元光子晶体的输特性研究[J]. 光电子·激光, 2004, 15(1): 104 - 107
- [7] 陈慰宗. 一维光子晶体禁带的特点及增宽[J]. 西北大学学报:自然科学版, 2002, 32(6): 625
- [8] 沃恩. E沃耳夫光学原理[M]. 北京:科学出版社, 1978
- [9] 刘启能. 吸收对光子晶体能带结构的影响[J]. 激光与红外, 2007, 37(6): 543 - 545

The influence of adsorption on one - dimensional triple - sects photonic crystal band symmetrical structure

HU L i

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

Abstract: Computer refractive index and transfer matrix theory are used to study the influence of adsorption on one - dimensional triple - sects photonic crystal with symmetry and transmission peak. The results show that, in reflected wave, the reflectivity of forbidden band decreases with the increase of extinction coefficient, when k increases to 0.005, the border of forbidden band is vague and there is no obvious forbidden band, in transmission wave, with the increases of extinction coefficient, the border of forbidden band is gradually vague, when k increases to 0.003, reflectivity decreases to 0.35. Photonic crystal extinction coefficient has obvious influence on transmission peak in forbidden band, when k equals to 0.001, transmission index decreases to 0.15, with the increase of extinction coefficient, the width of semi - peak of transmission peak increases but there is no influence on central wave length of transmission peak.

Key word: photonic crystal; characteristic matrix; extinction coefficient; photonic bandgap.

责任编辑:代晓红