

光阑与透镜间距对聚焦高斯光束的影响*

蒲继雄^① 陈国璋^②

(^①华侨大学电气技术系, 泉州 362011; ^②福建省南安市第一中学, 南安 362300)

摘要 讨论高斯光束经过光阑, 被一透镜聚焦后的轴上点光场分布, 以及光阑和透镜的间距对最佳聚焦点的影响. 理论计算结果表明, 聚焦光场的光强分布与光阑和透镜之间的间距密切相关.

关键词 高斯光束, 光阑与透镜间距, 聚焦

分类号 O 436

高斯光束经过低菲涅尔数的圆孔径透镜聚焦时, 其最佳聚焦点(光强最大点)并不在几何焦点上, 而是处于透镜与几何焦点之间. 这个效应被称为“焦移”^[1~4]. 近几年来, 有关“焦移”的研究论文很多, 但其所研究的对象都是光阑(孔径)正好处在透镜的位置. 本文讨论更一般的情况, 即光阑处在透镜之前. 同时着重研究光阑与透镜的间距对聚焦高斯光束的轴上点光场分布的影响.

1 轴上点光场分布

如图1所示, 一单色的高斯光束被焦距为 f 的透镜聚焦, 光阑与透镜的间距为 L . 假定光阑和透镜的中心都处在高斯光束的光轴上, 同时高斯光束的束腰正好在光阑处. 光阑的半径等于 a , 并且透镜的孔径很大, 由它引起的衍射效应可以忽略不计. 图中从光阑至观察点 P 的光线矩阵可写为

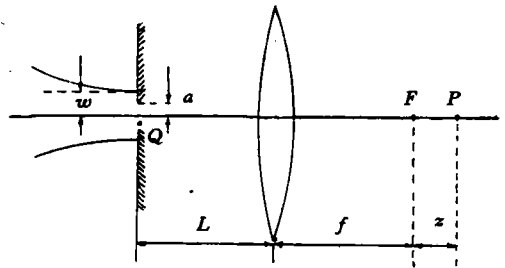


图1 高斯光束经光阑后再经薄透镜聚焦示意图

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -u & f(1+uv) \\ -1/f & v \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 $u = z/f$, $v = 1 - L/f$.

根据 Huygens-Fresnel 衍射积分^[2], 轴上点 P 的光场为

$$E(P) = -\frac{ik}{2\pi B} \exp[-ik(L+f+z)] \int_0^a \int_0^{2\pi} E_0(\rho) \cdot \exp\left(-\frac{ik}{2B} A \rho^2\right) \rho d\rho d\theta, \quad (2)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢, λ 为波长. 光阑处的高斯光束光场分布 $E_0(\rho)$ 为

$$E_0(\rho) = A_0 \exp(-\rho^2/w^2), \quad (3)$$

这里 ρ 是点 Q 到光轴的距离, w 是高斯光束的束腰大小, A_0 为正常数.

* 本文 1996-04-20 收到, 福建省自然科学基金资助项目

把式(3)和式(1)的矩阵元代入式(2),可得

$$E(p) = -\frac{iA_0\pi N_a}{1+uv} \cdot \frac{1 - \exp(-\alpha + i\pi N_a u/(1+uv))}{\alpha - i\pi N_a u/(1+uv)} \cdot \exp[-ik(L+f+z)], \quad (4)$$

其中 $N_a = a^2/\lambda f$ 为光阑的非涅尔数, $\alpha = (a/w)^2$ 称为拦截系数.

因此,我们可得到观察点 P 的光强分布为

$$I(P) = E^*(P) \cdot E(P). \quad (6)$$

把式(4)代入式(6),可得

$$I(P) = \frac{A_0^2}{u^2 + (1+uv)^2/\pi^2 N_w^2} \{1 + \exp(-\alpha) [\exp(-\alpha) - 2\cos(\pi N_a u/(1+uv))]\}, \quad (7)$$

式中 $N_w = w^2/\lambda f$ 为高斯光束的非涅尔数^[2].

在式(7)中,令 $u=0$,即得到透镜焦点处的光强为

$$I(F) = \pi^2 A_0^2 N_w^2 [1 - \exp(-\alpha)]^2. \quad (8)$$

轴上点光强最大值点由方程

$$\frac{dI}{dz} = \frac{dI}{du} \cdot \frac{du}{dz} = 0 \quad (9)$$

决定. 因为 $\frac{du}{dz} \neq 0$, 故光强最大的点由如下方程

$$\frac{dI}{du} = 0$$

决定. 把式(7)代入式(9),可得到

$$\begin{aligned} & [\alpha^2(1+uv) + \pi^2 N_a^2 u] \cdot [1 + \exp(-2\alpha) - 2\exp(-\alpha)\cos(\pi N_a u/(1+uv))] \\ & = \exp(-\alpha)\sin(\pi N_a u/(1+uv)) [\alpha^2(1+uv)^2 + \pi^2 N_a^2 u^2] \frac{\pi N_a}{(1+uv)^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)不仅确定了光强最大值的位置,而且确定了光强次极大、极小值的位置.

式(7)说明,衍射光场轴上点的光场分布不仅与 N_w 、 N_a 、 α 有关,而且还与光阑与透镜之间的间距 v 有关. 图2给出 $v=\pm 1$ 和 $v=0$ 时的光强与 u 的关系(其中 $N_w = w^2/\lambda f = 1$, $\alpha = 1$). 由图可见,当 $v=1$ 和 $v=-1$ 时,这两条曲线相对于 $u=0$ 轴对称;当 $v=0$ ($L=f$) 时,光强的最大点 $u_{\max}=0$,也即恰好在焦点 F 上.

图3给出了光强最大点与拦截系数 α 的关系 ($v=\pm 0.5, \pm 1$; $N_w = w^2/\lambda f = 1$). 当 α 较小时(强拦截情况), u_{\max} 比较大;当 $\alpha > 3$, 对应于弱拦截情形, u_{\max} 趋于某一固定值. 这个固定值,是在没有光阑限制时按高斯光束传输公式求得的光强最大点. 图中,当 $v' = -v$ 时, $u'_{\max} = -u_{\max}$ (在其它参数不变的情况下).

图4为最佳聚焦点 u_{\max} 与 v 的关系 ($\alpha=0.5, 1, 2$; $N_w = w^2/\lambda f = 1$). 由图可见, α 值愈小,

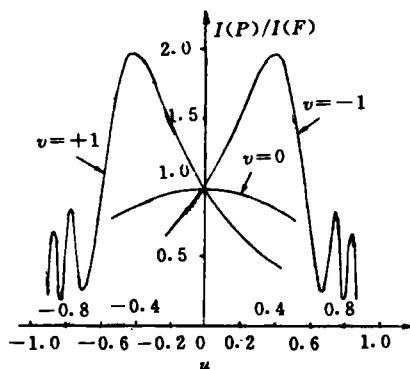


图2 轴上点相对光强与 u 的依赖关系

u_{\max} 随 v 的变化愈显著. 同时, 不管 α 值如何改变, 当 $v=0$ 时, 有 $u_{\max}=0$.

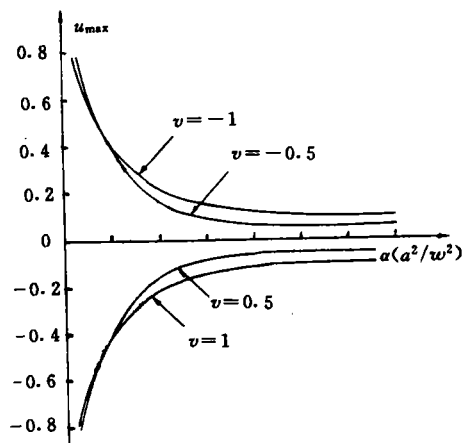


图 3 u_{\max} 与 α 的关系

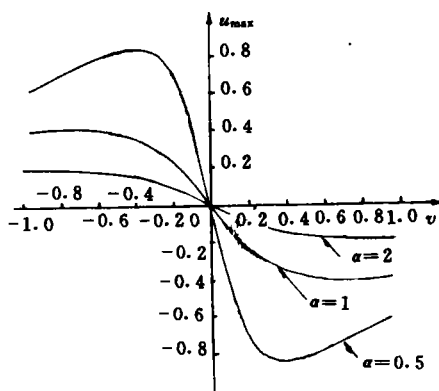


图 4 u_{\max} 与 v 的关系

3 结论与讨论

本文的结果表明, 轴上点光场分布情况依赖于透镜与光阑之间的间距. 当 $v=1$, 本文所讨论的问题就转化为文[1]所讨论的情况, 因而更具有普遍意义. 在激光光束的应用场合, 常会遇到文中所讨论的情形, 即光阑置于透镜之前. 因此, 本结果对激光光束的应用具有一定的指导作用.

参 考 文 献

- 1 Li Y J, Wolf E. Focal shifts in diffracted converging spherical waves. Opt. Commun., 1981, 39(4): 211~215
- 2 Li Y J, Wolf E. Focal shifts in focused Gaussian beams. Opt. Commun., 1982, 42(4): 151~156
- 3 Pu J X. On-light distribution in focused truncated Gaussian beams. J. Opt., 1995, 26(3): 105~108
- 4 Pu J X. A simple procedure for tracing Gaussian Schell-model beams through optical systems. Optik, 1995, 99, (3): 120~122

Effect of Aperture-Lens Separation on the Focusing of Gaussian Beams

Pu Jixiong^① Chen Guozhang^②

(^①Dept. of Electric Technique, Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou; ^②Nanan First middle School, 362300 Fujian)

Abstract A bundle of Gaussian beams passing through a circular aperture is focused by a lens. A study is devoted to the effect of its aperture-lens separation on its on-axis light distribution and its optimal focusing. The theoretical results show that there have been a close relation between light distribution of the focused field and the aperture-lens separation.

Keywords Gaussian beam, aperture-lens separation, focusing