

# 相位片角向衍射产生拉盖尔-高斯光束的实验研究<sup>\*</sup>

任煜轩<sup>1)2)</sup> 吴建光<sup>2)</sup> 周小为<sup>3)</sup> 付绍军<sup>3)</sup> 孙 晴<sup>2)</sup> 王自强<sup>2)</sup> 李银妹<sup>1)2)4)†</sup>

1) (中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室, 合肥 230026)

2) (中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

3) (中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

4) (中国科学技术大学安徽省光电子科学与技术重点实验室, 合肥 230026)

(2008 年 12 月 29 日收到; 2009 年 11 月 6 日收到修改稿)

设计了一种角向分布的相位片, 利用离子束刻蚀技术加工成  $0$  和  $\pi$  二级的相位片. 利用角向衍射理论对相位片的衍射场分析表明, 衍射场为拓扑指数相反的两束拉盖尔-高斯光束的叠加场. 用直径为  $4\text{ mm}$  的近平行光照射相位片, 获得径向指数为零, 拓扑荷相反的叠加拉盖尔-高斯光场. 采用较大孔径的光束入射时, 仍为拓扑荷相反的两束光的叠加, 但径向指数会发生变化.

**关键词:** 信息光学, 拉盖尔-高斯光束, 相位片, 离子束刻蚀

**PACC:** 4230, 6110D, 4240E

## 1. 引 言

圆偏振光具有自旋角动量, 可以用来俘获和旋转微小粒子. 而具有轨道角动量的光束也可以用来俘获和旋转微小粒子<sup>[1, 2]</sup>, Allen 等<sup>[3]</sup>发现具有  $\exp(i l \varphi)$  形式相位因子光束的每个光子具有轨道角动量  $l\hbar$ , 其中  $l$  是轨道角动量量子数, 典型光束是拉盖尔-高斯 (LG) 光束. LG 光束是指光场振幅分布满足 LG 方程的光束. 它的典型特征是光场中具有相位不确定且光波振幅为零的点, 这些点称作相位奇点<sup>[4]</sup> (phase singularity), 围绕相位奇点的光束呈现螺旋波前的特性. 有螺旋波前的光束聚焦后形成一个圆环而不是实心点, 它携有轨道角动量, 且能够传递给被照明的物体. 这种呈现螺旋波前特性的 LG 光束在光镊俘获金属纳米粒子<sup>[1, 5]</sup>、无干涉径向偏振光<sup>[6]</sup>、微机电系统驱动器、下一代 X 射线自由电子激光<sup>[7]</sup>、显微镜相位对比成像<sup>[8, 9]</sup>及自由空间量子光通信<sup>[10]</sup>等方面具有重要的应用价值.

常见的激光器输出多为基模高斯光束, 实验上为得到 LG 光束需要将高斯模通过某种装置转换成所需的 LG 模. 常用的方法有柱面镜光束变换<sup>[11, 12]</sup>、计算全息产生衍射光栅<sup>[13]</sup>、动态光调制<sup>[14]</sup>和螺旋相位片<sup>[15]</sup>等方法. 利用柱面透镜系统虽然可以将厄米-高斯 ( $HG_n^m$ ) 光束转换成相应的  $LG_p^l$  ( $l = n - m, p = \min(m, n)$ ) 光束, 但是对其制作及调整要求较高; 计算全息一级衍射效率较低, 多数能量集中在零级且伴有寄生高级衍射<sup>[16]</sup>; 而螺旋相位片可以承受较高功率激光, 且在小的带宽范围内运用到飞秒激光上无需色散补偿元件<sup>[17]</sup>, 然而制作连续改变相位的螺旋板需要采用套刻工艺<sup>[18]</sup>, 加工环节多, 制作周期长, 进而影响控制精度和衍射效率. 本文通过简化的螺旋片设计二元化的掩模版, 利用离子束刻蚀技术将掩模版图形转移到石英玻璃基片上形成浮雕结构的二元相位片. 根据角向衍射理论, 准直的高斯光束经过该相位片衍射的光场分布为拓扑指数相反的两束 LG 光的叠加态. 分别给出了理论模拟和实验结果, 二者符合较好.

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA021811, 2007AA021809)、中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (批准号: KJ9X2-YW-H-10) 和中国科学技术大学研究生创新研究基金资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: liyinmei@ustc.edu.cn

## 2. 相位片的制作

LG 光的特性是具有螺旋波阵面, 故 LG 光可以通过设计一个螺旋型的相位片加载到准直的高斯光束中形成. 然而, 随角向连续渐变的螺旋相位片的制作因需要采用套刻工艺而非常难加工. 我们提出基于角向周期性的 0 和  $\pi$  调制的相位片来实现叠加的 LG 光束.

### 2.1. 相位片产生原理

与普通高斯光束聚焦后形成焦点不同, 具有螺旋波前的光束聚焦后形成的是一个圆环. 它携有轨道角动量, 且能够通过传递给被照明的粒子而引起特定粒子的旋转. 聚焦足够强时, 这样的螺旋模构成称为光学旋涡<sup>[13]</sup>, 它可以用傍轴亥姆霍兹方程的本征解 LG 方程来表达. 这些本征模的径向依赖关系为<sup>[19]</sup>

$$u_p^l(r, z) = (-1)^p \left( \frac{\sqrt{2}r}{\omega} \right)^l L_p^l \left( \frac{2r^2}{\omega^2} \right) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right), \quad (1)$$

其中  $L_p^l(x)$  是径向指数为  $p$  的广义拉盖尔多项式,  $\omega$  是  $z$  处光束半径. 螺旋模  $\psi_l(\mathbf{r})$  的主要特征<sup>[19]</sup> 是其横向相位分布正比于与光轴所夹的极角  $\theta$ ,

$$\psi_l(\mathbf{r}) = u_p^l(r, z) \exp(-ikz) \exp(il\theta). \quad (2)$$

这里  $\mathbf{k} = k\hat{z}$  是沿  $z$  轴传播的光波波矢, 整数旋转指标  $l$  称为拓扑指数, 它决定着光学螺旋的角向分布特征.

光学旋涡可以由高斯光束通过附加如下式的相位调制<sup>[20]</sup> 的相位片来实现:

$$\varphi_l(\boldsymbol{\rho}) = l\varphi, \quad (3)$$

其中  $\varphi$  是相位片平面的极角坐标. 用  $a(\varphi)$  表示相位片图样的振幅随相位  $\varphi_l(\boldsymbol{\rho})$  的分布函数. 实验中需要对  $a(\varphi)$  做二值化处理, 可以得到如下的二元相位片掩模图分布函数:

$$a(\varphi) = \begin{cases} 1 & (\text{mod}(\varphi_l(\boldsymbol{\rho}), 2\pi) \leq \pi), \\ 0 & (\text{mod}(\varphi_l(\boldsymbol{\rho}), 2\pi) > \pi), \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\text{mod}(a, b)$  表示  $a$  对  $b$  取余的函数. 由(4)式描述的掩模图如图 1 所示.

用上述经过二值化的图案做掩模刻蚀石英玻璃, 刻蚀的深度满足元件对光进行 0 和  $\pi$  的调制. 表面刻蚀有图 1 所示的掩模图形浮雕结构的石英玻璃的衍射光场为拓扑荷相反的 LG 光的叠加态. 相位片衍射光场的轨道角动量分布可以用角向衍射理论<sup>[21, 22]</sup> 来分析.

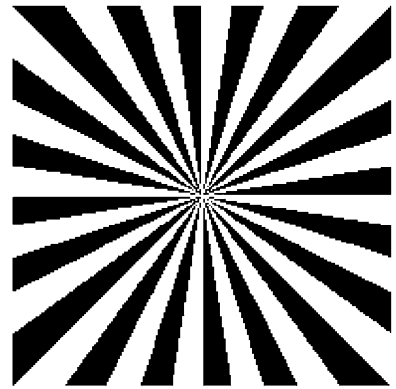


图 1 二元相位片掩模图 产生拓扑荷  $|l|=20$  的叠加 LG 光

### 2.2. 反应离子刻蚀法制作相位片

相位片的制作是将设计好的掩模图刻蚀到玻璃基片上形成浮雕型的结构. 它主要包括光刻掩模制备、图形转移到光刻胶上和离子束刻蚀等三步. 掩模版制作选用的基片材料是苏打玻璃, 基片表面镀有 100 nm 厚的铬膜. 铬膜表面涂覆正型光致抗蚀剂, 在激光直写设备上采用波长为 413 nm 的 Kr 离子激光辐照光刻胶, 曝光部分的抗蚀剂发生分解反应并在显影液中被溶解除去, 而未曝光部分被保留而形成抗蚀保护层, 再经等离子蚀刻 (plasmon etching) 等后续处理形成铬膜掩模图案. 铬版上的有铬区域对应相位片的相对相移为  $\pi$ , 无铬区域对应相移为 0.

为获得相位型的光栅, 需通过离子束刻蚀将铬版上的图形转移到石英玻璃上. 对波长为 633 nm 的激光, 石英玻璃的折射率  $n = 1.458$ . 获得  $\pi$  相移的相位片需要刻蚀的深度为  $\lambda/(2n - 2) = 692$  nm.

离子束刻蚀的过程如图 2 所示, 首先在清洁的石英基片上涂上 RZJ-306 型正性瑞红光刻胶, 采用 KW-4A 型台式匀胶机以 500 r/min 的低速旋转 9 s, 使胶布满样品; 再以 2500 r/min 的高速旋转 30 s, 使胶均匀涂布. 涂敷光刻胶的厚度约为 840 nm. 将铬掩模版放到光刻胶层上, 采用高压汞灯的 I 线 (波长为 365 nm) 进行紫外曝光. 再将基片放入 0.5% 的 NaOH 溶液清洗, 根据正胶特性, 曝光部分融解, 得到光刻胶图形. 采用由中国科学技术大学研制的 KZ-400 型离子束刻蚀机, 工作气体为  $\text{CHF}_3$ , 刻蚀带有光刻胶掩模图形的石英基片. 刻蚀到需要的深度后取出样品, 用丙酮溶液洗去剩余的光刻胶. 经 Alpha-Step 500 型台阶仪测量, 石英玻璃的刻蚀深度

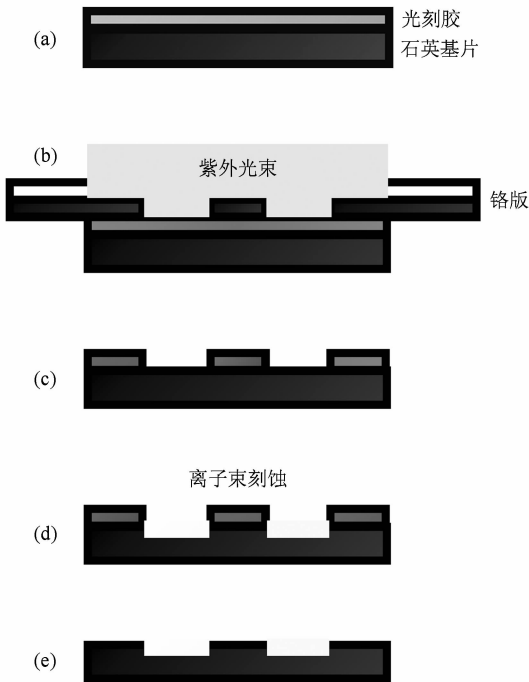


图2 反应离子刻蚀流程 (a) 涂光刻胶并作前烘处理, (b) 紫外曝光, (c) 显影及坚膜(后烘), (d) 离子束刻蚀, (e) 去除剩余的光刻胶

为 778 nm, 深度误差约为 12%.

### 3. 实验结果

利用二元相位片生成 LG 光束的实验装置如图

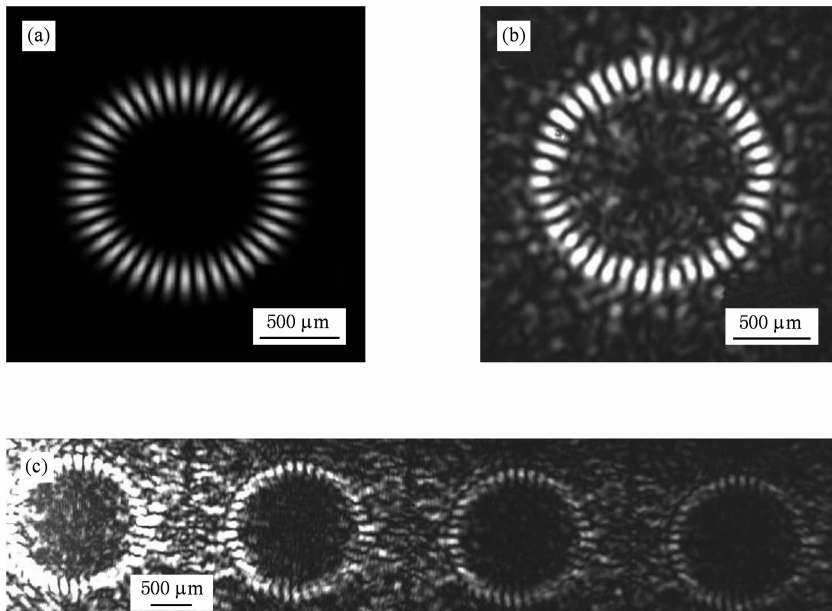


图4 由相位片产生的叠加 LG 光 (a) 拓扑荷相反的 LG 光叠加场数值计算结果, (b) 相位板零级衍射光场分布的实验结果, (c) 从左到右依次为相位板的 +1 级到 +4 级衍射光场

3 所示. 采用 He-Ne 激光产生的波长为 633 nm 的基模高斯光束作为光源, 激光束经扩束后光斑直径约为 1 cm, 经孔径光阑调节后直接照射到相位片上, 调节相位片的位置使得相位片的相位奇点处于光束中心. 最后由 CMOS 相机记录经透镜聚焦的夫琅禾费衍射光场分布.

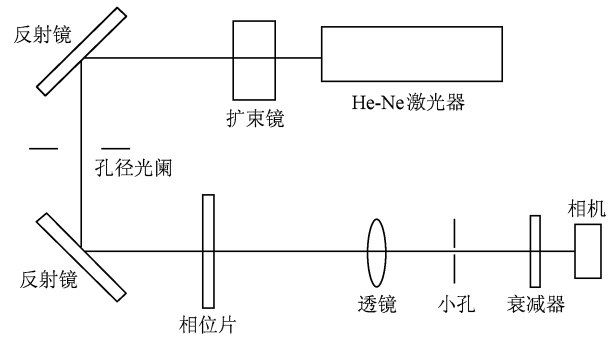


图3 相位片测试装置示意图

实验中所采用相位片的衍射光场中拓扑指数相反的谐波分量同时出现, 衍射光场分布为  $l = 20$  和  $l = -20$  两个 LG 模的叠加态. 与单一拓扑荷 LG 光垂直于传播方向所形成的封闭环不同, 拓扑荷相反的两束 LG 光的叠加光场在圆环上出现亮暗相间的分布, 结果如图 4 所示. 图 4(a) 为  $l = 20$  和  $l = -20$  两束 LG 光横向的叠加光场分布的模拟结果, 图 4(b) 为采用直径为 4 mm 的光阑测量得到的相位板的零级衍射光场分布.

实验中我们还观测到在零级衍射环外侧还存在高级的衍射环,高级衍射环仍为相反拓扑荷两束 LG 光的叠加态. 图 4(c) 中从左到右依次为 +1 级到 +4 级衍射环. 实验测量零级衍射效率可达 70%, 可见衍射光场能量主要集中在零级.

改变孔径光阑的大小,即改变入射到相位板上光束的直径,衍射光场也会发生相应的变化. 当孔径光阑直径小于 3.5 mm 时,衍射光场不能出现清晰的圆环,这是受相位板分辨率制约所致;入射光

的直径在 4—5 mm 之间时,出现一个亮暗间隔的圆环;再增大光阑的直径,零级衍射光场中出现两套或多套亮暗间隔的圆环. 光阑孔径分别为 4.8, 5.9, 6.8 和 8.9 mm 时,相位板的零级衍射光场如图 5 所示. 由图 5 可见,当入射激光孔径增大时,相位片的衍射光场由一个圆环分布变为多个圆环分布,对应于高级  $p$  指数的反向拓扑荷的叠加 LG 光分量. 孔径大时光场为不同径向指数 LG 光的叠加,角动量分布并没有发生变化.

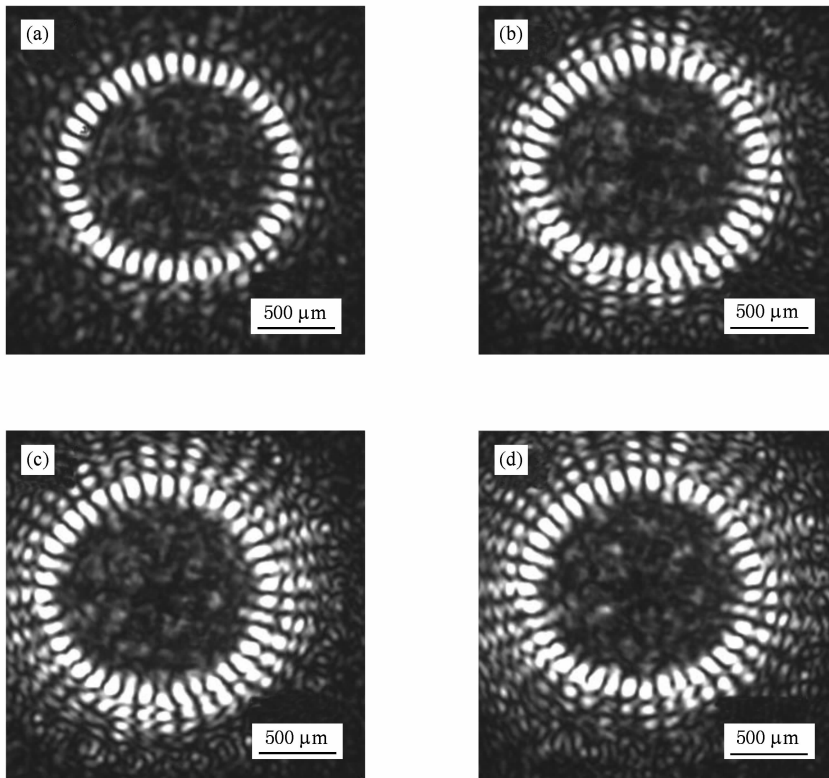


图 5 入射光孔径不同时相位板零级衍射光场分布 (a)入射光孔径为 4.8 mm, (b)入射光孔径为 5.9 mm, (c)入射光孔径为 6.8 mm, (d)入射光孔径为 8.9 mm

## 4. 结果分析

实验中采用 4 mm 直径光束照射相位片时,零级衍射圆环上有 40 个暗点,定性的解释是相位片在角向有 40 个  $0 \rightarrow \pi$  或  $\pi \rightarrow 0$  的相位突变. 零级衍射光场的角动量分布需要通过角向傅里叶分析获得. 方位角  $\varphi$  和轨道角动量  $l$  互为傅里叶变换,两者存在如下的变换关系<sup>[22]</sup>:

$$A_l = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi \psi(\varphi) \exp(-il\varphi), \quad (5)$$

$$\psi(\varphi) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} A_l \exp(il\varphi). \quad (6)$$

(6)式表示光波用螺旋模谐波基  $\exp(il\varphi)$  展开. 实验所用的相位片改变光波的轨道角动量谱分布,产生新的边频带,但不改变光束的净角动量或平均角动量.

透过率  $M$  的一般形式为

$$M(\varphi) = \begin{cases} \exp(i\pi) & (n\alpha \leq \varphi < n\alpha + \beta), \\ 1 & (n\alpha + \beta \leq \varphi < (n+1)\alpha), \end{cases} \quad (7)$$

其中  $n=0, 1, \dots, (N-1)$ ,  $\beta < \alpha$ . 对于透过率为  $M$  的相位片,采用螺旋谐波  $\psi_0(\varphi) = \psi_0 \exp(il_0\varphi)$  正

入射时,衍射光场在角动量本征态上的展开系数为

$$A_l = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi M(\varphi) \exp(-il\varphi) \psi_0 \exp(il_0\varphi). \quad (8)$$

考虑本文所用相位片的几何关系,  $\beta = \alpha/2 = \pi/20$ ,  $N = 20$ , 将(7)式中  $M(\varphi)$  代入(8)式得

$$A_{l+l_0} = \frac{\psi_0 \beta \sin \frac{l\beta}{2} \exp\left(-\frac{i l \beta}{2}\right) \frac{\sin(lN\beta)}{\sin(l\beta)}}{\times \exp(-il(N-1)\beta)} \\ \times (\exp(i\pi) + \exp(-il\beta)). \quad (9)$$

(9)式即为实验所用相位片的衍射光场在轨道角动量本征态基上的展开系数,其模方即为衍射光场在对应角动量态上的概率分布.对扩束的基模高斯光束,  $l_0 = 0$ , 计算可得相位片衍射光场在各本征态上的分布,结果如图6所示.

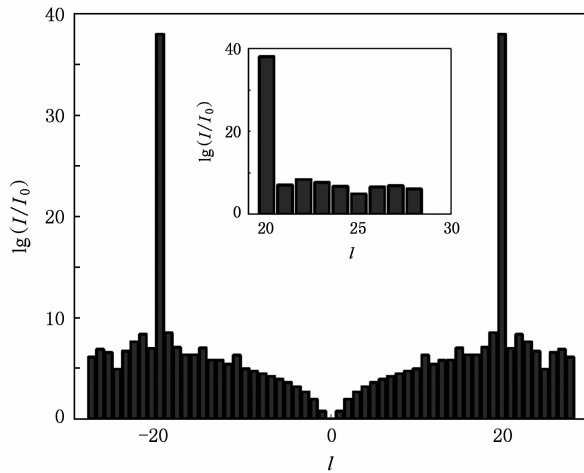


图6 相位片零级衍射光场在各轨道角动量本征态上的概率分布 内插图为  $l=20-30$  的概率分布

从图6可以看出,在相位片的衍射光场中,对应于轨道角动量量子数  $l = +20$  和  $l = -20$  的两个谐波分量占有较大的份额.从图6的内插图可见,衍射光场中  $l = +20$  模分量的强度比边频带其他分量的强度至少大30个数量级,因而用准直的激光束去照

射相位片时,由于探测器动态响应范围和灵敏度的限制,衍射光场中观察不到  $l \neq 20$  的谐波分量.由于轨道角动量为相反的两个谐波分量在衍射光场中占有优势,考虑具有相反轨道角动量量子数  $l$  和  $-l$  的两束 LG 光,相位片衍射光场的分布为<sup>[23]</sup>

$$\psi(\mathbf{r}, z) = 2u_p^l(\mathbf{r}, z) \cos(l\varphi) \exp(-ikz). \quad (10)$$

图4(a)即为(10)式描述的相位片衍射光场的横向分布.

当入射光孔径较大时会出现  $p > 0$  的高阶衍射分量,衍射图案角向为拓扑荷相反的两束 LG 光的叠加态,径向为  $p = 0$  与  $p > 0$  的光的线性叠加.实验表明,孔径在 6—10 mm 之间时,  $p = 0$  阶衍射明显强于  $p > 0$  的高阶衍射分量,该结果也可由傅里叶光学分析得到.当入射孔径较小时,由于受相位片的分辨率限制,零级衍射光场中并没有出现环形,若需要在光束较细的入射光下工作,则需要制作精度更高的相位片.对我们制作的相位片,入射光孔径在 3.5—5 mm 之间时,能够出现单一的  $p = 0$  阶衍射环.

## 5. 结 论

采用单块掩模版一次离子束刻蚀制作而成的相位片,不需采用多次套刻工艺,降低了实验成本和复杂程度.准直的高斯光束照射所制作的相位片,衍射光场为拓扑荷相反的两束 LG 光的叠加场,实验结果和角向衍射理论符合较好.所产生的叠加的环形光为 LG 光的研究提供一定的实验依据.在激光光镊的研究中,由于空心光束中心光强为零,所形成的光阱与普通高斯光束光阱相比轴向更加稳定,在低折射率或复折射率粒子(如金属、金刚石等)的俘获方面具有较广阔的应用前景.拓扑荷相反的 LG 光叠加场具有其特殊的空间光强分布,同样可以用来囚禁一些特殊的微粒,如液相中的空气泡、金属粒子以及金刚石等.

[1] Dienerowitz M, Mazilu M, Reece P J, Krauss T F, Dholakia K 2008 *Opt. Express* **16** 4991  
 [2] Paterson L, MacDonald M P, Arlt J, Sibbett W, Bryant P E, Dholakia K 2001 *Science* **292** 912  
 [3] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185

[4] Cai T, Zhang X B, Ye F W, Li Y P 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 1457 (in Chinese) [蔡田、张晓波、叶芳伟、李永平 2005 光学学报 **25** 1457]  
 [5] Cheng G X, Zhou J H, Ren Y X, Li Y M 2009 *Laser Optoelectron. Prog.* **46** 32 (in Chinese) [陈冠雄、周金华、任煜轩、李银妹 2009 激光与光电子学进展 **46** 32]

- [6] Moh K J, Yuan X C, Bu J, Low D K Y, Burge R E 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 251114
- [7] Hemsing E, Musumeci P, Reiche S, Tikhoplav R, Marinelli A, Rosenzweig J B, Gover A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 174801
- [8] Bernet S, Jesacher A, Fürhapter S, Maurer, Ritsch-Marte C M 2006 *Opt. Express* **14** 3792
- [9] Jesacher A, Schwaighofer A, Fürhapter S, Maurer C, Bernet S, Ritsch-Marte M 2007 *Opt. Express* **15** 5801
- [10] Lin J, Yuan X C, Tao S H, Burge R E 2007 *Appl. Opt.* **46** 4680
- [11] Hasegawa T, Shimizu T 1999 *Opt. Commun.* **160** 103
- [12] Ren Y X, Zhou J H, Wu J G, Li Y M 2008 *Laser Optoelectron. Prog.* **45** 35 (in Chinese) [任煜轩、周金华、吴建光、李银妹 2008 激光与光电子学进展 **45** 35]
- [13] He H, Heckenberg N R, Rubinsztein-Dunlop H 1995 *J. Mod. Opt.* **42** 217
- [14] Wang Q, Sun X W, Shun P, Yin X J 2005 *Opt. Express* **13** 10285
- [15] Yuan X C, Lin J, Bu J, Burge R E 2008 *Opt. Express* **16** 13599
- [16] Li F, Gao C Q, Liu Y D, Gao M W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 860 (in Chinese) [李丰、高春清、刘义东、高明伟 2008 物理学报 **57** 860]
- [17] Moh K J, Yuan X C, Tang D Y, Cheong W C, Zhang L S, Low D K Y, Peng X, Niu H B, Lin Z Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 091103
- [18] Sueda K, Miyaji G, Miyanaga N, Nakatsuka M 2004 *Opt. Express* **12** 3548
- [19] Curtis J E, Koss B A, Grier D G 2002 *Opt. Commun.* **207** 169
- [20] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, Rubinsztein-Dunlop H, Wegener M J 1992 *Opt. Quantum Electron.* **24** S951
- [21] Yao E, Franke-Arnold S, Courtial J, Barnett S, Padgett M 2006 *Opt. Express* **14** 9071
- [22] Jack B, Padgett M J, Franke-Arnold S 2008 *New J. Phys.* **10** 023015
- [23] Haroutyunyan H L, Nienhuis G 2004 *Phys. Rev. A* **70** 063408

## Experimental generation of Laguerre-Gaussian beam using angular diffraction of binary phase plate\*

Ren Yu-Xuan<sup>1)2)</sup> Wu Jian-Guang<sup>2)</sup> Zhou Xiao-Wei<sup>3)</sup> Fu Shao-Jun<sup>3)</sup>  
Sun Qing<sup>2)</sup> Wang Zi-Qiang<sup>2)</sup> Li Yin-Mei<sup>1)2)4)†</sup>

1) (Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

2) (Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

3) (National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

4) (Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology of Anhui Province, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 29 December 2008; revised manuscript received 6 November 2009)

### Abstract

A phase plate was fabricated on a quartz crystal using ion beam etching technique with a predesigned angular phase mask, which can modulate the phase of light illuminating the phase plate by 0 and  $\pi$  rad. Analyzed the field distribution of the diffracted light by angular diffraction theory, which shows the resulting beam is a superposition of two Laguerre-Gaussian (LG) beams with opposite topological charges. Illuminating the phase plate using the expanded beam with diameter 4 mm generates the superposition of two LG beams with the same radian index  $p=0$  and opposite angular index  $l=20$  and  $l=-20$ . By increasing the aperture of the illuminating beam, LG beam with higher  $p$  index can be acquired, while the  $l$  index remains opposite.

**Keywords:** information optics, Laguerre-Gaussian beam, phase plate, ion beam etching

**PACC:** 4230, 6110D, 4240E

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2007AA021811, 2007AA021809), the Main Direction Program of the Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KJXC2-YW-H-10) and the Innovation Research Foundation for Graduate Students of University of Science and Technology of China.

† Corresponding author. E-mail: liyinmei@ustc.edu.cn