

# 二维蜂窝格子光子晶体的远场成像特性 及界面对成像质量的影响

李国俊<sup>1)</sup> 康学亮<sup>1)</sup> 李永平<sup>1)†</sup>

1) 中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

2) 中国科学院量子信息重点实验室, 合肥 230026)

(2007 年 2 月 28 日收到, 2007 年 3 月 28 日收到修改稿)

利用有限时域差分法研究了一种二维蜂窝格子光子晶体的远场亚波长成像特性, 发现和折射率为  $-1$  时的负折射成像规律符合得很好. 但是由于晶格结构本身的特性, 入射光以大角度入射时, 这种结构的耦合效率很低, 影响了像的强度和数量. 通过适当改变界面上介质柱的半径的方法可以提高耦合效率, 进而有效提高成像的质量和强度.

关键词: 光子晶体, 负折射, 等频面

PACC: 4210, 4270, 7820

## 1. 引言

最近, 围绕负折射材料的研究逐渐成为热点. Veselago 在 1968 年就理论上预测了材料的等效介电常数、磁导率和折射率都可以为负值<sup>[1]</sup>, 但是他的理论直到最近才受到重视并得到了实验上的验证<sup>[2,3]</sup>. 负折射材料有多种反常的特性, 其主要的用途之一是制作超透镜, 利用这种透镜成像可以突破传统的衍射极限<sup>[4]</sup>. 然而, 目前负折射材料的构成中包含金属, 金属固有的吸收不利于负折射在可见光频段的应用. 而光子晶体中负折射现象的发现<sup>[5-8]</sup>为负折射在可见光频段的应用打开了大门. 光子晶体本身通常由非负折射的材料构成, 其中的负折射是由波传输的色散特性引起的. 新的研究表明, 光子晶体中的负折射现象可以实现亚波长的近场<sup>[7,8]</sup>和远场成像<sup>[9-12]</sup>, 但是相比较而言, 亚波长远场成像更有意义.

目前, 对于亚波长成像的研究多集中于方形和三角形格子. 本文利用有限时域差分法研究了一种二维蜂窝格子光子晶体的远场成像特性. 这种结构的光子晶体的有效折射率对于入射方向的依赖性微弱, 具有较小的空间色散, 我们的模拟也证实这种结

构具有较好的负折射远场成像特性. 但是由于晶格结构本身的特性, 入射光以大角度入射时, 这种结构的耦合效率很低, 影响了像的强度和数量. 我们通过设置过渡层的方法有效提高了耦合效率, 进而提高了成像的质量和强度.

## 2. 蜂窝格子光子晶体负折射成像特性

蜂窝格子光子晶体的结构和计算时采用的原胞如图 1 所示. 蜂窝格子是由三角形格子变形而来, 每个原胞包含两个介质柱. 我们选取介质柱的半径为  $0.24a$ , 折射率为 3.6, 背景折射率为 1.0. 利用平面波展开法<sup>[13,14]</sup>计算得到 TM 模的能带结构和第二能带的等频面如图 1 和图 2 所示. 可以看出在第二能带中, 布里渊区的中心点  $\Gamma$  点的能量高于布里渊区边缘的点, 说明此能带中波矢  $k$  和群速度  $V_g$  的方向相反, 即  $k \cdot V_g < 0$ , 有可能存在负折射现象. 而在等频面图中, 在  $\Gamma$  点附近的等频面都十分接近圆形, 即相对  $\Gamma$  点是外凸的, 所以在蜂窝格子的第二能带中频率较高的部分存在负折射现象<sup>[15-17]</sup>. 由于等频面接近圆形, 在特定频率下, 蜂窝格子的光子晶体可以使从任意角度入射的光的有效相折射率保持在  $-1$  附近<sup>[18]</sup>, 这对于负折射成像是十分有利的. 本文

† 通讯联系人. E-mail: liyp@ustc.edu.cn

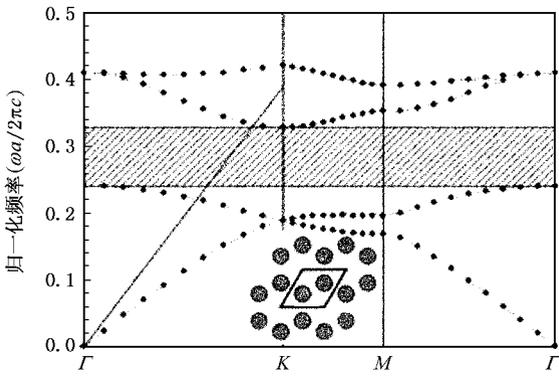


图1 二维蜂窝格子光子晶体的结构及 TM 能带结构图(计算采用的参数为  $r=0.24a$ ,  $n=3.6$ )

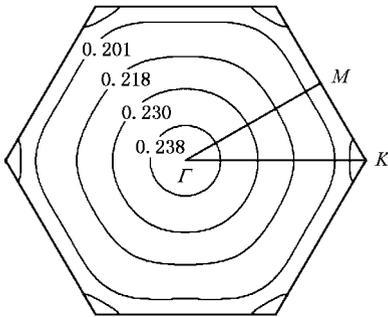


图2 二维蜂窝格子光子晶体第二能带的等频面图(图中标注的频率单位为  $2\pi c/a$ )

选取的频率为  $0.218(2\pi c/a)$ 。

考虑一块折射率为  $-1$  的均匀介质材料,假设其厚度为  $L$ ,由负折射平板成像的规律,如果一个点源到平板的距离为  $X$ ,则在平板另一侧由负折射所成的像到平板的距离应为  $L - X$ ;如果选取  $X = L/2$ ,则像点到平板的距离也应该为  $L/2$ 。既然从折射

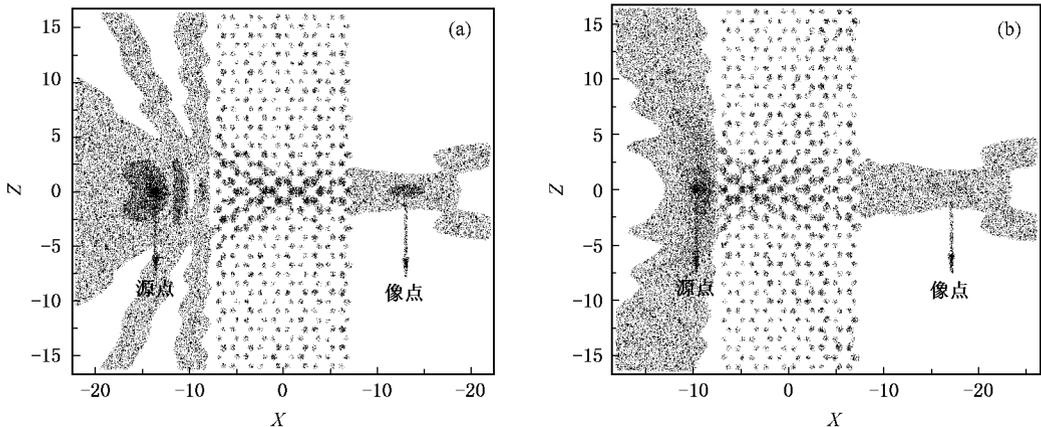


图3 厚度为  $14a$  的光子晶体平板透镜负折射远场成像强度分布图(介质柱半径  $0.24a$ ,入射光频率  $\omega = 0.218(2\pi c/a)$ ) (a)点源距离光子晶体  $7a$  (b)点源距离光子晶体  $3a$

率方面来看,蜂窝格子光子晶体可以被视为一块折射率接近  $-1$  的材料,那么其负折射是否符合上面的规律呢?为验证这一点,我们利用有限时域差分法对蜂窝格子光子晶体的负折射成像进行了模拟.选取光子晶体平板的厚度为  $14a$ ,分别将点源放置在距离平板透镜  $7a$  和  $3a$  处,按照前面的分析,它们的像的位置应该分别在距离透镜  $7a$  和  $11a$  处.模拟得到的强度分布图分别如图 3(a)和图 3(b)所示.在两种情况下像点的位置都很明显,而在平板透镜内部都可以发现一个强度较高的点,可以看成是另一个像点,这与负折射的成像规律是相符合的.对于图 3(a),可以看出其像点到透镜的距离约为  $7a$ .通过做直线  $z=0$ ,即  $x$  轴方向上的强度分布曲线图 4(a)可以确定像点到平板透镜的精确距离为  $6.7a$ ,与光子晶体平板厚度的一半十分接近.图 4(b)所示的是像点沿  $z$  方向的强度分布,可以得到像点光强的横向半高宽为  $2.3a$ ,约  $0.5\lambda$ ,与传统的衍射极限相当.对于图 3(b)其像点距离平板透镜的距离约为  $10.5a$ ,与我们预计的结果也很接近.说明蜂窝格子的光子晶体有很好的负折射远场成像特性.像点的位置和预计有一定差异的原因主要是光子晶体平板的有效折射率并非精确等于  $-1$ ,而是随着入射角的变化而在  $-1$  附近有小范围的变化,随着出射光传播距离的增加,折射率的差异带来的影响也会逐渐变大.

### 3. 成像质量的分析和改进

虽然像点的位置符合负折射成像的规律,但是从图 4 中也发现,和点源的强度相比,像的强度很

低.像点的大小也只是达到了衍射极限而没有突破衍射极限.图3中在点源和光子晶体的界面之间有明显的因干涉而产生的条纹,说明有相当一部分能量被界面反射掉,并没有耦合到光子晶体中.经过分析发现,在蜂窝格子的第二能带中,随着入射角度的增大,光在光子晶体表面的耦合效率呈下降的趋势.在我们选定的频率附近,大角度入射时的耦合效率更是接近零.我们计算了厚度为  $14a$  的光子晶体平板的透过率随入射角变化的曲线如图5,很明显随着入射角逐渐增大,透过率逐渐接近于零(图中的尖峰可以解释为有限厚度的光子晶体中法布里波罗效应引起的).这种情况也意味着失去了大角度入射的光所携带的信息和能量,这显然对于像的强度和数量有不利影响<sup>[12]</sup>.文献[19]和[20]中的研究表明三角形格子中同样存在类似现象,并且阐述了这主要是由于入射光的模式和三角形格子内布洛赫波模式之间的不匹配造成的,入射角度越大这种不匹配就越明显.由于蜂窝格子可以看成是复式的三角形格子,因此保留了三角形格子的大部分特征,所以这种解释可以应用于蜂窝格子中类似的现象上.也就是说,第二能带中大角度下极低的耦合效率是由晶格结构本身引起的,很难完全消除.

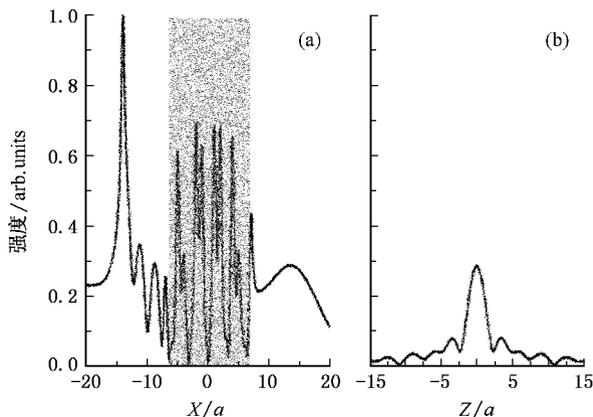


图4 (a)沿  $x$  轴的强度分布图(灰色区域代表光子晶体)(b)像点位置沿  $z$  方向的强度分布图

通过分析不同的频率入射光的耦合效率我们发现,在大角度入射时,第二能带的低频区域耦合效率有较为明显地提高,而且是频率越低,耦合效率越高.图5虚线显示频率为  $0.201(2\pi c/a)$  的入射光的透过率随角度变化的关系,可以明显看出不仅在大角度入射时,低频入射光的透过率较高,在入射角较小时透过率也有明显改善.说明此时入射光模式和光子晶体内布洛赫模式之间的失配程度较小,所以

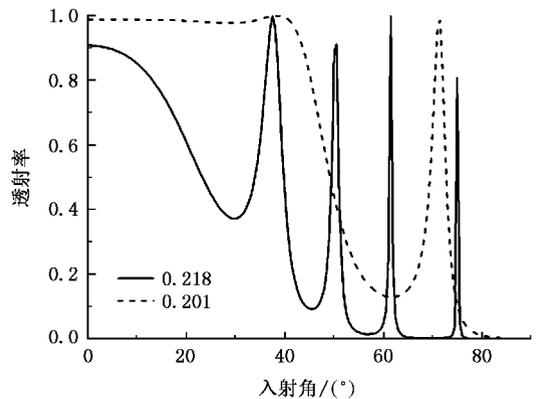


图5  $r=0.24a$ ,厚度为  $14a$  的光子晶体平板的透过率随入射角变化的示意图(实线对应频率为  $0.218(2\pi c/a)$ ,虚线对应频率为  $0.201(2\pi c/a)$ )

为了提高耦合效率,可以在光子晶体表面设置一层过渡层,这层过渡层的介质柱半径稍小.由于对介质柱型光子晶体,减小半径可以使能带升高,这样,同样频率的入射光对于过渡层而言就落到了第二能带的低频区域中,有较高的耦合效率.而过渡层和光子晶体之间模式的匹配程度本身就较高,这样过渡层中的入射光绝大部分都会被耦合到光子晶体中,提高了光子晶体总体的耦合效率.

但是,对于过渡层来说,介质柱半径越小,同样的频率在等频面中就越靠近布里渊区边缘.通过等频面图可以发现,靠近边缘的等频面,其形状已经偏离圆形,接近正六边形甚至星形.相对于中心  $\Gamma$  点,这些频率的等频面逐渐由外凸的形状演变成内凹的形状,光在光子晶体表面的折射也逐渐由负折射过渡到自准直,再过渡到正常折射,有效折射率逐渐由负值变为正值.因此,如果要保持整块光子晶体的有

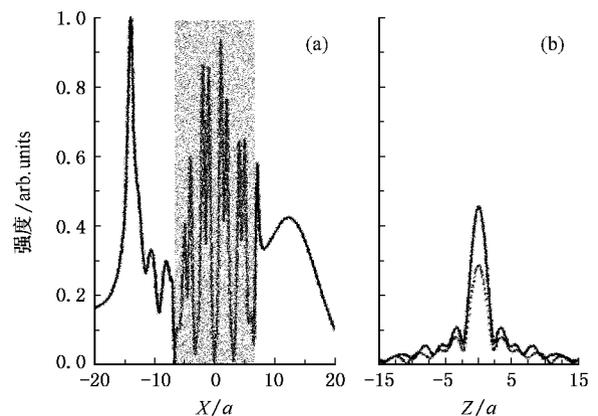


图6 (a)沿  $x$  轴的强度分布图(b)像点位置沿  $z$  方向的强度分布图(虚线所示为不加过渡层时像点的  $z$  方向强度分布)

效折射率不会有太大的变化,过渡层介质柱的半径就不能取得太小.另一方面,虽然在入射光的频率不超出第二能带的前提下,过渡层的半径越小对于入射光的耦合效率越高,但是如果和内层光子晶体的半径差别过大,会导致过渡层和内层光子晶体之间模式的匹配程度降低,不利于整体的耦合效率的提高.通过比较,我们选取过渡层的介质柱半径为  $0.22a$ .

采用厚度同样为  $14a$  的平板,设置每一侧过渡层的厚度为  $2a$ ,其他参数不变,模拟得到的沿  $x$  轴方向和  $z$  方向的强度分布图见图 6.与图 4 比较可以明显看出光子晶体平板右侧像的强度得到了显著地增强,与不设置过渡层时的强度相比提高了 59%,像的横向半高宽也达到了  $0.45\lambda$ ,小于传统衍射极限,和图 4 相比提高了 10%,这与文献 [12] 中通过改变界面上折射率的方法得到的结果相符合.说明光子晶体中负折射的成像质量和光在光子晶体表面的耦合效率有密切的关系,设置过渡层的方法可以有

效提高像的强度和质量.这种方法也有一定的缺点,由于改变过渡层的半径后,其有效折射率会改变,会使像点的位置有小的移动.由于三角形格子和蜂窝格子有相似的特点,这种方法同样可以应用于三角形格子光子晶体中.

## 4. 结 论

蜂窝格子光子晶体的第二能带中存在负折射现象,并且具有较小地空间色散,从而使这种结构的光子晶体有良好的负折射远场成像特性.但是由于晶格结构本身的特性,入射光以大角度入射时,这种结构的耦合效率很低,影响了像的强度和质量.我们通过适当改变界面处介质柱半径的方法有效提高了耦合效率,进而提高了成像的质量和强度.说明光子晶体中负折射的成像质量和光在光子晶体界面上的耦合效率有密切的关系,而设置过渡层的方法可以有效地提高像的强度和质量.

- [ 1 ] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [ 2 ] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [ 3 ] Smith D R, Padilla W J, View D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [ 4 ] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [ 5 ] Luo C, Johnson S G, Joannopoulos J D, Pendry J B 2002 *Phys. Rev. B* **65** 201104
- [ 6 ] Luo C, Johnson S G, Joannopoulos J D, Pendry J B 2003 *Phys. Rev. B* **68** 045115
- [ 7 ] Parimi P V, Lu W T, Vodo P, Sridhar S 2003 *Nature* **426** 404
- [ 8 ] Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E, Foteinopoulou S, Soukoulis C M 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 207401
- [ 9 ] Zhang X 2004 *Phys. Rev. B* **70** 195110
- [ 10 ] Wang X, Ren Z F, Kempa K 2004 *Opt. Express* **12** 2919
- [ 11 ] Hu X, Chan C T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1520
- [ 12 ] Zhang X 2005 *Phys. Rev. B* **71** 165116
- [ 13 ] Che M, Zhou Y S, Wang F H, Gu B Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4770 (in Chinese) [ 车 明、周云松、王福合、顾本源 2005 物理学报 **54** 4770 ]
- [ 14 ] Dong H Y, Liu M, Wu Z H *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3194 (in Chinese) [ 董慧媛、刘 楣、吴宗汉等 2005 物理学报 **54** 3194 ]
- [ 15 ] Parimi P V, Lu W T, Vodo P, Sokoloff J B, Derov J S, Sridhar S 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 127401
- [ 16 ] Foteinopoulou S, Soukoulis C M 2003 *Phys. Rev. B* **67** 235107
- [ 17 ] Gajic R, Meisels R, Kuchar F, Hingerl K 2005 *Opt. Express* **13** 8596
- [ 18 ] Gajic R, Meisels R, Kuchar F, Hingerl K 2006 *Phys. Rev. B* **73** 165310
- [ 19 ] Ruan Z, Qiu M, Xiao S, He S 2005 *Phys. Rev. B* **71** 045111
- [ 20 ] Martinez A, Miguez H, Griol A, Marti J 2004 *Phys. Rev. B* **69** 165119

# Far-field focusing properties of two-dimensional honeycomb photonic crystals and the effect of the interface

Li Guo-Jun<sup>1)</sup> Kang Xue-Liang<sup>1)</sup> Li Yong-Ping<sup>1,2)†</sup>

<sup>1)</sup> *Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

<sup>2)</sup> *Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China*

(Received 28 February 2007; revised manuscript received 28 March 2007)

## Abstract

The far-field focusing properties of two dimensional rod-type honeycomb lattice photonic crystals are investigated by using finite difference time domain method, and it was found that it explicitly follows the wave-beam negative refraction law with relative refractive index of  $-1$ . But the image qualities are limited by low transmission at large incident angles. The image qualities can be improved by modifying the radius of rods near the surface of photonic crystals slab.

**Keywords** : photonic crystal, negative refraction, equifrequency surface

**PACC** : 4210, 4270, 7280

---

† Corresponding author. E-mail: liyp@ustc.edu.cn