

基于微米级全光磁全息结构的涡旋光生成实验研究*

秦雪云^{1) #} 吴越^{2) #} 朱榕琪^{2) 3)} 朱竹青^{1) 2) 4) 5) †}

1) (南京师范大学计算机与电子信息学院, 南京 210023)

2) (南京师范大学物理科学与技术学院, 南京 210023)

3) (长治职业技术学院信息工程系, 长治 046000)

4) (南京师范大学泰州学院信息工程学院, 泰州 225300)

5) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

(2025年5月18日收到; 2025年6月21日收到修改稿)

涡旋光因其携带轨道角动量 (OAM), 在光通信、光学操控及精密测量等领域具有重要的应用价值. 现有的涡旋光生成方法 (如螺旋相位板、空间光调制器和超表面) 虽已广泛应用, 但仍存在结构固化、动态调控困难以及集成性不足等问题, 难以满足可重构、可编程涡旋光生成系统的应用需求. 为此, 本文提出一种基于全光磁全息的新型涡旋光生成方案. 该方法利用单脉冲飞秒激光将预先设计的叉形光栅全息图以打点方式写入微米级 GdFeCo 磁性材料表面, 并通过磁光法拉第衍射效应再现涡旋光. 实验结果表明, 通过一维叉形光栅可实现不同拓扑荷 ($l = \pm 2, \pm 5, \pm 8$) 的涡旋光生成, 且涡旋光半径与拓扑荷呈正相关; 二维叉形光栅则可生成多拓扑荷分布的 3×3 涡旋光阵列, 实现涡旋光的空间可控调制. 该方案具备可擦写重构、重复使用及高稳定性等优势, 为微/纳尺度下涡旋光的灵活调控与集成应用提供了新思路.

关键词: 涡旋光, 轨道角动量, 叉形光栅, 全光磁全息

PACS: 42.40.Ht, 42.60.Jf

CSTR: 32037.14.aps.74.20250649

DOI: 10.7498/aps.74.20250649

1 引言

近年来, 涡旋光因其携带的轨道角动量 (OAM), 在光通信^[1,2]、超分辨成像^[3]、光镊^[4-7]等前沿领域展现出广泛的应用潜力, 推动了涡旋光高效、可控生成技术的发展. 目前, 常见的涡旋光产生方法包括螺旋相位板^[8]、空间光调制器^[9,10]、衍射光栅^[11]以及超表面^[12-14]等. 其中, 空间光调制器在快速、实时的产生和调控涡旋光方面具有显著优势, 但受

分辨率、响应速度、尺寸等的限制难以集成应用. 而超表面因其亚波长厚度、紧凑结构及对相位的高度操控能力, 在集成化光学系统中表现出显著优势. 然而, 超表面本质上是静态器件, 其光学响应在制备后无法动态调控, 难以满足可重构性的需求. 此外, 超表面的制备依赖高精度纳米加工工艺, 成本高且难以修改. 因此, 亟需开发一种微/纳尺度下可重构、可编程涡旋光调控的新方法.

磁全息技术的兴起为涡旋光的高效、动态调控提供了全新路径. 传统磁全息主要依赖热磁辅助记

* 国家自然科学基金 (批准号: 12174196) 和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室 (批准号: SKLAO2022001A17) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: zhuqingzhu@njnu.edu.cn

录机制^[15,16], 通过激光加热降低磁性材料的矫顽力, 并配合外加磁场实现磁化反转. 然而, 该方法易受到超顺磁效应的干扰, 导致记录过程不稳定, 且存在相邻记录单元间的空间串扰问题, 严重制约了其在高精度、可重复领域中的应用. 为克服上述限制, 全光磁全息技术应运而生^[17-19]. 该技术基于全光磁反转机制, 可通过单脉冲飞秒激光在无外磁场条件下精确诱导磁性材料实现磁畴翻转. 其写入分辨率可达微米尺度, 同时具备可重复擦写、长期稳定存储等优势, 显著提升了系统的灵活性与可编程能力.

基于此, 本文提出一种适用于微米尺度的高效、可重构涡旋光生成方案, 融合了全光磁全息原理与计算全息设计方法. 该方法利用单脉冲飞秒激光将计算得到的叉形光栅全息图精确写入磁性材料表面, 并在平面波照射下, 借助磁光法拉第效应实现具有特定拓扑荷的涡旋光重建. 实验进一步验证了一维与二维叉形光栅结构在涡旋光拓扑荷调控方面的可行性与规律性, 成功生成多种结构的涡旋光及阵列分布. 相比于传统产生手段, 该技术具有可重复擦写、结构紧凑、稳定性强等显著优势, 特别是在微/纳尺度涡旋光与可编程光学系统构建中展现出良好的扩展潜力, 为涡旋光在高密度信息存储、光通信、量子信息处理等领域的进一步应用提供了新的技术路径.

2 理论基础

如图 1 所示, 基于全光磁全息的涡旋光生成过

程主要包括两个阶段: 全息图记录与涡旋光再现. 在记录阶段, 单脉冲飞秒激光聚焦于磁性材料表面, 诱导局部磁畴发生反转, 从而实现叉形光栅的精确写入. 图 1(a1) 为偏光显微镜下拍摄的磁畴图像, 其中白色区域记作 M^+ , 灰色区域记作 M^- , 表示相反的磁化取向, 与二元叉形光栅中的 1 和 0 相对应. 在再现阶段, 借助磁光法拉第效应重建涡旋光^[20], 其典型的环形强度分布如图 1(b1) 所示. 具体来讲, 参考光经过图 1(a1) 叉形光栅的法拉第效应原理如图 2 所示, 图 2(a) 为二元磁光栅不同位置处的磁化方向, 设磁光栅宽度为 a , 光栅常数为 d , 定义白色区域 M^+ 磁畴方向向上, M^- 位置磁畴方向向下. 当 z 方向的线偏振光入射到磁化方向交替变换的磁光栅上时, 如图 2(b) 所示, 输入线偏振光 E 将发生不同方向的偏转 (E^+ 和 E^-), 其中 y 分量不受磁光效应影响, x 分量衍射产生 π 的相位差^[20]. 因此, 平面波穿过具有螺旋相位结构的二元叉形光栅, 经过透镜聚焦, 将会在远场焦面得到具有螺旋相位特征的涡旋光的再现.

同时, 鉴于涡旋光的再现质量与磁性材料的法拉第转角 θ_F 密切相关, 本文选用 θ_F 显著高于传统磁性材料的 $\text{Gd}_{27}\text{Fe}_{63.87}\text{Co}_{9.13}$ 合金作为记录介质^[19]. 该材料通过磁控溅射工艺沉积制备, 结构如图 1(a2) 所示, 包含 AlTi 散热层 (10 nm)、SiN 缓冲层 (5 nm)、GdFeCo (20 nm) 和 SiN 盖层 (60 nm), 此外, 因其磁性材料优异的高磁稳定性和抗腐蚀性, 打点记录的全息图能够长期保持数据而不受外界环境的影响.

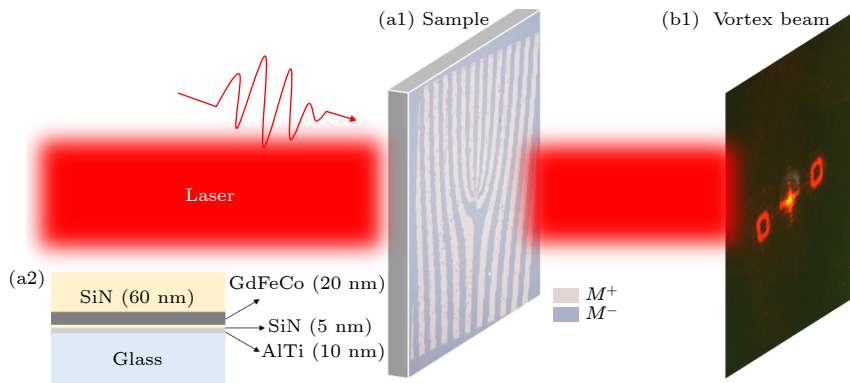


图 1 全光磁全息生成涡旋光的原理图 (a1) 偏光显微镜下的全息图; (a2) $\text{Gd}_{27}\text{Fe}_{63.87}\text{Co}_{9.13}$ 材料的多层膜结构; (b1) 涡旋光实验光强图

Fig. 1. Principle of vortex beam generation based on all-optical magnetic holography: (a1) Hologram observed under a polarizing optical microscope; (a2) multilayer film structure of the $\text{Gd}_{27}\text{Fe}_{63.87}\text{Co}_{9.13}$ material; (b1) experimental intensity distribution of the reconstructed vortex beam.

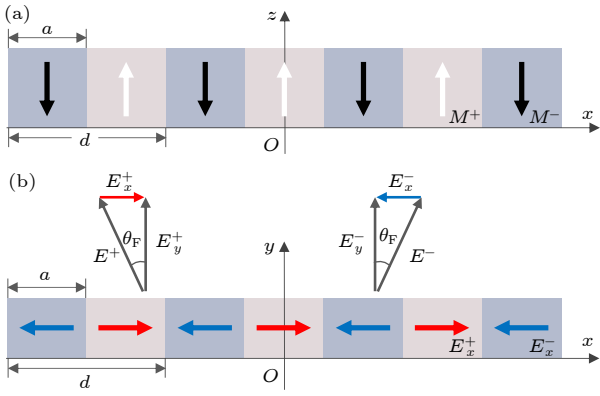


图 2 二元磁光栅的法拉第效应 (a) 磁性材料不同位置的磁化方向; (b) 入射光经过磁性材料后的电场分布

Fig. 2. The Faraday effect of binary magnetic gratings: (a) The magnetization directions of magnetic materials at different positions; (b) the electric field distribution of incident light after passing through magnetic materials.

作为全息图核心结构的二元叉形光栅, 其生成原理基于涡旋光与平面波之间的干涉效应. 目前, 典型涡旋光可由拉盖尔-高斯光束描述, 该光束是在傍轴近似的条件下, 亥姆霍兹方程在柱坐标系 (r, θ, z) 下的解, 其复振幅表达式为^[21]

$$\begin{aligned}
 E_p^l(r, \theta, z) = & (-1)^p \sqrt{\frac{2p!P_0}{\pi(p+|l|)!\omega^2(z)}} \\
 & \times \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \left[\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right]^{\frac{|l|}{2}} \left\{L_p^{|l|}\left[\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right]\right\} \\
 & \times \exp(-il\theta) \exp\left[\frac{-ikr^2z}{2(z^2+z_R^2)}\right] \\
 & \times \exp\left[i(2p+|l|+1)\arctan\left(\frac{z}{z_R}\right)\right], \quad (1)
 \end{aligned}$$

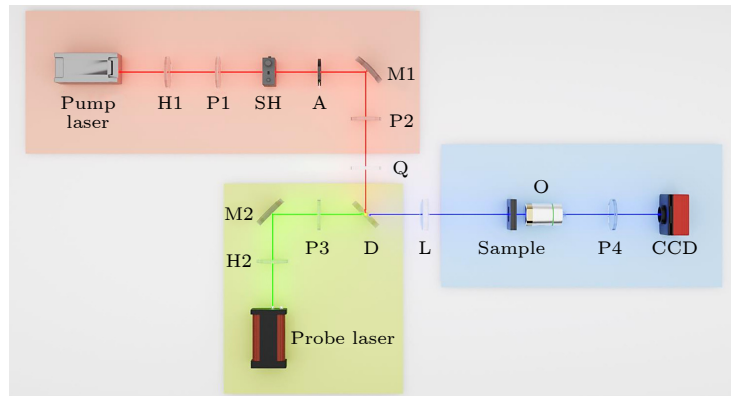


图 3 实验装置示意图, H1—H2 为半波片; P1—P4 为偏振片; SH 为光开关; A 为光阑; M1—M2 为反射镜; Q 为 1/4 波片; D 为二向色镜; L 为透镜; O 为显微物镜; CCD 为工业相机

Fig. 3. Schematic of experimental setup, H1—H2 represent half-wave plates; P1—P4 represent polarizers; SH represents optical shutter; A represents aperture; M1—M2 represents mirrors; Q represents quarter-wave plate; D represents dichroic mirror; L represents lens; O represents objective lens; CCD represents industrial camera.

式中, p 为径向量子数, l 为拓扑荷, $\omega(z)$ 为传播距离为 z 处光束的截面半径, P_0 为激光器功率, $L_p^{|l|}$ 为连带拉盖尔多项式, k 为波数, z_R 为瑞利距离. 考虑到复杂干涉图样对空间分辨率的极高要求, 本文忽略拉盖尔-高斯光束的径向量子数 ($p = 0$), 重点考察不同拓扑荷 ($l \neq 0$) 对干涉图样的影响, 以验证全光磁全息记录与再现涡旋光的可行性. 随后, 使用周期为 d 的闪耀光栅生成相位全息图的复透过率函数为 $t = \exp[i(\arg(E_0^l) + 2\pi x/d)]$, 该干涉图样呈现经典的叉形条纹结构, 即叉形光栅, 其条纹形态与涡旋光的拓扑荷密切相关. 该叉形光栅图样作为计算全息图被打点写入磁性材料中, 用于后续的涡旋光全息重建实验.

3 实验装置

如图 3 所示, 本文搭建的全光磁全息记录与涡旋光衍射再现实验系统由 3 部分组成: 红色区域为飞秒激光全光磁记录模块, 绿色区域为涡旋光的探测与重建模块, 蓝色区域为显微成像与观察模块.

记录模块中, 泵浦光源采用掺钛蓝宝石啁啾脉冲放大器输出的线偏振飞秒激光脉冲, 波长为 800 nm, 脉宽 40 fs, 最大重复频率 1 kHz. 该激光用于诱导磁性材料中磁畴的局部反转, 实现全息图图案的写入. 激光首先通过半波片 (H1) 和偏振片 (P1) 调整为竖直线偏振态, 随后经脉冲选择器和光开关 (SH) 控制脉冲频率. 为避免多次激发引起的热量积累导致局部温度超过材料居里温度, 实验选用 1 Hz 单脉冲模式. 经光阑 (A)、偏振片 (P2)

和 $1/4$ 波片 (Q) 后, 光束被转换为左/右旋圆偏振光, 最终通过焦距为 150 mm 的透镜 (L) 聚焦至样品磁畴面完成全息图打点. 实验前, 样品通过电磁铁进行统一磁化初始化; 记录过程中, 样品固定于三维位移台上, 并由 LabVIEW 控制系统精确控制打点坐标, 实现全息图的高精度写入.

再现模块中, 探测光源采用波长为 561 nm 的半导体连续激光器. 激光经半波片 (H2) 和偏振片 (P3) 调制为线偏振光后, 通过半透半反镜 (D) 和透镜系统照射至样品表面. 调节反射镜 (M1, M2), 使探测光与泵浦光的焦点位置严格重合, 以确保再现的涡旋光质量. 重建的涡旋光经由显微物镜 (O, $NA = 0.12, 5\times$) 成像, 再通过与 P3 偏振方向正交的偏振片 (P4) 消除背景偏振干扰, 最终由工业相机 (CCD) 实时采集并记录涡旋光的强度分布图像.

4 结果与讨论

衍射再现效果与全息图的记录分辨率密切相关. 在全息图尺寸固定的条件下, 记录分辨率的提升意味着激光打点尺寸的减小, 从而能够呈现更丰富的空间细节. 因此, 在正式开展全息图打点记录之前, 需优先确定磁性材料实现磁化反转所需的最小激光能量阈值, 以明确所能实现的最小有效打点尺寸范围, 为后续高分辨率记录提供参数依据.

为确保实验结果的稳定性与可重复性, 选取样品上约 $1000\ \mu\text{m} \times 1000\ \mu\text{m}$ 的均匀区域进行激光打点实验. 图 4(a) 所示为在不同激光能量密度条件下形成的磁畴反转区域, 其中红色数字标注对应的实际打点尺寸, 黑色数字表示施加该尺寸所需的能量密度. 图 4(b) 所示为磁化反转概率随激光能量密度变化的趋势. 结果表明, 当能量密度超过 $1.62\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 时, 磁畴反转概率接近 100%, 对应的最小稳定打点尺寸约为 $4.5\ \mu\text{m}$, 叉形光栅条纹周期约为 $9\ \mu\text{m}$. 因此, 在后续全息图记录实验中, 选用该能量参数作为激光打点标准, 在保证磁化反转效率的同时兼顾记录分辨率与图样质量.

基于前期确定的打点参数, 首先开展对一维叉形光栅结构的全光磁全息记录与衍射再现实验. 如图 5(a1)—(a3) 所示, 分别为拓扑荷 $l = 2, 5, 8$ 的二元叉形光栅模拟图 (尺寸为 130×130 pixels). 依据图像中像素点的坐标信息, 通过 LabVIEW 实时控制三维位移平台, 在 $\text{Gd}_{27}\text{Fe}_{63.87}\text{Co}_{9.13}$ 磁性材

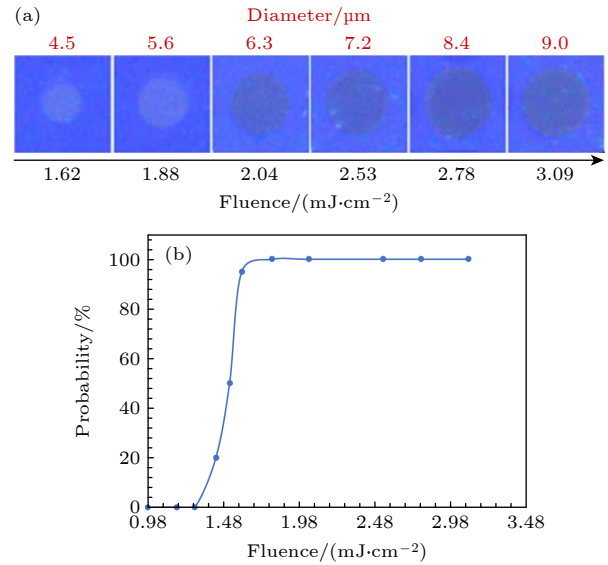


图 4 反转尺寸、反转概率与激光能量密度之间的关系 (a) 不同激光能量密度下的反转尺寸; (b) 反转概率与激光能量密度之间的拟合曲线

Fig. 4. Relationship between reversal size, reversal probability, and laser energy density: (a) Reversal sizes under different laser energy densities; (b) fitted curve of reversal probability versus laser energy density.

料表面完成全光磁打点记录, 所得光栅面积约为 $600\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$. 图 5(c1)—(c3) 显示了偏光显微镜下记录完成的叉形光栅结构, 图 5(d1)—(d3) 则为相应的涡旋光衍射再现实验光强分布. 作为对比, 图 5(b1)—(b3) 所示为相同参数下的理论模拟结果. 实验结果表明, 随着拓扑荷的增大, 涡旋光半径逐渐扩大, 与理论预测一致, 验证了叉形光栅结构对涡旋光的空间特性的有效调控能力. 需要指出的是, 实验结果中的部分涡旋光呈现矩形 (图 5(d2)) 和轻微破裂现象 (图 5(d3)), 这与所记录的叉形光栅的质量有直接关系, 而造成记录质量不佳的原因可能包括材料表面的不均匀、打点分辨率的限制、激光脉冲能量的波动以及实验环境的扰动等. 因此, 通过选取均匀的打点位置、更小的打点尺寸以及更稳定的实验条件等来改善记录的光栅质量, 进而提升实验结果, 使其更加接近理论结果. 除此之外, 得益于 $\text{Gd}_{27}\text{Fe}_{63.87}\text{Co}_{9.13}$ 材料具备可擦除、可重复写入的特性, 实验可通过多次优化打点策略以进一步提升涡旋光的重建质量与稳定性^[19].

相较于单个涡旋光束, 由多个涡旋光构成的涡旋光阵列引入了空间排布这一新的自由度, 在基于轨道角动量的大容量光通信、多粒子操控以及激光并行加工等领域展现出广阔的应用前景^[22,23]. 通过

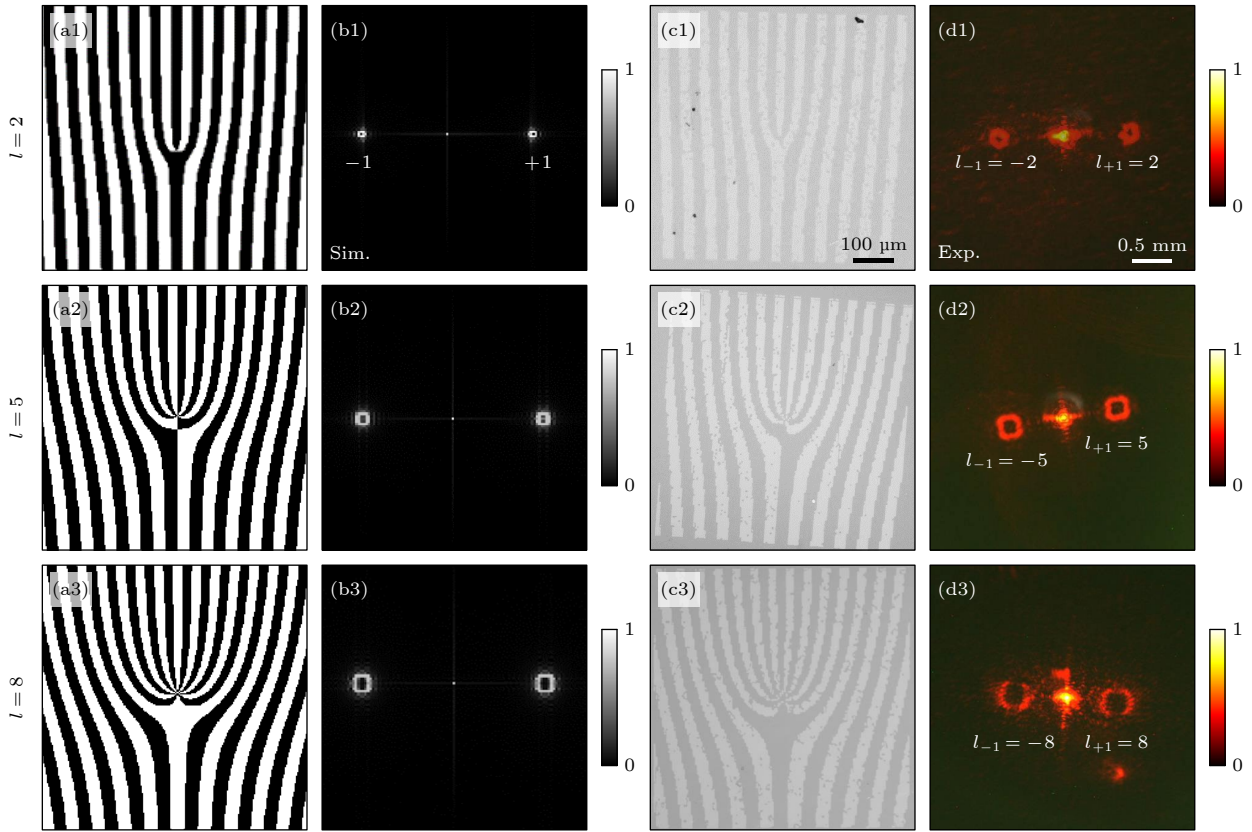


图5 涡旋光的生成 (a1)—(a3) 一维叉形光栅模拟图; (b1)—(b3) 涡旋光模拟光强图; (c1)—(c3) 偏光显微镜下的一维叉形光栅实验图; (d1)—(d3) 涡旋光实验光强图

Fig. 5. Generation of vortex beams: (a1)—(a3) Simulated binary fork grating patterns; (b1)—(b3) simulated intensity distributions of vortex beams; (c1)—(c3) experimental images of one-dimensional fork gratings observed under a polarizing microscope; (d1)—(d3) experimental intensity distributions of the reconstructed vortex beams.

叠加沿水平方向 (x) 和垂直方向 (y) 的一维叉形光栅, 可构建出具有特定空间结构的二维叉形光栅, 从而实现对光束的空间分束. 通过分别调节水平和垂直方向光栅的拓扑荷 l_x 和 l_y , 可灵活设计不同拓扑特征和分布规律的涡旋光阵列, 从而实现多样化、可编程的涡旋光调控, 为涡旋光的精细调控与功能扩展提供了重要手段.

如图 6(a1) 所示, 为拓扑荷 $l_x = l_y = 2$ 条件下设计的二维叉形光栅模拟图, 对应的远场衍射模拟光强分布结果见图 6(b1). 结果表明, 通过二维叉形光栅的空间调制, 可在焦平面形成规则、对称分布的 3×3 涡旋光阵列, 各光束均呈现清晰稳定的环形涡旋结构. 为便于后续分析, 对涡旋光阵列中的 9 个涡旋光位置进行了编号标识. 已知 $l_x = l_y = 2$, 结合远场衍射的拓扑荷守恒规则^[24], 涡旋光阵列中各位置涡旋光的拓扑荷可由水平和垂直方向光栅的衍射级数进行代数相加得到: 中心零级位置 (位置 5) 及其上下 (位置 3, 7) 拓扑荷均为 0 (即,

$l_3 = l_5 = l_7 = 0$); 左上角和右下角 (位置 1, 9) 为对角线叠加项, 拓扑荷为 $l_1 = -l_9 = 4$; 水平与垂直正一级 (位置 2, 6) 分别对应 $l_2 = l_6 = 2$, $l_6 = l_x = 2$; 水平与垂直负一级 (位置 4, 8) 分别对应 $l_4 = -l_y = -2$, $l_8 = -l_x = -2$. 需要指出的是, 由于样品本身的衍射效率有限及像素调控精度的约束, 中心零级位置亮度相对增强, 且高阶衍射方向上的涡旋光光强出现不同程度的衰减.

为了进一步丰富涡旋光阵列中的轨道角动量分布的多样性, 在保持水平方向光栅拓扑荷 $l_x = 2$ 不变的基础上, 将垂直方向光栅的拓扑荷调整为 $l_y = 4$. 图 6(a2), (b2) 分别展示了相应的二维叉形光栅模拟图与其衍射光强分布模拟结果. 在该条件下, 水平方向正负一级 (位置 4, 6) 涡旋光拓扑荷保持不变, 分别为 $l_4 = -l_6 = 2$; 垂直方向正负一级 (位置 2, 8) 涡旋拓扑荷分别为 $l_2 = -l_8 = 4$. 同理, 根据拓扑荷守恒规则^[24], 对角线位置处的涡旋光拓扑荷分别为 $l_1 = 6, l_3 = 2, l_7 = -2, l_9 = -6$,

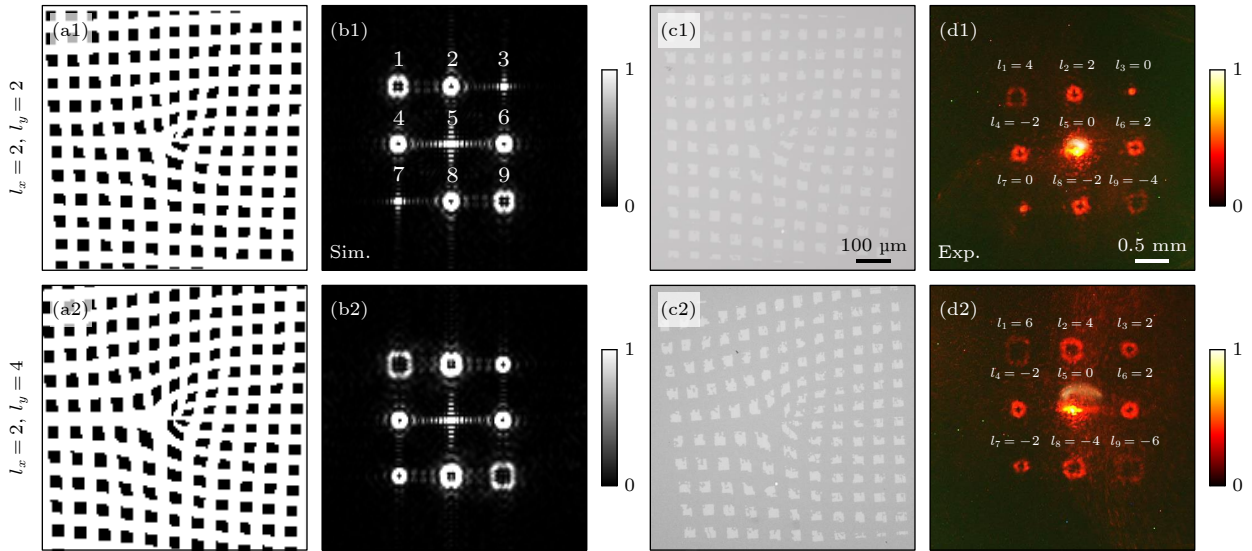


图6 涡旋光阵列的生成 (a1), (a2) 二维叉形光栅模拟图; (b1), (b2) 涡旋光阵列模拟光强图; (c1), (c2) 偏光显微镜下的二维叉形光栅实验图; (d1), (d2) 涡旋光阵列实验光强图

Fig. 6. Generation of vortex beam arrays: (a1), (a2) Simulated two-dimensional fork grating patterns; (b1), (b2) simulated intensity distributions of vortex beam arrays; (c1), (c2) experimental images of two-dimensional fork gratings observed under a polarizing microscope; (d1), (d2) experimental intensity distributions of the reconstructed vortex beam arrays.

形成具有非对称轨道角动量分布的涡旋光阵列结构. 实验获得的二维叉形光栅全息图及其对应的涡旋光再现光强图分别如图 6(c2), (d2) 所示, 整体形貌与模拟结果高度一致, 进一步验证了全光磁全息技术在微米尺度下实现涡旋光阵列调控的可行性与有效性. 该方法不仅展现出在复杂涡旋光阵列可编程构建方面的优良性能, 也为未来在多通道光通信、光学并行操作和量子态复用等方向的应用拓展提供了新的技术路径.

5 结 论

本文提出了一种基于全光磁全息的新型涡旋光生成方案, 通过单脉冲飞秒激光将预设的涡旋光全息图以打点方式记录在磁性材料表面, 并在平面波照射下, 借助磁光法拉第衍射效应实现涡旋光的高效再现. 研究表明, 采用不同拓扑荷的一维叉形光栅可实现相应拓扑荷的涡旋光生成, 且其涡旋光半径随拓扑荷的增大而增大, 符合传统涡旋光的光学特性. 进一步地, 通过叠加正交方向的一维叉形光栅构建二维结构, 可实现具有多种拓扑荷分布的涡旋光阵列, 其中阵列各涡旋光的拓扑荷由所叠加光栅的拓扑荷决定. 该方法在多粒子精密操控、并行激光加工及大容量轨道角动量多路复用通信等领域展现出良好的应用前景. 此外, 所用的磁

性材料具备可擦除重写、可重复使用、长期稳定存储及器件体积小等优势, 使该方案不仅在涡旋光的空间调控方面具有较强的灵活性, 也为涡旋光技术在微/纳尺度集成与可编程光学系统中的拓展应用提供了新的思路.

感谢暨南大学光子技术研究院李向平教授课题组提供实验条件与指导.

参考文献

- [1] Wang J, Liu J, Li S H, Zhao Y F, Du J, Zhu L 2022 *Nanophotonics* **11** 645
- [2] Yan W X, Chen Z Z, Long X, Gao Y, Yuan Z, Ren Z C, Wang X L, Ding J P, Wang H T 2024 *Adv. Photonics* **6** 036002
- [3] Shi Z J, Wan Z S, Zhan Z Y, Liu K Y, Liu Q, Fu X 2023 *Nat. Commun.* **14** 1869
- [4] Zhu L H, Zhang X H, Rui G H, He J, Gu B, Zhan Q W 2023 *Nanophotonics* **12** 4351
- [5] Zhu L H, Tai Y P, Li H H, Hu H J, Li X Z, Cai Y J, Shen Y J 2023 *Photonics Res.* **11** 1524
- [6] Peng L, Yao J, Bai Y H, Sun Y F, Zeng J C, Ren Y X, Xie J X, Hu Z Y, Zhang Q, Yang Y J 2024 *ACS Photonics* **11** 1213
- [7] Gao W Y, Zhou Y, Li X, Zhang Y A, Zhang Q, Li M M, Yu X H, Yan S H, Xu X H, Yao B L 2024 *Photonics Res.* **12** 2881
- [8] Fang L, Padgett M J, Wang J 2017 *Laser Photonics Rev.* **11** 1700183
- [9] Zhu L H, Tang M M, Li H H, Tai Y P, Li X Z 2021 *Nanophotonics* **10** 2487
- [10] Qin X Y, Zhang H, Tang M M, Zhou Y J, Tai Y P, Li X Z

- 2024 *Opt. Lett.* **49** 2213
- [11] Wang J, Li K, Quan Z Q 2024 *Photonics Insights* **3** R05
- [12] Zhang S L, Tian X M, Xu J W, Xu Y N, Li L, Liu J L 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 064201 (in Chinese) [张胜蓝, 田喜敏, 许军伟, 徐亚宁, 李亮, 刘杰龙 2025 *物理学报* **74** 064201]
- [13] Liu M Z, Lin P C, Huo P C, Qi H C, Jin R C, Zhang H, Ren Y Z, Song M W, Lu Y Q, Xu T 2025 *Nat. Commu.* **16** 3994
- [14] Zhou S Y, Li L, Gao L L, Zhou Z Y, Yang J Y, Zhang S R, Wang T L, Gao C Q, Fu S Y 2025 *Light Sci. Appl.* **14** 167
- [15] Rottmayer R E, Batra S, Buechel D, Challener W A, Hohlfeld J, Kubota Y, Li L, Lu B, Mihalcea C, Mountfield K, Pelhos K, Peng C, Rausch T, Seigler M A, Weller D, Yang X M 2006 *IEEE Trans. Magn.* **42** 2417
- [16] Challener W A, Peng C B, Itagi A V, Karns D, Peng W, Peng Y G, Yang X M, Zhu X B, Gokemeijer N J, Hsia Y T, Ju G, Rottmayer R E, Seigler M A, Gage E C 2009 *Nat. Photonics* **3** 220
- [17] Radu I, Vahaplar K, Stamm C, Kachel T, Pontius N, Dürr H A, Ostler T A, Barker J, Evans R F L, Chantrell R W, Tsukamoto A, Itoh A, Kirilyuk A, Rasing T, Kimel A V 2011 *Nature* **472** 205
- [18] Makowski M, Kolodziejczyk M, Bomba J, Frej A, Sypek M, Bolek J, Starobrat J, Tsukamoto A, Davies C S, Kirilyuk A, Stupakiewicz A 2022 *J. Magn. Magn. Mater.* **548** 168989
- [19] Makowski M, Bomba J, Frej A, Kolodziejczyk M, Sypek M, Shimobaba T, Ito T, Kirilyuk A, Stupakiewicz A 2022 *Nat. Commun.* **13** 7286
- [20] Mezrich R 1970 *IEEE Trans. Magn.* **6** 537
- [21] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [22] Qin X Y, Zhu L H, Hu H J, Tai Y P, Li X Z 2023 *J. Appl. Phys.* **133** 013101
- [23] Tai Y P, Fan H H, Ma X, Wei W J, Zhang H, Tang M M, Li X Z 2024 *Opt. Express* **32** 10577
- [24] Zhu L F, Wang J, Guo M J, Li J H 2023 *Laser J.* **44** 150 (in Chinese) [朱凌峰, 王静, 郭苗军, 李晋红 2023 *激光杂志* **44** 150]

Experimental study on vortex beam generation based on micron-scale all-optical magnetic holographic structures*

QIN Xueyun^{1) #} WU Yue^{2) #} ZHU Rongqi^{2) 3)} ZHU Zhuqing^{1) 2) 4) 5) †}

1) (*School of Computer and Electronic Information, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China*)

2) (*School of Physics Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China*)

3) (*Department of Information Engineering, Changzhi Polytechnic College, Changzhi 046000, China*)

4) (*School of information Engineering, Nanjing Normal University Taizhou College, Taizhou 225300, China*)

5) (*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optical Precision Machinery and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(Received 18 May 2025; revised manuscript received 21 June 2025)

Abstract

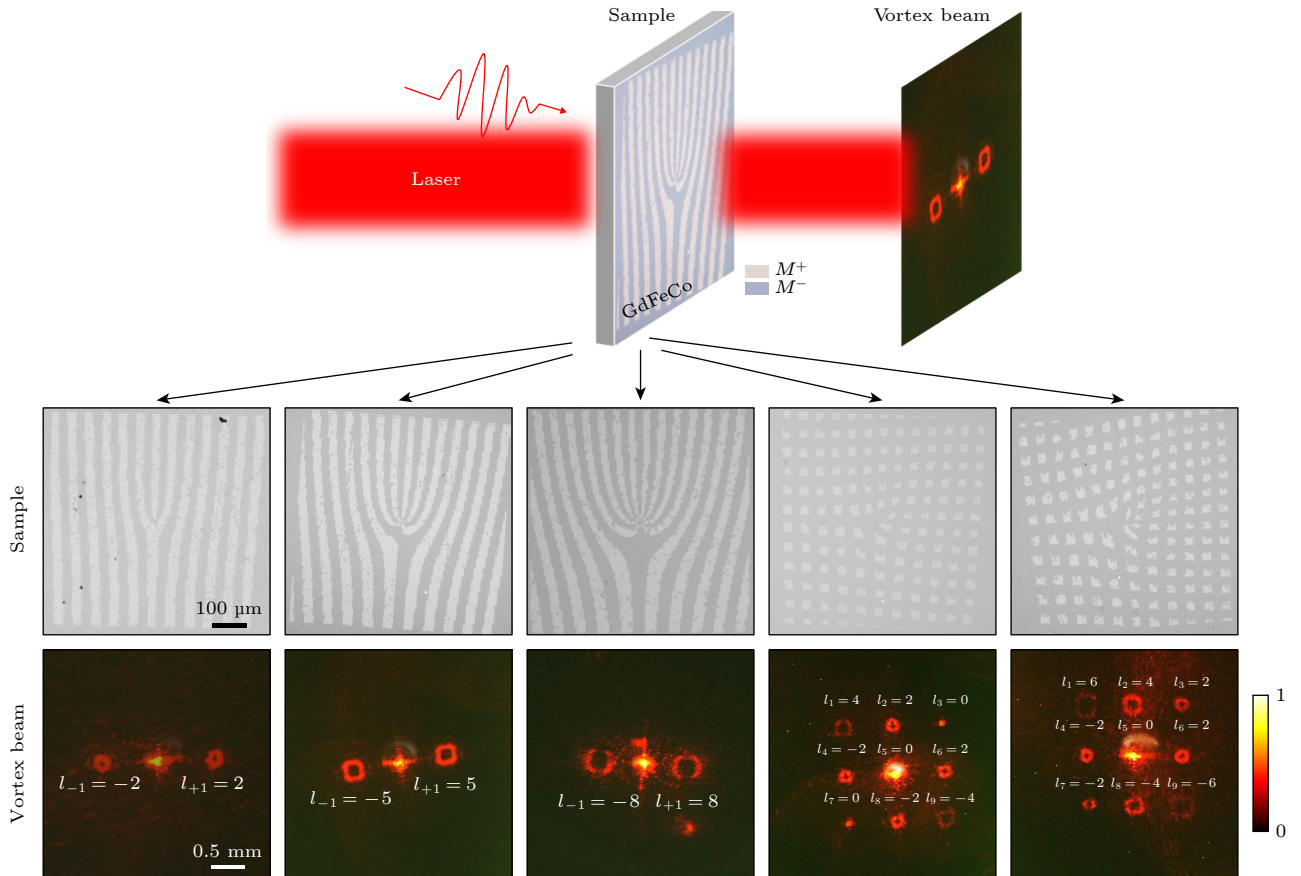
In recent years, vortex beams carrying orbital angular momentum (OAM) have been widely applied to optical communications, optical manipulation, and precision measurement. However, traditional generation methods such as spiral phase plates, spatial light modulators, and metasurfaces, encounter several challenges, including structural rigidity, limited dynamic tunability, and inadequate integration capabilities. These limitations hinder the realization of reconfigurable and programmable vortex beam generation systems. In order to solve these problems, a novel vortex beam generation method based on all-optical magnetic holography is presented in this paper. In this technique, a single-pulse femtosecond laser is used in a dotted writing mode to engrave a pre-designed fork-shaped grating hologram onto the surface of a micron-scale magnetic material, GdFeCo. Under subsequent illumination with a plane wave, the vortex beam is reconstructed via the magneto-optical Faraday diffraction effect. Experimental results show that one-dimensional fork-shaped gratings can

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12174196) and the State Key Laboratory of Optical Technology for Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. SKLAO2022001A17).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: zhuqingzhu@njjnu.edu.cn

flexibly generate vortex beams with different topological charges ($l = \pm 2, \pm 5, \pm 8$), where the beam radius increases with the augment of topological charges. Furthermore, a two-dimensional fork-shaped grating, formed by superimposing horizontal and vertical one-dimensional gratings, can produce 3×3 vortex beam arrays with various topological charge distributions, enabling the spatial modulation of OAM. This method offers advantages such as reusability, long-term stability, and a compact structure, thus providing a programmable and reconfigurable platform for generating micro-structured vortex beams. Unlike traditional static optical elements, this approach enables dynamic, high-resolution, and easy-to-integrate solutions, and shows great application potential in OAM-based multi-channel optical communication, multi-particle manipulation, and parallel laser processing.



Keywords: vortex beam, orbital angular momentum, fork grating, all-optical magnetic holography

PACS: 42.40.Ht, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.74.20250649

CSTR: 32037.14.aps.74.20250649

基于微米级全光磁全息结构的涡旋光生成实验研究

秦雪云 吴越 朱榕琪 朱竹青

Experimental study on vortex beam generation based on micron-scale all-optical magnetic holographic structures

QIN Xueyun WU Yue ZHU Rongqi ZHU Zhuqing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 174202 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250649

CSTR: 32037.14.aps.74.20250649

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250649>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小型化涡旋光模式解复用器: 原理、制备及应用

Miniaturized optical vortex mode demultiplexer: Principle, fabrication, and applications

物理学报. 2023, 72(20): 204207 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231521>

三维空间轨道角动量全息

Three-dimensional spatial orbital angular momentum holography

物理学报. 2024, 73(9): 094202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231822>

基于飞秒激光加工长周期光栅的全光纤三阶轨道角动量模式的产生

Generation of all-fiber third-order orbital angular momentum modes based on femtosecond laser processing of long-period grating

物理学报. 2023, 72(4): 044201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221928>

基于平面相控阵的轨道角动量涡旋电磁波扫描特性

Beam steering of orbital angular momentum vortex wave based on planar phased array

物理学报. 2021, 70(23): 238401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211119>

基于光束偏移器的光的轨道角动量分束器

Orbital angular momentum splitter of light based on beam displacer

物理学报. 2024, 73(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231874>

基于电光晶体平板部分相位调制动态产生涡旋光束

Dynamic generation of vortex beam based on partial phase modulation of electro-optical crystal plate

物理学报. 2022, 71(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220835>