

文章编号:1001-5078(2024)01-0116-06

· 光学技术 ·

可变光阑对焦深影响的探究

石琛琛

(天津师范大学物理与材料科学学院,天津 300387)

摘要:传统的标量光场其偏振态空间均匀分布,而矢量光场相较于标量光场其偏振态是空间变化的。这个空域变化的偏振特性使得矢量光场具有更大的调控自由度,在焦场设计、光学微操纵、微加工、以及量子信息领域有着潜在的应用。本文基于 Richards-Wolf 矢量衍射理论,研究了可变光阑以及透镜数值孔径对双环角向偏振光束聚焦特性的影响。结果表明,通过改变光阑大小以及透镜数值孔径,不仅可以改变焦斑光强、焦斑大小,也可以显著改变焦场暗通道的长度,从而生成较长的暗通道。生成的可变焦场暗通道未来可用于光学微操纵以及微加工的应用中。

关键词:Richards-Wolf 积分;双环角向偏振光束;焦深;拉盖尔高斯光束

中图分类号:TN206;O436 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.01.017

Exploration of the influence of variable aperture on the depth of focus

SHI Chen-chen

(College of Physics and Materials Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Traditional scalar light fields have spatially uniform polarization states, whereas vector light fields have spatially varying polarisation states compared to scalar light fields. The spatial variation of the polarization characteristics enables the vector light field to have greater control freedom with potential applications in the field of focal field design, optical micromanipulation, micromachining, and quantum information. In this paper, based on the Richards-Wolf vector diffraction theory, the effects of variable aperture as well as lens numerical aperture on the focusing characteristics of a double-ring-shaped azimuthally polarized beam are investigated based on the Richards-Wolf vector diffraction theory. The results clearly show that by changing the aperture size and lens numerical aperture, it is possible to change not only the focal spot intensity and the focal spot size, but also the length of the dark channel in the focal field, resulting in longer dark channels. The resulting variable focal field dark channel can be used in the future for optical micromanipulation and microprocessing applications.

Keywords: Richards-Wolf diffraction integral; the double-ring-shaped azimuthally polarized beams; the depth of focus; Laguerre-Gauss beam

1 引言

传统的标量光场通常其偏振态是空间均匀分布的,而矢量光场相较于标量光场其代表光矢量特性的偏振态在空间是不均匀分布的。这种偏振

态空域变化的矢量光场与传统标量光场相比,赋予了矢量光场许多新奇的特性。如径向偏振光场的聚焦焦斑与标量光场聚焦的焦斑相比更小^[1-2]、角向偏振光场聚焦后在焦场区域得到中

作者简介:石琛琛,女,硕士,主要从事光学技术研究。E-mail:2773025483@qq.com

收稿日期:2023-04-24;修订日期:2023-06-14

空且沿光轴具有暗通道的横向光场、以及矢量光场在激光加工方面与标量光场有着明显不同的特性等,这使得矢量光场在许多领域受到越来越多的关注。其中,轴对称矢量光场是矢量光场中一种较为简单也比较特殊的光场,和光路系统中常用的透镜一样沿着光轴具有轴对称性,轴对称的矢量光场在垂直于光轴的横截面上其偏振态也呈轴对称分布。轴对称矢量光场包括径向偏振光、角向偏振光与广义轴对称矢量偏振光。作为矢量光场中最为特殊的光场,同样因为其不同寻常的性质受到广泛的关注^[3-10]。

研究表明,径向偏振光场经透镜紧聚焦后可以在焦场范围内产生非常强的纵向电场分量^[12]。2008年,Wang等人发现径向偏振光通过一个具有五环带结构的位相型二元光学元件的径向调制后,在焦场处可以生成一个纵向场焦深达 4λ 的亚波长光针^[11]。随后,匡翠方等人使用双光束进行聚焦,产生了一个纵向场聚焦深度超过 9.5λ 的亚波长光针^[13]。此外,Helseth研究了角向偏振光场的紧聚焦问题,发现在焦场区域出现了一个带有亚波长焦孔的暗通道^[14]。随后,蒲继雄等人利用双环角向偏振光生成了一个焦深约为 26λ 的暗通道^[15]。这种焦场区域具有暗通道的光场通常也被称为光瓶光束,可以用于光镊或是原子阱^[16-17]。

本文围绕着双环角向偏振光场的聚焦展开研究,系统研究了由可变光阑实现的外围遮挡以及透镜数值孔径对焦场关键参数,如暗通道的焦深、光斑全宽、以及光强的影响。

2 原理

Richards-Wolf 矢量积分是研究不同类型矢量光场经透镜紧聚焦后焦场分布的理论基础^[18]。根据Richards-Wolf 矢量衍射理论,角向偏振光束在经过数值孔径为 NA 的透镜聚焦时,焦点附近的电场可以写为:

$$\vec{E}(r, \phi, z) = \begin{bmatrix} E_r \\ E_\phi \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2B \int_0^{\delta \cdot \alpha} \cos^{1/2} \theta \sin \theta A(\theta) J_1(kr \sin \theta) e^{ikz \cos \theta} d\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, r, ϕ, z 为柱坐标系的三个变量; θ 为入射光束的发射角; $\alpha = \arcsin(NA/n)$ 为最大数值孔径角; n 为折射率, δ 为 θ_{\max} 与 α 之比; $A(\theta)$ 为入射光束在透镜光阑面的瞳孔切趾函数; B 为振幅参数; $k = 2\pi/\lambda$ 为入射光波的波矢; λ 为入射光波的波长; J_1 为第一类贝塞尔函数。本文采用具有角向偏振的拉盖尔高斯光束作为入射光束,其透镜光阑面的瞳孔切趾函数的角谱形式可以表示为^[19]:

$$A(\theta) = \beta^2 \frac{\sin \theta}{\sin^2 \alpha} \exp \left[- \left(\beta \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \right)^2 \right] L_p^1 \left[2 \left(\beta \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \right)^2 \right] \quad (2)$$

其中, β 为物镜光瞳直径与光瞳前光束直径的比值, L_p^1 为广义拉盖尔多项式。当 $p = 1$ 时,入射光束为双环角向偏振光束,如图1所示, f 为透镜的焦距。

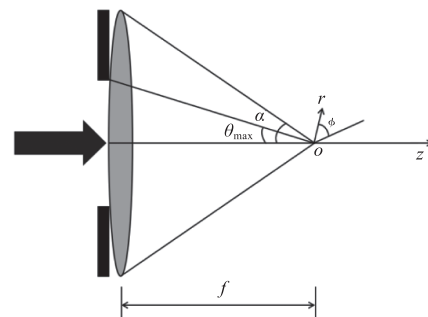


图1 双环形角向偏振光束的聚焦示意图

Fig. 1 Focus schematic diagram of the double-ring-shaped azimuthally polarized beam

根据式(1)和(2),可以计算出双环角向偏振光束在不同外围遮挡参数 δ 与透镜数值孔径 NA 的情况下光场强度在焦场附近的分布,特别是 δ 与 NA 对双通道焦场分布的影响。简单起见,所有长度单位都以波长为单位,所以 $\lambda = 1$,其余参数 $n = 1, B = 1$ 。对于暗通道光场的焦深,我们以焦场暗通道最近邻光强最大值沿着轴向降低到其 $1/e$ 的全宽表示为焦场暗通道的焦深长度。

3 结果与讨论

我们首先研究孔径光阑 δ 大小对双环角向偏振光场聚焦后焦场分布的影响。

图2给出了不同 δ 值情况下,聚焦场在 $x-z$ 平面的光场强度分布图2(a)~(c)为用高 NA 透镜聚焦的双环角向偏振光束 $x-z$ 平面的强度分布;其余参数 $NA = 0.6, \beta = 1.2$ 。图2(d)为 NA

$= 0.6$ 时光斑全宽、焦深与最大光强随 δ 的变化图(已归一化)。从图中我们可以看出,当 $\delta = 1$ 时,即没有遮挡的情况,此时暗通道可以形成,但暗通道的焦孔半径沿暗通道分布并不均匀,暗通道的焦深长度约为 14λ ;当减小光阑时,如 $\delta = 0.8$ 时,我们发现焦孔半径沿暗通道的分布已经较为均匀,暗通道的聚焦深度相应变短,约为 11.4λ ,并且此时的最大光强相比无遮挡的情况下变强,光斑全宽相比无遮挡的情况下变小;当进一步减小光阑时,如 $\delta = 0.4$ 时,暗通道的聚焦深度会进一步变长,约为 36λ ,但是此时最大光强相应的减弱,光斑全宽逐渐增大。

图 2(d) 给出了 $NA = 0.6$ 时,光场暗通道的焦深随着 δ 值的变化,我们发现在暗通道分布不均匀的区间,焦深随着 δ 的减小而减小,而在暗通道分布均匀的区间,焦深随着 δ 的减小却呈现增大的趋势,以 $\delta \approx 0.8$ 为界。而最大光强走向趋势与焦深相反,但同样以 $\delta \approx 0.8$ 为界。

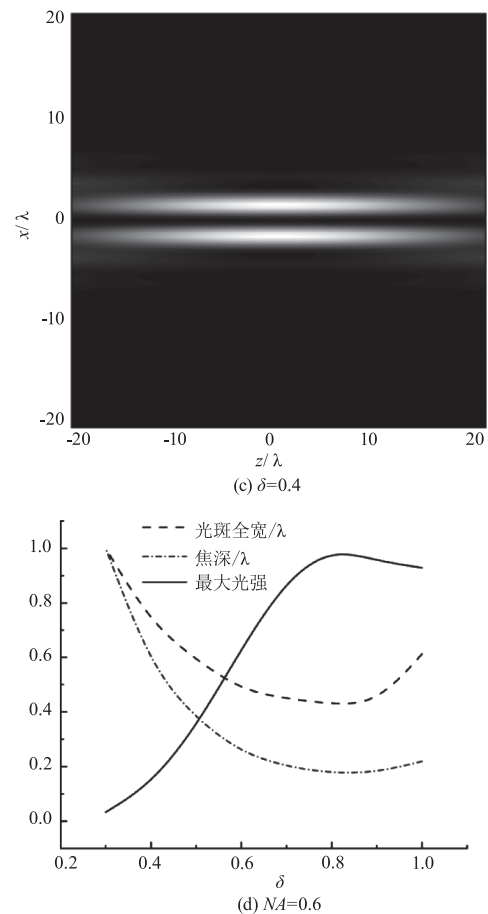
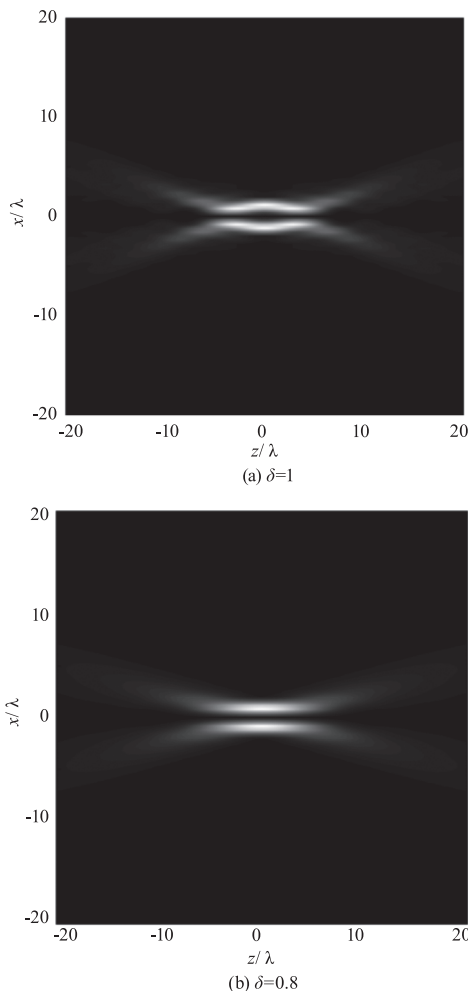


图 2 不同 δ 值情况下,聚焦场在 $x-z$ 平面的光场强度分布
Fig. 2 The intensity distribution of the focusing field in the $x-z$ plane with different δ values

除了对暗通道焦深的影响之外,我们也计算了孔径光阑 δ 大小对焦场横向场分布的影响(其余参数: $NA = 0.6, \beta = 1.2$),如图 3 所示。图 3 相应地给出了 $\delta = 1, \delta = 0.8, \delta = 0.4$ 的情况下,焦平面的光强分布。从图中我们可以看出,双环角向偏振光束在采用外围遮挡的情况下,随着 δ 值的增大,虽然焦深逐渐增强,但不可避免地损失了光斑全宽的值,在 $\delta = 1$ 的情况下,光斑全宽约为 1.2λ ,在 $\delta = 0.4$ 的情况下,光斑全宽约为 1.42λ ,与 $\delta = 1$ 时相比略有增长。

图 2(d) 也给出了 $NA = 0.6$ 时,光斑全宽随 δ 值的变化,在暗通道不均匀的区域,光斑全宽随 δ 值的减小而减小,当暗通道均匀以后,光斑全宽随 δ 值的减小而逐渐增大,与焦深和最大光强一致,同样以 $\delta \approx 0.8$ 为界。

进一步将透镜的数值孔径值 NA 与光阑大小 δ 同时考虑。图 4 给出了在 NA 值与 δ 同时考虑的情

况下,焦场最大光强、暗通道焦深以及光斑全宽的变化图。

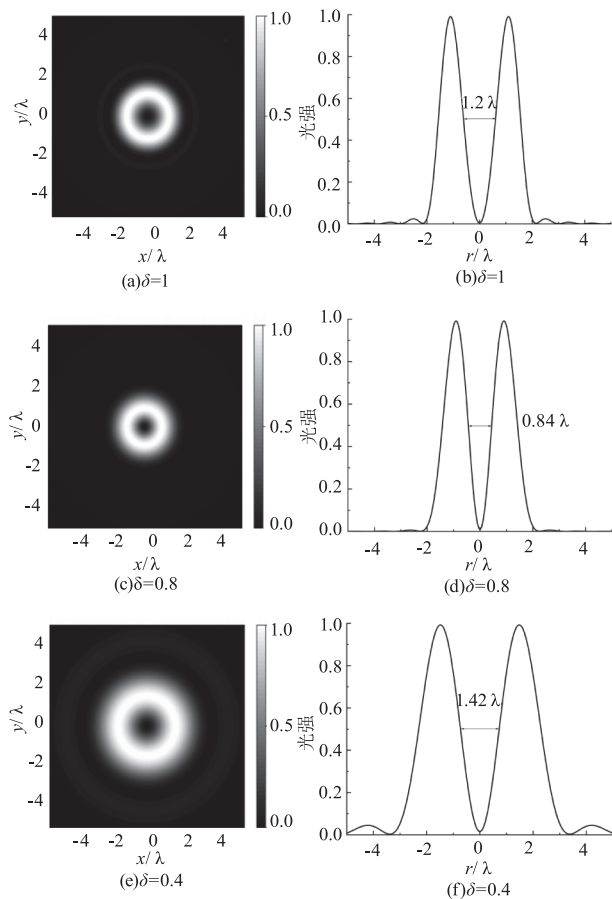


图3 不同 δ 情况下的焦平面光强分布以及对应的横向光强分布

Fig. 3 The intensity distribution of the focal plane and the corresponding transverse light intensity distribution with varied.

从图中可以看出当 δ 值保持不变时,随着 NA 值的增大,最大光强逐渐增大,焦深与光斑全宽均逐渐减小,三种变化都为单调变化;当 NA 值保持不变时,随着 δ 值的增大,最大光强呈现先增大后减小的趋势,焦深与光斑全宽均呈现先减小后增大的趋势,并且三种变化都在 $\delta \approx 0.8$ 时达到极值。

4 仿真结果意义概述

对于聚焦后的角向偏振光束,由于偏振对称性焦平面上的电场具有甜甜圈形状,可以用来稳定地捕获微小的颗粒,这种光学捕获我们把它形象地称为“光镊”。从 1986 年便开始了对光镊的研究^[20-21],至今光镊技术已经逐渐实现了对溶液中亚纳米大小的单个分子的光学捕获^[22]。

以对瑞利粒子起捕获作用的是梯度力为例,其梯度力的大小与焦场光强的梯度成正比^[21]。在横向方向,其光强分布在不同 δ 值的情况下并没有发生显著的变化,除了光斑全宽的改变。但是在 z 轴方向的变化较为明显,因此我们这里重点关注沿着 z 轴方向梯度力的变化。基于此,我们计算了三种不同 δ 值的情况下,光强梯度力沿 z 轴的变化,如图 5 所示。从图中我们看出,与 $\delta = 1$ 相比, $\delta = 0.4$ 时,暗通道均匀且焦深较长,双环角向偏振光束在 z 分量上提供了很小的梯度力,这说明被捕获的瑞利粒子在 z 轴方向的束缚很弱,这种梯度力特性能够用于仅对瑞利粒子横向束缚的实验研究中。

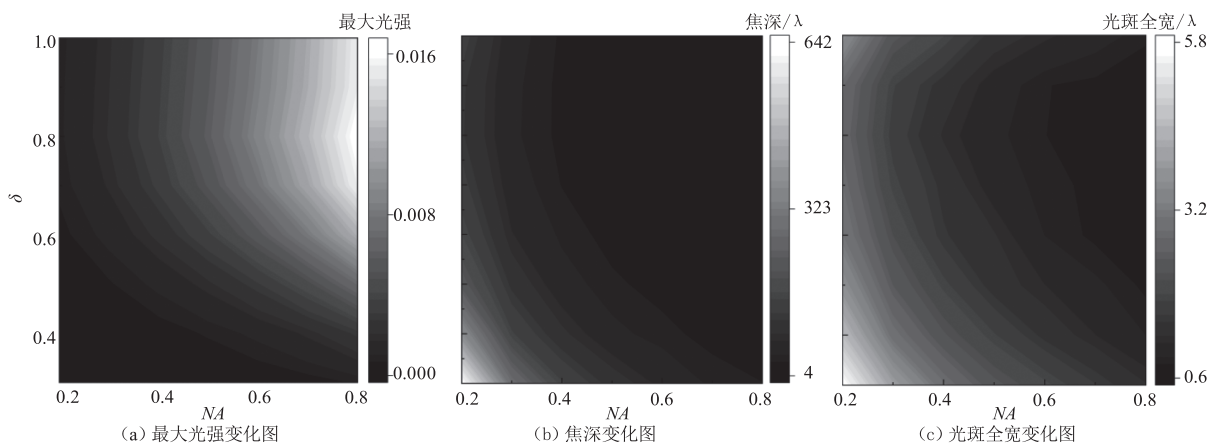


图4 在 NA 值与 δ 同时调控的情况下,焦场最大光强、暗通道焦深以及光斑全宽的变化图

Fig. 4 The variation of the maximum light intensity at the focal plane, the focal depth of the dark channel and the full width of the focal spot as a function with NA and δ

此外,与传统工具相比,激光加工在生产率、加工精度、零件质量、材料利用率和灵活性方面具有显

著的优势。在研究了圆偏振矢量光束在不同类型材料的激光钻孔中的影响后,根据所加工的材料的不

同,发现径向或角向偏振都比线性偏振或圆偏振更有效,比如角向偏振优于低碳不锈钢的钻孔^[23]。本文我们通过改变 δ 的数值,可以生成均匀的暗通道,与暗通道不均匀的情况相比,加工可能更为方便。

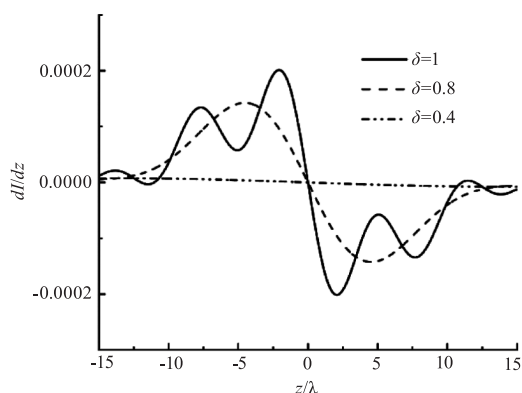


图5 三种不同 δ 值时光强梯度沿 z 轴的变化

Fig. 5 Light intensity gradient along the z -axis with three different values of δ

5 结论

本文研究了可变光阑与透镜数值孔径对双环角向偏振光束聚焦特性的影响,特别是对暗通道焦深的影响。结果表明通过改变孔径光阑的大小,可以生成一个较长的暗通道。此外通过同时改变 NA 与 δ 的值,可以实现对焦深长短以及光斑大小的联合调控。

参考文献:

- [1] Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. Physical Review Letters, 2003, 91(23): 233901.
- [2] Sun C C, Liu C K. Ultrasmall focusing spot with a long depth of focus based on polarization and phase modulation[J]. Optics Letters, 2003, 28(2): 99 - 101.
- [3] Liu Xiaoyun, Tian Bo. Double ring angle to polarized beam deep focusing characteristics[J]. Journal of Strong Laser Light and Beam of Particles, 2012, 24(6): 1365 - 1368. (in Chinese)
刘晓云, 田博. 双环角向偏振光束深聚焦特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1365 - 1368.
- [4] Mu Dandan, Zhu Yongtian, Zhang Kai. Experimental study on modulated ring optical field[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 996 - 1001. (in Chinese)
穆丹丹, 朱永田, 张凯. 天文光纤机械扰模器调制环形光场的实验研究[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 996 - 1001.
- [5] Xiao Yun, Zhang Yunhai, Yang Haomin, et al. Characteristics of angular polarized light under a large numerical aperture objective[J]. Journal of Progress in Laser Light and Optoelectronics, 2015, 52(3): 229 - 234. (in Chinese)
肖昀, 张运海, 杨皓旻, 等. 大数值孔径物镜下角向偏振光聚焦特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 229 - 234.
- [6] Lin Le, Zheng Meiling, Dong Xianzi, et al. Improvement in longitudinal resolution of micro-nano-scale polymer structures by radially polarized light[J]. Journal of Quantum Electronics, 2017, 34(1): 76 - 80. (in Chinese)
林乐, 郑美玲, 董贤子, 等. 径向偏振光对微纳尺度聚合物结构纵向分辨率的改善[J]. 量子电子学报, 2017, 34(1): 76 - 80.
- [7] Wu Zhixiang, Jin Qijian, Zhang Kun, et al. Angular-polarized light based on binary amplitude modulation[J]. Journal of Optoelectronic Engineering, 2018, 45(4): 68 - 76. (in Chinese)
武志翔, 金启见, 张坤, 等. 基于二值振幅调控的角向偏振光超振荡聚焦平面透镜[J]. 光电工程, 2018, 45(4): 68 - 76.
- [8] Yang Dong, Nie Zongquan, Zhai Aiping, et al. Surface-enhanced raman scattering properties of a radially polarized light-excited GO/gold nanorods composite substrate[J]. Journal of Optics, 2019, 39(6): 406 - 415. (in Chinese)
杨东, 聂仲泉, 翟爱平, 等. 径向偏振光激发氧化石墨烯/金纳米棒复合基底的表面增强拉曼散射性能[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 406 - 415.
- [9] Yang Che, Peng Hongpan, Chen Meng, et al. Dedeviation mechanism and compensation method of radial polarized light[J]. Journal of Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(3): 144 - 154. (in Chinese)
杨策, 彭红攀, 陈檬, 等. 径向偏振光的退偏机理及补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 144 - 154.
- [10] Yu Buzhao, Wang Jiming, Wu Tong, et al. Study on the optical properties of tellurium dioxide crystals based on vector light field[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 963 - 968. (in Chinese)
郁步昭, 王吉明, 吴彤, 等. 基于矢量光场的二氧化碲晶体旋光特性研究[J]. 应用光学, 2021, 42(6):

- 963 – 968.
- [11] Youngworth K S, Brown T G. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams [J]. *Optics Express*, 2000, 7(2): 77 – 87.
- [12] Wang H, Shi L, Lukyanchuk B, et al. Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(8): 501 – 505.
- [13] Kuang C, Hao X, Liu X, et al. Formation of sub-half-wavelength focal spot with ultra long depth of focus [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(7): 1766 – 1769.
- [14] Helseth L E. Smallest focal hole [J]. *Optics Communications*, 2006, 257(1): 1 – 8.
- [15] Tian B, Pu J. Tight focusing of a double-ring-shaped, azimuthally polarized beam [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2014 – 2016.
- [16] Isenhower L, Williams W, Dally A, et al. Atom trapping in an interferometrically generated bottle beam trap [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1159 – 1161.
- [17] Xu P, He X, Wang J, et al. Trapping a single atom in a blue detuned optical bottle beam trap [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2164 – 2166.
- [18] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems, II. Structure of the image field in an aplanatic system [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1959, 253(1274): 358 – 379.
- [19] Kozawa Y, Sato S. Focusing property of a double-ring-shaped radially polarized beam [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6): 820 – 822.
- [20] Zhou Zhehai, Zhu Lianqing. Focusing properties and applications of high order axially symmetric polarized beams [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(8): 916 – 921. (in Chinese)
周哲海, 祝连庆. 高级次轴对称偏振光束的聚焦特性及应用综述 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(8): 916 – 921.
- [21] Dong Miao, Yao Jun, Bai Yihua. Study on tight focusing and radiation force of abnormal vortex beams with partial coherent circular polarization [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(4): 502 – 508. (in Chinese)
董淼, 姚骏, 白毅华. 部分相干圆偏振反常涡旋光束的紧聚焦及辐射力研究 [J]. *激光与红外*, 2021, 51(4): 502 – 508.
- [22] Huo Chunan, Qiu Shengjie, Liang Qingman, et al. Advances in the scale limit of capture and manipulation by optical tweezers [J/OL]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2023. (in Chinese)
霍春安, 邱圣杰, 梁青满, 等. 光镊捕获和操控尺度极限的进展 [J/OL]. *物理化学学报*, 2023.
- [23] Kawauchi H, Yonezawa K, Kozawa Y, et al. Calculation of optical trapping forces on a dielectric sphere in the ray optics regime produced by a radially polarized laser beam [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(13): 1839 – 1841.