

基于空气孔的光子晶体亚波长成像的特性研究*

湛胜高 梁斌明[†] 朱幸福 陈家壁 庄松林

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

(2013年12月25日收到; 2014年3月17日收到修改稿)

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. 本文采用空气孔在硅介质中周期性排列构成六角结构的光子晶体结构, 用平面波展开法及FDTD方法, 研究了该光子晶体的亚波长成像能力还研究了入射波长以及温度漂移对该光子晶体平面亚波长成像的影响.

关键词: 负折射, 光子晶体, 亚波长, 成像

PACS: 42.70.Qs, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.63.154212

只有在一定温度范围内才能实现亚波长成像.

1 引言

1968年Veselago对介电常数 ϵ 以及磁导率 μ 都为负值的材料进行了理论上的研究, 并提出左手材料的概念^[1]. 由于这种特殊材料所具有的如光的负折射^[2-10], 负的切连科夫效应, 反多普勒效应等性质^[6-9], 近年来吸引了越来越多人的关注. 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^[11-21]研究发现光子晶体由周期性排列电介质组成的光子晶体在应用广泛的红外和可见光频段可实现负折射且能量损耗较小^[3-16]. Li等指出利用光子晶体平板可以实现高质量的近场成像^[2]这方面的实验由Belov等完成, 但仅限于微波波段^[9]. 近年来, 基于hyperbolic dispersion的负折射材料也广泛的被研究, 而且也能实现宽频带超分辨成像^[22,23]. 本文中我们使用的是空气孔型光子晶体, 空气孔型的光子晶体具有加工方便、操作方便等优点. 本文研究了不同波长的点光源经光子晶体的亚波长成像, 发现光子晶体可以在一定波长范围内实现亚波长成像. 同时, 本文还对不同温度下的亚波长成像进行了研究, 发现

2 光子晶体结构

空气圆柱在硅介质中周期性排列构成的六角结构光子晶体如图1所示, 晶格常数为 a , 本文中取 $a = 482 \text{ nm}$. 空气柱的半径为 $r = 0.365a$, 硅的折射率为 $n = 3.4$. 该光子晶体的两表面加有反光栅, 可以增大入射光的透过率. 光栅通过常数 w_1, w_2, h_1, h_2 来定义, 取 $w_1 = 0.22a$, $w_2 = 0.29a$, $h_1 = 0.53a$ 以及 $h_2 = 0.08a$ 可以使光栅的防反作用达到最优效果.

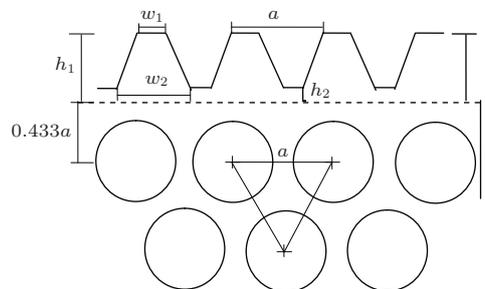


图1 光子晶体平板结构

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2007CB935300)和国家自然科学基金(批准号: 61177043, 11104184)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: Liangbinming@sina.com

3 光子晶体平板的亚波长成像

图2(a)为光子晶体亚波长成像的原理图, 两点光源位于光子晶体下方, 可以通过光子晶体, 并在光子晶体上方成像. 利用图1所示的光子晶体结构, 在平板的下方距下表面 $0.7\ \mu\text{m}$ 处设置两个相距 $2.4a$, 波长为 $3.311a$ 的点光源, 通过模拟计算得该波长下光子晶体的等效负折射率为 -1.93 . 这两个点光源发出的光可以通过光子晶体平板, 并在平板上方成像. 图2(b)为通过R-soft采用二维时域有限差分法(FDTD)模拟得到的两点光源的成像图, 同时可以探测出光线向上传播通过光子晶体平板后在平板上方能流的分布, 从而探测出成像位置, 以及成像点处的能流透过率.

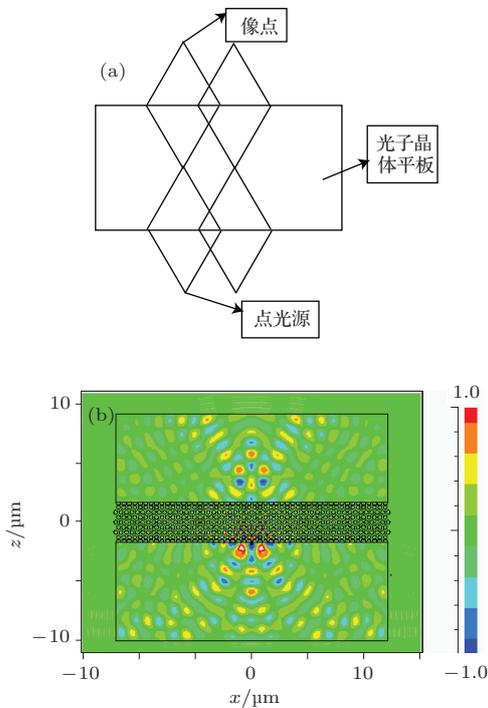


图2 (网刊彩色) (a) 光子晶体亚波长成像的原理图; (b) 两个相距 $2.4a$, 波长为 $3.311a$ 的点光源经光子晶体平板的亚波长成像

图3为两点光源经光子晶体成像在成像点处的能流透过率分布图. 我们所测的为成像点处的能流透过率, 由于整个成像平板不是无限宽的, 所以成像点处透过率受到光经平板边缘反射回来光的影响有可能出现负值, 由于反射回来的光能量一般很小, 可以忽略不计. 如图所示, 成像处的纵坐标为 $Z = 3.2\ \mu\text{m}$, 在成像处的能流透过率分布有波峰及波谷, 成像处波峰处的透过率为 0.12343 , 波谷处的透过率为 0.016979 , 半宽为 0.436λ , λ 为入射

波长. 图中两个波峰之间的距离为 $3.14a$, 即为两像点之间的距离, 为两光源之间的距离的 1.31 倍, 可知该光子晶体成像具有放大作用. 由模拟结果可知这两个点光源可以通过光子晶体平板实现亚波长成像.

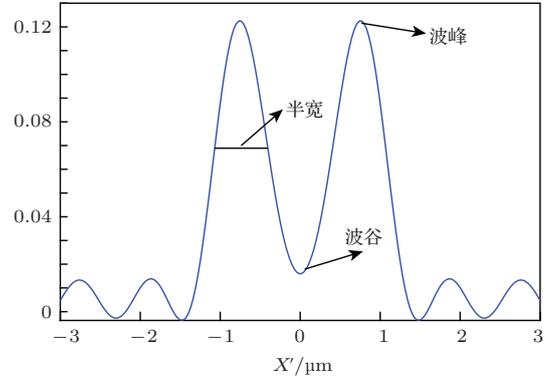


图3 两个相隔 $2.4a$, 波长为 $3.311a$ 的点光源经光子晶体平板成像处的能流分布图

4 入射光波长对亚波长成像的影响

将入射波长设为变量, 两点光源之间的距离为 $2.4a$, 通过改变入射波长来观察光子晶体的亚波长成像. 入射波长在 $3.291a-3.326a$ 这个区间中取值, 每 $0.05a$ 取一个值. 通过模拟, 得到每个入射波长对应的亚波长成像处的能流透过率分布.

如图4所示, 入射波长对亚波长成像点的性质确实会产生影响: 随着波长的增加, 亚波长成像点的位置越来越靠近光子晶体平板的上表面; 成像处波峰的透过率开始时随着波长的增加而增加, 当波长增加到一定程度时, 波峰处透射率随着波长的增加而降低, 当入射光波长为 $3.311a$ 时波峰处透射率达到最大值; 波谷处透射率开始时随波长的增加而变大, 当入射光波长为 $3.321a$ 时达到最大, 随后开始随波长的增加而减小; 半宽随着波长的增加而增大. 考虑以上几个因素, 当波长为 $3.311a$ 时能达到最好效果的亚波长成像.

接下来通过改变两光源的距离, 来观察亚波长成像的效果. 首先, 缩短两光源之间的距离, 取两光源之间的距离为 $2.24a$. 通过模拟, 得出成像处的能流透过率分布, 如图5所示. 从图中我们发现, 成像点位置以及波峰与波谷处的透射率随波长的变化和两光源之间的距离为 $2.4a$ 是一样的. 但是由于两光源相距太近, 导致波谷处的透射率大于波峰处透射率的一半, 所以无法测出半宽.

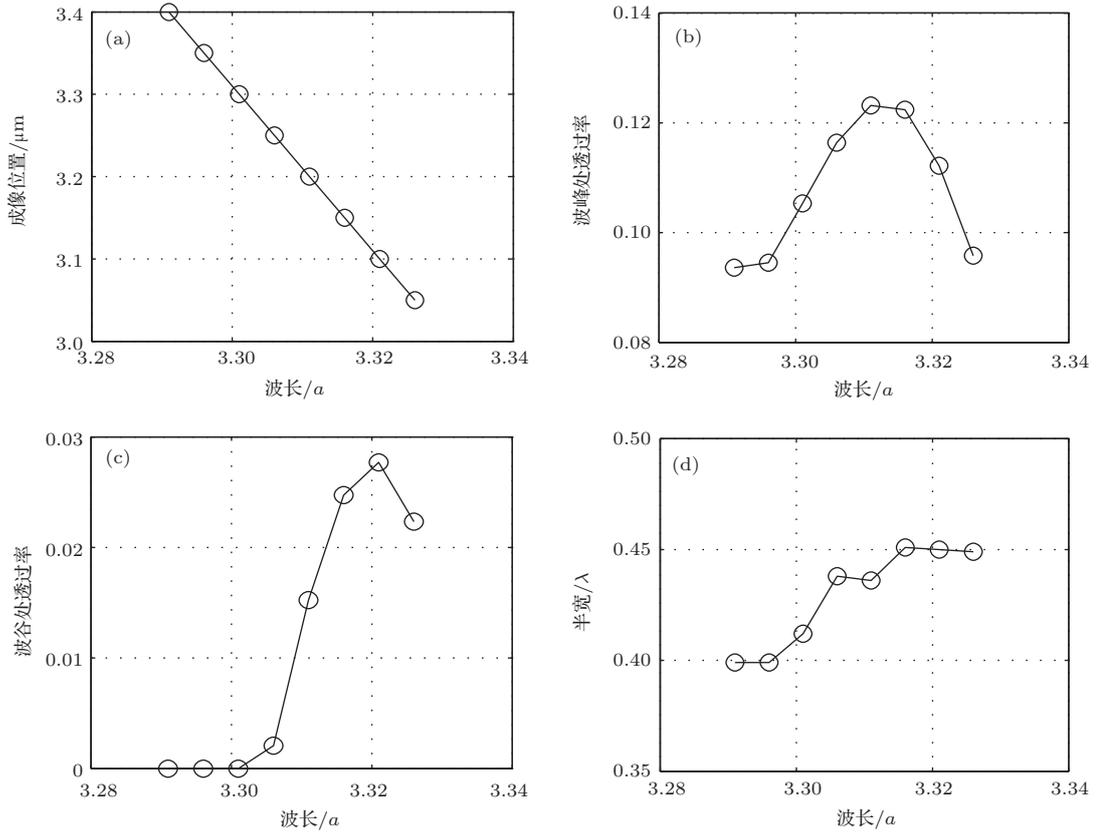


图4 (a) 入射波长对亚波长成像位置的影响; (b) 入射波长对波峰处透过率的影响; (c) 入射波长对波谷处透过率的影响; (d) 入射波长对半宽的影响

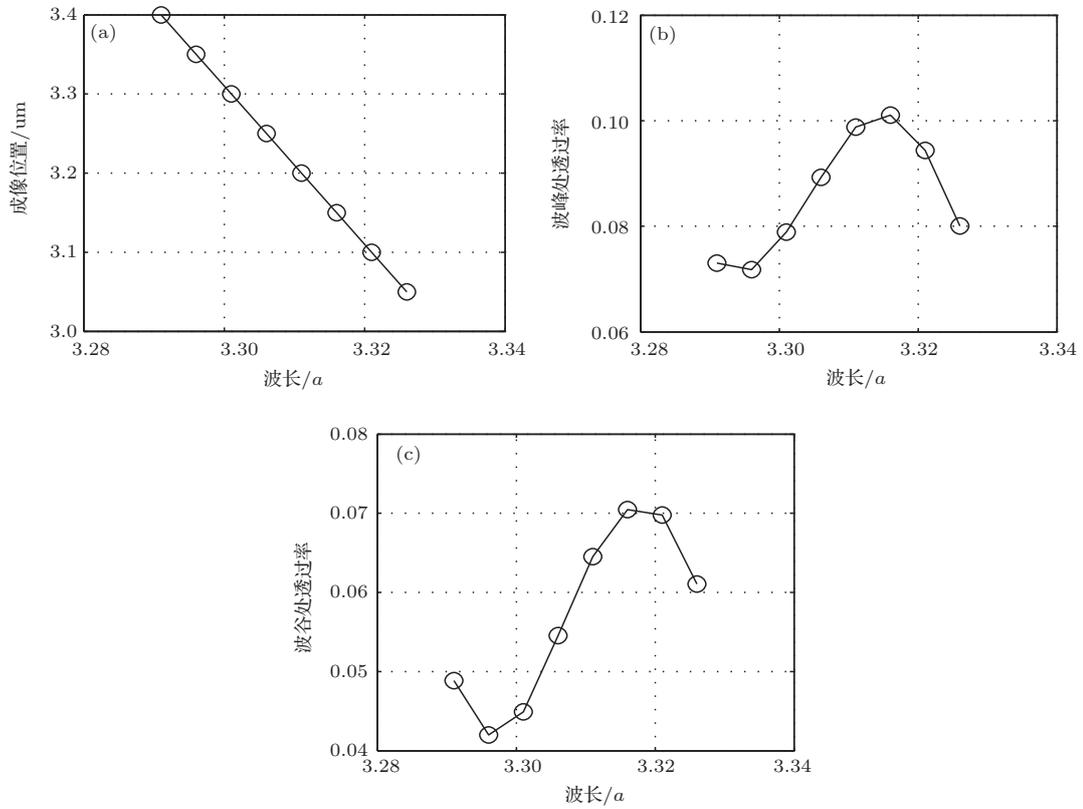


图5 (a) 入射波长对亚波长成像位置的影响; (b) 入射波长对波峰处透过率的影响; (c) 入射波长对波谷处透过率的影响

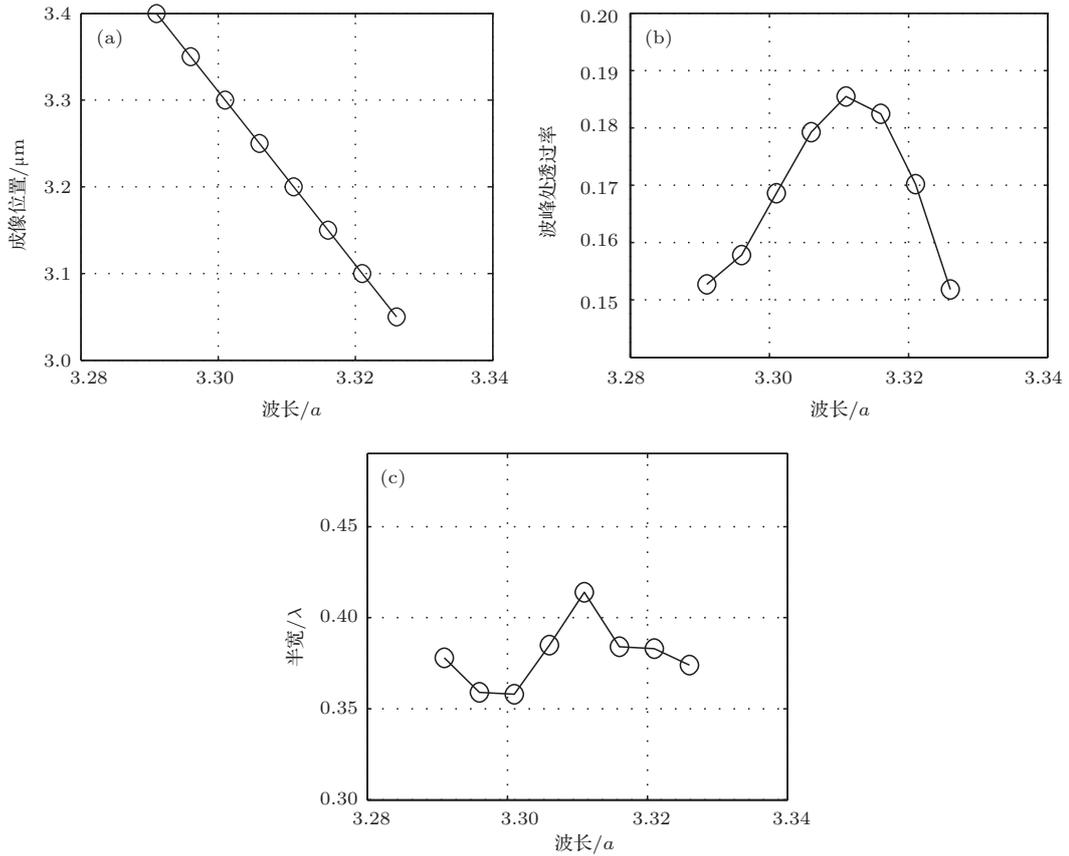


图6 (a) 波长对亚波长成像位置的影响; (b) 波长对波峰处透过率的影响; (c) 波长对半宽的影响

最后, 扩大两光源的距离, 使两光源的距离为 $2.65a$. 通过模拟得出数据, 如图6所示. 图中我们发现, 成像点位置以及波峰处的透射率随波长的变化与两光源之间的距离为 $2.4a$ 时是一样的. 而且由于两点光源之间的距离足够大, 能很好实现亚波长成像, 所以波谷处的透过率为0. 而且波峰处的透过率明显比两光源距离为 $2.4a$ 要大得多, 亚波长成像效果比两光源之间的距离为 $2.4a$ 时更加显著了.

接下来, 我们将通过连续取两光源之间的距离, 来研究两光源之间的距离对亚波长成像的影响. 我们取入射光的波长为 $3.311a$, 也即是入射波长 λ 为 $1.596 \mu\text{m}$, 通过改变两光源之间的距离, 来观察成像结果.

从图7中我们发现随着两光源距离的增大, 波峰处的透过率不断增大, 而波谷处的透过率不断减小. 也就意味着亚波长成像的性质越来越好. 并且, 通过瑞利判据可知, 当两光源之间的距离小于 0.66 个波长时, 将不能实现亚波长成像.

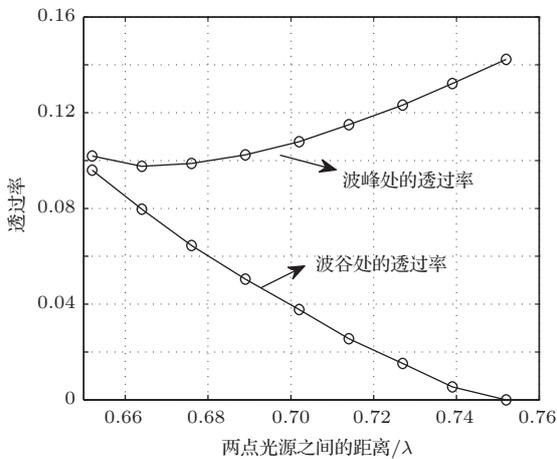


图7 两光源的距离对成像点处波峰及波谷透过率的影响

5 温度漂移对亚波长成像的影响

由上面的模拟结果可知当入射光波长为 $3.311a$ 时, 可以实现最佳的亚波长成像, 接下来将利用这个波段的入射波来研究温度对亚波长成像的影响. 由于光子晶体介质柱是由硅材料制作的, 其具有热光效应, 在光子晶体工作温度范围 ($0-220 \text{ }^\circ\text{C}$) 内, 温度变化与介质折射率间的关系可表达为 [24]

$$\Delta n = \alpha_1 \cdot n \cdot \Delta T,$$

其中 n 为介质的折射率; α_1 为介质的热光系数; ΔT 为温度变化量. 硅的热光系数为 $\alpha_1 = 1.86 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$. 我们可以通过背景折射率的改变来模拟温度的改变, 从而探索出温度对亚波长成像的影响.

取两光源之间的距离为 $2.4a$, 入射光的波长为 $3.11a$, 通过模拟, 探测出成像位置, 以及成像点处的能流透过率分布.

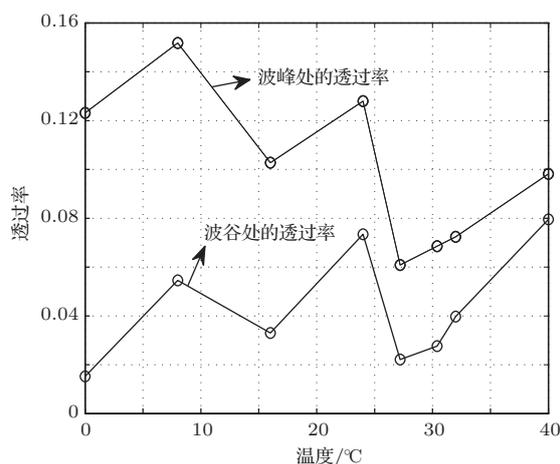


图8 温度对成像点性质的影响

从图8中可以看出, 波峰及波谷处的透过率随温度的变化没有明显的规律. 根据瑞利判据判断只有在温度为0—32 °C的范围内才能实现亚波长成像, 当温度大于32 °C, 波峰、波谷处的透过率差过小而导致不能实现亚波长成像.

6 结 论

利用文中所示的光子晶体模型可以实现亚波长成像, 而且亚波长成像点的性质受入射光的波长、温度以及两光源之间的距离影响. 亚波长成像性质最好的入射光波长为 $3.311a$, 波长的增大或者减小都将导致波峰和波谷处的透射率差降低, 从而影响亚波长成像的性质. 两光源之间的距离也是影响亚波长成像的重要点, 当两光源的距离小于0.66个波长时将导致不能实现亚波长成像. 此外, 温度也对亚波长成像有很重要的影响, 只有在一定温度范围内才能实现亚波长成像, 当温度大于32 °C已

经不能实现亚波长成像了.

参考文献

- [1] Veselago V G 1986 *Soviet Phys. Uspekhi.* **10** 509
- [2] Li Z Y, Lin L L 2003 *Phys. Rev.* **68** 245110
- [3] Quan X L, Yang X B 2009 *Chinese Phys. B.* **18** 5131
- [4] Ni J, Zhang J J, Cao Y, Wang X B, Li C, Chen X L, Geng X H, Zhao Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 087309
- [5] Liu H, Liu D, Zhao H, Gao Y h 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 194208 (in Chinese) [刘会, 刘丹, 赵恒, 高义华 2013 物理学报 **62** 194208]
- [6] Yu G j, Bu S, Wang X, Ji H Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194703 (in Chinese) [于国君, 卜胜利, 王响, 纪红柱 2012 物理学报 **61** 194703]
- [7] Tong Y W, Tian S, Zhuang S L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 054201 (in Chinese) [童元伟, 田双, 庄松林 2011 物理学报 **60** 054201]
- [8] Peng Shi, Kun Huang, Yong-ping Li 2012 *Optics. Letters.* **37** 359
- [9] Pavel A, Belov and Yang Hao 2006 *Phys. Rev.* **73** 113110
- [10] Wojciech Śmigaj, Boris Gralak, Raphaël Pierre, Gérard Tayeb 2009 *Optics. Letters.* **34** 3532
- [11] Sukhovich A, Merheb B, Muralidharan K, Vasseur J O, Pennec Y, Deymier P A, Page J H 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 4301
- [12] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science.* **292** 77
- [13] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [14] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [15] Schonbrun E, Yamashita T, Park W, Summers C J 2006 *Phys. Rev.* **73** 5117
- [16] Liu N, Guo H, Fu L, Kaiser S, Schweizer H, Giessen H 2008 *Nature Mater* **7** 31
- [17] Notomi M 2008 *Phys. Rev. B* **62** 10696
- [18] Feng Z F, Zhang X D, Wang Y Q, Li Z Y, Cheng B Y, Zhang D Z 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 7402
- [19] Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E, Foteinopoulou S, Soukoulis C M 2003 *Nature* **423** 604
- [20] Ertugrul, Cubukcu, Koray, Aydin, Ekmel, Ozbay, Stavroula, Foteinopoulou, Costas M Soukoulis 2001 *Science* **291** 849
- [21] Fabre N, Lalouat L, Cluzel B, Mélique X, Lippens D, de Fornel F, Vanbésien O 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 3901
- [22] Zu bin Jacob, Leonid V Alekseyev, Evgenii Narimaov 2006 *Opt. Express* **14** 8247
- [23] Zhang T, Chen L, Li X 2013 *Optics Express* **21** 20888
- [24] Tong K, Cui W W, Wang M T, Li Z Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 762 (in Chinese) [童凯, 崔卫卫, 汪梅婷, 李志全 2008 物理学报 **57** 762]

Research of the characteristics of photonic crystals based on air holes sub-wavelength imaging*

Zhan Sheng-Gao Liang Bin-Ming[†] Zhu Xing-Fu Chen Jia-Bi Zhuang Song-Lin

(College of Optical & Electronic Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,
Shanghai 200093, China)

(Received 25 December 2013; revised manuscript received 17 March 2014)

Abstract

Negative refractivity has been extensively studied, especially in the perfect imaging photonic crystal slab, for its fantastic characteristics. The photonic crystals sub-wavelength imaging is investigated by finite-difference time-domain (FDTD) simulation and numerical analysis. Impact of wavelength and temperature drift on the sub-wavelength imaging of photonic crystal with negative refraction has been studied in this paper.

Keywords: negative refraction, two-dimensional photonic crystal, imaging, sub-wavelength

PACS: 42.70.Qs, 42.25.Bs

DOI: [10.7498/aps.63.154212](https://doi.org/10.7498/aps.63.154212)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB935300), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61177043, 11104184).

[†] Corresponding author. E-mail: Liangbinming@sina.com