

畴腐蚀掺镁铌酸锂可调阵列光分束器的研究

佟曼 范天伟 陈云琳

Tunable array beam splitter with different domain-etching depth based on MgO-doped lithium niobate crystal

Tong Man Fan Tian-Wei Chen Yun-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 014215 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.014215

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014215>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光纤叠栅的全光纤声光可调谐滤波器的特性分析

[Analysis of all fiber acousto-optic tunable filter based on superimposed fiber Bragg gratings](#)

物理学报.2015, 64(17): 174207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174207>

双层金属纳米光栅的TE偏振光异常透射特性

[Extraordinary optical transmission through bilayer metallic nano-grating for s-polarization light](#)

物理学报.2015, 64(16): 164206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164206>

Bragg反射齿型平面凹面衍射光栅性能研究

[Study on planar concave diffraction grating with Bragg reflector facets](#)

物理学报.2015, 64(15): 154211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154211>

准随机矩形孔阵列透射光栅

[Quasi-random rectangular holes self-supporting transmission grating](#)

基于Bragg反射面结构的衍射光栅设计与研究

[Study of the diffraction grating designed based on the Bragg reflection structure](#)

物理学报.2014, 63(19): 194209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194209>

畴腐蚀掺镁铌酸锂可调阵列光分束器的研究*

佟曼 范天伟 陈云琳†

(北京交通大学理学院, 微纳材料及应用研究所, 北京 100044)

(2015年7月3日收到; 2015年8月28日收到修改稿)

研究了不同畴腐蚀深度的掺镁铌酸锂二维六角可调阵列光分束器的分数 Talbot 效应. 对不同 Talbot 分数 β 和不同畴腐蚀深度的阵列光分束器 Talbot 衍射像进行了数值模拟理论研究. 模拟结果表明, Talbot 分数 β 可以改变 Talbot 衍射像的周期及结构分布, 而畴腐蚀深度可有效调制衍射像的光强分布. 在理论研究的基础上, 设计并制备了具有不同畴腐蚀深度的掺镁铌酸锂二维六角阵列光分束器, 对其在不同 Talbot 分数 β 条件下的分数 Talbot 效应进行了通光实验研究, 实现了畴腐蚀阵列光分束器对近场 Talbot 衍射光强分布的调制, 实验结果与理论研究结果一致.

关键词: Talbot 效应, 掺镁铌酸锂, 畴腐蚀, 光分束

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

DOI: 10.7498/aps.65.014215

1 引言

1836年, Talbot^[1]用一束单色平面光照射到一周周期性光栅上时, 发现在光栅后方沿光轴方向的某些特定位置会出现光栅的自身衍射像, 这种无透镜的衍射自成像现象被定义为 Talbot 效应. Talbot 效应已在光信息存储、原子光学、光学精密测量等^[2-5]领域中得到了广泛应用, 基于 Talbot 效应的阵列光分束器件可用于实现光信息并列高速处理、光功率分配、光互连等^[6,7]多种功能, 因此其在光通信、光存储、光计算、精密测量等现代科技领域中有巨大的应用前景. 在医学及材料学应用领域, 文献^[8-11]对基于 Talbot 效应的 X 射线吸收成像技术的研究也取得了一定成果. 掺镁铌酸锂晶体作为一种最为成功的全能型非线性光学材料^[12], 极好的非线性光学性能以及畴壁扩张速率慢、透光范围广、抗光折变能力强等^[13,14]优点, 使其具有重要的研究意义. 文献^[15-18]对周期极化铌酸锂晶体的二次谐波效应进行了研究, 大大拓展了其在非线性光学领域的应用. 近年来, 对外加电场可调制

相阵列光分束器的研究已取得了一定进展^[19-21], 但是随着集成光学领域的飞速发展, 研究人员已开始转向对不施加外加电场的可调阵列光分束器的研究^[22,23]. 本课题组虽然对不同占空比畴腐蚀结构的阵列光分束器进行了研究^[24], 但并未就畴腐蚀深度对光分束器衍射光强分布的影响进行系统的研究. 由于畴腐蚀会破坏晶体的表面结构, 不利于其在精密光学领域的应用, 因此本文在前期研究基础上, 制备了腐蚀深度分别为 0.21, 0.28 及 0.39 μm 的畴腐蚀可调阵列光分束器, 此时的阵列光分束器可近似对光完全透明, 腐蚀结构对光分束器的光透过率分布影响较小. 同时, 对光分束器分数 Talbot 效应进行了系统的理论和实验研究.

2 理论部分

2.1 Talbot 衍射方程

圆形周期六角排列阵列光分束器的结构分布如图 1 所示, 其中黑色部分代表负畴(畴反转区域), 白色部分代表正畴(畴未反转区域). t_x 和 t_y 分别是阵列光分束器在 x 和 y 方向的周期常数,

* 国家自然科学基金(批准号: 61178052)和教育部博士点基金(批准号: 20130009110008)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ylchen@bjtu.edu.cn

$t_y = \sqrt{3}t_x$, l 为圆形基元直径, 占空比 $D = l/t_x$. 由 Talbot 衍射理论可知, 当波长为 λ 的单色平面光沿 z 轴方向照射到二维六角型阵列光分束器上时, 其 Talbot 距离 Z_T 可表示为 $Z_T = 3t_x^2/(2\lambda)$, Talbot 成像距离可表示为 $Z = \beta Z_T$, 式中 β 称为 Talbot 分数.

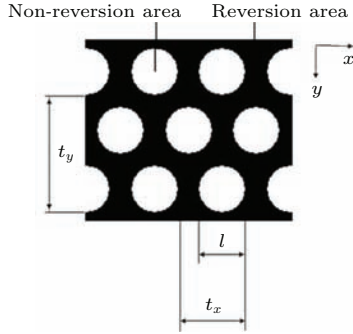


图1 二维六角阵列光分束器结构示意图
Fig. 1. Two-dimensional hexagonal array optical splitter mask template structure.

铌酸锂晶体是铁电晶体, 在铁电晶体中, 自发极化的分子电偶极矩方向排列一致形成小区域电畴. 铌酸锂晶体的自发极化主要由 Li^+ 和 Nb^{5+} 相对于氧平面的位移造成, 当正电荷的重心沿晶体的 $+z$ 轴方向偏移时, 自发极化 P_s 就表现为正向. 我们通过外加电场极化法, 对晶体施加足够的能量来克服氧平面的能级壁垒, 使正电荷重心移动到 $-z$ 方向, 使 P_s 反转 180° , 得到相反极性的畴 [25,26]. 分子电偶极矩取向不同, 正、负畴面在酸中被腐蚀的速率也不同, 负 z 面腐蚀速率要快于正 z 面腐蚀速率. 故经酸中腐蚀后正负极性的畴就显现出来, 呈现出高低不同的表面结构. 当一束单色平面光入射到畴腐蚀阵列光分束器上时, 光分束器正负畴之间会产生一个 $\Delta\varphi$ 的位相差, 位相差 $\Delta\varphi$ 与腐蚀深度 d 有关, 两者的关系表达式如 (1) 式所示:

$$\Delta\varphi = \pi(n - 1)d/\lambda, \quad (1)$$

式中, n 为掺镁铌酸锂晶体对 λ 入射光的折射率, 由于周期性畴腐蚀结构对晶体折射率的影响很小 [27], 在此认为折射率 n 不变, 其大小为 2.1; d 为晶体的畴腐蚀深度.

由菲涅耳衍射理论可知, z 平面处的近场 Talbot 衍射光场强度分布 $u_z(\Delta\varphi, x, y)$ 可用傅里叶级数展开为

$$u_z(\Delta\varphi, x, y) = \sum_{mn} E_{mn}(\Delta\varphi) \exp\left[\frac{i2\pi D}{l}\left(mx + \frac{ny}{\sqrt{3}}\right)\right]$$

$$\times \exp\left[\frac{i\pi\beta}{2}(3m^2 + n^2)\right], \quad (2)$$

式中 m, n 取正整数, 系数 E_{mn} 可表示为

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

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

2.2 数值模拟

由 (2)–(4) 式可以看出光分束器近场衍射光强分布 u_z 与位相差 $\Delta\varphi$ 、占空比 D 及 Talbot 分数 β 有关, 我们前期已经对不同占空比下的光分束器 Talbot 衍射光强分布进行了细致研究, 结果表明在占空比 D 为 52% 时效果最佳 [19]. 本文主要研究位相差 $\Delta\varphi$ 和 Talbot 分数 β 对衍射光强分布的影响, 而腐蚀深度 d 直接改变位相差 $\Delta\varphi$. 通过 MATLAB 数值模拟出不同腐蚀深度 d 及 Talbot 分数 β 下光分束器的近场 Talbot 光衍射像, 模拟参数选择如下: 入射光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 光分束器圆形基元直径 $l = 15.6 \mu\text{m}$, 阵列结构周期 $t_x = 30 \mu\text{m}$, $t_y = \sqrt{3}t_x = 52 \mu\text{m}$, 占空比 $D = l/t_x = 52\%$, Talbot 距离 $Z_T = 2.54 \text{ mm}$.

为研究不同 Talbot 分数 β 对近场 Talbot 光衍射光强分布的影响, 通过数值模拟得到了位相差 $\Delta\varphi$ 为 π 时, 不同 Talbot 分数 β 条件下的近场衍射光强分布模拟图, 如图 2 所示. 图 2 (a)–(d) 分别是 β 为 0.2, 0.33, 0.5, 1.0 时的近场衍射图样, (a')–(d') 为对应的三维 (3D) 模式光强分布图, (a'')–(d'') 为对应的点阵基元相对光强剖面图. 由图可见, 当 Talbot 分数 $\beta = 1.0$ 时, 成像距离恰好位于一倍 Talbot 距离处, 此时的衍射自成像现象称为整数 Talbot 效应, 这时的衍射图像与原阵列结构完全一致, 点阵周期及点阵基矢均无变化, 且单元点阵的光强分布十分均匀, 无任何衍射花纹. 随着 Talbot 分数 β 的改变, Talbot 光衍射图像的周期及结构分布发生了明显变化. 图 2 (a) 为 Talbot 分数 $\beta = 0.2$ 时的衍射光场分布结果, 衍射图像的阵列周期减小为原阵列光分束器的 $1/5$, 且单元点阵

的光强分布变得十分尖锐. 图 2(b) 为 Talbot 分数 $\beta = 0.33$ 时的光分束器近场衍射图像, 此时衍射像的周期变为原型的 $1/\sqrt{3}$, 且六角型点阵结构的基矢有一 90° 旋转, 结构成蜂窝状. 图 2(c) 为 $\beta = 0.5$ 时的衍射像, Talbot 衍射光场的周期变为原结构的一半, 此时相邻圆形基元之间的距离为 $14.4 \mu\text{m}$, 而

两个圆形基元的半径之和为 $15 \mu\text{m}$, 大于圆形点阵间距, 相邻圆斑的边缘会出现叠加干涉, 此时单元点阵的光强分布变得不均匀, 圆心处的光强要暗于四周光强, 此时的分数 Talbot 衍射图像最为清晰、明亮.

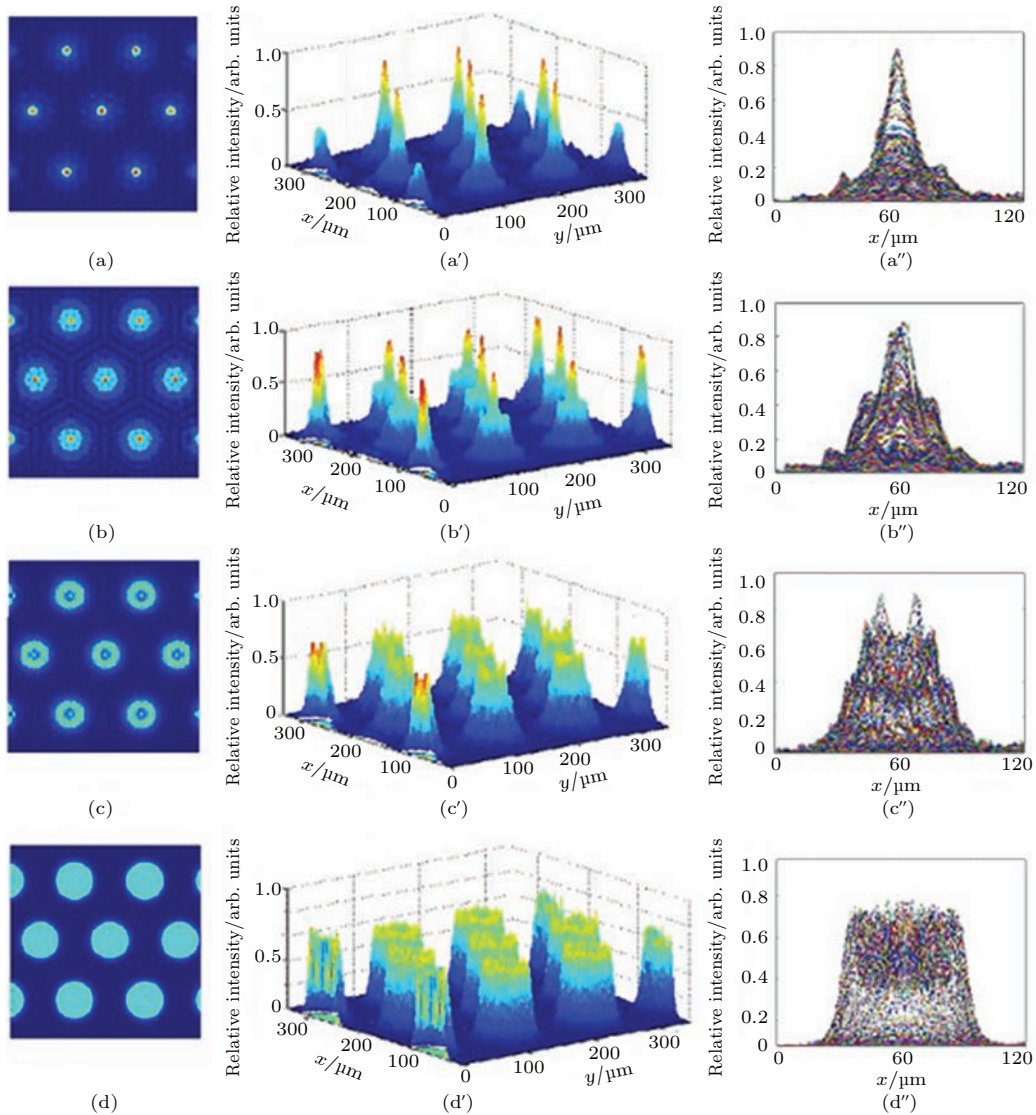


图 2 (网刊彩色) (a)–(d) 分别是 β 为 0.2, 0.33, 0.5, 1.0 时的近场衍射图样; (a')–(d') 为对应的 3D 模式光强分布图; (a'')–(d'') 为对应的点阵基元相对光强剖面图

Fig. 2. (color online) (a)–(d) Theoretical diffraction images with $\beta = 0.2, 0.33, 0.5, 1.0$; (a')–(d') maps of 3D diffraction intensity distribution; (a'')–(d'') profiles of unit lattice relative intensity distribution.

由 Talbot 衍射光强分布方程 (2) 可知, 光分束器衍射光强分布 u_z 还与位相差 $\Delta\varphi$ 有关, 而不同腐蚀深度会改变光分束器表面所产生的位相差 $\Delta\varphi$, 从而实现畴腐蚀阵列光分束器对衍射光强分布的可调. 对三种不同畴腐蚀深度的阵列光分束器的分数 Talbot 效应进行了数值模拟分析, 腐蚀深度分别为 $0.21, 0.28$ 及 $0.39 \mu\text{m}$, 其对应的位相差分别为

$0.47\pi, 0.63\pi$ 和 0.88π , 代入到数值模拟研究模型, 模拟结果如图 3 所示. 图 3(a)–(d) 是位相差固定为 $\Delta\varphi = 0.47\pi$, Talbot 分数 $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 时的数值模拟近场光衍射像, (a')–(d') 是位相差 $\Delta\varphi = 0.63\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 处的近场光衍射模拟像, (a'')–(d'') 则是位相差 $\Delta\varphi = 0.88\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 时的 Talbot 光衍射模拟像.

由模拟结果可以看出, 在相同 Talbot 分数 β 处的模拟衍射像, $\Delta\varphi = 0.88\pi$ ($d = 0.39 \mu\text{m}$) 时的衍射像花纹较另外两者都更为清晰, 图像光强分布更为明

亮, 分数 Talbot 效应更为显著, 即畴腐蚀阵列光分束器的 Talbot 衍射光场相对光强分布随腐蚀深度的增加而变大 (位相差为 $0-\pi$ 范围内).

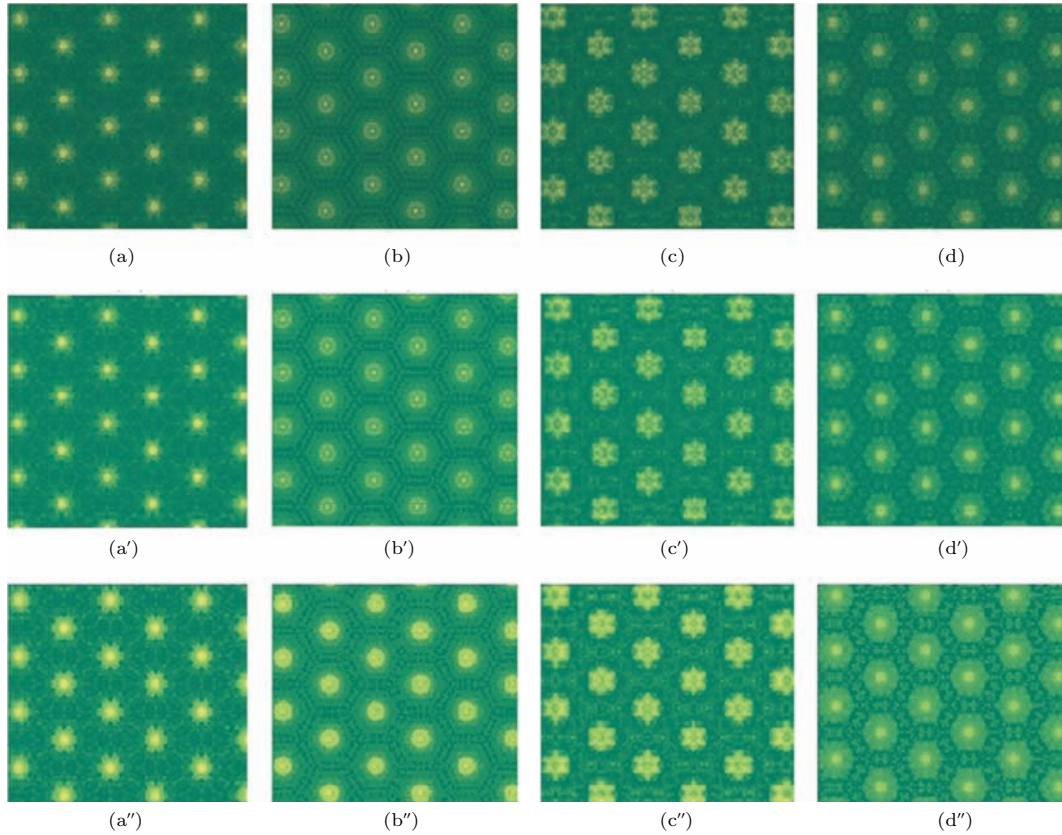


图3 (网刊彩色) (a)—(d) 位相差为 $\Delta\varphi = 0.47\pi$, Talbot 分数 $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 时的数值模拟近场光衍射像; (a')—(d') 位相差 $\Delta\varphi = 0.63\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 处的近场光衍射模拟像; (a'')—(d'') 位相差 $\Delta\varphi = 0.88\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 时的 Talbot 光衍射模拟像

Fig. 3. (color online) (a)—(d) Theoretical diffraction images with $\Delta\varphi = 0.47\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$; (a')—(d') theoretical diffraction images with $\Delta\varphi = 0.63\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$; (a'')—(d'') theoretical diffraction images with $\Delta\varphi = 0.88\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$.

3 实验结果与分析

基于数值模拟理论研究结果, 在本课题组前期对周期极化掺镁铌酸锂晶体制备工艺研究的基础上^[28], 制备了占空比为 52% 的圆形基元六角排列畴腐蚀掺镁铌酸锂阵列光分束器, 样品尺寸为 $30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$, 阵列结构周期 $t_x = 30 \mu\text{m}$, $t_y = \sqrt{3}t_x = 52 \mu\text{m}$, 圆形基元直径 $l = 14.4 \mu\text{m}$, 占空比 $D = l/t_x = 52\%$. 将样品在室温下浸于氢氟酸中腐蚀 30 min, 由于氢氟酸对不同极性的铁电畴腐蚀速率和程度不同, 因此晶体表面会出现周期性高低起伏的腐蚀结构. 图 4(a) 是在 $100\times$ 光学显微镜下得到的畴腐蚀表面结构分布图, 图 4(b) 是在 $400\times$ 光学显微镜下的畴腐蚀表面

结构分布图. 从图 4 可以看出, 晶体表面形成了周期排列的均匀圆形腐蚀结构. 通过 NS-3500 三维激光扫描显微镜测得畴腐蚀阵列结构平均腐蚀深度为 $0.21 \mu\text{m}$, 3D 激光扫描图如图 5 所示.

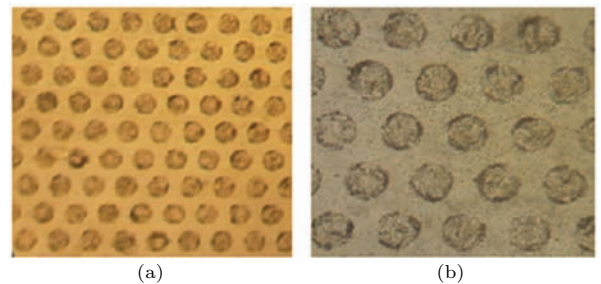


图4 (网刊彩色) 晶体腐蚀后 +z 面畴结构分布图
Fig. 4. (color online) Microscopic images after HF solution etching on +z surface.

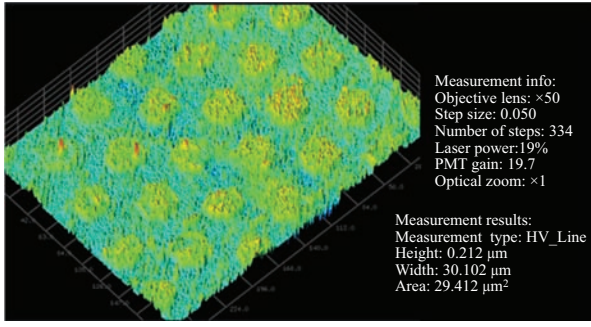


图5 (网刊彩色) 畴腐蚀结构3D激光扫描图

Fig. 5. (color online) Optical splitter's 3D structure.

对畴腐蚀掺镁铌酸锂二维阵列光分束器进行透光实验, 实验装置如图6所示. 光源采用波长为532 nm的半导体激光器, 最大输出功率为2 W, 激光器后放置一直径为0.8 mm的小孔光阑, 通过小孔衍射对光斑进行整形, 光再经过一焦距为190 mm的透镜, 畴腐蚀二维阵列光分束器置于透

镜后方的焦平面上. 阵列光分束器后放置一40×显微物镜, 用来放大光分束器Talbot衍射图像, 物镜可通过高精度三维调节支架控制其与光分束器间的距离, 该距离即为Talbot成像距离, 移动物镜至分数Talbot成像距离处即可观察阵列光分束器的分数Talbot效应. 在物镜后方放置一电荷耦合器件(CCD)摄像机用于记录衍射像, CCD尺寸为1/3 in (1 in = 2.54 cm), 像素数为130万dpi, 将其连接到计算机, 以传输Talbot衍射场的光强分布.

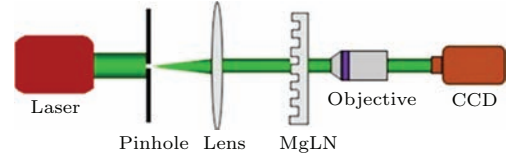


图6 (网刊彩色) 畴腐蚀光分束器Talbot效应透光实验装置图

Fig. 6. (color online) Experimental setup of selective-etching optical splitter.

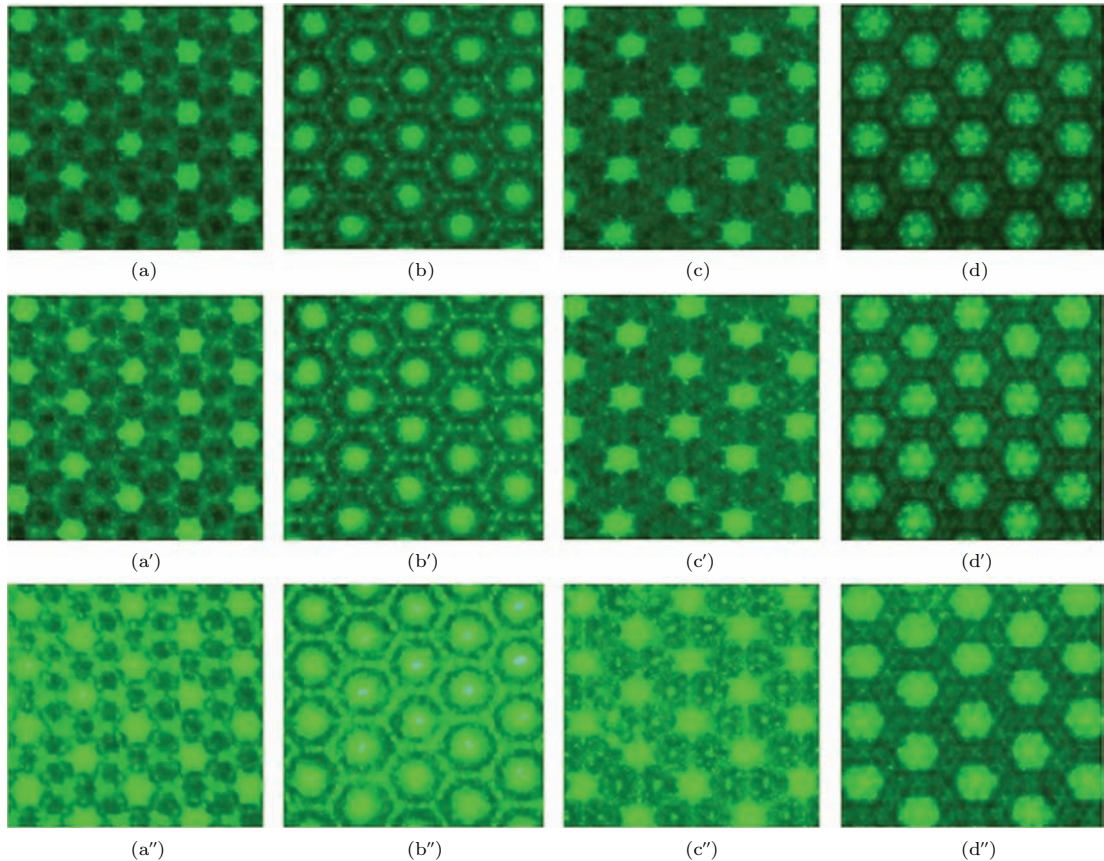


图7 (网刊彩色)(a)–(d) 位相差为 $\Delta\varphi = 0.47\pi$, Talbot 分数 $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 时的近场光衍射实验图; (a')–(d') 位相差 $\Delta\varphi = 0.63\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 时的近场光衍射实验图; (a'')–(d'') 位相差 $\Delta\varphi = 0.88\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 时的 Talbot 光衍射实验图

Fig. 7. (color online) (a)–(d) Experimental diffraction images with $\Delta\varphi = 0.47\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$; (a')–(d') experimental diffraction images with $\Delta\varphi = 0.63\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$; (a'')–(d'') experimental diffraction images with $\Delta\varphi = 0.88\pi$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$.

为进一步实验研究畴腐蚀结构对光分束器 Talbot 衍射成像的影响, 将制备好的腐蚀深度为 $0.21\ \mu\text{m}$ 的光分束器继续浸于氢氟酸中冷腐 15 min 及 30 min, 得到平均畴腐蚀深度 d 为 $0.28\ \mu\text{m}$ 及 $0.39\ \mu\text{m}$ 的阵列光分束器. 在不同分数 Talbot 距离处, 不同畴腐蚀深度下的 Talbot 衍射实验成像结果如图 7 所示. 图 7(a)—(d) 是腐蚀深度 $d = 0.21\ \mu\text{m}$, Talbot 分数 $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 时的 Talbot 衍射图样. 图 7(a')—(d') 是腐蚀深度 $d = 0.28\ \mu\text{m}$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 时的 Talbot 光衍射图样, 图 7(a'')—(d'') 则是腐蚀深度 $d = 0.39\ \mu\text{m}$, $\beta = 0.1, 0.2, 0.33, 0.4$ 时的近场衍射图样. 由图 7 可见, 腐蚀深度可有效地对光分束器 Talbot 衍射像的光强分布进行调制, 随着 d 的增加光分束器的 Talbot 光衍射图像效果更佳, 点阵平均相对光强更大, 衍射花纹更为清晰, 分数 Talbot

效应更为明显. 由于畴腐蚀会破坏晶体表面结构, 不利于其在集成光学的应用, 因此对更大的腐蚀深度 d 我们不做研究, 本实验中我们在较小腐蚀深度 d 下得到了清晰的衍射图样. 对比模拟结果, 实验图像与其符合得很好.

为再次验证阵列光栅 Talbot 光衍射成像的实验结果, 我们使用光学分析软件对 $\beta = 0.33$, 位相差 $\Delta\varphi = 0.35\pi, 0.5\pi, 0.75\pi$ 时的光栅近场 Talbot 光衍射图像中的单个点阵光斑进行了光强分布分析, 如图 8 所示. 图 8(a)—(c) 分别为 β 固定为 0.33, 畴腐蚀深度 d 为 $0.21, 0.28, 0.39\ \mu\text{m}$ 时的光栅近场 Talbot 光衍射实际通光图像, (a')—(c') 为衍射图像中红框内单元点阵光斑对应的相对光强分布分析结果. 由图 8 可知, 随着腐蚀深度的增加, 相对光强增大, 透过率增高.

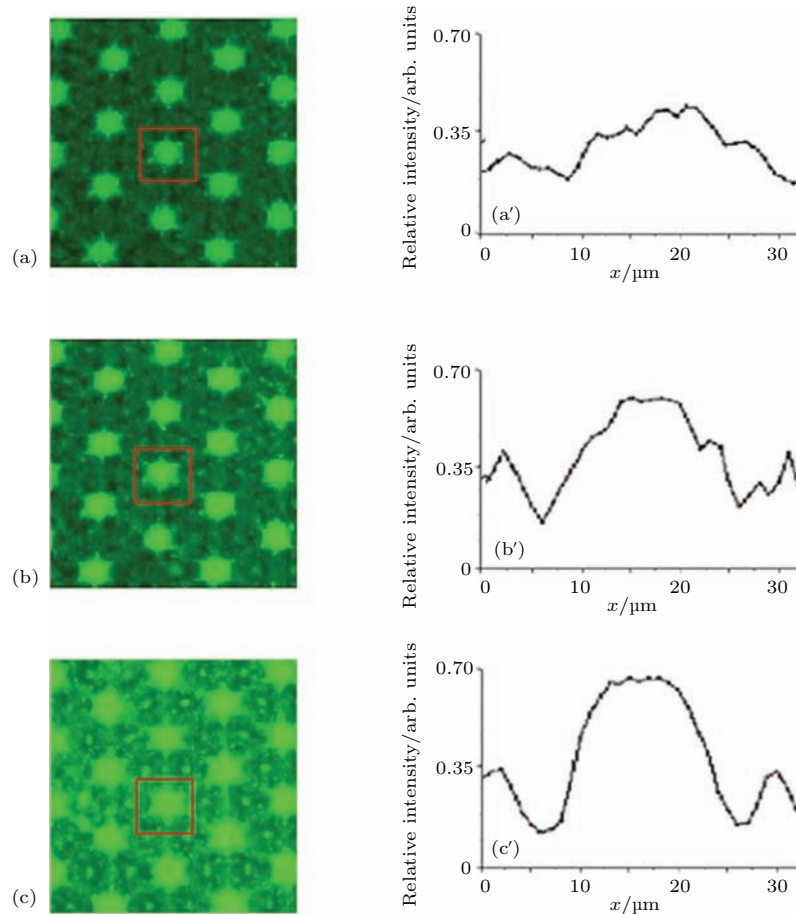


图 8 (网刊彩色) (a)—(c) 分别为 $\beta = 0.33$, 畴腐蚀深度 d 为 $0.21, 0.28, 0.39\ \mu\text{m}$ 时的光栅近场 Talbot 光衍射实际通光图像; (a')—(c') 为衍射图像中红框内单元点阵光斑对应的相对光强分布
Fig. 8. (color online) (a)—(c) Near-field fractional Talbot images at $d = 0.21, 0.28, 0.39\ \mu\text{m}$, while $\beta = 0.33$, respectively; (a')—(c') the cross sections' relative intensity along y - z plane of the selected spots.

4 结 论

本文对掺镁铌酸锂畴腐蚀可调阵列光分束器的分数 Talbot 效应进行了研究. 模拟了不同 Talbot 分数 β 及腐蚀深度 d 条件下的畴腐蚀光分束器 Talbot 衍射图像, 发现随着腐蚀深度 d 的增加, 衍射图样更为清晰, 透过率增高, 分数 Talbot 效应更为显著. 在理论研究的基础上, 实验设计并制备了占空比 D 为 52% 且腐蚀深度分别为 0.21, 0.28 及 0.39 μm 的掺镁铌酸锂畴腐蚀阵列光分束器, 对其进行通光实验研究, 证实腐蚀深度可以有效地对光分束器 Talbot 衍射像光强分布进行调制, 实验结果很好地印证了模拟研究结果. 与此同时, 为减小畴腐蚀对晶体表面结构的破坏, 本文制备的光分束器可在较小的腐蚀深度下得到清晰的分数 Talbot 衍射像, 有利于其在集成光学领域的进一步发展.

参考文献

- [1] Talbot H F 1836 *The London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science* **9** 401
- [2] Zhou C H, Stankovic S, Denz C, Tschudi T 1999 *Opt. Commun.* **161** 209
- [3] Cohen J L, Dubetsky B, Berman P R, Cohen J L, Dubetsky B, Berman P R 1999 *Phys. Rev. A* **60** 3982
- [4] Kohno T, Suzuki S, Shimizu K 2007 *Phys. Rev. A* **76** 053624
- [5] Kung H L, Bhatnagar A, Miller D A B 2001 *Opt. Lett.* **26** 1645
- [6] Takahashi H, Oda K, Toba H 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 1097
- [7] Mawst L J, Botez D, Roth T J, Simmons W W, Peterson G, Jansen M, Wilcox J Z, Yang J J 1989 *Electron. Lett.* **25** 365
- [8] Lei Y H, Liu X, Guo J C, Zhao Z G, Niu H B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 042901
- [9] Wang Z L, Gao K, Chen J, Ge X, Zhu P P, Tian Y C, Wu Z Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 118703
- [10] Wen M W, Yang X W, Wang Z S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 114102 (in Chinese) [闻铭武, 杨笑微, 王占山 2015 物理学报 **64** 114102]
- [11] Liu X S, Li E R, Zhu P P, et al. 2010 *Chin. Phys. B* **19** 040701
- [12] Chen Y L, Guo J, Lou C B 2004 *J. Crystal Growth* **263** 427
- [13] Chen Y L, Lou C, Xu J, Chen S L, Kong Y F, Zhang G Y, Wen J P 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 3350
- [14] Paturzo M, De Natale P, de Nicola S 2006 *Opt. Lett.* **31** 3164
- [15] Wen J, Zhang Y, Zhu S N, Xiao M 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 275
- [16] Li G H, Jiang H L, Xue X Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 064201
- [17] Chen Z, Liu D, Zhang Y, Wen J, Zhu S N, Xiao M 2012 *Opt. Lett.* **37** 689
- [18] Liu D, Zhang Y, Chen Z, Wen J, Xiao M 2012 *J. Opt. Soc. Am. B* **29** 3325
- [19] Fan T W, Chen Y L, Zhang J H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094216 (in Chinese) [范天伟, 陈云琳, 张进宏 2013 物理学报 **62** 094216]
- [20] 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 2012 物理学报 **61** 124210]
- [21] Zhang J H, Chen Y L 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 32 (in Chinese) [张进宏, 陈云琳 2014 光学学报 **34** 32]
- [22] Capmany J, Fernández-Pousa C R, Diéguez E 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 5145
- [23] Grilli S, Ferraro P, de Natale P 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 233 106
- [24] Fan T W, Chen Y L 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 259 (in Chinese) [范天伟, 陈云琳 2014 光学学报 **34** 259]
- [25] Qin Y, Zhang J, Yao W, Wang C, Zhang S 2015 *J. Am. Ceram. Soc.* **98** 1027
- [26] Boes A, Steigerwald H, Crasto T, Wade S A, Limboeck T, Soergel E, Mitchell A 2014 *Appl. Phys. B* **115** 577
- [27] Chen Y, Liu S W, Wang D, Chen T, Xiao M 2007 *Appl. Opt.* **46** 7693
- [28] Chen Y, Lou C, Xu J 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 3350

Tunable array beam splitter with different domain-etching depth based on MgO-doped lithium niobate crystal*

Tong Man Fan Tian-Wei Chen Yun-Lin[†]

(Institute of Applied Micro-Nano Materials, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 3 July 2015; revised manuscript received 28 August 2015)

Abstract

The Talbot effect is a self-imaging phenomenon of near-field diffraction. When a plane wave is incident on a periodic diffraction grating, the image of the grating is repeated at regular distances away from the grating plane. A Talbot array illuminator is a device that splits singular light beam into an array of beams with periodical optical intensity based on Talbot effect. LiNbO₃ (LN) crystal is a kind of practicable material for a Talbot array illuminator due to its perfect optical characteristics. MgO-doped LiNbO₃ (MgLN) crystal shows shorter absorption edge wavelength and higher resistance to photorefractive damage than LN. Up to now, the usefulness and simplicity of Talbot effect have still aroused the interest of many scholars.

In the conventional method, a Talbot array illuminator is fabricated by using high external electric field to modulate the phase difference. However, essentially, high external electric field restricts the Talbot array illuminator to applications in optical integration and optical micro structure devices. Now we are looking forward to a new way which avoids using high external electric field.

In this paper, we systematically study the two-dimensional (2D) hexagonal tunable array beam splitter, which is fabricated by domain-etching in MgLN crystal, and its fractional Talbot effect. The self-imaging phenomenon caused by Talbot effect in the Fresnel field for this phase array coherently illuminated is theoretically analyzed according to Fresnel diffraction theory. We numerically simulate the light intensity distributions of Talbot diffraction image under different values of Talbot coefficient β and different values of domain-etching depth. The simulation results show that β can change the array period and the structure distribution of the fractional Talbot diffraction image, and the domain-etching depth can modulate the light intensity distribution of diffraction image. Based on the numerical simulation results, the 2D hexagonal array beam splitters are fabricated with different values of domain-etching depth. The fractional Talbot diffraction images of array splitters are obtained at different values of β through the optical experiments. The results show that domain-etching depth can effectively modulate the intensity distribution of diffraction image, becoming a tunable array beam splitter successfully. The experimental results agree well with the simulation results. The theoretical and experimental results show that the optimal self-image visibility can be obtained at a Talbot coefficient β of 0.5 and a domain-etching depth of 0.39 μm , while the duty cycle is 52%. Moreover, a good self-image pattern is also observed under thinner domain-etching depth, which is beneficial to optical integration and micro optical devices.

Keywords: Talbot effect, MgO-doped lithium niobate, domain-etching, beam splitting

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

DOI: 10.7498/aps.65.014215

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178052) and the Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (Grant No. 20130009110008).

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