

文章编号: 0258-7025(2009)08-1979-07

# 中红外高能激光光斑探测器

杨鹏翎<sup>1,2</sup> 冯国斌<sup>2</sup> 王群书<sup>2</sup> 王振宝<sup>2</sup> 程建平<sup>1</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** 为定量测量中红外高能激光的总能量和功率密度时空分布, 采用热吸收和光电量热复合相结合的测量方法, 通过热吸收体温度场分布数值计算和探测器结构设计, 研制了可用于长脉冲中红外高能激光测量的光斑探测器。探测器由量热堆、光电量热复合探测阵列、测温单元、数据采集单元和信号处理单元等几部分组成。有效测量面积为 12 cm×12 cm, 光斑测量空间分辨率为 2.4 cm, 时间分辨率为 25 Hz, 总能量测量不确定度小于 10%, 功率密度测量不确定度小于 7%。实验表明, 该探测器可测量最大能量超过 50 kJ 的数秒级脉冲中红外激光, 采用该方法, 可实现大面积、高能量和高空间分辨的高能激光光斑测量。

**关键词** 光学仪器; 高能激光; 探测器; 光电量热复合; 光斑测量

**中图分类号** TN247

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL20093608.1979

## Mid-Infrared High Energy Laser Beam Sensor

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

(<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** A high energy laser beam sensor is developed using photoelectric and calorimetric compound method by temperature field calculation and structure design in order to measure long pulse mid-infrared laser. The sensor can measure the total energy and power density distribution. It is consisted of calorimetric pile, photoelectric and calorimetric compound detector array, temperature field sensors, analog to digital converter and signal processor. The sensor has the effective sensitive area of 12 cm×12 cm, the spatial resolution of 2.4 cm, and the temporal resolution of 25 Hz, with the total energy measurement uncertainty of less than 10% and the power density distribution measurement uncertainty of less than 7%. The experimental datas prove that the method can be used in high energy, large area and high spatial resolution laser beam measurement.

**Key words** optical device; high energy laser; sensor; photoelectric and calorimetric compound method; beam measure

## 1 引 言

随着高能激光在机械、电子、航空、汽车、造船等领域的广泛应用<sup>[1]</sup>, 高能激光器的优越性已越来越被人们所认识。化学激光、气体激光和固体激光技术的日益成熟, 进一步拓展了高能激光的应用空间。目前, 输出功率超过万瓦的连续高能激光器已非常普遍, 但对高能激光光斑的准确测量, 依然是一个技术难题。高能激光能量大、功率密度高, 普通激光测量手段难以适用, 目前常用的测量方法主要有能量

烧蚀法、漫反射成像法<sup>[2]</sup>、扫描取样法<sup>[3]</sup>、量热法<sup>[4~7]</sup>和光电阵列探测法<sup>[8]</sup>等。前两种方法简单易行, 是高能激光测量的常用手段, 但测量不确定度大, 多用作定性测量; 扫描取样法可实现光斑在线测量, 但系统结构复杂, 且难以实现准确定量测量; 量热法在能量定量测量中具有优势。目前成熟的激光功率和能量计多采用量热法实现, 是目前比较认可的高能激光能量测量手段, 但时间分辨能力较差, 存在一定局限; 光电阵列法也是激光光斑测量的有效手

收稿日期: 2008-08-12; 收到修改稿日期: 2008-10-24

基金项目: 国防预研基金(21110501)资助项目。

作者简介: 杨鹏翎(1979—), 男, 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: Wangqunshu@tsinghua.org.cn

段,光电探测器响应速度快,对可见和近红外激光测量,可采用 Si 或 InGaAs 光电探测器来实现。美国林肯实验室曾利用 1536 个 InGaAs 探测器单元组成的光电阵列,测量得到了机载激光器(ABL)激光减功率发射的激光光斑,给出了斯垂耳(Strehl)比、环围能量和光束抖动等一系列参数<sup>[9]</sup>。但针对中红外波段的光电探测器如 InSb, HgCdTe, PbSe 等响应率对温度很敏感,所以多用于激光功率密度相对测量<sup>[10]</sup>。

本文针对测量需要,采用量热法和光电探测相结合的方式,研制了一种可用于脉冲持续时间为数秒的中红外高能激光光斑定量测量的探测器,并通过实验验证了该方法的可行性。

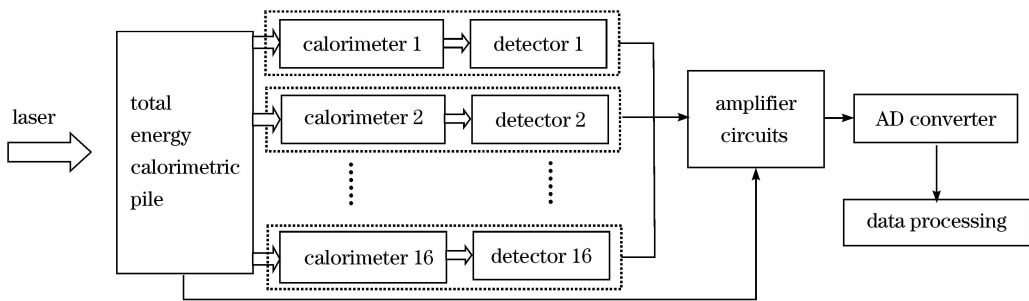


图 1 激光光斑探测器结构框图

Fig. 1 Functional block diagram of laser beam sensor

用于高能激光测量的量热材料,要有大比热、高热导率和高辐射吸收系数,以及良好的抗氧化性能和低热膨胀系数。一般金属材料辐射吸收系数低、热容小、熔点低,不适于高能激光测量。结合国内外激光能量探测经验,选用具有高纯度、高密度、高硬

## 2 探测器基本组成和测量原理

探测器采用量热和光电探测相结合的测量方法,系统组成如图 1 所示,主要包括量热堆、量热器阵列、光电探测器阵列、放大电路、数据采集单元和数据处理单元等几个部分。量热堆用于测量入射激光总能量,热堆吸收体上设计 16 通道阵列式光取样孔。采用量热器阵列测量取样孔后透过激光能量,给出光斑能量分布。光电探测器阵列用于监测量热器表面散射光,获取时间信息。输出信号经调理放大和模数转换,送入计算机实现数据处理。

度的“三高”石墨作为量热材料,为保证吸收体表面良好的抗氧化性能和漫反射特性,石墨的颗粒度控制在  $10 \mu\text{m}$  以内。测量得不同温度下石墨材料的热导率和热容见表 1。

表 1 不同温度时石墨材料的热导率和热容

Table 1 Conductivity and thermal capacity at different temperature of graphite

$T/\text{C}$	25	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$C/(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	706	822	1052	1213	1332	1452	1549	1601	1646	1674	1618
$\lambda/(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	88.5	82.2	75.1	70.1	63.6	60.4	57.6	54.3	51.3	48.8	43.6

系统基本原理如图 2 所示。图中最左边为量热堆,主要由石墨吸收体和热电偶阵列组成,热电偶冷端固定于铝热沉板上,吸收体迎光面接收激光能量,其余面绝热。激光加载时,能量被吸收体吸收转化为温升,由热电偶测量给出,设热吸收体边长为  $a$ ,厚度为  $h$ ,则入射激光总能量可表示为

$$E = \frac{\eta}{i} \sum_i \rho a^2 h \int_{T_0}^{T_i} C(T) dT, \quad (1)$$

式中  $i$  为热电偶单元数,  $\rho$  为量热材料密度,  $C$  为热容,  $\eta$  为表面二次辐射、对流换热以及内部温度场非均匀性引起的修正系数,通过优化吸收体结构和热电偶阵列埋设位置,可降低不同参数加载激光时的表面热损失和温度场测量不均匀性,此时  $\eta$  可以近

似为常数,并由实验标定获得。

吸收体上沿激光入射方向均布了 16 个阵列光取样孔,用于量热器阵列的能量分布取样测量。取样孔设计为  $15^\circ$  的锥型,以增大光斑取样视场角。量热器阵列位于能量取样孔后,由石墨吸收体和热电偶组成,吸收体迎光面与激光入射方向呈  $45^\circ$  角。后表面固定于铝热沉板上,为传导型设计。通过控制吸收单元上取样孔的通光面积,使量热器接收能量适中,温升不会过高,因而表面辐射和对流热损失可忽略,大大降低测量不确定度。以第  $i$  通道为例,激光从前表面加载,设功率为  $P_i(t)$ ,后表面温度恒为  $T_0$ ,其他表面均绝热。为简单计算,采用集总参

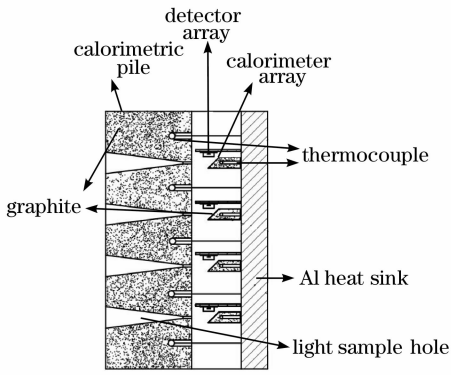


图 2 激光光斑探测器

Fig. 2 Laser beam sensor

数法,假设量热器内部导热热阻远小于后表面换热热阻,则有

$$\rho CV \frac{d\Delta T_i}{dt} = -\lambda A \frac{\Delta T_i}{d} + P_i(t), \quad (2)$$

式中  $\Delta T_i$  为量热器温升,  $d$  为量热器厚度,  $A$  为后表面截面积。由于激光功率变化远高于量热器响应频率,对量热器响应,入射激光可近似等效为  $P_i(t) = P_{i0} [u(t) - u(t - t_0)]$ , 其中  $P_{i0}$  为激光平均功率,  $t_0$  为激光脉宽,计算得

$$\Delta T_i(t) = \frac{P_{i0} d}{\lambda A} \left\{ [u(t) - e^{-\frac{\lambda}{\rho CV d} t} u(t)] - [u(t - t_0) - e^{-\frac{\lambda}{\rho CV d} (t - t_0)} u(t - t_0)] \right\}. \quad (3)$$

(3) 式中指数项由两部分组成,  $\lambda A/d$  代表热传导常数,  $\rho CV$  为体热容,二者比值代表量热器的热时间常数,通过调整几何结构来改变,激光平均功率可由量热器温升曲线获得。

光电探测器阵列与量热器阵列相对应,紧靠量热器前表面,用于测量量热器表面散射光功率,探测器输出信号与量热器表面入射激光功率呈正比,因而量热器表面入射功率为

$$P_i(t) = P_{i0} V_i(t) t_0 / \int_0^{t_0} V_i(t) dt, \quad (4)$$

式中  $V_i(t)$  为光电探测器输出电压。

### 3 理论分析和设计

#### 3.1 量热堆

量热堆的吸收体前表面积由待测光斑尺寸决定,本文取  $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ ,厚度由待测激光功率密度和加载时间决定。为提高灵敏度,吸收体温升应尽量高,另一方面,由于石墨材料不是理想导体,内部存在温差,温升过高会导致表面损伤,表面二次辐射造成的热损失也会大大增加,给测量带来较大影响。当厚度小于激光加载时间  $t_0$  内温度纵向传播

距离  $\sqrt{\pi \alpha t_0}$  时 ( $\alpha = \lambda/\rho C$ , 为材料热扩散常数),增加吸收体厚度可降低表面温升,当厚度超过此值时,最大温升将趋于稳定,增加厚度就没有意义。本文所用石墨材料密度  $\rho = 1.84 \text{ g/cm}^3$ ,激光最大加载时间  $t_0 = 5 \text{ s}$ ,计算得  $\sqrt{\pi \alpha t_0} = 3.3 \text{ cm}$ ,因此取吸收体厚度为  $4 \text{ cm}$ 。

由傅里叶热传导方程,吸收体内部温度场分布可表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial [\rho C(T) T(x, y, z, t)]}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \\ &\frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \\ &\frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

由吸收体结构,迎光面为热流边界,其余面为绝热边界,边界条件和初始条件分别为  $\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(t)$ ,  $\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0$ ,  $\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=\pm a/2} = 0$ ,  $\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=\pm a/2} = 0$ ,  $T(x, y, z, 0) = T_0$ , 迎光面

热流为  $q(t) = P(t) - \sigma(T^4 - T_0^4) - h(T - T_0)$ , 式中玻尔兹曼常数  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ , 对流换热系数  $h = 10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。采用有限元法计算激光加载时单元内部温度场变化。假设加载激光是半径为  $4 \text{ cm}$  的理想高斯光斑

$$P(t) = P e^{-(x^2 + y^2)/16} [u(t) - u(t - t_0)], \quad (6)$$

改变激光功率和加载时间,得表面最大温升曲线如图 3 所示。图 3(a) 中加载时间为  $1 \text{ s}$ ,由图知表面最大温升与激光加载功率近似呈线性。图 3(b) 中激光功率为  $40 \text{ kW}$ ,拟合得最大温升

$$T_{\max} = 348.62 + 374.23 t_0 - 25.63 t_0^2, \quad (7)$$

非线性主要由表面二次辐射所致。

当激光功率  $40 \text{ kW}$ ,加载时间为  $5 \text{ s}$  时,计算得吸收体温度分布见图 4。图中左边为表面温度分布,右边为纵向中心剖面上温度分布。激光加载时热流主要沿纵向传播,主要原因是激光光斑空间频率低,迎光面相邻点接收能量差异较小,导致温度梯度以纵向为主。采用无限大平板近似,认为吸收体内任一点的温度值主要取决于其在迎光面投影区激光加载能量,选取合适深度为测温点,可反演出前表面入射能量<sup>[4]</sup>。图中  $5 \text{ s}$  时纵向温度最大传播距离小于  $3 \text{ cm}$ ,为保证温升随激光加载时间呈线性,设

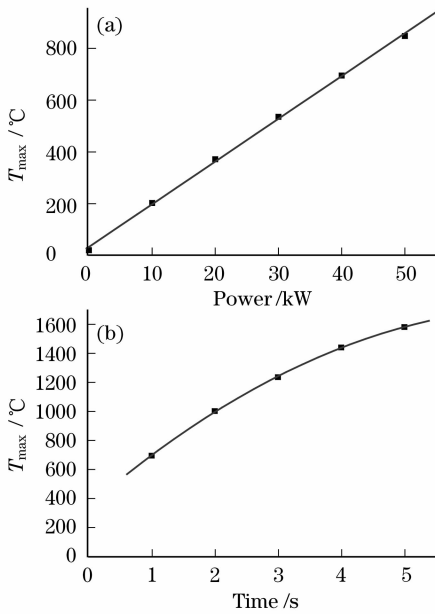


图 3 热吸收体表面温度变化曲线。(a)不同激光功率；  
(b)不同加载时间

Fig. 3 Surface temperature rise of calorimetric pile. (a) at different laser power; (b) at different laser pulse width  
计测温点距迎光面 3 cm。为降低入射激光位置变化可能引起的输出信号差异,热电偶间隔应小于距迎光面距离,取 2.8 cm,热电偶分布见图 5。因测温点温度变化缓慢(约为 100 °C),假设(1)式中热容近似与温度无关,则可将 12 个热电偶串联为热电堆,以减少测温通道,优化系统结构,同时提高测量信噪比。

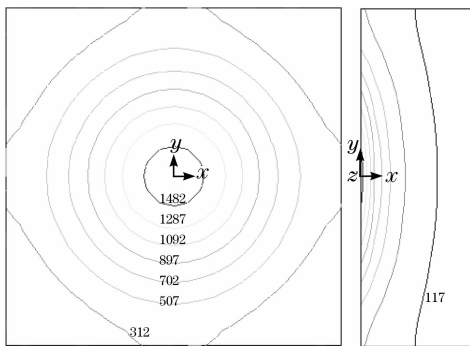


图 4 热吸收体温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in the calorimetric pile

图 6 给出了激光入射位置不同时热电堆的温升曲线。激光加载功率为 4 kW,时间 1 s,曲线 1 为正入射时热电堆温升,曲线 2 为偏置(1 cm, 1 cm)时热电堆温升。由图知最大温升分别为 237 °C 和 229 °C,不一致性小于 4%。

改变激光功率和加载时间,得热电堆升温曲线如图 7 所示,图 7(a)激光功率为 40 kW,最大温升

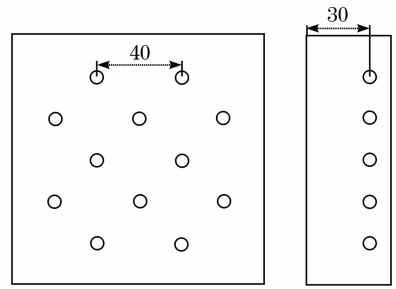


图 5 热电偶分布示意图

Fig. 5 Distribution of thermocouple in the calorimetric pile structure

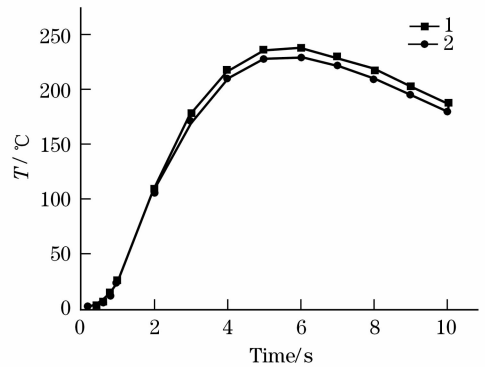


图 6 入射激光位置不同时热电堆温升曲线

Fig. 6 Temperature rise curve of thermopile with different incidence spot

随加载时间变化如图 7(b)所示,拟合得

$$T_{\max} = 10.52 + 238.86t_0 - 11.14t_0^2. \quad (8)$$

图 7(c)激光加载时间为 1 s,最大温升随功率变化曲线如图 7(d)所示,拟合得

$$T_{\max} = (3.98 + 64.20P - 1.46P^2) \times 10^{-4}, \quad (9)$$

(8)式和(9)式的二次项主要是由前表面二次辐射所引起的。

### 3.2 量热器阵列

取  $d = 12.5 \text{ mm}$ ,  $A = 25 \text{ mm}^2$ ,由(3)式得热时间常数为 2.29 s,取  $P = 10 \text{ W}$ ,  $t_0$  分别为 1 s, 5 s 和 10 s,计算得量热器温升曲线如图 8 所示。采用有限元法,计算得加载激光功率为 10 W,时间为 5 s 时,量热器中心剖面上温度分布如图 9 所示。由图可知,沿纵向距激光入射点一定位置后,温度梯度趋于均匀,温升与入射激光功率呈线性关系,同时,为提高灵敏度,测温点需尽量靠近激光入射点,因此本文中热电偶埋深位置为正中心距入射点 2.5 mm 处。

### 3.3 光电探测器阵列

选用室温中红外 HgCdTe 光导探测器,并采用直流惠氏桥电路放大。光电探测器测量光谱范围为  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ,工作偏流为 4 mA,室温下元阻抗为  $100 \sim$

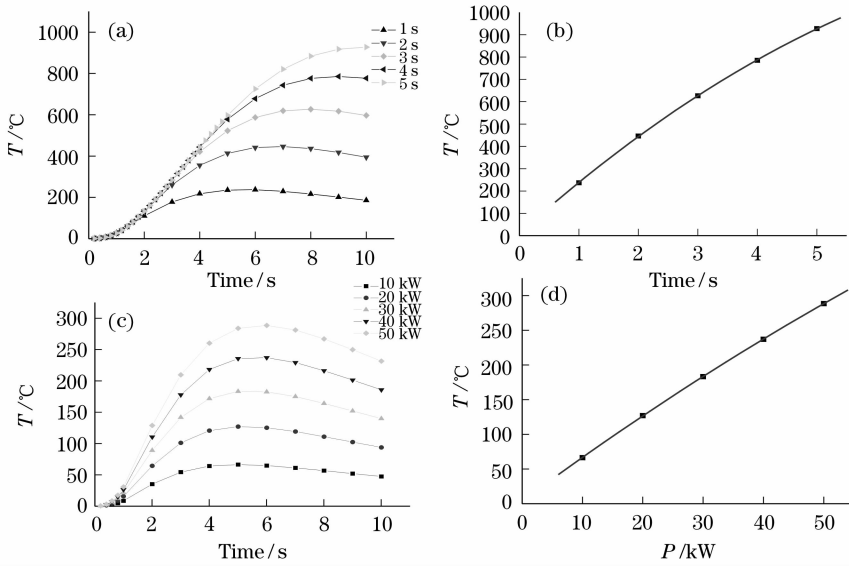


图 7 不同激光功率和加载时间时热电堆的温升曲线

Fig.7 Temperature rise of thermopile with different laser power and pulse width

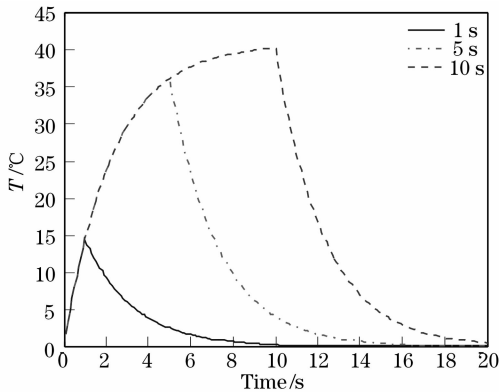


图 8 不同加载时间时量热器的温升曲线

Fig.8 Temperature rise of calorimeter with different laser pulse width

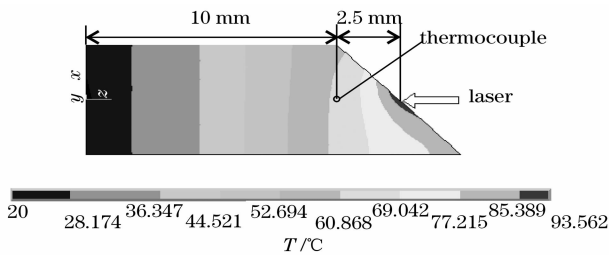


图 9 量热器温度分布

Fig.9 Temperature distribution in the calorimeter

200 Ω, 响应率大于 100 V/W, 探测器探测率  $D^*$  大于  $10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ , 响应时间小于  $1 \mu\text{s}$ 。由于光电探测器仅测量散射激光相对强度, 只需保证测量线性动态范围即可, 无需严格标定, 响应率温度特性也不用考虑。

### 4 系统实验验证和考核

#### 4.1 量热堆实验考核

采用长波红外激光器, 对热吸收单元温度响应进行了验证。当激光参数分别为功率 3486 W, 脉宽 3 s 和功率 3190 W, 脉宽 10 s 时, 热电堆输出曲线如图 10 所示。由图可知, 当输出能量为 10458 J 时, 最大温升为  $91.284 \text{ }^\circ\text{C}$ , 响应系数为  $114.57 \text{ J}/^\circ\text{C}$ , 当输出能量为 31900 J 时, 最大温升为  $273.964 \text{ }^\circ\text{C}$ , 响应系数为  $116.44 \text{ J}/^\circ\text{C}$ , 两次测量响应系数平均值为  $115.51 \text{ J}/^\circ\text{C}$ , 不一致性小于 2%。

#### 4.2 量热器和光电探测器阵列标定

采用光纤激光器, 分别改变激光加载时间和功率, 测量了量热器特性曲线, 第  $i$  通道结果如图 11 所示, 图 11(a) 中激光功率为 10 W, 由图可知量热单元最大温升与加载时间呈指数关系, 对上升段曲

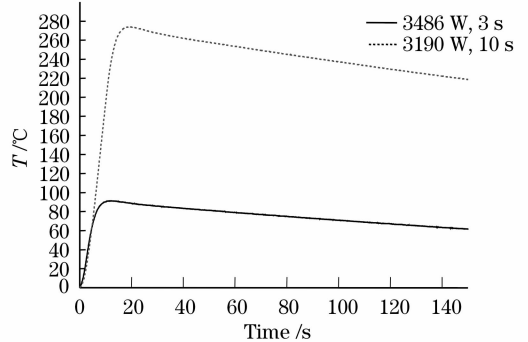


图 10 CO<sub>2</sub> 激光标定量热堆响应曲线

Fig.10 Measured calorimetric pile response curve with CO<sub>2</sub> laser

线拟合,可知热电偶温升随加载时间曲线为

$$\Delta T_i = 63.71 \times (1 - e^{-t/3.943}). \quad (10)$$

功率呈线性关系,因此(10)式可以写为

$$\Delta T_i = 6.371 \times (1 - e^{-t/3.943}) P_{i0}, \quad (11)$$

图 11(b)中加载时间为 10 s,可以看出最大温升与

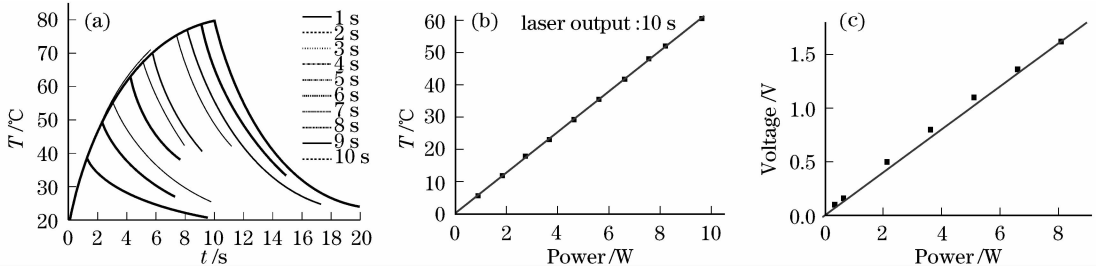


图 11 光电量热复合探测器典型特性曲线。(a)量热器温升-加载时间;(b)量热器最大温升-功率;(c)光电探测器幅度-功率  
Fig. 11 Typical characteristic curve of photoelectric and calorimetric compound detector. (a) temperature rise curve of calorimeter with different pulse width; (b) maximal temperature rise at different incident power; (c) amplitude of photon detector at different incident power

式中  $P_{i0}$  可由激光脉宽和热电偶温升得出。图 11(c) 为 HgCdTe 光电探测器输出信号随入射激光功率变化曲线,二者呈线性关系。量热器温度响应曲线可通过实验标定,测量不确定度较低,本文为 5%,光电探测器引起不确定度为 4%,因此由(4)式得出的功率测量不确定度为 7%。

### 4.3 系统主要技术指标

最终研制的光斑探测器,由探测器部分和数据采集系统两部分组成,测量结果送入计算机进行数据处理。系统主要技术指标见表 2。

表 2 光斑探测器主要技术指标

Table 2 Main technical specifications of laser beam detector

	Dynamic range	Uncertainty	Remarks
Total energy	1~200 kJ	10%	Active area of 12 cm×12 cm
Energy distribution	1~200 J	5%	Spatial resolution of 2.4 cm
Power distribution	0.2~20 W	7%	Temporal resolution of 25 Hz

### 5 系统考核实验

采用中红外激光器对测量系统考核,共进行了 B,D,E 3 次实验,得到热电堆响应曲线如图 12 所示,相应热吸收单元测量结果见表 3。某次实验中光电量热复合探测器阵列测量结果如图 13 所示,共有 4 个通道接收到激光信号,图 13(a)为各通道热电偶温升,图 13(b)为光电探测器输出信号,图 13(c)为计算得到的各通道测量功率,相应测量结果见表 4。

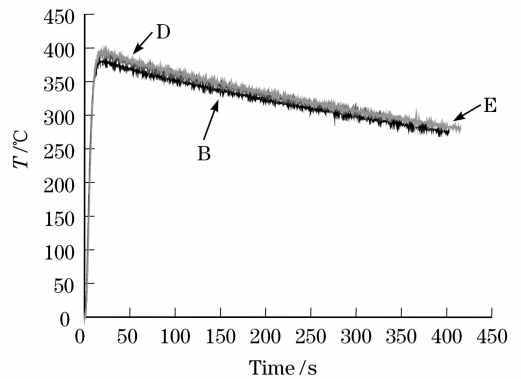


图 12 中红外激光考核实验量热堆响应曲线

Fig. 12 Measured calorimetric pile response curve with mid-infrared laser

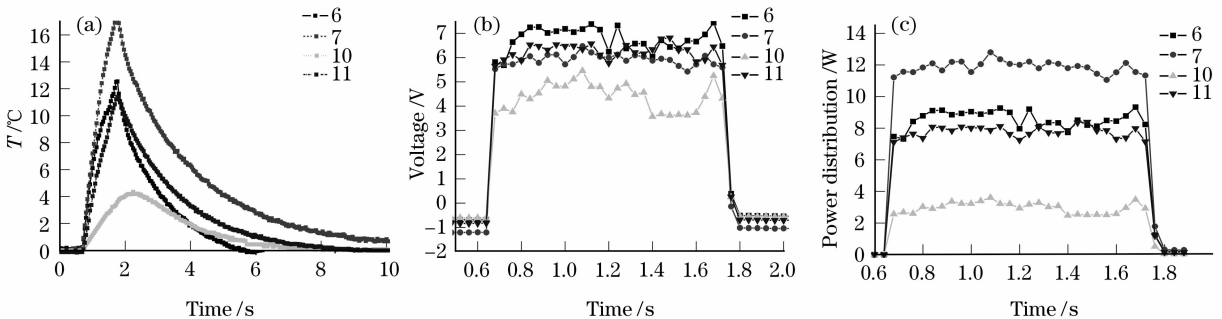


图 13 中红外激光考核实验光电量热复合探测器阵列测量结果

Fig. 13 Measurement results of photoelectric and calorimetric compound detector array in mid-infrared laser experiment

表3 热吸收单元测量结果

Table 3 Measurement results of calorimeter

	Laser power /kW	Laser pulse width /s	Temperature rise /°C	Measured energy /kJ	Maximal error /%
B			379.95	43.9	
D	36	1.2	391.58	44.2	6
E			394.88	45.6	

表4 量热器阵列测量结果

Table 4 Measurement results of calorimeter array

No.	Temperature rise /°C	Measured average power /W
6	12.55	7.51
7	17.40	10.41
10	4.35	2.60
11	11.39	6.81

## 6 结 论

采用量热堆和光电量热复合阵列相结合的方法,通过温度场分布理论计算和探测器结构设计,研制了可用于中红外高能激光能量和光斑分布测量的探测器。探测器最大可探测能量超过 50 kJ,有效探测面积为 12 cm×12 cm,空间分辨率为 2.4 cm,总能量测量不确定度小于 10%,功率密度测量不确定度小于 7%。实验结果表明,该方法可用于高能量、大面积中红外激光光斑测量,但受实验条件限制,探测器没有进行高能激光测量量程内的全系统标定,能量测量不确定度有待提高。在实际测量中,测量光斑面积和空间分辨率也需进一步提高。

## 参 考 文 献

- 1 Qi Junfeng, Niu Zhen, Zhang Dongyun *et al.*. Control of shaping of welds for CO<sub>2</sub> laser welding shipbuilding T-section aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 297~302
- 2 Liu Feng, Wu Zhensen, Wang Lijun *et al.*. Reconstruction theory of laser beam intensity temporal and spatial distribution measurement by thermal image method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 98~104
- 3 刘峰, 吴振森, 王立君等. 热图法测量激光强度时空分布的重构理论研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 98~104
- 4 J. V. Gilse, S. Koczera, D. Greby. Direct laser beam diagnostics [C]. *SPIE*, 1991, **1414**: 45~54
- 5 Antonio R. Marujo, Edward C. Hensel. High energy laser beam diagnostics [C]. *SPIE*, 1993, **1871**: 265~278
- 6 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
- 7 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
- 8 Guan Youguang, Fu Shuzhen, Gao Xueyan *et al.*. A novel high energy laser beam detector form easuring energy distribution[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(2): 175~180
- 9 关有光, 傅淑珍, 高学燕等. 一种新型高能激光光束能量分布探测器[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(2): 175~180
- 10 Li Gaoping, Wang Lei, Yang Zhaojin *et al.*. Study on the measurement of long pulse high power laser energy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1111~1114
- 11 黎高平, 王雷, 杨照金等. 长脉冲高能激光能量测试技术的研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(9): 1111~1114
- 12 E. A. Mnatsakanyan, V. I. Andreev, S. I. Bestalanny *et al.*. Measuring device for space-temporal characteristics of technological lasers radiation [C]. *SPIE*, 1991, **1414**: 130~133
- 13 C. Higgs, P. C. Grey, J. G. Mooney *et al.*. Dynamic target board for ABL ACT performance characterization [C]. *SPIE*, 1999, **3706**: 216~222
- 14 John R. Albertine. History of navy HEL technology development and systems testing [C]. *SPIE*, 2002, **4632**: 32~37