

# 二维空气环型光子晶体的负折射成像特性\*

孔令凯<sup>1)</sup> 郑志强<sup>1)†</sup> 冯卓宏<sup>1)</sup> 李小燕<sup>2)</sup> 姜翠华<sup>1)</sup> 明海<sup>3)</sup>

1) 福建师范大学物理与光电信息科技学院, 福州 350007)

2) 武警福州指挥学院, 福州 350002)

3) 中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

(2008 年 10 月 8 日收到, 2009 年 2 月 21 日收到修改稿)

采用平面波展开法和时域有限差分法研究了由空气环组成的二维三角晶格光子晶体平板的负折射成像特性. 研究表明对于外半径为  $0.4a$ , 内半径  $0-0.13a$  的空气环型光子晶体, 第二能带中归一化频率为  $0.3$  的电磁波可以实现有效折射率为  $-1$  的负折射成像. 通过光子晶体有效折射率的计算, 得到了有效折射率为  $-1$  的电磁波频率随空气环内径由  $0-0.2a$  变化的规律, 并由对应等频曲线的变化解释了结构参数对光子晶体平板成像的影响.

关键词: 光子晶体, 空气环, 负折射, 等频曲线

PACC: 4270Q, 7820P

## 1. 引言

负折射介质是指介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  同时为负值的介质, 这一概念最早是由 Veselago<sup>[1]</sup> 提出的. 由点光源发出的光经过一块矩形的负折射介质平板, 会在平板另一侧形成一个实像, 在负折射介质中, 光波传播的方向与能量传播的方向相反, 同时电场、磁场与波矢满足左手法则, 因此负折射介质也被称为“左手介质”<sup>[2]</sup>. 这种改变引起了一些非常引人注目的现象, 例如反常多普勒频移、逆 Cherenkov 辐射、负折射现象等<sup>[3-5]</sup>.

光子晶体是由两种或者两种以上折射率不同的材料周期性排列组成的人工晶体<sup>[6,7]</sup>. 由于材料折射率的周期性分布对入射电磁波的周期性调制, 可以使得在某些特殊的波段, 电磁波在光子晶体中传播的群速度方向和相速度方向相反<sup>[8]</sup>, 从而具有负折射介质的特点. 自 2000 年, Notomi 提出光子晶体的负折射现象<sup>[8]</sup>, 国内外的许多科研工作者对光子晶体的负折射现象在理论和实验方面都进行了广泛而深入的研究<sup>[9-20]</sup>. 2002 年, Luo 研究发现在二维正方晶格光子晶体中, 对于第一个能带中靠近带边的频率范围, 光子晶体对入射光的集体散射效果出现了类似于负折射介质的负折射效应和超棱镜效

应<sup>[9]</sup>. 2003 年, Parimi 在实验上证实了光子晶体的负折射现象<sup>[10]</sup>. 2004 年, Wang 研究发现了二维三角格子光子晶体的远场成像<sup>[11]</sup>. 基于正方和三角晶格光子晶体, 很多研究小组在光子晶体结构、成像性能等方面都进行了更为详细的研究<sup>[13-23]</sup>. 国内的一些研究小组在光子晶体负折射研究方面也取得了一些不错的成果. 2004 年, Zhang 研究小组发现, 在由金属圆柱组成的二维三角晶格光子晶体中, 对于第二个能带中的特定频率区域, 其等频率曲线的形状非常接近一个理想的圆形, 并且不同频率所对应的圆形的半径随着频率的增加而减小, 意味着对于这部分入射光来说, 该光子晶体可以看作是一种各向同性材料并且其折射率为负值<sup>[13]</sup>. 通过对特定频率空间电场分布的数值计算, 发现物距、像距和平板厚度之间满足折射率为  $-1$  的透镜成像定律. 同年, He 等研究了三角晶格光子晶体的负折射成像特性<sup>[17]</sup>. 相比正方晶格的光子晶体, 三角晶格结构能够实现远场成像, 因而具有更好的研究价值.

本文研究了空气环组成的二维三角晶格的光子晶体平板的负折射成像. 空气环型光子晶体的结构相对传统的光子晶体增加了一个结构参数, 因而更易于调节光子晶体平板的成像性能. 如果在空气环内填充液晶等各向异性材料, 该结构的光子晶体在能带结构上会表现出更好的可调谐性能. 通过有效

\* 福建省自然科学基金(批准号: A0510014), 福建省科技厅项目(批准号: 2006F5025)资助的课题.

† E-mail: zqzheng@fjnu.edu.cn

折射率的计算,我们发现了有效折射率为  $-1$  的电磁波频率随光子晶体结构参数的变化关系,进而得到优化的空气环型光子晶体结构.采用时域有限差分法模拟光子晶体平板的成像过程,模拟结果很好的证实了由平面波法计算得到的结论.

## 2. 空气环型光子晶体的负折射成像特性

空气环型光子晶体的结构如图 1 所示.空气环型光子晶体的结构可以看作是由三角格子的空气孔和介质柱两种类型的光子晶体嵌套而成.即半径为  $r$  (空气环内径),相对介电常数为  $\epsilon_1$  的电介质柱插

在三角格子的空气孔阵列中,空气孔的半径为  $R$  (空气环外径),背景材料的相对介电常数  $\epsilon_2$ .在本文的研究中,我们仅讨论  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$  的情况,即电介质柱的相对介电常数与背景材料相同,计算中我们选取的  $\epsilon$  为 12.96.每个原胞包含 1 个介质柱和 1 个空气环.首先我们选取空气环外径  $R = 0.4a$ ,内径  $r = 0.1a$ ,其中  $a$  为晶格常数,由平面波展开法计算得到该结构光子晶体的能带结构及第二能带的等频曲线(TM 偏振)如图 2 所示.为了便于比较,我们同时计算了相同背景电介质材料空气孔半径为  $0.4a$  的空气孔型三角晶格光子晶体的能带结构<sup>[11]</sup>,图示的等频曲线均标出了其相应的频率.

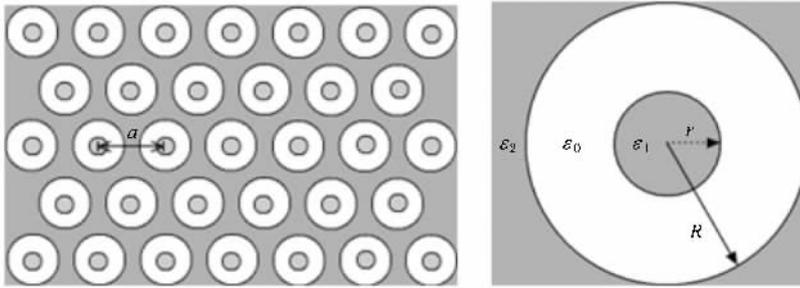


图 1 三角格子空气环型光子晶体的结构

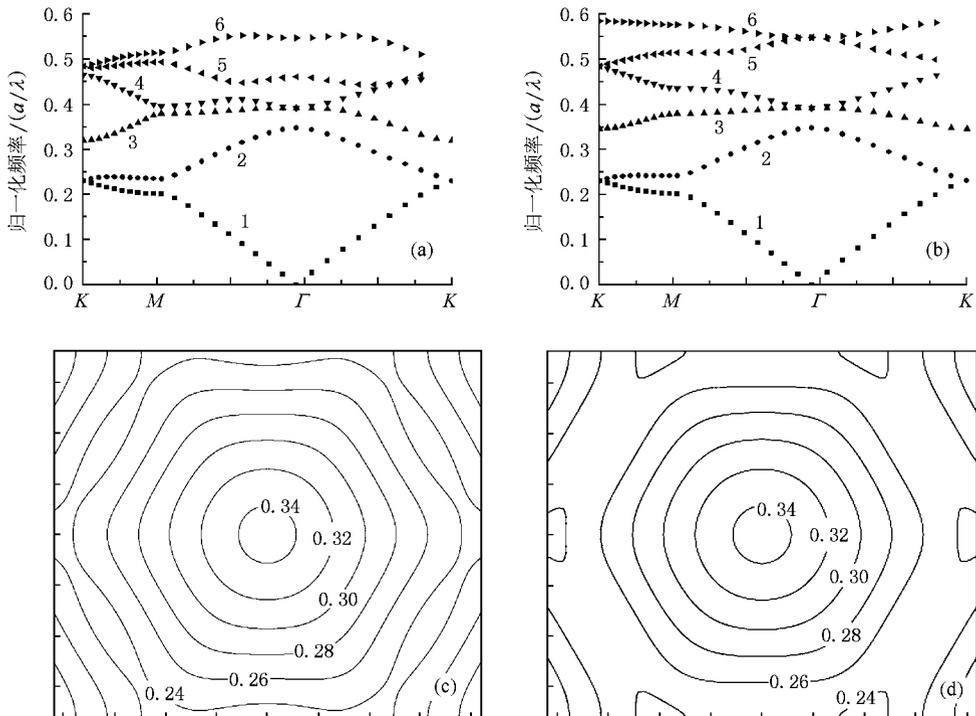


图 2 空气环与空气孔型三角格子光子晶体的能带结构(TM 偏振)及第二能带中的部分等频曲线(曲线 1—6 分别为能带 1—能带 6)(a)(c) $r = 0.1a$ ,  $R = 0.4a$ ; (b)(d) $R = 0.4a$

通过对比空气环和空气孔型光子晶体的能带结构我们发现,两种结构的第一、二能带色散曲线几乎没有明显变化,而在较高的五、六能带色散曲线变化相对比较明显.从两种结构对应的第二能带的等频曲线也可以得到相同的结论.但是,空气环型光子晶体比以往的空气孔或介质柱型光子晶体在结构上多了一个参数(空气环的内径),更为重要的是空气环型结构也可以由两种不同介电常数的材料复合而成,即内部介质柱与背景材料不同,其能带结构都将表现出一些新颖的特性.如果在空气环区域填充某种功能材料,如液晶,空气环型结构光子禁带、负折射都可能会有更好的可调谐性能<sup>[24, 25]</sup>.图 2(c)(d)

分别给出了空气环和空气孔结构的光子晶体在第二能带的等频曲线分布.通过进一步对有效折射率的计算,我们发现有效折射率  $n = -1$  对应的电磁波频率空气环型光子晶体为 0.30018,空气孔型为 0.3009,并没有太大的变化.

我们采用时域有限差分法模拟了两种光子晶体的平板成像过程,如图 3(a)(b)所示即为 FDTD 模拟得到的电场分布.选取的光子晶体平板为 7 层结构,平板两侧的界面法线均沿  $TM$  方向,归一化频率为 0.3(TM 偏振)的点光源置于平板前  $2a$  处,在光子晶体平板的另一侧都得到了非常清晰的点像,像的分辨率(半高宽度)可达到  $0.2\lambda$ .

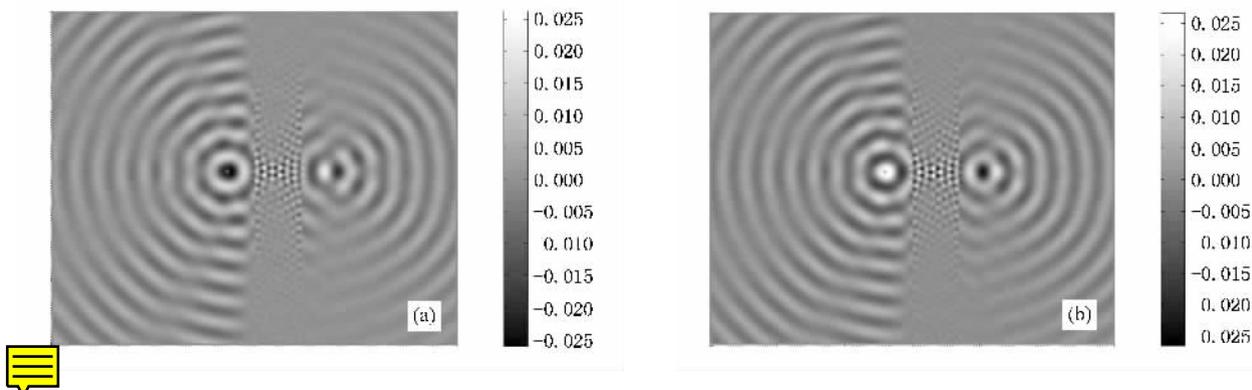


图 3 FDTD 模拟两种结构光子晶体平板成像中的电场分布,归一化频率为 0.3(TM 偏振) (a)空气环结构 (b)空气孔结构

由数值模拟结果不难看出,对于空气环型光子晶体,在内部介质柱半径不是很大的条件下( $r = 0.1a$ ),可以实现与空气孔型光子晶体等效效果的负折射成像.而空气环型光子晶体在实验制作过程当中会大大节省光刻时间,降低制作成本<sup>[26]</sup>.接下来我们将分析内部介质柱尺寸对负折射成像的影响,进而确定出内部介质柱的临界半径大小(即不影响负折射成像的条件下内部介质柱半径的最大值).

### 3. 空气环内径变化对光子晶体负折射成像的影响

通过前面的分析我们发现,对于内径为  $0.1a$  的空气环型光子晶体可以实现与空气孔型效果相同的负折射成像.但内部介质柱的尺寸必须在有限的范围内才能实现有效折射率为  $-1$  的负折射成像.采用平面波展开法,通过计算光子晶体的有效折射率和等频图来确定内部介质柱半径的临界大小.图 4 为有效折射率  $-1$  的电磁波频率随空气环内径的变化情况(空气环外径选取为  $0.4a$ ).从图中可以看

出空气环内径从零一直增大到  $0.2a$  的过程中,有效折射率为  $-1$  的电磁波的归一化频率分布在 0.3 左右,仅有不到  $\pm 0.001$  的变化,但这并不表示空气环内径增加对负折射成像没有大的影响,还必须要考虑到等频曲线的变化.

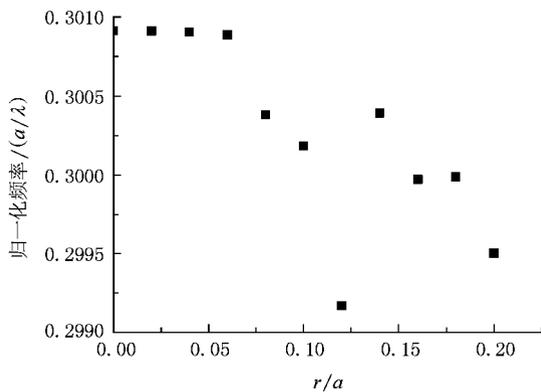


图 4 有效折射率为  $-1$  的电磁波频率随空气环内径的变化

不同内径的三角晶格空气环型光子晶体对应的等频曲线分布如图 5 所示.从等频曲线的变化不难

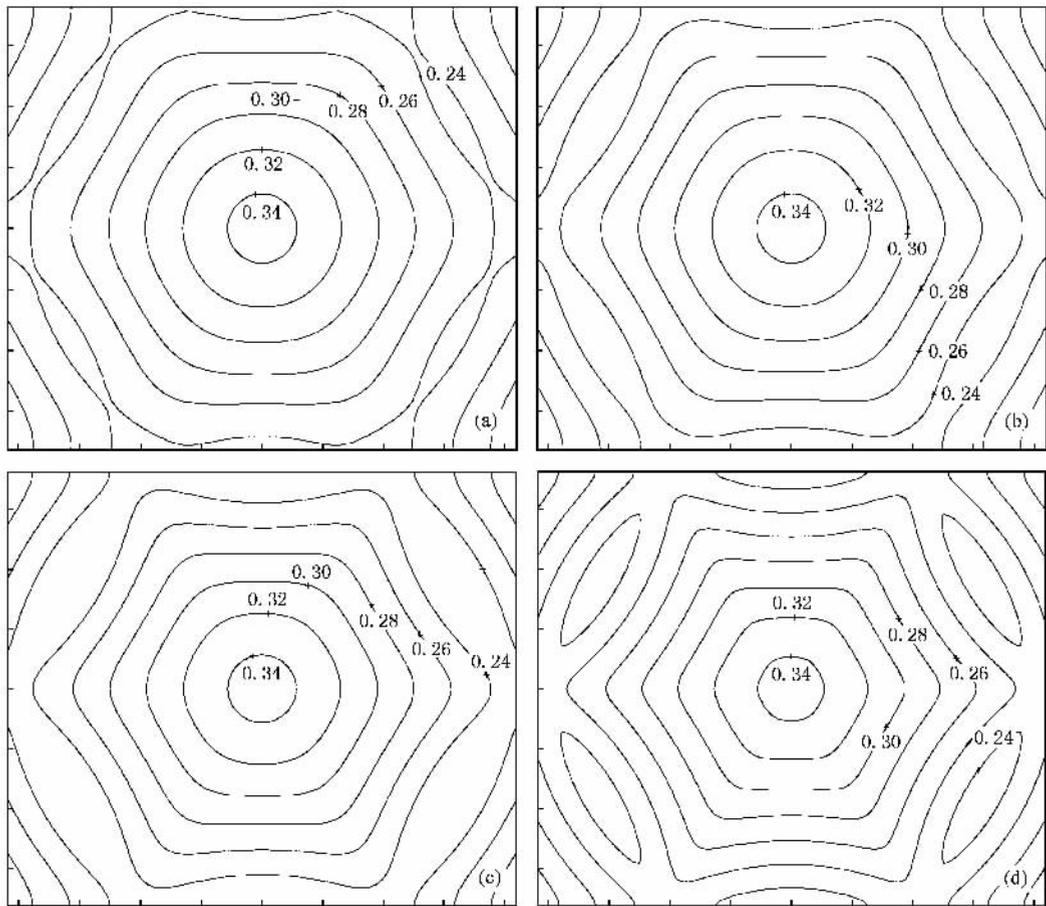


图 5 不同空气孔内径对应的等频曲线分布 (a)  $r=0.08a$  (b)  $r=0.12a$  (c)  $r=0.16a$  (d)  $r=0.2a$

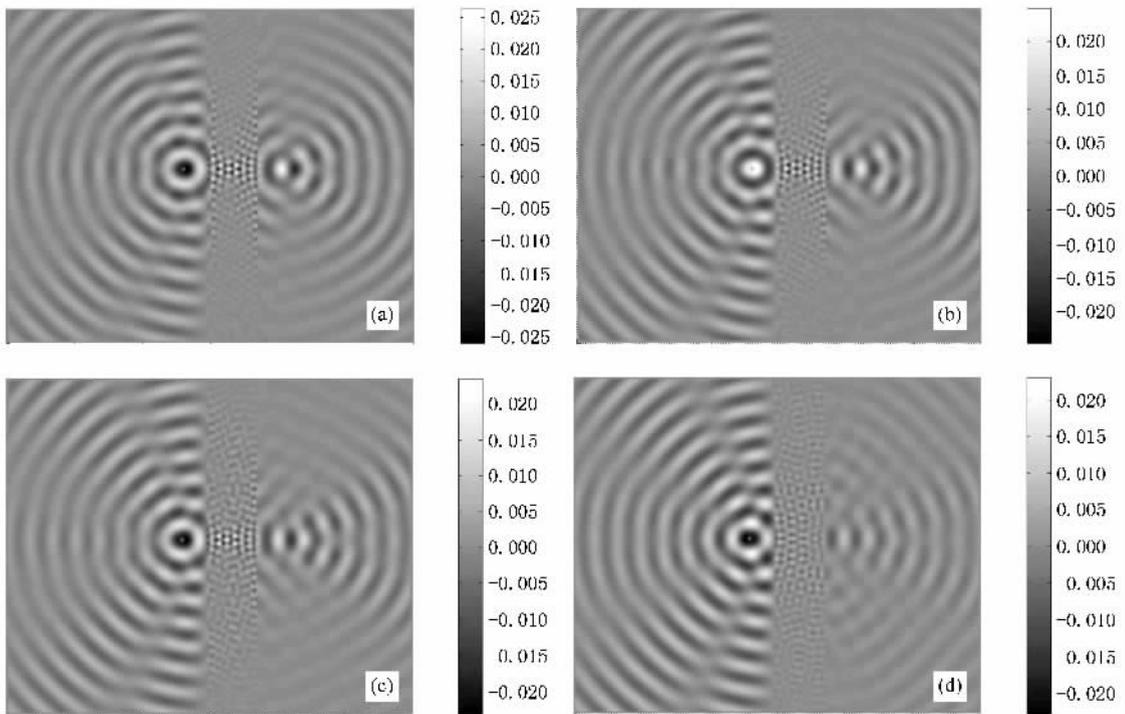


图 6 不同空气环内径对应的电场分布 (a)  $r=0.08a$  (b)  $r=0.12a$  (c)  $r=0.14a$  (d)  $r=0.20a$

看出,随着空气环内径的增加,归一化频率为 0.3 的等频曲线的形状逐渐由圆形变成正六边形,即各向异性的特性将明显增强,进而会导致成像质量越来越差。

点光源通过不同内径的空气环型光子晶体而形成的像点是有较大差别的。将同一点光源分别置于不同的光子晶体平板前,保持点光源到平板的距离不变,且点光源的频率均为  $0.3(a/\lambda)$ ,FDTD 数值模拟的电场分布如图 6 所示。从模拟结果不难看出,随着空气环内径的增大,光子晶体右侧得到的像的质量确实越来越差,很好地证明了由等频曲线分析得到的结论。通过分析等频曲线和时域有限差分法(FDTD)模拟的结果,我们得到空气环内径的临界值在  $0.13a$  左右。

## 4. 结 论

本文采用平面波展开法和时域有限差分法研究了由空气环组成的二维三角晶格光子晶体平板的负折射成像特性。对于外半径为  $0.4a$ ,内半径  $0-0.13a$  的空气环型光子晶体,在第二能带中与有效折射率  $-1$  对应的归一化频率分布在  $0.3$  左右,而且在空气孔内径由  $0-0.13a$  变化过程中这一频率基本保持不变,均可以实现较理想的负折射成像。通过光子晶体有效折射率的计算,得到了有效折射率为  $-1$  的电磁波频率随空气孔内径由  $0-0.2a$  变化的规律并由等频曲线形状的变化解释了结构参数对光子晶体平板成像的影响。研究结果对于实验制作负折射光子晶体平板有很好的指导意义。

- [ 1 ] Veselago V G 1968 *Phys. Usp.* **10** 509
- [ 2 ] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [ 3 ] Fang N, Zhang X 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 161
- [ 4 ] Wiltshire M C K, Pendry J B, Young I R *et al* 2001 *Science* **291** 849
- [ 5 ] Shen J T, Platzman P M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3286
- [ 6 ] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [ 7 ] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2846
- [ 8 ] Notomi M 2000 *Phys. Rev. B* **62** 10696
- [ 9 ] Luo C, Johnson S G, Joannopoulos J D, Pendry J B 2002 *Phys. Rev. B* **65** 201104
- [ 10 ] Parimi P V, Lu W T, Vodo P, Sridhar S 2003 *Nature* **426** 404
- [ 11 ] Wang X, Ren Z F, Kempa K 2004 *Opt. Express* **12** 2919
- [ 12 ] Luo C, Johnson S G, Joannopoulos J D, Pendry J B 2003 *Phys. Rev. B* **68** 045115
- [ 13 ] Zhang X D 2004 *Phys. Rev. B* **70** 195110
- [ 14 ] Hu X, Chan C T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1520
- [ 15 ] Xiao S, Qiu M, Ruan Z, He S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4269
- [ 16 ] Li Z Y, Lin L L 2003 *Phys. Rev. B* **68** 245110
- [ 17 ] He S L, Ruan Z C, Chen L, Shen J 2004 *Phys. Rev. B* **70** 115113
- [ 18 ] Zhang X D 2005 *Phys. Rev. B* **71** 165116
- [ 19 ] Feng S, Li Z Y, Feng Z F *et al* 2005 *Phys. Rev. B* **72** 075101
- [ 20 ] Feng Z F, Zhang X D, Ren K *et al* 2006 *Phys. Rev. B* **73** 075118
- [ 21 ] Li Y Y, Gu P F, Li M Y, Zhang J L, Liu X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2596 ( in Chinese ) [ 厉以宇、顾培夫、李明宇、张锦龙、刘旭 2006 物理学报 **55** 2596 ]
- [ 22 ] Zhang B, Wang Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1404 ( in Chinese ) [ 张波、王智 2007 物理学报 **56** 1404 ]
- [ 23 ] Li G J, Kang X L, Li Y P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6403 ( in Chinese ) [ 李国俊、康学亮、李永平 2007 物理学报 **56** 6403 ]
- [ 24 ] Hamza Kurt, Citrin D S 2005 *Opt. Express* **13** 10316
- [ 25 ] Kurt H, Hao R, Chen Y *et al* 2008 *Opt. Lett.* **33** 1614
- [ 26 ] Mulot M, Säynätjoki A, Arpiainen S *et al* 2007 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **9** S415

# Focusing property of two-dimensional photonic crystals with ring-shaped air holes<sup>\*</sup>

Kong Ling-Kai<sup>1)</sup> Zheng Zhi-Qiang<sup>1)†</sup> Feng Zhuo-Hong<sup>1)</sup> Li Xiao-Yan<sup>2)</sup> Jiang Cui-Hua<sup>1)</sup> Ming Hai<sup>3)</sup>

1) *School of Physics and OptoElectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China*

2) *Fuzhou Command Academy of Armed Police Force, Fuzhou 350002, China*

3) *Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

( Received 8 October 2008 ; revised manuscript received 21 February 2009 )

## Abstract

Imaging properties of two-dimensional photonic crystal slab lens consisting of a triangular lattice of ring-shaped air holes in a high-refraction-index dielectric medium have been studied. The results calculated by the plane wave expansion method (PWE) and the finite-difference time-domain method (FDTD) show that the effective index  $n = -1$  can be realized in this structure. A perfect image can be obtained by increasing the inner radius of ring-shaped holes from 0 to  $0.13a$  with the outer radius  $0.4a$  at the normalized frequency  $0.3(a/\lambda)$ . Based on the result of normalized frequency with effective refraction index -1 versus inner radius of ring-shaped holes we theoretically analyzed the effects of structure parameters to equipfrequency contours of respective normalized frequency and imaging properties.

**Keywords** : photonic crystal , ring-shaped air holes , negative refraction , equipfrequency contour

**PACC** : 4270Q , 7820P

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province of China ( Grant No. A0510014 ) and the Science Foundation of the Department of Science and Technology of Fujian Province of China ( Grant No. 2006F5025 ).

<sup>†</sup> E-mail : zqzheng@fjnu.edu.cn