

利用 CCD 准确测量激光远场发散角

陈 军 黄 鹏

(浙江大学光科系现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 利用 CCD 面阵接收器, 通过标定的方法, 将其准确安置在长焦距透镜后焦面上, 并找出 CCD 象元数与原场发散角的对应关系, 从而迅速确定远场发散角。同时用短焦距透镜对光束限制光阑成像, 测得近场光斑光强分布。以激光束振幅函数的傅里叶变换作为理想衍射极限, 将远场发散角与之比较, 可以得到用几倍衍射极限的方法表示的实际光束质量。

关键词 远场发散角 CCD 测量

激光的远场发散角是评价激光质量的一个重要参数。一方面它反映了远距离传输时的发散特性, 另一方面它与束腰的乘积则是近年来所广泛讨论的 M^2 参数。应用 ISO 统一规范的 M^2 法则^[1]

$$M^2 = \frac{\pi \theta}{4\lambda} \quad (1)$$

M^2 则包含了光束质量的综合特性, 较为直观地说明了该光束可聚焦的程度。测量 M^2 必须测量远场发散角。过去常规的远场发散角测量方法有套孔法、刀口法等。这一方法已沿用多年, 目前也仍为 ISO 组织介绍的一种方法。传统方法在安置套孔于后焦面时有较大的误差, 而我们用 CCD 面阵测量发散角是一种标定方法, 一方面可以将 CCD 准确放置在透镜后焦面上以减少测量误差, 使测量精度上比传统方法有较大提高。另一方面经标定后确定 CCD 象元数与远场发散角的一一对应关系, 从而可迅速、准确地测出光束在任一方向的远场发散角。特别是对于由板条激光器产生的矩形光束或其它非圆对称光束, 该方法是十分有效的。

1 CCD 标定及远场发散角测量

1.1 CCD 标定

利用 CCD 测量远场发散角的原理是利用标定方法根据 CCD 接收元的准确间距, 将 CCD 准确放置在长焦距透镜的后焦面上, 并测得后焦面上光斑在某个方向上实际尺寸 d , 从而得到远场发散角 $2\theta = d/f$ 。具体安置及标定方法有二种, 第一种方法比较准确, 且适用于任何发散角情况。第二种方法十分方便, 测量与长焦路无关, 但只适用于发射角较小的情况, 当发散角较大时误差也较大。

在第一种安置方法中, 标定及测量光路安置如图1所示。将被测光束通过一反射镜 A 反射后再通过一长焦距透镜, 透镜焦距对使用波长为已知。反射镜安置在一个可微调支架上, 利用螺旋测微器 C 使反射镜绕原点 O 作微小转动。螺旋测微器支点到原点 O 的距离是准确已知

国防科技基础研究基金资助项目。

1997年8月11日收到原稿, 1997年10月5日收到修改稿。

陈军, 女, 1946年12月出生, 教授, 博士生导师。

的, 在实验中为 $CO = 49.5\text{mm}$, 一般是由支架加工精度保证的。螺旋测微器最小刻度为 0.01mm 0.01mm , 因此每转过一格, 相应的镜面偏转为 0.202m rad , 这一偏转相应于后焦面上光束移过 CCD 的象元数为 $m = 0.404f / \Delta (\text{Pix}/\text{格})$, 式中 Δ 为 CCD 的 x 方向上的象元间隔, 实验中 $\Delta = 10\mu\text{m}$, f 为透镜焦距, 实验中 $f = 250\text{mm}$, 可得 $m = 10.1\text{Pix}/\text{格}$, 以此得到标定系数 $K = 0.0404\text{m rad}/\text{Pix}$ 。标定时使光束偏转一较大角度, 求出光斑在透镜后焦面处在 CCD 上应移过的 Pix 数, 使 CCD 在透镜后焦面附近前后移动, 直至严格地符合标定应放置的后焦面上位置为止。并可在连续测量光斑点移动几个位置后取平均值, 据此可将 CCD 准确安置在透镜后焦面上。再把光斑调回中心位置。图2为焦点处的光斑图像。测得光斑直径为 54Pix (0.54mm), 便可由标定系数 K 及光斑直径所占的 Pix 数确定其远场发散角。实验测量了 He-Ne 激光的远场发散角为 2.18m rad 。类似地, 对脉冲 Nd: YAG 进行测量, 测得其焦点处光斑为 $\phi. 26\text{mm}$, 焦距 $f = 258\text{mm}$, 故其远场发散角为 1.0m rad 。

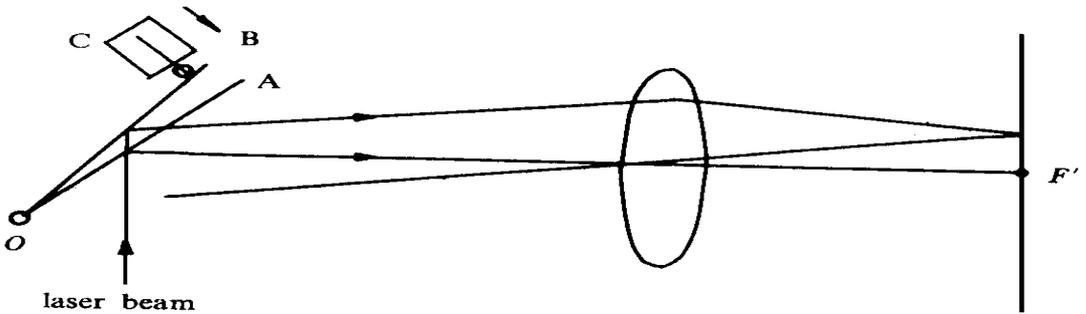


Fig 1 Experimental setup for measure of the far field divergence angle
图1 测量远场发散角的实验装置

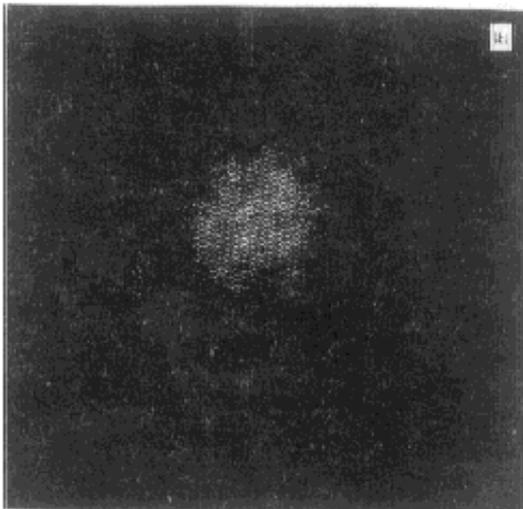


Fig 2 (a)He-Ne laser beam spot at the focal plane; (b) Intensity distribution of a cross section
图2 (a)焦点处的 He- Ne 激光光斑; (b)截面光强分布

第二种方法测量装置也见图1。当被测光束发散角较小时,可直接移动 CCD 使象最清晰为止。此时 CCD 不一定准确处在后焦面上。但标定就是以此面进行,而被测光束发散角较小,按此面标定及计算实际误差是很小的。标定时是以反射镜 A 转角为标准的,即使焦距未知也不影响计算光束偏转相应的 Pix 数,具体步骤如下:将 CCD 置于透镜后焦面附近,移动 CCD 使光束的远场衍射象最清晰为止。转动反射镜 A,使光束沿 x 方向移动,反射镜偏转一格相应于光束偏转 m rad 数是已知的。读出转动加减10格时光斑在 CCD 上移动过的 Pix 数,即可求出相应于 x 方向上 $1m$ rad 光束远场发散角的 Pix 数及标定系数 K_x 。根据 CCD 象元在 x 及 y 方向上的纵横比,可求出 y 方向上的标定系数 K_y 。

1.2 远场发散角的测量

根据远场发散角 $2\theta = d/f$, 发散角测量归结到远场衍射光斑尺寸的测量。

对于中心对称的圆形光斑或近圆形光斑,方法是将光束调到光轴附近,测量光斑直径所占的 Pix 数。直径测量方法可以由截面分布曲线取下降至极大值的 $1/e^2$ 处的直径,当光斑模式较差、对称性不好时,则应采用二阶距法。我们根据二阶距计算公式,编制了计算程序及去除 CCD 暗电流噪声、环境噪声的程序,处理 CCD 测得的光强数据,可以方便地求得光斑的重心坐标及二阶距(这一方法将在以后文章中介绍)。

对于非中心对称的矩形光斑,我们提出如下方法。以文献中的板条激光器为例,使出射的矩形光束通过一焦距 $f = 1.5m$ 的长焦透镜,成象于透镜后焦面的 CCD 上。这就是矩形光束的远场傅里叶频谱象。用此光束作标定,转动反射镜 A,方法与上节同。可求出标定系数 $K_x = 0.01244m \text{ rad/Pix}$ 。由实验用 CCD 象素大小 $17\mu m \times 19.8\mu m$ 求得 $K_y = 0.01449m \text{ rad/Pix}$ 。从而测得 Nd:YAG 板条激光放大器在重复率为 150Hz 时的矩形输出光斑的远场发散角为 $\theta = 0.352m \text{ rad}$ 及 $\theta = 0.074m \text{ rad}$ 。在测量这一光斑尺寸时测量的是矩形光斑最大值的 $1/2$ 值处的尺寸。利用这一方法分别测量了 Nd:YAG 板条激光放大器在重复率为 150 、 250 、 375 、 750Hz 时的矩形输出光斑的远场发散角。并按下节方法计算衍射极限倍数分别为: x 方向 1.09 、 1.12 、 1.03 、 1.53 ; y 方向 1.19 、 1.23 、 1.13 、 1.16 。

2 几倍衍射极限计算

光斑的远场发散角通常还用几倍衍射极限的方法表示。

对于中心对称的圆形光斑或近圆形光斑,根据 ISO 标准草案,光束的 M^2 值就是几倍衍射极限数。它是以理想高斯光束 $M^2 = 1$ 为比较标准的。因此测得了远场发散角以及束腰直径后代入(1)式即可求得 M^2 即几倍衍射极限值。

对于矩形光斑,不能以理想高斯光束为比较标准。本文介绍的方法是,同时用短焦距透镜对光束限制光阑平面成象,以测得的近场最小光斑处光强分布进行对这一光场振幅函数作傅里叶变换作为理想衍射极限。将远场发散角与之比较,可以得到用几倍衍射极限的方法表示的实际光束质量。具体做法如下,图3示出的被测对象是 Nd:YAG 板条激光放大器的矩形输出光斑^[2]及 x 和 y 方向截面图。若把矩形输出光斑近似为 rect 函数,得振幅分布为

$$A(x, y) = \text{rect}(x/D_x) \text{rect}(y/D_y) \quad (2)$$

D_x 及 D_y 为图3光斑 x 和 y 方向宽度。其远场衍射光强分布为(1)式的傅里叶变换

$$I(x_0, y_0) = (D_x D_y / \lambda z)^2 \text{sinc}^2(D_x x_0 / \lambda z) \text{sinc}^2(D_y y_0 / \lambda z) \quad (3)$$

式中 x_0 、 y_0 分别为长焦透镜的后焦面坐标; λ 为被测光波长; z 为长焦透镜焦距。

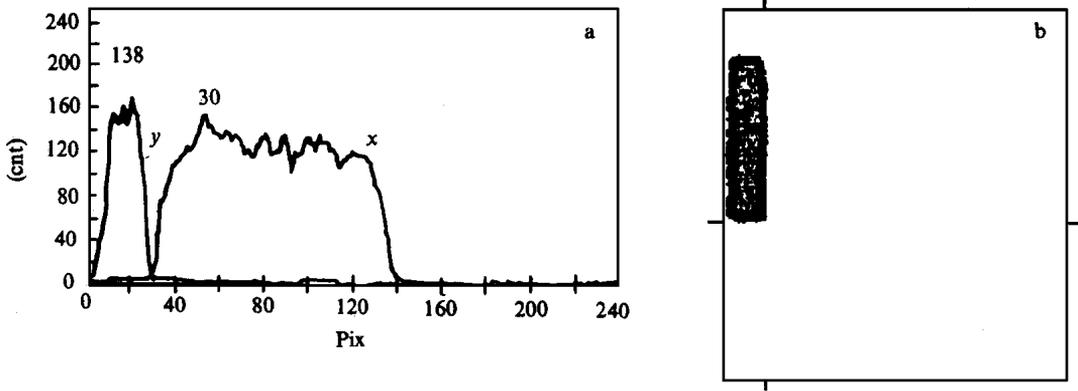


Fig 3 Nd: YAG slab laser pattern in near field (a) intensity distribution; (b) the rectangular laser pattern
 图3 Nd: YAG 板条激光近场光斑。(a) 光强分布; (b) 矩形光斑象

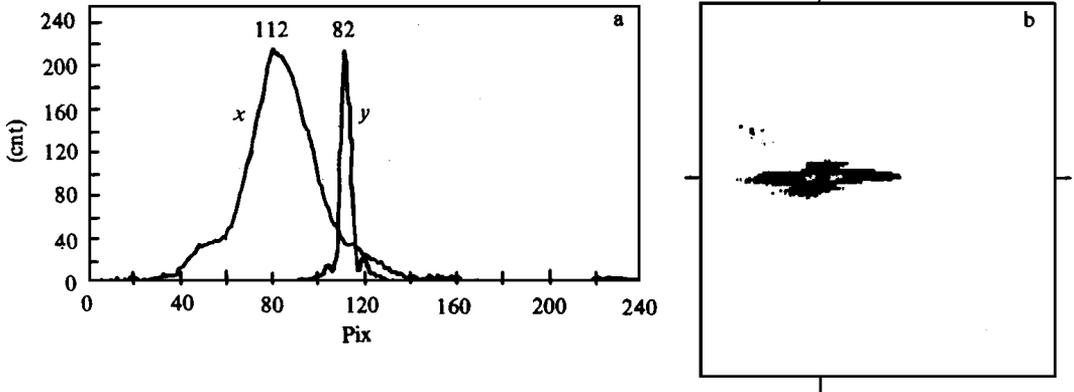


Fig 4 Nd: YAG slab laser pattern in far field (a) intensity distribution; (b) the diffraction pattern
 图4 Nd: YAG 板条激光远场光斑。(a) 光强分布; (b) 衍射光斑象

图4为与图3光束相应的远场衍射光斑象。(a) 相应于(3)式中的二个 sinc^2 函数, 由于其二个一阶零点的间距不易准确测量, 因此定义为测量1/2的峰值处宽度的 Pix 数, 并由此求出相应的实际发散角。而相应于(3)式的理想 sinc^2 函数1/2的峰值处宽度可以计算得为 $0.88(\lambda z/D_x)$ 及 $0.88(\lambda z/D_y)$, 相应的衍射极限发散角(全角, 下同)为 $0.88(\lambda z/D_x)$ 及 $0.88(\lambda z/D_y)$ m rad。因此将实际远场发散角 2θ 除此衍射极限发散角数值, 就是几倍的衍射极限数。假如远场衍射光斑象的二个一阶零点的间距可以准确测量, 那么也可以用其二个一阶零点的间距定义的发散角与 sinc^2 函数的相应理想值相除得到几倍的衍射极限数。可以计算相应于(3)式的理想 sinc^2 函数相应的衍射极限发散角为 $2(\lambda/D_x)$ 及 $2(\lambda/D_y)$ 。可见用几倍的衍射极限数来表示发散角与采用何种方法定义的发散角无关。但假如用 m rad 来表示, 则必须指出定义方式及半角或全角, 一般以光强峰值的 e^{-2} 处光斑宽度定义发散角。由于远场发散角与近场光斑大小有关, 仅仅指出发散角的 m rad 数实际上是没有意义的。指出其几倍衍射极限数则包括了与近场光斑理想衍射情况的比较, 是一种合理的方法。

近场光斑的准确测量也采用标定的方法。用一块精密加工的孔径与孔距已知的模板, 例如一排小孔。将其放置在光束限制光阑位置的平面上, 从 CCD 测得的近场象求出光斑的标定系

数 J (mm/Pix), 由此测出光斑参数 D_x 及 D_y 。当然如果光阑完全限制了光束, 且被限制光束基本均匀, 为简单起见, 也可直接测量光阑尺寸作为光斑参数 D_x 及 D_y 。我们在文献[1]实验中测量的重复率为150、250、375、750Hz时的矩形输出光斑的 x 及 y 方向远场发散角所相应的衍射极限倍数分别为1.09、1.12、1.03、1.53和1.19、1.23、1.13、1.16。

上面所用的理想衍射极限是用 rect 函数的傅氏变换。更严格的做法是对图3的光斑作超高斯函数的拟合^[3]

$$u(r) = \exp(-c_n r^n) \quad (4)$$

例如到10阶超高斯函数 $\exp(-c_{10} r^{10})$ 就已比较接近实际光束, 再对10阶超高斯函数作傅氏变换作为理想衍射极限, 就更为严格。此处就不详细介绍。

综上所述, 对于矩形光束的远场发散角, 我们在这里采用了这样一个定义, 即理想的衍射极限应当是被测光束的近场光斑振幅分布函数的傅里叶变换, 实际光束由于各种原因而具有大于理想衍射极限的发散角。事实上我们可证明用理想高斯光束 $\exp(-r^2/\omega_0^2)$ 作傅里叶变换再以极大值的 e^{-2} 求理想的衍射极限发散角代入(1)式, 得到理想高斯光束 M^2 等于1, 因此采用傅里叶变换的方法求发散角是正确的。我们将在以后的文章中给出详细的证明。不同的光束, 包括不同的光束截面形状及尺寸, 只能以其自身的理想衍射极限为标准, 用其远场发散角与其自身的理想衍射极限作比较, 得到其相应的衍射极限倍数。这样的定义是严格及合理的。

参考文献

- 1 International Organization for Standardization Document ISO/TC 172/SC 9/WG 1 N 80(1995 2)
- 2 陈军 激光二极管阵列泵浦的位相共轭板条 YAG 激光放大系统 光学学报, 1996, 16(10): 1411~ 1414
- 3 Siegmann A. E. Lasers, University Science Book, Mill Valley, California 1986, 738~ 739

EXACT MEASUREMENT OF THE FAR FIELD DIVERGENCE OF THE LASER BEAM USING CCD CAMERA

Chen Jun and Huang Peng

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation

Department of Optical and Scientific Instrumentation Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

ABSTRACT Using CCD camera, based on the calibration to put the CCD exactly on the rear focal plane of a lens with long focal length, we can get the pixel number of the CCD corresponding to the perm rad of the far field divergence. Therefore, the far field divergence could be detected quickly. Meanwhile, the spatial intensity distribution in near field is measured using CCD. The Fourier transform of the laser beam amplifier function in near field could be taken as the theoretical diffraction limit. The ratio of the far field divergence and the theoretical diffraction limit expresses the beam quality in the form of the "times of diffraction limit".

KEY WORDS far field divergence, measurement using CCD.