

高能非稳腔激光器光束质量评价的探讨

刘泽金 陆启生 赵伊君

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

提要 探讨了一种评价高能非稳腔激光器光束质量的方法,对其定义、测量及物理意义作了说明和解释。

关键词 光束质量,非稳腔,激光器, β 因子

高能激光束远距离传输时,其光束质量是一个重要指标,杜教授曾分析过实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素^[1],其中激光器的光束质量是主要因素之一。高能激光器一般采用非稳腔结构,输出光束不是高斯光束,用传统的激光器光束质量评价方法(如 M^2 因子、远场发散角或衍射极限倍数、斯特列尔比)衡量非稳腔激光器产生的激光束的光束质量都有一些不便或不确定之处。总结我国几次高能激光外场传输试验的经验,参照国外的标准,本文探讨了一种评价高能非稳腔激光器光束质量的方法,我们称其为 β 因子方法。

1 理想光束的确定和 β 因子

各种光束质量的评价方法中都选取了一个理想光束作为基准,然后将实际光束与之比较,对非稳腔激光束用什么样的光束作理想光束呢?对稳定腔,理想光束是基模高斯光束,它也是稳定腔的理想模式,只不过这个模式的光束参数积 $d_0 \cdot \theta_0 = 4\lambda/\pi$ 是一个常数。那么非稳腔的理想模式是什么呢?按照 Siegman 提出的几何损耗分析方法^[2],满足自洽条件的非稳腔模式是一个振幅均匀的球面波,我们定义这个模为非稳腔的几何模,可以将这个几何模选为非稳腔的理想光束。对一个共焦非稳腔而言,其几何模就是一个边缘被截断的平面波。例如,与图 1 所示的共焦非稳腔对应的理想光束,可用其在输出镜处 P_1 上光场的复振幅分布表示

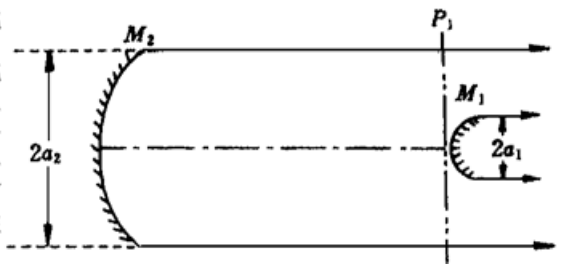


图 1 正支共焦非稳腔与其几何模
Fig. 1 A positive confocal unstable resonator and its geometric mode

$$\epsilon(r) = \begin{cases} 1 & r \leq a_2 \\ 0 & r > a_2 \end{cases} \quad (1)$$

而输出的光束是中心被挡空的环状光束。考虑衍射损耗后,实际腔模不可能是几何模,但几何模是最好的腔模(非稳腔中不可能产生基模高斯光束),用几何模作为基准是可行的,它给出了

一个定量的、可对比的基准。

理想光束确定了,用什么作为对比量来定量说明光束质量?远场发散角、远场光斑大小还是远场光斑大小与发散角的积或者是二阶矩?根据实践经验,选用远场光斑半径比较方便且合理,只要按统一的标准定义理想光束的远场光斑半径和实际光束的远场光斑半径,就能定义衡量光束质量的 β 因子,按照前面的讨论,描述非稳腔激光束质量的 β 因子由下式定义

$$\beta = \frac{\text{实际光束的远场光斑半径}}{\text{理想光束的远场光斑半径}} \quad (2)$$

由(2)式可见,实验上仅需测量实际光束远场光斑半径一个量。对共焦非稳腔这种定义与远场发散角 β 值的定义是相同的,但它消除了测量聚焦光学系统焦距的麻烦和带来的误差。习惯上称 β 值为衍射极限倍数,很容易与 M^2 因子混淆,(在ISO/TC-72号文件中,将 M^2 因子称为衍射极限倍数因子),为避免混淆,不称 β 因子为衍射极限倍数,称其为光束质量因子。

2 远场光斑半径的定义

假定已知远场光斑的光强分布为 $I(x, y)$,计算其“光斑质心”(或称一阶矩)

$$x_0 = \frac{\int x I(x, y) dx dy}{\int I(x, y) dx dy} \quad (3)$$

$$y_0 = \frac{\int y I(x, y) dx dy}{\int I(x, y) dx dy} \quad (4)$$

其中 s 表示对整个面积分。以 (x_0, y_0) 为原点,以 r_0 为半径选取一个圆形区域,当 r_0 满足

$$\frac{\int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} I(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr d\theta}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} I(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr d\theta} = \frac{e^2 - 1}{e^2} \approx 0.865 \quad (5)$$

时,定义 r_0 为远场光斑半径。这样定义光斑半径的原因是: r_0 的大小定量地体现了远场光斑的集中程度,通常情况下,在 $r > r_0$ 的区域,其光强较弱,与目标的相互作用效果不明显,忽略其作用,另外也参照了高斯光束光斑半径的定义。这个定义适用于理想光束,也适用于实际光束。

3 远场光强分布的测量和理想光束的远场光强分布计算

(5)式定义的光斑半径实际上是一个等效值,不是直接测量量,直接测量量是远场光强分布。随着光电器件技术的发展,高精度的面阵光电探测器已越来越普及,建议用面阵CCD图像

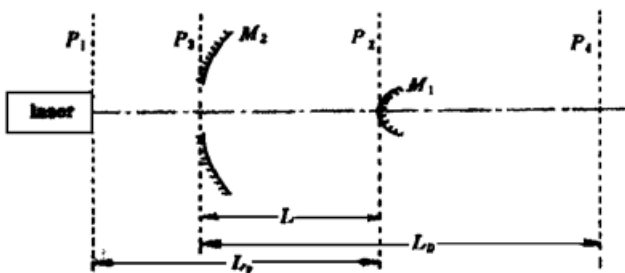


图2 光束质量测量实验光路图

Fig. 2 The optical path for measuring beam quality of the laser with an unstable resonator

传感器作探测器,测量激光束的远场光强分布。当激光束的能量很大时,可测量漫反射光的光强分布以代替真实光强分布的测量,在很多情况下也只能如此测量。设计光束质量测量实验方案时,必须注意一点:尽量减小因测量需要引入的光学变换系统对实际光束产生的截断,以免因测量造成光束的衍射扩展。实验中,曾用图2所示的光学变换系统测量一台非稳腔激光器的光束质量。为减小截断的

影响,要求扩束聚焦系统的主镜 M_2 的口径足够大,利用非稳腔激光器输出光束的空心(环状)特性,根据 M_1 镜的曲率半径和光束内外径大小选取适当的镜间距 L 及 M_2 的曲率半径,让 M_1 镜的遮挡影响减小到可接受的程度。理想光束的远场光强分布也必须根据实验所用的光学系统变换计算,否则失去了可对比性,但不能将光学元件遮挡造成的衍射损耗和扩展计入,例如对图 2 所示的光路,若光腔的几何模外径为 $2a_0$,用下述 Fresnel 衍射积分公式计算理想光束的远场光强分布,

$$\epsilon_2(r_2) = -\frac{jk}{L_p} e^{jkL_p} \cdot e^{jk\frac{r_2^2}{2L_p}} \int_0^{a_0} \epsilon_1(r_1) e^{jk\frac{r_1^2}{2L_p}} J_0\left[\frac{kr_1r_2}{L_p}\right] r_1 dr_1 \quad (6)$$

$$\epsilon_3(r_3) = -\frac{jk}{L} e^{jkL} \cdot e^{jk\frac{r_3^2}{2L}} \int_0^\infty \epsilon_2(r_2) e^{jk\left[\frac{r_2^2}{2L} - \frac{r_2^2}{R_1}\right]} J_0\left[\frac{kr_2r_3}{L}\right] r_2 dr_2 \quad (7)$$

$$\epsilon_4(r_4) = -\frac{jk}{L_D} e^{jkL_D} \cdot e^{jk\frac{r_4^2}{2L_D}} \int_0^\infty \epsilon_3(r_3) e^{jk\left[\frac{r_3^2}{2L_D} - \frac{r_3^2}{R_2}\right]} J_0\left[\frac{kr_3r_4}{L_D}\right] r_3 dr_3 \quad (8)$$

$$I(r_4) = |\epsilon_4(r_4)|^2 \quad (9)$$

式中 $\epsilon_1(r_1)$ 为非稳腔的几何模, L_D 为等效焦距,用几何光学方法求出 $L_D = \frac{(L - f_1)f_2}{f_2 - (L - f_1)}$, $f_1 = R_1/2 < 0$, $f_2 = R_2/2 > 0$,积分限的选取体现了无衍射损耗的光学变换特征,这一点很重要,否则会将光束质量和测量系统联系在一起,失去了其本身的意义。

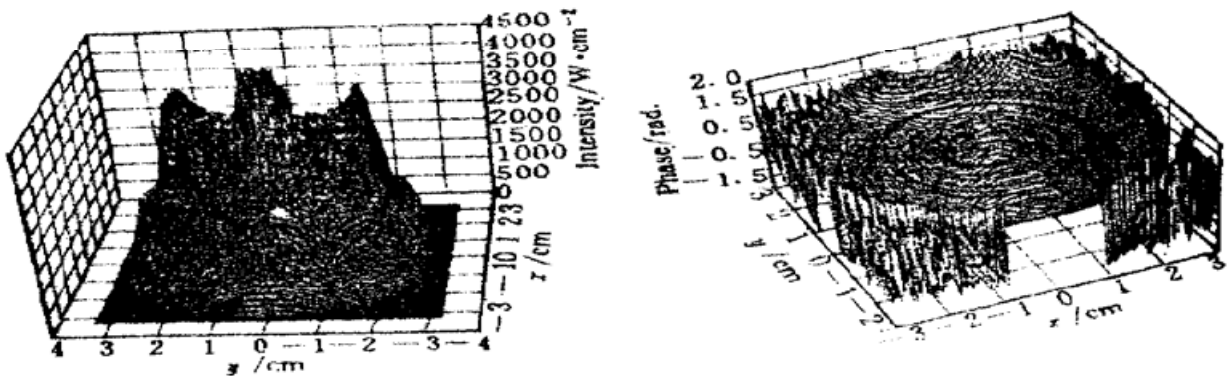


图 3 DF 激光器的本征模式

Fig. 3 The DF laser's eigenmode

表 1 远场光斑半径随等效焦距的变化

Table 1 The spot radius at far-field and beam quality factor vs the effective focal-length

Effective focal-length L_D /m	Spot radius of an ideal beam at far-field, R_o /cm	Spot radius of the real beam at far-field, R_r /cm	Beam quality factor
200	0.0197	0.0362	1.84
400	0.0394	0.0724	1.84
600	0.0591	0.1087	1.84
800	0.0788	0.1449	1.84
1040	0.1024	0.1883	1.84
1280	0.1260	0.2318	1.84
1520	0.1496	0.2752	1.84
1760	0.1732	0.3187	1.84

虽然不能严格地证明 β 因子与测量光学系统参数无关,但若测量系统造成的衍射影响可

忽略不计时,用数值方法可以证明 β 因子与测量光学系统的参数无关。用 FFT 方法计算了一个非稳腔 DF 激光器的本征模式,其近场光强和位相分布如图 3 所示,用该本征模式的输出部分作实际光束,腔的几何模作理想光束,用衍射积分计算出的远场光斑半径随等效焦距的变化如表 1 所示,可见光束质量因子 β 不随等效焦距 L_D 变化,用 β 因子作非稳腔激光器光束质量的评价标准是合理的,它是激光器输出光束的一个特征参数,不随光学系统的变换而变化。

实践中,用面阵 CCD 图像传感器测量高能激光束的远场光强分布时,即使测量其照在漫反射屏上产生的漫反射光也需衰减,否则探测器饱和。衰减的方式主要有两种,一是加透射式衰减片,二是减小通光孔径。加透射式衰减片(常为镀膜的平晶)时要选择无像差(或尽可能小的像差)元件;用限孔光阑将会抹掉光强分布的高频部分,但不带来附加的像差。由加衰减器引入的测量误差是无法克服的误差,它是测量误差的一部分。理想光束的远场光斑半径是一个理论计算值,可以不考虑计算误差的影响(比起测量误差来,它是一个小量),因此,光束质量的误差主要来自于测量光学系统和探测器的图像处理。图 4 是用 CCD 摄像机测量的一台非稳腔激光器输出光束的一幅远场光斑图,利用(1)~(9)式计算出它的光束质量 $\beta = 5.0$ 。

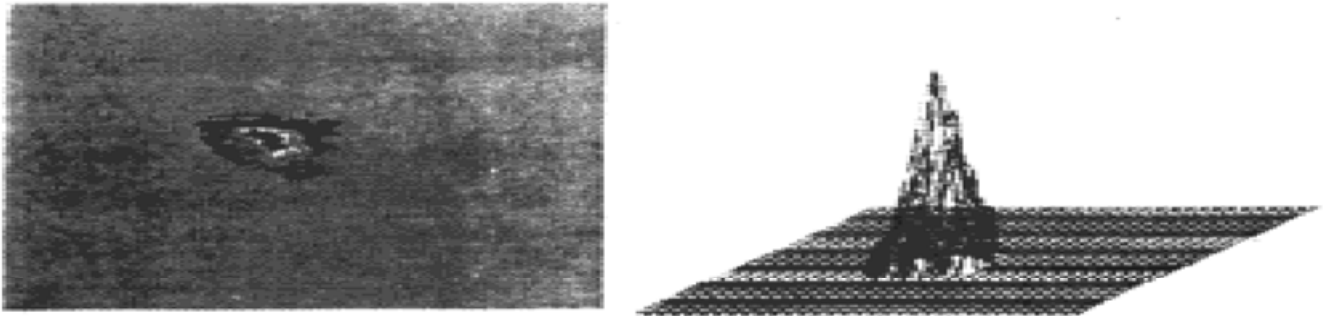


图 4 非稳腔激光束的远场光斑

Fig. 4 The spot of a laser with an unstable resonator at far-field

CCD 摄像机可以记录下多幅远场光斑,按时间顺序逐幅处理光斑图像,即可得到光束质量因子随时间的变化关系 $\beta(t)$ 。

参 考 文 献

- 1 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of real high power laser on the target surface in far field. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(4): 327~ 332 (in Chinese)
- 2 A. E. Siegman, H. Y. Miller. Unstable optical resonator loss calculations using the Prony method. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(12): 2729~ 2736

Study of Evaluating Beam Quality of High Energy Lasers with Unstable Resonators

Liu Zejin Lu Qisheng Zhao Yijun

(Applied Physics Department, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract A method of evaluating the beam quality of lasers with unstable resonators, called as β -factor method, is studied. The definition and physical meaning of the method are explained and the measuring method is presented.

Key words beam quality, unstable resonator, laser, β -factor