

doi:10.3788/gzxb20154412.1216001

# 单棱镜共光路干涉法制作多结构二维光子准晶

孙晓红<sup>1</sup>, 刘温彦<sup>2</sup>, 王帅<sup>1</sup>, 李文阳<sup>1</sup>, 刘薇<sup>1</sup>

(1 郑州大学 信息工程学院河南省激光与光电信息技术重点实验室, 郑州, 450000)

(2 郑州大学图书馆, 郑州, 450000)

**摘 要:**提出一种共路干涉装置用于复杂结构亚微米尺度光子准晶的大面积制作. 改变样品旋转角度和曝光次数, 设计多种不同旋转对称性的准晶结构, 并给出相应的衍射模式以证明其多重旋转对称性. 利用该装置可以制作任意复杂结构、任意旋转对称度的准晶结构. 同时, 分析了旋转轴和旋转角存在偏差时对准晶结构的影响. 另外, 采用该装置实验制作了十重准晶结构, 并用原子力显微镜和衍射测量表征该准晶的长程指向性和十重旋转对称性, 实验结果表明: 十重晶格结构的直径为  $1.2 \mu\text{m}$ , 最小结构单元尺寸为  $377 \text{ nm}$ , 与理论设计尺寸  $1.25 \mu\text{m}$  和  $392.5 \text{ nm}$  相比, 误差为  $4\%$ . 理论设计和实验结果一致性很好, 对研究以光子带隙为基础的纳米光子学器件具有重要的指导意义.

**关键词:**多重准晶; Top-cut 棱镜; 共路干涉; 光子晶体; 全息刻蚀

中图分类号: O436.1; O438.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)12-1216001-6

## Fabrication of Multi-structure 2D Photonic Quasicrystals by Using Single-prism Common-path Interferometry

SUN Xiao-hong<sup>1</sup>, LIU Wen-yan<sup>2</sup>, WANG Shuai<sup>1</sup>, LI Wen-yang<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>

(1 Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electric Information Technology, School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

(2 Library, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** A simple common-path interfering device used for large-area production of complicated photonic quasicrystals in sub-micron scale was presented. The quasicrystalline structures were designed and their diffraction patterns were obtained to prove the multi-fold rotational symmetry. By using the setup, all kinds of quasicrystals with arbitrary complexity and rotational symmetry can be designed and fabricated. Furthermore, ten-fold quasicrystalline structures were produced experimentally. The atomic force microscope measurements and diffraction patterns reveal the long-range directivity and rotational symmetry. The experimental results show that the quasicrystal has a diameter of  $1.2 \mu\text{m}$  for a ten-fold lattice and  $377 \text{ nm}$  for a minimum unit. Compared with the theoretical data  $1.25 \mu\text{m}$  and  $392.5 \text{ nm}$ , there is a difference of  $4\%$ . A good agreement has been obtained between the experimental and theoretical results. This is promising for the investigation on photonic devices based on the photonic bandgaps.

**Key words:** Multi-fold quasicrystals; Top-cut prism; Common-path interfering; Photonic crystal; Holographic lithography

**OCIS Codes:** 160.5298; 230.5298; 220.4241

## 0 引言

相比于周期光子晶体, 准晶光子晶体具有完全光子带隙的折射率阈值低、光子带隙与方向无关、缺陷模

更为丰富、更好的聚焦能力等优良性能, 这使其成为光子带隙材料、成像及聚焦材料、负折射材料等的优秀候选对象, 具有更广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>. 因为准晶只具有长程指向性而不具有平移周期性, 用传统的电子束、离

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11104251)和河南省基础科研项目(No. 152300410023)资助

第一作者: 孙晓红(1971-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光子晶体器件. Email: iexhsun@zzu.edu.cn

收稿日期: 2015-07-07; 录用日期: 2015-09-30

<http://www.photon.ac.cn>

子束刻蚀等精密加工微制作技术<sup>[1,4-6]</sup>制作准晶的过程相当繁杂、耗时,尤其是大面积制作百纳米尺度的准晶结构更是异常困难.而胶体微粒自组装技术<sup>[7-8]</sup>能实现大面积光子准晶制作,却容易产生缺陷.近几年来,激光全息刻写技术被广泛用来研究制作光子带隙材料,其原理是利用多束相干激光干涉形成空间全息图案,然后用光敏介质记录干涉图案,所制作的晶体周期常数和晶格结构多样灵活.而在众多的激光全息光刻技术中,利用单衍射元件<sup>[9-10]</sup>、多透镜板<sup>[11]</sup>、多孔板<sup>[12]</sup>和单棱镜折射元件<sup>[13-17]</sup>进行多光束共路干涉制作光子晶体的方法具有稳定性好、快速制作准晶的优越性,但缺点是要么制作准晶面积小(前三种方法),要么一种元件只适合制作一种准晶结构(第四种方法),比如五棱镜系统只能制作十重准晶结构<sup>[18]</sup>等.而且随着准晶对称性(重数)的增加,棱镜的结构越发复杂、制作越困难,给光路调整和准晶的大面积制作带来非常不利的影响.另外,一种棱镜只能制作一种晶体结构也造成物质资源的极大浪费.有鉴于此,本文采用一种简单棱镜,结合样品旋转和多次曝光的方法来制作不同的多重准晶结构,实验装置简单、光路易于调整、并适合大面积准晶结构制作.

## 1 单棱镜干涉准晶结构理论设计

如图1所示,扩束之后的一束激光入射到棱镜上,被棱镜折射分束为两束光(三棱镜)或三束光(Top-cut三棱镜),分束后的光束在棱镜底面外进行合束后形成干涉图案,光敏介质记录干涉图案,经显影、定影后得到晶体结构.偏振板或位相板可以调整不同光束的偏振方向及初位相,改变晶体的结构.旋转台调整光敏介质与棱镜的相对位置,改变晶体的旋转对称性.

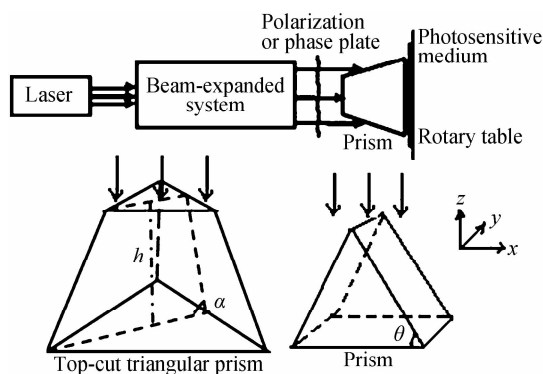


图1 单棱镜共路干涉光路图  
Fig. 1 Schematic diagram of single-prism common-path interferometer

该装置中的主要元件是棱镜和样品旋转装置,棱镜是用来产生不同数量光束的共路干涉,旋转台用来改变多重准晶的旋转对称度.Top-cut三棱镜相比于文

献<sup>[11,12,14]</sup>中的 top-cut 六棱镜所产生的晶体结构更简单、纯净,而且由于光束数少更易于光路调整.

假设偏振板和位相板使得棱镜分束后各光束偏振方向和初位相相同,则棱镜后光敏介质上的干涉光场为<sup>[14]</sup>

$$I(r) = \sum_{j,l} E_j E_l^* \exp\{-i[(k_j - k_l) \cdot r]\} \quad (1)$$

式中  $E_j$  是光束  $j$  的振幅,  $r = (x, y, z)$  是坐标空间位置矢量.

对于普通三棱镜系统,  $j, l = 1, 2$ , 波矢量

$$k_m = k(\pm \sin \varphi, 0, \cos \varphi) \quad (2)$$

$m = 1, 2$ , 分别与等式后的 +、- 号相对应, 式中角度  $\varphi = \theta - \arcsin(\sin \theta / n_w)$ . 对于 Top-cut 三棱镜系统, 式(1)中的参量  $j, l = 1 \sim 3$ , 波矢量  $k_m = k(\cos[2(m-1)\pi/3] \sin \varphi, \sin[2(m-1)\pi/3] \sin \varphi, \cos \varphi)$ ,  $m = 1 \sim 3$ , 角度  $\varphi = \alpha - \arcsin(\sin \alpha / n_w)$ . 上面所有式子中波矢量  $k = 2\pi n_w / \lambda$ ,  $n_w$  是光敏介质在写入光波长的折射率.

### 1.1 三棱镜干涉准晶结构

对于如图1所示的三棱镜系统, 将  $\theta = 54.7^\circ$ ,  $n_w = 1.5$  和  $\lambda = 355 \text{ nm}$  代入式(1)和(2)中, 得到如图2(a)所示干涉图案, 将该图案在光敏介质上曝光一次, 该结构周期为  $\Lambda = \lambda / 2n_w \sin \varphi = 319.5 \text{ nm}$ . 图2(b)是将三棱镜直接干涉条纹组1及其旋转  $\pi/4, 2\pi/4, 3\pi/4$  后条纹组2, 3和4叠加后得到8重旋转对称准晶的示意图.

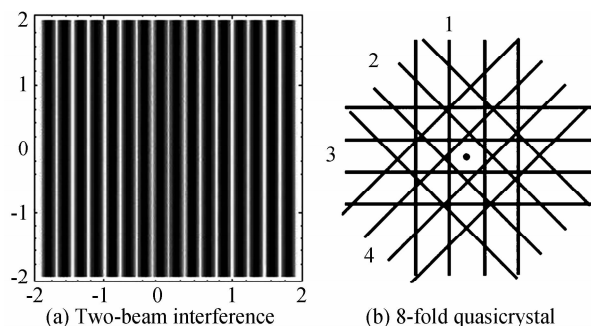


图2 双光束干涉及构成八重准晶

Fig. 2 Two-beam interferogram and 8-fold quasicrystal

因此, 三棱镜直接干涉条纹曝光后的样品分别旋转  $\pi/4, 2\pi/4, 3\pi/4$ , 再曝光三次, 即可得到八重准晶结构; 将曝光有干涉条纹1的样品分别旋转  $\pi/5, 2\pi/5, 3\pi/5, 4\pi/5$ , 再曝光四次, 即可得到十重准晶结构. 将曝光后的样品分别旋转  $\pi/7, 2\pi/7, 3\pi/7, 4\pi/7, 5\pi/7, 6\pi/7$ , 再曝光六次, 即可得到十四重准晶结构. 三种准晶结构如图3所示, 小插图是准晶的中心区域结构图. 图3(d)~(f)是它们对应的傅里叶(Fourier Transform FT)变换图, 从这些图可以明显地看到准晶结构的8重、10重和14重旋转对称性. 依据这样的方法, 可以得到任何重数的准晶结构.

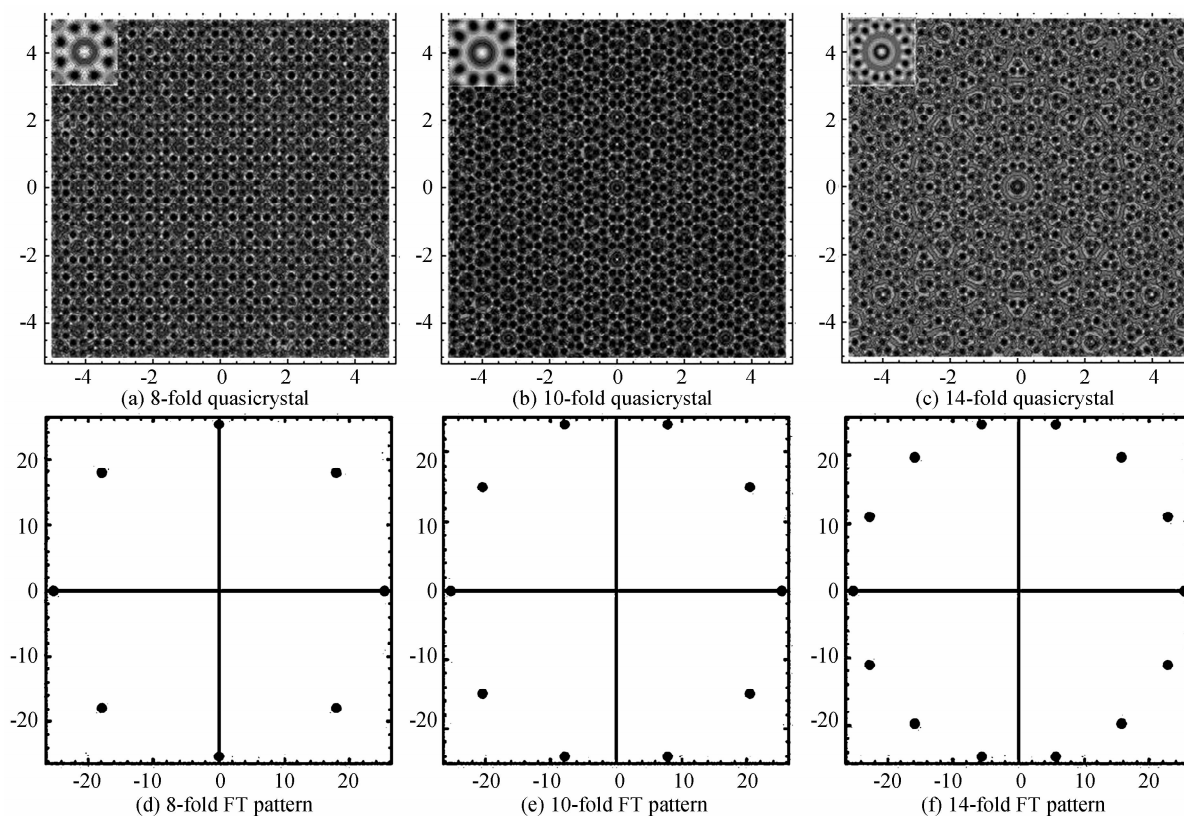


图3 三棱镜干涉所得到的多种准晶结构及相应的傅里叶变换频谱图, 小插图是各种结构中心区域  
 Fig. 3 Different quasicrystalline structures formed by prism interferometry and the corresponding FT patterns. The central area shown in the inset

### 1.2 Top-cut 棱镜干涉准晶结构

对于如图 1 所示的 Top-cut 棱镜系统, 将  $\alpha=54.7^\circ$ ,  $n_w=1.5$  和  $\lambda=355\text{ nm}$  代入式(1)和(3)中, 得到如图 4 (a)所示干涉图案, 将该图案在光敏介质上曝光一次, 即可得到六角晶格二维光子晶体结构, 该结构沿  $x$  方向周期为  $\Delta=\lambda/\{n_w[1-\cos(2\pi/3)]\sin\varphi\}=426\text{ nm}$ . 从图中可以看出该结构是由三束光两两相干所形成的三组干涉平面交错而成的光子晶体结构. 图 4(b)是将该结构及其旋转  $\pi/6$  后结构叠加得到 12 重旋转对称准晶的示意图. 在 Top-cut 棱镜干涉形成的六角结构基础上, 通过控制光敏介质的旋转角度和曝光次数即可得到多重准晶结构, 而且所得准晶结构的重数与旋

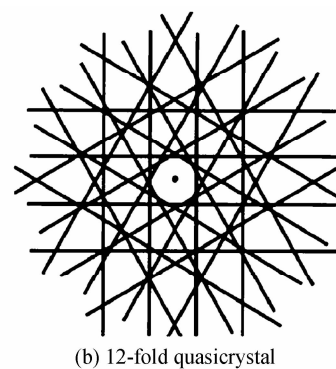
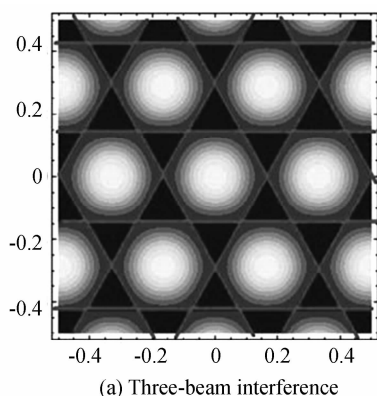


图 4 Top-cut 棱镜三光束干涉构成十二重准晶图  
 Fig. 4 Three-beam interferogram and 12fold quasicrystalline composition

转角度、曝光次数有定量的关系, 假设曝光次数为  $n$  (旋转次数为  $n-1$ ), 单次旋转角度为  $60^\circ/n$ , 所得准晶结构具有  $6n$  重的旋转对称性, 其中  $n$  为正整数. 如 12 重准晶结构, 对应  $n=2$ 、旋转 1 次和旋转角为  $30^\circ$ .

依照上述方法, 分别对曝光次数  $n=2, 3, 4$  (相对应的单次旋转角度为  $30^\circ, 20^\circ, 15^\circ$ , 旋转次数为 1, 2, 3) 的多重准晶干涉图样进行理论计算, 得到如图 5(a)~(c)所示的 12 重、18 重和 24 重准晶结构, 小插图对应所计算准晶结构中心区域的放大图. 图 5(e)~(g)为三种准晶结构相应的傅里叶变换 (FT) 图, 这些 FT 图更清楚地揭示了三种准晶结构的多重旋转对称性.



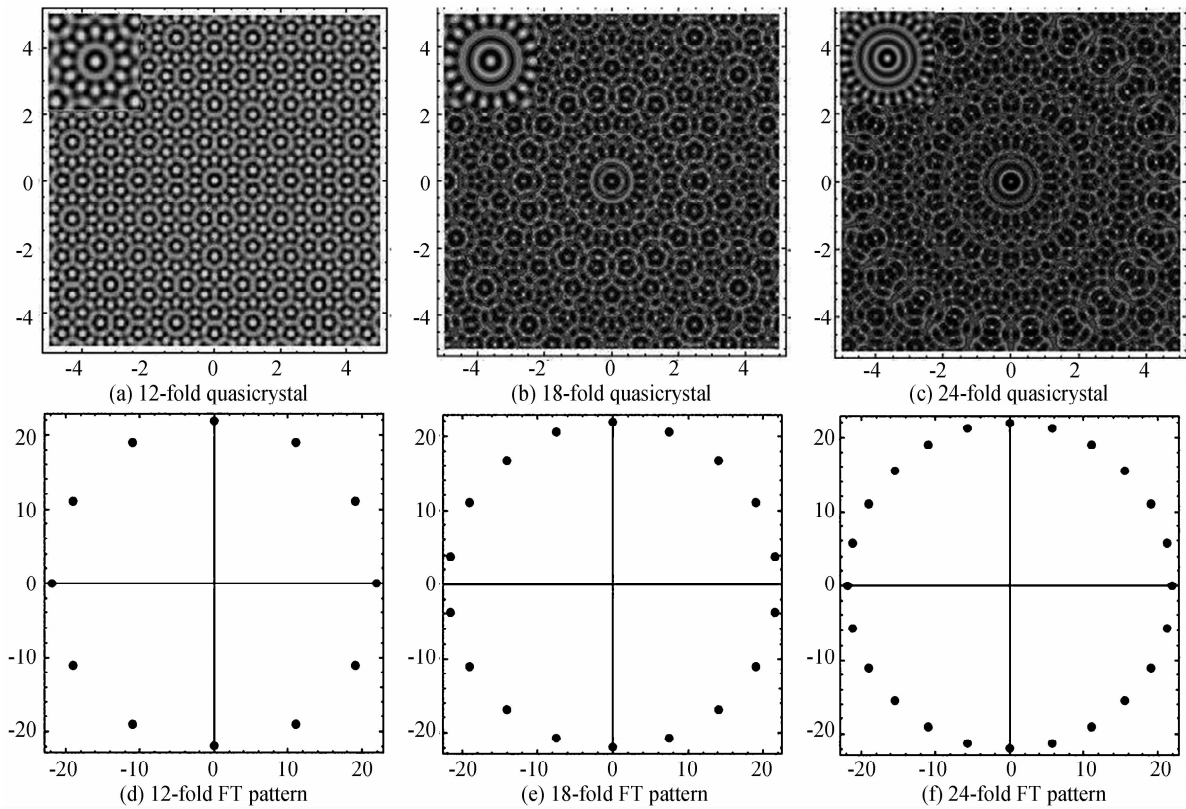


图 5 三棱镜干涉所得到的多种准晶结构及相应的傅里叶变换频谱图,小插图是各种结构中心区域  
 Fig. 5 Different quasicrystalline structures formed by prism interferometry and the corresponding FT patterns. The central area shown in the inset

## 2 准晶制作实验结果及分析

实验中采用 Nd:YAG 三倍频 355 nm 脉冲激光器 (YG981, 脉冲重复率 10 Hz, 法国 Quantel 公司) 单棱镜共光路干涉系统制作十重准晶结构. 三棱镜侧面与底面夹角  $\theta=54.7^\circ$ . 所用的光敏介质记录材料是 SU8 光抗材料 (Microchem 公司). 在制作光子准晶过程中, 激光单次曝光的能量密度是  $3 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  (单脉冲能量 20 mJ, 激光扩束后光斑直径 3cm), 单次曝光时间 4s.

在玻璃衬底上旋涂 SU8 材料进行准晶结构制作, 被曝光区域接近 1.5 cm 直径的圆形, 所制作的准晶结

构被切成 1cm 方形, 用原子力显微镜 (Multimode 8 SPM, Bruker) 进行微结构测量. 测量结果如图 6, 图 6 (a) 和 (b) 分别是同一区域不同放大倍数的测量结果, 图中非常清楚地展示了准晶的十重旋转对称性和长程有序性. 图 6 (b) 中黑实线所圈区域的直径为  $1.2 \mu\text{m}$ , 圆周上任意两个柱子之间的间距为 377 nm. 图 6 (c) 给出了与 6 (b) 相同大小区域的理论计算结果, 黑实线所圈区域的直径为  $1.25 \mu\text{m}$ , 圆周上两个柱子之间间距为 392.5 nm. 从图 6 (b) 和 (c) 的结果可得理论与实验误差为 4%. 造成误差的原因是 SU8 光抗材料薄膜在处理 and 烘干过程中所产生的收缩. 因此, 无论结构的尺

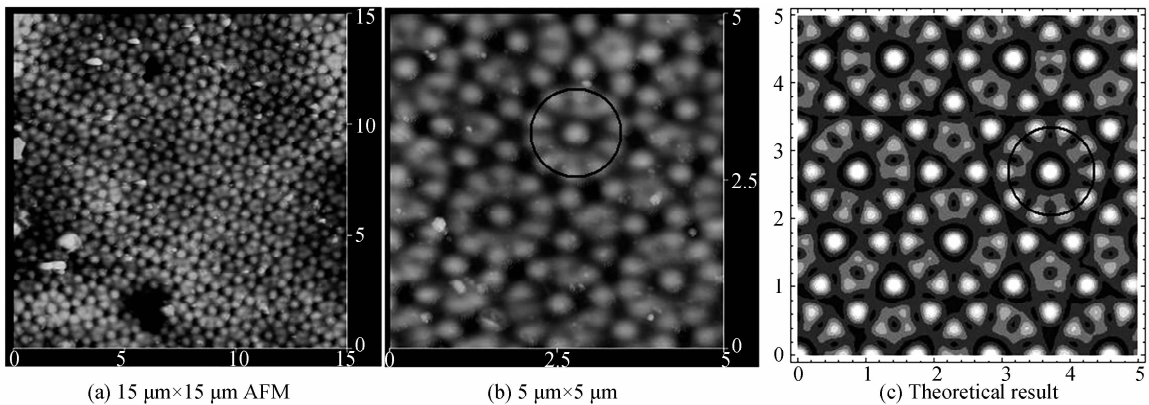


图 6 不同放大倍数 AFM 测量结果及理论计算结果  
 Fig. 6 Experimental AFM topography with different magnification and theoretical result

寸还是形状,图 6(b)和(c)表明理论设计和实验结果的非常好的一致性。

为了进一步证明所制作准晶结构的十重旋转对称性,测量制作结构的衍射图,如图 7。实验中采用连续的 532 nm 小型绿光激光器垂直入射到玻璃样品上,衍射图被白色打印纸光屏接收,照相机记录衍射结果。图 7 是所拍摄的衍射图,该图清楚地表明准晶结构的十重旋转对称性,与图 3(e)的理论计算结果相吻合。



图 7 制作准晶结构衍射图  
Fig. 7 Diffraction pattern

在高性能光子准晶结构实验制作过程中,特别注意两点:1)要保证每一次旋转都同轴,最理想的条件是旋转轴与光学系统光轴一致,这样既能保证样品相同位置多次曝光时光强基本相同,又能保证准晶结构的完全对称性;2)要保证每一次旋转角度均为  $\pi/5$ 。这样才能得到完美的十重旋转对称准晶结构。

如果旋转时旋转轴位置和旋转角有偏差,将会对准晶结构造成影响。假设第一次旋转时旋转轴沿  $x$  方向偏离光轴 20 nm、30 nm 和 50 nm,其他次旋转不受影响,所得一个准晶结构单元如图 8(b)、(c)和(d),图 8(a)是不存在误差时结构。从图中可以看出,偏差为 20 nm 时准晶结构中有三个对称点(图中黑圆所圈位置)光强开始变小,随着偏差变大,这三个位置光强逐渐变小,50 nm 时已经与其它对称点有比较大的光强差别。同样,只考虑一次旋转时旋转角有偏差也得到不同的准晶结构,如图 9 所示,(a)~(d)分别是角度偏差为  $0^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $5^\circ$  和  $10^\circ$  时的晶体单元结构。角度偏差为  $5^\circ$  时,相对应的二对对称点(图中黑圆所示)光强开始变弱, $10^\circ$  时光强对称性破坏的更厉害。

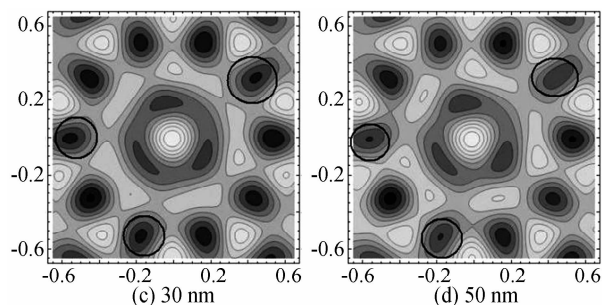
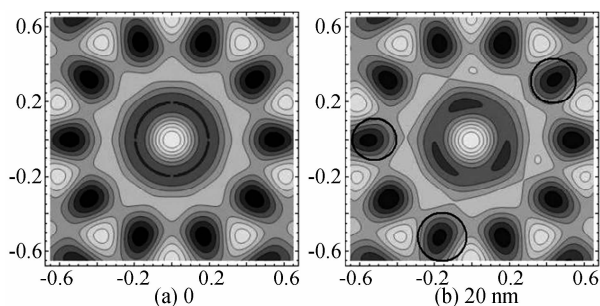


图 8 旋转轴沿  $x$  方向有不同偏差时的准晶结构单元  
Fig. 8 Quasicrystalline structure with different deviation of rotational axis along  $x$  direction

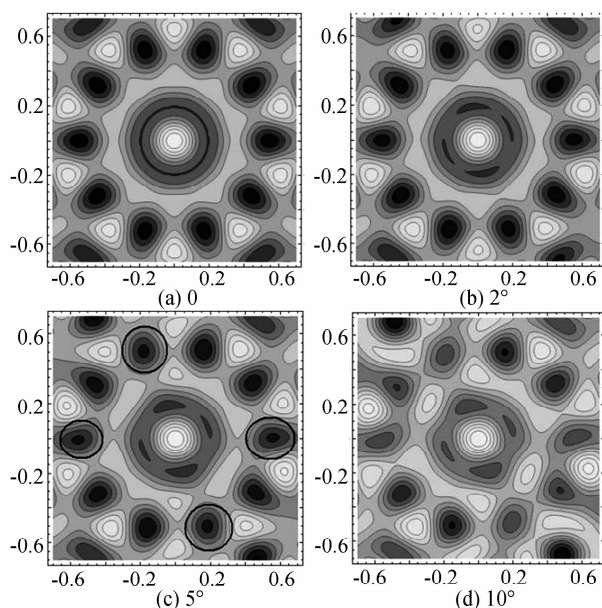


图 9 一次旋转角有不同偏差时的准晶结构单元  
Fig. 9 Quasicrystalline structure with different deviation of the first rotational angle

### 3 结论

本文给出了利用单棱镜共光路干涉装置制作多结构准晶的方法,通过调整光敏介质旋转角度和曝光次数,可以大面积制作任意复杂结构、任意旋转对称度的复杂准晶光子晶体结构,而且结构晶格常数在亚微米量级。具有实验装置简单、稳定性高、重复性好以及对激光器的相干性要求不高等特点。同时,分析了旋转轴和旋转角存在偏差时对准晶结构的影响,并实验制作了十重准晶结构,理论设计和实验结果相吻合。

#### 参考文献

- [1] ZOOROB M E, CHARLTON M D B, PARKER G J, *et al.* Complete photonic bandgaps in 12-fold symmetric quasicrystals [J]. *Nature*, 2000, **404**(6779):740-743.
- [2] MAN W N, MEGENS M, STEINHARDT P J, *et al.* Experimental measurement of the photonic properties of icosahedral quasicrystals[J]. *Nature*, 2005, **436**:993-996.
- [3] LIU Jian-jun, FAN Zhi-gang, HU Hai-li L, *et al.* Wavelength dependence of focusing properties of two-dimensional photonic quasicrystal flat lens [J]. *Optics Letter*, 2012. 5, **37**(10):

- 1730-1732.
- [4] JIN Chong-jun, CHENG Bing-ying, MAN Bao-yan, *et al.* Two-dimensional dodecagonal and decagonal quasiperiodic photonic crystals in the microwave region[J]. *Physical Review B*, 2000, **61**(16):10762-10767.
- [5] HATTORI T, TSURUMACHI N, KAWATO S, *et al.* Photonic dispersion relation in a one-dimensional quasicrystal [J]. *Physical Review B*, 1994, **50**(6): 4220-4223.
- [6] KALITEEVSKI M A, BRAND S, ABRAM R A, *et al.* Two-dimensional Penrose-tiled photonic quasicrystals: from diffraction pattern to band structure [J]. *Nanotechnology*, 2000, **11**(4): 274-280.
- [7] MIKHAEL J, ROTH J, HELDEN L, *et al.* Archimedean-like tiling on decagonal quasicrystalline surfaces[J]. *Nature*, 2008, **454**(7203): 501-504.
- [8] MIKHAEL J, SCHMIEDEBERG M, RAUSCH S, *et al.* Proliferation of anomalous symmetries in colloidal monolayers subjected to quasiperiodic light fields[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, **107**(9): 7214-7218.
- [9] CAMPBELL M, SHARP D N, HARRISON M T, *et al.* Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography[J]. *Nature*, 2000, **404**: 53-56.
- [10] WANG Xia, XU Jian-feng, SU Hui-ming, *et al.* Three-dimensional photonic crystals fabricated by visible light holographic lithography[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(14): 2212-2214.
- [11] JIN Wen-tao, XUE Yan-ling. Optical fabrication of two-dimensional photorefractive periodic photonic lattices and quasicrystal microstructures by multi-lens board[J]. *Applied Physics B*, 2015, **120**(1):75-80.
- [12] JIN Wen-tao, XUE Yan-ling, Optically induced three-dimensional Penrose-type photonic quasicrystal lattices in iron-doped lithium niobate crystal [ J ]. *Optics Communications*, 2014, **322**:205-208.
- [13] SUN Xiao-hong, TAO Xiao-ming, YE Ting-Jin, *et al.* Optical design and fabrication of 3D electrically switchable hexagonal photonic crystal[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2007, **87**(1): 65-69.
- [14] SUN Xiao-hong, TAO Xiao-ming, YE Ting-Jin, *et al.* 2D and 3D electrically switchable hexagonal photonic crystal in the ultraviolet range[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2007, **87**(2):267-271.
- [15] SUN Xiao-hong, TAO Xiao-ming, YE Ting-Jin, *et al.* Diffraction measurement and analysis of slanted writing holographic polymer dispersed liquid crystal[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **98**:0435101-0435105.
- [16] SUN Xiao-hong, TAO Xiao-ming, WANG Yang-yong. Various photonic crystal structures fabricated by using a top-cut hexagonal prism[J]. *Applied Physics A*, 2010, **98**(2): 255-261.
- [17] SUN Xiao-hong, LIU WEI, WANG Gao-liang, *et al.* Optics design of a top-cut prism interferometer for holographic photonic quasi-crystals[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(21-22):4593-4598.
- [18] SUN Xiao-hong, WU Yu-long, LIU Wen, *et al.* Optical design and fabrication of ten-fold photonic quasicrystal structure [J]. *AIP Advances*, 2015, **5**(5): 0571081-0571084.