

# 多重旋转对称结构光子晶格的实验研究

武一洁 杨立森 王龙飞 李强 施慧渊

内蒙古师范大学物理与电子信息学院, 内蒙古 呼和浩特 010022

**摘要** 采用光诱导光子晶格的方法,利用3孔、4孔、5孔、8孔和12孔掩模在掺铁铌酸锂晶体中写入多重旋转对称结构的二维光子晶格。基于干涉理论,对多孔掩模干涉图样进行了数值模拟。通过实验成功地观测到了3孔、4孔、5孔、8孔和12孔布里渊区和远场衍射,并分析了布里渊区与远场衍射的对应关系,实验结果表明光子晶格图样和数值模拟一致。传统观测布里渊区的方法需要使用旋转漫反射器,观测布里渊区和写入晶格是不同的光路,而本方法只需在写入光路中加入衰减器便可观测到布里渊区,较之前的诸方法更为简单、稳定、易于调节。

**关键词** 非线性光学;光诱导光子晶格;布里渊区;LiNbO<sub>3</sub>:Fe晶体;掩模

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.031902

## Experimental Study of Multiple Rotational Symmetry Photonic Lattices

Wu Yijie Yang Lisen Wang Longfei Li Qiang Shi Huiyuan

Department of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia Normal University, Huhhot, Inner Mongolia 010022, China

**Abstract** Utilizing the method of light-induced photonic lattices, we fabricate multiple rotational symmetry two-dimensional photonic lattices in LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystal by masks with 3, 4, 5, 8 and 12 holes. Based on the interference principle, the multiple-beam interference pattern is obtained by numerical simulation. We observe the 3, 4, 5, 8 and 12 holes Brillouin-zone spectra and far-field diffraction patterns, and analyze the relationship between them. Experimental results are quite consistent with the simulation results. Traditional methods of observing Brillouin-zone spectra need rotating diffuser, using different optical paths to induce superlattices and observe Brillouin zone. We use attenuator only, so that the proposed method is simpler, more stable, and easier to adjust.

**Key words** nonlinear optics; light-induced photonic lattices; Brillouin zone; LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystal; mask

**OCIS codes** 190.4400; 160.5298; 050.1940; 160.5293

## 1 引言

1987年,由Yablonovitch<sup>[1]</sup>和John<sup>[2]</sup>分别同时提出光子晶体的概念。二十几年来,国内外对光子晶体及其器件的研究有很多。近年来,光子晶体的带隙<sup>[3]</sup>及缺陷模<sup>[4]</sup>等性质得到了广泛的关注。光子晶体可以用于制作全光开关<sup>[5]</sup>、光子晶体光纤<sup>[6]</sup>等光电子器件。制备光子晶体的常见方法有很多种,1991年,Yablonovitch等<sup>[7]</sup>,利用显微制造技术在介质上钻孔,制作出三维光子晶体。后来又涌现出一些新的方法,如“逐层叠加”法、胶体化学法、自然沉降法、强制有序化法、场诱导有序化法、电泳法、离心沉积法等<sup>[8]</sup>。而用光学方法制作光子晶体,需要让一束激光通过多个反射镜和分束器,或者经过光栅、棱镜、衍射分束器、空间光调制器,通过一次或多次曝光,才能制备出光子晶体<sup>[9]</sup>。光子晶体一般需要两种折射率不同的材料组成,而光子晶格(又叫波导阵列)是在同一材料中形成折射率周期性排列的结构,它和光子晶体类似,存在光子禁带<sup>[10]</sup>。本文采用光诱导光子晶格的方法<sup>[11]</sup>,用带有周期性信息的激光束辐照光折变晶体,晶体内部折射率发生改变,记

收稿日期:2013-10-30;收到修改稿日期:2013-11-25;网络出版日期:2014-03-01

基金项目:国家自然科学基金(60467002)、内蒙古自然科学基金(2013MS0926)

作者简介:武一洁(1985—),女,硕士研究生,主要从事光折变非线性光学方面的研究。E-mail: wuyijie315@sina.com

导师简介:杨立森(1953—),男,教授,主要从事光折变非线性光学方面的研究。E-mail: ylsen@imnu.edu.cn

录下这种周期性信息。在暗室中写入的晶格可以在晶体中保存很长时间,再次拿出使用时其读出的晶格基本不会产生变化<sup>[12]</sup>。这种方法具有容易实现、可实时观测、晶体可重复使用等优点,适合在实验室进行研究。常用的光折变晶体有掺铁铌酸锂晶体(LiNbO<sub>3</sub>:Fe)和铌酸锶钡晶体(SBN)等。LiNbO<sub>3</sub>:Fe是自散焦光折变晶体,经过光辐照可以产生负折射率变化( $\Delta n < 0$ ),  $\Delta n$ 的数量级为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 。在使用时无需外加电场,退火处理即可再次使用,比SBN晶体使用起来更方便。

布里渊区是固体物理中的基本概念,是能带论的主要内容。近年来,对光子晶格布里渊区的研究不断。布里渊区可以直接反映出布拉格反射和带隙的情况,布里渊区中的暗线对应于强的布拉格反射和带隙<sup>[13]</sup>。光能量集中在能量谱中的第一布里渊区的布拉格边界上<sup>[14]</sup>。所以通过布里渊区可以直接分析出带隙的深度、宽度和方向。2005年,Bartal等<sup>[15]</sup>观测到了3孔和4孔布里渊区。2009年,Zhang等<sup>[16]</sup>在SBN晶体中研究了4孔干涉形成的布里渊区。观测布里渊区需要使用非相干光,以往报道过的文献中都要用到旋转漫反射器,把它放到光路中起到破坏激光相干性的作用。旋转漫反射器需要用电机控制,加入到光路中有可能会影响到光学平台的稳定性。观测布里渊区时需要将光束聚焦在旋转漫反射器上,而写入光子晶格时不需要,这样读出光路和写入光路不同,一般需要搭建2个以上光路,再由分束镜汇合到一起,这样就增加了光路的复杂性和不稳定性。本文采用的方法无需使用旋转漫反射器,只需在写入光路中直接加入一个或多个衰减器即可。衰减器一般是一块镀膜薄玻璃,呈黑色或深灰色。衰减器表面的微结构使激光散射,可以部分地起到破坏激光相干性的作用<sup>[17]</sup>。由于观测时所需要的光强较写入时弱很多,在光路中加入衰减器也可起到降低光强的作用。这样,写入和读出可以使用同一个光路,方法简便而且光路稳定。

## 2 实验与模拟研究

### 2.1 实验装置与方法

实验中光源采用532 nm激光器,激光束先经过短焦距透镜L<sub>1</sub>进行扩束,再经过由L<sub>2</sub>和L<sub>3</sub>组成的4f系统聚焦到LiNbO<sub>3</sub>:Fe晶体上,L<sub>2</sub>和L<sub>3</sub>为规格相同的凸透镜,焦距为300 mm,掩模放在L<sub>2</sub>和L<sub>3</sub>中间,掩模上带有周期排列的小孔。在晶体和CCD之间放置一个成像透镜L<sub>4</sub>,调节L<sub>4</sub>前后位置使CCD对晶体后表面成像,CCD连接到电脑上可以实时观测探测到的图像。调节成像透镜位置使其对晶体后表面成像。实验装置如图1所示。

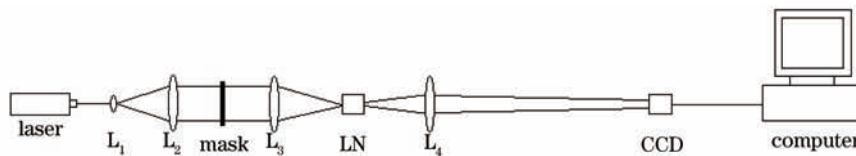


图1 实验装置示意图。

Fig.1 Schematic of the experimental setup

实验中选取3孔、4孔、5孔、8孔和12孔掩模。用Mathematica模拟出干涉图像,并和采集到的掩模图比较。激光束经过扩束准直后,到达掩模上,可以形成多束干涉光,再经过透镜聚焦到LiNbO<sub>3</sub>:Fe晶体上。待照射数分钟后,晶体有光照的区域折射率会降低,未经照射的区域折射率不变,从而形成光子晶格。将一个小孔光阑置于光路中,若从晶体中读出的图像和掩模图像结构相同并且完整,说明光子晶格已经成功写入。若读出图像不完整说明写入时间不够,若读出图像很模糊说明写入时间过长。晶体中写入光子晶格后,用光束照射会产生布拉格衍射<sup>[18]</sup>。由于光以布拉格角度入射时,可以观测到布里渊区<sup>[19]</sup>,所以只需将掩模从光路中移除,这时光束的角度范围足以覆盖整个布里渊区,在激光器与晶体之间的光路中加入衰减片,便直接可以观测到布里渊区。这时的光强约为写入时的1%。适当调整成像透镜的位置,使得在CCD上观测到的图像清晰。原来放掩模的位置放置一个小孔光阑,光束成一束细平行光束,照射到晶体中已经写好的光子晶格上,可以观测到远场衍射图像。

### 2.2 干涉图样模拟

实验中的掩模均为旋转对称结构。晶体具有平移周期性,有14种排列方式,称为14种布拉菲格子。晶体只能有1、2、3、4和6这5种旋转对称轴,没有5和大于6的旋转对称轴。这种不具有平移周期性的非晶体

结构可以叫做准周期结构,具有长程指向性和旋转对称性<sup>[20]</sup>。这种非晶体的物质就叫做准晶。因为多重对称结构准晶格形成带隙更加容易<sup>[21]</sup>,所以我们研究3孔、4孔、5孔、8孔和12孔掩模的情况。3孔和4孔掩模形成的是光子晶格,而5孔、8孔和12孔形成的是准光子晶格。

理论推导和数值模拟以3孔掩模为例,3孔掩模形成3个点光源<sup>[22]</sup>,其光场分布如图2所示。以3点构成的等边三角形的内心为坐标原点,其中一个顶点在 $x$ 轴上。3个顶点坐标分别为 $(a,0)$ 、 $\left(-\frac{1}{2}a, \frac{\sqrt{3}}{2}a\right)$ 和 $\left(-\frac{1}{2}a, -\frac{\sqrt{3}}{2}a\right)$ 。

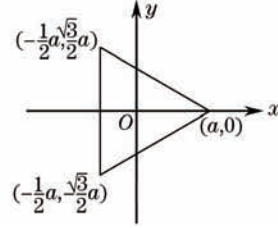


图2 三孔干涉空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of 3 holes

将3个顶点的光场用 $\delta$ 函数表示为 $\delta(x-a, y)$ 、 $\delta\left(x+\frac{1}{2}a, y-\frac{\sqrt{3}}{2}a\right)$ 、 $\delta\left(x+\frac{1}{2}a, y+\frac{\sqrt{3}}{2}a\right)$ ,那么叠加后的光场为

$$u(x, y) = \delta(x-a, y) + \delta\left(x+\frac{1}{2}a, y-\frac{\sqrt{3}}{2}a\right) + \delta\left(x+\frac{1}{2}a, y+\frac{\sqrt{3}}{2}a\right). \quad (1)$$

因为 $\delta$ 函数具有可分离变量性,故(1)式又可以表示为

$$u(x, y) = \delta(x-a)\delta(y) + \delta\left(x+\frac{1}{2}a\right)\delta\left(y-\frac{\sqrt{3}}{2}a\right) + \delta\left(x+\frac{1}{2}a\right)\delta\left(y+\frac{\sqrt{3}}{2}a\right). \quad (2)$$

其傅里叶变换为

$$u(v_x, v_y) = \mathcal{F}[u(x, y)] =$$

$$\begin{aligned} & \iint_{-\infty}^{+\infty} \left[ \delta(x-a)\delta(y) + \delta\left(x+\frac{1}{2}a\right)\delta\left(y-\frac{\sqrt{3}}{2}a\right) + \delta\left(x+\frac{1}{2}a\right)\delta\left(y+\frac{\sqrt{3}}{2}a\right) \right] \cdot \exp(i2\pi v_x x) \exp(i2\pi v_y y) dx dy = \\ & \iint_{-\infty}^{+\infty} \left[ \delta(x-a) \exp(i2\pi v_x x) \delta(y) \exp(i2\pi v_y y) dx dy + \delta\left(x+\frac{1}{2}a\right) \exp(i2\pi v_x x) \delta\left(y-\frac{\sqrt{3}}{2}a\right) \exp(i2\pi v_y y) dx dy + \right. \\ & \left. \delta\left(x+\frac{1}{2}a\right) \exp(i2\pi v_x x) \delta\left(y+\frac{\sqrt{3}}{2}a\right) \exp(i2\pi v_y y) dx dy \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

应用公式

$$\mathcal{F}[\delta(x-a)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-a) \exp(i2\pi u x) dx = \exp(i2\pi u a), \quad (4)$$

可得积分结果

$$\begin{aligned} u(v_x, v_y) &= \exp(i2\pi v_x a) + \exp\left(-i2\pi v_x \frac{1}{2}a\right) \cdot \exp\left(-i2\pi v_y \frac{\sqrt{3}}{2}a\right) + \exp\left(-i2\pi v_x \frac{1}{2}a\right) \cdot \exp\left(-i2\pi v_y \frac{\sqrt{3}}{2}a\right) = \\ & \exp(i2\pi v_x a) + 2 \exp\left(-i2\pi v_x \frac{1}{2}a\right) \cdot \cos\left(2\pi v_y \frac{\sqrt{3}}{2}a\right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$I = u \cdot u^* = |u|^2, \quad (6)$$

其中

$$v_x = \frac{x}{\lambda f}, v_y = \frac{y}{\lambda f}, \quad (7)$$

$x$ 和 $y$ 为掩模上孔距中心的距离, $\lambda$ 为激光器波长, $f$ 为透镜的焦距300 mm。用Mathematica对(7)式进行模拟,可以得到三孔干涉光强分布图。

4孔、5孔、8孔和12孔的推导方法和3孔类似,在此不再赘述。

### 2.3 模拟图与实验图对比

图3为实验中使用的掩模示意图、对不同孔数掩模干涉的模拟图和实验中用CCD观测的掩模图。

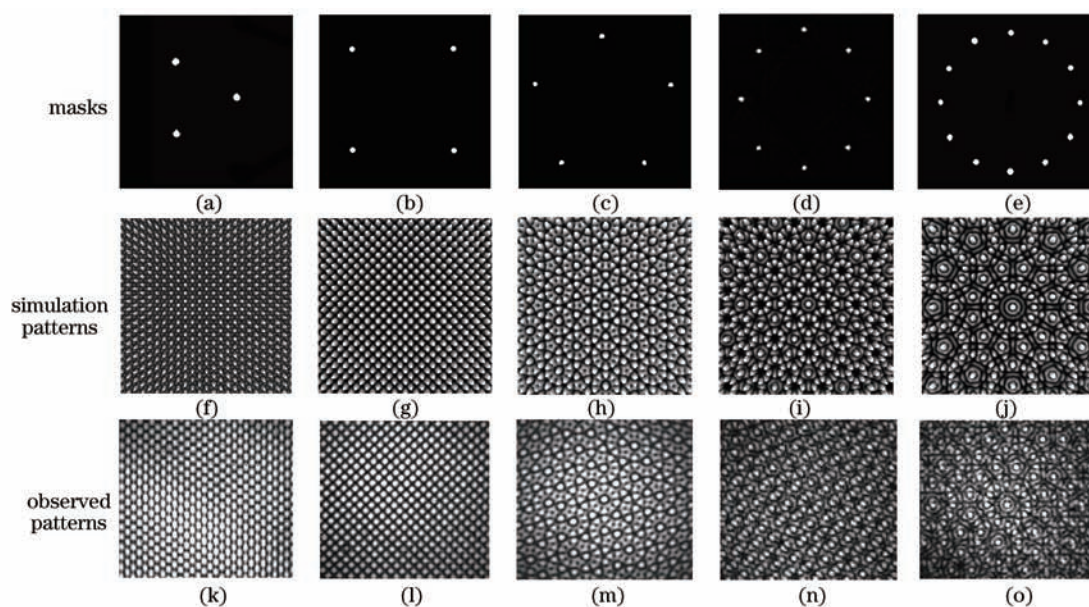


图3 多孔干涉理论模拟图和实验观测图

Fig.3 Numerical simulation and experimental observation patterns of multi-holes interference

由图3可以看出,理论模拟图和实验中用CCD拍摄的掩模图像是一致的。说明对掩模多孔干涉的理论分析和数值模拟是正确的。3孔、4孔、5孔、8孔和12孔这些图案均为中心旋转对称结构,且孔数越多结构越复杂。

### 2.4 布里渊区与远场衍射

众所周知,第一布里渊区的定义是倒易点阵的维格纳-赛茨元胞。倒易点阵是晶体点阵的傅里叶变换。读出的晶格图像是晶格结构在坐标空间的映像,远场衍射图像是晶格倒易点阵的映像。作原点与距原点最近一周的倒格点的垂直平分线,它们围起来的闭合区域就是第一布里渊区。

图4为布里渊区理论图和实验中观测到的布里渊区图,从左至右分别对应3孔、4孔、5孔、8孔和12孔。

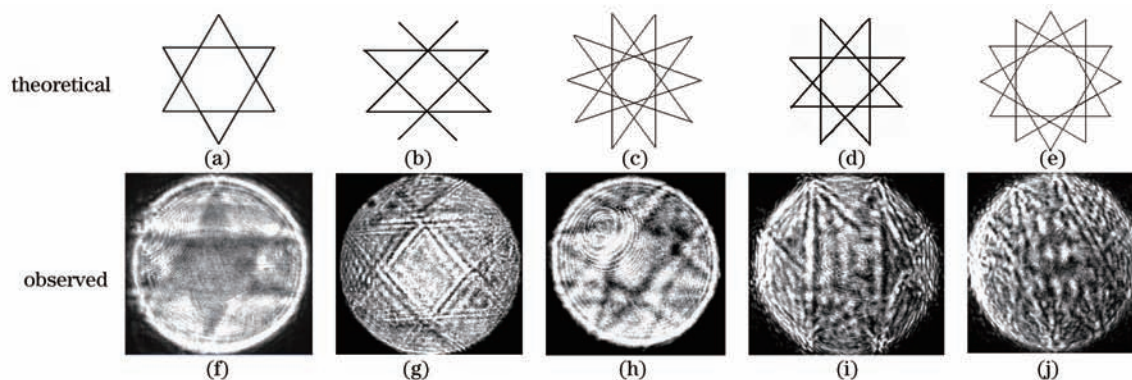


图4 布里渊区理论图和实验观测图

Fig.4 Theoretical and experimental observation patterns of Brillouin zone spectra

图5为远场衍射理论图和实验中观测到的远场衍射图,从左至右分别对应3孔、4孔、5孔、8孔和12孔。由图5可以看出,实验观测的每个远场衍射光点的亮度不尽相同,尤其是5孔、8孔和12孔的远场衍射光点亮度明显不同,这是由各向异性 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体的非线性特性引起的。通过图4和图5可以看出远场衍射和布里渊区的对应关系。以远场衍射中心的亮点为原点,作原点与衍射点的垂直平分线,它们包围起来的闭合区域就是第一布里渊区。

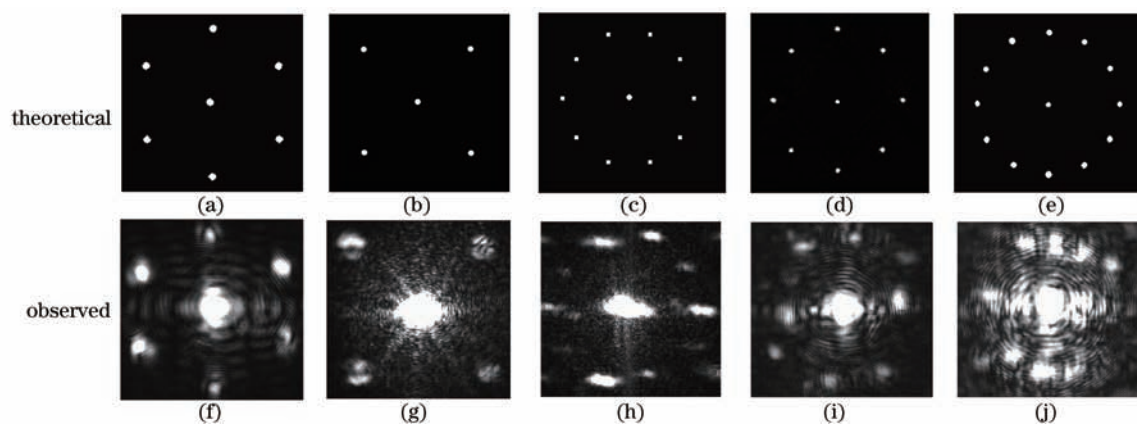


图5 远场衍射理论图和实验观测图

Fig.5 Theoretical and experimental observation pattern of far-field diffraction

### 3 结 论

数值模拟了3孔、4孔、5孔、8孔和12孔干涉图样。用光诱导光子晶格的方法在LiNbO<sub>3</sub>:Fe晶体中构造了二维3、4、5、8、12重旋转对称结构光子晶格,数值模拟和实验观测的图像一致。利用写入光路直接观测到了布里渊区和远场衍射。分析了布里渊区和远场衍射的关系。实验设备和方法简单、容易实现,可以方便地在实验室中完成。

### 参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2061.
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 Liu Yanhong, Dong Lijuan, Liu Lixiang, *et al.*. Narrow bandpass angular filter based on anisotropic photonic band gap [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (8): 0823001.  
刘艳红,董丽娟,刘丽想,等.基于各向异性光子晶体带隙的窄带带通角度滤波器[J].光学学报,2013,33(8):0823001.
- 4 Wu Yulong, Sun Xiaohong, Liu Wei. Investigation on defect-mode property of ten-fold photonic quasicrystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 062601.  
武毓龙,孙晓红,刘 薇.十重准晶光子晶体缺陷模性质研究[J].激光与光电子学进展,2013,50(6):062601.
- 5 Yang Hui, Wang Zhiyong, Zhang Wei, *et al.*. Properties of all-optical switch based on two-dimensional nonlinear photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1016003.  
杨 辉,王智勇,张 伟,等.基于二维非线性光子晶体的全光开关特性[J].光学学报,2012,32(10):1016003.
- 6 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 010101.  
柴 路,胡明列,方晓惠,等.光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J].中国激光,2013,40(1):010101.
- 7 Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M. Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms[J]. Phys Rev Lett, 1991, 67(17): 2295-2298.
- 8 Zhang Hui, Zhao Xiaofeng, Tang Qing. The fabrication of 3D photonic crystal[J]. J Functional Materials, 2003, 34(2): 118-125.  
张 辉,赵晓峰,唐 清.三维光子晶体的制备技术研究进展[J].功能材料,2003,2(34):118-125.
- 9 Yao Dong, Xiong Yuqing, Wang Jizhou. Progress on fabrication of three-dimensional photonic crystals by holographic lithography[J]. Vacuum and Cryogenics, 2010, 16(3): 142-147.  
姚 东,熊玉卿,王济洲.激光全息法制备三维光子晶体的研究进展[J].真空与低温,2010,16(3):142-147.
- 10 Liu Jianjing, Hao Wei, Liu Kai, *et al.*. FD TD simulation for photorefractive materials[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2007, 13(1): 47-51.  
刘建静,郝 伟,刘 锴,等.光折变材料的带隙结构研究[J].量子光学学报,2007,13(1):47-51.

- 11 Nan Zhu, Zhaohong Liu, Ru Guo. A method of easy fabrication of 2D light-induced nonlinear photonic lattices in self-defocusing LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystal[J]. Opt Mater, 2007, 30(4): 527-531.
- 12 Wentao Jin, Yuanmei Gao. Optically induced two-dimensional photonic quasicrystal lattices in iron-doped lithium niobate crystal with an amplitude mask[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(14): 141104.
- 13 S Liu, P Zhang, X Gan. Visualization of the Bragg reflection in complex photonic lattices by employing Brillouin zone spectroscopy[J]. Appl Phys B, 2010, 99(4): 727 - 731.
- 14 Xinyuan Qi, Simin Liu, Guoquan Zhang, *et al.*. Gap solitons in optically induced two-dimensional square photonic lattices in LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystals[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(13): 131111.
- 15 G Bartal, O Cohen, H Buljan, *et al.*. Brillouin zone spectroscopy of nonlinear photonic lattices[J]. Phys Rev Lett, 2005, 94(16): 163902.
- 16 Peng Zhang, Robert Egger, Zhigang Chen. Optical induction of three-dimensional photonic lattices and enhancement of discrete diffraction[J]. Opt Express, 2009, 17(15): 13151-13156.
- 17 Fan Zhixin, Zhang Haomiao, Ma Shaolong. The experiment of laser scattering[J]. J Adult Education School of Hebei University of Technology, 2006, 21(1): 13-15.  
范志新, 张浩苗, 马少龙. 激光散射实验[J]. 河北工业大学成人教育学院学报, 2006, 21(1): 13-15.
- 18 Yang Lisen, Wu Ruixiang, Lu Gai ling, *et al.*. Experimental research of refractive index modulation degree about optically induced photonic lattices[J]. J Optoelectronics·Laser, 2008, 19(11): 1530 - 1533.  
杨立森, 武瑞祥, 陆改玲, 等. 光诱导光子晶格折射率调制度的实验研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(11): 1530 - 1533.
- 19 Liu Mengmeng. Optical Induction and Research of Periodic and Quasiperiodic Photonic Microstructures in Iron-Doped Lithium Niobate Crystal[D]. ShanDong: Shandong Normal University, 2013. 13.  
刘孟孟. 掺铁铌酸锂中周期性及准周期性微结构的光诱导与研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2013. 13.
- 20 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao, *et al.*. Properties and applications of photonic quasicrystals[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(1): 011601.  
殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪. 准晶光子晶体特性及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(1): 011601.
- 21 Yuanmei Gao, Mengmeng Liu. Design of two-dimensional 7-, 8-, 9-, 10-, 14-, 16-fold penrose-tiled photonic quasicrystals and mixed honeycomb[J]. Opt Eng, 2013, 52(5): 053401.
- 22 Yang Lisen, Chen Xiaohu, Liu Simin. Fabrication of (2 + 1) dimensional photorefractive waveguides array[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(10): 1200-1204.  
杨立森, 陈晓虎, 刘思敏. (2+1)维光折变波导阵列的制作[J]. 光子学报, 2002, 31(10): 1200-1204.