

基于 Talbot 效应的掺镁铌酸锂二维六角位相阵列光栅的研究*

范天伟 陈云琳[†] 张进宏

(北京交通大学理学院, 北京 100044)

(2012年10月22日收到; 2012年11月22日收到修改稿)

本文系统研究了基于泰伯效应 (Talbot) 的位相可调掺镁铌酸锂二维六角位相阵列光栅及其光衍射成像, 对光栅占空比 D 、不同位相差 $\Delta\varphi$ 、及泰伯分数 β 条件下的光栅近场光衍射强度分布进行了理论研究, 结果表明当光栅占空比 $D = 52\%$ 、位相差 $\Delta\varphi = 0.75\pi$ 、泰伯分数 $\beta = 0.2$ 时, 光栅近场衍射光图像效果最佳. 实验设计与制备了掺镁铌酸锂二维六角位相阵列光栅, 并对其进行了 Talbot 衍射光成像实验研究, 得到了不同位相差和不同泰伯分数 β 条件下光栅近场衍射光图像, 实验结果与理论研究结果相符.

关键词: 二维六角位相阵列光栅, 掺镁铌酸锂晶体, 泰伯效应

PACS: 42.79.Dj, 42.70.Mp, 42.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.62.094216

1 引言

基于 Talbot 效应的位相阵列光栅可实现光信息并行高速处理、微图形传输和光功率分配^[1-3]等一系列功能, 并且它在光通信、光存储、光电精密测量等领域有着广泛的应用前景. 目前一维阵列光栅的研究已经比较成熟^[4-6]. 二维阵列光栅的制造材料和阵列结构可以有多种选择, 不同的组合所产生的效果也会不同, 但以非线性晶体为材料的阵列光栅的研究已显现出其优越的性能^[7]. 其中六角阵列结构能够很好的利用光能^[8-10], 特别是外加电场可调二维六角位相阵列光栅, 可以有效的消除光栅在工作中因温度变化带来的不良影响, 同时可调的后场均匀光强分布也为阵列光栅的应用提供了新的研究思路. 近年来, 研究者们对外加电场调制二维六角阵列光栅衍射近场均匀光强分布进行了一些理论研究^[11], 并通过调制外加电场实现了衍射光强的均匀分布^[12]; 但对二维六角位相阵列光栅优化设计、位相差对不同泰伯距离处光栅近场衍射光强分布影响的研究报道鲜为少见. 本文在

前期研究的基础上, 开展光栅占空比 D 、不同位相差 $\Delta\varphi$ 及泰伯分数 β 条件下的光栅近场光衍射成像的数值模拟研究, 在此研究的基础上, 我们设计与制备了占空比为 52% 的掺镁铌酸锂二维六角位相阵列光栅, 并对其进行了通光实验研究, 实验结果和理论研究结果符合较好.

2 可调二维六角位相阵列光栅的衍射方程

位相型光栅对光是完全透明的, 不影响光信息的振幅分布, 仅引起位相的改变. 图 1 是二维六角位相阵列光栅的数值模拟模型, 黑色部分和白色部分都是透光的 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. 光栅占空比表达式为 $D = l/t_x$. 当波长为 λ 的光沿 z 方向入射到二维六角位相阵列光栅时, 其泰伯距离可表示为 $Z_T = 3t_x^2/2\lambda$, z 方向上不同衍射观察屏位置用分数泰伯距离表示, 即 $Z = Z_T/\beta$, 其中 β 为泰伯分数.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178052) 和北京交通大学校基金 (批准号: 2011JBM122, 2011JBZ013) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: ylchen@bjtu.edu.cn

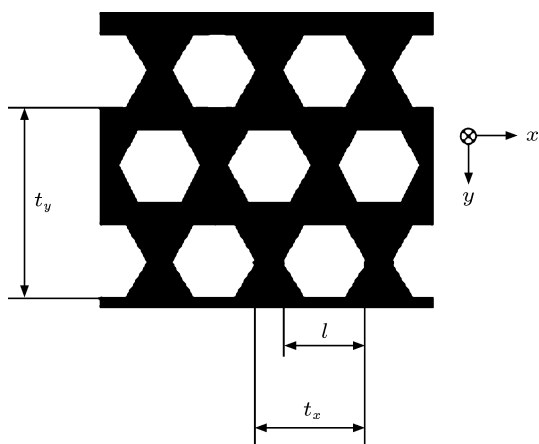


图1 二维六角位相阵列光栅

光入射到二维六角位相阵列光栅时, 将产生非线性效应, 在外加电场作用下, 使得黑色和白色两部分之间存在位相差 $\Delta\varphi$, 形成了一个位相阵列光栅, 可以改变光栅不同区域的位相差, 从而改变其光栅透过率分布, 以实现泰伯效应的外加电场调制. 其中位相差 $\Delta\varphi$ 与外加调制电场电压 V 成正比, 位相差可由下式计算得出, 即

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

式中 V 为外加电场, λ 为入射光波长, d 是晶片厚度, d_{33} 为铌酸锂压电系数 (7 pm/V), n_0 是晶片未加电场时 λ 入射光的折射率, r_{13} 是铌酸锂的线性电光系数 (10 pm/V).

周期为 $t(xy)$ 的掺镁铌酸锂晶体光栅的透射光场振幅可表示为 $u(x, y)$, 忽略相位因子, 透射光场振幅 $u(xy)$ 可写为下式, 即

$$u(x, y) = \sum_{mn} A_{mn} \exp \left[i2\pi \left(\frac{mx}{t_x} + \frac{ny}{\sqrt{3}t_x} \right) \right], \quad (2)$$

式中 m, n 取正整数, 且系数 A_{mn} 可通过以下两式表示, 即

$$A_{00} = \exp[-i(\Delta\varphi)] + c \{ \exp[i(\Delta\varphi)] - \exp[-i(\Delta\varphi)] \}, \quad (3)$$

$$A_{mn} = i \left\{ 1 + \exp[i\pi(n+m)] \right\} \times \frac{(-1)^n \sin(\Delta\varphi)}{n(n^2 - m^2)\pi^2} \times \left[(n+m) \cos \left(\frac{2m-3n}{5} \pi \right) - 2n \cos \left(\frac{n\pi}{5} \right) + (n-m) \cos \left(\frac{2m+3n}{5} \pi \right) \right]. \quad (4)$$

因此, 当一束单色平面光照射在二维六角位相阵列光栅时, 在 z 平面处的衍射光场强度 $u_z(\Delta\varphi, x, y)$ 可通过傅里叶级数表示为式

$$u_z(\Delta\varphi, x, y) = \sum_{mn} A_{mn} \exp \left[i2\pi \left(\frac{mx}{t_x} + \frac{ny}{\sqrt{3}t_x} \right) \right] \times \exp \left[i\pi\lambda z \left(\frac{3m^2 + n^2}{3t_x^2} \right) \right]. \quad (5)$$

将占空比表达式 $D = l/t_x$, $Z = Z_T/\beta$, $Z_T = 3t_x^2/2\lambda$ 代入 (5) 式, 可推导出

$$u_z(\Delta\varphi, x, y) = \sum_{mn} A_{mn} \exp \left[\frac{i2\pi D}{l} \left(mx + \frac{n}{\sqrt{3}}y \right) \right] \times \exp \left[i\frac{3\pi}{2\beta} \left(m^2 + \frac{1}{3}n^2 \right) \right]. \quad (6)$$

3 数值分析与讨论

通过 (1)—(6) 式及分数泰伯距离表达式, 可以看出光栅近场衍射光强分布 $u_z(\Delta\varphi, x, y)$ 由占空比 D 、位相差 $\Delta\varphi$ 及泰伯分数 β 决定. 因此, 根据 (6) 式作为理论研究依据, 数值模拟计算出在不同条件下的光栅后近场衍射光相对强度分布结果.

图 2 所示为泰伯分数 $\beta = 0.33$, 外加调制电压改变使位相差 $\Delta\varphi$ 分别为 0.35π , 0.5π , 0.75π 及 π 的情况下, 光栅后近场衍射光的相对光强随占空比 D 变化的模拟计算结果. 从图 2 可见当占空比 $D = 0.52$, 位相差 $\Delta\varphi = 0.75\pi$ 时, 光栅后近场衍射光的相对光强最大, 约为 0.62. 图 3 是根据 (1) 式计算得出的位相差与外加调制电压之间的关系图.

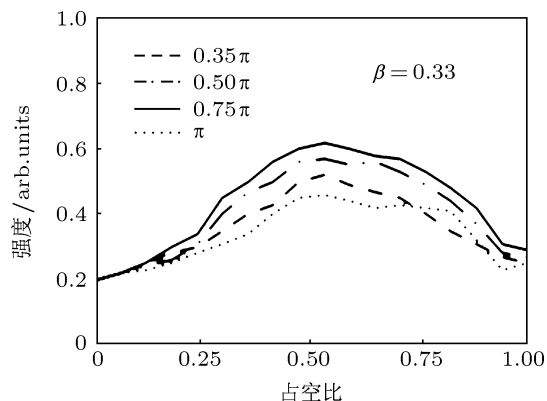

 图2 $\beta = 0.33$, 不同位相差及占空比与光栅后近场光衍射相对强度的关系

图 4(a), (b), (c), (d) 所示为 $\beta = 0.2, 0.33$ 和 0.5 , 位相差 $\Delta\varphi$ 分别为 $0.35\pi, 0.5\pi, 0.75\pi$ 及 π 的条件下, 光栅后近场衍射光的相对强度随占空比 D 变化的模拟计算结果. 由图 4(a)—(d), 可以得出当位相差

$\Delta\varphi = 0.75\pi$, 占空比 $D = 52\%$, 且泰伯分数 $\beta = 0.2$ 时, 光栅后近场的相对衍射光强最大, 接近于 0.92.

数值模拟计算结果表明, 对不同位相差 $\Delta\varphi$ 和泰伯分数 β , 其占空比 $D = 52\%$ 时, 光栅后近场光衍射图像的相对光强均对应最大值, 此时六角形区域与非六角形区域面积近似相等, 正、负位相差相等. 同时, 得出当位相差 $\Delta\varphi = 0.75\pi$, 且 $\beta = 0.2$ 时, 光栅后近场衍射图像具有最大相对衍射光强, 其值为 0.92.

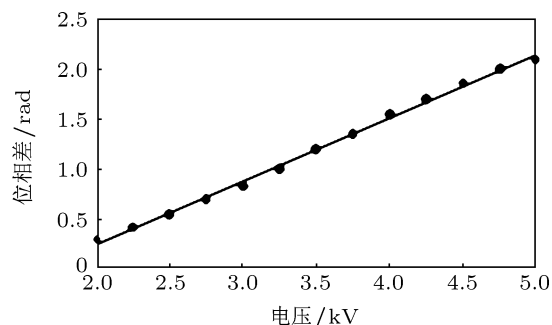


图3 位相差与外加调制电压之间的关系图

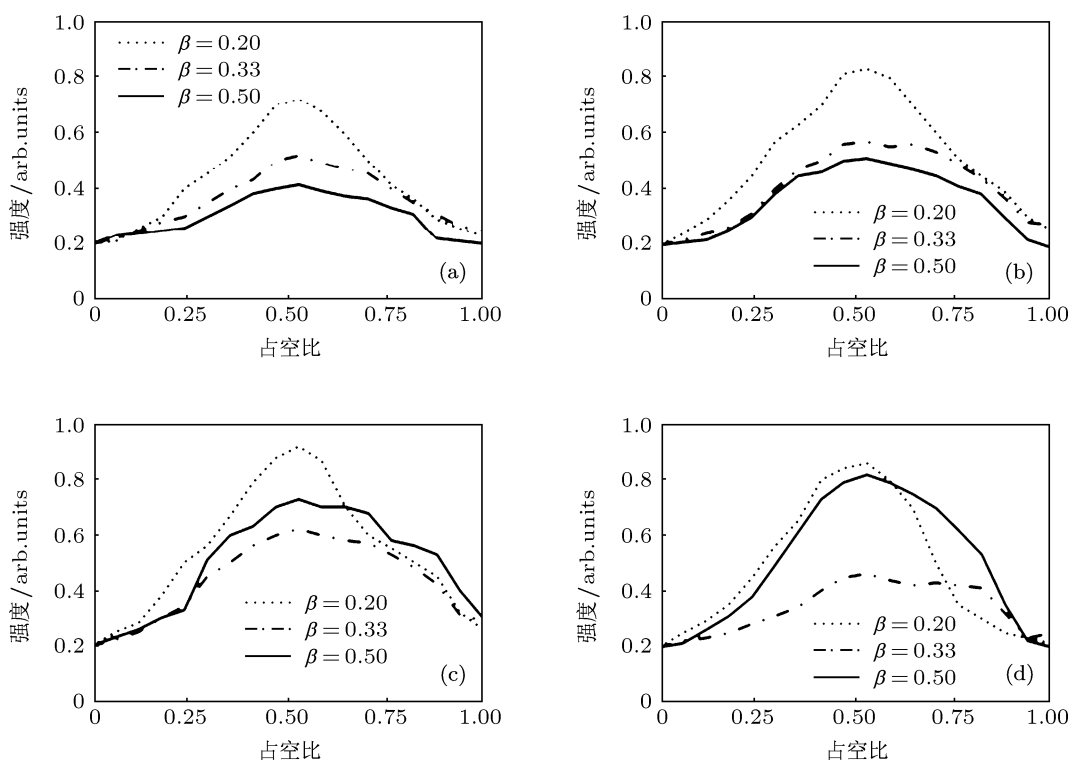


图4 $\beta = 0.2, 0.33, 0.5$, 不同位相差 $\Delta\varphi$ 衍射光强与光栅占空比的关系 (a) 位相差 $\Delta\varphi = 0.35\pi$; (b) 位相差 $\Delta\varphi = 0.5\pi$; (c) 位相差 $\Delta\varphi = 0.75\pi$; (d) 位相差 $\Delta\varphi = \pi$

4 Talbot 衍射成像实验

根据上述理论分析结果, 我们设计并制备了可调二维六角掺镁铌酸锂位相阵列光栅, 图 5(a) 为六角二维位相阵列光栅分布掩模板设计结构图, 图 5(b), (c) 分别为极化腐蚀后的光栅 $+z$ 面和 $-z$ 面的结构图, 并对掺镁铌酸锂二维六角阵列光栅 $\pm z$ 面进行磁控溅射 ITO 镀膜, 光栅体积大小为 $30\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, $t_x = 35\text{ }\mu\text{m}$, $t_y = \sqrt{3}t_x = 60\text{ }\mu\text{m}$, $l = 18\text{ }\mu\text{m}$, 占空比 $D = l/t_x \approx 52\%$. 所用光源是波长为 532 nm 的半导体激光器, 其最大输出功率为 2 W . 图 6 是 Talbot 衍射成像的实验光路图, 阵列光栅的 $\pm z$ 面分别用导线连接到 $0\text{--}5.0\text{ kV}$ 的外接直流电源上, 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, 可观测到光栅后不同 Talbot 分数距离处的光场衍射图像.

对可调二维六角位相阵列光栅进行通光实验的光栅近场衍射图像如图 7 所示. 其中图 7(a)—(c) 分别为 $\beta = 0.33$, 位相差 $\Delta\varphi = 0.35\pi, 0.5\pi, 0.75\pi$ 时的光栅近场光衍射图像, 图 7(d)—(f) 分别为 $\beta = 0.2, 0.33, 0.5$, 位相差 $\Delta\varphi = 0.75\pi$ 时的光栅近场光衍射图像.

在光场衍射接收屏 Talbot 分数位置一定的情况下, 通过对外加电场的精细调制, 获得了二维六角阵列光栅如图 7(a)—(c) 所示的 Talbot 光衍射成像结果. 在外加调制电场一定的条件下, 通过改变泰伯分数 β 获得了在不同 Talbot 位置处光衍射成像的结果, 如图 7(d)—(f) 所示.

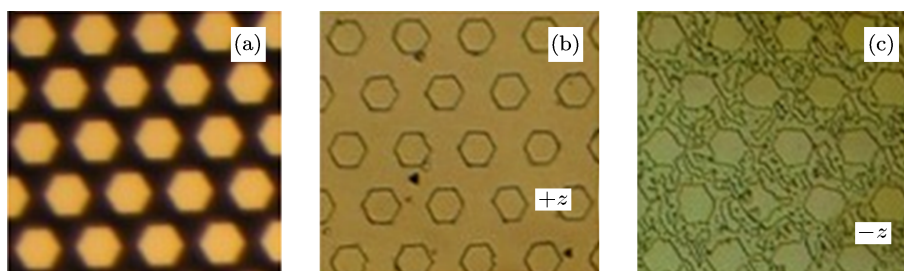


图5 (a) 二维六角位相阵列光栅掩模板示意图; (b) 二维六角位相阵列光栅 +z 面腐蚀图; (c) 二维六角位相阵列光栅 -z 面腐蚀图

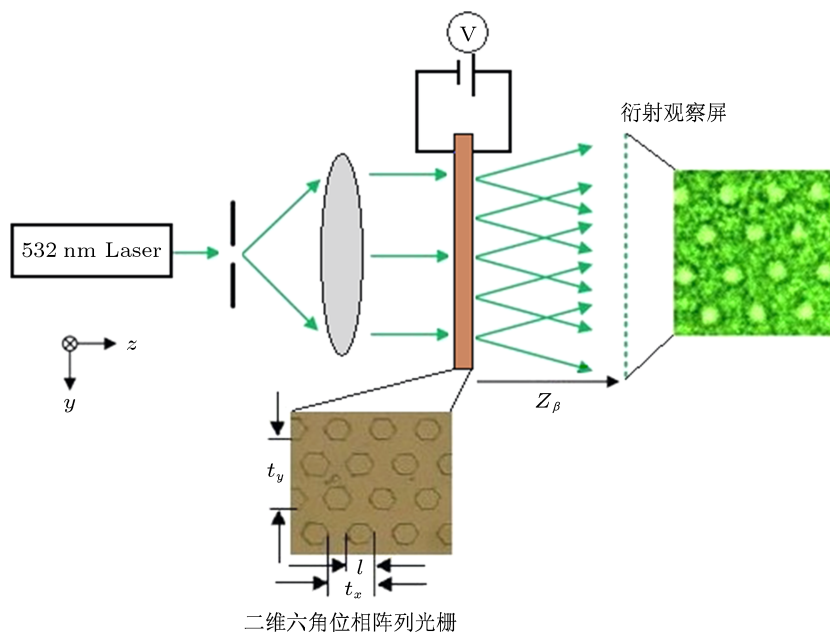


图6 可调二维六角位相阵列光栅 Talbot 衍射成像实验光路图

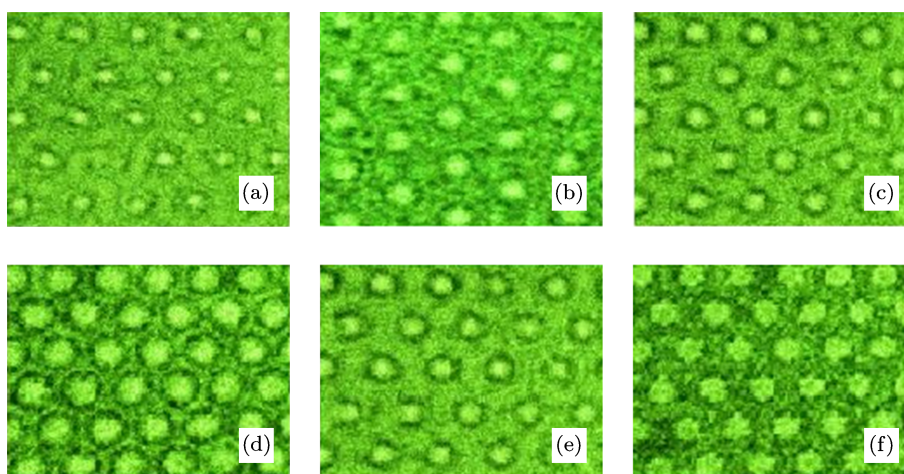


图7 (a)—(c) 分别为 $\beta = 0.33$, 位相差 $\Delta\varphi = 0.35\pi, 0.5\pi, 0.75\pi$ 时光栅后近场衍射图像分布图; (d)—(f) 分别为 $\beta = 0.2, 0.33, 0.5$, 位相差 $\Delta\varphi = 0.75\pi$ 时的光栅后近场衍射图像分布图

从衍射成像实验结果可以看出, 在占空比 $D = 52\%$ 时, 通过外加电场的调制, 在 Talbot 分数 $\beta = 0.33$ 距离处可以清晰的观测到 Talbot 衍射

成像现象, 相比于位相差为 0.35π 和 0.5π , 位相差为 0.75π 的光衍射成像效果较佳, 而这与前面理论数值模拟结果相符合. 从图 7 中还可以看出, 当

外加电场一定, 即位相差 $\Delta\varphi = 0.75\pi$ 时, 在不同的 Talbot 分数距离处可获得衍射光强不同的衍射图形, 在泰伯分数 $\beta = 0.2$ 处, 衍射图像效果最佳, 而这也与前面理论数值模拟结果完全相符.

5 结 论

本文对基于泰伯效应的外加电场调制二维六角位相阵列光栅的设计及其衍射成像进行了研究, 理论研究了光栅占空比 D 、不同位相差 $\Delta\varphi$ 、及泰伯分数 β 对二维六角位相阵列光栅衍射成像光场

分布的影响, 数值模拟得到了光栅最佳的占空比值是 52%, 且模拟结果表明当光栅占空比 $D = 52\%$ 、位相差 $\Delta\varphi = 0.75\pi$ 、泰伯分数 $\beta = 0.2$ 时, 光栅后近场光衍射强度最大. 在此基础上设计并制备了掺镁铈酸锂二维六角位相阵列光栅, 并对其进行了 Talbot 光衍射分数成像实验研究, 得到了不同位相差和不同泰伯分数 β 条件下光栅的衍射图像, 当位相差 $\Delta\varphi = 0.75\pi$ 且泰伯分数 $\beta = 0.2$ 时, 光栅 Talbot 衍射图像最为清晰明亮, 实验结果与理论研究结果完全相符.

-
- [1] Duchesne D, Morandotti R, Azana J 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 113
- [2] Testorf M 2006 *J. Opt. Soc. Am. A* **23** 187
- [3] Hamam H 2006 *Appl. Opt.* **45** 6525
- [4] Abramski K M, Baker H J, Colley A D, Hall D R 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 2469
- [5] Wang H S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5688 (In Chinese) [王淮生 2005 物理学报 **54** 5688]
- [6] Chen B, Zhu P P, Liu Y J, Wang J Y, Yuan Q X, Huang W X, Ming H, Wu Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1576 (In Chinese) [陈博, 朱佩平, 刘宜晋, 王寓越, 袁清习, 黄万霞, 明海, 吴自玉 2008 物理学报 **57** 1576]
- [7] Xi P, Zhou C H, Dai E W, Liu L R 2002 *Opt. Lett.* **27** 228
- [8] Paturzo M, Natale P D, Nicola S D, Ferraro P 2006 *Opt. Lett.* **31** 3164
- [9] Maddaloni P, Paturzo M, Ferraro P, Malara P, Natale P D, Gioffrè M, Coppola G, Iodice M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 121105
- [10] Zhang Y, Wen J M, Zhu S N, Xiao M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 183901
- [11] Zhou B, Chen Y L, Li Y A, Li H W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1816 (in Chinese) [周波, 陈云琳, 黎远安, 李海伟 2010 物理学报 **59** 1816]
- [12] Li J G, Chen Y L, Zhang J H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 124210 (in Chinese) [李建光, 陈云琳, 张进宏 2010 物理学报 **61** 124210]

A study of two-dimensional hexagonal phase array grating in MgO:LN based on the Talbot effect*

Fan Tian-Wei Chen Yun-Lin[†] Zhang Jin-Hong

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

(Received 22 October 2012; revised manuscript received 22 November 2012)

Abstract

In this paper, theoretical researches on the MgO:LN tunable hexagonal phase array grating based on the Talbot effect were presented. Researches revealed the effects on the intensity distribution of near-field diffraction from array grating duty cycle which is defined as D , phase difference which is defined as $\Delta\varphi$ and the distance coefficient which is defined as β . The results obtained show that good near-field diffraction images can be achieved at $D = 52\%$, $\Delta\varphi = 0.75\pi$, $\beta = 0.2$. Based on the theoretical researches, the tunable hexagonal phase array grating is designed and fabricated from periodically poled MgO:LN crystal. Through experimental test, the Talbot effect diffraction imaging map is successfully obtained at different $\Delta\varphi$ and β , which verifies the results of the theoretical researches.

Keywords: two-dimensional hexagonal phase array grating, MgO:LiNbO₃, talbot effect

PACS: 42.79.Dj, 42.70.Mp, 42.25.Fx

DOI: 10.7498/aps.62.094216

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178052), and the Foundation of Beijing Jiaotong University, China (Grant Nos. 2011JBM122, 2011JBZ013).

[†] Corresponding author. E-mail: ylchen@bjtu.edu.cn