

新型类贝塞尔振幅调制螺旋相位片

王金刚 步 敬 王明伟* 袁小聪

(南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 设计并制备了一个新型类贝塞尔调制螺旋相位片,该相位结构是由类贝塞尔函数表示的振幅信息加载到螺旋相位上构成的,通过选择合适的调制参数,使得透射率在相位结构边缘处为零,能够大幅度消除再现光学旋涡光束的旁瓣。采用在纯相位型元件上调制复振幅的编码方法,实现振幅型到纯相位型的转换。通过优化多灰阶激光直写工艺,对每一个像素高度进行调制,直接将该相位片加工在基底是玻璃的光刻胶上。搭建光路验证了光束强度分布,并取得了与理论预期高度一致的结果,为产生高质量旋涡光束提供了一个简便、可靠和低成本的光学元件手段。

关键词 光学设计;类贝塞尔调制;螺旋相位片;抑制旁瓣;激光直写;光刻胶

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0622001

New Type of Bessel-Like Amplitude Modulation Spiral Phase Plate

Wang Jingang Bu Jing Wang Mingwei Yuan Xiacong

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education of China, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract A new kind of phase plate using a variable Bessel-like function is designed and fabricated. The amplitude part is the variable Bessel-like function and the phase part is the spiral phase plate. The design suppresses the beam's sidelobes significantly by choosing a proper modulation parameter. A pure phase plate can be gotten through an encoding method. After optimization of gray scale laser direct writing process, the new kind of phase plate is fabricated on the photoresist slide substrate. Performance of the modulated phase plate is verified by using beam intensity distribution, which is in excellent agreement with the theoretical prediction. The proposed method gives rise to a simple, reliable, and low-cost micro-optical element solution for the generation of high quality optical vortices.

Key words optical design; Bessel-like modulation; spiral phase plate; suppressed sidelobes; direct laser writer; photoresist

OCIS codes 220.0220; 220.3740; 230.0230; 050.0050

1 引 言

螺旋相位片(SPP)是一种可以实现螺旋波面变换的相位滤波器。平面波通过 SPP 后的出射光束具有螺旋相位波前,光束中心具有相位奇点,且相位奇点处光强为零,这种特殊的光场被称为旋涡光束^[1],它具有独特的螺旋波前结构和确定的光子轨道角动量,因此被广泛用于光操纵、相称显微镜和光

通信等领域。旋涡光束产生的主要方法包括计算全息法^[2,3]、液晶空间光调制法^[4,5]和制作螺旋相位片等。螺旋相位片可以直接把高斯光束转换为旋涡光束而不会损失光的能量,可以高效、方便地产生旋涡光束,并且由玻璃制作的螺旋相位片在处理高功率激光照明时具有极高的效率。因此这种方法是目前最简洁、可靠、高效的产生旋涡光束技术。制作螺旋

收稿日期: 2011-01-24; 收到修改稿日期: 2011-02-18

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327702)和国际科技合作与交流专项(2009DFA52300)资助课题。

作者简介: 王金刚(1985—),男,博士研究生,主要从事微细加工方面的研究。E-mail: takepainsfh@163.com

导师简介: 袁小聪(1963—),男,博士,教授,主要从事微纳光学及旋涡光束等方面的研究。

E-mail: xcyuan@nankai.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangmingwei@nankai.edu.cn

相位片的方法有多种:微机械加工技术^[6]、灰阶掩模曝光、电子束曝光(EBL)^[7]和激光直写等。微机械加工技术,加工尺寸在毫米量级内,难以产生低拓扑荷的旋涡光束;灰阶掩模曝光,要求多次精确对准,工艺复杂,掩模版制作成本较高;电子束直写技术的精度可达到10 nm,制作精度高且台阶的连续性好,易于集成在光路中,但是电子束直写系统价格比较昂贵,需要在真空中曝光并且基底上需具有导电层,制作光学元件的周期比较长。在制作1~5 μm的连续结构时,由于抗蚀剂薄膜内电子的散射所造成的电子束光斑展宽的临近效应,实际上和激光直写技术有相似的最小特征尺寸。激光束直写系统操作方便,制作过程简单,易于掌握。因此,利用激光直写技术来制作螺旋相位片的方法,具有成本低、制作简单、性能可靠和可重复性高等优点。

旋涡光束的光强分布中除了有用的主亮环以外还有分布在主亮环外侧的旁瓣,旁瓣的存在会影响旋涡光束的应用效率,比如在多光束光学微操作^[8]中,由于旁瓣的存在造成不必要的干涉而使得操作困难;在径向希尔伯特变换中会导致边缘增强图像对比度降低等。因此,必须采用一些方法把旋涡光束的旁瓣消除掉,当前所采取的抑制旁瓣的方法有最佳环状螺旋相位结构法^[9]、径向调制螺旋相位结

构法^[10]和螺旋轴锥结构法^[11~14]。这些方法在实现旋涡光束旁瓣的抑制过程中有各自的局限性,本课题组^[15]最近提出的利用类贝塞尔振幅调制螺旋相位结构来实现旋涡光束旁瓣抑制的方法,能够完全彻底抑制旋涡光束旁瓣;并利用纯相位型空间光调制器验证了这一方法。本文采用激光直写的方法,制作了类贝塞尔振幅调制相位片,实现了该新型结构的微型化、器件化和实用化。

2 振幅调制的螺旋相位片的设计

将类贝塞尔函数表示的振幅信息加载到圆形螺旋相位上构成了类贝塞尔振幅调制螺旋相位结构,其透射率函数可表示为

$$T_N(r, \varphi) = \text{cir1}(r/R) \frac{J_{N-1}(\alpha r)}{r} \exp(iN\varphi), \quad (N = \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (1)$$

式中 (r, φ) 为相位结构平面上的极坐标, R 为类贝塞尔振幅调制螺旋相位结构的半径, α 为径向振幅调制参数, N 为螺旋相位片的拓扑荷数, $J_{N-1}(x)$ 为 $N-1$ 阶的第一类贝塞尔函数。当均匀平面波入射时,类贝塞尔调制螺旋相位结构在焦距为 f 的透镜后焦平面上的衍射场分布为

$$E_N(\rho, \theta) = \frac{ik}{2\pi f} \int_0^{R^2} \int_0^{2\pi} \frac{J_{N-1}(\alpha r)}{r} \exp(iN\varphi) \exp\left[-\frac{ik}{f}\rho \cos(\varphi - \theta)\right] d\varphi dr = (-1)^{N+1} \frac{k}{f} \exp(iN\varphi) \int_0^R J_{N-1}(\alpha r) J_N\left(\frac{k}{f}r\rho\right) dr. \quad (2)$$

贝塞尔函数具有以下特点:

$$\int_0^\infty J_\nu(\alpha x) J_{\nu-1}(\beta x) dx = \begin{cases} \frac{\beta^{\nu-1}}{\alpha^\nu} & \beta < \alpha \\ \frac{1}{2\beta} & \beta = \alpha \\ 0 & \beta > \alpha \end{cases} \quad (3)$$

旋涡光束的旁瓣不仅来自螺旋相位中间区域的衍射,还有来自边缘区域的衍射。为了消除后者对旁瓣的贡献,令调制振幅在最边缘处为零,即当 $r = R$ 时, $J_{N-1}(\alpha R)/R = 0$ 。解方程(2)和(3)可以得到最佳调制参数^[16]为

$$\alpha_{\text{opt}} = \frac{\gamma_{N-1,1}}{R}. \quad (4)$$

由于类贝塞尔振幅调制是基于振幅的调制方法,为了实现纯相位片的加工,采用基于纯相位型的

空间光调制器调制复振幅的编码方法^[17],可以实现从复振幅到纯相位的转换。则类贝塞尔振幅调制透射率函数 $T_N(r, \varphi)$ 转化为纯相位透射率函数

$$T'_N(r, \varphi) = \exp(i\phi), \quad (N = \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (5)$$

式中 $\phi(r, \varphi)$ 为纯相位函数的相位部分。

理想螺旋相位片的相位是光滑和连续变化的,但由于制作工艺的限制,所以实际应用中常用阶梯型螺旋相位片(ML-SPP)^[18]来代替。实验中利用14个台阶离散相位分布,每个离散像素的大小是40 μm,不同台阶的相位差可以根据灰阶分布控制曝光强度来改变,并且每个台阶的高度应该满足

$$h(m) = \frac{m\lambda}{14(n-1)} \times \frac{\text{mod}(\phi, 2\pi)}{2\pi}, \quad (m = 1, 2, \dots, 14) \quad (6)$$

式中 $\lambda=780\text{ nm}$, 对应这个波长的光刻胶折射率为 $n=1.51$, $\text{mod}(\phi, 2\pi)$ 表示 ϕ 对 2π 取余。

令 $N=5$, $R=r=4\text{ mm}$, $\alpha=3.749$ 进行理论计算, 图 1(a), (b) 分布是拓扑荷为 5 类贝塞尔调制相位分布图和拓扑荷为 5 普通叉形光栅相位分布图。在焦距 $f=60\text{ cm}$ 处的夫琅禾费衍射光强分布如图 2(a) 所示。同时用 $N=5$, $r=4\text{ mm}$ 的叉形光栅进行理论计算, 如图 2(b) 所示; 从计算的结果对比可以看出, 类贝塞尔调制的相位片有效地抑制了旁瓣。

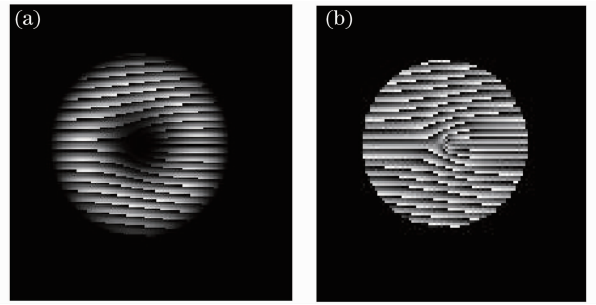


图 1 类贝塞尔调制相位片的(a)和(b)普通叉形光栅相位片的相位分布图

Fig. 1 Phase images of modulated Bessel-like phase plate (a) and usual fork grating phase plate (b)

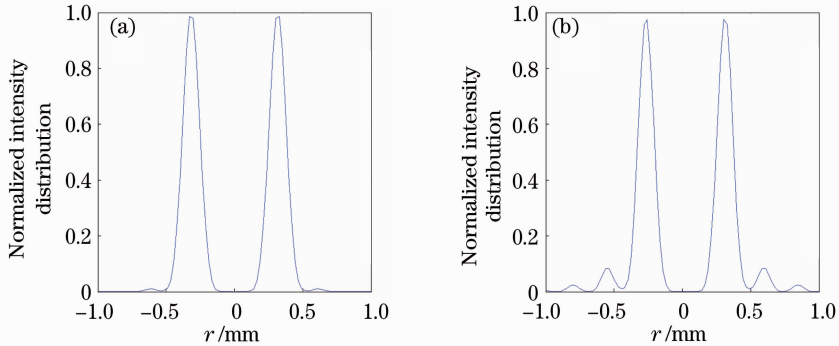


图 2 类贝塞尔调制相位片的(a)和普通叉形光栅相位片的(b)光强分布曲线

Fig. 2 Intensity distributions of modulated Bessel-like phase plate (a) and usual fork grating phase plate (b)

3 制作工艺

实验中所用的 DWL66 激光直写仪是德国海德堡仪器公司出产的高分辨率激光直写设备, 可以对多种衬底材料上的光刻胶进行快速直写, 精确得到二维、三维的微浮雕结构; 波长为 442 nm 的 He-Cd 激光器作为激光光源, 最大功率 70 mW , 4 mm 激光书写头焦深为 $1.8\text{ }\mu\text{m}$, 可达到的最小线宽为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。

基于以上分析, 利用 DWL66 激光直写仪在光刻胶上制作了拓扑荷 $C=5$, $R=r=4\text{ mm}$, $\alpha=3.749$ 的类贝塞尔振幅调制相位片。首先利用 AutoCAD 设计制作相位片所需的灰阶图形, 并保存为 DXF 格式; 然后利用 DWL66 系统的转换程序把不同曝光强度信息加到 DXF 文件中, 并转换成 LIC 格式文件, 通过 ftp 传送到 DWL66 直写系统。

实验采用德国 All Resist 公司生产的 AR-N4340 型负性光刻胶, 通过对 AR-N4340 光刻胶多次试验摸索和测试, 得出了以下优化的工艺参数: 转速为 4000 r/min , 要求胶膜分布均匀; 前烘 85° , 使胶内的溶剂蒸发, 此时胶的厚度是 $1.74\text{ }\mu\text{m}$; 然后将基片用 DWL66 激光直写仪曝光, 曝光后, 后烘 95° 坚

膜, 以便去除多余的溶剂且增加光刻胶与玻璃衬底的粘附性。显影液为 AR300-475, 显影 40 s , 去除未曝光的部分, 最后用轮廓仪测出各个台阶的数值。

4 实验结果

表 1 中的数据是 14 个台阶的设计值和测量值, 通过对两者的分析, 最大相对误差不超过 9.5% 。图 3 是用江南 XD-202 倒置显微镜在 4 倍物镜, 用 CCD 观察到的实际制作的类贝塞尔调制相位片部分图像。

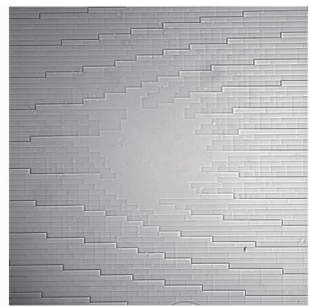


图 3 制作的类贝塞尔调制相位片的图像

Fig. 3 Image of fabricated Bessel-like modulated phase plate

表 1 类贝塞尔调制相位片每个台阶的设计和实际高度

Table 1 Designed and measured heights of step of modulated Bessel-like phase plate

Area No	Designed height /nm	Measured height /nm
1	130.0	125.0
2	167.0	162.3
3	204.0	218.8
4	241.0	264.8
5	278.0	301.3
6	315.0	345.0
7	352.0	366.6
8	389.1	405.5
9	426.1	439.0
10	463.1	476.6
11	500.1	524.2
12	537.1	570.6
13	574.1	617.5
14	611.1	658.3

对制作的螺旋相位片用 780 nm 进行了测试。利用两个平凸透镜将光束扩束、准直,通过光阑将光束尺寸限制到和螺旋相位片尺寸相匹配。用 CCD 在 60 cm 处采集菲涅耳衍射图样,图 4(a)是拓扑荷为 5 类贝塞尔调制菲涅耳衍射光强分布图,图 4(b)拓扑荷为 5 普通叉形光栅菲涅耳衍射光强分布图。比较可以看出,类贝塞尔调制较好地抑制了旁瓣。图 5 为拓扑荷为 5 类贝塞尔调制菲涅耳衍射光强分布曲线,可以看出较好地抑制了旁瓣。实验结果中光强分布不匀称的原因主要是制作的相位片与设计值最大偏差为 9.5% 以及光阑的衍射作用导致实际的入射光不是真正的平面波。而图 4(b)中的干扰光强是由于光栅中其他级次干扰造成。但是,两种相位片圆环状光强分布和中心的零振幅点清晰可见。

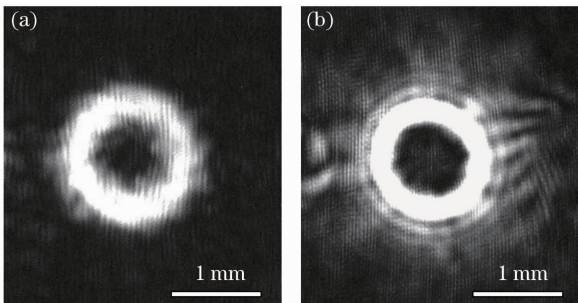


图 4 实验上获得的类贝塞尔调制相位片的(a)和普通叉形光栅相位片的(b)光强分布图

Fig. 4 Intensity distribution of modulated Bessel-like phase plate (a) and usual fork grating phase plate (b) in experiment

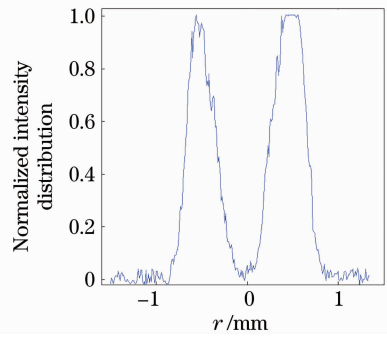


图 5 类贝塞尔调制相位片的菲涅耳衍射光强分布曲线

Fig. 5 Fresnel intensity distribution of modulated Bessel-like phase plate

5 结 论

通过微细加工的方法制作了类贝塞尔振幅调制相位螺旋结构。通过与叉形光栅相位片以及模拟计算结果的对比,验证了该新型相位片能够消除旁瓣的特性。同时,把这种复杂的结构用离散像素化的方法,加工在涂有光刻胶的玻璃上。通过搭建光路以及对实验结果的分析,验证了光束强度分布,并取得了与理论预期高度一致的结果,为产生高质量光学旋涡光束提供了一个简便、可靠、低成本的微光学元件手段。

参 考 文 献

- 1 P. Coulet, L. Gill, F. Rocca. Optical vortices [J]. *Opt. Commun.*, 1989, **73**(5): 403~408
- 2 N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith *et al.*. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(3): 221~223
- 3 Li Hailian, Yang Dexing, Ren Xiaoyuan *et al.*. Experimental investigation of optical vortex generated by volume holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 503~507
李海莲, 杨德兴, 任小元 等. 体全息产生光学涡旋的实验研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 503~507
- 4 J. E. Curtis, D. G. Grier. Modulated optical vortices [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(11): 872~874
- 5 J. E. Curtis, D. G. Grier. Structure of optical vortices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**: 133901
- 6 S. S. R. Oemrawsingh, J. A. W. Houwelingen, E. R. Eliel *et al.*. Production and characterization of spiral phase plates for optical wavelengths [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(3): 688~694
- 7 W. C. Cheong, W. M. Lee, X. C. Yuan *et al.*. Direct electron-beam writing of continuous spiral phase plates in negative resist with high power efficiency for optical manipulation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**: 5784~5786
- 8 Liu Bin, Wu Fengtie, Jiang Xinguang. Particles manipulation in multi-plane using non-diffracting bessel beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 379~382
刘 彬, 吴逢铁, 江新光. 利用无衍射贝塞尔光束多层面操控粒子 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 379~382
- 9 C. S. Guo, X. Liu, J. L. He *et al.*. Optimal annulus structures of optical vortices [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19): 4625~4634

- 10 Lin, X. C. Yuan, S. H. Tao. Variable-radius focused optical vortex with suppressed sidelobes [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(11): 1600~1602
- 11 V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, V. A. Soifer. Sidelobe contrast reduction for optical vortex beams using a helical axicon[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(8): 921~923
- 12 Lu Wenhe, Wu Fengtie. Geometric optics analysis on the bottle beam generated from an axicon-lens system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2924~2927
卢文和, 吴逢铁. 轴棱锥透镜系统产生局域空心光束的几何光学解释[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2924~2927
- 13 Ma Liang, Wu Fengtie, Huang Qilu. A new type of combined axicon for generating non-diffracting Bessel beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2417~2420
马亮, 吴逢铁, 黄启禄. 一种产生无衍射贝塞尔光束的新型组合锥透镜[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2417~2420
- 14 Ma Liang, Wu Fengtie, Huang Qilu. Beam propagation of transformation in axicon-lens system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2557~2560
吴逢铁, 卢文和, 马宝田. 轴棱锥-透镜系统的光束传输与变换 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2557~2560
- 15 J. Chen, X.-C. Yuan, X. Zhao *et al.*. Generalized approach to modifying optical vortices with suppressed sidelobes using Bessel-like functions [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(21): 3289~3291
- 16 Jun Chen, Xing Zhao, Zhiliang Fang *et al.*. Explicit relations and optimal parameters for sidelobe suppression in optical vortices with a modified Bessel function [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2009, **27**(4): 935~940
- 17 J. A. Davis, D. M. Cottrell, J. Campos *et al.*. Encoding amplitude information onto phase-only filters [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(23): 5004~5013
- 18 Chengshan Guo, Dongmei Xue, Yujing Han *et al.*. Optimal phase steps of multi-level spiral phase plates [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **268**(2): 235~239