

激光束远场能量集中度的评价指标探讨

贺元兴^{1,2,3} 李新阳^{2,3}

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; ² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
³ 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要 以常见的三种类型的激光束,即非稳腔产生的环形激光束、稳定腔产生的高斯光束以及多路高斯光束的相干合成光束作为研究和讨论的对象,针对涉及能量集中度的应用,分析了现有各种评价指标的优缺点和适用性,并对评价指标定义中若干关键问题进行了分析计算。结果表明,激光束的亮度或靶目标上光斑能量密度是评价激光系统效能发挥的重要评价参数,该评价指标不仅可以用于衡量同一激光系统的光束质量,也可以客观地评价不同激光系统间性能优劣。

关键词 激光光学;光束质量;远场能量集中度;评价指标

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.051403

Study on Standard for Evaluating the Far-Field Energy Focusability of Laser Beams

He Yuanxing^{1,2,3} Li Xinyang^{2,3}

¹ College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

³ Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract According to application purposes concerning focusability of laser energy, three kinds of lasers, i. e., the annular lasers generated from unstable resonators, Gaussian lasers generated from stable resonators and combined lasers of several Gaussian lasers are taken as analyzing objects. The advantages and drawbacks of beam quality parameters available are discussed, and some key issues on definition of beam quality are calculated and analyzed. The results show that, the parameter of laser brightness or laser energy density on the target is a very important standard for evaluating the performances of laser systems, which is suitable for measuring performance of the same system, as well as different systems objectively.

Key words laser optics; beam quality; far field energy focusability; evaluation standard

OCIS codes 140.3290; 140.3460; 120.4800

1 引言

对激光束的质量进行合理评估是激光领域的前沿课题^[1]。光束质量是激光应用技术中极为重要的参数,它是从质的方面来评价激光特性的性能指标,对激光器的设计、制造、检测和应用均有十分重要的指导意义。从20世纪60年代初世界上第一台红宝石激光器诞生起,如何刻画和描述光束质量便是摆在人们面前的一个不能回避的问题。1960年,Boyd等曾采用光斑尺寸 ω 和远场发散角 θ 来描述共焦腔的本征模,在其后的几十年内,激光技术得到了蓬勃发展,各种新型激光器相继问世,但激光光束质量始终没有确切和统一的定义,也没能建立起标准的测量方法。直到20世纪90年代初,Siegman^[2,3]对描述激光光束质量的 M^2 因

收稿日期: 2011-12-19; 收到修改稿日期: 2012-01-05; 网络出版日期: 2012-03-23

作者简介: 贺元兴(1984—),男,博士研究生,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: yuanxing-he@163.com

导师简介: 李新阳(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学技术,高能激光技术等方面的研究。

E-mail: xyli@ioe.ac.cn

子概念给出了较为完整的理论, M^2 因子成为通常情况下衡量激光束质量的评价参数, 国际光学界相继召开了多次关于光束描述和光束传输的专题会议^[4], 探讨光束质量相关问题, 其中一些研究成果也被国际标准化组织(ISO)采纳^[5]。虽然 M^2 在理论上比较严格, 但其作为激光光束质量的评价指标仍然存在诸多难以克服的问题, 鉴于此, Siegman^[6] 后来建议将 M^2 由光束质量因子修正为光束传输因子。由于实际光束的复杂性和应用目的多样性, 到目前为止, 衡量激光光束质量的评价指标仍不统一, 国内外学者对该问题的普通共识是各种评价指标均有其优缺点和适用场合, 应该根据具体的应用目的选择一个或若干个评价参数并建立相应的光束质量评价体系来描述光束质量^[7~10]。

对激光束的能量输运或对靶目标进行损伤这些应用场合, 人们普遍关心的是实际激光的远场能量集中度(或可聚焦能力), 这也是客观衡量其光束质量的重要依据^[11,12], 建立该类应用场合下激光光束质量评价体系具有重要的现实意义。以常见的三种类型激光束, 即非稳腔产生的环形激光束、稳定腔产生的高斯光束以及多路高斯光束的合成光束作为研究和讨论的对象, 针对能量型应用目的, 分析了现有各种评价指标的优缺点和适用性, 并对评价指标的若干基础性关键问题进行了讨论, 分析结果为今后客观评估激光束质量提供一定的参考。

2 描述激光束质量的常见评价指标

为了定量描述激光束的质量, 人们提出了各种评价参数, 在实际中广泛应用。

2.1 聚焦光斑尺寸和远场发散角

聚焦光斑尺寸 ω_f 定义为在远场平面内, 包含激光总能量 83.8% 或 86.5% 的焦斑半径(或直径)。在实际中通常采用聚焦光学系统将待测激光束的远场移至聚焦系统的焦平面上, 然后在焦平面内对其进行测量^[8]。

远场发散角 θ 定义为实际光束的聚焦光斑尺寸 ω_f 与聚焦系统有效焦距 f 的比值, 即

$$\theta = \frac{\omega_f}{f}. \quad (1)$$

聚焦光斑尺寸和远场发散角虽能够比较简单和直观地描述光束质量的好坏, 但其大小与聚焦光学系统的参数有关, 不便于在不同光学系统间的横向比较, 由此得到的光束质量优劣的结论也容易引起争议。

2.2 光束传输因子 M^2

光束传输因子 M^2 是 20 世纪 90 年代初由 Siegman 首先提出的, 随后被广泛用于评价高斯光束的质量, 它定义为实际光束的光束参数积($\omega\theta$)与理想基模高斯光束的光束参数积($\omega_0\theta_0$)二者的比值^[2], 即

$$M^2 = \frac{\omega\theta}{\omega_0\theta_0}, \quad (2)$$

式中理想基模高斯光束的光束参数乘积 $\omega_0\theta_0 = \lambda/\pi$ 为最小, 故实际光束 $M^2 \geq 1$ 。 M^2 因子是基于光强度的二阶矩束宽定义的, 同时考虑了光束近场(束腰宽度)及远场(发散角)的变化对激光光束质量的影响, 且激光束在通过理想无衍射、无像差光学系统时 M^2 是个不变量, 这就避免了只用聚焦光斑尺寸或远场发散角评价光束质量所引入的不确定性, 因而 M^2 曾一度被认为是判断光束质量较好的评价参数。虽然 M^2 因子在一定程度上可以反映实际光束相对于理想基模高斯光束远场能量发散的程度, 但随着对该问题认识的不断深入, 人们逐渐认识到 M^2 也并不是衡量实际光束质量的首选指标, 它在理论及测量两个方面均存在难以克服的局限性^[6,13]。因此, M^2 因子在国内外大型激光装置中应用不多。

2.3 峰值斯特雷尔比

峰值斯特雷尔比(SR_{peak})定义为实际光束远场轴上光强 $I_{\text{max,real}}$ 与理想参考光束的远场轴上光强 $I_{\text{max,ideal}}$ 之比^[14], 即

$$R_{\text{peak}} = \frac{I_{\text{max,real}}}{I_{\text{max,ideal}}}. \quad (3)$$

在考察像差影响因素的场合(如大气光学和自适应光学领域) SR_{peak} 被广泛采用, $R_{\text{peak}} \leq 1$, 其越接近 1, 光束质量越好。由于 SR_{peak} 实际上关心的是激光远场轴上峰值光强度, 在一定程度上可以反映实际光束远场的可聚焦性, 但由于该评价参数无法提供任何其它位置的光强分布信息, 因此也不太适合于描述能量型应用的场合。

2.4 环围能量斯特雷尔比

环围能量斯特雷尔比($SR_{\text{encircled}}$)定义为远场平面内实际光束在某一规范桶内的功率 P_{real} 与理想参考光束在相同规范桶内功率 P_{ideal} 的比值^[15],即

$$R_{\text{encircled}} = \frac{P_{\text{real}}}{P_{\text{ideal}}}. \quad (4)$$

由于实际光束在规范桶内的功率均要少于理想参考光束在相同桶内的功率,故 $R_{\text{encircled}} \leq 1$,其越接近于 1,光束质量越好。 $SR_{\text{encircled}}$ 适合于能量型应用场合,可反映实际光束在远场的能量集中度,但其不足在于,一方面参考光束和规范桶尺寸的定义存在争议,从而对同一激光束可能得出完全相反的光束质量优劣的评估结果。常见的规范桶尺寸^[11]有 $0.53 \lambda L/D$ 、 $1.22 \lambda L/D$ 、 $2.23 \lambda L/D$ 以及 $3.24 \lambda L/D$ 等(λ 为激光波长; L 为光束传输距离; D 为发射光束口径)。

2.5 环围能量比

环围能量比(BQ)定义为远场平面内理想参考光束在某一规范桶内的功率(或能量) P_{ideal} 与实际光束在相同规范桶内的功率(或能量) P_{real} 比值的方根^[11],即

$$R_{\text{BQ}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ideal}}}{P_{\text{real}}}}. \quad (5)$$

环围能量比本质上与环围能量斯特列比是一致的。对于实际光束, $R_{\text{BQ}} \geq 1$,其越接近于 1,光束质量越好。

2.6 光束传输因子

光束传输因子(BPF)是刘泽金等^[16,17]国内学者在近些年提出并用于评价相干合成光束质量的评价参数,定义为实际光束在远场平面内环围半径 $1.22 \lambda L/D$ 桶内的功率(或能量)占与相同发射孔径的均强平面光束在远场相同环围半径桶内的功率(或能量)的比值,即

$$T_{\text{BPF}} = 1.19 \frac{P}{P_{\text{total}}}. \quad (6)$$

式中 P 为实际光束在远场半径 $1.22 \lambda L/D$ 桶中功率, P_{total} 为远场平面内光斑总功率。

对实际光束, $T_{\text{BPF}} \leq 1$,其越接近于 1,光束质量越好。光束传输因子可以用于能量型的应用场合,可反映实际光束在远场的能量集中度和可聚焦能力,并且 BPF 的测量基于激光功率或能量的测量,而现有的功率测量手段可保证测量的精度,但其不足在于由于该指标被提出的时间不长,应用范围有待进一步推广。

2.7 光束质量因子 β

光束质量因子 β (亦称光束 β 值)定义为实际光束的远场发散角 θ_{real} 与理想参考光束的远场发散角 θ_{ideal} 的比值^[18,19],即

$$\beta = \frac{\theta_{\text{real}}}{\theta_{\text{ideal}}}. \quad (7)$$

实际光束与理想参考光束的远场发散角均是基于远场平面内某一规范能量百分比定义的,对于实际光束, $\beta \geq 1$, β 越接近于 1,光束质量越好。光束质量因子 β 适用于能量型应用的场合,可反映实际光束在远场平面内的能量集中度和可聚焦性,但其不足仍然在于理想参考光束及规范能量比的选择仍有争议,常见的规范能量比有 86.5%、83.8%、63.2%等。此外,光束 β 值在测量方面存在的最大问题是其测量精度受探测器的噪声影响很大,不同的减阈值去噪方法将得到不同的结果,阈值取得不当甚至会导致“超衍射极限”的荒谬结论。

3 现有激光光束质量评价指标关键问题分析

3.1 M^2 因子的不足

由 2 节的分析可知,在众多评价光束质量的指标中,环围能量比 BQ(或斯特雷尔比 $SR_{\text{encircled}}$)、光束传输因子 BPF 以及光束质量因子 β 三类指标可用于评价实际光束的远场能量集中度和可聚焦能力,适合于能量型应用场合, M^2 因子虽然在一定程度上可以反映实际激光在远距离传输过程中能量发散的程度(相对于理想基模高斯光束),但它是否可以衡量实际光束的远场能量集中度仍需进一步研究。

3.1.1 稳定腔高斯光束

对稳定腔来讲,高斯光束(包括高阶模高斯光束)为其本征模式,基模高斯光束为稳定腔的理想模式。计算了部分低阶拉盖尔-高斯光束 TEM_{10} 、 TEM_{11} 以及 TEM_{02} 模的远场环围能量(PIB)曲线,如图 1 所示,图中同时标出了计算模式类型及其对应的 M^2 值以方便讨论。

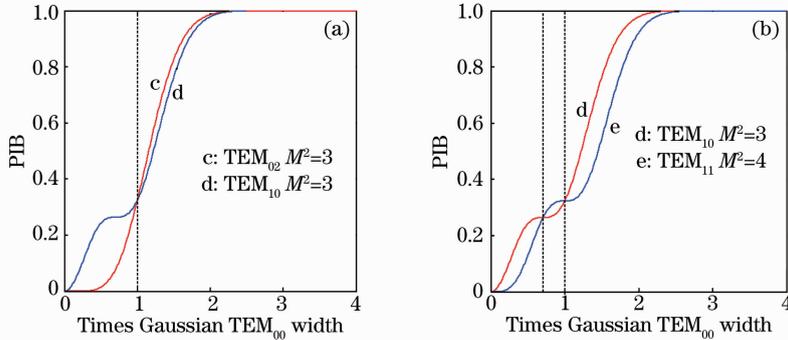


图 1 低阶高斯光束所对应的远场 PIB 曲线。(a) 相同 M^2 的 TEM_{02} 和 TEM_{10} 模的比较;
(b) 不同 M^2 的 TEM_{10} 和 TEM_{11} 模的比较

Fig. 1 Far-field PIB curves of several lower-order Gaussian lasers. (a) Comparison between TEM_{02} and TEM_{10} with the same M^2 ; (b) comparison between TEM_{10} and TEM_{11} with different M^2

由图 1 可知:1) 对 M^2 值相同的拉盖尔-高斯光束 TEM_{10} 模和 TEM_{02} 模,其远场能量集中度的优劣无法进行简单的判断,选择不同规范桶尺寸(或规范能量比),即使两种光束的 M^2 值相同,但仍然会得出光束质量优劣的不同结论;2) 对具有不同 M^2 值的拉盖尔-高斯光束 TEM_{10} 模和 TEM_{11} 模,其远场能量集中度与其 M^2 值之间也没有直接的关联,选择不同的规范桶尺寸(或规范能量百分比),可能会得出 M^2 值大者其远场能量集中度反而高, M^2 值小者其远场能量集中度反而低的结论。因此,对于稳定腔高斯光束,在实际中是不能通过其 M^2 值的大小来断定其能量集中度好坏的。

3.1.2 非稳腔环形光束

高功率激光器通常采用正支虚共焦非稳腔结构,输出光束为中心存在遮拦的环形光束。一方面,非稳腔中不可能产生高斯光束,并且按照 Siegman^[6] 所提出的几何损耗分析方法,对于共焦非稳腔,边缘被截断且振幅均匀分布的平面光束是其几何模,选择该几何模作为理想参考光束是合适的;另一方面,由于硬边光阑对光束的截断,非稳腔输出光束的基于强度二阶矩定义的远场发散角为无穷大,对应的 M^2 值发散^[13],为解决 M^2 在评价硬边光阑限制光束质量时在理论上的不足,广义截断二阶矩^[20,21]、渐近分析^[22] 和自收敛束宽^[23] 等分析方法被提出,但依此计算得出截断均强平面光束的 $M^2=2.31$,说明均强平面光束的光束质量较差,显然不能满足实际应用要求^[24]。因此,光束传输因子 M^2 并不适合描述这类激光束的光束质量。

3.1.3 多路高斯光束的合成光束

Siegman^[6] 曾计算过圆形空间布局的六路高斯光束的相干合成光束和非相干合成光束的远场 PIB 曲线,如图 2 所示,相干合成光束的 $M^2=4.38$,而非相干合成光束的 $M^2=4.55$,二者在数值上十分接近,但它们所对应的远场 PIB 曲线却相差甚远。对相干合成光束与非相干合成光束而言,尽管非相干合成光束的 M^2 值略大,但两种光束在远场的能量集中度的高低仍然不能简单的通过 M^2 值来进行衡量和判断,选择不同尺寸的规范桶,将可能得出非相干合成光束的质量反而优于相干合成光束的质量的结论。

以上通过对稳定腔高斯光束、非稳腔环形光束及多路高斯光束合成光束的分析,可以得出结论,实际光束的

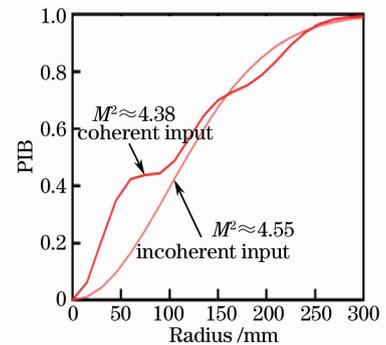


图 2 非相干和相干合成光束的远场 PIB 曲线
Fig. 2 Far-field PIB curves of coherently and incoherently combined lasers

远场能量集中度是不能简单的通过其 M^2 来进行衡量的^[25]。

3.2 评价指标关键问题分析

根据以上几节分析,对追求实际激光束远场能量集中度(或远场可聚焦能力)的应用场合来讲,聚焦光斑尺寸、远场发散角、峰值斯特雷尔比以及 M^2 因子均不能满足实际应用要求,而环围能量比 BQ(或斯特雷尔比 $SR_{\text{encircled}}$)、光束传输因子 BPF 和 β 是可供选择的评价指标,而在这些指标的定义中,均涉及理想参考光束及规范桶尺寸(或规范能量百分比)的选择两个关键问题。

3.2.1 理想参考光束的选择

由于指标 BQ、BPF 以及 β 值的定义均是基于实际光束的远场 PIB 曲线与理想参考光束的远场 PIB 曲线,因此要求作为比较基准的理想参考光束的远场 PIB 曲线是同类型光束的远场 PIB 曲线中最高的。

1) 单路激光理想参考光束

图 3 分别给出了单路前若干阶拉盖尔-高斯光束、不同遮拦比的圆环形均强平面光束和方环形均强平面光束的远场 PIB 曲线。由图 3 可知,对于单路稳定腔高斯光束,理想基模高斯光束 TEM_{00} 的环围 PIB 曲线比其它高阶模高斯光束的 PIB 曲线均高,因此,采用理想基模高斯光束作为衡量稳定腔高斯光束质量的理想参考光束是较为合适的;对于单路非稳腔圆环形光束,遮拦比为 0 的实心均强平面光束的远场 PIB 曲线较其它存在遮拦的环形均强平面光束的远场 PIB 曲线要高,因此,采用遮拦比为 0 的实心均强平面光束作为衡量非稳腔圆环形光束质量的理想参考光束是较为合适的;对于单路非稳腔方环形光束,遮拦比为 0 的实心方形均强光束的远场 PIB 曲线较存在遮拦的方环形均强平面光束的远场 PIB 曲线要高,故采用遮拦比为 0 的实心方形均强平面光束作为非稳腔方环形光束的理想参考光束是较为合适的。

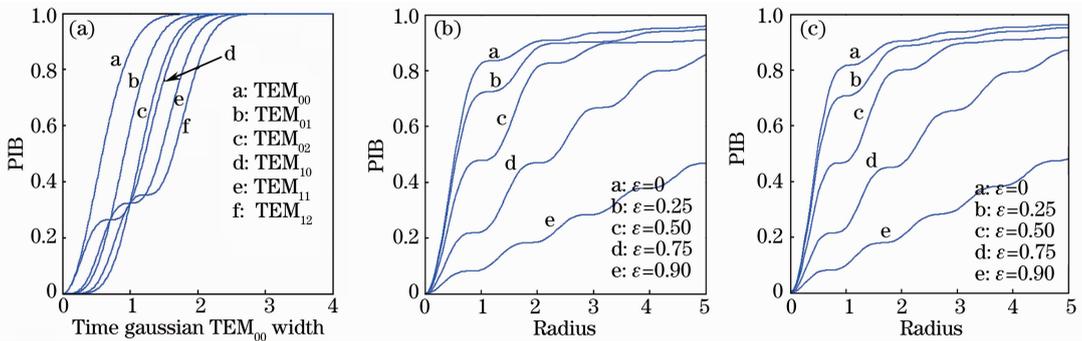


图 3 不同类型单路光束的远场环围能量曲线。(a) 高斯光束;(b) 圆环形光束;(c) 方环形光束

Fig. 3 Far-field PIB curves of different kinds of single lasers. (a) Gaussian beam; (b) circle annular beam;

(c) rectangular annular beam

2) 合成激光理想参考光束

(i) 指标 BPF 所存在的问题

光束传输因子 BPF 是在评价相干合成光束质量时被提出的。指标提出者指出,BPF 指标不仅适用于合成光束质量评价,对单路激光束的光束质量评价也是适用的,但其分析是针对非稳腔圆环形光束进行的^[18]。而对于稳定腔高斯光束,分析发现指标 BPF 定义中所选取的理想参考光束并不适用。

图 4 给出了孔径截断系数 ($F = D/2\omega_0$, D 为激光发射孔径, ω_0 为基模高斯光束在发射孔径平面内的半宽度,计算中取 $\omega_0 = 1$) 分别为 0.5、2 和 2.5 时,截断基模高斯光束与相同发射口径的均强平面光束的远场 PIB 曲线,图中虚线标出了 BPF 指标所定义的环围能量半径位置。由图 4 可知,均强平面光束并不见得是最好的理想参考光束,在孔径截断系数较小时 ($F=0.5$, 对应较大孔径截断),截断基模高斯光束在角半径为 $1.22 \lambda/D$ 的桶内所包含的能量份额要高于相同发射口径的均强平面光束。为了更进一步说明这一点,图 5 给出了单路截断基模高斯光束的 BPF 随孔径截断系数 F 的变化曲线,可以看出,当孔径截断系数 $F < 2$ 时,基模高斯光束的 $T_{\text{BPF}} > 1$,此时均强平面光束显然不宜作为理想参考光束,而由图 6 可以看出,在较大孔径截断情况下 ($F=0.5$),无截断基模高斯光束的远场 PIB 曲线比其它高阶模高斯光束的 PIB 曲线均高,因而在考察孔径截断因素对高斯光束质量影响时,选择无截断理想基模高斯光束作为理想参考光束是合适的。

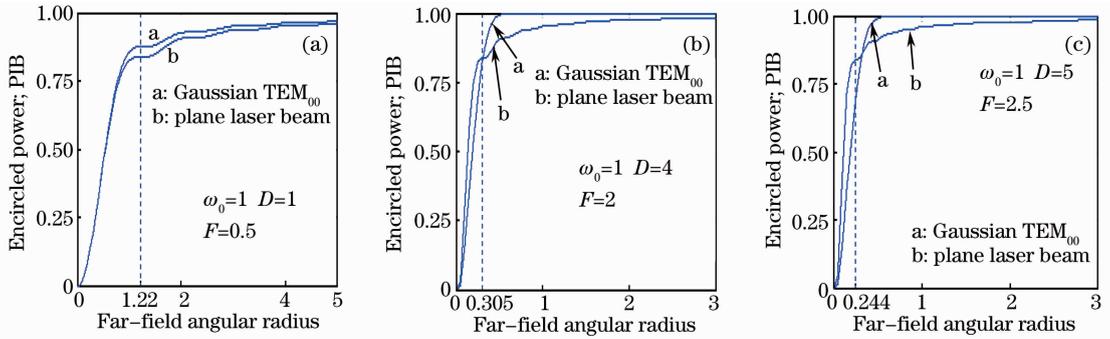


图 4 相同孔径大小的截断高斯光束和均强平面光束的远场 PIB 曲线比较。(a) 高斯光束 $\omega_0=1, D=1, F=0.5$;
(b) 高斯光束 $\omega_0=1, D=4, F=2$; (c) 高斯光束 $\omega_0=1, D=5, F=2.5$

Fig. 4 Comparison of far-field PIB curves of truncated Gaussian laser between plane laser with the same transmitted aperture size. (a) Gaussian beam $\omega_0=1, D=1, F=0.5$; (b) gaussian beam $\omega_0=1, D=4, F=2$; (c) gaussian beam $\omega_0=1, D=5, F=2.5$

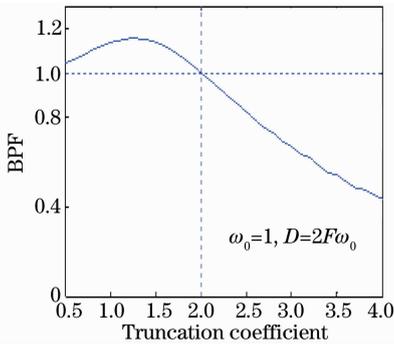


图 5 截断基模高斯光束 BPF 值随截断系数的变化
Fig. 5 BPF of Gaussian modes changing with truncation coefficient

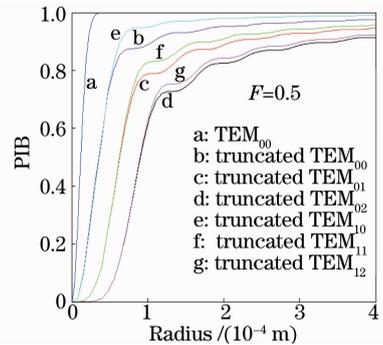


图 6 存在截断情况下高斯光束远场 PIB 曲线
Fig. 6 Far-field PIB curves of Gaussian beam with truncation

对于多路无截断基模高斯光束的合成激光阵列,如图 7 所示,合成光束环数 $N=4$,若各子光束中心间距为 d ,单路光束的束半宽为 ω_0 ,定义子光束的填充因子 $v=(d-2\omega_0)/\omega_0, v \geq 0, v$ 越小说明各路子光束彼此间排布越紧凑。当发射窗口尺寸 $D=2(N-1) \times d+4\omega_0$ 时,计算表明,激光阵列的几乎绝大部分能量均包含在该窗口内,因此可以将该尺寸定义为在圆形布局情况下相干合成光束的发射窗口尺寸,而文献[16]中取该发射窗口尺寸 $D=2(N-1) \times d+2\omega_0$,其实并没有包含发射激光的全部能量。我们计算了在环数 $N=2$ 情况下,小填充因子 $v=0$ 时的相干合成光束远场 PIB 曲线及相同发射口径均强平面光波的远场 PIB 曲线,如图 8 所示。由图可以看出,在填充因子 $v=0$ 时相干合成光束在远场 $1.22 \lambda L/D$ 环围半径桶内的能量份额要略高于理想平面光束在远场相同桶内的能量份额,计算 $T_{BPF}=1.05 > 1$,当填充因子较大($v=1$)时相干合成光束在远场 $1.22 \lambda L/D$ 环围半径桶内的能量份额明显低于理想平面光束在远场相同桶内的能量份额,计算 $T_{BPF}=0.77 < 1$ 。进一步计算了在不同环数情况下,当填充因子 $v=0$ 时相干合成光束的 BPF 值,列于表 1。

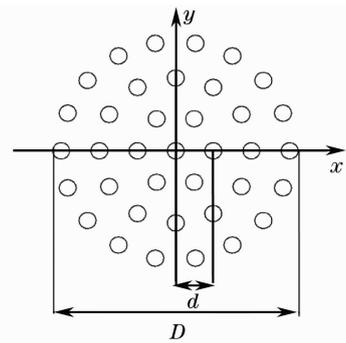


图 7 合成光束空间布局
Fig. 7 Distribution scheme of combined lasers

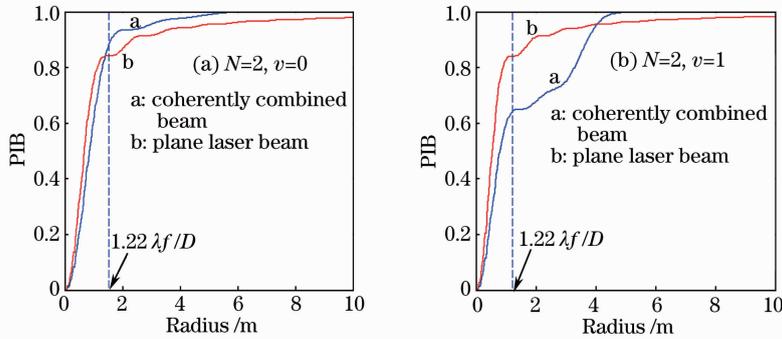


图 8 相干合成光束与均强平面光束远场 PIB 曲线比较。(a) $v=0$; (b) $v=1$

Fig. 8 Comparison of far-field PIB curves of coherently combined laser between plane laser. (a) $v=0$; (b) $v=1$

表 1 $v=0$ 时不同发射环数相干合成光束 BPF 值

Table 1 BPF values of coherently combined laser beams with different rings when $v=0$

N	2	3	4	5	6	7	8
BPF	1.054	1.046	1.028	1.015	1.005	0.997	0.990

由图 8 和表 1 可知,当填充因子 v 为 0 时,当参与相干合成光束路数 N 不超过 7 时,计算所得的 BPF 指标均略大于 1,这与 $T_{\text{BPF}} \leq 1$ 的定义不相符。

(ii) 可能的解决途径

在利用 BPF 指标来评价相干合成激光的光束质量时,一方面,当填充因子 v 较大时,选取相同发射口径的实心均强平面光束作为理想参考光束、远场环围半径 $1.22 \lambda L/D$ 作为计算 BPF 的规范桶尺寸是合适的,这也说明采用理想均强平面光束作为考察相干合成光束质量的理想参考在绝大多数情况下的确是没有问题的^[17];另一方面,杜祥琬^[11]曾指出,当希望的远场光斑尺寸小于目标尺寸时,为了更充分反映目标上的激光能量分布,作为对远场环围半径 $1.22 \lambda L/D$ 的补充,可用一个“桶系列”中的能量多少来衡量激光远场能量集中度,而“桶系列”是具有规范桶尺寸的若干个同心圆环。综合以上两点,可认为解决 BPF 评价指标上述不足的一种折中办法是,仍然沿用 BPF 所定义的理想参考光束,但规范桶尺寸不能再取 $1.22 \lambda L/D$ 。实际上,对于弥散较大的光斑,指标应用者更关心远场焦斑中心部分的光强,可选取较小的规范桶尺寸来定义 BPF,理想光斑在该桶内的能量也较少(如 63.2%),由此来计算 BPF 就不会出现数值大于 1 的“超衍射极限”情况。

3.2.2 规范桶尺寸(规范能量比)选择

在定义光束质量评价指标时,文献中惯用的做法是选取由理想远场光斑中心核所对应的环围能量半径作为光束质量定义的规范桶半径,以规范桶内所含的环围能量份额作为规范能量比。当理想参考光束取为圆形实心均强光束时,规范桶半径 r_0 取为 $1.22 \lambda L/D$,规范能量比 η_0 为 83.8%;当理想参考光束为方形实心均强光束时,规范桶半径 r_0 取为 $\lambda L/D$,规范能量比 η_0 取为 81.6%;当理想光束取为高斯光束时,规范桶半径 r_0 取为远场平面内基模高斯光斑强度二阶矩半宽度 ω_0 ,规范能量比 η_0 取 86.5%。实际上,这种定义方式是根据远场理想光斑强度分布的特征尺寸得来的,并没有从激光对靶目标的作用效果出发考虑,即要求所选取的规范桶尺寸内不仅要具有较多的能量份额,而且其内的归一化能量(功率)密度要大。

图 9 分别给出了基模高斯光束、实心圆形均强平面光束和实心方形均强平面光束的远场 PIB 曲线和环围平均能量密度曲线。由图 9 可知,无论对于哪种理想参考光束,当远场平面内所选取的作用光斑尺寸较小时,虽然光斑所在范围内的平均能量密度较高,但其内却包含了较少的能量份额,当远场平面内作用光斑的尺寸较大时,情况正好相反,而当作用光斑(规范桶)的尺寸为两条曲线的交点所对应的空间范围时,可同时保证光斑在桶内的能量份额及平均能量密度均较高,因此,选择远场 PIB 曲线与环围平均能量密度曲线的交点位置所对应的桶尺寸作为规范桶,理想光斑在该规范桶内的能量份额作为规范能量比是比较不错的选择。通过计算可知,对理想基模高斯光束,规范桶半径为 $\omega_0/\sqrt{2}$ (ω_0 为远场平面内基模高斯光斑半宽),规范能量百分比为 63.2%;对于实心圆形均强平面光束,规范桶半径为 $0.637 \lambda L/D$,规范能量百分比为 61.7%;对于实心方形均强平面光束,规范桶半径为 $0.565 \lambda L/D$,规范能量百分比为 60.7%。

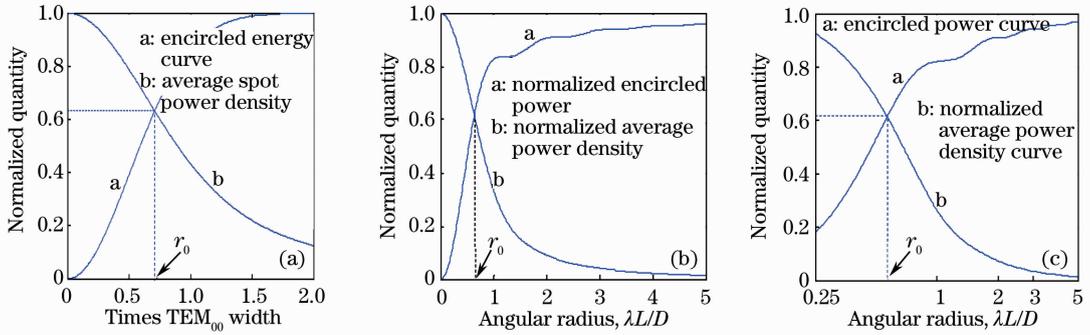


图9 不同类型理想光束的远场环围能量及环围平均能量密度曲线。(a) 高斯光束；(b) 圆环形光束；(c) 方环形光束

Fig.9 Far-field PIB curves and normalized encircled energy density curves of different kinds of ideal lasers.

(a) Gaussian beam; (b) circle annular beam; (c) rectangular annular beam

4 现有评价指标存在的问题及激光系统核心特征量

4.1 现有评价指标存在的问题

选择光束质量评价指标的依据除了与具体的应用目的直接相关外,还应该能够客观反映实际中各种因素对光束最终效能发挥的影响和制约程度。激光系统中从主激光器到远场靶目标的整个光学链路上,诸多因素均将制约实际光束最终效能的发挥、影响和恶化激光的光束质量^[12],这些影响因素概括起来大致可分为两类,即固有因素和非固有因素。固有因素是激光发射端的空间占空形式、空间占空比大小、激光波长和发射窗口尺寸等,非固有因素是波像差、强度起伏及光轴的抖动等。表2列出了对于单路光束及多路光束合成光束两种情况下,影响激光光束质量的各种固有和非固有因素。

表2 光束质量影响因素

Table 2 Influence factors of beam quality

Influence factors	Single laser	Combined lasers
Intrinsic factor	transmitter aperture shape, aperture size, obscuring ratio of transmitter aperture, laser wavelength	transmitter aperture shape of each beamlet, aperture size of each beamlet, obscuring ratio of transmitter aperture of each beamlet, laser wavelength, laser modes difference, number of beamlets, vacancy factor, distribution scheme of combined lasers
	wavefront aberration, intensity fluctuation, temporal and spatial coherence of laser, jitter of transmitter laser axis, laser modes difference, truncation coefficient	higher-order wavefront aberration of each beamlet, intensity fluctuation of each beamlet, polarization angle errors of beamlets, piston errors of beamlets, temporal and spatial coherence of laser, jitter in each beamlet
Extrinsic factor		

由表2可知,影响激光束远场传输效能的因素种类繁多,这也对评价指标的选取提出了更为苛刻的要求,即指标要能够客观反映这些固有和非固有因素对实际激光光束质量的影响情况。实际上,当考察固有因素对光束质量的影响时,所选择的参考光束的口径会随固有因素的变化而改变,从而导致在评判固有因素对光束质量影响程度的相对基准不恒定,可以认为文献[17]的相关分析存在不妥。固有因素反映了不同激光系统之间的横向差异,对于口径分别为 $D=d$ 和 $D=2d$ 的实心均强平面光束,按照现有的光束质量定义,二者的光束质量均为最优,但实际上激光发射口径越大,其远场光斑中心主核区域的尺寸($1.22 \lambda L/D$)也就越

小,远场能量集中度也相应地越高。除了发射窗口尺寸的影响外,诸如激光发射端口形状、发射端中心占空比以及激光波长、合成光束的路数及填充因子等诸类因素也存在相似的问题,这也就说明现有的评价指标并不利于衡量不同激光系统间光束质量的优劣。

4.2 激光系统核心特征量

无论对于固体激光器、化学激光器还是其它类型的激光器,无论是采用稳定腔结构还是采用非稳腔结构,无论对于单路激光束还是多路光束的合成光束,衡量实际光束远场能量集中度(或可聚焦能力)的好坏就是看激光束传播至靶目标上能否使尽量多的能量集中在尽量小的桶内,即要求激光在靶目标上具有较高的平均能量密度。若假设发射激光波长为 λ ,发射口径为 D ,光束质量因子为 β ,光束传输因子为BPF,规范桶尺寸 $r_0 = c\lambda L/D$,理想光斑在该规范桶内的能量份额为 η_0 ,激光传输效率为 α ,定义为激光到靶功率与激光出射总功率二者之比,传输距离为 L ,则靶目标上激光光斑能量密度可表示为

$$E_t = \frac{\eta_0 \alpha P t}{\pi (c\beta\lambda L/D)^2}. \quad (8)$$

如果只关心远场靶目标上给定大小桶内的能量密度(8)式可补充为

$$E_t = \frac{\eta_0 \alpha P t \times T_{\text{BPF}}}{\pi (c\lambda L/D)^2}, \quad (9)$$

由(8)式和(9)式可以看出,靶面能量密度除了与激光发射总功率及光束质量因子有关外,还与发射激光口径 D 、波长 λ 、传输距离 L 、传输损耗 α 、作用时间 t 等诸多横向因素直接相关。从对目标的作用效果来看,只要满足在激光发射的有效积分时间 t 内,激光在靶目标上沉积的光斑能量密度大于对靶目标造成损伤的阈值 E_{th} ,便可以对靶目标形成有效的效应,正因如此,激光焦斑能量密度(等同于激光亮度)被国内外学者称为激光系统的核心特征量,对相同激光系统而言,采用该核心特征量分析各种误差源的影响时所得出的结论也将与光束质量因子得到的结论一致,对不同的激光系统,该参量也可以客观评判不同系统间性能的优劣,具有普适性。

5 结 论

以常见的三种类型激光束,即非稳腔产生的环形激光束、稳定腔产生的高斯光束以及多路高斯光束的相干合成光束作为研究和讨论的对象,针对涉及能量的应用,分析了现有各种评价指标的优缺点和适用性,并对评价指标定义中若干关键基础性问题进行了分析计算,结果表明:

1) M^2 因子存在理论及测量方面的诸多问题,不大适用于目前高功率激光系统光束质量的评价。

2) 对环形激光束,理想参考光束可选为相同发射外口径的实心均幅平面光束;对于高斯光束,理想参考光束可选为无截断基模高斯光束;对于多路高斯光束的合成光束,理想参考光束可选为与合成光束具有相同发射口径的实心均强平面光束,而文献提出的通用评价参数 BPF 不适用于高斯光束情况。

3) 采用指标 BPF 评价相干合成光束质量,当各路子光束空间占空比很小为 0 时,取理想艾里斑中心主核区域半径及其内所包含的激光能量份额作为规范量,可能会得出 $T_{\text{BPF}} > 1$ 的“超衍射极限”的结论。

4) 从对靶目标的作用效果来看,选择理想光束的远场平均能量密度曲线及 PIB 曲线的交点位置所对应的规范量大小是较为合适的一种规范量选择方案。

5) 从激光能量型应用的最终目的来看,激光束的亮度或靶目标上焦斑能量(功率)密度是客观评判激光系统性能好坏的评价参数,该参数不仅与激光系统的应用目的关系密切,而且还可用于衡量和比较不同激光系统间光束质量的优劣,是较为合理的描述实际激光光束质量的参数和核心特征量。

参 考 文 献

- 1 Lü Baida. Laser Optics[M]. Beijing: High Education Press, 2003. 75~78
吕百达. 激光光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 75~78
- 2 A. E. Siegman. New developments in laser resonators[C]. SPIE, 1990, **1224**: 1~14
- 3 A. E. Siegman. High-power laser beams: defining, measuring and optimizing transverse beam quality[C]. SPIE, 1992, **1810**: 758~765
- 4 H. Weber. Special issue on laser beam quality[J]. Opt. & Quantum Electron., 1992, **24**(9): 861~1135

- 5 The international organization for standardization. ISO11146-1-2005 laser and laser-related equipment-Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios-part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams [S]. Switzerland, 2005
- 6 A. E. Siegman. How to (maybe) measure laser beam quality[J]. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, **17**(2): 184~199
- 7 Lü Baida, Kang Xiaoping. Some aspects of laser beam quality[J]. *Infrared and Engineering*, 2007, **36**(1): 47~51
吕百达,康小平. 对激光光束质量一些问题的认识[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(1): 47~51
- 8 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1643~1653
冯国英,周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1643~1653
- 9 Qian Liejia, Fan Dianyuan, Zhang Zhuhong *et al.*. On some basic issues related to light beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **21**(12): 981~987
钱列加,范滇元,张筑虹等. 有关光束质量的若干基本问题及其新进展[J]. *中国激光*, 1994, **21**(12): 981~987
- 10 Su Yi, Wan min. High Energy Laser System[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2003. 42~50
苏毅,万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 42~50
- 11 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in the far field[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **24**(4): 327~332
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. *中国激光*, 1997, **24**(4): 327~332
- 12 Du Xiangwan. Factors influencing key characteristic quality of high energy laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(5): 945~947
杜祥琬. 影响高能激光系统核心特征量的要素[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(5): 945~947
- 13 Cheng Xiaofeng. Analysis of evaluating standard for ring beam's beam quality[J]. *Laser Journal*, 1995, **16**(5): 209~212
程晓锋. 圆环光束的光束质量评价标准分析[J]. *激光技术*, 1995, **16**(5): 209~212
- 14 Virendra N. Mahajan. Strehl ratio for primary aberrations; some analytical results for circular and annular pupils[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(9): 1258~1266
- 15 Xian Hao, Jiang Wenhan. The relation between wavefront aberration and the beam quality factor[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **26**(5): 415~419
鲜浩,姜文汉. 波像差与光束质量指标的关系[J]. *中国激光*, 1999, **26**(5): 415~419
- 16 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 773~778
刘泽金,周朴,许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 773~778
- 17 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaojun Xu *et al.*. Numerical analysis of the effects of aberrations on coherently fiber laser beams[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(18): 3350~3359
- 18 Liu Zejin, Lu Qisheng, Zhao Yijun. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **25**(3): 193~196
刘泽金,陆启生,赵伊君. 高能非稳腔激光器光束质量评价的探讨[J]. *中国激光*, 1998, **25**(3): 193~196
- 19 T. Sean Ross. Appropriate measures and consistent standard for high-energy laser beam quality[J]. *J. Directed Energy*, 2006, **2**: 22~58
- 20 R. Martinez-Herrero, P. M. Mejias. Second-order spatial characterization of hard-edge diffracted beams[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(19): 1669~1671
- 21 R. Martinez-Herrero, P. M. Mejias, M. Arias. Parametric characterization of coherent, lowest-order Gaussian beams propagation through hard-edged apertures[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(2): 124~126
- 22 C. Pare, P. A. Belanger. Propagation law and quasi-invariance properties of the truncated second-order moment of a diffracted laser beam[J]. *Opt. Commun*, 1996, **123**: 679~693
- 23 S. Amarande, A. Giesen, H. Hugel. Propagation analysis of self-convergent beam width and characterization of hard-edge diffracted beams[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(22): 3914~3924
- 24 Lü Baida. Recent developments in novel high-power solid-state laser drivers for application to ICF and laser beam quality [J]. *Laser Journal*, 1999, **20**(1): 1~8
吕百达. 新一代 ICF 固体激光驱动器和光束质量研究的进展[J]. *激光杂志*, 1999, **20**(1): 1~8
- 25 A. E. Siegman. Binary phase plates cannot improve laser beam quality[J]. *Opt. Lett.*, **18**(9): 675~677