

# 用三光束干涉模型解释锥镜产生类贝塞尔光束

雷 铭<sup>1,2</sup> 姚保利<sup>1,\*</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要** 对高斯光束通过锥镜产生类似贝塞尔光束的环形光束进行了理论分析及实验研究. 数值模拟过程中, 基于相干光干涉理论, 考虑到实际情况中锥尖不尖带来的影响, 建立了三光束干涉的数学模型. 模拟得到的光场分布与实验结果及基于菲涅尔衍射积分理论或空间光谱理论得到的零阶贝塞尔光束很接近. 这种光场具有非衍射特性, 可应用于新型光镊研究.

**关键词** 锥镜; 贝塞尔光束; 光镊

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A

## 0 引言

贝塞尔光束(Bessel beam)具有在光束传播方向保持光束直径不变的特性, 可以克服高斯光束瑞利极限的限制, 因而在微粒的三维捕获方面得到了应用, 拓展了光镊的应用范围<sup>[1~3]</sup>.

近年来, Arlt 等<sup>[4~8]</sup>观察到高斯光束通过锥镜后产生的环形光束十分类似于贝塞尔光束, 他们假设锥尖是理想的尖点并使用菲涅尔衍射积分理论分析. V. Jarutis 等<sup>[9]</sup>使用空间光谱分析的办法模拟出了拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian)光束入射锥镜后产生的任意阶贝塞尔光束, 计算结果与使用菲涅尔衍射积分得到的模拟光场吻合. 但是在其推导过程中, 贝塞尔函数是为了求解积分而被引入表达式的. 本文认为高斯光束通过锥镜后产生的类似于贝塞尔光束的环形光束是由于锥尖不尖造成的. 如果认为锥尖是理想的尖点, 可以使用双光束干涉的办法进行分析, 得到的光场分布应该是高斯包络下的余弦函数分布, 在以前的文章中对此问题进行过研究<sup>[10]</sup>, 但模拟得到的光场与实验结果吻合得不是非常好. 在实验中发现光场中心总有一个亮点存在, 这个现象用双光束干涉的办法无法解释. Depret 等人<sup>[11]</sup>也曾观察到这一现象, 认为是锥尖不尖造成的. 基于这种现象, 考虑到锥尖不尖, 对先前的双光束干涉理论进行修正, 采用三光束干涉理论处理. 这种考虑的实验依据是, 实际使用的锥镜的顶部很难制造成理想的尖点, 会透过部分光束, 正是由于透过的这一细光束, 才会在锥镜后的光场中心一直都有一个亮点, 并且一直出现到阴影区后的黑洞中心. 锥镜后的光场分布是由透过的光束与被锥镜分开的两束高斯光束进行干涉迭加的结果. 使用

三光束干涉方法得到锥镜后的光场分布, 与实验结果及零阶贝塞尔光束很接近. 与使用菲涅尔衍射积分理论或空间光谱理论的方法相比, 该方法简单, 并且具有清楚的物理图像.

## 1 理论与实验

理想贝塞尔光束的电场复振幅可表示为

$$E(r, z) = A \exp(ik_z z) J_n(k_r r) \quad (1)$$

式中  $J_n(\cdot)$  代表  $n$  阶贝塞尔函数,  $k_r$  和  $k_z$  分别表示  $k$  矢量在光束轴向与纵向的波矢分量. 贝塞尔光束的波前都是同心圆的结构, 理想贝塞尔光束可以在自由空间不扩散地传播, 因而它是一种非衍射的光束.

高斯光束通过锥镜后产生的环形光束十分类似于零阶贝塞尔光束. 高斯光束经扩束准直后垂直对称入射底角为  $\gamma$ , 厚度为  $d$  的锥镜, 光束传播方向定义为  $Z$  轴, 垂直于  $Z$  方向定义为  $X$  轴. 按照几何光学的理论, 如图 1, 入射光束经锥镜后会分为  $E_1$

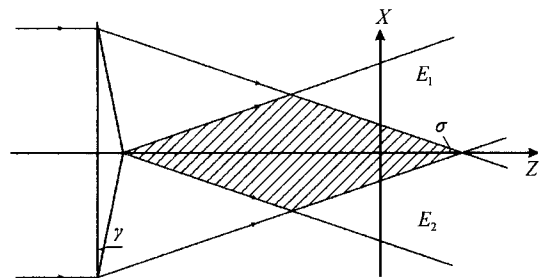


图 1 高斯光束通过理想锥镜的几何光路  
Fig. 1 Geometrical scheme of a Gaussian beam passing through an axicon with an ideal punctual vertex

和  $E_2$  两部分.  $E_1$  和  $E_2$  的复振幅表达式为

$$E_1 = A \exp(-x^2/w^2) \exp(i\phi) \quad (2)$$

$$E_2 = A \exp(-x^2/w^2) \exp(-i\phi) \quad (3)$$

式中  $w$  和  $A$  分别代表光束  $E_1, E_2$  的束腰半径和振幅; 相位  $\phi = k \sin \sigma \cdot x$ , 波矢  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  是波长,  $\sigma$  为光束  $E_1$  (或  $E_2$ ) 与  $Z$  轴的夹角. 由于锥镜的底角非

\* Tel: 029-88472069 Email: yaobl@opt.ac.cn

收稿日期: 2004-11-08

常小( $\sim 1^\circ$ ), 可以近似得到  $\sigma = (n-1)\gamma$ ,  $n$  是锥镜的折射率, 所以  $\phi = 2\pi(n-1)\gamma x/\lambda$ .

如果不考虑锥尖的影响, 那么锥镜后的光场将是  $E_1$  和  $E_2$  干涉迭加的结果, 光强可表示为

$$I = |E_1 + E_2|^2 = [2A \exp(-x^2/w^2) \cos \phi]^2 \quad (4)$$

实际上在锥镜加工过程中, 很难得到一个锥尖是理想尖点的锥镜, 锥镜的顶部会透过一部分光束, 如图 2. 因此在考虑光束干涉迭加时还应加入一项,

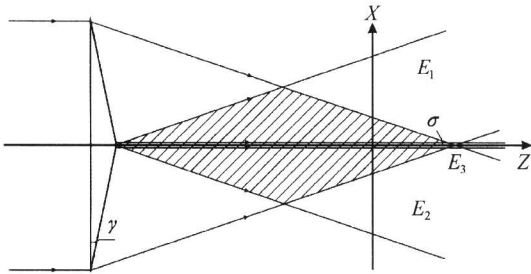


图 2 高斯光束通过非理想锥镜的几何光路  
Fig. 2 Geometrical scheme of a Gaussian beam passing through an axicon with an unideal punctual vertex  
代表从锥顶透过的光束, 假设它是高斯型的, 振幅表达式为

$$E_3 = B \exp(-x^2/v^2) \quad (5)$$

式中  $v$  和  $B$  分别代表光束  $E_3$  的束腰半径与振幅. 此时锥镜后光场强度可修正为

$$I = |E_1 + E_2 + E_3|^2 = [2A \exp(-x^2/w^2) \cdot \cos \phi + B \exp(-x^2/v^2)]^2 \quad (6)$$

为了证实上述理论, 实验上使用波长 514.5 nm 的氩离子激光器, 经扩束准直后获得直径为 10 mm 的高斯光束照射锥镜. 锥镜的底角为  $1^\circ$ , 直径 30 mm, 折射率为 1.5. 使用 CCD 记录锥镜后的光场强度分布情况.

## 2 结果与讨论

图 3 分别给出了按照式(6)计算得到的锥镜后的光强分布二维灰度图及强度分布曲线, 按照式(1)计算得到的理想贝塞尔光束光强分布, 以及实验结果图片. 这里使用灰度值作为相对光强单位是为了与实验曲线进行比较. 在计算过程中, 取光束  $E_1$  ( $E_2$ ) 与  $E_3$  的振幅分别为 1 和 1.5; 由于入射高斯光束的半径为 5 mm 而且锥尖很小,  $E_1$  ( $E_2$ ) 与  $E_3$  的束腰半径分别取 5 mm 与 0.05 mm.

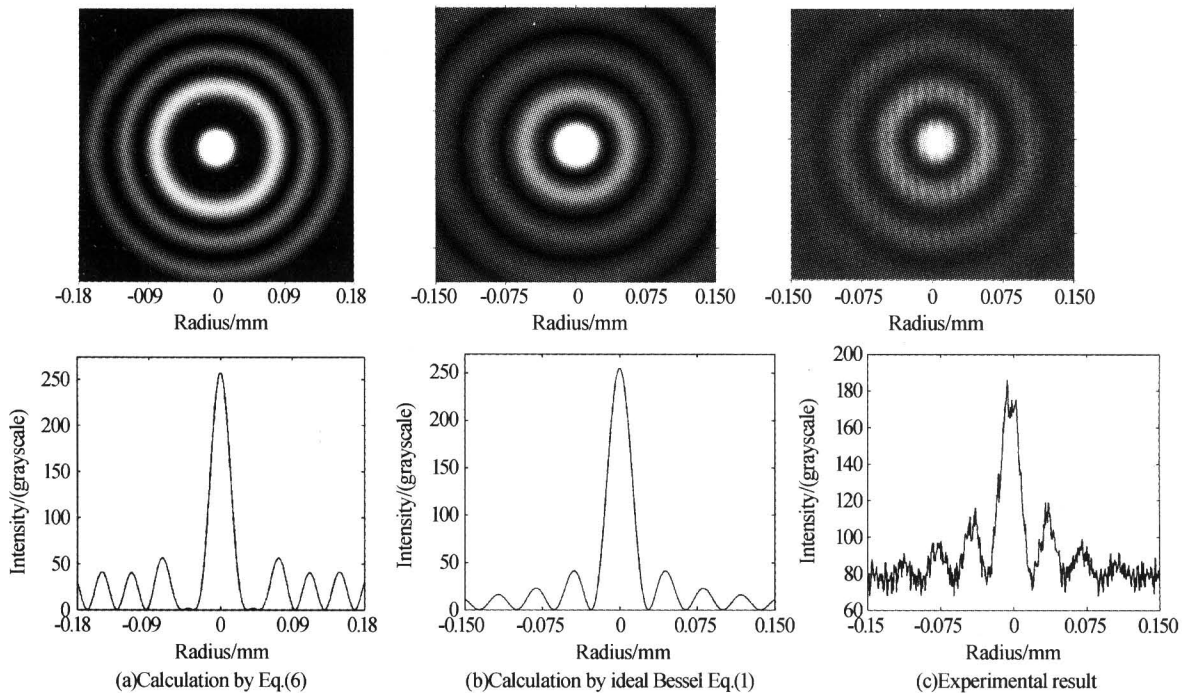


图 3 光强分布计算结果与实验结果的比较  
Fig. 3 Comparison of beam patterns and intensity profiles between theoretical calculation and experiment

可以看出, 计算结果与实验结果及理想贝塞尔光束是很接近的. 不同之处在于, 图 3(a) 中央极大与第一亮环的距离大于图 3(b) 与图 3(c) 中央极大与第一亮环的距离, 所以, 为了得到相同的光环数, 图 3(a) 中的半径计算范围稍大一些. 产生这种差别的原因是由于假设从锥尖透过的光束是高斯型的, 实际情况可能比这复杂.

图 4 给出的是实验得到的光束在锥镜后不同位置处的光斑形状. 可以看出, 在每个位置处的光斑中心都有一个比较明亮的亮点. 按照以前的分析<sup>[10]</sup>, 在图 1 或图 2 的阴影区之后, 光场分布应是一个黑洞, 而在图 4(c) 中明显可以看到也有亮点存在, 这个亮点就是由于锥尖不尖造成的透过光束. 这就是采用三光束干涉法分析锥镜后光场分布的实验依据.

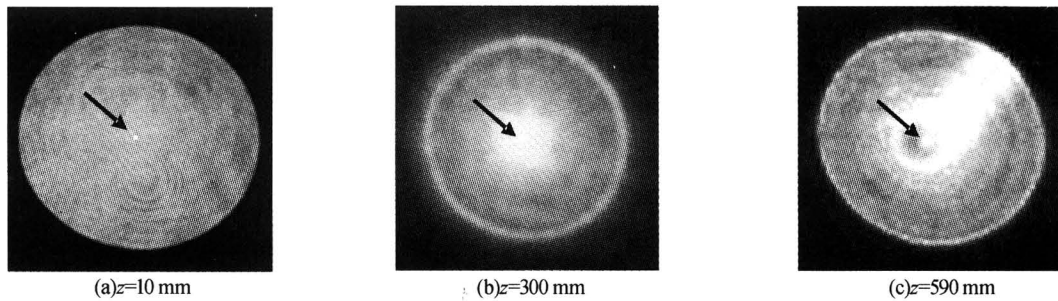


图 4 实验得到的锥镜后不同位置处的光场分布图

Fig. 4 The experimental beam patterns at different positions of Z axis behind the axicon

### 3 结论

考虑到锥尖不尖的影响,使用三光束干涉理论推导出了高斯光束入射锥镜后产生光场的解析表达式,不同于大多数文献所使用的菲涅尔衍射积分理论与傅里叶频谱分析理论,使用的方法简单,近似少,物理概念明晰,计算结果与实验结果及理想贝塞尔光束很接近。

#### 参考文献

- 1 Dholakia K, Spalding G, MacDonald M. Optical tweezers: the next generation. *Physics World*, 2002, (10): 31~35
- 2 Garces-Chavez V, McGloin D, Melville H, et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam. *Nature*, 2002, **419**(12): 145~147
- 3 McGloin D, Garces-Chavez V, Dholakia K. Interfering Bessel beams for optical micromanipulation. *Opt Lett*, 2003, **28**(8): 657~659
- 4 Arlt J, Garces-Chavez V, Sibbett W, et al. Optical micromanipulation using a Bessel light beam. *Opt Comm*,

2001, **197**: 239~245

- 5 Arlt J, Dholakia K. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon. *Opt Comm*, 2000, **177**: 297~301
- 6 Monk S, Arlt J, Robertson D A, et al. The generation of Bessel beam at millimeter-wave frequencies by use of an axicon. *Opt Comm*, 1999, **170**: 213~215
- 7 Volke-Sepulveda K, Garces-Chavez V, Chavez-Cerda S, et al. Orbital angular momentum of a high-order Bessel light beam. *J Opt B*, 2002, (4): 82~89
- 8 McQueen C A, Arlt J, Dholakia K. An experiment to study a non-diffracting light beam. *Am J Phys*, 1999, **67**(10): 912~915
- 9 Jarutis V, Paskauskas R, Stabinis A. Focusing of laguerre-gaussian beam by axicon. *Opt Comm*, 2000, **184**: 105~112
- 10 Lei Ming, Yao Baoli. Characteristics of beam profile of gaussian beam passing through an axicon. *Opt Comm*, 2004, **239**: 367~372
- 11 Depret B, Verkerk P, Hennequin D. Characterization and modeling of the hollow beam produced by a real conical lens. *Opt Comm*, 2002, **211**: 31~38

### The explanation of Bessel-like beam from axicon with three-beam interference model

Lei Ming<sup>1,2</sup>, Yao Baoli<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2004-11-08

**Abstract** A model of three-beam interference has been set up to explain the observed beam patterns which are generated by Gaussian beam passing through an axicon. The mathematical simulation is based on interferential theory, and the effect of the vertex of the axicon, is also considered. The derived equation for describing the transverse intensity distribution gives good approximation to the experimental result as well as the zero-order Bessel function. This beam is characteristic of non-diffraction and can be used to study the newly-type optical tweezers.

**Keywords** Axicon; Bessel beam; Optical tweezers



**Lei Ming** was born in April of 1978, in Xi'an, China. He graduated from technical physics department of Xidian University and got B. S. degree in 2000. He is working towards the Ph. D. degree in the State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, China Academy of Science. His research is in the area of optical tweezers.