

文章编号: 0253-2239(2009)08-2216-05

等离子体激发和辐射温度瞬态光谱测试方法

沈 华 陈 磊 朱日宏 马锁冬

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 对等离子体温度的测量能间接诊断瞬态物理场的瞬时温度变化。使用望远光学系统对准等离子体并收集其光谱。光栅分光系统高精度地($\Delta\lambda < 0.1$ nm)分离提取出测量所需的等离子体四通道特征光谱信号。光纤将光谱信号导入高灵敏度、快速响应的光电倍增管(PMTs),采集时间小于 $1 \mu\text{s}$,达到瞬态测试的要求。用四通道数据拟合 Boltzmann 直线提高了计算激发温度的精度(优于 2%),同时从黑体辐射理论推导出等离子体辐射温度的计算模型。只需用一次测量得到的光强就可以同时得到等离子体的激发温度和辐射温度。利用标准温度灯对系统的光谱响应系数进行了标定,通过实验表明系统测温的精度优于 3%。

关键词 光谱学; 瞬态温度测试; 玻尔兹曼法; 黑体辐射; 等离子体

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2216

Spectroscopic Diagnostics of Transient Excitation and Radiation Temperature of Plasma

Shen Hua Chen Lei Zhu Rihong Ma Suodong

(*Institute of Electronic Engineering and Photo-Electric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*)

Abstract Variation of the transient temperature of transient physical field can be diagnosed indirectly by measuring the temperature of the plasma. Spectrum of the plasma is gathered by the telescope which is the prepositive optical device of the system. Four characteristic spectral signals from the atom excitation are separated accurately ($\Delta\lambda < 0.1$ nm) from the light of the plasma by the diffraction grating. Photomultiplier tubes (PMTs) with high sensitivity and short response time ($< 1 \mu\text{s}$) detect the four signals through the optical fiber, for satisfying the request of the transient measurement. Calculation precision (better than 2%) of the excitation temperature is increased by fitting Boltzmann line with four data. Computational model of the radiation temperature is deduced based on Planck's blackbody radiation theorem. Transient excitation and radiation temperatures of the plasma are calculated isochronously by measuring light intensity once. Modulus of the spectral response of the system is calibrated by standard lamp. The results of the experiment show that the precision of the system is better than 3%.

Key words spectroscopy; transient temperature test; Boltzmann method; blackbody radiation; plasma

1 引 言

在强电磁场瞬间作用下或轰击过程中都会产生大量的高温等离子体,对这些等离子体进行温度参数的高精度实时测试有助于研究诸如强电磁场、爆炸、燃烧以及电焊等过程复杂、剧烈,环境异常恶劣的物理场的温度性质。这对于研究电热化学(ETC)

和电磁(EM)轨道发射技术是非常重要的^[1]。

激发温度是描述电弧等离子体热力学状态的最重要的参数之一,通过对激发温度的研究,可以获悉等离子体内部的一些重要性质和基本过程^[2]。辐射温度是描述等离子体热力学状态的另一个重要参数,对其研究可以掌握等离子体对外热量传递的情

收稿日期: 2008-10-22; 收到修改稿日期: 2008-11-23

基金项目: 国家 863 计划资助项目。

作者简介: 沈 华(1981—),男,讲师,博士研究生,主要从事光学瞬态测试以及光学薄膜方面的研究。

E-mail: Edward_bayun@163.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光学测试技术、光谱干涉分析技术、光学图像处理及压缩方面的研究。E-mail: zhurihong@vip.sina.com

况,从而得到瞬态物理场的温度状态。大量文献[2~11]显示,目前对等离子体温度进行测量的研究中,一般都是单一的测量激发温度或者辐射温度,还没有同时测量这两种温度参数的研究报道。但是在瞬态物理场的研究中,要求在极短的时间内能将产生的等离子体的激发温度以及辐射温度的瞬态值能同步得到,从而为分析瞬态过程的物理变化提供数据支持。本文在结合玻尔兹曼(Boltzmann)法和多光谱辐射原理的基础上,研究了利用一次测量得到的光强就可以同时得到等离子体的激发温度和辐射温度的测量方法。

2 基本原理

无论是用 Boltzmann 法来求等离子体的激发温度还是用多光谱辐射法求其辐射温度,前提条件都是测量等离子体的特征光谱强度值。也就是说只要得到等离子体的特征光谱值就可以通过不同的数学模型计算出它的激发温度和辐射温度,因此只要建立合理的解算模型就能利用一次测量得到的等离子体光强计算得到这两个温度值。

2.1 激发温度测量原理

根据原子谱线发射理论,激发温度 T_{exc} 与谱线强度 I 有关系如下,

$$I = \frac{hc}{4\pi\lambda} g_m A_{m1} \frac{N}{Z(T_{\text{exc}})} \exp(-E_m/KT_{\text{exc}}), \quad (1)$$

式中 h 为 Planck 常数, c 为光速, A_{m1} 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。对式(1)两边取对数,则有

$$\ln \left[\frac{I_{m1}\lambda_{m1}}{A_{m1}g_m} \right] = -\frac{E_m}{kT_{\text{exc}}} + \ln \left[\frac{hcN}{4\pi Z} \right]. \quad (2)$$

式(2)实际上是 $\ln \left[\frac{I_{m1}\lambda_{m1}}{A_{m1}g_m} \right] = f(E_m)$ 的直线方程,直线的斜率为 $K = -\frac{1}{kT_{\text{exc}}}$,因此只要测得各谱线的相对辐射强度 I_{m1} 的值,然后再以 $\ln \left[\frac{I_{m1}\lambda_{m1}}{A_{m1}g_m} \right]$ 为纵坐标,以 E_m 为横坐标,即可以作出 $\ln \left[\frac{I_{m1}\lambda_{m1}}{A_{m1}g_m} \right] = f(E_m)$ 的关系直线,得到直线斜率 K ,根据 $K = -\frac{1}{kT_{\text{exc}}}$ 可得到激发温度 T_{exc} 值。

目前大多数方法求取等离子体激发温度时都采用双通道的方式,即只采集特征谱线中的两条来拟

合 Boltzmann 直线。但两点拟合直线受测量误差的影响是很大的,这就降低了测温的精度。为了提高测试方法的可靠性,本文选择了四通道的方式,即采用了 Cu 原子(强电磁场中的主要元素)发射的 510.554 nm、521.820 nm、529.250 nm、578.213 nm 的四根光谱作为目标光谱,可使实验的可信度高达 99%~99.5%。

2.2 辐射温度测量原理

根据黑体辐射定理(即普朗克定理),具有一定温度的物体都可辐射光强,

$$M(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} [\exp(hc/\lambda kT_F) - 1]^{-1}. \quad (3)$$

由于实际测量中物体通常为灰体,故对于一定温度 T 下,某一波长 λ ,测量得到的辐射光强对应的输出电压 V_g 为:

$$V_g = A_g \cdot \epsilon_g \cdot \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (4)$$

其中 A_g 是只与波长有关而与温度无关的检定常数,它与该波长下探测器的光谱响应率、光学元件透过率、被测物几何尺寸以及第一辐射常数 C_1 有关; C_2 为第二辐射常数; ϵ_g 为物体的发射率。

以标准温度源(黑体)为被测物,温度为 T_0 时,测得某一波长 λ 下测量得到的辐射光强对应的输出电压 V_0 为:

$$V_0 = A_0 \cdot \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_0}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (5)$$

实测时,对于某一被测物体,温度为 T ,光谱发射率为 ϵ 的条件下,测得其某一波长对应的系统输出电压 V :

$$V = A \cdot \epsilon \cdot \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (6)$$

将上面式(6)与式(5)相除得到:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{A}{A_0} \cdot \epsilon \cdot \frac{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_0}\right) - 1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}. \quad (7)$$

根据上式可求得被测物体辐射温度 T 为

$$T = \frac{C_2}{\lambda \ln \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_0}\right) - 1 \right] \cdot \epsilon \cdot \frac{V_0 \cdot A}{V \cdot A_0} \right\}}. \quad (8)$$

3 实验系统

实验装置主要由前置光学系统、光栅分光系统、光电倍增管(PMT)信号采集与处理系统组成,如图1所示。

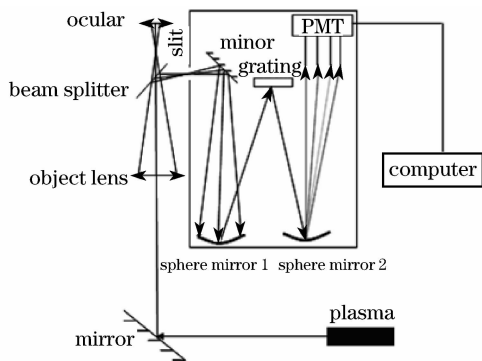


图 1 等离子体瞬态测温系统结构图

Fig. 1 Transient temperature measurement system of plasma

该系统使用前置光学结构收集被测信号,利用闪耀光栅分光系统的高精度分光本领分离提取出测量所需的四通道光谱信号(波长定位精度为 0.2 nm 左右,信号带宽为 ± 2.4 nm),再经光纤传入高灵敏度、快速响应的 PMT(响应时间小于 $1 \mu\text{s}$),利用原子发射光谱理论的 Boltzmann 法和黑体辐射理论,实现了对等离子体激发温度和辐射温度的高精度、瞬态、同步测量。

4 实验过程及结果分析

为了使实验系统达到高精度的要求,在实验前对系统四通道的输出电压值 U 与采集到的光强 I 的关系进行了标定。标定所使用的温度源为国防计量二级站的标准钨带灯(黑体的二级传递标准)。通过标定可知各通道的电压与接收谱线的强度之间有良好的线性关系,如图 2 所示,非线性误差为 0.04。

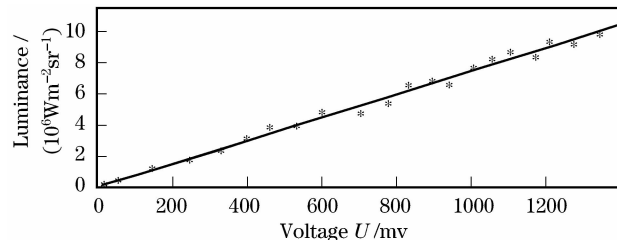


图 2 电压-光强线性关系曲线

Fig. 2 Linear curve of U - L

根据前面的测温原理以及四通道波长的提取精度($\Delta\lambda_1=0.011$ nm, $\Delta\lambda_2=0.100$ nm, $\Delta\lambda_3=0.224$ nm, $\Delta\lambda_4=0.113$ nm)和系统采集光强的相对误差值(上述标定结果),代入误差传递公式: $\frac{\Delta T}{T} =$

$\sqrt{\sum\left(\frac{\partial T}{\partial \lambda}\Delta\lambda\right)^2 + \sum\left(\frac{\partial T}{\partial I}\Delta I\right)^2}$, 得到求取激发温度的系统精度为 1.65%, 求取辐射温度的系统精度为 1.83%。

对等离子体瞬态测温系统进行了三项实验。第一项实验,测量铜焊枪焊接时的电火弧(等离子体发光)的激发温度;第二项实验,测量溴钨灯的辐射温度值;第三项实验,测量强电磁作用下产生的等离子体的激发温度以及辐射温度。

铜焊枪在焊接铜管时会产生电火弧(即等离子体发光),系统通过采集电火弧的光,利用前面所叙述的测温原理求取这时铜焊枪电火弧的激发温度。实验采集到的光强电压信号的数据如图 3 所示,求取的激发温度结果如图 4 所示。从结果可以看出,铜焊枪在焊接时其产生的电火弧的激发温度最高为 7995 K,最低温度为 6251 K,平均的激发温度为 7014 K。

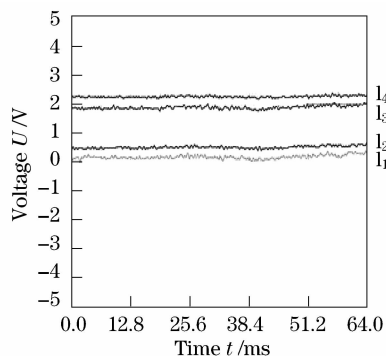


图 3 铜焊电火弧光强图

Fig. 3 Light intensity of copper arc-plasma

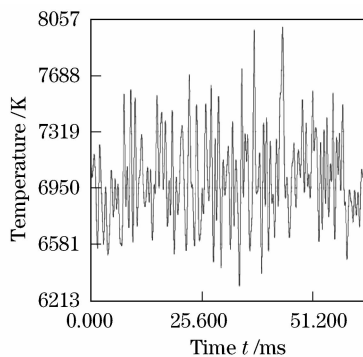


图 4 铜焊电火弧激发温度结果图

Fig. 4 Excitation temperature of copper arc-plasma

实验系统通过采集溴钨灯的辐射亮度大小,利用前面所叙述的测温原理将这时溴钨灯的辐射温度进行测量。为了验证系统测温的精度,实验采用光学高温计同步对溴钨灯在某一亮度下的辐射温度进行测试,比对两者测试结果验证系统的测试可靠性。实验采集到的溴钨灯的光强电压信号的数据如图 5 所示,求得的辐射温度结果如图 6 所示。

使用光学高温计对溴钨灯灯丝的辐射温度进行测量测得的结果为 2655 K,在考虑到光学高温计的

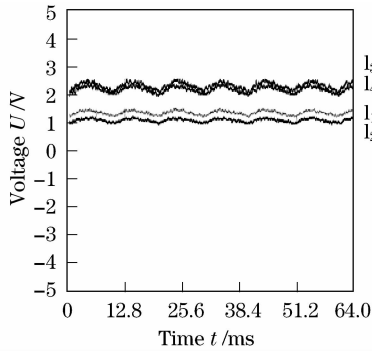


图 5 溴钨灯光强图

Fig. 5 Light intensity of bromine tungsten lighter

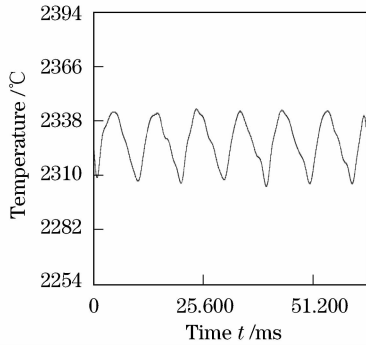


图 6 溴钨灯辐射温度结果图

Fig. 6 Radiation temperature of bromine tungsten lighter

测量误差在 2073~3273 K 时为 ±80 K, 认为实际溴钨灯的辐射温度在 2573 K~2733 K 之间。本系统测得的溴钨灯的辐射温度最高为 2622 K, 最低为 2575 K, 平均辐射温度为 2600 K, 这一结果与光学高温计的测试结果基本吻合, 吻合精度为 2.2%。

最后本系统对瞬态物理国家重点实验室的强电磁(EM)作用下产生的等离子体的瞬态激发温度和辐射温度进行了同步测量。本系统测量得到的该等离子体的光强电压信号的数据如图 7 所示, 求得的激发温度如图 8 所示, 求得的辐射温度如图 9 所示。

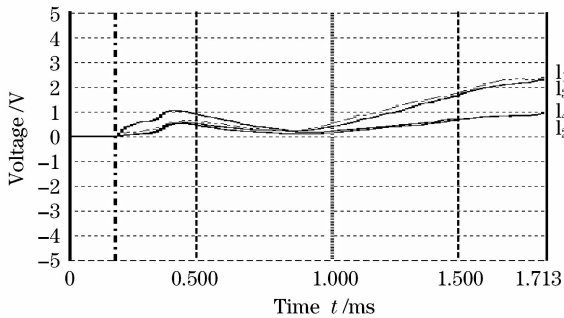


图 7 强电磁下的等离子体的光强图

Fig. 7 Light intensity of plasma produced by strong EM

从结果可以看出强电磁作用下产生的等离子体的激发温度最高为 7509 K, 最低为 5717 K, 平均激

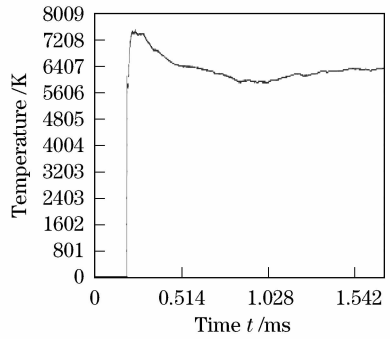


图 8 等离子体的激发温度结果图

Fig. 8 Excitation temperature of plasma

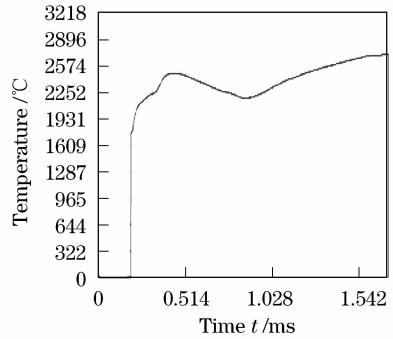


图 9 等离子体的辐射温度结果图

Fig. 9 Radiation temperature of plasma

发温度为 6326 K, 辐射温度最高为 2991 K, 最低为 2033 K, 平均辐射温度为 2687 K。

5 结 论

本文通过采用光栅式四通道的特殊光学结构, 一方面提高了提取等离子体特征光谱的精度(比起传统的滤光片式), 另一方面用四通道拟合 Boltzmann 直线比起以往的双通道拟合使结果的可信度加强了。由于这种特殊的光学结构, 使得对等离子体的激发温度的测试精度得到了显著提高, 优于 2%。同时本文还首次针对等离子体的特征光谱来解算其辐射温度, 由黑体辐射理论推了解算的数理模型, 并进行了相应的实验, 验证了模型的可靠性, 测试精度优于 3%。这样只需用一次测量得到的等离子体的特征光谱强度就可以同时得到其瞬态激发温度和辐射温度。

参 考 文 献

1 Zhou Xuetic, Wang Junde, Li Yan *et al.*. Real Time diagnostics of instantaneous temperature of combustion and explosion process by modern spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, 23(2):407~410
周学铁, 王俊德, 李 燕 等. 现代光谱对燃烧与爆炸过程瞬态温度的实时诊断技术[J]. *光谱学与光谱分析*, 2003, 23(2):407~

- 410
- 2 Wang Zhonghui, Jiang Lipei, Qi Bojin *et al.*. Developing diagnostics of the arc plasma temperature field[J]. *Materials Science & Technology*, 2007, **15**(5):654~657
王中辉, 蒋力培, 齐铂金等. 发展中的电弧等离子体温度场诊断技术[J]. *材料科学与工艺*, 2007, **15**(5):654~657
 - 3 Liu Dabin, Yang Dong, Jiang Rongguang *et al.*. Spectroscopic determination of the dynamic electrical spark temperature of nonel tube igniter[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, **22**(4):670~672
刘大斌, 杨 栋, 蒋荣光等. 导爆管起爆器瞬态电火花温度的光谱法测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, **22**(4):670~672
 - 4 J. M. Kohel, L. K. Su, N. T. Clemens *et al.*. Emission spectroscopic measurements and analysis of a pulsed plasma jet [J]. *IEEE Transactions on Magn.*, 1999, **35**(1):201~206
 - 5 Fan Chuanxin. Development of a multiple target multi-spectral pyrometer[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2004, **27**(4):316~319
范传新. 多目标多光谱高温仪的研制[J]. *固体火箭技术*, 2004, **27**(4):316~319
 - 6 Su Hongyu, Zhou Yan, Yu Depin *et al.*. Research report oil instant spectral radiometer[J]. *China Measurement Technology*, 2005, **31**(4):5~8
苏红雨, 周 彦, 余德萍等. 瞬态光谱辐射测量仪的研制[J]. *中国测试技术*, 2005, **31**(4):5~8
 - 7 Puerkai Xiading. The measurement of excitation temperature in a arc plasma [J]. *Journal of Yuman University of the Nationalities (Nature Science Edition)*, 2001, **10**(1):273~275
甫尔开提·夏尔丁. 电弧等离子体激发温度的测量[J]. *云南民族学院学报(自然科学版)*, 2001, **10**(1):273~275
 - 8 Wu Junying, Feng Changgen, Chen Lang *et al.*. Plasma radiation temperature measurement of metal explosion [J]. *Tactical Missile Technology*, 2006, (5):31~33
伍俊英, 冯长根, 陈 朗等. 金属电爆炸等离子体辐射温度测量[J]. *战术导弹技术*, 2006(5):31~33
 - 9 Sun Xiuyun, Zhou Xuetic, 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 法测量毛细管放电产生的电热高密度等离子体温度之误差分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2003, **23**(3):563~565
 - 10 Shen Yan, Zhao Wenhua, Chen Liming *et al.*. Temperature measurement of arc-plasma in low pressure[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, **25**(4):242~243
沈 岩, 赵文华, 陈黎明等. 低压电弧等离子体射流的温度测量[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **25**(4):242~243
 - 11 Ma Shuiliang, Gao Hongming, Zhang Guangjun *et al.*. A data processing method for abel inversion in arc plasma diagnostics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1633~1638
马税良, 高洪明, 张广军等. 阿贝尔逆变换数据处理算法在电弧诊断中的应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9):1633~1638