

文章编号: 1001-3806(2011)04-0499-04

各向异性矩形掺杂光子晶体的缺陷模及量子效应

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: 为了研究1维各向异性矩形掺杂光子晶体中缺陷模及量子效应,采用特征矩阵法研究了光波在其中出现的模式量子效应,并计算了TE波和TM波各模式缺陷模的变化规律,得出了1维各向异性矩形掺杂光子晶体缺陷模的新结构。结果表明,缺陷模的频率和透射角都随模式量子数的增加而增大,同一模式缺陷模的频率随矩形边长的增加而减小。

关键词: 材料;矩形光子晶体;各向异性介质;量子效应;缺陷模

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.015

Quantum effect and defect mode of anisotropic rectangle doping photonic crystal

LIU Qi-neng

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

Abstract: In order to study the quantum effect and defect mode of light wave in 1-D anisotropic rectangle doping photonic crystal, the quantum effect was calculated by means of characteristic matrix and the defect mode characteristics of TE wave and TM wave were calculated. New defect mode structure of 1-D anisotropic rectangle doping photonic crystal was obtained. The results show that the defect mode frequency and transmission angle increases with increasing quantum number. The defect mode frequency of the same pattern decreases with increasing rectangle side length.

Key words: materials; rectangle photonic crystal; anisotropic media; quantum effect; defect mode

引言

光子晶体的概念自1987年分别由JOHN和YABLONOVITCH提出后,由于光子晶体在带隙方面的特殊性质,使它很快成为光学前沿领域中一个十分活跃的研究课题。近年来人们已对光子晶体开展了广泛、深入的研究^[1-11]。但为了使问题简化而便于研究,几乎都是把1维光子晶体作为横向不受限来处理,即认为1维光子晶体的横向为无穷大。这种假设降低了问题的复杂性,也就降低了理论研究的难度。但是,真实的光子晶体具有一定外形,这使得光波在其中传输时横向受到外形限制,这种限制使光波的能量和波函数都会出现量子效应,伴随产生复杂的多模性。因此,研究1维光子晶体的横向受限问题对弄清真实的1维光子晶体的特性有着十分重要的理论价值和应

价值。

参考文献[12]和参考文献[13]中对1维光子晶体横向受限的问题做了一些研究,取得了一些成果,但仍有许多重要问题有待深入研究。作者将对光波在1维各向异性矩形掺杂光子晶体中光波的量子效应及其缺陷模结构作深入的研究。

1 物理模型和理论

设计这样一种各异性材料/各向同性材料构成的1维矩形掺杂光子晶体,光子晶体由各向异性介质A(硝酸钠)和各向同性介质B(硫化锌)周期性交替组成,在光子晶体的中间插入一层C(C层仍为硝酸钠,只是厚度与A层不同),构成的1维各向异性矩形掺杂光子晶体的结构为 $(AB)^N C (BA)^N$,如图1所示。硝酸钠是单轴晶体,其光轴如图中 \otimes 所示,它有两个折射率,分别为 $n_o = 1.587$ 和 $n_e = 1.336$,A层的厚度为 $h_A = 94.52\text{nm}$ 。硫化锌的折射率为 $n_B = 2.38$,B层的

基金项目:重庆市教委科技研究基金资助项目(KJ100717)

作者简介:刘启能(1957-),男,教授,从事光学与声学研究。

E-mail: liuqineng@yahoo.com.cn

收稿日期:2010-09-05;收到修改稿日期:2010-09-15

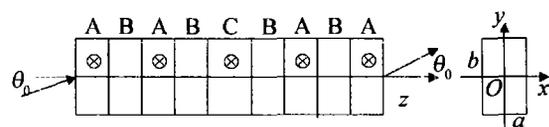


Fig. 1 1-D anisotropic rectangle doping photonic crystal

厚度为 $h_B = 63.03\text{nm}$ 。C层的厚度为 $h_C = 2h_A$ 。当TE波在A层和C层传播时,其折射率为 $n_e = 1.336$,当TM波在A层和C层传播时,其折射率为 $n_o = 1.587$ 。周期数 $N = 6$ 。

在该1维各向异性矩形掺杂光子晶体中传播的电磁波的波矢 \mathbf{k} ($k = n\omega/(2\pi c)$, ω 为圆频率, c 为光速, n 为折射率)的3个分量 k_x, k_y, k_z 有:

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (1)$$

由于电磁波在 x 方向和 y 方向受限, k_x 和 k_y 必须满足驻波条件:

$$\begin{cases} k_x = J_x/(2a), (J_x = 0, 1, 2, 3, \dots) \\ k_y = J_y/(2b), (J_y = 0, 1, 2, 3, \dots) \end{cases} \quad (2)$$

而 $k_z = k\cos\theta$ (θ 为波矢 \mathbf{k} 与 z 轴的夹角), 由(1)式和(2)式得:

$$k^2 \sin^2\theta = [J_x/(2a)]^2 + [J_y/(2b)]^2, \\ (J_x = 0, 1, 2, 3, \dots; J_y = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

由(3)式可知, J_x, J_y 各取一个值, 对应于一个 k 即电磁波的一个模式, 将 J_x 和 J_y 称为模式量子数(它们是用来标记模式的物理量)。因此, 在1维各向异性矩形掺杂光子晶体中传播的电磁波存在多个 k 分离的模式, 其中 $J_x = 0, J_y = 0$ 的模式对应电磁波正入射, 其它模式对应电磁波斜入射的情况。(3)式正是1维各向异性矩形掺杂光子晶体中电磁波各模式满足的关系式。利用(3)式可以研究该各向异性矩形掺杂光子晶体中光波的量子效应。

根据薄膜光学理论, 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, A层、B层、C层的特征矩阵分别为:

$$\begin{cases} M_A = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & -\frac{i}{p_1}\sin\delta_1 \\ -ip_1\sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \\ M_B = \begin{bmatrix} \cos\delta_2 & -\frac{i}{p_2}\sin\delta_2 \\ -ip_2\sin\delta_2 & \cos\delta_2 \end{bmatrix} \\ M_C = \begin{bmatrix} \cos\delta_3 & -\frac{i}{p_3}\sin\delta_3 \\ -ip_3\sin\delta_3 & \cos\delta_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\delta_1 = (2\pi/\lambda)n_A h_A \cos\theta_A$, $\delta_2 = (2\pi/\lambda)n_B h_B \cos\theta_B$, $\delta_3 = (2\pi/\lambda)n_C h_C \cos\theta_C$ 。

$$p_j = \begin{cases} n_j \cos\theta_j, (j = A, B, C, \text{TE波}) \\ \cos\theta_j/n_j, (j = A, B, C, \text{TM波}) \end{cases} \quad (5)$$

(5)式中的 θ 由(3)式确定, 该1维各向异性矩形掺杂光子晶体的整体特征矩阵 M 为:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = (M_A M_B)^N M_C (M_B M_A)^N \quad (6)$$

其光波的透射率 T 为:

$$T = \left| \frac{2n_0}{(M_{11} + M_{12}n_0)n_0 + (M_{21} + M_{22}n_0)} \right|^2 \quad (7)$$

利用(3)式~(7)式就可以研究该1维各向异性矩形掺杂光子晶体中TE波和TM波的缺陷模特性。

2 量子效应的特征

1维横向受限光子晶体与1维横向非受限光子晶体的最重要的区别, 就是在于其中传播的光波出现了量子效应。下面通过(3)式分析该1维各向异性矩形掺杂光子晶体中光波的量子效应特征。计算中取中心波长取 $\lambda_0 = 600\text{nm}$, 中心圆频率 $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$, 设归一化频率 $g = \frac{\omega}{\omega_0}$ 。

令 $a = X\lambda_0, b = Y\lambda_0$ (其中 X 和 Y 是参变量), 由(3)式可得:

$$\sin\theta_0 = \sqrt{[J_x/(2X)]^2 + [J_y/(2Y)]^2}/g, \\ (J_x = 0, 1, 2, 3, \dots; J_y = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

若电磁波沿 x - O - z 面入射, 则:

$$\sin\theta_0 = J_x/(2gX), (J_x = 0, 1, 2, 3, \dots; J_y = 0) \quad (9)$$

若电磁波沿 y - O - z 面入射, 则:

$$\sin\theta_0 = J_y/(2gY), (J_x = 0; J_y = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

(1)模式的量子效应: 由(3)式可知, 1维各向异性矩形掺杂光子晶体中光波存在许多模式, 每个模式由两个模式量子数 J_x 和 J_y 确定, 记为 $[J_x, J_y]$ 。 J_x 和 J_y 只能取自然数, 彼此是分离的。即在1维各向异性矩形掺杂光子晶体中传播的光波其模式出现了量子效应, 而1维横向非受限光子晶体中传播的光波不存在模式。

(2)横向波矢的量子效应: 由(2)式可得, 在该1维各向异性矩形掺杂光子晶体中的光波其横向波矢 k_x 和 k_y 满足:

$$\begin{cases} k_x = J_x/(2a), (J_x = 0, 1, 2, 3, \dots) \\ k_y = J_y/(2b), (J_y = 0, 1, 2, 3, \dots) \end{cases} \quad (11)$$

所以, 光波的横向波矢 k_x 和 k_y 只能为分离的值, 即出现了量子效应。而1维横向非受限光子晶体中光波的横向波矢 k_x 和 k_y 是连续变化的。

(3)传播方向的量子效应: 由(8)式可得, 在该1维各向异性矩形掺杂光子晶体中光波的传播方向 θ 也由模式量子数 J_x 和 J_y 确定, 即在1维各向异性矩形掺杂光子晶体中光波的传播方向也出现了量子效应。而在1维横向非受限光子晶体中光波可以沿任意方向传播。

3 缺陷模的结构

从前面的分析可知, 由于光波在1维各向异性矩形掺杂光子晶体中横向受限, 使得在其中传播的光波

出现了量子效应。量子效应的出现也必然使其中光波的缺陷模与横向非受限光子晶体中光波的缺陷模相比产生新的特性。下面分别研究模式量子效应、方向量子效应以及矩形边长对1维各向异性矩形掺杂光子晶体中的TE波和TM波的缺陷模结构的影响。

3.1 模式量子效应对缺陷模的影响

固定矩形的边长 $a = 4\lambda_0, b = 5\lambda_0$, 计算出TE波和TM波的[1,1],[1,4],[1,7] 3个模式的缺陷模结构图,如图2和图3所示。图2和图3中细线、中粗

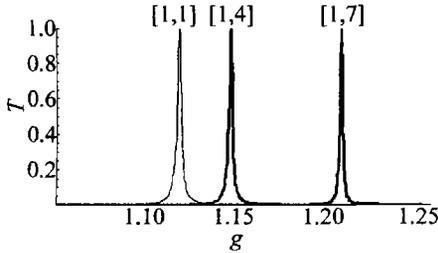


Fig. 2 Response curves of defect mode versus g (TE wave)

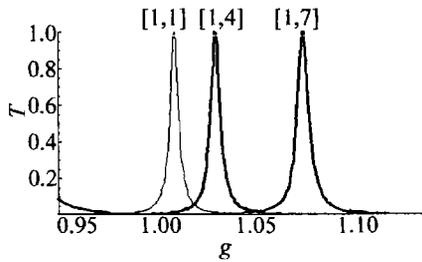


Fig. 3 Response curves of defect mode versus g (TM wave)

线、粗线分别对应[1,1],[1,4],[1,7]的曲线。由图2和图3可知:(1)TE波和TM波的[1,1],[1,4],

[1,7]3个模式都出现了缺陷模,这表明TE波和TM波的各个模式都会出现缺陷模;(2)TE波的[1,1],[1,4],[1,7]3个模式缺陷模的归一化频率 g 分别在1.11,1.14,1.21处,即各模式缺陷模的频率随模式量子数的增加而增大,TM波的各模式缺陷模的频率也随模式量子数的增加而增大,这与TE波相同;(3)TE波的[1,1],[1,4],[1,7]3个模式缺陷模的频率半峰全宽 Δg 分别为0.004,0.003,0.001,即各模式缺陷模的频率半峰全宽随模式量子数的增加而减小。TM波的[1,1],[1,4],[1,7]3个模式缺陷模的 Δg 分别为0.005,0.006,0.008,即各模式缺陷模的频率半峰全宽随模式量子数的增加而增大,这与TE波相反。并且TM波的缺陷模频率半峰全宽明显宽大于TE波对应模式的缺陷模频率半峰全宽,这是各向异性掺杂光子晶体的特点。

3.2 方向量子效应对缺陷模的影响

由(8)式可知,由于模式的量子效应会引起1维各向异性矩形掺杂光子晶体中光波的传播方向量子效应。为了研究传播方向量子效应对1维各向异性矩形掺杂光子晶体中光波的缺陷模的影响。固定矩形的边长 $a = 4\lambda_0, b = 5\lambda_0$, 计算出透射空间中TE波和TM波的[0,1],[0,4],[0,7]3个模式的缺陷模随透射角 θ_0 的响应曲线,分别如图4和图5所示。由图4和图5可知:TE波的[0,1],[0,4],[0,7]3个模式的缺陷模对应的透射角 θ_0 分别在0.09rad,0.36rad,

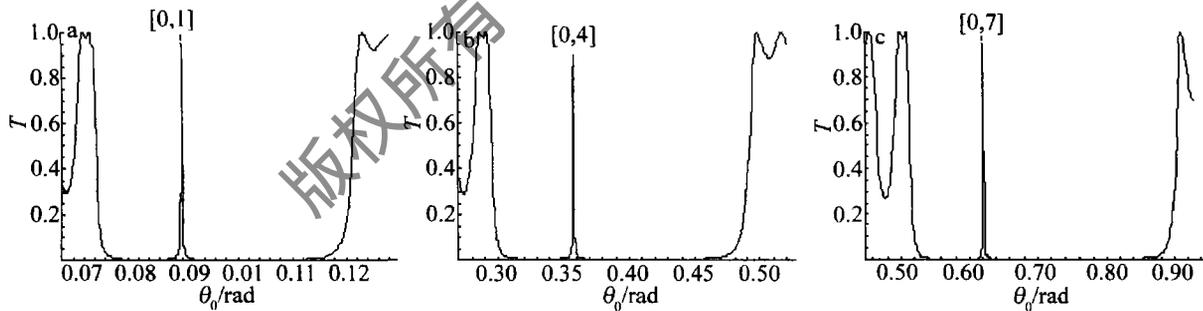


Fig. 4 Response curves of defect mode versus θ_0 (TE wave)

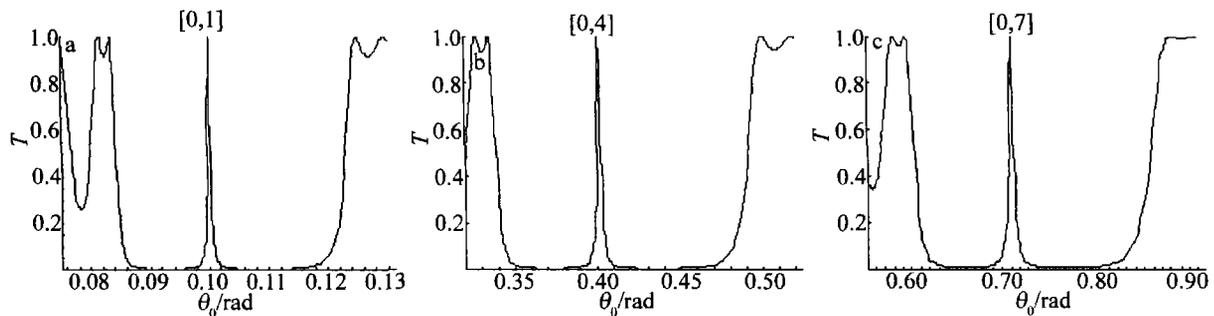


Fig. 5 Response curves of defect mode versus θ_0 (TM wave)

0.61rad处,即各模式缺陷模对应的透射角随模式量子数的增加而增大。TM波的各模式缺陷模对应的

透射角也随模式量子数的增加而增大,这与TE波相同。

3.3 矩形边长对缺陷模的影响

固定 $a = 4\lambda_0$, 计算出 TE 波和 TM 波模式 [1,1] 的缺陷模随边长 b 和归一化频率 g 的变化, 如图 6 和图 7 所示。在图 6 和图 7 中, 白色细带为缺陷模, 两边的深色部分为禁带。由图 6 和图 7 可知: (1) TE 波和 TM 波同一模式缺陷模的频率都随边长的增加而减小, 但随着边长的增加缺陷模的频率减小的速度变缓, 当边长的增加到 $6\lambda_0$ 后, 缺陷模的频率几乎不再变化; (2) 对于 TE 波和 TM 波, 同一模式缺陷模的频率半峰全宽都随边长的增加而增大, 但随着边长的增加, 缺陷模的频率半峰全宽增加的速度变缓, 当边长增加到 $6\lambda_0$ 后, 缺陷模的频率半峰全宽几乎不再变化。

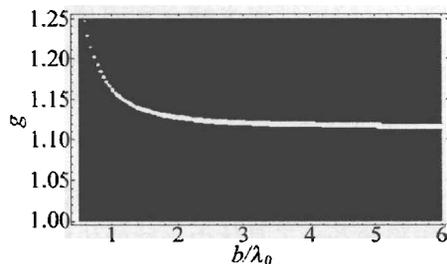


Fig. 6 Response curves of defect mode versus b and g (TE wave)

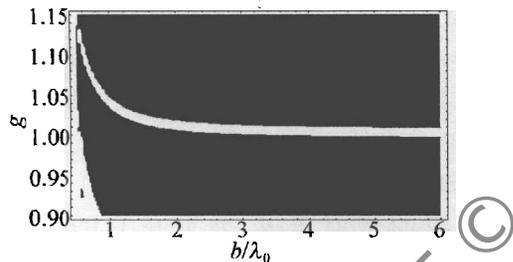


Fig. 7 Response curves of defect mode versus b and g (TM wave)

4 结论

利用光波在 1 维各向异性矩形掺杂光子晶体中横向受限的条件, 研究了光波在其中出现的模式量子效应, 并利用特征矩阵法计算了 TE 波和 TM 波各模式的缺陷模随模式量子数、传播方向以及矩形边长的变化规律。对于 TE 波, 缺陷模的频率随模式量子数的增加而增大, 但随矩形边长的增加而减小; 缺陷模的频率半峰全宽随模式量子数的增加而减小, 但随矩形边长的增加而增大; 缺陷模的透射角随模式量子数的增加

而增大。对于 TM 波, 缺陷模的频率随模式量子数的增加而增大, 但随矩形边长的增加而减小; 缺陷模的频率半峰全宽随模式量子数的增加而增大, 也随矩形边长的增加而增大; 缺陷模的透射角随模式量子数的增加而增大。

参考文献

- [1] CHEN W Z, SHEN Y, HU M L, *et al.* Structure of basic period of one-dimensional photonic crystal and the characters of forbidden bands [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30 (12): 1453-1456 (in Chinese).
- [2] DUAN X F, NIU Y X, ZHANG C, *et al.* Light propagation characteristics of 1-D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32 (9): 1086-1089 (in Chinese).
- [3] FANG Y T, SHEN T G, TAN X L. Study on one dimensional photonic crystal with impurity defect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24 (11): 1557-1560 (in Chinese).
- [4] ZHOU J G, DU G Q, ZHANG Y W, *et al.* Electromagnetic modes of thickness-modulated dual-periodic one-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54 (8): 3703-3707 (in Chinese).
- [5] DU G Q, LIU N H. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53 (4): 1095-1097 (in Chinese).
- [6] WANG R, ZHANG C X, NIE Y H. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 35 (1): 89-92 (in Chinese).
- [7] LIU Q N. The design of double channel polarization tunable filter of photonic crystal [J]. *Laser Technology*, 2008, 32 (1): 84-87 (in Chinese).
- [8] LIU Q N. Effect of absorption of dopant on design of photonic crystal filters [J]. *Laser Technology*, 2008, 32 (3): 335-338 (in Chinese).
- [9] LIU Q N. A new method for bandgap study of one-dimensional photonic crystal [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29 (4): 531-534 (in Chinese).
- [10] LIU Q N. Dispersive study on the complete picture of photonic bandgap of one-dimensional photonic crystal [J]. *Laser Journal*, 2007, 28 (2): 46-47 (in Chinese).
- [11] LIU Q N. A new simple and convenient method for study of properties forbidden band of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36 (6): 1031-1034 (in Chinese).
- [12] LIU Q N. The mode and bandgap of electromagnetic wave in cylindrical 1-D photonic crystal [J]. *Optical Technique*, 2009, 35 (5): 671-675 (in Chinese).
- [13] LIU Q N. The defect mode of electromagnetic wave in flat-panel doping photonic crystal [J]. *Laser Technology*, 2010, 34 (3): 363-366 (in Chinese).