

刀口法测量高斯光束光斑半径研究

杨晓冬¹, 邵建新², 廖生鸿¹, 谭锦业¹, 周杰¹, 蒋跃文¹

(1. 广东梅州嘉应学院物理学院, 广东 梅州 514015; 2. 新疆石河子大学物理系, 新疆 石河子 832003)

摘要:根据高斯光束光强分布公式, 讨论了 $P(x)\% / (1 - P(x)\%)$ 为任意值时, 高斯光束光斑半径与刀口 - 光斑中心距比值及相应的光斑半径的测量误差; 根据理论分析结果, 在 $P(x)\%$ 为不同值条件下, 对基模高斯光束光斑半径进行了实验测量, 实验结果与理论分析符合较好。

关键词:刀口法; 高斯光束光斑半径; 透光百分比

中图分类号: TN206 **文献标识码:** A

Investigation on measuring beam width of the Gaussian beam by knife-edge method

YANG Xiao-dong¹, SHAO Jian-xin², LIAO Sheng-hong¹, TAN Jin-ye¹, ZHOU Jie¹, JIANG Yue-wen¹

(1. Department of Physics, Jiaying College, Meizhou 514015, China;

2. Department of Physics, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: The rate of the beam radius and the distance between the knife-edge and the center of the Gaussian beam for different percentage of transmitting knife-edge light power is theoretically investigated. The error of measuring the beam width is also theoretically investigated. Based on the theoretical investigation, the beam width are experimentally measured by using different percentages of transmitting knife-edge light power to the total power. There is a better agreement between the theoretical and experimental results.

Key words: knife-edge method; beam width of Gaussian beam; percentages of transmitting knife-edge light power to the total power

1 引言

高斯光束光斑半径的精确测量对光束质量因子的判定及激光系统设计有非常重要的意义^[1-8]。高斯光束光斑半径的测量方法主要有套孔法、刀口法、CCD法等, 其中刀口法测量具有装置简单、操作方便、测量精度高等诸多优点, 在实际中有广泛的应用。

图1(a)为刀口法测量高斯光束光斑半径装置示意图。刀片通常被固定在光学平移台上, 可沿与光束传播垂直方向切割光束。图1(b)为刀口垂直切割光束示意图, 当刀口相对于光斑中心坐标为 $-x$ 时, 刀片遮挡部分激光, 透过刀口边缘激光功率占总功率百分比为 $P(x)\%$ (设 $P(x)\% > 50\%$); 当刀口

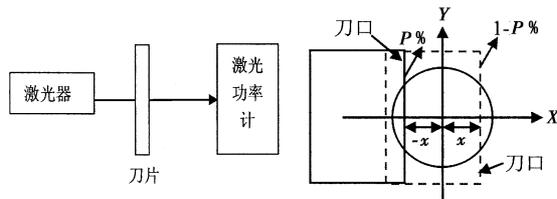
移动到与 $-x$ 位置对称的 x 位置时, 透过刀口边缘激光功率百分比为 $1 - P(x)\%$; 目前采用的 $90\% / 10\%$ 刀口测量方法为: 取 $P(x)\% = 90\%$, 测量透过刀口边缘光功率占总功率百分比分别为 90% 和 10% 时的刀口位置坐标, 以确定刀口边缘与光斑中心距离 x 的值; 根据理论分析, 此时光斑半径 ω 与 x 的比值为 1.56 , 所以将 x 乘以 1.56 即为刀口处基模高斯光束光斑半径。目前的相关文献报道都是针对该方法^[1-5]。但由于在垂直于高斯光束传播方向的

基金项目: 广东省自然科学基金 (No. 8451401501000668) 资助。

作者简介: 杨晓冬 (1968 -), 男, 博士, 主要从事全固态激光技术研究。E-mail: xjxd@126.com

收稿日期: 2009-03-26; 修订日期: 2009-05-18

横截面上,光强沿半径方向上具有确定的相对分布,当选取功率透过率 $P(x)\%$ 为 50% ~ 100% 区间任意值时,光斑半径与刀口 - 光斑中心距的比值都为与 $P(x)\%$ 值对应的确定值,因此,当选取 $P(x)\%$ 为任意值时,都可根据透过率为 $P(x)\%/1 - P(x)\%$ 所对应的两刀口位置坐标,测量光斑半径。本文对 $P(x)\%$ 为不同值时,光斑半径的测量及测量误差进行了理论分析;根据理论分析结果,采用不同的 $P(x)\%$ 值,测量了基模高斯光束光斑半径。



(a) 装置示意图 (b) 刀口切割光束示意图

图1 刀口法测量光斑半径原理示意图

2 理论分析

2.1 不同 $P(x)\%$ 对应 ω 与 x 的比值

在与基模高斯光束传播方向垂直的横截面上,光强分布表达式为:

$$I(x, y) = \frac{2P_0}{\omega^2 \pi} \exp\left(-\frac{2x^2 + 2y^2}{\omega^2}\right) = I_0 \exp\left(-\frac{2x^2 + 2y^2}{\omega^2}\right) \quad (1)$$

式中, ω 为待测基模高斯光束光斑半径; I_0 为光斑中心光强; P_0 为激光总功率,可表示为:

$$P_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_0 \exp\left[-\frac{2x^2 + 2y^2}{\omega^2}\right] dx dy \quad (2)$$

由于通常情况下,光斑尺寸远小于刀口沿 Y 轴方向宽度,可认为沿 Y 轴刀口宽度为无穷大,则在图 1(b) 中,刀口位于 $-x$ 位置时,通过刀口边缘的激光功率为:

$$P(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-x}^{\infty} I_0 \exp\left[-\frac{2x^2 + 2y^2}{\omega^2}\right] dx dy \quad (3)$$

其占总功率的百分比可表示为:

$$P(x)\% = \frac{P(x)}{P_0} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-x}^{\infty} \exp\left[\left(-\frac{2x^2}{\omega^2}\right) \left(-\frac{2y^2}{\omega^2}\right)\right] dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\left(-\frac{2x^2}{\omega^2}\right) \left(-\frac{2y^2}{\omega^2}\right)\right] dx dy} \quad (4)$$

当刀口从 $-x$ 移动到 x 位置时,透过刀口边缘的光功率百分比为 $1 - P(x)\%$,其表达式为:

$$1 - P(x)\% = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_x^{\infty} \exp\left[\left(-\frac{2x^2}{\omega^2}\right) \left(-\frac{2y^2}{\omega^2}\right)\right] dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\left(-\frac{2x^2}{\omega^2}\right) \left(-\frac{2y^2}{\omega^2}\right)\right] dx dy} \quad (5)$$

取 $\frac{x}{\omega}$ 与 $\frac{y}{\omega}$ 为积分变量,设定 $P(x)\%$ 为 50% ~ 100% 区间某一数值,根据式(4)或式(5)可计算出与 $P(x)\%$ 相对应的 $\frac{\omega}{x}$,定义 $A = \frac{\omega}{x}$ 。实验测量 x 值(该值与 $P(x)\%$ 对应),将 x 与计算所得 A 值相乘,就可得刀口坐标 x 对应的光斑半径 ω 数值。表 1 为根据式(5)计算所得 $P(x)\%$ 取不同值时的 A 值。从表 1 可看出: A 与 $P(x)\%$ 一一对应,当选取 $P(x)\%$ 值较大时,测量点远离光斑中心, A 值增大。

表 1 不同 $P(x)\%$ 所对应的 $\frac{\omega}{x} = A$ 值

$P\% / (1-P\%)$	95% / 5%	90% / 10%	85% / 15%	80% / 20%	75% / 25%	70% / 30%	65% / 35%	60% / 40%	55% / 45%
$\frac{\omega}{x} = A$	1.217	1.56	1.931	2.375	2.967	3.817	5.181	7.874	15.873

上述讨论中, x 为刀口 - 光斑中心距,但由于光斑中心准确位置无法预知, x 的值无法直接测定。为间接测量 x 的值,可固定平移台底座,分别测量透光率为 $P(x)\%$ 与 $1 - P(x)\%$ 对应的刀口相对于底座的位置坐标 x_1 与 x_2 ,则刀口 - 光斑中心距 x 可表示为:

$$x = \frac{|x_2 - x_1|}{2} \quad (6)$$

对应的光斑半径表达式为:

$$\omega = \frac{|x_2 - x_1|}{2} A \quad (7)$$

2.2 刀口法测量基模高斯光束光斑半径测量精度讨论

刀口法测量基模高斯光束光斑半径的误差主要来源于以下两个方面:

1) 测量刀片位置坐标的螺旋测微器产生的误差。在图 1(b) 中,刀口位置由光学平移台所带有的螺旋测微器测量,其对刀口位置的单次测量误差为 0.005 mm,根据公式(7),该误差引起的光斑半径测量误差为:

$$\Delta\omega_d = \frac{A}{2} (|\Delta x_{1d}| + |\Delta x_{2d}|) = 0.005 A \text{ (mm)} \quad (8)$$

式中, $|\Delta x_{1d}|$ 和 $|\Delta x_{2d}|$ 分别为测量刀口位置坐标 x_1 与 x_2 时,螺旋测微器产生的测量误差。从式(8)及表1可看出,当选取 $P(x)\%$ 较小时,测量位置靠近光斑中心, A 值较大,误差 $\Delta\omega_d$ 的数值也将增大。

2) 激光功率计所引起的光斑半径测量误差。图1(a)所示装置中,功率计的测量误差引起刀口位置坐标的测量误差,进而引起光斑半径的测量误差。所引起刀口位置测量误差可以表示为:

$$\Delta x_p = \frac{1}{\frac{dP(x)}{dx}} \Delta P \tag{9}$$

式中, $\frac{dP(x)}{dx}$ 为透过刀口边缘的激光功率随刀口位置坐标的变化率; ΔP 为激光功率计的精度。功率计引起的光斑半径测量误差为:

$$\Delta\omega_p = (|\Delta x_{1p}| + |\Delta x_{2p}|) \cdot \frac{A}{2} = A \frac{1}{\frac{dP(x)}{\omega dx}} \Big|_{x=x_1} \Delta P \tag{10}$$

式中, Δx_{1p} 和 Δx_{2p} 分别为激光功率计引起刀口位置坐标 x_1 与 x_2 的测量误差。根据式(3)和式(1)两式, $\frac{dP(x)}{dx}$ 表达式为:

$$\begin{aligned} \frac{dP(x)}{dx} &= \frac{2P_0}{\omega^2 \pi} \left[\exp(-2 \frac{x^2}{\omega^2}) \int_{-\infty}^{\infty} (-\frac{2y^2}{\omega^2}) dy \right] \\ &= \frac{\sqrt{2}P_0}{\omega \sqrt{\pi}} \exp(-2 \frac{x^2}{\omega^2}) \end{aligned} \tag{11}$$

由式(10)、式(11)两式可得,功率计测量误差所引起的光斑半径测量误差为:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_p &= \frac{A\omega \sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \exp(2 \frac{x^2}{\omega^2}) \frac{\Delta P}{P_0} \\ &= \frac{\omega \sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \left[A \exp(\frac{2}{A^2}) \right] \frac{\Delta P}{P_0} \end{aligned} \tag{12}$$

由式(12)可以看出:激光功率计所引起的光斑半径测量误差与功率计精度、激光功率以及所选取的测量点有关,减小 $\frac{\Delta P}{P_0}$ 有利于减小 $\Delta\omega_p$; 选取的测量点与 $\Delta\omega_p$ 关系较为复杂,将式(12)两边对 A 求导可得,当 $\left| \frac{\omega}{x} \right| = A = 2$ 时, $\Delta\omega_p$ 具有最小值 $4.133 \omega \frac{\Delta P}{P_0}$; 根据式(4)、式(5)可得, $\left| \frac{\omega}{x} \right| = 2$ 测量点对应的 $P(x)\% = 84.1\%$, $1 - P(x)\% = 15.9\%$; 目前使用的 90%/10% 刀口测量方法对应 $\Delta\omega_p = 4.447 \omega \frac{\Delta P}{P_0}$, 两

者相差并不大。

刀口法测量高斯光束光斑半径的总误差为上述两项误差之和,可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= \Delta\omega_d + \Delta\omega_p \\ &= 0.005 A + \frac{\omega \sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \left[A \exp(2 \frac{1}{A^2}) \right] \frac{\Delta P}{P_0} \text{ (mm)} \end{aligned} \tag{13}$$

由于选取测量点 $\left| \frac{\omega}{x} \right| = A = 2$ 时,上式第二项 $\Delta\omega_p$ 具有最小值,而上式第一项 $\Delta\omega_d$ 随着 A 值线性增加,因此测量光斑半径的最佳位置应当在 $\left| \frac{\omega}{x} \right| = A < 2$ 区域。目前采用的 90%/10% 测量方法对应 $\left| \frac{\omega}{x} \right| = A = 1.561$, 满足上述条件,同时在 $\left| \frac{\omega}{x} \right| = A = 2$ 与 $\left| \frac{\omega}{x} \right| = A = 1.56$ 这两点对应的 $\Delta\omega_p$ 相差不大,因此常用的 90%/10% 测量方法所对应的测量点应在最佳测量位置附近。

3 实验测量结果及讨论

利用图1所示实验装置,分别采用不同 $P(x)\%$,我们对距离单模氦氖激光器 15 cm 处光斑半径进行了实验测量。装置中刀片为剃须刀片,宽度大于 20 mm;激光器输出功率约为 1.6 mW;功率计为光电式指针激光功率计,有 0.1 mW/1 mW/10 mW/50 mW 四个量程档,功率计表盘被划分为 50 个分格;为了减小 $\frac{\Delta P}{P_0}$,我们选取 1 mW 量程档,同时在刀口与功率计间加入旋转式可调衰减片,使无刀片遮挡时,入射到功率计的 P_0 达到满量程 1 mW,对应 $\frac{\Delta P}{P_0}$ 值为 1/100(取功率计单次测量误差 ΔP 为最小刻度的一半 0.01 mW)。实验中,每一 $P(x)\%$ / $(1 - P(x)\%)$ 下的刀口位置坐标测量 5 次。表2给出 $P(x)\%$ 取不同值时,测量及计算所得刀口-光斑中心距 x , x 的误差 Δx 、光斑半径 ω 及测量误差 $\Delta\omega$ 。从表2可以看出,采用不同透光百分比测量所得光斑半径最大值(0.325 mm)与最小值(0.317 mm)的偏差仅为 0.008 mm,该结果进一步说明可采用不同的透光百分比 $P(x)\%$ 对基模高斯光束光斑半径进行测量;从表中也可以看出当 $P(x)\%$ 减小时,刀口距离光斑中心距离 x 的测量误差 Δx 减小,原因是:当 $P(x)\%$ 减小时,刀口距离光斑中心距离 x 减小,

进入功率计的光功率随刀口移动变化速率增大,从而使 x 的测量误差 Δx 减小,但测量所得光斑半径的误差并不一定减小。以上实验结果与理论分析基本相符。

表2 测量结果

$P\% / (1-P\%)$	95%/5%			90%/10%			85%/15%			80%/20%			75%/25%			70%/30%			65%/35%			60%/40%		
	$(A = \frac{\omega}{x} = 1.217)$			$(A = \frac{\omega}{x} = 1.561)$			$(A = \frac{\omega}{x} = 1.931)$			$(A = \frac{\omega}{x} = 2.375)$			$(A = \frac{\omega}{x} = 2.967)$			$(A = \frac{\omega}{x} = 3.815)$			$(A = \frac{\omega}{x} = 5.181)$			$(A = \frac{\omega}{x} = 7.874)$		
	x_1	x_2	x																					
测量数据 /mm	4.035	3.505	0.265	3.973	3.556	0.209	3.932	3.604	0.164	3.902	3.632	0.135	3.870	3.655	0.108	3.851	3.684	0.083	3.829	3.705	0.062	3.805	3.723	0.041
	4.036	3.505	0.266	3.975	3.559	0.208	3.936	3.605	0.165	3.902	3.632	0.135	3.876	3.661	0.106	3.851	3.683	0.084	3.828	3.702	0.063	3.805	3.725	0.040
	4.035	3.506	0.264	3.975	3.557	0.209	3.933	3.604	0.164	3.905	3.636	0.134	3.876	3.665	0.106	3.851	3.684	0.083	3.828	3.704	0.062	3.806	3.723	0.042
	4.033	3.498	0.268	3.972	3.562	0.205	3.933	3.602	0.166	3.904	3.633	0.135	3.875	3.660	0.107	3.850	3.683	0.084	3.829	3.705	0.062	3.806	3.725	0.040
	4.038	3.501	0.269	3.975	3.558	0.209	3.935	3.603	0.166	3.903	3.633	0.135	3.877	3.662	0.108	3.850	3.684	0.083	3.829	3.705	0.062	3.806	3.724	0.041
$\frac{x}{x \pm \Delta x}$ /mm	0.266 ± 0.001			0.208 ± 0.001			0.165 ± 0.000			0.135 ± 0.000			0.107 ± 0.000			0.083 ± 0.000			0.062 ± 0.000			0.041 ± 0.000		
$\omega = Ax$ /mm	0.324 ± 0.0001			0.325 ± 0.001			0.319 ± 0.001			0.320 ± 0.0001			0.317 ± 0.001			0.318 ± 0.001			0.322 ± 0.0001			0.321 ± 0.003		

4 结论

对刀口法测量高斯光束光斑半径进行理论与实验两方面研究,研究表明,可采用不同透光百分比的刀口法对高斯光束光斑半径进行测量,理论与实验研究结果符合较好。

参考文献:

- [1] 陆璇辉,陈许敏,张蕾,等. 刀口法测量高斯光束光斑尺寸的重新认识[J]. 激光与红外,2002,32(3):186-187.
- [2] 樊心民,郑义,王冠军,等. 90/10刀口法测量激光高斯光束束腰的实验研究[J]. 激光与红外,2008,38(6):541-543.
- [3] 樊心民,郑义,王冠军,等. 90/10刀口法测量高斯激光光束束腰的两种计算方法[J]. 应用激光,2008,28(2):139-141.
- [4] 林宗德,杨亚文. 红外激光束斑的线度测量[J]. 应用激光,1990,10(5):195-198.
- [5] D Diso, M R Perrone, M L Protopapa. Beam width measurements of asymmetric multi-mode laser beams [J]. Optics & Laser Technology, 1999, 31: 411-418.
- [6] 刘晓兵,雷升印,吴学军. 刀口特性对光斑测量的影响[J]. 应用激光,1994,14(1):27-30.
- [7] 赵长明. 激光光束质量参数测量的实验研究[J]. 激光技术,2000,24(6):341-344.
- [8] 李文成,谷晋骐,王涌萍. 激光光斑及束腰光斑尺寸的测量研究[J]. 应用光学,2002,23(3):30-33.