

产生长距离近似无衍射光束的凹锥透镜

方 翔¹ 陈 婧¹ 吴逢铁^{1,2} 程治明¹ 朱健强³

(¹华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021; ²福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

³中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 设计了一种可产生长距离近似无衍射光束的新型光学元件——凹锥透镜,该透镜是以轴线为中心将传统轴棱锥的底面磨削成凹球面。采用几何光学理论分析了其产生长距离近似无衍射光束的原理。推导了凹锥透镜的振幅透射率函数,并由衍射理论分析和模拟了平面波通过其后的光强分布特性。结果表明,相对于传统轴棱锥,选择合适曲率半径的凹锥透镜能够产生光束发散小、轴向光强分布均匀的长距离近似无衍射光束。以折射率 $n=1.51509$,底角 $\gamma=10^\circ$,曲率半径 $R=75\text{ mm}$ 的凹锥透镜为例,入射光束半径 $a=10\text{ mm}$ 时可产生最大无衍射距离为 $Z_{\max}=471.220\text{ mm}$ 的近似无衍射光束,相同参数条件下的传统轴棱锥只能产生最大无衍射距离为 $Z_{\max}=111.235\text{ mm}$ 的近似无衍射光束,比较可知无衍射距离增大了 359.985 mm 。

关键词 几何光学;长距离近似无衍射光束;轴棱锥;振幅透射率;凹锥透镜

中图分类号 O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201333.0508002

Generation of Long-Distance Quasi-non-Diffracting Beams Using a Concave Axicon

Fang Xiang¹ Chen Jing¹ Wu Fengtie^{1,2} Cheng Zhiming¹ Zhu Jianqiang³

¹College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021 China

²Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, Xiamen, Fujian 361021, China

³Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract A new type of axicon is proposed for generating quasi long-distance non-diffracting beams. This new type of optical element is grinded to a concave spherical surface on the bottom of a traditional axicon. The formation of the long-distance non-diffracting beams is analyzed by the theory of geometrical optics. Its amplitude transmissivity function is derived. The intensity distribution of plane wave pass through the concave axicon is simulated by diffraction theory. The results show that the appropriate radius of curvature of axicon can produce long-distance non-diffracting beams with low divergent and good uniformity. Take an axicon with base angle γ of 10° , refraction index n of 1.51509 and curvature radius R of 75 mm for example, the maximum non-diffracting distance Z_{\max} of 471.220 mm is obtained when radius of the incident beam a is 10 mm, while the traditional axicon with the same base angle and refraction index can obtain non-diffracting distance of 111.235 mm. The non-diffracting distance increases by 359.985 mm.

Key words geometric optics; long-distance quasi-non-diffracting beam; axicon; amplitude transparency; concave axicon

OCIS codes 080.2740; 220.2740; 260.1960

1 引 言

无衍射光束由 Durnin 等^[1]于 1987 年提出,因

其具有在传播过程中强度及光斑尺寸保持不变的特性,被广泛用于光学俘获和操作^[2]、光学相干断层扫

收稿日期: 2012-12-10; 收到修改稿日期: 2013-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(61178015)、国家高功率激光物理重点实验室开放基金(SG001102)、福建省自然科学基金(2012J01278)和泉州市科技重点项目(2011G9)资助课题。

作者简介: 方翔(1986—),男,硕士研究生,主要从事光束传输与变化的理论和技术等方面的研究。

E-mail: asjna@163.com

导师简介: 吴逢铁(1958—),男,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)

描^[3]、干涉测量^[4]和空间光通信^[5]等。但由于受实际光学系统的孔径限制,一般只能得到有限距离的近似无衍射光束,极大地限制了无衍射光束在长距离测量和通信等领域的应用。因此,对如何能获取传播距离长且光束质量好的近似无衍射光束的研究显得尤为重要。

目前,针对近似无衍射光束的产生方式已有众多研究^[6~9],其中传统轴棱锥因为结构简单、转换效率高和光损伤阈值大等优点而被广泛采用。但在入射光束半径固定的情况下,近似无衍射光束的传播距离与传统轴棱锥的锥面底角和材料折射率成反比。目前,国内外市场上能购买的传统轴棱锥最小底角为 0.5° ,且小的锥面底角加工困难会使无衍射光束产生畸变^[10]。能获取的折射率较小的光学玻璃也是稀少昂贵,比如SCHOTT公司生产的光学玻璃的最小折射率也仅为1.43291。因此,采用传统轴棱锥获取长距离近似无衍射光束显得尤为困难。近年来,Belyi等^[11]提出了利用会聚的球面波

连续通过两个传统轴棱锥的方法产生长距离近似无衍射光束,但此系统所需的光学元件多,光能损耗率随之增大,光路调试也极其困难;Burvall等^[12]提出的单一光学元件——透镜轴棱锥,通过解决小锥角的加工问题能产生长距离近似无衍射光束,但此光学元件的中心需用不透明的圆屏挡光,极大地降低了元件的能量利用率。为了解决上述问题,本文提出了一种产生长距离近似无衍射光束的新型光学元件——凹锥透镜。该透镜是以轴线为中心将传统轴棱锥的底面磨削成一凹球面而成,这不仅保留了传统轴棱锥的众多优点,也解决了光学玻璃材料及加工小锥角加工的难题。

2 元件设计

凹锥透镜是在传统轴棱锥的基础上加工而成的,如图1(a)所示,以轴线为中心,将底角为 γ 和折射率为 n 的传统轴棱锥底面磨削成一个曲率半径为 R 的凹球面。

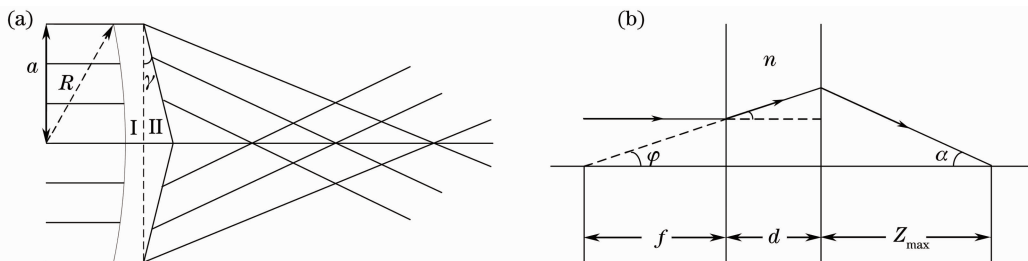


图 1 (a)凹锥透镜结构示意图;(b)光路图

Fig. 1 (a)Structure diagram of concave axicon; (b) optical pathway diagram

图1(a)中凹锥透镜的凹球形部分I等效为一个平凹透镜,II部分等效为一个传统轴棱锥。光路图如图1(b)所示,平面波入射到凹锥透镜,光束分别在凹球形底面和锥形表面发生两次偏折。经过平凹透镜的偏折形成焦距 $f = \frac{R}{n-1}$ 的发散球面波,发散光线与轴线的夹角为 φ 。发散球面波经过锥面偏折线聚焦形成一段焦线长为 Z_{\max} 的菱形区域。与传统轴棱锥不同,此时在菱形区域内各处的光线倾斜度 α 不同,即中心光斑尺寸沿轴向会有变化,但是光束横截面光强仍满足贝塞尔分布且衍射图形为同心圆环。由刘华等^[13,14]研究结果知,选择恰当的球面波入射轴棱锥可以减小出射光束中心光斑尺寸的变化范围,使出射光束具有基本相同的倾斜角,此时菱形区域内的出射光束可以近似为无衍射光束。

由几何光学理论可以推出:

$$\alpha \approx (n-1)\gamma - \varphi, \quad (1)$$

式中 $\varphi = \frac{a}{f} = \frac{a(n-1)}{R}$ 。

当 α 取最小值时,可知最大无衍射距离

$$Z_{\max} = \frac{a}{\tan \alpha_{\min}} \approx \frac{a}{(n-1)\left(\gamma - \frac{a}{R}\right)}. \quad (2)$$

由(1)、(2)式知,传统轴棱锥产生的近似无衍射光束最大无衍射距离 $\left[Z_{\max} = \frac{a}{(n-1)\gamma}\right]$ 仅与入射光束半径 a 、底角 γ 和折射率 n 有关,而凹锥透镜还可通过改变底面的曲率半径 R 控制无衍射距离。在 γ 固定的情况下,凹锥透镜可通过减小底面的曲率半径 R ,获取更长距离的近似无衍射光束;或在无衍射距离大小给定的条件下,通过减小底面曲率半径 R ,凹锥透镜可采用较大的底角 γ ,较大底角对加工技术、精度和误差方面的要求相对较低。

3 理论分析

3.1 振幅透射率

设入射光波沿 z 轴方向传播, 由于整个凹锥透镜厚度很小, 可以忽略光线在不同介质处发生的径向偏移。当光波经过凹锥透镜后入射波的波前有相位延迟, 延迟效应的大小正比于凹锥透镜各点的厚度。为了便于分析, 将凹锥透镜分成两部分: 厚度为 d_{01} 的平凹部分和厚度为 d_{02} 的锥形部分, 如图 2 所示。

设在高度 r 处的厚度为 $d_{01}(r)$ 。当入射光波通过凹锥透镜时, 在平凹部分引起的光程差为

$$\Delta_1(r) = n(R - \sqrt{R^2 - r^2} + d_{01}) - (R - \sqrt{R^2 - r^2} + d_{01}), \quad (3)$$

厚度为 $d_{02}(r)$ 的锥形部分引入的光程差为

$$\Delta_2(r) = n(d_{02} - r\gamma) - (d_{02} - r\gamma), \quad (4)$$

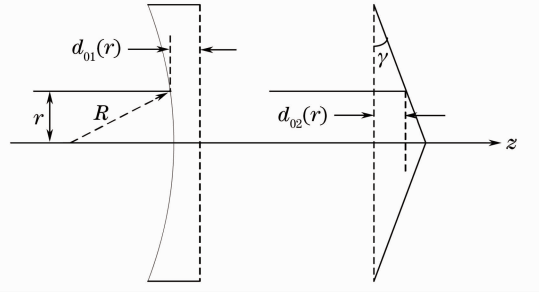


图 2 相位延迟示意图

Fig. 2 Phase delay schematic diagram

总光程差为

$$\Delta = \Delta_1(r) + \Delta_2(r) = (n-1)(R - \sqrt{R^2 - r^2} + d_{01}) + (n-1)(d_{02} - r\gamma), \quad (5)$$

凹锥透镜引入的总相位延迟为

$$\varphi(r) = k\Delta = k[(n-1)(R - \sqrt{R^2 - r^2} + d_{01}) + (n-1)(d_{02} - r\gamma)] = k(n-1)R + k(n-1)d - k(n-1)\sqrt{R^2 - r^2} - k(n-1)r\gamma, \quad (6)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为光波波矢, $d = d_{01} + d_{02}$ 。(6)式中第一、二项对于入射波各点的相位延迟都相同, 因此在凹锥透镜引入的总相位延迟中, 略去这些对光强无贡献的常相位因子。

经上述简化后, 可得凹锥透镜对入射光波的相位变换即振幅透射率函数为

$$t(r) = \exp[-ik(n-1)(\sqrt{R^2 - r^2} + r\gamma)]. \quad (7)$$

3.2 衍射积分分析

在柱坐标下, 广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式^[15]为

$$E_2(r_2, \psi_2) = -\frac{i}{\lambda B} \exp(ikz) \iint_s E_1(r_1, \psi_1) \exp\left\{\frac{ik}{2B}[Ar_1^2 + Dr_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\psi_1 - \psi_2)]\right\} r_1 dr_1 d\psi_1, \quad (8)$$

式中 $E_1(r_1, \psi_1)$, $E_2(r_2, \psi_2)$ 分别为源点和场点的复振幅, $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 为光通过光学系统的变换矩阵, 当光场满足旋转对称时, 与极角 ψ 无关, 则 $E_2(r_2, \psi_2) \approx E_2(r_2)$, $E_1(r_1, \psi_1) \approx E_1(r_1)$ 。设衍射孔径半径为 a , 对 r, ψ 进行积分, 则(8)式变为

$$E_2(r_2) = -\frac{i}{\lambda B} \exp(ikz) \int_0^a E_1(r_1) 2\pi J_0\left(\frac{kr_1r_2}{B}\right) \exp\left[\frac{ik}{2B}(Ar_1^2 + Dr_2^2)\right] r_1 dr_1. \quad (9)$$

设光波在自由空间沿 z 轴传播距离为 z , 则传输矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 可得到在坐标 (r_2, z) 处的光场分布:

$$E_2(r_2, z) = -\frac{ik}{z} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_0^a E_1(r_1) J_0\left(\frac{kr_1r_2}{z}\right) \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2z}\right) r_1 dr_1. \quad (10)$$

将(7)式代入(10)式, 可得经过凹锥透镜变换后的光场分布

$$E_2(r_2, z) = -\frac{ik}{z} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_0^a E_1(r_1) J_0\left(\frac{kr_1r_2}{z}\right) \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2z}\right) t(r_1) r_1 dr_1 = -\frac{ik}{z} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_0^a E_1(r_1) J_0\left(\frac{kr_1r_2}{z}\right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n-1)(\sqrt{R^2 - r_1^2} + r_1\gamma)\right] r_1 dr_1, \quad (11)$$

由(11)式可以求得经过凹锥透镜变换后的光强分布为

$$I(r_2, z) = |E_2(r_2, z)|^2. \quad (12)$$

取参量 $n=1.51509, \lambda=632.8 \text{ nm}, \gamma=5^\circ, a=$

$5 \text{ mm}, R=300 \text{ mm}$ 。由(12)式模拟可得凹锥透镜后的三维光强分布,如图3所示。

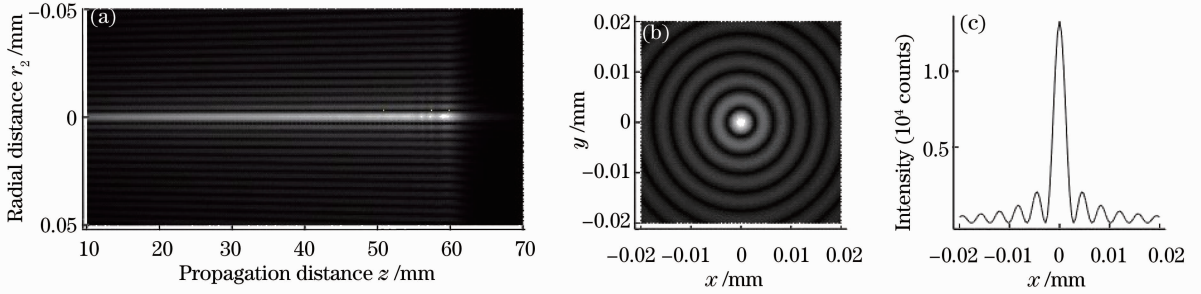


图3 平面波通过凹锥透镜后的光强分布。(a)纵向光强分布;(b) $z=30 \text{ mm}$ 处横截面二维光强分布;(c) $z=30 \text{ mm}$ 处径向光强分布

Fig. 3 Intensity distribution of plane wave passing through concave axicon. (a) Longitudinal intensity distribution; (b) cross section intensity distribution in two-dimension at $z=30 \text{ mm}$; (c) radial intensity distribution at $z=30 \text{ mm}$

由图3可以看出,经过振幅透射率函数的相位变换,凹锥透镜后产生了具有无衍射光束特性的线聚焦光束。且最大无衍射距离 $Z_{\max} = 61.489 \text{ mm}$ 符合(2)式的计算结果。

曲率半径 $R=400, 150, 100, 75 \text{ mm}$,由最大无衍射距离(2)式,可计算得最大无衍射距离 $Z_{\max} = 129.931, 179.983, 260.477, 471.220 \text{ mm}$ 。相对于传统轴棱锥 ($Z_{\max} = 111.235 \text{ mm}$),无衍射距离分别扩展了 $18.696, 68.748, 149.242, 359.985 \text{ mm}$ 。采用波长 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 的平面波照射凹锥透镜,利用(12)式模拟出近似无衍射光束的光强分布,如图4所示。

4 数值模拟与分析

凹锥透镜的材料选用 SCHOTT 公司生产的 N-BK7($n=1.51509$),底角 $\gamma=10^\circ$,半径 $a=10 \text{ mm}$,

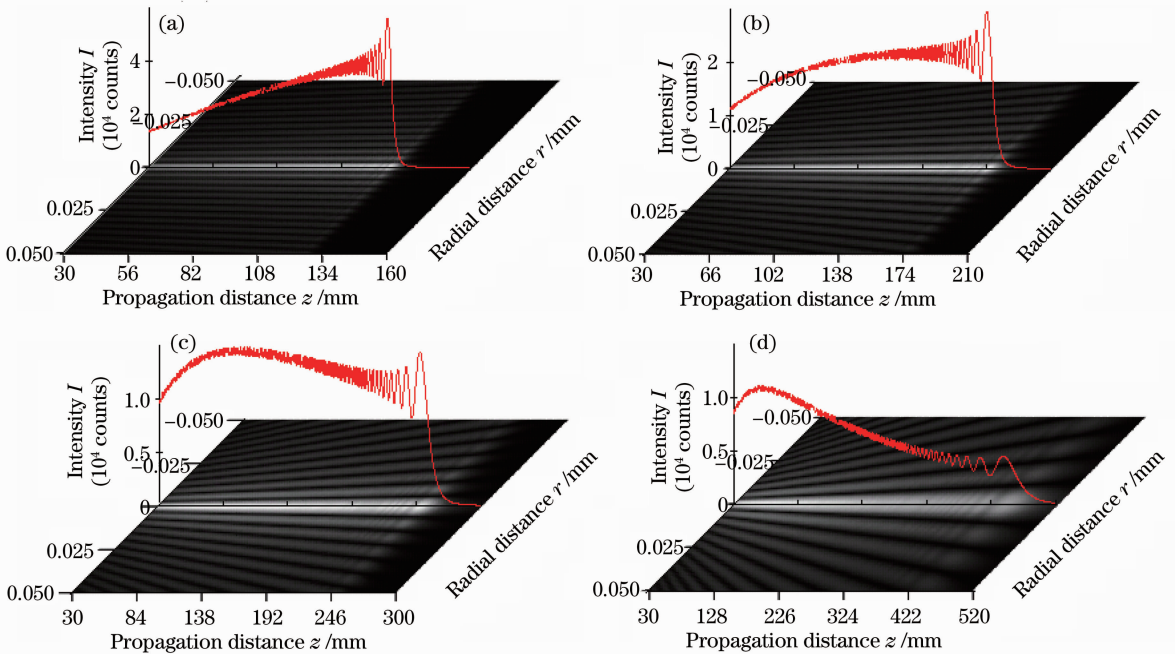


图4 轴向光强分布图。(a) $R=400 \text{ mm}$; (b) $R=150 \text{ mm}$; (c) $R=100 \text{ mm}$; (d) $R=75 \text{ mm}$

Fig. 4 Distribution of intensity along propagation distance. (a) $R=400 \text{ mm}$; (b) $R=150 \text{ mm}$; (c) $R=100 \text{ mm}$; (d) $R=75 \text{ mm}$

由图(4)可以看出,在底角 γ 固定不变的情况下,曲率半径 R 的取值越小,可获取的近似无衍射光束无衍射距离越长。当 R 介于400~100 mm区间内时,无衍射距离的增长较为缓慢,光束发散程度也较小,但轴上光强分布得到了极大改善,光强分布随着曲率半径的减小而变得更加均匀。当 R 介于100~75 mm区间内时,随着曲率半径的减小,无衍射距离的增长变得急促,光束发散程度比较大,轴上光强分布也缓慢下降。

5 结 论

设计出了一种产生长距离近似无衍射光束的新型光学元件——凹锥透镜,从几何光学的角度分析其产生近似无衍射光束的机理,推导出其振幅透射率函数,并利用衍射理论进行了数值模拟。结果表明,底面的曲率半径越小,无衍射光束的传播距离越大。不必加工极小的锥面底角,通过选择合适的曲率半径就可得到光束发散角小和轴向光强分布均匀的长距离无衍射光束,降低了元件的加工难度。研究结果对于无衍射光束在长距离激光准直、激光测距和激光通信等方面有着重要的实用价值。

参 考 文 献

- 1 J. Durnin, J. J. Miceli, J. Eberly. Diffraction-free beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(15): 1499~1501
- 2 V. Garcés-Chávez, D. McGloin, H. Melville *et al.*. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. *Nature*, 2002, **419**(6903): 145~147
- 3 K. S. Lee, J. P. Rolland. Bessel beam spectral-domain high-resolution optical coherence tomography with micro-optic axicon providing extended focusing range [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(15): 1696~1698
- 4 M. Fortin, M. Piché, E. F. Borra. Optical tests with Bessel beam interferometry [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(24):

5887~5895

- 5 Wang Zhongyu, Li Meng. Misalignment analysis of optical interconnects based on non-diffracted beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2984~2988
王中宇,李萌.基于无衍射光的光互连系统的对准偏差研究[J].*光学学报*,2009,**29**(11):2984~2988
- 6 T. Chiba. Spot dancing of the laser beam propagated through the turbulent atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(11): 2456~2461
- 7 Ari Turunen, Antti Vasara, Ari T. Friberg. Holographic generation of diffraction-free beams [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **27**(19): 3959~3962
- 8 Cheng Zhiming, Wu Fengtie, Fan Dandan *et al.*. Non-diffraction Bessel-like beam generated by green LED source [J]. *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.*, 2012, **42**(8): 805~811
程治明,吴逢铁,范丹丹等.绿光LED产生无衍射Bessel光束[J].*中国科学:物理学,力学,天文学*,2012,**42**(8):805~811
- 9 Fang Xiang, Wu Fengtie, Cheng Zhiming. Effects of incoherent monochromatic LED light source on formation of Bessel beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(2): 0205001
方翔,吴逢铁,程治明.非相干单色LED光源对贝塞尔光束形成的影响[J].*光学学报*,2013,**33**(2):0205001
- 10 Jiang Xinguang, Wu Fengtie, Liu Bin. Modification of aberration nondiffraction beams in manufacture error of elliptical axicon [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1538~1542
江新光,吴逢铁,刘彬.轴棱锥椭圆加工误差产生畸变无衍射光束的修正[J].*中国激光*,2007,**34**(11):1538~1542
- 11 Vladimir Belyi, Andrew Forbes, Nikolai Kazak *et al.*. Bessel-like beams with z -dependent cone angles [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(3): 1966~1973
- 12 A. Burvall, K. Kolacz, Z. Jaroszewicz. Simple lens axicon [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(25): 4838~4844
- 13 Liu Hua, Lu Zhengwu. The focus diffraction property of axicons illuminated by incident spherical wave [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 126~128
刘华,卢振武.圆锥透镜对球面入射光的聚焦衍射特性[J].*光子学报*,2005,**34**(1):126~128
- 14 Zhai Zhongsheng, Zhao Bin. Study on property of central spot of non-diffracting beams [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(5): 480~483
翟中生,赵斌.无衍射光束中心光斑的特性研究[J].*激光技术*,2008,**32**(5):480~483
- 15 Lü Baida. Laser Optics [M]. Beijing: High Education Publishing House, 2003. 11~16
吕百达.激光光学[M].北京:高等教育出版社,2003.11~16

栏目编辑:张腾