文章编号: 0253-2239(2009)04-1092-04

二维正方晶格光子晶体平板的近场成像特性

敖 玲 冯 帅* 王义全

(中央民族大学理学院,北京 100081)

摘要 光子晶体是由两种或两种以上不同介电函数的材料周期性排列组成的一种人工晶体。由于介电函数的周期 性分布对入射光的调制作用,使得特定频率区域的入射光在光子晶体中传播时的群速度方向和相速度方向相反,因 而使得光子晶体平板表现出负折射特性。系统研究了介质柱的形状对二维正方晶格光子晶体近场成像特性的影响。 通过对分别由正方形、三角形、椭圆形、长方形等形状介质柱组成的二维正方晶格光子晶体平板近场成像特性的理论 分析,发现当介质柱形状的对称性降低到一定程度后可以实现光子晶体近场成像的纵向平移。进一步通过对相应等 频率曲线形状的分析,明确了光子晶体近场成像是由于自准直效应和负折射效应的共同作用形成的。

关键词 光学材料;光子晶体;近场成像;时域有限差分方法;左手材料

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092904.1092

Near-Field Imaging Properties of Two-Dimensional Square-Lattice Photonic Crystal Slabs

Ao Ling Feng Shuai Wang Yiquan

(Academy of Science, Central University for Nationalities, Beijing 100081, China)

Abstract Photonic crystals are man-made crystals consisting of two or more kinds of different dielectric materials arrayed periodically. Because of the collective modulation of the periodic dielectric distribution to the incident electromagnetic waves, the directions of the group velocity and the phase velocity can be opposite, a photonic crystal slab can work as a negative refractive-index material. In the letter we study the influence of the dielectric shape on the negative refraction and near-field imaging of the photonic crystal slab. By the analysis of near-field imaging properties of the two-dimensional square-lattice photonic crystals consisting of circular, square, triangular, elliptical and rectangular rods, respectively, we find that the image spot moves laterally with respective to the rectangular slab when the symmetry of the rods reduces for a certain degree. With the systemic analysis of the equifrequency-surface contours, we find that an excellent-quality near-field image of the photonic crystal slab can be formed mainly by the self-collimation and the negative-refraction effects.

Key words optical materials; photonic crystal; near-field imaging; finite-difference time-domain method; left-hand materials

1 引

言

负折射材料是指介电常数和磁导率同时为负值 的材料。Pendry^[1]认为由负折射材料制作的矩形平 板可以放大从点光源发出的消逝波成分,能够将点 光源的所有信息复制到像点,实现远远小于衍射极 限的完美实像。负折射材料具有负折射、超透镜、反 常多普勒效应等新颖的现象,在多个领域有着重大 的应用前景^[1~5]。 目前人们尚未在自然界中找到天然的负折射材料。光子晶体是由两种或者两种以上的介质或金属材料周期性排列构成的一种人工材料。最近人们研究发现在特定结构的光子晶体中也可以实现负折射现象^[6~15]。2002年Luo等^[6]研究发现,可以在由圆形介质柱组成的二维正方晶格光子晶体平板中实现超透镜成像,其中入射光位于光子晶体的第一个能带中且靠近带边的频率区域。Li等^[7]研究表明除

收稿日期: 2008-08-10; 收到修改稿日期: 2008-09-25

基金项目:国家民委科研项目(07ZY15)、国家自然科学基金(10674185,10705056)和中央民族大学青年科学基金(CUN0207)资助课题。

作者简介: 敖 玲(1959-),女,副教授,主要从事等离子体和光子晶体等方面的研究。E-mail: aolingz@sina.com

^{*} 通信联系人。E-mail: fengshuai75@163.com

了负折射效应,自准直效应和近场散射效应在二维 正方晶格光子晶体的近场亚波长成像中发挥了主导 作用。本文研究发现在由其他形状的介质柱组成的 二维正方晶格光子晶体中也存在点光源近场成像现 象,通过对不同形状介质柱成像特性的比较,得出第 一个能带中频率的近场成像特性受介质柱形状的影 响不大。当介质的对称性降低到一定程度后,可以 实现点光源与所成实像关于矩形光子晶体平板的纵 向分离,进一步明确了当前条件下的近场成像主要 是由于自准直作用形成的。

2 不同形状光子晶体的近场成像特性

2.1 正方形介质柱组成的正方晶格光子晶体

本文研究由介电常数为18,边长为0.46a的正

方形介质柱组成的二维正方晶格光子晶体,其中 a为光子晶体的晶格常数,正方形的边长沿着晶体的 ΓX 方向。运用平面波展开方法计算了上述光子晶 体第一个能带中的等频率曲线,如图 1(a)所示。可 以看到在频率 0.19 ($2\pi c/a$)等频率曲线中以 ΓM 线 为中心的部分区域,曲线形状是比较平的,并且表面 法线指向 ΓM 方向。由于对于一个确定的布洛赫 (Bloch)模,其群速度方向是平行于该点的表面法线 方向的,可以看到该区域激发的布洛赫模的群速度 方向是指向 ΓM 方向的。对于一个表面法线平行于 ΓM 方向的光子晶体平板来说,该群速度方向代表 了一种明显的自准直效应。在远离 ΓM 线的其他区 域,频率曲线相对于 Γ 点是凸起的,意味着负折射



效应的存在。

图 1 由正方形介质组成的二维正方晶格光子晶体第一个能带中的若干等频率曲线(a)和表面法线沿着晶体 ΓM 方向的矩 形晶体平板的近场成像特性(b)

Fig. 1 Equifrequency-surface contours of several frequencies in the first band of the two-dimensional square-lattice photonic crystal consisting of square dielectric (a) and the near-field imaging characteristics of the rectangular photonic crystal slab with surface normal along the ΓM direction

图 2(a)为由正方形介质柱组成的光子晶格平板的结构示意图,其中晶体平板的表面法线沿着光



图 2 表面法线沿着 ΓM 方向的矩形光子晶体平板的结构 示意图。(a)正方形;(b)三角形;(c)椭圆形;(d) 长方形
Fig. 2 Schematics of the rectangular photonic crystal slab with surface normal along the ΓM direction.
(a) square;(b) triangle;(c) ellipse; (c) rectangle

子晶体的 ΓM 方向。利用时域有限差分方法计算了 由点光源发出的光经过上述矩形光子晶体平板的传 输特性。晶体平板的宽度为 41 层介质柱,厚度为 11 层介质柱,最左侧一排介质柱的中心位于 x=0处。频率为 0. 19 的点光源放在光子晶体平板的左 侧 x=-0.5a, y=0 位置。从图 1(b)中可以看出, 由点光源发出的电磁波穿过光子晶体平板,在光子 晶体平板的右侧形成一个清晰的实像,该实像位于 晶体平板右侧 1. 7a 处,其宽度约为 3. 2a,相当于入 射光波长的 0. 608 倍。在光子晶体的内部区域,光 束的宽度随着传播距离的增加而逐渐减小,证明了 负折射效应的存在。

2.2 三角形介质柱光子晶体平板的近场成像

在保持介质柱的折射率和占空比不变的条件 下,将介质柱的形状由正方形改变为等边三角形,等 边三角形的边长为 0.7a。利用平面波展开方法计 算得到的该光子晶体第一个能带中的等频率曲线如 图 3(a)所示。比较图 3(a)和图 2(a)发现,等频率曲 线 0.19 的形状基本上是一样的,说明了长波长的入 射光在光子晶体中的传播特性受介质柱的形状影响 比较小。不同之处仅在于三角形介质柱 0.19 等频 率曲线的长度比正方形介质柱 0.19 曲线的长度要 稍微长一些。

由三角形介质柱组成的光子晶格平板的结构如 图 2(b)所示。与正方形介质柱类似,此光子晶体平 板的宽度为 41 层,厚度为 11 层。从图 3(b)中可以



看出,由点光源发出的电磁波穿过光子晶体平板,在 平板的右侧 2.1a 位置处形成了一个实像,其宽度约 为 2.8a,相当于入射光波长的 0.532 倍。在晶体平 板的内部区域,光束的宽度随着传播距离的增加而 逐渐减小,证明了负折射效应的存在。比较图 2(b) 和图 3(b)可见,在两种介质柱情况下,近场成像的 空间位置基本上没有改变,但像点的质量有了一定 程度的改善,原因是三角形介质柱 0.19 等频率曲线 的长度要长一些,意味着由点光源发出的更多部分的 光波可以通过光子晶体平板,在右侧实现近场成像。





Fig. 3 Equifrequency-surface contours of the triangular-dielectric photonic crystal (a) and the near-field imaging characteristics of the crystal slab

的负折射方向。

2.3 椭圆形介质柱光子晶体平板的近场成像

椭圆形介质柱的长半轴长度为 0.424a, 短半轴 的长度为 0.212a,其中 a 为正方晶格光子晶体的晶 格常数,介质柱的相对介电常数为 14,介质柱的长 轴沿着晶体的 ΓX 方向。上述光子晶体的第一个能 带的等频率曲线如图 4(a)所示。频率为 0.196 的 等频线不再是关于 ΓM 方向对称的。在图中 P_1 区 域内频率 0.196 的等频线是非常直的,并且表面法



线指向一个确定的方向(图中表示为 P_1 方向)。在

靠近布里渊区边界 X'M 的小部分区域(图中表示为

 P_2 区域),其等频线的表面法线指向一个非常明显



图 4 椭圆形介质光子晶体的等频线(a)和晶体平板的近场成像特性(b)

Fig. 4 Equifrequency-surface contours of the elliptical-dielectric photonic crystal (a) and the near-field imaging

characteristics of the crystal slab

分别为 8 层。从图 4(b)可以看到在晶体平板的另一侧呈现了一个质量非常好的实像。但是所成的像点 不再与物点处于相同的水平位置,而是从 y=0 的位 置向下移动了一段距离。换句话说,像和物的连线不 再是沿着矩形光子晶体平板的法线方向了。

2.4 长方形介质柱光子晶体平板的近场成像

长方形介质柱的两个边长分别为 0.75*a* 和 0. 375*a*,其中 *a* 为正方晶格光子晶体的晶格常数,介 质柱的介电常数为 14,介质柱的长边沿着晶体的 *ΓX* 方向。这样长方形介质柱与椭圆介质柱具有了 相同的介电常数、长短边比值和占空比。





图 5 长方形介质光子晶体的等频线(a)和晶体平板的近场成像特性(b) Fig. 5 Equifrequency-surface contours of the rectangular-dielectric photonic crystal (a) and the near-field imaging

characteristics of the crystal slab

3 结 论

研究了由各种形状介质柱体组成的二维正方晶 格光子晶体的近场成像特性。与人们广泛研究的圆 形介质柱类似,由其他形状介质柱组成的晶体平板 也存在点光源近场成像特性。通过对不同形状介质 柱光子晶体成像特性的比较,得出近场成像特性是 由于自准直效应和负折射效应的共同作用形成的。

参考文献

- J. B. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 3966~3969
- 2 V. G. VeSelago. The electromagnetics of substances with simultaneously negative values of ε and μ [J]. Sov. Phys. Usp., 1968, 10: $509 \sim 514$
- 3 D. R. Smith, D. Schurig. Electromagnetic wave propagation in media with indefinite permittivity and permeability tensors [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**: 077405
- 4 J. S. Li, L. Zhou, C. T. Chan *et al.*. Photonic band gap from a Stack of positive and negative index materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**: 083901
- 5 R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292: 77~79

- 6 C. Luo, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos et al.. All-angle negative refraction without negative effective index [J]. Phys. Rev. B, 2002, 65: 201104
- 7 Z. Y. Li, L. Li. Lin. Evaluation of lensing in photonic crystal slabs exhibitin negative refraction[J]. Phys. Rev. B, 2003, 68: 245110
- 8 X. D. Zhang. Image resolution depending on slab thickness and object distance in a two-dimensional photonic-crystal-based superlens[J]. Phys. Rev. B, 2004, 70: 195110
- 9 J. Li, M. H. Lu, J. Ren *et al.*. All-angle negative refraction imaging effect with complex two-dimensional hexagonal photonic crystals[J]. J. Appl. Phys., 2007, **102**: 073538
- 10 S. Feng, Z. Y. Li, Z. F. Feng *et al.*. Engineering the imaging properties of a metallic photonic-crystal slab lens [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88: 031104
- 11 S. Feng, Z. Y. Li, Z. F. Feng *et al.*. Imaging properties of an elliptical-rod photonic-crystal slab lens[J]. *Phys. Rev. B*, 2005, 72: 075101
- 12 S. Feng, Y. Q. Wang, Z. Y. Li *et al.*. Imaging properties of a rectangular-lattice metallic photonic-crystal slab[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, 24: 229~232
- 13 C. Y. Qiu, X. Zhang, Z. Y. Liu. Far-field imaging of acoustic waves by a two-dimensional sonic crystal [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, 71: 054302
- 14 Y. T. Fang, T. G. Shen. Multi-imaging by photonic crystal slab using negative refraction[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, 22: 949~951
- 15 S. He, Z. C. Ruan, L. Chen *et al.*. Focusing properties of a photonic crystal slab with negative refraction[J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **70**: 115113