Jun., 2010

文章编号: 1000-7032(2010)03-0445-04

# 含负折射率材料的异质结构光子晶体的光学传输特性

张正仁1,隆正文1,袁玉群2

(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:利用传输矩阵法研究了正负折射率材料构成的异质结构光子晶体的光学传输特性。结果表明:当人射波正入射时,在这种异质结构光子晶体内出现了光子带隙,并且带隙内出现了3个极窄的透射峰,这是正负交替光子晶体和常规材料构成的同周期一维异质结构光子晶体所不具有的新颖物理特性。计算了这种异质结构光子晶体的透射谱。发现:这3个透射峰不敏感于入射角的变化,而在带隙两侧的透射峰则会随着入射角增大统一向带隙靠近;能带敏感于晶格厚度和周期数的变化。

关 键 词:光子晶体;负折射率材料;传输矩阵

中图分类号: 0431

PACS: 42.70. Qs

PACC: 4225B

文献标识码: A

### 1 引言

光子晶体是 1987 年由 Yablonovitch 等人提出 的,它是一种介电常数周期变化的人工介质结构, 其最基本特征就是具有光子带隙。这种带隙是由 于光在周期介质中多次布拉格散射和多次干涉而 形成的,波长落在光子带隙中的电磁波被禁止传 播[1]。利用带隙特性,光子晶体可制作光开关、 光学延迟线、光滤波器等[2~7]。负折射率材料是 近年来国际上非常活跃的研究领域。它是由 Veselage<sup>[8]</sup>在1967年首先研究并提出理论假设, 并由 Pendry、Smith 等人在 2000 年左右研究并第 一次人工制备出的。负折射率材料是指介电常量  $\varepsilon$ 和磁导率  $\mu$  同时为负的材料,又称双负材料。 在其中波矢方向和能流方向相反,导致了相位随 光波的传播而减小。由于负折射率材料的奇异特 性弥补了很多传统材料的不足,如产生负折射、逆 多普勒效应和逆切伦科夫效应等[9~11]。

本文研究了由正负折射率材料构成的一维异质结构光子晶体的透射特性,发现:当入射波正入射时,在这种异质结构光子晶体内出现了光子带隙,并且带隙内出现了3个极窄的透射峰,这3个透射峰不敏感于入射角的变化。而在带隙两侧的透射峰则会随着入射角增大统一向带隙靠近。利用这一特性有望使我们设计出可以同时实现多重

超窄带滤波和全向多通道滤波的滤波器。值得注意的是这种异质结构光子晶体的能带敏感于晶格厚度和周期数的变化,这对我们在利用此结构光子晶体设计滤波器时具有一定的参考价值。

### 2 理 论

考虑一个由正折射率材料和负折射率材料交替生长成的一维光子晶体构成的异质结构  $(AB)^n(A'B')^m(AB)^n(A'B')^m$ 。这里 A(A') 和 B(B')分别表示正折射率材料和负折射率材料,m、n 分别为周期数。我们取正折射率介质A(A'):  $\varepsilon_A=5$ , $\mu_A=1.5$ ;负折射率介质 B(B'): $\varepsilon_B=1-\omega_{ep}^2/\omega^2$ , $\mu_B=1-\omega_{mp}^2/\omega^2$ , $\omega<\omega_{ep}$ , $\omega<\omega_{mp}$ 。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,取为 12 GHz。晶格厚度取为  $d_A=24$  mm, $d_B=24$  mm, $d_{A'}=12$  mm, $d_{B'}=24$  mm.

根据文献[12],电磁波在分层介质中的传输特性可以用传输矩阵表示。利用麦克斯韦程组,可以得到任意一层(第*j* 层)内的光场满足的波动方程:

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

方程的一般解可表示为:

$$E_{j} = E_{+j} \exp[ik_{jz}(z - z_{j})] + E_{-j} \exp[-ik_{jz}(z - z_{j})],$$

 $z_j$  是界面坐标。用 2-分量波函数矢量来描述第 j

E-mail: zhrenzhang@126.com

层的电磁场分布,即:

$$\varphi_{j}(z) = \begin{bmatrix} E_{j}(z) \\ icH_{j}(z) \end{bmatrix},$$
(3)

$$M_{i}(\Delta z, \omega) = \begin{bmatrix} \cos(k_{z}^{j} \Delta z) & -\frac{|\mu_{j}|}{\sqrt{\varepsilon_{j} \mu_{j} - \sin^{2} \theta}} \sin(k_{z}^{j} \Delta z) \\ \frac{\sqrt{\varepsilon_{j} \mu_{j} - \sin^{2} \theta}}{\mu_{i}} \sin(k_{z}^{\prime} \Delta z) & \cos(k_{z}^{j} \Delta z) \end{bmatrix},$$

式中, $k_z^j = \pm \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_j \mu_j - \sin^2 \theta}$ ,对于正折射材料取 "+",而对于负折射率材料取"-"。c为真空中 的光速。利用电磁场的切向分量界面上的连续条 件,设衬底的折射率为1,可得透射系数为:

$$t(\omega) = \frac{2\cos\theta}{2\cos\theta}$$

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

其中,x;;是以下矩阵的矩阵元

$$x_N = \prod_{i=1}^N M_j(d_j, \boldsymbol{\omega}), \qquad (7)$$

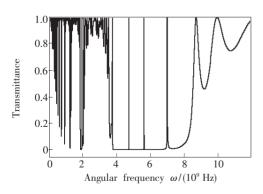
这里, $d_i$ 是第j层的厚度,它的序列与多层膜体系 的结构一致。

透射率则为:

$$T = |t(\omega)|^2, \tag{8}$$

#### 3 数值计算与分析

固定上述常量,在电磁波正入射的情况下,我 们研究了异质结构(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup>(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup> 的透射谱,如图1所示。



正入射时异质结构(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup>(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup> 图 1 的诱射谱

Fig. 1 Transmission spectrum of the heterostructure (AB)<sup>6</sup>-(A'B')<sup>6</sup>(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup> with normal incidence

从图1我们可以看到,这种异质结构光子晶 体具有光子带隙,在带隙中出现了三个极窄的透 则电磁场满足如下矩阵关系

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

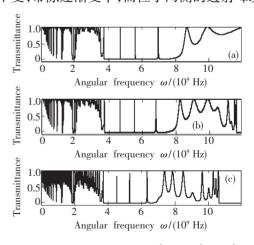
其中

$$-\frac{\mid \mu_{j} \mid}{\sqrt{\varepsilon_{j}\mu_{j} - \sin^{2}\theta}} \sin(k_{z}^{j}\Delta z)$$

$$\cos(k_{z}^{j}\Delta z)$$
(5)

射峰。这是一新颖的物理特性,这种结构的光子 晶体不需任何掺杂就可以实现多重超窄带滤波。 之所以在带隙中出现透射峰,可以用固体物理中 的紧束缚模型来解释。由于光子晶体由正负折射 率材料组成,当入射电磁波取一定能量值时,能量 会在界面上进行多重反射,这就导致了大部分电 磁场能量局域在界面上,形成特殊界面模式。透 射峰的强弱是由局域区场强的强弱造成的。而由 常规材料构成的相同周期的一维光子晶体的异质 结构中,只能出现一个透射峰[13],这是因为常规 材料构成的异质结构(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup>(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup> 中只有一个缺陷(这里把(A'B')6看做缺陷),所 以只有一个透射峰(缺陷模)出现在带隙中。

图 2 是计算所得的能带随入射角变化的透射 谱。我们分别随机以  $0 \times 0.15\pi \times \frac{\pi}{3}$  入射到异质结 构(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup>(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup>中。由图2可以 看出,当入射角逐渐增加时,三个透射峰的位置几 乎不变,带隙逐渐变窄,而位于两侧的透射峰统一



入射角改变时异质结构(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup>(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup> 的透射谱 (a)  $\theta = 0$ ; (b)  $\theta = 0.15\pi$ ; (c)  $\theta = \frac{\pi}{3}$ .

Transmission spectra of the heterostructure (AB)6-Fig. 2  $(A'B')^6(AB)^6(A'B')^6$  with the variation of incident angles (a)  $\theta = 0$ ; (b)  $\theta = 0.15\pi$ ; (c)  $\theta = \frac{\pi}{3}$ .

向带隙靠近,这一特性可用来进行全向多通道滤波。这与常规材料构成的异质结构不同,常规材料构成的一维光子晶体随入射角的增大,所有透射峰都向高频移动。

通过以上分析可知这种结构光子晶体具有正负交替光子晶体和常规材料构成的同周期的一维光子晶体的异质结构所不具有的一些新颖物理特性。由这些新颖的物理特性可以看出:这种结构光子晶体可以同时进行超窄带滤波和全向多通道滤波。因此我们可以利用这种结构光子晶体设计出同时具备多重超窄带滤波和全向多通道滤波功能的滤波器。

能带随晶格厚度的变化情况如图 3 所示。我们将晶格厚度分别变为原来的 3/4 和 5/4,在电磁波正入射到异质结构(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup>(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup>的情况下所得透射谱分别如图 3(a)、(b)所示。从图 3 的对比中,我们明显看到随着晶格厚度的减小原来的带隙逐渐消失,而随着晶格厚度的增加带隙变宽,透射峰仍然存在。可知,这种异质结构的能带敏感于晶格厚度的变化。

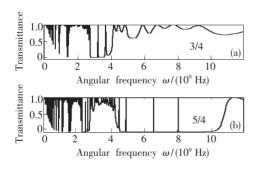


图 3 异质结构(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup>(AB)<sup>6</sup>(A'B')<sup>6</sup> 随晶格厚 度变化的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of heterostructure (AB) $^6$ - (A'B') $^6$ (AB) $^6$ (A'B') $^6$  with the changes of lattice thickness

为了使我们的研究趋于一般化,图 4 给出了在正人射且晶格厚度保持原来不变的情况下,周期数从 3~8 逐渐递增的透射谱。为方便说明,图 4 只是给出了周期数 m=n=3,4,7,8 的该光子晶体的透射图谱,分别如图 4(a)、(b)、(c)、(d)所示。从图中我们可以看出,随着周期数的逐渐增加整个能带结构带隙中的透射峰逐渐形成后又逐

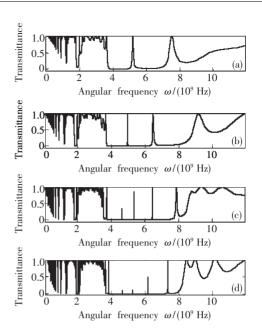


图 4 异质结构随周期变化的透射谱(a) m = n = 3; (b) m = n = 4;(c) m = n = 7;(d) m = n = 8。

Fig. 4 The transmission spectrum with the periodicity change (a) m = n = 3; (b) m = n = 4; (c) m = n = 7; (d) m = n = 8.

新消失。这说明周期数的变化对这种光子晶体的能带结构影响较大(当周期数为5和6时带隙内的透射峰是强烈的,透射率为1)。

### 4 结 论

利用传输矩阵研究了(AB)"(A'B')"(AB)"-(A'B')"型正负折射率材料构成的异质结构光子晶体的光学传输特性。结果表明:当入射波正入射时,在这种异质结构光子晶体内出现了光子带隙,并且带隙内出现了3个极窄的透射峰,这3个透射峰不敏感于入射角的变化。而在带隙两侧的透射峰则会随着入射角增大统一向带隙靠近。这是普通正负交替光子晶体和常规材料构成的相同周期的一维光子晶体的异质结构所不能做到的。利用这一特性有望使我们设计出可以同时实现多重超窄带滤波和全向多通道滤波的滤波器。值得注意的是这种异质结构的能带敏感于晶格厚度和周期数的变化,这对我们在利用此结构光子晶体设计滤波器时具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- (20):2059-2062.
- [2] Lidorikis E, Soukoulis C M. Pulse-driven switching in one-dimensional nonlinear photonic band gap materials: a numerical study [J]. *Phys. Rev.* E, 2000, **61**(5):5825-5829.
- [3] Satoshi Nishikawa, Sheng Lan, Naoki Ikeda, et al. Optical characterization of photonic crystal delay lines based on one-dimensional coupled defects [J]. Opt. Lett., 2002, 27(23):2079-2081.
- [4] Zhu Shiyao, Liu Nianhua, Zheng Hang, et al. Time delay of light propagation through defect modes of one-dimensional photonic band-gap structures [J]. Opt. Commun., 2000, 174(1-4):139-144.
- [5] Qiao Feng, Zhang Chun, Wang Jun, et al. Photonic quantum-well structures; multiple channeled filtering phenomena [J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 77(23):3698-3700.
- [6] Wang Zhengping, Wang Cheng. Transmission spectra of one-dimensional "Chirped" photonic crystal containing negative refraction materials [J]. Chin. J. Lumin. (发光学报), 2008, **29**(2):221-224 (in Chinese).
- [7] Li Hongtao, Shao Mingzhu, Luo Shiyu. Band structure of one-dimensional photonic crystal with dielectric constant as a sine-squared function in coordinate space [J]. Chin. J. Lumin. (发光学报), 2008, **29**(2):229-233 (in Chinese).
- [ 8 ] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously values of  $\varepsilon$  and  $\mu$  [ J ]. Sov. Phys. Usp. , 1966 , 10 (4) :509-514.
- [9] Smith D R, Kroll N. Negative refractive index in left-handed materials [J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85 (14): 2933-2936.
- [10] Klimov V V. Spontaneous emission of an excited atom placed near "left-handed" media [J]. Opt. Commun., 2002, 211 (4):183-187.
- [11] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85(18):3966-3969.
- [12] Liu N H, Zhu S Y, Chen H, et al. Superiuminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect [J]. Phys. Rev. E, 2002, 65(4):46607-46615.
- [13] Qin Q, Lu H, Zhu S N, et al. Resonance transmission modes in dual-periodical dielectric multilayer films [J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 82(26):4654-4656.

## Transmission Properties of Photonic Crystal Heterostructure Consisting of Negative Materials

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: Transmission properties of photonic crystal heterostructure consisting of negative materials was studied by transfer matrix. The results showed that, as the incident wave at normal incidence, not only a photonic gap appears in this kind of photonic crystal heterostructure but also three very narrow transmission peaks appear in this gap. The positive and negative alternating one-dimensional photonic crystal and the same periods of one-dimensional heterostructure photonic crystal, which consists of conventional materials, don't have this characteristic. Transmission spectrum of this kind of photonic crystal was calculated. It was found that the three transmission peaks are insensitive to the angle of incidence, but the transmission peaks on both sides of the gap will move to the gap with the increasing of the incident angles. The energy band is sensitive to the scale length of crystal lattice and the change of the periods number.

**Key words:** photonic crystal; negative materials; transfer matrix