

104-108

激光光束质量因子 M^2 的物理概念与测试方法

曾秉斌 徐德行 王润文

7/249

(中国科学院上海光机所 201800)

A

提要 激光光束传输质量因子 M^2 是一种全新的描述激光光束质量的参数, 它能定量表征单模、多模光束传播特性。本文介绍 M^2 的物理概念、特点、测试方法及近年来国外的研究概况。

关键词 光束质量因子 M^2 , 衍射极限倍数, 束宽, 束腰, 嵌入高斯光束

Physical Concept and Measurement on Laser Beam Quality Factor M^2

Zeng Binbin, Xu Deyan and Wang Runwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, 201800)

Abstract In this paper, we introduce the factor M^2 as a new method for characterizing and measuring the "beam quality" of a laser output beam. The benefits of this method are that the parameter can be measured to characterize real mixed-mode beams and it becomes a measurable quantity describing beam propagation as well as beam quality. The physical concept and the measurements of the factor M^2 are mentioned.

Key words the beam quality factor M^2 , times-diffraction-limited, beam width, beam waist, imbedded Gaussian beam

在激光技术及其应用领域, 以及激光器的设计和生产过程中, 光束质量是极为重要的参数。光束质量的定义及测试是激光研究的重要内容之一。近年来, 一种表征激光光束质量的 M^2 因子被国际光学界所公认, 并由国际标准化组织 (ISO) 予以推荐。 M^2 因子克服了常用的光束质量评价方法的局限, 用 M^2 作为评价标准对激光器系统进行质量监控及辅助设计等具有十分重要的意义。

光束质量是激光束可聚焦程度的度量。高质量光束的远场发散角应接近理想的单模高斯光束 (TEM_{00}) 的衍射极限。影响光束质量的因素较多, 诸如高阶模输出、衍射、光学传输系统的象差及装校误差、工作物质的双折射及热透镜效应等^[1]。光束质量是由光场振幅和相位分布共同决定的, 有些些多模光束的光强分

布与单模高斯光束很相似, 但发散度较大, 可聚焦性也差; 而另一些光束经调制后可获得与单模高斯光束接近的相位分布而光强分布相差甚远^[1]。

光束质量是一项重要的性能指标。激光切割和焊接过程中, 通过在线检测光束质量来控制工件进给速率; 高质量光束在很大程度上提高激光武器的作战参数; 光束质量的优劣为激光器制造中的质量控制提供依据。然而, 过去常用的光束质量评价方法都存在一些不足。

光束质量的定义和测量方法缺乏统一标准对激光学术交流以及激光器产品供销都是一种障碍。为此, 欧共体国家委托 ISO 下属激光委员会 (SC9) 第一工作组 (WG1) 经 1990 年以

1994 年 2 月 3 日收稿

来几次会议讨论, 初步认可 M^2 因子作为光束质量标准。根据该标准, 国际上任何厂家的激光器的光束质量均可相互比对。

M^2 的数理概念

定义 M^2 为光束质量因子的理论基础是束腰的束宽和远场发散角乘积不变原理。如图 1 所示, 光束经无象差光学系统变换后,

$$d'_0 \theta' = d_0 \theta = \text{const.} \quad (1)$$

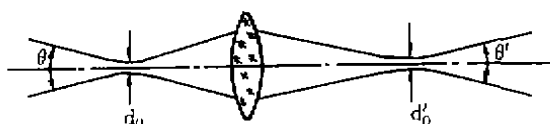


图 1 无象差透镜对束腰和发散角的变换式 (1) 可用量子力学测不准关系来解释^[3]: 在束腰处光子位置不确定度是 ΔX , ΔX 最小值是单模高斯光束束腰处束宽 d_0 , 光子横向动量不确定度是 ΔP_x , 在近轴近似条件下,

$$\Delta P_x = \frac{h}{\lambda} \sin \Theta \approx \frac{h\Theta}{\lambda} \quad (2)$$

式中 h 为普朗克常数, Θ 最小值是单模高斯光束远场发散角 θ

$$\theta = 4\lambda/\pi d_0 \quad (3)$$

根据测不准关系

$$\Delta X \cdot \Delta P_x \geq 4h/\pi \quad (4)$$

对一般光束束腰处, $\Delta X = D_0$, $\Delta P_x = h/\lambda\Theta$, 代入上式, 则

$$D_0 \Theta \geq 4\lambda/\pi \quad (5)$$

定义光束质量因子 M^2 为

$$M^2 = \frac{D_0 \Theta}{d_0 \theta} = \frac{\pi}{4\lambda} \cdot D_0 \Theta \quad (6)$$

因为实际光束的截面常常并不是圆形的, 即当光束的光强分布不对称或存在象散时, 光束质

量应用两个参数描述,

$$\begin{cases} M_x^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \cdot D_{ox} \Theta_x \\ M_y^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \cdot D_{oy} \Theta_y \end{cases} \quad (7)$$

M_x^2 和 M_y^2 分别表示 X 方向和 Y 方向的光束质量因子。由定义可知 M^2 是一个大于或等于 1 的参数, 对单模高斯光束 $M^2=1$ 。从 (7) 式可以看出一般光束远场发散角

$$\Theta = M^2 \frac{4\lambda}{\pi D_0} \quad (8)$$

考虑到 $\frac{4\lambda}{\pi D_0}$ 是单模高斯光束的衍射极限, M^2 的物理意义可理解为衍射极限倍数 (times-diffraction-limited)。

M^2 的概念较早是由 M. Larry 提出的^[4], 他认为高阶模光束的焦斑直径和远场发散角都是单模高斯光束的 M^2 倍。A.E.Siegman 引入空间频率和强度矩的概念使定义 M^2 作为光束质量因子的设想得以确立^[5,6]。

将光强在空域及频域的分布分别表示为 $I(X,Y,Z)$ 和 $\hat{I}(s_x, s_y)$, 其中 s_x, s_y 分别是 X, Y 方向上的空间频率, 在傍轴近似条件下, $s_x = \sin \theta_x / \lambda \approx \theta_x / \lambda$, $s_y = \sin \theta_y / \lambda \approx \theta_y / \lambda$, 可以计算出空域和频域的光强分布的二次矩:

$$\begin{cases} \sigma_x^2(z) = \frac{\int \int (x-\bar{x})^2 I(x,y,z) dx dy}{\int \int I(x,y,z) dx dy} \\ \sigma_{s_x}^2 = \frac{\int \int (s_x - \bar{s}_x)^2 \hat{I}(s_x, s_y) ds_x ds_y}{\int \int \hat{I}(s_x, s_y) ds_x ds_y} \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{式中 } \bar{X}(Z) = \frac{\int \int X I(x,y,z) dx dy}{\int \int I(x,y,z) dx dy} \quad (10)$$

$$\bar{s}_x = \frac{\int \int s_x \hat{I}(s_x, s_y) ds_x ds_y}{\int \int \hat{I}(s_x, s_y) ds_x ds_y} \quad (11)$$

将光束空间宽度和频谱宽度分别定义为

$$D_x(z) = 4\sigma_x(z) \quad (12)$$

$$\Delta S_x = 4\sigma_{s_x} \quad (13)$$

$D_x(z)$ 和 $\sigma_x(z)$ 都是 Z 的变量, 在束腰位置分别为 D_{ox} 和 σ_{xo} , 而 ΔS_x 和 σ_{s_x} 与 Z 无关, 考

考虑到频谱宽度 ΔS_x 与发散角 Θ_x 的关系, 可得到

$$\Theta_x = 4\sigma_{S_x} \lambda \quad (14)$$

将 (15) 式和 (17) 式代入 (8) 式, 则

$$\begin{aligned} M_x^2 &= 4\pi\sigma_{x0}\sigma_{S_x} \\ \text{对 } y \text{ 方向} \quad M_y^2 &= 4\pi\sigma_{y0}\sigma_{S_y} \end{aligned} \quad (15)$$

上述分析表明, 束腰宽由束腰截面上的光强分布决定, 而远场发散角由相位分布决定, 因此, 定义 M^2 作为光束质量因子能够反映光场的强度分布与相位分布的特性。

M^2 因子的特点

以 M^2 因子表征光束质量有几个显著的优点。

首先, M^2 因子能够确定和度量多模光束的光束质量。工业上应用的大功率激光器, 如大多数千瓦级 CO_2 激光器输出厄密—高斯混合模光束, 并且先在高阶模产生振荡^[7], 这种混合模光束的光束质量因子 M^2 是各个模相对强度的加权平均^[8],

$$\begin{cases} M_x^2 = \sum_{m,n} (2m+1) |\tilde{C}_{mn}|^2 \\ M_y^2 = \sum_{m,n} (2n+1) |\tilde{C}_{mn}|^2 \end{cases} \quad (16)$$

C_{mn} 是相对振幅系数, m, n 是模的阶数。厄密—高斯混合模光强空间分布可表示为

$$\begin{aligned} I_{mn}(X, Y, Z) \\ = \frac{I_{mn}(0)}{W^2(Z)} H_m^2(X) H_n^2(Y) \exp[-2\frac{x^2+y^2}{W^2(Z)}] \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $W(Z)$ 是光束半宽, $H_m(X)$ 、 $H_n(Y)$ 是厄密多项式, 各阶模的光强分布有相同的高斯指数因子, 传播相同的距离后光束发散程度相同, 因而也有相同的瑞利距离和波面曲率半径^[9]。可以设想在多模光束中构造一个“嵌入高斯光束”^[2], 它与多模光束有相同的束腰位置和瑞利距离 Z_R , 如图 2 所示。“嵌入高斯光束”的束宽 d 与多模光束束宽 D 在任意截面上满足: $D=Md$, 在束腰位置: $D_0=Md_0$ 。它

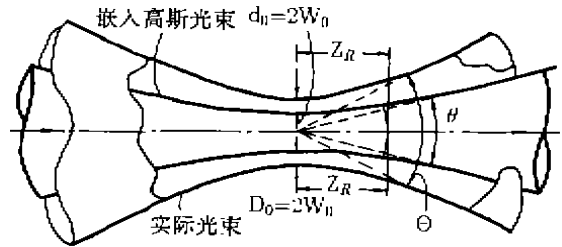


图 2 嵌入高斯光束
们的远场发散角满足: $\Theta=M\theta$ 。
多模光束的衍射极限

$$\frac{4\lambda}{\pi D_0} = \frac{4\lambda}{\pi M d_0} = \frac{1}{M} \theta \quad (18)$$

因此, 多模光束中引入“嵌入高斯光束”后, M^2 因子同样可理解为多模光束远场发散角 ($M\theta$) 与衍射极限 ($\frac{1}{M}\theta$) 之比, 即衍射极限倍数。

其次, M^2 因子能描述多模光束的传播特性。并且光束的传播方程、波面曲率半径、复曲率半径。以及通过近轴光学系统传播的 ABCD 矩阵等都具有高斯光束的类似表达式。根据多模光束的部分相干理论将多模光束近似成高斯—斯盖尔模光束 (Gaussian Schell Model beam)^{[10][11]}, 它的 Q 参数定义为

$$\frac{1}{Q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{M^2 \lambda}{\pi D^2(z)} \quad (20)$$

Q 参数的传播同样遵守 ABCD 法则^[12]

$$Q(Z_2) = \frac{AQ(Z_1) + B}{CQ(Z_1) + D} \quad (21)$$

如果“嵌入高斯光束”的束宽为 D/M , 同样可得到 Q 参数定义式以及多模光束传播方程^[6]

$$D^2(Z) = D_0^2 \left[1 + \left(\frac{Z - Z_0}{Z_R} \right)^2 \right] \quad (22)$$

式中 $Z_R = \frac{\pi D_0^2}{M^2 \lambda}$ 。多模光束一般是非对称的, 因此更确切的描述应该把各光束传播参量写成在 x, y 方向的分解形式。上述结果表明, 多模光束经无象差近轴系统的变换利用 ABCD 矩阵和“嵌入高斯光束”的概念可以一步完成。

另外, M^2 因子有助于设计多模光束的光学传输系统和聚焦系统^[5]。可以先测量入射光束的 M^2 和束腰宽 D_0 , 得到“嵌入高斯光束”的束腰宽 $d_0 = D_0/M$ 再利用高斯光束传播方程和 ABCD 矩阵计算“嵌入高斯光束”通过该光学系统后的光束参量, 不断完善系统结构参数直到光束参量符合要求; 多模光束与“嵌入高斯光束”有相同的瑞利距离和波面曲率半径, 区别只在于任一光束截面上 $D = Md$; 在各光学元件位置确定后, 按多模光束束宽的 3 倍给出它们的口径, 这样取值既可降低衍射损失又可忽略一部分高阶模的影响。

M^2 的测量方法

光束质量因子 M^2 的测量方法按原理可分为两种: 一是傅立叶变换法, 在光束束腰截面上同时测出光场强度分布和相位分布, 由傅立叶变换得到空间频谱, 从 (18)、(19) 式可以看出, 只要计算强度分布宽度和频谱宽度的乘积就可得到 M^2 ; 较常用的方法是基于光束传播方程 (32) 的束宽测量法, 由 (32) 式可知

$$M^2 = \frac{\sqrt{D^2 - D_0^2}}{Z - Z_0} \cdot D_0 \cdot \frac{\pi}{4\lambda} \quad (23)$$

只要测得束腰位置、束腰宽以及任一其它位置的束宽就能计算出 M^2 。激光光束的束腰可能位于激光器好几米之外, 也可能位于谐振腔内, 这样就使确定束腰位置较为困难, 因此, 通常并不直接对自由光束进行测量, 而是用一个无象差透镜将自由光束聚焦, 然后在象空间测量有关参数, 最后折算到物空间对应数值, 这种“透镜变换法”已为 ISO 认可^[13]。采用这种方法至少带来三个好处: 一是能实现远场测量, 远场定义是指到束腰距离: $FF \geq 100\pi D_0^2/\lambda$ 的区域^[14], 自由光束经聚焦后, $D'_0 \ll D_0$, 实现远场测量要容易得多; 二是象方束腰位置漂移较小, 因为自由光束准直度较高, 聚焦后的束腰必位于象方焦点附近, 这给测量带来极大方便; 三是降低了由限制孔径引起的衍射效应对近场束宽测量的影响。不过, “透镜变换法”

须选择适当的透镜以避免在测量结果中引入较大的误差。

M^2 的测量实质上可归结为束宽测量。通常束宽定义为光强分布曲线上相对光强为峰值 $1/e^2$ 的两点间的距离, 也有用 $1/e$ 、50% 作为定义指标, 学术界公认的最严格的束宽定义是 (15) 式提及的“ 4σ 准则”, 它适用于任何光强分布。

“ISO 标准 (草案)”中认可的束宽测量方法中^[15], 针孔装置由于衍射引起较大的束宽测量误差, 一般很少采用; 狭缝扫描装置狭缝宽度为被测束宽的 $1/10$ 以下才不致引起较大的测量误差^[16]; 上述两种方法都是直接以峰值光强 $1/e^2$ 作为测量阈值, 可变光阑装置是一个圆心与光束轴线重合的可变光阑, 当通过光阑的能量为全部光束能量的 86.5% 时, 光阑口径即为束宽, 这种方法的优点是在束宽测量同时, 可测得束宽范围内的总能量, 这在材料加工和光纤传输领域十分重要, 它的主要缺点是要求光阑中心对准光束轴线常常很难做到。

刀口扫描装置是在一个机械平台上沿光束截面平移刀口, 由探测器采集透过的光能。刀口装置的特点是结构简单, 束宽测量范围广, 可测得光束有效能量。刀口测量阈值的确定并不容易, 即使在理想高斯光束情况下, 有关刀口函数的计算也十分复杂, 通常采用近似的“ 4σ 准则”定义束宽, 测得值 D_c 是总能量 10% 和 90% 之间的刀口移动距离, 再修正到实际束宽 D ^[17], $D = 1.56D_c$ 。这一测量阈值对低阶模精度较高, 而用于高阶模光束则误差较大。相干公司推出的 M^2 测试仪 Mode Master 采用的就是刀口扫描装置^[18], 如图 3 所示, 准直度较高的光束经透镜 1 聚焦, 束腰位置保持在透镜焦点附近, 并随透镜一起移动, 轮毂旋转一周, 刀口能在前后两个位置测得束宽, 移动透镜 1 直到刀口在两个位置测得束宽相等, 这时束腰位置可确定位于轮毂轴线, 再次移动透镜 1, 移动距离为轮毂的半径, 使束腰落在一个测量位置上, 再次测量得到束腰宽和另一给定距离的束

宽, 代入 (33) 式求出 M^2 。 M^2 测试仪 Mode-Master 能测量多种光束空间参数, 但只局限于测量连续激光。

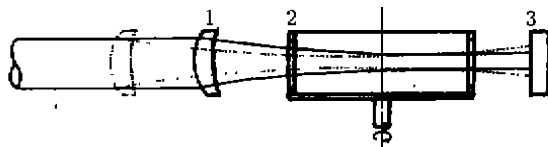


图3 Mode Master 的刀口扫描装置
1 聚焦镜 2 带有刀口的轮毂 3 探测器

脉冲激光的 M^2 因子的测量, 要求在一个脉冲持续的时间内同时测得两个截面的束宽, 其中一个为束腰截面。图4是一种可用于脉冲光束的束宽测量装置, 该装置主要由光学系统(前组透镜 L_1 , 后组透镜 L_2 , 分束器以及 L_1 的驱动调节机构)和图象处理系统(面阵 CCD, 图象采集卡和计算机)组成。两个 CCD 探测器之间有固定的光程差, 调节 L_1 使光束聚焦准确地落在其中一个 CCD 上, 这样就能在一个脉冲里同时对束腰截面和另一个给定距离的截面进行测量, 测量结果能获得以二次矩计算的束宽。

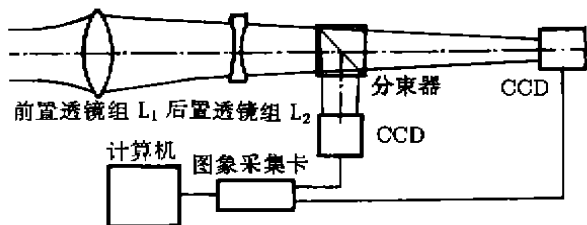


图4 一种可用于脉冲光束的束宽测量装置

结 语

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它的局限性, 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^[19]。尽管如此, M^2 因子仍是一种较为完善、合理的光束质量评价标准。因此, 已被 ISO 接受, 并准备于 1993 年验收^[20]。最近也有人提出用 M^2 的倒数表示光束质量其实是相同的。近一、两年来,

国内已开始研究激光传输光学质量因子 M^2 的理论及其测试技术^[21], 我国在这一领域的研究必将引起人们的普遍关注。

参考文献

- [1] A.C.Ashmead, Laser Focus World, Aug. 83(1991)
- [2] M.W. Sasnett et.al., SPIE, 1414, 21(1991)
- [3] T. F.Johnston, Laser Focus World, May 173(1990)
- [4] M. Larry, Laser Focus World, Apr.26(1971)
- [5] A.E. Siegman, SPIE, 1224, 2(1990)
- [6] A.E. Siegman, 激光集锦, 王世孝译, 2. No. 3, 36(1992), No.4, 34(1992)
- [7] A.E. Siegman, IEEE J.Quantum Electronics, 29, No.4, 1212(1993)
- [8] K.M.Du et.al., Optical and Quantum Electronics, 24, 1087(1992)
- [9] A.E.Siegman, IEEE J.Quantum Electronics, 27, No.5, 1146(1991)
- [10] S.Lavi et.al., Applied Optics, 27, No.17, 3696(1988)
- [11] R.Gase, Journal of Modern Optics, 38, No.6, 1107(1991)
- [12] P.A. Belanger, Optics, Letters, 16, No.4, 196(1991)
- [13] J.Fleischer et.al., ICALEO(1990)
- [14] J.Darchuk, Laser Focus World, May 205(1991)
- [15] ISO/TC 172/SC 9/WG1 N14, 1991-02-19
- [16] J.M.Fleischer et.al., SPIE, 888, 60(1988)
- [17] A.E.Siegman et.al., IEEE J.Quantum Electronics, 27, No.4, 1098(1991)
- [18] U.S.Patent, Patent Number: 5.100.231, Mar.31, 1992
- [19] A.Parent et.al., Optical and Quantum Electronics, 24, 1071(1992)
- [20] 晓晨译, 国外激光, No.6, 40(1993)
- [21] 杨成龙, 激光技术, 17, No.5, 306(1993)