

doi:10.3788/gzxb20154403.0319004

含各向异性左手材料的一维 Thue-Morse 准周期结构的反射带隙

康永强^{1,2}, 高鹏³, 刘红梅¹, 张淳民²

(1 山西大同大学 物理电子科学学院 固体物理研究所, 山西 大同 037009)

(2 西安交通大学 理学院 空间光学研究所, 西安 710049)

(3 青岛科技大学 数理学院, 山东 青岛 266061)

摘 要:采用传输矩阵法,研究了由各向同性右手材料和各向异性左手材料组成的 Thue-Morse 准周期结构的反射带隙,分析了入射角、偏振和晶格比例缩放因子对反射带隙的影响.结果表明该结构存在一个全方向反射带隙,该带隙的宽度由 TE 模的低频带边缘和 TM 模的高频带边缘决定.当在该结构中插入一层缺陷时,在全方向带隙中出现一条缺陷模.对 TE 模,缺陷模的位置受入射角的影响很弱,而对 TM 模,缺陷模的位置随入射角的增大,向高频方向移动.

关键词:各向异性;左手材料;反射带;传输矩阵;Thue-Morse 准晶

中图分类号:O469

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-0319004-6

Reflection Band Gap in Thue-Morse Quasicrystal Containing Anisotropic Left Handed Material

KANG Yong-qiang^{1,2}, GAO Peng³, LIU Hong-mei¹, ZHANG Chun-min²

(1 Institute of Solid State Physics, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

(2 Institute of Space Optics, School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(3 College of Mathematical and Physical Sciences, Tsingtao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract: By means of transfer matrix method, the reflection band gap of Thue-Morse (T-M) structure containing anisotropic left handed material was studied. The influence of incident angle, polarization and lattice scaling factor on reflection band gap was theoretically investigated. It is shown that there is an Omnidirectional Reflection Band (ORB) in the structure. The width of the ORB is determined by the higher frequency band edge for TE polarization and the lower frequency band edge for TM polarization. When an impurity is introduced, a defect mode appears in the reflection band gap. The position of the defect modes is weakly dependent on incident angle for TE polarization, but affected by incident angle for TM polarization.

Key words: Anisotropic; Left hand materials; Reflection band; Transfer matrix; Thue-Morse quasicrystal

OCIS Codes: 190.4400; 160.0160; 160.1190; 160.2100; 160.3918; 260.0260

0 引言

左手材料又称负折射率材料,是一种人工微结构材料,当电磁波在该介质中传播时,其电场矢量、磁场矢量和波矢方向构成左手螺旋关系,其折射率为负数,

有许多新奇的现象^[1-3]. 2000 年, Smith 成功制造出第一块左手材料^[4],使得左手材料迅速成为科学家们的研究热点^[5-6]. 由于人工制备的特异性材料多由两种子结构(金属谐振环阵列和金属细导线阵列)组合在一起实现负的介电常数和负的磁导率,因此人工制备的左

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61307121, 60278019, 11274207)资助

第一作者:康永强(1979-),男,讲师,博士,主要研究方向为光子晶体和超材料. Email:kyq_2000@sohu.com

收稿日期:2014-08-19;录用日期:2014-10-14

<http://www.photon.ac.cn>

手材料多是各向异性的,或者说是单轴各向异性的^[7]. Smith对各向异性左手介质进行了系统的描述,并命名主轴上不同符号的介质为不确定媒质(indefinite media),将不确定媒质分为四类,来表征其切向波矢量,从而代表不同的电磁波传播特性^[8]. 各向异性左手材料的介电常数和磁导率用张量形式表示. 相对各向同性左手材料,各向异性左手材料更容易制作. 在特定条件下,各向异性左手材料可以代替各向同性左手材料呈现出奇特的电磁特性,包括负折射、逆多普勒效应、完美成像等^[9-11].

准晶体是一种介于周期结构和无序结构之间,缺少长程平移对称性,但具有一定取向序的非周期结构^[12]. 对电磁波在一维准晶体中的传播特性和局域特性已经取得了不少研究成果^[13-14]. 一维准晶结构主要包括斐波纳契(Fibonacci)序列和 Thue-Morse 序列. Fibonacci 序列具有康托尔集结构,其本征态既不扩展也不局域,文献[12,15]研究了含双负材料的 Fibonacci 序列结构的光子晶体形成的能带结构,研究表明随着阶数的增长,全方向零均值相位带隙的宽度和位置出现极限值. 而 Thue-Morse 序列的本征态具有奇特的连续谱,支持扩展态. 中山大学的尹承平等发现含有单负材料的 Thue-Morse 准周期结构存在全方向反射带隙和平顶透射传输谱^[16]. 但是含各向异性左手材料的 Thue-Morse 准周期结构,鲜有报道. 本文研究了含各向异性左手材料一维 Thue-Morse 准周期结构的反射带特性,分析了入射角、偏振和晶格比例缩放因子对反射带隙的影响.

1 理论模型和方法

一维 Thue-Morse 准晶体结构是非周期结构,具有与 Fibonacci 准晶体序列不同的性质,其电子的性质可以看成处于 Fibonacci 准晶体和周期性晶体结构之间的一种过渡类型. Thue-Morse 序列和 Fibonacci 序列一样,都可以通过迭代生成, Thue-Morse 序列形成的最简单的一种方式方法为迭代法^[17],即 $S_n = S_{n-1} \bar{S}_{n-1}$,令 $S_1 = AB$, \bar{S}_{n-1} 序列可以通过交换 S_{n-1} 序列得到,即 $\bar{S}_{n-1} = BA$. 其中, A、B 代表两种不同的材料元素. 前几阶 Thue-Morse 序列可以写为, $S_1 = AB$, $S_2 = ABBA$, $S_3 = ABBABAAB$, …… 由上面的迭代规则可知, Thue-Morse 序列中 A、B 的数目相等,总的元素个数随阶数 n 呈 2^n 增长.

考虑由各向同性右手材料 A 和各向异性左手材料 B,按照上面 Thue-Morse 序列排列构成一维光子晶体,描述各向异性左手材料层 B 的介电常数和磁导率具有对角化的张量形式为^[18]

$$\boldsymbol{\epsilon}_B = \begin{pmatrix} \epsilon_{Bx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{By} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{Bz} \end{pmatrix}, \boldsymbol{\mu}_B = \begin{pmatrix} \mu_{Bx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{By} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{Bz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

假设 TE 模从空气由入射角 θ 入射到 n 阶 Thue-Morse 结构,则在任意位置 z 和 $z + \Delta z$ 处的电场和磁场由传输矩阵计算,其传输矩阵元为

$$\mathbf{T}_{A,B} = \begin{bmatrix} \cos(k_{A,Bz} d_{A,B}) & i \frac{\mu_{A,Bz} \omega}{k_{A,Bz} c} \sin(k_{A,Bz} d_{A,B}) \\ i \frac{k_{A,Bz} c}{\mu_{A,Bz} \omega} \sin(k_{A,Bz} d_{A,B}) & \cos(k_{A,Bz} d_{A,B}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $k_{A,Bz}^2 = \omega^2 / c^2 (\epsilon_{A,By} \mu_{A,Bx} - \mu_{A,Bx} / \mu_{A,Bz} \sin^2 \theta)$, 对各向同性右手材料 A 有 $\epsilon_{Ax} = \epsilon_{Ay} = \epsilon_{Az} = \epsilon_A$, $\mu_{Ax} = \mu_{Ay} = \mu_{Az} = \mu_A$, θ 为空气到介质的入射角, c 为真空中的光速. 如果出射端介质也为空气,则反射系数和透射系数表示为

$$r = \frac{\cos \theta (x_{n,11} - x_{n,22}) - (\cos^2 \theta x_{n,12} - x_{n,21})}{\cos \theta (x_{n,11} + x_{n,22}) - (\cos^2 \theta x_{n,12} + x_{n,21})} \quad (3)$$

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

式中 $x_{n,ij}$ ($i, j = 1, 2$) 表示第 n 阶 Thue-Morse 结构总传输矩阵中的矩阵元素,总结构的传输矩阵可以通过迭代关系得到

$$\mathbf{X}_n = \mathbf{X}_{n-1} \bar{\mathbf{X}}_{n-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{M}(d_A) \mathbf{M}(d_B)$$

式中, $\bar{\mathbf{X}}_{n-1}$ 为 \mathbf{X}_{n-1} 的逆序列矩阵,可以通过交换 A、B 的次序得到. 对于 TM 波的情形,根据对偶原理,只需要用 μ_{By} 代替 ϵ_{By} , ϵ_{Bx} 代替 μ_{Bx} , ϵ_{Bz} 代替 μ_{Bz} , 就可以得到相应传输矩阵和波矢.

3 计算结果及讨论

取各向同性右手材料 A 的厚度 $d_A = 12$ mm,介电常数和磁导率分别为 $\epsilon_A = 3$, $\mu_A = 1$,各向异性左手材料 B 的厚度 $d_B = 6$ mm,其介电常数和磁导率取 Drud 模型来描述^[18],对于 TE 模为

$$\epsilon_{By} = 1 - 100/\omega^2, \mu_{Bx} = 1.21 - 100/\omega^2, \mu_{Bz} = 2 \quad (5)$$

对于 TM 模为

$$\mu_{By} = 1.21 - 100/\omega^2, \epsilon_{Bx} = 1 - 100/\omega^2, \epsilon_{Bz} = 2 \quad (6)$$

图 1 为正入射时,由右手材料和各向异性左手材料组成 Thue-Morse 结构的反射谱,图(a)、(b)、(c)、(d) 分别对应 S_4 阶、 S_5 阶、 S_6 阶和 S_7 阶 Thue-Morse 序列. 从图中可以看到,各阶 Thue-Morse 序列中均存在一个较宽的反射带隙,反射带边缘随着阶数的增加,逐渐变得陡峭,在阶数增大到 S_6 以上时,反射带边缘基本保持不变.

由正负折射率材料交替排列的一维光子晶体存在零均值折射率带隙^[19-20],该带隙位置和宽度不受入射角和光偏振的影响. 以 S_6 为例,研究该 Thue-Morse 结构的反射谱受人射角的影响. 图 2 为不同偏振模式下, S_6 阶 Thue-Morse 结构的反射谱随入射角 0° 到 80° 的变化,左半部分对应 TM 模,右半部分对应 TE 模. 从图中可以看到,对于 TE 模反射带的高频边缘不受入射角的影响,而低频边缘随着入射角增大向高频方向

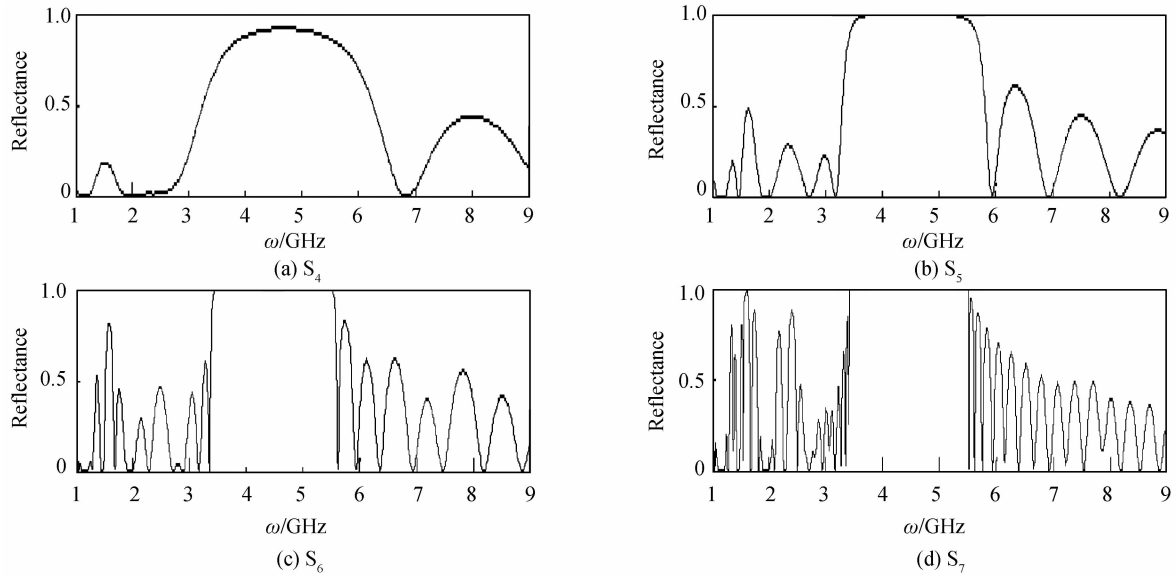


图 1 正入射时,由右手材料和各向异性左手材料组成 Thue-Morse 结构的反射谱

Fig. 1 Normal incidence reflection spectra for the different order T-M structures as a function of the angular frequency

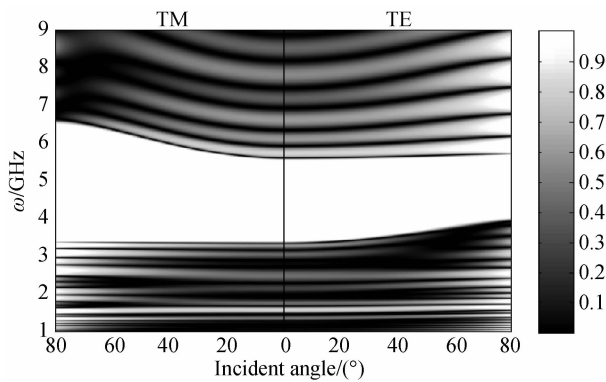


图 2 不同偏振模式下, S_6 Thue-Morse 结构的反射谱随入射角的变化

Fig. 2 Reflection spectra for the S_6 T-M structure with different incident angle on polarization

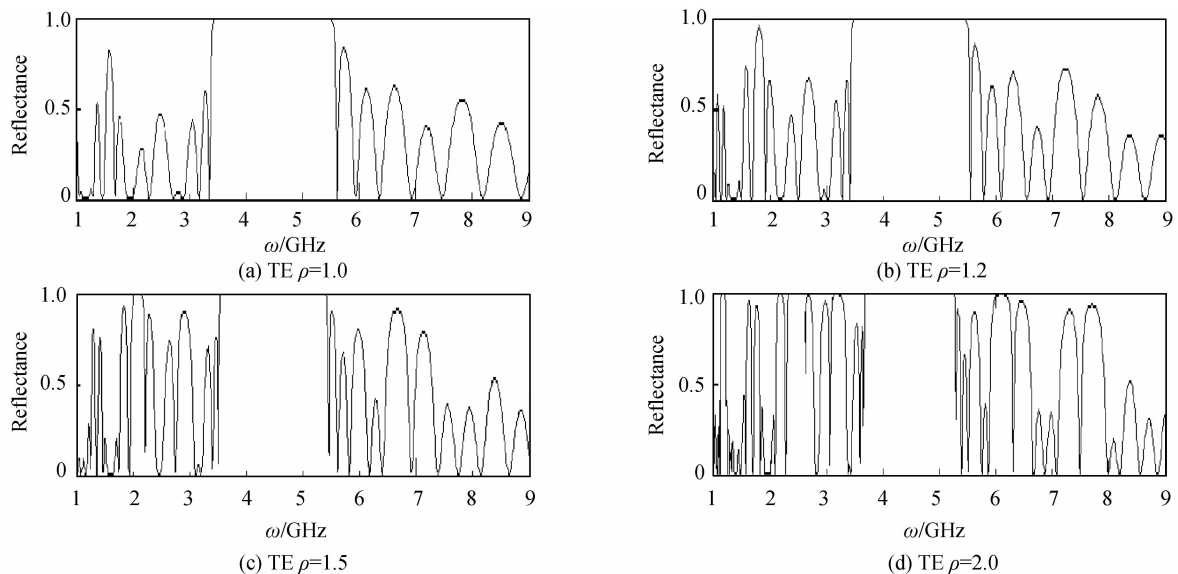


图 3 入射波是 TE 模时, S_6 Thue-Morse 结构的反射带隙随晶格厚度缩放因子的变化

Fig. 3 The reflection spectra of S_6 structure at different scaling factor for TE polarization

移动,带隙变窄;而对于 TM 模,反射带的低频边缘不受入射角的影响,而高带边缘随着入射角增大,向高频方向移动,带隙逐渐增宽.因此,如果要想得到全方向带隙,由图 2 可知,频率范围可以取为 4 GHz 到 5.6 GHz.

由正负折射率材料交替排列构成的一维光子晶体,形成的零均值折射率带隙,不受晶格比例缩放的影响^[19-20].定义比例因子 $\rho=d/d_0$,其中 d_0 对应比例缩放前厚度取值为 $d_A=12$ mm, $d_B=6$ mm, d 对应比例缩放后的值.图 3 为 TE 偏振波时,以 S_6 Thue-Morse 结构为例,反射带隙随晶格比例的变化.由图可知,随着晶格厚度缩放因子的增大,该反射带隙的位置几乎不受影响.

图 4 为 TM 偏振波时,以 S_6 Thue-Morse 结构为例,反射带隙随晶格比例的变化.由图可知,随着晶格

厚度缩放因子的增大,该反射带隙的位置几乎不受影响.

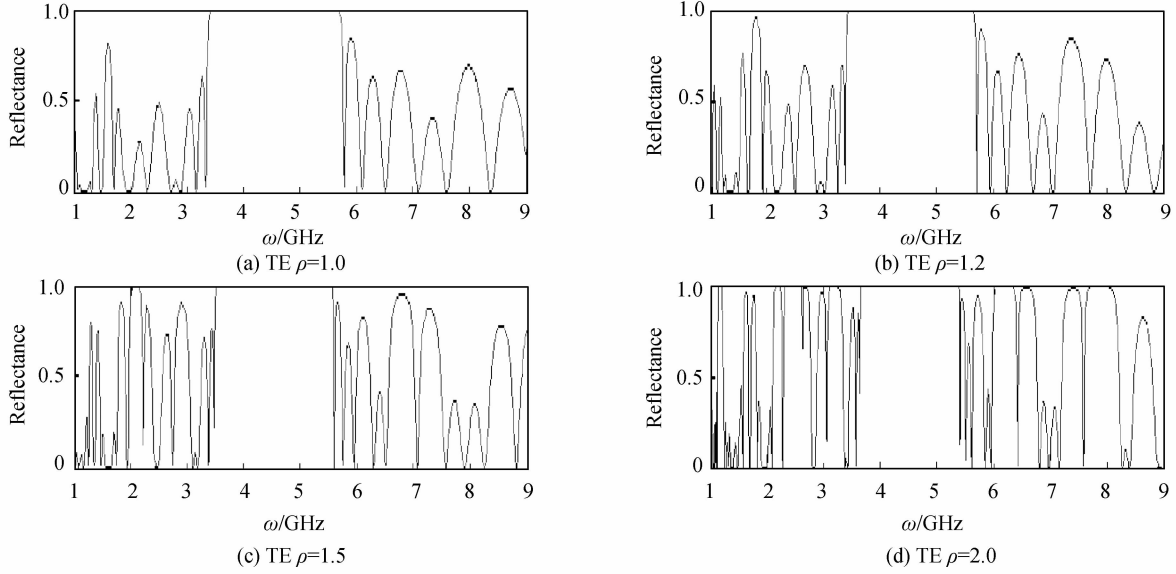


图 4 入射波是 TM 模时, S_6 Thue-Morse 结构的反射带隙随晶格厚度缩放因子的变化

Fig. 4 The reflection spectra of S_6 structure at different scaling factor for TM polarization

如果在一维光子晶体中,掺杂一个缺陷层,则在透射谱中会出现一条缺陷模,如果缺陷模出现在零均值折射率带隙中,将不受入射角和偏振的影响,具有全向特性^[21-22].以 S_6 Thue-Morse 结构为例,研究一维 Thue-Morse 准周期结构中掺杂一缺陷层 C,禁带中缺陷模

的特性.设缺陷层的相对介电常数和相对磁导率为 $\epsilon_c = 2.5, \mu_c = 1$.图 5 为 TE 入射波在不同入射角时,含缺陷的 S_6 Thue-Morse 结构 S_6CS_6 的透射谱.由图可知,随着入射角从 0 到 80° 的增大,禁带中缺陷的位置变化非常微弱.

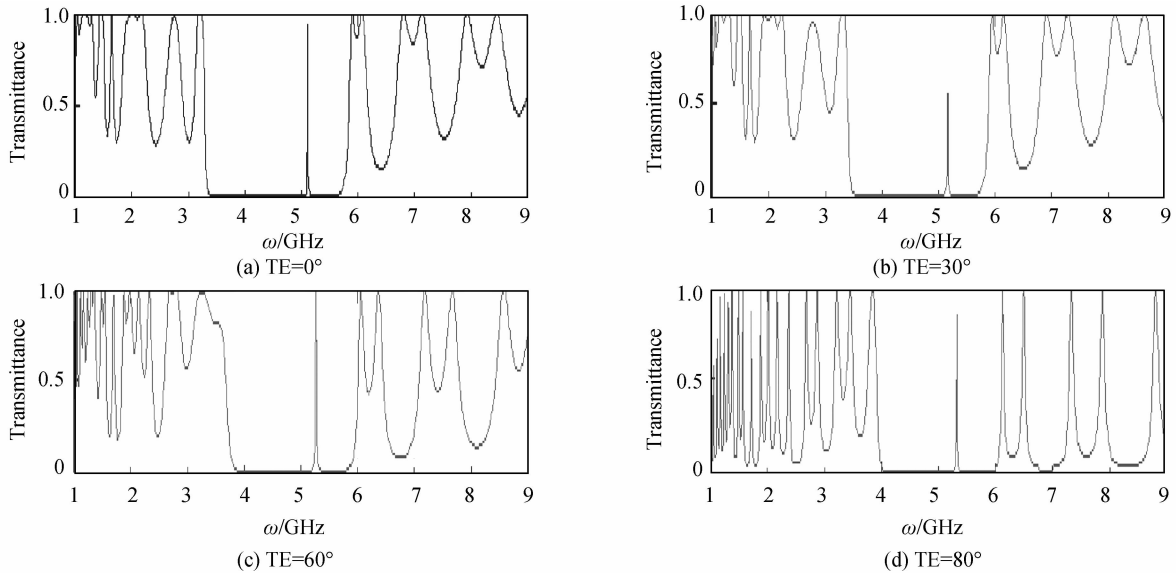


图 5 TE 入射波在不同入射角时含缺陷的 S_6 Thue-Morse 结构的透射谱

Fig. 5 Transmission spectra of the T-M structure with a defect for TE polarization

图 6 为 TM 入射波在不同入射角时,含缺陷的 S_6 Thue-Morse 结构 S_6CS_6 的透射谱.由图可知,对于 TM 模,在入射角小于 30° 时,对缺陷模位置的影响比

较弱,当入射角大于 60° 时,禁带中缺陷模的位置受入射角影响较大,移向高频方向.

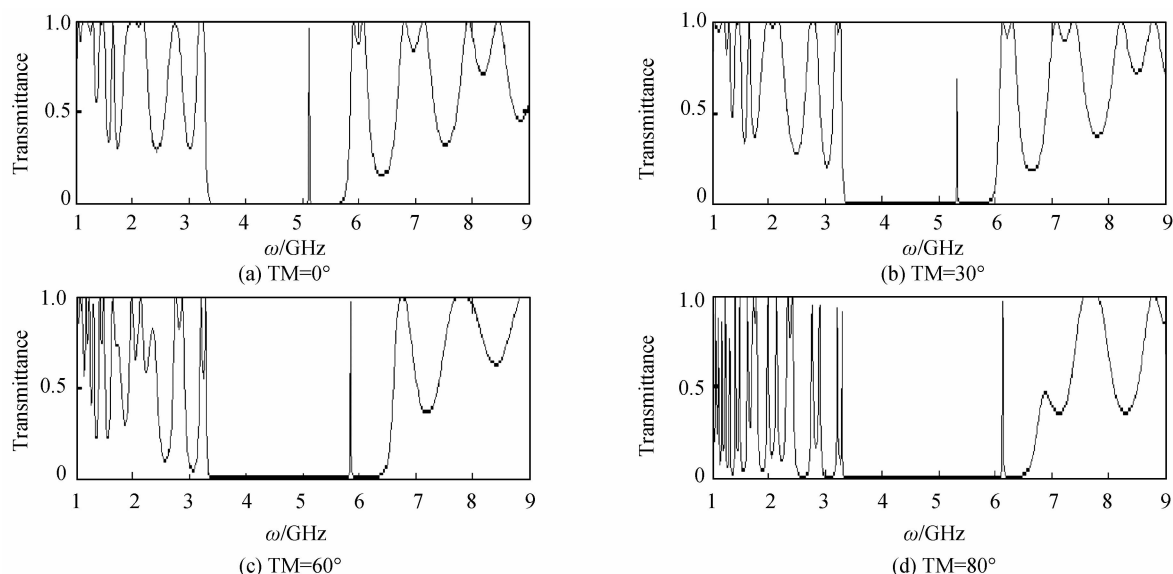


图6 TM入射波在不同入射角时含缺陷的 S_6 Thue-Morse结构 S_6CS_6 的透射谱
Fig. 6 Transmission spectra of the T-M structure with a defect for TM polarization

4 结论

本文研究了由各向同性右手材料和各向异性左手材料组成的 Thue-Morse 一维准晶结构的反射带隙和透射特性. 结果表明该结构中存在着一个全方向反射带隙, 该带隙随着 Thue-Morse 结构阶数的增大, 位置基本保持不变. 此带隙的位置和宽度, 不受晶格比例缩放因子的影响. 带隙的宽度可以由 TE 模的低频带边缘和 TM 模的高频带边缘来决定. 如果在该结构中插入一缺陷层, 会在相应的带隙中出现一条缺陷模. 对 TE 模, 缺陷模的位置受入射角的影响很弱, 而对 TM 模, 缺陷模的位置随入射角的增大, 向高频方向移动. 该 Thue-Morse 准周期结构反射带隙特性的研究对新型光子晶体带隙器件的设计提供理论指导.

参考文献

- [1] RAO X S, ONG C K. Amplification of evanescent waves in a lossy left-handed material slab [J]. *Physical Review B*, 2003, **68**(11):113103.
- [2] RAMAKRISHNA S A. Physics of negative refractive index materials [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, **68**(2): 449-521.
- [3] LUO Li-ping, LIU Nian-hua. Transmittance in Thue-Morse quasicrystal containing negative-index materials [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11):1615-1618.
罗黎平, 刘念华. 含负折射材料的 Thue-Morse 序列结构的光学透射谱[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11):1615-1618.
- [4] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Physical Review Letters*, 2000, **84**(18):4184-4187.
- [5] GAO Peng, ZHANG Chun-ming, AI Jing-jing, et al. Multiple frequency bands of squares split resonant rings and metal wire metamaterials [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(25):6309-6315.
- [6] KANG Yong-qiang, ZHANG Chun-ming, MU Tin-kui. Resonance modes and inter-well coupling in photonic double quantum well structure with single negative materials [J].

Optics Communication, 2012, **285**, 4821-4824.

- [7] VESELAGO V. Electrodynamics of substa simultaneously negative electrical and magnetic properties [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, **10**(4):509-517.
- [8] SMITH D, SCHURIG D. Electromagnetic wave propagation in media with indefinite permittivity and permeability tensors [J]. *Physical Review Letters*, 2003, **90**(7):077405.
- [9] SMITH D, PENDRY J, WILTSHIRE M. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, **305**(5685):788-792.
- [10] SMITH D R, KOLINKO P, SCHURIG D. Negative refraction in indefinite media [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, **21**(5):1032-1043.
- [11] SMITH D R, SCHURIG D, MOCK JJ, et al. Partial focusing of radiation by a slab of indefinite media [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(13):2244-2246.
- [12] KOHMOTO M, SUTHERLAND B, TANG C. Critical wave functions and a Cantor-set spectrum of a one-dimensional quasicrystal model [J]. *Physical Review B*, 1987, **35**(3):1020-1033.
- [13] DULEA M, SEVERIN M, RIKLUND R. Transmission of light through deterministic aperiodic non-Fibonacci multilayers [J]. *Physical Review B*, 1990, **42**(6):3680-3689.
- [14] DULEA M, JOHANSSON M, RIKLUND R. Localization of electrons and electromagnetic waves in a deterministic aperiodic system [J]. *Physical Review B*, 1992, **45**(1):105-114.
- [15] HSUEH W, CHEN C, CHEN C. Omnidirectional band gap in Fibonacci photonic crystals with metamaterials using a band-edge formalism [J]. *Physical Review A*, 2008, **78**(1):013836.
- [16] YIN Cheng-ping, WANG Tong-biao, DONG Jian-wen, et al. Omnidirectional reflection and flat-top transmission in Thue-Morse quasicrystal with single-negative materials [J]. *The European Physical Journal B*, 2009, **69**(3):357-361.
- [17] FENG Ya-ping, ZHOU Jun, YANG Ming-yang, et al. Fabrication and optical properties of two dimensional Thue-Morse quasicrystal [J]. *Acta Optical Sinica*, 2011, **31**(4):0423001.
冯亚萍, 周骏, 阳明仰, 等. 二维 Thue-Morse 型准周期光子晶体的制作与光学特性 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(4):0423001.

- [18] KANG Yong-qiang, ZHANG Chun-min, XUE Chun-hua, *et al.* Wannier stark ladder in one-dimensional photonic crystal coupled microcavity containing indefinite metamaterials [J]. *Journal of Optics*, 2013, **42**(4), 335-340.
- [19] JIANG Hai-tao, CHEN Hong, LI Hong-qiang, *et al.* Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals containing negative-index materials [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(26):5386-5388.
- [20] WANG Li-gang, CHEN Hong, ZHU Shi-yao. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with single-negative materials [J]. *Physical Review B*, 2004, **70**(24):245102.
- [21] GAO Lei, TANG C J, and WANG S M. Photonic band gap from a stack of single-negative materials [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, **301**(2):371-377.
- [22] ZHOU Lei, SONG Zheng-yong, HUANG Xue-qin, *et al.* Physics of the zero- \bar{n} photonic gap: fundamentals and latest developments [J]. *Nanophotonics*, 2012, **1**(3-4):181-198.