

基于衍射受限矢量光管场的离散式复振幅滤波器的设计

刘庆亮¹ 王吉明^{1,2} 赫崇君¹ 刘友文¹

(¹南京航空航天大学应用物理系, 江苏 南京 211106
²瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要 提出一种离散式的复振幅光瞳滤波器,用于构建大数值孔径系统下柱对称偏振矢量光束的特殊聚焦光场。输入角向偏振矢量光束,经圆对称的6个离散环带复振幅滤波器滤波后聚焦。该滤波器半径已归一化,各环带具有不同透射振幅,外围两环带有相同的相位延迟,其余相邻透射环带间 π 反相。在聚焦区可获得超长(大于 8λ)的衍射受限“光管”场。该“光管”场为中空纯角向偏振矢量光场,管中心沿轴向无光场分布,光管横向直径(约 0.31λ)在亚波长量级,“光管”管壁为沿轴向平坦分布的角向偏振矢量场,无轴向旁瓣。该复振幅滤波器可用于构建特殊三维矢量光场以及利用该光场进行粒子捕获和操控。

关键词 光学器件;偏振;衍射;光瞳滤波器;光管场

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.011202

Discrete Complex Pupil Filter for Diffraction Limited Three-Dimensional Optical Tube Field

Liu Qingliang¹ Wang Jiming^{1,2} He Chongjun¹ Liu Youwen¹

(¹Applied Physics Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China
²State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract A discrete complex pupil filter is proposed to create focused field using cylindrical beams in the high numerical aperture (NA) system. The radius of this filter is normalized to 1. It consists of six discrete transmitted annular zones with different amplitudes and there zones are shifted by a π phase retardation in neighboring zones except for the same retardation in the two outermost zones. The polarization pattern and intensity of the incident azimuthally polarized beam can be modified by the filter and then focused by the high NA lens. An ultra-long (longer than 8λ) diffraction limited three-dimensional optical tube with azimuthal polarization spiraling around z -axis can be created. The center of the optical tube field is null along the axial direction. And the radius of the tube determined by the transverse full width at half maximum (FWHM) of this focused field is 0.31λ in the focal plane and remains nearly constant throughout the total depth of the tube. This complex pupil filter will meet applications in three-dimensional tailoring of focused field and trapping and manipulation of particles.

Key words optical devices; polarization; diffraction; pupil filter; optical tube field

OCIS codes 120.2440; 260.1960; 140.3300; 140.7010

1 引言

空变偏振光束是指传播截面上偏振态呈现各向异性或局域相异性分布的一种矢量光束。区别于传统的

收稿日期: 2011-07-10; 收到修改稿日期: 2011-09-02; 网络出版日期: 2011-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(60808026)、南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS20010200)及瞬态光学与光子技术国家重点实验室项目(SKLSST201004)资助课题。

作者简介: 刘庆亮(1986—),男,硕士研究生,主要从事矢量光学方面的研究。E-mail: mumapiaoyun@126.com

导师简介: 王吉明(1977—),男,博士,副教授,主要从事偏振光学与矢量光学方面的研究。

E-mail: jimingw@nuaa.edu.cn(通信联系人)

偏振光束,如线偏振或圆偏振光束,这种新颖的矢量光束具有独特的光物理特性,10多年来受到国际光学界的广泛关注^[1]。所谓的柱对称矢量光束就是一种典型的空变偏振矢量光束,其截面偏振态呈柱对称分布,如径向偏振光束、角向偏振光束等。由于偏振态在空间的特殊分布特性,这类矢量光束经大数值孔径(NA)聚焦系统后的聚焦光场,也不同于普通偏振光束的聚焦光场,不但可以获得聚焦场强特殊的分布模式,而且可以获得聚焦场偏振态的特殊分布模式。

Youngworth等^[2]根据严格的矢量衍射理论,分析了径向与角向偏振光经大数值孔径系统后的聚焦矢量光场分布特性,给出了矢量光束聚焦的理论基础。之后,Zhan等^[3]提出了一种简单的聚焦整形技术,利用一个由双半波片级联组成的偏振旋转器,通过适当调整半波片的旋转角,将角向偏振光束、径向偏振光束转换成广义的柱对称矢量光束,实现聚焦强度模式的整形。Chen等^[4]将圆柱矢量偏振光束和二元衍射光学元件(DOE)相结合,提出了一种三维聚焦整形方法,适当调整圆柱矢量光束的参数和DOE的设计参数,实现聚焦区域场强模式整形。Kang等^[5]以径向偏振的贝塞尔-高斯入射光,经一个二元DOE滤波后聚焦,获得了一种沿轴向偏振的聚焦“光针”场。最近,矢量光束的聚焦与高频电(磁)偶极子的反向辐射被阐释为具有共同的光学传播过程,揭示了矢量光束聚焦的本质光物理特性^[1]。据此,Chen等^[6]通过结合矢量衍射理论和电偶极子的场辐射理论,反向推演了产生任意偏振态控制的三维聚焦矢量场所需的入射光场分布模式。Wang等^[7]则将天线设计理论引入到聚焦矢量场的构建,提出根据电偶极子天线设计,可获取一种超长(大于 8λ)、高纯度的轴向偏振光针场,并获得入射光瞳面的入射光场分布模式。将电偶极子天线推广至磁偶极子天线、电-磁偶极子天线,则可实现超长三维光管场、三维平顶光场及其他特殊的聚焦光场。以上这些聚焦光场,将在光学显微、微纳粒子捕获与操控、高密度光存储、激光精细加工等先进光子学技术领域获得应用。

本文根据矢量衍射积分理论,提出了一种基于角向偏振光聚焦的离散式复振幅光瞳滤波器。该滤波器由6个圆对称的离散化透射环带组成,各环带透射率均不相同,透射光相位则呈 $0/\pi$ 二元分布。数值分析表明,在优化滤波器结构下,输入的角向偏振矢量光束经聚焦后,可在聚焦区获得超长衍射受限“光管”场。

2 离散式光瞳滤波器的设计

柱对称光束的电磁场描述是麦克斯韦方程的矢量解,即角向偏振柱对称矢量光束的基元偏振形式之一。图1是角向偏振矢量光束经大数值孔径系统聚焦的原理图。根据矢量衍射理论^[8],对于一个满足正弦条件设计的大数值孔径系统,角向偏振矢量光束经其聚焦获得的聚焦区光场分布可表示为

$$E(r, \varphi, z) = E_{\varphi} e_{\varphi}. \quad (1)$$

式中 e_{φ} 是沿角向的单位矢量。聚焦场无径向和轴向偏振分量,其中

$$E_{\varphi}(r, \varphi, z) = 2A \int_0^{\theta_{\max}} \sqrt{\cos \theta} \sin \theta P(\rho) J_1(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta. \quad (2)$$

式中 θ 是数值孔径角, θ_{\max} 是物镜的最大孔径角, $\rho = f \sin \theta$ 为滤波面归一化半径, f 是焦距。 $P(\rho)$ 是光瞳滤波器的复振幅, $J_1(kr \sin \theta)$ 是第一类一阶贝塞尔方程, $A = n_1 \pi f / \lambda$, n_1 是物镜折射率。

光瞳滤波函数 $P(\rho) = T(\rho) \exp[i\phi(\rho)]$, $T(\rho)$ 是透射率函数, $\phi(\rho)$ 是相位函数。根据角向偏振光的聚焦特性与磁偶极子辐射场反向聚焦的共同性,利用磁偶极子阵列天线的辐射场,可获取实现特殊聚焦空心光场所需的光瞳面连续光场分布模式^[9]。但连续的光场强度分布模式实际中很难实现,尤其是在振幅分布剧烈变化的情况下。尽管如此,但这种连续分布模式存在振幅零值暗区,这为我们设计简化的、易实现的光场模式提供了环带分区信息。为了简化滤波器的设计,将振幅透射率离散化为非连续的梯度透射振幅。分析表明,光瞳滤波器的第一个环带的振幅透射率很小,对聚焦场模式影响很

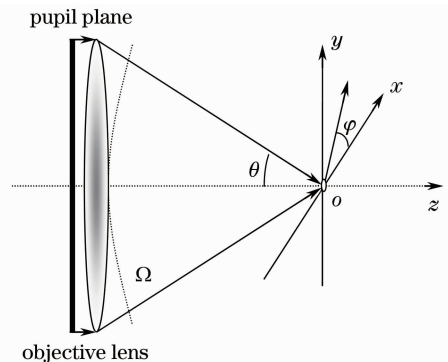


图1 大数值孔径聚焦系统的原理图

Fig. 1 Schematic of the high numerical aperture system

小,可以将第一环带归零。由于最外层环带的振幅透射率变化很快,为了减小离散化对聚焦场模式的影响,将其分为透射率不同、相位延迟相同的两个环带。设计的复振幅滤波器由6个离散化环带组成,该滤波器半径已归一化,各环带具有不同透射振幅,外围两环带有相同的相位延迟,其余相邻透射环带间 π 反相。图2是离散化的复振幅光瞳滤波器的透射率结构图。其具体参数如表1所示。

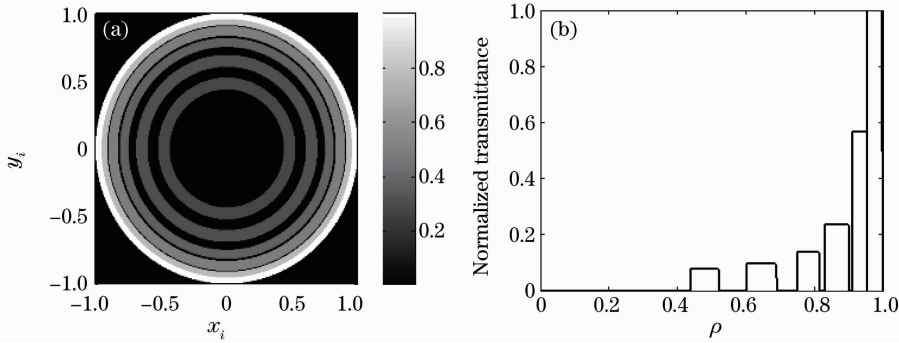


图2 离散化复振幅光瞳滤波器的透射率结构图。(a)光瞳滤波器的透射率强度分布;(b)离散化透射率分布
Fig.2 Structure of transmittance of discrete complex pupil filter. (a) Distribution of transmittance of discrete complex pupil filter; (b) distribution of discrete amplitude transmittance

表1 六环带离散式复振幅光瞳滤波器的参数
Table 1 Parameters of the six-zone complex pupil filter

Order of zone	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
ρ	0.436~0.524	0.604~0.692	0.753~0.816	0.832~0.904	0.912~0.955	0.955~1.000
$T_n(\rho)$	0.0761	0.0969	0.1359	0.2365	0.5668	1
$\phi_n(\rho)$	π	0	π	0	π	π

在大数值孔径聚焦系统的光瞳面上加入设计的环带复振幅滤波器,相应的聚焦场表示为

$$E_\varphi(r, \varphi, z) = 2A \sum_{n=1}^6 T_n(\rho) \exp[i\phi_n(\rho)] \int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n} \sqrt{\cos \theta} \sin \theta J_1(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta. \quad (3)$$

理论分析表明,外层环带的振幅透射率参数变化对聚焦场的模式分布影响很大,主要决定聚焦场焦深长度和整体场强形貌,而内层环带的参数调整有利于平滑轴向强度分布,实现平顶化聚焦场。内外环带结合,可获得超长焦深的光场。分析结果对光瞳参数的优化起着重要的指导作用。

3 三维衍射受限光管矢量场

在设计和数值仿真过程中,选择的数值孔径 $NA=0.95$,数值孔径角 $\theta_{\max}=\arcsin(NA/n_1)=1.2532$ 。根据表1参数结构的离散光瞳滤波器,对入射角向偏振光滤波,获得相应的聚焦场强度分布如图3所示。

从图3可以看出,利用设计的离散化复振幅滤波器,在聚焦区可获得超长(大于 8λ)的衍射受限“光管”场,在 $r=0.155\lambda$ 时,“光管”管壁沿轴向平坦分布,无轴向旁瓣。光管场为中空纯角向偏振矢量光场,管中心沿轴向无光场分布,光管场横向实现了衍射受限,直径(约 0.31λ)在亚波长量级,横向旁瓣被有效地抑制,符合设计要求。

在光瞳滤波器的实际加工制造过程中,加工误差会影响滤波性能,从而影响到聚焦场的分布。在研究中发现,各环带相移误差对聚焦场影响很小,各环带半径、振幅透射率偏差会对聚焦场的分布产生一定的影响。由于最外层环带的孔径角最大,透射率振幅最大,这个环带的参数公差对光管场的质量影响也最大。在最外层环带的设计中,引入环带宽度 $\pm 2\%$ 的误差,透射率 $\pm 10\%$ 的误差,数值分析结果显示,沿轴向的波峰-波谷强度的起伏控制在 5% 以下,焦深保持在约 8λ 。图4显示了引入振幅透射率和环带半径误差对聚焦场的轴向强度影响。

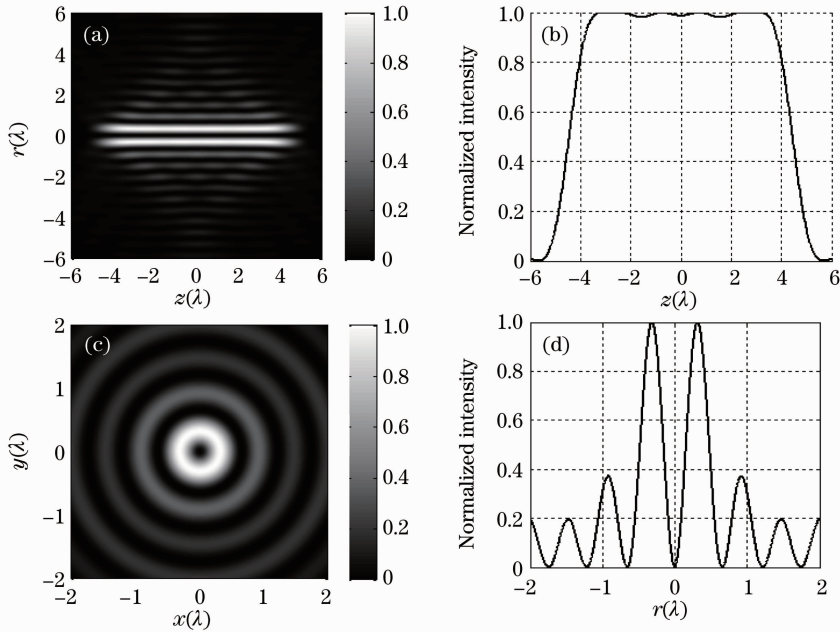


图3 离散光瞳滤波器滤波后大数值孔径聚焦场的强度分布。(a) rz 平面的总强度分布;(b) $r=0.155\lambda$ 时的轴向强度分布;(c) xy 平面总强度分布;(d) 横向强度分布

Fig. 3 Intensity distribution of focused field using discrete pupil filter. (a) Distribution of intensity in the rz plane; (b) axial field intensity along the wall of the tube when $r=0.155\lambda$; (c) distribution of intensity in the xy plane; (d) transversal field intensity at the focal plane when $z=0$

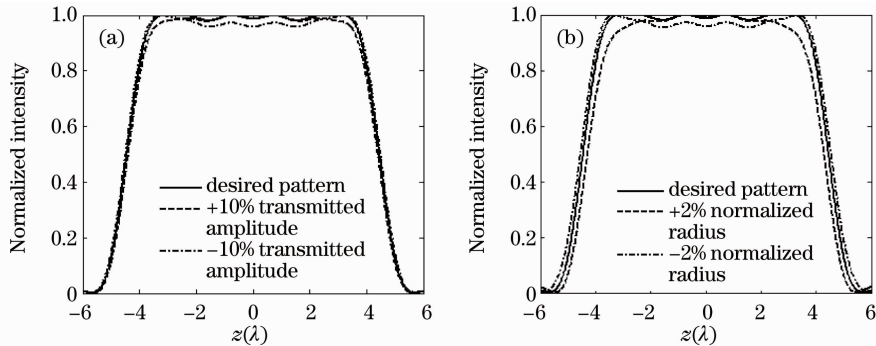


图4 (a)振幅透射率和(b)环带半径误差对聚焦场的影响

Fig. 4 Influence of transmittance error (a) and zone radius tolerance (b) on the focused field

4 光管矢量场在粒子捕获方面的应用

1986年, Ashkin等^[10]提出了光学捕获原理, 因为其在物理、化学和生物方面越来越广泛的应用而快速发展。通常情况下, 要实现高折射率微粒的稳定捕获困难不大, 因为普通光束经过强聚焦后的强度分布符合高斯函数, 梯度力在任何方向都指向焦点。但是, 如果微粒的折射率低于环境介质($n_2 < n_1$), 梯度力会从聚焦中心指向低强度边界。因此, 为了捕获低折射率微粒, 需要一种有聚焦能力的空心强度分布的光束, 称为空心光束或环形光束。本文设计的光管场符合操纵低折射率粒子的条件。根据 Zhan^[11]的假设, 将粒子看作是一种瑞利尺度的电介质微球体, 折射率是 n_2 , 球体半径是 a 。洛仑兹力作用于微球面诱导极化偶极子产生的梯度力^[12]表示为

$$\mathbf{F}_{\text{grad}} = \pi n_1^2 \epsilon_0 a^3 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \nabla |\mathbf{E}|^2, \quad (4)$$

式中粒子的相对折射率 $m = n_2/n_1$, $n_1 = 1.33$ 。数值计算中, 波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, 选择半径 $a = 80 \text{ nm}$, 第一种粒子的折射率 $n_2 = 1.63$, 另一种粒子的折射率 $n_2 = 1.12$ 。数值分析作用于两种不同折射率粒子的梯度力,

如图 5 所示。

聚焦光管场沿轴向的分量是零,所以不考虑轴向梯度力作用,两种粒子都可以在轴向自由移动。从计算结果得知,折射率大于媒介折射率的粒子在光管场径向有两个受力平衡点,焦点的粒子沿径向被捕获在一个环带区域,同时沿角向可以自由运动。折射率小于媒介折射率的粒子在光管场的中心位置处只存在一个受力平衡点,表明聚焦的角向偏振光更适合捕获低折射率的纳米粒子。由于长度达 8λ ,通过离散滤波器构建的超长光管场可以实现粒子在聚焦区域长距离和多粒子输运,为多粒子的操纵提供了一种新的选择。Shvedov 等^[13]提出一种利用低数值孔径系统聚焦的长中空光场捕获微米量级粒子的光学捕获和输运的新方法,利用高强度的温差力实现了超长距离上的粒子输运,同时有效消除了光学涡旋光束的随机特性。由于其轴向扩展的光场分布,相对于其他捕获系统,可以捕获更多的粒子。相较该报道,本文设计的聚焦矢量光场适合操纵尺度更小的纳米尺度的粒子,且同样可以捕获更多粒子。

5 结 论

基于严格的矢量衍射理论,设计了一种具有更大透射振幅自由度的二元相位分布($0/\pi$)的全新离散化复振幅滤波器。这种新颖的复振幅滤波器适用性广泛,不仅适用于光管场的产生,同样可以应用于其他聚焦矢量光场的设计,例如沿轴向分布的光针场和三维平顶光场的实现。同时分析了加工误差对滤波器的性能影响,计算表明滤波器有较大的容差能力。数值仿真了聚焦光管场中粒子受到的梯度作用力,计算结果表明角向偏振的光管场适合捕获低折射率粒子,可以在聚焦区域实现多粒子的操控,在光学捕获方面有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Qiwen Zhan. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2009, **1**(1): 1~57
- 2 K. S. Youngworth, T. G. Brown. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. *Opt. Express*, 2000, **7**(2): 77~87
- 3 Q. Zhan, J. R. Leger. Focus shaping using cylindrical vector beams[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7): 324~331
- 4 W. Chen, Q. Zhan. Three-dimensional focus shaping with cylindrical vector beams[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **265**(2): 411~417
- 5 H. Kang, B. H. Jia, M. Gu. Polarization characterization in the focal volume of high numerical aperture objectives[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(10): 10813~10821
- 6 W. Chen, Q. Zhan. Diffraction limited focusing with controllable arbitrary three-dimensional polarization[J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(4): 045707
- 7 Jiming Wang, Weibin Chen, Qiwen Zhan. Engineering of purity ultra-long optical needle field through reversing the electric dipole array radiation[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(21): 21965~21972
- 8 B. Richards, E. Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system [J]. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1959, **253**(1274): 358~379
- 9 Jiming Wang, Weibin Chen, Qiwen Zhan. Three-dimensional focus engineering using dipole array radiation pattern[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(12): 2668~2671
- 10 A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm *et al.*. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(5): 288~290
- 11 Qiwen Zhan. Radiation forces on a dielectric sphere produced by highly focused cylindrical vector beams[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003, **5**(3): 229~232
- 12 S. Quabis, R. Dorn, M. Eberler *et al.*. Focusing light to a tighter spot[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **179**: 1~7
- 13 Vladlen G. Shvedov, Andrei V. Rode, Yana V. Izdebskaya. Giant optical manipulation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **105**(11): 118103

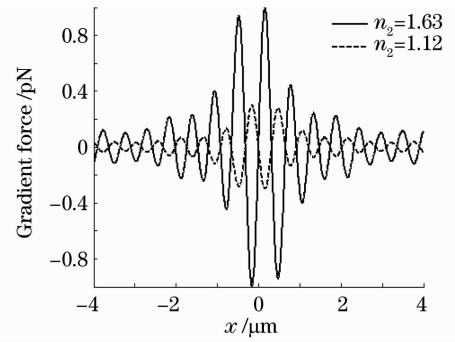


图 5 两种折射率不同的粒子在光管场中受到的梯度作用力

Fig. 5 Radiation forces produced by focused tube field on two different types of particles