

文章编号:1007-2780(2025)09-1268-07

接近式步进全息干涉拼接曝光实现的大口径 液晶偏振光栅制备

王晨¹, 房启鹏^{1#}, 江飞宇^{1,2}, 廖铖凯^{1,2}, 孙秀辉¹, 胡超¹, 尹韶云^{1*}

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;

2. 重庆邮电大学电子科学与工程学院, 重庆 400065)

摘要:大口径的液晶偏振光栅由于其高效率、无惯性的优势,在光束指向扫描模组中具有广泛的潜在应用。受限于偏振全息干涉曝光光路元件的口径,难以通过单次曝光制备口径在2 in (1 in=2.54 cm)以上的液晶偏振光栅。本文提出了接近式步进全息干涉拼接曝光方法,通过与曝光基片接近放置的掩模版,实现单次曝光区域位置的精确控制。配合高精度位移台,实现了大口径液晶偏振光栅的步进式拼接曝光。本文所制备光栅幅面达150 mm,拼接缝隙仅为26.4 μm ,衍射效率达96.86%。本文为大口径光束的高效偏转提供了新的思路。

关键词:液晶偏振光栅;全息干涉曝光;光配向;液晶聚合物

中图分类号: O484.4; O753⁺.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2025-0113 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2025-0113

Fabrication of large-aperture liquid crystal polarization gratings by proximity stepper holographic interference splicing exposure

WANG Chen¹, FANG Qipeng^{1#}, JIANG Feiyu^{1,2}, LIAO Chengkai^{1,2}, SUN Xiuhui¹,
HU Chao¹, YIN Shaoyun^{1*}

(1. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences,
Chongqing 400714, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, Chongqing University of Posts and
Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Large-aperture liquid crystal polarization gratings (LCPGs) hold broad potential applications in beam steering modules due to their advantages of high efficiency and inertia-free operation. However, limited by the aperture of optical components in polarization holographic interference exposure systems, it is challenging to fabricate LCPGs with apertures exceeding 2 in (1 in=2.54 cm) through single exposure.

收稿日期: 2025-06-04; **修订日期:** 2025-07-07.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No.62175239); 国家重点研发计划(No.2024YFF0726302); 重庆市北碚区科技人才与自主创新专项(No.2024-17).

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.62175239), National Key Research and Development Program of China (No.2024YFF0726302); Chongqing Beibei District Science and Technology Bureau (No.2024-17)

[#]共同第一作者

^{*}通信联系人, E-mail: ysy@cigit.ac.cn

This paper proposes a proximity stepper holographic interference splicing exposure method. By employing a photomask placed in close proximity to the exposure substrate, precise control of single-exposure area positioning is achieved combined with a high-precision displacement stage. Stepper splicing exposure of a 150 mm aperture LCPG is realized. The fabricated grating exhibits a splicing seam of only 26.4 μm and achieves a diffraction efficiency of 96.86%. This paper provides a new idea for the efficient deflection of large-aperture beams.

Key words: liquid crystal polarization gratings; holographic interference exposure; photoalignment; liquid crystal polymer

1 引言

光束的精确指向偏转被广泛用于显示系统、激光雷达、自由空间光通信以及激光微纳加工等领域^[1-2]。液晶偏振光栅中的液晶分子在面内呈“摆线型”排列,从而对入射光圆偏振光产生几何相位调制,通过控制液晶层厚度为半波片厚度,理论上可产生100%的光束偏转效率^[3]。由于其具有良好的共形性,并具有高衍射效率、无惯性扫描的优势,液晶偏振光栅已逐步应用于传感器、激光通信和激光雷达终端,有望逐渐替代传统的机械式扫描装置^[4-7]。

口径是光束指向扫描模块的核心参数之一。大口径扫描系统往往具有更低的光束发散角、更远的传输距离和更高的分辨率。目前,液晶偏振光栅的制备主要依赖于包括双光束干涉光路、马赫-曾德尔干涉光路及迈克尔逊干涉光路在内的偏振全息干涉曝光法。受限于偏振光学元件的口径,难以直接制备口径在2 in (1 in=2.54 cm)以上的液晶偏振光栅。Matthew等利用发散球面波通过沃拉斯顿棱镜,产生两束共光路但旋向相反的发散圆偏光,制备了6 in (1 in=2.54 cm)幅面的液晶偏振光栅,但引入发散球面波极大地降低了曝光光源的能量利用率^[8]。在此基础上,沈浩等用线偏振的发散球面波通过两片液晶偏振光栅模板,从而产生两束光强相等的正交圆偏光,利用大口径透镜准直后进行偏振干涉曝光,实现了200 mm口径的液晶偏振光栅,并通过调节两片液晶偏振光栅模板的相对角度实现了所制备光栅周期的连续可调^[9]。然而,所制备光栅的口径依然被准直透镜的口径所制约。Zhi Meng利用高通量偏振直写制备了4 in (1 in=2.54 cm)口径的液晶偏振光栅,而受限于单个直写光点尺寸,难以制

备具有亚微米周期的光栅^[10]。依赖于高精度位移台和小口径曝光光束的步进式光学拼接技术已被广泛用于米级幅面的全息光栅制作,这为大口径液晶偏振光栅的制备提供了启发^[11]。

本文提出了接近式步进全息干涉拼接曝光方法,用于大口径液晶偏振光栅的制备。在经典的双光束干涉曝光光路基础上,利用与曝光基片接近放置的方形孔径掩模版,实现了单次曝光位置的精确控制。通过高精度位移台移动曝光基片,实现了大面积光栅的拼接曝光。本文制备了周期为5 μm ,幅面为150 mm的液晶偏振光栅,衍射效率达96.86%。

2 接近式步进全息干涉拼接曝光原理

接近式步进全息干涉拼接曝光的原理图如图1(a)所示,实际搭建的接近式步进全息干涉拼接曝光系统如图1(b)所示。波长 $\lambda=457\text{ nm}$ 的激光光束经扩束后,依次经过分束棱镜和1/4波片,形成两束光强相等、旋向相反的圆偏振光,其复振幅可写为:

$$\begin{aligned} E_1 &= e^{ikr \sin(\theta/2)} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \\ E_2 &= e^{ikr \sin(-\theta/2)} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $k=2\pi/\lambda$ 为波矢, θ 为光束之间的夹角。这两束旋向相反的圆偏振光在曝光位置处发生干涉,产生的偏振干涉光场为:

$$E = \begin{bmatrix} \cos[kx \sin(\theta/2)] \\ -\sin[kx \sin(\theta/2)] \end{bmatrix}. \quad (2)$$

两束光强相等、旋向相反的圆偏振光将在曝光位置干涉形成具有“摆线型”偏振分布的干涉光

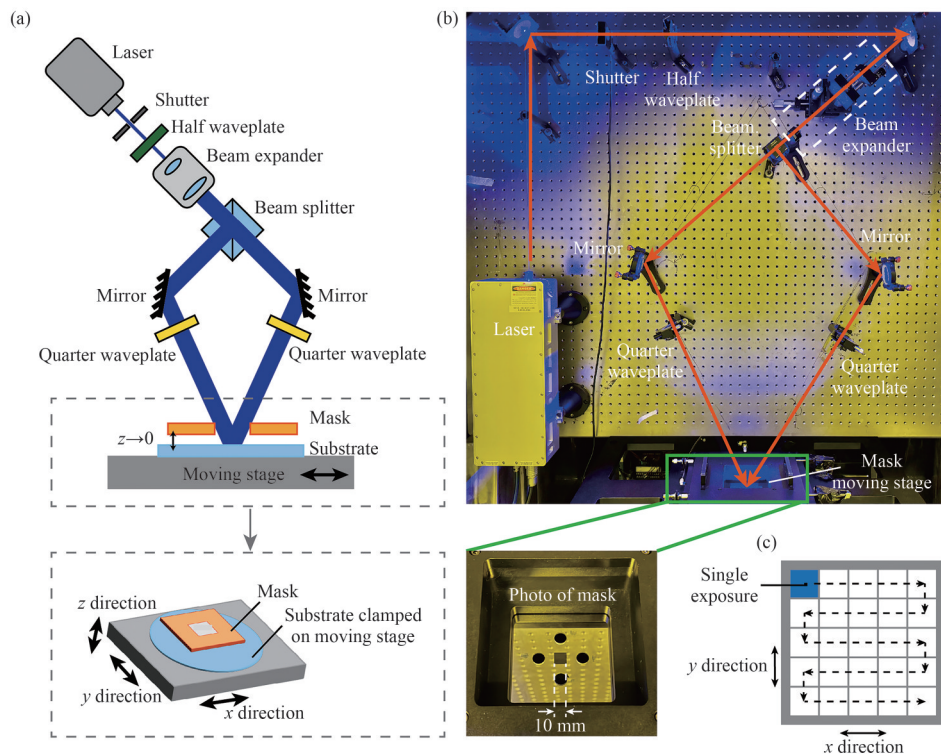


图1 接近式步进全息干涉拼接曝光方法。(a)曝光系统原理图;(b)曝光系统照片;(c)步进式曝光路线图。

Fig. 1 Schematic diagram of proximity stepper holographic interference splicing exposure. (a) Schematic diagram of the exposure system; (b) Photo of the exposure system; (c) Step-by-step exposure route map.

场,其周期由两束圆偏振光的夹角所决定。

采用偶氮染料亮黄(Brilliant Yellow, BY)作为光取向材料,记录两束圆偏振光干涉产生的偏振光场。BY的光谱吸收峰值在432 nm附近。使用圆偏振光曝光后,BY分子发生平面内指向,从而引导液晶分子随之有序排列。实验中,将BY以0.9%的质量分数溶解于N,N-二甲基甲酰胺(N,N-Dimethylformamide, N,N-DMF)中,随后以3 000 r/min的速度旋涂到清洗干净的玻璃基片上,在100 ℃烘烤30 min后,即可用于全息干涉曝光。

按以上步骤制备好BY光配向层的基片被真空吸附在 x 、 y 、 z 三轴精密位移台上。基片之上设置一通光孔径为10 mm×10 mm的方形掩模版,调节位移台 z 轴使曝光基片与掩模版位置接近。单次曝光能量为10 J。在曝光过程中,首先固定 y 轴,移动位移台 x 轴完成第一行拼接曝光;随后再通过设置 y 轴位移,将曝光区域移动到下一列,重复以上步骤完成第二行拼接曝光。如此循环往复,直至大幅面液晶偏振光栅曝光完成,从而将“摆线型”偏振分布的干涉光场记录到光配向层上,如图1(c)所示。

在接近式步进全息干涉曝光方法中,单次曝光区域之间的拼接缝隙宽度与掩模版和曝光基片的距离有关。在理想情况下,掩模版应紧贴曝光基片。然而,在实际的拼接曝光过程中,曝光基片将随位移台在水平面上运动150 mm。为了避免在运动过程中掩模版和曝光基片之间的刮蹭,需要在掩模版与曝光基片之间引入一微小空隙,这导致了曝光光束的衍射,从而引入了单次曝光区域之间的拼接缝隙。基于菲涅尔衍射理论,我们分析了掩模版和曝光基片之间的距离 z 与拼接缝隙的关系。

设矩形掩模版通光孔径边长为 a ,则矩形掩模版处的曝光光束复振幅为:

$$E_{1, \text{aperture}}(x_0, y_0) = \text{rect}\left(\frac{x_0}{a}, \frac{y_0}{a}\right) E_1,$$

$$E_{2, \text{aperture}}(x_0, y_0) = \text{rect}\left(\frac{x_0}{a}, \frac{y_0}{a}\right) E_2. \quad (3)$$

到达曝光平面的曝光光束复振幅 U_1 、 U_2 可由角谱法求出^[12]:

$$U(x, y, z) = \text{FFT}^{-1}\left\{\text{FFT}\left\{E(x_0, y_0, 0)\right\}H(f_x, f_y, z)\right\}, \quad (4)$$

其中:FFT和 FFT^{-1} 分别代表傅里叶变换和反傅里叶变换, f_x 、 f_y 为空间频域坐标, H 为传播函数。 H 写为:

$$H(f_x, f_y, z) = \exp \left[ikz \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right]. \quad (5)$$

在曝光平面上,两束光束发生干涉,形成的干涉光场 $U_c = U_1 + U_2$ 具有“摆线型”偏振分布,其二维分布偏振如图2(a)所示。曝光光束在掩模版 x 方向边界的衍射表现为条纹形状的畸

变,而在掩模版 y 方向边界的衍射并不影响干涉光场。掩模版和曝光平面之间的距离越大,光栅条纹畸变范围越大。图2(b)展示了与 x 方向平行的一维干涉光场的偏振分布。当掩模版和曝光平面的间距 z 分别设置为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $30\text{ }\mu\text{m}$ 时,拼缝宽度分别为 $8.8\text{ }\mu\text{m}$ 、 $12.3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $17.8\text{ }\mu\text{m}$ 、 $22.9\text{ }\mu\text{m}$ 。在本文所述的步进式全息干涉拼接曝光方法中,掩模版和曝光平面的间距设置为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

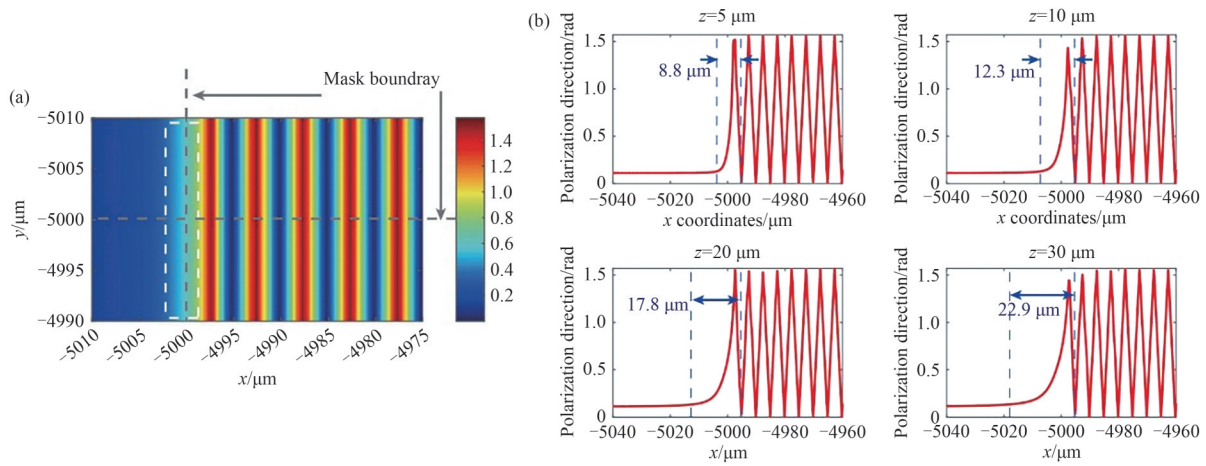


图2 掩模版和曝光基片之间的距离 z 与拼接缝隙的关系。(a)曝光平面处于干涉光场的二维偏振分布;(b)拼接缝隙宽度与 z 的关系。

Fig. 2 Relationship between the splicing seam width and z , which means the distance between the mask and the exposure substrate. (a) Two-dimensional polarization distribution of the interference light field at the exposure plane; (b) Relationship between the splicing seam width and z .

3 大口径液晶偏振光栅制备

液晶偏振光栅是通过在曝光完成的基片上逐层旋涂聚合物液晶溶液而制备的。聚合物液晶分子的排列由取向层中BY分子的排列决定,其指向矢分布可写为^[13]:

$$\vec{n} = \left\{ \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}x\right), \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda}x\right), 0 \right\}, \quad (6)$$

其中, $\Lambda = \frac{\lambda}{2} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ 代表双光束曝光过程中所决定的液晶分子排列周期。

制备完成的液晶偏振光栅对入射的圆偏振光产生几何相位调制。设液晶分子双折射率差为 Δn ,入射到光栅的光波长为 λ_m ,则液晶偏振光栅 ± 1 级衍射效率为^[3]:

$$\eta_{\pm 1} = \frac{1}{2} (1 \mp S_3) \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda_{in}} \right), \quad (7)$$

其中: S_3 为表征入射光偏振方向的归一化斯托克斯参数, d 为液晶层厚度。当液晶层厚度满足 $\Delta n d = \lambda/2$ 且入射光为圆偏振光($S_3 = \pm 1$)时,液晶偏振光栅 ± 1 级的理论衍射效率达100%。

本文所采用的液晶聚合物为RM257,以3%的质量分数溶解于甲苯中,并按照5%的质量分数加入光引发剂安息香二甲醚。制备过程中,将液晶聚合物溶液滴加到曝光完成的基片上,先以500 r/min的速度旋涂5 s,再以1 500 r/min的速度旋涂30 s,并在氮气环境中用紫外非偏振光固化。随后使用波长650 nm的圆偏振光作为入射光源,使用光功率计测量液晶偏振光栅各个衍射级次的衍射效率。在每次测量中,入射光入射到液晶光栅上3个不同的空间位置,并计算3个入

射点对应衍射效率的平均值和标准差。反复进行旋涂操作,直至+1级次衍射效率达到最大,如图 3(a)所示。此时,制备完成的液晶偏振光栅衍射场中存在-1级、0级、+1级、+2级 4 个级次,其衍射效率依次为 $(0.415\pm0.002)\%$ 、 $(2.306\pm$

$0.401)\%$ 、 $(96.863\pm0.405)\%$ 、 $(0.415\pm0.002)\%$ 。其中,+1级衍射效率达 $(96.863\pm0.405)\%$,说明此液晶偏振光栅具有高效的光束偏转能力,且其衍射效率的空间均匀性良好。制备完成的幅面 150 mm 的液晶偏振光栅如图 3(b)所示。

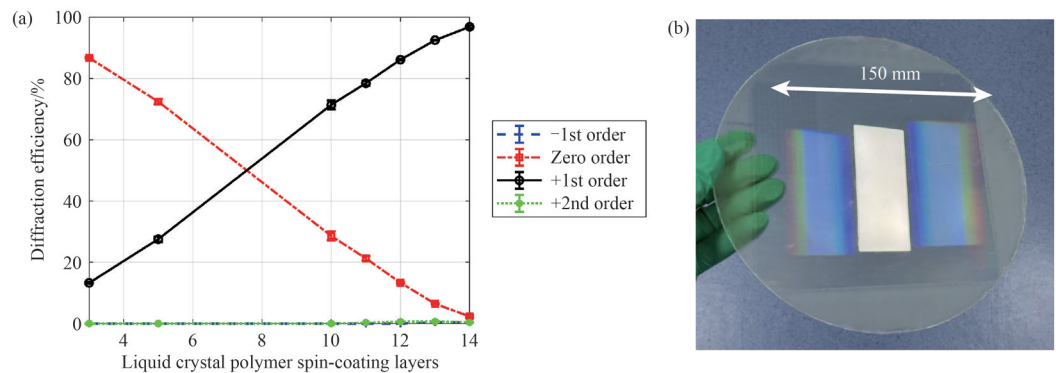


图 3 大口径液晶偏振光栅的制备。(a)大口径液晶偏振光栅各级次衍射效率与聚合物液晶旋涂层数的关系;(b)制备完成的大口径液晶偏振光栅。

Fig. 3 Fabrication of large-aperture liquid crystal polarization grating. (a) Relationship between diffraction efficiencies at various diffraction orders and the number of liquid crystal spinning-coated layers for the large-aperture LCPG; (b) Fabricated large-aperture liquid crystal polarization grating.

使用偏光显微镜表征液晶偏振光栅的微观结构,如图 4(a)所示,光栅结构中液晶分子排列与式(6)相符,所制备的光栅周期为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。拼接处的微观形貌如图 4(b)所示。与图 2 所示仿真结果一致, x 方向的拼缝表现为条纹结构畸变,缝宽为 $26.4\text{ }\mu\text{m}$ 。缝宽略大于理论值,这可能是由于位移台的移动误差导致的。 y 方向的拼接缝隙依旧展现出规律的条纹结构,接缝处主要表现为两个单次曝光区域之间的条纹错位,缝宽为 $14.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

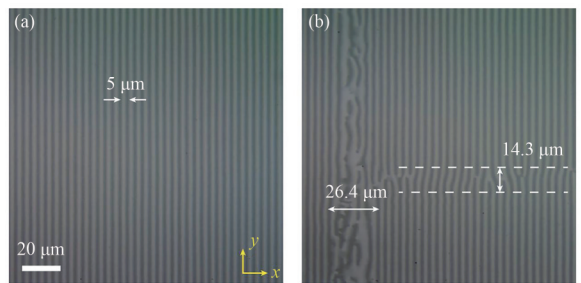


图 4 大口径液晶偏振光栅的微观结构。(a)单次曝光区域内的光栅结构;(b)光栅拼缝处的微观结构。

Fig. 4 Micro-structure of the large-aperture liquid crystal polarization grating. (a) Grating structure within a single exposure region; (b) Micro-structure at the splicing seam.

提高位移台的定位精度有助于减小单次曝光区域之间的拼接缝隙。目前,激光干涉位移测量精度已达到纳米量级,有望通过激光干涉测量对位移台进行标定,并通过光栅尺闭环反馈实现单次曝光区域的精确控制^[14]。

使用波长 650 nm 的圆偏振光作为入射光源照射制备完成的液晶偏振光栅,可根据式(6)所示的液晶分子指向矢分布在 Matlab 软件中仿真得到液晶偏振光栅的远场衍射效率和衍射图样,如图 5(a)、图 5(b)所示。当左旋圆偏振光(Left-handed Circularly Polarized Light, LHC)入射时,液晶偏振光栅-1级的仿真衍射效率达 100%;而当右旋圆偏振光(Right-handed Circularly Polarized Light, RHC)入射时,液晶偏振光栅+1级的仿真衍射效率达 100%,与式(7)所示一致。实测得到的液晶偏振光栅远场衍射图样如图 5(c)所示。由于制备的液晶偏振光栅的衍射效率高达 96.86%,其衍射光强远高于其他级次,故而图中仅显示 ± 1 级衍射光斑。当入射光源具有左旋圆偏振态时,+1级次衍射角为 -7.5° ;当入射光源具有右旋圆偏振态时,-1级次衍射角为 7.5° 。

所制备的大口径液晶偏振光栅的衍射光束

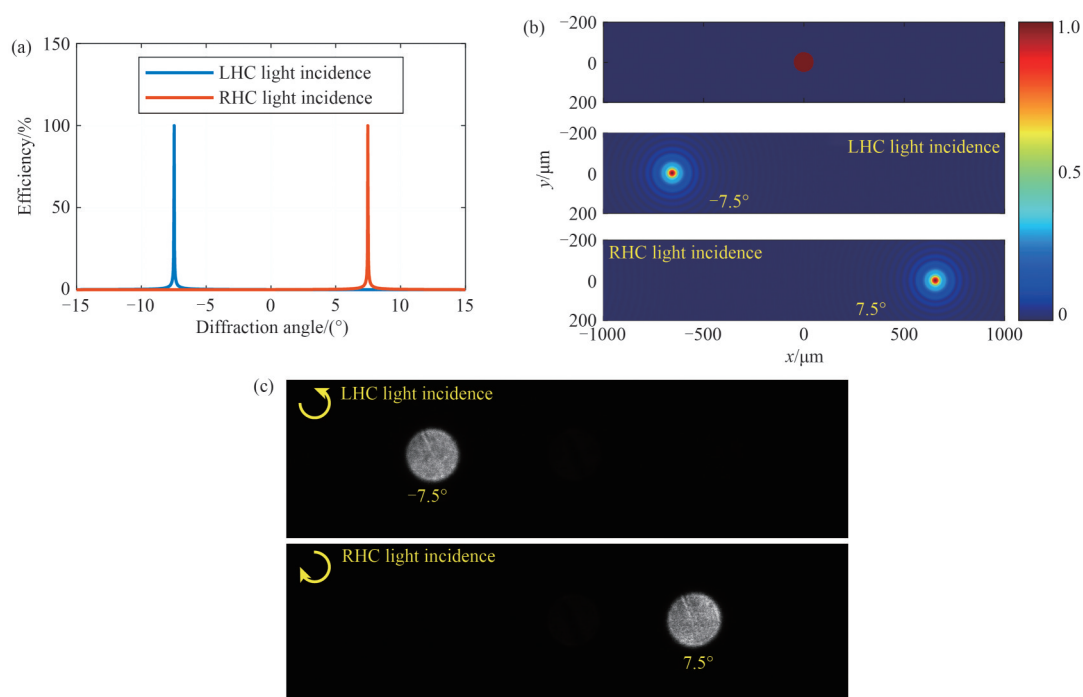


图5 大口径液晶偏振光栅的远场衍射仿真与实测。(a)大口径液晶偏振光栅的远场衍射效率仿真;(b)大口径液晶偏振光栅的远场衍射图样仿真;(c)大口径液晶偏振光栅的远场衍射图样实测。

Fig. 5 Simulation and experiment of far-field diffraction of the large-aperture liquid crystal polarization grating. (a) Far-field diffraction efficiency simulation; (b) Far-field diffraction pattern simulation; (c) Far-field diffraction pattern experiment.

波前差由 zygo 干涉仪测量,其衍射光束波前差的 RMS 为 0.3λ (@633 nm, 45 mm 口径范围内)。在整个 150 mm 口径范围内,此液晶偏振光栅的衍射光束波前差水平一致。相比于通过直接扩大曝光光束口径来制备大幅面液晶偏振光栅的方法,本文的步进拼接曝光方法有助于衍射光束的波前差控制。未来通过增大位移台的行程,有望制备更大幅面且衍射光束波前差良好的液晶偏振光栅。

4 结 论

通过小口径曝光区域的步进式拼接曝光方

法,实现了口径 150 mm、周期 $5\ \mu\text{m}$ 的液晶偏振光栅制备,衍射效率达 96.86%。采用双光束偏振全息干涉法实现单次曝光,利用与曝光基片距离 $20\ \mu\text{m}$ 的方形孔径掩模版与高精度位移台实现了单次小口径曝光区域的精确控制,所制备的光栅拼接缝隙仅为 $26.4\ \mu\text{m}$ 。所提出的步进式拼接曝光方法主要依赖掩模版和三轴位移台的精密配合,能推广到马赫-曾德尔偏振全息干涉光路及迈克尔逊偏振全息干涉光路,从而灵活调整所制备的大幅面光栅的周期。所制备的液晶偏振光栅为大口径光束的高效偏转提供了新的思路,有望为激光雷达和空间光通信终端提供新的启发。

参 考 文 献:

- [1] 侯霞,刘哲琦,常亦迪,等. 卫星激光通信技术发展现状与趋势分析[J]. 中国激光,2024,51(11):1101013.
HOU X, LIU Z Q, CHANG Y D, *et al.* Analysis on development status and trend of space laser communication technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(11): 1101013. (in Chinese)
- [2] HOY C, STOCKLEY J, SHANE J, *et al.* Non-mechanical beam steering with polarization gratings: a review [J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 361.
- [3] KIM J, OH C, SERATIS, *et al.* Wide-angle, nonmechanical beam steering with high throughput utilizing polarization

- gratings [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(17): 2636-2639.
- [4] SEARCY P, MATSUMORI B A. Five advantages of managed optical communications array (MOCA) technology over other Lasercomm approaches [C]. *Free-Space Laser Communications XXXIII*. Online: SPIE, 2021: 116780Y.
- [5] ZHOU R S, GU D M, WU J P, *et al.* Optoelectronic pod integrating FSO communication and scanning based on liquid crystal optical phased array [C]. 2024 22nd International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Harbin: IEEE, 2024: 1-3.
- [6] 刘禹彤, 曹宗新, 李子凡, 等. 基于液晶偏振光栅的大口径激光光束扫描系统[J]. *应用光学*, 2024, 45(3): 557-567.
LIU Y T, CAO Z X, LI Z F, *et al.* Large-aperture laser beam scanning system based on liquid crystal polarization grating [J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 557-567. (in Chinese)
- [7] 刘博扬, 王冉冉, 孙静. 可视化柔性可穿戴传感器研究进展[J]. *分析化学*, 2023, 51(3): 305-315.
LIU B Y, WANG R R, SUN J. Advances in visualization of flexible wearable sensors [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(3): 305-315. (in Chinese)
- [8] MISKIEWICZ M N, KIM J, LI Y M, *et al.* Progress on large-area polarization grating fabrication [C]//*Proceedings of SPIE 8395, Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXVI*. Baltimore: SPIE, 2012.
- [9] 沈浩, 段佳著, 陈一波, 等. 基于可调剪切干涉曝光方法的大口径液晶偏振光栅制备[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(5): 602-609.
SHEN H, DUAN J Z, CHEN Y B, *et al.* Fabrication method of large-area polarization grating based on tunable shearing holography [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 602-609. (in Chinese)
- [10] MENG Z, HUANG W B, ZHANG L X, *et al.* Large aperture and defect-free liquid crystal planar optics enabled by high-throughput pulsed polarization patterning [J]. *Optics Express*, 2023, 31(19): 30435-30445.
- [11] LI W H, WANG X Y, BAYANHESHIG, *et al.* Controlling the wavefront aberration of a large-aperture and high-precision holographic diffraction grating [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 112.
- [12] ZHANG K, SUN X H, LV Y M, *et al.* Band-amplified angle spectrum method for the phase hologram design to achieve high-quality holographic imaging in long distance [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 176: 111046.
- [13] SARKISSIAN H, PARK B, TABIRIAN N, *et al.* Periodically aligned liquid crystal: potential application for projection displays [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2006, 451(1): 1-19.
- [14] 林雄磊, 苏晓博, 王嘉宁, 等. 亚纳米皮米激光干涉位移测量技术与仪器[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(3): 0312016.
LIN X L, SU X B, WANG J N, *et al.* Laser interferometer technology and instruments for sub-nanometer and picometer displacement measurements [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 0312016.

作者简介:



王 晨, 女, 博士, 2022 年于华中科技大学获得博士学位, 主要从事液晶全息光学器件与应用的研究。E-mail: wangchen@cigit. ac. cn



房启鹏, 男, 博士, 2023 年于中国科学院重庆绿色智能技术研究院获得博士学位, 主要从事大幅面液晶聚合物偏振光栅制备的研究。E-mail: 670382321@qq. com



尹韶云, 男, 博士, 研究员, 2009 年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位, 主要从事微纳光学与系统集成的研究。E-mail: ysy@cigit. ac. cn