

高能激光测量的近红外探测阵列

张 磊 邵碧波 杨鹏翎 冯国斌 王振宝

(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 采用光热/光电阵列相结合的方法, 研制了近红外波段高能激光束总能量和光斑时空分布的测量系统。该系统可实现波长范围 $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 、动态范围 $\text{W}/\text{cm}^2\sim\text{kW}/\text{cm}^2$ 的激光光斑参数测量, 并具有探测光斑面积大和测量不确定度小等特点。通过验证, 系统有效探测面积为 $22\ \text{cm}\times 22\ \text{cm}$, 空间分辨力为 $1.1\ \text{cm}$ 。能量测量不确定度小于 10% , 功率密度测量不确定度小于 15% 。该方法可以作为近红外高能激光参数测量的有效手段。

关键词 测量; 近红外探测阵列; 光热/光电阵列; 能量和功率密度时空分布

中图分类号 TN209 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100517

Near-Infrared Detecting Array for High-Energy Laser Measurement

Zhang Lei Shao Bibo Yang Pengling Feng Guobin Wang Zhenbao

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

Abstract By using the method of combining photo-thermal/photoelectric array, a measuring system of near infrared high energy laser beam and time-space distribution of the spot is developed. The system can be used for laser beam parameter measurement of the wavelength range of $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$ and the power density range of $\text{W}/\text{cm}^2\sim\text{kW}/\text{cm}^2$ with the characteristic of large detection area of spot and small measurement uncertainty. The result shows that the system has the effective sensitive area of $22\ \text{cm}\times 22\ \text{cm}$, and the spatial resolution of $1.1\ \text{cm}$. The energy measurement uncertainty is less than 10% , and the power density measurement uncertainty is less than 15% . This method is an available approach for parameter measurement of near-infrared laser beam.

Key words measurement; near-infrared detection array; photo-thermal/photoelectric array; energy and power density time-space distribution

OCIS codes 140.0140; 040.1880; 100.0100

1 引 言

高能激光束不仅仅具有较高的能量, 还有相当高的功率密度, 对这类激光束的诊断, 需要测得激光束的绝对功率密度时空分布, 以得到激光束的总功率、光斑尺寸和功率密度时空分布等多种参数, 为综合判断其光束质量提供依据^[1,2]。传统激光束强度分布的测量方法既可直接测量, 如烧蚀法^[3]、烧蚀照相法^[4]和热敏纸法等; 也可间接测量, 常用的有转镜法、转盘法和转针轮法等, 它们均不能准确得到激光光斑功率密度的时空分布信息。亦有采用量热探测器阵列测量高能激光束参数的报道^[5~7], 该方法虽然可以获得激光光斑空间能量分布和总能量测量的参数, 但无法准确获得激光光斑的时间特性。本文

介绍了一种用于测量近红外高能激光束总能量和功率密度时空分布的探测阵列, 可以实现大动态范围激光功率密度时空分布的测量, 并成功应用于近红外激光光斑参数的定量测量中。

2 系统工作原理及组成

系统采用热吸收法测量高能激光远场辐照总能量, 有效探测面积为 $22\ \text{cm}\times 22\ \text{cm}$ 。在吸收体上设计阵列式激光功率密度取样通道, 利用小孔取样和漫反射相结合的方式对高能激光功率密度有效衰减, 利用光电探测器阵列实现空间取样光斑的光电转换。系统采用前置放大电路完成光电信号和光热信号的放大和调制, 通过多通道高速数据采集系统

收稿日期: 2011-03-15; **收到修改稿日期**: 2011-03-24

基金项目: 国防预研项目(22110707)资助课题。

作者简介: 张 磊(1982-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事激光测量方面的研究。E-mail: thez11982@yahoo.com.cn

实现测量信号的模数(A/D)转换,实现数据处理和光斑图像还原。

测量系统由激光能量吸收和功率密度空间取样靶板、光电探测阵列、数据采集系统和数据处理终端等部分组成。图1和图2分别给出了测量系统的原理图及结构图。

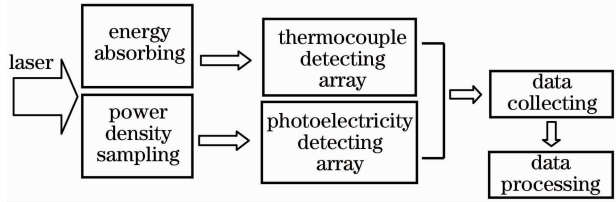


图1 测量系统原理框图

Fig.1 Functional block of laser beam detector array

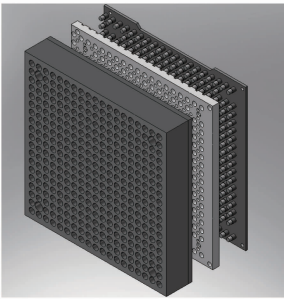


图2 测量系统结构图

Fig.2 Structure of laser beam detector array

3 系统单元模块结构

3.1 能量测量单元

系统能量测量由前端的吸收体完成,选用具有高纯度、高密度和高硬度的石墨作为吸收材料。前表面设计为高能激光防护面板,以避免镜面反射带来的安全隐患。在吸收体上等间隔设计阵列式激光功率密度取样通道,用于激光光斑空间取样,取样锥孔由 19×19 阵列组成,对应于后面的光电探测单元。每个锥孔后均对应一个衰减单元,用于实现对入射激光功率密度定量衰减。吸收体后面均匀分布热电偶探测阵列实现光热信号的测量。测量过程中激光入射能量为

$$E = mC(T)\Delta T/n, \quad (1)$$

式中 m 为石墨吸收体质量, $C(T) = \int_{T_0}^T c(T)dT$ 为热

平衡时刻石墨吸收体的热容积分值,对实测温升曲线进行函数拟合, ΔT 为采用后沿拟合得出的激光入射零时对应靶面热偶温升和, n 为靶面热偶数目。拟合函数为

$$\Delta T = \Delta T_0 + k \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

式中 ΔT_0 为热平衡时热偶温升和, k 代表对流和热辐射损失能量所对应的温度变化, τ 为热偶时间常数, t 为测量时刻。图3和图4分别给出测量得到的不同温度下石墨热容曲线和典型的温升后沿拟合曲线。

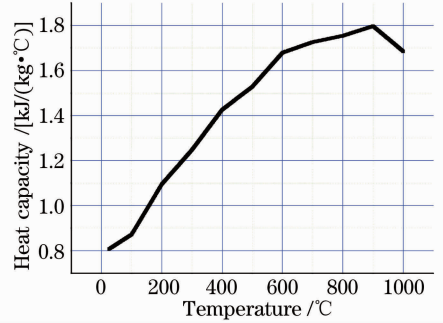


图3 石墨材料热容-温度曲线

Fig.3 Heat capacity at different temperature of graphite

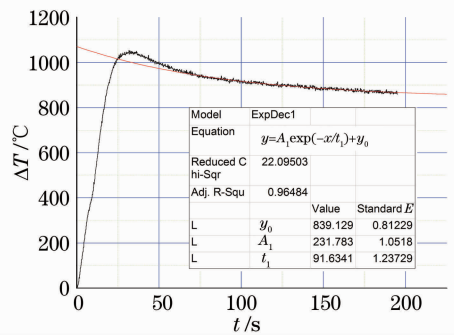


图4 典型的温升后沿拟合曲线

Fig.4 Typical simulation by the trailing edge of temperature curve

根据石墨材料相关参数及实测温升曲线拟合所得到的 ΔT 可以计算入射激光能量。

3.2 衰减取样单元

功率密度衰减取样单元的设计是测量系统的主要难点之一,考虑到激光功率密度高、光斑面积大,需采用合理的衰减方式对强激光进行有效衰减和空间取样。在石墨吸收体中布置一系列功衰减取样通道,取样衰减后的功率/能量密度满足光电探测器的量程要求,并保证各通道的测量一致性要求。

结合光电探测器的测量动态范围,对高能激光要进行较大倍数的衰减。本套测量系统利用石墨材料的漫反射特性,在石墨吸收体上面设计一系列漫反射单元对高能激光功率密度有效衰减取样,入射激光信号经过多次漫反射实现衰减。

图5给出了漫反射单元出射光场的三维空间分布情况。

从图 5 中可以看出,入射激光经过衰减结构后,其出射光场在 x, y 方向上较为对称,其光斑为高斯形状分布;在 z 方向,随着测试位置与出光孔距离的增加,其光强分布呈指数下降关系。

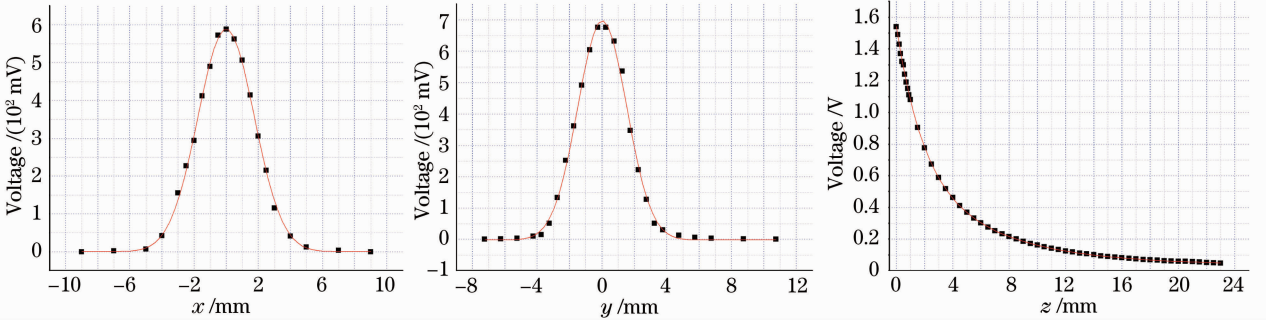


图 5 漫反射单元出射光三维空间分布

Fig. 5 Three-dimensional spatial distribution of diffuse reflection unit at different direction

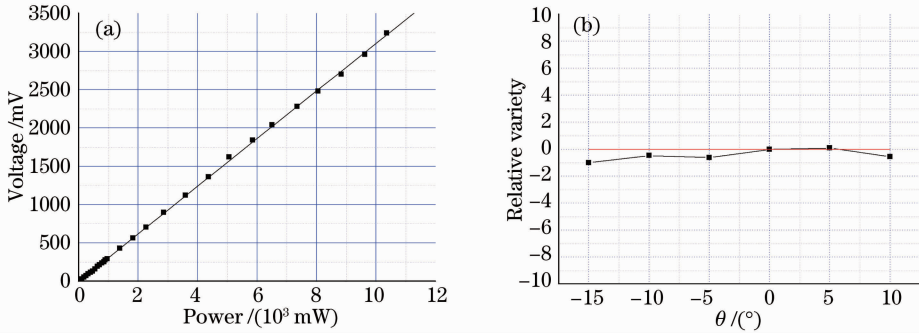


图 6 衰减单元测量。(a)线性动态范围测量;(b)角度敏感性测量

Fig. 6 Measurement of attenuation unit. (a) Measured linear dynamic range; (b) measured angle sensitivity

3.3 光电探测单元

光电探测部分同样由 19×19 的探测阵列组合而成,置于光学衰减取样单元后面,用于接收入射激光能量并完成光电转换,探测器选用近红外光伏型 InGaAs 探测器。电路采用跨导工作模式,这样可以提高测量线性动态范围,进而能够实现对高能激光的测量。所有探测单元均设计有过压保护和短路保护功能,以提高测量系统可靠性。探测器输出信号通过电路调制放大,放大信号经多通道数据采集单元实现模数转换,并通过数传通道发送至数据处理终端。

对于第 i 行、第 j 列探测器 D_{ij} , t 时刻其输出电压信号为

$$V_{ij}(t) = P_{ij}(t) T_f A_{ij} R_{A,ij} R_{load}, \quad (3)$$

式中 $P_{ij}(t)$ 为入射到光电探测器光敏面的激光功率, T_f 为光学衰减单元透射率, A_{ij} 为该通道放大器电压放大倍数, $R_{A,ij}$ 为光电探测器的响应率, R_{load} 为光电探测器负载电阻,则有

图 6 分别给出了衰减单元线性动态范围和角度敏感性的测量结果。由图 6 可以看出,衰减单元线性动态范围大于 10^5 倍,在 $\pm 10^\circ$ 范围内对激光入射角度不敏感。

$$P_{ij}(t) = \frac{V_{ij}(t)}{T_f A_{ij} R_{A,ij} R_{load}}. \quad (4)$$

相应地,该点功率密度值为

$$S_{ij}(t) = P_{ij}(t) / A_D, \quad (5)$$

式中 A_D 为光电探测器有效光敏面面积,所使用的光电探测器光敏面尺寸为 $\Phi 1$ mm。

3.4 数据采集单元

数据采集系统分别完成光热部分和光电部分的信号放大和调制,光热信号通过 A/D 转换变成数字信号。光电信号可测量电压信号范围为 $-10 \sim 10$ V,每 16 路经过一个多路开关进行数据传输,进而完成 A/D 转换。单通道采样率 50 Hz,通道间延时小于 1 ms, A/D 分辨率不小于 10 位。为了提高系统集成度,数采单元对经过前放电路调制后的信号采用模拟多路开关组进行通道间扫描,扫描后的信号送到数据采集单元完成 A/D 转换,为了保证通道间最小时延要求,要求 A/D 芯片具有足够高的采样速率。系统测量数据最后由网口输出。数采单元通过编程实现外部信号触发采集功能。

3.5 数据处理及图像复原单元

数据处理及图像复原软件采用 VC++ 编写而成,主要功能有采集所得数据库的分帧、衰减因子的计算、激光功率的时空分布复原及图像融合、测量结果计算等。为直观地显示测量结果,设有图像二维光斑显示,并有按帧播放、回放、前进以及计算结果

屏幕显示等功能。

采用高能近红外模拟激光光源对测量系统进行了考核实验,图 7 和图 8 分别给出了探测器系统强光实验中不同时刻激光功率密度空间分布图和积分光斑功率密度分布图像。

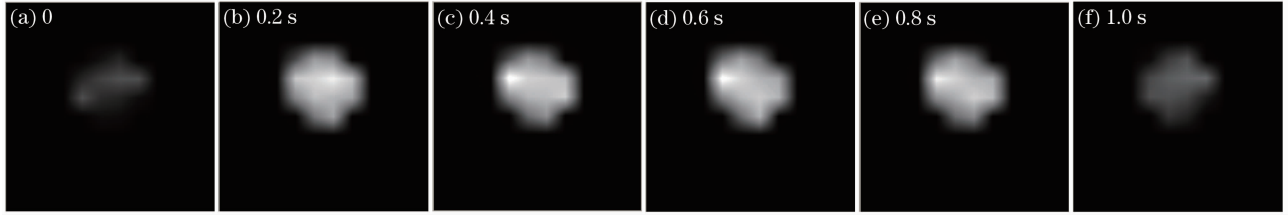


图 7 探测器系统强光实验不同时刻激光功率密度空间分布图像

Fig. 7 Laser power density spatial distribution at different time for high power by the detector system

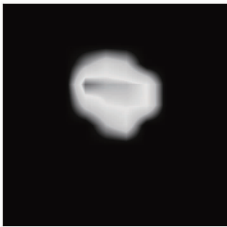


图 8 测量系统强光实验积分光斑功率密度空间分布图像

Fig. 8 Power density spatial distribution of integrating spot for high power by the detector system

4 结 论

研制了一种可用于近红外高能激光能量和光斑时空分布测量的光热/光电复合阵列探测系统,可实现大动态范围激光功率密度测量,光斑测量空间分辨力为 1.1 cm,能量测量不确定度小于 10%,功率密度测量不确定度小于 15%。实验表明,该系统可实现高能量、大面积近红外高能激光光斑测量。

参 考 文 献

1 Sun Changku, He Mingxia, Wang Peng *et al.*. Laser Measurement Technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004. 45~46

孙长库,何名霞,王 鹏. 激光测量技术[M]. 天津:天津大学出版社,2008. 85~86

2 Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin *et al.*. New technology and new configuration for high energy laser system [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2008, **45**(1): 37

周 朴,许晓军,刘泽金 等. 高能激光系统的新技术与新结构 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(1): 37

3 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 45~46

苏 毅,万 敏. 高能激光系统[M]. 北京:国防工业出版社,2004. 45~46

4 J. V. Gilse, S. Koczera, D. Greby. Direct laser beam diagnostics[C]. *SPIE*, 1991, **1414**: 45~54

5 Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Qunshu *et al.*. Design and implement of detecting module for mid-infrared laser power density measurement [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(8): 1249~1252

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

6 Guan Youguang, Fu Shuzhen, Gao Xueyan *et al.*. A novel high energy laser beam detector for measuring energy distribution[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **12**(2): 175~177

关有光,傅淑珍,高学燕 等. 一种新型高能激光束能量分布探测器[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **12**(2): 175~177

7 Liu Feng, Wu Zhensen, Xie Yongjie *et al.*. Reconstruction method of far field laser energy measured with calorimetric array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1615~1620

刘 峰,吴振森,谢永杰 等. 量热阵列测量远场激光能量的重构方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1615~1620