

doi: 10.3788/gzxb20134202.0171

# 光子晶体表面结构的改变对成像的影响

田双, 童元伟

(上海理工大学 理学院, 上海 200093)

**摘 要:** 负折射率材料因为其奇异的特性成为广泛研究的对象, 尤其是光子晶体平板的完美成像. 硅材料以其良好的物理性质成为当今集成光学领域中应用最广的材料之一. 本文以硅介质柱在空气中周期性排列构成六角结构的光子晶体平板为例, 运用平面波展开法进行光子晶体能带计算并运用时域有限差分法模拟改变光子晶体平板成像并讨论表面结构对成像的影响. 光子晶体平板等效折射率为  $-1$  时, 通过改变上下侧最外层介质柱的半径或是侧向移动最外层介质柱发现: 当光子晶体平板表面结构发生改变时光子晶体平板仍能成像但像点强度发生变化. 当光子晶体平板表面结构的改变在一定范围时, 所成像的位置发生改变且位置变化符合光子晶体成像经典的 Veselago 关系; 当光子晶体表面结构的变化超过该范围时, 所成像与物的相位发生反相同时像点位置发生“巨变”, 此时 Veselago 关系已不成立. 数值模拟表明: 光子晶体平板表面结构的改变可以有效地改变该光子晶体平板所成像的强度、位置和相位.

**关键词:** 负折射材料; 光子晶体; 成像; 表面结构; 时域有限差分法

中图分类号: O482.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)02-0171-5

## Effect of Changing Surface Structure of Photonic Crystals on Image

TIAN Shuang, TONG Yuan-wei

(College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Negative index material is one of wide research objects because of its unique characteristics, especially perfect imaging of photonic crystal slab. Silicon is a kind of the most widely applied materials in the integrated optical field because of its physical properties. In this paper, Si cylindrical rods are designed into hexagonal pattern in air to build a 2D photonic crystals flat. Band structure of this photonic crystals is calculated by the plane wave expansion method and the finite difference time domain method is used to simulate the effect on imaging when the surface structure of photonic crystals flat is changed. The simulation results show that photonic crystals slab can still image but image intensity will change by changing the both outermost radius or shifting outermost layer column laterally as photonic crystal slab equivalent refractive index is  $-1$ . And the position of image change and it changes accord with the classic Veselago relation of photonic crystal imaging as the surface structure of photonic crystals slab is changed in a certain range. But the phase difference of image and source will be  $180^\circ$  if the surface changes beyond this range and at the same time the image position will change sharply and the source and image will go against the Veselago relation. From the results it can be included that it can change the image intensity, position and phase effectively by changing the surface structure of photonic crystal slab.

**Key words:** Negative Index Material(NIM); Photonic Crystals(PCs); Imaging; Surface structure; Finite Difference Time Domain(FDTD)

基金项目: 重点基础研究发展计划(No. 2005CB724304)和国家自然科学基金(No. 60777045)资助

第一作者: 田双(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光子晶体成像. Email: tianshuanghaoyun@126.com

导师: 童元伟(1971-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为光子晶体负折射特及其成像特性. Email: tyw0991@hotmail.com

收稿日期: 2012-06-08; 录用日期: 2012-10-24

## 0 引言

负折射材料(Negative Index Material, NIM)是一种介电常量 $\epsilon$ 和磁导率 $\mu$ 同时为负的人工材料.这种特殊材料具有诸如负折射、反切连科夫效应、反多普勒效应等奇异的物理性质.由于自然界中不存在天然的NIM,这种材料在很长一段时间内都未引起人们的关注.1996年Pendry等<sup>[1]</sup>从理论上证明按一定周期性排列的金属开口谐振腔(Split Ring Resonators, SRRs)和金属线(Wires)在某波段实现介电常量和磁导率同时为负<sup>[1]</sup>.2001年Smith<sup>[2]</sup>等人首次用Cu为主要材料制造出按一定周期性排列起的SRRs和Wires在微波波段介电常量和磁导率同为负的器件<sup>[3]</sup>.一系列的理论和实验研究已证明NIM这种新颖材料的可实现性,尤其是Pendry关于介电常量和磁导率为-1的介质平板能够突破衍射极限的限制实现完美成像<sup>[4]</sup>的研究使NIM吸引了越来越多人的关注.但由于金属材料制成的NIM工作频段较短且能量损耗大,不利于NIM的大规模应用.后来经研究发现:由周期性排列电介质组成的光子晶体(Photonic Crystals, PCs)在应用较广泛的红外和可见光频段可实现负折射<sup>[5-7]</sup>且能量损耗较小,PCs开辟了研究NIM的新方向,尤其是光子晶体平板的“完美成像”对高分辨率成像、光通讯、高密度光存储、超大规模集成电路的光刻技术以及集成光学等领域都将产生深远的影响.

本文通过在空气中周期性排列六角格子硅介质柱子( $n=3.46$ )构造成二维结构光子晶体,讨论改变最外层介质柱半径或侧向移动最外层介质柱对PCs成像的影响.

## 1 负折射光子晶体的设计与色散关系分析

由文献<sup>[8]</sup>可知介质柱形状对称性越高成像分辨率愈大.本文在基本单位为 $1\mu\text{m}$ 的XZ平面内以无限长硅介质( $\epsilon=12$ )圆柱为基本单元在空气介质中周期性排列构成二维六角结构光子晶体(PCs)  $40\times 7$ 阵列模型,PCs平板中心位于X-Z平面坐标原点处,晶格常量为 $a=1\mu\text{m}$ 圆柱的直径(波导宽度)为 $2r=0.6a$ ,如图1(a)所示.PCs平板之所以能够成像是由于负折射对光起到会聚作用.TM波在空气孔形成的二维光子晶体中的负折射较明显,而TE波在介质柱构成的二维光子晶体中负折射较为明显<sup>[5]</sup>.所以本文选TE波为激励光源,入射波E偏振方向平行于圆柱轴线方向.

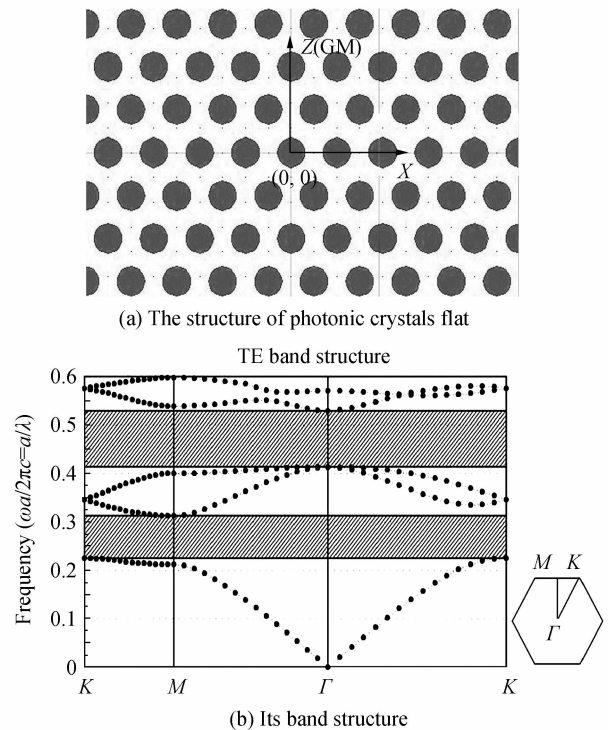


图1 二维六角结构光子晶体平板及其能带图  
Fig.1 The 2D hexagonal structure of photonic crystals flat and its band structure

用平面波展开法(Plane Wave Expansion Method, PWEM)对该二维光子晶体进行能带计算,得到的光子晶体简约布里渊区能带结构图,如图1(b).由图1(b)可知:在二维六角光子晶体的第一与第二能级之间和第二与第三能级之间,均存在一个光子禁带,光子带隙的归一化中心频率分别为 $a/\lambda=0.27$ ,  $a/\lambda=0.445$ ( $a$ 为晶格常量, $\lambda$ 为入射波波长).在两个禁带间是光子晶体的第二个通带.从第一布里渊区的能带图可区分是否存在禁带但却不能反映各个通带中能否发生负折射现象.可通过分析第一布里渊区各个能级的等频率图,研究PCs不同能级(频段)的等效折射率问题.

用平面波展开法可以获得二维六角结构光子晶体其第一布里渊区中各个能级的等频图.由图2(a)可知:在第二能级中从布里渊区中心 $\Gamma$ 出发,无论沿 $\Gamma$ 到 $M$ 方向,还是沿 $\Gamma$ 到 $K$ 方向,随着波矢 $k$ 的增加,在光子晶体中传播的光波的频率是减小的即 $\partial\omega/\partial k < 0$ ,对应于在晶体中传播的TE波的群速 $v_g = -\nabla_k(\omega) = \partial\omega/\partial k < 0$ ,TE波在晶体中传播的等效折射率 $n_{\text{eff}} = c/v_g < 0$ .由此可知在第二能级各个频率的光从空气入射到PCs时发生负折射.该结构的光子晶体的第三能级等频图与第二等级相似,但第三能级等频图的对称性变差,对TE波成像带来很大影响,所以本文只讨论第二能级的成像问题.

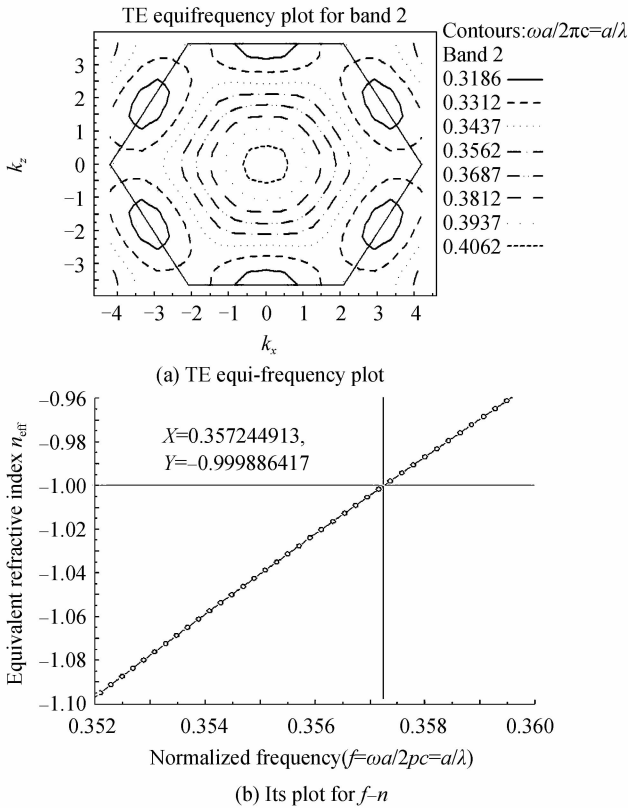


图2 第2能级等频图及其在GK方向的 $f-n_{\text{eff}}$ 图  
Fig. 2 TE equi-frequency plot for band 2 and its plot for  $f-n$  in the GK direction of hexagonal PCs flat

通过分析图2(b)可知当归一化频率  $f = a/\lambda = 0.357$  时,等效折射率  $n_{\text{eff}} = -1$ . 当光源工作的归一化频率  $f = a/\lambda = 0.357$  时通过改变光子晶体表面结构探讨其行为对光子晶体成像质量的影响.

## 2 改变最外层光子晶体的结构对成像的影响

时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)法可用来模拟电磁波入射到光子晶体平板的场分布. 为避免边界反射波的干扰,采用完美匹配层为边界条件. 上文设计的七层六角结构硅介质柱的对称性PCs平板,其法线沿着 $\Gamma M$ 方向,点光源被放置在距光子晶体平板中心下方的 $5.8a$ (光源位置固定)的空气中,光源的归一化工作频率  $f = a/\lambda = 0.357$ . 该点光源经过光子晶体平板在光子晶体上方成像,图3(a)为PCs介质柱半径  $r = 0.3a$  时的源-像(Source-Image, S-I)图. 由该图可知:像点中心与光源中心共轴(都在 $Z$ 轴),距离光子晶体平板中心为 $5.6a$ ,源像坐标可分别简写为  $S(0, -5.8)$  与  $I(0, 5.6)$ .

### 2.1 表面两层介质柱半径的改变对光子晶体平板成像的影响

以  $r = 0.3a$  时的PCs平板成像情况为基准,以  $0.01a$  为间隔改变PCs平板表面最外层介质柱的半

径,即分别讨论光子晶体两表面半径  $\text{bsr} = 0.34a, 0.33a \cdots 0.20a$  时的成像来研究不同最外层半径对光子晶体平板成像的影响. 模拟成像过程中首先确定不同半径时像点位置,由图3可知:改变上下最外层介质柱的半径,像点中心 $X$ 坐标不变,沿 $Z$ 轴上下移动,说明改变最外层介质柱的半径对光通过PCs平板会聚成像的方向无影响,下文均以像点中心 $Z$ 轴坐标代表像点位置.

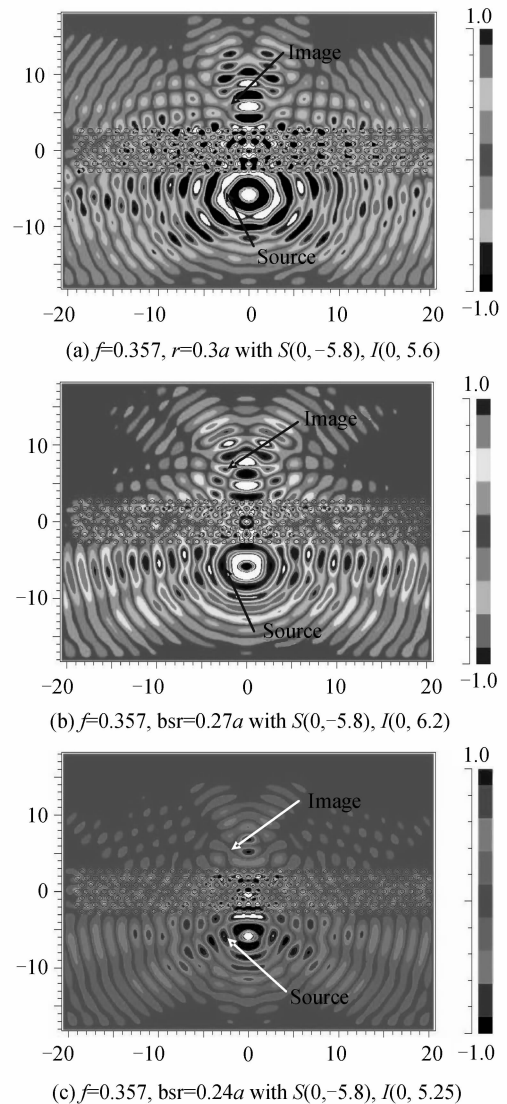


图3  $f = 0.357$  不同最外层介质柱半径时的S-I图  
Fig. 3 The plots of S-I as the source frequency is 0.357

由图3(b)可知,当上下侧最外层介质柱半径  $\text{bsr} = 0.27a$  时,该光子晶体平板能很好地成像,但是像的位置却上移了  $0.6a (0.214\lambda)$ . 确定像点位置后,分别在光源与像点处放置一探针,记录不同最外层半径的介质柱时光源与像的  $E_y$  分布并进行归一化处理.

图4(a)和(b)分别表示上下最外层介质柱变化时像点位置和最大光强的修正率之间关系,其中光强修正率定义为  $\text{IIR} = (I_{\text{bsr}} - I_{0.3}) / I_{0.3} \times 100\%$ . 由

图4可知当最外层介质柱半径减小 $0.01a$ 时像点位置几乎不变但光强却变小(减小约30%);当最外层介质柱半径 $bsr=0.27a$ 时像点光强最强(提高了约50%).半径减小到 $bsr=0.24a$ 开始直至 $bsr=0.2a$ ,PCs平板形成的像与光源的相位发生反相位(即S-I相位差 $\pi$ ),如图3(c)所示.增加PCs平板表面最外层介质柱的半径,结果发现:当最外层介质柱半径增大到 $bsr=0.34a$ 时,该PCs平板已不能很好地成像,可能是因为下侧最外层介质柱半径过大导致过多光被PCs平板下表面反射.说明PCs平板最外层介质柱半径增加过大对成像影响较大.所以本文只讨论最外层半径增到 $0.33a(0.118\lambda)$ 的情况.

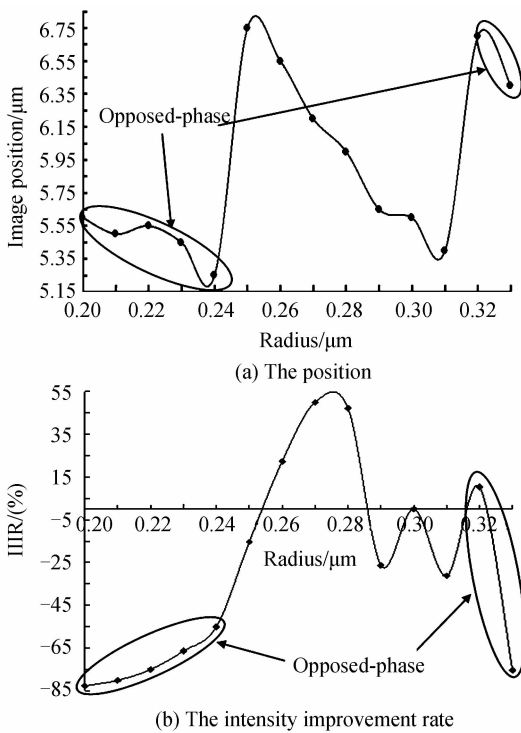


图4  $f=0.357$  时最外层介质柱半径与像点位置和像强度修正率之间的关系图

Fig. 4  $f=0.357$ , the maps of outmost layer radius  $R$  VS image position and  $R$  VS image intensity improvement rate

由图4(a)可知:像与光源的相位未发生反相时,最外层介质柱半径减小(即物距 $L$ 变大,PCs平板厚度 $d$ 变小)时像点远离PCs平板中心(即像距 $L'$ 变大)这与Veselago关系 $[7,9](L+L'=d)$ 相违背.这种现象是因为与 $n=-1$ 的左手介质平板相比,周期性排列介质柱构成的PCs平板在Bragg散射效应作用下对入射光的集体散射使平板的等效折射率 $n_{eff}=-1$ .由图2(a)可知 $f=0.357$ 的等频线已不是规则的圆形且PCs平板对光的散射、反射、干涉作用都很强,缩小介质柱半径对入射光的散射、反射均会产生影响从而影响像点位置.当半径变化超过某个临界值时,像源的相位发生反相同时像点

的位置也会发生“巨变”.这种现象可解释为:一是因为光线在PCs平板中传播,光的波阵面会因介质柱的周期性排列而发生相位的微变 $[10]$ ,改变介质柱半径会“放大”这种相位的“微变”,当介质柱变化达到某个程度时就会出现这种源-像反相、像位置巨变的现象;二是因为光子晶体负折射介质平板“完美成像”的物理机制除了负折射效应还有自准直和近场散射等效效应,在某些情况下甚至可以超过负折射效应 $[11]$ .倏逝波与表面等离子体元产生共振放大后被耦合到PCs内部从而实现亚波长成像.PCs平板边界条件对表面等离子体元影响较大间接影响倏逝波,而隧道或自准直效应主要传输倏逝波的信息 $[12-13]$ .改变PCs平板最外层介质柱半径使隧道效应或自准直效应成为影响成像的主要因素.由图4(b)可以看出:当上下两层介质柱半径 $bsr=0.27a$ 时像点光强度最大, $bsr=0.2a$ 时像点光强度最小.

### 2.2 表面两层介质柱左右平移对光子晶体平板成像的影响

将PCs平板表面最外层介质柱同时左或右移对PCs结构的改变相同,所以本文只讨论介质柱右平移即 $\delta=0.1a,0.2a,\dots,0.5a$ (变为正方结构)的成像情况.模拟结果通过PCs平板最外层介质柱侧移距离 $\delta$ 与像位置和光强修正率的关系(图5)表示

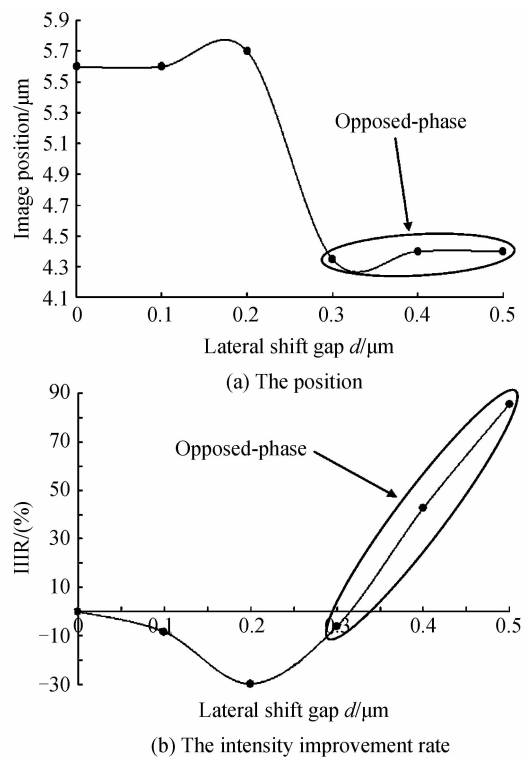


图5  $f=0.357$  时最外层介质柱侧移距离 $\delta$ 与像点位置和像光强修正率关系图

Fig. 5  $f=0.357$ , the maps of outmost layer shift gap  $\delta$  VS image position and  $\delta$  VS image intensity improvement rate (IHIR)

出来.由图 5(a)可知:与  $\delta=0$  成像相比当 PCs 平板表面介质柱同时侧移时像点仍在  $Z$  轴上且  $\delta=0.1a, 0.2a$  时像点位置保持不变(误差允许范围内),仍在  $Z$  正半轴  $5.6a$  处;当  $\delta=0.3a, 0.4a, 0.5a$  时 PCs 平板成的像与光源开始出现相位反相(相位差为  $\pi$ ),三像点位置均在  $Z$  正半轴约  $4.4a$  处(误差允许范围内),与  $\delta<0.3a$  情况相比像点位置发生“巨变”(变化达  $0.43\lambda$ ).说明 PCs 平板最外层介质柱侧移对像的相位影响较大,源-像反相时,像点位置巨变;源-像未反相时像点位置不变.由图 5(b)可知:当  $\delta=0.2a$  时像点光强最弱(降低了约 30%),当这  $\delta=0.5a$  时光强最强(提高了约 86%).这一结果与侧移  $\delta=0.2a$  时光子晶体负折射的透射光强最大, $\delta=0.5a$  时 PCs 负折射的透射光强最小<sup>[14]</sup>这一结论相反,说明当 PCs 平板最外层介质柱侧向移动时,PCs 成像的物理机制主要是自准直至效应决定而非负折射效应.

### 3 结论

本文以硅介质柱在空气中周期性排列构成六角结构光子晶体平板,分别通过改变 PCs 平板表面介质柱的半径和侧向移动表面介质柱来研究改变光子晶体平板的表面结构对成像的影响.数值计算结果可总结为:

1)改变光子晶体表面介质柱半径会使像点沿着  $Z$  轴上下移动,像点的光强先减小后增大再变小.当最外层介质柱半径  $bsr=0.27a$  时,像点上移了  $0.214\lambda$ ,此时像点光强最大(提高了约 50%).继续改变表面介质柱半径会使像点光强降低;当  $bsr=0.24a$  和  $bsr=0.32a$  继续减小或增大半径出现源-像相位反相,像点位置巨变等现象.

2)侧向移动 PCs 表面介质柱不会使像点在水平方向移动, $\delta\geq 0.3a$  时源-像反相同时像点位置发生巨变,当  $\delta$  不足以引起相位反相时像点位置不变.当  $\delta=0.5a$  时像点光强最强,此时 PCs 平板成像的物理机制以自准直至效应为主.

因此可知:PCs 表面结构的改变可有效地改变 PCs 平板像点位置、相位和像光强.这一结论对光子晶体平板成像、提高光子晶体成像质量、改进和优化光学器件等提供了理论依据.

### 参考文献

- [1] ELEFTHERIADES G V, BALMAIN K G. Negative refraction meta materials: fundamental principles and applications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. Press, 2005: 6-11.
- [2] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, *et al.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Physical Review Letters*, 2000, **84**(18): 4184-4187.
- [3] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77-79.
- [4] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(18): 3966-3969.
- [5] NOTOMI M. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap [J]. *Physical Review B*, 2000, **62**(16): 10696-10705.
- [6] CUBUKCU E, AYDIN K, OZBAY E, *et al.* Electromagnetic waves: Negative refraction by photonic crystals[J]. *Nature*, 2003, **423**(6940): 604-605.
- [7] PARIMI P V, LU Wen-tao, VODO P, *et al.* Imaging by flat lens using negative refraction[J]. *Nature*, 2003, **426**(6965): 404.
- [8] SONG Yi, WANG Ruo-peng. Dependence of image resolution on the air hole shape for 2D photonic crystal slab lens[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, **45**(2): 362-364.  
宋毅,王若鹏.二维光子晶体的空气孔形状对负折射平板透镜成像分辨率的影响[J].北京大学学报,2009, **45**(2): 362-364.
- [9] SUN Gui-lin, JUGESSUR A S, KIRK A G. Imaging properties of dielectric photonic crystal slabs for large object distance[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(15): 6755-6765.
- [10] FOTEINOPOULOUS S, SOUKOULIS C M. Electromagnetic wave propagation in two-dimensional photonic crystals: a study of anomalous refractive effects[J]. *Physical Review B*, 2005, **72**(16): 5112.
- [11] LI Zhi-yuan, ZHANG Dao-zhong. Photonic crystal and meta-materials[J]. *China Basic Science*, 2005, **7**(6): 10.  
李志远,张道中.光子晶体和负折射介质材料[J].中国基础科学,2005, **7**(6):10.
- [12] LI Zhi-yuan, LIN Lan-lan. Evaluation of lensing in photonic crystal slabs exhibiting negative refraction [J]. *Physical Review B*, 2003, **68**(24): 5110.
- [13] HE Sai-lin, RUAN Zhi-chao, CHEN Long, *et al.* Focusing properties of a photonic crystal slab with negative refraction [J]. *Physical Review B*, 2004, **70**(11): 5113.
- [14] MAO Yu, TONG Yuan-wei. Effect of the change of surface structure of photonic crystals on intensity of transmitted light [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9): 1562-1566.  
毛宇,童元伟.改变光子晶体表面结构对负折射透射光强的影响[J].光子学报,2010, **39**(9): 1562-1566.