



利用全息法在偶氮聚合物薄膜中记录涡旋光场

陈天宇 王长顺 潘雨佳 孙丽丽

Recording optical vortices in azo polymer films by applying holographic method

Chen Tian-Yu Wang Chang-Shun Pan Yu-Jia Sun Li-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 054204 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201496

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201496>

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

环形光子晶体光纤中涡旋光的传输特性研究

Propagation properties of vortex beams in a ring photonic crystal fiber

物理学报. 2017, 66(1): 014205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.014205>

不同类型偶氮材料光致双折射的温度特性研究

Temperature dependent characteristics of photo-induced birefringence in different types of azo materials

物理学报. 2017, 66(24): 244203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.244203>

贝塞尔-高斯涡旋光束相干合成研究

Generation of Bessel-Gaussian vortex beam by combining technology

物理学报. 2018, 67(13): 134203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180325>

基于双层阿基米德螺线的表面等离子体元涡旋产生方法

Generation of surface plasmon vortices based on double-layer Archimedes spirals

物理学报. 2019, 68(23): 234201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190747>

基于空间光调制器的非相干数字全息单次曝光研究

Single-shot incoherent digital holography based on spatial light modulator

物理学报. 2018, 67(6): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172127>

六重准晶涡旋光光子晶体光纤特性

Transmission characteristics of vortex beams in a sixfold photonic quasi-crystal fiber

物理学报. 2019, 68(11): 114209 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190381>

利用全息法在偶氮聚合物薄膜中记录涡旋光场*

陈天宇† 王长顺 潘雨佳 孙丽丽

(上海交通大学物理与天文学院, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

(2020年9月8日收到; 2020年10月6日收到修改稿)

利用全息技术在偶氮聚合物薄膜中记录了拓扑荷数 $q = -1, 1, 2, 4$ 的涡旋光场, 并将记录的原始叉形光栅与计算全息光栅进行对比, 对不同拓扑荷数涡旋光的记录速率和偶氮材料的可重复擦写性能进行了测试; 记录完成后, 将复现涡旋光与高斯光束干涉, 并与原始涡旋光和原始叉形光栅对比, 分析了记录质量. 实验结果表明: 高阶涡旋光场的全息叉形光栅会在记录过程中发生劈裂, 轻微劈裂的涡旋光束仍维持一个稳定的环状结构; 全息记录过程中不同拓扑荷数的涡旋光束记录速率较为统一, 偶氮材料可经过上百次的擦写而不出现疲劳; 再现涡旋光与原始涡旋光在光强分布结构上保持高度一致, 再现涡旋光的干涉条纹与原始涡旋全息光栅保持高度一致, 涡旋光及其携带的拓扑荷信息可被有效记录和读取.

关键词: 全息技术, 偶氮聚合物, 涡旋光, 拓扑荷**PACS:** 42.40.Eq, 42.70.Ln, 42.79.Vb**DOI:** 10.7498/aps.70.20201496

1 引言

涡旋光束具有中心相位奇点和螺旋相位结构^[1], 在柱坐标下涡旋光束的一般结构可被表示为 $U(r, q, z) = Aq(r) \exp(iq\theta) \exp(-ikz)$. $Aq(r)$ 描述了磁场的径向分布, $\exp(-ikz)$ 描述了光束在 z 方向的传播, $\exp(iq\theta)$ 描述了螺旋相位结构, θ 表示方位角, q 表示角量子数, 反映了在相位奇点附近 2π 相位周期的个数, 涡旋光束的光强呈环形分布, 截面中心处的强度为 0. 由于螺旋形相位波前的存在, 涡旋光束具有轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) $L_z = q\hbar$, q 决定了涡旋光束携带的轨道角动量的大小, 是表征涡旋光束拓扑荷信息的特征值, 因此 q 也被称为拓扑荷数. 涡旋光束携带轨道角动量的性质使得其在非线性量子光子学^[2-6]、材料处理^[7-10]、超分辨率显微镜^[11,12]、光学镊子和扳手^[13-15]、量子信息编码^[16,17]、多路复用 OAM 光通信^[18-20] 中得到广泛的研究和应用. 当前产生涡旋光束的主要方法有在激光中使用非线性相互作用

法^[21,22]、螺旋相位板法^[23]、超材料表面法^[24] 和计算全息法^[25] 等. 其中最为广泛使用的是 Heckenberg 于 1992 年提出的计算全息法, 该方法用计算机模拟生成一张涡旋光束与参考光干涉形成的全息叉形光栅图, 通过用参考光照射计算全息图产生涡旋光束. 也有研究人员通过全息法在材料表面直接记录叉形光栅, 并通过记录的叉形光栅生产涡旋光束, 例如 Leblanc 等^[26] 通过使用高强度脉冲激光 (10^{19} W/cm²) 在等离子体表面刻写叉形光栅, 并用超高强度激光照射该光栅, 以解决传统方法难以产生高强度涡旋光束的问题.

这种利用原始涡旋光束记录叉形光栅并复现涡旋光束的思想也可用于对涡旋光中拓扑荷信息的记录与读取. 由于涡旋光束理论上具有无穷多态, 可以是任意拓扑荷数的, 这在理论上允许传输内容的无限增加, 使得涡旋光在光学信息的编码^[16,17]、光通信^[18,19] 等领域取得了巨大的成功. 因此记录和再现涡旋光场对光学信息的存储具有一定意义, 但之前研究^[26] 中使用的记录材料对光强

* 国家自然科学基金 (批准号: 11574211) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tianyuchen@sjtu.edu.cn

要求较高,相较于等离子材料,偶氮聚合物薄膜材料具有易于擦写的特点^[27],低强度激光可将全息图案直接记录于薄膜内,全息图不需要后处理,并可以通过加热薄膜到其玻璃化转变温度来擦除全息图.这些特性使得偶氮聚合物薄膜材料在进行全息光学信息记录时具有一定优势.

本文利用全息技术,在偶氮聚合物薄膜中记录了不同拓扑荷数的涡旋光场.研究了拓扑荷数对记录速率和记录的原始叉形光栅的影响,测试了偶氮样品的可擦写性和耐久性,并用参考光复现了涡旋光束,对记录质量进行了分析研究.本文对涡旋光及其携带的拓扑荷信息的记录具有一定参考意义.

2 实验

2.1 样品

实验采用的记录材料为偶氮苯染料和聚离子液体 (PIL, Sigma-Aldrich) 通过离子自组装^[28]形成的超分子薄膜材料.其制备过程如下:选择带电聚合物聚(1-butyl-vinylpyridinium bromide) PIL 作为主链段,甲基橙染料 (MO, Sigma-Aldrich) 作为构建单元.将 2.5 mg/mL PIL 水溶液以 1:1 摩尔电荷比滴加到 MO 水溶液中,将沉淀的聚合物用双蒸馏水反复清洗几次,并在 60 °C 的真空环境中干燥 10 h,干燥后的粉末加热至 200 °C 左右熔化,在冷却阶段出现了高取向顺序的聚合物.用 Dektak 轮廓仪测得合成的薄膜的厚度约为 6 μm.

聚合物薄膜的吸收光谱、样品的原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 图像、样品的结构和化合物的化学结构如图 1 所示.样品的吸收峰在 350—550 nm 之间,实验选取波长为 532 nm 的激光作为记录光源,样品薄膜的表面起伏在 10 nm 范围内,具有较高的平整度,能有效减少表面不平整对光场的影响,利于光学信息的记录.

2.2 实验装置

实验装置如图 2 所示.记录光源为波长 532 nm 的倍频 Nd:YAG 连续激光器 (约 200 MW/cm²).记录过程中移走 BS2, M1, M2, M3, A1, A2, A3.激光器射出的线偏振高斯光束被 BS1 均分为

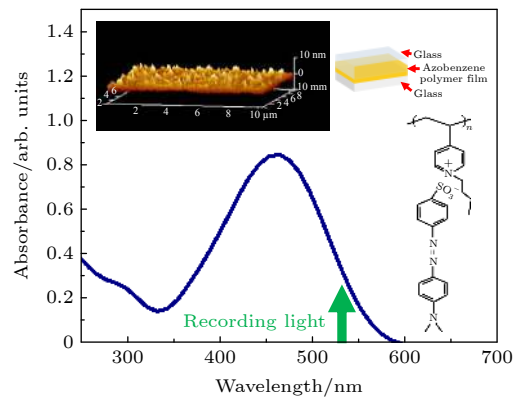


图 1 偶氮苯聚合物薄膜的吸收光谱,插图为样品 AFM 图像,封装后的样品结构和化合物的化学结构
Fig. 1. Absorption spectra of the azo-benzene polymer film. Inset: AFM image and structure of the sample, and chemical structure of the compound.

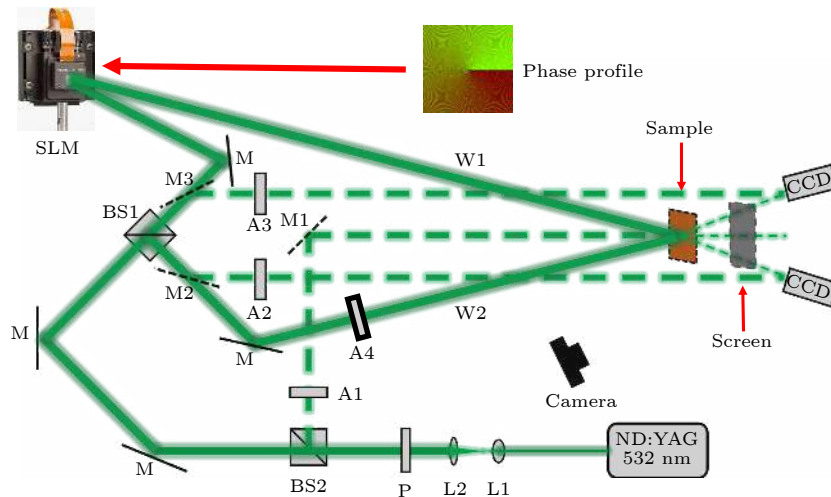


图 2 涡旋全息记录实验装置. W1 和 W2, 记录光束; L1, 焦距为 7.5 cm 的凸透镜; L2, 焦距为 20 cm 的凸透镜; P, 偏振片; BS1, BS2, 分束器; A1, A2, A3, A4, 衰减片; M, M1, M2, M3, 反光镜; SLM, 空间光调制器

Fig. 2. Experimental setup for vortex holographic recording. W1 and W2, recording waves. L1, lens with a focal length of 7.5 cm; L2, lens with a focal length of 20 cm; P, polarizer; BS1, BS2, beam splitter; A1, A2, A3, A4, attenuator; M, M1, M2, M3, mirror; SLM, spatial light modulator.

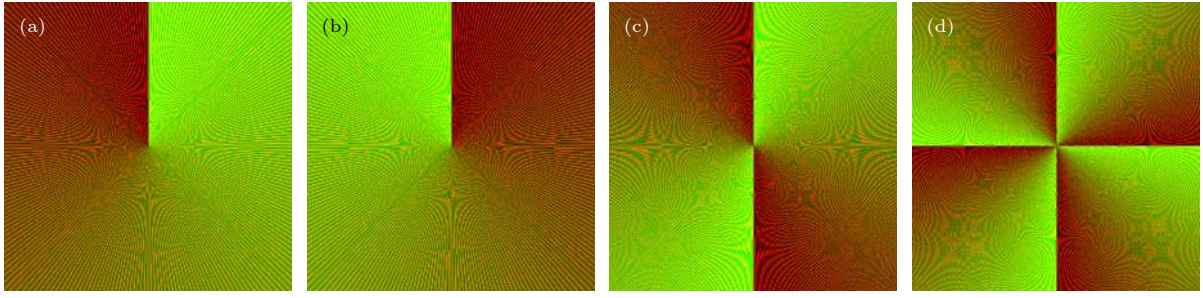


图 3 用以产生不同拓扑荷数涡旋光束的相位图像配置文件 (a) $q = -1$; (b) $q = 1$; (c) $q = 2$; (d) $q = 4$

Fig. 3. Phase profiles displayed on the SLM to generate vortex beams with different topological charges q : (a) $q = -1$; (b) $q = 1$; (c) $q = 2$; (d) $q = 4$.

W1 和 W2, W1 经空间光调制器 (spatial light modulator, SLM MEADOWLARK OPTICS E512-635) 调制成具有特定拓扑荷数的涡旋光束, 调节衰减片 A4, 使 W1 和 W2 强度相等. 两束记录光的入射平分线垂直于薄膜表面, 入射光之间夹角为 6° .

记录完成后, 将 BS2, M1, M2, M3, A1, A2, A3 置于如图 2 所示位置. 并用相机 (SONY ILCE-6400) 记录衍射图案. 移开屏幕, 用 CCD 相机 (CINOGY Technologies GmbH CinCam-1201) 探测衍射光斑. 调节 M2, M3 和 A1, A2, A3, 使高斯光束和衍射光斑强度相同, 用 CCD 记录高斯光束和一阶衍射光斑的干涉图样. 所有测量均在室温和大气条件下进行.

实验依据涡旋光的螺旋相位波前结构, 设计了如图 3(a)—图 3(d) 所示的相位图, 当激光照射在投影了相位图的空间光调制器上时, 反射光会被调制成拓扑荷数 $q = -1, 1, 2, 4$ 的涡旋光束. 通过对比 $q = -1$ 和 $q = 1$ 时的光栅形状, 比较正负拓扑荷在记录和读取时是否易于区分, 通过对比 $q = 2$ 和 $q = 4$ 时的光栅形状, 分析高阶涡旋光束在记录和读取中的表现.

3 结果与讨论

通过计算涡旋全息光栅, 模拟了一束具有螺旋相位波前的相干光与一束波前相位处处相等的相干光的干涉图样, 并与实际记录的涡旋全息光栅对比. 当两束光 $A_1 \exp(i\phi_1)$ 和 $A_2 \exp(i\phi_2)$ 相干涉时, 他们的干涉图样由 $A_1 A_2 \cos(\phi_1 + \phi_2)$ 调制. 涡旋光束 U_1 可表示为

$$U_1 = A_1 (r/R)^{|q|} \exp \left[-\left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \exp(iq\theta), \quad (1)$$

R 代表了光斑的半径, r 为半径坐标, q 代表角量子数, 即拓扑荷数, θ 为方位角.

$$U_2 = A_2 (r/R)^{|q|} \exp \left[-\left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \exp(iqc), \quad (2)$$

U_2 表示一束波前相位处处相等的高斯光束, c 为常数, 在下面的计算中被指定为 $c = 0$. 当两束光同轴干涉时, 在极坐标下, 明暗条纹的分界位置可被表示为

$$q\theta = \left(n + \frac{1}{2} \right) \pi, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

当两束光线呈一定夹角干涉时, 明暗条纹的分界在极坐标下可被表示为

$$q\theta = \left(n + \frac{1}{2} \right) \pi + kr \sin \gamma \cos \theta, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (4)$$

其中 γ 代表两束光线之间的夹角, k 为波矢. 图 4(a)—图 4(d) 分别给出了 $q = -1, 1, 2, 4$ 的计算涡旋全息图, 从图中可以清晰地看到在相位奇点附近发生干涉条纹的劈裂, 条纹的劈裂形状与数量都与拓扑荷数具有良好的对应关系, 由一根条纹劈裂成 $|q|+1$ 根条纹, 当 q 正负号相反时, 条纹劈裂的方向相反.

图 4(e)—图 4(h) 为 CCD 相机记录的涡旋光束与高斯光束产生的全息光栅. 实验中将相位图 3(a)—图 3(d) 分别加载到振幅型空间光调制器 (SLM) 上, 入射光经 SLM 反射后被调制成涡旋光束, 将涡旋光束与高斯光束进行夹角为 6° 的小角度干涉, 得到需要记录在样品中的原始全息光栅, 并用 CCD 进行记录分析. 从图 4(e)—图 4(h) 中可以看出, $q = -1, 1$ 的叉形全息光栅完美符合计算

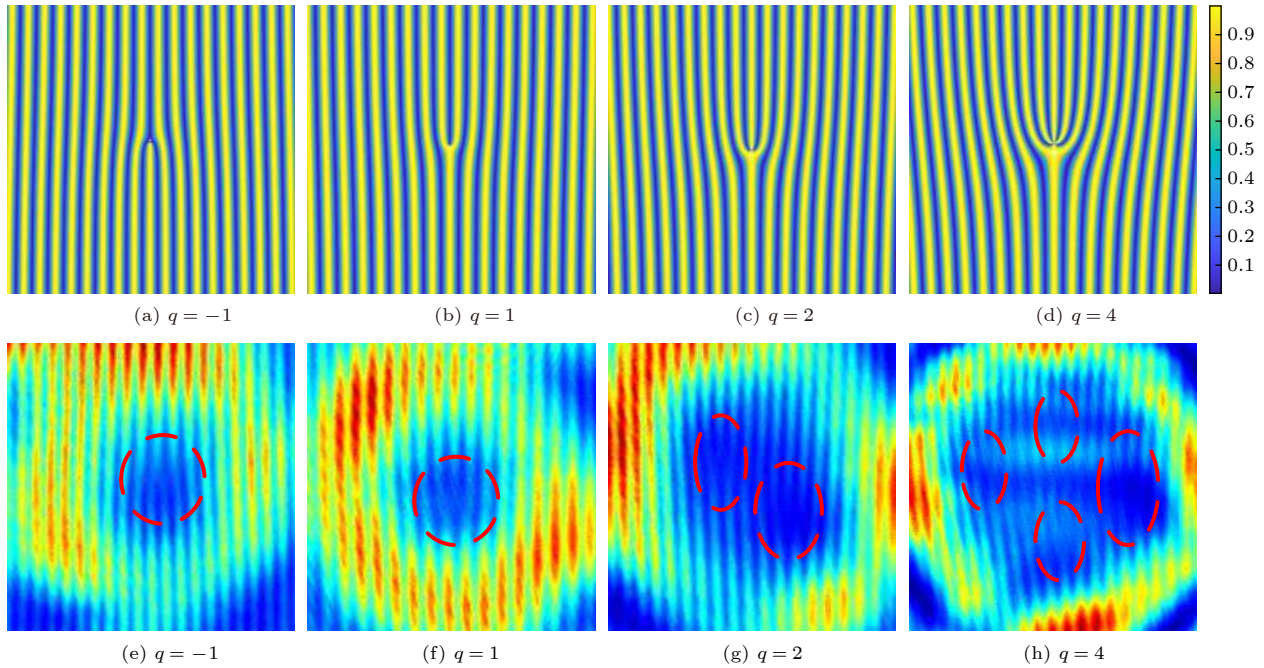


图 4 计算全息光栅与实验中记录的涡旋全息光栅的对比 (a)—(d) 分别为 $q = -1, 1, 2, 4$ 的计算全息光栅; (e)—(h) 分别为实验中记录的 $q = -1, 1, 2, 4$ 全息光栅

Fig. 4. Comparison between CGH gratings and vortex holographic gratings: (a)—(d) the CGH gratings of $q = -1, 1, 2, 4$; (e)—(h) vortex holographic gratings of $q = -1, 1, 2, 4$ recorded in experiments.

全息光栅的形状, 在相位奇点处干涉条纹发生劈裂, 叉形的开口方向相反, 一根条纹分裂成两根条纹, 表示在此处有一个 2π 相位的跳变. $q = 2, 4$ 的全息光栅并没有像计算全息光栅那样在一个相位奇点发生劈裂, 由一根光栅分裂成 $q + 1$ 根光栅, 而是分别分裂成了 2, 4 个二叉形光栅, 一个 q 阶的相位奇点退化成为 q 个一阶的相位奇点. 这种现象是由涡旋光在传播过程中经过各向异性介质时产生拓扑荷的衰退^[29,30], 涡旋光传播过程中受空气的扰动^[31,32], 光路中各种光学器件的像散^[33] 等因素共同导致. 但这种劈裂仍被局限在一个环形场强结构中, 高阶涡旋光并没有分裂成多束低阶涡旋光, 可以被认为是一束中央奇点发生分裂和位移的高阶涡旋光, 仍能有效携带拓扑荷信息.

在正式记录之前进行一次预演实验, 确定衍射光斑出现的位置, 并在该位置布置锁相放大器, 如图 5 所示, 以探测衍射光强度随时间的变化. 利用偶氮苯聚合物薄膜的可擦写性质, 将薄膜加热至相变温度以上, 擦除预演实验中记录的信息. 保持样品位置与预演实验一致, 开始正式记录, 锁相放大器实时监测的衍射光斑强度, 如图 6(a) 所示, 在 15 s 左右的记录后, 衍射光斑的强度增长趋于平缓, 15 s 后关闭记录光源, 衍射信号强度保持平稳,

改变原始涡旋光的拓扑荷数重复上述步骤, 得到不同拓扑荷数衍射光斑强度随记录时间的变化规律保持高度一致, 说明对不同拓扑荷数的涡旋光束, 实验的记录速率保持一致, 这对统一实验步骤具有重要意义, 可以在相同时间内记录不同拓扑荷数的涡旋光. 关掉记录光后, 参考光照射样品得到的衍射光斑如图 7 所示, 高阶涡旋光束所记录的光栅得到的衍射光斑具有更大的空心环状强度结构, 这很好地符合了已有的研究^[34], 衍射光斑的拓扑荷数为参考光的拓扑荷数加上原始全息光栅中携带的拓扑荷数乘以衍射光斑的阶数 (带符号运算). 当参考光为一束拓扑荷数为 0 的高斯光束时, 正 1 级衍射光斑的拓扑荷数应该与实验原始记录的涡旋光束相等.

为测试样品的耐久性和可擦写性, 实验选取同一块样品, 对拓扑荷为 1 的涡旋光束进行了 100 次重复记录擦写实验, 并记下每次记录后 1 阶衍射光斑, 即再现涡旋光的衍射效率, 如图 6(b) 所示. 实验发现, 当薄膜被加热到 97 °C 左右时, 偶氮聚合物样品发生玻璃化转变, 记录在其中的叉形光栅消失, 衍射信号随之消失. 重复上文记录过程, 大约在 15 s 的记录后衍射光斑的光强到达一个稳定的强度, 关闭记录光, 对此时的样品进行衍射效率的

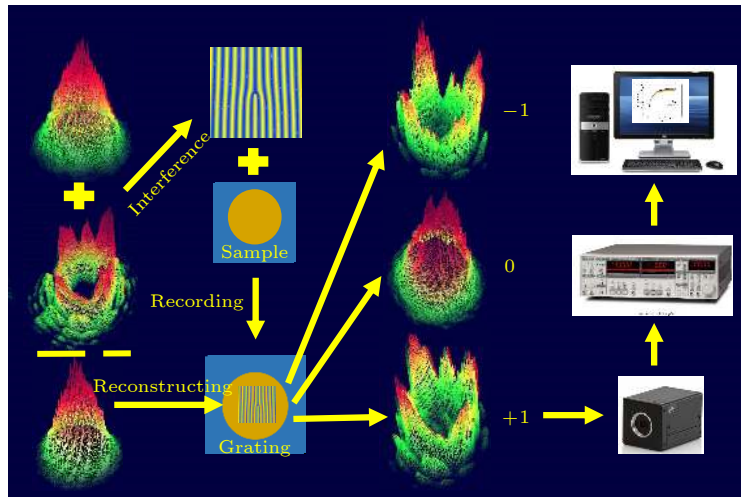


图 5 +1 级衍射光斑强度的探测

Fig. 5. Detection of the intensity of the first order diffraction spot.

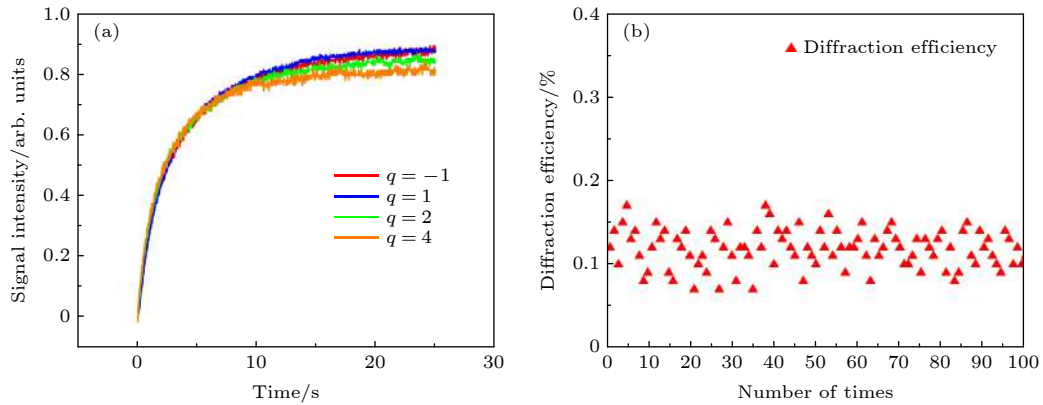


图 6 (a) 衍射光斑强度随时间的变化; (b) 涡旋全息光栅的衍射效率

Fig. 6. (a) Curves of the intensity variation of diffraction spots; (b) diffraction efficiency of optical vortex holographic grating.

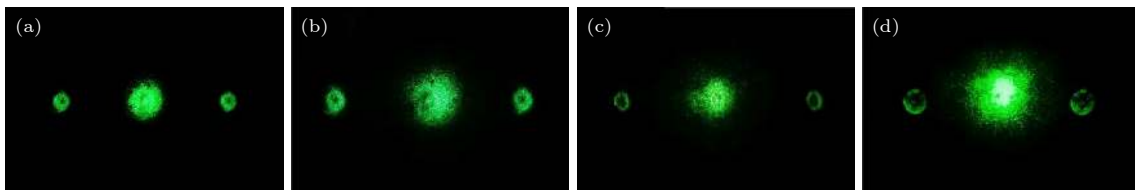


图 7 高斯光束照射不同拓扑荷数涡旋光记录的全息光栅得到的衍射图样 (a) $q = -1$; (b) $q = 1$; (c) $q = 2$; (d) $q = 4$

Fig. 7. Diffraction images generated by using reference beam to illuminate samples with holograms recorded different topological charges: (a) $q = -1$; (b) $q = 1$; (c) $q = 2$; (d) $q = 4$.

测定, 发现经过 100 次记录擦除实验后, 材料所记录的光栅的衍射效率稳定在 0.12% 左右, 没有发现明显的疲劳, 展示了良好的稳定性, 代表样品具有良好的可重复记录性.

为了进一步探究实验的记录效果, 用 CCD 记录一级衍射光斑与原始涡旋光束作对比, 并用干涉法检验再现涡旋光中是否有效携带了拓扑荷信息. 图 8(a)—图 8(d) 给出了拓扑荷数 $q = -1, 1, 2, 4$

的再现涡旋光束的强度分布图, 图 8(e)—图 8(h) 为原始涡旋光的强度分布, 图 8(i)—图 8(l) 为将一束高斯光束通过衰减片后调节至和再现涡旋光强度一致并与再现涡旋光束进行干涉的干涉条纹. 结果表明, 不同拓扑荷数的涡旋光束均具有环形光强分布, 中央无场强区域的面积随着拓扑荷的增加而变大, 再现涡旋光束和原始涡旋光束在形貌上保持着高度相似, 代表实验具有良好的记录和再现效果.

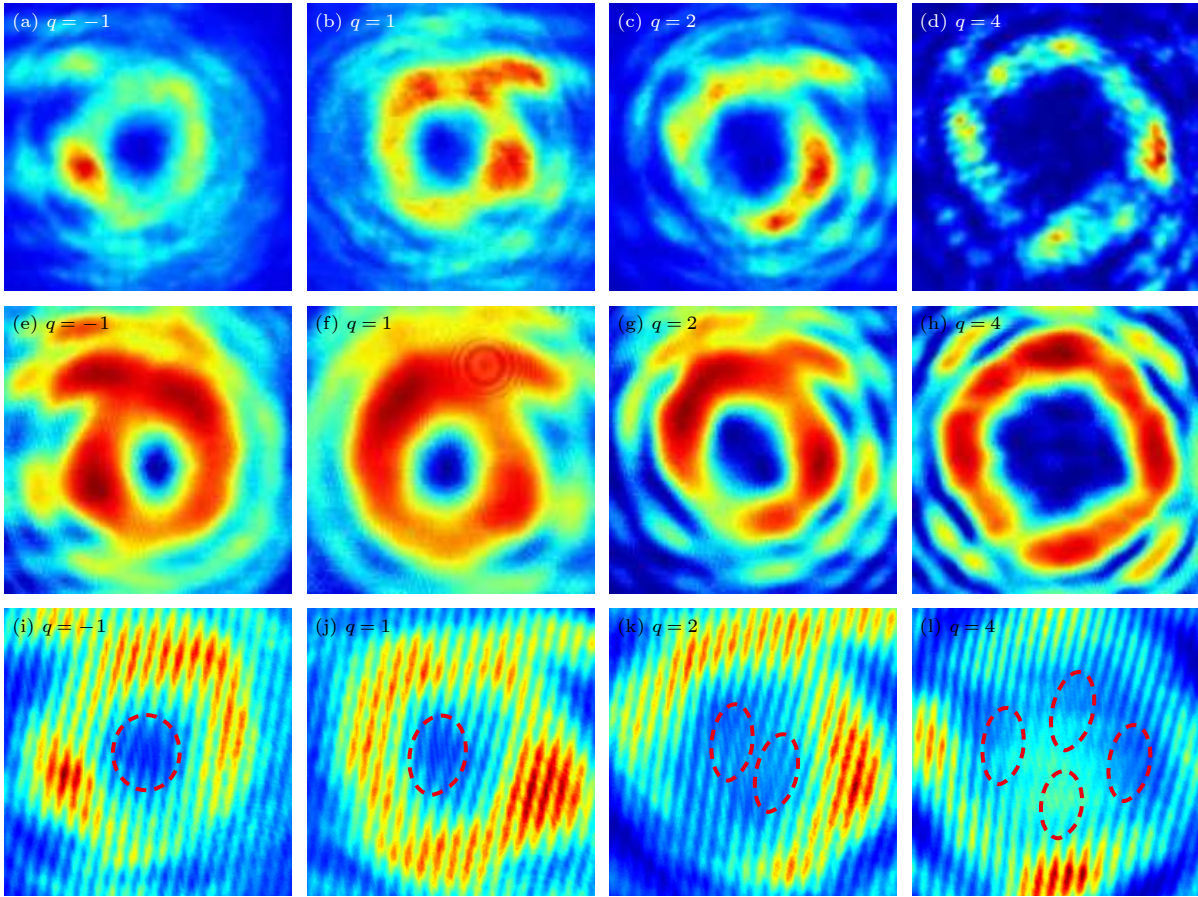


图 8 (a)—(d) 再现涡旋光束; (e)—(h) 原始涡旋光束; (i)—(l) 再现涡旋光束与高斯光束的干涉图样

Fig. 8. (a)–(d) Reconstructed optical vortex beams; (e)–(h) original optical vortex beam; (i)–(l) the interference pattern of reconstructed optical vortex beam and Gaussian beam.

图 8(i) 与图 8(j) 中都有一个由一条分为两条的叉形条纹, 开口方向相反, 说明此处存在一个相位奇点, 且在奇点处有一个 2π 相位的跳变, 两束涡旋光的拓扑荷数相反. 图 8(k) 和图 8(l) 中分别出现了两个和四个二叉形条纹, 一个 q 阶相位奇点分裂为 q 个一阶相位奇点, 代表 q 阶涡旋光演变为具有多奇点的复杂结构光束, 即高阶涡旋光的相位奇点发生了退化和分裂, 这些相位奇点仍被局限在一个环形场强分布内, 仍能有效携带拓扑荷信息. 图 8(i)—图 8(l) 中干涉图样与图 4(e)—图 4(h) 中原始涡旋光束的干涉图样保持高度一致, 验证了再现涡旋光中有效携带了原始涡旋光中的拓扑荷信息, 即原始涡旋光中的拓扑荷信息被有效记录在样品中并可以被读取.

4 结 论

本文基于全息技术在偶氮聚合物薄膜中记录了拓扑荷数 $q = -1, 1, 2, 4$ 的涡旋全息光栅, 并对

光栅形貌、记录速率和材料的可擦写性及耐久性进行了分析; 用参考光复现了涡旋光束, 将复现的涡旋光与高斯光束干涉, 与原始涡旋光和涡旋全息光栅进行比较, 分析了记录质量. 实验结果表明: 高阶涡旋光束的全息叉形光栅会在记录过程中发生劈裂, 分裂的相位奇点仍被局限在一个环形场强结构中, 轻微劈裂的涡旋光束仍维持一个稳定的环状结构, 可有效携带拓扑荷信息. 不同拓扑荷数涡旋光束的记录速率相近, 可以用统一的时长记录. 再现的涡旋光和原始涡旋光具有高度相似的场强结构, 再现涡旋光与高斯光束的干涉条纹也与记录在样品中的涡旋全息光栅具有高度相似性, 表明涡旋光及其拓扑荷信息能被有效记录和读取. 可通过加热样品到 $97\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右擦除记录的信息, 冷却后可重新记录新的信息, 样品在记录擦除 100 次后尚未出现疲劳, 具有良好的可重复性. 这种在偶氮聚合物薄膜中记录和再现涡旋光场的系统对光路的稳定性和光源的强度要求不高, 可以有效记录、存储、

读取和擦除涡旋光及其携带的拓扑荷信息, 在光学信息的记录方面具有应用前景。

参考文献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [2] Mair A, Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2001 *Nature* **412** 313
- [3] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, Franke-Arnold S, Courtial J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 257901
- [4] Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 240401
- [5] Ding D S, Zhang W, Zhou Z Y, Shi S, Xiang G Y, Wang X S, Jiang Y K, Shi B S, Guo G C 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 050502
- [6] Schine N, Ryou A, Gromov A, Sommer A, Simon J 2016 *Nature* **534** 671
- [7] Hamazaki J, Morita R, Chujo K, Kobayashi Y, Tanda S, Omatsu T 2010 *Opt. Express* **18** 2144
- [8] Omatsu T, Chujo K, Miyamoto K, Okida M, Nakamura K, Aoki N, Morita R 2010 *Opt. Express* **18** 17967
- [9] Toyoda K, Miyamoto K, Aoki N, Morita R, Omatsu T 2012 *Nano Lett.* **12** 3645
- [10] Toyoda K, Takahashi F, Takizawa S, Tokizane Y, Miyamoto K, Morita R, Omatsu T 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 143603
- [11] Watanabe T, Igasaki Y, Fukuchi N, Sakai M, Ishiuchi S, Fujii M, Omatsu T, Yamamoto K, Iketaki Y 2004 *Opt. Eng.* **43** 1136
- [12] Bretschneider S, Eggeling C, Hell S W 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 218103
- [13] Gahagan K T, Swartzlander G A 1996 *Opt. Lett.* **21** 827
- [14] Padgett M, Bowman R 2011 *Nat. Photonics* **5** 343
- [15] Padgett M J 2017 *Opt. Express* **25** 11265
- [16] Barreiro J T, Wei T C, Kwiat P G 2008 *Nat. Phys.* **4** 282
- [17] Nicolas A, Veissier L, Giner L, Giacobino E, Maxein D, Laurat J 2014 *Nat. Photonics* **8** 234
- [18] Willner A E, Huang H, Yan Y, Ren Y, Ahmed N, Xie G, Bao C, Li L, Cao Y, Zhao Z, Wang J, Lavery M P J, Tur M, Ramachandran S, Molisch AF, Ashrafi N, Ashrafi S 2015 *Adv. Opt. Photonics* **7** 66
- [19] Ren Y, Wang Z, Liao P, Li L, Xie G, Huang H, Zhao Z, Yan Y, Ahmed N, Willner A, Lavery M P, Ashrafi N, Ashrafi S, Bock R, Tur M, Djordjevic I B, Neifeld M A, Willner A E 2016 *Opt. Lett.* **41** 622
- [20] Eznaveh Z S, Zacarias J C A, Lopez J E A, Shi K, Milione G, Jung Y, Thomsen B C, Richardson D J, Fontaine N, Leon-Saval S G, Correa R A 2018 *Opt. Express* **26** 30042
- [21] Lugiato L A, Oldano C, Narducci L M 1988 *Opt. Soc. Am. B* **5** 879
- [22] Brambilla M, Battipede F, Lugiato L A, Penna V, Prati F, Tamm C, Weiss C O 1991 *Phys. Rev. A* **43** 5090
- [23] Oemrawsingh S S R, Ma X, Voigtand D, Aiello A, Eliel E R, Hooft G W, Woerdman J P 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 240501
- [24] Karimi E, Schulz S A, Leon I D, Qassim H, Upham J, Boyd R W 2014 *Light Sci. Appl.* **3** e167
- [25] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, White A G 1992 *Opt. Lett.* **17** 221
- [26] Leblanc A, Denoed A, Chopineau L, Mennerat G, Martin P, Quéré F 2017 *Nat. Phys.* **13** 440
- [27] Ambrosio A, Marrucci L, Borbone F, Roviello A, Maddalena P 2012 *Nat. Commun.* **3** 989
- [28] Cook L J, Mazilu D A, Mazilu I, Simpson B M, Schwen E M, Kim V O, Seredinski A M 2014 *Phys. Rev. E* **89** 062411
- [29] Mamaev A V, Saffman M, Zozulya A 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2108
- [30] Gan X, Zhang P, Liu S, Zheng Y, Zhao J, Chen Z G 2009 *Opt. Express* **17** 23130
- [31] Malik M, O'Sullivan M, Rodenburg B, Mirhosseini M, Leach J, Lavery M P, Padgett M J, Boyd R W 2012 *Opt. Express* **20** 13195
- [32] Cui Q, Li M, Yu Z 2014 *Opt. Commun.* **329** 10
- [33] Reddy S G, Prabhakar S, Aadhi A, Banerji J, Singh R P 2014 *JOSA A* **31** 1295
- [34] Stoyanov L, Topuzoski S, Stefanov I, Janicijevic L, Dreischuh A 2015 *Opt. Commun.* **350** 301

Recording optical vortices in azo polymer films by applying holographic method*

Chen Tian-Yu[†] Wang Chang-Shun Pan Yu-Jia Sun Li-Li

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(Received 8 September 2020; revised manuscript received 6 October 2020)

Abstract

In this paper the optical vortices with topological charge $q = -1, 1, 2, 4$ are recorded in azo polymer films by using holographic technology. The forked holographic gratings formed by the Gaussian beam and optical vortex beam are recorded in the sample films, the original forked holographic grating and the recording rate are analyzed. The vortex beam is reconstructed by illuminating the sample film with a reference beam, and the recording quality is analyzed. Also the erasability and durability of the sample are tested. The experimental results show that the recording rates of vortex beams with different topological charges are relatively uniform, which means that the optical vortices with different topological charges can be recorded at the same speed. The forked holographic grating of the high-order optical vortex splits in the recording process due to the disturbances, such as anisotropic nonlinear light, atmospheric turbulence, and background light field. However, the split vortex beam still maintains a stable ring structure. The reconstructed optical vortex and the original optical vortex are highly consistent in morphology, and the interference fringes of the reconstructed optical vortices are highly consistent with the original vortex holographic gratings, indicating that the topological charge information in the optical vortices can be effectively recorded and read out. The recorded information can be erased by heating the sample to about 97 °C, and new information can be re-recorded after cooling. There appears no fatigue in the sample after the information has been erased 100 times and good durability is still retained. Optical vortices theoretically have infinite states of topological charges, based on which great success is achieved in optical communication and information encoding. Therefore, storing and reading information of topological charges in optical vortices may have potential applications in optical information storage.

Keywords: holography, azo polymer, optical vortex, topological charge

PACS: 42.40.Eq, 42.70.Ln, 42.79.Vb

DOI: [10.7498/aps.70.20201496](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201496)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11574211).

[†] Corresponding author. E-mail: tianyuchen@sjtu.edu.cn