

波在不同色散特异介质一维光子晶体中的传播

席 锋, 胡 莉

(重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

摘 要:对由两种不同色散模型的负折射特异介质构成的光子晶体,利用传输矩阵法研究了微波段的电磁波在其中传播特性。两种特异介质均为双负,TE波和TM波以相同的角度入射,有相同的带隙结构,且带隙结构对入射角不敏感。其中一种特异介质为电单负,而另一种特异介质为双负时,光子带隙对TE波的禁带随入射角的增大而展宽;而当入射角大于0.5 rad, TM波的禁带不再改变。结果表明,该结构的光子晶体带隙在某些频率内具有全向反射特性。

关键词:光子晶体;色散;负折射;特异介质;全向反射

中图分类号:O436

文献标识码:A

Wave Propagation in a One-dimensional Photonic Crystal with Different Dispersive Metamaterial

XI Feng, HU Li

(Computer and Information Engineering College, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Photonic crystal is composed with two different dispersive metamaterials-negative refractive index materials. Transmission spectra are obtained by transfer matrix in microwave region. When two materials all are double negative, band structure is the same for TE and TM wave at the same incident angle, which is insensitive to the incident angle. For the one with negative permittivity and positive permeability and another with the double negative, Band-gap gets wide as the incident angle increases for TE wave. However, band gap remains when the incident angle is larger than 0.5 rad for TM wave. According to the results, band-gap of this photonic crystal can be act as omnidirectional reflector.

Key words: photonic crystal; dispersion; negative refractive; metamaterial; omnidirectional reflector

0 引言

光子晶体是由不同折射率介质周期性排列组成的人工晶体材料^[1-2],在过去20年间,由于其对电磁波(光波)独特的性质,引起人们关注^[3-6]。光子晶体最基本的特征是由于布喇格多重反射产生光子禁带(PBG),在禁带内禁止光子传播。通过调整光子晶体的结构、介电常数(或折射率)及晶格单元的大小可调制光子禁带的位置和宽度,从而可有效控制光子晶体中的传播行为,因此,被广泛应用于制作光波导、光子滤波器及全向反射镜等光子器件^[7-9]。

通常,光子晶体都由正折射率介质构成,它对入射光波的偏振态和入射角很敏感。不同入射角和偏

振态对应不同频率的带隙结构。由于 Veselago^[10]提出的负折射理论被 Smith 等^[11]实验证实,将负折射介质引入光子晶体中将会呈现许多新颖特性。负折射率介质是指介电常数和磁导率同时或其中之一为负数的合成人工材料,常称为特异介质。引入特异介质后由正负折射率介质构成的一维光子晶体对电磁波(光波),具有与传统光子晶体截然不同能带结构^[12-14]。

本文对由两种不同色散模型的特异介质构成的一维光子晶体,通过数值模拟,研究了不同偏振态入射时的带隙结构,以及带隙随入射角的变化。结果表明,该结构的一维光子晶体具有全向反射带。

收稿日期:2011-09-17

基金项目:重庆市教委科技基金资助项目(KJ100717)

作者简介:席锋(1976-),男(土家族),重庆人,讲师,博士生,主要从事光电子、光电技术及晶体材料的研究。E-mail: xifeng7429@ctbu.edu.cn。

1 模型

一维光子晶体由 A、B 两种均匀各向同性特异介质周期性交替排列组成,如图 1 所示。介质 A、B 的介电常数和磁导率分别为 ϵ_a, μ_a 和 ϵ_b, μ_b , 厚度为 d_a, d_b , 周期常数 $d = d_a + d_b$, 结构周期数为 N 。

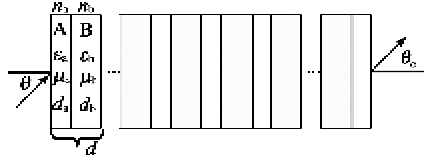


图 1 特异介质的一维光子晶体

入射波以 θ 从端面入射, 出射端面的透射波通过传输矩阵^[15] 计算得到。波在介质层中的传输矩阵^[16] 为

$$m_j = \begin{bmatrix} \cos k_j d_j & \frac{-i}{p_j} \sin k_j d_j \\ -i p_j \sin k_j d_j & \cos k_j d_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$k_j = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_j \mu_j} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon_j \mu_j}} \quad (2)$$

$$q_j = \frac{\sqrt{\epsilon_j}}{\sqrt{\mu_j}} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon_j \mu_j}} \quad (\text{TE 波}) \quad (3)$$

$$q_j = \frac{\sqrt{\mu_j}}{\sqrt{\epsilon_j}} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon_j \mu_j}} \quad (\text{TM 波}) \quad (4)$$

式中: ω 为角频率; c 为真空中的光速; ϵ_j 和 μ_j 分别为介质的介电常数和磁导率, $j = a, b$ 。各介质层上的入射角 θ_j 与端面入射角 θ 的关系为

$$\cos \theta_j = \sqrt{1 - \frac{n_0^2 \sin^2 \theta}{n_j^2}} \quad (5)$$

$$n_j = \pm \sqrt{\epsilon_j \mu_j} \quad (6)$$

当 ϵ_j 和 μ_j 其中之一或同时为正时取“—”号, 其中之一或同时为负时取“+”号。利用式(1)~(6), 可计算出该特异介质光子晶体的带隙结构。

2 色散特异介质

不考虑介质损耗, 设特异介质 A 在微波区的等效介电常数和磁导率^[17] 为

$$\epsilon_a(f) = 1 + \frac{25}{0.9^2 - f^2} + \frac{100}{11.5^2 - f^2} \quad (7)$$

$$\mu_a(f) = 1 + \frac{9}{0.902^2 - f^2} \quad (8)$$

而介质 B 的 Drude 模型^[18] 为

$$\epsilon_b(f) = 1.0 - \frac{f_{ep}^2}{f^2} = 1.0 - \frac{100}{f^2} \quad (9)$$

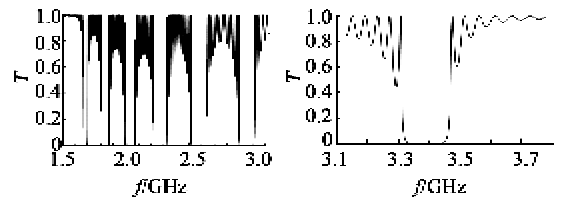
$$\mu_b(f) = 1.44 - \frac{f_{mp}^2}{f^2} = 1.44 - \frac{100}{f^2} \quad (10)$$

式中: f 为频率; f_{ep} 和 f_{mp} 分别为电等离子频率和磁等离子频率。对介质 A, 当 $f < 3.13$ GHz 时, $\epsilon_a < 0$ 且 $\mu_a < 0$, 为双负特异介质; 3.13 GHz $< f < 3.78$ GHz, $\epsilon_a < 0$ 且 $\mu_a > 0$, 为电单负特异介质。对介质 B, $f < 8.33$ GHz, ϵ_b 和 μ_b 均为负值, 为双负特异介质; 8.33 GHz $< f < 10.0$ GHz, ϵ_b 为负, μ_b 为正, 是电单负特异介质。

3 数值结果与讨论

3.1 TE 波

设介质厚度 $d_a = 12$ mm, $d_b = 24$ mm, 则 $d = 36$ mm, $N = 15$, 所处环境介质折射率为 1.0。均匀平面波从左端面垂直入射, $f < 3.13$ GHz 时, A 和 B 均为双负特异介质, 透射波中出现多个光子禁带, 且随着频率的增大, 禁带宽度变宽, 如图 2(a) 所示, 图中 T 为透射率。3.13 GHz $< f < 3.78$ GHz 时, A 为单负特异介质, B 为双负特异介质, 透射波中出现一个完整光子禁带, 禁带中心位于频率约 3.39 GHz 处, 这与正折射率一维光子晶体禁带相仿。



(a) 介质 A、B 均为双负 (b) 介质 A 为电单负, B 为双负

图 2 正入射时的透射谱

为反映该特异介质光子晶体在不同入射角 θ 的带隙特征, 在 1.75~2.65 GHz 内(此时介质 A、B 均为双负特异介质), 当 θ 分别为 0.5 rad, 1.0 rad 和 1.5 rad 时, 透射波谱如图 3(a)~(c) 所示。

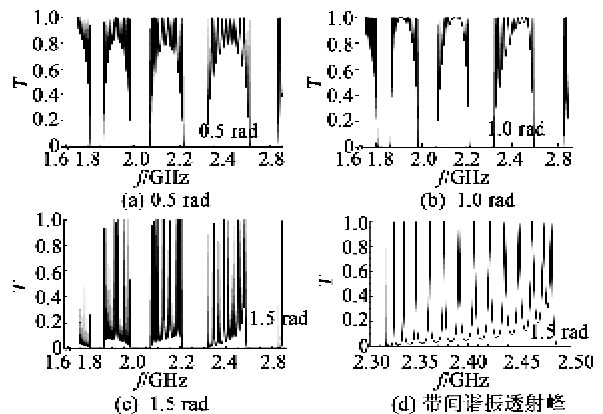


图 3 不同入射角时的透射禁带

随着入射角的增大,透射谱的禁带基本不变,除禁带略微展宽,下带边向低频方向移动外。由于反射率 $R=1-T$,对于完全禁带($T=0$)即对应于全反射。这表明,当介质 A、B 均为双负特异介质时,该光子晶体具有多个全向反射带。当 $\theta=1.5$ rad 时,在相邻的两禁带间出现 14 个透射峰,如图 3(d) 所示。透射峰的个数 p 与结构的周期数 N 有关: $p=N-1$ 。产生的原因是由于入射波在该光子晶体内的多重反射谐振隧穿效应。

在 3.13~3.78 GHz 频率范围内(此时介质 A 为电单负、B 为双负特异介质), θ 分别为 0.5 rad、1.0 rad 和 1.5 rad 时,透射波谱如图 4 所示。随着 θ 的增大,禁带逐渐展宽,而传播带变窄,透射峰越来越细锐。对比正入射的带隙结构可知,在 3.38~3.46 GHz 频率范围内,也出现全向反射带。

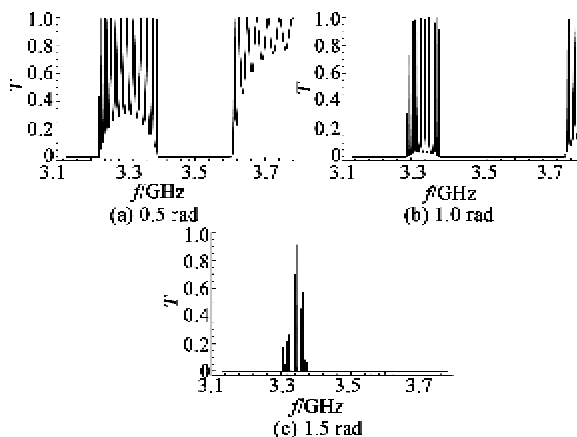


图 4 介质 A 为电单负、B 为双负时不同入射角的透射谱

3.2 TM 波

结构参数不变, TM 波垂直入射,在 1.50~3.78 GHz 频率范围内,介质 A 为双负(虚线左侧, I 区)和单负(虚线右侧, II 区),透射谱如图 5 所示。与 TE 波正入射时的透射谱完全相同,这说明,正入射时,该光子晶体的透射谱与入射波的偏振态无关。

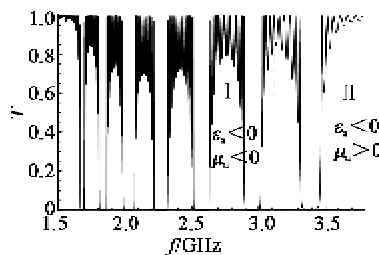


图 5 TM 波正入射的透射谱

为进一步说明 TM 波入射时该光子晶体带隙特征,同样考虑在 1.75~2.65 GHz(介质 A、B 均为

双负特异介质)和 3.13~3.78 GHz(介质 A 为电单负、B 为双负特异介质)范围内, θ 分别为 0.5 rad、1.0 rad 和 1.5 rad 时的透射谱,如图 6、7 所示。结果表明,当 A、B 均为双负特异介质, TM 波以与 TE 波相同的角度斜入射时,具有与 TE 波相同的透射谱,且 $\theta=1.5$ rad 时,也产生带间谐振峰;当 A 为电单负、B 为双负, $\theta>0.5$ rad 时,在 $f>3.32$ GHz 出现零透射带。因此,对 TM 波,该光子晶体在某些频率范围内也具有全向反射特性。

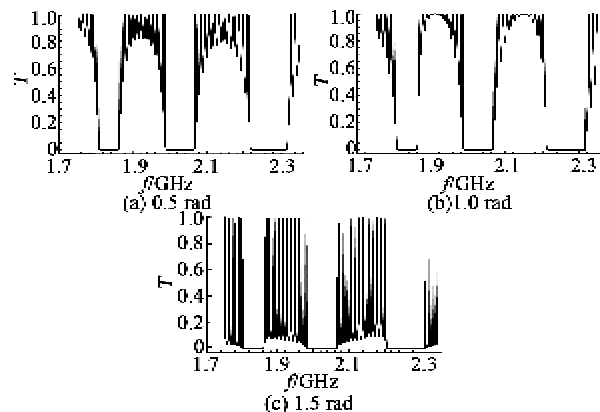


图 6 介质 A、B 为双负时 TM 波斜入射的透射谱

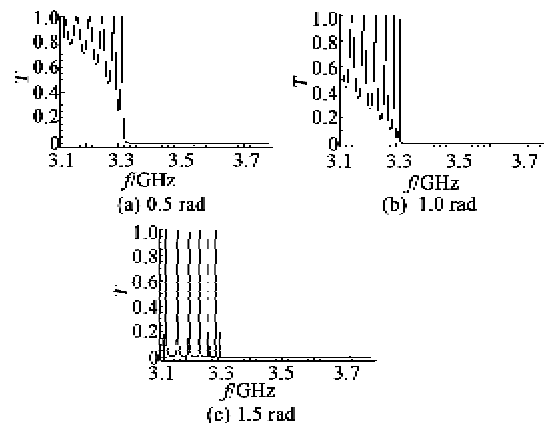


图 7 介质 A 为电单负、B 为双负时 TM 波斜入射的透射谱

4 结束语

通过对由两种不同色散模型的特异介质构成的一维光子晶体,利用传输矩阵法研究了 TE 波和 TM 波在正入射和斜入射的透射谱。结果表明,介质 A、B 为双负(小于 3.13 GHz),该光子晶体对相同入射角的 TE 波和 TM 波有完全相同的透射谱,表明透射谱对入射角的变化不敏感。介质 A 为电单负,而介质 B 为双负时(3.13~3.78 GHz),TE 波的禁带随入射角的增大而加宽,当 $\theta>0.5$ rad 后 TM 波的禁带不再改变。因此,在某些频率范围内

该光子晶体内的禁带具有全向反射特性。

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] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] FOGEL I S, BENDICKSON J M, TOCCI M D, et al. Spontaneous emission and nonlinear effects in photonic bandgap materials[J]. Pure Appl Opt, 1998, 7(2): 393-407.
- [4] BENDICKSON J M, DOWLING J P, SCALORA M. Analytic expression for the electromagnetic mode density in finite, one-dimensional, photonic band-gap structures[J]. Phys Rev E, 1996, 53(4): 4107-4121.
- [5] NOTOMI M. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap [J]. Phys Rev B, 2000, 62(16): 10696-10705.
- [6] OUCHANI N, BRIA D, DJAFARI-ROUHANI B, et al. Defect modes in one-dimensional anisotropic photonic crystal[J]. J Appl Phys, 2009, 106(1/8): 106(11): 113107-113107-8.
- [7] 方云团, 沈廷根, 谭锡林. 一维光子晶体掺杂缺陷模研究[J]. 光学学报, 2004, 24(11): 1557-1560.
FANG Yuntuan, SHEN Tinggen, TAN Xilin. Study on one dimensional photonic crystal with impurity defect[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(11): 1557-1560.
- [8] 刘启能. 光子晶体多通道可调谐偏振滤波器的理论研究[J]. 光子学报, 2008, 37(2): 305-308.
LIU Qineng. Theoretical study of multi-channel polarization tunable filter of photonic crystal[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(2): 305-308.
- [9] YUAN Y. Polarization-sensitive tunable filter in a one-dimensional photonic crystal consisting of anisotropic metamaterials with arbitrary optical axis[J]. Phys B, 2010, 405(7): 1842-1845.
- [10] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative of permittivity and permeability [J]. Sov Phys Usp, 1968, 10(4): 509-514.
- [11] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [12] ZHAROV A A, ZHAROVA N A. Quasi-guided electromagnetic beam propagation in one-dimensional photonic crystal with a left-handed metamaterial [J]. J Appl Phys, 2008, 103(1): 1-5.
- [13] CHEN Y H. Broadband one-dimensional photonic crystal wave plate containing single-negative materials [J]. Opt Expr, 2010, 18(19): 130343.
- [14] 田祖安, 陈景秋, 邓艇. 用中心差分方法计算轴对称圆柱中的弹性波传播[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2007(8): 5-8.
- [15] 玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙, 译. 北京: 科学出版社, 1978.
- [16] JIANG H T, CHEN Y H, LI H Q, 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.
- [17] LI J S, ZHOU L, CHAN C, T et al. Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials [J]. Phys Rev Lett, 2003, 90(8): 1-4.
- [18] ELEFThERIADES G V, IYER A K, KREMER P C. Planar negative refractive index media using periodically L-Loaded transmission lines[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2002, 50(12): 2702-2712.