

关于激光光束质量若干问题的分析*

吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 从 M^2 因子概念出发, 对高功率激光(典型例为惯性约束聚变驱动器中传输的激光和高功率激光的空间运输)的光束质量进行了分析。对高功率激光光束质量定义和测量方法中若干问题也作了讨论。

关键词: 光束质量 高功率激光 惯性约束聚变 高功率激光空间运输

Analyzing some problems of laser beam quality

L ü Baida

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: Starting from the M^2 factor concept, the beam quality of high-power lasers, typical examples of which are lasers propagating through ICF driver and laser power beaming, has been analyzed. Some aspects concerning the beam quality definition and measurement methods of high-power lasers have also been discussed.

Key words: beam quality high-power laser inertial confinement fusion (ICF) laser power beaming

引 言

通常认为光束质量是从质的方面来评价激光的特性。但是, 较长时期以来, 光束质量一直没有确切的定义, 也未建立标准的测量方法, 这给科研和应用都带来不便。例如, 在激光产品说明书上常给出远场发散角 θ_0 作为激光光束质量参数, 但并未指明输出光束束宽 w (或束腰宽度 w_0), 而 θ_0 是可通过附加光学系统改变的, 由此易引起争议。90 年代初, Siegman 对描述激光光束质量的 M^2 因子概念给出了较为完整的理论^[1], M^2 因子(衍射极限倍数因子)或其倒数 K 因子(光束传输因子)成为通常情况下评价激光光束质量参数。国际标准化组织(ISO)

* 本工作得到国家高技术激光技术主题 410-1 和强辐射重点实验室项目 H96-1 支持。主要内容曾在国家高技术强辐射重点实验室报告。

- 2 Ong N P, Salem J, Lee W Y *et al.* Phys Rev Lett, 1991; 67: 2088
- 3 张振杰译. 光辐射探测器. 西安: 陕西省教育出版社, 1991: 346
- 4 Carrington A, Catts P F. Phys Rev Lett, 1992; 69: 2855
- 5 Richards P L, Fisher M J, Dehart T E *et al.* A P L, 1989; 54: 283
- 6 Polliner C, Sugimoto A, Yamaquchi Y *et al.* J Phys Soc Jpn, 1994; 71: 3348
- 7 Fukuyama H, Tanaka M, Tachikimi M. J Phys Soc. Jpn, 1995; 74: 4213

* * *

作者简介: 钟丽云, 女, 1968 年 2 月出生。硕士, 副教授。主要从事激光技术、激光光谱和光电微弱信号检测方面的研究工作。

为此举行多次会议讨论, 数易其稿, 给出激光相关参数确切定义、测量原理、设备和方法^[2], 研究工作十分活跃^[3]。国内光学界也对激光光束质量开展了热烈研讨, 就一些基本问题达成共识。然而, 问题尚未彻底解决^[4~7]。例如, 用何种光束作为比较标准(即理想光束)为好? 是否在实际应用中用一参数足以评价激光光束质量? 实际工作中出现较大测量误差, 甚至 $M^2 < 1$ 如何认识和解决? 高功率激光, 典型例为惯性约束聚变(ICF)驱动器中的高功率激光和高功率激光的空间输运, 光束质量如何评价? 本文拟从 M^2 因子概念和光束质量测量开始我们的讨论, 然后对高功率激光光束质量评价问题进行分析, 最后就激光光束质量若干问题提出我们的看法与同行商榷。

一、 M^2 因子和激光光束质量分析仪

1. M^2 因子的定义

M^2 因子定义为
$$M^2 = \frac{\text{实际光束的光腰宽度和远场发散角乘积}}{\text{理想光束的光腰宽度和远场发散角乘积}} \quad (1)$$

从对 M^2 因子和相关概念的分析可知: (1) 与可用以描述激光光束质量的诸多参数如远场发散角, 聚焦光斑尺寸等^[8] 相比较, M^2 因子更为严格和全面地表征了激光光束质量。可以证明激光通过理想无象差和无穷大孔径光学系统时, M^2 因子是一个不变量, 它对应于几何光学中的拉格朗日不变式。(2) 在 M^2 因子定义式中的光腰宽度和角谱宽度(远场发散角)都是用二阶矩公式定义的。在傍轴近似和光阑孔径衍射可忽略情况下, 自由空间中光束宽度 $w(z)$ 满足如下传输方程
$$w^2(z) = w_0^2 + M^4 [N(\pi w_0)]^2 (z - z_0)^2 \quad (2)$$
 式中, z_0 为束腰 w_0 所在位置。更一般地, 任意光束(或称广义光束)通过近轴无孔径 ABCD 光学系统的传输遵从广义 ABCD 定律^[9,10]。(3) M^2 因子定义式中以理想基模高斯光束作为比较标准, 这对实际工作中遇到的大多数情况是合适的。用与测不准关系类似证明可知 $M^2 \geq 1$, 对基模高斯光束 $M^2 = 1$, M^2 值越大, 则光束质量越差。(4) 由(1)式出发, 可对混合模和部分相干光作模分解。在各横模间互不相关条件下, 推导出模分解公式。这样, 由 M^2 因子值就可确定振荡模阶数和各模式所占权重因子大小^[11]。当交叉项存在时, 亦可对此作进一步研究^[12]。

2. 激光光束质量分析仪

因为远场发散角可由将光束通过一理想聚焦光学系统后在焦面上焦斑宽度 w_f 的测量得出, 所以 M^2 因子的测量实质上归结为束宽的测量。按 ISO 标准^[2], 束宽可用狭缝扫描、移动刀口、可变光阑和 CCD 相机等方法测量, 而 M^2 因子则由测三处束宽(三点法)、两处束宽(其中之一为光腰, 两点法)或多点束宽测量(双曲线拟合法)得出。测量 M^2 因子和激光光束质量相关参数的仪器称为激光光束质量分析仪, 国际上已有多家产品出售, 国内亦有多多个单位研制、试销。在激光光束质量研究中引发争议原因之一是 M^2 因子的不同测量方法和测量中引入的误差。理想光束质量分析仪应满足如下要求:

- 有足够高的测量精度, 即可靠性好,
- 使用操作方便, 能满足实际测量环境要求,
- 有大的动态工作范围, 线性良好,
- 有高空间分辨率和时间分辨能力,
- 有大的波长工作范围,

- 能用于连续和脉冲工作激光,
- 理想光学系统,不引入附加象差和衍射等,
- 计算机图象处理功能强,例如光强分布的1D,2D实时显示,有平均、积分、消除背景和增强对比度等功能。

显然,要同时达到这些要求的仪器是难于制作出来的。在实际工作中,只能按使用要求在一定容限范围内尽可能予以满足。

二、高功率激光光束质量评价

对ICF驱动器的光束质量已进行了许多研究。目前的基本看法是^[5]:(1)基模高斯光束不宜作为ICF驱动器光束质量的比较标准,因为高斯光束分布的光束并不是ICF驱动器追求的理想光束。从提高填充因子以提高放大系统效率和减小非线性自聚焦效应等考虑出发,近平顶均匀分布光束更为适宜。因此,以均匀平面波作为衍射极限倍数的比较标准更好。(2)用多个参数评价光束质量。在空间域中,应有均匀的近场光强分布,并按直接驱动和间接驱动不同要求提出能量(功率)可聚焦度(或衍射极限倍数)、高频成分含量和焦斑光强均匀度等指标。这里,对近场分布要求是为前述提高放大器效率和减小介质非线性破坏而提出的,注意这并不能由远场条件唯一确定。例如,10倍衍射极限光束可由不同近场振幅(光强)和位相分布的光束来实现。在时间域中,应能按不同物理实验要求提供光滑可控的脉冲波形,有高信噪比(例如 $> 10^7$)和多路光脉冲波形和幅度不一致性小(例如 $< 5\%$)等。

在对高功率激光空间运输之类应用的光束质量评价研究中,首先应对高功率激光的产生、发射和传输过程影响光束质量的因素,以及与靶耦合的物理问题进行分析。在激光器部分,泵浦、冷却的非均匀性和增益饱和都会引起激光介质非均匀增益分布,光学元件的静态象差和动态热象差(热畸变)、光腔的失调和抖动、硬边光阑衍射,以及多模工作等都会降低光束质量,发射光学系统的象差和抖动也是影响光束质量原因。高功率激光在传输通道(大气)中的线性(例如湍流)和非线性(热晕等)效应常是导致光束质量劣化、限制高功率激光远程有效传输的重要因素。激光与靶的耦合效应则随材料种类、作用方式(软、硬破坏)和工作环境而变。其次,以下诸点值得考虑:(1)目前用于空间运输的高功率激光,例如氟化氢(HF)、氟化氘(DF)和氧碘(COIL)化学激光大多由非稳腔产生,其本征基模为球面波(平面波为其特例),非稳腔输出激光光束质量的正确评价和诊断至今尚无定论。(2)研究表明,不同近场分布(例如环状、实心光束、高斯分布),或者相同远场能量(功率),但不同光强分布(例如均匀分布,有无尖峰等),对靶目标的破坏能力是不同的。(3)在大气光学中,习惯上用Strehl比作为光束质量评价参数,但在其它场合下用Strehl比并不一定方便,APS报告中用光束亮度(W/s或J/s)作为量度激光器效能和武器系统要求的参数,表征激光武器的火力水平。但是,它同时从量的方面提出了对激光系统的要求,相同 M^2 因子值,不同功率(能量)激光系统的亮度是不一样的,故不宜作为评价光束质量参数。此外,描述激光相干性的参数也不使用以评价光束质量,因为对相干性要求与应用目的有关。由上述分析我们认为对高功率激光空间运输和激光武器应用,光束质量评价是一个较为复杂的问题,且对器件性能评估也十分重要。我们的基本看法是:(1)基模高斯光束不一定是理想的比较标准,对非稳腔输出以采用均匀平面波作理想光束为好。(2)用一个参数,例如远场发散角(β 值)或 M^2 因子似乎不足以对光束质量作全面评价。是否可用1个(或2个)参数作为主要评价参数,提出较为全面评价光束质量标准?

三、问题分析和小结

在激光光束质量研究中,理论上一个重要问题是:是否有一个普适的评价参数?虽然 Siegman 认为他的理论对任意光束都是成立的,但实际上“任意光束”也是有条件的^[10]。例如,对空域中有复杂象散的光束,扭曲高斯-谢尔模型光束,时-空域中参数有耦合的光束,Siegman 的理论都应加以推广。对贝塞耳光束、超高斯光束、非稳腔输出光束和有强硬边衍射效应光束质量的评价和测量都值得继续研究。偏振对光束质量影响, M^2 因子的时变规律等在 Siegman 的理论中都未详加讨论。虽然 M^2 因子在理论上是严格的和自洽的,但对有前述明确应用目的的高功率激光光束质量评价,却很难用 M^2 因子统一处理。

实验上,二阶距定义中高频分量影响,光束质量是不同测量方法和束宽不同定义导致的误差是讨论的热点。文献[14]对高功率非稳腔输出光束质量的测量和测量误差作了较为详细分析,指出了用普通 CCD 相机测量高功率非稳腔 M^2 因子会大为偏小,甚至出现 $M^2 < 1$,这是值得注意分析和加以改进的。

在激光的实际应用中,尤其是高功率激光技术领域,光束质量是一个重要研究课题,包括光束质量评价,对影响光束质量因素分析和对改善光束质量方法及能力的研究等。对光束质量的评价,可按实际应用目的而论,给出比较标准和评价参数(也可用多参数),不必强求统一。例如,对 ICF 驱动器的光束质量,可用均匀平面波作比较标准,针对直接驱动和间接驱动物理实验不同要求,在空间域和时间域给出多个评价参数,可认为是光束质量广义的物理含义。对高功率激光空间输运之类的应用,仅用 M^2 因子或 Strehl 比似乎不足以全面描述光束质量,应在对系统各环节深入研讨基础上,提出既能简明反映物理实质,又能全面评价光束质量标准。对影响激光光束质量的主要因素进行分析,并提出有效补偿振幅和波前畸变方法有重要实用意义。其中,尤其应重视对多种新型光腔、二元光学和自适应光学元件等在不明显降低输出功率前提下提高高功率激光光束质量潜力的研究。

参 考 文 献

- 1 Siegman A E. SPIE Proc, 1990; 1224: 2~ 14
- 2 ISO/T C 172/SC 91/WG 1 N 80, ISO/DIS/ 1146, 1995
- 3 Ed. by H Weber. Opt & Quant Electron, 1992; 24(9)
- 4 吕百达,张 彬,蔡荆维. 激光技术, 1992; 16(5): 278~ 284
- 5 范滇元,钱列加. 激光聚变驱动器的光束质量研究. 国家高技术光束传输研讨会报告. 深圳, 1994
- 6 陈培锋,丘军林. 中国激光, 1995; 22(2): 139~ 143
- 7 杨成龙. 激光杂志, 1996; 17(1): 1~ 5
- 8 吕百达. 激光光学, 第二版. 成都: 四川大学出版社, 1992: 9~ 10
- 9 Belanger P A. Opt Lett, 1991; 16(4): 196~ 198
- 10 吕百达,张 彬,孔繁龙. 红外与激光工程, 1996; 25(6): 19
- 11 Lü B D, Zhang B, Cai B W. Opt Commun, 1993; 101(1): 49~ 52
- 12 Du K M, Herziger G. Opt & Quant Electron, 1992; 24(9): 1081~ 1093
- 13 美国物理学会研究组, 中国工程物理研究院译. 定向能武器的科学与技术. 1987: 44~ 46
- 14 Wittrock U, Dong S, Eppich B. SPIE Proc, 1995; 2375: 172~ 183

*

*

*

作者简介: 吕百达,男,1943 年出生。教授,博士生导师。主要研究方向为新型和高功率固体激光器件与技术,光腔物理与光束传输变换。