

# 一种测量大面积激光束光强分布的复合阵列

王飞\*, 谢永杰, 戢运峰, 段刘华, 叶锡生

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:**针对大面积高能激光束时空分布参数测量的需要,研究了量热和光电法综合测量激光束时空分布的方法。采用现场实时定标技术有效地解决了两类数据融合问题,研制了量热光电复合阵列测量系统。该复合阵列主要由256路量热探测单元、120路光电探测单元、多通道数据采集模块和数据分析处理模块等部分组成,具有量热型探头测量绝对激光能量准确、光电探测器测量时间分辨率高等优点,实现了大面积高能激光束光强分布时间和空间的绝对测量。

**关键词:**复合测量;高能激光;时间分辨;空间分辨

中图分类号:TN247; TN215 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120506.0658

## Compound detector array for measuring intensity distribution of large caliber laser beam

WANG Fei\*, XIE Yong-jie, JI Yun-feng, DUAN Liu-hua, YE Xi-sheng

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

\* Corresponding author, E-mail: wj97@ustc.edu

**Abstract:** For the measurements of temporal and spatial distribution parameters of high energy laser beams, a synthetic measurement of calorimetric and photoelectric method is studied. The data fuse of two kinds of sensors is achieved with a real-time scaling technique. Then, a set of compound measurement system is developed for measuring the large caliber laser beams. The system is mainly composed of 256 calorimetric detectors, 120 photoelectric detectors, multi-channel data sampling modules and one central processing computer. The total energy of the laser beam is precisely measured with the calorimetric detectors, and the high temporal and spatial resolution distribution is given with the photoelectric detectors. With the merits of accurate energy and the high temporal resolution of two kinds of sensors, the compound system can be used for absolute measurement of the far-field temporal and spatial distribution of high energy laser beams.

**Key words:** compound measurement; high energy laser; temporal resolution; spatial resolution

## 1 引言

高能激光束在国防及工业加工等领域具有重要作用<sup>[1]</sup>,近些年在国内外得到了快速发展。准确测量激光束光强分布对于检验和调试激光器状态十分重要<sup>[2]</sup>,同时对于研究和探索激光束与不同物质材料、功能器件、生物体等的相互作用物理过程也具有重要的意义。

自激光器发明以来的几十年中,激光光强分布测量的方法和技术得到很大提高,研制出许多测量仪器和装置。但由于高能激光具有输出总能量高、远场光斑面积大、辐照烧蚀破坏力强的特点,其远场大面积光束的准确测量存在较大的技术难度。目前,远场高能激光束光强分布的测量方法主要可分为光电测量法和量热测量法两大类。光电测量法具有响应灵敏、时间分辨率高等优点<sup>[3]</sup>,但受到衰减取样环节和标定条件的限制,在能量测量中具有较大的不确定度;量热测量法具有耐受辐照能量高、能量测量不确定度小等优点<sup>[4]</sup>,但在时间分辨测量上却存在一定难度。本文提出了量热光电复合阵列,采用量热与光电复合技术来测量大面积激光束光强分布,通过充分利用量热法和光电法的优势实现了大面积激光束光强时空分布的测量。

## 2 复合阵列的组成

量热光电复合阵列由阵列面板、数据采集模块和数据分析处理模块3个部分组成。

阵列面板包括底板、量热探测单元阵列和光电探测单元阵列3个部分,如图1所示。

底板大小为450 mm × 450 mm,设计为蜂窝状,256路高纯石墨量热探测单元嵌入至蜂窝体内,120路光电探测单元间插嵌入量热探测单元间,从而实现两者对靶面入射光束的同时测量。量热探测单元的石墨探头吸收入射激光能量并产生温升,测温元件测量探头温升值,根据此温升值可计算入射激光能量。同时,各光电探测单元分别测量激光光斑不同取样点处波形信号,经信号处理和图像复原运算后可实现激光远场光斑时间

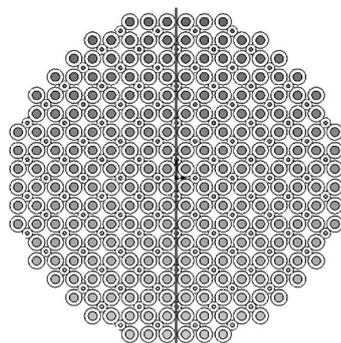


图1 复合阵列靶板空间结构

Fig. 1 Spatial structure of laser beam measuring array based on compound photoelectric and calorimetric techniques

分布测量。

数据采集模块包含400路数据采集通道,分为测温元件信号采集和光电信号采集两部分。其中测温元件信号采集部分由256路量热探测单元测量通道、4路量热探测单元背板温度测量通道和12路备份测量通道组成;光电信号采集部分由120路光电信号测量通道和8路备份测量通道组成。

数据分析处理模块实现对采集信号的综合分析处理,即通过对探测单元阵列测量数据进行信号转换、时域分析、空间光斑图像复原和综合信息处理,最终获得大面积激光束的光强分布信息。

## 3 数据处理方法

量热光电复合阵列对大面积激光束进行时间和空间采样,探测单元的测量信号经数据采集模块采集后形成原始测量数据。数据处理过程中,首先将原始测量数据的电信号还原为光信号,再根据各探测单元通道对应的空间位置进行信号的空间还原,然后对空间还原得到的采样矩阵进行插值<sup>[5]</sup>、配色等操作,形成常用的伪彩光斑图。

量热光电复合阵列算法的设计思想是先由量热探测单元阵列得到激光的总能量分布,再由量热探测单元测量结果实时定标光电探测单元,最后给出激光光强的时空分布。

### 3.1 量热探测单元数据处理方法

量热探测单元主要由高纯石墨体、测温热电偶和绝热陶瓷座3部分构成<sup>[6]</sup>。数据采集模块采集得到量热探测单元在激光作用时间前后的温度变化曲线  $T(t)$  后,利用下降沿拟合的方式可在一定程度上补偿传导和弱对流导致的热损失,从而得到稳定的  $T_0$  值,如图2所示。

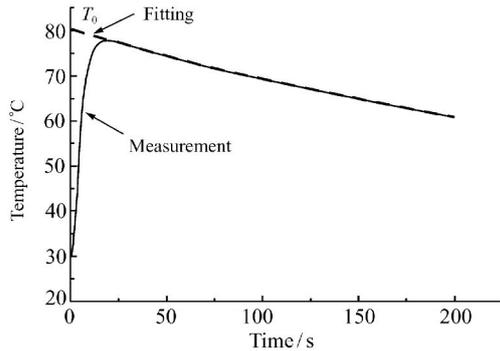


图2 曲线拟合得到  $T_0$

Fig. 2  $T_0$  calculated by curve fitting

根据经典能量回推公式计算相应的沉积能量为<sup>[7]</sup>:

$$E_0 = \int_{T_E}^{T_0} m \cdot C_p(T) \cdot dT, \quad (1)$$

式中: $m$ 为探头质量, $C_p$ 为材料热容, $T_E$ 为环境温度。通过实验定标对得到的  $E_0$  进行热辐射损失修正,计算出量热探测单元上沉积的激光能量  $E_1$ <sup>[8]</sup>,最终得到该单元处的激光辐照能量密度  $J_1$ 。

### 3.2 光电探测单元数据处理方法

光电探测单元主要由光学衰减部件、光电探测器和运放调理电路组成<sup>[9]</sup>。光电探测器接收入射到光电探测单元经衰减后的激光,数据采集模块采集通过光电转换和运放调理得到的电信号。在测量范围内,光电探测单元的探测器电阻与入射激光的光功率呈线性关系。对于常用的光导型红外探测器,由式(2)可将采集到的电信号值还原为激光功率密度值。

$$P = \frac{V}{A_v \times (Y + A \times e^{-T/T_0}) \times S \times At}, \quad (2)$$

式中: $P$ 为激光功率密度值, $V$ 为测量所得的电压值, $A_v$ 为运放电路的放大倍数, $Y$ 、 $A$ 和  $T_0$ 为光电探测器标定响应曲线的系数, $T$ 为探测器表面温

度, $S$ 为探测器光敏面的面积, $At$ 为光学衰减部件的衰减系数。从式中可以看出,对一个确定的探测单元,测量的激光功率密度值与得到的电压值之间只存在一个与温度相关的转换系数,设该系数为  $K(T)$ ,则:

$$K(T) = \frac{1}{A_v \times (Y + A \times e^{-T/T_0}) \times S \times At}, \quad (3)$$

由此,式(2)可化为:

$$P = K(T) \times V. \quad (4)$$

因此,只要得到每个光电探测单元的  $K(T)$  值,就能得到入射激光功率密度值。

常用的获取光电探测单元  $K(T)$  值的方法是对式(3)中的各个参量进行标定。实验室标定对光源均匀性、稳定性和可调性等要求较高,探测器的一致性差异又致使标定工作量极大。复合阵列在数据处理中运用现场实时定标的方法,有效地简化了标定环节,并改善了由标定光源及探测器一致性引入的不确定度。

在阵列上任取一光电探测单元,设其所在位置为  $(x, y)$ 。在单元封装绝热良好的条件下,测量过程中其光敏面温度将保持不变,设为  $T_1$ ,则其对应的转换系数  $K(T_1)$  为定值  $K_{xy}$ 。数据处理时,将  $K_{xy}$  作为一个待定系数,对该光电探测单元测量值进行时间积分,可得该光电探测单元处激光辐照的能量密度为:

$$J_{xy} = K_{xy} \times \int_{t_1}^{t_2} V_{xy}(t) \cdot dt, \quad (5)$$

式中: $t_1$ 为激光辐照开始时刻, $t_2$ 为激光辐照结束时刻, $t$ 为采样时刻。根据复合阵列的设计思想, $J_{xy}$ 可由与该光电探测单元相邻的几个量热探测单元处激光辐照能量密度值插值计算给出。由此可得:

$$K_{xy} = J_{xy} / \int_{t_1}^{t_2} V_{xy}(t) \cdot dt. \quad (6)$$

进而可求得该探测单元采样的光功率密度值序列。

### 3.3 光斑图像数据矩阵

如图1所示,在量热光电复合阵列中,光电探测单元和量热探测单元在阵列空间间隔布置。图中,大圈为量热探测单元,间插的小圈为光电探测单元。依据阵列布局表排布计算得到的各通道处

激光光强,可以求得激光光强时空分布采样矩阵。

量热探测单元阵列得到的是一个  $18 \times 18$  的采样矩阵,矩阵中的数值表示其对应量热探测单元所在面积内辐照激光的平均能量密度。光电探测单元阵列得到的是一组  $17 \times 17$  的采样矩阵,矩阵中的数值表示其对应光电探测单元所在位置处相应采样时刻的辐照激光功率密度,矩阵中的空格通过相邻位置测量值插值计算补足。

根据实际应用中对图像显示大小及分辨率的要求,结合模型设计和输出需求,可选用相应的插值方法来处理采样矩阵,最终形成光斑图像数据矩阵。

### 4 复合阵列标定

根据量热光电复合阵列算法设计思想,光电探测单元阵列测量的不确定度主要由量热探测单元阵列传递而来,由此,标定工作的重点在于对量热探测单元进行绝对标定。

由式(1)可知,完成标定需要准确给出石墨材料在不同温度下的热容。具体标定采用“固体材料高温热扩散率试验测量方法-激光脉冲法”进行,如图3所示。

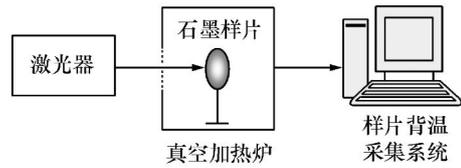


图3 石墨热容测量

Fig. 3 Heat capacity measurement of graphite

测试中石墨样品被放置于一个温度可调的真空加热炉中,激光经加热炉窗口辐照到石墨样片上,石墨样片吸收激光能量并产生温升,根据吸收激光能量和石墨片的温升值可计算得出待测石墨材料的热容数据,从而得到石墨材料不同温度下的热容拟合曲线。石墨材料的热容测量依据“中华人民共和国国家军用标准 GJB1201. 1-91”执行,在温度为  $300 \sim 1\ 300\ K$  内,测量不确定度最高为  $5.0\% (k=2)$ 。

量热探测单元热辐射损失修正是另外一个需要绝对定标量。标定利用  $5\ kW$  高功率  $CO_2$  激光器结合在线式功率计完成,布局如图4所示。利用光闸精确控制激光辐照探头的时间,并利用  $5\ kW$  的转针式功率计实时监测入射到探头上的激光功率,功率计的测量不确定度  $< 3.0\% (k=2)$ 。

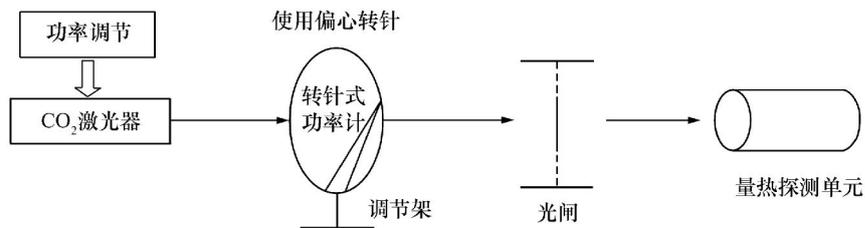


图4 量热探测单元标定实验

Fig. 4 Calibration experiments of calorimetric detecting module

### 5 结论

本文提出了量热光电复合阵列。该复合阵列基于现场实时定标的思想,将量热测试技术和光电测试技术优势结合起来,通过复合算法实现两

类测量数据的有效融合,充分发挥了两种测量方法的优势,减小了标定难度,提高了光强分布测量结果的可靠性。由于其兼具量热型探头绝对激光能量密度测量准确,光电探测器时间测量分辨率高的优点,可用于大面积高能激光束远场光强空间和时间分布的绝对测量。

#### 参考文献:

[1] 苏毅,万敏. 高能激光系统[M]. 北京:国防工业出版社,2004.

- SU Y, WAN M. *High Energy Laser System*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 吴伟伟, 唐军, 吴兆杰. 高能脉冲激光远场多参量测试系统设计[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(1): 9-12.  
WU W W, TANG J, WU ZH J. Design of far-field multi-parameters testing system for high-energy pulsed laser[J]. *Optics Optoelectronic Technology*, 2011, 9(1): 9-12. (in Chinese)
- [3] 杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝, 等. 中红外激光光斑探测阵列[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 702008.  
YANG P L, FENG G B, WANG ZH B, *et al.*. Mid-infrared high energy laser beam detector array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(7): 702008. (in Chinese)
- [4] 段刘华, 谢永杰, 戴运峰, 等. 量热阵列式激光束能量分布测量系统研制[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1110-1114.  
DUAN L H, XIE Y J, JI Y F, *et al.*. Development of laser beam energy distribution measuring array based on calorimetric techniques[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2010, 39(6): 1110-1114. (in Chinese)
- [5] 罗潇, 孙海江, 陈秋萍, 等. Bayer 格式图像的实时彩色复原[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 182-187.  
LUO X, SUN H J, CHEN Q P, *et al.*. Real-time demosaicing of Bayer pattern images[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(2): 182-187. (in Chinese)
- [6] 谢永杰, 段刘华, 戴运峰, 等. 高能激光量热式能量探头的研制[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(增3): 80-84.  
XIE Y J, DUAN L H, JI Y F, *et al.*. Development of calorimetric detector for high energy laser energy measurement[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2006, 35(S3): 80-84. (in Chinese)
- [7] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.  
YANG SH M. *Heat Conduction*[M]. Beijing: Advanced Education Publishing, 1998. (in Chinese)
- [8] 关有光. 一种新型高能激光束能量分布探测器[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 175-177.  
GUAN Y G. A novel high energy laser beam detector for measuring energy distribution[J]. *High Power Laser Particle Beams*, 2000, 12(4): 175-177. (in Chinese)
- [9] 杨鹏翎, 冯国斌, 王群书, 等. 中红外激光功率密度探测单元的研制[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1249-1252.  
YANG P L, FENG G B, WANG Q SH, *et al.*. Design and implement of detecting module for mid-infrared laser power density measurement[J]. *High Power Laser Particle Beams*, 2008, 20(8): 1249-1252. (in Chinese)

作者简介: 王 飞 (1978—), 男, 四川乐山人, 硕士, 助理研究员, 主要从事强激光测量技术方面的研究。

E-mail: wf97@ustc.edu