

基于光电探测的多光谱测温装置

张磊*, 陈绍武, 赵海川, 王平, 武俊杰

(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: 为了实现非接触式高温测量, 本文基于多光谱辐射测温理论, 采用多路光电探测器, 设计了多光谱快响应测温系统。对测量装置的测量原理、系统结构、系统标定等进行了阐述和分析。接着利用标准钨灯对装置进行了光谱响应系数标定, 并通过标准辐射源进行了温度测量的实验验证, 验证了测量装置用于高温测量的准确性。

关键词: 多光谱辐射; 温度测量; 光电探测; 快响应

中图分类号: TB942 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20191202.0289

Multi-spectral temperature measuring system based on photoelectric detection

ZHANG Lei*, CHEN Shao-wu, ZHAO Hai-chuan, WANG Ping, WU Jun-jie

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

* Corresponding author, E-mail: zhanglei@nint.ac.cn

Abstract: In order to achieve non-contact high temperature measurement, multi-spectral fast-response temperature measuring system adopting multichannel photoelectric detectors is designed based on multispectral radiation temperature measured theory. The measuring principle, the system structure and calibration of the measuring system is elucidated and analyzed. The spectral response coefficient is standardized by the tungsten lamp. Experiments are carried out by measuring the temperature of the standard radiation source, demonstrating that this device is reliable in high temperature measurement.

Key words: multi-spectral radiation; temperature measurement; photoelectric detection; fast response

1 引言

辐射法测温技术因拥有非接触式测量的优势,一直以来深受人们的关注,尤其在爆炸场测温领域,一直是广大学者研究探索的热门领域^[1-3]。爆炸场温度测量过程中,由于被测目标场的温度通常高达数千度,而爆炸反应历程非常短,需要测量系统的响应速度达到纳秒乃至微秒量级。同时,有些场合需要满足远距离传输、抗震动、抗电磁干扰等要求,传统的温度测量方法难以适用,辐射法测温体现出了明显的优势。目前,国内外已有的辐射场非接触式温度测量方法主要包括比色测温法^[4]、6波长测温法^[5]、8波长高温计^[6]和光谱测量法等以及由以上方法衍生出来的相关方法。

本文基于多光谱测温理论,利用光电探测技术响应速度快的优势,研制了响应时间为百纳秒的多光谱测温装置。实现了高温辐射源的高温测量,为爆炸场温度测量提供了设计思路和技术支持。

2 多光谱辐射测温理论

绝对黑体的辐射强度是波长和温度的函数,辐射强度 $E(\lambda, T)$ 可用普朗克公式表示为下式^[7-9]:

$$E(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}, \quad (1)$$

式中, λ 为工作波长, T 为工作温度, C_1 和 C_2 分别为第一辐射常数和第二辐射常数。通过测量某波段的辐射功率可以间接得到辐射场的温度,如图1所示。

通常,光谱辐射场的辐射强度受其表面发射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 的影响,因此辐射测温原理可以用公式(2)表示。

$$E(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}. \quad (2)$$

辐射温度为 3 000 K 以下时,可将辐射测温的普朗克公式(2)近似为维恩公式(3),使问题的

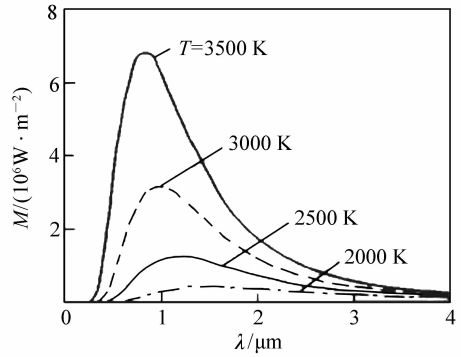


图1 不同温度下的谱功率密度出射率与波长的关系

Fig. 1 Relationship between the emissivity of spectral power density and wavelength at different temperature

讨论和计算得到简化。

$$E(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda T)}. \quad (3)$$

对公式(3)两边取对数,可以得到:

$$\ln E(\lambda, T) + 5 \ln \lambda + C_2/\lambda T - \ln C_1 = \ln \varepsilon(\lambda, T), \quad (4)$$

其中, $\ln E(\lambda, T)$ 是测量值, C_1 是常数, 预设波长 λ 也是已知的, 因此可以设 A 的表达式如下:

$$A = \ln E(\lambda, T) + 5 \ln \lambda - \ln C_1. \quad (5)$$

根据经验, 当温度低于 3 000 K 时, 可假设光谱发射率的对数与波长具有以下关系:

$$\ln \varepsilon(\lambda, T) = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + \dots + a_m \lambda^m, \quad (6)$$

由式(4)~式(6)得到:

$$A \lambda = -\frac{C_2}{T} + a_0 \lambda + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda^3 + \dots + a_m \lambda^{m+1}. \quad (7)$$

测量时, 取 n 个波长处的光谱强度进行测量, 即可得到 n 个方程。方程组有解的必要条件是 $n \geq m + 2$, 求出 $m + 2$ 个系数, 便可拟合出动态温度。

3 基于光电探测的多光谱测温装置

3.1 辐射测温装置

多光谱辐射测温装置主要由准直透镜、传输光纤、分光单元、探测阵列^[10-11]、数据采集单元及

电脑终端组成。其总体结构如图2所示。

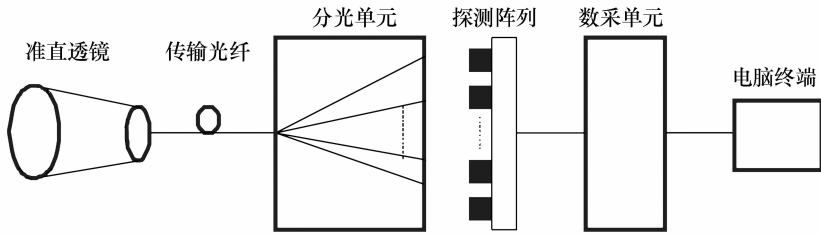


图2 测温装置总体结构示意图

Fig.2 Structure schematic of temperature measuring device

系统工作过程中,准直透镜对准待测区域,待测温度场的辐射光信号通过系统前端的准直透镜耦合进入测量系统,经光纤传输后进入分光单元,分光单元在一定波长范围内对光信号进行波长选择,将其分成多路光信号,之后进入多元线性探测阵列,不同波长的光信号经过探测阵列转换成电信号,输出的电信号被高速数据采集单元进行采集处理。根据探测阵列的响应率计算得到每一路入射光的辐射强度,通过多波长点的辐射强度拟和得出待测区域的温度。

3.2 分光单元及探测阵列

测量装置的分光单元主要包括分光光栅与反射镜组,结合所采用探测阵列的光谱响应范围,分光单元将入射信号光在300~800 nm波段均匀分成32路,选取每段的中心波长作为测量波长。通过反射镜组的多次反射,进行光束整形,最终形成平行光束后进入后面的线性探测阵列。

探测阵列是由快速响应的光电探测单元组成的32路线性阵列,每个探测单元分别对应前面分光单元的一路输出信号。为了满足快速响应,探测单元响应时间小于1 ns。由于辐射信号强度较弱,设计增益大于 10^6 。光信号经探测阵列完成光电转换后输出32路电压信号被数据采集模块采集。

3.3 测量装置标定

光电探测阵列作为测量装置的传感器,每一路探测单元对应的波长响应系数需通过标定给出。该装置研制过程中利用已知输出光谱能量的卤钨灯光源对测量装置进行响应系数标定。卤钨灯输出光谱曲线及实测的探测阵列光谱响应系数分别如图3、4所示。

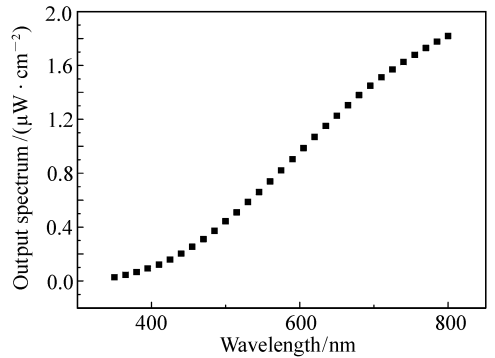


图3 卤钨灯输出光谱

Fig.3 Output spectrum of tungsten halogen lamp

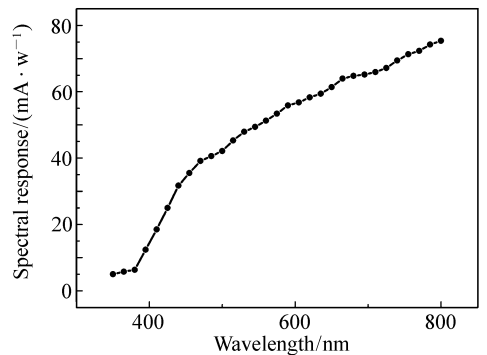


图4 探测阵列光谱响应

Fig.4 Spectrum response of detection array

4 标准辐射源温度测量

为了进一步对测量装置的温度进行修正,本文利用标准的高温辐射源进行了高温实验验证。实验中,分别设置不同的温度点进行实验测量,通过比对装置的实际测量值与温度标准值进行校

正,最终实现温度的准确测量。

表 1 装置实测值与标准值比对

Tab.1 Comparison of measured values and standard values

| 实验序号 | 1 | 2 | 3 |
|--------|-------|-------|-------|
| 标准值/°C | 1 300 | 2 000 | 2 700 |
| 测量值/°C | 1 140 | 1 789 | 2 419 |

利用测量装置实测电压信号,推算出不同波长的功率谱密度,进而拟合得到所对应的温度曲线。典型的拟合曲线如图 5 所示。

从实验结果看,需要对测量装置的测量结果进行整体修正,利用测量结果与真实温度的偏差对探测阵列的光谱响应曲线进行修正校准。

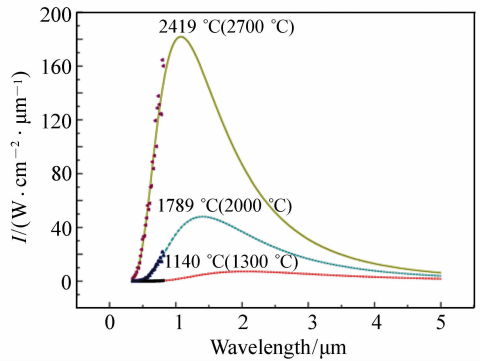


图 5 典型拟合温度曲线

Fig. 5 Typical fitting temperature curves

修正后再用标准辐射源进行实验验证,得到不同温度点的实测值与标准值如表 2 及图 6 所示。

表 2 装置修正后实测值与标准值比对

Tab.2 Comparison of corrected values and standard values

| 实验序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 标准值/°C | 1 100 | 1 300 | 1 500 | 1 800 | 2 000 | 2 200 | 2 400 | 2 700 |
| 测量值/°C | 1 140 | 1 324 | 1 478 | 1 790 | 2 043 | 2 216 | 2 397 | 2 714 |

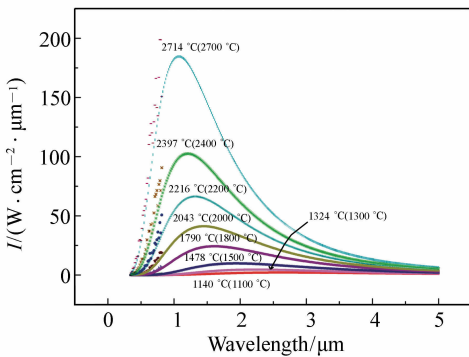


图 6 修正后温度曲线

Fig. 6 Corrected temperature curves

从上述实验结果可知,测量装置经过修正后,对不同温度的测量结果比较准确。

5 结 论

本文设计的测温装置利用具有快速响应的光电探测单元作为传感器,提高了响应速度。采用阵列结构设计,增加了波长点数,提高了温度拟合的精度。研制过程中利用卤钨灯作为标准光源对测量装置进行了响应系数标定,通过标准辐射源温度测量实验,验证了该装置温度测量的可靠性。测量装置借鉴了以往光谱辐射理论经验的基础上,设计了多通道快响应测量方案,为爆轰场、冲击波等瞬时温度场的测量提供新的手段和技术。

参考文献:

[1] 刘强,周昕,李扬聪,等. 采用激光诱导击穿光谱技术探测等离子体温度[J]. 光学与光电技术,2008,6(5):12-14.
 LIU Q,ZHOU X,LI Y C, et al. . Temperature detection of plasma by technology of laser induced breakdown spectroscopy [J]. Optics & Optoelectronic Technology,2008,6(5):12-14. (in Chinese)

- [2] 刘晶儒,胡志云,张振荣,等. 激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用[J]. 光学精密工程,2011,19(2):284-296.
LIU J R, HU ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.*. Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):284-296. (in Chinese)
- [3] 孙晓刚,李成伟,戴景民,等. 多光谱辐射测温理论综述[J]. 计量学报,2002,23(4):248-250,286.
SUN X G, LI CH W, DAI J M, *et al.*. Review on the theory of multi-spectral radiation thermometry[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, 23(4):248-250, 286. (in Chinese)
- [4] 李磊,刘庆明,汪建平,等. 比色高温传感器参数分析及其在爆炸场中的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(9):2466-2471.
LI L, LIU Q M, WANG J P, *et al.*. Research on parameters of dynamic colorimetric temperature sensor and its application to fuel air explosion temperature field detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(9):2466-2471. (in Chinese)
- [5] 周显明,李加波,王翔. 一种新型光纤高温计的研制[J]. 高压物理学报,2009,23(5):345-352.
ZHOU X M, LI J B, WANG X. Development of a new fiber-coupled optical pyrometer[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(4):345-352. (in Chinese)
- [6] 孙晓刚,胡晓光,戴景民,等. 可同时测量真温及光谱发射率的8波长高温计[J]. 光学技术,2001,27(4):305-306,309.
SUN X G, HU X G, DAI J M, *et al.*. Eight-wavelength pyrometer which can simultaneously measure the true temperature and spectral emissivity[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(4):305-306, 309. (in Chinese)
- [7] 丛大成,戴景民,孙晓刚,等. RBF网络在多光谱测温中的应用研究[J]. 红外与毫米波学报,2001,20(24):97-101.
CONG D CH, DAI J M, SUN X G, *et al.*. Study of the application of RBF network to multi-spectral thermometry[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, 20(24):97-101. (in Chinese)
- [8] 杜保林,张元生,李艳晓. 一种红外目标模拟器黑体辐射源选型的计算方法[J]. 光学与光电技术,2012,10(3):71-73.
DU B L, ZHANG Y SH, LI Y X. Algorithm for selecting blackbody radiation source of infrared target simulator[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10(3):71-73. (in Chinese)
- [9] 胡剑虹,宁飞,沈湘衡,等. 目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(2):152-156.
HU J H, NING F, SHEN X H, *et al.*. Influence of surface emissivity of objects on measuring accuracy of infrared thermal imagers[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(2):152-156. (in Chinese)
- [10] 张晓龙,刘英,王健,等. 不同非均匀性校正温度的红外测温技术[J]. 中国光学,2014,7(1):150-155.
ZHANG X L, LIU Y, WANG J, *et al.*. Infrared thermometry technology with different nonuniformity correction temperatures[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1):150-155. (in Chinese)
- [11] 王世涛,张伟,王强. 红外探测器件在低温背景下的探测率测试[J]. 光学精密工程,2012,20(3):484-491.
WANG SH T, ZHANG W, WANG Q. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):484-491. (in Chinese)

作者简介:



张磊(1982—),辽宁锦州人,硕士,主要从事激光参数测试、光电技术方面的研究。E-mail:zhanglei@nint.ac.cn