

# 强聚焦涡旋光束经过散射介质的实验研究

孙存志 陈子阳 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要** 激光束经过大数值孔径透镜聚焦后,可以得到一个亚波长大小的聚焦光斑,能够用于显微技术、光刻和数据存储。通过实验的方法,研究了强聚焦的涡旋光与非涡旋光经过散射介质的透射率,并分析聚焦透镜数值孔径和涡旋光拓扑荷数对聚焦光透过散射介质能力的影响。实验结果显示:在相同的实验条件下,涡旋光的透射能力比非涡旋光更强;拓扑荷数越大,聚焦光透射能力越强;数值孔径越大,聚焦光的透射能力越强。

**关键词** 大气光学;涡旋光束;强聚焦;散射介质

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0601002

## Experimental Study of Tightly Focused Vortex Beams Through Turbid Media

Sun Cunzhi Chen Ziyang Pu Jixiong

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

**Abstract** A subwavelength focal spot can be generated by tightly focused laser beams through lens with large numerical aperture (NA), which may have potential applications in microscopy, photoetching and data storage. The transmittances of tightly focused vortex beams and non-vortex beams through turbid media are experimentally studied. The influences of the NA of objective and the topological charge of vortex beam on the transmittance are investigated in details. The experimental results show that the transmittance is stronger if beam carries spiral phase under the same experimental conditions. Moreover, a larger topological charge and a larger NA can produce a stronger transmittance.

**Key words** atmospheric optics; vortex beam; tightly focused; turbid media

**OCIS codes** 010.1310; 010.7060; 290.2558

## 1 引言

激光光束经过大数值孔径(NA)透镜聚焦被称为强聚焦,研究表明强聚焦的激光束具有比普通聚焦更小的光斑以及更强的纵向分量,因此在平板印刷术、光数据存储、粒子束囚禁和数据处理等方面具有广泛的应用<sup>[1]</sup>。具有螺旋型相位分布的光束被称为涡旋光束,其电场强度表达式中带有涡旋相位项 $\exp(-im\varphi)$ ,涡旋光束的每个光子具有轨道角动量。对涡旋光的研究在最近一段时间引起了广泛的兴趣。国内外对涡旋光强聚焦已经进行了较深入的研究,研究内容包括强聚焦涡旋光束聚焦场中的电场以及轨道角动量等<sup>[2-7]</sup>。然而,涡旋光束大数值孔径聚焦通过散射介质的特性目前还没有研究。本

文根据对线偏振涡旋光束强聚焦的研究结果,分析了涡旋相位项在聚焦过后对焦点附近电场透过散射介质能力的影响。对涡旋光束强聚焦透过散射介质特性(透射率、光强特性)的研究对利用透过散射介质光束产生光镊及成像等方面具有一定意义。

## 2 实验装置

拉盖尔-高斯涡旋光束是实验室中具有代表性的涡旋光束,将激光器输出的高斯光<sup>[8-10]</sup>,经过螺旋相位板的相位调制输出拉盖尔-高斯光束,其横截面上的光场强度可以表示为

$$E_i(r, \varphi) = E_0 \left( \frac{r}{w} \right)^{|m|} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \exp(-im\varphi), \quad (1)$$

**收稿日期**: 2013-12-10; **收到修改稿日期**: 2014-01-10

**基金项目**: 国家自然科学基金(61178015)

**作者简介**: 孙存志(1988—),男,硕士研究生,主要从事光束整形方面的研究。E-mail: 992049627@qq.com

**导师简介**: 蒲继雄(1962—),男,博士,教授,主要从事光束传输与变换方面的研究。E-mail: jixiong@hqu.edu.cn  
(通信联系人)

式中  $(r, \varphi)$  为横截面上场分布的柱坐标,  $E_0$  为光场强度振幅,  $m$  为涡旋光的拓扑电荷数,  $\omega$  为入射光束大小。对于没有涡旋相位项的入射光, 其电场表达式为

$$E_{in}(r) = E_0 \left(\frac{r}{\omega}\right)^{|m|} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right). \quad (2)$$

实验研究上述两类光束以及拉盖尔-高斯光束拓扑电荷数、透镜数值孔径等参数改变时, 聚焦光束

穿过散射介质的能力。实验装置如图 1 所示, 波长为 632.8 nm 的激光光束垂直偏振片表面入射, 所获得的线偏振光入射到涡旋相位板, 继而由两个焦距分别为  $f_1$ 、 $f_2$  的透镜进行扩束, 并利用焦距为  $f_3$  的大数值孔径透镜对扩束后的涡旋光束进行聚焦, 将散射介质放置在焦点附近, 探测器紧贴放置在散射介质后对出射光束光能进行探测。

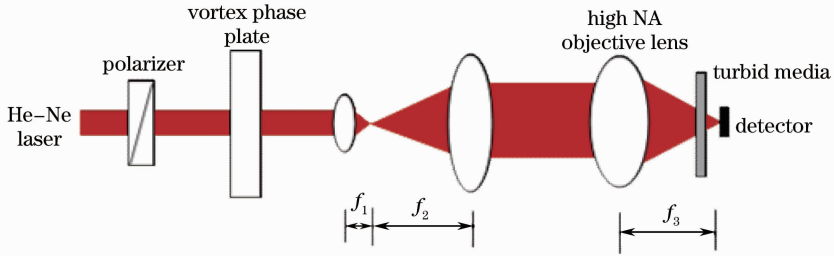


图 1 强聚焦涡旋光透过散射介质实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of tightly focused vortex beam through turbid media

在实验中以氢氟酸腐蚀玻璃片作为散射样品, 腐蚀的时间不同, 则样品的散射程度也不同。实验中使用 Ophir-Spiricon NOVAVII 型光功率计, 该功率计探测精度为  $10^{-4}$  mW, 读数精确到  $10^{-3}$  mW。本文详细研究了入射光是否带有涡旋相位及数值孔径、拓扑荷数等发生变化时对光强透射率的影响。

### 3 实验结果分析

实验结果中纵坐标表示光能量透射率(透射率定义为透过光的能量和入射光能量的比值  $I_{out}/I_{in}$ )。单片样品厚度为  $l=0.25$  mm, 本实验使用的 7 个散射样品按顺序 1~7 编号, 在同一次试验中按照相同的编号顺序叠加样品到厚度  $L$ , 样品叠加散射效果增强<sup>[11-16]</sup>, 光能透射率不断下降。对样品编号可以消除因为样品被腐蚀程度不同对实验结果造

成的影响。实验数据的起伏是由于不同腐蚀程度的玻璃片以及实验允许的测量误差造成的。相同实验条件及样品放置顺序一定的情况下, 数据变化的趋势相同。图 2(a) 对比了大数值孔径下, 带有涡旋相位项和无涡旋相位项对聚焦光能透射率的影响。选择涡旋光束的拓扑荷数为 8, 透镜的数值孔径  $NA=0.65$ 。由实验数据随样品厚度变化曲线可知, 带有涡旋相位项的入射光大数值孔径聚焦后, 透过散射介质能力明显比没有涡旋相位项的聚焦光束更强。如图 2(b) 所示, 在同样的实验条件下, 改变透镜的数值孔径  $NA=0.25$ , 八阶涡旋光束与无涡旋项光束聚焦的实验结果。与图 2(a) 的结果相反, 当透镜的数值孔径较小时, 无涡旋相位光束的透射率比涡旋光束的透射率更高。

在保持数值孔径为 0.65 的情况下, 考虑涡旋光

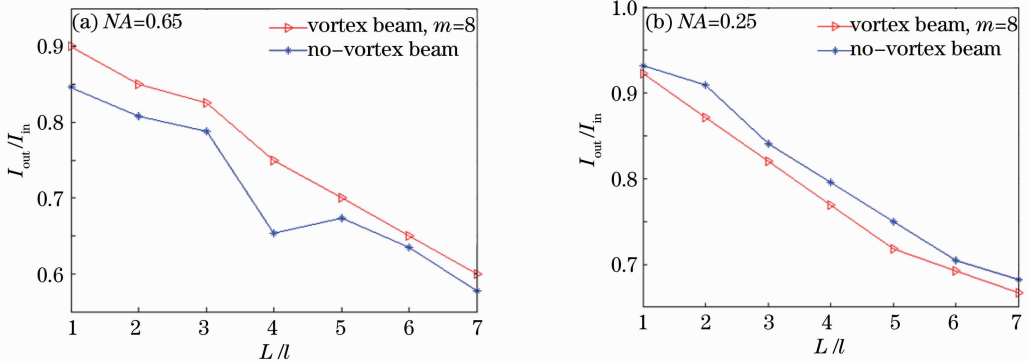


图 2 不同数值孔径时八阶涡旋光束与非涡旋光束经过散射介质的透射率曲线

Fig. 2 Transmittance curves of tightly focused vortex beam and no-vortex beam through turbid media with different numerical apertures

束的拓扑荷数对透射率的影响。选取涡旋光束的拓扑荷数分别为 2、4、8，结果如图 3 所示。放置第一个样品时，考虑误差的存在，不同拓扑荷数的实验数据会有偏差。放置多个样品后的结果表明：聚焦前入射涡旋光的拓扑荷数越大，聚焦光的透过能力越强。

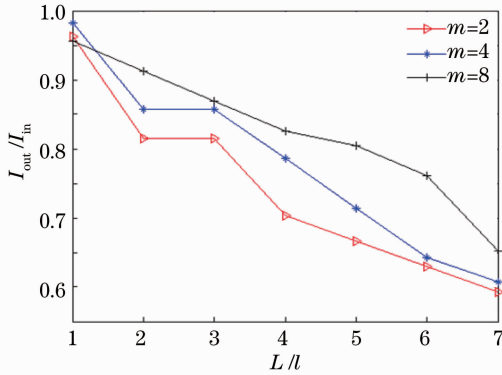


图 3 不同拓扑荷数时涡旋光束经过散射介质的透射率  
Fig. 3 Transmittance curves of tightly focused vortex beam through turbid media with different topological charges

图 4 比较了数值孔径大小对涡旋光束的透射率的影响。入射涡旋光的拓扑荷数为 2，聚焦透镜的数值孔径分别为 0.65、0.4 时。数值孔径越大，聚焦光斑的尺寸越小，聚焦光斑光能密度越大。图 4 中结果表明，聚焦透镜数值孔径越大则透过能力越强。

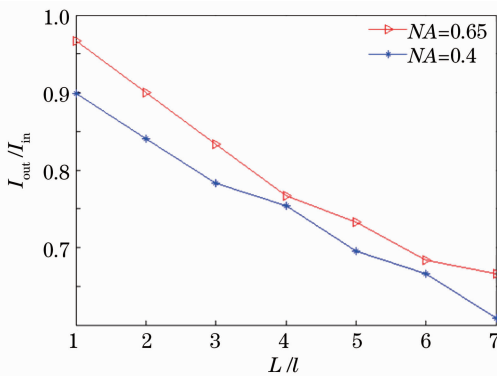


图 4 不同数值孔径时的透射率曲线 ( $m=2$ )  
Fig. 4 Transmittance curves with different numerical apertures ( $m=2$ )

## 4 结 论

用实验的方法研究了涡旋光束与非涡旋光束在强聚焦的情况下，经过散射介质后的透射率情况。研究结果表明，当聚焦透镜的数值孔径较小时，非涡旋光束具有更高的透射率，而在大数值孔径聚焦时，涡旋光束具有更高的透射率，并且在强聚焦情况下，

涡旋光束的拓扑荷数越大，其透射率越高。此外，以拓扑荷数为 2 的涡旋光束为例分析了数值孔径对涡旋光束经过散射介质的透射率，发现数值孔径越高时，其透射率越大。这一研究结果有望在显微技术、光镊以及材料加工等方面得到应用。

## 参 考 文 献

- Ziyang Chen, Limin Hua, Jixiong Pu. Tight focusing of light beams: effect of polarization, phase and coherence [J]. Progress in Optics, 2012, 57: 219–259.
- Zhiming Zhang, Jixiong Pu, Xiqin Wang. Focusing of partially coherent Bessel-Gaussian beams through a high numerical-aperture objective [J]. Opt Lett, 2008, 33(1): 49–51.
- Baosuan Chen, Jixiong Pu, Olga Korotkova. Focusing of a femtosecond vortex pulse through a high numerical aperture objective [J]. Opt Express, 2010, 18(10): 10822–10827.
- Chen Ziyang, Pu Jixiong, Zhao Daomu. Tight focusing properties of linearly polarized Gaussian beam with a pair of vortices [J]. Phys Lett A, 2011, 375(32): 2958–2963.
- S Quabis, R Dorn, M Eberler, et al.. Focusing light to a tighter spot [J]. Opt Commun, 2000, 179(1): 1–7.
- R Dorn, S Quabis, G Leuchs. Sharper focus for radially polarized light beam [J]. Phys Rev Lett, 2003, 91(23): 233901.
- J W M Chon, X Gan, M Gu. Splitting of the focal spot of a high numerical-aperture objective in free space [J]. Appl Phys Lett, 2002, 81(9): 1576–1578.
- Li Yingle, Li Jin, Wang Mingjun, et al.. Investigation of scattering for a uniformly anisotropic dielectric sphere [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0429002.
- 李应乐, 李 瑾, 王明军, 等. 均匀各向异性介质球散射的解析研究[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0429002.
- Hong Minfang, Shen Jianqi, Zhang Qiuchang, et al.. Propagation of Gaussian beam through planar interface [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0702005.
- 洪敏芳, 沈建琪, 张秋长, 等. 高斯光束垂直入射到不同折射率介质中的传播规律[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702005.
- Ding Chaoliang, Zhang Yongtao, Wang Haixia, et al.. Spectra and coherence properties of partially coherent pulse scattered by anisotropic media [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0729001.
- 丁超亮, 张永涛, 王海霞, 等. 部分相干光脉冲经各向异性介质散射的光谱和相干特性[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0729001.
- S R Arridge. Optical tomography in medical imaging [J]. Inverse Problems, 1999, 15(2): R41.
- P Brusaglioni, G Zaccanti, Q Wei. Transmission of a pulsed polarized light beam through thick turbid media: numerical results [J]. Appl Opt, 1993, 32(30): 6142–6150.
- V Tuchin. Tissue Optics [M]. Bellingham: SPIE Press, 2007. 3–60.
- B Richards, E Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems, II. Structure of the image field in an aplanatic system [C]. Proc R Soc London Ser A, 1959, 253(1274): 358–379.
- S K Gayen, R R Alfano. Emerging optical biomedical imaging techniques [J]. Opt Photon News, 1996, 7(3): 17–22.
- Zhang Guowen, Tao Hua, Pu Jixiong, et al.. Focusing characteristics of partially coherent square flat-topped electromagnetic pulsed beams focused by a phase modulated lens [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0102005.
- 张国文, 陶 华, 蒲继雄, 等. 部分相干方形平顶电磁脉冲光束经相位调制透镜的聚焦特性 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0102005.