

文章编号:1001-5078(2011)02-0216-04

· 光学材料器件与薄膜 ·

## 含单负材料一维光子晶体的偏振特性

李文胜<sup>1</sup>, 黄海铭<sup>1</sup>, 付艳华<sup>1</sup>, 张琴<sup>1</sup>, 是度芳<sup>1,2</sup>

(1. 湖北汽车工业学院理学部, 湖北十堰 442002; 2. 华中科技大学物理系, 湖北武汉 430074)

**摘要:**利用传输矩阵法,讨论了由单负材料组成的光子晶体的偏振特性。结果表明:垂直入射时,TE模和TM模的透射谱完全相同。当入射角 $\theta$ 增加时,两模的透射谱均向短波方向移动,禁带的宽度增加,且TE模的变化大于TM模的。入射角越大,变化越明显。光子晶体的周期数 $N$ 增加时,准禁带底部逐步降低,宽度稍有变窄,禁带的位置和宽度均保持不变。但位于两禁带间通带顶部震荡峰的数量 $M$ 增加,且 $M$ 和 $N$ 之间满足 $M=N-1$ 。介质的几何厚度增加时,TE模和TM模的透射谱均向长波方向移动,禁带的宽度增加,反之亦然。当介质的几何厚度的变化量相同,两模透射谱禁带宽度的变化量也分别相同。

**关键词:**光子晶体;单负材料;透射谱;偏振特性

**中图分类号:** O734 **文献标识码:** A

## Polarization properties of one-dimensional photonic crystal containing single-negative materials

LI Wen-sheng<sup>1</sup>, HUANG Hai-ming<sup>1</sup>, FU Yan-hua<sup>1</sup>, ZHANG Qin<sup>1</sup>, SHI Du-fang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Basic Science Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China;

2. Department of Physics of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The polarization properties of photonic crystals containing single-negative materials were discussed by transfer matrix method, the results indicate that at the normal incidence, the transmission spectra of TE and TM modes are identical. With the increase of incident angle  $\theta$ , the transmission spectra of the two modes move towards short-wave direction together with the forbidden band width increase, and the change of TE modes is greater than TM ones. The greater the incidence angle is, the more obvious this change will be. The bottoms of the quasi-forbidden band reduce gradually and the width is narrower slightly; the positions and width of forbidden band remain unchanged when number of period  $N$  increases. Whereas, the number of oscillation peaks  $M$  located at the top pass-band between the two bands will increase, and  $M$  and  $N$  obey the formulae  $M=N-1$ . The transmission spectra of TE and TM modes move towards long-wave direction together with the forbidden band width increasing. The same results can be observed when geometric thickness of the medium increases. The geometry thicknesses of the medium variation are same, the variation of the forbidden band width of the transmission spectrum of these two modes were also same, respectively.

**Key words:** photonic crystal; single-negative materials; transmission spectra; polarization properties

### 1 引言

光子晶体是一种折射率周期变化的人工微结构材料<sup>[1]</sup>。光子晶体的一个显著特点就是存在光子带隙结构,改变材料的折射率可以调整光子晶体带隙结构的禁、通带的中心位置和宽度、偏振特性

等<sup>[2]</sup>。我们知道,除普通的正折射率材料外,1968年,前苏联科学院物理学家 V. G. Veselago 提出了负

作者简介:李文胜(1955-),男,副教授,主要从事光学的教学与研究。E-mail:lws551119@tom.com

收稿日期:2010-09-12;修订日期:2010-09-28

折射率材料<sup>[3]</sup>。负折射率材料的介电常量  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  同时为负, 又称其为双负材料<sup>[4]</sup>。随着研究的深入, 介电常量  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  中只有一种为负的所谓单负材料已引起了人们的极大兴趣。单负材料分为两种, 若  $\epsilon < 0, \mu > 0$ , 则称为电单负材料; 若  $\epsilon > 0, \mu < 0$ , 则称为磁单负材料<sup>[5]</sup>。本文构造了由电单负材料  $A$  和磁单负材料  $B$  组成的  $(AB)^N$  形一维光子晶体, 并利用传输矩阵法讨论了该光子晶体的两偏振态在入射角  $\theta$ 、周期数  $N$  和介质厚度  $d_A$  和  $d_B$  分别变化时的偏振特性。

### 2 物理模型与计算方法

设由电单负材料  $A: \mu_A = a, \epsilon_A = 1 - \omega_{ep}^2/\omega^2, \omega < \omega_{ep}$ , 和磁单负材料  $B: \epsilon_B = b, \mu_B = 1 - \omega_{mp}^2/\omega^2, \omega < \omega_{mp}$ , ( $\omega_{ep}$  和  $\omega_{mp}$  分别是电等离子体频率和磁等离子体频率) 交替排列, 组成的  $(AB)^N$  形一维光子晶体, 介质层  $A$  和  $B$  的几何厚度分别  $d_A$  和  $d_B$ 。

采用传输矩阵法, 计算上述光子晶体的透射谱的总传输矩阵为<sup>[6]</sup>:

$$M = \prod_K M_{KA} M_{KB} \quad (1)$$

其中,  $M_{KA}$  和  $M_{KB}$  分别是第  $K$  周期中  $A, B$  两介质的特征矩阵,  $N$  为周期数。对于第  $K$  周期中的  $A$  介质层, 其特征矩阵  $M_{KA}$  的具体表示是<sup>[7]</sup>:

$$M_{KA} = \begin{bmatrix} \cos\delta_{KA} & i \sin\delta_{KA}/\eta_A \\ i\eta_A \sin\delta_{KA} & \cos\delta_{KA} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $\delta_{KA} = 2\pi d_A \sqrt{\epsilon_A \mu_A - \sin^2\theta_A}/\lambda$ , 对 TE 模:  $\eta_A = \sqrt{\epsilon_A/u_A} \cos\theta_A$ , 而对 TM 模:  $\eta_A = \sqrt{\epsilon_A/u_A} \cos\theta_A$ ,  $\theta_A$  为第  $k$  周期中  $A$  介质层中光线的折射角。而对  $B$  介质层, 其特征矩阵  $M_{KB}$  的形式及矩阵元的表达式与上述对应的表示一致。

若  $M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$

则透射率为<sup>[8]</sup>:

$$T = \frac{4\eta_a^2}{|\eta_a m_{11} + \eta_a^2 m_{12} + m_{21} + \eta_a m_{22}|^2} \quad (4)$$

式中,  $\eta_a$  为光子晶体外侧介质的导纳。

### 3 计算结果及分析

设光子晶体两外侧都是空气, 电磁波的入射角为  $\theta$ , 对电单负材料  $A$ , 取  $\mu_A = 5, d_A = 3 \mu\text{m}$ ; 对磁单负材料  $B$ , 取  $\epsilon_B = 1.5, d_B = 3 \mu\text{m}$ 。在此条件下, 分别讨论了该光子晶体的两偏振态在入射角  $\theta$ 、周期数  $N$  和介质厚度  $d_A$  和  $d_B$  分别变化时的偏振特性。

#### 3.1 不同入射角时的透射谱

光子晶体取上述参数, 电等离子体频率和磁等离子体频率  $\omega_{ep}$  和  $\omega_{mp}$  均取  $10^9 \text{Hz}$ , 周期数  $N$  取 10。数值计算表明, 入射角  $\theta$  取不同的值时, 在小于  $6 \mu\text{m}$  的范围内, 没有明显的禁带, 而在  $6 \sim 12 \mu\text{m}$  的范围内其透射谱如图 1 所示。从图中可见, 当入射角  $\theta = 0^\circ$  时, TE 模和 TM 模的透射谱完全相同: 即在  $6 \sim 6.72 \mu\text{m}$  间是一通带, 通带的透射率为 1, 只是在短波段的顶部有震荡; 在  $7 \mu\text{m}$  处有一较窄的禁带, 而在  $9.11 \sim 11.79 \mu\text{m}$  间是一较宽的禁带, 在两禁带间是一顶部有震荡的通带, 震荡幅度通带的中间段较小, 而在两侧较大, 且长波段的震荡幅度大于短波段的。当入射角  $\theta$  增加时, 两模的透射谱均向短波端移动, 因较宽禁带长波端的移动量小于短波的, 且 TE 模的变化大于 TM 模的, 故入射角增加时, 该禁带的宽度增加, 且入射角越大, 这一变化越明显。此外, 在入射角增大的过程中, 较窄带隙的底部先升后降, 原 TE 模两禁带间通带短波端震荡部分的底部上升, 而 TM 模相应部分则是先升后降, 这些变化在短波端的变化最为明显。

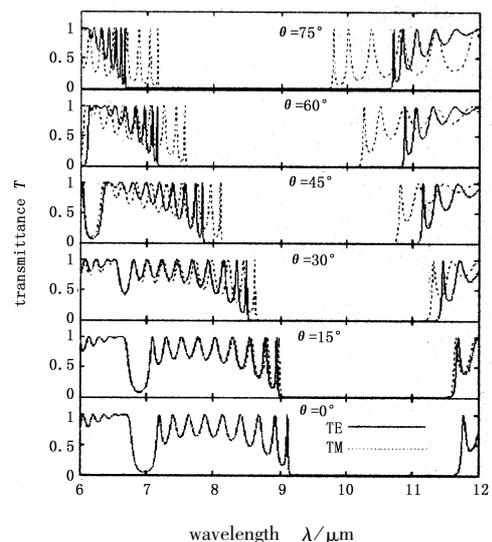


图 1 入射角不同时 TE 模和 TM 模的透射谱  
Fig. 1 transmission spectra of TE and TM modes at different incidence angle

#### 3.2 不同周期时的透射谱

上述光子晶体, 若取两介质层的几何厚度  $d_A = d_B = 3 \mu\text{m}$ , 入射角  $\theta = 45^\circ$ , 保持不变, 当周期数  $N$  取不同值时, TE 模和 TM 模的透射谱如图 2 所示。从图中可见, 当周期数  $N = 8$  时, TE 模和 TM 模均在  $6.15 \mu\text{m}$  处有一较窄的准禁带, 其后是一顶部有震荡的通带, 震荡幅度在短波端较小, 长波端较大。

TE 模和 TM 模分别从  $7.85 \mu\text{m}$  和  $8.10 \mu\text{m}$  起是一宽度各为  $3.30 \mu\text{m}$  和  $2.70 \mu\text{m}$  的严格禁带,此禁带长波端仍是一顶部有震荡的通带,但震荡幅度却是短波端的较大而长波端的较小。周期数  $N$  增加时,两模的透射谱中准禁带的位置不变,但底部逐步降低,宽度略有变窄;较宽禁带的位置和宽度均保持不变,但位于两禁带间通带顶部的震荡峰的数量  $M$  增加, $M$  和  $N$  之间满足  $M = N - 1$ 。这和由普通材料组成的光子晶体通带顶部的震荡峰数  $M$  和周期数  $N$  之间的关系  $M = 2N - 1$  不同<sup>[9]</sup>。

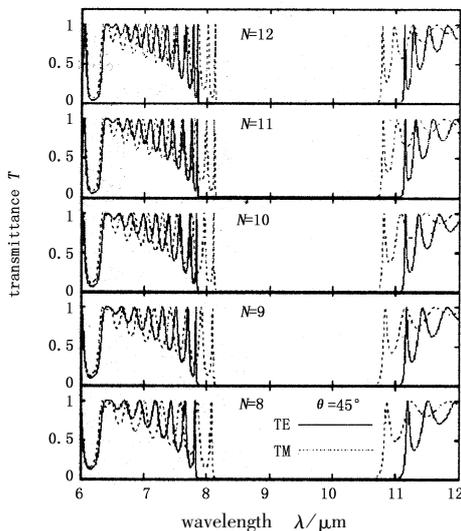


图2 周期数不同时 TE 模和 TM 模的透射谱

Fig.2 Transmission spectra of TE and TM modes at different number of period

### 3.3 介质的几何厚度不同时的透射谱

为讨论介质厚度变化时,上述光子晶体的 TE 模和 TM 模透射谱的变化规律取:周期数  $N = 10$ ,入射角  $\theta = 45^\circ$ 。当两介质层的几何厚度在其基本值  $3 \mu\text{m}$  的基础上以 5% 的倍率增、减时,TE 模和 TM 模的透射谱如图 3 所示。从图中可见,当  $d_A = d_B = 3 \mu\text{m}$  时,TE 和 TM 两模均在  $6.18 \mu\text{m}$  处有一较窄的准禁带,其后是一顶部有震荡的通带,震荡幅度在短波端较小,长波端较大。TE 和 TM 两模分别从  $7.83 \mu\text{m}$  和  $8.13 \mu\text{m}$  起是一宽度各为  $3.36 \mu\text{m}$  和  $2.65 \mu\text{m}$  的严格禁带,此禁带右侧仍是一顶部有震荡的通带,但震荡幅度却是短波端的大于长波端的。介质的几何厚度增加时,两模的透射谱均向长波端移动,因禁带边缘长波端的移动量大于短波的,故介质的几何厚度增加时,该禁带的宽度增加也增加,反之亦然。进一步的计算表明,当介质的几何厚度的变化量相同时,两模透射谱禁带宽度的变化量也相同。

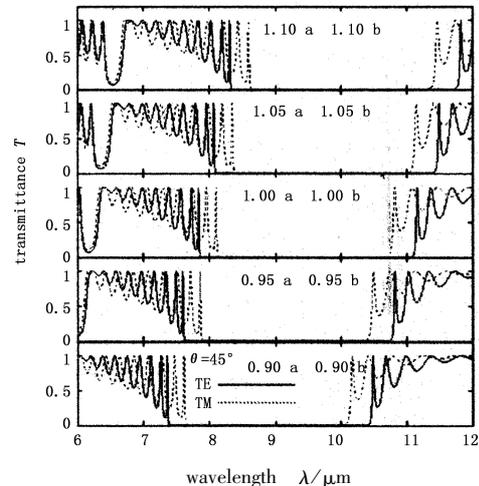


图3 介质的几何厚度不同时 TE 模和 TM 模的透射谱

Fig.3 transmission spectra of TE and TM modes at different geometry thickness of media

## 4 结论

通过上述讨论,对由单负材料组成的光子晶体,我们可以得出如下结论:①垂直入射时,TE 和 TM 两模的透射谱完全相同;当入射角  $\theta$  增加时,两模的透射谱均向短波端移动,较宽禁带的宽度增加,且 TE 模的变化大于 TM 模的,入射角越大,这一变化越明显;②光子晶体的周期数  $N$  变化时,TE 和 TM 模的透射谱中准禁带的位置不变; $N$  增加时,准禁带底部逐步降低,宽度略有变窄;而禁带的位置和宽度均保持不变,但位于禁带间通带顶部震荡峰的数量  $M$  增加, $M$  和  $N$  之间满足  $M = N - 1$ ;③介质的几何厚度增加时,TE 和 TM 模的透射谱均向长波端移动,禁带的宽度增加,反之亦然。当介质的几何厚度的变化量相同,两模透射谱中禁带宽度的变化量也相同。上述结论对于进行由单负材料组成的一维周期光子晶体偏振特性的理论研究具有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] Fang Yuntian. Effect of random fluctuation of structure parameters on optical properties of one-dimensional photonic crystal [J]. Journal of Synthetic Crystal, 2008, 37(1): 243 - 247. (in Chinese)  
方云团. 一维光子晶体结构参数的随机扰动对其光学特性的影响 [J]. 人工晶体学报, 2008, 37(1): 243 - 247.
- [2] Xue H, Zheng Z R, Gu P F, et al. A novel filter with low angle effect [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(6): 3983 - 3987. (in Chinese)  
薛辉, 郑臻荣, 顾培夫, 等. 一种新型的低角度效应的

- 滤波器[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 3983 - 3987.
- [3] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission solid state physics and electronics [J]. Phys. Rev. Lett, 1987, 58(20): 2059 - 2062.
- [4] Zhang Z R, Long Z W, Yuan Y Q, et al. The band structure of symmetrical structured 1-D photonic crystal with single-negative materials[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(1): 587 - 591. (in Chinese)  
张正仁, 隆正文, 袁玉群, 等. 对称型单负交替一维光子晶体的能带结构[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 587 - 591.
- [5] Zhang H Y, Zhang Y P, Su X Y. A Transfer matrix method for analyzing the character of reflectivity in finite period 1-D photonic crystal [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2004, 10(1): 38 - 41. (in Chinese)  
张会云, 张玉萍, 苏希玉, 等. 传输矩阵法分析有限周期光子晶体的反射谱特征[J]. 量子光学学报, 2004, 10(1): 38 - 41.
- [6] Liu Qineng, Long Tao, Lin rui, et al. Filtering feature of 1-D flat-panel doping photonic crystal I [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(4): 427 - 430. (in Chinese)  
刘启能, 龙涛, 林睿, 等. 一维平板掺杂光子晶体的滤波特性[J]. 激光与红外, 2010, 40(4): 427 - 430.
- [7] Li Wensheng, Fu Yanhua, Shi Dufang. Study of transmission properties of quasi-periodic 1-D photonic crystal containing left-handed materials [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2009, 15(3): 274 - 278. (in Chinese)  
李文胜, 付艳华, 是度芳. 含左手材料的一维准周期光子晶体的透射特性研究[J]. 量子光学学报, 2009, 15(3): 274 - 278.
- [8] Zhang ling, Liang L, Zhang L L, et al. Study of band-structure of 1-D photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(9): 1815 - 1818. (in Chinese)  
张玲, 梁良, 张琳丽, 等. 一维光子晶体带隙结构研究[J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1815 - 1818.
- [9] Yu Ziming, Liao Shuzhi. Many narrow defect modes in the transmission spectrum of 1-D defect photonic crystal [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(4): 422 - 426. (in Chinese)  
于志明, 廖树帜. 一维缺陷光子晶体多个禁带中的窄带缺陷模[J]. 激光与红外, 2010, 40(4): 422 - 426.