

文章编号: 1001-3806(2013)02-0261-04

刀口法测平顶光斑和高斯光斑半径的新算法

高 源^{1,2} 樊仲维^{2,3*} 余 锦² 赵天卓² 石朝辉³

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100080; 2. 中国科学院 光电研究院, 北京 100094; 3. 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085)

摘要: 为了测量平顶光斑和高斯光斑的半径, 采用刀口法进行了理论分析和实验验证, 并且提出了新的迭代算法。刀口的间距与光斑半径存在正比关系, 求出了相应的比例系数。在实际测量中, 测得刀口的间距后再乘上相应的系数就可以得到光斑半径。结果表明, 将迭代法进行推广, 可用于求任意已知强度分布式的光斑半径。

关键词: 测量与计量; 迭代算法; 刀口法; 高斯光斑; 平顶光斑

中图分类号: TN206 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.030

New algorithm of knife-edge method measuring the size of hat spot and Gaussian spot

GAO Yuan^{1,2}, FAN Zhong-wei^{2,3}, YU Jin², ZHAO Tian-zhuo², SHI Zhao-hui³

(1. Graduate University, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China; 2. The Academy of Opto-electronic, Chinese Academy of Science, Beijing 100094, China; 3. Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: In order to measure the radius of hat spots and Gaussian spots, knife-edge method was adopted for the theoretical analysis and experimental verification. A new iterative algorithm was proposed. The distance of knife-edge is in direct proportion to the radius of spot. The corresponding scale factors were calculated. It is convenient to obtain the radius of spots by multiplying a corresponding scale factor to the distance of knife-edge. The result shows this iterative algorithm is also valid for any spot whose distribution of intensity is already known.

Key words: measurement and metrology; iterative algorithm; knife-edge method; Gaussian spot; hat spot

引 言

在激光器中, 高斯光斑^[1-2]最为常见, 而通过光束整形, 可将高斯光斑变为平顶光斑。在激光器的设计过程中经常需要知道特定位置的光斑半径^[3]。常用的光斑半径测量方法为套孔法、CCD 法和刀口法。套孔法是用半径可变的圆形光阑遮光, 通过遮挡能量的百分比和光阑半径推算出光斑的半径。CCD 法是将光斑打到 CCD 上, 通过强度拟合求出光斑半径。套孔法和 CCD 法都有其局限性, 套孔法需要将光阑中心与光斑中心对准, 而实际上操作起来很困难, CCD 法虽然比较精确, 可是只能测量低能量的光斑, 如果加衰减片则会造成光束的畸变。而刀口法没有上述的局限, 并且具有简洁、精确、适用范围广等优点。用刀口法测平顶光斑和高斯光斑的半径需要用不同的计算方法。

本文中第 1 节主要介绍刀口法的测量步骤, 第 2 节中介绍了刀口法测平顶光斑的半径, 第 3 节中则介绍了刀口法测高斯光斑半径的迭代算法, 最后给出了相应结论。

1 刀口法测量光斑半径步骤

刀口法测量光斑半径分为 4 步^[4], 分别如图 1 所示。首先测出未遮挡时光斑总功率; 然后将刀口从左至右或从右至左滑动, 渐渐遮挡光斑, 同时一边用功率计观察功率的变化, 当遮挡后的光斑功率与光斑总功率的比值为 a 时 ($1/2 < a < 1$), 记录下刀口位置 d_1 ; 然后继续移动, 当该比值变为 $1-a$ 时, 再记录一次刀口的位置 d_2 ; 此时 d_1 和 d_2 的距离为 d , 测出 d 和 a 后, 对

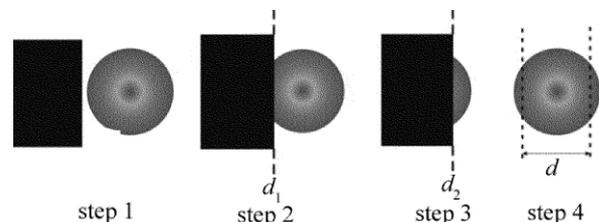


Fig. 1 Procedure of knife-edge method

作者简介: 高 源 (1988-) 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: fanzhongwei@aoc.ac.cn

收稿日期: 2012-05-02; 收到修改稿日期: 2012-07-17

不同的光斑运用相应算法即可求出光斑半径 w 。计算过程中长度和光斑半径的单位都是 mm。

2 刀口法测平顶光斑半径

带尾纤的 LD 抽运经过耦合镜头汇聚的光斑可以认为是圆形的平顶光斑,其强度分布很简单,如下式所示:

$$I = \begin{cases} A & (0 \leq r \leq w_f) \\ 0 & (r > w_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中,光强 A 为常数。图 2 是求平顶光斑半径的示意图。

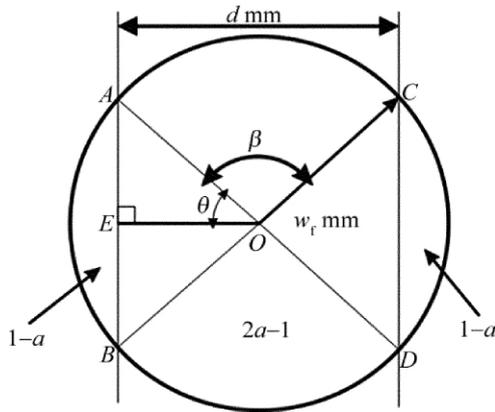


Fig.2 Scheme of hat spot

线段 AB 和 CD 是两次刀口的测量位置,间距为 d , OE 垂直于 AE , θ 和 β 分别是 AO 和 OE 及 AO 和 OC 之间的夹角。刀口之间的光斑功率与光斑总功率的比值为 $2a - 1$ 。需要通过 d 和 a 求出光斑半径 w_f 。

由图 2 易知 $OE = d/2$, $OA = w_f$ 。则 θ 为:

$$\theta = \arccos\left(\frac{d}{2w_f}\right) \quad (2)$$

β 可以由 θ 求出:

$$\beta = \pi - 2\theta = \pi - 2\arccos\left(\frac{d}{2w_f}\right) \quad (3)$$

扇形 AOC 的面积为:

$$S_{AOC} = \frac{\beta}{2\pi} \cdot \pi w_f^2 = \frac{1}{2} \left[\pi - 2\arccos\left(\frac{d}{2w_f}\right) \right] w_f^2 \quad (4)$$

三角形 AOB 的面积为:

$$S_{AOB} = \frac{1}{2} AB \cdot EO = \frac{d}{2} \sqrt{w_f^2 - \frac{d^2}{4}} \quad (5)$$

根据图 2,可知刀口之间的平顶光斑面积为:

$$S_1 = 2(S_{AOC} + S_{AOB}) = \left[\pi - 2\arccos\left(\frac{d}{2w_f}\right) \right] w_f^2 + d \sqrt{w_f^2 - \frac{d^2}{4}} \quad (6)$$

设 S 为光斑总面积,由于平顶光斑的强度分布均匀,面积之比等于功率之比,因此 $S_1/S = 2a - 1$,代入(6)式

得:

$$\left[\pi - 2\arccos\left(\frac{d}{2w_f}\right) \right] w_f^2 + d \sqrt{w_f^2 - \frac{d^2}{4}} = (2a - 1) \pi w_f^2 \quad (7)$$

(7) 式就是平顶光斑半径 w_f 所满足的方程,将 d 和 a 代入,解该方程可以得出光斑半径 w_f 。选取不同 a 和 d 的值代入(7)式中,即可计算出对应的光斑半径 w_f ,以上步骤可以通过 MATLAB 实现^[4]。

图 3 表示平顶光斑半径 w_f 与遮挡系数 a 和刀口间距 d 的关系。其中 75/25 表示 $a = 0.75$, 80/20 表示 $a = 0.8$, 以此类推。

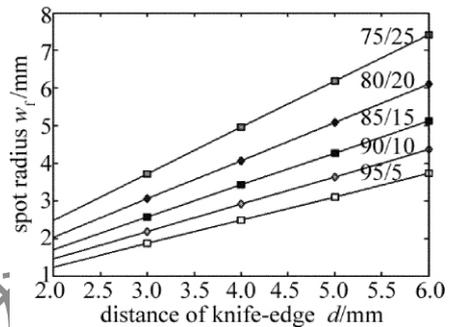


Fig.3 The curve of d and w_f with different coverage factor

由图 3 可以看出,平顶光斑半径 w_f 与 d 成线性关系,满足关系式:

$$w_f = q_f \times d \quad (8)$$

式中,比例系数 q_f 随着遮挡系数而改变。通过最小二乘拟合,得出 q_f 的值,如表 1 所示。

Table 1 Relationship between a and q_f

a	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95
q_f	1.238	1.017	0.856	0.728	0.621

图 4 是 a 和 q_f 变化曲线,可以看出 a 和 q_f 成近似线性关系,其中粗实线是最小二乘拟合曲线。拟合后的关系式为:

$$q_f = -3.046a + 3.481 \quad (9)$$

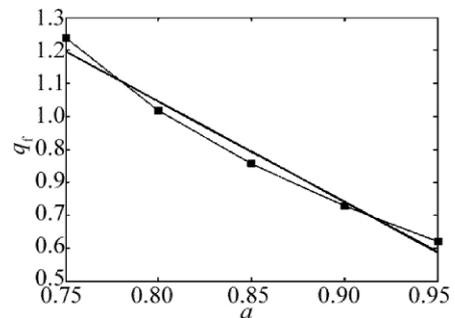


Fig.4 Curve of a - q_f and fitting curve

可以通过(8)式和(9)式两式方便地算出平顶光斑的半径。首先根据所选用的遮挡比例 a ,代入(9)式,得到比例系数 q_f ,将测得的刀口间距 d 和 q_f 代入

(8) 式,即可得到平顶光斑半径 w_f 。

3 刀口法测光斑的半径的迭代算法

3.1 刀口法测高斯光斑的迭代算法

高斯光斑强度分布满足下式:

$$I = I_0 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w_G^2}\right] \quad (10)$$

式中 I_0 为中心光强, w_G 为高斯光斑半径。矢径 $r^2 = x^2 + y^2$, 当 $r = w_G$ 时, 光强衰减为中心光强的 $1/e^2$ 。同样, 需要根据遮挡系数 a 和刀口间距 d 求出高斯光斑半径 w_G 。

图 5 和图 6 分别是高斯光斑强度和半径示意图^[5-6]。

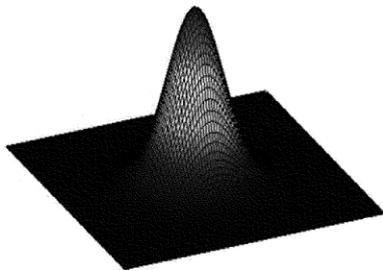


Fig. 5 Intensity distribution of Gaussian spot

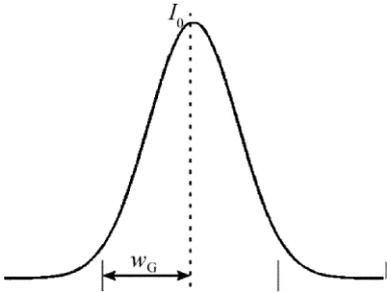


Fig. 6 Radius of Gaussian spot

求高斯光斑半径比平顶光斑复杂一些, 这里介绍一种求高斯光斑半径新的数值算法, 该算法操作简便、结果精确, 并且适合编程通过计算机实现^[7]。该算法分为 4 步, 具体步骤如下。

(1) 构造高斯光斑半径的向量 $W_G = [w_{G,1} \cdots w_{G,i} \cdots w_{G,n}]$, 其中 $1 \leq i \leq n$ 。向量 W_G 的取值范围可以根据 d 和 a 估算。

(2) 遍历向量 W_G 中的每一个值, 通过数值积分求出高斯半径为 $w_{G,i}$ 的光斑总功率 $P_t = [P_{t,1} \cdots P_{t,i} \cdots P_{t,n}]$, 下标 t 表示总功率, 其中:

$$P_{t,i} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w_{G,i}^2}\right] dx dy \quad (11)$$

该式进行了归一化, 忽略了中心光强 I_0 , 因为在计算中 I_0 会被约去。

(3) 求出刀口间距 d 之间的光斑功率 $P_d = [P_{d,1} \cdots P_{d,i} \cdots P_{d,n}]$ 其中:

$$P_{d,i} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\frac{d}{2}}^{+\frac{d}{2}} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w_{G,i}^2}\right] dx dy \quad (12)$$

并算出刀口之光斑功率与光斑总功率之间的比值 $R = P_d/P_t$, R 是 P_d 和 P_t 中对应的分量相除所构成的向量。

(4) 构造目标函数:

$$\delta = R - (2a - 1) \quad (13)$$

画出目标函数的曲线图, 找到 $\delta = 0$ 时对应的光斑半径 w_G , 如果不存在 w_G , 则返回第 1 步改变向量 W_G 的取值范围继续求解; 如果能找到对应的 w_G , 此时 w_G 就是待求的光斑半径。以上计算中 W_G, I_t, I_d, R 和 δ 都是维数相同的向量。

刀口法对遮挡光斑的功率的比例没有确切要求^[8], 目前大多采用 90/10 法, 即遮挡系数 $a = 0.9$, 也可以取其它遮挡系数。通过上述算法, 可以得出不同遮挡方式下, 刀口间距 d 和高斯光斑半径 w_G 的关系图。

图 7 是遮挡比例为 70/30 ~ 85/15 时, 刀口间距 d 和高斯光斑半径 w_G 的关系曲线, 图 8 是遮挡比例为 90/10 ~ 97/3 时, 刀口距离与光斑半径的关系曲线。刀口距离取 2mm ~ 6mm。可以发现, 在不同的遮挡比例下, 光斑半径与刀口距离呈线性趋势, 遮挡比例不同, 曲线的斜率也随之变化。与平顶光斑相类似, 高斯光斑的半径也满足(8)式, 则有:

$$w_G = d \times q_G \quad (14)$$

式中 q_G 为不同遮挡情况下相应的比例系数。

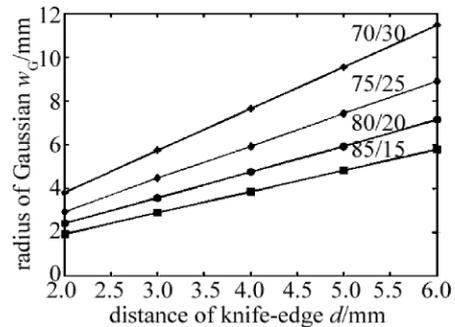


Fig. 7 Curve of d and w_G with coverage factor 70/30 ~ 85/15

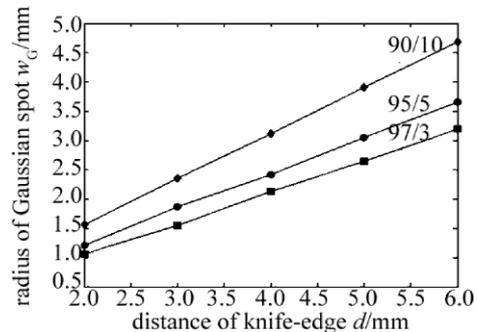


Fig. 8 Curve of d and w_G with coverage factor 90/10 ~ 97/3

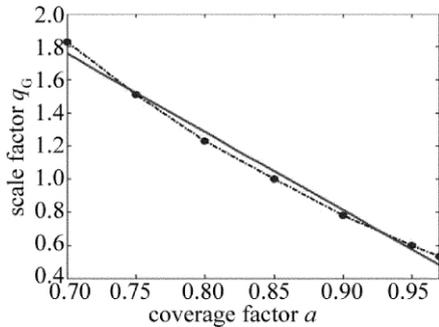
通过最小二乘拟合, 求出不同遮挡情况下的比例系数, 如表 2 所示。

Table 2 Relationship between a and q_G

a	0.7	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	0.97
q_G	1.83	1.51	1.23	0.97	0.78	0.61	0.53

图9为遮挡系数与比例系数的关系曲线,可以看出大致呈线性关系。其中带圆点的虚线表示不同遮挡系数下,比例系数 q_G 的值。实线为拟合后的曲线,可以看出实际值与拟合曲线符合得较好。比例系数的拟合公式为:

$$q_G = -4.726a + 5.066 \quad (15)$$

Fig. 9 Curve of a - q_G and fitting curve

在实际的测量中,遮挡系数已知。通过(15)式求出比例系数,测出相应遮挡系数下的刀口间距 d 。根据(14)式即可得出高斯光斑半径。运用该方法测量单模运转下波长为1064nm皮秒激光器的光斑半径,得出的结果与通过CCD测量结果相符。

3.2 刀口法测其它光斑迭代算法

在第3.1节中介绍的迭代算法,不仅仅局限于基模高斯光斑,还可以用于测量任意已知强度分布表达式的光斑^[9]。由于高阶厄米特-高斯光斑和高阶拉盖尔-高斯光斑(见图10)都有解析表达式,因此,也能应用该迭代算法测量其半径。

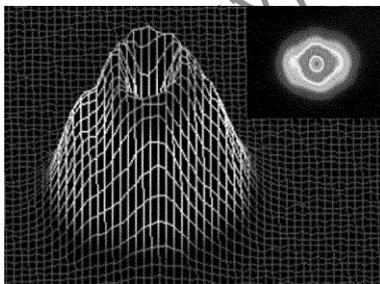


Fig. 10 Intensity distribution of high order mode

此时设任意光斑强度表达式为:

$$I_r = f(x, y, w_r) \quad (16)$$

式中 x, y 表示2维坐标分量, w_r 为光斑半径,同样的, w_r 定义为降落到最高强度的 $1/e^2$ 时的宽度^[10]。将光斑强度方程(16)式替换第3.1节中迭代式的基模高斯强度方程(10)式,即可得出迭代算法,流程图如图11所示。通过以上步骤,可以方便地求出任意已知强度分布表达式的光斑半径。

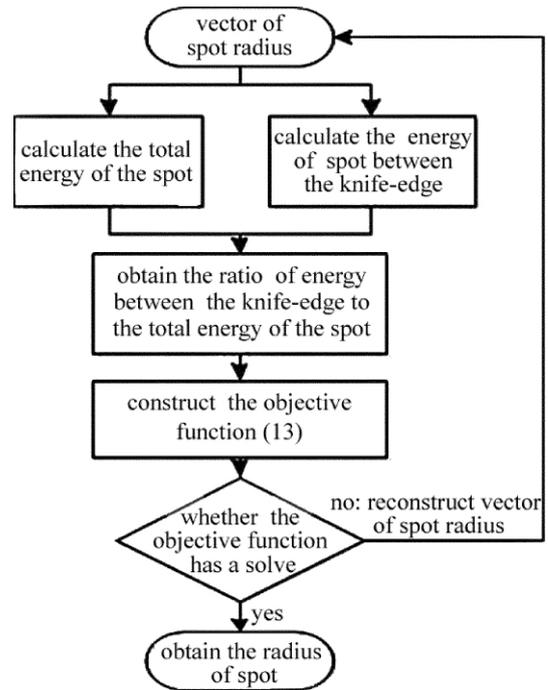


Fig. 11 Flow chart of knife-edge method for measuring spot radius

4 结论

通过一种新的数值方法,可以简便快速地求出平顶光斑和高斯光斑的半径。找到了刀口间距与光斑半径、遮挡系数和比例系数之间的联系,通过拟合得出解析式,将遮挡比例和刀口间距代入即可得到光斑半径。将该方法推广,可以求出任意已知强度分布式的光斑半径。

参考文献

- [1] LU X H, CHEN X M, ZHANG L, et al. Re-cognition of knife-edge method measuring the spot size of gaussian beam [J]. Laser & Infrared 2002, 32(3): 186-187 (in Chinese).
- [2] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag 2006: 102-152.
- [3] LÜ B D, KANG X P. Some aspects of laser beam quality [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 47-51 (in Chinese).
- [4] XUE D Y, CHEN Y Q. Advanced applied mathematical problem solutions with MATLAB [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press 2008: 120-250 (in Chinese).
- [5] KOGELNIK H, LI T. Laser beams and resonators [J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(10): 1312-1329.
- [6] HE Zh, LÜ B D, KANG X P. The beam quality of vectorial non-paraxial Hermite-Laguerre-Gaussian beams [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(9): 4569-4574 (in Chinese).
- [7] WEBER H. Special issue on laser beam quality [J]. Optical & Quantum Electronics, 1992, 24(9): 861-1135.
- [8] LÜ B D, ZHANG B. M^2 -factor concept and laser beam quality control [J]. Laser Technology, 1992, 16(5): 278-284 (in Chinese).
- [9] KONG B, WANG Zh, TAN Y Sh. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. Infrared and Laser Engineering 2002, 31(3): 275-279 (in Chinese).
- [10] LUO X, CHEN P F, WANG Y. Some understanding of M^2 factor of laser beam [J]. Applied Laser, 2009, 29(2): 148-153 (in Chinese).