

文章编号:1007-2780(2026)09-1223-09

基于偏振激光直写光取向的液晶几何 相位平面光学元件

张陈应^{1,2}, 杨 喆^{1,2}, 朱庆骥^{1,2}, 刘 亮^{1,2}, 李森森^{1,2}, 陈鹭剑^{1,2*}

(1. 厦门大学 电子科学与技术学院 电子工程系, 福建 厦门 361104;
2. 厦门大学 福建省超快激光技术及应用重点实验室, 福建 厦门 361104)

摘要: 基于液晶的几何相位原理, 可以设计并制造出多种消色差的平面光学元件, 例如 q -plate、偏振光栅等, 而液晶的精确取向则是实现这些光学元件功能的关键基础。尽管数字微镜器件(DMD)曝光技术已广泛应用于液晶几何相位元件的光取向工艺中, 但其尺寸分辨率受限于微镜单元的尺寸以及投影物镜的放大倍率。针对上述局限, 本文提出了一种结合扫描振镜与位移平台的偏振激光直写(PLDW)系统。该系统实现了 $3.4\ \mu\text{m}$ 的高尺寸分辨率, 并展现出良好的光取向效果。利用该系统, 本文成功制备了 Pancharatnam-Berry(PB)光栅、透镜及微透镜阵列。实验结果表明, 所制备的 PB 光栅周期仅为 $27\ \mu\text{m}$, 在圆偏振光入射下的相对衍射效率超过 85%; 所制备的 PB 透镜具备良好的聚焦性能, 其阵列结构可实现对掩模图案的 1:10 倍率阵列成像。本文提出的 PLDW 技术为液晶几何相位平面光学元件的光取向提供了一种高精度、低成本的新方法。

关键词: 激光直写; 光取向; 几何相位; 液晶光学元件

中图分类号: TN249 文献标识码: A doi: 10.3724/CJLCD.2026-0132 CSTR: 32172.14.CJLCD.2026-0132

Liquid crystal geometric phase planar optical elements based on polarized laser direct writing induced photoalignment

ZHANG Chenying^{1,2}, YANG Zhe^{1,2}, ZHU Qingqi^{1,2}, LIU Liang^{1,2}, LI Sensen^{1,2}, CHEN Lujian^{1,2*}

(1. Department of Electronic Engineering, School of Electronic Science and Engineering,
Xiamen University, Xiamen 361104, China;

2. Fujian Key Laboratory of Ultrafast Laser Technology and Applications, Xiamen University,
Xiamen 361104, China)

Abstract: Various achromatic planar optical elements, such as q -plates and polarization gratings, can be designed and fabricated based on the geometric phase of liquid crystals. The function of these optical elements heavily relies on the precise alignment of liquid crystal molecules. While digital micromirror device(DMD) exposure has been widely used for the photoalignment of liquid crystal geometric phase elements, its dimensional resolution is inherently limited by the micromirror pitch and the magnification of

收稿日期: 2026-07-15; 修订日期: 2026-08-15.

基金项目: 国家自然科学基金(No.62475223); 国家重点研发计划(No.2022YFA1203700)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.62475223); National Key Research and Development Program of China (No.2022YFA1203700).

*通信联系人, E-mail: lujianchen@xmu.edu.cn

the projection lens. To address these limitations, this paper proposes a polarized laser direct writing (PLDW) system which integrates a scanning galvanometer with a displacement stage. The developed PLDW system achieves a high dimension resolution of $3.4\ \mu\text{m}$ and demonstrates effective photoalignment capabilities. Utilizing this system, Pancharatnam-Berry(PB) gratings, lens and microlens arrays were fabricated. The fabricated PB grating exhibits a fine period of $27\ \mu\text{m}$ and achieves a relative diffraction efficiency exceeding 85% under circularly polarized illumination. Furthermore, the PB lens demonstrated good focusing performance, and the microlens array successfully generated a clear image array of the mask pattern at a magnification of 1:10. The proposed PLDW technique offers a high-precision and cost-effective solution for the photoalignment of liquid crystal geometric phase planar optical elements.

Key words: laser direct writing; photoalignment; geometric phase; liquid crystal optical elements

1 引言

几何相位亦被称为 Pancharatnam-Berry (PB) 相位,是光通过液晶等各向异性介质时,因偏振态沿特定路径演化而获得的一种特殊相位,其相位差仅由介质的空间相位角决定^[1],而与光波波长无关^[2]。利用这一波长无关的特性,可以设计并制造出各种无色差的液晶几何相位平面光学元件^[3],例如 q -plate^[4-5]、偏振光栅^[6-9]等。这些元件能够对入射光的传播方向、强度、偏振态及相位等特征产生调制作用^[1,10-15]。

在液晶几何相位平面光学元件的制造过程中,液晶分子的取向控制是至关重要的环节。目前主流的取向技术主要包括摩擦取向^[16-17]和光取向^[18-20]。作为一种非接触式取向技术,光取向具有低污染、非破坏、高分辨率等显著优势^[18,20-22]。

在光取向工艺中,掩模版是实现图案化配向的核心组件。将掩模版与特定波长的偏振光结合,可诱导基底表面的光敏取向层(如SD1)发生定向重排^[18,21],进而实现对液晶分子的精确取向。根据物理形态,掩模版分为物理掩模版^[23-24]和数字掩模版^[22,25]。物理掩模版采用固定图案,虽存在开模周期长、单次成本高的局限,但适合工业界的大批量稳定生产^[23],可通过规模效应摊薄成本。而在实验室科研等非量产场景中,数字掩模版更为常用。该技术将取向图案数字化,借助数字微镜器件(DMD)^[25-27]、偏振激光直写(PLDW)^[28-30]等技术对基底进行曝光,实现高分辨率的光取向。

基于DMD的光取向技术因其加工效率高、编程灵活等优势,已被广泛应用于各类液晶几何

相位平面光学元件的制造^[25-27]。然而,其尺寸分辨率受限于微镜单元的尺寸以及投影物镜的放大倍率^[31-34]。相比之下,偏振激光直写(PLDW)通过偏振激光束的直接扫描实现图案化取向,有望突破上述限制。例如,美国北卡罗来纳州立大学 Escuti 课题组^[28]利用聚焦的高斯激光束对光取向层进行重叠曝光,配合位移台高速扫描和半波片调节激光的偏振态,成功制备了 q -plate 和全息光栅等液晶几何相位平面光学元件。随后,该课题组^[29]通过算法优化,进一步实现了 $3\ \mu\text{m}$ 像素信息的写入。华中科技大学的熊伟教授课题组^[35]提出飞秒激光双光子直写技术,实现了液晶分子沿激光扫描路径的取向,尺寸分辨率高达 $129.6\ \text{nm}$,并用于制造微型菲涅尔波片阵列。

针对液晶几何相位平面光学元件的光取向制备需求,本文研制了一套基于偏振激光直写(PLDW)的软硬件控制系统,该系统采用扫描振镜与精密位移平台协同工作的直写方案,利用扫描振镜,无需规划运动轨迹,即可将设计好的指向矢经物镜聚焦后直接写入取向层。在 $10\times$ 物镜的聚焦下,系统尺寸分辨率高达 $3.4\ \mu\text{m}$,单次直写的最大幅面直径约 $1.5\ \text{mm}$;配合位移平台,可实现阵列化直写与幅面扩展,最大总幅面可达到 $20\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$ 。利用该系统,本文成功制备了液晶 PB 光栅、透镜及微透镜阵列等典型元件,验证了该技术在制造液晶光学元件方面的潜力。

2 系统搭建与元件制备

2.1 PLDW 系统搭建

PLDW 系统的光路结构如图 1 所示。该系

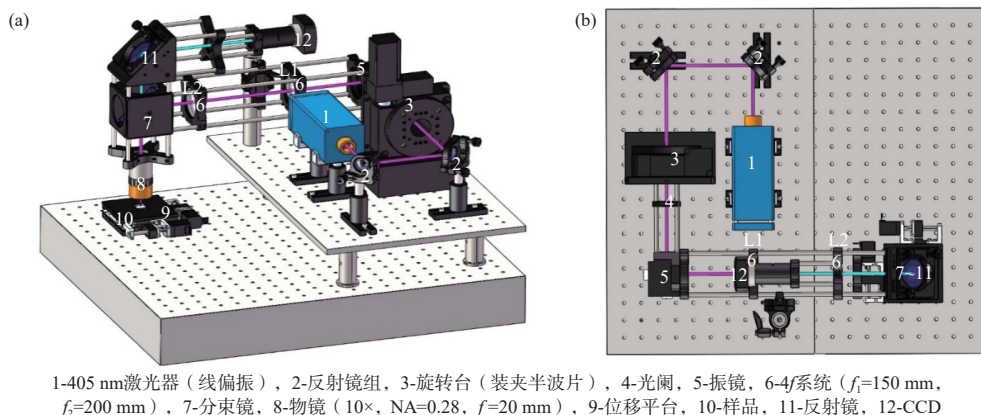


图1 PLDW系统的光路设计。(a) 立体视图; (b) 平面视图。

Fig. 1 Optical setup of PLDW system. (a) Stereo view; (b) Plan view.

统采用波长为 405 nm 的线偏振激光作为光源, 光束经各级光学元件传输后, 由物镜聚焦至样品表面。系统通过激光控制器, 在计算机端实现振镜、旋转台与位移平台的联动控制, 自动完成掩模切换、相位调整及取向直写的全流程操作。

在进行 PLDW 加工前, 首先利用 CCD 观测加工平面的激光光斑尺寸, 并将样品调整至最佳加工物距, 随后按照图 2 所示的工艺流程制备液晶几何相位平面光学元件。加工过程中, 将包含取向信息的数字掩模图像导入系统, 利用图像的

灰度信息精确控制振镜的扫描路径, 无需繁琐的运动轨迹规划即可对液晶光学元件表面的 SD1 层进行取向。结合分步曝光策略, 在切换不同相位的全息图时, 同步旋转光路中的半波片以调整激光偏振方向, 从而在 SD1 表面写入多样化的取向信息, 搭载图示参数的 $10\times$ 物镜和 $4f$ 系统时, 单次直写的最大幅面直径约 1.5 mm。此外, 配合位移平台的运动, 系统可实现阵列化直写与幅面拼接扩展, 扩展后的最大直写幅面为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 。

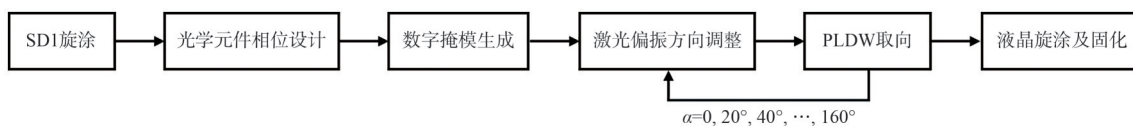


图2 PLDW工艺流程

Fig. 2 Process flow of PLDW

2.2 液晶几何相位平面光学元件的设计

本文利用 MATLAB 软件完成液晶 PB 光栅与 PB 透镜的指向矢分布设计。为了生成数字掩模版 M1~M9, 将 $0^\circ\sim 160^\circ$ 的液晶指向矢角度范围进行离散化处理, 共划分为 9 个区间, 步进间隔为 20° 。

在液晶 PB 光栅的设计中, 液晶分子的指向矢在基板平面 (x - y 平面) 内沿光栅周期方向 (x 轴) 呈连续旋转分布, 并以 Λ 为周期进行重复排布^[36], 如图 3(a) 所示, 液晶分子沿 x 轴的指向矢可描述为:

$$\alpha = -\frac{\pi x}{\Lambda} + \alpha_0, \quad (1)$$

公式(1)中, α_0 为液晶的初始指向矢, 在本文设计的液晶 PB 光栅中, $\alpha_0 = 0$ 。

基于上述指向矢的区间划分, 生成的单个光栅周期数字掩模分布如图 3(b) 所示。进一步地, 图 3(c) 展示了包含多个周期的液晶 PB 光栅的整体数字掩模构成。

对于液晶 PB 透镜, 其 PB 相位 $\Phi = \pm 2\alpha$ 沿径向 r 呈梯度变化, 以实现入射光的聚焦功能。该相位分布满足广义 Snell 定律^[37-38], 据此推导得到液晶指向矢的分布为:

$$\alpha = -\frac{\pi}{\lambda f} r^2 + \alpha_0. \quad (2)$$

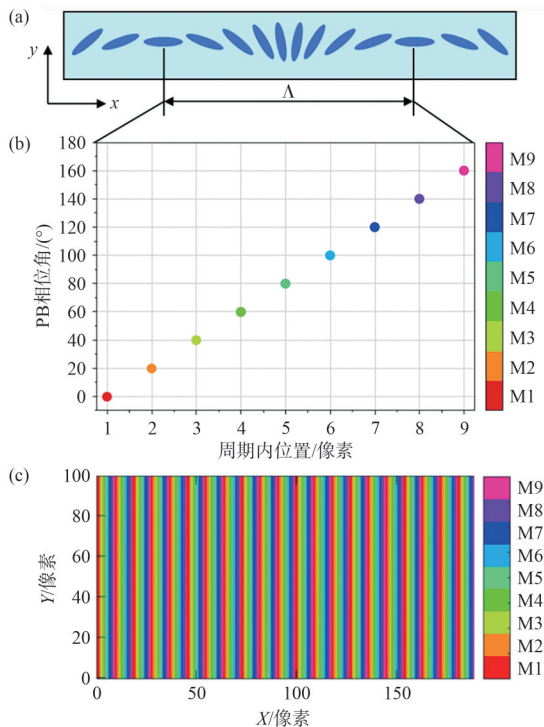


图3 液晶PB光栅的设计。(a)单个光栅周期内的液晶指向矢变化与(b)数字掩模设计;(c)具有多周期的PB光栅内的数字掩模设计。

Fig. 3 Design of liquid crystal PB grating. (a) Liquid crystal director distributions and (b) design of digital masks within a single grating period; (c) Design of digital masks in PB grating with various periods.

在本文设计的液晶PB透镜中,液晶初始指向矢 $\alpha_0=0$,给定透镜口径 R 、焦距 f 和工作波长 λ 后,即可确定透镜的指向矢分布,相应的数字掩模设计如图4所示。值得注意的是,通过对同一指向矢分布图进行几何缩放,可制备出一系列口

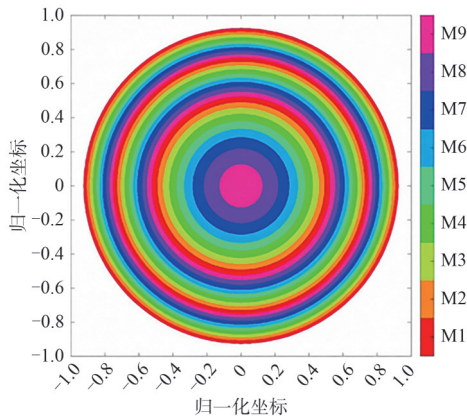


图4 液晶PB透镜的数字掩模设计
Fig. 4 Design of digital masks in liquid crystal PB lens

径不同但数值孔径(NA)保持一致的透镜。

2.3 液晶几何相位平面光学元件的制备流程

液晶几何相位平面光学元件的制备流程可分为:基底清洗、SD1旋涂、SD1光取向、液晶聚合物旋涂及固化。

首先,将1 mm厚的ITO玻璃片切割为25 mm×25 mm的方块作为基底。基底被依次置在ITO清洗剂的纯净水、纯净水、无水乙醇中超声清洗20 min,氮气吹干后置于等离子清洗机(MTI, PCE-6)中清洗处理15 min,以去除表面有机残留并提升润湿性。

随后,使用台式匀胶机(KW-4A)在清洗后的ITO基底上旋涂SD1溶液,工艺参数设定为:800 r·min⁻¹/10 s,3 000 r·min⁻¹/30 s。旋涂完成后,将样品在80℃下烘烤10 min,以挥发溶剂并增强SD1分子与基底的附着力。

将涂覆SD1的基底置于PLDW系统的位移平台上,对上表面的SD1层进行PLDW光取向。

完成PLDW取向后,按照表1所示成分配比配制液晶聚合物溶液,并过滤去除杂质,随后在SD1层表面旋涂液晶聚合物溶液,工艺参数设定为:500 r·min⁻¹/10 s,750 r·min⁻¹/40 s。最后,将样品置于UV LED光源下曝光90 s,使液晶聚合物完全固化,从而制得液晶几何相位平面光学元件。

表1 液晶聚合物溶液的成分配比

Tab. 1 Composition of the liquid crystal polymer solution

名称	质量/g
RM257	0.5
PGMEA	1.5
Irgacure 651	0.012

3 液晶几何相位平面光学元件的制备结果

3.1 激光功率对取向工艺的影响

在液晶几何相位平面光学元件的PLDW取向研究中,本文首先制备了均匀取向的液晶光栅,将光栅单元宽度设定为1像素,以探究激光功率对光栅单元的平均线宽及取向效果的影响,结果如图5所示。

当激光聚焦照射于样品表面时,CCD观测

到的亮斑直径(以下称表观光斑)约为 $30\text{ }\mu\text{m}$,如图5(a)插图所示。由于激光能量主要集中于光束中心,仅中心区域的光强能够达到SD1的取向阈值,所以光栅单元的线宽明显小于表观光斑直径,以下将光强能达到取向阈值的区域直径称为有效直径。

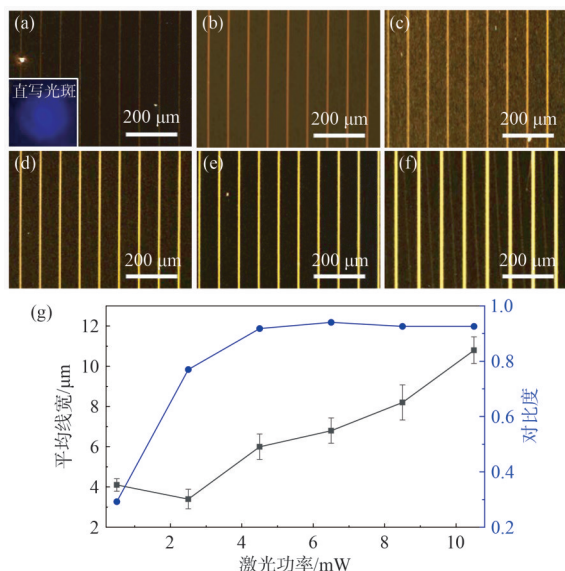


图5 不同激光功率制备的均匀取向液晶光栅线。(a) 0.5 mW; (b) 2.5 mW; (c) 4.5 mW; (d) 6.5 mW; (e) 8.5 mW; (f) 10.5 mW; (g) 平均线宽和对比度随激光功率的变化规律。

Fig. 5 Liquid crystal grating lines with uniform alignment fabricated under different laser powers. (a) 0.5 mW; (b) 2.5 mW; (c) 4.5 mW; (d) 6.5 mW; (e) 8.5 mW; (f) 10.5 mW; (g) Variations of average line width and contrast with increasing laser power.

当激光功率仅为 0.5 mW 时,由于SD1取向不充分,无法有效诱导液晶分子配向,在偏光显微镜(POM)下明暗交替微弱,对比度仅 0.29,此时的平均线宽为 $4.1\text{ }\mu\text{m}$,如图5(a)所示。当激光功率提升至 2.5 mW 时,SD1 获得充分取向, POM 下呈现出清晰的明暗交替条纹,对比度提升至 0.77,同时,平均线宽也缩小到 $3.4\text{ }\mu\text{m}$,展现出优异的尺寸分辨率,如图5(b)所示。随着激光功率的继续提高,尽管对比度可以提高到 0.9 以上,但表观光斑的有效直径也随之增大,从而导致加工线宽明显展宽^[39],如图5(c)~(f)所示。综合权衡平均线宽与对比度两项指标,本文最终将激光功率设定为 2.5 mW,用于液晶几何相位

平面光学元件的制备。

值得注意的是,本文展示的 $3.4\text{ }\mu\text{m}$ 线宽是在 $10\times$ 物镜与 $4f$ 系统配合下实现的,该配置下单次直写的最大幅面直径约为 1.5 mm。在实际应用中,可根据对分辨率和直写幅面的不同需求,更换不同倍率的物镜,并依据衍射极限条件^[40]相应调整 $4f$ 系统^[41-42]:若需获得更高的分辨率,可换用数值孔径(NA)更大的高倍率物镜,但单次直写的最大幅面将随物镜倍率的提高而成比例缩小;反之,若需获得更大的直写幅面,可换用低倍率物镜,单次直写的最大幅面将随倍率的降低而成比例放大,但由于 NA 值的降低,分辨率将相应下降。

3.2 液晶 PB 光栅的制备结果

基于单次振镜直写,得到的液晶 PB 光栅的外形尺寸为 $1\text{ }080\text{ }\mu\text{m}\times 1\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$,其制备及表征结果如图6所示。得益于 PLDW 技术优异的尺寸分辨率,所制备的光栅周期仅为 $27\text{ }\mu\text{m}$,如图6(a)所示。图6(b)为液晶 PB 光栅的衍射效率测试光路:通过调节线偏振片(LP)与 $1/4$ 波片(QWP)的相对夹角,可分别获得左旋或右旋圆偏振入射

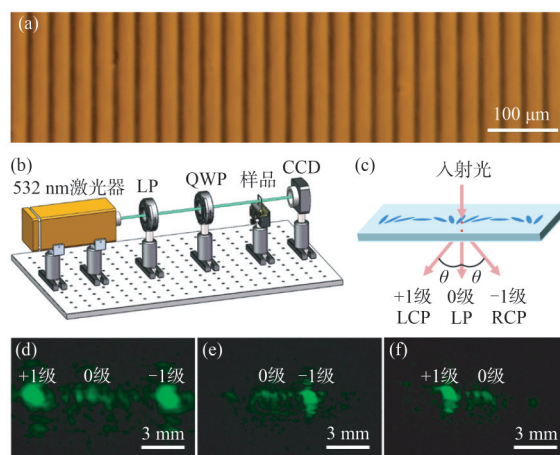


图6 PB光栅的制备及表征结果。(a)显微图像;(b)衍射效率测试光路;(c)衍射示意图;(d)线偏振光的衍射光斑;(e)左旋圆偏振光的衍射光斑;(f)右旋圆偏振光的衍射光斑。

Fig. 6 Fabrication and characterization results of the PB grating. (a) Microscopic image; (b) Optical setup for measurement of diffraction efficiency; (c) Schematic of the diffraction results; (d) Diffraction spot for linearly polarized incident laser; (e) Diffraction spot for left circularly polarized incident laser; (f) Diffraction spot for right circularly polarized incident laser.

光;移除QWP后,则可获得线偏振入射光。

在理想的PB光栅中,其衍射特性如图6(c)所示^[8, 43]:线偏振光入射时,光场分解为0级透射的线偏振光,以及±1级左、右旋圆偏振衍射光;左旋圆偏振光入射时,仅产生−1级右旋圆偏振衍射光;右旋圆偏振光入射时,仅产生+1级左旋圆偏振衍射光。图6(d)~(f)展示了实际的衍射光斑,圆偏振光入射时,衍射图样中仍可观测到微弱的0级透射光斑。

0级透射光斑的出现,可归因于测试条件与样品制备两方面的非理想因素。在测试条件方面,入射光的圆偏振纯度不足^[44]以及入射角偏离正入射^[45-46],均会引入未被完全转换的0级分量。在样品制备方面,PB光栅相位分布的离散化特征导致目标级次衍射效率降低^[47-48],部分入射光能量未被有效偏振转换而直接透射;此外,液晶层膜厚波动及表面缺陷^[49-50]使局部相位延迟量偏离理想的半波条件,进一步加剧了0级残留。

为准确评估该器件的偏振转换性能,本文采用相对衍射效率作为评价指标,其计算公式如式(3)所示^[51]:

$$\eta = \frac{I_1}{I_1 + I_0} \times 100\%, \tag{3}$$

式中, I_1 、 I_0 分别代表一级衍射光光强和零级透射光光强。在实际的相对衍射效率测试中,可通过

测量对应的光功率 P_1 、 P_0 评估相对衍射效率:

$$\eta = \frac{P_1}{P_1 + P_0} \times 100\%. \tag{4}$$

在右旋圆偏振光入射条件下,本文选取了8个不同的测试位置,分别测量了+1级衍射光与0级透射光的光功率,并依据公式(4)计算得到相对衍射效率,测试结果如图7所示。PB光栅的相对衍射效率均保持在85%以上,表现出较好的实际应用潜力。

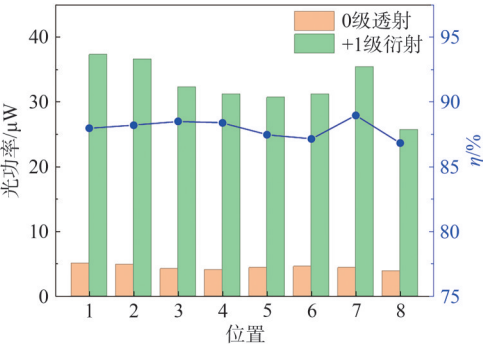


图7 液晶PB光栅对右旋圆偏振光的衍射效率
Fig. 7 Diffraction efficiency of liquid crystal PB grating for right circularly polarized incident laser

3.3 液晶PB透镜的制备结果

液晶PB透镜的制备结果如图8所示,图8(a)为单个直径约845 μm的PB透镜。在此基础上,

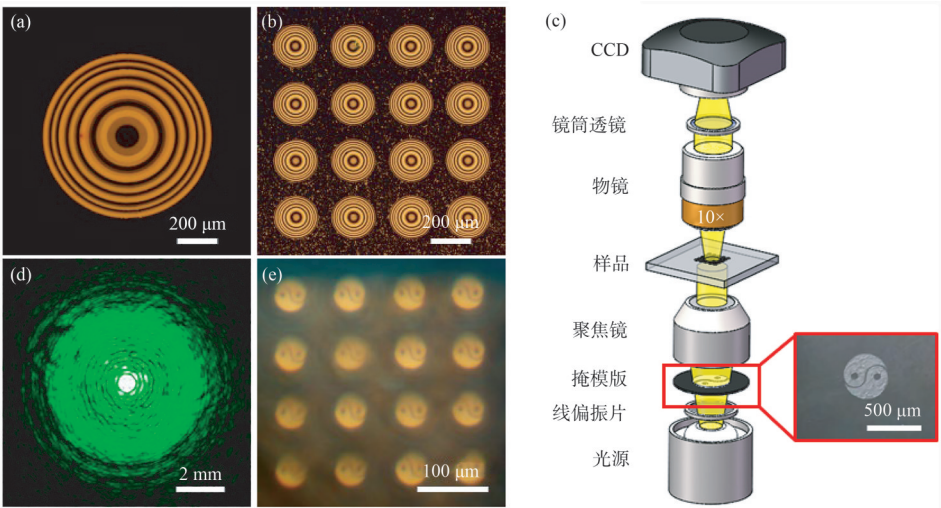


图8 液晶PB透镜的制备及表征结果。(a) 单个透镜的显微图像;(b) 微透镜阵列的显微图像;(c) 微透镜阵列的成像表征;(d) 单个透镜的聚焦光斑;(e) 微透镜阵列对掩模图样的成像结果。

Fig. 8 Fabrication and characterization results of liquid crystal PB lens. (a) Microscopic image of a single lens; (b) Microscopic image of a microlens array; (c) Imaging characterization for the microlens array; (d) Focused spot of a single lens; (e) Imaging result of a mask pattern by the microlens array.

将透镜直径缩减至 $270\ \mu\text{m}$,并以 $300\ \mu\text{m}$ 为周期进行阵列化直写,成功制备了如图 8(b)所示的微透镜阵列。

随后,基于图 6(b)所示的测试光路,将入射激光调整为右旋圆偏振态,对液晶 PB 透镜的聚焦性能进行了表征。单个液晶 PB 透镜的聚焦光斑如图 8(d)所示,其对右旋圆偏振光表现出显著的聚焦效应,形成清晰明亮的聚焦光斑。经测量,其焦距为 $65\ \text{mm}$,焦点尺寸约为 $180\ \mu\text{m}$ 。进一步地,本文对微透镜阵列进行了成像测试,如图 8(c)所示,在光源上方放置“太极”图案掩模版,经微透镜阵列微缩成像后,CCD 成功捕捉到与掩模版一致的“太极”阵列图像,实测缩放倍率约为 1:10,如图 8(e)所示。

上述结果表明,基于 PLDW 技术制备的液晶

PB 透镜及微透镜阵列具备良好的聚焦特性与成像功能。

4 结 论

本文开发了一套适用于液晶几何相位平面光学元件光取向的 PLDW 系统。实验结果表明,该系统具备 $3.4\ \mu\text{m}$ 的高尺寸分辨率和良好的光取向能力。基于该系统,本文成功制备了液晶 PB 光栅、透镜及微透镜阵列。测试结果显示,PB 光栅的相对衍射效率超过 85%,PB 透镜及微透镜阵列则展现出良好的聚焦特性和可靠的成像效果。综上所述,本文提出的 PLDW 系统为液晶几何相位平面光学元件的制造提供了一种高精度、低成本的新途径。

参 考 文 献:

- [1] DE LEGA X C, JACQUOT P. Deformation measurement with object-induced dynamic phase shifting [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(25): 5115-5121.
- [2] ESCUTI M J, KIM J, KUDENOV M W. Controlling light with geometric-phase holograms [J]. *Optics and Photonics News*, 2016, 27(2): 22-29.
- [3] 李世隆,陈鹭剑. 微通道内的液晶微流控技术及其应用[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(2): 284-308.
LI S L, CHEN L J. Liquid crystal microfluidic technology within microchannels and its applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(2): 284-308. (in Chinese)
- [4] JI W, LEE C H, CHEN P, *et al.* Meta-q-plate for complex beam shaping [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 25528.
- [5] HUANG Y H, KO S W, LI M S, *et al.* Modulation of shape and polarization of beam using a liquid crystal q-plate that is fabricated via photo-alignment [J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10954-10961.
- [6] KOMANDURI R K, ESCUTI M J. High efficiency reflective liquid crystal polarization gratings [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(9): 091106.
- [7] EAKIN J N, XIE Y H, PELCOVITS R A, *et al.* Zero voltage Fredericksz transition in periodically aligned liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(10): 1671-1673.
- [8] OH C, ESCUTI M J. Achromatic diffraction from polarization gratings with high efficiency [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(20): 2287-2289.
- [9] CHEN H F, TAO X Y, ZHU B H, *et al.* Reconfigurable nonlinear Pancharatnam-Berry diffractive optics with photopatterned ferroelectric nematics [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 314.
- [10] WEN B, PETSCHKE R G, ROSENBLATT C. Nematic liquid-crystal polarization gratings by modification of surface alignment [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7): 1246-1250.
- [11] GORKHALI S P, CLOUTIER S G, CRAWFORD G P, *et al.* Stable polarization gratings recorded in azo-dye-doped liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(25): 251113.
- [12] CARDANO F, KARIMI E, SLUSSARENKO S, *et al.* Polarization pattern of vector vortex beams generated by q-plates with different topological charges [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(10): C1-C6.
- [13] WANG Z Y, ZHOU Z, ZHANG H, *et al.* Vectorial liquid-crystal holography [J]. *eLight*, 2024, 4(1): 5.
- [14] OUYANG C, CHEN Q M, ZHANG D W, *et al.* Multi-parameter enhanced optical encryption with biphasic chiral photonic crystals [J]. *Light: Science & Applications*, 2026, 15(1): 266.
- [15] KONG Q H Z, ZHANG R, XUE P, *et al.* Precise calibration of liquid crystal variable retarder for various incident

- angles [J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(2): 434-444.
- [16] GAO Y, MA L R, LUO J B. Friction anisotropy induced by oriented liquid crystal molecules [J]. *Tribology Letters*, 2016, 61(3): 27.
- [17] BERREMAN D W. Solid surface shape and the alignment of an adjacent nematic liquid crystal [J]. *Physical Review Letters*, 1972, 28(26): 1683-1686.
- [18] 邹鹏飞, 魏冰妍, 杨淑蕾, 等. 光控取向技术应用于液晶非显示领域的若干进展[J]. 液晶与显示, 2017, 32(6): 411-423.
- ZOU P F, WEI B Y, YANG S L, *et al.* Some progresses of photoalignment technique applied in liquid crystal nondisplay field [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(6): 411-423. (in Chinese)
- [19] YAROSHCHUK O, REZNIKOV Y. Photoalignment of liquid crystals: basics and current trends [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(2): 286-300.
- [20] SCHADT M, SEIBERLE H, SCHUSTER A. Optical patterning of multi-domain liquid-crystal displays with wide viewing angles [J]. *Nature*, 1996, 381(6579): 212-215.
- [21] XI X C, YAN C Q, SHEN L Z, *et al.* Liquid crystal photoalignment technique: basics, developments, and flexible/stretchable device applications [J]. *Materials Today Electronics*, 2023, 6: 100069.
- [22] 邢陈陈, 郑继红, 陈芳芳, 等. 光控取向液晶偏振全息柱透镜的制备及聚焦特性[J]. 液晶与显示, 2024, 39(5): 593-601.
- XING C C, ZHENG J H, CHEN F F, *et al.* Preparation and focusing characteristics of polarized holographic photoalignment liquid crystal cylindrical lenses [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 593-601. (in Chinese)
- [23] 郑先锋, 祝迎花, 金相旭, 等. 取向膜印刷精度的改善研究[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 655-661.
- ZHENG X F, ZHU Y H, JIN X X, *et al.* Research on improving the accuracy of alignment film printing [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 655-661. (in Chinese)
- [24] GUO Y B, JIANG M, PENG C H, *et al.* High-resolution and high-throughput plasmonic photopatterning of complex molecular orientations in liquid crystals [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(12): 2353-2358.
- [25] 刘思嘉, 张逸恒, 朱琳, 等. 基于光取向技术的液晶螺旋达曼波带片[J]. 液晶与显示, 2023, 38(1): 1-9.
- LIU S J, ZHANG Y H, ZHU L, *et al.* Liquid crystal spiral Dammann zone plates based on photoalignment technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(1): 1-9. (in Chinese)
- [26] QIN X W, ZHAO K Y, ZHANG X J, *et al.* Dynamic polarization patterning technique for high-quality liquid crystal planar optics [J]. *Photonics*, 2024, 11(4): 350.
- [27] LIU C, ZHANG S Y, LIU Y Q, *et al.* Correction of a digital micromirror device lithography system for fabrication of a pixelated liquid crystal micropolarizer array [J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 12014-12025.
- [28] MISKIEWICZ M N, ESCUTI M J. Direct-writing of complex liquid crystal patterns [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12691-12706.
- [29] XIANG X, KIM J, ESCUTI M J. Far-field and Fresnel liquid crystal geometric phase holograms via direct-write photo-alignment [J]. *Crystals*, 2017, 7(12): 383.
- [30] LI B X. Continuous-phase liquid-crystal optics promise a flat revolution [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2026, 7(2): 62.
- [31] 王洪庆, 温积森, 杨臻垚, 等. 高速并行双光子激光直写光刻系统[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2202009.
- WANG H Q, WEN J S, YANG Z Y, *et al.* High-speed parallel two-photon laser direct writing lithography system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(22): 2202009. (in Chinese)
- [32] PAVLOV I A, RYBAK A S, DOBROVOLSKIY A M, *et al.* High-quality alignment of nematic liquid crystals using periodic nanostructures created by nonlinear laser lithography [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 267: 212-221.
- [33] FISCHER J, WEGENER M. Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(1): 22-44.
- [34] ANDREW T L, TSAI H Y, MENON R. Confining light to deep subwavelength dimensions to enable optical nanopatterning [J]. *Science*, 2009, 324(5929): 917-921.
- [35] ZHANG Z X, DENG C S, FAN X H, *et al.* 3D directional assembly of liquid crystal molecules [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(31): 2401533.
- [36] KIM J. Liquid crystal geometric phase holograms for efficient beam steering and imaging spectropolarimetry [D].

- Raleigh: North Carolina State University, 2011.
- [37] LEE S Y, KIM K, KIM S J, *et al.* Plasmonic meta-slit: shaping and controlling near-field focus [J]. *Optica*, 2015, 2(1): 6-13.
- [38] JIANG M, GUO Y B, YU H, *et al.* Low f -number diffraction-limited Pancharatnam-Berry microlenses enabled by plasmonic photopatterning of liquid crystal polymers [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(18): 1808028.
- [39] 高鸿鹄,马骏杰,朱林伟,等. 垂直端面光波导形状缺陷的激光补偿[J]. 中国光学(中英文), 2025, 18(4): 869-878.
GAO H H, MA J J, ZHU L W, *et al.* Laser compensation of optical waveguide shape defects on vertical end face [J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(4): 869-878. (in Chinese)
- [40] AIRY G B. On the diffraction of an object-glass with circular aperture [J]. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1835, 5: 283-291.
- [41] 刘宝怡. 激光微纳扫描光学系统设计[D]. 西安:西安工业大学, 2025.
LIU B Y. Design of optical system for laser micro-Nano scanning [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2025. (in Chinese)
- [42] LU Z G, LUO B W, TAN J B. Ultra-long focal depth annular lithography for fabricating micro ring-shaped metasurface unit cells on highly curved substrates [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6(4): 697-709.
- [43] HE Z, NOSE T, SATO S. Diffraction and polarization properties of a liquid crystal grating [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1996, 35(6R): 3529-3530.
- [44] CHEN Y, LEE C K, WANG C T, *et al.* High-accuracy circular dichroism measurement using a liquid crystal polarization grating [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 158: 107181.
- [45] 郑青泉,王春阳,王子硕,等. 斜入射下液晶偏振光栅衍射特性研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 20210511.
ZHENG Q Q, WANG C Y, WANG Z S, *et al.* Research on diffraction characteristics of liquid crystal polarization grating under oblique incidence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(7): 20210511. (in Chinese)
- [46] LIN T G, XIE J, ZHOU Y J, *et al.* Recent advances in photoalignment liquid crystal polarization gratings and their applications [J]. *Crystals*, 2021, 11(8): 900.
- [47] YU H, ZHOU Z Y, QI Y L, *et al.* Pancharatnam-Berry optical lenses [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(5): D107-D111.
- [48] LIU S, YU H, JIANG M, *et al.* Numerical study of transmissive liquid crystal Pancharatnam-Berry gratings with small periods [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2023, 40(2): 431-435.
- [49] 王丽娜. 基于液晶偏振光栅的大角度光束偏转技术研究[D]. 长春:长春理工大学, 2022.
WANG L N. Research on large angle beam deflection technology based on liquid crystal polarization grating [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [50] CUI Z B, XIAO X, WEI Z N, *et al.* Suppressing laser-power noise with a multifunctional liquid crystal polarization grating in miniaturized optically pumped magnetometers [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2026, 12(1): 161.
- [51] 朱宁,郑继红,申桐,等. 采用丙烯酸酯双单体的高空间频率透射式体全息 H-PDLC 光栅的研制[J]. 液晶与显示, 2024, 39(6): 752-760.
ZHU N, ZHENG J H, SHEN T, *et al.* Preparation of dual-monomer high spatial frequency H-PDLC grating based on acrylic polymer [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(6): 752-760. (in Chinese)

作者简介:



张陈应,男,博士研究生,2021年于厦门大学获得硕士学位,主要从事液晶光学元件激光加工的研究。E-mail: zhangchenying@stu.xmu.edu.cn



陈鹭剑,男,博士,教授,2007年于浙江大学获得博士学位,主要从事液晶光子学和微流控技术方面的研究。E-mail: lujianchen@xmu.edu.cn