

文章编号:1004-2474(2014)01-0110-03

一维三元光子晶体的偏振滤波特性研究

刘文莉, 邓 桥, 何修军, 唐婷婷

(成都信息工程学院 光电技术学院, 四川 成都 610225)

摘 要:设计了一维三元对称光子晶体结构,用传输矩阵法对其偏振滤波特性进行了研究。结果表明,入射角、介质厚度增大,两偏振波的禁带和共振模的分离度变大。周期数目 N 增大,对两偏振波的共振模的分离度影响最明显。晶体结构对称度的改变,对两种波的禁带和共振模的分离度影响不大。

关键词:光子晶体;传输矩阵法;偏振波;共振模

中图分类号:O431 **文献标识码:**A

Study on Polarization Filtering Properties of 1-D Three Element Photonic Crystal

LIU Wenli, DENG Qiao, HE Xiujun, TANG Tingting

(College of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: A kind of one-dimensional three element photonic crystal with symmetrical structure has been designed. The polarization filtering properties have been studied by using the transfer matrix method. It is found that the separation degree of band gap and resonance mode of two polarized waves increase with the increase of the incident angle and medium thickness, and the increase of the period number N has obvious influence on the separation degree of the two polarized waves, while the change of the symmetry degree of the crystal structure has little effect on the separation degree of band gap and resonant mode of the two waves.

Key words: photonic crystals; transfer matrix method; polarized wave; resonant modes

0 引言

光子晶体是一种折射率在空间周期性变化排布的新型人工材料,它具有光子禁带。频率和能量处于禁带内的光子在光子晶体内部完全被禁止存在^[1-2]。人们利用这个特性在光纤、发光二极管、光集成器件等方面进行运用^[3-5]。目前对一维光子晶体研究大都集中于一维二元光子晶体^[6-8],对一维三元光子晶体的研究甚少^[9]。本文对结构对称的一维三元光子晶体进行研究,分析其对 S 光波(TE 波)和 P 光波(TM 波)的分离特性,包括入射角、周期数、厚度、结构对称性等对两种偏振波的影响。

1 物理模型与计算方法

由 3 种折射率相差较大的材料 A、B、C 交替排列组成的一维对称三元光子晶体结构,作为本文理论分析的模型,它们对应的介质折射率和介质厚度分别为 (n_a, d_a) 、 (n_b, d_b) 、 (n_c, d_c) (a, b, c 分别对应 A、B、C 三层介质),结构如图 1 所示。光在一维光

子晶体中传播可用 Maxwell 方程及相应的边界条件决定,根据传输矩阵法,光在每层介质中的传输可用 2 行 2 列阵表示,即

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -i \sin \delta_j / p_j \\ i p_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

对 S 光波(TE 波),有 $p_j = n_j \cos \theta_j$, $\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j / \lambda$ 。对 P 光波(TM 波),有 $p_j = n_j / \cos \theta_j$, $\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j / \lambda$ 。这里的 $j = a, b, c$ 分别对应 A、B、C 三层介质。 n_j, θ_j 分别为各个介质层的折射率和入射角。 λ 为真空中的波长。

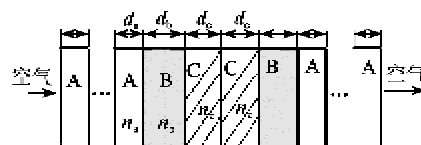


图 1 一维三元光子晶体对称结构

以 S 光波(TE 波)为例,将式 $\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j / \lambda$ 与 $p_j = n_j \cos \theta_j$ 中的 j 分别取 a, b, c 就得到 A、B、C 三层介质层的传输矩阵为

收稿日期:2013-05-09

基金项目:四川省科技厅软科学计划基金资助项目(2011ZR0179)

作者简介:刘文莉(1975-),女,四川省绵竹市人,讲师,硕士,主要从事光电介质理论的研究。E-mail: liuwl2000@cuit.edu.cn.

$$M_a = \begin{bmatrix} \cos \delta_a & -i \sin \delta_a / p_a \\ i p_a \sin \delta_a & \cos \delta_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_b = \begin{bmatrix} \cos \delta_b & -i \sin \delta_b / p_b \\ i p_b \sin \delta_b & \cos \delta_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M_c = \begin{bmatrix} \cos \delta_c & -i \sin \delta_c / p_c \\ i p_c \sin \delta_c & \cos \delta_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

对图 1 所示结构,总传输矩阵为

$$M = \dots [M_a M_b M_c] [M_c M_b M_a] \dots = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

设周围材料的折射率为 n_0 , $p_0 = n_0 \cos \theta_0$, 若光是非垂直入射,对 TE 波而言,光的反射系数为

$$r_{TE} = \frac{(M_{11} + M_{12} p_{N-1}) p_0 - (M_{21} + M_{22} p_{N-1})}{(M_{11} + M_{12} p_{N-1}) p_0 + (M_{21} + M_{22} p_{N-1})} \quad (6)$$

对 TM 波而言,光的反射系数为

$$r_{TM} = \frac{(-M_{11} - M_{12} p_0) p_{N+1} + (M_{21} + M_{22} p_0)}{(M_{11} + M_{12} p_0) p_{N+1} + (M_{21} + M_{22} p_0)} \quad (7)$$

反射率为

$$R = |r|^2 \quad (8)$$

透射率为

$$T = 1 - R \quad (9)$$

2 数值结果与讨论

2.1 入射角对偏振滤波的影响

图 1 所示结构的 A,B,C 介质分别为 GaP($n_a = 3.3$), ZnO($n_b = 2.34$)和 SiO₂($n_c = 1.5$)。图 2 为在各层介质光学厚度为 350 nm,周期取 6 时,入射角变化时的偏振滤波特性。由图可知,TE 和 TM 波在入射角为 0 时,两者是分不开的。随着入射角增大,两偏振波分离度变大,两者的禁带都会左移,禁

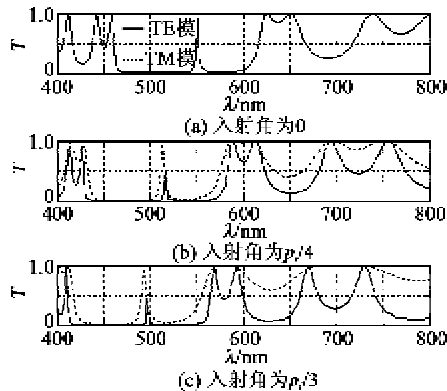


图 2 入射角度不同时的偏振滤波特性

带中心有一共振模, TM 波共振模幅度不受角度变化的影响, TE 波的共振模幅度会随角度增大而减小。在入射角取 $p_i/3$ 时,共振模分离度最大。

2.2 光学厚度对偏振滤波的影响

图 3 是入射角为 $p_i/4$,周期取 6 时,介质光学厚度变化时的偏振滤波特性。从上到下介质层光学厚度分别取 350 nm,400 nm,450 nm。由图可知,随着光学厚度的增加,两偏振波的禁带都出现右移, TM 波的共振模幅度无变化, TE 波的共振模幅度随之增大。且随厚度的增大,禁带分离变大,共振模也分得越开。

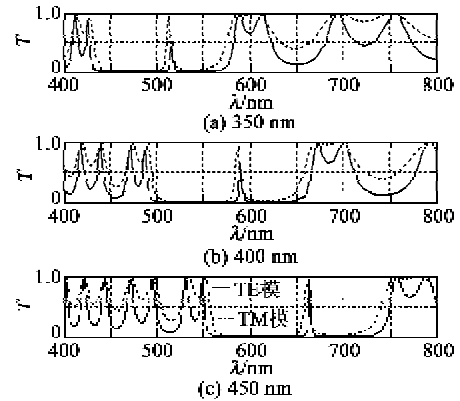


图 3 光学厚度不同时的偏振滤波特性

2.3 周期数目 N 对偏振滤波的影响

图 4 为当入射角为 $p_i/4$,光学厚为 350 nm 时,周期单元(ABC)和(CBA)的数目 N 分别取 6,16,26 时的偏振滤波特性。由图可知,随着 N 的增大,TE 和 TM 波的禁带宽度都会变小。且当 $N = 16$ 时,两偏振波的禁带和共振模的分离度达最大。 N 再增大,共振模会消失。

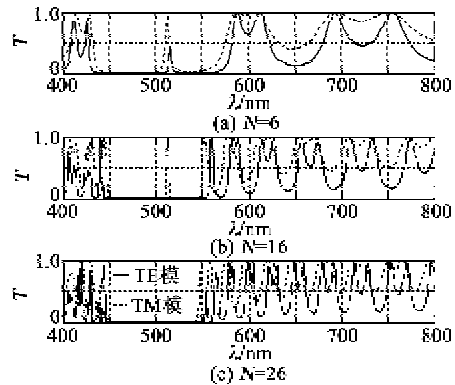


图 4 周期数目 N 不同时的偏振滤波特性

2.4 对称度对偏振滤波的影响

图 5 是当光学厚度取 350 nm,入射角为 $p_i/4$ 时,晶体对称度(光子晶体两边结构单元 ABC 和

CBA的周期个数之比称为对称度)对光子晶体偏振滤波特性的影响。由图可知,随对称度由1开始减小,两偏振波的禁带宽度都会缩小,两偏振波的禁带和共振模的分离度变化不大。且一旦分布不对称,TE和TM波禁带中心的共振模便会消失。

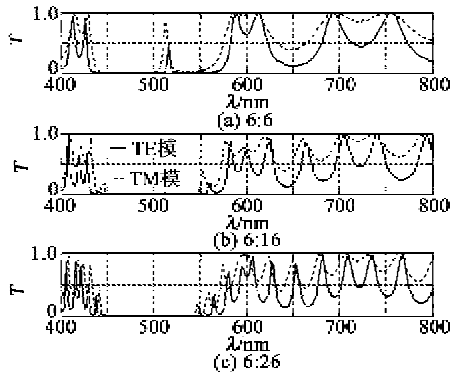


图5 对称度不同时的偏振滤波特性

3 结束语

本文利用传输矩阵理论,对一维三元对称光子晶体结构(ABC)(CBA)的偏振特性进行分析。对入射角、介质厚度、周期数目 N 及对称度变化带来的影响行了模拟。结果显示,入射角变大,会导致两偏振波禁带左移,且角度越大,禁带和共振模的分离度越大。在介质厚度增大时,两偏振波的禁带都右移,且禁带和共振模的分离度也增大。介质层周期数变化对共振模的分离度影响最明显。(ABC)和(CBA)结构的对称度变化,会影响两偏振波的禁带宽度,但对两偏振波的禁带和共振模的分离度影响不大。晶体结构一旦偏离对称,禁带中的共振模便消失,所以共振模是该类晶体是否对称的一个体现。

参考文献:

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2063.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2409.
- [3] WU Weiqin, CHEN Xiongwen, ZHOU Hui, et al. Investigation of the uflattened dispersion in photonic crystal fibers with hybrid cores[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(1): 109-113.
- [4] 刘启能. SH波的转移矩阵及其在声子晶体中的应用[J]. 四川兵工学报, 2013(2): 1-4.
LIU Qinen. The transfer matrix of SH wave and its application in photonic crystals[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013(2): 1-4.
- [5] LI Yan, ZHENG Ruishen, FENG Yuchun, et al. Influence of disordered photonic crystal on light extraction of a kind of light emitting diode model[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(6): 903-905.
- [6] 刘丽丽, 汤炳书. 偏振滤波一维二元光子晶体的实现[J]. 吉首大学学报, 2007, 28(5): 56-59.
LIU Lili, TANG Bingshu. Investigation of polarization filter properties of 1-D dual photonic crystal nanometer film in visible region[J]. Journal of Jishou University, 2007, 28(5): 56-59.
- [7] 蒋美萍, 江兴方, 沈小明, 等. 一维光子晶体的偏振特性研究[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 612-616.
JIANG Meiping, JIANG Xingfang, SHEN Xiaomin, et al. Study on the polarization property of 1-D photonic crystals[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(4): 612-616.
- [8] 陈征, 王涛. 一维光子晶体缺陷模的偏振特性研究[J]. 光子学报, 2007, 36(12): 2243-2247.
CHEN Zheng, WANG Tao. Study on the polarization properties of the defect mode of one-dimensional photonic crystal[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(12): 2243-2247.
- [9] 黎根, 刘正东, 赵顺才, 等. 一维三元光子晶体微腔中模式竞争特性的研究[J]. 量子光学学报, 2010, 16(4): 294-299.
LI Gen, LIU Zhengdong, ZHAO Shuncai, et al. The characteristics of mode competition in the micro-cavity of one-dimensional ternary photonic crystal[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2010, 16(4): 294-299.