

doi:10.3788/gzxb20184707.0708003

# 双级无衍射光束的生成理论与实验研究

杨贵洋, 马国鹭, 曾国英

(西南科技大学 制造过程测试技术省部共建教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010)

**摘 要:**为进一步完善多级无衍射光束的传输与变换理论,拓展双级无衍射光束的应用范围,根据轴锥镜法和菲涅耳衍射理论对双级无衍射光束的光场分布做了详细理论分析;基于轴锥镜法搭建生成双级无衍射光束的实验平台,获取了沿光轴传输至不同距离处的截面光斑及其光强分布,探究了平行光束不同入射倾角对无衍射光束传输变换的影响.实验结果表明:双极无衍射出射光场由四个区域组成,在干涉重合区其光强为一、二级轴锥镜出射场的耦合叠加,其余区域仍保持单级无衍射光束的传播特性,其光强大小受轴锥镜透镜的入射光阑与透镜底角影响,光斑破裂程度与平行光束的入射倾角呈正相关.本文对双极无衍射光束的空间传播特性、光强分布特性、光强影响因素等做了详细分析,对拓展多级无衍射光束的应用具有指导意义.

**关键词:**衍射理论; Bessel 光束; 轴锥镜法; 双级无衍射光; 局域空心光束

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)07-0708003-9

## Generation Theory and Experimental Study of Two Stage Non-diffracting Beam

YANG Gui-yang, MA Guo-lu, ZENG Guo-ying

(Ministry of Education Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Southwest University of Science and Technology (SWUST), Mianyang, Sichuan 621010, China)

**Abstract:** In order to complete the transmission and transformation theory of multilevel non-diffracting beam and to expand the application range of two stage non-diffracting beam, the light field distribution of two stage non-diffracting beam was analyzed in detail on the basis of the axicon method and Fresnel diffraction theory. Based on the axicon method, an experimental platform for generating two stage non-diffracting beams is constructed. The cross section spots and their light intensity distributions transmitted along the optical axis at different distances are obtained. The influence of different incidence angles of parallel beams on the propagation and transformation of non-diffracting beams is investigated. Experimental results show that the two stage non-diffracting diffraction light field is composed of four regions, in the interference overlap region, the light intensity is the superposition coupling of the diffraction fields of the first and second axicons, the rest of the region remain the propagation characteristics of the single stage non-diffracting beam. The light intensity is influenced by the incident aperture and the bottom angle of the axicon lens. The rupture degree of the spot is positively correlated with the inclination of parallel beam. In this paper, the spatial propagation characteristics, the intensity distribution characteristics and the influence factors of the light intensity are analyzed in detail, which has an important directive significance to extend the application field of multilevel non-diffracting beams.

**Key words:** Diffraction theory; Bessel beam; Axicon method; Two stage non-diffracting beam; Bottle

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61505169), 西南科技大学研究生创新基金(No. 17ycx132)资助

第一作者: 杨贵洋(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光束传输与转换的理论及应用等. Email: yangguiyang1020@163.com

通讯作者: 马国鹭(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为大尺度空间中几何量精密测量, 光电精密检测等. Email: maguolu999@163.com

导 师: 曾国英(1966-), 女, 教授, 硕士, 主要研究方向为机电一体化, 工程测试等. Email: zgywf@163.com

收稿日期: 2018-03-22; 录用日期: 2018-05-03

<http://www.photon.ac.cn>

beam

OCIS Codes: 080.4298; 050.1940; 050.1960; 110.3055; 260.1960

## 0 引言

1987年, DURNIN J 提出了场分布具有第一类零阶 Bessel 函数形式的自由空间标量波动方程特解, 描述了一种在传输过程中光束强度及尺寸不随传输距离变化的特殊光束, 后将其命名为“无衍射光束”<sup>[1-2]</sup>. 无衍射光束因其中心光斑小、方向性好、传输距离远大于相应高斯光束的瑞利距离等特点<sup>[3]</sup>, 常用于大深径比激光加工、光学准直与成像、精密光学检测、光学微操纵等领域<sup>[4-6]</sup>.

目前无衍射光束的主要生成方法有: 环缝-透镜法<sup>[1]</sup>、全息法<sup>[7]</sup>、谐振腔法<sup>[8]</sup>、轴锥镜法<sup>[9]</sup>、球面像差法<sup>[10]</sup>等五种. 其中, 轴锥镜法因其实验装置简单、转换效率高、光损伤阈值大等特点<sup>[11-12]</sup>, 广泛应用于无衍射光束的生成系统中. 国内吴逢铁等运用梯度轴棱锥或阶变轴棱锥生成了局域空心光束, 并对其光强分布与传输转换特性做了详细研究<sup>[13-18]</sup>, 国外 Ahluwalia<sup>[19]</sup> 和 Kampmann<sup>[20]</sup> 等也提出了基于双轴棱锥生成自成像局域空心光束(Bottle beam), 实现了粒子的微操作. 局域空心光束实质上是一种双极无衍射光束, 其在单级无衍射光基础上实现了两束不同波矢角光束的干涉叠加, 其光场横截面仍为类似单级无衍射光束的多级同心圆环状分布, 而在纵向却呈近似周期变化的特殊光强分布. 它不仅保持了单级无衍射光束的光学特性, 其特殊的光强分布还可实现对粒子的光学微操纵, 在生物医学、原子物理等领域已有广泛应用. 但目前, 对双级无衍射光束的生成理论、光束的传输与转换及空间光强分布特性等研究较少. 基于此, 本文基于轴锥镜法采用双级轴棱锥透镜生成同轴双级无衍射光束, 对双级无衍射光的光学传输特性作详尽分析.

## 1 双级无衍射光束的生成理论

轴棱锥透镜是一种侧面呈圆锥形绕轴对称旋转的非球面且具有线聚焦特性的光学透镜. 如图 1 所示, 一束平面波垂直入射至底角为  $\varphi$  的 Axicon 透镜底面, 经 Axicon 透镜转换形成波矢角为  $\theta$  的锥面波矢并在光轴的截面上发生干涉, 于透镜右侧生成无衍射光束. 由几何光学易知:  $\theta = (n-1)\varphi$ , 其中  $n$  为透镜折射率. 基于轴锥镜法生成单级无衍射光束的原理<sup>[21]</sup>, 本文将底角为  $\varphi$  的单级 Axicon 透镜替换成底角呈  $\varphi_1, \varphi_2$  梯度分布的双级 Axicon 透镜, 由轴棱锥法知, 图 1 最终会生成两束不同波矢角的无衍射光束, 但由于生成无衍射光束的 Axicon 透镜底角不同, 故随着纵向距离的变化, 光斑直径会因此而改变, 在两级无衍射光束干涉区域将会产生上、下对称波面的重叠区( $z_{\max 1} < z < z_{\max 2}$ ), 在此重叠区将出现特殊的干涉条纹. 其沿光轴传输方向的横截面光斑虽保持多级同心圆环状分布, 但随着纵向距离的变化圆环大小会发生相应改变. 基于轴锥镜法生成双级无衍射光束的光路如图 1 所示.

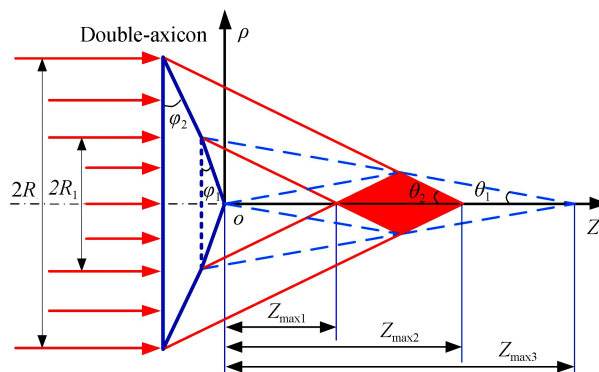


图 1 轴锥镜法生成双级无衍射光束示意图

Fig.1 Schematic diagram of two stage non-diffracting beam generated by axicon method

图中,  $R_1, R$  为一级和二级 Axicon 透镜的入射光阑,  $\varphi_1, \varphi_2$  为一、二级透镜底角,  $\theta_1, \theta_2$  为一、二级波矢角,  $z_{\max 1}$  为二级透镜临界点衍射距离,  $z_{\max 2}, z_{\max 3}$  为二级透镜与一级透镜的最长无衍射距离.

由几何光学易知, 调整不同的底角  $\varphi_1, \varphi_2$  及入射光阑  $R_1, R$  的大小, 右侧会生成沿轴向不同距离处、分布不同的无衍射光束重叠区. 本文选取其极具代表性的一种干涉重叠区作分析, 当其几何关系满足

$$\frac{R_1}{R} = \frac{1 - \tan \varphi_2 \tan \theta_2}{2 - \tan \varphi_1 \tan \theta_1 - \tan \varphi_2 \tan \theta_2} \quad (1)$$

此时其右侧无衍射光束重叠区( $z_{\max 1} < z < z_{\max 2}$ )分布如图 1 所示。

如图 1 所示,可根据入射范围  $0 < r < R_1$  和  $R_1 < r < R$  作两部分底角不同的轴棱锥透镜分析,由菲涅耳衍射理论知平面波经双级轴棱锥透镜后的光场分布为

$$E_1(r_1, z) = \frac{2\pi \exp(ikz)}{i\lambda z} \int_0^{R_1} J_0\left(\frac{kr r_1}{z}\right) \exp\left[\frac{ik}{2z}(r^2 + r_1^2) - ik\theta_1 r\right] r dr \quad (2)$$

$$E_2(r_1, z) = \frac{2\pi \exp(ikz)}{i\lambda z} \int_{R_1}^R J_0\left(\frac{kr r_1}{z}\right) \exp\left[\frac{ik}{2z}(r^2 + r_1^2) - ik\theta_2 r\right] r dr \quad (3)$$

式中,  $r, r_1$  为双级轴棱锥入射面和光场接收面的径向坐标,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\theta = (n-1)\varphi$ ,  $n$  为透镜折射率,  $J_0$  是第一类零阶 Bessel 函数<sup>[22]</sup>, 在柱坐标系下, 对波动方程分离变量无法用初等函数表示而以 Bessel 函数来表征其解, 其函数图像呈振荡衰减分布, 任意两解都线性无关。则其相位分布为

$$f_1(r) = \frac{1}{2z}(r^2 + r_1^2) - \theta_1 r, \quad f_2(r) = \frac{1}{2z}(r^2 + r_1^2) - \theta_2 r \quad (4)$$

根据稳相法<sup>[23]</sup>的相关理论, 针对相位因子快速振荡积分而采取渐进估计方法, 知其稳相点为

$$r_{p1} = (n-1)\varphi_1 z, \quad r_{p2} = (n-1)\varphi_2 z \quad (5)$$

由菲涅耳衍射理论知平面波经双级轴棱锥透镜沿光轴传输至不同距离  $z$  处的复振幅不同, 主要分为如下四个区域:

1) 在  $0 < z \leq z_{\max 1}$  区域内,  $r_{p1} < R_1$ , 此时出射光场为一级锥镜生成的单级无衍射光场为

$$E(r_1, z) = \frac{2\pi \exp(ikz)}{i\lambda z} \int_0^{R_1} J_0\left(\frac{kr r_1}{z}\right) \exp\left[\frac{ik}{2z}(r^2 + r_1^2) - ik\theta_1 r\right] r dr \quad (6)$$

由稳相法理论知

$$E(r_1, z) \approx k\theta_1 \sqrt{\lambda z} J_0(k\theta_1 r_1) \exp\left(ikz + \frac{ik}{2z}r_1^2 - \frac{ik}{2}\theta_1^2 z - i\frac{\pi}{4}\right) \quad (7)$$

在此范围内的光强为

$$I(r_1, z) \approx k^2 \theta_1^2 \lambda z |J_0(k\theta_1 r_1)|^2 \quad (8)$$

2) 在  $z_{\max 1} < z \leq z_{\max 2}$  区域内,  $r_{p1} < R_1, R_1 < r_{p2} < R$ , 此时出射光场为二级锥镜生成光场与一级锥镜生成光场的干涉叠加

$$E(r_1, z) = E_1(r_1, z) + E_2(r_1, z) \quad (9)$$

在此范围内的光强为

$$I(r_1, z) \approx k^2 \theta_1^2 \lambda z |J_0(k\theta_1 r_1)|^2 + k^2 \theta_2^2 \lambda z |J_0(k\theta_2 r_1)|^2 \quad (10)$$

3) 在  $z_{\max 2} < z < z_{\max 3}$  区域内,  $r_{p1} < R_1$ , 此时出射光场为一级锥镜生成的单级无衍射光场  $E(r_1, z)$ , 在此范围内的光强为

$$I(r_1, z) \approx k^2 (n-1)^2 \varphi_1^2 \lambda z |J_0[k(n-1)\varphi_1 r_1]|^2 \quad (11)$$

4) 在  $z = z_{\max 3}$  区域内,  $r_{p1} = R_1$ , 此时出射光场为  $E(r_1, z) \approx \frac{1}{2}E_1(r_1, z)$ , 在此范围内的光强为

$$I(r_1, z) \approx \frac{1}{4}k^2 \theta_1^2 \lambda z |J_0(k\theta_1 r_1)|^2 \quad (12)$$

上述四个区域中, 一、三区域为单级无衍射光束光场, 该区域光束光强分布与传播特性已有众多学者进行了讨论; 本文着重关注第二区域的两级无衍射光束光场干涉叠加后的光强分布与传输特性, 以及第四区域临界光场的光强分布。

## 2 双级无衍射光束的模拟分析

基于上述双极无衍射光束生成理论, 模拟平面波经双级轴棱锥透镜后的空间光场分布, 选取 He-Ne 激光作为入射光源, 其波长  $\lambda = 632.8$  nm, 透镜折射率  $n = 1.49$ , 两级透镜底角  $\varphi_1 = 0.05^\circ, \varphi_2 = 0.075^\circ$ , 其入射光阑  $R_1 = 10$  mm、 $R = 20$  mm, 则根据式(7)~(12)进行仿真可得双级无衍射光束的空间光强分布及轴上光强

分布,如图 2 所示.

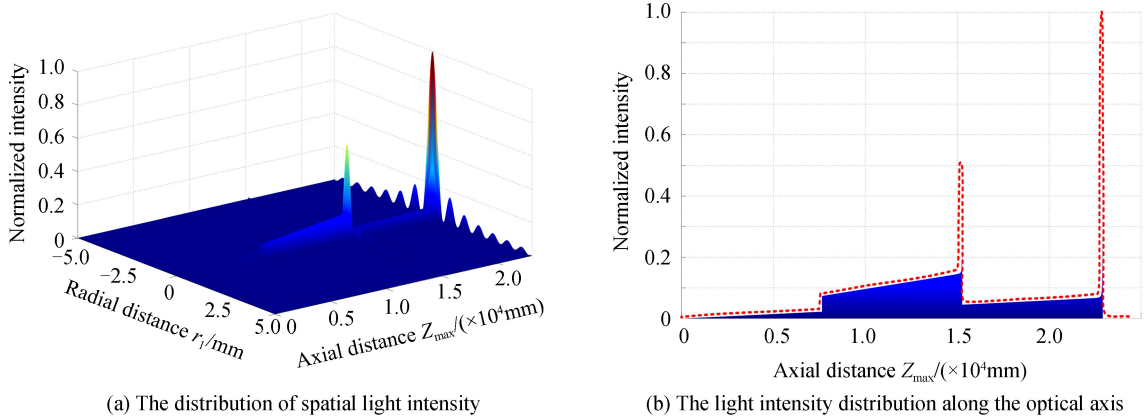
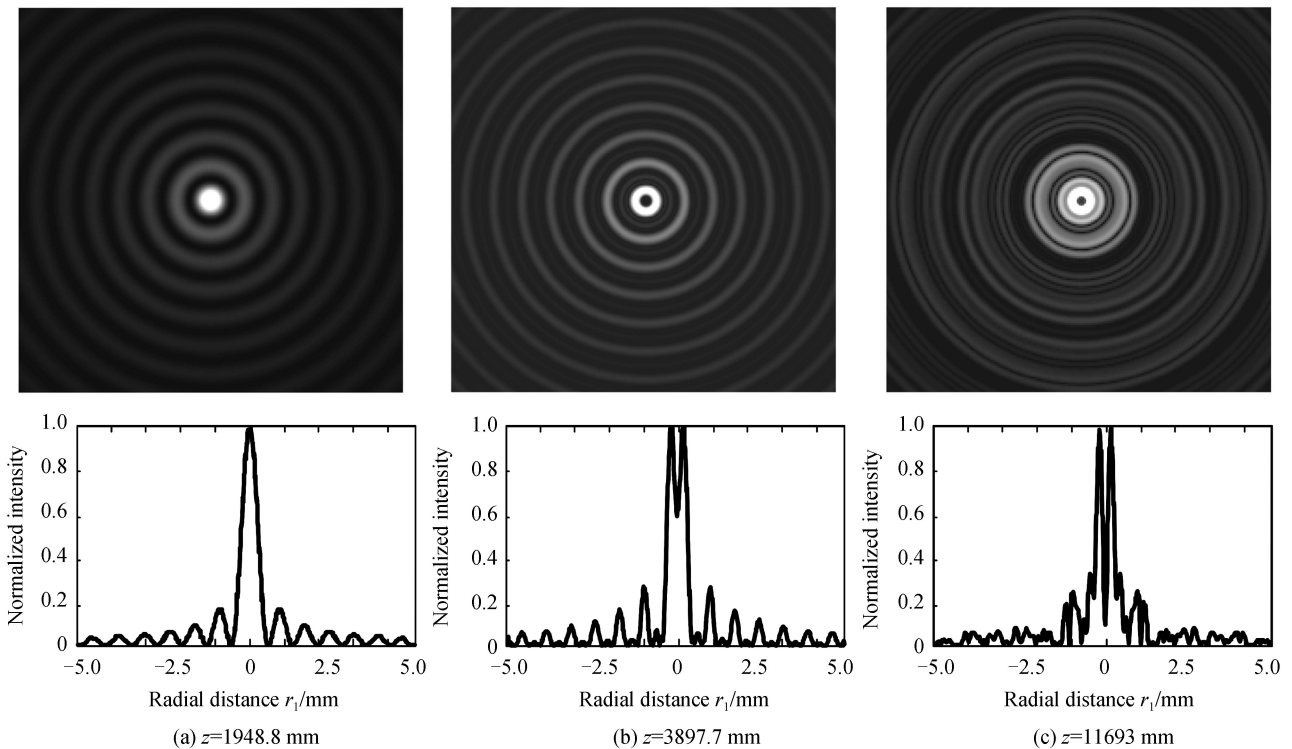


图 2 双级无衍射光束光强分布  
Fig.2 The light intensity distribution of two stage non-diffracting beams

如图 2 所示,无衍射光束沿光轴传输距离在  $0 < z \leq z_{max1}$  和  $z_{max2} < z \leq z_{max3}$  范围内时,不存在光强干涉叠加区域,该区域光场是由底角为  $\varphi_1$ ,入射光阑为  $R_1$  的一级轴棱锥透镜生成的单级无衍射光束,其轴上光强随传输距离  $z$  的增大呈振荡现象,在一级轴棱锥透镜的最长无衍射距离  $z_{max3}$  处,急剧增加后衰减;在  $z_{max1} < z \leq z_{max2}$  范围内,经一、二级轴棱锥透镜生成的无衍射光束在此区间内干涉叠加生成新的无衍射光束,在传输过程中由于相位的变化,其干涉重合区光强在原有一级轴棱锥衍射光强基础上可能叠加增强,也可能叠加减弱.由式(10)知叠加光强大小由一、二级轴棱锥透镜底角和入射光阑大小共同决定.根据衍射理论,分析沿光轴传输的四个不同区域中其截面光强分布的变化情况,由几何光学计算易知  $z_{max} \approx L / [(n-1)\varphi]$ ,其中  $L$  为入射光阑大小,则  $z_{max1} \approx 3\ 897.7\ \text{mm}$ ,  $z_{max2} \approx 19\ 488.4\ \text{mm}$ ,  $z_{max3} \approx 23\ 386\ \text{mm}$ .模拟沿光轴传输至不同距离处的截面光斑,采集的截面光斑区域为  $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ ,同时提取其光强分布曲线如图3中(a)~(e)所示.



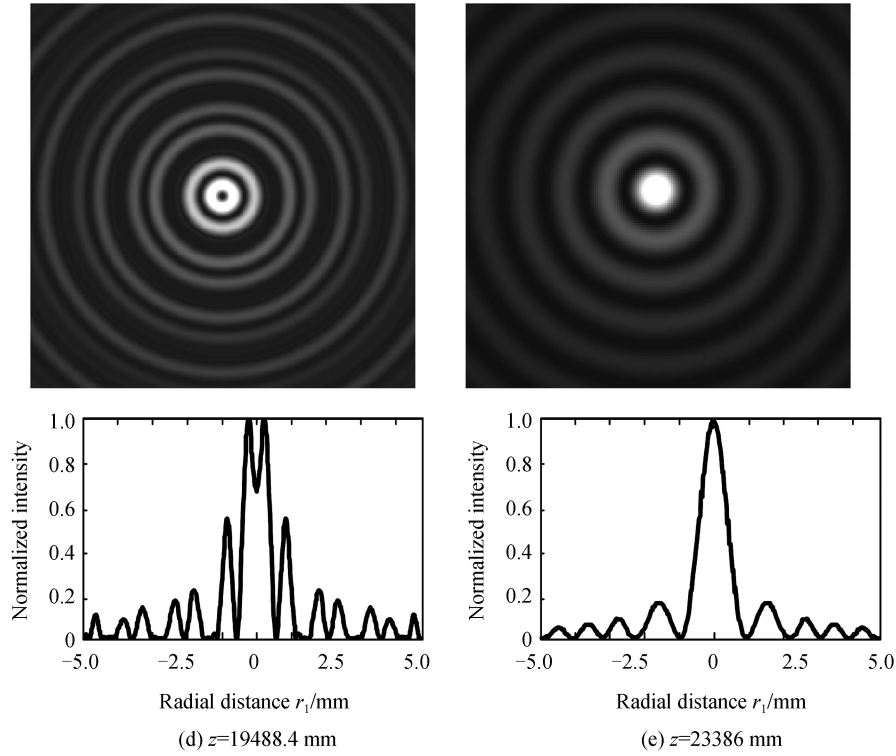


图 3 双级无衍射光束沿光轴传输至不同距离处其截面光斑及光强分布

Fig.3 The cross section spot and light intensity distribution of two stage non-diffracting beams along the optical axis

如图 3(a) 和 3(e) 所示,在非干涉叠加区域  $0 < z \leq z_{\max 1}$  和  $z_{\max 2} < z \leq z_{\max 3}$  范围内,其截面光斑(a)、(e)仍保持单级无衍射光束的多级同心圆环状均匀分布,其截面光强分布曲线服从第一类零阶 Bessel 函数分布.在干涉叠加区域  $z_{\max 1} < z \leq z_{\max 2}$ ,如图 3(b)、(c)、(d) 所示,其沿光轴传输方向的横截面光斑不同于单级轴棱锥透镜的多级同心圆环均匀分布,由于两级透镜底角的差异,在光强重合区叠加生成新的特殊的干涉条纹.同时,在干涉叠加过程中,其光强在一级无衍射光强基础上振荡变化,而光强分布曲线也不再服从第一类零阶 Bessel 函数分布.基于亥姆霍兹波动方程,结合塔尔伯特距离<sup>[24]</sup>知光场叠加区振荡周期为  $Z_T = \left| 2\pi / [\sqrt{k^2(1-\theta_1)^2} - \sqrt{k^2(1-\theta_2)^2}] \right| \approx 5\ 537.3\ \text{mm}$ ,根据该理论可知振荡周期与两级无衍射光束的波矢角  $\theta$  有关,进而可通过调节两级轴棱锥底角  $\varphi$  或透镜折射率  $n$  的大小来改变其光强振荡周期分布.

### 3 双级无衍射光束的光强分布实验验证

为验证上述理论分析,进行相关测试实验.本实验采用的双级轴棱锥透镜由中科院长春光机所定制加工的亚克力透镜,其底角分别为  $\varphi_1 = 0.05^\circ$ ,  $\varphi_2 = 0.075^\circ$ ,直径 40 mm,两级锥角入射光阑均匀分布,透镜折射率  $n = 1.49$ ,入射激光波长为 632.8 nm.图像传感器采用 basler acA2040-25gm,光敏面大小为 11.3 mm  $\times$  11.3 mm,其像素尺寸为 5.5  $\mu\text{m}$   $\times$  5.5  $\mu\text{m}$ ,采集的实验结果如图 4 所示.

由图 4 可知,在非干涉叠加区域  $0 < z \leq z_{\max 1}$  和  $z_{\max 2} < z \leq z_{\max 3}$  范围内,其截面光斑图(a)、(e)仍保持为一中心亮斑和均匀分布的多级同心圆环状,实验采集的光强分布与理论模拟较为接近,近似 Bessel 函数分布.在干涉叠加区域  $z_{\max 1} < z \leq z_{\max 2}$ ,截面光斑图(b)、(c)、(d)中光斑分布因存在叠加干涉而非多级同心圆环的均匀分布状,在(c)中可明显观察到 Bottle beam,其截面光强分布曲线也不再服从 Bessel 分布,与理论模拟基本一致.同时,该截面光强分布曲线也象征着该截面光强的势阱能分布,可表征其光学微操纵的能力,进而可作为光镊在不同应用环境中的参考.同时,实验获取的光斑与理论模拟光斑也存在细微差异,由硬边圆环衍射理论<sup>[25]</sup>知,当传输距离较长时轴棱锥透镜表面微观形貌质量对光斑分布影响较大.如图 4(a)~(e)所示,沿光轴传输至不同距离处获得的光斑其光强比理论模拟整体要稍低,其原因可能是锥面面型的加工误差、光路中透镜的吸收、激光入射角度的倾斜和测试环境中微粒对激光的散射等造成的.

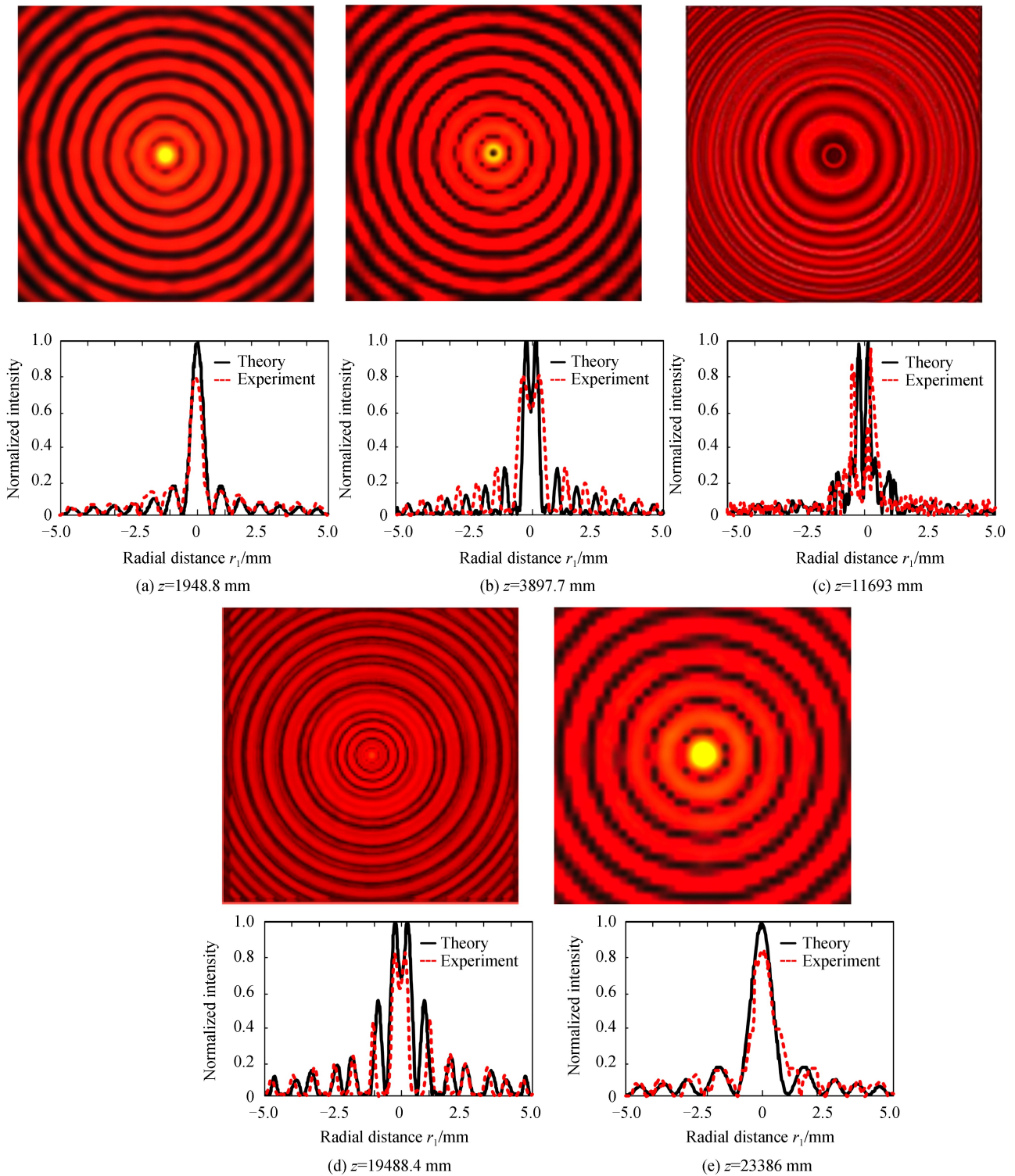


图4 双级无衍射光束沿光轴传输至不同距离处其截面光斑及光强分布

Fig.4 The cross section spot and light intensity distribution of two stage non-diffracting beams along the optical axis

同时,在搭建生成无衍射光束实验平台过程中,发现所捕获的无衍射光束截面光斑其中心区域时而呈现“棋盘格”状,如图 6(b)、(c)、(d)所示.基于轴锥镜法生成无衍射光束原理,理想的无衍射光束生成过程为: He-Ne 激光器发出的激光经准直扩束后,以平面波的形式垂直入射至 Axicon 透镜底面,如图 5(a)所示,但在实际光路搭建过程中,由于入射光束的倾斜或 Axicon 透镜安装倾斜等因素的存在而难以保证入射光束与 Axicon 透镜底面的绝对垂直,进而造成无衍射光束生成过程中平行光束相对于 Axicon 透镜底面的倾斜入射产生,如图 5(b)所示,则在轴棱锥透镜右侧衍射场其截面光斑中心区域出现“棋盘格”现象,该现象也被称

为“矩形栅格效应”,其产生的主要原因是:随着入射倾角  $\eta$  的增大而导致光线斜距受入射角度引起的光程差在纵向截面上迅速接近入射光束的半个波长,此时光斑中心区域内的圆形特征将被破坏,但在距离光斑中心较远的区域依然保持为同心圆环状分布,近似为第一类零阶 Bessel 函数特性.若要保证入射倾角增加时中心光斑不破裂,则需使倾斜衍射场的零阶 Bessel 函数的零级衍射区范围不大于第一类零阶 Bessel 函数的第一个零点值即可<sup>[22]</sup>.

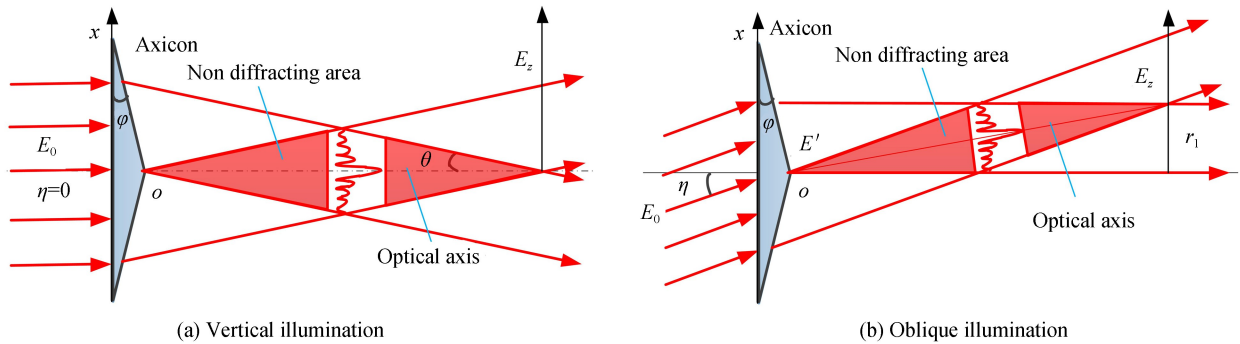


图 5 平面波照射 Axicon 无衍射光斑中心的轨迹  
Fig.5 The plane wave irradiates the path of Axicon non-diffracting spot center

基于赫姆霍兹波动方程理论,两级透镜由于底角差异的存在,造成其初始相位不同,而入射激光的波长一致,故在干涉叠加区中始终存在一定的相位差,因此在该区域“棋盘格”现象虽存在但会削弱,所以并不明显.故在本次试验采集选取第一区域即单级无衍射光束区域传输距离  $z=1\ 500\ \text{mm}$  处,入射光束倾斜角调整台为 Zolix 的 PSAG15-65 精密角位移台,其行程范围为  $\pm 15^\circ$ ,调整精度为  $0.1^\circ$ ,在同一传输距离  $z$  处采集不同倾角入射时的截面光斑,并提取其截面光强分布如图 6 所示.

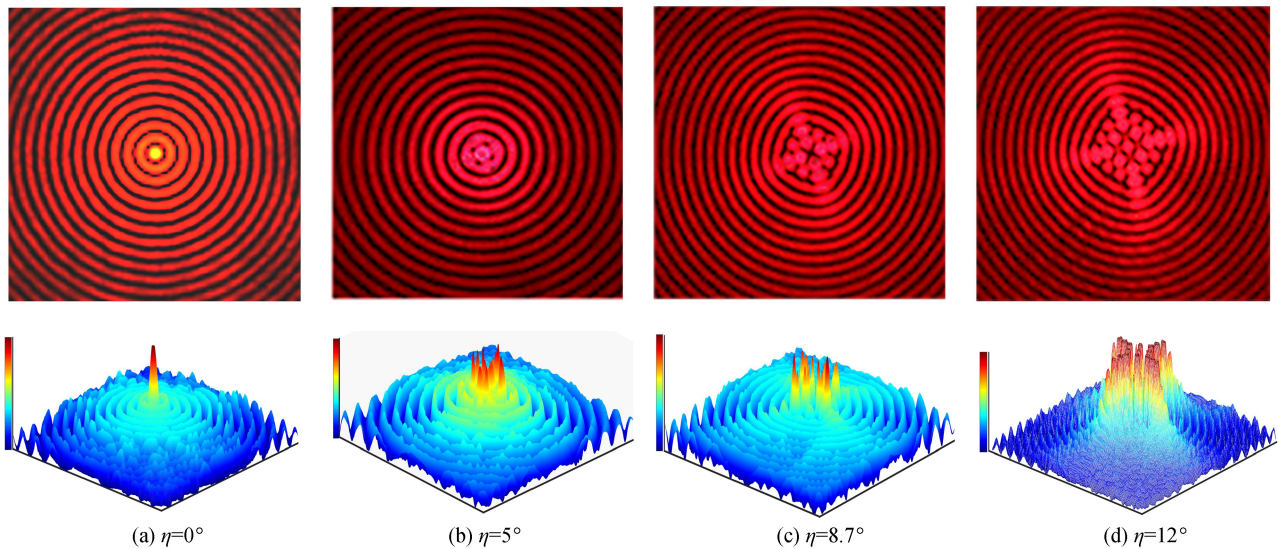


图 6 不同入射倾角时的截面光斑及其光强分布  
Fig.6 The light intensity distribution of the cross section of different inclinations

如图 6 所示,当平行照射光束的入射倾角  $\eta$  逐渐增大时,中心光斑区域遭受破坏的程度也愈加严重,不再呈如图 6(a) 般均匀分布的多级同心圆环条纹状,而呈现类似图 6(b)~(d) 中“棋盘格”分布状特征;而且当入射倾角逐渐增大时,中心光斑分裂愈加严重,“棋盘格”特征破坏的中心环数也越来越多,这将严重影响并改变无衍射光束的光学特性,因此在实际工程应用中,运用无衍射光束时要尤其注意调整并标定好其入射角范围,以免影响其测量精度.

#### 4 结论

基于轴锥镜法生成单级无衍射光束的原理,本文搭载底角呈梯度分布的 Double-Axicon 透镜生成了同

轴双极无衍射光束.根据菲涅耳衍射理论和稳相法,对同轴双极无衍射光束的空间传播特性、光强分布特性及光强影响因素等做了详细理论分析,并重点探究了两级轴棱锥出射光场的干涉叠加区光强耦合分布情况,结合塔尔博特效应对相干叠加区域的光强振荡周期和生成局域空心光束的演变过程做了仔细推导.同时,基于双级无衍射光束的生成实验平台采集了沿光轴传输至不同距离处的截面光斑,并与理论模拟对比分析了其光强分布,实验表明:双极无衍射光束出射光场分四个区域,在干涉叠加区为一、二级无衍射光束的干涉耦合叠加,其截面光斑呈现非均匀分布多级条纹状,该区域光强大小与两级轴棱锥的入射光阑与透镜底角大小有关,在其他区域仍保持单级无衍射光束的光学特征.与此同时,分析了平行光以一定倾角入射至 Axicon 透镜底部对无衍射光束的生成影响,这对多级无衍射光束应用于大尺度空间精密测量、粒子微操纵等领域具有重要的指导意义.

### 参考文献

- [1] DURNIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffracting-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58** (15): 1499-1501.
- [2] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams[J]. *Journal of the Optical Society of American A*, 1987, **4** (4): 651-654.
- [3] DU Tuan-jie, WU Feng-tie, WANG Tao, *et al.* Theoretical modulation and experiment on the self-reconstruction of periodic bottle beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34** (1): 137-141.  
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): 137-141.
- [4] MITRA S, CHANAL M, CLADY R, *et al.* Millijoule femtosecond micro-Bessel beams for ultra-high aspect ratio machining[J]. *Applied Optics*, 2015, **54** (24): 7358-7365.
- [5] MA Guo-lu, ZENG Guo-ying, ZHAO Bin. Arago-poisson diffraction spot observed in the shadow area of an axicon lens [J]. *Journal of Optics*, 2015, **44** (4): 391-396.
- [6] MA Guo-lu, ZENG Guo-ying. Research and uncertainty analysis of probe based on non-diffracting beam for Measuring Coordinates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35** (5): 189-196.  
马国鹭, 曾国英. 基于无衍射探针的空间坐标测量及其不确定度分析[J]. *光学学报*, 2015, **35** (5): 189-196.
- [7] LU Y, JIANG B. Arrays of Gaussian vortex, Bessel and Airy beams by computer-generated hologram[J]. *Optics Communication*, 2016, **363**: 85-90.
- [8] WU Ping-hui. Research on the mechanism and method of Bessel beams[D]. Hangzhou: College of optical science and engineering, Zhejiang University, 2016.  
吴平辉. Bessel 光束的机理及方法研究[D]. 杭州: 浙江大学光电科学与工程学院, 2016.
- [9] ZHANG Q, CHENGX M. Diffraction-free, self-reconstructing Bessel beam generation using thermal nonlinear optical effect[J]. *Applied Physics Letter*. 2017, **111** (16): 161103.
- [10] BURVALL A, KOLACZ K. Lens axicons in oblique illumination[J]. *Applied Optics*, 2007, **46** (3): 312-318.
- [11] MA Guo-lu, LIU LI-xian, ZHAO Bin. Measurement and automatic calibration of spatial incident angle based on non-diffracting beam[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, **37** (8): 1906-1912.  
马国鹭, 刘丽贤, 赵斌. 基于无衍射光的空间入射角测量及其自动标定[J]. *仪器仪表学报*, 2016, **37** (8): 1906-1912.
- [12] MA Guo-lu, ZENG Guo-ying, ZHAO Bin. Measurement of space coordinates in hidden parts by combining non-diffracting attitude probe and total station. [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23** (2): 363-370.  
马国鹭, 曾国英, 赵斌. 基于无衍射姿态探针和全站仪组合测量空间隐藏坐标[J]. *光学精密工程*, 2015, **23** (2): 363-370.
- [13] WU Feng-tie, JIANG Xin-guang, LIU Bin, *et al.* Single bottle beam generated by a gradient axicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58** (4): 2410-2414.  
吴逢铁, 江新光, 刘彬, 等. 梯度轴棱锥产生单个 Bottle beam[J]. *物理学报*, 2009, **58** (4): 2410-2414.
- [14] WU Feng-tie, LIU Bin, LU Wen-he, *et al.* Experiment study on bottle beam generated by interfering Bessel beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36** (11): 2899-2901.  
吴逢铁, 刘彬, 卢文和, 等. 贝塞耳光束相干产生局域空心光束的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36** (11): 2899-2901.
- [15] MA Liang, WU Feng-tie. A bottle beam generated by a step refractive index axicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59** (9): 6096-6100.  
马亮, 吴逢铁. 阶变折射率轴棱锥产生局域空心光束[J]. *物理学报*, 2010, **59** (9): 6096-6100.
- [16] XIE Xiao-xia, WU Feng-tie, Li dong. Effect of bifocal lens on propagation of Bessel beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63** (18): 29-35.  
谢晓霞, 吴逢铁, 李冬. 双焦透镜对 Bessel 光束传输的影响[J]. *物理学报*, 2014, **63** (18): 29-35.
- [17] FENG Cong, WU Feng-tie, XIE Xiao-xia. High-order Bessel beam focused by cylindrical lens generated caustic optical beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45** (12): 1226002.  
冯聪, 吴逢铁, 谢晓霞. 柱透镜聚焦高阶 Bessel 光束产生焦散光束[J]. *光子学报*, 2016, **45** (12): 1226002.
- [18] XIE Xiao-xia, JI Jia-wei, WANG Shuo-chen, *et al.* The focusing characteristics of Mathieu beam propagating through axicon[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45** (2): 0226002.



- 谢晓霞,纪佳位,王硕琛,等.无衍射 Mathieu 光束经轴棱锥的聚焦特性[J]. 光子学报,2016, **45** (2):0226002.
- [19] AHLUWALIA B P S, CHEONG W C, YUAN X C, *et al.* Design and fabrication of a double-axicon for generation of tailorable self-imaged three-dimensional intensity voids[J]. *Optics Letters*, 2006, **31** (7): 987-989.
- [20] KAMPMANN R, CHALLA K. Optical system for trapping particles in air[J]. *Applied Optics*, 2014, **53** (4): 777-784.
- [21] SCOTT G, MCARDLE N. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon [J]. *Optical Engineering*, 1992, **59** (31): 2640-2643.
- [22] 刘式适,刘式达.特殊函数[M]. 二版. 北京:气象出版社,2002. 386-426.
- [23] MANDEL L, WOLF E, Optical coherence and quantum optics[M]. Cambridge University Press, New York, 1995: 128-141.
- [24] WU Feng-tie, ZENG Xia-hui. Bottle beam with Talbot effect generated by interfering bessel beams[J]. *Acta Optica Sinica*,2008, **28** (1): 174-178.  
吴逢铁,曾夏辉.相干贝塞尔光产生具有塔尔博特效应的局域空心光束[J]. 光学学报,2008, **28** (1):174-178.
- [25] MA Guo-lu, LIU LI-xian, YANG Gui-yang. Generating method of non-diffracting beam with long-distance propagation and controllable parameters[J]. *Chinese Optics*, 2018, **11** (1): 100-107.  
马国鹭,刘丽贤,杨贵洋,赵斌.参数可控长距无衍射光束的生成方法研究[J]. 中国光学,2018, **11** (1):100-107.

---

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61505169), and the Postgraduate Innovation Fund Project by Southwest University of Science and Technology (No.17yes132)

引用格式: YANG Gui-yang, MA Guo-lu, ZENG Guo-ying. Generation Theory and Experimental Study of Two Stage Non-diffracting Beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0708003  
杨贵洋,马国鹭,曾国英.双级无衍射光束的生成理论与实验研究[J].光子学报,2018,**47**(7):0708003