

高重复频率脉冲激光光斑时空分布探测阵列

冯国斌¹ 王振宝² 冯刚² 杨鹏翎² 王群书² 安毓英¹

(¹西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071
²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 远场激光光斑测量是研究高功率激光大气传输效应的有效方法,同时也是测试分析激光系统远距离瞄准能力的主要手段。设计了一种基于光电探测器阵列的高重复频率脉冲激光光斑分布探测阵列,实现了到靶激光总功率和光斑时空分布的定量测量。该探测阵列由 297 路 Si-PIN 光电探测器单元组成,其中心区域空间分辨力为 1 cm,有效探测尺寸为 $\phi 32$ cm、波长范围为 300~1100 nm。结果表明,该系统可用于最小脉冲宽度为 10 ns、重复频率为 1~20 kHz、动态范围为 0.02~100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的脉冲光斑测量。

关键词 探测器; 高重复频率; 脉冲激光; 时空分布; 探测器阵列; 远场; 光斑

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0608003

Detector Array for Measuring Temporal-Spatial Distribution of High-Repetition-Rate Pulsed Laser Beam Profile

Feng Guobin¹ Wang Zhenbao² Feng Gang² Yang Pengling²
Wang Qunshu² An Yuying¹

(¹School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China
²State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract Measuring far-field laser beam profile is an effective way to study the atmospheric transmission effects of high power laser and evaluate the pointing capability of high power laser system in a long distance. A laser beam profiler based on detector array is developed to measure the far-field beam intensity and temporal-spatial distribution of the high-repetition-rate pulsed laser beam, and the image of the far-field beam profile is reconstructed with the bilinear interpolation method. The detector array is composed of 297 Si-PIN photodiode detectors, with the spatial resolution of 1 cm in the central region, an effective sensitive area of $\phi 32$ cm, and response wavelength between 300 nm and 1100 nm. The beam profiler is capable of measuring far-field beam profile of 1~20 kHz repetition rate pulsed laser, with minimal detectable pulse width of 10 ns, and dynamic range of energy density of 0.02~100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

Key words detectors; high repetition rate; pulsed laser; temporal-spatial distribution; detector array; far-field; beam profile

OCIS codes 120.1840; 230.0040; 250.0040

1 引 言

高重复频率(通常指工作重复频率大于 1 kHz)脉冲激光目前已经广泛应用于科研、工业微加工、军事等领域^[1~3],尤其是军事应用领域,如目标追踪、激光雷达、光电对抗等热点研究领域。高重复频率脉冲激光一般具有较高的瞬时功率和较窄脉冲宽度,可长

时间持续工作,对这类激光束的诊断,需要测得激光束的总功率、光斑尺寸、功率密度时空分布等多种参数,为综合分析光束质量、大气传输效率、激光系统性能等提供依据。传统的高重复频率脉冲激光参数测量多采用 CCD 相机来实现,但是这种方法只能提供相对的能量密度分布,而无法提供定量的测量结果。

收稿日期: 2013-02-05; **收到修改稿日期**: 2013-04-07

基金项目: 国防预研基金(22110702)资助课题。

作者简介: 冯国斌(1971—),男,博士研究生,研究员,主要从事激光测试评估和辐照效应等方面的研究。

E-mail: fgb02@eyou.com

导师简介: 安毓英(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光技术领域方面的研究。E-mail: anyy@mail.xidian.edu.cn

对于激光光斑分布的探测方法有很多^[4~11],其中光电探测器阵列具有较好的时间和空间分辨能力,非常适合于激光远场光斑强度时空分布测量^[4~8]。早在1999年美国林肯实验室就有相关文献报导^[8]。本文研究了一种基于Si-PIN光电探测器阵列的高重复频率脉冲激光参数测量系统,可以准确测量远场激光光斑参数。

2 系统工作原理及组成

系统工作原理如图1所示,首先对激光光斑进行空间取样和功率密度定量衰减,再利用高速光电探测器阵列实现测量信号的光电转换,探测器输出电信号经过电荷灵敏放大、脉冲展宽、低通滤波(带宽约为20 Hz)、低频放大等信号降频处理过程,然后经过模/数(A/D)变换实现数字化并发送至数据处理终端,进行相应的数据处理和光斑图像复原与分析,给出激光光斑参数信息。图中FPGA表示现场可编程门阵列。

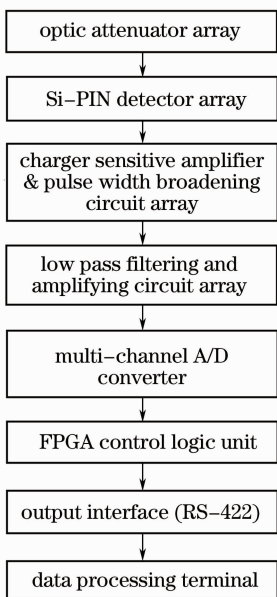


图1 探测阵列测量原理示意图

Fig.1 Functional block diagram of detector array for measurement

测量系统主要由激光衰减阵列、光电探测器阵列、脉冲信号电荷灵敏放大与脉冲展宽电路、低通滤波与放大电路、多通道模数转换、数据处理终端等功能模块组成。图2为系统外形布局和剖面结构图,系统由297路探测单元组成,中心区域分辨力为1 cm,边缘分辨力为2 cm。光电探测器选用高速Si-PIN光电二极管(响应时间小于2 ns),置于光学衰减单元后面,用于接收入射激光能量并完成光电

转换,光电二极管光谱响应曲线如图3所示,其有效光谱响应范围为200~1100 nm。脉冲信号电荷灵敏放大与脉冲展宽电路和低通滤波与放大电路设计是系统电路研制中的关键环节,设计的脉冲信号电荷灵敏放大器最小可响应的脉冲宽度为10 ns。脉冲展宽电路的时间常数和低通滤波器带宽需与可测量的重复频率范围匹配。针对被测激光信号重复频率在1~20 kHz范围内,设计了脉冲展宽电路的时间常数为50 μs,低通滤波器带宽为20 Hz。根据低通滤波器带宽,确定探测阵列的信号采样频率为50 Hz。

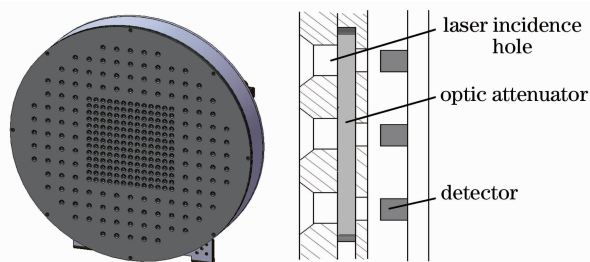


图2 探测阵列外形布局及剖面图

Fig.2 Outline and section drawing of detector array

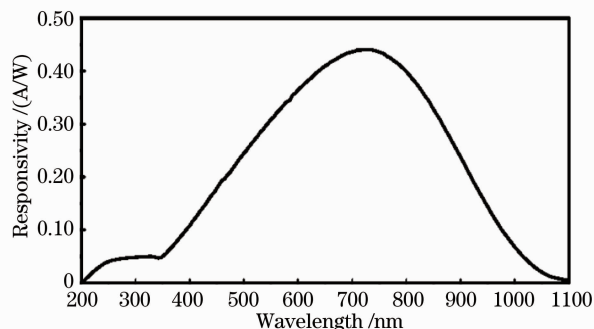


图3 Si-PIN光电探测器光谱响应特性

Fig.3 Spectral response performance of Si-PIN detector

在功率密度解算及光斑图像还原时,对于第*i*行、第*j*列探测器 D_{ij} ,假设*t*时刻其输出电压信号为 $V_{ij}(t)$,则入射到光电探测器光敏面的激光功率 $P_{ij}(t)$ 为

$$P_{ij}(t) = \frac{V_{ij}(t)}{T_f A_{ij} R_{A,ij} R_{load}}, \quad (1)$$

式中 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。相应地,该点功率密度值 $S_{ij}(t)$ 为

$$S_{ij}(t) = P_{ij}(t)/A_D, \quad (2)$$

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直径为 $\phi 1$ mm。探测器阵列测量得到的总功率*P*为

$$P = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij}(t) A_{ij}^*, \quad (3)$$

式中 A_{ij}^* 为探测单元的面积权重系数, m 、 n 为探测器的行数、列数。

3 光学衰减单元设计

探测器前加装满足量程设计范围要求的滤光片,对激光信号进行衰减,同时降低太阳辐射对测量带来的影响,以提高信噪比。当信号强度较弱时,采用窄带通光学滤波片对激光功率密度进行定量衰减,是较为理想的消除太阳背景噪声对测量结果影响的方法,测量波长与背景光之间抑制比可达到 40 dB 以上,图 4 为用于 532 nm 激光测量的典型窄带通光学滤波片透过光谱曲线。采用窄带通光学滤波片衰减系数精确控制难度大、成本高,一致性很难保证(通常需要进行繁重的标定实验),且透射率随激光入射角度变化较为敏感,增加了系统的测量不确定度。

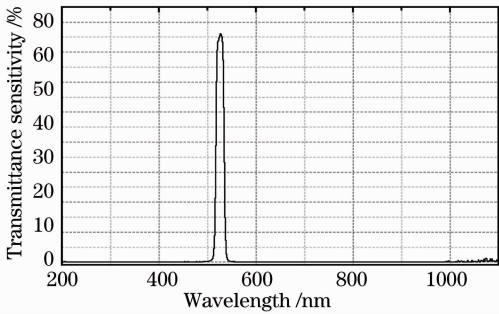


图 4 窄带通光学滤波片光谱曲线

Fig. 4 Spectral curve of narrow bandpass filter

考虑到实际应用过程中测量激光信号相比于太阳背景噪声信号强度高很多,因此本系统设计时采用中性密度滤波片(设计工作波段 300~1100 nm)来实现激光功率密度的定量衰减,既克服了太阳背景噪声影响,又降低了测量系统的复杂性及成本,还

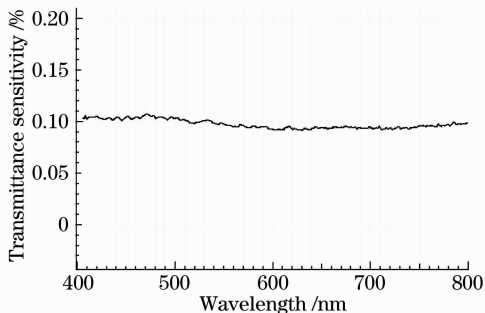


图 5 中性密度光学滤波片光谱曲线

Fig. 5 Spectral curve of neutral density filter

可实现宽谱段范围内激光测量。图 5 和图 6 给出了系统中使用的中性密度滤波片光谱响应曲线和角度敏感性的测量结果。

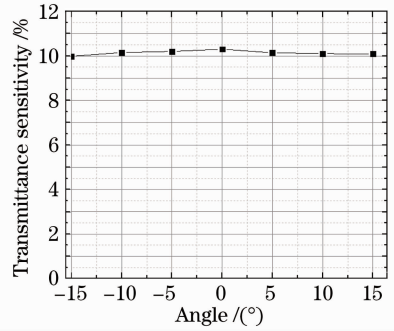


图 6 中性密度滤波片角度敏感性

Fig. 6 Transmittance sensitivity as a function of angle for neutral density filter

由图 5 可以看出,设计制作的中性密度光学滤波片在 400~800 nm 光谱范围内,透射率曲线相对较为平坦(起伏约为 $\pm 5\%$)。图 6 的测量结果显示,该中性密度滤波片在 $\pm 15^\circ$ 激光入射角度范围内,对入射角度敏感性较低,因入射角度引起的透射率变化小于 3%。

4 探测器标定及性能测试

在激光光斑时空分布测量过程中,探测器阵列灵敏度一致性是保证测量结果准确性的关键因素。实验光源选用波长为 532 nm 激光器,输出功率为 20 mW,重复频率为 1 kHz。为获得均匀光斑,测试过程中采用多层毛玻璃组合对输出激光进行匀化。标定过程中,在保证激光器输出光功率及入射角度不变的情况下,得到各探测单元输出信号幅度。探测器阵列灵敏度一致性测量结果如图 7 所示,实测结果表明探测器阵列灵敏度不一致性小于 5%。图 8 为探测器阵列单通道动态范围测量结果。实测结果表明探测器阵列的线性动态范围上限为 $100 \mu\text{J}/\text{cm}^2$,测量下限由系统

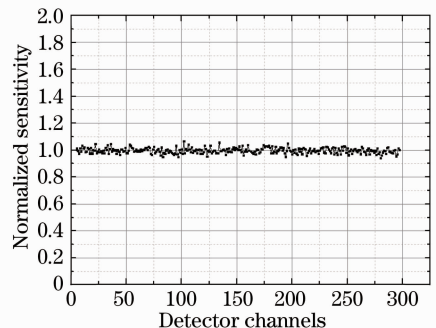


图 7 探测器阵列一致性测量结果

Fig. 7 Testing results of uniformity for detector array

的噪声峰值水平决定(通常取为噪声电压峰值 V_{out} 的 2 倍)。实测系统输出噪声电压峰值小于 1 mV, 对应激光能量密度值为 $0.01 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。因此可推得, 探测器阵列的线性动态范围下限为 $0.02 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。

图 9 为整个系统性能测试实验布局图, V_0 表示在激光辐照时, 探测器阵列单通道输出的信号强度。实验中光源使用中心波长为 532 nm 激光器, 其输出功率为 1~15 W 可调, 脉冲宽度为 10 ns, 重复频率为 10 kHz。通过格兰偏振棱镜组来实现透射激光能量的连续衰减。为获得大面积光斑, 实验中利用透镜对激光光斑进行发散, 使得到达探测阵列表面处光斑直径约为 16 cm。实验前标定出光楔表面反射光与透镜后透射光的光分比, 采用 OPHIR 公司

的 PE9 型功率计测量光楔表面反射光功率, 以在线监测探测阵列输入激光功率。

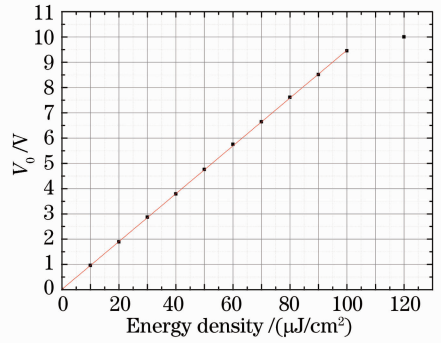


图 8 探测器阵列单通道动态范围测量结果
Fig. 8 Testing results of dynamic range for one channel

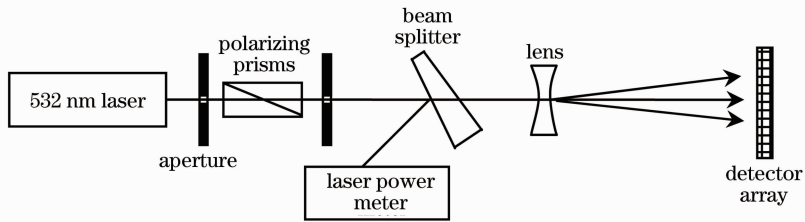


图 9 实验布局图

Fig. 9 Arrangement of experiment

表 1 给出了探测阵列系统性能测试结果。其中输入光功率使用监测功率计测量得到, 探测阵列测得的光功率值采用(3)式计算得到, 表中数据为出光时间内平均值。由表 1 的实验数据可以看出, 探测器系统实测光功率与入射光功率密度比较吻合(实

测结果与输入值偏差小于 3%)。图 10 为探测阵列系统典型结果, 其中图 10(a)为不同时刻的典型光斑功率密度分布图, 图 10(b)为测得总功率随时间变化曲线。

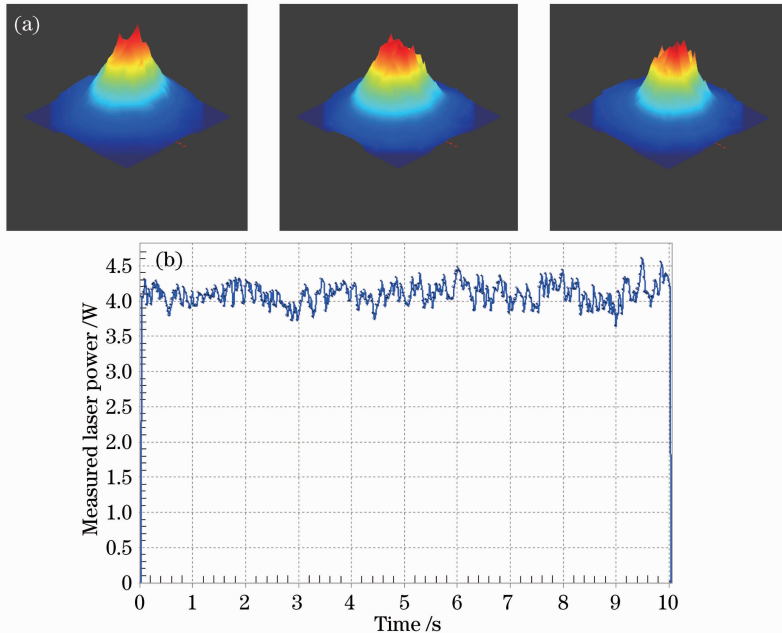


图 10 (a) 不同时刻激光光斑图像和(b)功率-时间曲线

Fig. 10 (a) Laser spot pictures at different times and (b) $P-t$ curve

表1 探测器系统性能测试数据

Table 1 Testing results of detector system performance

Input laser power /W	Measured laser power /W	Deviation /%
3.0	2.95	-1.7
5.0	5.12	2.4
7.0	6.89	-1.6
9.1	8.95	-1.6
10.1	10.30	2.0

5 结 论

用 Si-PIN 光电探测器组成的大面积阵列探测器系统实现了高重复频率脉冲激光光斑功率密度时空分布的测量,可以获得较为详细的激光光斑近场及远场特性,为激光系统的光束质量、大气传输效率评价提供重要依据。该探测器系统可实现波长范围为 300~1100 nm、能量密度为 0.02~100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 量级的激光光斑参数测量,并具有探测光斑面积大和功率测量误差小(实测结果与输入值偏差小于 3%)的优点。该探测阵列可测激光波长范围受 Si-PIN 探测器光谱响应限制,若换用其他类型光伏探测器(如 InGaAs),可以实现其他波段高重复频率脉冲激光光斑功率密度时空分布的测量。

参 考 文 献

- 1 Wang Xiongfei, Zhao Hong, Zhu Chen *et al.*. Output characteristics of high-repetition-rate narrow-pulse-width pulsed fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1870~1875
王雄飞,赵 鸿,朱 辰等. 高重复频率窄脉冲光纤激光器的输出特性实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1870~1875
- 2 Ma Yunfeng, Yu Jin, Niu Gang *et al.*. 25 W high repetition rate picosecond green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1202010

- 麻云凤,余 锦,牛 岗等. 高重复频率 25 W 皮秒绿光激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1202010
- 3 Li Zhulian, Zhang Haitao, Huang Tao. Research of rotation shutter control for high repetition frequency co-optical path satellite laser ranging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(s1): s112006
李祝莲,张海涛,黄 涛. 高重复共光路卫星测距中旋转快门的控制研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(s1): s112006
 - 4 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System[M]. Beijing: National Defense Technology Press, 2004
苏 毅,万 敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
 - 5 Pengling Yang, Guobin Feng, Qunshu Wang *et al.*. Detector array for measuring far-field energy density distribution of repetitively pulsed laser[C]. *SPIE*, 2008, **6622**: 66220T
 - 6 Pengling Yang, Guobin Feng, Qunshu Wang *et al.*. Detector array for measuring far-field mid-infrared laser beam spatial profile[C]. Shanghai: Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim, 2009. TUP72
 - 7 Zhu Zhen, Wang Yongzhou, Yi Yaxing *et al.*. Novel direct-detection scheme for measuring energy distribution of laser spots in outfield[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **31**(11): 49~53
 - 8 C. Higgs, P. C. Grey, J. G. Mooney. Dynamic target board for ABL ACT performance characterization[C]. *SPIE*, 1999, **3706**: 216~222
 - 9 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
 - 10 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
 - 11 Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao *et al.*. Mid-infrared high energy laser beam detector array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702008
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): 0702008

栏目编辑: 何卓铭