

doi: 10.3788/gzxb20184707.0708004

# 部分相干焦散光束的形成及其相干特性

杨艳飞, 吴逢铁, 胡汉青, 胡润, 朱清智

(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:** 提出利用交叉谱密度函数描述焦散光束, 将焦散光束的研究范围从相干光拓展到部分相干光领域. 结合菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式, 导出焦散光束在自由空间中的传输表达式. 理论分析了光束射入不同倾斜角度轴棱锥引起的像散对焦散光束的影响, 并设计相关实验进行了验证, 实验结果与数值模拟相吻合. 进一步研究入射光场相干性对焦散光束的影响, 发现随着入射光场空间相干长度的降低, 焦散光强的明暗分布会慢慢变模糊, 光束中心的光点阵列逐渐消失.

**关键词:** 部分相干; 交叉谱密度; 焦散光束; 轴棱锥; 空间相干长度

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)07-0708004-8

## Generation of Partially Coherent Caustic Beam and Its Spatial Correlation Properties

YANG Yan-fei, WU Feng-tie, HU Han-qing, HU Run, ZHU Qing-zhi

(Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

**Abstract:** A new method is introduced by using the cross-spectral density function to describe the caustics beam, which is extended from fully coherent cases to the field of partially coherent cases for the first time. And the propagation formula of caustics beam is derived in the free space combined with the Fresnel Kirchhoff diffraction integral theory. The influence of astigmatism introduced by tilted axicon at various inclination angles on partially coherent caustic beam with respect to the propagation axis was studied theoretically and experimentally. Furthermore, the partially coherent caustics beam is investigated that is effected by the field coherence on the partially coherent caustic beam. Results show that the intensity contrast ratio between light focus and the surrounding dark regions can be reduced with the decrease of the spatial coherent lengths.

**Key words:** Partially coherence; Cross-spectral density function; Caustics beam; Axicon; Spatial coherent length

**OCIS Codes:** 080.4298; 070.4560; 220.3620; 030.1640

## 0 引言

自激光诞生起, 激光的光场调控便一直是研究的热门课题. 为满足实际应用, 研究人员通过波动方程不断寻求具有特殊物理性质的新型光场, 如无衍射光束、涡旋光束、Pearcey 光束等. 1987 年 DURIN J 教授<sup>[1]</sup>在实验室内产生第一束无衍射贝塞尔光束(Bessel beam), 因其光束具有无衍射、不扩散以及自重建等特性而迅速引起广泛关注. 而后更是被应用于粒子微操控<sup>[2]</sup>、激光导管<sup>[3]</sup>、光学清扫<sup>[4]</sup>、量子通信<sup>[5]</sup>、立体成像等领域<sup>[6]</sup>. 目前产生无衍射光束的方案有很多, 其中轴棱锥因其装置简单、能量利用率高的特点, 被人们广泛用于产生无衍射 Bessel 光束.

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 11774103), 国家自然科学基金青年基金(No. 61605049), 福建省科技重大项目(No. 2016H6016)资助

**第一作者:** 杨艳飞(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光束传输与变换. Email: 568185781@qq.com

**导师(通讯作者):** 吴逢铁(1958—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光束传输与变换. Email: fengtie@hqu.edu.cn

**收稿日期:** 2018-02-01; **录用日期:** 2018-05-03

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

人们在对本塞尔光束的实验研究中发现,轴棱锥的椭圆误差或光束的倾斜入射都会导致 Bessel 光束中心向外环分裂,从而产生焦散光束<sup>[7-8]</sup>.由于焦散光束的新颖空间光场分布、独特的光学特性以及实际应用价值<sup>[9-11]</sup>,而日益成为一个热门的研究课题.在过去几年中,科学家们对焦散光束不断深入研究<sup>[12-15]</sup>.相关研究方案相继被提出,如斜入射法<sup>[12]</sup>、柱透镜-轴棱锥法<sup>[13]</sup>、空间光调制器法<sup>[14]</sup>等;其在多层粒子囚禁<sup>[16]</sup>、拓扑电荷数检测<sup>[17]</sup>及大景深成像<sup>[18]</sup>等潜在应用前景也不断被挖掘.目前关于焦散光束的研究工作大都局限于相干光领域,相关理论描述及光学性质的讨论也都基于相干光理论.而对部分相干焦散光束的研究尚无报道.与完全相干光相比,部分相干光在自由空间具有光强均匀度好、抗散斑能力强<sup>[19-20]</sup>等优点,在很多方面具有重要的应用价值,如自由空间光通信、惯性约束核聚变、激光涂敷等.

本文提出一种产生部分相干焦散光束的实验方案,即通过一束平行的部分相干光正入射倾斜轴棱锥获得焦散光束.理论上引入交叉谱密度函数探讨入射光场的像散及空间相干长度对焦散光束的影响,并研究和讨论了部分相干焦散光束的传输特性.

## 1 理论分析

部分相干焦散光束的形成原理如图 1 所示.一束平行的部分相干光正入射倾斜轴棱锥后,受像散的影响,贝塞尔光束的中心光斑逐渐向外环对称分裂,从而形成部分相干焦散光束.实验上,用激光照射旋转毛玻璃及长距离传输的方式产生部分相干光,其空间相干性分布与高斯函数基本一致;因此,可引用高斯-谢尔模型描述该部分相干光束的传输特性<sup>[21]</sup>.

轴棱锥前,部分相干光的交叉谱密度函数为<sup>[22]</sup>

$$W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, \xi_1, \xi_2, \omega) = \exp\left(-\frac{\boldsymbol{\rho}_1^2 + \boldsymbol{\rho}_2^2}{\omega_0^2}\right) \exp\left[-\frac{\boldsymbol{\rho}_1^2 + \boldsymbol{\rho}_2^2 - 2\boldsymbol{\rho}_1 \cdot \boldsymbol{\rho}_2 \cos(\xi_2 - \xi_1)}{2\sigma_0^2}\right] \quad (1)$$

式中,  $(\boldsymbol{\rho}_1, \xi_1)$  和  $(\boldsymbol{\rho}_2, \xi_2)$  分别是轴棱锥前表面(即图 1 中的平面  $oxy$ )任意两点的位置坐标;  $\omega$  为光频率,  $\omega_0$  为束腰半径,  $\sigma_0$  为横向相干长度.

当一束准单色平面光波正入射沿  $x$  轴方向倾斜的轴棱锥时(见图 1),根据轴棱锥的透过率函数<sup>[23]</sup>,出射的光场表达示为

$$E(\boldsymbol{\rho}, \xi) = \exp(ik\rho \cos \xi \sin \theta) \exp[-ik(n-1)\gamma\rho] \quad (2)$$

式中,  $\theta$  是轴棱锥沿  $x$  轴方向倾斜的角度,  $n$  和  $\gamma$  分别对应轴棱锥折射率与底角.

经过轴棱锥后,交叉谱密度函数为

$$W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, \xi_1, \xi_2, \omega) = \langle E^*(\boldsymbol{\rho}_1, \xi_1, \omega) E(\boldsymbol{\rho}_2, \xi_2, \omega) \rangle \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3),可得到轴棱锥后初始光场的交叉谱密度函数为

$$W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, \xi_1, \xi_2, z=0) = \exp\left(-\frac{\boldsymbol{\rho}_1^2 + \boldsymbol{\rho}_2^2}{\omega_0^2}\right) \exp\left[-\frac{\boldsymbol{\rho}_1^2 + \boldsymbol{\rho}_2^2 - 2\boldsymbol{\rho}_1 \cdot \boldsymbol{\rho}_2 \cos(\xi_2 - \xi_1)}{2\sigma_0^2}\right] \times \quad (4)$$

$$\exp[ik \sin \theta (\boldsymbol{\rho}_2 \cos \xi_2 - \boldsymbol{\rho}_1 \cos \xi_1)] \exp[-ik(n-1)\gamma(\boldsymbol{\rho}_2 - \boldsymbol{\rho}_1)]$$

根据菲涅耳-基尔霍夫理论来描述轴棱锥后焦散光束的传输特性,轴棱锥后  $z$  处的交叉谱密度函数为

$$W(\boldsymbol{r}_1, \boldsymbol{r}_2, \varphi_1, \varphi_2, z) = \left(\frac{1}{\lambda z}\right)^2 \iint W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, \xi_1, \xi_2, 0) \exp[ik(R_2 - R_1)] d^2 \boldsymbol{\rho}_1 d^2 \boldsymbol{\rho}_2 \quad (5)$$

$$R_j = [z^2 + r_j^2 + \boldsymbol{\rho}_j^2 - 2r_j \boldsymbol{\rho}_j \cos(\xi_j - \varphi_j)]^{1/2} \quad (j=1, 2) \quad (6)$$

为了便于计算,将(6)式作泰勒级数展开,考虑到  $z \gg \rho, z \gg r$ ,式(6)可简化为<sup>[17]</sup>

$$R_j = \left(z + \frac{r_j^2}{2z} - \frac{r_j^4}{8z^3}\right) + \left(\frac{\rho_j^2}{2z} - \frac{r_j^2 \rho_j^2}{2z^3}\right) - \frac{r_j \rho_j}{z} \cos(\xi_j - \varphi_j) - \frac{r_j^2 \rho_j^2}{4z^3} \cos 2(\xi_j - \varphi_j) \quad (7)$$

将式(4)、(7)代入(5)式;并令  $r_1 = r_2 = r, \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$  时,交叉谱密度  $W(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{r}, \varphi, \varphi, z)$  即为轴棱锥后  $z$  处的光强有

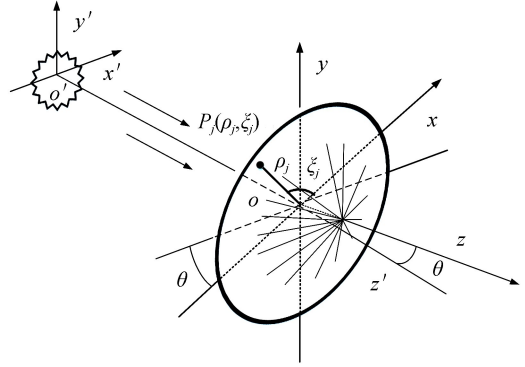


图 1 原理图

Fig.1 Principle diagram

$$I(\mathbf{r}, \varphi, z) = \left(\frac{1}{\lambda z}\right)^2 \iint \rho_1 \rho_2 C(\mathbf{r}, \rho_1, \rho_2, \xi_1, \xi_2, z) \exp \left[ -\left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{1}{2\sigma_0^2}\right) (\rho_1^2 + \rho_2^2) \right] \times \exp \left[ -ik(n-1)\gamma(\rho_2 - \rho_1) \right] \exp \left[ \frac{ik}{2z} \left(1 - \frac{r^2}{z^2}\right) (\rho_2^2 - \rho_1^2) \right] d\rho_1 d\rho_2 \quad (8)$$

$$C(\mathbf{r}, \rho_1, \rho_2, \varphi, \xi_1, \xi_2, z) = \iint \exp \left[ \frac{\rho_1 \rho_2 \cos(\xi_2 - \xi_1)}{\sigma_0^2} \right] \exp \left\{ -ik \left[ \rho_1 \cos \xi_1 \sin \theta - \frac{r\rho_1}{z} \cos(\xi_1 - \varphi) - \frac{r^2 \rho_1^2}{4z^3} \cos 2(\xi_1 - \varphi) \right] \right\} \exp \left\{ ik \left[ \rho_2 \cos \xi_2 \sin \theta - \frac{r\rho_2}{z} \cos(\xi_2 - \varphi) - \frac{r^2 \rho_2^2}{4z^3} \cos 2(\xi_2 - \varphi) \right] \right\} d\xi_1 d\xi_2 \quad (9)$$

根据二重积分稳相法将(8)简化为<sup>[13,24]</sup>

$$I(\mathbf{r}, \varphi, z) = \frac{1}{\lambda z} \rho_0^2 C(\mathbf{r}, \rho_0, \varphi, \xi_1, \xi_2, z) \exp \left[ -2\rho_0^2 \left( \frac{1}{\omega_0^2} + \frac{1}{2\sigma_0^2} \right) \right] \quad (10)$$

考虑到  $r \ll z$ , 其稳相坐标简化为

$$\rho_0 = \rho_{10} = \rho_{20} = (n-1)\gamma z \quad (11)$$

假设  $\xi'_1 = \xi_1 - \varphi, \xi'_2 = \xi_2 - \varphi$ , 将式(11)带入式(9)得

$$C(\mathbf{r}, r', \rho_0, \varphi', \xi'_1, \xi'_2, z) = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp \left[ \frac{\rho_0^2 \cos(\xi'_2 - \xi'_1)}{\sigma_0^2} \right] \exp \left\{ -ik \frac{\rho_0 r'}{z} \left[ \cos(\xi'_2 - \varphi') - \cos(\xi'_1 - \varphi') \right] \right\} \exp \left[ -ik \frac{r'^2 \rho_0^2}{4z^3} (\cos 2\xi'_2 - \cos 2\xi'_1) \right] d\xi'_1 d\xi'_2 \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} r' = [(r - z \sin \theta \cos \varphi)^2 + (z \sin \theta \sin \varphi)^2]^{1/2} \\ \varphi' = \arctan(z \sin \theta \sin \varphi / r - z \sin \theta \cos \varphi) \end{cases} \quad (13)$$

根据图1的几何关系可知,焦散光束的中心坐标位于

$$(r, \varphi) = (z \sin \theta, 0) \quad (14)$$

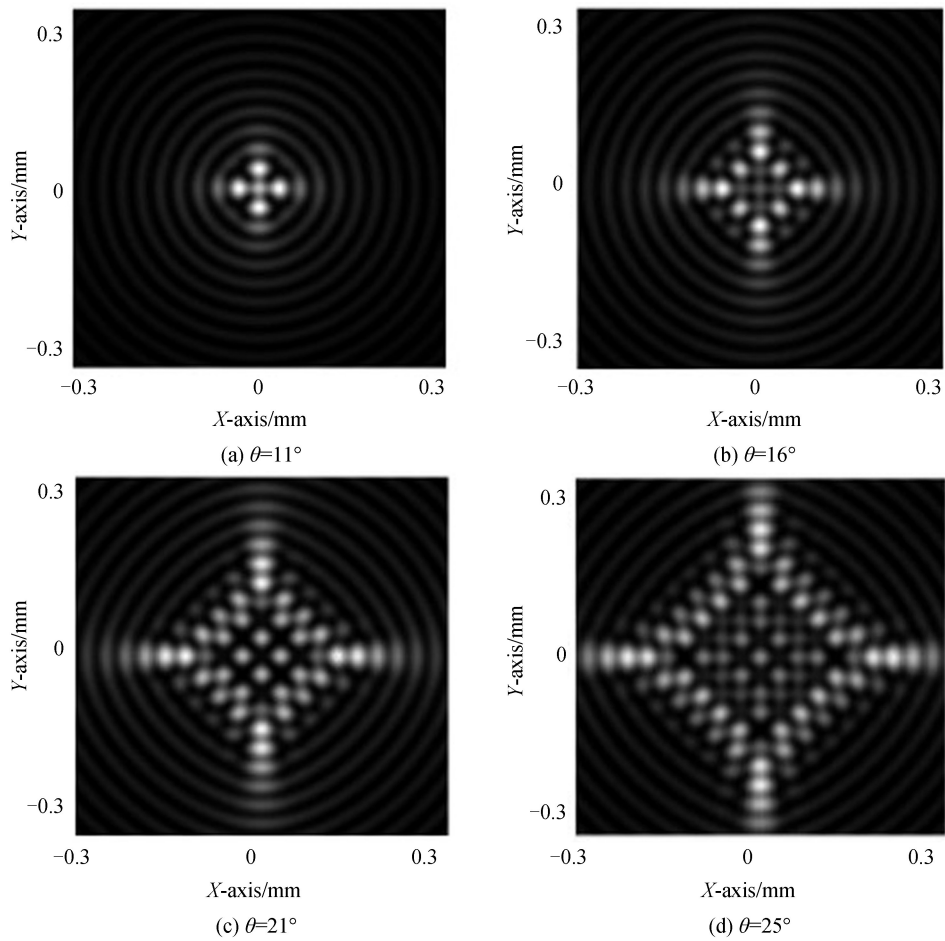
因此,式(13)中的参量  $r'$  和  $\varphi'$  表示以光斑中心  $r = z \sin \theta$  为原点的坐标.令  $r = z \sin \theta$  并将式(12)代入式(10)可得轴棱锥后  $z$  处焦散光斑的光强为

$$I(r', \varphi', z) = \frac{\rho_0^2}{\lambda z} \exp \left[ -2\rho_0^2 \left( \frac{1}{\omega_0^2} + \frac{1}{2\sigma_0^2} \right) \right] \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp \left[ \frac{\rho_0^2 \cos(\xi'_2 - \xi'_1)}{\sigma_0^2} \right] \exp \left\{ -ik \frac{\rho_0 r'}{z} \left[ \cos(\xi'_2 - \varphi') - \cos(\xi'_1 - \varphi') \right] \right\} \exp \left[ -ik \frac{(z \sin \theta)^2 \rho_0^2}{4z^3} (\cos 2\xi'_2 - \cos 2\xi'_1) \right] d\xi'_1 d\xi'_2 \quad (15)$$

## 2 数值模拟

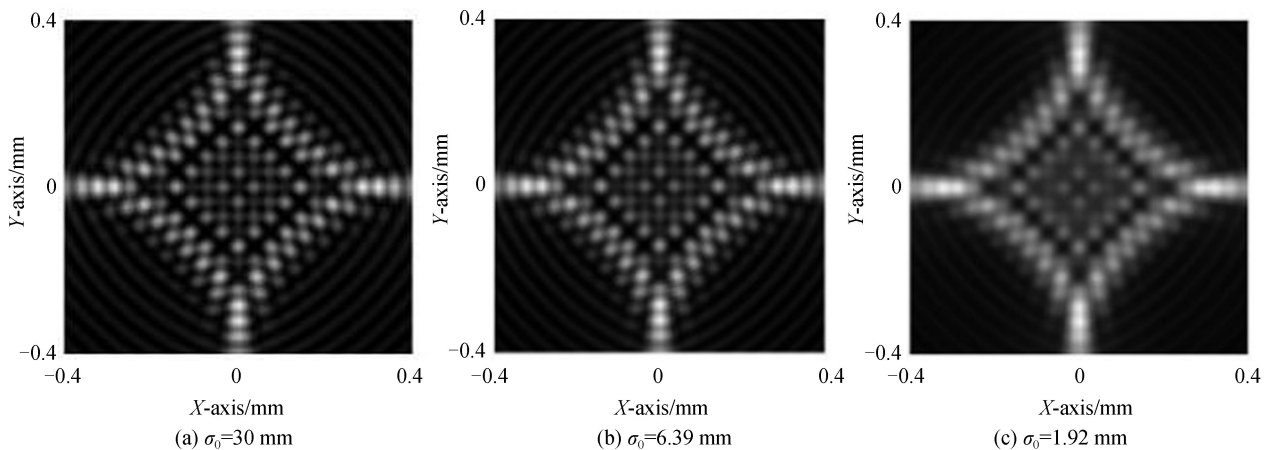
### 2.1 部分相干焦散光束的形成

焦散光束的形成与轴棱锥的像散息息相关,为了分析像散对焦散光束的影响,可根据(11)、(15)式模拟不同像散因子对焦散光斑的影响.模拟时选取参量  $\lambda = 6.328 \times 10^{-4}$  mm,  $\omega_0 = 15$  mm,  $\sigma_0 = 6.39$  mm,  $n = 1.51$ ,  $\gamma = 1^\circ$ , 轴棱锥倾角  $\theta$  分别取  $11^\circ, 16^\circ, 21^\circ$  和  $25^\circ$  时,可在倾斜轴棱锥后  $z = 210$  mm 得到相应的部分相干焦散光束的光强截面分布,如图2(a)~(d)所示.可以看出,受像散的影响,光束的中心光斑逐渐向外环对称分裂,形成光点阵列;而中心光强逐渐向外延展,形成星状外轮廓;同时光束内部的光点数和外轮廓的尺寸也会随着像散的增大而增大.

图2 部分相干焦散光束在  $z=210$  mm 处的模拟光强截面Fig.2 Simulation intensity distribution of cross section partially coherent caustic beam at  $z=210$  mm

## 2.2 焦散光束的相干特性

与相干光相比,部分相干光具有抗散斑及抗扰动强等特性,为研究部分相干焦散光束的相干特性,将不同相干长度的焦散光束在自由空间中传输的横向光强截面分布列于图 3(a)~(e).数值模拟时,选取参量  $z=210$  mm,轴棱锥倾角  $\theta$  为  $28^\circ$ ,相干长度  $\sigma_0$  分别取 0.64、1.28、1.92、6.39 mm 进行数值模拟;对于完全相干光入射情况,理论上相干长度应取无穷大即  $\sigma_0=\infty$ ,而实验中进入轴棱锥的光波场受到半径为 15 mm 的光阑限制,可将其相干长度取为  $\sigma_0=30$  mm.可以看出,随着相干长度的缩短,焦散光斑的强弱衬比度逐渐降低,光束内的光点阵列趋于消失.



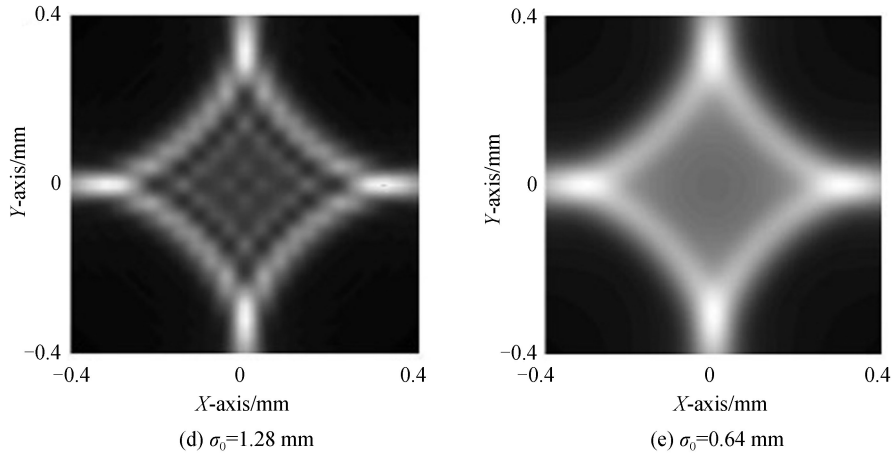


图3 不同空间相干长度的部分相干焦散光束的模拟光强截面

Fig.3 Simulation intensity distribution of cross section partially coherent caustic beam with the different coherent lengths

### 3 实验设计及结果分析

部分相干焦散光束的实验装置如图4所示.波长为632.8 nm的氦氖激光器作为光源,光束先经过 $L_1$ 和

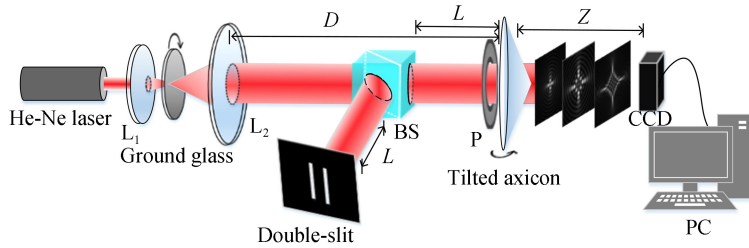


图4 实验装置

Fig.4 Experimental setup

$L_2$  透镜(焦距分别为15mm和300mm)组成的扩束系统;透镜之间加入旋转毛玻璃薄片打散光场的相干性,通过一段距离传输后,再经过分光棱镜(BS)分成相同的两束部分相干光:一束经过倾斜的轴棱锥产生部分相干焦散光束;另一束传输相同的距离 $L=33$  mm后通过杨氏双缝测量其光场相干度<sup>[26]</sup>.其中轴棱锥的底角为 $1^\circ$ ,折射率 $n=1.51$ ,固定在Thorlabs公司提供的高精度旋转位移台(PR01/M)上;光阑P的半径为15 mm.CCD成像系统与倾斜轴棱锥的距离为 $z=210$  mm.

当旋转毛玻璃放置 $L_1$  焦点处,用杨氏双缝干涉测得轴棱锥处入射光的相干度分布,如图5所示.

可以看出,实验所测得的相干特性呈高斯型衰减,因此可用高斯谢尔模型近似表示.由式(1)可将相干函数表示为

$$\mu(\mathbf{\rho}_1 - \mathbf{\rho}_2) = \exp \left[ -\frac{(\mathbf{\rho}_1 - \mathbf{\rho}_2)^2}{2\sigma_0^2} \right] \quad (16)$$

根据式(16)对图5的实验数据进行拟合,可以得到旋转毛玻璃在 $L_1$  焦点处时入射光场的相干长度为 $\sigma_0=6.39$  mm.

通过高精度旋转台控制轴棱锥倾角,再用CCD成像系统分别记录相干长度 $\sigma_0=6.39$  mm的部分相干

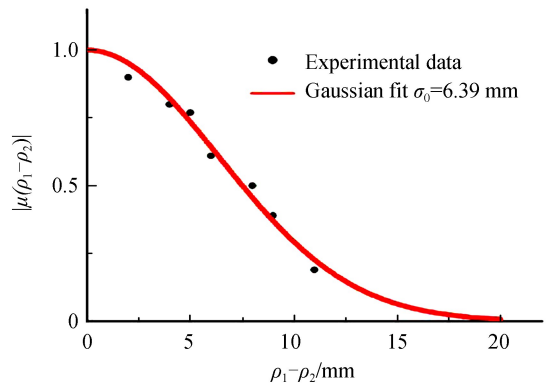


图5 相干度分布

Fig.5 Spectral degree of coherence



光通过不同倾角轴棱锥后  $z=210$  mm 处的衍射光斑.图 6 中(a)~(d)分别对应轴棱锥倾角为  $11^\circ$ 、 $16^\circ$ 、 $21^\circ$ 、 $25^\circ$  焦散光斑的实验图.从数值模拟和实验结果可以看出,入射光经过倾斜轴棱锥后受像散的影响,中心光斑逐渐向外环对称分裂形成部分相干焦散光束,且焦散光束的尺寸随着像散的增大而变大,理论模拟与实验现象基本一致.

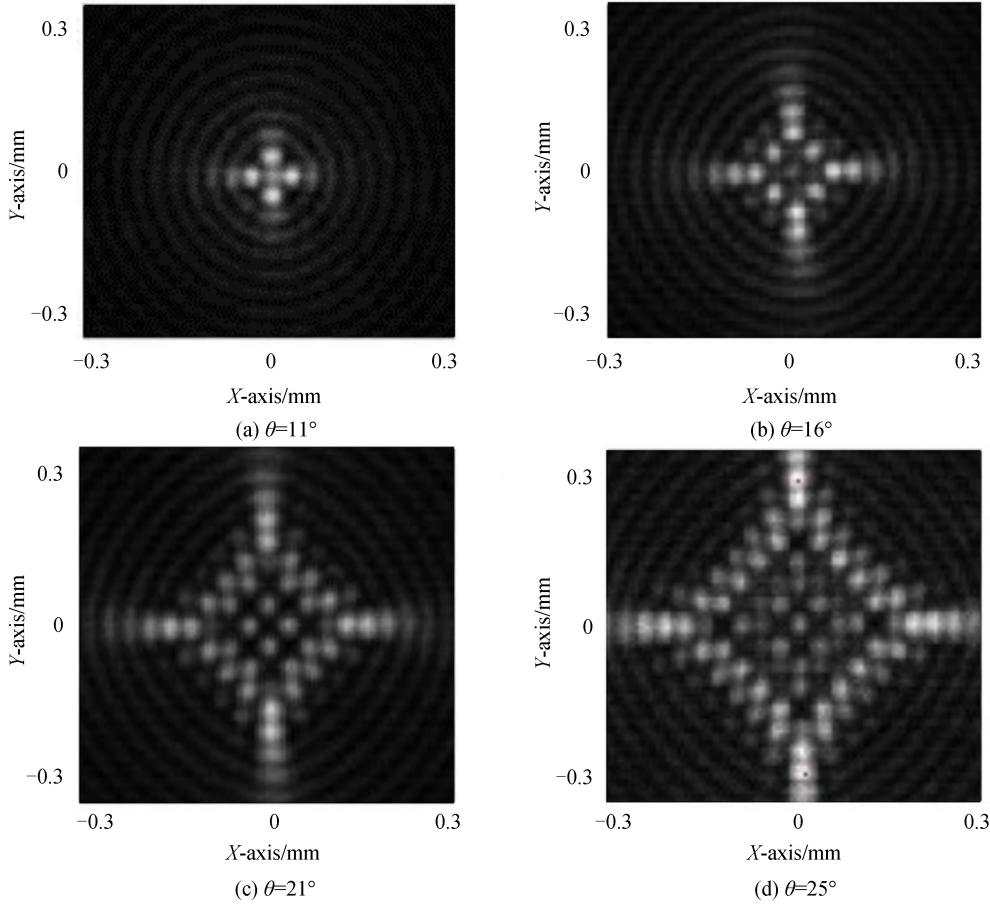
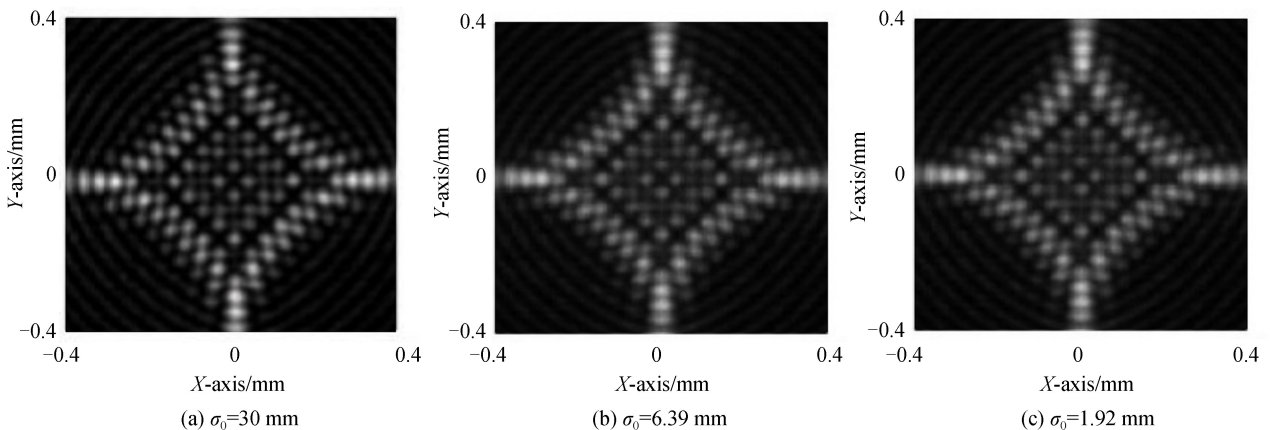


图 6 部分相干焦散光束在  $z=210$  mm 处的实验光强截面

Fig.6 Experimental intensity distribution of cross section partially coherent caustic beam at  $z=210$  mm

在扩束系统的透镜  $L_1$  焦距附近调整旋转毛玻璃的位置,并相应微调透镜  $L_2$  的位置,使出射的光束仍为平行光,从而获得相干长度不同的部分相干光;并利用杨氏双缝测量相应光场的空间相干长度,再通过 CCD 成像系统分别记录不同空间相干长度的入射光经过倾角  $\theta=28^\circ$  的轴棱锥后的光强截面.图 7 (a)~(e) 分别是在  $z=210$  mm 处,完全相干  $\sigma_0=30$  mm 及部分相干  $\sigma_0=6.39$  mm、 $\sigma_0=1.92$  mm、 $\sigma_0=1.28$  mm 和  $\sigma_0=0.64$  mm 焦散光束的光强截面.可以看出,随着入射光场相干长度的降低,焦散光强的明暗分布逐渐变模



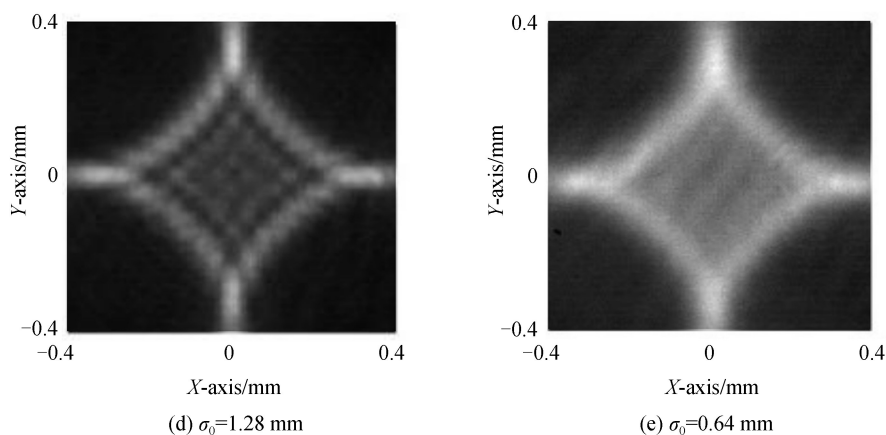


图7 不同空间相干长度的部分相干焦散光束的实验光强截面

Fig.7 Experimental intensity distribution of cross section partially coherent caustic beam with the different coherent lengths

糊,光束中心的光点阵列渐渐消失,这与相应条件下的数值模拟结果吻合.对比图5中完全相干 $\sigma_0 = 30$  mm与部分相干 $\sigma_0 = 6.39$  mm的焦散光斑,发现相干度较高的部分相干焦散光束的光强分布基本可以和完全相干光相比拟.由于部分相干焦散光束具有抗散斑及扰动强等特性,因此,产生相干度高的部分相干焦散光束将比完全相干焦散光束更具有应用前景.

## 4 结论

本文引入交叉谱密度函数描述部分相干焦散光束的传输及相干特性,并设计相关实验进行了验证.分析了轴棱锥倾角引起的像散对焦散光束的影响.结果均表明,受像散的影响,轴棱锥后的光场发生畸变而形成部分相干焦散光束;随着像散(或轴棱锥的倾斜程度)的增大,该光束的中心光斑逐渐向外环对称分裂,形成光点阵列;而中心光强逐渐向外延展,形成星状外轮廓.进一步研究入射光场相干度对焦散光束的影响,发现随着入射光场空间相干长度的降低,焦散光强的明暗分布会慢慢变模糊,光束中心的光点阵列渐渐消失.与完全相干光相比,部分相干光展示出独特优势,如抗散斑及扰动强等.这将极大延伸了焦散光束应用的广度和深度,如拓扑荷数的检测及大景深成像等领域.

## 参考文献

- [1] DURNIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(15): 1499-1501.
- [2] WANG Shuo-chen, XIE Xiao-xia, WU Feng-tie. Propagation properties of partially coherent diffraction-free beam through an annular aperture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(8): 0826002.  
王硕琛, 谢晓霞, 吴逢铁. 部分相干无衍射光束经环形孔径的传输特性[J]. *光子学报*, 2016, **45**(8): 0826002.
- [3] ECKERSKORN N, LI L, KIRIAN R A, et al. Hollow Bessel-like beam as an optical guide for a stream of microscopic particles[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(25): 30492-30499.
- [4] BAUMGARTL J, MAZILU M, DHOLAKIA K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(11): 675-678.
- [5] FICKLER R, LAPKIEWICZ R, PLICK W N, et al. Quantum entanglement of high angular momenta[J]. *Science*, 2012, **338**(6107): 640-643.
- [6] CHENG Zhi-ming, WU Feng-tie, FAN Dan-dan, et al. Non-diffraction bessel-like beam generated by green LED source [J]. *Science China: Physics Mechanics Astronomy*, 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.
- [7] ZENG Xia-hui, WU Feng-tie. Effect of elliptical manufacture error of an axicon on the diffraction-free beam patterns[J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**(8): 083401.
- [8] THANING A, JAROSZEWICZ Z, FRIBERG A T. Diffractive axicons in oblique illumination: analysis and experiments and comparison with elliptical axicons[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(1): 9-17.
- [9] MATHIS A, COURVOISIER F, Dudley J M, et al. Arbitrary accelerating micron-scale caustic beams in two and three dimensions[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(17): 16455-16465.
- [10] VAVELIUK P, LENCINA A, Ó MARTÍNEZMATOS. Caustic beams from unusual powers of the spectral phase[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(19): 4008-4011.

- [11] HU Run, WU Feng-tie, ZHU Qing-zhi, *et al.* Influence of off-axis astigmatism on high order Bessel beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(8): 0826002.  
胡润, 吴逢铁, 朱清智, 等. 离轴像散对高阶贝塞尔光束的影响[J]. 光学学报, 2017, **37**(8):0826002.
- [12] ZHAO B, ZHU L. Diffraction property of an axicon in oblique illumination[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(13): 2563-2568.
- [13] ANGUIANO-MORALES M. Transformation of Bessel beams by means of a cylindrical lens[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(25): 4826.
- [14] REN Z, FAN C, SHI Y, *et al.* Symmetric form-invariant dual Pearcey beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science & Vision*, 2016, **33**(8): 1523-1530.
- [15] WANG Li, WANG Qin-feng, WANG Xi-qin, *et al.* Focusing properties of partially coherent modified Bessel-Gauss beams passing through a lens with spherical aberration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 340-344.  
王莉, 王庆峰, 王喜庆, 等. 部分相干修正贝塞尔高斯光束通过球差透镜的聚焦特性[J]. 光子学报, 2008, **37**(2):340-344.
- [16] DONG Mei-mei, PU Ji-xiong. Focal shifts of partially coherent light focused by a cylindrical lens with spherical aberration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1095-1098.  
董梅梅, 蒲继雄. 部分相干光经柱面球差透镜聚焦所产生的焦移[J]. 光子学报, 2006, **35**(7):1095-1098.
- [17] KHONINA S N, KOTLYAR V V, SOIFER V A, *et al.* Astigmatic bessel laser beams[J]. *Optica Acta International Journal of Optics*, 2004, **51**(5): 677-686.
- [18] SNOEYINK C, WERELEY S. Three-dimensional locating of paraxial point source with axicon[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(11): 2058.
- [19] WANG Tao, PU Ji-xiong. Propagation of Bessel-correlated partially coherent hollow beams in the turbulent atmosphere [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(11): 6754-6759.  
王涛, 蒲继雄. 部分相干空心光束在湍流介质中的传输特性[J]. 物理学报, 2007, **56**(11):6754-6759.
- [20] GBUR G. Partially coherent beam propagation in atmospheric turbulence. [J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science & Vision*, 2014, **31**(9): 2038-2045.
- [21] CUI Sheng-wei, CHEN Zi-yang, HU Ke-lei, *et al.* Investigation on partially coherent Airy beams and their propagation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(9): 172-176.  
崔省伟, 陈子阳, 胡克磊, 等. 部分相干 Airy 光束及其传输的研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(9): 172-176.
- [22] 吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 高等教育出版社, 2003.
- [23] ZHU Qing-zhi, SHEN Dong-hui, WU Feng-tie, *et al.* Effects of a partially coherent beam on periodic bottle beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(4): 67-74.  
朱清智, 沈栋辉, 吴逢铁, 等. 部分相干光对周期性局域空心光束的影响[J]. 物理学报, 2016, **65**(4):67-74.
- [24] MANDEL L, WOLF E, SHAPIRO J H. Optical coherence and quantum optics[J]. *Physics Today*, 1996, **49**(5): 68-70.
- [25] HU K, CHEN Z, PU J. Investigation on partially coherent vector beams and their propagation and focusing properties. [J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science & Vision*, 2012, **29**(11): 2300.
- [26] TITUS S S K, WASAN A, VAISHYA J S, *et al.* Determination of phase and amplitude of degree of coherence from spectroscopic measurements[J]. *Optics Communications*, 2000, **173**(1): 45-49.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No.11774103), National Natural Science Youth Fund (No.61605049) and Major Science and Technology Projects in Fujian (No. 2016H6016)

引用格式: YANG Yan-fei, WU Feng-tie, HU Han-qing, *et al.* Generation of Partially Coherent Caustic Beam and Its Spatial Correlation Properties[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0708004  
杨艳飞, 吴逢铁, 胡汉青, 等. 部分相干焦散光束的形成及其相干特性[J]. 光子学报, 2018, **47**(7):0708004