

# 用于测量高功率激光远场光强空间分布 的小畸变光强衰减与成像系统研究\*

陈 军 黄 鹏 周淑文 邱文法 包成芳

(浙江大学光学和科学仪器工程现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

叶金祥 夏彦文 刘 华

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都 610003)

**摘 要** 介绍了用于测量星光装置激光远场空间分布的高衰减倍率的光强衰减与成像系统。它是高功率激光远场实时监测系统的重要组成部分。衰减器衰减倍数可以在  $10^{-2} \sim 10^{-12}$  间变化, 衰减成像系统在给定条件下引入的附加波像差被控制在 2 倍衍射极限之内, 总的波像差小于  $2\lambda/3$ 。

**关键词** 小畸变光强衰减器, 激光光强空间分布测量。

## 1 引 言

为了检测及评价星光激光装置光束质量, 估算靶面激光功率密度, 必须对激光束远场光强空间分布作实时监测<sup>[1, 2]</sup>。目前在小功率脉冲激光器上已广泛应用面阵 CCD 作空间光强分布测量<sup>[3, 4]</sup>, 基于星光装置激光的超高功率, 以及 CCD 器件的高灵敏度和低损伤阈值, 在利用 CCD 测量技术时必须对光强作大幅度衰减, 同时使引入的附加波面畸变尽可能小。按目前星光装置输出的激光远场发散角约为 10 倍衍射极限计算, 要求由光强衰减成像系统引入的附加像差引起的发散度在 2 倍衍射极限之内, 亦即附加波像差不大于  $2\lambda/3$ 。根据星光装置输出的激光光束参数及测量要求, 研制了具有大衰减比的“小畸变”光强衰减成像系统, 编制了相应的数据处理软件, 并利用面阵 CCD 对星光装置激光远场进行了初步测试。

## 2 衰减系统的原理及设计思想

光强衰减成像系统的总体设计如图 1 所示。系统包括准直镜 1、准直镜 2, 成像物镜, 衰减片对, 光阑 1, 光阑 2。由星光装置输出的激光光束经分光板分出一路检测光束, 经非球面透镜会聚在其后焦点上, 光强衰减成像系统的入口就设在此。光强衰减成像系统将把这一焦点上的焦斑经衰减后成像在 CCD 接收面上。

\* 本课题得到中国工程物理研究院(GFYY-H-46.3.6)项目资助及浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放课题基金资助(课题批准号 LMOI-9501)。

收稿日期: 1996-12-26; 收到修改稿日期: 1997-06-23

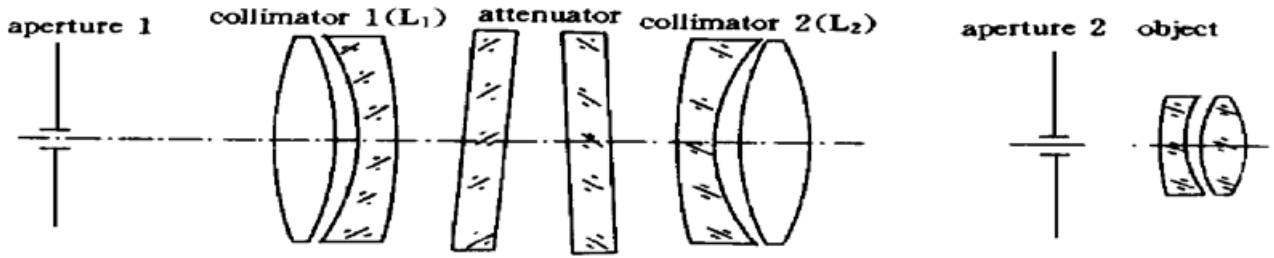


Fig. 1 Principal setup of intensity attenuator

为防止环境杂散光进入系统影响像的对比度及清晰度,在非球面透镜的后焦点上设置了一个直径为 1 mm 的小孔光阑。由于待测取样光强为  $10^7$  W 数量级,要求小孔光阑的材料耐高温,目前采用的为不锈钢,最好为金箔。

光束经小孔光阑后入射到准直镜 1 上,使准直镜 1 的前焦点与非球面透镜的后焦点重合,则光束经准直镜后成为平行光束而通过衰减片对。准直镜的前表面镀高反膜 ( $R = 99.9\%$ ),对入射光束进行第一次衰减,准直镜的其余表面均镀增透膜以减少各表面间的干涉。平行光束经过衰减片对,各衰减片对表面按要求镀不同反射率的反射膜,经组合可得到各种不同的衰减倍数。经过衰减片对的平行光束将通过准直镜 2 会聚在光阑 2 上,以减少筒内杂散光及干涉条纹的干扰。

光阑 2 平面上的焦斑像通过物镜成像在 CCD 接收面上。CCD 尺寸约为  $8\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ ,而非球面透镜后焦点上的焦斑大小为  $60\text{ }\mu\text{m}$ ,考虑到光学分辨率及调整测量的方便,取物镜放大倍数为 20 倍。

从整机结构及使用要求分析,除了达到足够的衰减倍数之外,系统引入的附加波像差将是影响测量精度的主要原因,尽量减少附加波像差是需解决的关键技术问题。附加波像差主要来源于衰减片对的附加程差和成像系统的像差。下面将对这两个方面进行讨论。

衰减成像系统对光强的衰减主要是通过衰减片实现的。采用了透射式衰减方式,即在平行平板表面镀上对  $1.053\text{ }\mu\text{m}$  波长的高反膜,使大部分光在表面上被反射而达到衰减的目的。衰减片的透过率设置为  $T = 10^{-3}$ 、 $10^{-2}$ 、 $10^{-1}$ 、0.2、0.4、0.8 几种。经不同组合最高可达到  $10^{-2} \sim 10^{-12}$  的衰减倍率。

衰减片采用加工平行度及平面度要求很高的平行平板。衰减片的附加像差主要来自于由平行平板两表面的面形误差造成的相位畸变。首先对不同的面形误差计算了引入的波像差,以根据测量要求所允许的波像差确定合理的加工精度。为了避免各平板表面的干涉,结构设计上采用了每对平板对称地作一小角度倾斜。因此,在作像差计算时采用了偏心光学元件空间光线光路计算。以给定的初始光束孔径角作光线追迹,求出由最后面出射的光束位置及方向,并用最小平方方法作波面拟合,以此波面为基准求出最佳参考点,作出理想波面,理想波面与实际波面间的差即为所求的波像差。本文编制了偏心光学元件空间光线光路追迹程序,对衰减系统进行了计算。若每面的面形误差为  $0.1\lambda$ ,求得的波像差在使用两对(4 块)衰减片时,最大可能值为  $0.19\lambda$ ,即使在使用 4 对(8 块)衰减片时,其最大可能值也不会超过  $0.3\lambda$ 。只要使成像系统的总波像差控制在  $0.3\lambda$  之内,就己能满足光强衰减成像系统附加总波像差  $2\lambda/3$  的要求。因此,衰减片的表面面形误差定在  $0.1\lambda$  是足够的。

成像系统采用准直镜与成像物镜组合的形式,三组镜组均采用双分离形式。组合系统如图 1 所示。由于系统的总体尺寸是由现场空间所决定,因此准直镜的焦距已基本确定。每组

作单独校正像差,最后作统一校正。

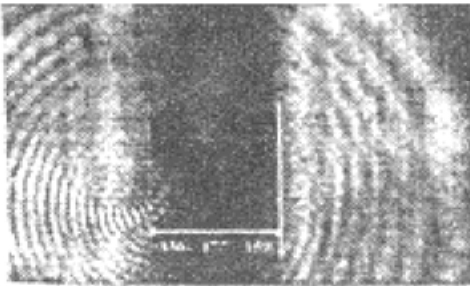
准直镜为双分离物镜。利用双分离物镜的间隔  $d$  的调整减少准直镜的二级球差,设计结果球差为负,对最佳像面的波像差为  $\lambda/20$ 。成像物镜也为双分离物镜,设计为与准直镜的像差互相补偿。两组准直镜与成像物镜的组合,在最佳像面即 CCD 的接收面上弥散在一倍焦宽以内 ( $\lambda/u' = 0.013 \text{ mm}$ ),对最佳像面的波像差为  $\lambda/9$ 。考虑到透镜的加工误差及安装误差,其总像差可以控制在  $\lambda/3$  之内。

### 3 激光光斑图像接收系统与分析系统

为了检测及评价星光装置激光光束质量,估计靶面激光功率密度,对激光束光强空间分布作实时的显示测量及存储和后处理,本文应用二维 CCD 列阵作空间光强分布测量<sup>[5]</sup>。使用该系统同步接收激光光强空间分布的方法,在成功获取了脉冲光斑图像数据的基础上,利用自行开发的分析系统对其作各种处理,得到脉冲激光光斑的特性参数。

### 4 系统的调试及现场测量结果

由于衰减成像系统主要用于测量会聚在靶面上的焦斑大小,因此对系统的总放大倍数的



精确度有严格的要求,系统调整后对其放大倍数作了检验,如图 2 所示。把用千分卡测得直径为  $80 \mu\text{m}$  的发丝置于孔阑 2 位置,以  $1.06 \mu\text{m}$  YAG 脉冲光照明,在最佳像面上用 CCD 测得放大后像宽为  $1590 \mu\text{m}$ ,相应于 20 倍放大倍数时物体直径为  $79.5 \mu\text{m}$ ,误差为  $0.5 \mu\text{m}$ 。

由非球面会聚在光阑 1 上的光斑点应严格落在衰减系统的第一透镜  $L_1$  的前焦点上。从  $L_1$  与  $L_2$  之间分光出射的光束应为平行光,这可以用分光镜反射至远距离或用剪切的方法来检验并调整这一系统。

利用这套衰减成像系统在星光装置上对激光远场作了初步的实测。在调整过程中应用不同的衰减倍率进行了 CCD 同步光斑捕捉,获得了多幅实测光斑像。图 3 示出了其中一幅。直接在光斑像上测量光斑像所占像元数,按系统放大倍数及 CCD 像元间隔等参数计算,测得几个光斑的直径为  $110 \mu\text{m}$  左右。作者认为这一焦面位置的设定是合理的,因为由星光装置以往的实测打靶数据结果知焦斑大小约为  $100 \mu\text{m}$ ,考虑到由本衰减系统设计的残余像差在最佳像面上的弥散斑造成的物方聚焦点处的边缘点扩散以及由光学系统透镜口径造成的衍射效应而导致的斑点弥散,因此用此系统测量焦斑直径的方法是可行的。在调整过程中,从记录的图像可以看出,当衰减倍数不够大而使记录光斑出现明显饱和时,焦斑直径就较难准确测量,这时从记录光斑上观察到的亮斑范围与衰减倍数有关,这显然不能代表光斑直径。只有在没有明显饱和现象时以光强极大值的  $e^{-2}$  处的间距取为光斑直径时光斑直径才与衰减倍数无关。因此要求 CCD 有较大的动态范围。本试验采用的 CCD 动态范围为 8 bit,今后计划采用进口的 12 bit CCD,将具有更大的调整范围。

图 4 示出了其中一幅实测光斑像远场光强二维分布曲面。较为严格的测量方法是利用光斑像光强二维分布以二阶矩法求出其重心及半径,当光强分布较为对称时,可采用截交线求

出极大值的  $e^{-2}$  处的间距即为直径。关于这部分将在今后的文章中讨论。

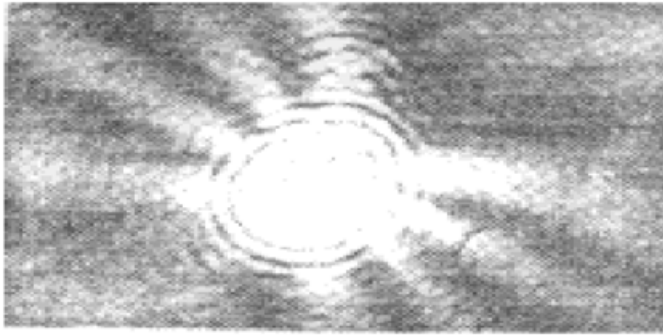


Fig. 3 The captured laser beam focal spots using the 2-dimensional CCD

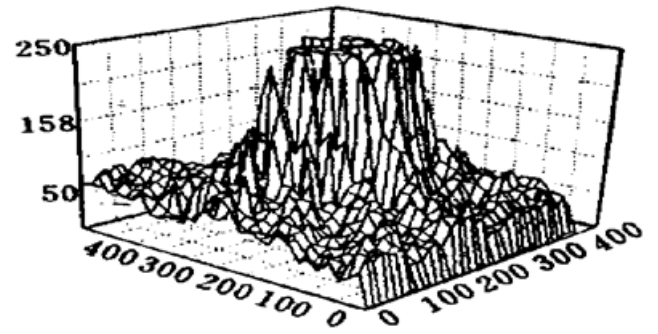


Fig. 4 2-dimensional far-field intensity distribution of a pulsed laser spot

### 参 考 文 献

- [1] J. M. Fleischer, Laser beam width, divergence, and propagation factor: status and experience with the draft standard. *Proc. SPIE*, 1991, **1414**: 2~ 11
- [2] A. Cutolo, L. Zeni, Improvements to the diagnostics of beam quality in cw and pulsed laser system. *Opt. Commun.*, 1992, **89**(2~ 4): 223~ 228
- [3] 李映波, 折雅西, 外同步 CCD 数据采集系统. 半导体光电, 1990, **11**(1): 78~ 83
- [4] 蔡文贵, 李永远, 许振华, CCD 技术及其应用, 北京: 电子工业出版社, 1992. 35~ 85
- [5] 陈 军, 姚玉良, 毛志伟, 脉冲激光光强空间分布的 CCD 同步接收技术, 中国激光, 1996, **3**(6): 490 ~ 494

## The Intensity-Attenuator and Imaging System with Small Aberration used in Measurement of Far Field Spatial Distribution of High Power Pulsed Laser Beam

Chen Jun    Huang Peng    Zhou Shuwen    Qiu Wenfa    Bao Chengfang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation,  
Department of Optical and Scientific Instrumentation Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Ye Jinxiang    Xia Yanwen    Liu Hua

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Chengdu 610003)

(Received 6 December 1996; revised 23 June 1997)

**Abstract** The Intensity-attenuator and imaging system with high attenuation used for measuring the far-field spatial intensity distribution of "Xiang Guang II" laser system is introduced. Intensity-attenuator is an important part of the far-field real time detecting system for high power laser. The attenuation can vary from  $10^{-2}$  to  $10^{-12}$  and the induced wave aberration of attenuator and imaging system is controlled within the  $2\times$  diffraction limit, namely  $2\lambda/3$  wave aberration under given experimental conditions.

**Key words** intensity-attenuator and imaging system with small aberration, measurement of the spatial intensity distribution.