

文章编号: 0253-2239(2006)09-1409-5

波状结构二维光子晶体近场亚波长成像的研究*

厉以宇 顾培夫 李明宇 张锦龙 刘旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 研究了波状结构二维光子晶体(2DPC)在红外波段的负折射近场成像,对其等频面进行了分析,指出波状结构二维光子晶体无法实现负折射远场成像的原因在于缺少与入射介质等频面相匹配的光子晶体圆形等频面,所用的矩形等频面使波状膜层二维光子晶体不可避免地具有各向异性特征,进而将成像限制在近场范围内。采用时域有限差分(时域有限差分)方法模拟了不同厚度的波状结构二维光子晶体近场成像效果,当厚度为两倍栅格常量时,单光源的成像分辨力为 0.28λ ,达到亚波长分辨效果。分辨力随着光源逐渐远离近场范围而降低,而像点的位置基本不随光源距离和光子晶体厚度的变化而改变。双光源的成像模拟进一步验证了波状结构二维光子晶体的近场亚波长成像能力,分辨力达到 0.35λ ,但成像质量受光子晶体厚度变化的影响较大。

关键词: 光电子学; 光子晶体; 时域有限差分; 负折射; 亚波长成像

中图分类号: O439 文献标识码: A

Near-Field Subwavelength Imaging in Wave-Like Two-Dimensional Photonic Crystal

Li Yiyu Gu Peifu Li Mingyu Zhang Jinlong Liu Xu

(State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Near-field subwavelength imaging based on negative refraction in wave-like two-dimensional photonic crystals within infrared band. The adopted rectangular iso-frequency surface results in the inhomogeneity of wave-like two-dimensional photonic crystal unavoidably, so the imaging is confined in the near-field region. For the lack of the circular-shaped iso-frequency surface in photonic crystal matching that of the incident medium, far-field imaging based on negative refraction is unavailable in wave-like two-dimensional photonic crystal. The finite-difference time-domain method is used to simulate the near-field imaging in wave-like two-dimensional photonic crystal of different thickness. The resolution of 0.28λ is achieved for single point source when the thickness of photonic crystal is twice of lattice constant. The resolution will gradually degrade as the source moves beyond the near-field domain. Meanwhile, the image is strongly confined in the near-field region on the other side of photonic crystal in spite of the change of source position and photonic crystal thickness. In order to further demonstrate the subwavelength imaging ability of wave-like two-dimensional photonic crystal, double sources are used. Resolution of 0.35λ is obtained, but the imaging quality depends on the thickness of photonic crystal greatly.

Key words: optoelectronics; photonic crystal; finite-difference time-domain; negative refraction; subwavelength imaging

1 引言

现今主要有两种方式能够实现亚波长成像,其中一种是利用负折射率材料。Pendry^[1]指出当介电常量和磁导率同为 -1 ,且材料不存在损耗的情况下,倏逝波分量能够在负折射率材料中得到放大^[2],

同时传播模通过负折射将在焦平面汇聚,所以由负折射率材料构成的平板就能够实现完美成像。但这种理想的负折射率材料在自然界中是不存在的,用人工制造不仅难度高而且损耗较大。另一种方式是利用由无损耗的介质材料构成的光子晶体(PC)结

* 国家自然科学基金(60478038)和国家基础研究基金(2004CB19803)资助课题。

作者简介:厉以宇(1980~),男,浙江温州人,浙江大学博士研究生,主要从事光学薄膜和多维光子晶体的研究。

E-mail: liiyiyuu@263.net

收稿日期: 2005-11-25; 收到修改稿日期: 2006-01-11

构。Lu^o等^[3]首先发现二维光子晶体(2DPC)可以实现全角度的负折射,并研究了倏逝波在二维光子晶体内的传播特性,论证了利用二维光子晶体实现亚波长成像的可行性。Li等^[4]通过模拟发现受光子晶体自准直效应的影响负折射成像的像点会被限制在近场范围内。Hu等^[5]指出通过选择合适的介电常量和调整光子晶体的填充率即改变散射子的尺寸,在光子晶体的第一条能带上可以获得中心位于布里渊区中M点上的圆形等频面,从而抑制自准直效应实现远场的负折射成像。

本文针对波状结构二维光子晶体等频面的结构特征,研究了红外波段的负折射近场成像,采用时域有限差分方法先后模拟了单光源和双光源的成像效果,并讨论了光源距离和光子晶体的物理厚度对成像质量的影响。

2 结构分析

光子晶体一般由两种介质材料组成,从本质上讲它属于非均匀介质材料^[6~8],如何准确判断光波在其中的传播一直是一个难题。最近一系列的理论研究^[9,10]和实验表明利用光子晶体等频面的概念可以定性分析光波在光子晶体内部的传播特性。当等频面呈圆形且与入射介质的等频面等大时,光子晶体呈现各向同性,若频率朝圆心方向递增,就能实现全角度的负折射近/远场成像^[11];而当等频面趋向矩形时,自准直效应将会显现,所以由等频面和相应的群速度计算,可以研究光波在光子晶体内的传播。

图1是波状结构二维光子晶体的结构图,采用方形栅格结构 $L_x=L_z=a$, a 为栅格常量。浅色和深色区域分别代表Si和SiO₂膜层, T 代表Si的厚度, θ 是指波状结构的倾角。与常见的由周期排列的圆形介

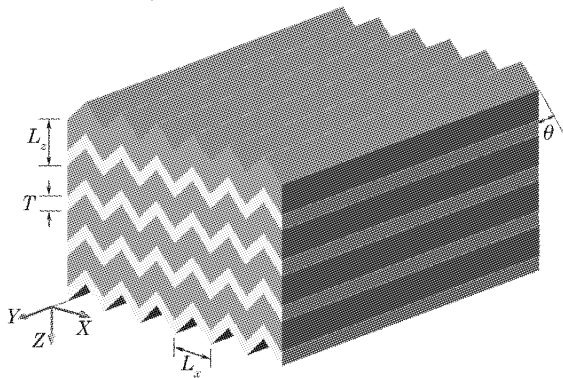


图1 波状结构二维光子晶体的结构图

Fig. 1 Structure of wave-like two-dimensional photonic crystal

质柱构成的光子晶体^[12~14]相比波状结构二维光子晶体的对称性较差,因而在介电常量和栅格常量固定的情况下,很难通过调节两种介质材料的填充比得到中心位于 Γ 或者M点且与入射介质等频面等大的圆形等频面,只能得到圆角矩形等频面,造成波状结构二维光子晶体的各向异性难以消除。

图2是利用平面波展开算法计算得到的TM模(电场方向沿Y轴)的等频面,此时 $a=0.44\mu\text{m}$, $T=0.14\mu\text{m}$, $\theta=45^\circ$ 。 k_x, k_z 分别为波矢空间内两个正交分量。当归一化频率由0.31上升时,中心位于 Γ 点的等频面逐渐向圆形演变并收缩,但此时入射介质等频面的面积已经远远超过光子晶体的等频面并持续增大,两者严重失配。选择归一化频率 $\Omega=a/\lambda=0.287$,对应波长 $\lambda=1533\text{nm}$,该频率下入射介质和光子晶体的等频面尺寸相当,光子晶体等频面呈矩形,如图3所示。

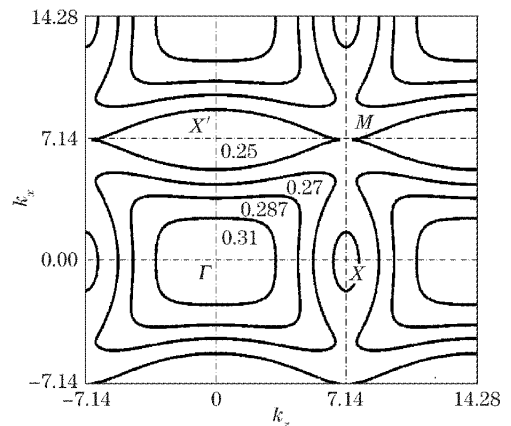


图2 波状结构二维光子晶体的等频面图

Fig. 2 Iso-frequency surface of wave-like two-dimensional photonic crystal

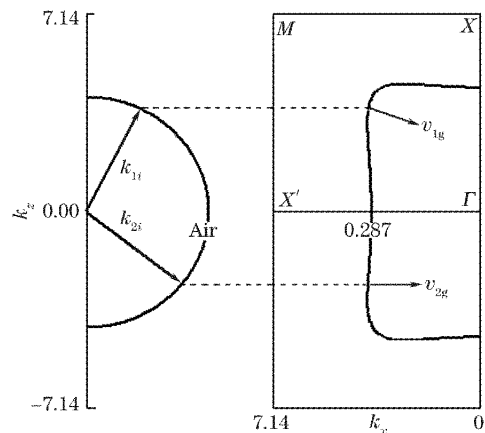


图3 入射介质(空气)和光子晶体的等频面对应关系

Fig. 3 Correspondence of iso-frequency surfaces of photonic crystal and incident medium (air)

入射界面的法线方向选择 $\Gamma X'$ ，即实空间的 X 轴方向。矩形等频面在其圆角区域产生负折射现象，而在四边平坦区域出现自准直效应，波状结构二维光子晶体的各向异性由此产生，并将对负折射成像产生较大影响。图 3 依据波矢切向分量连续原则分别绘出了在光子晶体内部与入射波矢 k_{1z} 和 k_{2z} 对应的负折射的群速度 V_{1g} 和 V_{2g} 自准直群速度。

3 模拟成像

采用时域有限差分(FDTD)方法模拟点光源的负折射成像。图 4 给出了波状结构二维光子晶体在 X 轴方向的厚度分别取 $2a$ 、 $6a$ 和 $10a$ 时的成像效

果。点光源位于 $X/a=8.41, Z/a=18.45$ 距离光子晶体前端面 $0.68a$ ，相当于 0.195λ ， λ 取 1533 nm 。模拟所用的网格尺寸为 $20\text{ nm}\times 20\text{ nm}$ 。图 4 展示的是电场实部的取值。电场基本上以光子晶体为中心线上下对称分布，说明在光子晶体的出射端面出现了一个较为完善的点像。受光子晶体各向异性影响，像距并不随光子晶体厚度的增加而发生明显变化，因而物距与像距之和不再与光子晶体的厚度相等，在光子晶体内部也很难找到较为清晰的汇聚焦点。所以，矩形等频面引起的各向异性使波状结构二维光子晶体的负折射失去了远场成像能力，像点被限制在光子晶体出射端面的近场范围内。

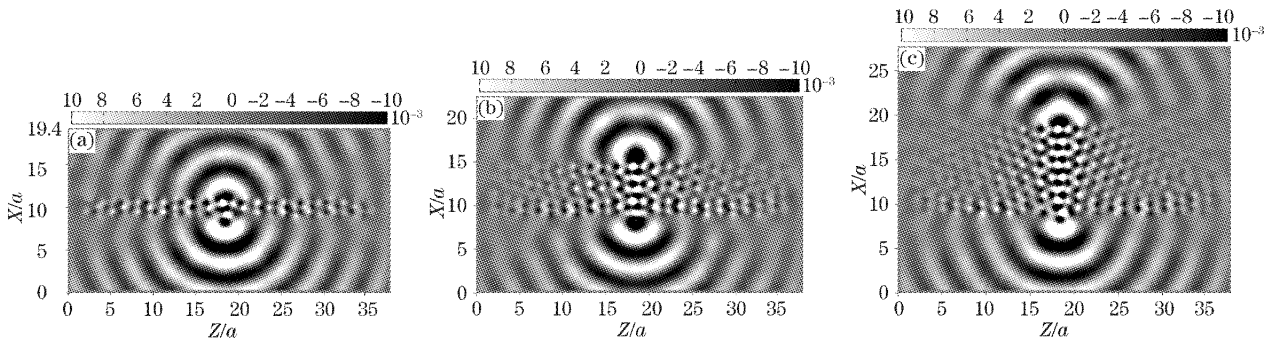


图 4 不同厚度情况下的波状结构二维光子晶体点光源近场成像的电场分布。光子晶体厚度为 $2a$ (a)， $6a$ (b)， $10a$ (c)
 Fig. 4 Distribution of electric field of near-field imaging for point source in wave-like two-dimensional photonic crystal with thickness of (a) $2a$, (b) $6a$ and (c) $10a$

为了详细说明光源距离的变化对波状结构二维光子晶体负折射成像的影响，将时域有限差分的网格划分尺寸减小到 $5\text{ nm}\times 5\text{ nm}$ ，光子晶体在 X 轴方向的厚度选用 $2a$ ，模拟结果如图 5，灰色实线代表光子晶体的前后端面。图 5(a) 中光源与光子晶体前端面的距离为 $0.68a$ ，像点到出射端面的距离约为 $0.61a$ ，两者之和小于光子晶体的厚度。保持光子晶体的厚度不变，当光源逐渐远离近场向远场移动时，像点迅

速模糊，像距略有呈增大的趋势但不明显，如图 5(b) 和图 5(c) 所示。图 6 给出了点光源距离光子晶体前端面分别为 $0.68a, 0.79a$ 和 $0.90a$ 时像面上的光强分布。光强由电场的模平方表示，并进行了归一化处理。光源距离为 $0.68a$ 时，像点最为清晰，半峰全宽(FWHM)为 $0.98a$ ，即 0.28λ ，达到亚波长成像分辨力。随着光源距离的增大，次峰的峰值随之上升，最终像点将会淹没在周围的次峰当中。可见各向异性

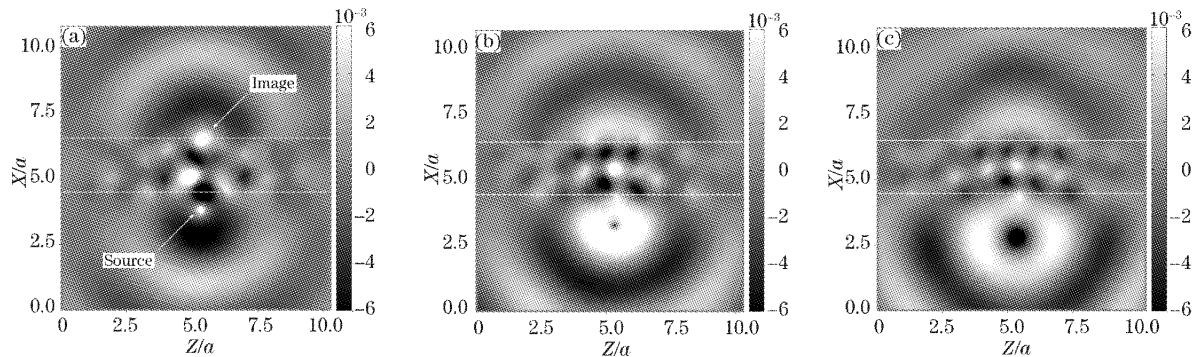


图 5 不同光源距离下的波状结构二维光子晶体的点光源近场成像电场分布。光源距离为 $0.68a$ (a)， $1.20a$ (b)， $1.70a$ (c)
 Fig. 5 Distribution of electric field of near-field imaging in wave-like two-dimensional photonic crystal with point source distance of (a) $0.68a$, (b) $1.20a$ and (c) $1.70a$

不仅限制了光子晶体负折射的远场成像能力,还对近场成像的物距提出了要求,即光源必须处在入射端面的近场范围内才能得到良好的近场成像效果。

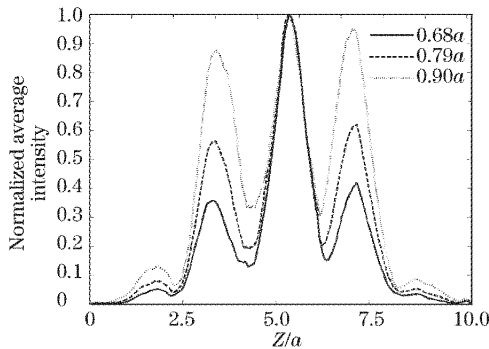


图 6 改变光源的距离在像面上得到的归一化光强分布
Fig. 6 Normalized intensity on image plane when the distance of source is changed

为进一步验证波状结构二维光子晶体的亚波长成像能力,在距离光子晶体前端面 $0.68a$ 处引入两个同频率的点光源,位置分别设在 $X/a = 3.86$, $Z/a = 7.38$ 和 $X/a = 3.86$, $Z/a = 10.26$,光源间距为 $2.88a$,即 0.83λ 。光子晶体在 X 轴方向的厚度为 $2a$ 。双光源成像的电场分布如图 7 所示。

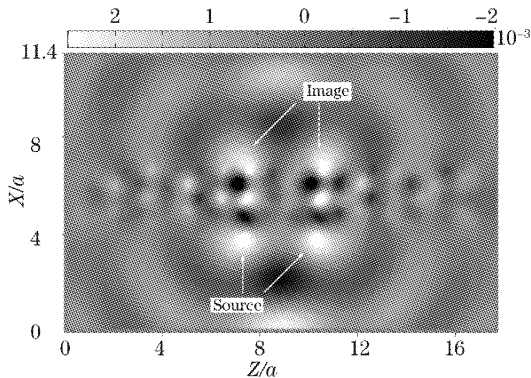


图 7 波状结构二维光子晶体的双光源近场成像电场分布
Fig. 7 Distribution of electric field of near-field imaging for double point sources used for wave-like two-dimensional photonic crystal

图 8 中的实线代表此时横穿两个像点且平行于 Z 方向的截面上的光强分布,半峰全宽约为 $1.22a$,即 0.35λ ,比单个点光源成像时略有增大,但依然达到亚波长成像的要求。当光子晶体的厚度增大到 $3a$ 和 $5a$ 时,像质逐渐变差。

4 结 论

波状结构二维光子晶体可以利用负折射实现红外波段的近场亚波长成像,但矩形等频面引起的光

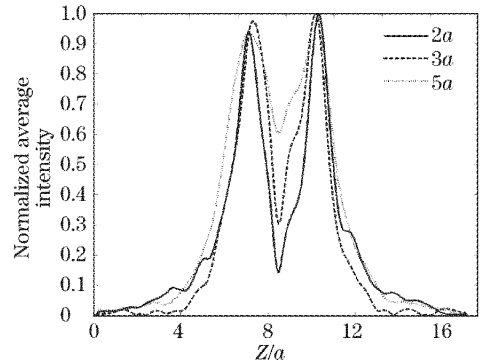


图 8 改变波状结构二维光子晶体的厚度在像面上得到的归一化光强分布

Fig. 8 Normalized intensity on image plane when the thickness of wave-like two-dimensional photonic crystal is changed

子晶体各向异性使其失去了远场成像能力,像点总是被限制在近场范围内,同时为达到较高的成像分辨力,要求光源必须放置在与像点异侧的近场范围内,而且光源距离和光子晶体厚度的增大都会严重影响波状结构二维光子晶体的近场成像质量。波状结构二维光子晶体的负折射远场成像将是今后的研究重点,可以考虑通过选用其他介质材料和改变栅格结构来调节能带结构从而获得合适的圆形等频面使波状结构二维光子晶体呈现各向同性。

参 考 文 献

- 1 J. B. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18): 3966~3969
- 2 Chen Long, He Sailing, Shen Linfang. Analysis for the propagation of evanescent waves and the photo tunneling effect in a multi-layered structure containing materials with negative refractive index[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(10): 2386~2392 (in Chinese)
陈 龙,何赛灵,沈林放. 含负折射率介质的多层结构中倏逝波传播及隧道效应的分析[J]. *物理学报*, 2003, **52**(10): 2386~2392
- 3 C. Y. Luo, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos *et al.*. All-angle negative refraction without negative effective index[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**(20): 201104-1~201104-4
- 4 Z. Y. Li, L. L. Lin. Evaluation of lensing in photonic crystal slabs exhibiting negative refraction[J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **68**(24): 245110-1~245110-7
- 5 X. H. Hua, C. T. Chan. Photonic crystals with silver nanowires as a near-infrared superlens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(9): 1520~1522
- 6 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Ji Jiarong *et al.*. The transmission properties of photonic crystals without strict periodicity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 847~850 (in Chinese)
朱志宏,叶卫民,季家镛等. 光子晶体的非严格周期性对其传输特性的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 847~850
- 7 Feng Shangshen, Shen Linfang, He Sailing *et al.*. A two-dimensional pixel-type of photonic crystal structure with a large complete band gap at high frequency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1025~1029 (in Chinese)

- 冯尚申, 沈林放, 何赛灵 等. 高频区具有大带隙的二维像素型光子晶体结构[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1025~1029
- 8 Chen Fuyi, Jie Wanqi. Growth and microstructure analysis of PMMA photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1117~1120 (in Chinese)
- 陈福义, 介万奇. 聚甲基丙烯酸甲酯光子晶体的生长和结构分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1117~1120
- 9 M. Notomi. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals; Refraction behavior in the vicinity of the photonic band gap[J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **62**(16): 10696~10705
- 10 C. Y. Luo, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos *et al.*. Negative refraction without negative index in metallic photonic crystals[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(7): 746~754
- 11 X. D. Zhang. Subwavelength far-field resolution in a square two-dimensional photonic crystal[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(3): 037601-1~037601-4
- 12 B. Gralak, S. Enoch, G. Tayeb. ANomalous refractive properties of photonic crystals[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(6): 1012~1020
- 13 E. Cubukcu, K. Aydin, E. Ozbay *et al.*. Subwavelength resolution in a two-dimensional photonic-crystal-superlens[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(20): 207401-1~207401-4
- 14 C. H. Kuo, Z. Ye. Optical transmission of photonic crystal structures formed by dielectric cylinders; Evidence for non-negative refraction[J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **70**(5): 056608-1~056608-4