

采用一次曝光制备连续面形螺旋相位板的方法

史立芳 曹阿秀 郭书基 罗 雪 秦燕云 邓启凌

中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

摘要 提供了一种制备连续面形螺旋相位板(SPP)的方法。通过将三维目标面形在一维方向上按照一定的间隔进行抽样处理,进而将获得的样条按照比例平铺在抽样空间内,获得与目标面形对应的二维掩模结构图形;利用该掩模结构在抽样方向上进行一次曝光即可获得目标面形。对该抽样方法、结构参数进行了分析,并且针对该方法开展了制备技术研究,制备出了 4 种电荷数分别为 1,3,10 和 20 的螺旋相位片,其适用波长为 532 nm,并对其光学效果进行了测试。

关键词 光学制造; 光学漩涡; 光刻; 微光学元件

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s122001

Method to Fabricate Spiral Phase Plate with Continous Surface by One Exposure Processing

Shi Lifang Cao Axiu Guo Shuji Luo Xue Qin Yanyun Deng Qiling

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract A method for fabricating spiral phase plate (SPP) with continuous surface is proposed. An interval is used to quantize the three dimension surface of SPP into two dimension bars to form a binary mask. The exposure dose can be precisely modulated through this mask in the exposure process. The select criterion of the quantization interval is discussed in detail. As the results, four kinds of high-quality SPPs with topological charges 1, 3, 10 and 20 are fabricated which can be used under the wavelength of 532 nm. The corresponding optical effects are also measured.

Key words optical fabrication; optical vortex lithography; micro-optical device

OCIS codes 220.3740; 080.4865; 230.3990

1 引 言

螺旋相位板(SPP)是一种光学厚度与旋转方位角成正比的纯相位型衍射光学元件^[1-2],入射平面波通过螺旋相位板后可形成光学漩涡^[3-4]。光学漩涡是一种具有螺旋相位结构和确定轨道角动量的特殊光场,已经被广泛应用在很多领域,如光镊、粒子操控^[5-6]、量子信息传输等领域。螺旋相位片的广泛应用使得人们对其制备技术产生了迫切的需求。目前用于制备螺旋相位板的技术通常有电子束、聚焦离子束技术,但是这些技术需要昂贵的设备,并且由于是采用逐点直写的方式,所以制备效率低。另外一种制备技术是将连续面形的螺旋相位板台阶化^[7-9],然后通过多次曝光的方式套刻完成其制备,但是这种方法制备的螺旋相位板是多台阶状的,其光学效率被极大地降低。那么这就对连续面形螺旋相位板的制备技术提出了新的挑战。

在 1996 年, B Chen 等^[10-11]提出了应用移动掩模法制备微透镜列阵的技术,通过其研究组多年的努力,这项技术得到了很好的发展^[12]。在此技术的基础上,作者在 2007 年提出了一种利用移动掩模进行一次曝光制备微透镜列阵的技术^[13-14]。在此基础上,本文提出一种针对不规则排布三维微光学元件的掩模设计方法和制备技术。通过对螺旋相位片的光学分布特征进行研究,将其在一维方向上按照一定的抽样间隔进行抽样处理,将获得的样条按照其高度进行归一化处理,并使其最大值为抽样间隔;将所有的样条平铺在对应的抽样间隔内,所有的样条组合之后构成掩模图形。利用该掩模通过一次移动曝光即可完成该元件的制备。

收稿日期: 2015-02-15; **收到修改稿日期:** 2015-03-15

作者简介: 史立芳(1980-),女,博士,副研究员,主要从事微细加工技术方面的研究。E-mail: shilifang@ioe.ac.cn

这种技术可以实现任意面形形状的微光学元件的制备。文中采用该方法制备了 4 种不同拓扑电荷数的螺旋相位板,并对其光学效果进行了测试。

2 原 理

图 1 表示出了该螺旋相位板的制备过程。如图 1(a)所示为螺旋相位板三维结构示意图,其面形可以表达为 $f(x, y)$,从图中可以看出该结构的特点是其光学厚度与旋转方位角成正比,即厚度随着旋转角度逐渐增加。下面对该制作方法进行说明。假设该螺旋相位板结构的口径为 D ,利用间隔 d 对该结构进行抽样,如图 1(b)所示,获得 D/d 个样条。由于该螺旋相位板是一个不规则的三维结构,因此,不同位置处的样条的形状各不相同,样条方程表达式为 $f_i(x, y), i=1, 2, \dots, N$ 。如图 1(c)所示为每个样条的二维形状。每个样条被投影然后缩小相同的倍数之后放置到其对应位置处的抽样间隔之内,如图 1(c)中每个样条图形下方的黑色样条所示。三维样条及其二维样条之间的关系可以表示为 $f_i(x) = C \int_{(i-1)d}^{id} f_i(x, y) dy, i=1, 2, \dots, N$,其中 C 为常数,它表示出了螺旋相位板的实际矢高与抽样间隔 d 之间的缩小关系。经过以上处理之后,可以得到每个样条所对应的二维掩模图形 $M_i(x, y)$,其中当 $(i-1)d < y < (i-1)d - f_i(x)$ 的时候, $M_i(x, y) = 1$,表示的是光不能通过的部分;其余的部分 $M_i(x, y) = 0$,表示的是光能通过的部分。将所有的二维掩模图形组合之后,即可获得用于制备该螺旋相位板所对应的总掩模图形 $M(x, y)$,如图 1(d)所示。在曝光过程中,利用该掩模图形对曝光量进行调制,即可获得所需要的曝光分布,如图 1(e)所示。在曝光过程中,掩模所移动的距离为 d 。在每个量化单元中所对应的曝光量 $Q_i(x, y)$ 是由其对应的二维掩模图形在曝光过程中调制获得的,

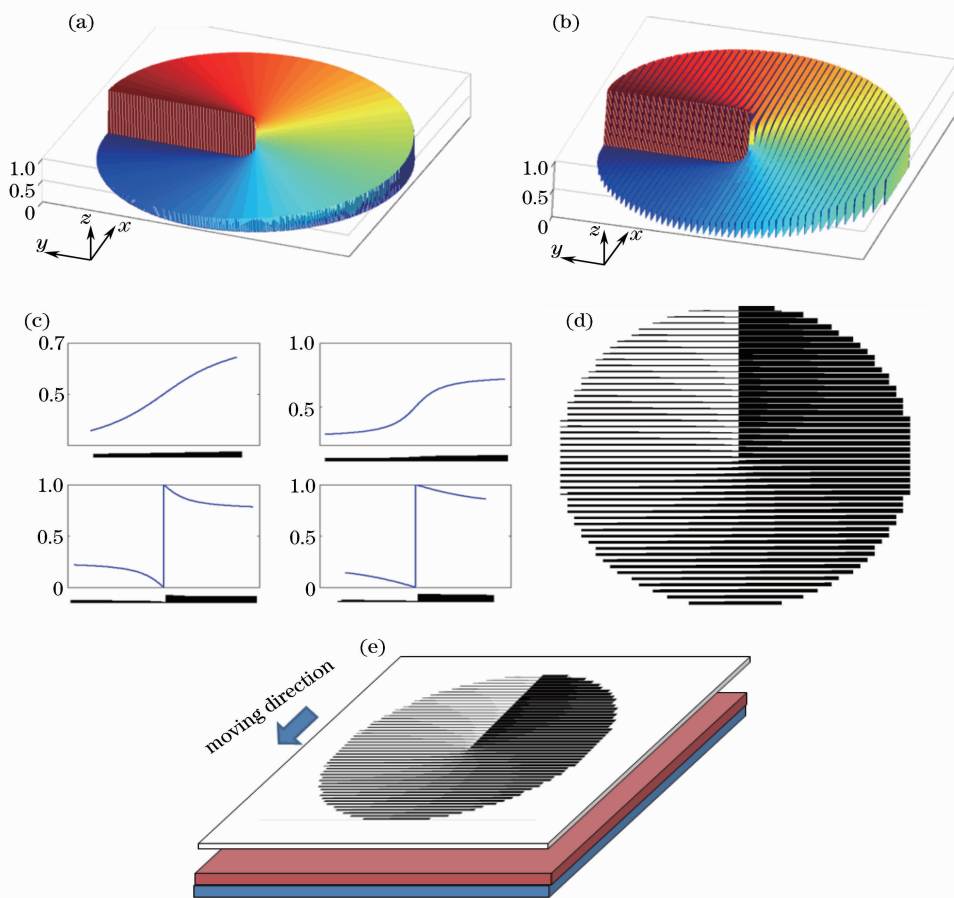


图 1 (a)螺旋相位板示意图;(b)螺旋相位板抽样示意图;(c)样条归一化结构示意图;(d)掩模图形;(e) 曝光原理

Fig. 1 (a) Schematic of SPP; (b) schematic of sample of spiral phase plate; (c) schematic of spline normalized structure; (d) mask pattern; (e) principle of exposure

所以它可以看成是子掩模函数与移动速度之间的卷积, 即其可以表达为:

$$Q_i(x, y) = \frac{I_0}{v} M_i(x, y) \otimes \text{rect}\left(\frac{y-d/2}{d}\right), \quad (1)$$

式中 I_0 为曝光系统的入射光强, v 为曝光过程中掩模的移动速度。从(1)式可以看出, 子掩模所对应的曝光量是由每个子掩模函数来获得的, 那么总曝光量分布可以看成是每个子掩模所对应的曝光量之间的叠加, 即可

以表达为 $Q(x, y) = \sum_{i=1}^N Q_i(x, y)$ 。所对应的螺旋相位板的三维面形 $z_f(x, y)$ 与曝光量的关系可以表示为: $z_f(x, y) = \rho \cdot Q(x, y)$, 其中 ρ 表示出了三维面形与曝光量之间非线性, 该非线性是由光刻胶的特性所决定的。

3 参数分析

在该制备过程中, 三维结构面形首先被抽样量化成多个微样条并用其来组成掩模结构。那么由于量化所导致的结构面形的粗糙度以及其影响因素需要被分析, 其中抽样间隔 d 是一个关键的影响参数。下面将对面形粗糙度的影响因素以及抽样间隔 d 的选择标准进行讨论。

3.1 水平方向的粗糙度

水平方向的粗糙度主要由量化所得的样条的数量决定。对于一个口径为 D 的结构来说, 采用的抽样间隔为 d , 那么所获得的总的样条的数量为 $N=D/d$ 。从该表达式可以看出, 抽样间隔 d 选取的越小, 那么所获得的样条的数量越多, 三维结构被描述的越细致; 相反, 抽样间隔 d 选取的越大, 那么, 多获得的样条的数量越少, 三维结构被描述的越粗糙, 其中的一些细节部分有可能会被疏漏。基于以上原因, 抽样间隔 d 选择的越小越好, 从图 2 中可以看出, 图 2(a)中所使用的抽样间隔 d 比图 2(c)中所使用的抽样间隔小一半, 图 2(b)和 (d)分别为图 2(a)和(c)中虚线所示部分的横切面, 可以看出, d 选取的越小, 其三维面形所描述的越精细。

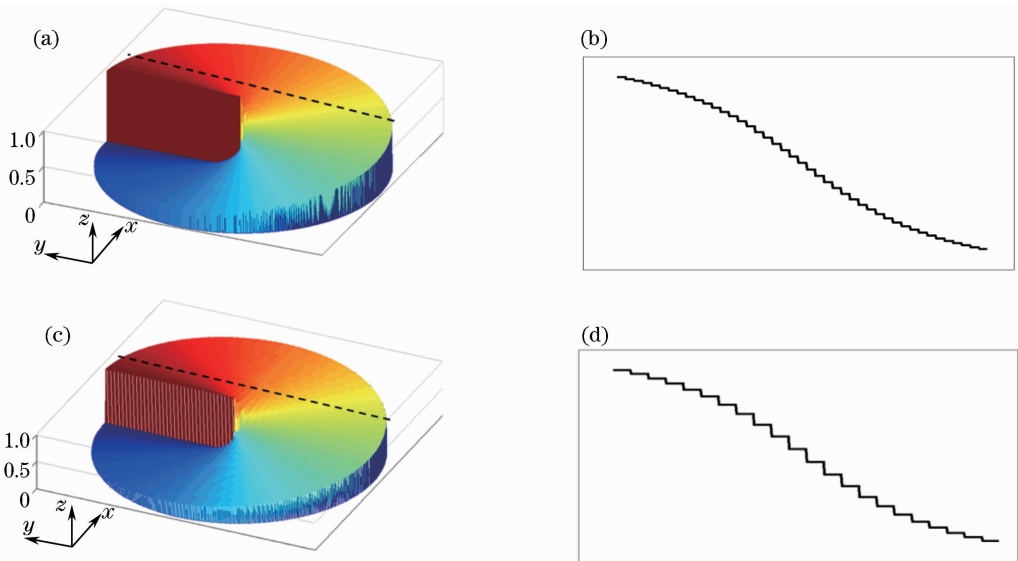


图 2 抽样间隔对水平方向粗糙度的影响。(a) 利用较小的间隔 d 抽样后所获得的三维面形; (b) 图(a)中虚线所示部分的横切面; (c) 利用较大的间隔 d 抽样后所获得的三维面形; (d) 图(c)中虚线所示部分的横切面

Fig. 2 Effect of sampling interval on horizontal roughness. (a) Three-dimensional surface shape obtained by sampling using small interval d ; (b) cross-section shown by dotted line in (a); (c) three-dimensional surface shape obtained by sampling using large interval d ; (d) cross-section shown by dotted line in (c)

3.2 竖直方向的粗糙度

竖直方向的粗糙度主要由所获得的子掩模中所对应的灰度等级来决定。因为子掩模图形是被放置在抽样间隔 d 之内的, 并且掩模图形是由激光直写技术来制备的, 而激光直写所能达到的最小分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$, 因此每个子掩模中所能包含的灰度数为 $N' = d/0.1$ 。因此, 对于同样的结构, 如果抽样间隔 d 为 $10 \mu\text{m}$, 那么所获得的灰度数为 100, 如图 3(a)所示; 而如果抽样间隔为 $5 \mu\text{m}$, 那么所获得的灰度数为 50, 如图 3(b)所

示。由于曝光量是由子掩模来共同调制的,那么想要获得足够多的灰度等级以在曝光过程中获得垂直方向上更高精度的面形, d 选取的越大越好。

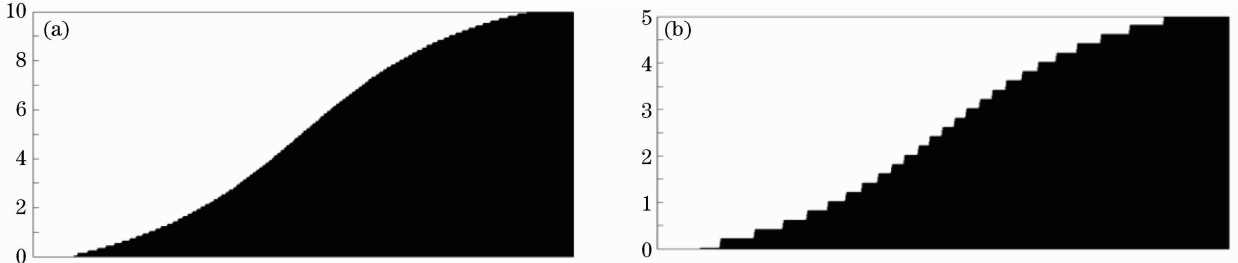


图3 抽样间隔对垂直方向粗糙度的影响。(a)采用较大的抽样间隔 d 所获得的子掩模;(b)采用较小的抽样间隔 d 所获得的子掩模

Fig. 3 Effect of sampling interval on vertical roughness. (a) Sub-mask obtained using large interval d ;
(b) sub-mask obtained using small interval d

3.3 抽样间隔 d 的选择标准

在实际制作中,水平方向和垂直方向的粗糙度需要被综合考虑以获取好的三维结构面形。从以上的分析可知,水平方向的粗糙度由抽样所得样条的数量 $N=D/d$ 决定,而垂直方向上的粗糙度由子掩模中的灰度等级数 $N'=d/0.1$ 决定。对于确定的口径 D , d 需要被谨慎选择以满足水平和垂直方向上的粗糙度。为了使两个方向上的粗糙度相同,那么选择 $N=N'$,可以得到 $d=\sqrt{0.1\times D}$ 。也就是说,对于口径 D 为1 mm的螺旋相位板来说,应该选择的抽样间隔应该为 $10\ \mu\text{m}$,样条的数量和灰度等级的数量均为100。

对于一个大口径比如1 inch(inch=2.54 cm)口径的螺旋相位板来说,如果利用以上选择标准,那么计算所得的 d 应该选取为 $50\ \mu\text{m}$,所获得样条数和灰度等级的数量均为500。假设该螺旋相位板是在绿光下($\lambda=532\ \text{nm}$)使用的,其相位调制范围为 $0\sim 2\pi$,那么其所对应的矢高为 $h=1.154\ \mu\text{m}$ 。通常来说,其在垂直方向上的粗糙度达到数纳米或者 $10\ \text{nm}$ 都是允许的,那么也就是说,在制备的时候,垂直方向上的灰度等级 $1.154\ \mu\text{m}/10\ \text{nm}=122$ 就足够获得良好的面形。因此由上式所获得的500个灰度等级是浪费的。在这种情况下,抽样间隔 d 可以直接由垂直方向上所需要的灰度等级要求来确定,即利用灰度等级数122,即可以获得 $d=122\times 0.1\ \mu\text{m}=12.2\ \mu\text{m}$,在此,考虑到曝光系统的精度,选择 $d=12\ \mu\text{m}$ 。利用该抽样间隔,可以获得2117个样条,远多于利用之前标准所获得的500个,可以进一步提高在水平方向上的粗糙度。

由以上分析可知,抽样间隔 d 的选择标准为:首先,利用公式 $d=\sqrt{0.1\times D}$ 获得 d 的初始值;其次,将 d 与 $10\times h$ 相比较,其中 h 为三维结构的矢高,如果 $d\leq 10h$,那么 d 的值被选取为 $d=\sqrt{0.1\times D}$;如果 $d>10h$,那么抽样间隔 d 的值应该被选取为 $d=10h$ 。

4 实 验

4.1 制作流程及结果

为了验证以上的方法,实验制备了4种不同拓扑电荷数($l=1, l=3, l=10$ 以及 $l=20$)的螺旋相位板。其口径为1 inch,使用波长为 $532\ \text{nm}$,其相位调制范围为 $0\sim 2\pi$,计算得到其矢高为 $1.154\ \mu\text{m}$ 。采用以上的选择标准,可以得到抽样间隔 d 为 $12\ \mu\text{m}$ 。4种不同拓扑电荷数的螺旋相位板所对应的掩模板结构如图4(a)~(d)所示,图4(e)为图4(b)中掩模红框所示部分的放大图,其中的黑色部分表示的是光不能通过的部分,其他部分为光能通过的部分。

选择1 inch的 SiO_2 基底和AZ9260作为光刻胶。光刻胶的旋涂速度为 $5000\ \text{r/min}$ 。之后将光刻胶进行前烘,前烘温度为 $100\ ^\circ\text{C}$,前烘时间为 $5\ \text{min}$,获得的光刻胶的厚度为 $3\ \mu\text{m}$ 。采用上述掩模对该光刻胶进行曝光,掩模与光刻胶层之间的间隙为 $50\ \mu\text{m}$,采用的是边移动边曝光的方式,移动距离为 $12\ \mu\text{m}$,移动时间即曝光时间为 $20\ \text{s}$ 。曝光之后将基片放入显影液中对光刻胶进行显影,显影时间为 $3\ \text{min}$;之后采用RIE刻蚀的方法将结构由光刻胶传递到基底上,刻蚀气体为 SF_6 和 CHF_3 ,刻蚀时间为 $80\ \text{min}$ 。获得的4种螺旋相位板结构如图5所示。

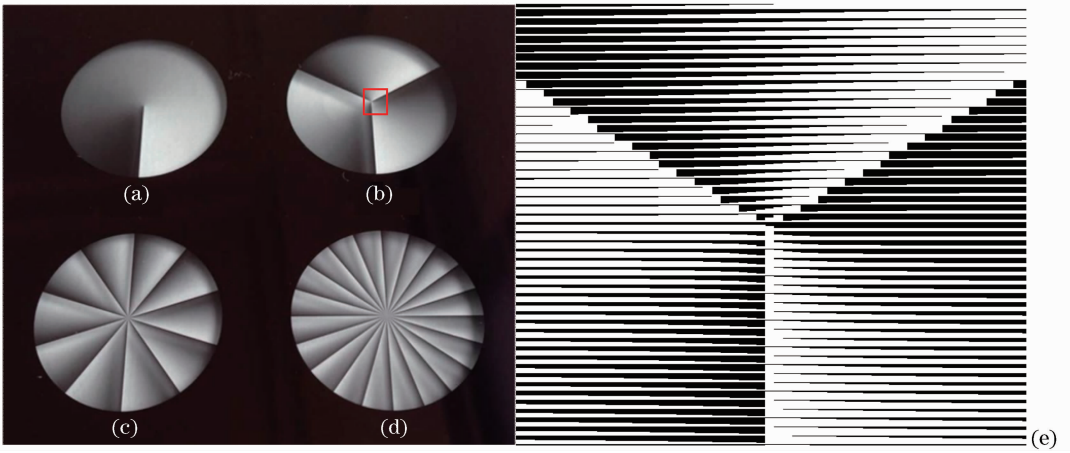


图 4 不同拓扑电荷数的螺旋相位板所对应的掩模板。(a) $l=1$; (b) $l=3$; (c) $l=10$; (d) $l=20$; (e) 图(b)中掩模的红框部分的放大图

Fig. 4 Mask of SPP corresponding to different topological charges. (a) $l=1$; (b) $l=3$; (c) $l=10$; (d) $l=20$; (e) enlarged figure of red box in (b)

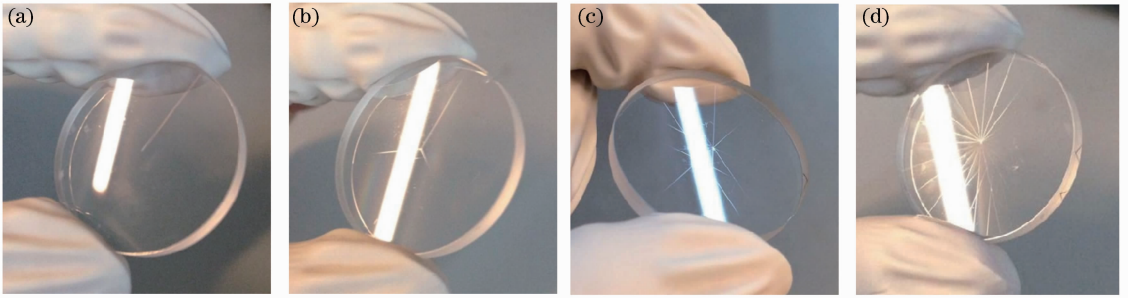


图 5 不同拓扑电荷数的螺旋相位板实物图。(a) $l=1$; (b) $l=3$; (c) $l=10$; (d) $l=20$

Fig. 5 Physical map of SPP corresponding to different topological charges. (a) $l=1$; (b) $l=3$; (c) $l=10$; (d) $l=20$

利用光学干涉仪对其表面形貌进行了测试,并且利用台阶仪对其矢高进行了测试。其面形图如图 6 所示,从图中可以看出,螺旋相位板元件的表面光滑平整,其矢高分别为 $1.162 \mu\text{m}$ ($l=1$), $1.162 \mu\text{m}$ ($l=3$), $1.164 \mu\text{m}$ ($l=10$), 以及 $1.157 \mu\text{m}$ ($l=20$)。

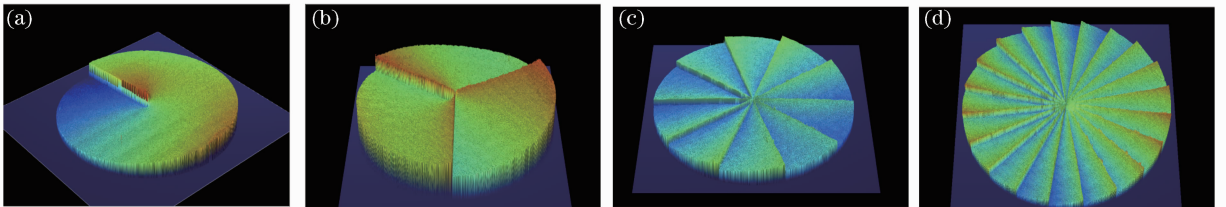


图 6 干涉仪测得的不同拓扑电荷数螺旋相位板的表面形貌。(a) $l=1$; (b) $l=3$; (c) $l=10$; (d) $l=20$

Fig. 6 Surface topography of spiral phase plate corresponding to different topological charges measured by interferometer. (a) $l=1$; (b) $l=3$; (c) $l=10$; (d) $l=20$

4.2 光学效果测试

为了验证制备所得的螺旋相位板的光学效果,开展了测试实验。实验中所采用的激光器的波长为 532 nm , 光束的直径约为 5 mm ,螺旋相位板元件距离观察面的距离约为 4 m 。当光束分别入射到不同电荷数的螺旋相位板时,在观察面上所获得的光场分布如图 7 所示。

从以上结果可以看出,利用制备所得的不同电荷数的螺旋相位板,均可以获得形状良好的涡旋光场分布,说明了上述制备技术的正确性和高精度性。并且从图中可以看出,当螺旋相位板的电荷数越大的时候,所获得的涡旋光的直径越大。

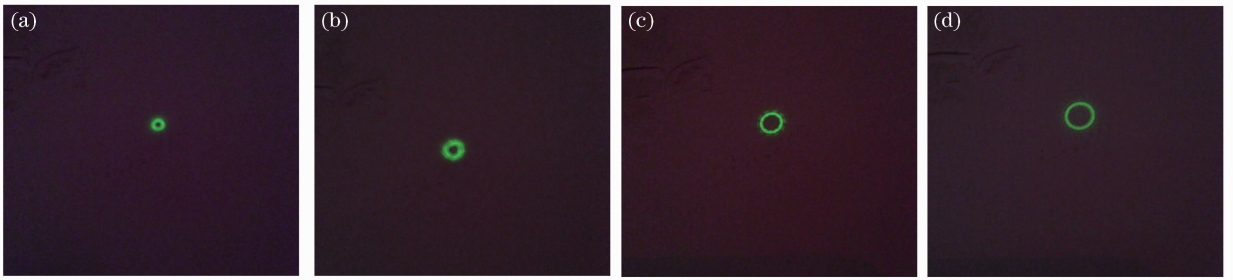


图 7 利用不同电荷数的螺旋相位板所获得的涡旋光。(a) $l=1$; (b) $l=3$; (c) $l=10$; (d) $l=20$

Fig. 7 Obtained vortex light using SPP corresponding to different charges. (a) $l=1$; (b) $l=3$; (c) $l=10$; (d) $l=20$

5 结 论

提出了一种用于制备连续面形螺旋相位板的方法,并且采用该方法制备完成了 4 种不同电荷数的螺旋相位片,其电荷数分别为 1, 3, 10 和 20,适用波长为 532 nm。在本方法中,将二维掩模与移动曝光技术相结合,可以利用二维掩模调制曝光量以实现连续面形三维结构的制备。在该制作流程中,不需要昂贵的仪器和设备,制作周期短,成本低,制备结果表明该方法是一种用于制备连续面形螺旋相位板的有效方法。

参 考 文 献

- 1 M W Beijersbergen, R P C Coerwinkel, M Kristensen, *et al.*. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate[J]. *Opt Commun*, 1994, 112(5-6): 321-327.
- 2 S N Khonina, V V Kotlyar, M V Shinkaryev, *et al.*. The phase rotor filter[J]. *J Mod Opt*, 1992, 39(5): 1147-1154.
- 3 P A M Dirac. Quantized singularities in the electromagnetic field[J]. *Proc R Soc Lond A*, 1931, 133(821): 60-72.
- 4 J F Nye, M V Berry. Dislocations in wave trains[J]. *Proc R Soc Lond A*, 1974, 336(1605): 165-190.
- 5 J Wang, J Yang, I M Frazal, *et al.*. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photon*, 2012, 6: 488-496.
- 6 A Niv, G Biener, V Kleiner, *et al.*. Formation of linearly polarized light with axial symmetry by use of space-variant subwavelength gratings [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(7): 510-512.
- 7 K Sueda, G Miyaji, N Miyanaga, *et al.*. Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high-intensity laser pulses [J]. *Opt Express*, 2004, 12(15): 3548-3553.
- 8 C S Guo, D M Xue, Y J Han, *et al.*. Optimal phase steps of multi-level spiral phase plates[J]. *Opt Commun*, 2006, 268(2): 235-239.
- 9 P Schemmel, G Pisano, B Maffei. Modular spiral phase plate design for orbital angular momentum generation at millimetre wavelengths[J]. *Opt Express*, 2014, 22(12): 14712-14726.
- 10 B Chen, L R Guo, J Y Tang, *et al.*. Refractive microlens arrays with parabolic section profile and no dead area [C], *SPIE*, 1996, 2866: 420-423.
- 11 B Chen, L R Guo, J Y Tang, *et al.*. Novel method for making parabolic grating [C]. *SPIE*, 1996, 2687: 142-149.
- 12 C L Du, X C Dong, C K Qiu, *et al.*. Profile control technology for high performance microlens array [J]. *Opt Eng*, 2004, 43(11): 2595-2602.
- 13 L F Shi, X C Dong, Q L Deng, *et al.*. Formation for bass-relief micro-profiles based on an analytic formulation [J]. *Chin Phys Lett*, 2007, 24(10): 2867-2869.
- 14 L F Shi, C L Du, X C Dong, *et al.*. Effective formation method for an aspherical microlens array based on an aperiodic moving mask during exposure [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(34): 8346-8350.

栏目编辑: 韩 峰