

# 二维平板光子晶体的等效负折射率测量

蒋 强<sup>1</sup>, 陈家璧<sup>1\*</sup>, 梁斌明<sup>1</sup>, 王 燕<sup>2</sup>, 庄松林<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

<sup>2</sup>江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022

**摘要** 光子晶体特殊的色散特性能导致负折射现象发生。用波束位移法对二维光子晶体平板的负折射现象进行理论计算和实验测量, 得到了入射光经平板光子晶体折射后的二维光场分布。测量结果表明, 横电 (TE) 光在光子晶体中发生负折射, 出射光沿出射面产生了反方向的横向位移, 由此计算出来的负折射率约为  $-0.44$ , 而横磁 (TM) 光没有发生负折射。实验结果与仿真结果吻合较好。

**关键词** 材料; 光子晶体; 负折射; 等频图; 测量

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0616001

## Measurement of Effective Negative Refractive Index of Two-Dimensional Photonic Crystal Slabs

Jiang Qiang<sup>1</sup>, Chen Jiabi<sup>1</sup>, Liang Binming<sup>1</sup>, Wang Yan<sup>2</sup>, Zhuang Songlin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Optical-Electrical and Computer Engineering,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

<sup>2</sup>College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China

**Abstract** Photonic crystals have a special dispersion characteristic, which can lead to negative refraction. The negative refraction of a two-dimensional photonic crystal slab is calculated theoretically and measured experimentally with the beam-displacement method. The two-dimensional field distribution for an incident light refracted by this photonic crystal slab is obtained. The measured result shows that, as for the transverse electric (TE) light, the negative refraction in photonic crystals and the horizontal displacement in the opposite direction for the light exiting along the exit surface occur, and thus the effective refractive index is calculated as  $-0.44$ . In contrast, as for a transverse magnetic (TM) light, the negative refraction does not happen at all. The experimental result is well consistent with the simulated one.

**Key words** materials; photonic crystal; negative refraction; equi-frequency contour; measurement

**OCIS codes** 160.5298; 350.4238; 000.2190

## 1 引 言

负折射材料自从被 Smith 实验验证后就得到了广泛研究<sup>[1]</sup>, 其不仅在物理机理方面有重要的研究价值, 而且在亚波长成像<sup>[2-4]</sup>、新型传感器和光通信器件的设计<sup>[5-6]</sup>以及光的相位调控<sup>[7-8]</sup>等方面也具有巨大的应用前景。光子晶体作为一种周期性人工介质材料, 当尺寸和介电常数符合一定条件时能实现负折射。不同于一般意义上的左手材料<sup>[9]</sup>, 光子晶体的负折射效应是由其色散特性导致的, 特殊的色散关系和等频率曲线使得群速和相速的方向始终相反, 即光子晶体的负折射不要求材料的介电常数和磁导率同时为负, 因此实现起来更容易。光子晶体的晶格周期与其工作波长有对应的缩放关系, 工作在可见光波段的光子晶体要求晶格周期在纳米级, 但受限于加工工艺, 目前对光子晶体的负折射效应的实验研究大多集中在微波波段<sup>[10-11]</sup>。典

**收稿日期:** 2016-12-28; **收到修改稿日期:** 2017-01-18

**基金项目:** 国家自然科学基金(61177043)、国家青年科学基金(61308096)、江西省青年科学基金(2011ZBAB215036)

**作者简介:** 蒋 强(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: 18817581594@126.com

**导师简介:** 庄松林(1940—), 男, 博士, 教授, 主要从事应用光学和光电子学方面的研究。E-mail: slzhuang@yahoo.com

\* **通信联系人.** E-mail: jbchenk@163.com

型的负折射测试方法有棱镜法、功率透射实验法、波束位移实验法、本构参数提取实验法、近场电磁分布测试法等。关于光子晶体在光频段的负折射现象的验证实验大部分都是采用棱镜法。棱镜测量法的优势在于其能直接测量出折射角,通过斯涅耳定理即可求得折射率,且测量折射光时不会受到入射光方向强背景噪声的干扰<sup>[12-13]</sup>,但它的缺点在于只能测量正入射时的折射率。而波束位移法<sup>[10]</sup>则可以解决这一问题,该方法能测量不同入射角对应的等效折射率。本文采用波束位移法,从入射光方向强背景噪声中分离出了负折射光信号,测量了二维平板光子晶体在光频段的负折射率。

## 2 仿真结果

所用光子晶体为三角晶格硅柱构成的平板结构,光子晶体周期为  $a$ ,硅柱直径  $d=0.4a$ ,硅的介电常数为 12.25,如图 1(a)的右插图所示,其中  $\theta$  为入射角。该光子晶体的负折射效应可利用相位守恒原理、群速度定义及等频图分析。考虑到归一化入射光频率为  $0.5(2\pi/a)$ ,其对应的横电(TE)模和横磁(TM)模的等频图如图 1(a)中的左插图所示,其中虚线对应 TE 模的等频图,绿色、红色、蓝色分别对应归一化频率  $0.49(2\pi/a)$ 、 $0.5(2\pi/a)$ 、 $0.51(2\pi/a)$ ,黑色圆为空气中的等频线,入射光波矢  $\mathbf{k}$ (蓝色箭头)与光子晶体 TE 模的  $0.5(2\pi/a)$ 等频线相交于 A 点,对应的波矢分量守恒线(黑色虚线)与等频线相交于 B 点。入射光激发的波的群速度  $\mathbf{v}_g = \nabla \mathbf{k} \omega$ (其中  $\omega$  为归一化频率)得到。由图 1 可见,TE 模的等频图频率增大的方向指向等频图中心,即群速度的方向指向等频图中心(图中红色箭头所示),对应的波矢  $\mathbf{k}$  则沿着相速度方向(黑色箭头方向)。显然,A、B 两点中,若 A 点的群速度方向指向光源发出的方向,则折射光的群速度方向与入射光波矢的夹角大于  $\pi/2$ ,违背因果关系,因此由入射光激发的波的波矢和群速度方向只能如 B 点处箭头所示,此时,  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_g < 0$ ,即发生了负折射。TE 模的等频线在第一布里渊区闭合成一个较圆的形状,因此,光子晶体对应该频率的入射光能实现全角负折射。用等频图计算 TE 入射光的入射角为  $0^\circ \sim 90^\circ$  时的光子晶体的等效折射率  $n$ ,如图 1 所示。由图可见,等效折射率随着入射角  $\theta$  的变化而变化,且呈现出周期为  $60^\circ$  的周期性变化。实线对应 TM 模的等频图,其频率增加的方向也是指向中心点,但该等频图外凹且等频线不闭合,由频率增加的方向判断负折射的方法不再适用,因为用等频图判断负折射的方法只限于等频图相对中心点外凸的情况<sup>[14]</sup>。

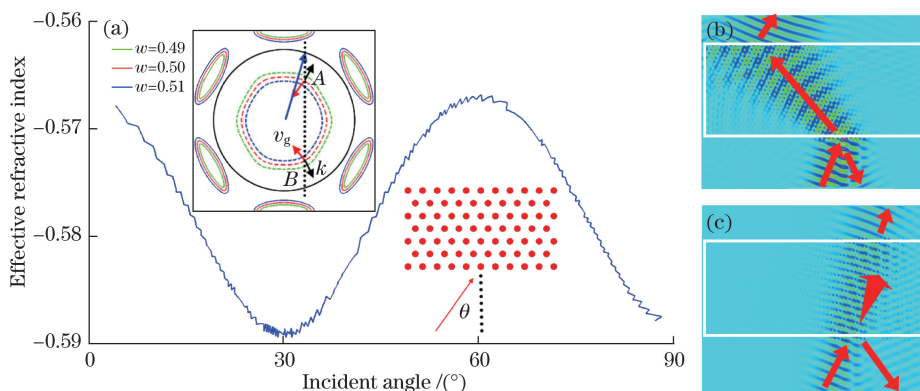


图 1 (a) TE 偏振光入射时,光子晶体等效折射率随入射角的变化[左插图:TE 光(虚线)和 TM 光(实线)对应的光子晶体等频图;右插图:光子晶体结构];入射角为  $18^\circ$  时,(b) TE 光和(c) TM 光在光子晶体中的传输图

Fig. 1 (a) Effective refractive index versus incident angle for incident TE polarized light [left inset: equi-frequency contours of TE light (dashed lines) and TM light (solid lines); right inset: structure of photonic crystal]; transission diagrams for (b) TE light and (c) TM light with the incident angle of  $18^\circ$

用时域有限差分(FDTD)方法仿真分析入射角为  $18^\circ$  时,TE 和 TM 偏振光在光子晶体中的传输,如图 1(b)、(c)所示。TE 波在光子晶体中发生明显的负折射现象,入射光和折射光在法线的同侧,对应折射率可通过测量图中的出射角再由斯涅耳定理算出,约为  $-0.43$ ;而 TM 波进入光子晶体后严重发散,随后从第二界面折射出来,整个过程类似正折射。

在实验测量中,所用的光子晶体是用深反应离子束蚀刻法在尺寸为  $20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  的硅片

上加工出来的硅柱,扫描电镜(SEM)图如图2所示,其周期 $a=5.3\ \mu\text{m}$ ,硅柱高度为 $75\ \mu\text{m}$ ,深宽比大于30。但较大的深宽比导致加工的硅柱的直径沿高度方向不一致。任取其中三个硅柱(标注柱1,柱2,柱3),记录从上向下每隔 $6\ \mu\text{m}$ 高度处的硅柱直径,如表1所示。从表中可以看出,硅柱的上部分,其直径明显大于设计值,越往下,硅柱直径越小,在硅柱的中下部分,硅柱直径达到设计值( $2.12\ \mu\text{m}$ )。硅柱的不均匀导致对应某一入射角的等效负折射率分布在一定的范围内。改变FDTD仿真中的硅柱直径,并用斯涅耳定理得到硅柱直径分布在 $2.02\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 范围时,对应的等效折射率范围为 $-0.5546\sim -0.073$ 。

表1 沿硅柱方向不同高度处的硅柱直径

Table 1 Diameters of silicon rod at different heights along rod direction

Height / $\mu\text{m}$	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
Diameter of rod 1 / $\mu\text{m}$	2.40	2.40	2.47	2.36	2.36	2.30	2.25	2.25	2.14	2.02	2.07	2.08
Diameter of rod 2 / $\mu\text{m}$	2.25	2.36	2.35	2.36	2.36	2.32	2.25	2.14	2.10	2.02	1.97	2.02
Diameter of rod 3 / $\mu\text{m}$	2.36	2.36	2.40	2.47	2.36	2.36	2.25	2.10	2.05	2.14	2.02	2.10
Average value / $\mu\text{m}$	2.34	2.37	2.41	2.40	2.36	2.33	2.25	2.16	2.10	2.06	2.02	2.07

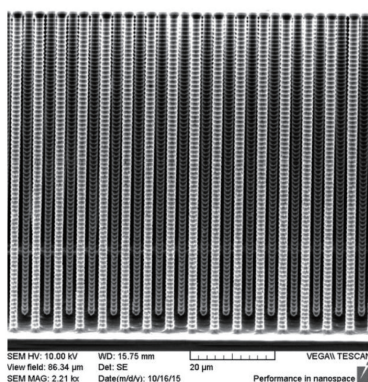


图2 光子晶体的扫描电镜图

Fig. 2 SEM image of photonic crystal

### 3 实验测量

测量光路如图3所示,其中 $\Delta Y$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 分别为出射光与光轴的距离、入射角、折射角。由于 $\text{CO}_2$ 激光器发出的 $10.6\ \mu\text{m}$ 的光为不可见光,用合束镜将He-Ne激光与 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光调至共轴以对其进行指示。TE偏振的红外光经过偏振比为500:1的偏振片提高偏振度,其后的小孔光阑起到限制光能量和整形光束的作用。通过旋转CdS晶体制成的半波片(HWP)实现光束偏振态的切换,随后,光束经焦距为 $50\ \text{mm}$ 的ZnSe透镜聚焦到光子晶体上,其中光子晶体粘贴于玻璃片侧面,而该玻璃片竖直贴在玻璃砖上。光经过光子晶体后,由固定在精密位移平台上的溴化银(AgBr)光纤接收并传输至带制冷器的红外探测器接收面上,其中光纤的纤芯直径为 $800\ \mu\text{m}$ ,接收透射光束的光纤前端面上固定一个直径约为 $50\ \mu\text{m}$ 的镍片光阑,光束通过光阑后入射至纤芯。二维精密位移台带动AgBr光纤来回扫描透射光中垂直于光轴平面的二维光场。该扫描以 $\approx$ 字形方式进行,即采用PI MICROS公司的分辨率为 $1\ \text{nm}$ 的PLS-85一维线性平移台横向扫描某一高度的一维光场后返回原位;电动旋转波片改变入射光的偏振态,随后纵向电机带动平移台下移 $8\ \mu\text{m}$ ,一维线性平移台再扫描新的一维光场,重复该过程,从而实现对整个二维光场的扫描。实验中用锁相放大器提高探测器输出信号的信噪比,其中锁相放大器的参考信号从调制 $\text{CO}_2$ 激光器的函数发生器导出。

该实验系统中,在每个扫描高度,光路中的波片都会进行一次旋转,为确保波片的旋转轴与光轴严格重合,对实验系统的测量精度进行了验证。调节好光路后,将光纤接收端置于透镜的焦平面处,通过二维电机带动光纤来回扫描焦点处的二维光场,在每个高度来回旋转波片改变光的偏振态。结果表明,多次测量得到的二维光场光强最大值位置的重复精度小于 $1\ \mu\text{m}$ ,这证明该实验能保证波片旋转导致的光子晶体界面上入射点的位置偏移不超过 $1\ \mu\text{m}$ 。

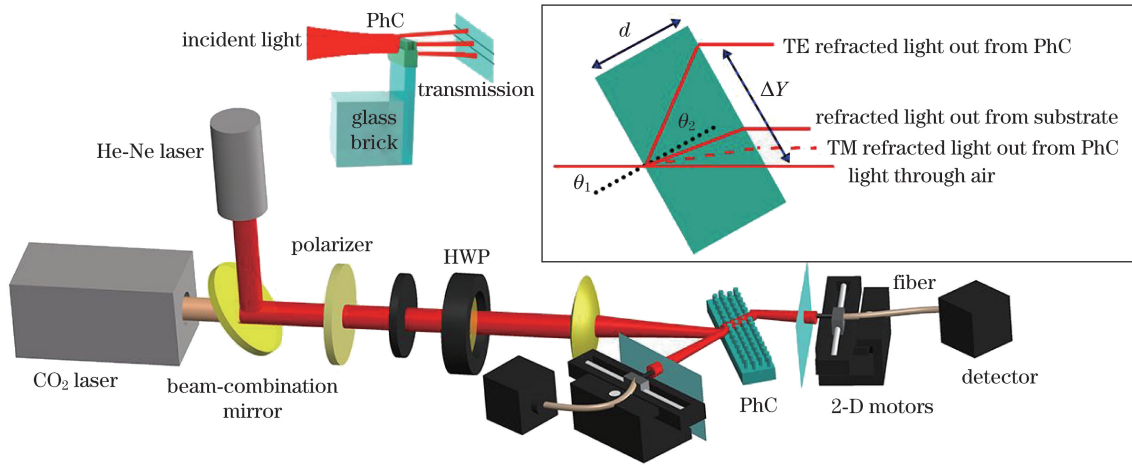


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental set up

随后对入射角为  $18^\circ$  时, TE/TM 光经过光子晶体后的光场数据进行扫描采集, 其光场分布如图 4(a)、(b) 所示。从图中可以看到, TE 和 TM 光的光场分布大体上是一样的, 只是在两图的中层, 图 4(a) 所示的右半部分明显有弱光斑分布, 而图 4(b) 中对应的区域则没有光斑存在。

会聚在焦点处的光斑的束腰直径约为  $120 \mu\text{m}$ , 而硅柱高度仅为  $75 \mu\text{m}$ , 因此聚焦在光子晶体界面的光从上到下分成三部分分别在空气中、光子晶体中和硅基底中传输, 且光功率主要集中在光子晶体中, 如图 3 左上插图所示。在光子晶体上方空气中传输的光沿光轴传输; 在光子晶体中, TE 光发生负折射, 光经两次折射后其出射点平移至法线右侧, 而 TM 光经两次正折射后, 出射点在法线左侧, 如图 3 右上插图所示; 在硅基底中, 光束经两次正折射后出射。因此, 实验中扫描得到的光场分布可以从上到下分为三个区域, 图 4(a) 所示的 TE 光的光场分布从上到下分别对应空气中的传输光、光子晶体中的负折射光和硅基底中的折射光, 图 4(b) 所示的光场也可作同样的分析, 图 4(a) 和图 4(b) 右上角插图中的中间区域的红点分别对应负折射出射的 TE 光和正折射出射的 TM 光, 其中  $X$  为线性平移台的移动距离。显然, 图 4(a) 中右侧区域明显的弱光斑即对应负折射出射的 TE 光。实验测量得到的 TE 出射光散落在较宽的范围内, 与图 1(b) 和图 1(c) 用细光束的仿真结果不符, 这是由于加工的硅柱从上到下不均匀, 不同高度上光子晶体的等效折射率不一样, 导致负折射光从光子晶体平板出射时的横向偏移也不一样。

在图 4(a) 和图 4(b) 中, 对应的光子晶体区域除了 TE 和 TM 折射光外, 还存在一个很强的光斑, 该光斑的位置与光轴的位置重合。它的存在给 TE 和 TM 折射光的测量带来很大干扰, 这是波束位移法的缺点, 该光斑能量较大, 而从光子晶体平板中传输出来的 TE/TM 光能量很弱, 严重影响了测量的信噪比。另外, TM 光的侧向位移较小, 离该光斑很近, 探测器前端  $50 \mu\text{m}$  的小孔不能将这两束光分辨开, 因此图 4(b) 中, 在光子晶体中经两次折射出射的 TM 光与该光斑混在一起。该干扰光斑在仿真中不存在, 但在实验中测得, 这可能是因为仿真中, 光子晶体被理想化为无限长硅柱, 而实验中, 光子晶体硅柱的高度是有限的。从上到下, 无限厚的空气层、 $75 \mu\text{m}$  厚的光子晶体层和  $425 \mu\text{m}$  厚的硅基底层构成了三层介质, 入射光在三层介质中传输。其中, 光在光子晶体层传输时, 将分别掠入射过光子晶体层-硅基底层界面和光子晶体层-空气层界面, 并被反射回光子晶体层。而且, 这两个界面中光子晶体层-硅基底层界面两端的折射率差更大, 反射光更强。由于硅柱的高度有限, 作为整体效应的负折射现象的出现受到了制约, 尤其处在光子晶体底部和顶部分界面的反射光受负折射的影响更小, 几乎沿着原入射光的方向射出, 形成干扰亮斑。

从图 3 的插图可知, 光子晶体的等效折射率  $n$  可由  $\Delta Y = d(\tan \theta_1 + \tan \theta_2)$  和  $\sin \theta_1 = n \sin \theta_2$  算出。任取图 4(a)、(b) 中某一高度的一维光场[图 4(a)、(b) 中红色箭头所指的高度]进行分析, 如图 4(c)、(d) 所示, 可见 TE 光光场在  $1.4 \text{ mm}$  附近有明显的尖峰, 而 TM 光光场在对应区域没有尖峰出现。该区域出现的尖峰对应负折射现象。保持二维移动平台的位置不变, 移除焦点处放置的光子晶体样品, 再扫描一维光场分布, 即可得到在空气中传输的光的中心位置(即光轴与探测面的交点位置), 为  $0.718 \text{ mm}$ , 从而  $\Delta Y =$

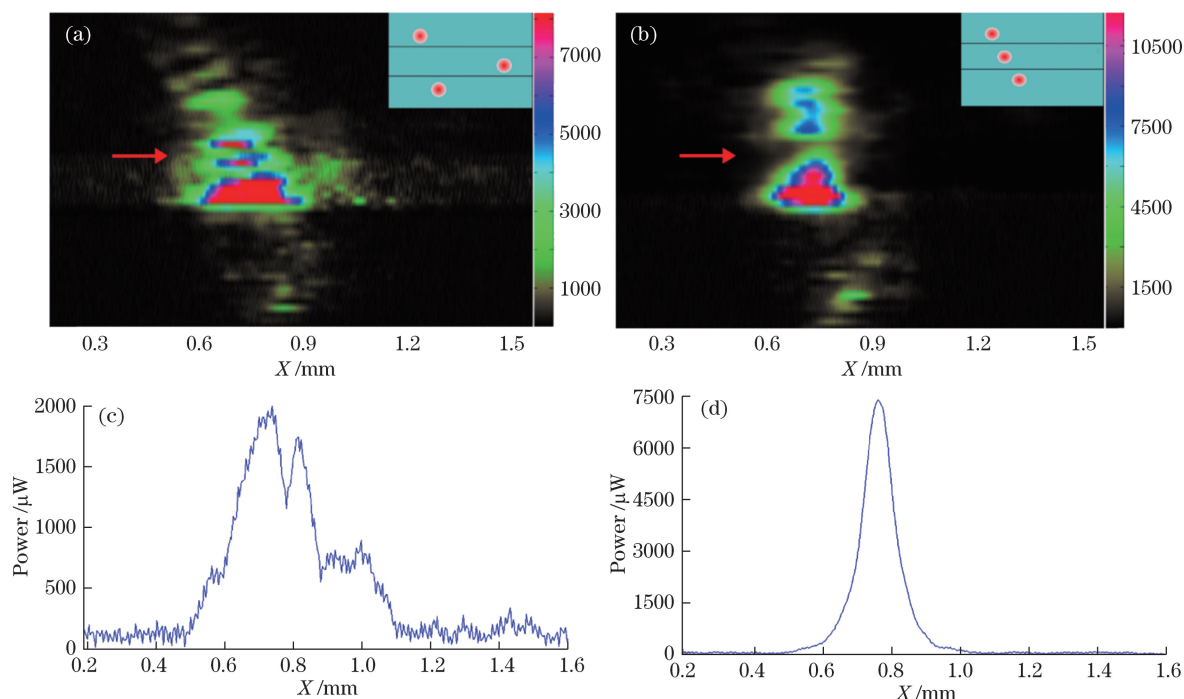


图 4 扫描得到的以  $18^\circ$  入射的 (a) TE 光和 (b) TM 光经过光子晶体后的光场分布；  
(c) 图 4(a) 和 (d) 图 4(b) 中箭头所示高度处的一维光场分布

Fig. 4 Scanned field distribution of (a) TE light and (b) TM light with the incident angle of  $18^\circ$  passing through photonic crystal; one-dimensional field distribution at heights indicated in (c) Fig. 4(a) and (d) Fig. 4(b) by arrows

0.652 mm, 通过计算可得对应的负折射率约为  $-0.44$ 。该折射率在  $-0.5546 \sim -0.073$  区间内, 与图 1(b) 中通过仿真计算得到的  $-0.43$  接近, 即实验测得的等效负折射率与理论分析结果吻合较好。为验证上述结果的普遍性, 将放置光子晶体的样品台进行平移和旋转, 以改变入射点和入射角, 并进行多次测量。图 5 为入射角为  $16^\circ$  时所对应的 TE 光和 TM 光的折射光场中某一高度的一维光场分布。从图 5 可见, 在 TE 光的光场分布中, 1.5 mm 处有较小的峰值存在, 对应负折射光束的位置, 而 TM 光的光场分布中没有, 与图 4(c)、(d) 中的光场分布比较相似, 说明在改变入射点和入射角度后, 负折射效应也同样发生。

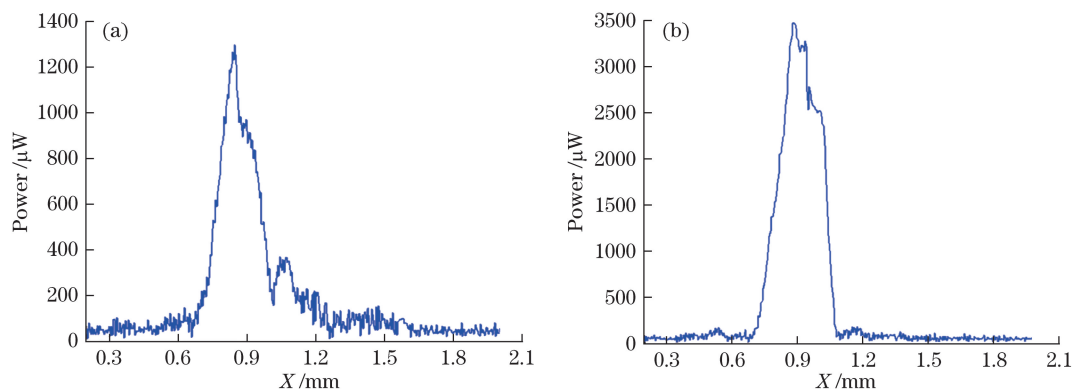


图 5 扫描得到以  $16^\circ$  入射的 (a) TE 光和 (b) TM 光经过光子晶体后的光场分布

Fig. 5 Scanned field distribution of (a) TE light and (b) TM light with the incident angle of  $16^\circ$  passing through photonic crystal

## 4 结 论

对二维平板光子晶体在光频段的负折射现象进行了理论分析, 并对等效负折射率进行了实验测量。实验中所用的光子晶体, 其硅柱直径在高度方向不均匀, 使得光子晶体的等效折射率在高度方向上也不一致。因此, 实验观测到的 TE 负折射光分布在一定的范围内, 而非单一出射光。而对 TM 偏振光, 实验

结果表明其折射光没出现在负折射区域,与仿真结果一致。对于实验中观察到的光子晶体区域中出现的能量很强的干扰亮斑,其成因有待进一步深入研究。实验测量了光频段平板光子晶体的负折射率,为后续对负折射平板光子晶体的应用提供了参考,同时也为负折射平板光子晶体的相关实验提供了实验方案。

## 参 考 文 献

- [1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [2] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [3] Zhan Shenggao, Liang Binming, Zhu Xingfu, *et al.* Research of the characteristics of photonic crystals based on air holes sub-wavelength imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(15): 154212.  
湛胜高, 梁斌明, 朱幸福, 等. 基于空气孔的光子晶体亚波长成像的特性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(15): 154212.
- [4] Liu Fengfang, Zhu Zhaojie, Tong Yuanwei. Effects on imaging quality of defects in the photonic crystal with negative refraciton 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.
- [5] Liang Binming, Hu Aiqing, Jiang Qiang, *et al.* Application of photonic crystal negative refraction effect to sugar solution concentration detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 877-883.  
梁斌明, 胡艾青, 蒋 强, 等. 光子晶体负折射效应在糖溶液浓度检测中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(4): 877-883.
- [6] Duan S Q, Chen Y P, Li G Z, *et al.* Broadband polarization beam splitter based on a negative refractive lithium niobate photonic crystal slab[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(4): 042301.
- [7] Gong Xia, Zhang Tingrong, Yang Yuting, *et al.* Propagation properties of sinh-squared-Gaussian beams through a left-handed material slab[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(6): 0605001.  
龚 霞, 张廷蓉, 杨玉婷, 等. 双曲正弦平方高斯光束通过左手平板材料的传输特性[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0605001.
- [8] Kocaman S, Aras M S, Hsieh P, *et al.* Zero phase delay in negative-refractive-index photonic crystal superlattices[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(8): 499-505.
- [9] Baba T. Slow light in photonic crystals[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(8): 465-473.
- [10] Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E, *et al.* Subwavelength resolution in a two-dimensional photonic-crystal-based superlens[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101: 129903.
- [11] Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E, *et al.* Electromagnetic waves: Negative refraction by photonic crystals[J]. *Nature*, 2003, 423: 604-605.
- [12] Liang Binming, Feng Li, Chen Jiabi, *et al.* Experimental verification of negative refractive phenomena of photonic crystal in 10.6  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(7): 1645-1648.  
梁斌明, 冯 莉, 陈家璧, 等. 10.6  $\mu\text{m}$ 波段光子晶体负折射现象的实验验证[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(7): 1645-1648.
- [13] Chen J B, Wang Y, Jia B H, *et al.* Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(7): 239-245.
- [14] Foteinopoulou 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): 165112.