

文章编号: 0258-7025(2010)02-0521-05

# 测量中红外激光远场光斑的光电阵列靶斑仪

杨鹏翎<sup>1,2</sup> 冯国斌<sup>2</sup> 王振宝<sup>2</sup> 王群书<sup>2</sup> 冯 刚<sup>2</sup> 张天庆<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 清华大学工程物理系, 北京 100084; <sup>2</sup> 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要** 光束质量是评价高能激光系统综合指标的重要参数,准确测量激光远场功率密度的时空分布是获取其光束质量和研究高能激光大气传输效应的有效手段之一。采用室温中红外光电探测器阵列,研制了可用于中红外激光远场光斑测量的光电阵列靶斑仪系统,系统主要由光学衰减单元、光电探测器阵列、信号调理单元、数据采集系统、无线数传单元、数据处理单元等组成。为解决中红外光电探测器响应率随温度变化敏感的难题,提出了基于探测器元阻抗的响应率自适应实时校正模型,拓展了测量系统的工作温度。该系统可测激光波长为  $1\sim 5\ \mu\text{m}$ ,空间分辨率为  $2.5\ \text{cm}$ ,数据刷新频率为  $25\ \text{Hz}$ ,测量动态范围为  $1000$  倍,工作温度为  $-60\sim 40\ ^\circ\text{C}$ ,测量不确定度小于  $20\%$ 。

**关键词** 测量;中红外激光;功率密度时空分布;靶斑仪;响应率自适应校正模型;碲镉汞探测器

中图分类号 TN216;TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103702.0521

## Detector Array for Measuring Far-Field Power Density Distribution of Mid-Infrared Laser

Yang Pengling<sup>1,2</sup> Feng Guobin<sup>2</sup> Wang Zhenbao<sup>2</sup>

Wang Qunshu<sup>2</sup> Feng Gang<sup>2</sup> Zhang Tianqing<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)  
(<sup>2</sup> Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

**Abstract** Beam quality and intensity are critical characters of high energy laser system. Accurately measuring the far-field laser beam spatial profile is an effective way to diagnose laser beam quality and study the atmospheric transmission effects for a high energy laser system. In this paper, a detector array system for mid-infrared laser beam profile measuring is developed. The system is consisted of optic attenuators, photoconductive HgCdTe detectors, amplifiers, analog to digital converter unit, wireless transmission unit, and data processing end. Considering the responsivity and resistance sensitivity of HgCdTe detector with temperature, a responsivity adaptive calibration model is proposed to solve the temperature sensitivity of HgCdTe detector. The system is capable for absolutely measuring far-field power density distribution of infrared laser with response wavelength between  $1\ \mu\text{m}$  and  $5\ \mu\text{m}$ , the dynamic range of power density which it can measure of above  $10^3$ , the refresh rate of  $25\ \text{Hz}$ , along with the measurement uncertainty of less than  $20\%$  in the temperature range of  $-60\sim 40\ ^\circ\text{C}$ .

**Key words** measurement; mid-infrared laser; power density spatial-time distribution; detector array; responsivity adaptive calibration model; photoconductive HgCdTe detector

## 1 引言

激光具有定向性、单色性、高亮度和相干性等特点,且能量可有效实现远距离传输,因而具有很好的应用前景,成为目前各国竞相研究的热点<sup>[1]</sup>。通常将平均功率大于  $10\ \text{kW}$ ,持续时间数秒的激光称为高能激光。测量高能激光远场功率密度时空分布,是直接获

取激光光斑靶面火力、光束质量、质心漂移等重要参数的有效手段,对于分析高能激光的大气传输效应和评价高能激光系统的光束控制能力、跟踪瞄准能力等具有重要意义<sup>[2~6]</sup>。采用光电探测阵列可以实现高能激光远场大面积光斑功率密度时空分布定量测量,1999年3月,美国林肯实验室利用由  $1536$  个 InGaAs 探测

收稿日期:2009-03-29;收到修改稿日期:2009-07-01

基金项目:国防预研基金(22110501)资助项目。

作者简介:杨鹏翎(1979—),男,助理研究员,博士研究生,主要从事激光参数测量方面的研究。

E-mail: pennayang@gmail.com

导师简介:王群书(1956—),男,研究员,博士生导师,主要从事核技术和光电技术方面的研究。

E-mail: wangqushu@tsinghua.org.cn

器单元组成的光电探测阵列,测量得到了 ABL 激光减功率发射的激光光斑,给出了 Strehl 比、环围能量和光束抖动等一系列参数<sup>[7]</sup>。但针对中红外波段的光电探测器如 InSb, HgCdTe, PbSe 等响应率随温度敏感,所以多用于激光功率密度相对测量。本文针对中红外高能激光测量要求,采用室温中红外碲镉汞(HgCdTe)光电探测器阵列,有效解决了探测器响应率温度敏感的技术难题,研制了可用于高能激光远场光斑功率密度时空分布测量的中红外光电阵列靶斑仪,并成功应用于远场激光光斑的定量测量之中。

## 2 系统测量原理和基本组成

光电阵列靶斑仪系统首先对于远场激光光斑进行大面积空间取样和功率密度定量衰减,采用光电探测器阵列实现测量信号的光电转换,探测器信号经过调理放大后实现数字化并发送至数据处理终端,完成数据处理和光斑分析,给出激光远场光斑参数。

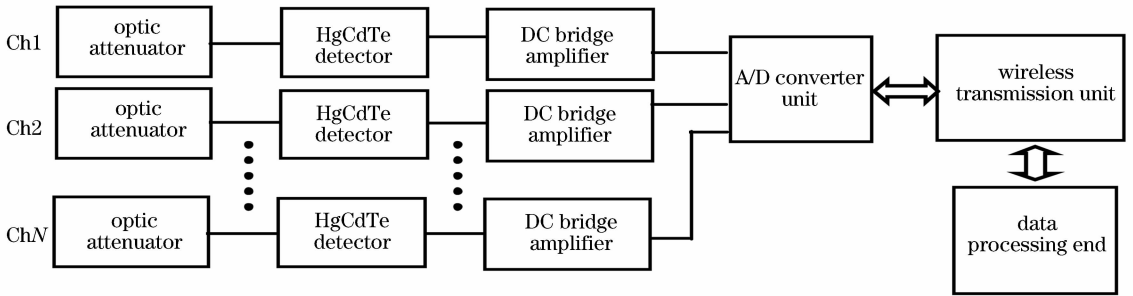


图 1 光电阵列靶斑仪测量原理示意图

Fig. 1 Functional block diagram of detector array for laser beam measurement

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

$$V_{ij}(t) = P_{ij}(t) T_f A_{ij} R_{v,ij}(T), \quad (1)$$

式中  $P_{ij}(t)$  为入射到探测器光敏面的激光功率,  $T_f$  为光学衰减片透过率,  $A_{ij}$  为该通道放大器电压放大倍数,  $R_{v,ij}(T)$  为在实际工作温度为  $T$  时探测器的响应率, 则有

$$P_{ij}(t) = V_{ij}(t) / [T_f A_{ij} R_{v,ij}(T)], \quad (2)$$

相应地, 该点功率密度值为

$$S_{ij}(t) = P_{ij}(t) / A_D, \quad (3)$$

式中  $A_D$  为探测器有效光敏面面积, 本文为  $1 \text{ mm}^2$ 。

## 3 光学衰减片设计

由于测量激光功率密度远高于光电探测器响应线性动态范围, 因此采用光学衰减片对于入射激光功率密度大量程定量衰减。光学衰减片采用折射率高低周期交替的多层介质高反射膜, 基片材料选用

系统由激光接收和衰减取样面板、红外探测器阵列、信号调理放大电路、数据采集单元、供电单元、无线数传单元、数据处理终端所组成, 测量原理如图 1 所示。激光接收面板为直径  $350 \text{ mm}$  的圆形铝板, 表面漫反射喷砂处理, 以避免高能激光可能产生镜面反射所带来的安全隐患。铝板上等间隔布置了 112 个圆锥形取样孔, 用于激光光斑空间取样, 锥孔间隔为  $2.5 \text{ cm}$ , 每个锥孔后均安装了光学衰减片, 用于对入射激光功率密度的定量衰减, 衰减片采用单晶硅表面镀多层介质膜的方式来实现, 以提高光学衰减片抗激光损伤阈值, 通过调整多层介质膜膜系和膜层数来调整衰减片透过率。光电探测器置于光学衰减片后面, 用于接收入射激光能量并完成光电转换, 探测器选用室温中红外光导型 HgCdTe 探测器, 探测器输出信号采用惠氏桥电路调理放大, 放大信号经多通道数据采集单元实现模数转换, 并通过无线数传通道发送至数据处理终端。

在中红外波段透过率高、热导率较高的硅单晶(折射率  $n_1 = 3.48$ ), 以提高光学衰减片的抗激光损伤阈值, 多层介质膜采用  $\lambda_0/4$  膜系, 膜层材料分别为 ZnS(折射率  $n_2 = 2.15$ ) 和  $\text{YbF}_3$ (折射率为  $n_3 = 1.40$ ), 如图 2 所示, 设高低折射率膜层厚度分别为  $h_2$  和  $h_3$ ,  $h = h_2 + h_3$ , 且有  $n_2 h_2 = n_3 h_3 = \lambda_0/4$ , 图中  $n_1$  为空气折射率, 激光入射角度为  $\theta_1$ , 其在高低折射率膜层的折射角分别为  $\theta_2$  和  $\theta_3$ , 在基底层的折射

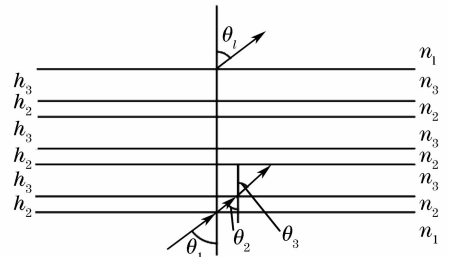


图 2 多层介质膜光学衰减片结构示意图

Fig. 2 Structure of multilayer medium film optic attenuator

角为  $\theta_l$ ，且有  $\theta_2 = \arcsin(n_1 \sin \theta_1/n_2)$ ,  $\theta_3 = \arcsin(n_2 \sin \theta_2/n_3)$ ,  $\theta_l = \arcsin(n_3 \sin \theta_3/n_l)$ ，则对

$$M_2(h) = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & -\frac{i}{p_2} \sin \beta_2 \\ -i p_2 \sin \beta_2 & \cos \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_3 & -\frac{i}{p_3} \sin \beta_3 \\ -i p_3 \sin \beta_3 & \cos \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 \cos \beta_3 - \frac{p_3}{p_2} \sin \beta_2 \sin \beta_3 & -\frac{i}{p_3} \cos \beta_2 \sin \beta_3 - \frac{i}{p_2} \sin \beta_2 \cos \beta_3 \\ -i p_2 \sin \beta_2 \cos \beta_3 - i p_3 \cos \beta_2 \sin \beta_3 & \cos \beta_2 \cos \beta_3 - \frac{p_2}{p_3} \sin \beta_2 \sin \beta_3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $\beta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 h_2 \cos \theta_2$ ,  $\beta_3 = \frac{2\pi}{\lambda} n_3 h_3 \cos \theta_3$ ,  $p_2 = n_2 \cos \theta_2$ ,  $p_3 = n_3 \cos \theta_3$ 。当膜层周期数为  $N$  时，特性矩阵变为

$$M_{2N}(Nh) = [M_2(h)]^N = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

膜的透射系数

$$t = \frac{2p_1}{(M_{11} + M_{11} p_l) p_1 + (M_{21} + M_{22} p_l)}, \quad (6)$$

式中  $p_1 = n_1 \cos \theta_1$ ,  $p_l = n_l \cos \theta_l$ ，则透过率

$$T_t = \frac{p_l}{p_1} |t|^2. \quad (7)$$

对于 TM 模，计算方法和 TE 模类似，只是式中

$p_1, p_2, p_3$  和  $p_l$  换为  $p_1 = \cos \theta_1/n_1, p_2 = \cos \theta_2/n_2, p_3 = \cos \theta_3/n_3, p_l = \cos \theta_l/n_l$  即可。图 3 为计算得到的衰减片透过率及其相对光谱随激光入射角度的变化曲线，图 3(a) 为 TE 模入射时的光谱曲线，图 3(b) 为 TM 模入射时的光谱曲线，图 3(c) 为中心波长处 TE 模和 TM 模透过率随入射角度的变化情况。由图可知，当入射角度变大时，透过率中心波长向短波方向移动，对于 TE 模，透过率随激光入射角度增加而减小，对于 TM 模，透过率随激光入射角度增加而增加，当入射角度变化小于  $15^\circ$  时，中心波长处透过率相对变化小于  $10\%$ 。

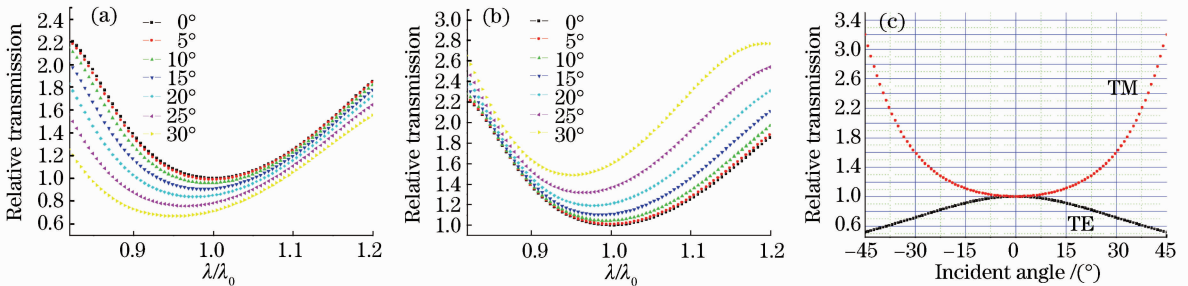


图 3 计算得到的衰减片透过率随入射角度的变化曲线

Fig. 3 Calculated transmission curve of optic attenuator at different incident angles

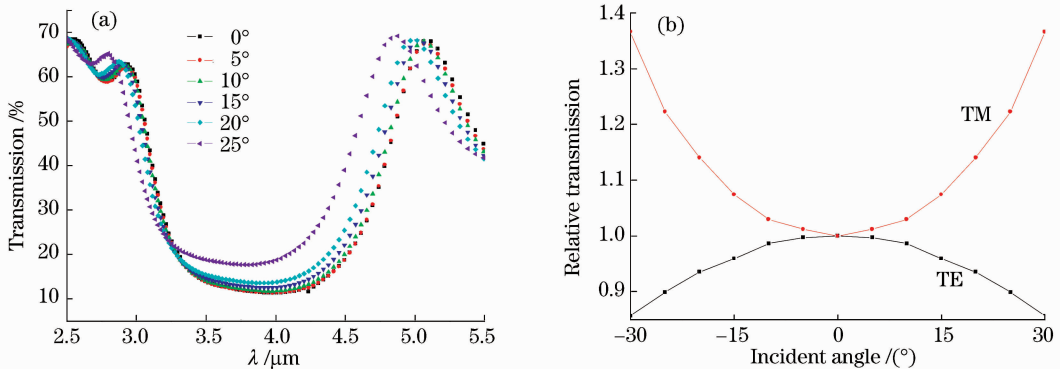


图 4 实测衰减片透过率随入射角度的变化曲线

Fig. 4 Measured transmission curve of optic attenuator at different incident angles

图 4 为实际测量得到的结果,图 4(a)为采用分光光度计测量得到的 TM 模入射时透过率光谱曲线的变化情况,图 4(b)为采用激光光源标定得到的 TE 模和 TM 模入射时透过率随入射角度的变化曲线。由图可知,在入射角度变化小于  $15^\circ$  时,测量结果与理论计算结果比较接近,因此根据实际需要,认为在入射角度为  $\pm 15^\circ$  以内时,光学衰减片透过率近似为常数,其随角度变化可以归入衰减片透过率测量不确定度。

$$R_v = \frac{\eta(\lambda)}{l\omega d} \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot \frac{V_b \tau}{n_0} = \frac{\eta(\lambda)\lambda\tau}{l\omega d h c n_0} \cdot \frac{l}{e n_0 \mu_n \omega d} \cdot I_b = \frac{\eta(\lambda)\lambda\tau}{e \mu_n h c (\tau \omega d n_0)^2} \cdot I_b, \quad (9)$$

式中  $\eta(\lambda)$  为量子效率,  $\tau$  为载流子寿命,  $V_b$  和  $I_b$  分别为加在探测器上的偏压和偏流。高温时热平衡载流子浓度可以表示为

$$n_0(x, T) = \frac{(1 + 3.25 k_b T / E_g) \times 9.56 \times 10^4 E_g^{1.5} T^{1.5}}{1 + 1.9 E_g^{3/4} \exp[E_g / (2 k_b T)]}, \quad (10)$$

式中  $k_b$  为玻尔兹曼常数, 禁带宽度  $E_g$  为

$$E_g = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2) \times 10^{-4} T + 0.35x^4. \quad (11)$$

探测器的  $C_d$  含量  $x = 0.205$ ,  $T$  在  $77 \sim 300$  K 之间时, 电子迁移率近似为

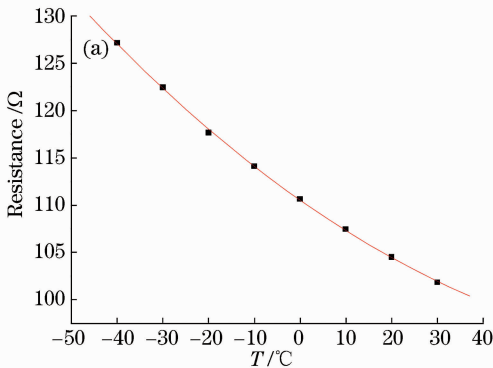
$$\mu(T) = 2.84 \times 10^9 T^{-2.2}. \quad (12)$$

载流子寿命主要由俄歇复合所决定, 其表达式为

$$\tau \propto \frac{1}{n_0^2} \exp\left(\frac{\mu}{1 + \mu} \frac{E_g}{k_b T}\right). \quad (13)$$

由以上分析可以看出, 探测器响应率和元阻抗均随工作温度而变化, 测量得到的探测器元阻抗和响应率随温度的变化曲线如图 5 所示, 图 5(a) 为元阻抗随温度的变化曲线, 图 5(b) 为响应率随温度的变化曲线。采用二次多项式拟合, 可将每个探测器元阻抗随温度变化曲线表示为<sup>[10]</sup>

$$R_{ij}(T) = A_{ij} + B_{ij} T + C_{ij} T^2, \quad (14)$$



#### 4 探测器响应率自适应校正模型

本文所选用的探测器为 n 型  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  光导型探测器, 其元阻抗可以表示为<sup>[9]</sup>

$$R_0 \approx \frac{l}{e n_0 \mu_n \omega d}, \quad (8)$$

式中  $l, \omega, d$  分别为探测器长度、宽度和厚度,  $n_0$  为热平衡电子浓度,  $\mu_n$  为电子迁移率。探测器响应率为

式中  $A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}$  为拟合系数, 同时, 采用指数拟合, 可将探测器响应率随温度的变化曲线表示为

$$R_{v,ij}(T) = R_{v0,ij} \exp[-(T - T_0) / \tau_{ij}], \quad (15)$$

式中  $R_{v0,ij}$  为室温  $T_0$  时探测器的响应率,  $\tau_{ij}$  为拟合得到的响应率随温度的变化率。由 (14), (15) 式可以看出, 通过实验室标定得出每个探测器的室温响应率、元阻抗和响应率随温度的变化曲线。靶斑仪探测器输出信号采用直流惠氏桥电路放大, 通过无光照时放大器直流输出电平可以得到探测器元阻抗, 然后由 (14) 式获取其工作温度, 并采用 (15) 式对其响应率实时修正, 因而不需要对探测器进行温度监测和控制, 即可实现宽温度范围内中红外激光功率密度的定量测量。

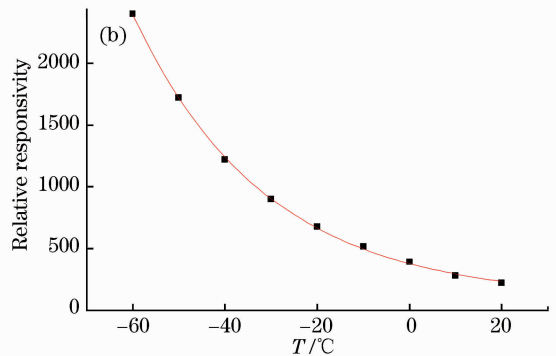


图 5 探测器元阻抗和响应率随温度的变化曲线

Fig. 5 Resistance and responsivity of detector at different temperatures

## 5 光斑复原和参数分析

测量得到激光远场光斑功率密度分布为  $12 \times 12$  的二维矩阵  $S(t)$ , 为光斑显示需要, 采用 16 点线性插值, 扩展后光斑数据为

$$\begin{aligned} S_{I,J} &= S_{m,n} \times \frac{i}{16} \times \frac{j}{16} + S_{m,n+1} \times \frac{i}{16} \times \frac{16-j}{16} + \\ &S_{m+1,n} \times \frac{16-i}{16} \times \frac{j}{16} + S_{m+1,n+1} \times \frac{16-i}{16} \times \frac{16-j}{16}, \end{aligned} \quad (16)$$

式中  $m, n$  为原始坐标,  $I, J$  为扩展后坐标, 且  $I = 16m + i, J = 16n + j$ , 复原得到的远场典型积分光斑如图 6 所示。光斑质心坐标为

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{12} x_i S_{i,j}(t)}{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{12} S_{i,j}(t)}, \\ \bar{y}(t) &= \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{12} y_j S_{i,j}(t)}{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{12} S_{i,j}(t)}, \end{aligned} \quad (17)$$

式中  $x_i$  和  $y_j$  为第  $i$  行、第  $j$  列探测器的坐标值, 光斑环围半径  $r$  可表示为

$$\sum_{r_{i,j} \leq r} S_{i,j} = 56.5\% \times \sum_{i,j} S_{i,j} = P_{\text{IB}}, \quad (18)$$

式中  $r_{ij} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_j - y)^2}$ ,  $P_{\text{IB}}$  为 56.5% 桶中能量, 光束质量为

$$\beta = r/r_0 = rD/1.22\lambda L, \quad (19)$$

其中  $r_0$  为理想光斑半径,  $D$  为激光器发射口径,  $L$  为激光传输距离。

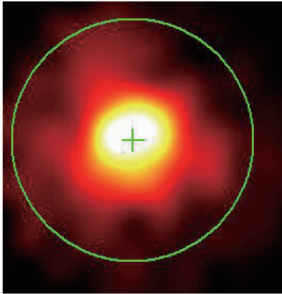


图 6 测量得到的远场积分光斑

Fig. 6 Mearsued far-field integral beam profile

由(3)式可以看出, 功率密度测量不确定度包括探测器电压  $V_{ij}$ , 探测器响应率  $R_{v,ij}(T)$ , 光学衰减片透过率  $T_f$ , 放大器放大倍数  $A_{ij}$  和探测器光敏面积  $A_D$  等几部分组成, 其中  $V_{ij}$  测量不确定度为 2%,  $R_{v,ij}(T)$  标定和修正不确定度合计为 15%,  $T_f$  不确定度(含角度变化)为 12%,  $A_{ij}$  不确定度为 3%,  $A_D$  不确定度为 1%, 因而功率密度合成测量不确定度为 20% ( $k=2$ )。

## 6 结 论

介绍了基于室温中红外 HgCdTe 探测器的光电阵列靶斑仪, 简要分析了各关键组成部分的设计原则和基本特性, 并提出了中红外探测器响应率温度自适应实时校正模型, 大大拓展了靶斑仪的工作温度范围, 降低了测量不确定度。靶斑仪工作温度范围为  $-60 \sim 40$  °C, 系统可测激光波长为  $1 \sim 5$   $\mu\text{m}$ , 有效测量光斑尺寸为  $\phi 320$  mm, 空间分辨率为 2.5 cm, 数据刷新率为 25 Hz, 测量动态范围为 1000 倍, 测量不确定度优于 20%。

## 参 考 文 献

- Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin *et al.*. Propagation of coherently combined laser beam in turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11):2051~2056  
周朴, 许晓军, 刘泽金等. 相干合成光束在湍流大气中的传输[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11):2051~2056
- Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4):773~778  
刘泽金, 周朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4):773~778
- Wei Jifeng, Zhang Kai, Qian Shaosheng *et al.*. Evaluation of uncertainty in online energy measurement of high energy laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7):1103~1106  
魏继锋, 张凯, 钱绍圣等. 高能激光能量在线测试中的不确定度分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(7):1103~1106
- Gao Xueyan, Su Yi, He Junzhang *et al.*. Uncertainty of spot moment parameters measured with array detectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10):1411~1416  
高学燕, 苏毅, 何均章等. 光斑矩参量阵列测试法的测量不确定度[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10):1411~1416
- Liu Zejin, Lu Qisheng, Zhao Yijun. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(3):193~196  
刘泽金, 陆启生, 赵伊君. 高能非稳腔激光器光束质量评价的探讨[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(3):193~196
- Ye Hongwei, Li Xinyang, Xian Hao *et al.*. Relationship between Zernike wavefront errors and beam quality factor  $\beta$  for optics system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6):1420~1427  
叶红卫, 李新阳, 鲜浩等. 光学系统的 Zernike 像差与光束质量  $\beta$  因子的关系[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6):1420~1427
- C. Higgs, P. C. Grey, J. G. Mooney *et al.*. Dynamic target board for ABL-ACT performance characterization [C]. *SPIE*, 1999, **3706**:216~226
- M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun transl.. Beijing: Science Press, 1978. 85~101  
M. 玻恩, E. 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨嘉孙译. 北京: 科学出版社, 1978. 85~101
- Chu Junhao. Narrow Gap Semiconductor Physics [M]. Beijing: Science Press, 2005. 933  
褚君浩. 窄禁带半导体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 933
- Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Qunshu *et al.*. Development of detect module for mid-infrared laser power density measuring [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