

文章编号: 1000-7032(2009)05-0678-04

## 色散光子晶体 GHz 波段的传输特性

张正仁<sup>1</sup>, 隆正文<sup>1</sup>, 袁玉群<sup>2</sup>

(1. 贵州大学 物理系, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 电子系, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 将两单负材料耦合后,再与一双负材料交替生成光子晶体。然后利用传输矩阵法对该光子晶体的能带和缺陷模进行了研究。结果表明:这种结构的光子晶体具有一种新型的光子带隙,不随晶格常数的缩放而移动;当引入普通电介质缺陷层时,缺陷模对入射角的改变不敏感,但缺陷模个数随着缺陷层厚度的增加而增多。

**关键词:** 光子晶体; 传输矩阵; 光子带隙; 缺陷模

**中图分类号:** O431.1

**PACS:** 42.70.Qs

**PACC:** 4225B

**文献标识码:** A

## 1 引 言

光子晶体是一种介电常数周期变化的人工微结构的介质,其典型的结构为一个介电常数周期为波长量级变化的三维结构材料。光子在光子晶体中的行为具有类似于电子在凝聚态物质中的行为,可能存在类似于半导体能带结构中的禁带,称之为光子带隙。频率落在光子带隙内的电磁波不能在光子晶体中传播<sup>[1,2]</sup>。光子晶体这一禁带特点有广泛应用前景,如:可以制作光滤波器、光开关、光混频器和光存储器等<sup>[3-6]</sup>。

负折射率材料是由 Veselago<sup>[7]</sup>于1968年提出理论假设,并由 Pendry<sup>[8]</sup>、Smith 等人<sup>[9,10]</sup>在2000年左右第一次制备出的。负折射率材料具有负的 $\epsilon, \mu$ ,又称双负材料。在负折射率材料中,电磁波的 $E, H$ 和波矢 $k$ 构成左手定则<sup>[11,12]</sup>。负折射率材料具有一些奇异的光学和电磁学特性,如:反常多普勒效应,交界面上的反常折射现象和原子自发辐射率的改变等。

除了双负材料外,单负材料也引起了人们关注。单负材料分两种,一种是电单负材料,即 $\epsilon < 0, \mu > 0$ ;一种是磁单负材料,即 $\epsilon > 0, \mu < 0$ 。由两种单负材料交替生成的周期性结构表现出一些与负折射率材料相似的性质,即在这种结构中有效群速度和有效相速度平行相反。在两种单负材料组

成的双层结构中表现出完全隧穿、共振和透明效应。

我们利用传输矩阵法,研究了由两单负材料耦合后与一双负材料交替生成的色散光子晶体在GHz波段的传输特性。结果表明:(1)这种光子晶体具有不随光子晶体单元厚度变化而发生改变的\*\*新型光子带隙\*\*。(2)引入一种普通正折射率材料缺陷层后,缺陷模对入射角的改变不敏感,但对于缺陷层厚度的改变敏感。

## 2 物理模型和计算方法

考虑由两单负材料耦合后再与一双负材料交替生成的光子晶体的结构为 $[(AB)C]^m$ , $m$ 表示周期数。设A为磁单负材料,介电常数和磁导率表示为: $\epsilon_A = a, \mu_A = 1 - \omega_{mp}^2/\omega^2$ ,其中 $\omega < \omega_{mp}$ ;B为电单负材料,介电常数和磁导率表示为: $\epsilon_B = 1 - \omega_{ep}^2/\omega^2, \mu_B = b$ ,其中 $\omega < \omega_{ep}$ ;C为双负材料,介电常数和磁导率表示为: $\epsilon_C = 1 - \omega_{ep}^2/\omega^2, \mu_C = 1 - \omega_{mp}^2/\omega^2$ ,其中, $(\omega < \omega_{ep}, \omega < \omega_{mp})$ 。这里, $\omega_{ep}$ 和 $\omega_{mp}$ 分别为电等离子体和磁等离子体的特征频率, $a, b$ 为正常量。

根据文献[13],电磁波在分层介质中的传输特性可以用传输矩阵表示。利用麦克斯韦方程组,可以得到任意一层(第 $j$ 层)内的光场满足的波动方程:

收稿日期: 2009-01-19; 修订日期: 2009-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(10865003)资助项目

作者简介: 张正仁(1981-),男,山东临沂人,主要从事光子晶体及负折射率材料方面的研究。

E-mail: zhrenzhang@126.com

$$\frac{\partial^2 E_j(z)}{\partial z^2} + k_{jz} E_j(z) = 0 \quad (1)$$

方程的一般解可表示为:

$$E_j = E_{+j} \exp[ik_{jz}(z - z_j)] + E_{-j} \exp[-ik_{jz}(z - z_j)] \quad (2)$$

$z_j$  是界面坐标。用 2-分量波函数矢量来描述第  $j$  层的电磁场分布, 即:

$$\varphi_j(z) = \begin{bmatrix} E_j(z) \\ icH_j(z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

则电磁场满足如下矩阵关系

$$\varphi_j(z + \Delta z) = M_j(\Delta z, \omega) \varphi_j(z) \quad (4)$$

其中

$$M_j(\Delta z, \omega) = \begin{pmatrix} \cos[k_z^j \Delta z] & i \frac{1}{q_j} \sin[k_z^j \Delta z] \\ iq_j \sin[k_z^j \Delta z] & \cos[k_z^j \Delta z] \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中, 波矢  $k_z^j = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_j \mu_j \sqrt{1 - (\sin^2 \theta / \epsilon_j \mu_j)}}$ ,

TE 波:  $q_j = \sqrt{\epsilon_j} / \sqrt{\mu_j \sqrt{1 - (\sin^2 \theta / \epsilon_j \mu_j)}}$ ,

TM 波:  $q_j = \sqrt{\mu_j} \theta / \sqrt{\epsilon_j \sqrt{1 - (\sin^2 \theta / \epsilon_j \mu_j)}}$

利用电磁场的切向分量在界面上的连续条件, 并设衬底的折射率为 1, 可得透射系数为:

$$t(\omega) =$$

$$\frac{2 \cos \theta}{\cos \theta [x_{11}(\omega) + x_{22}(\omega)] + i [\cos^2 \theta x_{12}(\omega) - x_{21}(\omega)]} \quad (6)$$

其中,  $x_{ij}$  是以下矩阵的矩阵元

$$X_N = \prod_{j=1}^N M_j(d_j, \omega) \quad (7)$$

这里,  $d_j$  是第  $j$  层的厚度, 它的序列与多层膜体系的结构一致。

透射率则为:

$$T = |t(\omega)|^2 \quad (8)$$

### 3 结果与讨论

考虑由两单负材料耦合后与一双负材料交替生成  $[(AB)C]^{16}$  的周期结构。设  $\epsilon_A = 1.5, \mu_B = 1.5, \omega_{ep}$  和  $\omega_{mp}$  分别取为 12 GHz。

#### 3.1 禁带性质

如下图 1 所示, 我们模拟了在两耦合材料厚度为:  $\frac{d_A}{d_B} = \frac{24}{12}$  (mm) (实线),  $\frac{19.2}{9.6}$  (mm) (虚线),  $\frac{12}{6}$  (mm) (点划线),  $d_C = 12$  mm, 入射角  $\theta = 0$  情况下和  $\frac{d_A}{d_B} = \frac{24}{12}$  (mm), 入射角  $\theta = 0$  (实线),  $\frac{\pi}{6}$  (虚线),  $\frac{\pi}{3}$

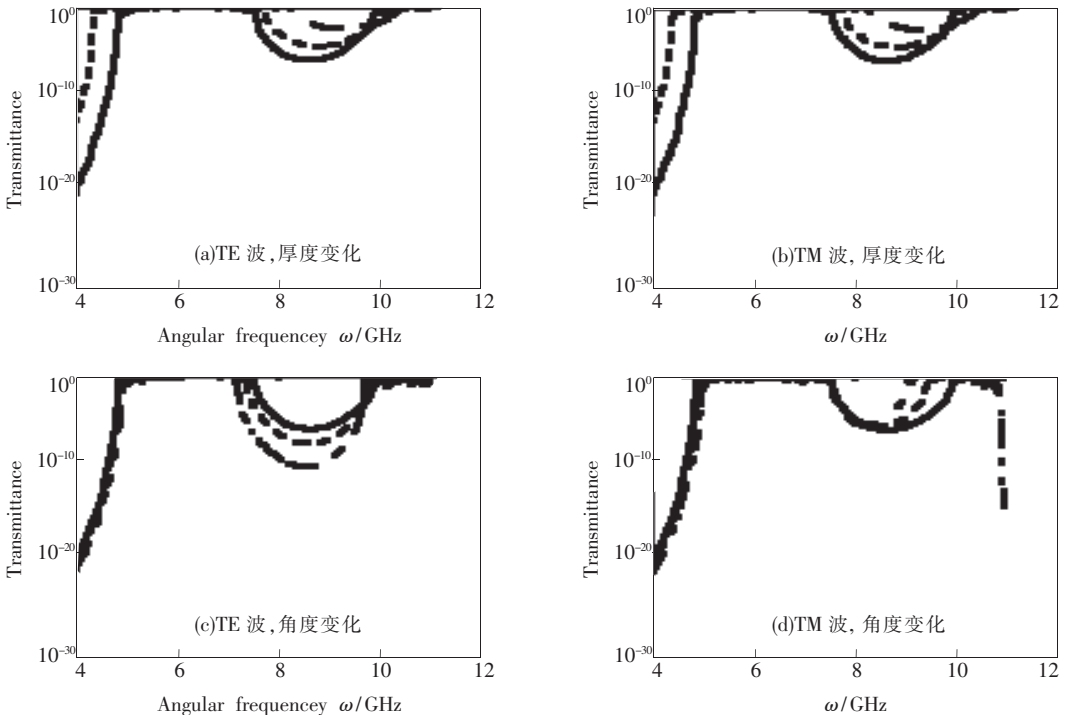


图 1 光子晶体的透射谱

Fig. 1 Transmission spectra of photonic crystal

(点划线)情况下的 TE、TM 偏振波入射时的透射谱。

对 TE 和 TM 波,从图 1(a)、(b)可以看出,TE、TM 偏振时,禁带宽度相同,禁带的频谱位置也是相同的。说明此种光子晶体的禁带随厚度变化不明显,厚度对这种光子晶体的禁带影响不大。当入射角逐渐增加时,对 TE 波来说,禁带的宽度随入射角的增加而变宽。TM 波的禁带宽度随入射角的增加而变窄。说明入射角对这类结构的光子晶体的禁带有一定影响。

由以上分析可知,这类结构的光子晶体禁带对入射角的改变敏感,对厚度的改变不敏感。这一点与 Bragg 带隙截然不同,Bragg 带隙起源于周期性结构的 Bragg 散射,光子带隙的中心频率与晶格常数成正比,晶格常数的缩放必然引起禁带的移动。这是一种新型的带隙结构,其生成的主要原因是各层中电磁表面膜的相互作用。由此看来,这种新型的带隙结构可以避免常规光子晶体禁带因随机厚度误差而产生的影响。

### 3.2 缺陷模性质

在上述两单负材料耦合后与一双负材料交替生成的光子晶体的中间引入一缺陷层 D,原来的周期性受到破坏,在原来禁带中出现缺陷模。我们所取模型结构为  $[(AB)C]^8D[(AB)C]^8$ , D 为正折射率的普通电介质缺陷层,  $\varepsilon_D = 2, \mu_D = 2$ 。我们将得到的透射率取为以 10 为底的对数,然后用灰度图表示出来。在灰度图中,亮度跟透射率的对数成正比关系,黑色区域表示禁带,而在黑色区域中的亮线表示缺陷模。

我们对缺陷层的研究取了两种情况:(1)固定缺陷层厚度  $d_D = 24$  mm,入射角从 0 增加到  $\frac{\pi}{3}$ ,如图 2(a)、(b)所示;(2)在垂直入射情况下,缺陷层厚度从 1~70 mm 变化,如图 2(c)、(d)所示。

从图 2(a)、(b)中可以看出,入射角的改变,对 TE、TM 波影响相同,禁带中都有一条倾斜的亮线,表明入射角对缺陷模有轻微的影响,但不敏感于入射角的改变。由图 2(c)、(d)可以看出,随着缺陷层厚度的增加,对 TE、TM 偏振波逐渐有两个缺陷模出现在原来的禁带中,并且两个缺陷模的频率都变小。在这里我们可以把缺陷层视为 F-P 共振腔,当正折射率材料作为缺陷层时,其厚度增加能增加光子晶体的光程,所以同一共振模频率减小。同时我们还可以看出缺陷层厚度的增

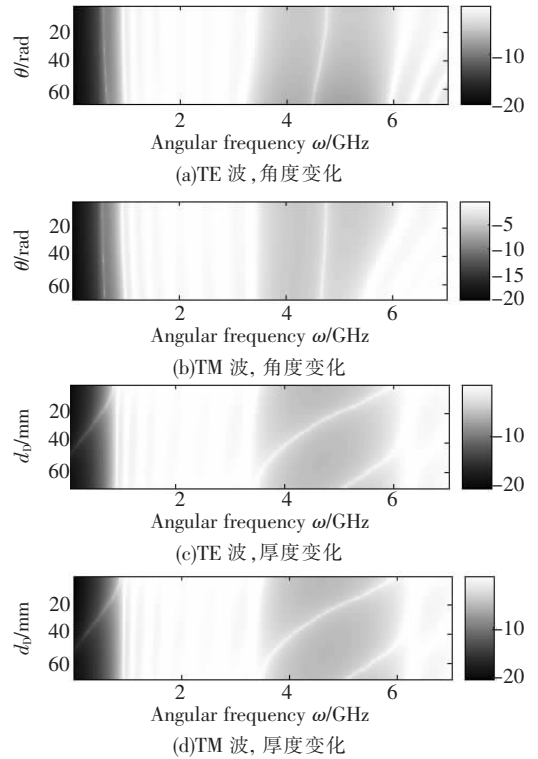


图 2 掺杂光子晶体的缺陷模与入射角度或缺陷层厚度变化的关系

Fig. 2 The relationship between defect mode and incidence angle or defect layer width in doped photonic crystal

加对 TE、TM 偏振波影响也相同。

由以上分析可知,引入缺陷层后,缺陷模对入射角的改变不敏感,但缺陷层厚度的变化对 TE、TM 波影响都比较明显。并且随着缺陷膜厚度的增加在禁带中出现的缺陷模个数增多。随着厚度的增加,整个结构可以同时实现多重滤波功能。而传统光子晶体难以同时实现多重滤波功能,只能分开实现。

## 4 结 论

利用传输矩阵法研究了由两单负材料耦合后与一双负材料交替生成的光子晶体的能带和缺陷模。结果表明:这种光子晶体有一种新型光子带隙,这类光子带隙对入射角的改变敏感,但对晶格常数的缩放不敏感,这就可以避免常规光子晶体禁带因随机厚度误差而产生的影响。引入缺陷层后,缺陷模对入射角的改变不敏感,但缺陷层厚度的变化对 TE、TM 波影响都比较明显,并且随着缺陷膜厚度的增加在禁带中出现的缺陷模个数增多。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58** (20):2059-2062.
- [ 2 ] Yin Chengping, Liu Nianhua. Transmission properties of one-dimensional photonic crystals containing negative refraction materials [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2005, **26**(2):173-176 (in Chinese).
- [ 3 ] Labilloy D, Benisty H, Weibuch C, *et al.* Demonstration of cavity mode between two-dimensional photonic-crystal mirrors [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(23):1978-1980.
- [ 4 ] Fan S, vk II eneuve P R, Joannopoulos J D. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(17):3294-3297.
- [ 5 ] Trull J M, Artorell J, Vilascca R. Angular dependence of phase-matched second-harmonic generation in a photonic crystal [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(10):2581-2585.
- [ 6 ] Yamada S, Koyama T, Katayarm Y, *et al.* Observation of light propagation in two-dimensional photonic crystal-based bent optical waveguides [J]. *Appl. Phys.*, 2000, **89**(2):855-858.
- [ 7 ] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1966, **10** (4):509-514.
- [ 8 ] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18):3966-3969.
- [ 9 ] Smith D R, Kroll N. Negative refractive index in left-handed materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(14):2933-2936.
- [ 10 ] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, **292** (5514):77-79.
- [ 11 ] Puppin R. Surface polaritons of a left-handed medium [J]. *Phys. Lett. A*, 2000, **277**(2):61-64.
- [ 12 ] Ziolkowski R W. Wave propagation in media having negative permittivity and permeability [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **64** (5):56625-56640.
- [ 13 ] Liu N H, Zhu S Y, Chen H, *et al.* Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(4):046607-1-8.

## Transmission Characteristic of GHz Wave Band in Dispersive Photonic Crystal

ZHANG Zheng-ren<sup>1</sup>, LONG Zheng-wen<sup>1</sup>, YUAN Yu-qun<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Department of Electronics, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** By using transfer matrix, the band structures and defect mode of photonic crystals consisting of coupling single-negative materials and double-negative materials were studied. It was shown that this structure can possess a new type of photonic gap, which is invariant with scaling length. When a normal dielectric defect layer was inset, the defect mode is insensitive to the angle of incidence. However, the number of the defect modes increase with the increase of width of defect layer.

**Key words:** photonic crystals; transfer matrix; photonic gap; defect mode

**CLC number:** O431.1

**PACS:** 42.70.Qs

**PACC:** 4225B

**Document code:** A