

畴腐蚀掺镁铌酸锂光分束器的泰伯效应研究

范天伟 陈云琳

(北京交通大学理学院, 北京 100044)

摘要 基于菲涅耳衍射理论分析了畴腐蚀二维周期结构掺镁铌酸锂晶体光分束器的泰伯效应, 对光分束器不同占空比 D 及泰伯分数 β 条件下的近场光衍射自成像进行了数值模拟研究。设计并制备了不同占空比的畴腐蚀掺镁铌酸锂晶体光分束器, 并对其进行了分数泰伯光衍射自成像的实验研究, 得到了不同泰伯分数 β 条件下的近场光衍射强度分布。结果表明, 当光分束器占空比 $D=52\%$ 、泰伯分数 $\beta=2$ 时, 近场衍射自成像效果最佳, 实验结果与理论研究结果相符。

关键词 光学器件; 衍射; 泰伯效应; 掺镁铌酸锂; 畴腐蚀; 光分束器

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0923002

Research of Talbot Effect of Optical Beam Splitter Fabricated by Selective Etching of MgO-doped LiNbO₃ Crystal

Fan Tianwei Chen Yunlin

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

Abstract The Talbot effect of the two-dimensional optical beam splitter fabricated by selective etching of MgO-doped LiNbO₃ (MgLN) crystal is analysed based on the Fresnel diffraction theory. Numerical simulation is applied to study the intensity distribution of near-field optical diffraction under various duty cycle D and Talbot distance coefficient β . Based on the theoretical result, the selective etching optical beam splitter is designed and fabricated with various duty cycles. Through optical experiments, the fractional Talbot diffraction imaging map is obtained at different Talbot distances. The results obtained show that good near-field diffraction images can be achieved at $D=52\%$, $\beta=2$, which verifies the results of the numerical simulation research.

Key words optical devices; diffraction; Talbot effect; MgO-doped LiNbO₃; selective etching; optical beam splitter

OCIS codes 230.1360; 110.6760; 160.3730

1 引言

1836 年, Talbot^[1] 用一束单色平面光源照射一个周期性光栅, 在光栅后方一些特定距离处可以观察到光栅的自身像, 这种现象被定义为泰伯效应。泰伯效应广泛存在于周期性阵列器件中, 由于泰伯衍射自成像的精细与简洁, 仍旧吸引着大量国内外研究人员的关注。近期泰伯效应已经成功拓展到等离子基元^[2]、X 射线成像技术^[3-4]、波导阵列中的分

立系统^[5]、量子光学^[6]等方面。其中, 光分束照明器是泰伯效应的一个重要的应用领域, 它可以一束单色平面光转化为周期性的光强分布。这种器件可实现光信息并行高速处理、微图形传输和光功率分配等功能^[7-9], 并且在光通信、光计算和光电精密测量^[10-12]等领域也有着巨大的应用空间。二维周期性阵列光分束器的制作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不尽相同, 由于周

收稿日期: 2014-03-03; **收到修改稿日期**: 2014-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61178052)、教育部博士点基金(20130009110008)

作者简介: 范天伟(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事微纳结构非线性光子晶体器件方面的研究。

E-mail: 12121695@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光子学技术、微纳材料与环境工程等方面的研究。E-mail: ylchen@bjtu.edu.cn(通信联系人)

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

期极化掺镁铌酸锂(MgO:LiNbO₃, MgLN)晶体具有极好的非线性光学性能,同时具有较低的矫顽场、抗光损伤性能强、透光范围广、畴壁扩张速率慢等优点^[13-14],使其成为制作泰伯光分束器件的首选材料。近年来,研究人员对外加电场可调相位阵列光分束器进行了系统研究^[15],文献[16]通过调制外加电场实现了相位从0到2π的连续可调衍射光强分布,并得出光分束器占空比D=52%、相位差Δφ=0.75π、泰伯分数β=0.2时的光分束器近场衍射光图像效果最佳。随着集成光学领域的飞速发展,人们更加期待不施加外调制电场下的阵列光分束器。文献[17]分析了畴腐蚀一维光栅的衍射成像。文献[18]对畴腐蚀二维周期结构光栅的制作进行了研究,但并未将其与泰伯效应联系,也未对其近场光衍射自成像进行理论和实验分析。

本文在前期研究基础上,基于菲涅耳衍射理论分析了畴腐蚀二维周期阵列光分束器的泰伯效应,开展了不同占空比D及不同泰伯分数β条件下的畴腐蚀光分束器近场光衍射自成像的数值模拟研究,在理论研究的基础上,分别设计并制备了占空比D为52%、75%及85%的畴腐蚀掺镁铌酸锂阵列光分束器,并对其进行了通光实验研究,实验结果与理论分析相符。

2 理论分析

2.1 畴腐蚀光分束器的衍射方程

畴腐蚀光分束器的制备是利用铁电晶体浸于酸性腐蚀溶液中,腐蚀速度与偶极矩取向有关的特点,不同极性的畴被腐蚀的程度不一样。因此,畴腐蚀光分束器上只是出现了周期性高低起伏的腐蚀坑,对光是完全透明的,不影响器件后光场光振幅的分

布。图1是畴腐蚀二维周期结构光分束器的数值模拟模型,为圆形六角排列点阵结构,黑色部分和白色部分都是透光的,分别代表晶体相反极性的畴,当一束平面光入射到畴腐蚀光分束器上时,将产生非线性效应,因此样品中白色的正畴与黑色的负畴之间会有一个Δφ=π的相位差。t_x和t_y分别是x方向和y方向上的光栅常数,t_y=√3t_x,l为光分束器阵列圆形基元直径的长度,光分束器占空比表达式为D=l/t_x。当波长为λ的平面抽运光沿z轴方向入射到畴腐蚀光分束器上时,其泰伯距离可表示为Z_t=3t_x²/λ,z方向上不同衍射观察屏的位置可用分数泰伯距离表示Z=Z_t/β,其中β为泰伯分数。

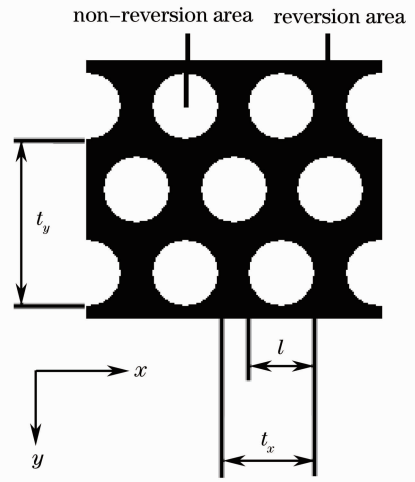


图1 光分束器理论分析模型

Fig.1 Theoretical analysis model of the optical beam splitter

根据前期研究可知,当一束单色平面光照射在畴腐蚀二维周期光分束器上时,在z平面处的衍射自成像光场强度u_z(Δφ,x,y)可通过傅里叶级数表示为

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

式中m,n取正整数,系数A_{mm}可通过以下两式表示:

$$A_{00} = \exp(-i\Delta\varphi) + c[\exp(i\Delta\varphi) - \exp(-i\Delta\varphi)], \quad (2)$$

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

2.2 数值模拟与讨论

通过(1)~(3)式可知,近场衍射光强分布u_z(Δφ,x,y)与光分束器占空比D及泰伯分数β有

关。因此,以(1)~(3)式为理论研究依据,经过计算机数值模拟计算出在不同条件下的光分束器近场光衍射自成像结果。模拟参数设置如下:入射光波长

$\lambda=532\text{ nm}$;六角结构阵列物体基元为圆形,其直径 $l=25\text{ }\mu\text{m}$;阵列结构周期 $t_x=50\text{ }\mu\text{m}$;光分束器占空比 $D=50\%$;泰伯距离 $Z=14.1\text{ mm}$ 。

图2为不同分数泰伯距离成像时,数值模拟的近场光衍射自成像结果,图2(a)~(c)分别为 $\beta=2,3,5$ 时的衍射像。由此可见,当泰伯分数 $\beta=2$ 时,衍射像的光场分布最清晰且明亮。随着 β 的改变,周期阵列仍表现为六角型阵列结构,但衍射像周期却发生了变化。图2(a)为 $1/2$ 泰伯距离, $Z_t=7.05\text{ mm}$ 处的衍射像,可以看出,衍射光场的周期变为输入面上阵列

周期的 $1/2$,并且由于相邻圆斑边缘的重合,出现相干叠加,圆斑之间相干叠加的结果如图2所示。图2(b)为 $1/3$ 泰伯距离, $Z_t=4.7\text{ mm}$ 处的近场衍射像,衍射像的周期变为原物体的 $1/\sqrt{3}$,且六角型点阵结构的基矢有发生 30° 旋转。图2(c)为 $1/5$ 泰伯距离, $Z_t=2.82\text{ mm}$ 处的光场分布图,可见其周期减小为原型的 $1/5$ 。文献[19]运用衍射角谱理论同样分析了六角型周期阵列物体的泰伯效应,其结果与本文结论一致。

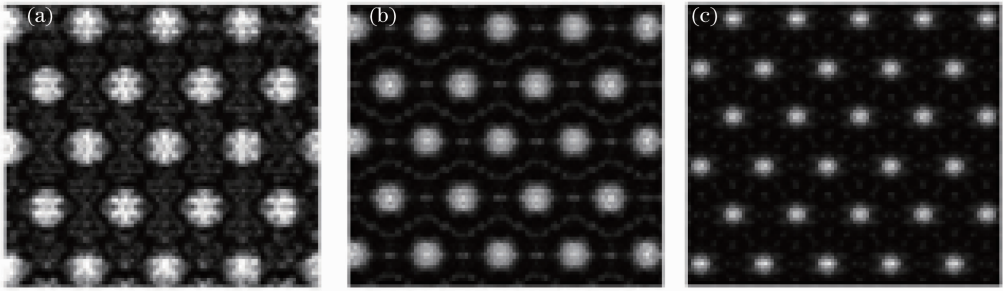


图2 不同分数泰伯距离衍射成像时数值模拟的近场光衍射自成像结果。(a) $\beta=2$; (b) $\beta=3$; (c) $\beta=5$

Fig.2 Simulated diffraction intensity distributions with different β . (a) $\beta=2$; (b) $\beta=3$; (c) $\beta=5$

图3为泰伯分数 β 分别为 $2,3,5$ 时光分束器近场光衍射自成像的相对光强随占空比 D 变化的计算机模拟结果。相对光强定义为 $I_r = I_s / I_b$, 其中 I_s, I_b 分别代表圆斑光强与背景光强。

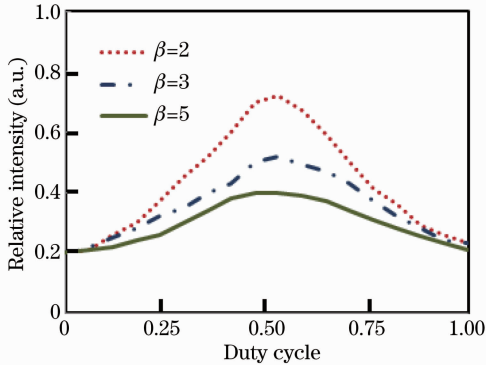


图3 光衍射图像相对光强曲线

Fig.3 Relative intensity curves of diffraction images

数值模拟结果表明,对不同泰伯分数 β ,当光分束器占空比 $D=52\%$ 时,其后近场光衍射图像的相对光强达到最大值,因为此时阵列中的圆形未反转区域与非圆形反转区域面积近似相等,正、负相位差相等。同时,还可得出后近场光衍射图像的相对光强度随 β 的增大而减小,因此当 $\beta=2$ 时,光衍射图像具有最大相对光强,其数值为 0.72 。

3 实验结果与讨论

3.1 周期极化掺镁铌酸锂晶体

根据上述理论分析结果,实验设计并制备了不同占空比的畴腐蚀二维周期掺镁铌酸锂光分束器,二维圆形六角排列点阵分布掩膜板的设计结构如图1所示。实验所使用的样品是掺镁摩尔分数为 5% 的 z 切铌酸锂晶体,其体积大小为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,光分束器周期为 $t_x=50\text{ }\mu\text{m}$, $t_y=\sqrt{3}t_x=86.6\text{ }\mu\text{m}$,圆形基元直径 l 分别为 $26, 37.5, 42.5\text{ }\mu\text{m}$,对应占空比 D 分别为 $52\%, 75\%$ 和 85% 。采用半导体光刻工艺^[20]分别在样品的 $+z$ 面镀膜厚度为 200 nm 且结构分布如图1所示的铝电极,同时在一 $-z$ 面镀膜厚度为 200 nm 的平面铝电极,晶体两端用导线接到脉冲高压电源上进行极化,输入波形由一任意波形发生器产生,极化装置如图4所示。为了有效降低晶体开关电场大小,从而降低极化电压,减小晶体击穿的可能性,需将晶体置于温控油锅中,在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行高温极化。

极化波形如图5所示,它由3部分组成,分别为预极化阶段、极化阶段和稳定化阶段。在晶体两端施加高电压的过程中,瞬间过大的传输电流会引起晶格温度的骤然上升,从而导致晶体碎裂,因此需要设计一带有斜率可调的电压波形前沿,即预极化阶

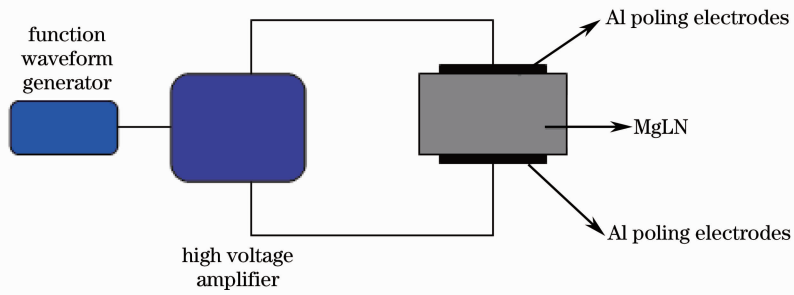


图 4 周期极化掺镁铌酸锂晶体实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of periodic poling of MgLN crystal

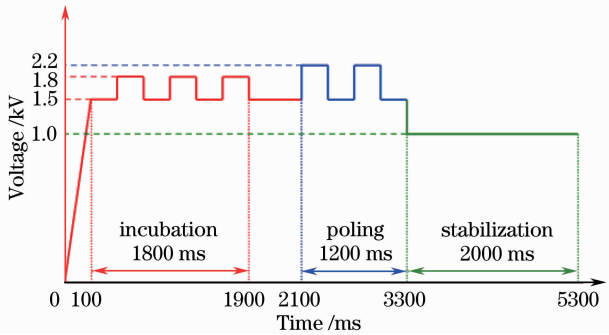


图 5 周期极化掺镁铌酸锂晶体极化波形图

Fig. 5 Waveform for the periodic poled MgLN crystal

段,该阶段前沿斜率为 5%,峰值电压为 1.8 kV,持续时间为 1800 ms。当电压上升到晶体的矫顽场电压后,进入电畴极化反转过程,计算得出晶体理论反转所需电荷量,设计出极化阶段,其峰值电压为 2.2 kV,持续时间为 1200 ms。电畴在反转电压的作用下发生反转后,若立即撤销电场,电畴会发生反弹,因此为了获得完全稳定的电畴反转晶体,需要在极化过程结束后施加一定时间低于极化反转电压的稳定电压。

在极化反转电压作用下,在晶体表面首先生成畴核,畴核沿晶体纵向完全生长后,畴壁进入横向扩张过程。为得到准确的畴腐蚀光分束器占空比,在掩膜板的设计过程中需考虑畴的横向扩张,在此不做详细论述。极化后的晶体最终形成占空比分别为 52%,75%和 85%的周期阵列结构,由于氢氟酸对不同极性的铁电畴腐蚀的速率与程度不一样,因此将样品浸于氢氟酸中进行约 16 h 的腐蚀,最终腐蚀效果如图 6 所示。图 6(a)~(c)是在 10×光学显微镜下得到的占空比 D 分别为 52%,75%及 85%的畴腐蚀结构分布图,图 6(d)~(f)则是在 40×光学显微镜下得到的各自占空比的畴腐蚀结构分布图。图 7 是占空比 D 为 52%的畴腐蚀结构扫描电子显微镜(SEM)图像,经测量,圆形基元直径为 26 μm ,腐蚀深度为 55 μm 。

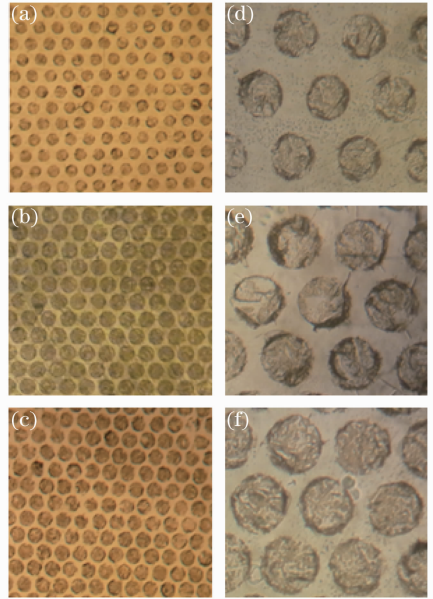


图 6 经氢氟酸腐蚀后的晶体 +z 面畴结构分布图

Fig. 6 Microscopic images after HF solution etching on +z surface

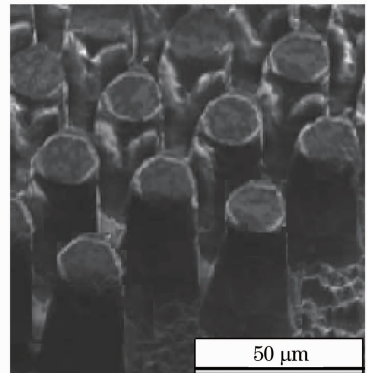


图 7 占空比 D 为 52%的畴腐蚀结构扫描电子显微镜图

Fig. 7 SEM image of inverted domain corrosion pattern with the duty cycle of 52%

3.2 透光实验

图 8 是畴腐蚀二维周期光分束器泰伯衍射成像的实验光路图。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。激光器出射的

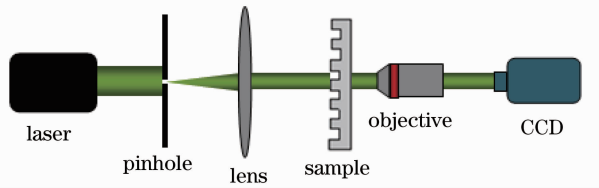


图8 光分束器泰伯衍射成像光路图

Fig. 8 Experimental setup of Talbot diffraction imaging of the optical beam splitter

光束经孔径大小为 0.8 mm 的小孔光阑后,通过一个焦距为 190 mm 的透镜聚焦,样品置于透镜后焦点上。准直后的激光光束打在样品上的光斑直径大约为 $900\text{ }\mu\text{m}$,能够照明约 400 个阵列基元。由于该透镜的共焦距离为 190 mm ,且晶体样品的厚度仅有 0.5 mm ,因此入射到样品表面的光波可近似为平行光。光路中有一个 $40\times$ 物镜,它的作用是放大功能,其数值孔径为 0.65 ,物镜可通过一个高精度三维调节支架控制,物镜与样品间的距离即成像距离,移动物镜就可观察到不同泰伯分数条件下的衍射成像情况。物镜后方固定一个电荷耦合元件(CCD)照相机[CCD尺寸为 $1/3\text{ inch}$ ($1\text{ inch}=2.54\text{ cm}$),像素数为 $130\times 10^4\text{ dpi}$ (dpi指每英寸的像素)],连接至计算机以传输衍射光场分布信号,为防止 CCD 损坏,激光器发出的光需先经过 3 个光衰减片后才能照射在样品上。

对不同分数泰伯距离条件下的畴腐蚀光分束器进行通光实验的近场光衍射图像如图 9 所示。其中图 9(a)~(c)分别为 $\beta=2,3,5$, 占空比 $D=52\%$ 时的光分束器近场光衍射图像,图 9(d)~(f)为占空比 $D=75\%$, $\beta=2,3,5$ 时的近场光衍射图像,图 9(g)~(i)为占空比 $D=85\%$, $\beta=2,3,5$ 时的近场光衍射图像。

由图 9 可以看出,占空比为 52% 时,当泰伯分数 $\beta=2$,即在 $1/2$ 泰伯距离处时,衍射成像周期减为原来的一半,周期减半后相邻两个点阵基元之间的距离变为 $25\text{ }\mu\text{m}$,其两圆斑半径之和为 $26\text{ }\mu\text{m}$,大于基元点阵间距 $25\text{ }\mu\text{m}$,因此相邻圆斑发生了重叠;对占空比 75% 及 85% 的光分束器,由于其两圆斑半径之和更大,重叠效果更显著,表明将有更多圆斑之间发生了相干叠加现象。对于 $1/3$ 泰伯距离处的衍射光图像,其衍射成像周期减为原来的 $1/\sqrt{3}$,同时点阵结构的基矢发生 30° 旋转,此时光圆斑的叠加使其正好围成六边形图案。在 $1/5$ 泰伯距离处,由于成像周期减小为原来的 $1/5$,相邻圆斑间距仅为 $10\text{ }\mu\text{m}$,相比于圆斑直径小很多,此时的相干叠加现

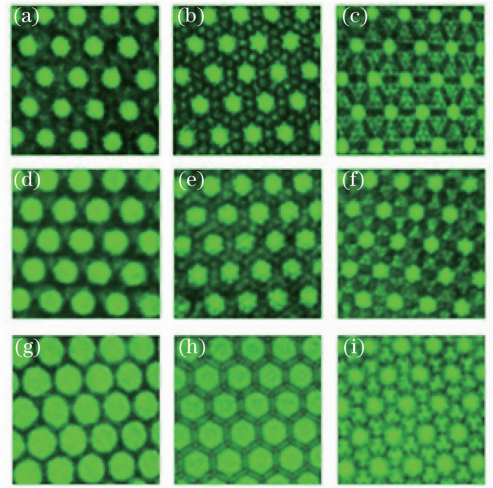


图9 不同占空比与分数泰伯距离条件下的光分束器近场光衍射图像

Fig. 9 Experimental diffraction intensity distributions with different D and β

象最明显。

通过对比图 9 可知,当光分束器占空比 $D=52\%$ 时,光衍射自成像最清晰,分数泰伯成像效果最佳。在泰伯分数 $\beta=2$ 距离处可以清晰观察到泰伯衍射自成像现象,相比于泰伯分数 β 为 3 和 5 时的光衍射成像效果更佳,这是因为随着 β 的增大,阵列结构周期的减小,相邻圆斑之间发生的相干叠加现象越来越强,导致图像的光强要进行重新分配,从而出现与原物不完全相同的阵列结构,这些实验结果与前面理论数值模拟结论相符。

4 结 论

对基于泰伯效应的畴腐蚀二维周期结构光分束器的制备与其分数泰伯光衍射自成像进行了研究。理论研究了不同光分束器占空比 D 及泰伯分数 β 对畴腐蚀二维周期光分束器衍射自成像光场分布的影响,数值模拟得到了光分束器的最佳成像条件是占空比 $D=52\%$,泰伯分数 $\beta=2$,此时光分束器后近场衍射光场强度最大。在此理论研究基础上,设计并制备了不同占空比的畴腐蚀二维周期掺镁铌酸锂光分束器,并对其进行了分数泰伯光衍射自成像的实验研究,得到了不同占空比 D 和不同泰伯分数 β 条件下的近场光衍射图像,当占空比 $D=52\%$ 且泰伯分数 $\beta=2$ 时,光分束器泰伯衍射图像最为清晰、明亮。实验结果与理论数值模拟研究结果完全一致。此外,由于酸性腐蚀溶液对相反极性的铁电畴结构的腐蚀速率不同,可使用该类溶液对具有铁电畴结构的晶体器件表面进行加工,从而制备出任意二维

衍射光分束器件,这对其在集成光学领域的进一步研究提供了重要的理论与应用价值。

参 考 文 献

- 1 H F Talbot. Facts relating to optical science [J]. Phil Mag, 1836, 9(56): 401-407.
- 2 M R Dennis, N I Zheludev, F Javier Garcia de Abajo. The plasmon Talbot effect [J]. Opt Express, 2007, 15(15): 9692-9700.
- 3 Han Yueping, Chen Zhiqiang, Zhang Li, *et al.*. Developments of X-ray grating imaging based on Talbot interferometry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070002.
韩跃平, 陈志强, 张 丽, 等. 基于 Talbot 干涉的 X 射线光栅成像技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070002.
- 4 Huang Jianheng, Lin Danying, Liu Zhenwei, *et al.*. Analysis and simulation of mid-energy X-ray grating phase contrast microscopy imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1034001.
黄建衡, 林丹樱, 刘振伟, 等. 中能 X 射线光栅相衬显微成像分析及模拟[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1034001.
- 5 R Iwanow, D A May-Arrijoja, D N Christodoulides, *et al.*. Discrete Talbot effect [J]. Phys Rev Lett, 2005, 95(5): 053902.
- 6 H Jin, P Xu, J S Zhao, *et al.*. Observation of quantum Talbot effect from a domain-engineered nonlinear photonic crystal [J]. Appl Phys Lett, 2012, 101: 211115.
- 7 D Duchesne, R Morandotti, J Azaña. Temporal Talbot phenomena in high-order dispersive media [J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(1): 113-125.
- 8 M Testorf, T J Suleski, Y C Chuang. Design of Talbot array illuminators for three-dimensional intensity distributions [J]. Opt Express, 2006, 14(17): 7623-7629.
- 9 H Hamam. Array illuminator with arbitrary fan-out [J]. Appl Opt, 2006, 45(25): 6525-6532.
- 10 Wu Bo, Yu Jinlong, Wang Zheng, *et al.*. Optical pulse trains with multiplied repetition frequency based on fractional Talbot effect in fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1249-1253.
吴 波, 于晋龙, 王 争, 等. 应用光纤分数塔尔博特效应产生重复频率倍频的光脉冲序列[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1249-1253.
- 11 C Canalias, V Pasiskevicius. Mirrorless optical parametric oscillator [J]. Nat Photonics, 2007, 1(8): 459-462.
- 12 Li Yao, Bai Jian, Deng Yan, *et al.*. Study on a wavefront detection system for long-focus lens by sub-wavefront scanning [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2590-2595.
李 遥, 白 剑, 邓 燕, 等. 子波面扫描法长焦距透镜波面检测系统研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2590-2595.
- 13 Y L Chen, J Guo, C B Lou, *et al.*. Crystal growth and characteristics of 6.5 mol% MgO-doped LiNbO₃ [J]. J Crystal Growth, 2004, 263(1): 427-430.
- 14 Yunlin Chen, Cibo Lou, Jingjun Xu. Domain switching characteristics of the near stoichiometric LiNbO₃ doped MgO [J]. J Appl Phys, 2003, 94(6): 956-958.
- 15 M Paturzo, P De Natale, S De Nicola, *et al.*. Tunable two-dimensional hexagonal phase array in domain-engineered Z-cut lithium niobate crystal [J]. Opt Lett, 2006, 31(21): 3164-3166.
- 16 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.
- 17 J Capmany, C R Fernández-Pousa, E Diéguez, *et al.*. Surface-relief diffraction gratings based on selective etching of periodically poled lithium niobate [J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(25): 5145-5147.
- 18 S Grilli, P Ferraro, P De Natale, *et al.*. Surface nanoscale periodic structures in congruent lithium niobate by domain reversal patterning and differential etching [J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(23): 233106.
- 19 Song Haicheng, Zhu Linwei, Wang Shaoqing, *et al.*. Study on the Talbot effect of a hexagonal periodic array object [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s205002.
宋海程, 朱林伟, 王少卿, 等. 六角型周期阵列物体的塔尔博特效应研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s2): s205002.
- 20 Yao Da, Liu Xin, Yue Shizhong. Trends of lithography technology and equipments for semiconductor fabrication [J]. Semiconductor Technology, 2008, 33(3): 193-196.

栏目编辑: 史 敏