

# 激光光束质量的评价与应用分析

吴晗平

(驻中南地区光电系统军事代表室, 湖北武汉 430074)

摘要: 从  $M^2$  因子概念出发, 分析了  $M^2$  因子的概念与激光本质参数之间的关系, 以及几种典型光束的  $M^2$  因子, 研究了  $M^2$  因子的局限性, 比较了针对不同应用目的的常用激光束质量定义的适用范围, 探讨了激光光束质量的影响因素及其控制措施。

关键词: 激光光束; 光束质量; 激光器; 评价; 高功率激光

中图分类号: TN241 文献标识码: A

## 1 引言

光束质量是从质的方面来评价激光的特性, 对激光器设计、制造、检测、应用等有重要作用。90年代初 Siegman 对描述激光光束质量的  $M^2$  因子给出较为完整的理论<sup>[1]</sup>。但在实际应用中发现  $M^2$  因子与其他光束质量因子相比较, 也有其局限性。探讨如何完善光束质量因子的普适性, 分析影响光束质量的因素, 并进行控制, 具有重要意义。

## 2 $M^2$ 因子概念与激光的本质参数

根据国际标准化度量局的定义, 用  $M^2$  来衡量光束质量<sup>[1]</sup>。

$$M^2 = \frac{\text{实际光束束腰直径} \times \text{远场发散角}}{\text{理想 Gauss 光束束腰直径} \times \text{远场发散角}} = \frac{\pi}{4\lambda} w_0 \theta \quad (1)$$

光束的束腰直径即其光斑宽度  $W(z)$  的极小值  $w_0$ , 而远场发散角  $\theta$  可以直观地定义为  $\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} W(z)/z$ ,  $\lambda$  为波长。

由此可知:

①以光束束腰直径和远场发散角的乘积来表示光束质量, 乘积愈小, 激光束相干性就愈好, 亮度就愈高, 因此用这个乘积来表示光束质量就能把激光束的本质特征表示出来。

②采用  $M^2$  因子概念时, 实际上是用一个相对值, 即衍射极限倍数作为光束质量参数, 作为光束质量统一比较的标准是理想 Gauss 光束(基模 TEM<sub>00</sub>), Gauss 光束有最好的光束质量  $M^2 = 1$ 。

③当 Gauss 光束通过无像差、衍射效应可忽略的透镜、望远系统聚焦或扩束时, 虽然束腰直径或远场发散角要变化, 但作为比较的物理量即束腰直径与远场发散角的乘积, 当光束一定时是一个不变量。对理想 Gauss 光束有:

$$w_0 \theta = \frac{4\lambda}{\pi} \quad (2)$$

因此, 使用  $M^2$  因子比之仅用聚焦光斑尺寸或发散角衡量光束质量更为全面一些。

实际光束的  $M^2$  一般大于 1,  $M^2$  越大, 实际光束偏离 Gauss 光束越远, 光束质量也越差。

由激光束亮度公式:

$$B = \frac{P(\text{or } E)}{\Delta S \cdot \Delta \Omega} \quad (3)$$

$B$  为光束亮度,  $P(\text{or } E)$  为光源发射的总功率(或能量),  $\Delta S$  为光源发光面积,  $\Delta \Omega$  为发射立体角, 以及  $\Delta S = \frac{1}{4} \pi w_0^2$ ,  $\Delta \Omega = \frac{1}{4} \pi \theta^2$ , 可以得到用  $M^2$  表示的亮度公式:

$$B = \frac{P(\text{or } E)}{(M^2)^2 \cdot \lambda^2} \quad (4)$$

这样, 激光束的特征就可以用功率(能量)、波长、光束质量这几个参数表示出来。  $M^2$  表征了激光束亮度高、空间相干性好的本质参数。

### 3 几种典型光束的 $M^2$ 因子分析

#### (1) 厄米——高斯光束

这种模式混合的光束质量因子, 用直角坐标下的质量因子表示, 则是各个模式相对强度的加权平均<sup>[2]</sup>:

$$M_x^2 = \sum_{m=0, n=0} (2m+1) |C_{mn}|^2 \quad (5)$$

$$M_y^2 = \sum_{m=0, n=0} (2n+1) |C_{mn}|^2 \quad (6)$$

用径向质量因子表示则有:

$$M_r^2 = \sum_{m=0, n=0} (m+n+1) |C_{mn}|^2 \quad (7)$$

$C_{mn}$  为权重因子, 且  $\sum_{m, n} |C_{mn}|^2 = 1$ 。

显然, 只有在该光束单纯由 TEM<sub>00</sub> 模组成而无高阶模时, 质量因子才可能有  $M_r^2 = 1$ 。

#### (2) 拉盖尔——高斯光束

这种情况下的径向光束质量因子为<sup>[2]</sup>:

$$M_r^2 = \sum_{p=0, l=-p}^p (2p+l+1) |C_{pl}|^2 \quad (8)$$

$C_{pl}$  为权重因子 ( $p, l$  为模序数), 且  $\sum_{p, l} |C_{pl}|^2 = 1$ 。

值得一提的是, 采用稳定激光谐振腔的实际激光器在某些情况下, 或在非相干的厄米——高斯(HG)模式上振荡, 或在非相干的拉盖尔——高斯(LG)模式上振荡。横模频率稍有不同的几个 JH 模式或 LG 模同时在稳定腔中振荡时, 通常会引起高斯模式的非相干迭加。在实际中, 大多数激光器件是在非相干的 HG 混合模式上振荡, 而不是在非相干的 LG 混合模式上振荡。只有很高程度柱形对称的几种激光器件才可以在 LG 混合模式上振荡。

#### (3) 多模高斯光束

在多模式非简并情况下, 多模激光器各个模式之间不存在相干。如果假定本征模式为高斯模, 则多模激光束为高斯混合模光束, 此时  $M_x^2, M_y^2$  如(5)、(6)式所示,  $M_r^2$  为<sup>[3]</sup>:

$$M_r^2 = \sum_{p=0, l=0} (2m+p+l+1) |C_{pl}|^2 \quad (9)$$

由  $|C_{mn}|^2, |C_{pl}|^2$  的归一性可知:

$$M_x^2, M_y^2, M_r^2 > 1 \quad (10)$$

由此可见, 多模中高阶模的存在使光束质量下降。

#### (4) 高斯——谢尔模型光束

对于高斯——谢尔模型光束 (Gaussian Schell-model beams), 其远场发散角  $\theta$  为<sup>[4]</sup>:

$$\theta = \lim_z \frac{W(z)}{z} = \frac{2\lambda}{\pi w_0} \left[ \left( \frac{w_0}{2\sigma_0} \right)^2 + 1 \right] \quad (11)$$

式中,  $w_0$  为光束的束腰直径,  $\sigma_0$  为相干长度, 是光束相干性的量度, 定义:

$$\beta = \left[ 1 + \left( \frac{w_0}{2\sigma_0} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

则(11)式可简写为:

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi w_0 \beta} \quad (13)$$

于是有:

$$w_0 \theta = \frac{2\lambda}{\pi \beta} \quad (14)$$

高斯——谢尔模型光束的  $M^2$  因子为:

$$M^2 = \frac{w_0 \theta}{w_0 \theta} = 1/\beta \quad (15)$$

对一般情况(部分相干光),  $\sigma_0$  为有限值, 由(12)、(15)式可知,  $M^2 > 1$ 。相干性越好,  $\sigma_0$  越大, 则  $M^2$  越接近 1, 极限情况下  $\sigma_0 \rightarrow \infty$  (理想 Gauss 光束),  $M^2 = 1$ 。

#### (5) 波前畸变光束

理想的基模高斯光束具有球面波前, 但实际的光束往往由于谐振腔或传输光路上的光学元件的缺陷或像差的影响而形成波前畸变, 这种波前畸变将影响光束的  $M^2$  值。

参考文献[5]求得像点强度与光束波阵面平均形变的关系为:

$$I(p) = 1 - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\Delta\Phi)^2 \quad (16)$$

其中  $\Phi$  为波前畸变,  $\Delta\Phi$  为波前的均方畸变。

实际上像点强度反比于光束的可聚焦度, 而  $M^2$  值正比于光束的可聚焦度, 因此:

$$M^2 = \left[ 1 - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\Delta\Phi)^2 \right]^{-1} \quad (17)$$

对于一个波前畸变不大的平面波:

$$E(x, y) = |E(x, y)| \exp(i\Phi) \quad (18)$$

有:

$$M^2 = M_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\Delta\Phi)^2 \right]^{-1}$$

$$M_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (\Delta\Phi)^2 \right] \quad (19)$$

其中  $M_0^2$  为平面波  $|E(x, y)|$  的  $M^2$  值, 由(19)式可知波前畸变的存在将使平面波的  $M^2$  值增大, 这与相干性降低对光束的  $M^2$  值影响相似。

## 4 $M^2$ 因子的局限性与适用条件

正如所有光束质量评价方法一样,应用  $M^2$  因子评价光束质量也有其局限性,它要求光束截面上的光强分布必须是连续的,而且不能有陡直的边缘,比如对于“超高斯光束”(Super Gaussian beam)  $M^2$  就不适用<sup>[6]</sup>。

1983 年 P. A. Belanger 等研究了高斯光束在非线形介质中的自聚焦效应<sup>[7]</sup>,其涵义是等效光束质量因子可小于 1。1994 年在实验上实现了等效光束质量因子为 0.3 的小型新光束 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[8]</sup>。新光束在量子力学范围内无法解释。因此,不等式  $M^2 \geq 1$  的成立有一定的条件。

通过分析,可以得到:

①当光束遵从非线性波动方程在介质中传播时,光束  $M^2$  因子的取值不受  $M^2 \geq 1$  的限制。

② $M^2 \geq 1$  与量子力学测不准关系在数学形式上的相似性反映的是光束线性传输过程中表现出来的波动本性。 $M^2$  纯粹是一个经典概念,绝不能把  $M^2 \geq 1$  理解为量子理论中光子的坐标——动量测不准关系。

③只有当光束线性传输时, $M^2$  的大小才可以等价地看成表示光束偏离其衍射极限的程度,此时  $M^2 \geq 1$  成立。如果光束传输过程中的非线性因素不可忽略,这样必定对光束的准直性、亮度和  $M^2$  因子的取值产生影响。当非线性引起凝聚作用时(例如光束的非线性自聚焦效应),这种作用会抑制光束的衍射发散程度,从而有可能使得  $M^2 < 1$ 。

不过,非线性现象存在时,(1)式给出的  $M^2$  因子仍可作为描述光束质量的参数。但远场发散角的定义应改变为:

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} w(z)/z \quad (20)$$

此式的物理意义非常直观。注意到基于角谱理论导出的 Siegman 公式<sup>[9]</sup>:

$$w^2(z) = w_0^2 + (f_x)^2 z^2 \quad (21)$$

式中,  $f_x$  为角谱理论中光束的空间频率。

(20)式在线性光学情形下将自动回到强度=阶矩定义<sup>[9]</sup>。然而采用(20)式作为光束的远场发散角之后, $M^2$  因子量度的是光束的准直性程度。 $M^2$  因子的大小与光束的衍射性质有关,但(一般情形下)不完全取决于衍射性质。

对于  $M^2 = 0$  的单孤子光束,从理论上讲,其准直性达到了最高程度。这一现象的物理原因是,

衍射效应造成的发散与非线性引起的压缩达到了平衡,从而使光束的能量在波的传播过程中始终能保持在一个小范围内。

## 5 $M^2$ 因子与其他光束质量因子的比较

激光光束质量的定义除了  $M^2$  因子之外,常用的定义还有:

①远场发散角或衍射极限倍数  $\beta$  因子,或焦斑大小。

②  $BQ = P_{理}/P_{实}$ ,靶上(或桶中)功率比,或环围能量比。

$$\begin{aligned} \text{③ STREHL} &= \frac{\text{实际轴上峰值光强}}{\text{理想轴上峰值光强}} \\ &= \exp\left[-\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\Delta\Phi)^2\right], \end{aligned}$$

式中  $\Delta\Phi$  是造成光束质量下降的波前畸变。

④  $E_{d.b.理想}/E_{d.b.实际}$ ,理想光束的“衍射极限桶”中的环围能量与实际光束在同一桶中的环围能量比值的开方。

这些定义各有优点和局限性。STREHL 比只反映远场轴上的峰光强,不能给出能量型应用所关心的光强分布。发散角或焦斑大小可整体地反映光束质量,但不能反映光强的空间分布。桶中功率(或能量)比适用于能量输送、耦合型的应用,但单一的桶对光强的空间分布的描述有所不足,而且必须明确理想光束的选取。定义④是用于评价能量型应用的强激光光束质量的方法,但由于高能激光器一般采用非稳腔结构,输出光束不是高斯光束,衡量非稳腔激光器产生的激光束的光束质量,有一些不确定之处。

相对来说,  $M^2$  因子能较好地反映光束质量的实质,具有较强的普适性,并且积分地反映了光强的空间分布。参考文献[10]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。因此,要特别注意光束质量检测系统的设计,使仪器建立在可靠的信噪比分析基础上。

对高功率激光空间运输之类的应用,仅用  $M^2$  因子或 STREHL 比不足以全面描述光束质量,应提出既能简明反映物理实质,又能全面评价光束质量的标准。对影响激光光束质量的主要因素进行分析,提出有效补偿振幅和波前畸变的方法

是有重要实用意义的。在不明显降低输出功率(能量)的前提下提高激光光束质量潜力的研究尤其重要。

## 6 影响光束质量的因素

光束质量受激光产生、发射和传输过程影响。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,光学元件的静态像差和动态热像差(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,发射光学系统的像差和抖动也是影响光束质量的原因。对高功率激光而言,在传输通道(大气)中的线性(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。

### (1) 增益介质对光束质量的影响

当激光器工作时,介质中的能量流将引起介质发热,从而使介质密度发生变化,进而导致折射率变化,并最终对光束质量产生影响。在低压气体激光器中这种影响较小,而在高压气体激光器及固体激光器中则可能相当严重。

### (2) 谐振腔对光束质量的影响

谐振腔畸变对整个光束质量起决定性作用,

光束在腔内多次往返,腔反射镜将其畸变逐次累加到波前上。谐振腔对只有2个反射镜的腔来说还比较简单,但对包括多个反射镜的腔则变得非常复杂。

### (3) 热晕对光束质量的影响

光学路径上热晕的影响是使光斑弥散,从而导致光轴上能量减小。

通过合理设计和使用空间滤波器、高斯光阑或高斯反射镜等光学元件和系统,可减小 $M^2$ 因子之值,提高光束质量,其实质是“滤去”高阶模。另外,优化光腔设计和泵浦方案等,也可提高光束质量。

## 7 结束语

$M^2$ 因子概念的明确提出和相关定义的规范化,有助于进一步深化对光束质量的认知以及统一标准的制定。 $M^2$ 因子与其他质量因子相比,仍是一较为完善、合理的光束质量评价标准。对于一个激光器来说,要提高其输出光束的质量,不但要减少其模式数目,提高其相干性,还必须保证光束的波前畸变小,这一点在设计高性能激光器时必须充分考虑。

## 参考文献:

- [1] International Organization for Standardization. Terminology and test methods for lasers[S]. ISO/TC 172/Sc 9/WG1 N14, No. 2, 1991.
- [2] Siegman A E 著. 王世孝译. 应用空间频率和强度矩量分析激光光束传播与光束质量公式[J]. 激光集锦, 1992, 2(4): 34-44.
- [3] 陈培锋, 丘军林. 各种实际光束的 $M^2$ 参数特性比较[J]. 中国激光, 1995, A22(2): 139-143.
- [4] 吕百达, 张彬等.  $M^2$ 因子概念和激光束质量控制[J]. 激光技术, 1992, 16(5): 139-143.
- [5] 玻恩 M, 沃尔夫 E. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1981. 601-610.
- [6] Parent A, et al. Optical and quantum electronics[J]. IEEE Trans. 1992, 1071: 24.
- [7] Belenger P A, et al. Beam propagation factor of diffracted laser beam[J]. Appl. Opt., 1983, 22: 2.
- [8] 潘承志, 于世彭等. 新光束二氧化碳激光器[J]. 应用激光, 1995, 15(1): 1.
- [9] Siegman A E. New developments in laser[C]. Proc. SPIE, 1990, 1224: 2-14.
- [10] Wittrock U, Dong S, Eppich B. Weber beam parameter product of unstable resonators[C]. Proc. SPIE, 1995, 2374: 172-183.

## Evaluation and applied analysis of laser beam quality

WU Han-ping

*(The Optoelectronic System Military Representative Office of the CPLA*

*Stationed in the Zhongnan Area of China, Wuhan 430074, China)*

**Abstract:** Starting from the concept of  $M^2$  factor, this paper analyzed the relation between the  $M^2$ -factor concept and the innate character of laser, and the factor  $M^2$  of some kinds of classical beams. The limitation of the factor  $M^2$  was studied. It also compared the appropriate areas for different definitions of laser beam quality and explored the influence factors on laser beam quality and controlling measures.

**Key words:** laser beam; beam quality; laser; evaluation; high-power laser

作者简介: 吴晗平(1964-), 男, 1985年毕业于湘潭大学近代光学专业, 1991年毕业于海军航空工程学院信号与信息处理专业(工硕士), 工程师, 从事光电技术及系统装备研究工作, 已在重要刊物上发表论文三十多篇。