

文章编号:1005-0523(2011)01-0081-05

参数和结构对超晶格成像特性的调制

伍清萍

(华东交通大学基础科学学院,江西 南昌 330013)

摘要:利用传输矩阵方法研究了不同结构和不同参数调制下的成像特征。结果表明:在近似相同总层数和相同的参数下,不同结构对成像有一定影响;周期结构完美成像的波矢范围最大,thue-morse模型次之,fibonacci模型最小;进一步研究当负折射率介质的介电常数或磁导率偏离1时的成像特点,发现除了可以通过调节负折射率介质的介电常数或磁导率控制尖锐峰的峰值大小外,还可通过改变两种媒质的层数比以及正折射率媒质的吸收系数来控制尖锐峰峰值的大小。

关键词:负折射率介质;成像;fibonacci;thue-morse

中图分类号:O43

文献标识码:A

负折射率媒质是一类具有奇异电磁性质的人造介质^[1-2]。2000年,Pendry^[3]提出负折射率媒质能放大倏逝波甚至能用于构成完美透镜之后,负折射率媒质引起了人们的强烈兴趣。Pendry指出在正折射率媒质中指数衰减的倏逝波进入负折射率媒质后随即指数增长。Zhang等^[4]的研究发现负折射率材料能极大地增强光子隧道效应。以上的研究都是在负折射率媒质没有任何损耗的理想情况下所作的讨论,文献[5]表明,负折射率介质不可避免地带有损耗和色散等性质。这对倏逝波的放大和隧道效应可能会有很大的影响。Ye等^[6]已经研究了光在单层带有损耗的负折射率媒质的棱镜中的透射和反射规律,发现由负折射率媒质构成的棱镜可以放大倏逝波,其修复率明显与介电常数的虚部有关。后Lei等^[7]人研究了光在含有负折射率媒质的多层平板中的成像规律。并研究发现介电常数的虚部具有抑制恢复率的偏离的作用,也就是说负折射率媒质对倏逝波的放大有很大影响。本文将讨论倏逝波在含负折射率介质的不同结构光子晶体中的成像特性,分析了倏逝波在不同结构和不同参数下的变化规律,并着重讨论损耗在不同结构中的影响。

1 物理模型及理论基础

本文考虑一个由负折射率材料A和正折射率材料B排列而成的多层系统,A和B的折射率分别为 n_A 和 n_B ,实际厚度分别为 d_A , d_B 。对于周期性结构即通常由媒质A和媒质B交替生成,一维Fibonacci超晶格^[8]结构则由A和B组合成一个数学上的Fibonacci排列,其排列方式为 $S_{j+1}=S_{j-1}^{-1}S_j$,其中 $j \geq 1$ 。我们取初使条件为 $S_0=\{B\}$, $S_1=\{B^{-1}A\}$,thue-morse结构^[9-10],则满足以下关系

$$S_0=\{B\}, S_1=\{BA\}, S_2=\{BAAB\}, S_3=\{BAABABBA\}, \dots$$

考虑单色平面波入射时

$$E_A = \exp[i(K_A x \sin \delta_A - \omega t)] [A_1 \exp(-iK_A y \cos \delta_A) + B_1 \exp(iK_A y \cos \delta_A)] \quad (1)$$

$$E_B = \exp[i(K_B x \sin \delta_B - \omega t)] [A_2 \exp(iK_B y \cos \delta_B) + B_2 \exp(-iK_B y \cos \delta_B)] \quad (2)$$

收稿日期:2010-12-01

基金项目:华东交通大学科学技术研究项目(09101013)

作者简介:伍清萍(1978—),女,讲师,研究方向为光导光学。

式中: K_A, K_B 分别为 A, B 层中的波矢; ω 为光的角频率; δ_A, δ_B 为入射角。为了方便计算不同模型的成像特征,我们将媒质传输矩阵进一步分解界面传输矩阵及媒质内部传输矩阵,其结果分别为

$$M_{AB} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1+R & 1-R \\ 1-R & 1+R \end{pmatrix} \quad M_{BA} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1+R^{-1} & 1-R^{-1} \\ 1-R^{-1} & 1+R^{-1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: $R = \frac{K_B \mu_A \cos \delta_B}{K_A \mu_B \cos \delta_A}$, 若为 TM 模, 则 $R = \frac{\varepsilon_B K_B \cos \delta_A}{\varepsilon_A K_A \cos \delta_B}$; ε_A, μ_A 为 A 层的介电常数和磁导率; ε_B, μ_B 为 B 层的介电常数和磁导体。而在 A, B 层内的传输矩阵分别为

$$M_A = \begin{pmatrix} e^{-iK_A d_A} & 0 \\ 0 & e^{iK_A d_A} \end{pmatrix} \quad M_B = \begin{pmatrix} e^{-iK_B d_B} & 0 \\ 0 & e^{iK_B d_B} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: K_A, K_B 分别为 A, B 层媒质中的波矢, 当 $K_0^2 \varepsilon_A \mu_A - K_\chi^2 < 0$, 此时为衰减波, $K_A = i \sqrt{K_0^2 \varepsilon_A \mu_A - K_\chi^2}$ 同样对于 B 媒质其衰减波波矢为 $K_B = i \sqrt{K_0^2 \varepsilon_B \mu_B - K_\chi^2}$ 。且有 $K_0^2 \varepsilon_B \mu_B - K_\chi^2 < 0$, 其中 K_0 为真空中的波矢, 其中设 B 层媒质为正折射率媒质, 其 $\varepsilon_B > 0, \mu_B > 0$, 而 A 层媒质为负折射率媒质, 即有 $\varepsilon_A < 0, \mu_A < 0$, 近年来提出的负折射率材料既有介电函数 $\varepsilon(\omega)$ 的色散也有磁导率的色散 $\mu(\omega)$, 其介电函数 $\varepsilon(\omega)$ 和磁导率 $\mu(\omega)$ 可以用 Drude 模型^[11]来表示

$$\varepsilon(\omega) = \left[\varepsilon_r - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\Gamma)} \right], \quad \mu(\omega) = \left[\mu_r - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega(\omega + i\Gamma)} \right] \quad (5)$$

式中: ω_{pe} 是电等离子频率; ω_{pm} 是电谐振频率; Γ 是媒质损耗系数, 仅考虑损耗的话, 也可表示为

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega), \quad \mu(\omega) = \mu'(\omega) + i\mu''(\omega) \quad (6)$$

当光在不同结构光子晶体中传播时第 1 层和最后第 N 层有如下关系

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = M_N \begin{pmatrix} A_N \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

那么它的衰减波对成像的影响可以用从介质平面到成像面的恢复率和相移来描述, 其恢复率为

$$q = \frac{A_N e^{i\kappa_N d_N}}{A_1 e^{-i\kappa_1 d_1}} \quad (8)$$

则当电磁波从物体平面到像平面时, 它的恢复率应为

$$R = |q| \quad (9)$$

相移为

$$\theta = \arctan \frac{q''}{q'} \quad (10)$$

式中: q', q'' 分别为 q 的实部和虚部。

2 数值结果与讨论

为了满足成像条件: 在不同结构比较时取媒质总厚度为定值, A 媒质与 B 媒质总厚度相等, 并且各层中的相同媒质的厚度相等。 $\delta_A = \delta_B = 0$, 但衬底层媒质 B 的厚度为其他层该媒质的 0.5 倍。

通过适当调节 $\omega_{pe}, \omega_{pm}, \Gamma$ 等值, 可使得介电函数和磁导率参数为 $\mu_B = 1, \varepsilon'_A = -0.96, \varepsilon''_A = 0.0005, \varepsilon_B = 1, \mu'_A = -100/96, \mu''_A = 0.01$ 。为了方便比较不同模型, 以图 1 中周期结构取 $B(AB)^{16}$ 形式, 而 Fibonacci 结构则取 (衬底层媒质 B+FC(2)29 层结构+衬底层媒质 B) 形式, thue-morse 模型则取 (第五代 32 层+媒质 B) 的形式。由图显示: 在近似相同总层数和相同的参数下, 周期正负交替结构成像恢复率值以及相移为 0

的波矢 K_x 范围最大,而thue-morse模型次之,fibonacci模型最小,说明在制作完美成像透镜时考虑波矢 K_x 范围的情形时选择周期交替结构较为理想。但由于存在吸收和色散负折射率媒质的介电函数以及磁导率偏离1值,使得恢复率在一定 K_x 范围出现较大峰值,即倏逝波的放大。对于周期模型和thue-morse模型峰值大小完全相同,而fibonacci模型峰值则较小,其结果可进一步分析如图2。随着层数的增加,不同结构的尖锐峰的位置都向长波处移动,此结论与文献^[7]讨论的相同。但thue-morse模型及周期结构最大尖锐峰峰值以及相应的小峰的值并不随着层数的增加有大小的改变。其原因可解释是由于周期膜结构的对称性导致。因此可得出结论:对称结构的层数以及排列对恢复率偏离的大小无关,在同一结构中无法通过调节层数来改变尖锐峰峰值的大小;在两种媒质层数相同的情形下,无法通过变化排列来改变峰值。

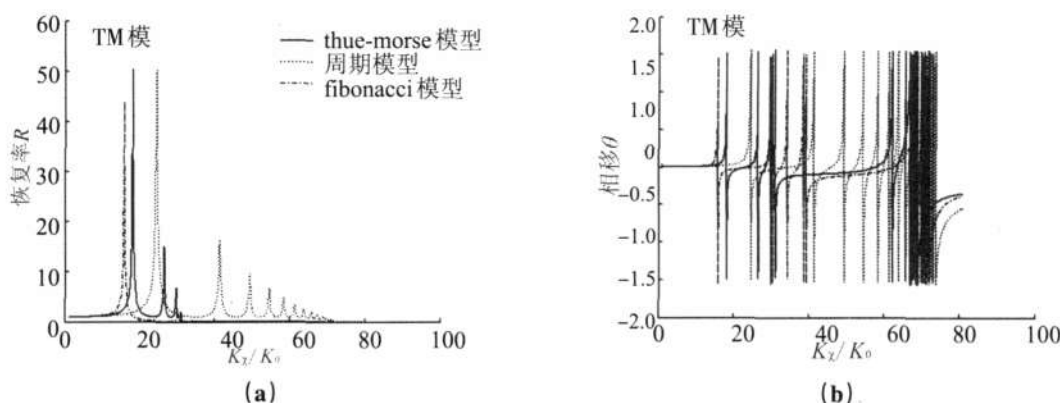


图1 不同多层结构的恢复率和相移

Fig.1 The recovery rate and the phase shift for different multilayer

与周期膜相比,Fibonacci构造的多层膜的尖锐峰峰值在不同层数时的最大值不完全相同,如图2(c),但总体相差不大。由此也表现出了Fibonacci构造的多层膜准周期性结构导致成像具有自相似性特点。比较在近似相同层数和相同参数下,周期膜的尖锐峰峰值相对比Fibonacci构造的多层膜高,其原因为周期结构B媒质与A媒质层数比为1:1,而Fibonacci结构小于1,作为影响倏逝波放大主要因素中A媒质层数相对较少,所以导致峰值变小,若需增大峰值,可将A媒质层数比值增大即可。这一特征可有效地控制倏逝波的放大倍数。

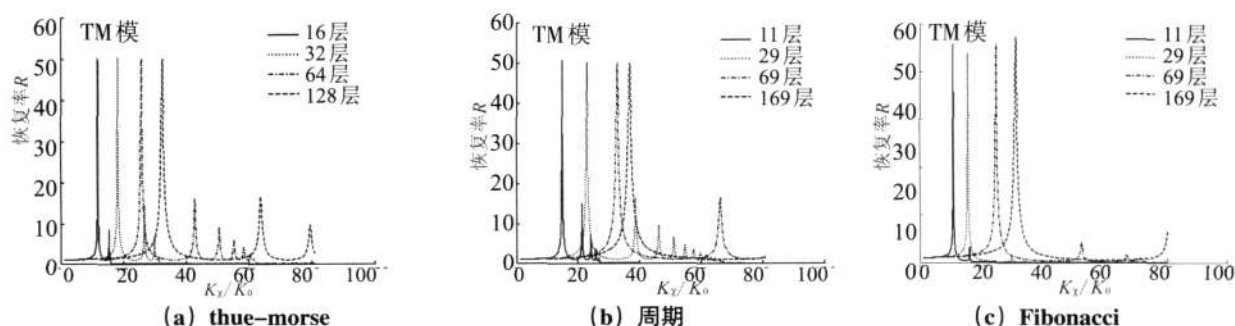


图2 不同结构的恢复率随层数的变化关系图

Fig.2 The recovery rate for different layer number

本文进一步研究当负折射率媒质的磁导率以及介电函数实部为偏离1的确定值时,如图3所示,参数取 $\mu_B = 1$, $\varepsilon_B = 1$, $\varepsilon'_A = -0.97$, $\varepsilon''_A = 0.005$, $\mu'_A = -100/97$,通过调节磁导率虚部的值来研究Fibonacci构造的多层膜29层的成像规律,与周期膜^[7]相似,发现磁导率虚部值的调节对此种情形具有非常有效的作用,即随着增大磁导率的虚部值可使得原来偏离1的恢复率值逐渐接近于1,因此可很好的控制倏逝波的

放大并进一步发现其调节规律:只有当磁导率虚部的数值大小与介电函数实部数值大小之和为1时,其恢复率为1的 K_x 范围更广。如果要得到完美成像,当磁导率以及介电函数实部为确定值时就可以通过这一特点确定磁导率虚部需取的最佳数值。

若考虑TM模则可以通过调节介电函数的虚部值使其恢复率达到最佳值。其调节规律与TE模类似即随着电介率虚部的增大可以抑制恢复率的偏离,并且当电介率的实部数值与其虚部数值之和为1时达到最佳效果。

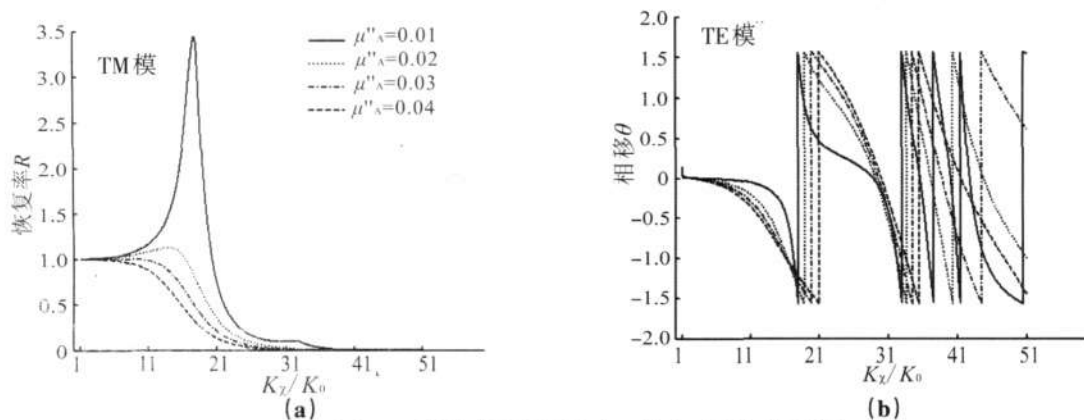


图3 A媒质磁导率虚部对FC(2)29层的成像影响
Fig.3 Imaging influence of medium A magnetic conductance on FC(2)29

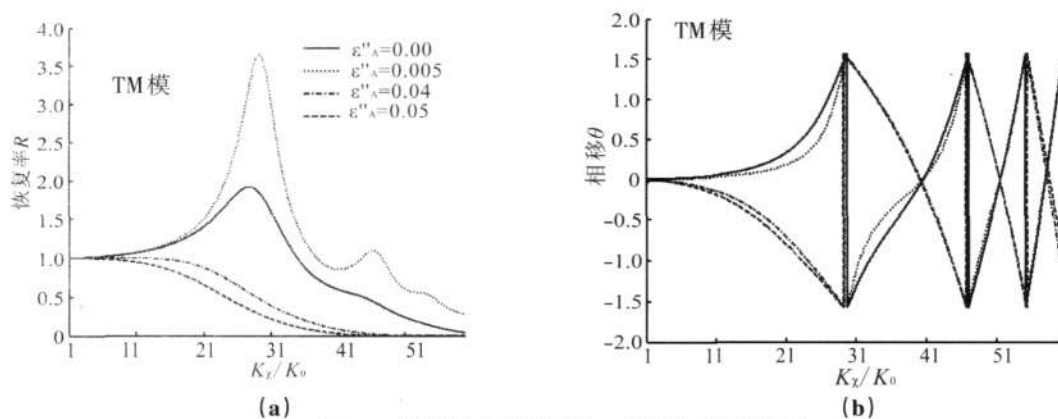


图4 B媒质介电常数周期32层结构成像的影响
Fig.4 Imaging influence of medium B dielectric constant periodic 32-layer structure

由前面的研究可知,负折射率材料的色散和损耗给成像产生了很大的影响^[12-13],而这些都是忽略正折射率媒质损耗的情形下的研究。但正折射率媒质不可避免的也存在吸收。本文进一步研究在负折射率媒质存在吸收和色散的基础上,进而考虑存在吸收非磁性的正折射率材料,通过模拟发现正折射率媒质的损耗极大地影响了完美成像,但若适当调节吸收系数的值则也会使恢复率的尖锐峰消失,使其逐渐恢复到1,并且发现由于负折射率媒质色散的存在导致的尖锐峰值可通过适当地调节正折射率媒质的吸收系数得到有效地控制,如图4所示,参数取 $\mu_B = 1$, $\epsilon'_B = -2.97$, $\epsilon''_A = 0.01$, $\mu'_A = -300/297$, $\mu''_A = 0.01$ 在TM模中当正、负折射率媒质的介电常数的实部、虚部满足 $|\epsilon'_A| + |\epsilon''_A| + |\epsilon''_B| = \epsilon'_B$ 的关系式时,恢复率为1的 K_x 范围较大。说明当衬底媒质存在吸收对提高完美成像也是有帮助的。

3 小结

利用传输矩阵方法研究了不同结构和不同参数调制下的成像特征。结果表明:在近似相同总层数和相同的参数下,不同结构对成像有一定影响即周期正负交替结构完美成像的波矢范围更大,而thue-morse模型次之,fibonacci模型最小,进一步发现当介质的介电函数或磁导率偏离1时,thue-morse模型及周期结构最大尖锐峰峰值相同并且不随着层数的增加而改变。而Fibonacci结构比周期膜的尖锐峰峰值相对较低。进一步研究了Fibonacci结构TE模中磁导率虚部对成像的影响:与周期模相似,发现磁导率虚部值的调节对此种情形具有非常有效的作用,并且只有当磁导率虚部的数值大小与介电函数实部数值大小之和为1时,其恢复率为1的 K_x 范围更广。在此基础上若考虑正折射率媒质的吸收,发现通过适当地调节正折射率媒质的吸收系数将有效地控制尖锐峰。

参考文献:

- [1] SMITH D R, PADILLA W, VIER D. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [2] SHELBY R A, SMITH D R, Nemat-Nasser S C, et al. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial[J]. Appl Phys Lett, 2001, 78(4): 489-491.
- [3] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [4] ZHANG Z M, FU C J. Unusual photon tunneling in the presence of a layer with a negative refraction index[J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(6): 1097-1099.
- [5] SMITH D R, KROLL N. Negative refractive index in left-handed material[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(18): 2933-2936.
- [6] ZHEN Y. Optical transmission and reflection of perfect lenses by left handed materials[J]. Phys Rev B, 2003, 67(19): 1-4.
- [7] GAO LEI, TANG C J. Near-field imaging by a multi-layer structure consisting of alternate right-handed materials[J]. Phys Lett A, 2004, 322(5/6): 390-395.
- [8] MAHITO KOHOMOTO, BILL SUTHERLAND, LGUCHI K. Localization in optics: quasiperiodic media[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2436-2438.
- [9] LIU N H. Propagation of light waves in thue-morse dielectric multilayers[J]. Phys Rev B, 1997, 55(6): 3543-3547.
- [10] 伍清萍, 刘正方. 电磁波在不同媒质的传输矩阵理论[J], 华东交通大学学报, 2008, 25(6): 87-90.
- [11] CUI T J, KONG J A. Time-domain electromagnetic energy in a frequency-dispersive left-handed medium[J]. Phys Rev B, 2004, 70(27): 1-7.
- [12] 尚廷义, 郑义, 张会云, 等. 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): 663-666.
- [13] 蒋美萍, 陈光, 陈宪锋, 等. 介质层厚对含负折射率介质 Bragg 微腔的影响[J]. 光子学报, 2007, 36(5): 912-917.

Modulation of Super-lattice Imaging Characteristics by Parameters and Structure

Wu Qingping

(School of Basic Sciences, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The characteristics of imaging of different structure and parameters are studied by transfer-matrix method. The perfect period structures have the widest wave scope, with thue-morse and Fibonacci having the second and the smallest scope. Imaging Characteristics is studied when negative refractive index medium dielectric constant or magnetic conductance deviates 1. It is found that the size of peak can be controlled by adjusting the spectrum-width medium dielectric constant or magnetic conductance and by changing two kinds of medium layer of ratio and the absorption coefficient of positive refractive index structural medium.

Key words: left-handed materials; image; fibonacci; thue-morse