

文章编号: 1001-3806(2004)01-0108-03

两种处理焦移方法的比较研究

彭润伍¹, 吕百达^{1,2}

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064; 2. 华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 对焦移的处理有两种不同方法, 即 Li Wolf 法和 Greene Hall 法。以复宗量拉盖尔-高斯光束为典型例, 对处理焦移的这两种方法作了详细的比较研究, 并对数值计算结果作了分析。所得结论对某些实际应用是有意义的。

关键词: 焦移; Li Wolf 法; Greene Hall 法; 复宗量拉盖尔-高斯光束

中图分类号: TN241 文献标识码: A

A comparative study of two different approaches to focal shifts

PENG Run-wu, L ÜBai-da

(1. Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: There are two different approaches to deal with focal shifts, i.e. Li Wolf's and Greene Hall's approaches. In this paper focal shifts in elegant (complex argument) Laguerre Gaussian (ELG) beams are taken as a typical example, a detailed comparative study of the two approaches is made and numerical calculations results are illustrated. The conclusion made in this paper is useful for some practical applications.

Key words: focal shift; Li Wolf's approach; Greene Hall's approach; elegant (complex argument) Laguerre Gaussian (ELG) beam

引 言

聚焦光束在轴上光强最大点往往与几何焦点不处于同一位置, 这是 LI 和 WOLF^[1,2]提出的焦移, 它是对经典理论的重要修正。对多类光束, 例如平顶高斯光束^[3]、高斯-谢尔模型光束^[4]等的焦移已进行了深入的研究。在这些工作中一般都使用 LI 和 WOLF^[1,2]提出的方法(简称 LW 法), 由轴上光强最大点相对于几何焦点的位置决定焦移。但是如果会聚光束轴上光强为 0 时, LW 法就失效了。近来, GREENE 和 HALL 用环围功率法(简称 GH 法)研究了矢量贝塞尔-高斯光束的焦移^[5]。本文中使用了 LW 法和 GH 法对复宗量拉盖尔-高斯光束(ELG 光束)^[6]的焦移特性作了比较研究。依赖于模序数的取值, ELG 光束在实际焦面上轴上光强可为 0, 也可不为 0。用 LW 法和 GH 法分析了 ELG 光束的焦

移, 并对当 ELG 光束轴上光强不为 0 时用两种方法得出的结果作了比较, 得出了一些有实际意义的新结果。

1 聚焦 ELG 光束的光强分布

设有 ELG 光束入射如图 1 所示焦距为 f ($f > 0$)

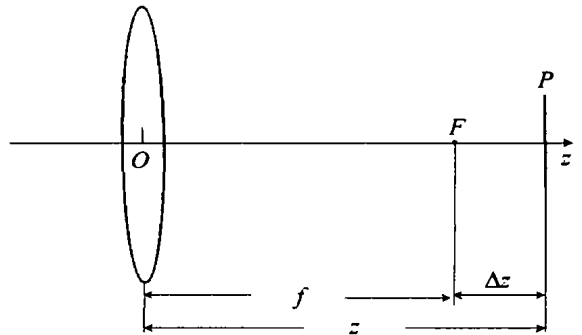


Fig. 1 An unapertured lens optical system

无光阑限制的薄透镜上。在入射面 $z=0$ 处 ELG 光束的场分布为^[6]:

$$E(r_0, \varphi_0, 0) = (r_0/w_0)^l L_p^l(r_0^2/w_0^2) \times \exp(-r_0^2/w_0^2) \exp(-il\varphi_0) \quad (1)$$

式中, w_0 是对应基模高斯光束束腰宽度, L_p^l 是拉盖

作者简介: 彭润伍(1971-), 男, 硕士研究生, 从事激光传输与变换的研究。

E-mail: pengrunwu@sina.com

收稿日期: 2003-02-20; 收到修改稿日期: 2003-05-14

尔多项式, l, p 分别为角向指数和径向指数。

ELG 光束通过无光阑透镜后在考察面 P 处的场分布为^[7]:

$$E(\xi, \varphi, \Delta z) = (-\Delta z/f)^p \xi^l \exp(i l \varphi) \times L_p \left\{ \frac{-i\pi N_w \xi^2}{[1 + (1 - i\pi N_w) \Delta z/f] \Delta z/f} \right\} \times \left[\frac{i\pi N_w}{1 + (1 - i\pi N_w) \Delta z/f} \right] \times \exp \left\{ -\frac{i\pi N_w (1 - i\pi N_w) \xi^2}{1 + (1 - i\pi N_w) \Delta z/f} \right\} \quad (\Delta z \neq 0) \quad (2)$$

$$E(\xi, \varphi, 0) = (-1)^p (p!)^{-1} \xi^{2p+l} \exp(i l \varphi) \times (i\pi N_w)^{2p+l+1} \exp[-i\pi N_w (1 - i\pi N_w) \xi^2] \quad (\Delta z = 0) \quad (3)$$

式中,

$$N_w = w_0^2 / \lambda \quad (\text{与高斯光束有关的菲涅耳数}) \quad (4) \quad \xi = r/w_0 \quad (\text{相对坐标}) \quad (5)$$

$\Delta z = z - f$ (以几何焦点为参考的轴向距离) ELG 光束通过无光阑透镜后在考察面 P 处的光强为:

$$I(\xi, \varphi, \Delta z) = |E(\xi, \varphi, \Delta z)|^2 \quad (7)$$

由(7)式得出聚焦 ELG 光束在几何焦面的光强分布如图 2 所示, 计算参数为 $w_0 = 1\text{mm}$, $\lambda = 632.8\text{nm}$, $f = 400\text{mm}$, $N_w = 4$ 。从图可看出, 除 TEM_{00} 模的轴上 ($\xi = 0$) 光强不为 0 外, 在几何焦面上 TEM_{10} , TEM_{20} , TEM_{01} , TEM_{02} 和 TEM_{11} 模的轴上光强均为 0。

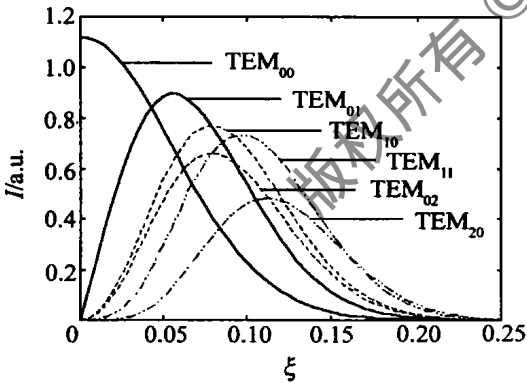


Fig. 2 Irradiance distributions of focused ELG beams at the geometrical focal plane $z = f$

2 ELG 光束的焦移

轴上光强不为 0 时, 使用 LW 法, 轴上光强极大值的位置 Δz_{\max} 由: $dI/d\Delta z = 0$ (8) 决定。由此得相对焦移为:

$$\Delta z_f = \Delta z_{\max} / f \quad (9)$$

轴上光强为 0 时, LW 法不再适用。对 ELG 光束聚焦后轴上光强为 0 和不为 0 的情况都可以使用 GH 法研究其焦移。GH 法用包含了 80% 光强的面积来定义束宽 w , 最小束宽 (束腰宽度) w_{\min} 对应的轴上位置 $z_{\max} = f + \Delta z_{\max}$ 为实际焦面位置, Δz_{\max} 满足:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{w/w_0} I(\xi, \varphi, \Delta z) \xi d\xi d\varphi \Big|_{z_{\max}} - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(\xi, \varphi, \Delta z) \xi d\xi d\varphi = 0.8 \quad (10)$$

由上式可得出光束束腰宽度 w_{\min} 、实际焦面的位置 z_{\max} , 然后由(9)式可得出相对焦移 Δz_f 。

使用(7)式~(10)式作数值计算进行分析。图 3 是 TEM_{00} , TEM_{10} , TEM_{20} , TEM_{01} , TEM_{02} 和 TEM_{11} 模 ELG 光束在实际焦面 z_{\max} 上的光强分布, 计算参数同图 2。比较图 2、图 3 可知, 除 TEM_{00} 模

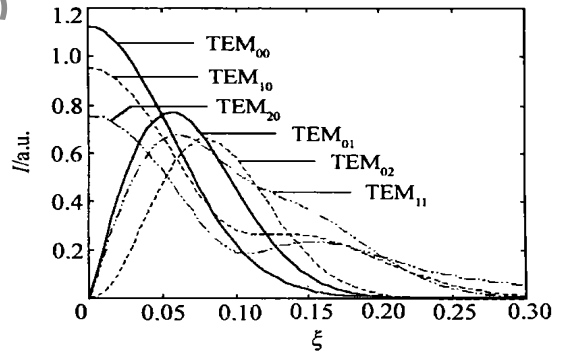


Fig. 3 Irradiance distributions of focused ELG beams at real focal plane z_{\max}

(高斯光束) 外, ELG 光束在实际焦面上光强分布与几何焦面上是不同的, 尤其是 TEM_{10} , TEM_{20} 模光强极大处于轴上 ($\xi = 0$), 但是 TEM_{01} , TEM_{02} 和 TEM_{11} 模轴上光强仍为 0。图 4 是 ELG 光束沿轴上

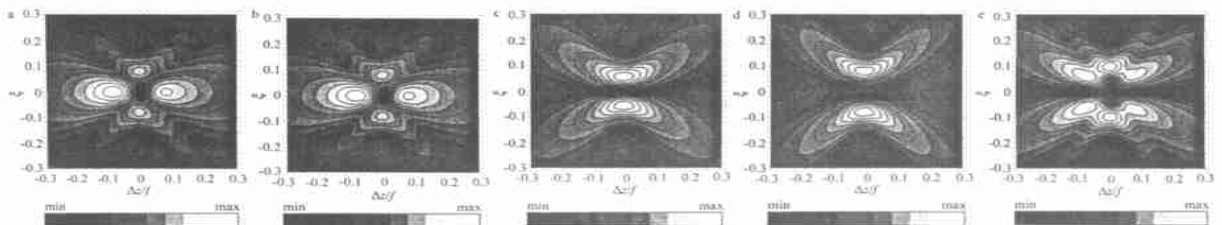


Fig. 4 Contour lines of the equal irradiance of focused ELG beams along the z -axis
a- TEM_{10} mode b- TEM_{20} mode c- TEM_{01} mode d- TEM_{02} mode e- TEM_{11} mode

的光强分布, 计算参数同图 2。从图可看出, 阶次越高的光束光强分布越复杂。光强分布关于 $\Delta z = 0$ ($z = f$) 是非对称的, 光强主极大不在几何焦点处, 而位于 $\Delta z < 0$ 的范围内。 $l = 0$ 的 TEM₁₀, TEM₂₀ 模在几何焦点两边分别存在一个光强主极大、一个次极大, 而几何焦点处的光强为 0。光束在沿轴向传输的过程中, 先是会聚达到主极大, 然后往轴外散开使轴上光强为 0, 接着再会聚产生光强次极大。 $l \neq 0$ 的 TEM₀₁, TEM₀₂ 模随阶次的增加等光强线分布离轴线 ($\xi = 0$) 散开越厉害。图 5 是 ELG 光束的束宽随相对传输距离的变化, 计算参数同图 2。束宽在光束到达几何焦点以前取得最小值, 光束束腰的位置(实际焦面的位置)相对几何焦点往透镜方向移动, 即光束存在负焦移。

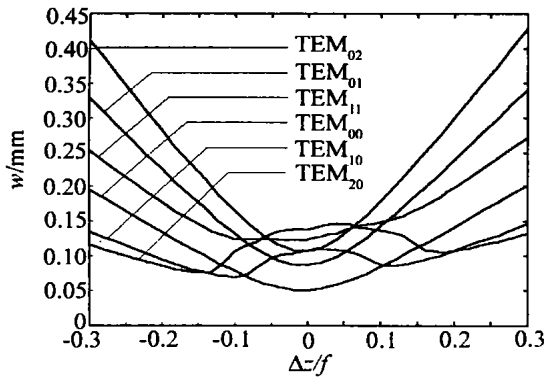


Fig. 5 Beam width w of focused ELG beams versus relative propagation distance $\Delta z/f$

图 6 是用 LW 法和 GH 法得出的 ELG 光束的 Δz_f 随 N_w 的变化。由图知, $|\Delta z_f|$ 随 N_w 的增大而减小。对轴上光强不为 0 的 TEM₀₀, TEM₁₀, TEM₂₀ 模 LW 法和 GH 法均适用, 二者得出的 Δz_f 有差别。

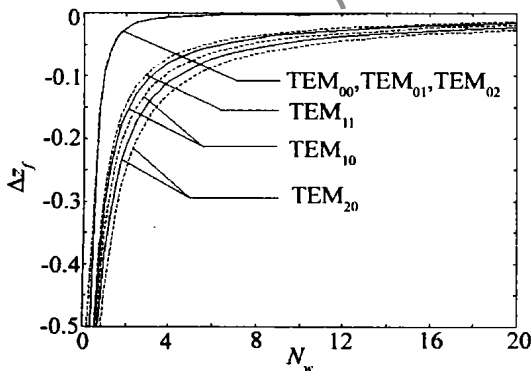


Fig. 6 Relative focal shift Δz_f of focused ELG beams versus Fresnel number N_w , “—” using LW method, “---” using GH method

TEM₀₀ 模的 Δz_f 差别很小, 除对较小的有细微不同外两条曲线完全重合, 而 TEM₁₀, TEM₂₀ 模的 Δz_f 则

有明显差别。例如, $N_w = 4$ 时使用 LW 法得出 TEM₀₀, TEM₁₀, TEM₂₀ 模的 Δz_f 分别为 -0.006, -0.079, -0.109, 使用 GH 法得出的 Δz_f 分别为 -0.006, -0.095, -0.129, 差值分别为 0, -0.016, -0.020, 即差值随阶次增大而增大。对轴上光强为 0 的 TEM₀₁, TEM₀₂ 和 TEM₁₁ 模, LW 法不适用, 只能使用 GH 法。计算得知 TEM₀₀, TEM₀₁ 和 TEM₀₂ 模有相同的 Δz_f , 但它们的束腰宽度不同, 在图 2 的计算参数情况下, 其束腰宽度分别为 0.051mm, 0.086mm, 0.107mm。

3 小 结

以 ELG 光束为例, 对研究焦移的 LW 和 GH 法作了详细的比较研究。结果表明, 聚焦 ELG 光束在实际焦面有着与几何焦面明显不同的光强分布, 阶次越高的光束光强分布越复杂。在实际焦面轴上有光强极大的 TEM₁₀, TEM₂₀ 模其光强极大不仅不在几何焦点处, 而且几何焦点的光强为 0。ELG 光束焦移与菲涅耳数和 ELG 模阶次有关, 并且用 LW 法和 GH 法计算实际焦面上轴上光强不为 0 时 TEM₀₀, TEM₁₀ 和 TEM₂₀ 模的焦移结果有差别。在计算参数相同条件下 LW 法得出的结果比 GH 法得出的结果要小。由此提出了一个新的问题: 应当用那种方法计算和分析焦移? 对这一问题的回答可简要归结为: (1) 当轴上光强为 0 时, 例如 TEM₀₁, TEM₀₂ 和 TEM₁₁ 模, LW 法不适用, 应当用 GH 法计算焦移; (2) 当轴上光强为最大, 且旁瓣较少时, 应当用 LW 法计算焦移; (3) 当横向光强分布较复杂时, 应当从实际应用目的出发, 选取计算焦移的方法。如果以追求远场功率(能量)集中度为应用目的, 则以 GH 法计算焦移为好。本文中所得这些结论对实际工作有应用意义。

参 考 文 献

- [1] LI Y, WOLF E. Opt Commun, 1981, 39(4): 211~ 215.
- [2] LI Y, WOLF E. Opt Commun, 1982, 42(3): 151~ 156.
- [3] LÍ B D, ZHANG B. J Mod Opt, 1995, 42(2): 289~ 298.
- [4] CASPERSON L W, HALL D G. J O S A, 1997, A14(12): 3341 ~ 3348.
- [5] GREENE P L, HALL D G. Optics Express, 1999, 4(10): 411 ~ 419.
- [6] SAGHAFI S, SHEPPARD C J R. J Mod Opt, 1998, 45(10): 1999 ~ 2009.
- [7] MA H, LÍ B D. Optik, 2000, 111(6): 273~ 279.