

基于周期极化掺镁铌酸锂晶体的 六角可调相位阵列光栅

张进宏 陈云琳

(北京交通大学理学院, 北京 100044)

摘要 研究了基于周期极化掺镁铌酸锂(PPMg:LN)晶体的二维六角可调相位光栅及其 Talbot 效应光衍射成像。理论模拟不同相位差及分数 Talbot 距离条件下的近场光衍射强度分布,计算取样区内衍射强度随相位差和分数 Talbot 距离的变化,给出相位差恒定及变化情况下取样区强度最大值的位置。在理论研究基础上,设计与制备 PPMg:LN 六角可调相位阵列光栅,并进行了 Talbot 衍射成像的实验研究,实验结果与理论研究吻合较好。

关键词 光栅; Talbot 效应; 周期极化掺镁铌酸锂; 电光效应

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0205002

Hexagonal Tunable Phase Array Grating on Periodically Poled Mg-Doped LiNbO₃ Crystal

Zhang Jinhong Chen Yunlin

(School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract Research of the tunable two-dimensional hexagonal phase array grating based on periodically poled Mg-doped LiNbO₃ (PPMg:LN) crystal and its Talbot effect of light diffracton imaging is presented. Theoretical simulation is executed to study the intensity distribution of near-field optical diffraction under various phase differences and fractional Talbot distances. Average intensity of the sample area in diffraction field is simultaneously calculated with phase difference and fractional Talbot distance, so the position of the maximum intensity of the sampling area is located as the phase difference is constant or changing. On the basis of theoretical research, the tunable hexagonal phase array grating is designed and fabricated based on periodically poled Mg-doped LiNbO₃ crystal. The Talbot diffraction imaging is successfully obtained, and the experimental results agree with the theoretical results well.

Key words gratings; Talbot effect; periodically poled Mg-doped LiNbO₃; electro-optic effect

OCIS codes 050.1950; 070.6760; 230.2090

1 引 言

在光通信、光计算、光存储、图像处理及精密测量等现代科技领域中,越来越多地要求能将一个信息(图像或数据)的输入变换成多个信息的输出。光学分束器件为实现上述要求,如光互联、光逻辑阵列、多通道读写及多重成像等提供了条件,并具有光

学并行高速处理的特点。阵列光栅是实现光学分束的一种有效方法,是利用周期物体的光学 Talbot 效应,将平面光波转换为周期性强度分布的光学器件,已经在光学信息处理、光功率分配及多通道互连等方面得到了应用^[1-3]。目前,一维阵列光栅已经成熟^[4-5],二维(2D)阵列光栅的研究主要涉及阵列结

收稿日期: 2013-07-12; **收到修改稿日期:** 2013-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(61178052)、中央高校基本科研业务费(2011JBM122)、教育部博士点基金(20130009110008)

作者简介: 张进宏(1975—),男,博士研究生,主要从事微结构非线性光子晶体与器件研制方面的研究。

E-mail: jhzhang@bjtu.edu.cn

导师简介: 陈云琳(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事微纳材料与器件及其光子学技术、微纳材料与环境工程方面的研究。E-mail: ylchen@bjtu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

构和制造材料^[6-8]。其中,六角阵列由于具有较高的衍射效率而成为主要的二维结构形式^[9-11],而以周期极化的铌酸锂晶体为制造材料的阵列光栅,由于可以利用外加电场调节相位实现对后场光强分布的动态电控调节^[10,12],获得了广泛关注。本课题组已经在外加电场调制相位阵列光栅衍射的相关理论和实验方面取得了一些成果^[13-15],本文在前期研究的基础上,用更精确的算法模拟了不同相位差 $\Delta\varphi$ 及 Talbot 分数 β 条件下的相位光栅近场衍射,获得整个衍射场强度分布图以及光点取样区内的相对强度分布,在此基础上设计与制备了基于周期极化掺镁铌酸锂(PPMg:LN)的二维六角可调相位阵列光栅,并对其进行了通光实验研究,实验所获结果同理论研究相符。

2 衍射方程

相位型光栅对光是完全透明的,不影响光信息的振幅分布,仅引起相位的改变。图 1 是二维六角相位阵列光栅的结构图, t_x 和 t_y 分别是 x 方向和 y 方向上的光栅常数, $t_y = \sqrt{3}t_x$, l 为光栅六角形对角线长度,光栅占空比 $D = l/t_x$ 。当波长为 λ 的光沿 z 方向入射到二维六角相位阵列光栅时,根据 Talbot 效应理论可知其 Talbot 距离可表示为 $z_T = 3t_x^2/(2\lambda)$, z 方向上衍射位置用 Talbot 分数 β 和 Talbot 距离的乘积表示,即 $z = \beta z_T$ 。

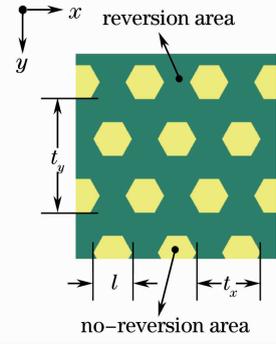


图 1 二维六角相位阵列光栅

Fig. 1 Two-dimensional hexagonal phase array grating

在外加电场作用下,由于晶体电光效应和压电效应,使得通过六角内部区域(黄色)和外部区域(绿色)两部分的光发生相反的相移,产生相位差 $\Delta\varphi$,形成一个相位阵列光栅,通过改变外加电场调整 $\Delta\varphi$ 实现 Talbot 效应的电场调制,其中相位差 $\Delta\varphi$ 与外加调制电场电压 V 成正比,即

$$\Delta\varphi = 4\pi V \left[(n_0 - 1)d_{33} - \frac{1}{2}n_0^3\gamma_{13} \right] / \lambda, \quad (1)$$

式中 λ 为入射光波长(532 nm), n_0 是掺镁铌酸锂晶片未加电场时的折射率(2.314), γ_{13} 是晶体的线性电光系数(10 pm/V), d_{33} 为晶体压电系数(7.6 pm/V)。

周期为 t_x 和 t_y 的掺镁铌酸锂晶体相位光栅的透射函数 $t(x, y)$ 可表示为周期单元透射系数 $u(x, y)$ 和用梳状函数 $\text{comb}(\cdot)$ 表达的周期单元分布函数的卷积,即

$$t(x, y) = u(x, y) \otimes \frac{1}{t_x t_y} [\text{comb}(x/t_x) \text{comb}(y/t_y) + \text{comb}(x/t_x - 1/2) \text{comb}(y/t_y - 1/2)], \quad (2)$$

式中

$$u(x, y) = \begin{cases} \exp(i\Delta\varphi), & \text{reversion area} \\ \exp(-i\Delta\varphi), & \text{no-reversion area} \end{cases}. \quad (3)$$

根据菲涅耳衍射理论可得到 z 平面处的近场衍射光场强度分布 $u_z(\Delta\varphi, x, y)$ 为^[9]

$$u_z(\Delta\varphi, x, y) = \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\beta z_T\right) \sum_{mm} A_{mm}(\Delta\varphi) \exp\left[i2\pi\left(\frac{mx}{t_x} + \frac{ny}{\sqrt{3}t_x}\right)\right] \exp\left(i\pi\lambda\beta z_T \frac{3m^2 + n^2}{3t_x^2}\right), \quad (4)$$

式中 m, n 取正整数,系数 A_{mm} 表示为

$$A_{00} = \exp(-i\Delta\varphi) + c[\exp(i\Delta\varphi) - \exp(-i\Delta\varphi)], \quad (5)$$

$$A_{mm} = i\{1 + \exp[i\pi(m+n)]\} \times \frac{(-1)^m \sin \Delta\varphi}{m(m^2 - n^2)\pi^2} \times \left[(m+n) \cos\left(\frac{2n-3m}{5}\pi\right) - 2m \cos\left(\frac{m\pi}{5}\right) + (m-n) \cos\left(\frac{2n+3m}{5}\pi\right) \right]. \quad (6)$$

(5)式中系数 c 是六角内部区域面积同阵列周期单元面积的比值,即 $c = 3l^2/(4t_x^2)$ 。

3 衍射场数值模拟

通过(4)式及分数 Talbot 距离表达式,可以看

出光栅近场衍射光强分布 $u_z(\Delta\varphi, x, y)$ 由相位差 $\Delta\varphi$ 及 Talbot 分数 β 决定。根据(1)式和(4)式模拟光栅后近场衍射场强度分布,选择参数如下: $t_x = 35 \mu\text{m}$, $t_y = 60 \mu\text{m}$, $l = 22 \mu\text{m}$, $\lambda = 532 \text{ nm}$ 和 $V = 0.9 \text{ kV}$, 对应光栅占空比 $D = 63\%$, 系数 $c = 0.30$, Talbot 距离 $z_T = 3.45 \text{ mm}$, 相位差 $\Delta\varphi = 0.35\pi$ 。计算结果如图 2 所示,强度分布在 x 方向和 y 方向具有和相位阵列光栅同样的周期,沿 z 方向强度分布以 Talbot 距离周期变化,但整体强度逐步减小,最大相对强度值为 8,出现在 $\beta = 0.38$ 平面处。最大值处横向衍射面强度分布的 2D 和三维(3D)模式如图 3 所示。

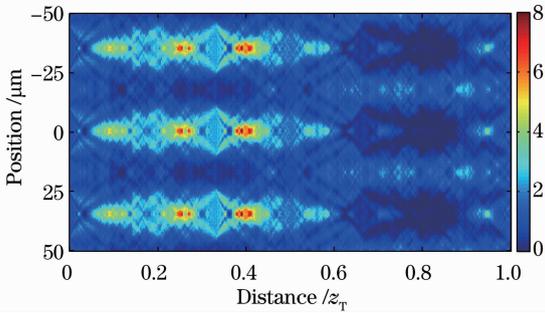


图 2 $\Delta\varphi = 0.35\pi$ 时衍射场的 x - z 截面模拟图
Fig. 2 Simulated diffraction field patterns with $\Delta\varphi = 0.35\pi$ in x - z plane

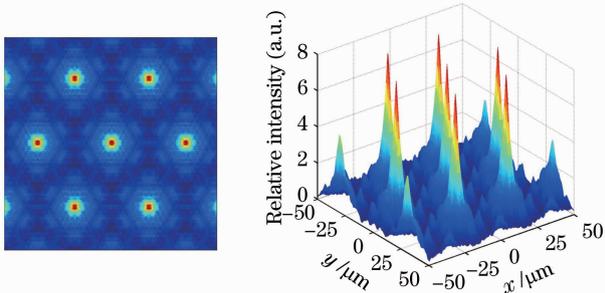


图 3 $\Delta\varphi = 0.35\pi$ 时, $\beta = 0.38$ 面强度分布的二维和三维图

Fig. 3 2D and 3D patterns of diffraction intensity distribution on $\beta = 0.38$ plane as $\Delta\varphi = 0.35\pi$

为了直观地观察衍射图案,模拟了不同 $\Delta\varphi$ 及 β 条件时垂直于 z 轴衍射面的强度分布,如图 4 所示。图 4(a)~(d)是相位差 $\Delta\varphi$ 一定时, $\beta = 0.10, 0.33, 0.50, 0.80$ 时的强度分布模拟图。图 4(b)中光斑大而均匀,暗区强度分布也比较均匀,图 4(d)同其他图案相比,亮区位置和暗区位置相反。图 4(e)~(h)是 Talbot 分数 β 一定时,相位差 $\Delta\varphi = 0.12\pi, 0.24\pi, 0.35\pi$ 和 0.48π 时衍射强度分布图,当衍射位置恒定时,随着相位差增大,其衍射光斑逐渐增

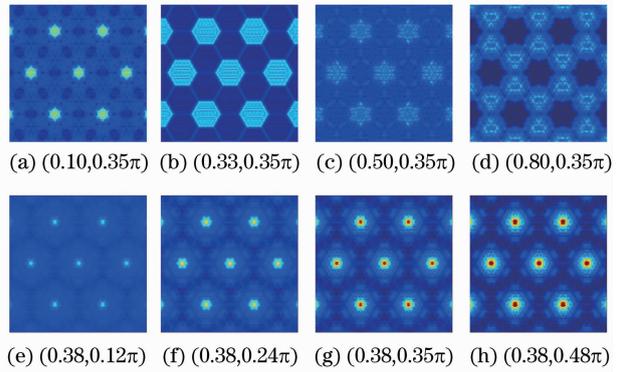


图 4 不同 β 和 $\Delta\varphi$ 条件下衍射面的强度分布模拟图
Fig. 4 Simulated diffraction intensity distributions with different β and $\Delta\varphi$

大,且强度随之增强。模拟结果表明,近场光衍射图像的光强分布取决于相位差 $\Delta\varphi$ 和 Talbot 分数 β 。

4 实验

根据上述理论分析结果,设计并制备二维六角周期极化的掺镁铌酸锂晶体。依据数值计算参数设计六角阵列掩模版用于在晶体 $+z$ 面蒸镀六角阵列铝电极,而 $-z$ 面镀平板铝电极,然后通过电极施加高压电场,使六角电极区的铁电畴反转而中空区不反转,形成六角阵列 PPMg:LN,最后用稀盐酸洗去铝电极,在晶体 $\pm z$ 面磁控溅射氧化钢锡(ITO)薄膜形成二维六角可调相位阵列光栅。光栅体积为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$,阵列结构参数同数值模拟参数。图 5 为周期极化掺镁铌酸锂晶体样品腐蚀后的 $\pm z$ 面显微图。光栅衍射所用光源是波长为 532 nm 的半导体激光器,阵列光栅的 ITO 电极分别用导线连接到 $0 \sim 1.5 \text{ kV}$ 的直流电源上,通过调节外加调制电场以及调整光栅后近场衍射观察屏位置,可观测到不同相位差和不同 Talbot 距离时的光场衍射图像。图 6 所示为相位阵列光栅 Talbot 衍射的实验光路及数值模拟的取样六角(红色区域)示意图。

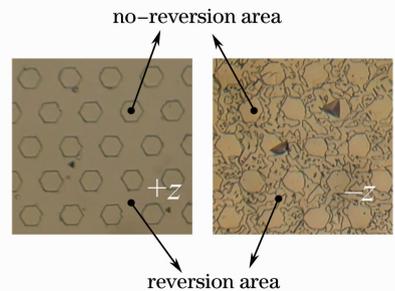


图 5 周期极化掺镁铌酸锂样品腐蚀后 $\pm z$ 面显微图
Fig. 5 $\pm z$ surface micrographs of periodically poled LiNbO_3 after etching

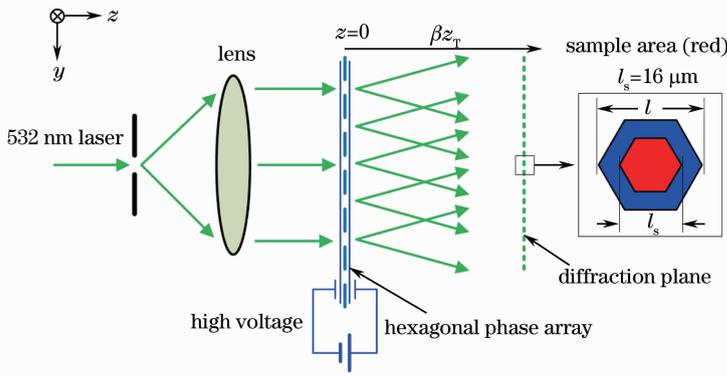


图 6 相位阵列光栅 Talbot 衍射成像实验光路图及取样六角区示意图

Fig. 6 Experimental setup of the Talbot diffraction imaging of phase array grating and diagram of sample hexagonal area

对二维六角可调相位阵列光栅进行通光实验，在外加调制电场一定的条件下，通过改变 Talbot 分数 β 获得衍射成像，图 7(a)~(d) 为相位差 $\Delta\varphi = 0.35\pi$ ($V = 0.90$ kV) 时， $\beta = 0.10, 0.33, 0.50, 0.80$ 时的衍射图像。在 $\beta = 0.38$ 处衍射光点强度最大，如图 7(g) 所示，整体看来衍射图案同数值模拟图相吻合。固定衍射位置，改变外加调制电场，获得六角阵列相位光栅在不同相位差下的 Talbot 衍射成像结果。图 7(e)~(h) 为 Talbot 分数 $\beta = 0.38$ 时，分别取 $\Delta\varphi = 0.12\pi, 0.24\pi, 0.35\pi, 0.48\pi$ ($V = 0.30, 0.60, 0.90, 1.20$ kV) 时的光栅近场衍射图像，很明显，图案可见度随相位差增加而增强，与理论模拟结果一致。实验结果表明，改变外加电场和衍射位置可以实现对衍射光点大小和强度的调节。由于高压电源输出限制，而且实际应用中更关注可调相位光栅在较低电压情况下的特性，没有进行更高相位差的实验。

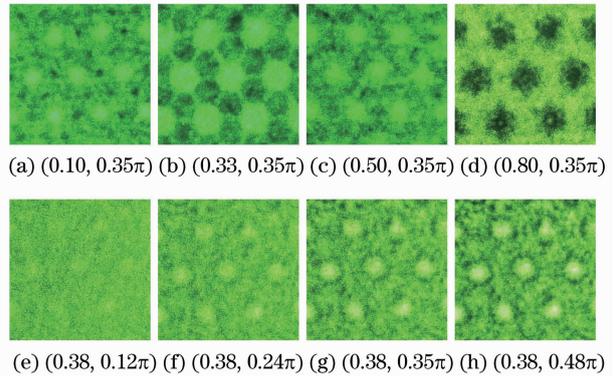


图 7 不同 β 和 $\Delta\varphi$ 条件下衍射面强度分布实验图

Fig. 7 Experimental diffraction intensity distributions with different β and $\Delta\varphi$

系到光栅的应用范围^[16-17]。为进一步研究衍射场区域强度随相位差和距离的变化情况，沿 z 轴方向引入一个六角取样区域，六角对角线长度 $l_s = 16 \mu\text{m}$ ，不同条件下取样区内的平均相对强度变化如图 8 所示。图 8(a) 为 $\beta = 0.38$ 时六角取样区内平均强度随相位差 $\Delta\varphi$ 在 $0 \sim 0.50\pi$ 范围内变化的曲线，实验曲线略低于模拟曲线，但强度随相位差增强符合模拟预期。 β 取其他值时也有类似的变化，但最大强度较 $\beta =$

5 衍射场区域强度

阵列光栅应用中，衍射光点的大小和强度直接关

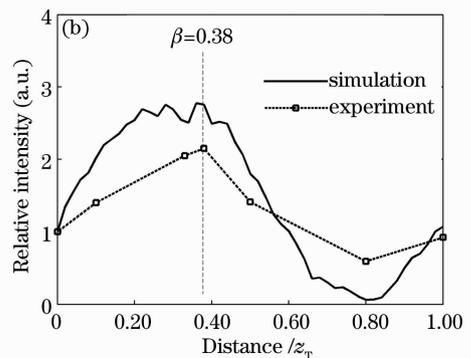
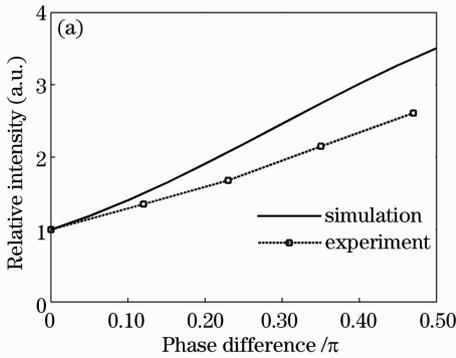


图 8 衍射强度曲线。(a) 在 $\beta = 0.38$ 时强度随相位差的变化；(b) 在 $\Delta\varphi = 0.35\pi$ 时强度随衍射位置的变化

Fig. 8 Diffraction intensity curves. (a) Intensity versus phase difference as $\beta = 0.38$; (b) intensity versus diffraction distance as $\Delta\varphi = 0.35\pi$

0.38时低。图 8(b)为 $\Delta\varphi=0.35\pi(V=0.90\text{ kV})$ 时取样区内平均强度在 Talbot 距离内的变化曲线。实验曲线整体趋势同模拟曲线一致,只是幅度较模拟曲线有所降低,主要由于晶体六角畴不规则且极化反转时 $\pm z$ 面之间各深度横向扩展速度不同,使六角畴体略成圆锥状,正反畴间不规则的畴界面的衍射损失导致光栅后衍射场光强度下降。图 8(b)中 $\beta=0.38$ 处,两条曲线对应的强度都接近各自曲线的最大峰值,与图 8(a)一致。

综合图 2 和图 4 可知,在相位差 $\Delta\varphi=0.35\pi$ 时,该相位阵列器在 Talbot 分数 $\beta=0.38$ 平面内取样区光强也具有最大值。初步的模拟结果表明,二维六角可调相位阵列的占空比决定了衍射光点具有最大光强时衍射面的位置,也就是说,占空比决定了相位光栅的衍射特征。因此可以通过优化阵列光栅的占空比,调整合适的外加电场和衍射位置实现对衍射光点的大小和强度的改变,以满足不同应用的需要。

6 结 论

对基于周期极化掺镁铌酸锂的外加电场调制二维六角相位阵列光栅的 Talbot 衍射成像进行了理论和实验研究。理论模拟得到相位光栅后的衍射场强度分布图,通过计算衍射场六角取样区内平均强度获得了相位差 $\Delta\varphi$ 和 Talbot 分数 β 对二维六角相位阵列光栅衍射成像光场分布的影响。数值模拟设计并制备了占空比 $D=63\%$ 的铌酸锂二维六角可调相位阵列光栅,并进行了 Talbot 光衍射分数成像实验研究,得到了不同相位差和不同 Talbot 分数 β 条件下的光栅衍射图像,当调制电场对应的相位差 $\Delta\varphi=0.35\pi$ 时,衍射光点强度最大位置对应的 Talbot 分数为 $\beta=0.38$,实验结果与理论模拟结果相符。

参 考 文 献

- 1 M Paturzo, F Merola, P Ferraro. Multi-imaging capabilities of a 2D diffraction grating in combination with digital holography [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(7): 1010–1012.
- 2 C X Yu, S J Augst, S M Redmond, *et al.*. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2686–2688.
- 3 M Krishnamurthi, L Tian, V Gopalan. Design and simulation of planar electro-optic switches in ferroelectrics [J]. *Appl Phys*

- Lett*, 2008, 93(5): 52912–52913.
- 4 Wang Huaisheng. Talbot effect of a grating under chirped ultrashort pulsed laser illumination [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(12): 5688–5691.
王淮生. 啁啾超短脉冲光波照射下光栅 Talbot 效应的研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(12): 5688–5691.
- 5 Zu Jifeng, Zhou Changhe, Xi Peng, *et al.*. Wavelength-division and beam splitting element based on the Talbot effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(4): 431–433.
祖继锋, 周常河, 席 鹏, 等. 基于塔尔博特效应的分波器和分束器[J]. *光学学报*, 2003, 23(4): 431–433.
- 6 W Zhao, X Huang, Z Lu. Super Talbot effect in indefinite metamaterial [J]. *Opt Express*, 2011, 19(16): 15297–15303.
- 7 E T Papaioannou, V Kapaklis, E Melander, *et al.*. Surface plasmons and magneto-optic activity in hexagonal Ni anti-dot arrays [J]. *Opt Express*, 2011, 19(24): 23867–23877.
- 8 Yan Xinxin, Zhang Lei, Zhang Wenzhi, *et al.*. Extended self-imaging conditions for two-dimensional periodic object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2562–2567.
严欣欣, 张 磊, 张文字, 等. 二维周期物体自成像条件的扩展[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2562–2567.
- 9 P Xi, C Zhou, E Dai, *et al.*. Generation of near-field hexagonal array illumination with a phase grating [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(4): 228–230.
- 10 Y Zhang, J Wen, S N Zhu, *et al.*. Nonlinear Talbot effect [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(18): 183901.
- 11 N G R Broderick, G W Ross, H L Offerhaus, *et al.*. Hexagonally poled lithium niobate: a two-dimensional nonlinear photonic crystal [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(19): 4345–4348.
- 12 P Maddaloni, M Paturzo, P Ferraro, *et al.*. Mid-infrared tunable two-dimensional Talbot array illuminator [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(12): 121105.
- 13 Zhou Bo, Chen Yunlin, Li Yuanan, *et al.*. The theoretical study and numerical simulation of the tunable two-dimensional hexagonal phase array based on Talbot effect [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 1816–1822.
周 波, 陈云琳, 黎远安, 等. 基于 Talbot 效应的可调相位差二维六角相位阵列器的理论研究和数值模拟[J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 1816–1822.
- 14 Li Jianguang, Chen Yunlin, Zhang Jinhong. A study of two-dimensional hexagonal phase array optical beam splitter modulated by external electric field [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(12): 124210.
李建光, 陈云琳, 张进宏. 外加电场调制二维六角相位阵列光分束器的研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(12): 124210.
- 15 Fan Tianwei, Chen Yunlin, Zhang Jinhong. A study of two-dimensional hexagonal phase array grating in MgO:LN based on the Talbot effect [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 094216.
范天伟, 陈云琳, 张进宏. 基于 Talbot 效应的掺镁铌酸锂二维六角相位阵列光栅的研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 094216.
- 16 B Hulsken, D Vossen, S Stallinga. High NA diffractive array illuminators and application in a multi-spot scanning microscope [J]. *J European Optical Society-Rapid Publications*, 2012, 7: 12026.
- 17 M G Keller, J Shaker, Y M M Antar. Millimeter-wave Talbot array illuminators [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2006, 5(1): 204–208.