

## 外加电场调制二维六角位相阵列光分束器的研究\*

李建光 陈云琳<sup>†</sup> 张进宏

(北京交通大学理学院, 北京 100044)

(2011年10月11日收到; 2011年11月8日收到修改稿)

本文建立了外加电场调制二维六角位相阵列光分束器的倒格矢理论模型, 利用数值模拟方法开展了阵列光分束器的理论研究, 对可调位相差阵列光分束器进行了分析, 得到了不同分数泰伯距离以及外加电场条件下的光强分布图. 实验设计与制备了砷酸锂二维六角位相阵列光分束器, 并对其进行了 Talbot 衍射光分束实验研究, 当外加电压为 0.5 kV(电场为 1 kV/mm) 时, 观测到了 Talbot 衍射光分束现象, 随着外加调制电场的增大, 其衍射光分束图像越清晰, 该实验结果和理论研究结果相符.

**关键词:** 外加电场调制, 二维六角位相阵列, 光分束器

**PACS:** 42.65.Jx, 42.79.Fm, 42.82.Et

## 1 引言

泰伯 (Talbot) 效应, 即周期性物体的衍射自成像效应, 是一种非常有实用价值的光学衍射现象. 自 1836 年 Talbot 报道了这种周期性物体的衍射自成像以来<sup>[1]</sup>, Talbot 效应已经在光通信<sup>[2]</sup>、光学精密测量<sup>[3,4]</sup>、光信息存储<sup>[5]</sup>、微图形传输<sup>[6]</sup>等领域得到了广泛的应用, 而阵列光分束器则是基于 Talbot 效应研究的一个重要领域. 阵列光分束器, 即是入射光束分割成阵列微光束且保持总光强不变的器件, 它可以高速并行完成光学信息处理, 光功率分配和多通道互连等功能<sup>[7]</sup>. 目前一维阵列光分束器的研究已经比较成熟<sup>[8]</sup>, 二维阵列光分束器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器的研究已显现出其优越的性能<sup>[9]</sup>, 本文研究的是六角阵列结构的非线性光子晶体光分束器. 六角阵列结构在自然界中十分常见, 如蜂窝、石墨、二氧化碳、苯环等均是天然六角阵列结构, 人们发现了这种结构的优越性, 并在光纤耦合器<sup>[10]</sup>、光纤延迟线<sup>[11]</sup>以及多孔逻辑图像处理

器中<sup>[12]</sup>大量应用. 在光分束器中, 六角阵列结构能够很好的利用光能, 如 2002 年 Xi 等设计的基于 Talbot 效应的六角阵列照明光能转换效率理论值和实验值分别为 100%和 90.6%<sup>[13]</sup>. 近年来, 研究工作者们大都采用菲涅耳近似下的傅里叶分析理论对六角阵列光分束器进行理论研究<sup>[7]</sup>, 但利用倒格矢理论对外加电场调制阵列光分束器后场均匀光强分布的理论研究鲜为少见. 外加电场调制位相型阵列光分束器, 可以有效的消除阵列器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分束器的应用提供了新的研究思路, Paturzo 等人<sup>[14,15]</sup>率先利用外加电场调制实现了六角阵列光分束现象, 但所需外加调制电压要高达 3.5 kV 以上时才能观察到较均匀的光波分束现象, 而这不利于微光学阵列器件的使用和光集成. 本文利用倒格矢理论, 建立了外加电场调制阵列光分束器后场均匀光强分布的理论模型, 通过调制外加电场来改变位相差, 从而实现光强的均匀分布. 在此理论研究的基础上, 我们设计与制备了砷酸锂二维六角位相阵列光分束器, 并对其进行了通光实验研究, 在较低外加电压 0.5 kV 调制下, 实现了衍射成像的均匀光强分布, 实验结果和理论研究

\* 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.

<sup>†</sup> E-mail: ylchen@bjtu.edu.cn

结果符合较好。

## 2 理论分析

按照晶体物理学中研究周期结构的方法, 二维周期阵列物体的入射光场复振幅分布  $U(\mathbf{r})$  可以写成一个基元函数和一个晶格阵列函数的卷积形式<sup>[16]</sup>, 基于此模型, 我们得到在分数 Talbot 距离  $Z_\beta = Z_T/\beta$ , ( $\beta = 1, 2, 3, \dots$ ) 处的复振幅分布函数

$$Uz_\beta = u_0(\mathbf{r}) * \text{lattice}(\mathbf{r}, \mathbf{R}_n) * h(\mathbf{r}), \quad (1)$$

其中,  $*$  表示卷积运算,  $u_0(\mathbf{r})$  为基元函数, 即一个六角阵列单元透射光场的复振幅分布;  $\text{lattice}(\mathbf{r}, \mathbf{R}_n)$  定义了一个与晶格阵点一一对应的  $\delta$  函数阵列, 即

$$\text{lattice}(\mathbf{r}, \mathbf{R}_n) = \sum_{n_1} \sum_{n_2} \delta(\mathbf{r} - n_1 \mathbf{a}_1) \times \delta(\mathbf{r} - n_2 \mathbf{a}_2), \quad (2)$$

式中矢量  $\mathbf{R}_n = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2$  为指向所有晶格阵点的位置矢量 (或称为正格式),  $n_1, n_2$  取整数,  $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$  是两个不共线的矢量, 称为点阵基元原胞的基矢;  $h(\mathbf{r})$  为采用傍轴近似后的光学传递函数, 且

$$h(\mathbf{r}) = \exp(ikz_\beta) \cdot \frac{i}{\lambda z_\beta} \exp\left(-i\pi \frac{|\mathbf{r}|^2}{\lambda z_\beta}\right), \quad (3)$$

式中, 波矢  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , 对于二维六角形结构的阵列光分束器,  $Z_T = \frac{3\Delta^2}{2\lambda}$ <sup>[17]</sup>,  $\Delta$  为六角阵列中相邻两阵点的最小距离, 如图 1(a) 中所示  $\Delta = \Delta_x = \frac{\Delta_y}{\sqrt{3}}$ .

对于由非线性光子晶体制备的位相型阵列光分束器, 由于非线性效应的存在, 在  $z$  轴方向上对晶片外加电场以后可以对其不同区域间的位相差进行调节, 从而改变其透过率分布, 实现 Talbot 效应的外加电场调制。

图 1(a) 中, 未加电场时黑色部分和白色部分之间的位相差为  $2\Delta\varphi$ , 其中  $\Delta\varphi$  可以由  $\lambda\Delta\varphi 2\pi = \pm[d\Delta n + (n_0 - 1)d_{33}V]$  得到<sup>[16]</sup>, 式中  $V$  为外加电场,  $\lambda$  为入射光波长,  $d$  是晶片厚度,  $d_{33}$  为铌酸锂压电系数,  $n_0$  是晶片未加电场时  $\lambda$  入射光的折射率,  $\Delta n = -(1/2d)r_{13}n_0^3V$  是外加电场  $V$  时的折射率改变值,  $r_{13}$  是铌酸锂的线性电光系数。

在  $Z = 0$  平面上, 复振幅等于入射光场和阵列光分束器透过率的乘积, 即  $u_0(x, y) = At_0(x, y)$ , 采

用平面波入射光源时  $A = 1$ , 故  $u_0(x, y) = t_0(x, y)$ , 本文只讨论平面波入射光的情形。

计算基元函数  $u_0(\mathbf{r})$  时, 只需给出包含有一个六角形的最小单元的透过率即可, 将图 1(a) 中的周期阵列进行单元划分, 得到一个最小的矩形单元, 如图 1(b) 所示。

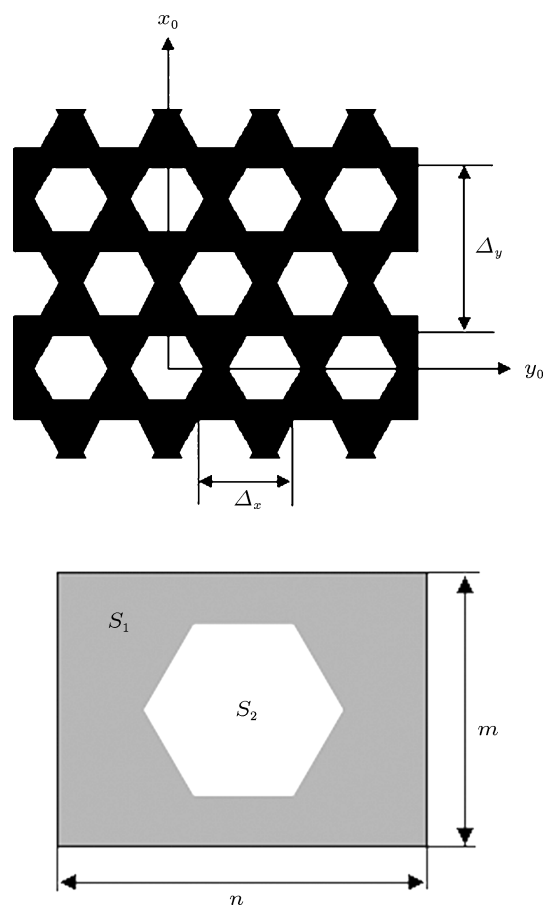


图 1 (a) 二维六角位相阵列光分束器; (b) 矩形六角单元

图 1(b) 中  $m, n$  分别为矩形的宽和长, 且满足  $n = \sqrt{3}m = \Delta$ , 设  $S_1, S_2$  分别为矩形中透过率相等的点的集合,  $P$  为矩形中任意一点, 则矩形单元在  $Z = 0$  处的复振幅分布可以表示为<sup>[15]</sup>

$$u_0(\mathbf{r}) = \begin{cases} \exp(-i\Delta\varphi), & P \in S_1, \\ \exp(i\Delta\varphi), & P \in S_2. \end{cases} \quad (4)$$

基于以上分析, 我们对可调位相差二维六角位相阵列光分束器进行了数值模拟, 得到了不同分数 Talbot 距离以及电压条件下的光强分布图。

模拟中的参数设置为:  $\Delta = 35 \mu\text{m}$ , 六角形边长  $l = 4 \mu\text{m}$ , 入射光波长  $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ , 晶片

厚度为 500  $\mu\text{m}$ . 图 2(a), (b), (c), (d) 的外加电场为 1.2 kV, 图 2(e), (f), (g), (h) 的外加电场为 0.5 kV, 图 2(a) 和 (e), (b) 和 (f), (c) 和 (g), (d) 和 (h) 分别为  $\beta = 2, 3, 5, 10$  时的衍射成像. 从图中可以看出, 随着 Talbot 分数  $\beta$  的增大, 衍射像的周期越来越小, 光强也有所减弱, 说明此模型是可用的, 同时, 外加电场为 1.2 kV 时的光强值明显大于外加电场为 0.5 kV 时的光强值, 这将在下面实验中得到证实.

### 3 实验

我们设计并制备了铌酸锂二维阵列微结构, 如图 3(a) 为六角二维光子晶体微结构阵列分布掩模

板设计图, 理论研究结果得出, 掩模板占空比 (即图 3(a) 中  $a$  与  $\Delta_x$  的比值) 的最佳值为 1/2, 但由于实际畴反转过程中横向扩散的存在, 故而掩模板占空比应设计为 1/3, 极化后得到的二维阵列微结构占空比为 1/2, 如图 3(b) 为极化腐蚀后的微结构阵列图, 然后对铌酸锂二维阵列微结构进行磁控溅射 ITO 镀膜, 最终获得所需光分束器, 光分束器体积大小为 20 mm  $\times$  10 mm  $\times$  0.5 mm, 六角二维阵列周期  $\Delta = 35 \mu\text{m}$ , 正六边形边长为  $l = 18 \mu\text{m}$ ; 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 4 是分光实验光路图, 阵列光分束器的  $\pm Z$  面分别用导线连接到 0—2.0 kV 的外接直流电源上.

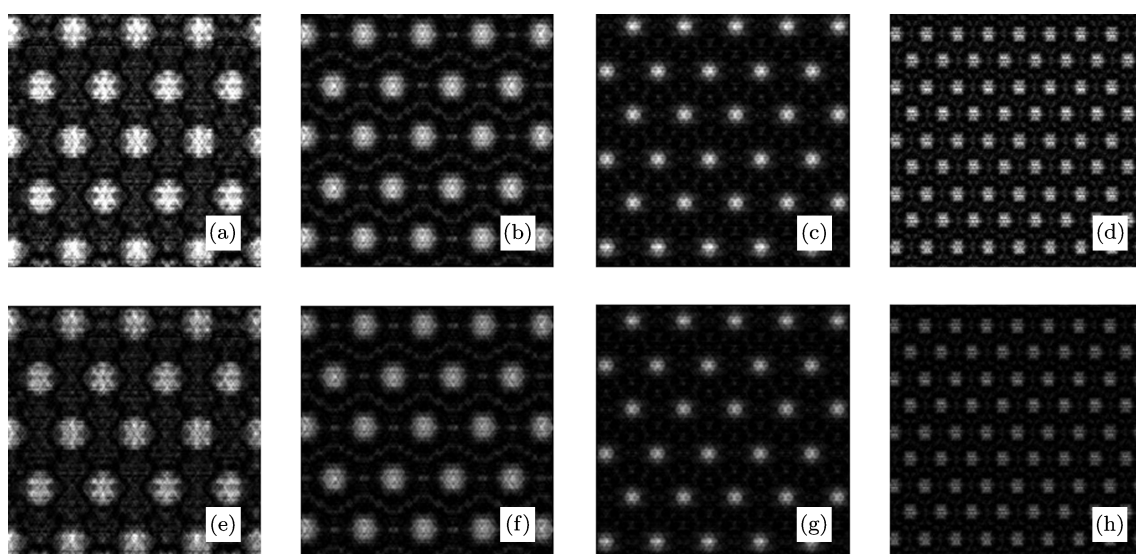


图 2 (a), (b), (c), (d) 的外加电场  $V = 1.2 \text{ kV}$ , (e), (f), (g), (h) 的外加电场  $V = 0.5 \text{ kV}$ ; (a) 和 (e), (b) 和 (f), (c) 和 (g), (d) 和 (h) 分别为  $\beta = 2, 3, 5, 10$  时的衍射成像

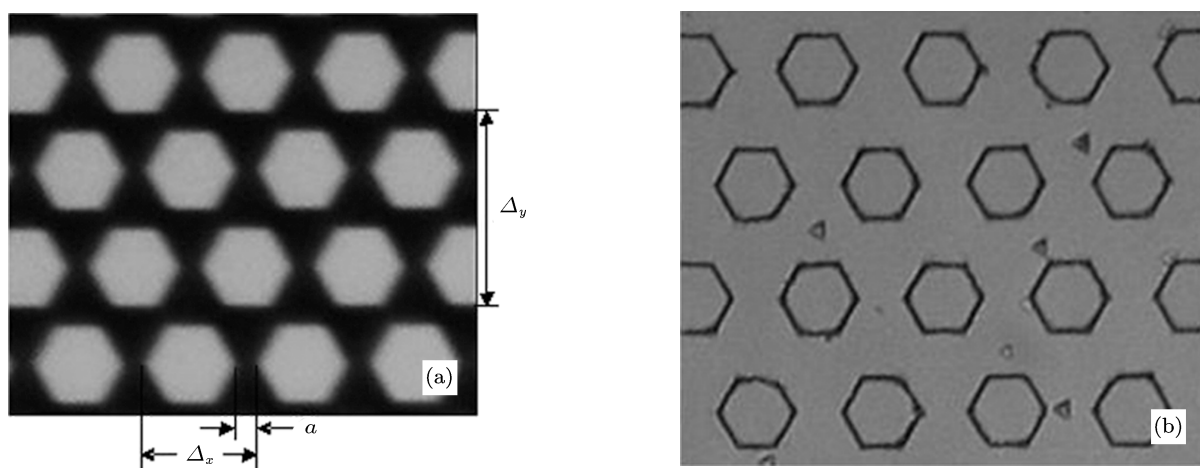


图 3 (a) 六角二维光子晶体微结构阵列分布掩模板设计图示; (b) 极化腐蚀后的 +Z 表面六角二维光子晶体微结构阵列

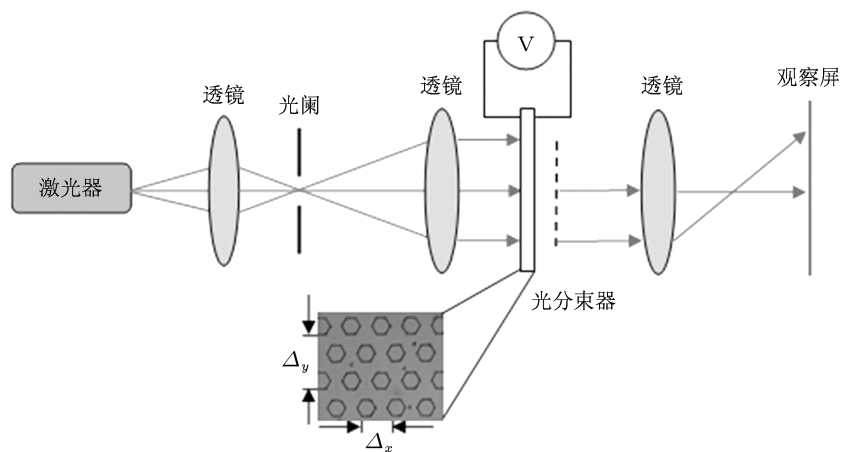


图 4 外加电场调节位相阵列光分束器光路图

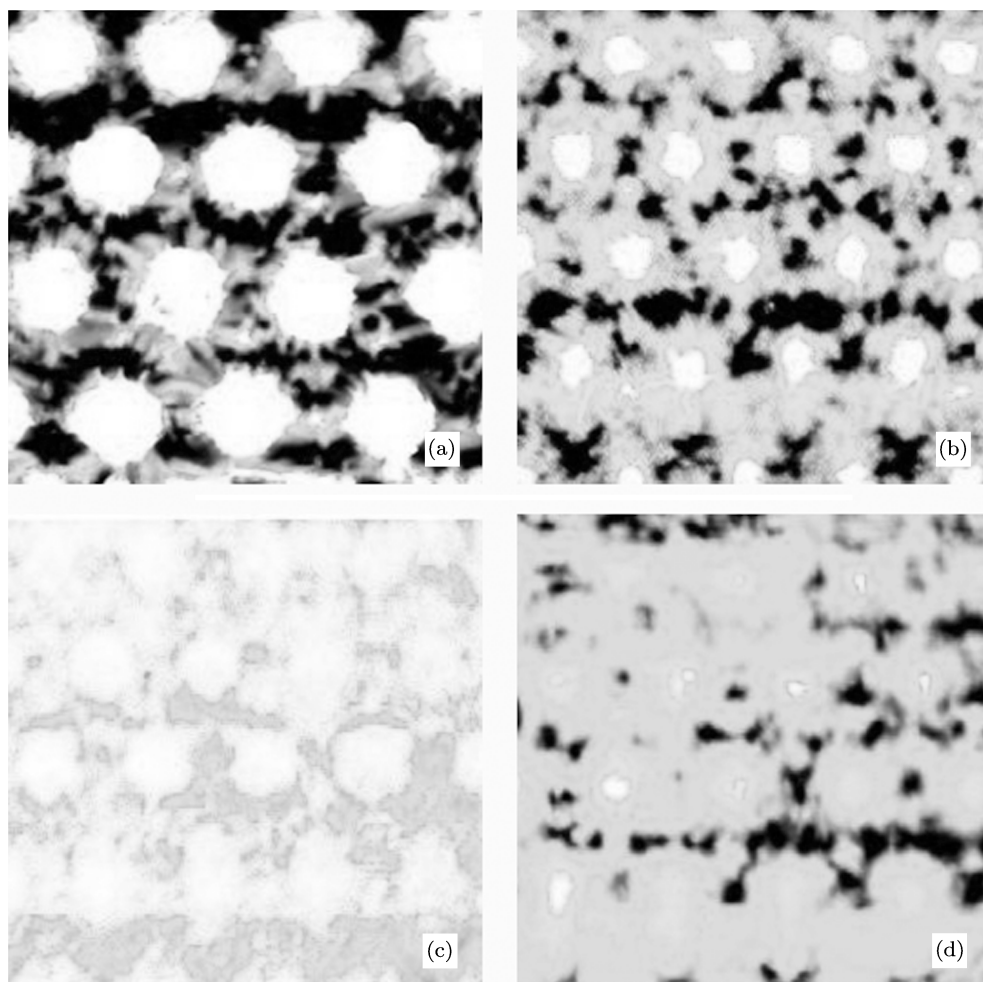


图 5 铌酸锂二维阵列光分束器在不同泰伯距离处和外加电场作用下的衍射成像结果 (a), (b) 的外加电场为 1.2 kV, (c), (d) 的外加电场为 0.5 kV; (a) 和 (c), (b) 和 (d) 分别对应  $\beta = 1, 4$

通过对外加电场的精细调制, 获得了二维六角阵列如图 5 所示的光分束结果. 图 5(a) 和 (b) 的外加电场为 1.2 kV 时的光分束结果, 图 5(c) 和 (d) 是外加电场为 0.5 kV 时的光分束图像, 图 5(a) 和 (c), (b) 和 (d) 分别是  $Z = Z_t = 3.45$  mm,  $Z = Z_t/4 = 0.8$  mm 处的 Talbot 衍射图像及分数 Talbot 衍射图像.

从我们的实验结果可以看出, 当外加电压为 0.5 kV(电场为 1 kV/mm) 时, 就可以初步观测到 Talbot 衍射光分束现象, 而这远远小于文献 [14] 所报道的在 1.75 kV(电场为 3.5 kV/mm) 时才能出现 Talbot 衍射光分束现象. 这主要是由于阵列结构占空比设计的较为合理且结构均匀, 从而使不同区域间的透射光场位相差更容易调节, 进而使光衍射效率增强. 从图 5 中还可以看出, 当外加电场增大时, 其 Talbot 衍射光分束现象明显加强, 而这与前面理论数值模拟结果完全相符.

## 4 结论

本文建立了外加电场调制二维六角位相型阵列光分束器的倒格矢理论分析模型, 数值模拟得到了不同分数 Talbot 距离和外加电场条件下的衍射像图, 在此基础上设计并制备了铌酸锂二维六角阵列光分束器, 由于在阵列光分束器的制备过程中占空比设计合理, 铌酸锂晶体极化阵列微结构均匀, 因此当外加电压为 0.5 kV(电场为 1 kV/mm) 时就可以初步观测到 Talbot 衍射光分束现象, 实现了低电压外加电场调制衍射成像的均匀光强分布, 且远远小于文献 [14] 所报道的在 1.75 kV(电场为 3.5 kV/mm) 时才能出现 Talbot 衍射光分束现象, 当外加电场增大时, 其 Talbot 衍射光分束成像明显加强, 而此实验结果与理论数值模拟结果完全相符.

- [1] Talbot H F 1836 *Philos. Mag.* **9** 401
- [2] Madamopoulos N, Riza N A 2000 *Appl. Opt.* **39** 4168
- [3] Sun C, Shen Y B, Bai J, Hou X Y, Yang G G 2004 *Acta Photon. Sin.* **33** 1214 (in Chinese) [孙琛, 沈亦兵, 白剑, 侯西云, 杨国光 2004 光子学报 **33** 1214]
- [4] Xi P, Zhou C H, Dai E W, Liu L R 2002 *Opt. Express.* **10** 1099
- [5] Zhou C, Stankovic S, Denz C, Tschudi T 1999 *Opt. Commun.* **161** 209
- [6] Ojeda-Castañeda J, Sicre E E 1983 *Opt. Commun.* **47** 183
- [7] Zhou B, Chen Y Y, 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]
- [8] Abramski K M, Baker H J, Colley A D 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 2469
- [9] Zhang Y, Wen J M, Zhu S N, Xiao M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 183901
- [10] Mortimore D B, Arkwright J W 1991 *Appl. Opt.* **30** 650
- [11] Madamopoulos N, Riza N A 2000 *Appl. Opt.* **39** 4168
- [12] Liu L, Liu X, Cui B 1991 *Appl. Opt.* **30** 943
- [13] Xi P, Zhou C H, Dai E W, Liu L R 2002 *Opt. Lett.* **27** 228
- [14] Maddaloni P, Paturzo M, Ferraro P, Malara P, Natale P D, Giofrè M, Coppola G, Iodice M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 121105
- [15] Paturzo M, Natale P D, Nicola S D, Ferraro P 2006 *Opt. Lett.* **31** 3164
- [16] Guo C S, Yin X, Zhu L W, Hong Z P 2007 *Opt. Lett.* **32** 2079
- [17] Winthrop J T, Worthington C R 1965 *Opt. Soc. Am.* **55** 373

# A study of two-dimensional hexagonal phase array optical beam splitter modulated by external electric field\*

Li Jian-Guang Chen Yun-Lin<sup>†</sup> Zhang Jin-Hong

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

(Received 11 October 2011; revised manuscript received 8 November 2011)

## Abstract

In this paper, we establish a theoretical model of reciprocal-lattice vector of the two-dimensional hexagonal phase array optical beam splitter modulated by an external electric field, perform the analysis of the tunable phase-difference array optical beam splitter according to the numerical simulation, and then obtain the images of intensity distribution with different values of fractional Talbot distance and external electric field. The two-dimensional hexagonal phase array optical beam splitter is designed and fabricated by lithium niobate. An experimental study of beam splitting is also given. When the applied voltage is 0.5 kV (with electric field of 1 kV/mm), we observe the phenomenon of the beam splitting in Talbot diffraction. As the external field increases, the images of beam splitting in diffraction become clearer, the experimental results are in agreement with theoretical results.

**Keywords:** external electric field modulation, two-dimensional hexagonal phase array, optical beam splitter

**PACS:** 42.65.Jx, 42.79.Fm, 42.82.Et

---

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

<sup>†</sup> E-mail: ylchen@bjtu.edu.cn