

各向异性矩形光子晶体禁带结构及量子效应

龙涛, 刘启能

(重庆工商大学计信学院, 重庆 400067)

摘要:利用光波在一维各向异性矩形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波各模式的禁带的变化规律,得出了一些一维各向异性矩形光子晶体禁带的新结构。禁带的频率和透射角都随模式量子数的增加而增大。同一模式禁带的频率随矩形边长的增加而减小。

关键词:矩形光子晶体;各向异性介质;量子效应;禁带

中图分类号: O436 **文献标识码:** A

Quantum effect and the bandgap of anisotropic rectangle photonic crystal

LONG Tao, LIU Qi-neng

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

Abstract: The quantum effect of light wave mode is studied under a condition that the light wave is restricted in 1-D anisotropic rectangle photonic crystal. The bandgap character of TE wave and TM wave are calculated by characteristic matrix method. New bandgap structure of 1-D anisotropic rectangle photonic crystal is obtained. The bandgap frequency and transmission angle increase with increasing quantum number. The bandgap frequency of the same pattern decreases with increasing rectangle side length.

Key words: rectangle photonic crystal; anisotropic media; quantum effect; bandgap

1 引言

光子晶体的概念自1987年分别由S. John和E. 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、深入地研究^[1-11]。但在这些研究中为了使问题简化而便于研究,几乎都是把一维光子晶体作为横向不受限来处理,即认为一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,这种限制会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,研究一维光子晶体的横向受限问题对弄清真实的一维光子晶体的特性有着十分重要的理论价值和应用价值。

文献[12]对一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。本文将对光波在一维各向异性矩形光子晶体中光波的量子效应及其禁带结构作深入的研究。

2 物理模型和理论

设计这样一种各向异性材料/各向同性材料构成的一维矩形光子晶体,沿 z 轴(对称轴)方向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,该光子晶体被限制在一个横切面为矩形的金属筒内,矩形的长为 a (沿 x 方向)、宽为 b (沿 y 方向),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

基金项目:重庆市教委科技基金项目(No. KJ090716)资助。

作者简介:龙涛(1963-),女,副教授,主要从事光学研究工作。E-mail: longtao1963@163.com

收稿日期:2010-09-15

为 $n_o = 1.587$ 和 $n_e = 1.336$, A 层的厚度为 $h_A = 9452 \text{ nm}$ 。硫化锌的折射率为 $n_B = 2.38$, B 层的厚度为 $h_B = 63.03 \text{ nm}$ 。当 TE 波在 A 层时,其折射率为 $n_e = 1.336$,当 TM 波在 A 层传播时,其折射率为 $n_o = 1.587$ 。周期数 $N = 10$,入射空间和出射空间的折射率都为 $n_0 = 1$ 。

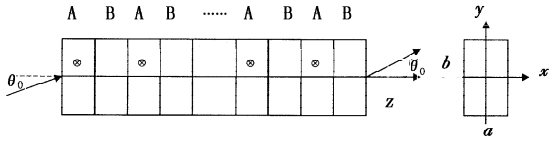


图1 一维各向异性矩形光子晶体

Fig.1 1-D rectangle anisotropic rectangle photonic crystal

在该一维矩形光子晶体中传播的电磁波的波矢 \vec{k} ($k = n\omega/2\pi c$, ω 为圆频率、 c 为光速、 n 为折射率) 的三个分量 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 受限, k_x 和 k_y 必须满足驻波条件:

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

而 $k_z = k \cos \theta$ (θ 为波矢 \vec{k} 与 z 轴的夹角), 由式(1)和式(2)得:

$$\begin{aligned} k^2 \sin^2 \theta &= (J_x/2a)^2 + (J_y/2b)^2 \\ J_x &= 0, 1, 2, 3, \dots \quad J_y = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)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, J_y 称为模式量子数。因此在一维矩形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, 其他模式对应电磁波斜入射的情况。式(3)正是一维矩形光子晶体中电磁波各模式满足的关系式。利用式(3)可以研究该各向异性矩形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, 光子晶体一个周期的特征矩阵 M_0 为:

$$M_0 = M_A M_B = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & -\frac{i}{p_1} \sin \delta_1 \\ -ip_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & -\frac{i}{p_2} \sin \delta_2 \\ -ip_2 \sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\delta_1 = (2\pi/\lambda) n_A h_A \cos \theta_A$, $\delta_2 = (2\pi/\lambda) n_B h_B \cos \theta_B$

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

式(5)中的 θ 由式(3)确定, 一维各向异性矩形光子晶体的整体特征矩阵 M 为:

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

一维各向异性矩形光子晶体对光波的透射率 T 为:

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

利用式(3)~式(7)就可以研究该一维各向异性矩形光子晶体中 TE 波和 TM 波的禁带特性。

3 量子效应的特征

一维横向受限光子晶体与一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。下面通过式(3)分析该一维各向异性矩形光子晶体中光波的量子效应特征。下面的计算中取中心波长 $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$, 中心圆频率 $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$, 设归一化频率 $g = \omega/\omega_0$ 。

令 $a = X\lambda_0, b = Y\lambda_0$, 由式(3)可得:

$$\begin{aligned} \sin \theta_0 &= \frac{1}{g} \sqrt{(J_x/2X)^2 + (J_y/2Y)^2} \\ J_x &= 0, 1, 2, 3, \dots \quad J_y = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (8)$$

若电磁波沿 xoz 面入射, 则:

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

若电磁波沿 yoz 面入射, 则:

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

(1) 模式的量子效应

由式(3)可知, 一维各向异性矩形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。即在一维各向异性矩形光子晶体中传播的光波其模式出现了量子效应, 而一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

由式(2)可得, 在该一维矩形光子晶体中的光波其横向波矢 k_x 和 k_y 满足:

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

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。而一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

由式(8)可得在该一维矩形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, 即在一维

矩形光子晶体中光波的传播方向也出现了量子效应。而在一维横向非受限光子晶体中光波可以沿任意方向传播。

4 禁带的结构

从前面的分析可知,由于光波在一维各向异性矩形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带隙与横向非受限光子晶体中光波的带隙相比产生新的特性。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一维各向异性矩形光子晶体中的 TE 波和 TM 波的禁带结构的影响。

4.1 模式量子效应对禁带的影响

固定矩形的边长 $a = 4\lambda_0, b = 5\lambda_0$, 计算出 TE 波和 TM 波的 $[1,1], [1,4], [1,7]$ 三个模式的禁带结构图,如图 2 和图 3 所示。图 2 和图 3 中细线、中粗

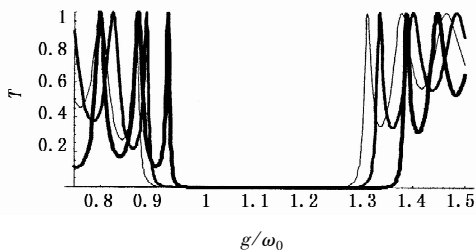


图 2 禁带随 g 的响应曲线(TE 波)

Fig.2 response curves of the bandgap versus g (TE wave)

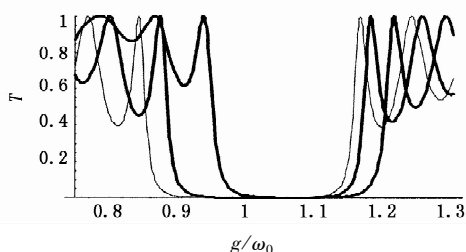


图 3 禁带随 g 的响应曲线(TM 波)

Fig.3 response curves of the bandgap 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: ①TE 波和 TM 波的 $[1,1], [1,4], [1,7]$ 三个模式都出现了禁带,这表明 TE 波和

TM 波各个模式都会出现禁带。②TE 波的 $[1,1], [1,4], [1,7]$ 三个模式禁带的频率中心分别在 $g = 1.07, 1.10, 1.15$ 处,即各模式禁带的频率中心随模式量子数的增加而增大。TM 波各模式禁带的频率中心也随模式量子数的增加而增大,这与 TE 波相同。③TE 波的 $[1,1], [1,4], [1,7]$ 三个模式禁带的频率宽度分别为 $\Delta g = 0.38, 0.40, 0.43$,即各模式禁带的频率宽度随模式量子数的增加而增大。TM 波的 $[1,1], [1,4], [1,7]$ 三个模式禁带的频率宽度分别为 $\Delta g = 0.26, 0.24, 0.21$,即各模式禁带的频率宽度随模式量子数的增加而减小,这与 TE 波相反。并且 TE 波的禁带频率宽度明显宽大于 TM 波对应模式的禁带频率宽度,这是各向异性光子晶体的特点。

4.2 方向量子效应对禁带的影响

由式(8)可以知,由于模式的量子效应会引起一维各向异性矩形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一维各向异性矩形光子晶体中光波的禁带的影响。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 $[0,1], [0,4], [0,7]$ 三个模式的禁带随透射角 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:①TE 波的 $[0,1], [0,4], [0,7]$ 三个模式的禁带对应的透射角中心分别在 $\theta_0 = 0.095 \text{ rad}, 0.170 \text{ rad}, 0.680 \text{ rad}$ 处,即各模式禁带对应的透射角中心随模式量子数的增加而增大。TM 波各模式禁带对应的透射角中心也随模式量子数的增加而增大,这与 TE 波相同。②TE 波的 $[0,1], [0,4], [0,7]$ 三个模式的禁带对应的透射角宽带分别为 $\Delta\theta_0 = 0.034 \text{ rad}, 0.170 \text{ rad}, 0.310 \text{ rad}$,即各模式禁带对应的透射角宽带随模式量子数的增加而增大。TM 波各模式禁带对应的透射角宽带也随模式量子数的增加而增大,但不如 TE 波明显。

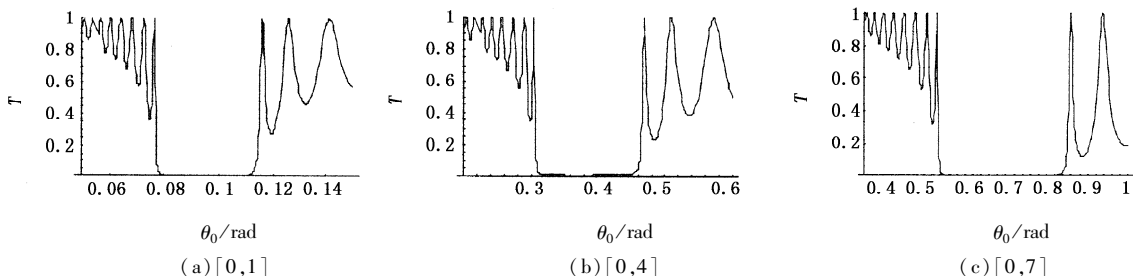
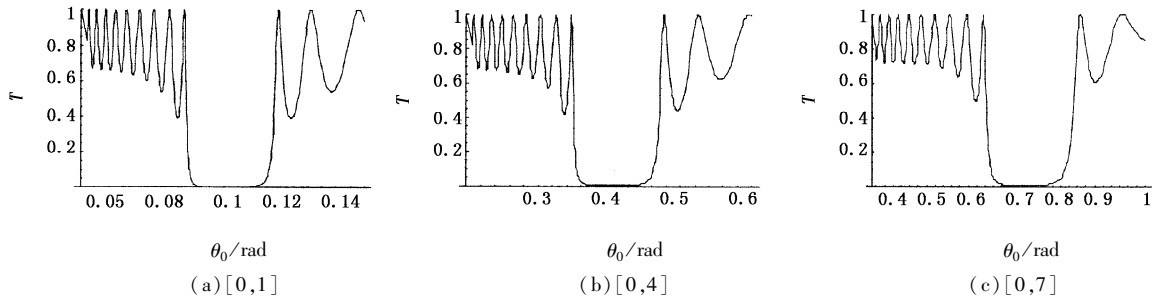


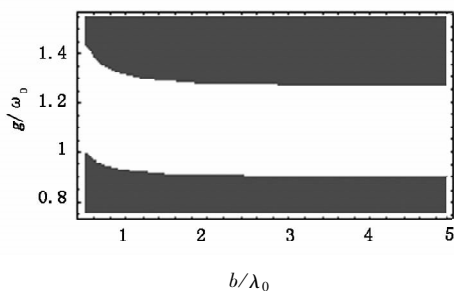
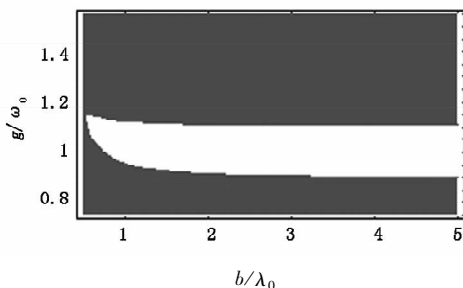
图 4 禁带随透射角 θ_0 的响应曲线(TE 波)

Fig.4 response curves of the bandgap versus θ_0 (TE wave)

图5 禁带随透射角 θ_0 的响应曲线(TM波)Fig. 5 response curves of the bandgap versus θ_0 (TM wave)

4.3 矩形边长对禁带的影响

固定 $a = 4\lambda_0$ 、计算出 TE 波和 TM 波模式 $[1, 1]$ 的禁带随边长 b 和归一化频率 g 变化的图,如图 6 和图 7 所示。在图 6 和图 7 中白色部分为禁带,两边的深色部分为导带,由图 6 和图 7 可知:①对于 TE 波:当 $b = \lambda_0, 3\lambda_0, 5\lambda_0$ 时, $[1, 1]$ 模式的禁带频率中心分别在 $g = 1.12, 1.10, 1.09$ 处,即同一模式禁带的频率中心随边长的增加而减小。对于 TM 波:同一模式禁带的频率中心也随边长的增加而减小,这与 TE 波相同。②对于 TE 波:当 $b = \lambda_0, 3\lambda_0, 5\lambda_0$ 时, $[1, 1]$ 模式的禁带频率宽度分别为 $\Delta g = 0.39, 0.37, 0.36$,即同一模式禁带其频率宽度随边长的增加而减小。对于 TM 波:当 $b = \lambda_0, 3\lambda_0, 5\lambda_0$ 时, $[1, 1]$ 模式的禁带频率宽度分别为 $\Delta g = 0.17, 0.20, 0.21$,即同一模式禁带其频率宽度随边长的增加而增大,这与 TE 波相反。

图6 禁带随 b 和 g 变化的图(TE波)Fig. 6 response curves of the bandgap versus b and g (TE wave)图7 禁带随 b 和 g 变化的图(TM波)Fig. 7 response curves of the bandgap versus b and g (TM wave)

5 结论

本文利用光波在一维各向异性矩形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 波各模式的禁带随模式量子数、传播方向以及矩形边长的变化规律。对于 TE 波有:禁带的频率中心随模式量子数的增加而增大,但随边长的增加而减小。禁带的频率宽度随模式量子数的增加而增大,但随边长的增加而减小。禁带的透射角中心和宽度都随模式量子数的增加而增大。对于 TM 波有:禁带的频率中心随模式量子数的增加而增大,但随边长的增加而减小。禁带的频率宽度随模式量子数的增加而减小,但随边长的增加而增大。禁带的透射角中心和宽度都随模式量子数的增加而增大。

参考文献:

- [1] Chen Weizong, Shen Ying, Hu Manli, et al. Structure of basic period of one-dimensional photonic crystal and the characters of forbidden bands [J]. Acta Photnica Sinica, 2001, 30(12): 1453 - 1456. (in Chinese)
陈慰宗, 申影, 忽满利, 等. 一维光子晶体的基本周期结构及其禁带特征 [J]. 光子学报, 2001, 30(12): 1453 - 1456.
- [2] Duan Xiaofeng, Niu Yanxiong, Zhang Chu, et al. Light propagation characteristics of 1-D photonic crystal [J]. Acta Photnica Sinica, 2003, 32(9): 1086 - 1089. (in Chinese)
段晓峰, 牛燕雄, 张维, 等. 一维光子晶体的光学传输特性分析 [J]. 光子学报, 2003, 32(9): 1086 - 1089.
- [3] Fang Yuntuan, Shen Tinggen, Tan Xilin. Study on one dimensional photonic crystal with impurity defect [J]. Acta Optic Sinica, 2004, 24(11): 1557 - 1560. (in Chinese)
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.
- [4] Zhou Jingou, Du Guiqiang, Zhang Yawen. Electromagnetic modes of thickness-modulated dual-periodic one-dimensional photonic crystal [J]. Acta Optic Sinica, 2004, 24(11): 1557 - 1560.

- sional photonic crystals[J]. Acta Phys. Sin. 2005, 54(8): 3703 - 3707. (in Chinese)
- 周金苟, 杜桂强, 张亚文. 双周期厚度调制的一维光子晶体的电磁模[J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3703 - 3707.
- [5] Du Guiqiang, Liu Nianhua. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. Acta Phys. Sin., 2004, 53(4): 1095 - 1097. (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): 1095 - 1097.
- [6] Zhang Dengguo, Ni Na, An Henan. Electromagnetic field analysis and numerical calculation of one-dimensional magneto-photonic crystal[J]. Acta Photnica Sinica, 2004, 33(8): 1007 - 1010. (in Chinese)
- 张登国, 倪娜, 安鹤南. 一维磁性光子晶体的电磁场分析和数值计算[J]. 光子学报, 2004, 33(8): 1007 - 1010.
- [7] Wang Rui, Zhang Cunxi, Nie Yihang. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals[J]. Acta Photnica Sinica, 2007, 35(1): 89 - 92. (in Chinese)
- 王瑞, 张存喜, 聂一行. 一维各向异性光子晶体的带隙结构和传输特性[J]. 光子学报, 2007, 35(1): 89 - 92.
- [8] Li Rong, Ren Kun, Ren Xiaobin. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. Acta Phys. Sin., 2004, 53(8): 2520 - 2523. (in Chinese)
- 李蓉, 任坤, 任晓斌. 一维光子晶体带隙结构对不同偏振态的角度和波长响应. [J]. 物理学报, 2004, 53(8): 2520 - 2523.
- [9] Liu Qineng. A new method for bandgap study of one-dimensional photonic crystal [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(4): 531 - 534. (in Chinese)
- 刘启能. 一种研究一维光子晶体能带的新方法[J]. 半导体光电, 2008, 29(4): 531 - 534.
- [10] Liu Qineng. Dispersive study on the complete picture of photonic bandgap of one-dimensional photonic crystal [J]. Laser Journal, 2007, 28(2): 46 - 47. (in Chinese)
- 刘启能. 一维光子晶体能带全貌特征的色散研究[J]. 激光杂志, 2007, 28(2): 46 - 47.
- [11] Liu Qineng, A new simple and convenient method for study of properties forbidden band of one-dimensional photonic crystal [J]. Acta Photnica Sinica, 2007, 36(6): 1031 - 1034. (in Chinese)
- 刘启能. 一种简便的研究一维光子晶体禁带特征的新方法[J]. 光子学报, 2007, 36(6): 1031 - 1034.
- [12] Liu Qineng, The mode and bandgap of electromagnetic wave in cylindrical 1-D photonic crystal [J]. Optical Technique, 2009, 35(5): 671 - 675. (in Chinese)
- 刘启能. 圆柱形光子晶体中电磁波的模式和带隙[J]. 光学技术, 2009, 35(5): 671 - 675.