

高功率激光光束的光束质量及聚焦*

蒲 继 雄

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

摘要 介绍激光光束的光束质量定义, 讨论高功率激光光束的光束质量及其描述和激光光束经透镜的聚焦。

关键词 激光光束, 光束质量, 聚焦

分类号 TN 241

通常高功率激光光束的光束质量较差。这是因为, 为了获取高的激光功率, 激光器常在大口径增益介质的条件下工作, 故输出的激光光束是由基横模和高阶模的非相干迭加; 另一方面, 高功率激光光束经过放大介质或光学系统传输, 放大介质或光学系统的缺陷或象差势必使高功率激光光束的光束质量变差。而在实际应用中, 激光的光束质量是很重要的参数。因此, 探讨高功率激光的光束质量及其在传输中的有关问题, 对高功率激光光束的应用是很重要的。

1 高功率激光光束的光束质量

激光光束的光束质量的好坏关系到激光的使用效果。因此, 对一台激光器来说, 其输出的激光的光束质量是一项非常重要的指标。然而长期以来, 人们惯用激光光束的束腰半径、发散角和斯特雷尔(Strehl)比率等参数来定义激光光束质量。而没有一个标准的、统一的量来定义激光的光束质量。直到1990年, Siegmen^[1]提出用 M^2 因子来定义激光的光束质量。 M^2 因子也称为光束质量因子, M^2 因子定义为

$$M^2 = (\omega \cdot \theta) / (\omega_0 \cdot \theta_0),$$

式中 ω, θ 是实际激光光束的束腰半径和发散角; ω_0, θ_0 是基模高斯光束的束腰半径和发散角。

M^2 因子的定义为激光光束质量给出了较清晰的定量描述。假设实际激光光束就是基模高斯光束, 即 $M^2=1$, 取极小值; 若实际光束为 n 阶厄米-高斯模, $\omega_n = (2n+1)^{1/2} \omega_0$, $\theta_n = (2n+1)^{1/2} \theta_0$, 故 n 阶厄米-高斯模的光束质量因子为^[2] $M^2 = 2n+1$, 即阶数 n 愈高, M^2 愈大, 表明其光束质量愈差。由于高功率激光光束是由基模、高阶模的混合。因此, 其光束质量因子 $M^2 > 1$ 。并且, 高阶模的成份愈多, M^2 值愈大, 表明其光束质量愈差。

值得一提的是, 激光光束经过线性无耗的光学系统传输, 其 M^2 因子保持不变。但是, 当其经过有球差的透镜等光学系统传输, 其 M^2 因子将增大^[3]。假设 M_{r0} 是激光光束的 M^2 因子, M_r 是经过有球差的透镜之后, 激光光束的 M^2 因子。那么 $M_r^2 = [(M_{r0}^2)^2 + (M_{r\infty}^2)^2]^{1/2}$, 其中 $M_{r\infty}$

* 本文1996-01-02收到; 福建省自然科学基金资助项目

$= \frac{2^{3/2} \pi M_{41} \omega^4}{f^3 \lambda}$, f 是透镜的焦距, ω 是透镜前激光光斑的大小, M_{41} 是无量纲的球差系数.

2 高功率激光光束的聚焦

在高功率激光的应用场合中, 为了获取更大的激光功率密度, 常采用会聚透镜把高功率激光光束聚焦, 如图 1 所示 (GSM 光束). 若透镜的焦距的 f , 那么聚焦点的位置在哪处呢? 这个问题是激光应用中需要回答的问题. 一般来说, 激光光束经透镜聚焦, 其焦点不在几何焦点 F 上, 而是在透镜与几何焦点 F 之间. 这个现象被称为焦移 (Focal Shift). 近几年, 对基模高斯光束经透镜聚焦而引起的焦移现象的研究很多^[4-6]. 然而, 对高功率激光光束焦移现象的报道却很少^[7]. 下面我们就对此问题进行讨论.

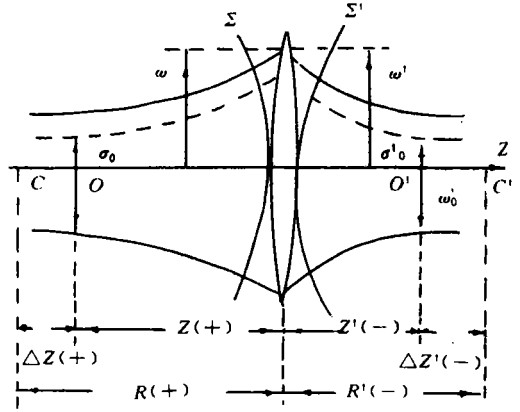


图 1 高功率激光光束经透镜聚焦示意图

假定高功率激光光束可用高斯-斯克尔模型 (GSM) 光束表示^[7-11]. 即 GSM 光束的交叉谱密度函数为

$$W(r_1, r_2; Z) = A(Z) \exp \left\{ - \frac{(r_1 + r_2)^2}{2\omega^2(Z)} \right\} \times \exp \left\{ - \frac{(\omega_0^2 + \sigma_0^2)(r_1 - r_2)^2}{2\sigma_0^2\omega^2(Z)} \right\} \exp \left\{ - \frac{ik(r_1^2 - r_2^2)^2}{2R(Z)} \right\}, \quad (1)$$

其中 $\omega(Z) = \omega_0 [1 + (Z/Z_R)^2]^{1/2}$, $\sigma(Z) = \sigma_0 [1 + (Z/Z_R)^2]^{1/2}$, $R(Z) = Z [1 + (Z_R/Z)^2]$, $A(Z) = A_0 / [1 + (Z/Z_R)^2]^{1/2}$, GSM 光束的瑞利距离 $Z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \beta$, $\beta = (1 + 1/\alpha^2)^{-1/2}$, GSM 光束的综合相干度 $\alpha = \frac{\sigma_0}{\omega_0}$ (GSM 光束经过无耗光学系统传输, 其值保持不变).

我们把式 $R(Z)$ 重新写成

$$R(Z) = Z + Z_R^2/Z = Z + \Delta Z. \quad (2)$$

由式(2)和图 2 可见, $R(Z)$ 是波面 Σ 的曲率半径, 而且它的中心 C 不在光束束腰平面 ($Z=0$ 平面), 而是在 $-\Delta Z$ 平面. ΔZ 即称为 GSM 光束的焦移. 我们定义 GSM 光束的非涅尔数 $N(Z)$ 为

$$N_* = N(Z) = (\omega^2 \beta) / (\lambda R), \quad (3)$$

把前几式代入式(3), 得

$$N_* = \lambda Z / (\pi^2 \omega_0^2 \beta); \Delta Z / Z = (Z_R / Z)^2 = 1 / (\pi N_*)^2. \quad (4)$$

图 2 为 GSM 光束经过薄透镜传输示意图. 根据光学的高斯理论, 在薄透镜输入和输出面上, 光束的大小相等. 即 $\omega' = \omega$. 根据透镜的成像公式, 薄透镜输入和输出面上光束的波面曲率半径有如下关系

$$1/R - 1/R' = 1/f. \quad (5)$$

因此, 输出面波前 Σ' 的非涅尔数 N'_* 为

$$N'_\omega = N^2\beta/(\lambda R') = (R/R')N_\omega. \quad (6)$$

输出光束的相对焦移为

$$\Delta Z'/Z' = 1/(\pi N'_\omega)^2, \quad (7)$$

根据式(4), (6)和(7),可以得到 GSM 光束经过薄透镜,其相对焦移的传输为

$$\begin{aligned} (\Delta Z'/Z')/(\Delta Z/Z) = \\ (N_\omega/N'_\omega)^2 = (R'/R). \end{aligned} \quad (8)$$

因此,根据式(4~8),我们可以很方便地追逐 GSM 光束经过光学系统的聚焦.下面我们举一例子说明之.

在图 2 中,我们假定 $Z=2f$, 据式(5),得

$$R' (= Z' + \Delta Z') = fR/(f - R), \quad (9)$$

把式 $R(Z)$ 代入上式,得

$$\begin{aligned} R' (= Z' + \Delta Z') = \\ -2f(1+x^2)/(1+2x^2), \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $x=Z_R/(2f)$, 而据式(8)得

$$\Delta Z'/Z' = x^2/(1+x^2/2)^2. \quad (11)$$

解式(10)和式(11),得

$$\begin{aligned} Z' &= \frac{2f(1+x^2)(1+x^2/2)}{(1-2x^2)(1+2x^2+4x^4/4)}; \\ \Delta Z' &= -\frac{2fx^2(1+x^2)}{(1+2x^2)(1+2x^2+x^4/4)}. \end{aligned}$$

图 3 作出了相对焦点位置 $Z'/2f$ 和相对焦移与光束综合相干度 α 的关系. 由图 3 可见,当 $\alpha=0$, (即对应于完全非相干情形), $Z'=2f$, $\Delta Z'=0$, 这就是几何光学预言的结论. 当 α 增大时,其成像关系偏离了几何光学的结果. 随着 α 的增大, $Z'/2f$ 和 $\Delta Z'/2f$ 趋向一固定值. 这个固定值就是完全相干的高斯光束的焦点位置和焦移. 以上结果表明,高功率激光光束(GSM 光束)的空间相干性不同,其最佳聚焦点也不同.

3 结论

高功率激光光束是由许多横模组成的. 采用 Siegman 提出的 M^2 因子描述高功率激光光束的光束质量是比较清晰、简单的方法. 目前,已有专门测量激光光束 M^2 因子的仪器出售.

由于高功率激光光束是由许多横模的混合,因此,它属于部分相干光束. 在某些情况下,可以用 GSM 光束描述^[12]. 鉴此,高功率激光光束经光学系统传输规律遵从部分相干光束的传输规律. 即经透镜聚焦的最佳聚焦点在一般情况下不在高斯光束经透镜聚焦所预言的焦

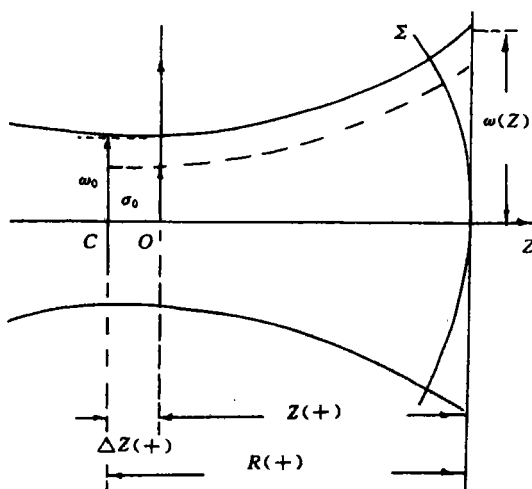


图 2 GSM 光束沿 Z 轴传输及其焦移等示意图

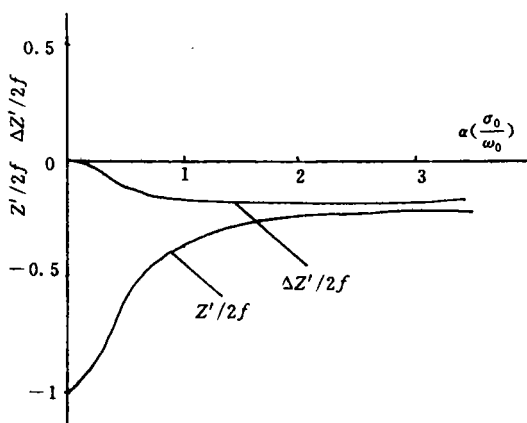


图 3 GSM 光束经透镜聚焦的焦移和焦点位置与光束的综合相干度 α 的关系

点,其最佳聚焦位置与高功率激光光束的横模组份有关.

参 考 文 献

- 1 Siegman A E. Optical resonators. Proc. SPIE, 1990, 1 224; 2~14
- 2 Carter W H. Spot size and divergence for hermite-gaussian beams of any order. Appl. Opt., 1980, 19, 1 027~1 029
- 3 Ruff J A, Siegman A E. Measurement of beam quality degradation due to spherical aberration in a simple lens. Opt. & Quant. Electron., 1994, 26, 629~632
- 4 Li Y J, Wolf E. Focal shift in focused truncated gaussian beams. Opt. Commun., 1982, 42, 151~156
- 5 Li Y J. Focal shift formula for focused apertured gaussian beams. J. Mod. Opt., 1992, 39, 1 761~1 764
- 6 Pu J X. On-axis light distribution in focused truncated gaussian beams. J. Opt., 1995, 26, 105~108
- 7 Lu B D, Zhang B, Cai B W. Focusing of a gaussian schell-model beam through a circular lens. J. Mod. Opt., 1995, 42, 289~298
- 8 Pu J X. Coherent-mode representation of propagation partially coherent beams through first-order optical systems. Proc. SPIE, 1990, 1 319, 17~19
- 9 蒲继雄,陈金铠. 高斯-斯克尔模型光束经过光学系统的传输. 光学学报, 1989, (9), 447~452
- 10 Pu J X. Waist location and rayleigh range for gaussian schell-model beams. J. Opt., 1991, 22, 157~159
- 11 Lu B D, Zhang B, Cai B W. A simple method for estimating the number of effectively oscillating modes and weighting factors of mixed-mode laser beams behaving like GSM beams. Opt. Commun., 1993, 101, 49~54

Beam Quality and Focusing of High-Power Laser-Beam

Pu Jixiong

(Dept. of Electric Technique., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract The beam quality of laser-beam is defined. A discussion is then devoted to the beam quality of high-power laser-beam and its description; and also to the focusing of high-power laser-beam.

Keywords laser-beam, beam quality, focusing