

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0238-05

基于多通道光谱玻尔兹曼直线拟合的瞬态温度测试技术

翟 洋¹ 沈 华¹ 朱日宏¹ 马锁冬¹ 李健欣¹ 陈 磊¹ 顾金良²

(南京理工大学¹ 电子工程与光电技术学院;² 弹道国防科技重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要 以光谱学玻尔兹曼定律和最小二乘法为理论基础,提出采用 4 波长光谱的多通道玻尔兹曼拟合计算的方法得到激发温度大小。实验结果表明,利用多通道玻尔兹曼直线拟合技术与高速响应光电探测器相结合的方法能够在测量得到瞬态等离子体的激发温度的同时,也保证了较高的精度,满足了对于发射瞬间物体表面瞬态温度测试的要求。

关键词 光谱学;等离子体;瞬态温度;玻尔兹曼分布;最小二乘法;光电探测器

中图分类号 TH811.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s2.0238

Transient Temperature Measurement Based on Multi-Channel Boltzmann Plots Technology

Zhai Yang¹ Shen Hua¹ Zhu Rihong¹ Ma Suodong¹ Li Jianxin¹
Chen Lei¹ Gu Jinliang²

¹ School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology,

² Key National Defence Research Laboratory of Ballistic, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract A method based on 4-channel Boltzmann plots technology to measure the electronic temperature of transient plasma is obtained. The results through a serial of experiments by using this theory as well as high-speed photodetector indicate that this method is valid and accurate for the measurement of the transient electronic temperature of transient plasma.

Key words spectroscopy; plasma; simultaneous temperature measurement; Boltzmann distribution; least squares method; photodetector

1 引 言

在近代动力发射系统中,伴随强电磁场等高能场产生的同时,发射系统也会产生高温金属等离子体。高温金属等离子体会向空间辐射与金属特性相关的数条特征波长光谱,该光谱的光强度大小直接反映该金属等离子体激发温度的大小。因此可以通过测试高温金属等离子体光谱强度从而计算得到动力发射系统的温度场分布大小情况。大量的工作^[1,2]研究了在高温等离子产生时伴随的温度场大小,如 Youichiro Kaga 等^[1]研究了在 He 气环境下

利用激励源实现金属铁原子分离频率调制时,光谱法测试产生金属铁等离子体的激发温度大小。

由于测试环境是动力发射系统,因此金属等离子体的产生是一个瞬态过程,普通的光谱提取方法如光学高温计或者 CCD 成像测温法^[3],在该情况下不再适用。而基于双波长光谱玻尔兹曼直线拟合方法计算激发温度虽然满足了瞬态测量的要求,但考虑到采用两点拟合直线方式^[4],其斜率误差较大,容易造成最终温度结果精度较低。本文在光谱学玻尔兹曼定律和最小二乘法理论基础之上,提出采用 4

基金项目: 国家 863 计划和重点实验室基金(9140C300101080C30)资助课题。

作者简介: 翟 洋(1985—),男,博士研究生,主要从事基于光学瞬态温度测试的研究。E-mail: optic_njust@126.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,教授,博士,主要从事精密光学测试方面的研究。E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn

通道波长光谱玻尔兹曼直线拟合方法计算激发温度的大小。采用多点采集多点拟合直线方式满足瞬态温度测试的同时,保证了最终结果高精度的要求。

2 原理分析

电子激发温度^[5,6] 简称为激发温度或称玻尔兹曼温度。根据原子谱线发射理论^[7,8],用玻尔兹曼定律可以确定不同激发状态间的平衡,而这些激发态的分布又是温度的函数。从而,电子激发温度 T_{exc} 与谱线强度 I 有如下关系

$$I = \frac{\Omega hc}{4\pi\lambda} g_m A_{nm} \frac{N}{Z(T_{exc})} \exp(-E_m/kT_{exc}), \quad (1)$$

式中 Ω 为立体角 h 为 Planck 常数, A_{nm} 为从高能级 m 向低能级 n 的跃迁几率, g_m 为 m 能级上的统计权重, N 为发射该谱线的原子数密度, Z 为发射该谱线的原子的配分函数, E_m 为高能级 m 的激发能, k 为 Boltzmann 常数。

对(1)式两边取对数,则有

$$\ln\left[\frac{I_{nm}\lambda_{nm}}{A_{nm}g_m}\right] = -\frac{E_m}{kT_{exc}} + \ln\left[\frac{\Omega hc N}{4\pi Z}\right]. \quad (2)$$

可以看出,(2)式中,除了谱线强度 I_{nm} , 谱线波长 λ_{nm} 和待求激发温度 T_{exc} 是未知量以外,其他参数均为常数或与金属等离子体特性相关的参数,可以在相关文献^[9~11]中查找。那么,选取金属等离子体辐射多根谱线大小(此处取 4 根谱线),分别测量它们的谱线强度,可以得到一组关于 $\ln\left[\frac{I_{nm}\lambda_{nm}}{A_{nm}g_m}\right] = f(E_m)$ 的函数关系,将该函数曲线表示如图 1 所示。

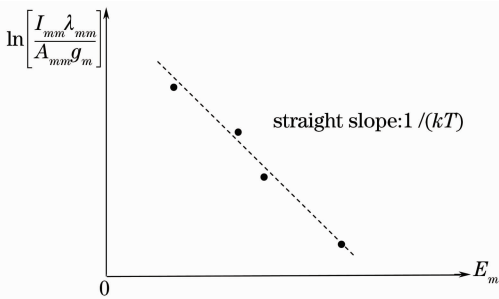


图 1 玻尔兹曼直线拟合原理示意图

Fig. 1 Temporally resolved Boltzmann plots figure

可以看出,(2)式实际上是 $\ln\left[\frac{I_{nm}\lambda_{nm}}{A_{nm}g_m}\right] = f(E_m)$ 的直线方程,直线的斜率为 $K = -\frac{1}{kT_{exc}}$,因此只要测得各谱线的相对辐射强度 I_{nm} 的值,然后再以 $\ln\left[\frac{I_{nm}\lambda_{nm}}{A_{nm}g_m}\right]$ 为纵坐标,以 E_m 为横坐标,对多组

测量数据进行最小二乘法拟合^[12],即可以作出 $\ln\left[\frac{I_{nm}\lambda_{nm}}{A_{nm}g_m}\right] = f(E_m)$ 的关系直线,得到直线斜率 K ,根据 $K = -\frac{1}{kT_{exc}}$ 可得到激发温度 T_{exc} 值。

3 实验装置

实验装置示意图如图 2 所示。该测试系统主要由 3 部分组成:1)前置光学系统,主要由反射镜、准直物镜、衰减片和等效透镜组成。2)光栅分光系统,主要由反射式光栅、汇聚透镜和出射狭缝组成。3)光电采集系统,主要由光纤、光电倍增管(PMT)、高速数据采集卡和计算机组成。

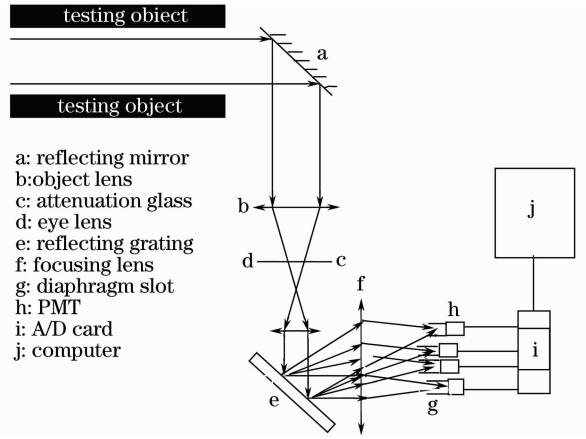


图 2 瞬态测温系统实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of the instant temperature measurement system

测量时,无穷远处的待测目标发射,产生的高温金属等离子体辐射出多条光谱信号,经过反射镜转折后进入由焦距为 550 mm 的准直物镜和等效透镜组成的望远镜系统,将多光谱光信号聚集成较小口径的平行光束照射在一块 1200 刻线每毫米的反射式光栅上。经过光栅转角计算^[13]后将光栅精密调整在某一角度,使得待测光信号中的 510.554 nm, 521.820 nm, 529.250 nm 和 578.213 nm 的 4 根谱线分离并通过汇聚透镜汇聚后进入出射狭缝,被 4 根光纤接收。光纤将这 4 条光谱光强信号分别导入响应时间在 3 ns 以内,光谱响应在 70 mA/mW 以上的光电倍增管,经过光电转换后的电压信号则被采样频率为 1 MHz 的高速数据采集卡采集进入计算机。通过待测目标发射这段时间这 4 条光谱光强信号的连续采集,并由玻尔兹曼最小二乘法直线拟合算法,即可计算待测目标发射时产生激发温度大小。在实验中,为了避免光强信号过大而使光电倍

增管输出饱和,在由准直物镜和等效透镜组成的望远镜系统中加入了衰减片将光强信号进行衰减。

4 实验结果与分析

4.1 实验数据与结果

此次实验的被测目标是铜制火枪,实验时采用将测试仪器直接对准枪口位置,测试枪口处喷射的火弧,从而得到温度大小。装置示意图如图 3 所示。

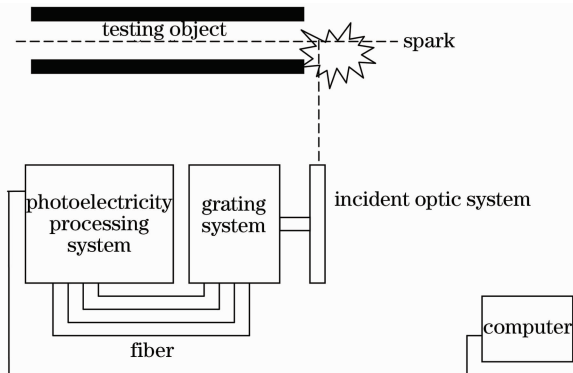


图 3 铜制火枪枪膛火弧温度测试实验装置示意图

Fig. 3 Experimental setup for measuring the spark temperature of the cupreous gun

根据以往测试数据经验,该铜制火枪弹丸出膛后火弧持续的时间约为 10 ms 左右。为保证所采集数据的完整性,采样的参数为:触发前维持 10~15 ms 时间,触发后维持 10~20 ms 时间,总采样时间设置为 20~35 ms。

实验采集的 4 条光谱信号光强转换后的电压大小随时间变化的数据如图 4 所示。其中曲线由上至下对应采集到的 510.554 nm, 521.820 nm, 529.250 nm 和 578.213 nm 光谱光强转换后的电压大小。

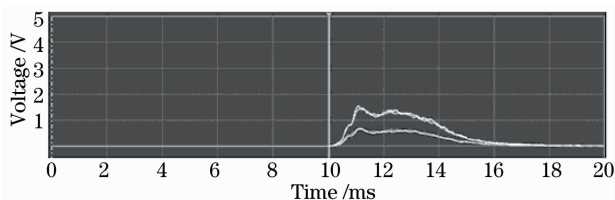


图 4 铜制火枪火弧温度测试装置信号采集输出结果

Fig. 4 Output signal of the cupreous gun spark temperature measurement system

由采集到的 4 路通道电压随时间变化曲线图可以看出,总采样时间为 20 ms,触发时刻为 10 ms,在触发后 0.19 ms 左右系统开始采集到明显的光强变化信号,说明此时火枪枪膛口开始出现明显的火焰光强。该火焰光强在触发后 0.47 ms 后达到最大,整个火焰光强大约维持 5.81 ms 后逐渐消失。

此次待测目标为铜元素金属等离子体,按(12)式,参数 A_{nm} , E_m , g_m 值的选取对最终实验结果的误差有显著的影响。参考相关文献^[14],选取如表 1 所示的 4 条谱线参数,可使实验的可信度高达 99%~99.5%,测量误差仅为 $\pm 6.5\%$ 。

表 1 GuI 中铜原子 4 条光谱线参数表

Table 1 Spectroscopic parameters of four copper atomic lines in GuI

Wavelength /nm	Energy level transition /K	Energy of the upper level /eV	$A_{nm}g_m$
510.554	11203~30784	2.65	0.051
521.820	30784~49942	4.30	5.8
529.250	43514~62403	5.38	3.2
578.213	13245~30535	2.63	0.054

根据采集到的 4 路通道的光强大小,以及表 1 中铜原子相关参数计算后得到的触发时间起枪膛的激发温度大小随时间变化曲线如图 5 所示。

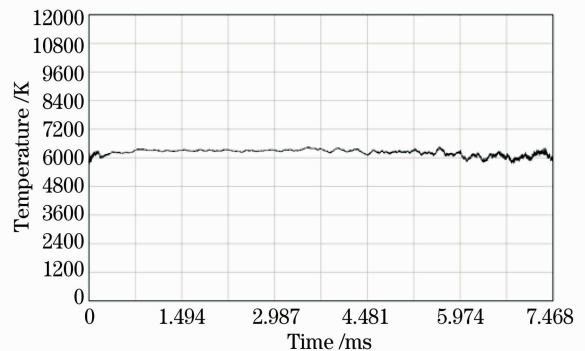


图 5 铜制火枪枪膛火弧激发温度变化

Fig. 5 Electronic temperature of the cupreous gun spark

从激发温度曲线可以看出,该温度曲线与采集到的 4 路通道电压曲线基本保持一致。在约 0.20 ms 前温度曲线毛刺较多,这是由于没有出现明显的火焰光强信号而计算得到的噪声大小信号。在 0.20 ms 左右温度曲线开始平缓光滑,维持到 5.81 ms 逐渐开始出现较多毛刺即火焰光强亮度基本消失。该火枪火焰激发温度最大为 6472 K,最小为 5785 K,平均激发温度为 6242 K。

4.2 精度分析

基于 4 波长拟合的玻尔兹曼直线拟合测温精度分析基于 Boltzmann 直线拟合数据,由(1)式简写为

$$\ln\left[\frac{I\lambda}{gA}\right] = -\frac{E}{kT} + \ln\left[\frac{hcN}{4\pi Z}\right]. \quad (3)$$

$$\text{设 } y = \ln\left[\frac{I\lambda}{gA}\right], x = E, a = -\frac{1}{kT}, b = \ln\left[\frac{hcN}{4\pi Z}\right],$$

按照最小二乘原理拟合直线 $y = ax + b$,可得直线斜率

$$a = \frac{\sum y \times \sum x - \sum yx \times l}{(\sum x)^2 - \sum x^2 \times l}, \tag{4}$$

其中 l 为拟合数据点数, 这里 $l=4$ 。因此可得

$$a = \frac{-1}{kT} = (E_1 - E_2) \ln\left(\frac{L_1 \lambda_1}{L_2 \lambda_2} \frac{A_2 g_2}{A_1 g_1}\right) + (E_1 - E_3) \ln\left(\frac{L_1 \lambda_1}{L_3 \lambda_3} \frac{A_3 g_3}{A_1 g_1}\right) + (E_1 - E_4) \ln\left(\frac{L_1 \lambda_1}{L_4 \lambda_4} \frac{A_4 g_4}{A_1 g_1}\right) \times \\ + (E_2 - E_3) \ln\left[\left(\frac{L_2 \lambda_2}{L_3 \lambda_3} \frac{A_3 g_3}{A_2 g_2}\right)\right] + (E_2 - E_4) \ln\left[\left(\frac{L_2 \lambda_2}{L_4 \lambda_4} \frac{A_4 g_4}{A_2 g_2}\right)\right] + (E_3 - E_4) \ln\left[\left(\frac{L_3 \lambda_3}{L_4 \lambda_4} \frac{A_4 g_4}{A_3 g_3}\right)\right] \\ \frac{}{(E_1 - E_2)^2 + (E_1 - E_3)^2 + (E_1 - E_4)^2 + (E_2 - E_3)^2 + (E_2 - E_4)^2 + (E_3 - E_4)^2}. \tag{5}$$

各个波长 λ_i 对应的常数 E_i, g_i, A_i 可以根据表 1 得到。因此, 可求得 a 对各个亮度 L_i 的偏微分

$$\frac{\partial a}{\partial L_1} = \frac{0.1104}{L_1}, \frac{\partial a}{\partial L_2} = \frac{-0.0567}{L_2}, \frac{\partial a}{\partial L_3} = \frac{-0.1661}{L_3}, \frac{\partial a}{\partial L_4} = \frac{0.1124}{L_4}, \tag{6}$$

以及 a 对各个波长 λ_i 的偏微分

$$\frac{\partial a}{\partial \lambda_1} = \frac{0.1104}{\lambda_1}, \frac{\partial a}{\partial \lambda_2} = \frac{-0.0567}{\lambda_2}, \frac{\partial a}{\partial \lambda_3} = \frac{-0.1661}{\lambda_3}, \frac{\partial a}{\partial \lambda_4} = \frac{0.1124}{\lambda_4}. \tag{7}$$

按照误差传递公式, 有

$$\left| \frac{\Delta T}{T} \right| = \left| \frac{\Delta a}{a} \right| = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial a}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i \right)^2 + \sum \left(\frac{\partial a}{\partial L_i} \Delta L_i \right)^2}, i = 1, 2, 3, 4 \tag{8}$$

其中波长误差 $\Delta \lambda_i$ 由仪器本身系统误差引起, 可以从系统以往的谱线波长-谱线间隔标定实验分析得出, 分别为: 0.011, 0.100, 0.224 和 0.113 nm。而辐射亮度 L_i 的相对误差 $\frac{\Delta L_i}{L_i}$, 则可以根据系统中探测器对测试谱线亮度-转换电压标定实验结果拟合直线的残差求得均方根, 分别为: 0.0768, 0.0409, 0.0639, 0.0815。

因此, 将(6), (7)式代入(8)式, 得精度计算结果

$$\left| \frac{\Delta T}{T} \right| = 1.65\%. \tag{9}$$

5 结 论

以原子谱线发射理论为基础, 结合玻尔兹曼统计热力学定律和最小二乘法, 得到了一种新颖的非接触式瞬态温度测试方法, 并通过实验研究得到了铜制火枪发射过程中激发温度随时间的变化。结果表明, 该方法能实时测量动力发射系统的激发温度变化过程, 与动力发射过程的物理性质相一致; 同时通过采用多通道 4 波长光谱直线拟合, 比经典双波长直线拟合得到的测试结果精度有大幅提高, 误差可以控制在 1.65% 以内。该方案的提出, 无论从动力发射系统能量大小计算, 或者研究发射过程中弹丸对发射轨道的烧灼和轨道寿命问题, 均有明确和重要的指导意义。

参 考 文 献

1 Youichiro Kaga, Shin Tsuge, Kuniyuki Kitagawa *et al.*.

Temporally resolved Boltzmann plots and excitation temperatures of iron atoms in a helium radiofrequency atomization/excitation source for atomic emission spectrometry[J]. *Microchem. J.*, 1999, **63**(1): 34~42

2 Wu Jiyou. A study on the linear fit scheme of fine spectra for measurement of high temperature[J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 1994, **6**(4): 1~3

吴继友. 细分光谱高温测温线性拟合方案的研究[J]. *红外与毫米波学报*, 1994, **6**(4): 1~3

3 Hu Li, Hu Xiao, Liu Dongfeng. Surface temperature distributions measurement based on CCD cameras[J]. *Sensor World*, 2005, **23**(5): 1~5

胡力, 胡晓, 刘冬枫. 基于 CCD 的物体表面温度场分布测量[J]. *传感器世界*, 2005, **23**(5): 1~5

4 Xu Houqian, Geng Jihui, Wang Junde *et al.*. The temperature measurement of 7.62 mm diameter fire gun's burning gunpowder gas based on spectroscopy[J]. *J. Ballistics*, 1999, **11**(1): 85~88

许厚谦, 耿继辉, 王俊德等. 7.62 mm 枪膛内火药气体燃烧温度的光谱法测量[J]. *弹道学报*, 1999, **11**(1): 85~88

5 M. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender. *Thermal Plasmas*[M]. New York: Plenum, 1995

6 E. Pfender, C. H. Chang. Plasma spray jets and plasma-particulate interaction: modeling and experiments[C]. *The 15th International Thermal Spray Conference*, 1998, **1**: 315~325

7 Haiou Zhang, Shengde Hu, Guilan Wang *et al.*. Modeling and simulation of plasma jet by lattice Boltzmann method[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2007, **31**(6): 1126~1128

8 S. Chapman. *The Mathematical Theory of Non Uniform-Gases* [M]. Cambridge: The Cambridge University Press, 1970

9 J. F. Alder, R. M. Bombelka, G. F. Kirkbright. *Spectrochim [J]. Spectrochimica Acta B*, 1980, **35**: 163

10 R. E. Sturgeon, V. T. Luong, S. N. Willie. *Spectrochim [J]. Spectrochimica Acta B*, 1993, **48**: 8930

11 T. D. Hettipathirana, M. W. Blades. *Spectrochim [J]. Spectrochimica Acta B*, 1992, **47**: 493

12 Meng Jianping, Yang Jingguo, Tan Hua *et al.*. Investigation of multi-channel collecting and temperature calculating by using minimum error principle for thermal radiation spectra [J].

- Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, **22**(5): 721~724
蒙建平, 杨经国, 谭 华 等. 热辐射谱的多道采集及最小二乘法温度解析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, **22**(5): 721~72
- 13 Zhang Zugang, Qi Zhisheng, Wang Xiaochuan. A method of wavelength scanning without mechanical transmission [J]. *J. Beijing Institute of Machinery*, 2007, **23**(3): 31~33
张祖刚, 祁志生, 王小川. 无机械传动的波长扫描技术研究[J]. *北京机械工业学院学报*, 2007, **23**(3): 31~33
- 14 Sun Xiuyun, Zhou Xuetie, Li Yan *et al.*. Error analysis of temperature measurement by Boltzmann plot in atomic emission spectroscopy for a high-density plasma produced by electrothermal capillary discharge [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, **23**(3): 563~565
孙秀云, 周学铁, 李 燕 等. 发射光谱 Boltzmann 法测量毛细 X 放电产生电热高密度等离子体之温度误差分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2003, **23**(3): 563~565