

三层单负材料为周期单元对称型一维光子晶体的频率特性

王筠 肖明 靳海芹 童爱红 刘丹

(湖北第二师范学院物理与电子信息学院, 湖北 武汉 430205)

摘要 应用传输矩阵法研究了以三层单负材料为周期单元对称型一维光子晶体 $(ABC)_M(CBA)_M$ 。结果表明,其带隙结构对入射角的敏感程度与光波的偏振性有关,TE波的高频通带会随着入射角的增大向中心频率移动,而TM波的带隙结构对入射角的变化不敏感。研究还发现各介质层厚度的变化对能带结构的影响规律不相同。当保持各介质层厚度比不变,成倍增大各介质层厚度,高、低频通带变窄并向中心频率移动,低频区通带首先消失。当改变各介质层厚度比时,若保持A、C层厚度不变,减小B层厚度,高、低频通带分别向两侧移动同时收缩变窄;若保持B层厚度不变,增大A、C层厚度,高、低频区通带同样变窄,低频区通带首先消失,带隙同样变宽。最后研究了该光子晶体的零有效相位带隙结构,发现其通带随晶格常数的增大逐渐向中心频率移动同时收缩变窄,这一特性可以用来设计单通道窄带零有效相位延迟滤波器。

关键词 光电子学;光子晶体;光子带隙;零有效相位带隙;传输矩阵;单负材料

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.062602

Frequency Characteristics of Symmetrical Structured One-Dimensional Photonic Crystal Consisting of the Cycle Unit of Three Single-Negative Materials

Wang Yun Xiao Ming Jin Haiqin Tong Aihong Liu Dan

(College of Physics and Electronic Information, Hubei University of Education, Wuhan, Hubei 430205, China)

Abstract The one-dimensional photonic band gap of symmetrical structured consisting of the cycle unit of three single-negative materials in the form of $(ABC)_M(CBA)_M$ are studied by the transfer matrix method. The results show that this kind of symmetrical structured one-dimensional photonic crystal has a special photonic band gap whose sensitivity to the angle of incidence is related to the nature of the light waves. TE wave high-frequency passband will move to the central frequency with the increase of the angle of incidence. The angle gap at the high-frequency band simultaneously enlarges with the increasing of the incident angle. But TM wave passband is not sensitive to the angle of incidence. When the ratio of the thicknesses of three media is unchanged, and the dielectric layers thickness is exponentially increased, high-frequency passband and low-frequency passband respectively shrank and narrowed, moving to the central frequency, and the low-frequency passband first disappears. When varying the ratio of the thicknesses of three media, keeping the A and C layer thickness unchanged and reducing the B layer thickness, high-frequency passband and low frequency passband respectively move to both sides and contract themselves at the same time. Maintaining the B layer thickness and increasing the A and C layer thickness, the high-frequency passband and the low-frequency passband are both shrunk, the low frequency passband first disappears. They all lead to the brodening of the band gap. We also found that the passband width of multiple heterostructures whose average permittivity and permeability are gradually narrowed with the increase of the lattice constant. This feature can be used to design omni-directional single-channel filters, and omni-directional zero-phase-shift filters.

收稿日期: 2012-02-06; **收到修改稿日期**: 2012-03-14; **网络出版日期**: 2012-04-28

基金项目: 湖北第二师范学院校管科研项目(2009B011)资助课题。

作者简介: 王筠(1966—),女,硕士,副教授,主要从事一维光子晶体理论及应用等方面的研究。

E-mail: wangyun.2007.6.5@163.com

Key words optoelectronics; photonic crystal; photonic band gap; zero-effective-phase gap; transfer matrix method; single-negative material

OCIS codes 260.1180; 350.4238; 160.5298; 160.3918

1 引言

光子晶体是一类由介电常数周期分布的非均匀人工电磁微结构。光子晶体的概念最早是由美国 Yablonovitch 和 John 在 1987 年分别在研究如何抑制自发辐射和无序电介质材料中的光子局域时各自独立提出的。光在光子晶体中传播时与光子晶体相互作用形成光子带隙。光子带隙是光子晶体最重要的特征,频率落在光子带隙中的电磁波是禁止传播的,所以人们可以利用光子晶体的光子带隙来控制光波的传播^[1~3]。近年来,含超常材料的光子晶体由于其奇异特性和潜在应用价值受到极大关注^[4~10]。超常材料包括介电常数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负的双负材料($\epsilon < 0, \mu < 0$) 以及负介电常数材料($\epsilon < 0, \mu > 0$) 与负磁导率材料($\mu < 0, \epsilon > 0$) 的单负材料。电磁波在单负材料中的波矢量是复数,只能形成倏逝波,所以单负材料对电磁波是不透明的。然而,由两种不透明单负材料交替组成的光子晶体,一定频率范围的电磁波在其中发生共振隧穿而完全能够通过。近来关于由两种单负材料组成的一维光子晶体的光子带隙的研究已经有很多^[4~10],而以三层单负材料为周期单元的一维光子晶体的能带结构的研究还未见报道,本文应用传输矩阵法研究了以三层单负材料为周期单元对称型一维光子晶体 $(ABC)_M(CBA)_M$ 的能带结构,研究发现这种能带结构与由两种单负材料交替构成的一维光子晶体具有不同的变化规律,对入射角的敏感程度与光波的性质有关,并会出现角度带隙。各介质层的厚度对能带结构的影响不同,其中结构周期单元中心介质层 B 层厚度的影响较其两侧介质层 A、C 层更显著。还研究了该光子晶体的零有效相位带隙结构,发现随结构晶格常数增大,通带向中心频率移动并收缩变窄,这一特性可以用来设计单通道窄带零有效相位延迟滤波器件。

2 理论模型

如图 1 所示是一个由负介电常数和负磁导率材料交替生成的一维光子晶体 $(ABC)_M(CBA)_M$,其中 A(或 C)是均匀各向同性负介电常数材料,B 是均匀各向同性负磁导率材料,由于单负材料通常是色散的,它们的电磁参数分别为

$$A: \epsilon_A = 1 - \frac{\alpha}{\omega^2}, \quad \mu_A = 8 \quad (1)$$

$$B: \epsilon_B = 2, \quad \mu_B = 1 - \frac{\beta}{\omega^2} \quad (2)$$

$$C: \epsilon_C = 1 - \frac{\alpha}{\omega^2}, \quad \mu_C = 9 \quad (3)$$

式中 $\alpha = \beta = 100$, ω 是电磁波的角频率,单位是 10^{15} rad/s,且入射电磁波的频率必须满足 $\omega < 10 \times 10^{15}$ rad/s,才能保证各介质层为单负材料。A、B、C 各层的厚度依次为 d_A, d_B 和 d_C , M 是结构周期数,假设整个结构处于空气中。

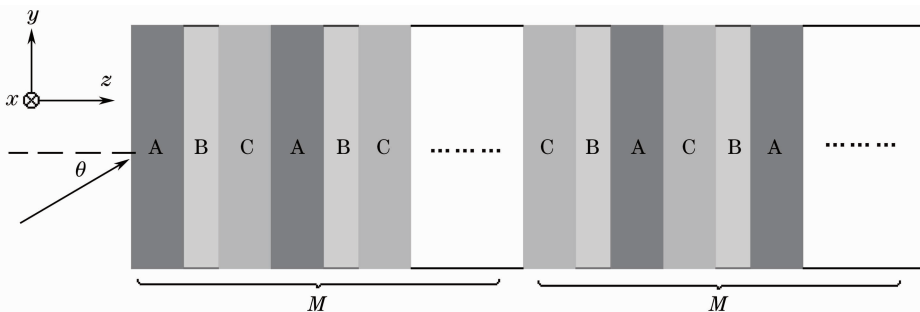


图 1 三层单负材料为周期单元对称型一维光子晶体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of symmetrical structured one-dimensional photonic crystal consisting of the cycle unit of three single-negative materials

3 计算方法

设一电场 \mathbf{E} 沿 x 轴方向的 TE 波由空气以入射角 θ 斜入射到由负介电常数材料和负磁导率材料交替生成的一维光子晶体 $(ABC)_M(CBA)_M$ 结构上 ($z > 0$), 如图 1 所示。运用传输矩阵法可以推得, 在该结构同一层的任意两个位置 z 和 $z + \Delta z$ 处的电场强度分量和磁场强度分量间满足以下矩阵关系^[4]:

$$M_j(\Delta z, \omega) = \begin{pmatrix} \cos(k_z^j \Delta z) & -\frac{\mu_j}{\sqrt{\epsilon_j \mu_j - \sin^2 \theta}} \sin(k_z^j \Delta z) \\ \frac{\sqrt{\epsilon_j \mu_j - \sin^2 \theta}}{\mu_j} \sin(k_z^j \Delta z) & \cos(k_z^j \Delta z) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中 $j = A, B, C$ 分别代表各材料层, 而

$$k_z^j = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_j \mu_j - \sin^2 \theta}, \quad (5)$$

是各单负材料中的有效波矢量, c 为真空中的光速。利用电磁场切向分量在界面上连续的条件, 可以得到置于空气中的该结构透射系数为^[4]

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

式中 $x_{i,j}$ ($i = 1, 2$) 是连接入射端和出射端总的传输矩阵

$X_N(\omega) = \prod_{j=1}^N M_j(d_j, \omega)$ 的矩阵元。对于横磁波 TM 波, 根据对应关系, 只需将单负材料的介电常数 ϵ_j 替代(4)式中的磁导率 μ_j 即可。

4 数值计算与分析

首先考察结构周期数 M 对 TE 波正入射时透射谱的影响, 假设 A、B、C 各层厚度分别取 $d_A = 1.0 \times 10^{-8}$ m, $d_B = 0.5 \times 10^{-8}$ m, $d_C = d_A = 1.0 \times 10^{-8}$ m, 该结构周期数 $M = 8$ 。图 2 是 TE 波正入射时的透射谱随结构周期数 M 分别取 $M = 8$ 和 $M = 17$ 的透射谱。从图 2 中知道结构周期数 M 对禁带宽度基本没有影响, 只是随着周期数 M 的增大, 在带隙边缘附近出现了更多的隧穿模。

接着考察光波入射角 θ 对带隙的影响, 图 3 是 TE 波的透射谱随入射角 θ 的变化情况, 从图中可以看到随着入射角的增大, 高频区域通带向中心频率移动, 并在高频区出现了文献[7]中提到的角度带隙(图 3 中, 当 $\theta = \pi/3$ 时, 角度带隙在: $\omega = 9.2 \sim 9.99 (\times 10^{15}$ rad/s) 之间), 而低频区域通带位置保持不变, 中心带隙两侧附近出现越来越多隧穿模。图 4 是 TM 波透射谱随入射角 θ 的变化情况, 显然图中带隙结构对入射角变化不是特别明显, 但中心带隙两侧的隧穿模随入射角增大也出现不断增多趋势。因此, 由三层单负材料组成周期单元

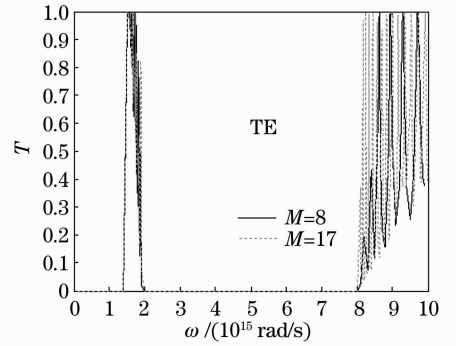


图 2 TE 波正入射透射率随周期数的变化
Fig. 2 TE wave normal incidence transmittance changes with different number of cycles

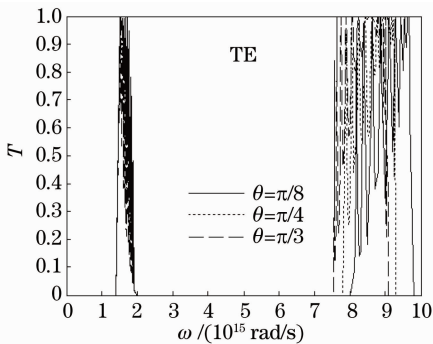


图 3 TE 波透射率随入射角的变化
Fig. 3 TE wave transmittance changes with different angles of incidence

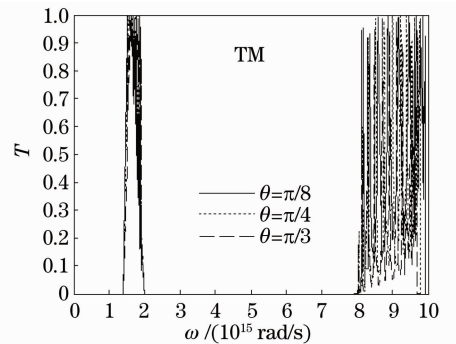


图 4 TM 波透射率随入射角的变化
Fig. 4 TM wave transmittance changes with different angles of incidence

的一维光子晶体带隙结构对入射角的敏感度与波的性质有关,TE波的带隙结构会随着入射角的改变而发生显著变化,并会产生角度带隙。

图3和图4所反映的入射角对能带的影响可以根据固体物理的紧束缚模型解释,由于各介质层边界上的隧穿模是局域化的,随着入射角的增大,隧穿模趋于简并,带隙两侧的隧穿模向中心带隙边缘移动。

考虑到一维光子晶体的能带结构与各介质层的厚度关系紧密,下面来考察正入射时各介质层厚度比对透射谱的影响情况。由于篇幅所限,下面的讨论仅限于TE波。

图5(a)是保持各介质层厚度比不变,即 $d_A:d_B:d_C=1:0.5:1$,周期结构的晶格常数为 $d=d_A+d_B+d_C$,依次将各介质层厚度增大相同倍数,即2倍和3倍,使得结构晶格常数依次变为 $2d,3d$ 分别绘出透射谱曲线。图中反映出透射谱在低频和高频区域的通带宽度随着晶格常数的增大逐渐变窄,低频区通带向高频移动直至消失,高频区通带向低频移动,中心的带隙宽度逐渐变窄;在晶格常数变为原来3倍时,整个透射谱带隙变得很宽,通带变得非常狭窄尖锐。

为了考察周期单元中心介质层B层的厚度对透射谱的影响,图5(b)计算了固定A、C层厚度,减小B层厚度时的透射谱,并与原透射谱进行比较。图中的圆点线对应各介质层厚度比 $d_A:d'_B:d_C=1:0.25:1$,从图中可以看到随着B层厚度减小,结构晶格常数随之减小,中心区域的禁带变宽,低频区域的通带在向更低频区移动的同时也变窄了。这说明周期单元中心介质层厚度的改变对该结构的带隙影响显著,随着B层厚度的减小中心带隙变宽,两侧通带变窄。

图5(c)计算了固定B层厚度,增大A、C层厚度时的透射谱,并与原透射谱进行比较,图中圆点线对应各介质层厚度比 $d'_A:d_B:d'_C=1.5:0.5:1.5$,图5(c)中虚线对应各介质层厚度比是 $d''_A:d_B:d''_C=2.5:0.5:2.5$ 。从图中反映出由于A、C层厚度的增大,结构晶格常数随之增大,其中心禁带宽度逐渐变宽,低频区通带宽度变窄直至消失,高频区通带向高频移动变窄,原带隙边缘的隧穿模逐渐消失。

根据固体物理紧束缚模型理论,在保持各介质层厚度比不变的前提下,各层厚度按相同比例增大,局域在两个单周期交界面上的隧穿模的波函数相互交叠减少,形成的通带就变窄[如图5(a)所示]。而在图5(b)中,由于周期单元的中心介质层B层厚度的减小,使得局域在B层边界处的隧穿模与两侧A、C层交界面距离减小,隧穿模之间的相互作用加强,则频率间的裂距变大,隧穿模向两侧移动,带隙变宽。在图5(c)中,由于保持周期单元中心介质层B层厚度不变,增大其两侧介质层A、C层的厚度,使得局域在两个单周期交界面以及B层与A、C层的隧穿模波函数相互交叠减少,形成的通带就会变窄,带隙变宽。

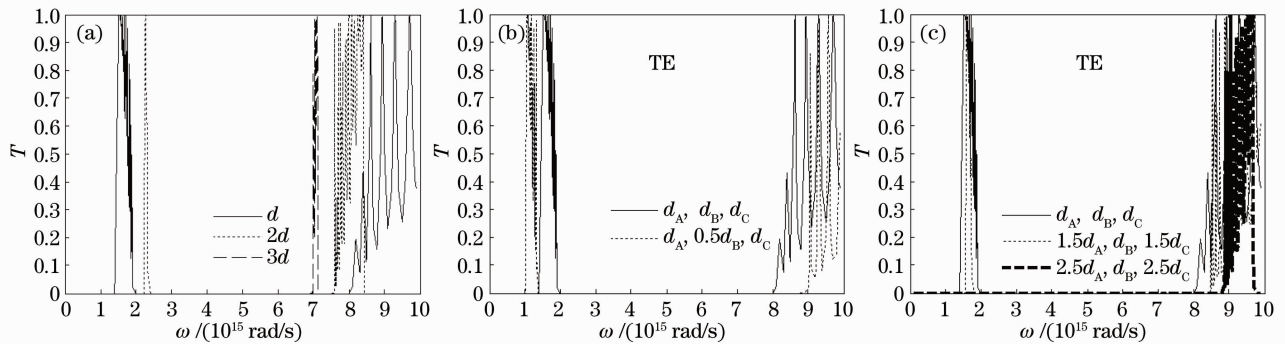


图5 TE波正入射的透射谱随晶格常数的变化

Fig. 5 TE wave normal-incidence transmittance changes with different lattice constants

最后来考察一类特殊情形,在保持各介质层电磁参数不变的前提下,适当选择各介质层的厚度,使它们满足平均介电常数和平均磁导率均为零,即^[4]

$$\bar{\epsilon} = \frac{2Md_A\epsilon_A + 2Md_B\epsilon_B + 2Md_C\epsilon_C}{2Md_A + 2Md_B + 2Md_C} = 0, \quad (7)$$

$$\bar{\mu} = \frac{2Md_A\mu_A + 2Md_B\mu_B + 2Md_C\mu_C}{2Md_A + 2Md_B + 2Md_C} = 0. \quad (8)$$

此时形成的光子带隙称为零有效相位带隙^[5],当光波在其中传播时不会产生相位延迟,这种结构的光子晶体

可以用来设计零有效相位延迟滤波器。

为满足(7)和(8)式,若取 $d_C = \frac{1}{9}d_A$, 则 $d_B = \sqrt{5}d_A$ 。

为了考察结构晶格常数的改变对零有效相位带隙的影响,图6中分别绘出在A层厚度依次取 $d_A = 1.0 \times 10^{-8}$ m, 2.0×10^{-8} m, 3.0×10^{-8} m 带隙随晶格常数的变化曲线图。从图中可以获知,随着A层厚度的增大,结构晶格常数随之增大,通带向中心频率收缩显著,隧穿模交叠减少,通带变得更尖锐,这为设计单通道窄带零有效相位延迟滤波器提供了理论依据。

5 结 论

本文应用传输矩阵法研究了以三层单负材料为周期单元对称型一维光子晶体 $(ABC)_M(CBA)_M$ 的能带结构,对结构周期数 M 的变化虽然不会导致带隙位置和宽度的改变,但是隧穿模向中心带隙边缘处聚集;入射角对带隙的影响程度与光波的性质有关,TE波的通带位置会随着入射角的增大由高频区向中心频率移动,使得高频区域出现不断增大的角度带隙;而TM波的通带位置对入射角的变化不敏感。研究还发现各介质层厚度的变化对能带结构的影响并不相同。当保持各介质层厚度比不变,成倍增大各介质层厚度时,高、低频区通带变窄并向中心频率移动,低频区通带变化较快首先消失。当改变各介质层厚度比时,结构周期单元中心层B层厚度的变化较其两侧A、C层厚度变化对带隙的影响更显著,保持A、C层厚度不变,减小B层厚度时,结构晶格常数随之减小,高、低频区通带分别向两侧移动同时收缩变窄,带隙变宽;而在保持B层厚度不变,增大A、C层厚度,结构晶格常数变大,此时高、低频区通带同样变窄,低频区通带首先消失,带隙也变宽。本文最后还研究了该光子晶体在平均介电常数和平均磁导率均为零时所形成的零有效相位带隙结构,发现其通带随晶格常数的增大而逐渐向中心频率移动同时收缩变窄,这一特性可以用来设计单通道窄带零有效相位延迟滤波器。

参 考 文 献

- Liu Qineng. Defect mode and mode of electromagnetic wave in cylindrical doping photonic crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 991~995
刘启能. 圆柱形掺杂光子晶体中电磁波的模式和缺陷模[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 991~995
- Wang Yali, Chen Yuanyuan, Shi Jielong. Influence of beam incoherence on the lateral shifts of defect modes in photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1226002
王雅莉, 陈园园, 施解龙. 光束非相干性对光子晶体缺陷模式透射位移的影响分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1226002
- Liu Qineng. Filtering feature of 1D rectangle doping photonic crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2041~2044
刘启能. 一维矩形掺杂光子晶体的滤波特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2041~2044
- Liu Nianhua, Zhu Shiyao, Chen Hong *et al.*. Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(4): 046607
- Jiang Haitao, Chen Hong, Li Hongqiang *et al.*. Properties of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials[J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**(6): 066607
- Wang Ligang, Chen Hong, Zhu Shiyao. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with single-negative materials[J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **70**(24): 245102
- Deng Xinhua, Liu Nianhua, Liu Genquan. Frequency response of photonic heterostructures consisting of single-negative materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12): 7280~7285
邓新华, 刘念华, 刘根泉. 单负材料光子晶体异质结构的频率响应[J]. *物理学报*, 2007, **56**(12): 7280~7285
- Chen Xianfeng, Jiang Meiping, Shen Xiaoming *et al.*. The defect modes in one-dimensional photonic crystal with multiple defects[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 5709~5712
陈宪锋, 蒋美萍, 沈小明 等. 一维多缺陷光子晶体的缺陷模[J]. *物理学报*, 2008, **57**(9): 5709~5712

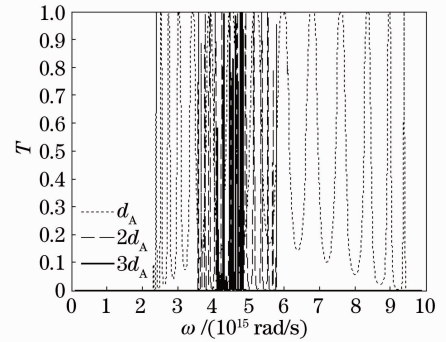


图6 零有效相位带隙随晶格常数变化

Fig. 6 Zero effective phase band gap changes with different lattice constant

- 9 Zhang Zhengren, Long Zhengwen, Yuan Yuqun *et al.*. The band structure of symmetrical structured one-dimensional photonic crystal with single-negative materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(1): 587~591
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
- 10 Zhang Ya'nan, Deng Lingling, Xu Fei. Study on defect modes in one-dimensional photonic crystals with periodic double defect layers of single-negative materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 148~152
张雅男, 邓玲玲, 徐 飞. 具有周期性双单负材料缺陷的一维光子晶体缺陷模的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 148~152