

激光的参数描述和光束质量*

吕百达^{1,2}, 季小玲¹, 罗时荣¹, 陶向阳^{1,2}

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064;

2. 江西师范大学 物理与通信电子学院, 江西 南昌 330027)

摘要:激光光束质量是一个很有现实意义的论题。对实际激光,一方面或多或少存在硬边光阑光学元件影响。另一方面,人们常对远场激光束的可聚焦能力感兴趣。对有光阑情况时光束传输因子(M^2 因子)的推广作了讨论。对有代表性的 3 种方法,即广义截断二阶矩法、渐近分析法和自收敛束宽法及其应用作了分析。引入了桶中功率(PIB)和 β 参数用以描述远场光束质量。然后,研究了实际应用对激光光束质量的一些要求和相关的评价参数。最后,讨论了复杂的高功率激光系统的全程光束质量控制问题。

关键词: 激光光束质量; 参数描述; 硬边光阑; 光束传输因子; 桶中功率

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)01-0014-04

Parametric characterization of laser beams and beam quality*

LÜ Bai-da^{1,2}, JI Xiao-ling¹, LUO Shi-rong¹, TAO Xiang-yang^{1,2}

(1. Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China)

Abstract: The laser beam quality is a topic of current interest. For a real laser, there exists hard-aperture optics more or less. On the other hand, the people are often concerned about the focusability of laser beams in the far field. The extension of the beam propagation factor (M^2 factor) to the apertured case is discussed. Three typical approaches to truncated beams, i. e. the generalized truncated second-moments method, asymptotic analysis and self-convergent-beam-width method, as well as their applications are analyzed. The power in the bucket (PIB) and β -parameter are used to characterize the beam quality in the far field. Then, some practical requirements for the laser beam quality and related characteristic parameters are studied. Finally, a brief discussion about the beam quality control of a complicated high-power laser system as a whole is made in this paper.

Keywords: Laser beam quality; Parametric characterization; Hard-edged aperture; Beam propagation factor; Power in the bucket

收稿日期:2003-08-20; 修订日期:2003-10-17

* 基金项目:总装备部预研基金资助项目(A823070);江西省自然科学基金资助项目(0212021)

作者简介:吕百达(1943-),男,四川成都人,教授,博士生导师,所长,主要从事高功率和新型固体激光器方面的研究,曾在国内外刊物上发表论文 300 余篇。

0 引言

自20世纪80年代末国际光学界重新提出激光光束质量这一问题以来,对此问题进行了多次研究。不仅从物理概念和理论上对激光光束质量和与此相关的激光束的描述、传输变换规律有了新的认识,而且从实际需要出发,提出了评价激光光束质量的参数和测量方法,一些厂家研制出了 M^2 因子模规、激光光束诊断仪等,供测量使用。

1 光束传输因子

由Siegman教授明确提出的光束传输因子(即 M^2 因子)^[1]常作为评价激光光束质量的参数。可以证明,光束通过近轴理想ABCD光学系统时, M^2 因子是一个传输不变量,而且基于二阶矩定义的光束参数在自由空间按双曲线规律传输。在实际应用中,对追求以基模高斯光束为理想光束并作为比较标准的情况下, M^2 因子可作为“光束质量因子”,用以衡量激光光束质量。在近轴条件下, $M^2 \geq 1$ 。 M^2 因子越大,则光束质量越差。然而,除了测量上的一些问题外^[2], M^2 因子遇到的另一问题是所谓“发散困难”,即对硬边强衍射光束, M^2 因子趋于无穷大。遗憾的是,实际的激光或多或少会受到光阑的限制,特别是,如何评价经硬边衍射从非稳腔输出的激光光束质量。如果一定要使用 M^2 因子作为评价参数,则必须将无光阑限制情况下 M^2 因子的定义进行推广。有代表性的工作包括广义截断二阶矩法、渐近分析法和自收敛束宽法等。

(1) 广义截断二阶矩法

Martinez-Herrero等人提出^[3]:当存在硬边光阑时,可分别用下式来定义空间域和空间频率域的截断二阶矩 $\langle x^2 \rangle$ 、 $\langle u^2 \rangle$ 以及截断混合矩 $\langle xu \rangle$ (设一阶矩为零):

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{I_0} \int_{-a}^a x^2 |E(x)|^2 dx \quad (1)$$

$$\langle u^2 \rangle = \frac{1}{k^2 I_0} \int_{-a}^a |E'(x)|^2 dx + \frac{4}{k^2 I_0 a} [|E(a)|^2 + |E(-a)|^2] \quad (2)$$

$$\langle xu \rangle = \frac{1}{2ikI_0} \int_{-a}^a \{ x [E'(x)]^* E(x) - xE'(x)E^*(x) \} dx \quad (3)$$

式中 a 为光阑宽度; k 为波数;“'”为对 x 的导数;“*”为复共轭; I_0 为进入光阑的功率,即:

$$I_0 = \int_{-a}^a |E(x)|^2 dx \quad (4)$$

广义截断二阶矩法的优点是它克服了 M^2 因子计算中的发散困难,对一些常见光束可得出广义 M^2 因子的解析公式,便于进行直观的物理分析^[4]。但对按公式(1)~(3)定义的光束参数作简单而直接的物理测量还存在一些困难^[5]。

(2) 渐近分析法

由Pare等人提出渐近分析法的基本思想是,当功率百分比 f (见公式(6))足够大时,截断二阶矩应当近似地按抛物线(确切而言是双曲线)规律演化。因此,截断光束的 M^2 因子可由最小二乘拟合法计算。空间域中截断光束的二阶矩为^[5]:

$$\sigma_x^2 = \int_{-x_c}^{x_c} x^2 |E(x,0)|^2 dx / \int_{-x_c}^{x_c} |E(x,0)|^2 dx \quad (5)$$

式中 $E(x,0)$ 为束腰($z=0$)处的场分布。积分限 x_c 由下式决定:

$$\int_{-x_c}^{x_c} |E(x,0)|^2 dx = f \int_{-a}^a |E(x,0)|^2 dx \quad (6)$$

式中 f 为功率百分比。在空间频率域中有:

$$\sigma_s^2 = \int_{-s_c}^{s_c} s^2 |E(s,0)|^2 ds / \int_{-s_c}^{s_c} |E(s,0)|^2 ds \quad (7)$$

且,

$$\int_{-s_c}^{s_c} |E(s,0)|^2 ds = f \int_{-a}^a |E(x,0)|^2 dx \quad (8)$$

于是,截断光束的 M^2 因子为:

$$M_Q^2 = 4\pi\sqrt{\sigma_r^2\sigma_s^2} \quad (9)$$

使用渐近分析法求 M_Q^2 时,功率百分比的选取很重要。若 $f=100\%$,则 M_Q^2 发散。如果 f 取值太小,

双曲线传输公式将不成立, M_0^2 不是常数。一般取 f 在 95%~99% 范围为宜。利用这一方法, 分析了截断高斯光束^[5]、截断双曲余弦高斯光束^[6] 等的 M_0^2 因子, 证实了该方法的可用性。

(3) 自收敛束宽法

依据 Amarande 等人提出的自收敛束宽法^[7], 将空间中截断光束的二阶矩定义为:

$$\sigma_x^2(z) = \frac{1}{p} \int_{-x_{\text{lim}}}^{x_{\text{lim}}} x^2 |E(x, z)|^2 dx \quad (10)$$

式中 $p = \int_{-x_{\text{lim}}}^{x_{\text{lim}}} |E(x, z)|^2 dx$ 为积分限 x_{lim} 内的功率份额。 σ_x^2 与束宽 $w(F_s)$ 关系为:

$$w(F_s) = 2\sqrt{\sigma_x^2(z)} \quad (11)$$

x_{lim} 由下式决定:

$$x_{\text{lim}} = F_s w(F_s) \quad (12)$$

式中 F_s 为自收敛束宽因子; $w(F_s)$ 可由迭代法求出, 详见参考文献[7]。选取 F_s 的原则是, 用自收敛束宽法计算出的 M^2 因子应收敛于无光阑时的值, 即该方法应自治。在自收敛束宽法中, M^2 因子由双曲线传输公式求出:

$$w^2(z) = w_0^2 + \left(\frac{\lambda M_s^2}{\pi w_0}\right)^2 (z - z_0)^2 \quad (13)$$

式中 w_0, z_0 分别为束腰宽度和束腰位置; λ 为波长。

实际上, 自收敛束宽法与渐近分析法类似, 都是用功率份额定义的截断二阶矩法。在一定条件下, 用这两种方法可得出近似的 M^2 因子, 但都存在参数 (f 或 F_s) 不能唯一确定的问题^[8], 并且计算出的 M^2 因子可能小于 1。这些问题尚待进一步研究。

2 桶中功率和 β 参数

若只关心实际激光在远场的可聚焦能力, 则可用桶中功率 (PIB)^[9] 评价远场激光质量。桶中功率定义为在远场给定尺寸的“桶”中围住的激光功率占总功率的百分比, 可表示为:

$$PIB = \int_{-b}^b |E(x, z)|^2 dx / \int_{-\infty}^{\infty} |E(x, z)|^2 dx \quad (14)$$

式中 $E(x, z)$ 为远场 (例如焦距为 f 透镜的几何焦

面 $z=f$, 或者实际焦面 $z=z_{\text{max}}$ 处) 的场分布; b 为桶的宽度。 $0 \leq PIB \leq 1$, PIB 越大, 则光束质量越好。

通常还用 β 参数表征激光光束质量, β 定义为:

$$\beta = \sqrt{\frac{A_m}{A_0}} \quad (15)$$

式中 A_m, A_0 分别为当 $PIB=63\%$ 时实际光束和理想光束所对应的面积^[10]。显然, β 可直接由 PIB 曲线得出。需指出的是, 理想光束可按应用目的选取, 如, 在高功率激光技术领域常取均匀平面波, 而没把高斯光束作为理想光束。 β 越小, 则光束质量越好。

与 M^2 因子相比, PIB 和 β 有测量较容易、精度较高、不受有无硬边光阑限制便于实际应用等优点, 实际工作中常作为评价激光远场光束质量的参数。但是, PIB 和 β 都不与光束的传输定律和传输不变量相联系。 β 定义中取 $PIB=63\%$ (实际上与束宽定义有关) 也无严格的理论依据。此外, 与 M^2 因子不同, 依赖于比较标准的选取, 亦可能出现 $\beta < 1$ ^[11]。

3 实际应用对激光光束质量的要求

上面对评价激光光束质量的重要参数 M^2 因子和桶中功率 (β 参数) 作了讨论。但实际工作中对激光光束质量的要求是多方面的, 因而评价参数也不是唯一的。主要要求有:

(1) 远场功率 (能量) 的可聚焦度

应用中大多将激光聚焦到工件上, 或经长程传输后作用于靶目标上。在这些应用中, 最感兴趣的指标是在靶上激光功率 (能量) 的集中度。它用桶中功率 (能量) 或 β 参数来描述。

(2) 瞄准稳定性

瞄准稳定性反映时间平均意义上激光作用在目标上的偏移程度。发射激光的线偏移和角偏移都会影响瞄准稳定性, 可用失调叠加积分 η_m 和瞄准稳定性参数 P_s (在测量时间 T 内 $|\eta_m|^2$ 的平均值) 来量度。 η_m 和 P_s 定义为^[12,13]:

$$\eta_m = \frac{1}{P} \int_{-\infty}^{\infty} E(x) [E(x - \delta) \exp(-ik\Omega x)]^* dx \quad (16)$$

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T |\eta_m(t)|^2 dt \quad (17)$$

式中 $E(x), E(x-\delta)\exp(-ik\Omega x)$ 分别为未失调光束和实际测量光束的场分布; δ, Ω 分别是实际光束的线偏移和角偏移, $P_\infty = \int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 dx$ 。

(3) 均匀性

在对光强空间剖面分布均匀性有要求的应用中,应当提出描述光强分布均匀性的物理参数。例如,

1) 不均匀度(或对比度)

$$\eta = I_{\max} - I_{\min} / I_{\max} + I_{\min} \quad (18)$$

式中 I_{\max}, I_{\min} 分别为最大和最小光强。 η 越小,则光强剖面越均匀。

2) 填充因子

$$F = \bar{I} / I_{\max} \quad (19)$$

式中 \bar{I} 为平均光强。 F 越大,光强分布越均匀。

(4) 时间持续性

时间持续性是指在激光工作时间 Δt 内需要控制的光束质量参数的可持续性。设控制参数为 K , 则时间持续性定义为:

$$S = \frac{K_{\min}(t)}{K_{\max}(t)} \Delta t \quad (20)$$

式中 $K_{\min}(t), K_{\max}(t)$ 分别为在 Δt 内的最大值和最小值。 S 越大,则激光时间持续性越好。

(5) 灵活性

在一些应用中,还要求有灵活改变激光波形空间分布和时间分布有灵活改变形状的能力^[14],并且根据不同要求提出相应指标。

4 结 论

由于目前对激光光束质量尚无统一认识,描述光束质量参数可能因应用不同而异,最好用多个参数而不是一个“光束质量因子”来全面评价激光光束质量。实际的激光系统,特别是高功率激光系统是非常复杂的,还需要对复杂光学系统(包括激光系统、发射光学系统和传输通道)实施全程光束质量控制,使之最终在激光与物质相互作用面上的诸多参数,例如功率(能量)集中度、瞄准稳定性、时间持续性以及空间和时间波形等均能满足应用要求,并且还可按照不同应

用目的灵活改变这些(或其中部分)参数。因此,实施全程光束质量控制要求确定系统总的光束质量控制参数和指标,将指标进行分解,对各分系统分别实施光束质量控制,建立相应的评价体系和参数测试系统。对复杂的高功率激光系统无论在理论上或在技术实施上都是值得进一步研究的课题。

参考文献:

- [1] Siegman A E. New developments in laser resonators[A]. SPIE [C]. 1990, 1224, 2-14.
- [2] Weber H. Some historical and technical aspects of beam quality [J]. Opt & Quant Electron, 1992, 24(9):861-864.
- [3] Martinez-Herrero R, Mejias P M, Arias M. Parametric characterization of coherent, lowest-order Gaussian beams propagating through hard-edged apertures[J]. Opt Lett, 1995, 20(2):124-126.
- [4] Lü B, Luo S. Generalized M^2 factor of high-edged diffracted flattened Gaussian beams[J]. J Opt Soc Am (A), 2001, 18(9): 2098-2101.
- [5] Pare C, Belanger P A. Propagation law and quasi-invariance properties of the truncated second-order moment of a diffracted beam[J]. Opt Commun, 1996, 123, 679-693.
- [6] Lü B, Luo S. Asymptotic approach to the truncated cosh-Gaussian beams[J]. Opt & Quant Electron, 2001, 33(2):107-113.
- [7] Amarande S, Giesen A, Hügel H. Propagation analysis of self-convergent beam width and characterization of hard-edged diffracted beams[J]. Appl Opt, 2000, 39(22):3914-3924.
- [8] Lü B, Qing Y. Self-convergent beam width approach to truncated Hermite-cosh-Gaussian beams and a comparison with the asymptotic analysis[J]. Opt Commun, 2001, 199(1):25-31.
- [9] Siegman A E. How to (maybe) measure laser beam quality[A]. OSA Trends in Optics and Photonics Series[C]. 1998, 17, 184-199.
- [10] Garay A. Continuous wave deuterium fluoride laser beam diagnostic system[A]. SPIE[C]. 1998, 888, 17-22.
- [11] Lü B, Ji X, Luo S. The beam quality of annular lasers and related problems[J]. J Mod Opt, 2001, 48(7):1171-1178.
- [12] Morin M, Bernard P, Galarneau P. Moment definition of the pointing stability of a laser beam[J]. Opt Lett, 1994, 19(18): 1379-1381.
- [13] Lü B, Luo S. The pointing stability of flattened Gaussian beams[J]. J Mod Opt, 2002, 49(7):1089-1094.
- [14] 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.