

含色散特性的负折射材料的一维光子晶体偏振特性的研究

林国华^{1,2}, 王永顺¹, 张羽²

(1 镇江船舶学院物理系, 江苏 镇江 212003)

(2 南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 研究了一种含色散特性的负折射材料的一维光子晶体的缺陷模特性, 分别研究了 TE 波和 TM 波的带隙结构, 研究表明, 两种模的带隙特性随入射角的变化而变化, 高频部分的带隙变化很大, 为色散特性的负折射材料在实际中的应用提供了理论指导.

[关键词] 光子晶体, 偏振特性, 色散特性的负折射材料

[中图分类号] O 436 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2010)02-0043-03

Study on Properties of Polarization of One-Dimension Photonic Crystal Comprised by a Dispersive Negative-Index Material

Lin Guohua^{1,2}, Wang Yongshun¹, Zhang Yu²

(1. Department of Physics, Zhenjiang W atercraft College, Zhenjiang 212003, China)

(2. School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract Band gaps of one-dimension photonic crystal containing dispersive negative-index material and positive-index material are studied. Band gaps of TE wave and TM wave are calculated, and from the results we can find that the properties of the band gaps are changed by the change of the incident angle which has theoretical significance for using the dispersive negative-index material.

Key words photonic crystal, properties of polarization, dispersive negative-index material

光子晶体是一种介电常数周期性变化的人工光学材料, 具有半导体相类似的带隙结构, 是当前光学前沿研究的热点之一.

一些文献研究了一维光子晶体透射率随入射角的变化而变化以及 TE 波和 TM 波的透射随频率的变化而响应的曲线^[1-6]. 由负折射材料 (NM) 组成的零平均折射率 ($\overline{n_{\text{zero}}=0}$) 的新型光子晶体具有许多特别的性质^[7,8]. 本文研究了一种含色散特性的负折射材料的一维光子晶体的透射率的色散特性和偏振特性^[7].

1 模型和计算理论

由 A, B 两种不同材料交替组成的一维光子晶体, A 为正折射材料 (PM), B 为负折射材料 (NM), 相应的厚度分别为 d_A, d_B , 介电常数为 ϵ_A, ϵ_B , 磁导率为 μ_A, μ_B , 对应的折射率分别为 $n_i = \pm \sqrt{\epsilon_i \mu_i}$, $i = A, B$ (为负折射材料 B 时取负号).

本文采用了特征矩阵法^[8,9]来计算电磁波在此种晶体中的传播特性, 若电磁波从真空中以角度 θ 入射到由 PM 和 NM 组成的周期结构, 均匀厚度的介质层的表面平行于 xy 平面, 对于 TE 波, 电场分量和磁场分量由 z 处到 $z + \Delta z$ 处可以表示为传输矩阵:

收稿日期: 2009-05-05

基金项目: 国家教育部重点实验室合作项目 (NS2006005), 江苏省地理信息科学重点实验室开放基金 (JK20050304).

通讯联系人: 林国华, 博士, 讲师, 研究方向: 电磁场与电磁波. E-mail: lgh79@163.com

$$\begin{bmatrix} \cos(k_z \Delta z) & -\frac{\mu}{\sqrt{\epsilon\mu - \sin^2\theta}} \sin(k_z \Delta z) \\ \frac{\sqrt{\epsilon\mu - \sin^2\theta}}{\mu} \sin(k_z \Delta z) & \cos(k_z \Delta z) \end{bmatrix}, \tag{1}$$

其中 $k_z = \pm(\omega/c) \sqrt{\epsilon\mu - \sin^2\theta}$ 正折射材料 A 时取“+”，负折射材料 B 时取“-”。对于整个光子晶体而言，特征矩阵为：

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_A \boldsymbol{M}_B \cdots = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

从而得到透射系数为：

$$t(\omega) = \frac{2\cos\theta}{(x_{11} + x_{22})\cos\theta + i(x_{12}\cos\theta - x_{21})}, \tag{3}$$

透射率为：

$$T(\omega) = t(\omega) \times t(\omega)^*, \tag{4}$$

对于 TM 波也有类似于上述的传输矩阵，从而可以用来研究 TM 波的缺陷特性
对于具有色散特性的各向同性的负折射材料 (NM) 的介电常数和磁导率分别为^[7]：

$$\epsilon(\omega) = \epsilon - \frac{\alpha}{\omega^2}, \tag{5}$$

$$\mu(\omega) = \mu - \frac{\beta}{\omega^2}, \tag{6}$$

其中， $\epsilon = 1.21$ ， $\mu = 1.0$ 和 $\alpha = \beta = 100$

2 研究结果和分析

在整个研究中取参数为： $n_A = 2.0$ $d_A = 12\text{mm}$ ， $d_B = 6\text{mm}$ $n_B = -\sqrt{\epsilon_B \mu_B}$ (其中 ϵ_B 、 μ_B 可用 (5) (6) 式计算得到)， $w_0 = 2\pi \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ，整个晶体层数为 32 (即 16 个周期)。入射角为零时的透射谱特性如图 1 所示，在低频和高频处都有一个较宽的带隙。

图 2 研究了透射率随入射角度的变化关系。其中 (a) 图为 TE 波的透射谱随入射角度的变化曲线，由图可以看出，随着入射角度的增大，低频区的带隙几乎没有变化，而高频区的带隙向高频方向移动 (入射角为 $5\pi/12$ 时比入射角为 0 时的位置向高频方向移动了约 $0.7w_0$)，同时宽度增加 (入射角为 $5\pi/12$ 时比入射角为 0 时的宽度增加了近一倍)，带隙的深度也增加；(b) 图为 TM 波的透射谱随入射角度的变化曲线，由图同样可以看出，随着入射角度的增大，低频区的带隙几乎没有变化，而高频区的带隙向高频方向移动，但宽度明显减小，深度也减小 (入射角为 $4\pi/12$ 时的透射率几乎为 1)。所以可以通过改变入射角度来改变透射谱以及透射波中的 TE 波和 TM 波的成分。

图 3 同时画出了 TE 波和 TM 波的透射谱。可以看出，在低频区，随着入射角的增加，二者的透射谱线差异不大；而在高频区，入射角为零时相同，但随着入射角的增大，透射谱线明显分开，TE 波的带隙变宽变深，而 TM 波的带隙变窄变浅。由式 (5) (6) 可知，在低频区，频率的变化对介电常数和磁导率的影响比较小，所以 TE 波和 TM 波的透射谱的差异不大；随着频率的增加，对介电常数和磁导率的影响变大，透射谱的差别就会明显。

图 4 给出了 $\pi/3$ 时高频区的透射谱。可以发现在很大的频率区域 TM 波全透射，而 TE 波全反射，从而将二者分开，可以利用这个特性得到合适的 TM 波或者 TE 波。

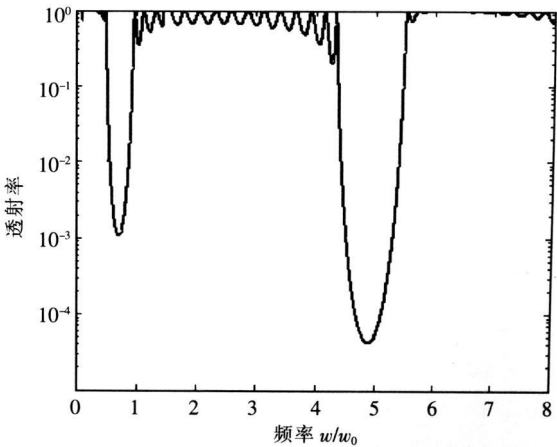


图 1 入射角为零时的透射率

Fig.1 Transmittance with zero as incident angle

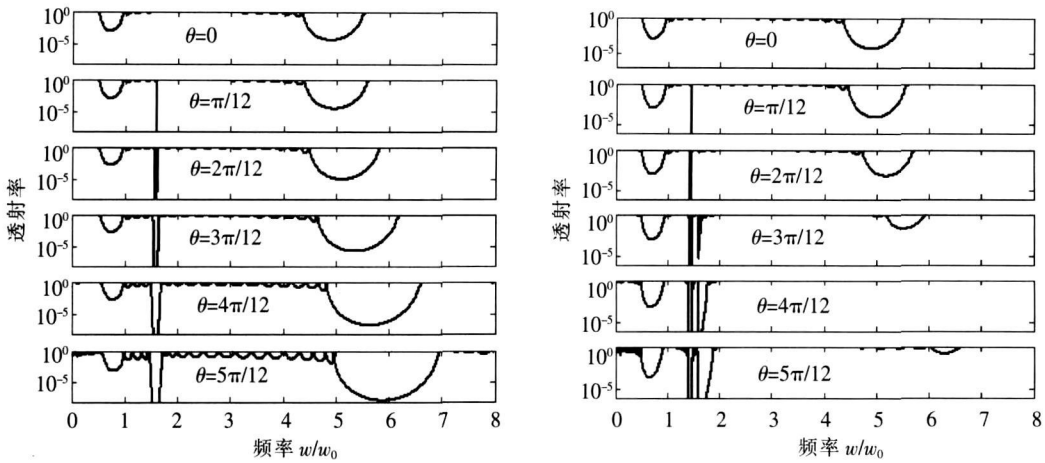


图 2 透射率随入射角的变化曲线
Fig.2 Transmittance with different incident angle

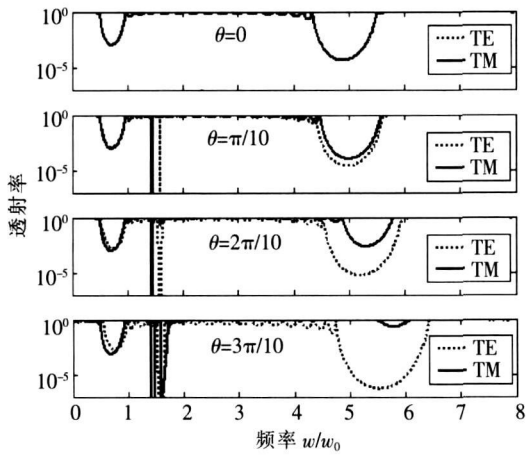


图 3 TE 和 TM 波透射谱的比较
Fig.3 Comparison of the transmittance of TE and TM

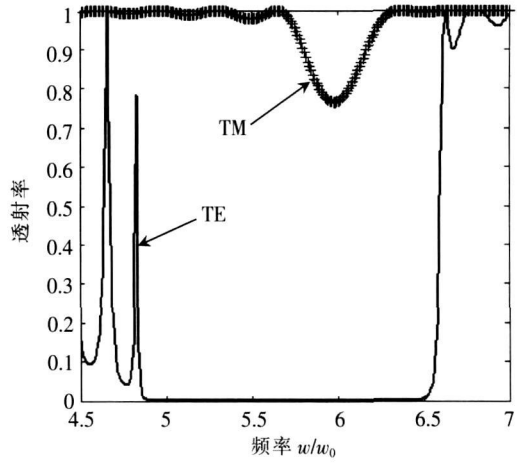


图 4 入射角为 $\pi/3$ 时的透射率
Fig.4 Transmittance with incident angle $\pi/3$

3 小结

利用传输矩阵法研究了一种含色散特性的负折射材料的一维光子晶体的偏振特性, 主要研究了 TE 波、TM 波的透射谱受入射角的影响. 发现在低频区, TE 波、TM 波的透射谱差异不大, 并几乎不受入射角的影响; 在高频区, 二者的差异较大, 差异和入射角也有关系, 同时带隙随着入射角的增大向高频区移动. 由于二者在高频区的差异, 可以在反射光中得到纯度很高的 TE 波, 而在透射光中得到纯度很高的 TM 波 (如当入射角为 $\pi/3$ 时, TE 波、TM 波可以在很大频率区域分开), 此特性有很好的实际应用价值.

[参考文献]

[1] 蒋美萍, 江兴方. 一维光子晶体的偏振特性的研究 [J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 612-616
[2] 刘启能. 一维光子晶体的偏振特性 [J]. 半导体光电, 2006, 27(6): 729-732
[3] 李蓉, 任坤. 一维光子晶体带隙结构对不同偏振态的角度和波长响应 [J]. 物理学报, 2004, 53(8): 2 520-2 525
[4] 金钗, 黄正逸. 光子晶体缺陷模的偏振特性研究 [J]. 激光技术, 2007, 31(3): 277-280
[5] 刘启能. 一维光子晶体缺陷模偏振特性的研究 [J]. 光子学报, 2007, 36(8): 1 431-1 434
[6] 王同标, 刘念华. 正负折射材料组成的一维光子晶体的能带及电场 [J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5 878-5 882
[7] Jiang Haitao, Chen Hong. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals containing negative-index materials [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(26): 5 386-5 388
[8] 尚廷义, 郑义. 含负折射率材料一维光子晶体的全方位带隙和缺陷模 [J]. 光子学报, 2007, 36(4): 663-665
[9] 王辉, 李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构 [J]. 物理学报, 2001, 50(11): 2 172-2 178

[责任编辑: 顾晓天]