

双环透镜聚焦平行光产生局域空心光束

孙 川 何艳林 吴逢铁

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 提出并展示了产生单个可调局域空心光束的一种新型元件。该元件由光罩与平凸透镜组成, 结构简单, 易于生产。该元件可调制平行光产生参数固定的局域空心光束, 通过更换光罩可在较大范围内实现局域空心光束的尺寸调谐。从应用光学角度分析了新型元件的成像原理, 推出了产生局域空心光束的参数公式。依据衍射积分理论推导出了元件后方的光场分布公式并用 Matlab 进行数值模拟, 使用 He-Ne 激光作为光源, 实验拍摄了局域空心光束的截面光强分布, 实验结果与仿真模拟基本吻合。

关键词 几何光学; 局域空心光束; 双环透镜; 光学设计; 球差效应

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1208001

Bottle Beam Generation with a Double Ring Lens by Focusing Parallel Light

Sun Chuan He Yanlin Wu Fengtie

Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract A novel compact optical component aimed at transforming a plane wave into a bottle beam is proposed and demonstrated. This component consists of a cover and a plano-convex lens which has the advantage of simple structure and easy production. The component can generate bottle beam with fixed parameters by modulating parallel light and achieve the target of turning the size of bottle beam in wide range by replacing the cover. The formation mechanism of bottle beam is analyzed by geometrical optics, the relevant parameters expression is also derived. According to the diffraction integral theory, the distribution of the light field behind the element is derived and the numerical simulation is carried out with Matlab. Using He-Ne laser as light source, the cross sectional intensity distribution of bottle beam in experiment is captured. The results are basically consistent with the simulation.

Key words geometric optics; bottle beam; double ring lens; optical design; spherical aberration

OCIS codes 080.2740; 080.1005; 080.3630; 220.3630

1 引 言

局域空心光束^[1]是一种在沿传输方向的三维空间内具有封闭暗域的特殊空心光束, 且暗域周围的光束具有极高的强度, 对处在暗域中的粒子有着束缚与囚禁的作用。局域空心光束由于对粒子特殊的“囚禁”能力而被广泛应用在粒子囚禁和生物细胞囚禁^[2-3]中, 还可用作激光导管^[4]、光镊^[5]与光学扳手^[6]等, 因此, 一直是光束变换与粒子操控研究中的热点。

局域空心光束特殊的光强分布促进了人们对它的研究, 现今已有许多产生局域空心光束的方法, Vinas 等^[7]用全息法得到局域空心光束, Tai 等^[8]使用激光器直接输出了局域空心光束, Ahluwalia 等^[9]使用两束 Bessel 光束干涉得到了自成像局域空心光束。本课题组对局域空心光束的光束特性做出了相关研究^[10-11]并

收稿日期: 2015-06-23; 收到修改稿日期: 2015-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(61178015)、福建省科技创新平台计划(2012H2002)、泉州市科技重点项目(2014Z127)

作者简介: 孙 川(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光束传输与变换方面的研究。E-mail: sch_789@163.com

导师简介: 吴逢铁(1958—), 博士, 教授, 主要从事光束传输与变换, 短脉冲技术及非线性光学等方面的研究。

E-mail: fengtie@hqu.edu.cn(通信联系人)

提出了多种产生局域空心光束的新型元件,如凹锥透镜、圆顶轴棱锥^[12]、组合式轴棱锥^[13]、发光二极管透镜^[14]等,都能在实验或理论中获得单个或周期的局域空心光束。但是产生局域空心光束的这些方法中,特殊的光学系统产生局域空心光束往往过于复杂,稳定性较差,容易受到干扰,新型元件虽然实现了单元件产生局域空心光束,但生产较为困难,许多元件的设计仅存在于理论,现实中制备或加工难度较大。为解决这一问题,本文提出了一种产生局域空心光束的新型元件——双环透镜,不需要复杂的光学系统便可将入射的平行光调制为参数固定的局域空心光束,通过更换元件罩体可以实现一定范围内的尺寸可调局域空心光束,重要的是本元件结构简单,成本低廉,完全可以实际生产并且推广。本文从应用光学角度分析了双环透镜的基本工作原理并得到了局域空心光束的参数公式,依据衍射积分理论^[15-16]推导出了元件后方的光场分布公式并用 Matlab 进行数值模拟,模拟分析了不同参数下的光束分布特性,与理论值对比发现两者吻合较好,最后在实验中进行验证,实验结果与模拟分析结果基本吻合。

2 元件的几何光学原理

双环透镜由罩体和平凸透镜两部分组成,其结构分析如图 1 所示。元件主体为一个平凸透镜,在透镜平面贴合有能够限制光束图样的罩体,罩体为圆形片状,使用遮光材料,如图 1(a)中黑色部分所示,其中有 2 个透光的同心圆环,圆环圆心要与平凸透镜的中心重合,圆环孔径 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 数值可人为设定,罩体可以更换,不同罩体的同心圆环孔径不同,对光束的调制效果不同。



图 1 双环透镜的(a)俯视图和(b)侧视图

Fig.1 (a) Top view and (b) side view of double ring lens

双环透镜利用球面透镜非理想成像(球差^[17])效应,距光轴不同距离的平行光线会被球面透镜聚焦到轴上的不同位置,用两组同心环状光束入射球差较大的透镜,设置恰当的参数便可以产生三维空间内闭合的空心光束,其几何分析如图 2(a)所示。

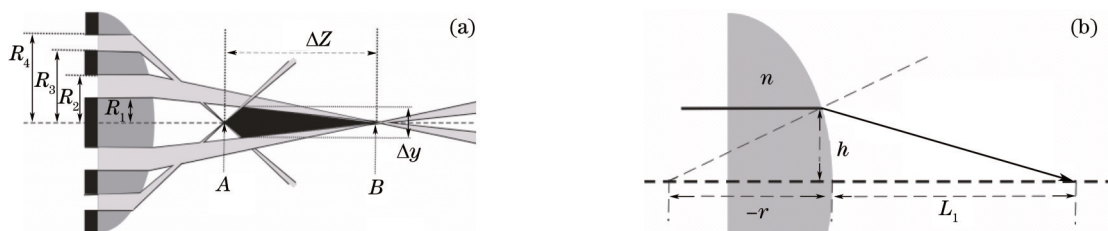


图 2 (a) 双环透镜产生局域空心光束的几何分析图; (b) 球面透镜成像分析图

Fig.2 (a) Geometrical analysis scheme of double ring lens generating bottle beam; (b) analysis scheme of spherical lens imaging

图 2(a)中,平行光入射双环透镜后被光罩调制成两组同心环状光束,由于平凸透镜存在像差效应,半径较大的环状光束会被聚焦在轴上据透镜较近的位置(A点),相应地,半径较小的环状光束被聚焦在据透镜较远的位置(B点),在 A、B 两点之间便形成了一个三维空间内的光束空洞,即局域空心光束。

图 2(b)中,由单个折射面的实际成像公式^[18]可推导出平行光从不同位置垂直入射时出射光束的像方截距公式为

$$L_1(h) = r + \frac{n \cdot r \cdot |r|}{\sqrt{r^2 - (n \times h)^2} - n \cdot \sqrt{r^2 - h^2}}, \quad (1)$$

式中 h 为入射光束与光轴的距离, r 为透镜凸面的曲率半径, n 为材料的折射率,结合图 2(a)可知,双环透镜产生局域空心光束的开环位置与轴向深度由圆环孔径决定。

局域空心光束开环位置 L_1 为

$$L_1 = L_1(R_3), \quad (2)$$

局域空心光束轴向深度 Δz 为

$$\Delta z = L_1(R_2) - L_1(R_3). \quad (3)$$

设局域空心光束空心区域的截面最大半径为 Δy , 由图 2(a)可知 Δy 被光轴与圆环边界光束所组成的三角区域所决定, 根据三角函数得边界光束与 Δy 的关系式为

$$\Delta y(x, y) = \frac{L_1(x) - L_1(y)}{\cot\left[\arcsin\left(\frac{x}{r}\right) - \arcsin\left(\frac{n \cdot x}{r}\right)\right] + \cot\left[\arcsin\left(\frac{y}{r}\right) - \arcsin\left(\frac{n \cdot y}{r}\right)\right]}, \quad (4)$$

式中自变量为边界光束到光轴的距离, 由图 2(a)知, 局域空心光束空心区域的截面最大半径 Δy 为

$$\Delta y = \text{minimum}\{\Delta y(R_1, R_3), \Delta y(R_2, R_3)\}. \quad (5)$$

3 产生局域空心光束的数值模拟

3.1 双环透镜产生单个局域空心光束

单波长平面波经双环透镜变换后的光场分布 $U(\rho, z)$ 可由柯林斯公式及新元件的振幅透射率函数

$t(r) = \left(\int_{R_1}^{R_2} 1 dr + \int_{R_3}^{R_4} 1 dr \right) \exp\left(-i \cdot k \cdot \frac{r^2}{2f}\right)$ 导出, 又知光强 $I(\rho, z) = |U(\rho, z)|^2$, 经整理可得平行光经双环透镜后的光强表达式为

$$I(\rho, z) = \frac{k^2}{z^2} \cdot \left[\int_{R_1}^{R_2} \left(\frac{k \cdot \rho \cdot r}{z} \right) \cdot \exp\left(\frac{i \cdot k \cdot r^2}{2z} - i \cdot k \cdot \frac{r^2}{2f}\right) \cdot r \cdot dr + \int_{R_3}^{R_4} \left(\frac{k \cdot \rho \cdot r}{z} \right) \cdot \exp\left(\frac{i \cdot k \cdot r^2}{2z} - i \cdot k \cdot \frac{r^2}{2f}\right) \cdot r \cdot dr \right]^2, \quad (6)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, 为波矢, f 为平凸透镜的焦距, z 为新元件到观察面的距离, ρ 为观察面上光束与光轴的距离。

取波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, 材料折射率 $n = 1.47$, 曲率半径 $r = -47 \text{ mm}$, 焦距 $f = 100 \text{ mm}$, 圆环孔径 $R_1 = 1.6 \text{ mm}$, $R_2 = 2.9 \text{ mm}$, $R_3 = 4.5 \text{ mm}$, $R_4 = 6 \text{ mm}$ 。将参量代入(6)式, 使用 Matlab 进行数值模拟。

由第 2 节理论部分知, (2)、(3)、(5)式可确定双环透镜产生局域空心光束的开环位置、轴向深度与最大空心半径, 代入数据可得到透镜产生的局域空心光束开环于 99.00 mm 处, 轴向深度 0.58 mm , 光束的最大空心半径为 0.010 mm 。

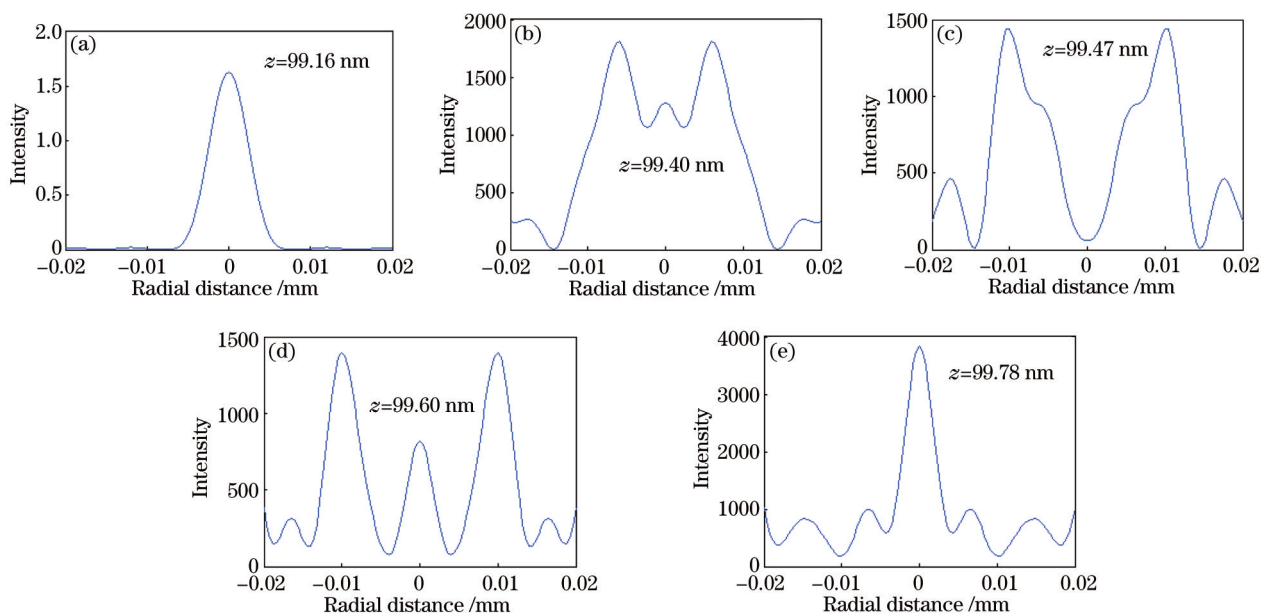


图 3 局域空心光束截面光强分布图

Fig.3 Section intensity distribution of bottle beam

图3展示了 Matlab 模拟的局域空心光束在不同轴向距离下的截面光强分布,可以明显看出,在 99.16 mm 处光强分布成高斯型,中心为亮斑,随着轴上距离的增大,中心光斑半径不断变大,亮度降低,直到在轴向距离 99.40 mm 处中心光强产生了明显的低谷,光束中心出现暗域;随着距离增加大到 99.47 mm,暗域半径也达到最大,中心光强降到最低;随后暗域开始不断缩小,中心光强也开始上升如 99.60 mm 处图样所示,最终在 99.78 mm 处暗域已经完全消失,此时光强分布变成 Bessel 函数形式。随轴向距离的不断增大,光束中心经历了由亮变暗,再由暗变亮的过程,在此过程中,暗域周围一直环绕着强度较高的光束,围成了一个在三维空间内闭合的局域空心光,形成一个完整的局域空心光束。

数值模拟所得局域空心光束开环于 99.16 mm 处,轴向深度 0.62 mm,光束的最大空心半径为 0.010 mm,相较于理论数值的 99.00、0.58、0.010 mm,模拟结果与理论结果吻合程度较高。

3.2 不同双环产生尺寸可调局域空心光束

为研究不同的双环孔径对产生局域空心光束的影响,使用与 3.1 节相同的参数,只改变双环透镜的圆环孔径大小,代入(6)式进行模拟,在模拟数据中加入理论计算结果,得到了模拟结果与理论结果的数据比较(表1)。

表 1 不同双环参数产生局域空心光束的理论值与模拟值

Table 1 Theoretical results and simulation results of bottle beam generated by different ring parameters

Aperture of light source R_1, R_2, R_3, R_4 /mm	Theoretical result			Simulation result		
	Starting position of bottle beam /mm	Axial depth /mm	Maximum hollow radius /mm	Starting position of bottle beam /mm	Axial depth /mm	Maximum hollow radius /mm
1,2,3,4	99.559	0.245	0.003	99.543	0.263	0.003
3,4,6,8	98.227	0.989	0.024	98.186	1.025	0.025
3,5,9,10	95.975	2.797	0.082	95.881	2.870	0.085
3,8,12,14	92.750	4.081	0.166	92.657	4.288	0.177
5,10,15,17	88.469	6.542	0.398	88.341	6.738	0.409
13,15,20,22	78.603	9.866	0.956	78.508	9.968	0.963

数据结果显示,设定不同的双环参数,透镜产生局域空心光束的轴向距离和最大半径随之改变,在模拟数据中,局域空心光束的最大空心半径从 0.003 mm 增大到 0.963 mm,轴向距离从 0.263 mm 增大到 9.968 mm。数值模拟与理论计算基本吻合。结果表明,新型透镜可以通过更换光罩达到局域空心光束尺寸可调的目的,对囚禁和操控不同尺寸的粒子具有现实意义。

4 实验验证

为了验证双环透镜能在实验中产生局域空心光束,设计实验光路如图4所示。其中,激光波长为 $0.6328 \mu\text{m}$,透镜 L_1, L_2 焦距分别为 15 mm、33 cm,使用体式显微镜 SMZ-168-BL 进行观察与记录。实验中使用打印好的菲林片做罩体,与平凸透镜胶合做成简易双环透镜,使用与 3.1 节相同的透镜参数,模拟产生的局域空心光束开环于 99.16 mm 处,轴向深度为 0.62 mm,最大空心半径为 0.010 mm。

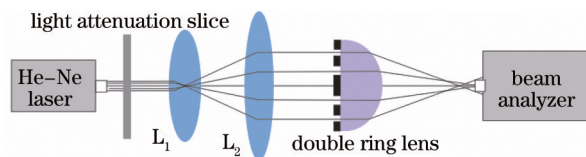


图4 实验光路图

Fig.4 Schematic of experiment

图4中,氦氖激光器发射的激光经过光强衰减片后入射由两组凸透镜组成的具有放大和准直作用的准直扩束系统,出射光束孔径达 15 mm 的近似平面波,经过双环透镜的调制作用,形成了沿光轴方向传播的局域空心光束,用体式显微镜进行观察并拍摄,得到了如图5所示局域空心光束的截面光强分布图。

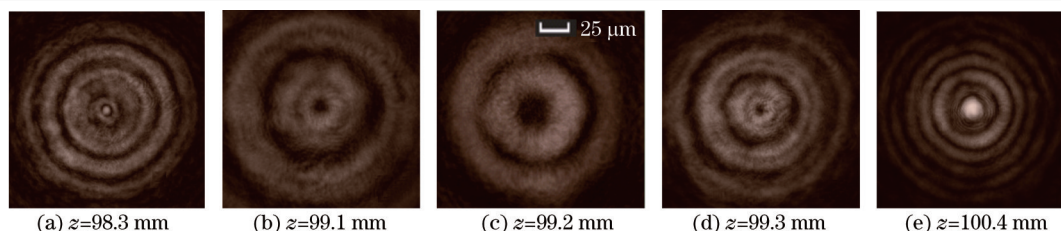


图5 实验产生局域空心光束截面光强分布

Fig.5 Section intensity distribution of bottle beam in experiment

图5(a)~(e)展示了空心光束不同位置处的截面光强分布,98.3 mm处为空心光束的开环位置,光斑中心为亮点,到99.1 mm处中心区域开始出现暗域,轴向距离增大到99.2 mm时暗域达到最大;随后光束空心区域逐渐减小如图5(d)所示,直到100.4 mm处暗域完全消失,光束中心重新变为亮点。实验所测局域空心光束的开环位置为98.279 mm,轴向深度约为1 mm,使用测微尺测量光束最大空心半径,测微尺在显微镜中按与光斑相同的放大倍数拍得,精度为10 μm ,测得最大空心半径约为12 μm 。误差分析:由于实验室中的体式显微镜只能观察到物镜前方11.5 cm处的图样,从双环透镜出射的光束的发散角度太大,体式显微镜无法观察到完整的光强分布,为了解决这个问题不得不在双环透镜后方16.7 mm处加入一个焦距为50 mm的透镜,将光束再次聚焦,实验数据经过二次处理后才得到局域空心光束的实际成像位置,由于实验记录的精度不够与二次计算导致了误差有所增加,但在误差允许的范围内,实验结果与理论结果基本吻合。

5 结 论

依据球差原理提出了一种产生单个可调局域空心光束的新型光学元件,从几何角度分析其原理并得出产生局域空心光束的参数公式,基于衍射理论推导出元件后方的光场分布公式并用Matlab软件数值模拟,得到的模拟结果与理论值基本吻合,最后使用He-Ne激光做光源进行实验验证,实验中拍摄到了中心有暗域的三维空心光束。

所提出的新型元件结构简单、制作容易,仅由光罩与平凸透镜组成,设定双环孔径与透镜曲率半径便可将入射的平行光调制成分数固定的单个局域空心光束,由于使用的元件只有一个,系统的稳定性会得到极大的提高;设置不同的双环孔径,新型元件可以通过更换光罩的方式达到局域空心光束可调谐的目的,不同的曲率半径与双环参数组合能在极大范围内调谐局域空心光束(实验中已能观察到最大空心半径为0.17~2 μm 的局域空心光束),对不同种类分子原子的囚禁与生物细胞操作具有极重要的应用意义。

参 考 文 献

- 1 Bokor N, Davidson N. A three dimensional dark focal spot uniformly surrounded by light[J]. Optics Communications,2007, 279(2): 229-234.
- 2 Zhou Qi, Lu Jun-Fa, Yin Jian-Ping. Matter-wave interference in an axial triple-well optical dipole trap[J]. Chinese Physics B, 2010, 19(9): 093202.
- 3 Peng Xu, Xiaodong He, Jin Wang, *et al.*. Trapping a single atom in a blue detuned optical bottle beam trap[J]. Optics Letters, 2010, 35(13): 2164-2166.
- 4 S A Tatarikova, W Sibbett, K Dholakia. Brownian particle in an optical potential of the washboard type[J]. Phys Rev Lett, 2003, 91(3): 038101.
- 5 Mondal S K, Pal S S, Kapur P. Optical fiber nano-tip and 3D bottle beam as non-plasmonic optical tweezers[J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16180-16185.
- 6 M P Macdonald, L Paterson, K Volke-Sepulveda, *et al.*. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures[J]. Science, 2002, 296(5570): 1001-1103.
- 7 S B Vinas, Z Jaroszewicz. Zone plates with black focal spots[J]. Applied Optics, 1992, 31(2): 192-198.
- 8 Po-Tse Tai, Wen-Feng Hsieh, Ching-Hsu Chen. Direct generation of optical bottle beams from a tightly focused end-pumped solid-state laser[J]. Optics Express, 2004, 12(24): 5827-5833.

- 9 Ahluwalia B, Yuan X C, Tao S H. Generation of self-imaged optical bottle beams[J]. Optics Communications, 2004, 238(1-3): 177-184.
- 10 Du Tuanjie, Wu Fengtie, Wang Tao, *et al.*. Theoretical modulation and experiment on the self-reconstruction of periodic bottle beam[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0114001.
杜团结, 吴逢铁, 王 涛, 等. 周期局域空心光束自重建的理论模拟与实验[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0114001.
- 11 Sun Chuan, He Yanlin, Chen Jing, *et al.*. Bessel beam generated by linear radial gradient-index lens[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802002.
孙 川, 何艳林, 陈 婧, 等. 线性径向梯度折射率透镜产生贝塞尔光[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802002.
- 12 Cheng Zhiming, Wu Fengtie, Fang Xiang, *et al.*. Multi-bottle beam generated by vaulted axicon[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(21): 214201.
程治明, 吴逢铁, 方 翔, 等. 圆顶轴棱锥产生多个局域空心光束[J]. 物理学报, 2012, 61(21): 214201.
- 13 Fang Xiang, Wu Fengtie, Cheng Zhiming. Detachable combined axicon for generating different types of bottle beam[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0826002.
方 翔, 吴逢铁, 程治明. 产生不同类型局域空心光束的可拆式组合轴棱锥[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0826002.
- 14 He Xi, Du Tuanjie, Wu Fengtie. Optical bottle beam generated by a new type of light emitting diode lens [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(7): 074201.
何 西, 杜团结, 吴逢铁. 新型发光二极管透镜产生局域空心光束[J]. 物理学报, 2014, 63(7): 074201.
- 15 Guo Fuyuan, Li Lianhuang. Propagation characteristics of non-paraxial diffraction beam[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102004.
郭福源, 李连煌. 非傍轴衍射光束的传输特性[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102004.
- 16 Guo Fuyuan, Li Lianhuang, Zheng Hua, *et al.*. Propagation characteristics of simple cylindrical polarized beam[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0802003.
郭福源, 李连煌, 郑 华, 等. 简单柱面坐标偏振光束的传输特性[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0802003.
- 17 Ren Guangsen, Ning Yu, Shi Yubin, *et al.*. Effect of primary aberration on tight focused azimuthally polarized beams[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702007.
任广森, 宁 禹, 师宇斌, 等. 初级像差对角向偏振光深聚焦场的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702007.
- 18 Wang Hongmin. Optical Engineering[M]. Beijing: Peking University Press, 2009: 14-15
王红敏. 光学工程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009: 14-15.

栏目编辑: 史 敏