

# 部分相干光在双焦聚焦系统中的焦移和焦开关

刘晓云 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 应用惠更斯-菲涅耳衍射积分公式, 研究部分相干光被由菲涅耳波片组成的双聚焦系统聚焦后的焦移现象. 研究表明, 焦移量不仅依赖于聚焦系统的菲涅耳数, 而且依赖于入射部分相干光的空间相干度. 对于某一固定的菲涅耳波片, 降低空间相干度, 会导致发生焦开关的临界菲涅耳数降低, 但当空间相干度太低时, 焦开关现象会消失.

**关键词** 部分相干光, 焦移, 焦开关, 菲涅耳波片, 衍射

**中图分类号** TN 241

**文献标识码** A

当平面波被低菲涅耳数圆形光阑透镜聚焦时, 轴上聚焦光强最大点不在透镜的几何焦点处, 而位于光阑和几何焦点之间, 这种效应就是焦移<sup>[1~3]</sup>. 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<sup>[4,5]</sup>. 对于焦移, 已经证明菲涅耳数是一个非常重要的因素, 即随着透镜菲涅耳数的降低, 焦移量增大. 近几年研究发现, 当菲涅耳数等于一个固定的数值时, 出现焦点突然跃迁现象, 即所谓的焦开关<sup>[5,6]</sup>. 在大多数文献中, 入射光一般都假设是空间相干的, 对部分相干光聚焦研究焦移或焦开关现象则较少<sup>[7]</sup>. 众所周知, 部分相干光和完全空间相干光相比较, 有一些特殊的优点, 如它对散斑的低灵敏度. 部分相干光被应用于激光核聚变, 这是因为一高相干的光束可以被变换成部分相干光束, 以减少散斑和获得更加均匀的聚焦光斑<sup>[8]</sup>. 此外, 多横模高功率激光光束可以用部分相干光来描述<sup>[9]</sup>. 因此, 对用部分相干光聚焦来研究焦移或焦开关变得更重要了. 本文研究用部分相干光经过菲涅耳波片衍射后的焦移和焦开关, 以及其空间相干度对焦移和焦开关的影响.

## 1 理论模型

首先, 证明波长为  $\lambda$  的会聚球面波经过菲涅耳波片衍射的情况, 如图 1 所示. 假设  $f$  是菲涅耳波片处球面波的曲率半径,  $a$  是最后波带的半径. 则  $F$  是几何焦点,  $P$  是  $z$  轴上一点,  $Q$  是菲涅耳波片球面波上的一点,  $s$  是  $QP$  之间的距离. 又假定菲涅耳波片平面的光场  $U$ , 则  $U(Q) = A(\rho) \cdot e^{-ikf}/f$ . 其中,  $A$  为振幅,  $\rho = \rho(x, y)$  是二维传输矢量,  $k = 2\pi\nu/c = 2\pi/\lambda$ .

根据惠更斯-菲涅耳原理, 聚焦场轴上任意一点  $P$  的光场为<sup>[10]</sup>,  $U(P) = \frac{-ik}{2\pi} \int_S U(\rho) (e^{iks}/s) d\rho$ . 式中的

积分扩展到整个菲涅耳波片平面  $S$ ,  $s$  为  $QP$  之间的距离. 菲涅耳波片由一系列同中心对称的明暗交替的环形片组成, 如图 2 所示. 图 2(a) 为空心光阑, 图 2(b) 为环形光阑, 图 2(c) 为中心波片开口的菲涅耳波片, 图 2(d) 为中心波片闭口的菲涅耳波片, 图 2(e)~(h) 分别为以上方式交替的菲涅耳波片. 波片半

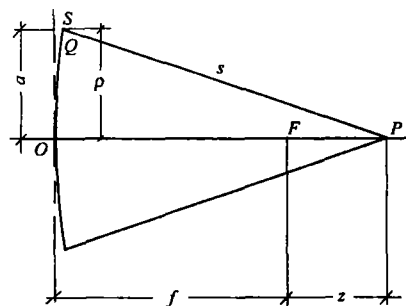


图 1 双聚焦系统结构示意图

**收稿日期** 2005-11-09

**作者简介** 刘晓云(1980-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光和光电子的研究; 通信作者: 蒲继雄(1962-), 男, 教授, E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

**基金项目** 国家自然科学基金资助项目(60477041); 福建省自然科学基金资助项目(A0510018); 国务院侨务办公室科研基金资助项目(03QZR4)

径  $r_m = r_M \cdot \sqrt{m/M}$ ,  $m=1, 2, 3, \dots, M$ . 其中,  $M$  是非涅耳半波带数,  $r_M$  为最后一个半波带的半径. 从图 2 可看出, 当  $M$  是奇数时, 中心波带是开口的; 当  $M$  是偶数时, 中心波带是闭合的. 波带数  $M$  和透明的

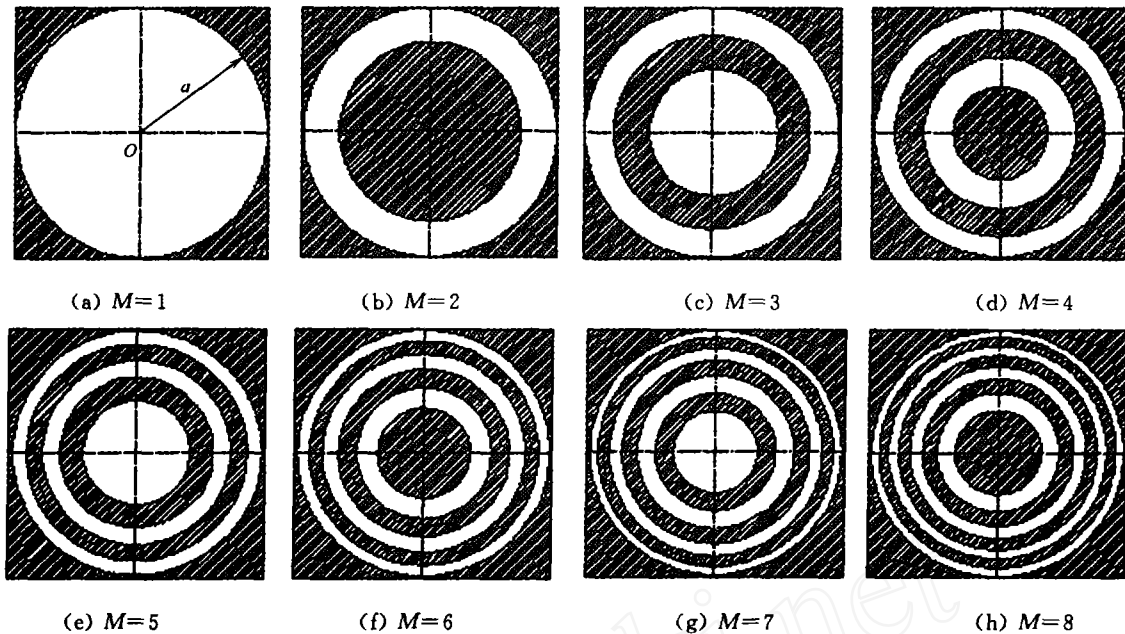


图 2 菲涅耳波片

波带数  $M_T$  可表示为

$$M_T = \begin{cases} M/2, & M = \text{even}, \\ (M+1)/2, & M = \text{odd}. \end{cases} \quad (1)$$

引入菲涅耳数<sup>[6]</sup>, 则有  $N_1 = \frac{r_m^2}{\lambda f} \cdot \frac{r_{m-1}^2}{\lambda f} = \frac{1}{M} \left( \frac{a^2}{\lambda f} \right)$ . 其中,  $a = r_M$ ,  $N_1$  是从几何焦点看去的任意透明波带的菲涅耳波带数. 因此, 所有透明波带的总菲涅耳波带数可表示为

$$N = M_T \times N_1 = \frac{M_T}{M} \left( \frac{a^2}{\lambda f} \right), \quad (2)$$

会聚的部分相干光经菲涅耳波片衍射, 聚焦场的交叉谱密度函数表示为

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle U^*(\mathbf{r}_1) U(\mathbf{r}_2) \rangle = \left( \frac{k}{2\pi} \right)^2 \iint_{s_1 s_2} W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2) \cdot \frac{e^{-ik(s_1 - s_2)}}{s_1 s_2} d\boldsymbol{\rho}_1 d\boldsymbol{\rho}_2. \quad (3)$$

在式(3)中, 角括号定义为系综平均, 星号表示位相共轭,  $W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2) = (1/f^2) \langle A^*(\boldsymbol{\rho}_1) A(\boldsymbol{\rho}_2) \rangle = (1/f^2) |A(\boldsymbol{\rho}_1)| |A(\boldsymbol{\rho}_2)| e^{-i(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2 / 2\sigma_g^2}$ . 这里, 参数  $\sigma_g$  是空间相干长度. 对方程(3)的因数  $s_1$  和  $s_2$  进行近似表达, 可得近似<sup>[11]</sup>  $s = s(\rho) \approx [(f+z)^2 - \rho^2/f]^2$ . 聚焦场中轴上点  $r$  的光谱强度  $I(r) = W(r, r)$ . 即

$$I(z) = \left( \frac{kA}{f} \right)^2 \cdot \frac{1}{2\pi} \left\{ \iint_{s_1 s_2} e^{-i(\rho_2 - \rho_1)^2 / 2\sigma_g^2} \cdot I_0 \left( \frac{\rho_1 \rho_2}{\sigma_g^2} \right) \cdot \cos\{k[s_1(\rho_1) - s_2(\rho_2)]\} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{s_1(\rho_1) s_2(\rho_2)} d\rho_1 d\rho_2 \right\}, \quad M = \text{even}, \quad (4)$$

在式(4)中,  $I_0$  是零阶修正贝塞尔函数. 我们选择  $M=6$ , 引入归一化因子  $I_{\text{coh}}(0)$ , 并定义其为完全相干时, 几何焦点的光强为

$$I_{\text{coh}}(0) = \lim_{\sigma_g \rightarrow \infty} I(0) = \left( \frac{kA}{f} \right)^2 \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{r_1}^{r_2} \int_{r_1}^{r_2} + \int_{r_3}^{r_4} \int_{r_3}^{r_4} + \int_{r_5}^{r_6} \int_{r_5}^{r_6} + \int_{r_1}^{r_2} \int_{r_3}^{r_4} + 2 \int_{r_1}^{r_2} \int_{r_5}^{r_6} + 2 \int_{r_3}^{r_4} \int_{r_5}^{r_6} \right] \cdot \left( \frac{\rho_1 \rho_2}{f^2} \right) d\rho_1 d\rho_2 = \frac{k^2 A^2 a^4}{14 f^4} = \left( \frac{\pi A N}{f} \right)^2. \quad (5)$$

在推导式(6)时, 我们应用了公式  $I_0(0)=1$ . 基于上述参数, 研究了其他参数的轴上点强度分布, 以至于更好研究焦移和焦开关.

## 2 从焦移到焦开关

部分相干光照射下,对于不同的菲涅耳数,其轴上点的强度分布如图3所示.图中, $M=6$ , $M_r=3$ ,空间相干度 $\sigma_g/a$ 等于1.最大光强峰值表示为 $I_{\max}$ ,第2大峰值表示为 $I_L$ .从图3可以看出,当 $N=25$ , $I_{\max}$ 的位置接近于几何焦点.这表明焦移 $\Delta z$ 非常小,两个峰值 $I_L$ 是关于最大峰值 $I_{\max}$ 对称的,而且峰值 $I_{\max}$ 左边的峰值 $I_L$ 比其右边的峰值略大.随着菲涅耳数 $N$ 的减小,峰值 $I_{\max}$ 和 $I_L$ 变强,焦移增加.然而,峰值 $I_L$ 增加的比率比峰值 $I_{\max}$ 要快.当 $N=7$ 时,两个主要峰值几乎等高.当菲涅耳数 $N$ 降低到5.1时,两个峰值达到同等高度.这表明,焦开关发生的临界强度点到来了.这是峰值 $I_L$ 变为 $I_{\max}$ ,焦移出现突变的传输.这种现象就是所谓的焦开关<sup>[8]</sup>.图3(a)~(c)可以归结为一个类型,那就是光强峰值 $I_L$ 接近于光阑的中心 $O$ 处,而峰值 $I_{\max}$ 则接近几何焦点 $F$ 处;图3(e)~(g)是焦开关出现以后的情况.这些图显示了另一类型的光强分布模型,即其主峰值 $I_{\max}$ 接近于光阑的中心 $O$ 处,第2峰值 $I_L$ 则接近于几何焦点 $F$ 处.

为了判定焦开关发生时的菲涅耳数的范围,我们用图4表示方程 $\Delta I=(I_L-I_C)/I(0)$ 对应3个不同的相干度( $\sigma_g/a=10, 1, 0.2$ ), $I_C$ 是中心光强.可以看出,当相干度等于1, $N>5.1$ , $\Delta I<0$ 时, $I_L$ 比 $I_C$ 小.随着 $N$ 的降低, $\Delta I$ 增加.当 $N=5.1$ , $\Delta I=0$ 时,两个主要峰值达到同等高度,即发生焦开关.焦开关发生时,所对应的菲涅耳数 $N$ 可以由临界菲涅耳数 $N_C$ 来定义.当 $N<5.1$ , $\Delta I>0$ 时, $I_L>I_C$ .从图4中的3条曲线中可以看出,部分相干光的相干度越低,临界菲涅耳数越低.这种特性同样表现在图5中.图5是对应不同数值的 $M$ ,其临界菲涅耳数 $N_C$ 与空间相干度 $\sigma_g/a$ 的关系.因此,我们可以通过控制菲涅耳数和空间相干度来控制焦开关的转换.图6为入射部分相干光的空间相干度对焦开关的影

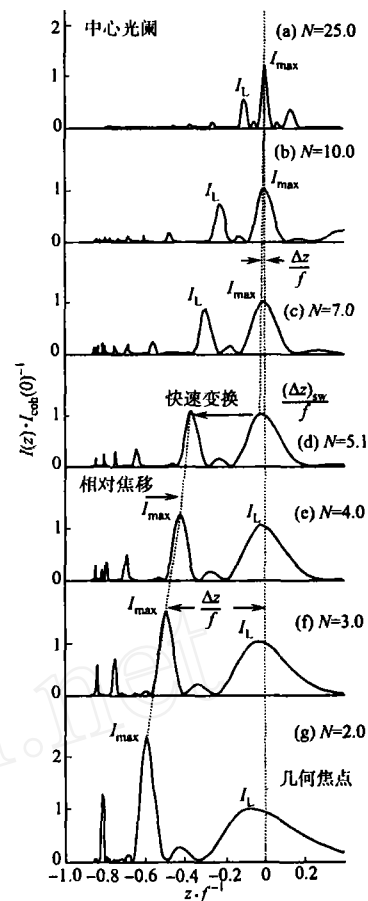


图3 菲涅耳数与相应的轴上点光强峰值的变化

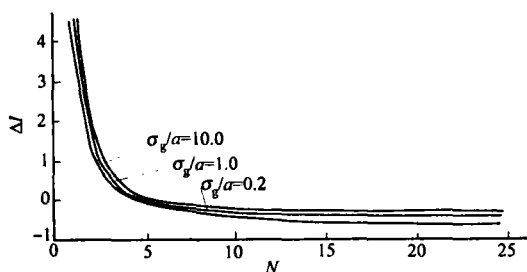


图4  $\Delta I$ 与菲涅耳数 $N$ 的关系

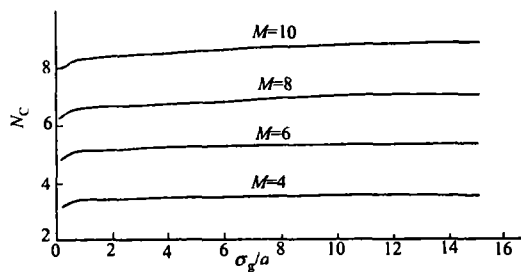


图5 临界菲涅耳数 $N_C$ 与相干度的关系

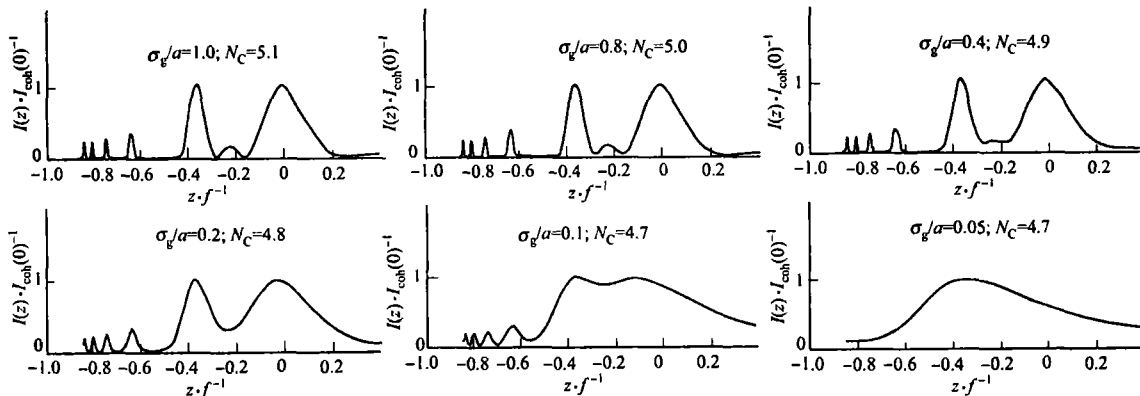


图6 6个不同的空间相干度与临界菲涅耳数关系

响. 当  $\sigma_g/a=1$ ,  $N=N_c=5.1$  时, 焦开关出现. 此外, 在两个主要峰值中间存有一个次峰, 并且波谷很深, 随着相干度的降低, 波谷变浅. 当  $\sigma_g/a=0.2$ ,  $N=N_c=4.8$  时, 两个主要峰值之间的次峰减弱. 随着相干度的继续降低, 当  $\sigma_g/a=0.05$  时, 两个主峰值之间的波谷消失. 这就意味着焦开关在这种情况下消失了.

### 3 结束语

我们已经证明了部分相干光被由菲涅耳波片组成的双聚焦系统聚焦的情况. 结果表明, 焦移会出现, 焦移量不仅依赖于聚焦系统的菲涅耳数, 而且依赖于入射部分相干光的空间相干度. 对某一固定的相干度和菲涅耳波片, 随着菲涅耳数的降低, 焦移量增加. 当菲涅耳数等于某一数值时, 焦移发生焦点突然跃迁的现象出现了, 即焦开关. 我们证明了对于某一固定的菲涅耳波片, 降低空间相干度, 会导致发生焦开关的临界菲涅耳数降低, 而当空间相干度太低时, 焦开关现象消失.

### 参 考 文 献

- 1 Li Y, Wolf E. Focal shifts in diffracted converging spherical waves[J]. Opt Commun, 1981, 39: 211~215
- 2 Holmes D A, Korka J E, Avizonis P. Parametric study of a apertured Gaussian beams[J]. Appl Opt, 1972, 11: 565~574
- 3 Arimoto A. Intensity distribution of aberration-free diffraction patterns due to circular apertures in large F-number optical systems[J]. Opt Acta, 1976, 23: 245~250
- 4 Martinez M C, Climent V. Focal switch: A new effect in low-Fresnel-number systems[J]. Appl Opt, 1996, 35: 24~27
- 5 Li Y. Focal shift and focal switch in dual-focus systems[J]. J Opt Soc Am (A), 1997, 14: 1 297~1 304
- 6 Peng Runwu, Lu Baida. Focal switch of Hermite-Gaussian beams[J]. Acta Phys Sin, 2003, 52: 2 795~2 802
- 7 Lu Baida, Zhang Bin, Cai Bangwei. Focusing of a Gaussian Schell-model beam through a circular lens[J]. J Mod Opt, 1995, 42: 289~298
- 8 Kato Y, Mima K, Miyanaga N, et al. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression[J]. Phys Rev Lett, 1984, (53): 1 057~1 060
- 9 Gase R. The multimode laser radiation as a gaussian Schell-model beam[J]. J Mod Opt, 1991, (38): 1 107~1 115
- 10 Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. London: Pergamon Press, 1999. 343
- 11 Friberg A T, Visser T D, Wang W, et al. Focal shifts of converging diffracted waves of any state of spatial coherence[J]. Opt Commun, 2001, 196: 1~7

## Focal Shift and Focal Switch of Partially Coherent Light in Dual Focus Systems

Liu Xiaoyun      Pu Jixiong

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

**Abstract** Applying the Huygens-Fresnel diffractive integral, we investigate the phenomenon of the focal shifts when a partially coherent light focused by a dual focus system that is consisted of a Fresnel zone plate. The theoretical results show that the amount of the focal shifts is not only dependent upon the Fresnel number of the focusing system, but also on the spatial coherence of the incident partially coherent light. For a fixed Fresnel zone plate, the decrease of the spatial coherence results in the decrease of the critical Fresnel number at which a focal switch occurs. And, when the spatial coherence is too low, the phenomenon of a focal switch disappears.

**Keywords** partially coherent light, focal shift, focal switch, Fresnel zone plate, diffraction