

文章编号: 0253-2239(2010)02-0503-05

# 体全息产生光学涡旋的实验研究

李海莲 杨德兴 任小元 赵建林

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 利用全息法可产生复杂拓扑结构的光学涡旋且容易实现对涡旋态的控制,但通常情况下衍射效率较低。以掺铁铌酸锂晶体为存储介质,通过对光学涡旋的体全息存储与再现研究,在晶体几何厚度仅为0.6 mm的情况下获得了26.7%的衍射效率,且再现图像与记录前图像质量相当。根据实验参数,应用Kogelnik耦合波理论进行的计算表明,在同一种晶体和曝光参数情况下,当晶体的几何厚度达到1.23 mm时可获得100%的涡旋光衍射效率。

**关键词** 衍射; 光学涡旋; 体全息; 衍射效率; 掺铁铌酸锂晶体

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0503

## Experimental Investigation of Optical Vortex Generated by Volume Holography

Li Hailian Yang Dexing Ren Xiaoyuan Zhao Jianlin

(Institute of Optical Information Science and Technology, Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** Complicated optical vortices can be generated by holography and their topological structures could be controlled easily, but the obtained diffraction efficiencies are usually low. It was investigated that optical vortex was stored and reconstructed in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystal by volume holography. The results exhibit that diffraction efficiency of vortex beam was achieved at 26.7% in a crystal just with a thickness of 0.6 mm, and the quality of reconstructed vortex was almost identical to that of original one. Furthermore, by employing Kogelnik's coupled-wave theory, the results of numerical computations according to the experimental parameters show that diffraction efficiency of vortex beam could attain to 100% as the thickness of crystal reached 1.23 mm with the same crystal and the same exposure parameters.

**Key words** diffraction; optical vortex; volume holography; diffraction efficiency;  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystal

## 1 引言

光学涡旋是指具有连续螺旋相位结构的光束,其中心为相位无法定义的奇点,且为一个暗核。从1974年J. Nye和M. Berry<sup>[1]</sup>发现光学涡旋以来,其特殊的性质使其在光学操控、光学捕获、光学涡旋日冕观测仪、新型光信息处理等方面有着广泛的研究和应用<sup>[2~7]</sup>。目前产生光学涡旋的方法主要有:几何模式转换法<sup>[8]</sup>、螺旋相位板法<sup>[9]</sup>、中空波导法<sup>[10]</sup>、旋转镜面光学参量振荡器法<sup>[11]</sup>、特殊设计的激光器<sup>[12]</sup>和计算全息法<sup>[13,14]</sup>等。前5种方法产生

的拉盖尔-高斯(Lagerre-Gaussian, LG)模式单一且不易控制相应的拓扑荷值。1990年Bazhenov等<sup>[14]</sup>利用计算全息(CGH)产生拓扑荷可以控制的光学涡旋。这种方法使光学涡旋参量的控制变得更加容易。后来,各种空间光调制器(SLM)与计算全息的结合使光学涡旋的产生变得更加方便<sup>[15,16]</sup>。使用SLM的一个主要问题是多级衍射问题,虽然可以同时产生不同拓扑荷的光学涡旋,但每一级涡旋衍射光的衍射效率都不够高。近年来人们在理论和实验上对涡旋的产生也做了较深入的研究<sup>[15~19]</sup>。2007

收稿日期: 2009-08-10; 收到修改稿日期: 2009-09-14

作者简介: 李海莲(1984—),女,硕士研究生,主要从事光信息技术方面的研究。E-mail: lihailian2006@163.com

导师简介: 杨德兴(1966—),男,博士,副教授,主要从事光纤技术和光电子器件方面的研究。

E-mail: dxyang@nwpu.edu.cn(通信联系人)

年 Zhongyi Guo 等<sup>[17]</sup>用 800 nm 的飞秒激光脉冲将涡旋的 CGH 图直接记录到玻璃内部,然后用 He-Ne 激光再现出光学涡旋,其产生的一级(包括+1 级和-1 级)衍射涡旋衍射效率有所改善,达到 4.79%。2008 年 Y. J. Liu 等<sup>[18]</sup>通过一电极上携带有 CGH 图案的反平行液晶元件来产生光学涡旋,通过调节加载到元件上的电压,得到的衍射效率最高为 27.5%。这些方法使衍射效率有所增加,但还无法抑制不需要的衍射级。

体全息图的布拉格衍射只有一个有效的衍射级,因此可以产生很高的衍射效率(最高可达到 100%),如果将涡旋光束作为物光与另一束参考光干涉,并将干涉条纹记录在体全息存储介质中,当用参考光照射所记录的体全息图时,就可以再现出高衍射效率的光学涡旋。将计算全息获得的光学涡旋衍射模板(胶片)产生的低衍射效率光学涡旋,通过体全息记录方式存储于  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  晶体中,以期获得高衍射效率的光学涡旋。

## 2 实验原理与装置

光学涡旋的体全息存储和再现与传统的体全息存储再现过程相同,其记录过程如图 1 所示。相干光束通过分束镜(BS)分为两束,其中一束照射涡旋产生器(OVG)产生一束涡旋光作为物光(O),另一束为平面波或球面波作为参考光(R)。两束光在全息存储介质(RM)中相遇并发生干涉,其干涉图样被记录在存储介质中,形成含有光学涡旋振幅和相位分布的体全息图(H)。通过用参考光照射所记录的体全息图,就可再现出记录的涡旋光场。

原理上,任何可产生光学涡旋的装置都可作为

图 1 中的 OVG。OVG 采用计算全息方法得到其衍射模板,该衍射模板通过照相的方式翻拍在黑白胶片上,图 2 为翻拍的 CGH 图,通过单色平面波照射该图片,利用其+1 或-1 级衍射光场即可得到涡旋光场。

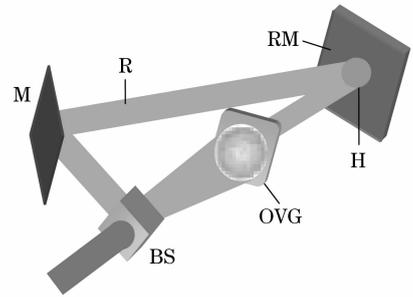


图 1 涡旋的体全息存储原理示意图

Fig. 1 Sketch map of optical vortex stored by volume holography

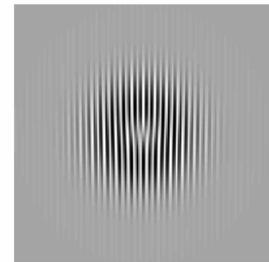


图 2 黑白胶片上的计算全息图

Fig. 2 CGH in the panchromatic film

实验装置如图 3 所示。图中激光器为美国 Coherent 公司的 Verdi-V2 型半导体抽运固体激光器,其输出波长为 532 nm,功率范围为 0~2 W。从激光器输出的光束经过倒置望远镜系统 RT 扩束准直后,再经分束镜  $\text{BS}_1$  分为两路相干光。经  $\text{BS}_1$  和

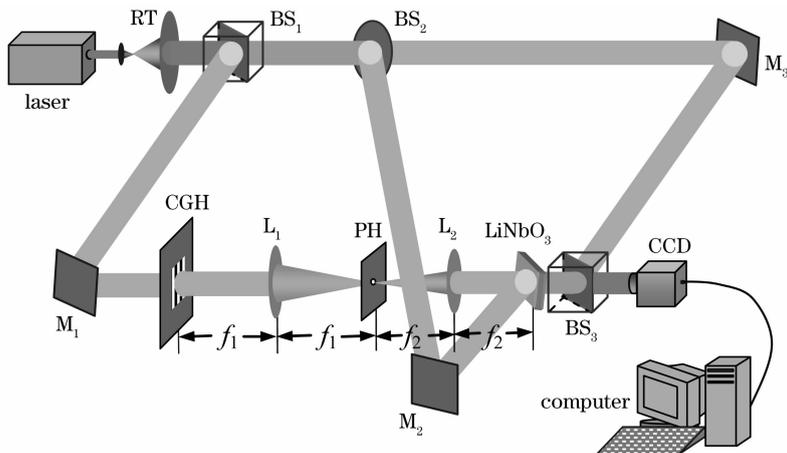


图 3 体全息记录和产生光学涡旋的实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of optical vortex recorded and generated by volume holography

反射镜  $M_1$  反射后的光束照射黑白胶片上的计算全息图 CGH, 衍射出的光束通过透镜  $L_1$  后会聚到小孔 PH 处, 将 +1 或 -1 级透过小孔后再经过透镜  $L_2$ , 在其后焦面处得到涡旋光束即物光。透过  $BS_1$  的光由  $BS_2$  再分成两束, 其反射光经反射镜  $M_2$  再次反射后作为参考光, 与物光对称入射到全息存储介质铌酸锂晶体 ( $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ ,  $10 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 掺 Fe 质量分数为 0.03%) 上。透过  $BS_2$  并经反射镜  $M_3$  反射后的准直光束与涡旋光束在分束镜  $BS_3$  上发生小角度干涉用以验证涡旋光束。实验中, 在晶体后参考光束和涡旋光束的透射方向分别放置一个光电探头, 测量透过晶体后参考光的光功率, 并实时检测再现出的涡旋光束的光功率大小, 并用 CCD 相机采集全息记录前后涡旋像的强度分布及其与验证光束的干涉条纹图。

### 3 实验结果与分析

图 3 所示的实验装置中, 存储介质  $\text{LiNbO}_3$  晶体的光轴与物光和参考光的偏振方向垂直, 且平行于两光束的入射面。其中物光是拓扑荷值为 1 的环形涡旋, 参考光为单色平面波, 且两光束功率密度比为 1:1, 均为  $10.6 \text{ mW/cm}^2$ 。两光束以约  $44^\circ$  夹角对称入射到存储介质  $\text{LiNbO}_3$  晶体上。在全息记录过程中, 每隔 2 min 测量一次衍射效率。测量时, 切断涡旋光束, 通过两个光电探头分别测量参考光的透射光功率  $P_r$  和再现出的涡旋光功率  $P_d$ 。每次测量时间不超过 5 s, 远小于测量间隔 120 s, 因此, 可忽略测量过程中对记录全息图的光擦除问题。在不考虑晶体吸收和表面反射的情况下, 衍射效率可按

$$\eta = \frac{P_d}{P_r + P_d}$$

来计算。图 4 为监测到的衍射效率随记录时间的变化关系。其中符号“□”为实测数据点, 实线为用 Kogelnik<sup>[22,23]</sup> 理论根据图中实验数据拟合的结果。

从图 4 的拟合结果可得到光栅的饱和折射率调制度  $\Delta n_{\text{sat}} = 1.573 \times 10^{-3}$ , 全息光写入时间常数  $\tau_r = 7638 \text{ s}$ 。当写入时间为 2280 s 时衍射效率达到最大, 约为 26.7%。

根据 Kogelnik<sup>[22,23]</sup> 理论可知衍射效率随记录介质厚度而变化, 由实验结果拟合得到的饱和折射率调

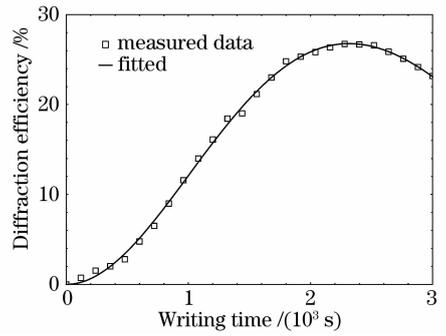


图 4 光栅衍射效率随写入时间的变化关系曲线

Fig. 4 Dependence of the diffraction efficiency of volume holographic grating on writing time

制度、所用光波长和对称入射角度等参数可以算出衍射效率与晶体几何厚度  $d$  的关系为  $\eta = \sin^2(1.27d)$ , 其变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 在该实验条件下, 通过适当增加记录介质的厚度可大幅度提高衍射效率。当记录晶体的厚度增加到 1.23 mm 时, 衍射效率可达到 100%。

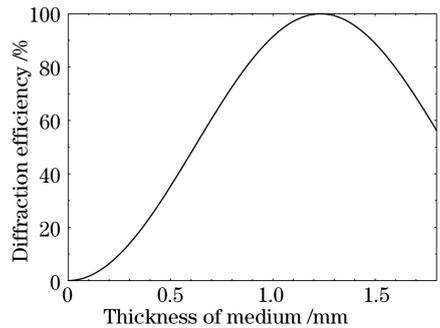


图 5 光栅衍射效率随记录介质厚度的变化曲线

Fig. 5 Curve of diffraction efficiency of the recorded grating with the thickness of medium

实验中, 也利用 CCD 观察了胶片模板和记录的体全息光栅产生的环形涡旋的强度分布及其与平面波、球面波的干涉图样, 结果如图 6 所示, 图 6(a)~(c) 为胶片模板的结果, 图 6(d)~(f) 为体全息光栅的结果。从这两组图可看出, 由体全息光栅再现出的光学涡旋与作为写入物光的光学涡旋基本一致, 从干涉图样可清晰地看出位错和螺旋形条纹, 结果显示均为拓扑荷等于 1 的环形涡旋, 表明环形涡旋的振幅和相位信息已记录在晶体中, 且体全息获得的光学涡旋与记录时作为物光的涡旋质量相当。

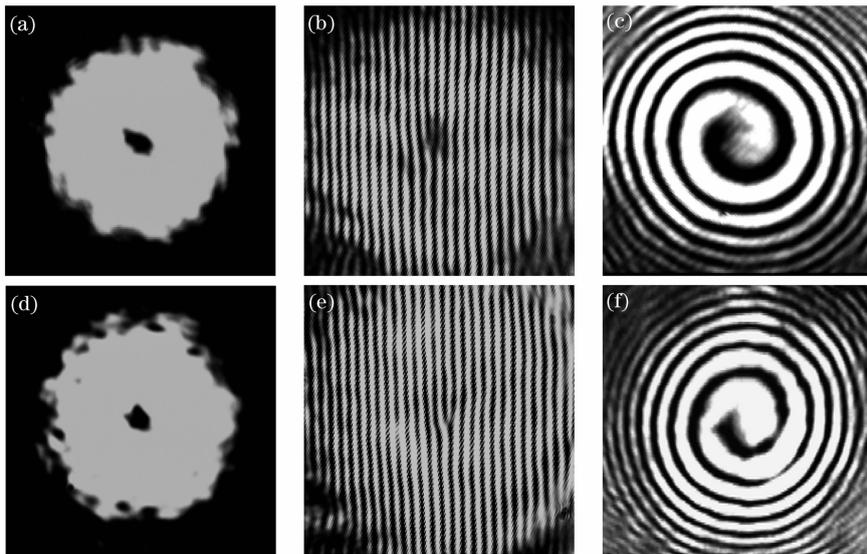


图 6 拓扑荷为 1 的环形涡旋体全息存储实验结果

Fig. 6 Experimental results of ring vortex with topological charge 1 by volume holographic storage

## 4 结 论

基于体积全息图的布拉格选择特性,通过体全息存储的方式,实验实现了铌酸锂晶体对于光学涡旋的体全息存储与再现,在晶体厚度仅为 0.6 mm 的情况下获得了 26.7% 的衍射效率。根据实验参数,应用 Kogelnik 耦合波理论进行的计算表明,晶体和曝光参数均不变的情况下,晶体厚度增加到 1.23 mm 时可获得 100% 的涡旋光衍射效率。这种利用体全息获得高的涡旋光衍射效率的方法可用于产生较强功率的涡旋光束。也可以进一步将多个涡旋同时记录在体全息材料中,利用角度复用实现多涡旋的叠加与分离,从而可获得更加丰富的涡旋分布光场。基于多重体全息光栅的合束效应,在用于微粒操控时,可根据实际需要选择不同的参考光束照射存储了多种拓扑荷涡旋的体全息材料,可以在同一个方向再现出不同拓扑荷的涡旋光束以获得不同的涡旋力。也可以同时用多束参考光照射存储材料在同一个方向再现多个不同拓扑荷的涡旋光束,实现多涡旋同轴相干叠加以改变涡旋态。因此,利用体全息存储光学涡旋,不仅可获得高衍射效率的涡旋光束,而且可方便地调节涡旋的拓扑荷和进行多涡旋的相干叠加等。

## 参 考 文 献

- J. F. Ney, M. V. Berry. Dislocations in wave trains[J]. *Proc. R. Soc. London Ser. A*, 1974, **336**(1605): 165~190
- David G. Grier. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 810~816
- T. Kuga, Y. T. N. Shiokawa, T. Hirano *et al.*. Novel optical trap of atoms with a doughnut beam[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(25): 4713~4716
- Gregory Foo, David M. Palacios, Grover A. Swartzlander *et al.*. Optical vortex coronagraph[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24): 3308~3310
- Chen Ziyang, Zhang Guowen, Rao Lianzhou *et al.*. Determining the orbital angular momentum of vortex beam by Young's Double-Slit interference experiment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1063~1067
- 陈子阳, 张国文, 饶连周 等. 杨氏双缝干涉实验测量涡旋光束的轨道角动量[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1063~1067
- Lianzhou Rao, Jixiong Pu. Generation of partially coherent vortex bottle beams [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 379~382
- Wang Hao, Yang Dexing, Gan Xuetao *et al.*. Analysis of interference of planar vortex beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 517~522
- 王浩, 杨德兴, 甘雪涛 等. 平面涡旋光干涉的分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 517~522
- M. W. Beijersbergen, L. Allen, H. E. L. O. van der Veen *et al.*. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **96**(1~3): 123~132
- G. A. Turnbull, D. A. Robertson, G. M. Smith *et al.*. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimeter-wave frequencies by use of a spiral phaseplate [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **127**: 183~188
- M. L. M. Balistreri, J. P. Korterik, L. Kuipers *et al.*. Local observations of phase singularities in optical fields in waveguide structures[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(2): 294~297
- Arlee V. Smith, Darrell J. Armstrong. Generation of vortex beams by an image-rotating optical parametric oscillator[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(8): 868~873
- R. Oron, N. Davidson, A. A. Friesem *et al.*. Efficient formation of pure helical laser beams[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **182**: 205~208
- N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith *et al.*. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(3): 221~223
- V. Yu. Bazhenov, M. V. Vasnetsov, M. S. Soskin. Laser beams with screw dislocations in their wavefronts [J]. *Pis'ma*

- Zh. Eksp. Teor.*, 1990, **52**(8): 1037~1039
- 15 Jeffrey A. Davis, Dylan E. McNamara, Don M. Cottrell. Image processing with the radial Hilbert transform: theory and experiments[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2): 99~101
- 16 Cheng-Shan Guo, Xuan Liu, Xiu-Yun Ren *et al.*. Optimal annular computer-generated holograms for the generation of optical vortices [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(2): 385~390
- 17 Zhongyi Guo, Shiliang Qu, Shutian Liu. Generating optical vortex with computer-generated hologram fabricated inside glass by femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **273**(1): 286~289
- 18 Y. J. Liu, X. W. Sun, D. Luo *et al.*. Generating electrically tunable optical vortices by a liquid crystal cell with patterned electrode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(10): 101114
- 19 Y. J. Liu, X. W. Sun, Q. Wang *et al.*. Electrically switchable optical vortex generated by a computer-generated hologram recorded in polymer-dispersed liquid crystals[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 16645~16650
- 20 R. K. Tyson, M. Scipioni, J. Viegas. Generation of an optical vortex with a segmented deformable mirror [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(33): 6300~6306
- 21 P. Kurzynowski, A. Woźniak, E. Frańczek. Optical vortices generation using the Wollaston prism [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(30): 7898~7903
- 22 Yu Meiwen. Optical holography and its applications [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1996. 149~196  
于美文. 光全息学及其应用 [M]. 北京:北京理工大学, 1996. 149~196
- 23 B. H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *Bell System Technical J.*, 1969, **48**(9): 2909~2974