

文章编号: 1001-3806(2008)03-0259-03

部分相干环形光束经透镜聚焦的焦移和焦开关

刘文兵, 钟 鸣*, 何衡湘, 夏惠军, 张 翼, 欧群飞, 衣学斌
(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了从理论上对部分相干环形光束被透镜聚焦后轴上点的光强分布以及焦移和焦开关现象进行研究, 采用惠更斯-菲涅耳衍射积分方法进行了理论分析, 取得了轴上点光强分布及焦移、焦开关现象的相关数据。结果表明, 焦移量不仅依赖于环形光束外半径的菲涅耳数, 还依赖于入射部分相干光的空间相干度和中心拦截比。菲涅耳数越大, 焦移量越小; 部分相干光的空间相干度越高, 焦移量越小。菲涅耳数一定时, 环形光束的中心拦截比越大, 焦移越大。对于某一固定的空间相干度, 随着菲涅耳数的降低会出现焦开关现象。这些结果对研究部分相干环形光束的聚焦性质是有帮助的。

关键词: 激光技术; 焦移; 焦开关; 惠更斯-菲涅耳衍射积分; 部分相干光; 环形光束

中图分类号: TN241 **文献标识码:** A

Focal shift and focal switch of partially coherent annular beam focused by lens

LU Wen-bing, ZHONG Ming, HE Heng-xiang, XIA Hui-jun, ZHANG Yi, OU Qun-fei, YI Xue-bin
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Applying the Huygens-Fresnel diffractive integral, the on-axis intensity distribution and the phenomena of focal shift and focal switch are theoretical studied when a partially coherent annular light is focused by a lens. The results show that the amount of the focal shift depends on not only the Fresnel number of the annular beam, but also the spatial coherence and the central obstruction ratio of the incident partially coherent light. It is also shown that the greater the Fresnel number, the smaller the focal shift; the higher the spatial coherence, the smaller the focal shift. For a fixed Fresnel number, the larger the central obstruction ratio is, the larger the focal shift is. For a given spatial coherence, the phenomenon of focal switch will occur as the Fresnel number decreases. The results are helpful to the research of the focus of partially coherent annular beam.

Key words: laser technique; focal shift; focal switch; Huygens-Fresnel diffractive integral; partially coherent light; annular beam

引 言

当光束被会聚透镜聚焦时, 轴上聚焦光强最大的点不在透镜的几何焦点处, 这种现象称为焦移。1981年, L I 和 WOLF 首次提出了焦移现象^[1]。他们证明, 与几何焦点相比, 焦移总是向透镜平面移动, 且焦移量由透镜的菲涅耳数决定。随着透镜菲涅耳数的降低, 焦移量增大。一些被平面波照射的系统, 例如拦截系统、环形聚焦透镜和双聚焦系统, 其焦移现象是存在的^[2-4]。近几年研究发现, 当菲涅耳数等于一个固定的值时, 出现焦点突然跃迁现象, 即所谓的焦开关^[3, 5]。迄今为止, 大多数文献中的研究都假设入射光束是空间完全相干的, 而对部分相干光聚焦研究焦移或焦开关现象则较少^[6-7]。近年来, 人们对部分相干光的研究日益感兴趣,

这一方面是因为随着激光核聚变研究的深入, 为了减少高空间相干光所引起的散斑等有害效应, 常采用去相干的办法把高空间相干激光变成部分相干光^[8-11]。另一方面是因为多横模高功率激光光束可以用部分相干光来描述^[12]。正因为如此, 对部分相干光的焦移和焦开关现象的研究显得很重要, 并具有普遍意义。环形光束是一些高功率激光器输出的一种特殊光束, 然而对环形光束聚焦性质的研究却很少。因此, 研究部分相干环形光束被透镜聚焦是一项很重要的工作。作者将研究部分相干环形光束被透镜聚焦之后轴上点的光强分布, 部分相干光的空间相干度、光阑的菲涅耳数以及环形光束的中心拦截比对焦移和焦开关的影响。

1 理论分析

首先, 考虑波长为 λ 、中心拦截比为 $\epsilon = b/a$ 的单色平面波环形光束被透镜聚焦的情况 (见图 1)。图中 a 是环形光阑的外半径, b 是环形光阑的内半径, f 是透镜的焦距。 S 是以几何焦点 F 为中心, 位于透镜之后

作者简介: 刘文兵 (1979-), 男, 博士研究生, 现从事强激光技术方面研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: office@xwpu.net

收稿日期: 2007-03-26; 收到修改稿日期: 2007-07-18

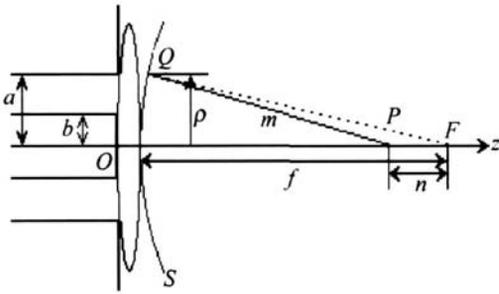


Fig 1 Diagram of partially coherent annular beam focusing

的参考球面。Q是透镜后球面波上的一点,P是位于z轴上的考查点,m是QP之间的距离。

假设环形光束经透镜后参考球面上的光场为U(Q),则U(Q)可以写为:

$$U(Q) = U(\vec{\rho}) = A(\vec{\rho}) \exp(-ikf)/f \quad (1)$$

式中,A(\vec{\rho})为透镜前表面光场的振幅分布,\vec{\rho} = \vec{\rho}(x,y)是面S上Q点的二维传输矢量,k=2\pi/\lambda=2\pi\nu/c,其中,\nu为相应于\lambda的频率,c为真空中光速。根据惠更斯-菲涅耳原理,聚焦场轴上任意一点P的光场为:

$$U(P) = -\frac{ik}{2\pi s} \iint U(Q) \frac{\exp(ikm)}{m} d\vec{\rho} \quad (2)$$

聚焦光场中任意两点\vec{r}_1, \vec{r}_2的光谱密度为:

$$W(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \nu) = \langle U^*(\vec{r}_1; \nu) U(\vec{r}_2; \nu) \rangle = \left\langle \frac{ik}{2\pi s} \iint (\vec{\rho}_1; \nu) [\exp(-ikm_1)/m_1] d\vec{\rho}_1 \times \right. \\ \left. -\frac{ik}{2\pi s} \iint (\vec{\rho}_2; \nu) [\exp(ikm_2)/m_2] d\vec{\rho}_2 \right\rangle = \left(\frac{k}{2\pi} \right)^2 \times \\ \iint \iint (\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2; \nu) \{ \exp[-ik(m_1 - m_2)]/m_1 m_2 \} d\vec{\rho}_1 d\vec{\rho}_2 \quad (3)$$

式中,\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2表示两个不同位置上的二维传输矢量,且:

$$W(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2; \nu) = \langle U^*(\vec{\rho}_1; \nu) U(\vec{\rho}_2; \nu) \rangle = \langle A^*(\vec{\rho}_1; \nu) A(\vec{\rho}_2; \nu) \rangle / f^2 =$$

$$|A(\vec{\rho}_1; \nu)| |A(\vec{\rho}_2; \nu)| \exp[-(\vec{\rho}_1 - \vec{\rho}_2)^2 / (2\sigma_g^2)] / f^2 \quad (4)$$

\sigma_g是透镜平面光场的有效空间相干长度。(3)式的因

数m_1和m_2的近似表达式为:m = m(\vec{\rho}) \approx

$$\sqrt{(f-z)^2 - \rho^2} / f_0$$

聚焦场中距几何焦点距离为z的轴上点的光强为^[13]:

$$I(z) = \left(\frac{kA_0}{f} \right)^2 \int_a^a \int_b^b \exp\left[-\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2}{2\sigma_g^2} \right] \times \\ \mathbb{I} \left(\frac{\rho_1 \rho_2}{\sigma_g^2} \right) \exp[-ik(m_1 - m_2)] \frac{\rho_1 \rho_2}{m_1 m_2} d\rho_1 d\rho_2 \quad (5)$$

式中,A_0=A(0),\mathbb{I}(\dots)是第1类零阶修正贝塞尔函数。ρ, ρ_1, ρ_2分别为\vec{\rho}, \vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2对应的标量。引入归一化因子I_F(0),定义为完全相干且ε=0时几何焦点的光强,即:

$$I_F(0) = \lim_{\substack{\sigma_g \rightarrow \infty \\ \epsilon = 0}} I(0) =$$

$$\left(\frac{kA_0}{f} \right)^2 \int_0^a \int_0^a \frac{\rho_1 \rho_2}{f^2} d\rho_1 d\rho_2 = \left(\frac{\pi NA_0}{f} \right)^2 \quad (6)$$

在上式的推导过程中,使用了公式\mathbb{I}(0) = 1。

应用(5)式,就能研究聚焦光场轴上点的光强分布,并进而研究焦开关现象以及焦移与部分相干光的空间相干度、光阑的非涅耳数N=a^2/(\lambda f)和环形光束中心拦截比等参数的关系。

2 焦移

图2为N=4, \sigma_g/a=0.5时,不同的中心拦截比ε对聚焦光场轴上点光强分布的影响。从图中可以看

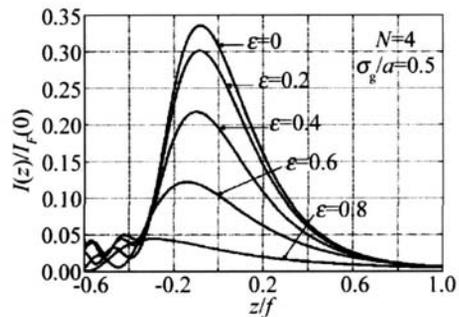


Fig 2 Normalized axial intensity distribution as a function of focal shift with different central obstruction ratio

出,随着中心拦截比ε的增大,聚焦光场轴上点的最大光强减小,焦移增大。

图3为轴上一考查点聚焦光强与中心拦截比ε的函数关系,其中N=1。从图3可以看出,中心拦截比

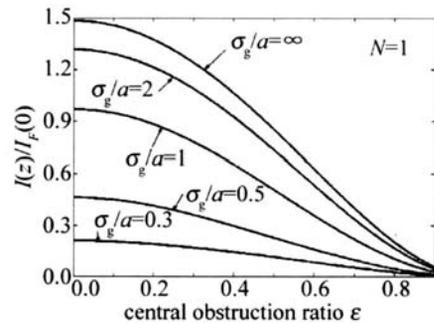


Fig 3 Normalized axial intensity distribution as a function of central obstruction ratio with different spatial coherence

ε相同的情况下,轴上点的聚焦光强随入射光束空间相干度的增加而变强,而当入射光束的空间相干度一定时,随着中心拦截比ε的增大,轴上点的聚焦光强逐渐减小。这是因为中心拦截比ε越大,透过透镜的光通量越小,因此可获得的最大聚焦光强也就越小。

图4中给出了聚焦光场轴上点的归一化光强分布I(z)/I_F(0)在不同的菲涅耳数N和不同的空间相干度σ_g/a下的计算结果。计算中取中心拦截比ε=0.2。从图中可以看出,焦移现象在部分相干光入射的情况

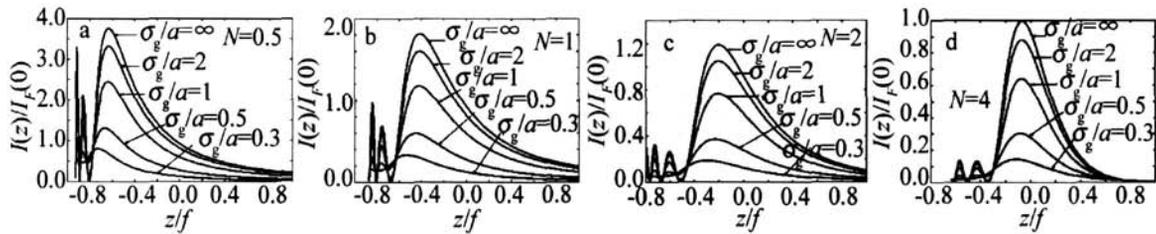


Fig 4 Normalized axial intensity distribution versus focal shift with different Fresnel numbers and spatial coherence

下也会出现;对于某一确定的中心拦截比和非涅耳数,随着空间相干度的增加,聚焦光场轴上点的最大光强亦会增大,而焦移量减小。在其它参数不变的情况下,非涅耳数越大,聚焦光场轴上点的最大光强越小,焦移量越小。

3 焦开关

部分相干光照射下,对于不同的非涅耳数 N ,其轴上点的强度分布如图 5 所示。图中中心拦截比 $\epsilon = 0.2$,空间相干度 $\sigma_g/a = 1$ 。最大光强峰值表示为 I_{\max} ,第 2

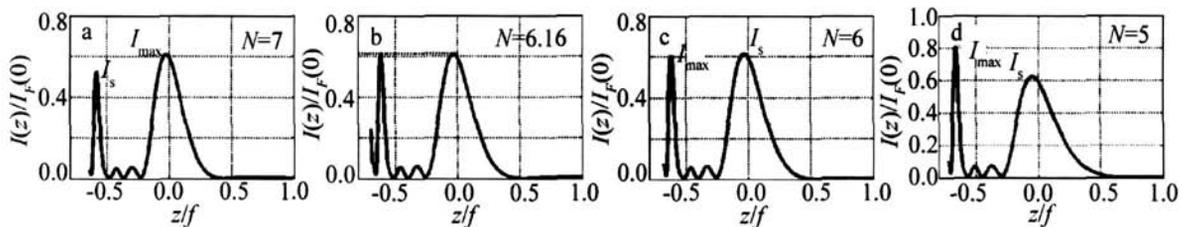


Fig 5 Fresnel number versus varies of on-axis peak intensity

峰值光强用 I_s 表示。从图 5a 中可以看出, $N = 7$ 时 I_{\max} 离几何焦点最近,这表明焦移较小,此种情况下,光强峰值 I_s 接近光阑的中心 O 处,而峰值 I_{\max} 接近几何焦点 F 处。而当非涅耳数 N 减小时,峰值 I_{\max} 和 I_s 变强,焦移增加,这与前面的分析一致。但是峰值 I_s 增加的比例比峰值 I_{\max} 要快。当非涅耳数 $N = 6.16$ 时,两个峰值达到同等高度(见图 5b),这表明已达到焦开关发生的临界强度点。此时峰值 I_s 变为 I_{\max} ,焦移出现突变的传输,这就是所谓的焦开关。此后随着非涅耳数 N 的继续减小,峰值 I_{\max} 与 I_s 的差值继续增大(见图 5c 和图 5d),此种情况下主峰值 I_{\max} 接近于光阑的中心 O 处,而第 2 峰值 I_s 则接近于几何焦点 F 处。

参考文献

4 结论

作者应用惠更斯-菲涅耳衍射积分公式,讨论了部分相干环形光束被透镜聚焦后,聚焦光场轴上点的光强分布,并进而分析了入射光束的空间相干度、中心拦截比和外半径的非涅耳数对焦移的影响。结果表明,部分相干光入射时也会出现焦移现象。焦移量不仅依赖于环形光束外半径的非涅耳数,还依赖于入射部分相干光的空间相干度和中心拦截比。焦移量随非涅耳数的增大而减小,随入射部分相干光的空间相干度的降低而增加。非涅耳数一定时,环形光束的中心拦截比越大,焦移越大。对于某一固定的空间相干度,当非涅耳数等于某一值时,焦移会发生焦点突然跃迁的现象,即所谓的焦开关现象。

- [1] LI Y J, WOLF E. Focal shifts in diffracted converging spherical waves [J]. Opt Commun, 1981, 39: 211-215.
- [2] MANUEL M C, VICENT C. Focal switch: a new effect in low-Fresnel-number systems [J]. Appl Opt, 1996, 35 (1): 24-27.
- [3] LI Y J. Focal shift and focal switch in dual-focal systems [J]. J O S A, 1997, A14 (4): 1297-1304.
- [4] LU X Y, PU J X. Focal shift and focal switch of partially coherent light in dual focus systems [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2006, 27 (2): 137-140 (in Chinese).
- [5] PENG R W, LÜB D. Focal switch of Hermite-Gaussian beams [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52 (11): 2795-2802 (in Chinese).
- [6] LÜB D, ZHANG B, CAI B W. Focusing of a Gaussian-Schell model beam through a circular lens [J]. Journal of Modern Optics, 1995, 42 (2): 289-298.
- [7] PAN L Zh, LÜB D. Focusing properties of partially coherent light passing through an astigmatic lens [J]. Laser Technology, 2003, 27 (4): 374-379 (in Chinese).
- [8] CAI Y J, LÜB D. Elliptical flattened Gaussian beam and its propagation characteristics [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13 (3): 267-271 (in Chinese).
- [9] SHEN F, JIAN W H. Transmitting characteristics of a Gaussian beam due to the telescope center obscure [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12 (2): 257-260 (in Chinese).
- [10] PU J X, ZHANG H H, ZHANG W B, et al. Axial intensity distribution of partially coherent light focused by a lens with spherical aberration [J]. Journal of Modern Optics, 2000, 47 (4): 605-612.
- [11] CAI Y J, LÜB D. Propagation properties of partially coherent flattened Gaussian beam [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001, 12 (12): 1301-1304 (in Chinese).
- [12] GASE R. The multimode laser radiation as a Gaussian Schell model beam [J]. Journal of Modern Optics, 1991, 38 (6): 1107-1116.
- [13] LU X Y, PU J X, HU X D, et al. Focal shifts of partially coherent light focused by an annular lens [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17 (3): 359-362 (in Chinese).