

# 涡旋光束经过轴棱锥后的聚焦特性

刘晓云<sup>1</sup> 代雪峰<sup>2</sup> 单丽艳<sup>1</sup> 王楠<sup>1</sup> 徐送宁<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159)  
(<sup>2</sup>东北大学理学院物理系, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要** 研究了涡旋光束通过轴棱锥聚焦后的聚焦特性。利用惠更斯-菲涅耳衍射积分理论推导了涡旋光束经过轴棱锥聚焦后所获得的聚焦光强分布。数值模拟结果表明, 涡旋光束经过轴棱锥聚焦后可获得高阶贝塞尔光束。研究了不同锥角的轴棱锥对涡旋光束聚焦特性的影响以及不同拓扑电荷数对聚焦特性的影响。结果表明, 在轴棱锥对应的最大准直距离内, 所获得的高阶贝塞尔光束保持了原有的无衍射特性。

**关键词** 物理光学; 涡旋光束; 轴棱锥; 高阶贝塞尔光束

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.022601

## Focusing Properties of Vortex Beam with an Axicon

Liu Xiaoyun<sup>1</sup> Dai Xuefeng<sup>2</sup> Shan Liyan<sup>1</sup> Wang Nan<sup>1</sup> Xu Songning<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110159, China)  
(<sup>2</sup>Department of Physics, College of Sciences, Northeast University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

**Abstract** Focusing properties of the vortex beams with axicon is studied. The focusing intensity distribution of vortex beams with axicon by using Huygens-Fresnel diffractive integral is investigated. Numerical calculations show that after focused by the axicon, a vortex beam can convert into a high-order Bessel beam. The influence of by different cone angles of the axicon and the different topological number of the vortex beam on the focusing properties of vortex beam is investigated. The results show that in the maximum distance of the non-diffraction zone of the axicon, the obtained high-order Bessel beam keeps the original non-diffraction properties.

**Key words** physical optics; vortex beam; axicon; high-order Bessel beam

**OCIS codes** 260.1440; 350.5500; 140.3300

## 1 引言

涡旋光束由于其独特的物理性质和应用领域, 引起了研究人员的广泛关注<sup>[1~3]</sup>。近几年来, 许多研究小组对这种光束的产生、传输特性及其潜在的应用进行了大量的研究<sup>[4~6]</sup>。由于涡旋光束带有轨道角动量, 因此在量子信息处理、粒子囚禁与操纵等领域都有潜在的应用。

美国 Rochester 大学的 Durnin 等<sup>[7,8]</sup>于 1987 年首次提出了无衍射光。这种光束的特点是当其在无界的自由空间中传播时, 与传播方向垂直的每个平面上的光场分布总是保持相同, 并且具有高度的局域化强度分布, 也就是说光束中电场强度的横向分布很集中, 这类光场不遭受衍射扩展。正是这一奇异的光学特性, 吸引了科研人员的广泛关注<sup>[9,10]</sup>, 使得对无衍射光的研究成为一个重要的课题。

无衍射贝塞尔光不仅在物理层面上得到不断完善, 而且在实际应用及科学研究领域也得到了长足的发展。Arlt 等<sup>[10]</sup>于 2001 年用贝塞尔光实现了对微粒进行光学操纵。这种光学微操作是 Ashkin 等<sup>[11,12]</sup>于 1971 年发展的一种囚禁微米粒子的光学技术, 简称光镊(或光钳), 主要是利用强聚焦的激光光束在焦点附近产生很高的电场梯度, 并且对激光束中的介质粒子施加一个指向焦点的作用力, 使得介质粒子被囚禁在激光光束焦点附近的三维空间内<sup>[13]</sup>。光镊为精确操控微观粒子提供了一种非接触无损伤的有效方法。

**收稿日期**: 2011-07-31; **收到修改稿日期**: 2011-08-31; **网络出版日期**: 2011-11-28

**基金项目**: 国家自然科学基金(11004138)资助课题。

**作者简介**: 刘晓云(1980—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事激光传输方面的研究。E-mail: xiaoyunliu0420@163.com

本文利用涡旋光束被轴棱锥聚焦后产生了高阶的贝塞尔光束,并对影响高阶贝塞尔光束的因素进行了具体的分析和阐述。

## 2 理论分析与数值模拟

首先考虑一束单色涡旋光束入射到轴棱锥上,如图1所示,图中 $\gamma$ 是轴棱锥的锥角。假设入射的涡旋光束的电场表示为

$$E_0(r, \varphi) = A_0 \left( \frac{r}{w_0} \right)^m \times \exp\left(\frac{-r^2}{w_0^2}\right) \times \exp(im\varphi), \quad (1)$$

式中 $A_0$ 为振幅常数, $w_0$ 为束腰半径, $m$ 为拓扑电荷数。

涡旋光束正垂直入射到轴棱锥上,已知轴棱锥的振幅透射率为<sup>[14]</sup>

$$t(\rho) = \begin{cases} \exp[-ik(n-1)\gamma\rho] & (\rho \leq R) \\ 0 & (\rho > R) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $n$ 为轴棱锥材料的折射率,轴棱锥的锥角 $\gamma$ 即轴棱锥锥面和底平面所成的夹角。

涡旋光束经轴棱锥后的场强分布可写为

$$E_1(r, \varphi) = E_0(r, \varphi) \times t(r) = A_0 \left( \frac{r}{w_0} \right)^m \times \exp\left(\frac{-r^2}{w_0^2}\right) \times \exp(im\varphi) \times \exp[-ik(n-1)\gamma r]. \quad (3)$$

由广义的惠更斯-菲涅耳衍射积分公式可得涡旋光束经轴棱锥聚焦后的场强分布为

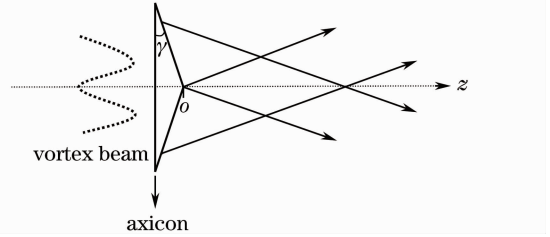


图1 涡旋光束被轴棱锥聚焦的光路示意图  
Fig. 1 Schematic illustration of the vortex beam focused by an axicon

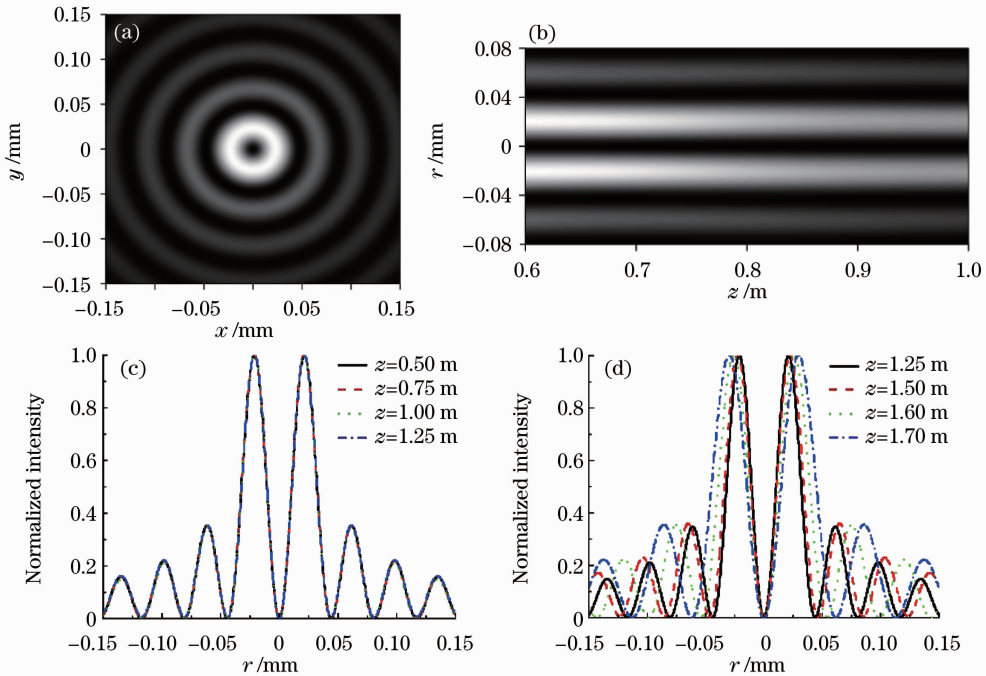


图2 涡旋光束经轴棱锥聚焦后的光强分布。(a)在 $z=750$  mm处光强的横向分布;(b)在 $r-z$ 方向光强分布轮廓图;在(c) $z=0.50 \sim 1.25$  m,高阶贝塞尔光束传输中的横向光强分布曲线;(d) $z=1.25 \sim 1.70$  m,高阶贝塞尔光束传输中的横向光强分布曲线。其他的计算参数为 $m=1, \gamma=0.5^\circ, n=1.5$

Fig. 2 Intensity distribution of vortex beams focused with an axicon. (a) Contour plot of transverse intensity distribution at 750 mm; (b) contour plot of intensity distribution in the  $r-z$  plane; transverse intensity distribution of the high-order non-diffraction beams within the propagation range (c)  $z=0.50 \sim 1.25$  m; (d) transverse intensity distribution of the high-order non-diffraction beams within the propagation range  $z=1.25 \sim 1.70$  m. The other calculation parameters are  $m=1, \gamma=0.5^\circ, n=1.5$

$$E(\rho, \psi, z) = -\frac{i}{\lambda z} \times \exp(ikz) \times A_0 \times \iint_s \left(\frac{r}{w_0}\right)^m \times \exp\left(\frac{-r^2}{w_0^2}\right) \times \exp(im\varphi) \times \exp[-ik(n-1)\gamma r] \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[\rho^2 + r^2 - 2r\rho\cos(\psi - \varphi)]\right\} r dr d\varphi, \quad (4)$$

式中  $r$  和  $\varphi$  分别为衍射场的坐标位置和方位角,  $\rho$  和  $\psi$  分别为聚焦场的坐标位置和方位角。

对积分式(4)式进行化简可得

$$E(\rho, \psi, z) = \int_0^\infty \exp\left[\frac{ik}{2z}(r^2 + \rho^2) - ik(n-1)\gamma r\right] \times \exp\left(\frac{-r^2}{w_0^2}\right) \times \left(\frac{r}{w_0}\right)^m \times \exp(im\psi) i^{-m} J_m\left(\frac{kr\rho}{z}\right) r dr. \quad (5)$$

(5)式所表示的是涡旋光束经过轴棱锥聚焦后所获得的光场。从中可以看出,涡旋光束经过轴棱锥聚焦后,涡旋光束的涡旋项并没有发生变化,背景光场则相对于原来多了一个高阶贝塞尔函数项。并且,贝塞尔函数的阶数与涡旋光束的拓扑电荷数相同。这就说明了涡旋光束经轴棱锥聚焦后,所得到的光场是与涡旋光束阶数相同的高阶贝塞尔光束。根据(5)式的场强表达式,模拟出涡旋光束经轴棱锥聚焦后的光强分布。

图2和图3分别为拓扑电荷数为1和2的环形涡旋光束经轴棱锥聚焦后的光强分布,从横截面的光强分布可以看出,聚焦涡旋光束可得到高阶贝塞尔光束,而入射前涡旋光束的拓扑电荷数决定了聚焦后高阶贝塞尔光束的阶数。从曲线图可以看出,在传输距离为  $z=0$  到  $z=1.25$  m 范围内,聚焦得到的高阶贝塞尔光束的光强分布基本完全重合,即在这一区域内光束的发散角可视为零。当传输距离达到 1.25 m 时,从图2(d)以及图3(d)可以看出,光束的光强分布已经开始向外扩展,光束开始随着传输而扩散。图2(b)与图3(b)是高级贝塞尔光束在传输距离为 0.6~1.0 m 范围内的纵向光强分布图,通过对比可看出二阶贝塞尔光束的暗中空区域比一阶大,而暗中空区域在纵向都保持不变,无衍射特性很明显。

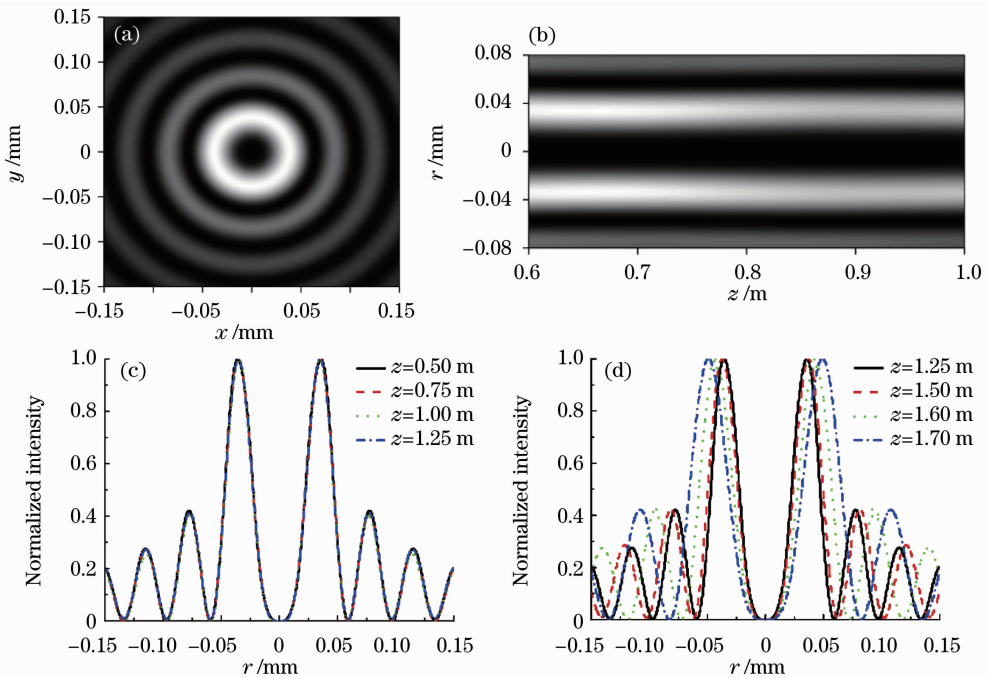


图3 涡旋光束经轴棱锥聚焦后的光强分布。(a)在  $z=750$  mm 处光强的横向分布;(b)在  $r-z$  方向光强分布轮廓图;在(c)  $z=0.50\sim 1.25$  m,高阶贝塞尔光束传输中的横向光强分布曲线;(d)  $z=1.25\sim 1.70$  m,高阶贝塞尔光束传输中的横向光强分布曲线。其他计算参数为  $m=2, \gamma=0.5^\circ, n=1.5$

Fig. 3 Intensity distribution of vortex beams focused with an axicon. (a) Contour plot of transverse intensity distribution at 750 mm; (b) contour plot of intensity distribution in the  $r-z$  plane; transverse intensity distribution of the high-order non-diffraction beams within the propagation range (c)  $z=0.50\sim 1.25$  m; (d) transverse intensity distribution of the high-order non-diffraction beams within the propagation range  $z=1.25\sim 1.70$  m. The other calculation parameters are  $m=2, \gamma=0.5^\circ, n=1.5$

拓扑电荷数不同的涡旋光束经轴棱锥聚焦后对光线的会聚程度是不一样的,如图4所示,不同的拓扑电荷数其光强分布不同。拓扑电荷数越大,中心光强暗中空区域光斑就越大。

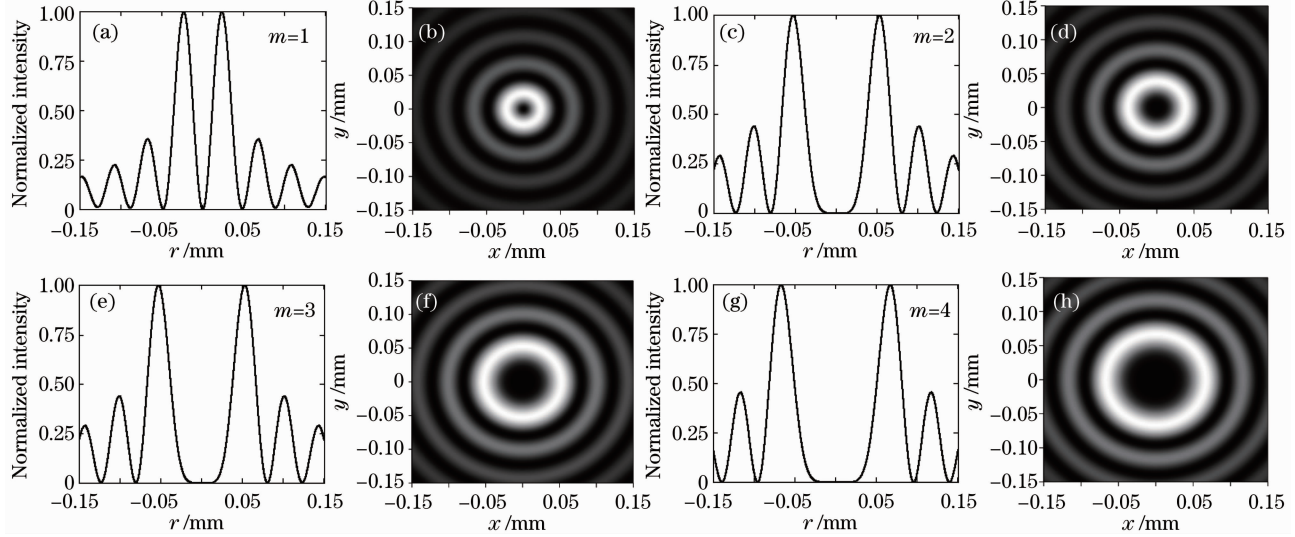


图4 不同拓扑电荷数的高阶贝塞尔光束的光强分布图。(a)~(h)分别对应不同拓扑电荷数的二维和三维光强分布。

其他计算参数为  $\gamma=0.5^\circ$ ;  $n=1.5$

Fig. 4 Intensity distributions of high-order Bessel beams with different topological numbers. (a)~(h) correspond to different topological numbers of two-dimensional and three-dimensional intensity distributions, respectively. The

other calculation parameters are  $\gamma=0.5^\circ$ ;  $n=1.5$

角度不同的轴棱锥对光线的会聚程度是不一样的,在对涡旋光束进行聚焦时,不同底角的轴棱锥也应该具有不同的会聚效果。在本文中对不同角度的轴棱锥的聚焦也做了比较。在研究锥角对贝塞尔光束光强分布的影响,采用底角  $\gamma$  为  $0.5^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $2^\circ$  的轴棱锥对拓扑电荷数  $m=1$  的涡旋光束进行聚焦,模拟结果如图5所示。从图5可以看出,随着轴棱锥底角角度的增大,轴棱锥对涡旋光束的聚焦效果越来越明显;角度越大,所得到的一阶贝塞尔光束的光斑就越小。

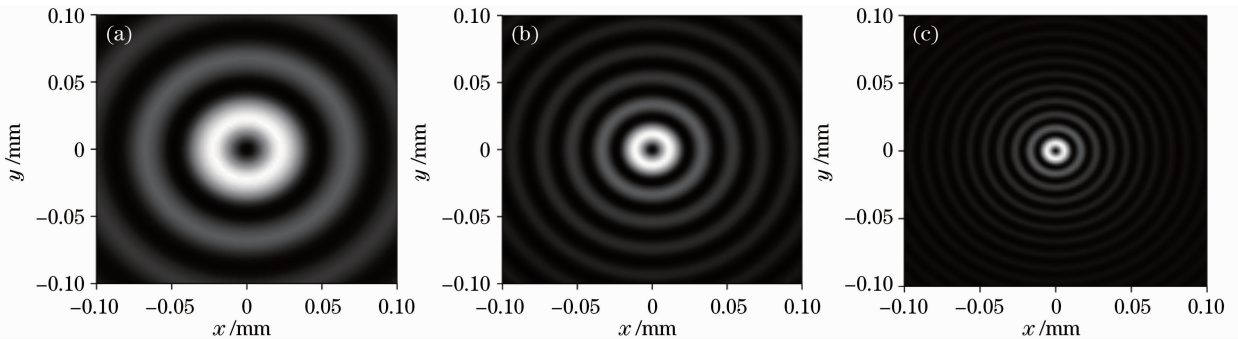


图5 不同角度轴棱锥聚焦涡旋光束所获得的高阶贝塞尔光束的光强分布。(a)  $\gamma=0.5^\circ$ ; (b)  $\gamma=1^\circ$ ; (c)  $\gamma=2^\circ$ 。

其他计算参数为  $z=250$  mm,  $m=1$

Fig. 5 Intensity distributions of high-order Bessel beams obtained by focusing a vortex beam with different cone angles of axicon. (a)  $\gamma=0.5^\circ$ ; (b)  $\gamma=1^\circ$ ; (c)  $\gamma=2^\circ$ . The other calculation parameters are  $z=250$  mm,  $m=1$

### 3 结 论

对采用轴棱锥聚焦涡旋光束产生高阶贝塞尔光束进行了研究。从理论上采用广义积分理论对聚焦进行计算。结果表明,涡旋光束经过轴棱锥聚焦后可以产生高阶贝塞尔光束,并且所获得的贝塞尔光束的阶数等于入射涡旋光束的拓扑电荷数。采用不同锥角的轴棱锥聚焦涡旋光束,发现轴棱锥的锥角越大,所得到的贝塞尔光束的暗中空光斑区域就越小。对于不同的拓扑电荷数,拓扑电荷数越大,所获得的高阶贝塞尔光束的

暗中空区域越大。同时,在轴棱锥的无衍射距离内,高阶贝塞尔光束的无衍射性很明显。

### 参 考 文 献

- 1 S. A. Tatarkova, W. Sibbett, K. Dholakia. Brownian particle in an optical potential of the washboard type[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(3): 038101
- 2 L. Paterson, M. P. Macdonald, J. Arlt *et al.*. Controlled rotation of optically trapped microscopic particle[J]. *Science*, 2001, **292**(5518): 912~914
- 3 D. G. Grier. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 810~816
- 4 Liu Yongxin, Chen Ziyang, Pu Jixiong. Diffraction characteristics of vortex beams by a fork-shaped grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302012  
刘永欣, 陈子阳, 蒲继雄. 涡旋光束经叉形光栅的衍射特性[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302012
- 5 J. Arlt, K. Dholakia. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**(1-6): 297~301
- 6 V. Garcés-Chavez, D. McGloin, H. Melville *et al.*. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. *Nature*, 2002, **419**(6903): 145~147
- 7 J. Durnin, J. J. Miceli, Y. J. H. Eberl. Diffractive-free beams[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(15): 1499~1501
- 8 J. Durnin, J. J. Miceli, Y. J. H. Eberl. Comparison of Bessel and Gaussian beams[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(2): 79~80
- 9 Gao Zenghui, Lü Baida. Propagation of nonparaxial Bessel-Gaussian beams in free space[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1732~1735  
高曾辉, 吕百达. 非傍轴贝塞尔-高斯光束在自由空间的传输[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1732~1735
- 10 J. Arlt, V. Garcés-Chavez, W. Sibbett *et al.*. Optical micromanipulation using a Bessel light beam[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **197**(4-6): 239~245
- 11 A. Ashkin, J. M. Dziedzic. Optical levitation by radiation pressure[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **19**(8): 283~285
- 12 S. Sato, Y. Harada, Y. Waseda. Optical trapping of microscopic metal particles [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(22): 1807~1809
- 13 M. P. Macdonald, L. Paterson, K. Volke-Sepulveda *et al.*. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures[J]. *Science*, 2002, **296**(5570): 1101~1103
- 14 M. V. Perez, C. Gomez-Reino, J. M. Cuadrado. Diffraction patterns and zone plates produced by thin linear axicon[J]. *Opt. Acta*, 1986, **33**(9): 1161~1176