

文章编号: 1001-4322(2006)02-0189-04

高精度激光参数测量系统中衰减系统的研究与评价*

高雪松, 高春清, 高明伟, 李家泽, 魏光辉

(北京理工大学 信息科学技术学院 431 教研室, 北京 100081)

摘 要: 分析了楔形镜和中性玻璃衰减片组对光束的衰减原理, 采用反射式楔形镜作为无像差定量衰减器, 并同时使用中性玻璃衰减片组微调光束能量。实验测量了 LD 泵浦激光模式发生器基模和高阶模条件下激光束的 M^2 因子, 结果表明, 楔形镜反射式衰减器对光束质量无显著影响, 将楔形镜第一次表面反射作为无像差定量衰减, 入射角在 $0 \sim 55^\circ$ 范围内, 单棱镜表面反射光束能量为入射光能量的 4.3%, 通过多块组合可以得到更大的衰减; 可采用中性玻璃衰减片组对激光光束的衰减进行精细控制, 使其满足 CCD 探测器动态范围要求。该结论可为高精度激光参数测量装置光衰减系统的研制提供理论依据。

关键词: 光束参数测量; 激光衰减器; M^2 因子; 楔形镜; 衰减片

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

衰减器在激光应用中广泛使用, 常用的衰减器件有光栅、光楔和吸收型衰减片等。在激光束参数的测量与评价研究中, 由于面阵 CCD 探测器件的高灵敏度和低饱和光强, 使被测光束的无像差衰减成为测量过程中一项关键技术^[1-2]。本文对所研制的激光参数测量系统中应用的楔形棱镜衰减器和中性衰减片组进行了研究与评价, 为高精度激光参数测量装置中衰减系统的研制提供理论依据。

1 楔形棱镜衰减器工作原理

任意偏振态光束的传播方程都可以写成^[3]

$$E(x, y, z, t) = AE_0(x, y, z)e^{i\phi(x, y, z)}e^{i(k \cdot r)}e^{i\omega t} \quad (1)$$

式中 A 为归一化系数; $E_0(x, y, z)$ 为与光波电场本身偏振态有关项; $\phi(x, y, z)$ 为传输过程中的附加位相; $e^{i(k \cdot r)}$ 与 $e^{-i\omega t}$ 为与传播有关项; k 为波矢; ω 为角频率。假定在界面上没有波面畸变, 在传输过程中 $\phi(x, y, z)$, $e^{i(k \cdot r)}$ 和 $e^{-i\omega t}$ 均不变, 任意偏振光入射到棱镜第一个表面后均可分解成 s (垂直入射平面方向) 和 p (在入射平面内) 两个分量, 其中 s 分量在介质表面反射时发生 π 的位相跃变, 但只是影响 $E_0(x, y, z)$ 的相位, 而不影响光波的强度 ($I \propto E \cdot E^*$) 和波面形状, 因此不会对激光光束带来明显影响。根据折射定律和菲涅耳公式可以推出反射光与入射光振幅之间的关系, 当入射光同时含有 s 分量和 p 分量时, 入射光的 s 分量 (或 p 分量) 只对折射光、反射光的 s 分量 (或 p 分量) 有贡献。定义 R 为光波的总反射率, n 为相对折射率, 入射光中 s 和 p 分量的强度比为 a , 则有

$$R = \frac{1}{1+a}(aR_s + R_p) \quad (2)$$

即 R 为 R_s 和 R_p 的加权平均。对于在两个正交方向偏振分量相等的自然光来说有 $a = 1$, 由菲涅耳公式可得能量反射率

$$R = \frac{1}{2}(R_s + R_p) \quad (3)$$

由 (3) 式可得在空气-平面玻璃 (石英玻璃, $n = 1.46$) 界面上反射率随入射角的变化。

非正入射情况下, 光束在楔形镜内的传输较为复杂, 在镜内经历多次折反射。光束每经历一次反射, 都会造成能量的衰减 (全反射情况除外), 因而棱镜周边每一束反射光都有不同程度的衰减。对于激光衰减应用而言, 考虑到棱镜材料不均匀性和热效应可能对光束质量带来的影响, 应选用第一次的反射光作为衰减后的出射光。然而对于楔形镜周边的其它出射光, 当能量比较大时, 考虑到安全以及避免杂散光进入系统影响测量精度, 应加装吸收装置予以吸收。当入射光与出射光平行时需考虑干涉和反射光对激光器的干扰。

* 收稿日期 2005-04-29; 修订日期 2005-09-30

基金项目 国家 863 计划项目资助课题

作者简介 高雪松 (1980—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新型固体激光器件与技术、激光光束参数测量, xhianlasergao@163.com。

自行设计的楔形镜衰减器光路如图 1 所示。楔形镜衰减器采用石英玻璃制成,楔角为 6.5° 。空气折射率 $n_1 = 1$, 石英玻璃折射率 $n_2 = 1.46$, 角 1 为入射角, 以 θ_i 表示(角 1 ... 角 7 分别用 $\theta_1, \dots, \theta_7$ 表示), 其中 $\theta_1 = 45^\circ$ 。根据折反射定律得: $\theta_2 = 45^\circ, \theta_3 = 57.9^\circ, \theta_7 = 77.7^\circ$ 。根据菲涅耳公式得: 第一次反射光的反射率 $R_1 = 0.043 = 4.3\%$ 。设楔形镜中心厚度 $BC = d, \theta_3 = 28.97^\circ, \theta_4 = 35.47^\circ$, 则 $AC \approx d/\sqrt{3}$, 则 $AD \approx 2d/\sqrt{3}$ 。由于激光光斑束宽远小于厚度 d , 且 $\theta_7 = 77.7^\circ$ 大于 θ_2 的 45° , 因此反射光 R1 和反射光 R2 不会相交, 且反射光 R1 仅有入射光 4.3% 的能量, 所以该楔形棱镜衰减器能起到无像差定量衰减光强的作用。

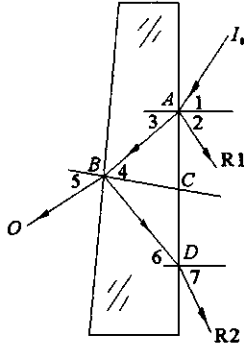


Fig. 1 Sketch map of cuneiform prism used as laser attenuator

图 1 光楔衰减器原理图

如图 2 所示, 在小角度入射时, 第二次反射光反射率 $R_2 \approx 4.3\%$, 且随入射角的变化而平缓变化。当入射角 θ_{in} 在 $0 \sim 55^\circ$ 时, 反射率的相对变化小于 0.5% , 由像差理论可知, 平面反射镜是无像差的理想光学系统, 因此可利用楔形镜第一个面的反射光作为无像差定量衰减。

由此以来, 多块楔形棱镜衰减器组合使用可以进一步衰减激光能量。如图 3 所示, 采用两块楔形棱镜衰减器可使出射光束定量衰减为入射光束能量的 0.185% 。

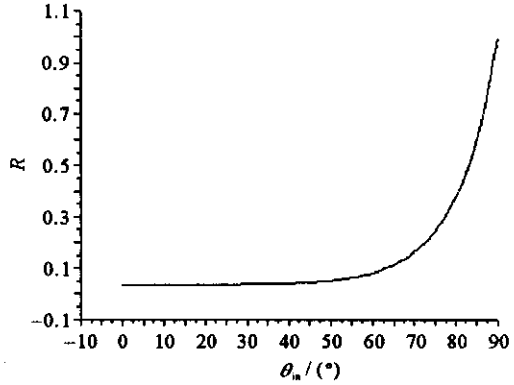


Fig. 2 Reflectivity vs incident angle

图 2 反射率与入射角的关系

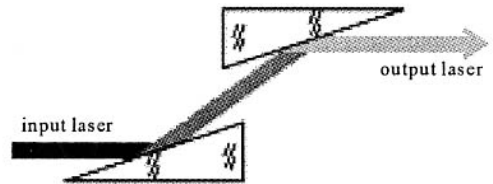


Fig. 3 Sketch map of two cuneiform prisms used as laser attenuator

图 3 两块楔形棱镜衰减器定量衰减光束能量原理

2 中性玻璃衰减片组工作原理

楔形镜反射式衰减器能对激光光束进行较大幅度的衰减, 但只能阶跃式地变化衰减度, 为了达到更为精细的衰减, 需要使用有吸收特性的中性玻璃衰减片。不同种类的中性玻璃衰减系数不一样, 相同种类、不同厚度的衰减片其吸收能力也不同。根据朗伯吸收定律

$$I = I_0 \lg(-kl) \quad (4)$$

式中 I 为透过介质后的光强, I_0 为入射介质前的光强, k 为吸收系数, l 为衰减片厚度。

在激光束参数测量过程中, 由于 CCD 探测器采集光斑位置不同、衰减程度不同、CCD 探测器曝光时间长短不同等原因, CCD 采集光斑的最大光强值也不相同, 有的接近于饱和值, 有的则很低^[4]。相比之下, 前者整体相对较亮, 边缘信号不容易淹没在噪声中, 较弱的信号值也不容易在 A/D 转换中由于不足半个量化单位而被忽略。所以在条件允许的情况下, 可使被采集光斑的光强尽量接近饱和光强, 以充分利用 CCD 动态范围。由于衰减片可以保护 CCD, 适当选择衰减的幅度能有效利用 CCD 的动态范围, 精确计算光束参量, 减小测量误差。因此可通过改变衰减片的数量与型号达到对光束衰减的灵活控制。

但中性衰减片具有不均匀性, 各点衰减度不可能完全一样, 光束越宽影响越大, 因此激光束经过中性衰减片后其能量强度二维分布会有所改变, 由此引入的误差将影响参数测量精度。因此根据测量所要求的精度, 应尽量选择衰减度均匀的衰减片, 必要时在其表面镀膜, 以滤掉不需要的波长, 限制杂散光并减小光场畸变。

3 实验研究

根据矩理论和 ISO11146 测量标准^[5], 利用 CCD 测量系统对激光光束 M^2 因子作精确测量, 比较楔形镜衰减器衰减前后光束质量的改变程度, 从而得出楔形镜衰减器对光束质量的影响。

3.1 实验系统构成

自行研制的高精度面阵 CCD 激光参数测量系统如图 4 所示,其中包括光衰减系统、变换透镜、CCD 探测器、图像采集卡、PC 机,以及相关测试软件^[6]。本系统采用的衰减系统由单块楔形镜衰减器和中性玻璃衰减片组成,其中楔形镜衰减器以其可适用于高功率激光、无畸变等特点作为第一级衰减器。

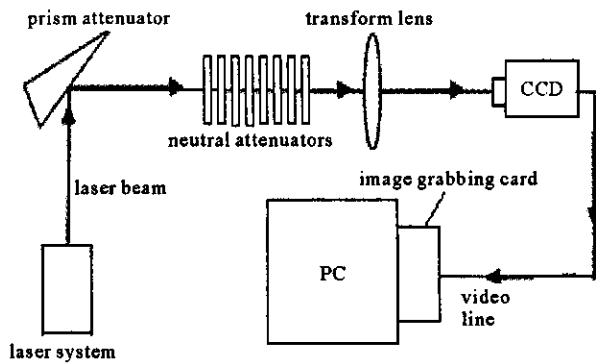


Fig. 4 Set-up of high precision beam parameter measurement system by using CCD camera

图 4 高精度面阵 CCD 激光参数测量系统

3.2 评价楔形棱镜衰减器性能的实验

利用如图 4 所示的测量系统,进行了在衰减系统中采用楔形镜衰减器的对比实验,测量了模式发生器 TEM₀₀ 和 TEM₅₀ 模的光束参数,实验结果见表 1。

表 1 楔形镜衰减器实验参数

Table 1 Comparison of experimental results for modes along x direction of cuneiform prism used as laser attenuator

	TEM ₀₀		TEM ₅₀	
	with attenuator	without attenuator	with attenuator	without attenuator
$\omega_0/\mu\text{m}$	239.09	224.11	521.72	508.88
$\theta_0/\mu\text{rad}$	1.70	1.52	7.83	7.21
M^2	1.215 35	1.210 99	11.926 2	11.836 8
M^2 relative variety	0.36%		0.48%	

从上述测量结果可知,在测量模式发生器不同阶次的光斑时,棱镜衰减器对激光光束质量没有明显影响,使用前后 M^2 变化小于 0.5%,明显小于 5% 的系统误差。

3.3 评价中性衰减片组性能的实验

测量激光模式发生器基模光束的过程中,我们采用不同数目和衰减量的衰减片组合,对同一基模光斑采集 100 次,发散角结果如图 5 所示。其中图 5(a)为基模大衰减,光强位于 CCD 动态范围下半区;图 5(b)为基模中等衰减,光强位于 CCD 动态范围上半区;图 5(c)为基模小衰减,光强使 CCD 饱和的情况。可以看出,衰减量依次增大时发散角测量结果明显变化,衰减量过大,使光强很弱时,测量结果明显偏小,而且不确定度增加,衰减量减小,使光强接近 CCD 饱和光强时,测量结果平稳,测量误差在 5% 以内。

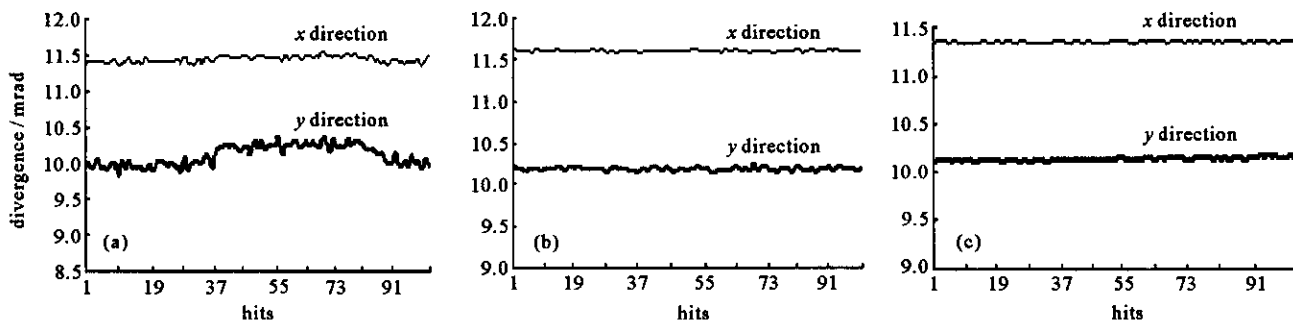


Fig. 5 Measured divergent angle by different neutral attenuated slices

图 5 用不同衰减量的衰减片组合测量光束发散角

使用不同型号和数目的衰减片将导致不同的衰减量,因此引起光斑在一定程度上发生变化,特别是光斑周围的一些细节,在衰减量比较大的情况下往往被忽略,这样会使得测量结果偏小。而在衰减不足的情况下,激光能量比较大,进入 CCD 后容易使探测器饱和,会使计算结果偏大,但只要保证衰减后的光强接近 CCD 所能承受的饱和光强,就可以保证测量精度。中性玻璃衰减片的不均匀性引起光强分布变化和衍射现象,以及多片中性玻璃衰减片的平行度带来的干涉现象都对光束质量产生影响,光束宽度越宽,影响越为明显。但采用中性玻璃衰减片组的好处是可以精确地控制激光束能量,很容易满足面阵 CCD 探测器动态范围要求,而且使用灵活方便,保证了测量精度。

4 结 论

本文分析了楔形镜衰减器和中性玻璃衰减片组对光束能量的衰减原理,通过实验验证得到以下结论(1)使用楔形镜作为衰减器,不会对激光光束质量带来明显影响(2)利用楔形镜第一个表面反射作为无像差定量衰减,入射角在 $0 \sim 55^\circ$ 范围内,单棱镜表面反射光能量占入射光能量的4.3%,实现定量衰减,通过多块组合可以得到更大的衰减(3)可采用中性玻璃衰减片组对激光光束的衰减进行精细控制,使其满足 CCD 探测器的动态范围上半区域的要求(4)使用中性玻璃衰减片组对激光光束进行衰减,在激光参数测量过程中应尽量消除不均匀性和平行度带来的影响,这两个因素对测量精度的影响至关重要(5)在大功率激光束参数测量时,可以采用多个楔形镜衰减器与中性衰减片组组合使用的方法,在无畸变定量衰减光束能量的同时,对衰减程度进行精细控制。

参考文献:

- [1] 曹一磊,高春清.基于面阵 CCD 的激光光束参数测量系统精度分析[J].光学技术,2004,30(5):583-586.(Cao Y L, Gao C Q. Analysis on the beam parameter measurement by using CCD camera. *Optical Technique*, 2004, 30(5): 583-586)
- [2] 邓小玖,谢莉莎,刘彩霞.光束质量与光束质量因子[J].广西物理,2003,24(2):11-12.(Deng X J, Xie L S, Liu C X. Beam quality and beam quality factor. *Guangxi Physics*, 2003, 24(2): 11-12)
- [3] 赵达尊.波动光学[M].北京:北京理工大学出版社,1986.(Zhao D Z. Wave optics. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1986)
- [4] Du K M, Herziger G, Loosen P, et al. Measurement of the mode coherence coefficients[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1992, 24(9): 1119-1127.
- [5] Test methods for laser beam parameters: beam widths, divergence angle and beam propagation factor[S]. International Standard Organization 1999 ISO 11146.
- [6] 高雪松,高春清,杨绍状,等.面阵 CCD 激光束参量测量系统及其实验研究[J].中国激光,2005,32(7):993-996.(Gao X S, Gao C Q, Yang S Z, et al. Experimental study on beam parameter measurement system by using area array CCD. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(7): 993-996)

Investigation and evaluation of cuneiform prism and neutral glass slices used as laser attenuator

GAO Xue-song, GAO Chun-qing, GAO Ming-wei, LI Jia-ze, WEI Guang-hui
(Department Optical-electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The theories of cuneiform prism and series neutral glass slices used as laser attenuator are analyzed in this paper. An aberration-free laser quantitative attenuator made of cuneiform prism is adopted and a series of neutral attenuated slices are used for adjusting laser-beam energy at the same time. The M^2 -factor of the Hermite-Gaussian beams generated by an LD-pumped mode master is measured and it has been verified that the cuneiform prism used as reflection laser attenuator of 4.3% $0 < \theta_i < 55^\circ$ has no distinct influence on the beam quality and the neutral glass slices have accurate adjusted the operation for laser beam energy. More powerful attenuator can be obtained by using the combination of multi-cuneiform prism. The precision control of the laser beam power was realized with neutral glass slices for CCD dynamic detecting range. This conclusion is a guidance significant for developing laser beam parameters measurement system.

Key words: Beam parameter measurement; Laser attenuator; M^2 -factor; Prism; Attenuation slices