

含空气缺陷层的单负材料一维光子晶体特性研究

张亚军 韩 鹏 林 超

(华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 采用传输矩阵法系统研究了含空气缺陷层的单负材料一维光子晶体光学特性。发现在禁带中出现的透射峰随着缺陷层厚度的增加向低频方向移动,这与传统正折射率材料构成的结构类似。但是,该透射峰位置并不能用传统的有效介质理论来确定。而且,透射峰的频率位置几乎不受入射角度和平面波的偏振状态的影响,表明该透射峰的形成并不是由于布拉格效应,而应归因于单负折射率材料的相位消除效应。因此,含空气缺陷层的单负材料光子晶体,其缺陷峰的性质具有与传统缺陷结构和纯粹单负材料缺陷结构不同的性质,利用这些特性可以设计一种全角、可调的光子晶体滤波器。

关键词 光子晶体; 单负材料; 缺陷模; 滤波器; 传输矩阵法

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0193

Air Defect in One-Dimensional Photonic Crystal Heterostructures with Single-Negative Materials

Zhang Yajun Han Peng Lin Chao

(College of Physics and Telecommunications Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract By using the transfer matrix method, the defect modes of one-dimensional photonic crystals composed of single-negative materials are investigated. The transmission peaks in band gaps shift to the low-frequency side with the increase of the layer thickness of the air defect layer, which accords with the properties of the photonic crystals composed of traditional positive materials. However, the position of the peak is found to be insensitive to the incident angle as well as polarization of the incident light, which implies the formation of the peak cannot be contributed to the Bragg effect, but the phase elimination effect. The results show that the structure is different from the structures composed of pure positive or negative materials. These properties of the structure show the potential application of omnidirectional tunable photonic filters.

Key words photonic crystals; single negative materials; defect mode; filter; transfer matrix method

1 引 言

近年来,人们对传统材料光子晶体结构的滤波现象做了广泛的研究^[1~5]。这些结构包括缺陷结构^[3]、量子阱结构^[4]和含缺陷的抑制结构^[5]。布拉格散射导致光子带隙中出现离散的局域模,从而产生光子禁带。在一维情况下,局域模和布拉格带隙会随着入射角度和偏振态的变化发生明显偏移。这些特性决定了其只能制作正入射滤波器。为了突破这种限制,很多研究人员对特异材料^[6,7]做了大量

的研究工作,发现含负折射率材料^[8]光子晶体的局域模几乎不受入射角度和偏振态的影响,但是其局域模并不是完全不受入射角的影响,所以它只能制作成较大入射角滤波器;而对含单负材料^[9~14]光子晶体抑制结构研究发现,当抑制结构的平均介电常数和磁导率为零时,禁带中会出现隧穿模。它完全不受入射角度和偏振态的影响而且有零相位延迟的特性可以用来设计全角、零相位延迟滤波器^[15]。

特异材料是一种介电常数和(或)磁感应常数为

基金项目: 国家自然科学基金(10504008)资助课题。

作者简介: 张亚军(1983—),男,硕士研究生,主要从事特异材料光子晶体方面的研究。E-mail: tea774@yahoo.com.cn

导师简介: 韩 鹏(1976—),男,博士,副教授,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: hanp@scnu.edu.cn(通信联系人)

负值的材料,自然界中并不存在。人们主要是通过金属或半导体上刻划出分裂环和细导线等微细结构的方法来制作这种特异材料,使得两个常数在某些频段小于零。目前,实际制备出的这种材料大多数还是工作在微波段,最近有报道研制出工作在可见光段的特异材料^[16]。同样通过刻蚀的办法将这种材料进行周期性的排列即可制成含特异材料的光子晶体,如果在刻蚀过程中,适当控制刻蚀的区域变化,还可以引入空气的缺陷层。

然而,目前关于含缺陷的特异材料光子晶体的研究还不多,因此本文利用传输矩阵方法,研究了含单负材料光子晶体异质结构中空气缺陷导致的光学性质。研究表明,含空气缺陷层的单负材料一维光子晶体也会出现透射峰,随着空气缺陷厚度的增加,透射峰向低频方向移动。但是透射峰的位置几乎不随入射角度的变化而改变。利用这些特性可以设计一种全角、可调的滤波器。

2 理论结构模型

让平面电磁波在真空中以入射角 θ 射入含空气缺陷层单负材料抑制结构 $(AB)_m D (B1A1)_n$, 如图 1 所示: $A(A1)$ 为负介电常数材料、 $B(B1)$ 为负磁导率材料、 D 为空气缺陷层、 $m(n)$ 为周期数。

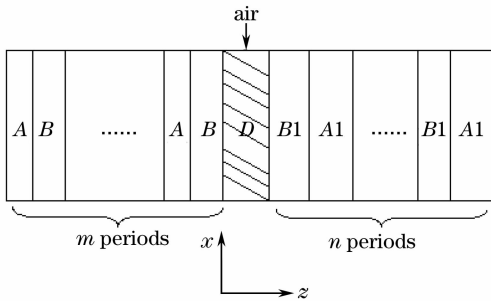


图 1 含空气缺陷层一维光子晶体异质结构 $(AB)_m D (B1A1)_n$ 示意图

Fig. 1 Schematic of a heterostructure constituted by two different 1D photonic crystals $(AB)_m D (B1A1)_n$ with single-negative materials

假设^[11]

$$\epsilon_A = \epsilon_a - \frac{\omega_{ep}^2}{\omega^2}, \quad \mu_A = \mu_a, \quad (1)$$

为负介电常数材料所满足条件。

$$\epsilon_B = \mu_B, \quad \mu_B = \mu_b - \frac{\omega_{mp}^2}{\omega^2}, \quad (2)$$

为负磁导率材料所满足条件。

$$\epsilon_D = 1, \mu_D = 1, \quad (3)$$

为空气缺陷层所满足条件。这里 $\epsilon_{ep}, \epsilon_{mp}$ 分别表示电

子等离子频率和磁等离子频率。(1)式、(2)式中的色散特性可通过 L-C 负荷传输线制作的异向介质在微波段实现^[17]。 ω 为角频率单位是 GHz。在以下的计算中, $\epsilon_a = \mu_b = 1, \mu_a = \mu_b = 3, \omega_{ep} = \omega_{mp} = 10$, 周期数 $m = n = 8$ 。负介电常数材料、负磁导率材料和空气缺陷层的厚度分别为 $d_A = 6 \text{ mm}, d_{A1} = 16 \text{ mm}, d_B = 12 \text{ mm}, d_{B1} = 10 \text{ mm}, d_D$ 厚度可调。下面我们利用传输矩阵法(TMM)^[6,18]研究含空气缺陷层的单负材料一维光子晶体 $(AB)_8 D (B1A1)_8$ 的光学特性。

3 计算原理

平面电磁波在真空中沿与 z 轴正方向夹角为 θ 角射入一维光子晶体。在这里电场和磁场在同一介质内任意两点 z 和 $z + \Delta z$ 处可以用下面矩阵表示

$$\mathbf{M}_j(\Delta z, \omega) = \begin{bmatrix} \cos(k_z^j \Delta z) & -i p_j \sin(k_z^j \Delta z) \\ -i p_j \sin(k_z^j \Delta z) & \cos(k_z^j \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $k_z^j = (\omega/c) \sqrt{\epsilon_j} \sqrt{\mu_j} \sqrt{1 - \sin^2 \theta / (\epsilon_j \mu_j)}$ 表示介质中 z 轴方向的波矢。

在 TE 偏振波下

$$p_j = \sqrt{\epsilon_j} / \sqrt{\mu_j} \sqrt{1 - \sin^2 \theta / (\epsilon_j \mu_j)}, \quad (5)$$

在 TM 偏振波下

$$p_j = \sqrt{\mu_j} / \sqrt{\epsilon_j} \sqrt{1 - \sin^2 \theta / (\epsilon_j \mu_j)}, \quad (6)$$

而 $j = A, B, A1, B1, D$ 表示负介电常数材料、负磁导率材料和空气缺陷层。

用传输矩阵法算出透射率系数:

$$t(\omega) = \frac{2q_0}{(q_s x_{11} + q_0 x_{22}) q_0 + (q_0 q_s x_{12} + x_{21})}, \quad (7)$$

式中 $q_0 = q_s = \sqrt{\epsilon_0} / \sqrt{\mu_0} \sqrt{1 - \sin^2 \theta / (\epsilon_0 \mu_0)} = \cos \theta$ 表示真空中平面波入射之前和出射之后的导纳修正。

4 计算结果及分析

在图 2 中计算了正入射情况下空气缺陷层厚度 d_D 分别为 6 mm, 12 mm, 24 mm 时 $(AB)_8 D (B1A1)_8$ 的透射率。对于含单负材料的光子晶体,在一定频率下系统满足 $\bar{\epsilon} = \bar{\mu} = 0$ 时,在此频率处会出现透射峰。引入空气缺陷层后,在理论上也能满足 $\bar{\epsilon} = \bar{\mu} = 0$ 条件。即

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon_A(m d_A + n d_{A1}) + \epsilon_B(m d_B + n d_{B1}) + \epsilon_D d_D}{m(d_A + d_B) + n(d_{A1} + d_{B1}) + d_D} = 0,$$

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_A(m d_A + n d_{A1}) + \mu_B(m d_B + n d_{B1}) + \mu_D d_D}{m(d_A + d_B) + n(d_{A1} + d_{B1}) + d_D} = 0, \quad (8)$$

在 d_D 分别取 6 mm, 12 mm, 24 mm 时, 频率分别为 0.7924 GHz, 0.7891 GHz, 0.7858 GHz 时满足 $\bar{\epsilon} = \bar{\mu} = 0$ 。假设这个理论对含缺陷结构也成立的

话, 在这些频率处会出现透射峰。数值计算结果如图 2 所示。

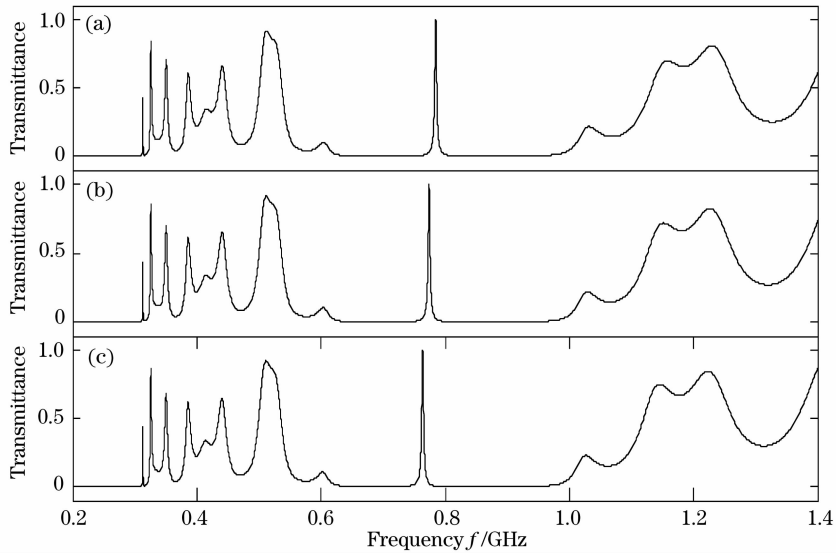


图 2 缺陷层厚度改变对透射峰的影响。(a)缺陷厚度为 6 mm; (b)缺陷厚度为 12 mm; (c)缺陷厚度为 18 mm

Fig. 2 Transmittance spectra of the photonic crystal heterostructure with different thicknesses of defect layer.

(a) $d_D = 6$ mm; (b) $d_D = 12$ mm; (c) $d_D = 18$ mm

研究表明在缺陷层厚度不同的情况下均出现了透射峰, 且透射峰的位置随着缺陷层厚度的增加向低频方向移动。可通过改变缺陷层厚度来调节透射峰的位置, 利用它的这种特性可设计一种可调的滤波器。还发现实际上透射峰所对应的位置分别为 0.7847 GHz, 0.7740 GHz, 0.7637 GHz 这和理论计算的结果 0.7924 GHz, 0.7891 GHz, 0.7858 GHz 并不吻合, 所以 $\bar{\epsilon} = \bar{\mu} = 0$ 并不能很好的解释含空气缺陷层的单负材料一维光子晶体抑制结构中出現透射峰的现象。图 3 是透射峰位置随缺陷层厚度逐渐增加的变化图, 可发现在一定范围内它们之间的关

系是近似线性的。

接下来改变入射角度, 计算了入射角度对透射峰的影响。选取缺陷层厚度 $d_D = 0.006$ mm 不变, 入射角度分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 89^\circ$ 时数值计算结果如图 4 所示。

结果发现, 在不同入射角度下, 透射峰出现的位置分别为 0.7847 GHz, 0.7862 GHz, 0.7890 GHz, 0.7904 GHz。所以在入射角度较小时, 透射峰位置几乎不随角度的变化而改变。

最后研究了在正入射情况下, 平面波的偏振状态对透射峰的影响。图 5 是缺陷层厚度为 $d_D = 0.006$ mm 时, 入射光分别为 TE、TM 波下的透射峰图像。

研究表明, 在正入射情况下透射峰的位置不随入射光的偏振状态的影响。

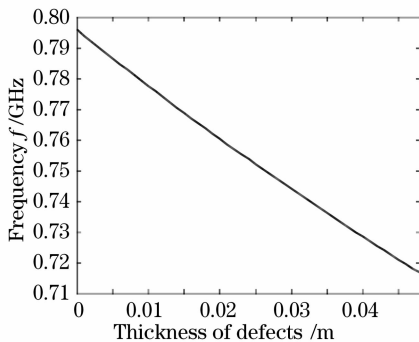


图 3 缺陷层厚度变化对透射峰的影响

Fig. 3 High transmittance peaks at various thickness of defect layer

4 结 论

研究了含空气缺陷的单负材料一维光子晶体的光学特性。发现在其禁带中会出现透射峰, 改变缺陷层的厚度, 透射峰的位置也会变化。且透射峰几乎不受入射角度和入射光偏振状态的影响。利用这些特性可以设计一种全角、可调的光子晶体滤波器。

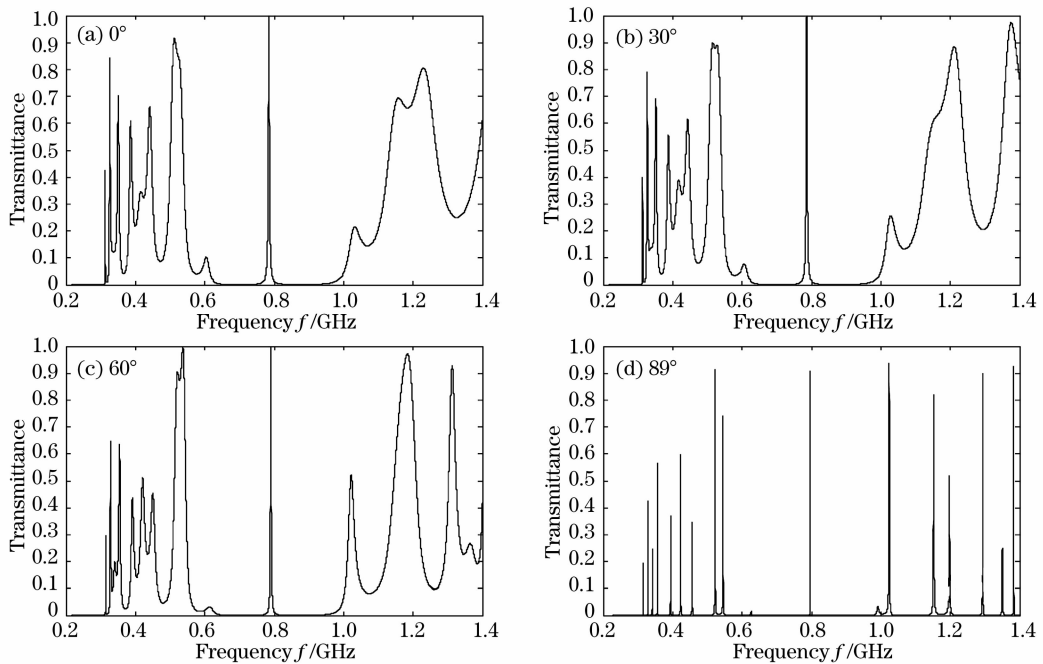


图 4 不同入射角对透射峰的影响

Fig. 4 Variance of the transmittance spectra of a heterostructure with the incident angles

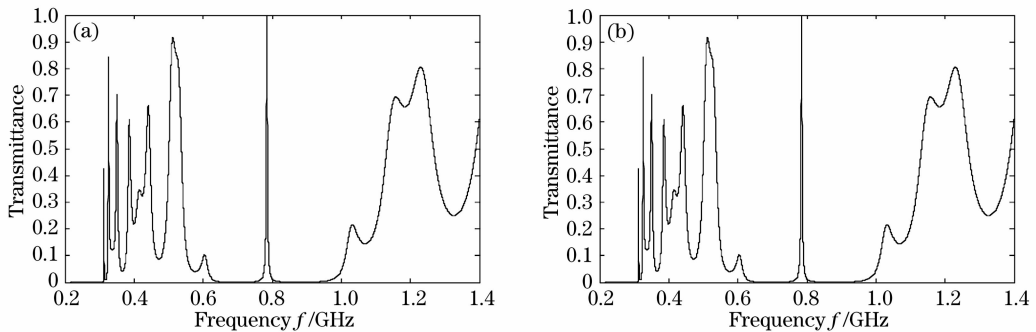


图 5 入射光偏振状态对透射峰的影响。(a)入射光为 TE 波;(b)入射光为 TM 波

Fig. 5 Transmittance spectra of the photonic crystal heterostructure with TE and TM wave. (a) TE wave; (b) TM wave

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 H. Y. Lee, H. Makino, T. Yao *et al.*. Si-based omnidirectional reflector and transmission filter optimized at a wavelength of 1.55 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(24): 4502~4504
- 4 F. Qiao, C. Zhang, J. Wan *et al.*. Photonic quantum-well structures: Multiple channelled filtering phenomena[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(23): 3698~3700
- 5 Z. S. Wang, L. Wang, Y. G. Wu *et al.*. Multiple channelled phenomena in heterostructures with defects mode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(10): 1629~1631
- 6 H. T. Jiang, H. Chen, H. Q. Li *et al.*. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals containing negative-index materials[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(26): 5386~5388
- 7 K. Y. Xu, X. G. Zheng, C. L. Li *et al.*. Design of omnidirectional and multiple channelled filters using one-dimensional photonic crystals containing a defect layer with a negative refractive index[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(6): 066604~066605
- 8 R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77~79
- 9 D. R. Fredkin, A. Ron. Effectively left-handed (negative index) composite material[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(10): 1753~1755
- 10 A. Lakhtakia, J. A. Sherwin. Orthorhombic materials and perfect lenses[J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 2003, **24**(1): 19~23
- 11 A. Aù, N. Engheta. Pairing an epsilon-negative slab with a mu-negative slab: Resonance, tunneling and transparency[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, **51**(10): 2558~2571
- 12 A. Lakhtakia, C. M. Krowne. Restricted equivalence of paired epsilon-negative and mu-negative layers to a negative phase-

- velocity material (alias left-handed material)[J]. *Optik*, 2003, **114**(7): 305~307
- 13 H. T. Jiang, H. Chen, H. Q. Li *et al.*. Properties of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**(6): 066607~066612
- 14 H. T. Jiang, H. Chen, H. Q. Li *et al.*. Compact high-Q filters based on one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(1): 013101~013106
- 15 Guosheng Guan, Haitao Jiang, Hongqiang Li *et al.*. Tunneling modes of photonic heterostructures consisting of single-negative materials[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(21): 211112~211115
- 16 Jason Valentine, Shuang Zhang, Thomas Zentgraf *et al.*. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index [J]. *Nature*, 2008, **455**(7211): 372~377
- 17 G. V. Eleftheriades, A. K. Lyer, P. C. Kremer. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(12): 2702~2712
- 18 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics[M]. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 1999