

# 高功率 CO<sub>2</sub> 激光束发散角的测量

奚全新 沈俊泉 沈华勤 陈钰明 归振兴 张顺怡 王润文

(中国科学院上海光机所, 201800)

**摘要:** 理论和实验研究了高功率 CO<sub>2</sub> 激光器的光束发散角测量。对三种不同测量方法进行了理论分析, 给出了相应公式和计算曲线。

**关键词:** 测量, 发散角

## Measurements of beam divergences in high power CO<sub>2</sub> lasers

*Xi Quanzxin, Shen Junquan, Shen Huaqin, Chen Yuming, Gui Zhenxing,  
Zhang Shunyi, Wang Runwen*

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

**Abstract:** The characteristics of measurements of beam divergence in high power CO<sub>2</sub> lasers were studied theoretically and experimentally. The theoretical analyses of three measurement means were made, and the corresponding formulas and theoretical calculation curves were given. The theory coincides well with the experimental results.

**Key words:** measurement, beam divergence

光束发散角是评估高功率 CO<sub>2</sub> 激光器件质量优劣的重要参数。本文从理论和实验上研究了三种测量高功率低阶模横流 CO<sub>2</sub> 激光器光束发散角的方法, 对其测量误差进行了理论分析, 并进行了实验验证。

### 一、远场光斑测量法

远场光斑测量法是测量足够远的两处  $z_1, z_2$  的 TEM<sub>mn</sub> 模的光斑尺寸  $W_{mn}(z_1)$  和  $W_{mn}(z_2)$ , 设  $z_2 > z_1$ , 由文献[1]有

$$W_{mn}(z_1) = W_{0mn} \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda a_{mn}^2 z_1}{\sigma W_{0mn}^2} \right)^2} \quad (1)$$

$$W_{mn}(z_2) = W_{0mn} \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda a_{mn}^2 z_2}{\sigma W_{0mn}^2} \right)^2} \quad (2)$$

设  $\frac{\lambda a_{mn}^2}{\sigma W_{0mn}^2} = q$ , 由公式(1)和(2)得

$$\theta_{mnz_2} = \frac{2W_{0mn}(\sqrt{1+(gz_2)^2} - \sqrt{1+(gz_1)^2})}{z_2 - z_1} \quad (3)$$

这里  $W_{0mn}$  表示光腰尺寸,  $a_{mn}$  为 TEM<sub>mn</sub> 模相对基模光斑尺寸的放大倍率,  $\theta_{mnz_2}$  为  $z_2$  处测得的光束发散角(全角, 以下同)。由公式(1)~(3)可知, 只要  $z_1, z_2$  足够大, 则远场发散角为

$$\theta_{mnz_2} = a_{mn}^2 \frac{2\lambda}{\pi W_{0mn}} \quad (4)$$

以一千瓦级 TEM<sub>10</sub> 低阶模横流 CO<sub>2</sub> 激光器为例, 其光腰尺寸  $W_{010} = 0.725$  cm, 光腰离窗口 2 m。由公式(3), 可以作出以光腰位置为参考原点,  $\Delta z = z_2 - z_1 = 1$  m, 不同  $z_2$  值的光束发散角之理论曲线示于图 1(实线)。从图 1 可知, 当从光腰开始的距离  $z_2$  大于 16 m 时, 由公式(3)表达的光束发散角  $\theta_{mnz_2}$  接近由公式(4)表达的远场发散角  $\theta_{mn}$ , 即逼近与水平轴平行的虚线位置。

由公式(3)可知, 满足远场发散角的条件的  $z$  值为

$$z \gg \frac{\pi W_{000}^2}{\lambda} \quad (5)$$

实验数据如图 1 虚线所示, 与理论曲线相比, 在光腰附近测得的光束发散角与理论曲线较吻合。随着  $z_2$  不断增大, 光束发散角与远场发散角接近。当  $z = 16$  m 时, 测得光束发散角为 2.90 mrad, 而理论值为 3.44 mrad, 其测量误差约 15%。

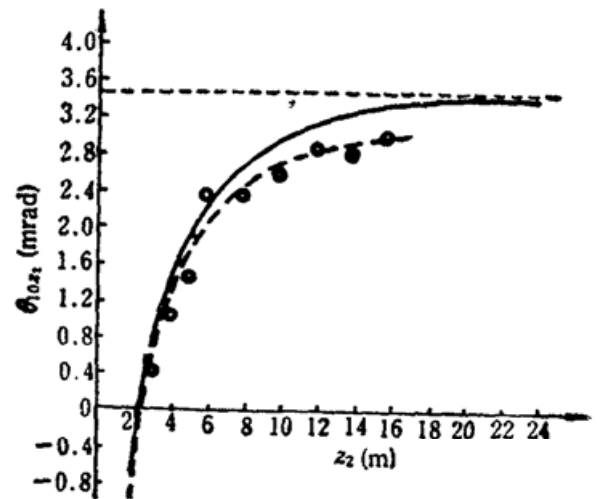


Fig. 1 Dependence of divergence angle  $\theta_{10z_2}$  on pattern position  $z_2$  using directly measured pattern sizes

## 二、聚焦测量法

为克服场地限制及功率计通光口径限制可采用聚焦法来测量远场发散角。

对高功率 CO<sub>2</sub> 激光束而言, 在保证近轴光线条件下, 采用一定曲率半径的反射镜(通常为铜质镀金镜)将激光束聚焦, 如果焦点处的光斑直径为  $D$ , 聚焦镜的焦距为  $F$ , 则认为光束发散角  $\theta$  为

$$\theta = D/F \quad (6)$$

理论分析和实验结果表明, 采用公式(6)作为光束发散角存在明显偏差。

如图 2 所示, 对于 TEM<sub>00</sub> 模来说, 由聚焦镜变换后的高斯光束光腰尺寸  $W'_{000}$  和位置  $l'$  与待测光束光腰尺寸  $W_{000}$  和位置  $l$  及聚焦镜焦距  $F$  之间关系为<sup>[2]</sup>

$$l' = F + \frac{(l-F)F^2}{(l-F)^2 + \left(\frac{\pi W_{000}}{\lambda}\right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{1}{W'^2_{000}} = \frac{1}{W^2_{000}} \left(1 - \frac{l}{F}\right)^2 + \frac{1}{F^2} \left(\frac{\pi W_{000}}{\lambda}\right)^2 \quad (8)$$

这里  $\lambda$  为激光波长。对于 TEM<sub>mn</sub> 模, 由  $W_{0mn} = a_{mn}W_{000}$  和  $W'_{0mn} = a_{mn}W'_{000}$ , 代入公式(7)、(8), 易得

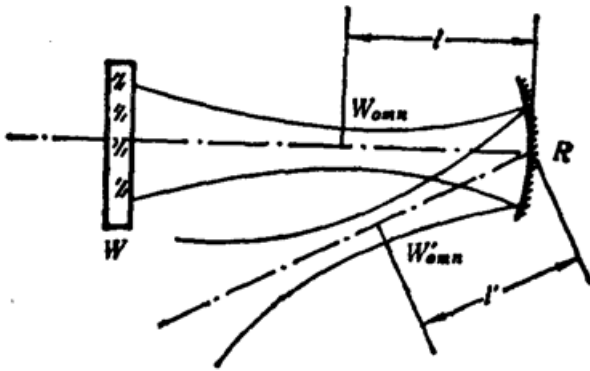


Fig. 2 Shift of measured Gaussian laser beam in terms of focus mirror

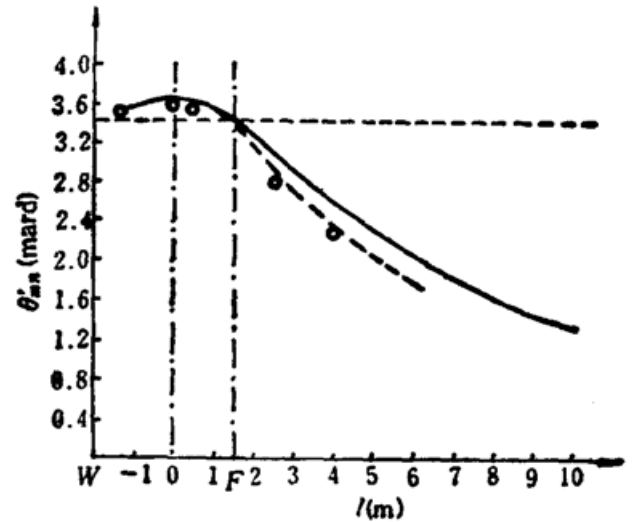


Fig. 3 Dependence of divergence angle  $\theta'_{mn}$  on located position  $l$  of focus mirror in terms of measured focus

$$l' = F + \frac{(l-F)F^2}{(l-F)^2 + \left(\frac{\sigma W_{0mn}^2}{\lambda a_{mn}^2}\right)^2} \quad (9)$$

$$\frac{1}{W_{0mn}'^2} = \frac{1}{W_{0mn}^2} \left(1 - \frac{l}{F}\right)^2 + \frac{1}{a_{mn}^4 F^2} \left(\frac{\sigma W_{0mn}}{\lambda}\right)^2 \quad (10)$$

当焦距为  $F$  的聚光镜  $R$  置于待测激光束光腰  $W_{0mn}$  之前方距离  $l=F$  时, 由公式(9)(10)可知, 由聚焦镜变换后的高斯光束之光腰位置  $l'$  和光腰尺寸  $W_{0mn}'$  分别为

$$l' = F \quad (11)$$

$$W_{0mn}' = F \cdot a_{mn}^2 \frac{\lambda}{\sigma W_{0mn}} \quad (12)$$

采用公式(6)定义的光束发散角, 当  $l=F$  时,  $\theta = a_{mn}^2 \frac{2\lambda}{\sigma W_{0mn}}$ , 这和公式(4)表明的光束远场发散角之结果一致。

当  $l < F$  时, 由公式(9)、(10)可知, 被聚焦后的激光束之光腰  $W_{0mn}'$  的位置  $l' < F$ , 新的光腰尺寸  $W_{0mn}'$  变小。

当  $l < 0$  时, 随着  $|l|$  增大,  $W_{0mn}'$  和  $l'$  继续减小。实际上, 人们采用被聚焦后的光腰尺寸  $W_{0mn}'$  被其位置  $l'$  去除作为光束发散角  $\theta'_{mn}$ , 即

$$\theta'_{mn} = 2W_{0mn}'/l' \quad (13)$$

公式(13)与公式(6)相比有所不同, 如果选择不当,  $l' \neq F$ , 焦点光斑  $D/2$  也不等于光腰尺寸  $W_{0mn}'$ 。如果忽略了聚焦镜所置位置  $l$  与焦距  $F$  的关系, 其测量精度是很差的。只有当  $l=F$  时, 公式(6)和公式(13)所得结果与公式(4)表示的远场发散角  $\theta_{mn}$  完全一致。

图3从理论和实验上给出了采用聚焦法得到的光束发散角  $\theta'_{mn}$  与聚焦镜所置位置  $l$  的关系。与图3水平轴平行的虚线代表了由公式(4)表明的远场发散角

$$\theta_{mn\infty} = a_{mn}^2 \frac{2\lambda}{\sigma W_{0mn}},$$

当聚焦镜  $R$  置于光腰处,  $\theta'_{mn}$  达极大值。在  $l < 0$  和  $F > l > 0$  的区域,  $\theta'_{mn} > \theta_{mn}$ 。在  $l=F$  处,

$$\theta'_{mn} = \theta_{mn}。$$

当  $l > F$  时, 随着  $l$  增大,  $W'_{0mn}$  逐渐变小,  $l'$  逐渐变大,  $\theta'_{mn}$  随  $l$  增大逐渐变小, 当  $l$  趋于无穷大时,  $\theta'_{mn}$  趋于零。

图 3 的虚线为采用聚焦法来测量千瓦级 TEM<sub>10</sub> 模横流 CO<sub>2</sub> 激光器光束发散角的实验曲线。其光腰  $W_{010}$  置于离输出窗口 2 m 处,  $W$  点为该激光器之输出窗口处。将焦距  $F = 1.5$  m 的铜镜分别置于光腰  $W_{010}$  的不同相对位置, 所得到的实验数据如图 3 中“o”点所示。实验结果与理论曲线较好吻合。当  $l = F$  时, 实验测得光束发散角为 3.40 mrad, 与理论值很接近, 测量误差在 5% 以内。

严格来说, 在  $l \neq F$  时,  $W'_{0mn}$  和  $l'$  还与聚焦镜焦距  $F$  有关。实际上  $F$  不宜太大, 只有满足下列关系时, 聚焦镜才有聚焦作用<sup>[1]</sup>:

$$F < \frac{1}{2} R(l) \quad (14)$$

$$R(l) = l \left[ 1 + \left( \frac{\pi W_{0mn}^2}{\lambda \cdot l \cdot a_{mn}^2} \right)^2 \right] \quad (15)$$

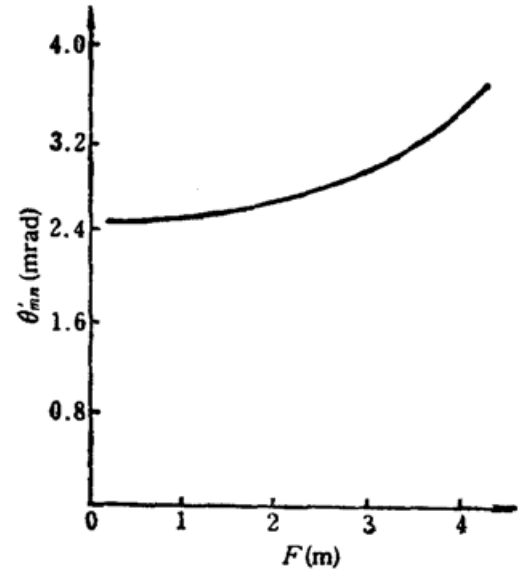


Fig. 4 Dependence of divergence angle  $\theta'_{mn}$  on focal length  $F$  of mirror when  $l = 4$  m

我们给出了光束发散角  $\theta'_{mn}$  与聚焦镜焦距  $F$  之间的关系, 结果表明  $\theta'_{mn}$  随聚焦镜焦距  $F$  增大而增大(图 4)。十分重要的是, 当聚焦镜置于  $l = F$  处, 测量结果与焦距  $F$  无关。

### 三、测量光腰尺寸法

对于高功率连续输出低阶模 CO<sub>2</sub> 激光器来说, 由于选模需要, 或者由于输出窗口在高功率激光密度下变形, 其光腰  $W_{0mn}$  常常置于输出窗口之外(如图 2 所示)。在此情况下, 其远场发散角  $\theta_{mn}$  可由公式(4)确定, 其  $W_{0mn}$  可由测量其光腰尺寸直接求得。问题的关键是仔细地找出光腰所在位置并测定它的大小。

但对于光腰不在输出窗口之外的情况, 直接测量光腰尺寸的方法显然是行不通的。在此情况下, 采用聚焦法来测量光束发散角是可行的, 但是应该算出  $W_{0mn}$  在腔内的位置, 尽量满足  $l = F$  这一条件, 以减少测量误差。

我所研制成功的千瓦级 TEM<sub>10</sub> 模横流 CO<sub>2</sub> 激光器, 其光腰  $W_{010}$  置于输出窗口之外 2 m 处, 对其光腰尺寸  $W_{010}$  进行测量, 所求得的远场发散角  $\theta_{mn}$  与聚焦法测得的结果一致。

### 参 考 文 献

- 1 周炳钿 *et al.*, 激光原理, 国防工业出版社, 1980