

# 准周期光子晶体平板透镜的光会聚

任 坤<sup>1</sup> 任晓斌<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

<sup>2</sup> 天津科技大学理学院, 天津 300222

**摘要** 提出了一种能够实现负折射的准周期光子晶体(QPC)。该准晶光子晶体具有十二重对称性,由介质背景下空气孔的准周期阵列组成。用时域有限差分方法研究了电磁波通过该十二重准晶后的传播行为。对劈形准晶样品的研究表明,电磁波在该准晶结构中发生了负折射现象。进一步利用该准晶制成平行平板,研究了平板的表面截面对电磁波传播的影响。发现改变平板的表面截面,可以调节电磁场在板后的分布。在合适的界面条件下,准晶平板对电磁波实现了会聚。因此,在实际应用中应仔细选择适当的界面参数。

**关键词** 光学器件;负折射;时域有限差分方法;光子晶体;准周期;透镜

中图分类号 O75 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2317

## Focus Achieved by a Slab Lens of Quasiperiodic Photonic Crystal

Ren Kun<sup>1</sup> Ren Xiaobin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> College of Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222

**Abstract** A type of quasiperiod photonic crystal (QPC) that can achieve negative refraction is proposed. The QPC has 12-fold symmetry and consists of a quasiperiod array of air-holes arranged in a dielectric background. The propagation of electromagnetic wave across the 12-fold quasicrystal is investigated by employing finite difference time domain method. Simulation on the wedge-shaped sample demonstrates that negative refraction can occur in the quasicrystal structure. Parallel QPC slab is further designed to explore the influence of surface termination of flat slab on the propagation of electromagnetic wave. The results show that by changing the surface termination of flat slab, the electromagnetic field distribution behind the slab can be modulated. Under appropriate surface condition, focusing can be obtained by the QPC slab. As a result, proper surface parameter should be carefully chosen for practical applications.

**Key words** optical devices; negative refraction; finite difference time domain method; photonic crystal; quasiperiod; lens

## 1 引 言

负折射现象有着广泛的应用前景,例如利用负折射材料制作超透镜<sup>[1]</sup>。研究表明光子晶体(PC)具有负折射效应<sup>[2~4]</sup>,对光子晶体中负折射的研究已经成为一个非常活跃的领域,但关于准周期光子晶体的负折射行为还有待研究。准周期光子晶体

(QPC)也称为光学准晶。准周期光子晶体比通常的周期光子晶体有更高的旋转和点反射对称性。由于结构上具有更大的灵活性,准晶比周期光子晶体有更大的自由度来改变自身的光学特性。比如准晶中的缺陷模式要比周期光子晶体中的更复杂更丰富<sup>[5,6]</sup>,因此对准晶中的折射行为进行了研究。

收稿日期: 2008-10-09; 收到修改稿日期: 2008-11-23

基金项目: 国家 973 计划(2004CB719804)和天津市应用基础及前沿技术研究计划(09JCYBJC01500)资助课题。

作者简介: 任 坤(1976—),女,讲师,博士,主要从事光子晶体、负折射、量子光学等方面的研究。

\* 通信联系人: E-mail: xiaobin\_r@126.com

## 2 准晶的结构和能带

光子晶体除了由低介电常数背景中的高介电常数材料周期排列构成,还可以由高介电常数背景中的低介电常数材料排列构成。这两种类型的光子晶体有所不同,研究表明,TM 偏振(磁场在平面内)的带隙易在孤立的高介电常数介质的晶格中产生,而 TE 偏振(电场在平面内)的带隙则易在连续的高介电常数介质的晶格中存在。以具有高对称性的十二重准晶为例,研究空气孔型准晶的折射行为。准晶的结构如图 1 中插图所示。它是由边长相等的正方形和三角形在空间按照一定的规律堆砌而成的。在十二重准晶的拼砌图案的正方形和三角形的顶角上放置空气柱。

分析中,正方形和三角形的边长都设为  $a$ 。背景介质的介电常数为 8.6。考虑空气孔半径为  $0.3a$  时的情况。利用时域有限差分方法,计算的 TM 偏振的透过谱在图 1 中给出。可以看出,频率在 0.387 和 0.413 之间存在一个带隙(采用了归一化频率,单位是  $2\pi c/a$ ,其中  $c$  为真空中的光速)。研究准晶结构中电磁波的折射特征,则主要考虑带边上的频率。

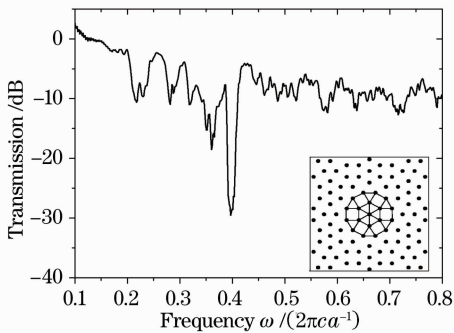


图 1 十二重准晶的 TM 透射谱

Fig. 1 Transmission spectra for TM wave

## 3 准晶中的折射分析

利用图 2(a)所示的劈形样品,研究电磁波通过样品后的折射情况。为了避免多次偏折,将电磁波垂直入射到样品的左表面。电磁波进入样品后传播方向不发生改变,将一直传播到样品的出射面。在劈形样品右侧与空气的界面上电磁波将发生折射,此时电磁波若向下折射,折射和入射的电磁波位于法线的两侧,属于正折射;若电磁波向上折射,折射和入射的电磁波都位于法线的同一侧,属于负折射。电磁波的频率取为 0.427,入射角为  $30^\circ$ 。模拟结果如图 2(b)所示,从图中可以看出,电磁波从劈形样

品出射后向上折射,说明在该模拟条件下,电磁波经过十二重准晶时,存在负折射现象。

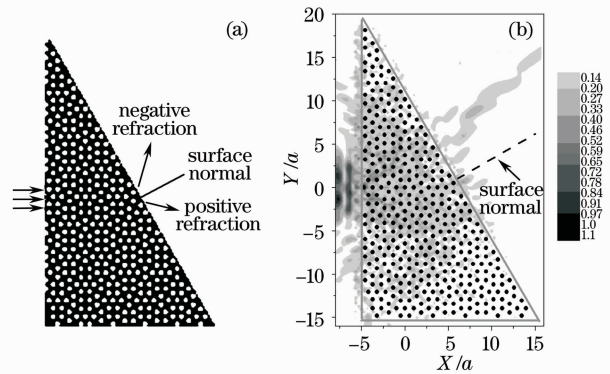


图 2 (a) 折射模拟时采用的劈形样品;(b)电磁波通过劈形样品的强度分布

Fig. 2 (a) Wedge-shaped sample used in the simulation, (b) Intensity pattern of electromagnetic wave across the wedge-shaped sample

## 4 准晶平板的会聚分析

用负折射材料制作的平行平板可以对点光源发出的电磁波产生会聚,实现透镜成像。利用十二重准晶设计平行平板,结构如图 3 所示,研究点光源发出的电磁波通过准周期光子晶体平板后的会聚情况,进一步研究准晶中发生的折射现象。由于准晶的非平移对称性,当准晶平板厚度稍有变化时,平板表面对应不同的空气柱分布情况。于是通过稍微改变板厚对准晶平板的界面进行调节,分析不同界面对负折射会聚产生的影响。选取的准晶平板关于 X 和 Y 轴对称,平板前后表面到最近的空气孔的中心距离相同,大小都取  $\delta$ ,如图 3 中所示,图中黑点为对称中心。进行场分布模拟时,对于选定的厚度,微调  $\delta$  大小,选取不同的表面作为分析对象。

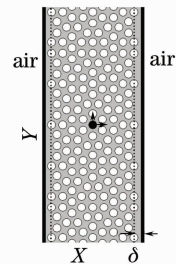


图 3 准周期光子晶体平板的结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of QPC slab

分析中,选取准晶构成的平板尺寸为  $30a$  宽,  $7.5a$  厚。点光源入射频率为 0.427,距离准晶平板左表面的距离为  $3.7a$ 。当  $\delta = 0.6a$  时,场分布模拟

结果如图 4 所示。X 和 Y 分别表示与电磁波传播方向平行和垂直的方向。可以看到在平板的右侧出现了电磁波的会聚。当准晶平板的参数  $\delta$  微小变化时，将对应不同的界面条件，图 5 给出了几种不同界面条件下，从准晶平板出射后的场分布。可以看出，电磁波的分布并不一样，有时会聚情况不是很好，甚至还出现发散，如图 5(c) 所示。这说明在合适的晶体表面截面下，入射波可以有效的激发表面波，从而改善准晶平板的会聚情况。

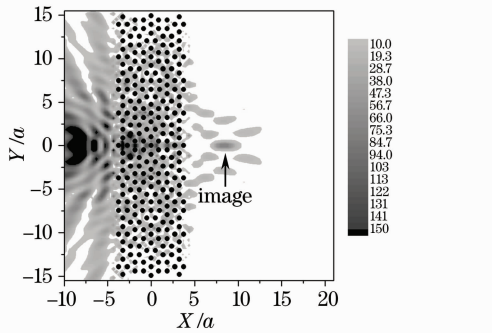


图 4 点光源通过准晶平板时的电场强度分布  
Fig. 4 Intensity distribution of a point source and its image across a QPC slab with  $\delta = 0.6 a$

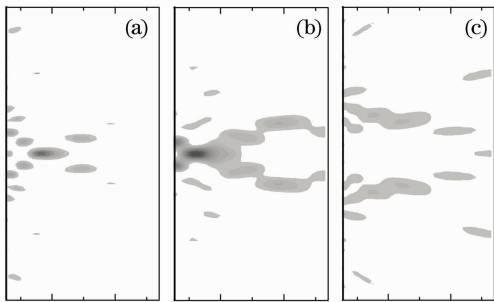


图 5 界面条件不同时的电场强度分布  
(a)  $\delta = 0.2 a$ ; (b)  $\delta = 0.5 a$ ; (c)  $\delta = 0.8 a$   
Fig. 5 Intensity distribution of different surface condition.  
(a)  $\delta = 0.2 a$ ; (b)  $\delta = 0.5 a$ ; (c)  $\delta = 0.8 a$

对多种厚度的准晶平板做了类似研究。图 6 给出的是平板厚度为  $5.5a$  的电场强度分布图。此时  $\delta = 0a$ ，光源到样品左表面的距离为  $2.7a$ ，入射的点光源频率仍然为  $0.427$ 。如图 6 所示，在准晶平板的另一侧有一个会聚点，说明平板可以实现透镜功能。图 7 给出了几种不同界面条件下，从准晶平板出射后的场分布。可以看出，此时准晶平板后的电场分布也不同。因此，由于准晶的非周期性特点，光子晶体表面截面对电磁波传播有重要影响。若要利用准晶负折射产生会聚，应筛选界面参数，选取合适的界面条件，才能获得高质量的成像。

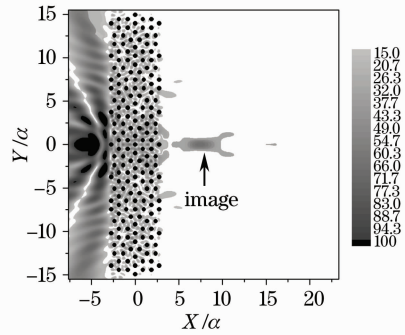


图 6 点光源通过准晶平板时的电场强度分布  
Fig. 6 Intensity distribution of a point source and its image across a QPC slab with  $\delta = 0 a$

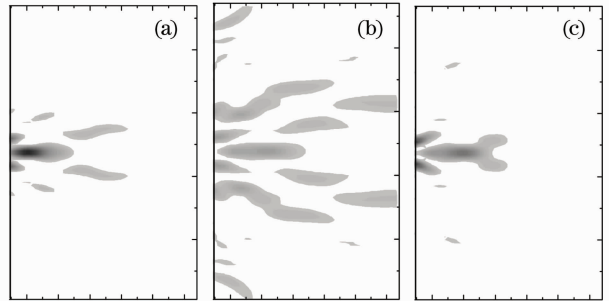


图 7 界面条件不同时的电场强度分布。  
(a)  $\delta = 0.2 a$ ; (b)  $\delta = 0.3 a$ ; (c)  $\delta = 0.6 a$

Fig. 7 Intensity distribution under different surface conditions  
(a)  $\delta = 0.2 a$ ; (b)  $\delta = 0.3 a$ ; (c)  $\delta = 0.6 a$

## 5 结 论

研究证明了在十二重准周期光子晶体中存在负折射现象。利用这种准晶可以设计平板透镜，实现电磁波的会聚。研究还发现，调节准晶平板的界面条件，可以影响电磁波在板后的会聚质量。因此，利用准晶平板的会聚性质时，若想实现超透镜成像，界面参数是必需考虑的一个因素

## 参 考 文 献

- 1 Pentry J. B. Negative refraction makes a perfect lens. [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**: 3966~3969
- 2 Tang Z, Zhang H, Peng R *et al.*. Subwavelength imaging with two symmetrical interfaces by dielectric-tube photonic crystals [J]. *Appl. Phys. A*, 2007, **87**: 223~225
- 3 Zhang Hao, Zhu Heyuan, Qian Liejia *et al.*. Collimations and negative refractions by slabs of 2D photonic crystals with periodically-aligned tube-type air holes. [J]. *Opt. Express* 2007, **15**(6): 3519~3530
- 4 Ren Kun, Li Zhiyuan, Ren Xiaobin *et al.*. Three-dimensional light focusing in inverted-opal photonic crystals. [J]. *Phys. Rev. B*, 2007, **75**(11): 115108
- 5 Jin Chongjun, Cheng Bingying, Man Baoyuan *et al.*. Two-dimensional dodecagonal and decagonal quasiperiodic photonic crystals in the microwave region. [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **61**(16): 10762~10767
- 6 Bayindir M, Cubukcu E, Bulu I *et al.*. Photonic band-gap effect, localization, and waveguiding in the two-dimensional Penrose lattice. [J]. *Phys. Rev. B* 2001, **63**(16): 161104