

基于二维光子晶体负折射的共聚焦系统

牛金科, 梁斌明*, 庄松林, 王国旭, 雷雨

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

摘要 基于二维光子晶体的负折射和亚波长成像特性, 提出了一种可以实现超分辨成像的共聚焦系统, 使用时域有限差分法(FDTD)仿真了共聚焦系统的聚焦和成像的过程。在焦点离光子晶体透镜下表面 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 横坐标 $X=4 \mu\text{m}$ 时, 焦点半峰全宽(FWHM)为 0.593λ , 小于入射波长, 此时反射光在右侧像点的 FWHM 达到 0.496λ , 实现了超分辨成像, 并且随着焦点的右移, 像点 FWHM 不断减小。同时, 在针孔和焦点位置不变时共聚焦系统的轴向分辨率达到 2.2λ 。

关键词 衍射; 光子晶体; 负折射; 共聚焦; 亚波长成像; 超分辨成像

中图分类号 TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.020501

Confocal System Based on the Negative Refraction of Two-Dimensional Photonic Crystals

Niu Jinke, Liang Binming*, Zhuang Songlin, Wang Guoxu, Lei Yu

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract In this study, a confocal system is proposed for which super-resolution imaging can be achieved based on the negative refraction and subwavelength imaging characteristics of two-dimensional photonic crystals (PCs). Further, the focusing and imaging processes of a confocal system are simulated with the finite-difference time-domain method. When the distance from the focus to the lower surface of a PC becomes $1.55 \mu\text{m}$ and when the transverse coordinate $x=4$, the full width at half maximum (FWHM) of the focus becomes 0.593λ , which is less than the incident wavelength; further, the FWHM of the reflected light in the right of the image point becomes 0.496λ , which indicates that super-resolution imaging can be realized. The FWHM of the image point decreases continuously when the focus shifts to right; further, the axial resolution of the confocal system becomes 2.2λ when the pinhole and focus are fixed.

Key words diffraction; photonic crystals; negative refraction; confocal; subwavelength imaging; super-resolution imaging

OCIS codes 050.5298; 050.6624; 220.3630

1 引言

由于具有亚波长成像和等效负折射率等特性, 近年来负折射材料(NIMs)^[1-3]吸引了越来越多的关注。负折射的概念最早由俄国科学家 Veselago 提出^[1], 当时的观点认为只要介电常数 ϵ 和磁导率 μ 为负值, 电场、磁场和波矢之间就会构成不同于一般介质材料的左手关系, 称为左手材料。1987 年, 加

拿大物理学家 John^[4] 和美国贝尔实验室的 Yablonovitch^[5] 提出周期性的电介质结构可以抑制固体中电子的自发辐射和无序介质超大晶格的强光子局域, 这种介质称为光子晶体(PC)。光子晶体在微纳器件, 如波导耦合器^[6]、光子晶体偏振分束器^[7] 和光子晶体光纤^[8] 等方面有广泛的应用前景。和一般的负折射材料不同, 光子晶体的负折射现象并不是由它特殊的磁导率和介电常数引起的, 而是由折

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-07-27; 录用日期: 2018-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(61177043)

* E-mail: bmliang78@aliyun.com

射率不同的两种介质周期性排列对光子产生的特殊色散效应引起的^[9-10],因此它的周期形态会影响光能透过等性质^[11]。除此之外,光子晶体还能够打破衍射极限^[12],实现超分辨成像。

1968年 Petráň 等提出了共聚焦系统^[13],该显微结构利用光源点、物方焦点和探测点的3点共焦,可以逐点成像的特性来提高成像的信噪比,增大图像对比度。近年来,随着受激辐射荧光损耗(STED)^[14-15]、饱和竞争(SAC)^[16]和分时差分自发辐射(FED)^[17]等技术的发展,共聚焦系统逐渐突破衍射极限,实现超分辨成像。由于共聚焦系统可以同时实现三维成像和光学切片^[18],其在微纳成像特别是生命科学^[19]领域得到了广泛的应用。

本文利用光子晶体负折射的特性,提出了一种等效折射率为-1的三角形结构平板透镜,该透镜可以实现光源点、焦点和像点的3点共焦。根据时域有限差分法(FDTD)仿真了负折射共聚焦系统聚焦和反射成像的过程,分析了焦点位置对像点峰值和半峰全宽(FWHM)的影响。

2 光子晶体负折射成像

对于三角形结构空气柱型光子晶体,晶格常数 $a=0.482 \mu\text{m}$,空气孔半径 $r=0.4015a$ 。高背景折射率材料硅折射率 $n=3.45$ 。根据平面波展开法(PWEM)计算出的光子晶体TE偏振第一光子带的等频图如图1所示,随着波矢 k 由内向外的不断增大,等频线对应的频率不断减小,光子晶体第一光子带频率范围内电磁波的群速度和相速度方向相反,此时光子晶体中坡印亭矢量和波矢 k 的点乘为负

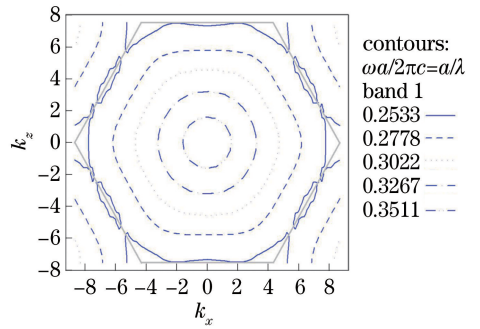


图1 光子晶体TE偏振光第一光子带等频图
Fig. 1 Equifrequency surface contours for the first TE-polarized photonic band of the PC

值,有左手特性,则其等效折射率为负值。当角频率 $\omega=0.311 \times 2\pi c/a$ 时 k 的值(即波数 k)为4.06,其对应的空间波长 $\lambda=3.216a$ (1550 nm),其中 c 为真空中的光速。

此频率等频面为环形,光子晶体各向同性,则其传播特性和入射方向无关。根据波数 k 和归一化频率 f 的关系:

$$k = \frac{\omega}{c} n_{\text{eff}}, \quad (1)$$

$$f = \frac{\omega a}{2\pi c}, \quad (2)$$

可得光子晶体的等效折射率 $n_{\text{eff}} = ka / (2\pi f)$,式中, ω 为角频率。代入文中参数,可得此时光子晶体的等效负折射率为 $-1.006 \approx -1$ 。根据折射定律可知,当物距小于折射率为-1的透镜厚度时,入射光会在透镜内部聚焦成一点,内部像点在透镜另一边缘对称点处再次聚焦成像,成像过程示意图如图2(a)所示。

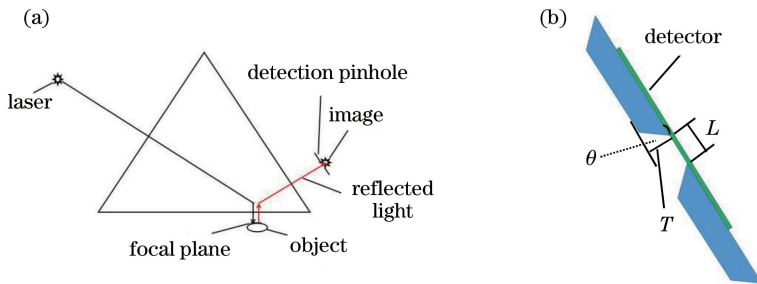


图2 光子晶体共聚焦系统成像示意图。(a)成像光路图;(b)像点处探测针孔及探测器

Fig. 2 Imaging schematic of PC confocal system. (a) Light path of imaging;

(b) pinhole and detector at the position of image point

使用 Rsoft 光路仿真软件和时域有限差分法(FDTD)模拟了光子晶体共聚焦透镜的成像过程,其理想匹配层(PML)为 $0.5 \mu\text{m}$,网格大小为 $0.03 \mu\text{m}$ 。仿真实验中等边三角形结构透镜的边长 $S=50a$,激

光光源位于三角形光子晶体透镜左侧,设置其焦平面距光子晶体下表面为 $1.55 \mu\text{m}$ 。仿真中针孔由吸收介质构成,长度为 $15 \mu\text{m}$,形状如图2(b)所示,其中挡板厚度 T 为 $1 \mu\text{m}$,针孔大小 L 为 1λ ^[20],探测针孔的作

用是消除离焦光对成像的影响,增加像点信噪比,提高成像质量。吸收介质挡板平行于光子晶体透镜右表面,针孔开角 θ 为 45° 。在针孔背面处放置光电倍增管采集像点信号,经计算机处理后可得到清晰的图像,仿真中用探测器采集信息。

3 结果分析

由于透镜是光子晶体平板,且等效折射率为 -1 ,则可以通过负折射对称成像将焦点会聚到透镜下方任一横向位置。 Q_1 为探测器在焦点处的归一化能量透过率; Q_2 表示在不加针孔时反射光在右侧像点处的归一化能量透过率; $Q_3 = Q_1 Q_2$,表示不加针孔时光源经反射后在右侧像点处的相对能量透过率。图 3 为焦点位于不同横向位置时 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 的变化曲线, X 为焦点的横坐标,由图 3 可知,随着焦点横向位置由 $-10 \mu\text{m}$ 移动到 $10 \mu\text{m}$,光源在焦点处的能量透过率不断减小,而反射光在右侧像点处的透过率不断增大。 Q_3 在 $X = -10 \mu\text{m}$ 到 $X = -2 \mu\text{m}$ 之间迅速增大,在 $X = 0$ 处达到最大值,且在 $X = -2 \mu\text{m}$ 到 $X = 4 \mu\text{m}$ 之间相对稳定。图 3 也给出像点 FWHM

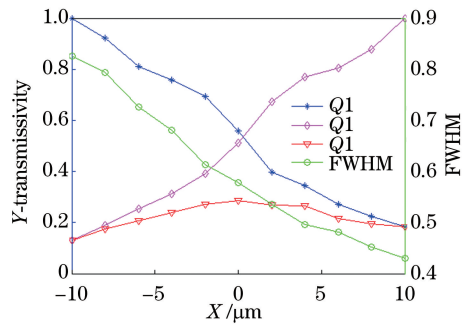


图 3 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 和 FWHM 的值随焦点横向位置的变化,焦点纵向位于光子晶体下表面 $1.5 \mu\text{m}$ 处
Fig. 3 Value of Q_1 , Q_2 , Q_3 and FWHM versus horizontal position of the focus, and it is located at $1.5 \mu\text{m}$ below the PC

随焦点横向坐标的变化,从 FWHM 的变化曲线可知,随着焦点位置的右移,像点处的 FWHM 不断减小。由于光子晶体可以放大倏逝波,当焦点位于 $X = 4 \mu\text{m}$ 时像点 FWHM 达到 0.496λ ,小于入射波长的一半,根据瑞利判据,此时像点 FWHM 突破衍射极限,可以实现超分辨成像。此时点光源聚焦和反射成像的光路图如图 4(a)和(b)所示。

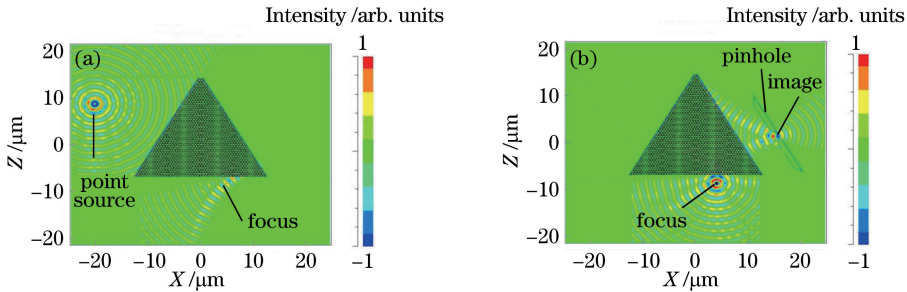


图 4 点光源聚焦和反射成像的光路图。(a)光源经过光子晶体负折射聚焦;(b)焦点反射光经负折射在探测针孔处成像
Fig. 4 Light path of focusing of the point source and reflection light imaging: (a) Negative refraction and focusing of the point source through PC; (b) reflection light negative refraction and imaging at pinhole

为了保证较高的能量透过率和较小的成像 FWHM,选定焦点横向坐标为 $4 \mu\text{m}$,入射光源在透

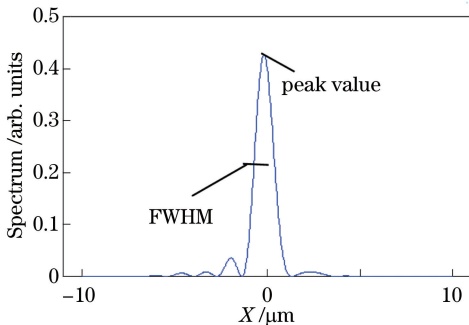


图 5 焦平面处探测器输出值
Fig. 5 Output values of detector at focal plane

镜下方出射,图 5 为焦平面处探测器的输出值,根据像点艾里斑大小为能量分布的主峰 FWHM,测得其 FWHM 为 0.593λ ,小于入射波长。光源从光子晶体透镜出射后在轴向上传播,其能量和 FWHM 在焦平面分别取得极大值和极小值。根据探测器的输出结果,以焦平面为中心点,轴向上下一个波长范围内的归一化峰值和 FWHM 如图 6 所示, H 为正表示焦平面上方,为负表示焦平面下方。可见光束在焦平面处取得极大峰值和极小 FWHM,并随着远离焦平面 FWHM 逐渐增大,峰值逐渐减小。

光源在透镜下方聚焦为 FWHM 是 0.593λ 的照明光场,焦点光反射后经光子晶体负折射在右侧针孔处聚焦成像,离焦光被针孔挡板吸收。设样品

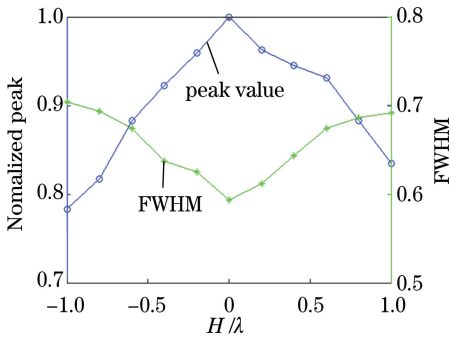


图6 轴向距离焦平面一个波长上下的归一化峰值和半峰全宽

Fig. 6 Normalized peak and FWHM when axial distance to focal plane H varies from $-\lambda$ to λ

偏离预设焦平面的距离,即离焦度为 d 时,离焦反射光的宽度由图6中的 FWHM 表示。在探测针孔位置和大小保持不变的情况下,离焦反射光在针孔处能量透过率的归一化峰值如图7所示,随着离焦度增大,能量透过率存在极大值,分别在 d 为 1 和 -1.2 时透过率减小到 0,可以认为此时该光子晶体共聚焦系统的轴向分辨率为 2.2λ 。同时根据光源、焦点和探测针孔 3 点共轭,在焦点 $X=4\ \mu\text{m}$ 时距光子晶体透镜下表面的距离 Z ,得出不同焦深时对应的光源点和探测针孔的位置关系分别为: $x_1 = -19.3 + (\sqrt{3}/2)Z$, $z_1 = 7 + Z/2$; $x_2 = 16.7 - (\sqrt{3}/2)Z$, $z_2 = 0.8 + Z/2$,其中 x_1 和 z_1 为光源点的横坐标和纵坐标, x_2 和 z_2 为探测针孔的横坐标和纵坐标。根据 3 者的位置关系,可以实现共聚焦系统不同焦深时的快速调焦,有利于对观测样本进行光学切片和三维成像。

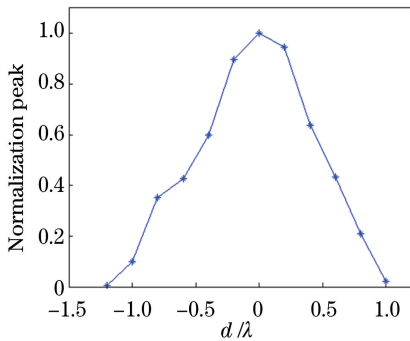


图7 探测点归一化峰值随离焦度 d 的变化

Fig. 7 Variation of the normalized peak value with the pinhole with d

4 结 论

基于折射率为 -1 的二维光子晶体,提出了一种共聚焦成像系统。焦点位于 $X=0$ 时系统取得最

大的能量透过率,且在 $X=-2\ \mu\text{m}$ 到 $X=4\ \mu\text{m}$ 范围内能量透过率保持稳定。焦点横坐标 $X=4\ \mu\text{m}$ 时其光斑 FWHM 为 0.593λ ,小于入射波长,此时反射光在像点处 FWHM 达到 0.496λ ,能够实现超分辨成像,并且像点 FWHM 随着焦点位置的右移不断减小。光源在光子晶体透镜下方聚焦,其峰值和 FWHM 分别在焦平面取得极大值和极小值,在焦点和针孔位置不变的情况下,共聚焦系统的轴向分辨率达到了 2.2λ 。最后,根据光源、焦点和探测针孔 3 点共轭,得出了光源和探测针孔相对于焦深 Z 的坐标关系,根据这一关系,可以准确快速地进行系统调焦,并且有利于对物体进行切片扫描和三维成像。

参 考 文 献

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [3] Kang M, Chen J, Li S M, *et al.* Optical spin-dependent angular shift in structured metamaterials [J]. Optics Letters, 2011, 36(19): 3942-3944.
- [4] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [5] Yablonovitch G, Sheng P, Yablonovitch E, *et al.* Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2061.
- [6] Su K, Wang Z M, Liu J J. Three waveguides directional coupler based on two dimensional square lattice photonic crystal [J]. Acta optica Sinica, 2016, 36(3): 0323002.
苏康, 王梓名, 刘建军. 二维正方晶格光子晶体三光波导方向耦合器 [J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0323002.
- [7] Zhang X X, Chen H M. Design and performance analysis of photonic crystal polarizing beam splitter [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 011301.
张信祥, 陈鹤鸣. 光子晶体偏振分束器的设计与性能分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 011301.
- [8] Ma J, Yu H H, Xiong J G, *et al.* Research progress of photonic crystal fiber sensors [J]. Laser &

- Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070006.
- 马健, 余海湖, 熊家国, 等. 光子晶体光纤传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070006.
- [9] Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E, *et al.* Electromagnetic waves: negative refraction by photonic crystals [J]. Nature, 2003, 423 (6940): 604-605.
- [10] Parimi P V, Lu W T, Vodo P, *et al.* Photonic crystals: imaging by flat lens using negative refraction[J]. Nature, 2003, 426(6965): 404.
- [11] Liu F F, Zhu Z J, Tong Y W. Effects on imaging quality of defects in the photonic crystal with negative refraction material[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (4): 0416004.
刘逢芳, 朱兆杰, 童元伟. 光子晶体负折射材料中缺陷对成像质量的影响[J]. 光学学报 2015, 35(4): 0416004.
- [12] Luo C, Johnson S G, Joannopoulos J D, *et al.* Subwavelength imaging in photonic crystals [J]. Physical Review B, 2003, 68(4): 045115.
- [13] Petráň M, Hadravský M, Egger M D, *et al.* Tandem-scanning reflected light microscope [J]. Journal of the Optical Society of America, 1968, 58 (5): 661-664.
- [14] Kuang C F, Li S, Liu W, *et al.* Breaking the diffraction barrier using fluorescence emission difference microscopy [J]. Scientific Reports, 2013, 3: 1441.
- [15] Willig KI, Harke B, Medda R, *et al.* STED microscopy with continuous wave beams [J]. Nature Methods, 2007, 4(11): 915-918.
- [16] Zhao G, Kabir M M, Toussaint K C, *et al.* Saturated absorption competition microscopy [J]. Optica, 2017, 4(6): 633-636.
- [17] Rong Z H, Li S, Kuang C F, *et al.* Real-time super-resolution imaging by high-speed fluorescence emission difference microscopy [J]. Journal of Modern Optics, 2014, 61(16): 1364-1371.
- [18] Wilson T. Resolution and optical sectioning in the confocal microscope [J]. Journal of Microscopy, 2011, 244(2): 113-121.
- [19] Sun T X, Liu H H, Liu Z G, *et al.* Application of confocal micro X-ray fluorescence technique based on polycapillary X-ray lens in analyzing medicine with capsule [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34 (1): 0134001.
孙天希, 刘鹤贺, 刘志国, 等. 毛细管 X 光透镜共聚焦微束 X 射线荧光技术在胶囊类药品分析中的应用 [J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0134001.
- [20] Borlinghaus R T, Kappel C. HyVolution: the smart path to confocal super-resolution [J]. Nature Methods, 2016, 13(3): 276.