

文章编号: 1001-4322(1999)06-0710-05

脉冲激光激发 Cu 等离子体温度的玻耳兹曼方法测量研究^{*}

靳丽红, 杨经国, 哈元清, 薛 康, 钟先琼, 蒙建平

(四川大学物理系, 610064)

摘 要 以 YAG 调 Q 脉冲激光为光源, 使用 CCD 技术采集样品 Cu 等离子体瞬态光谱, 用玻耳兹曼分布法对激光等离子体的温度进行了测量。当激光脉冲能量为 0.1J 时, 测量的 Cu 谱为原子激发谱, 等离子体温度为 14063K。作为对比, 用同样方法测量了交流电弧激发的 Cu 等离子体温度。所建立的测温方法对于研究激光与物质的相互作用有重要应用前景。

关键词 脉冲激光; Cu 等离子体温度; CCD 探测; 玻耳兹曼分布

中图分类号: TN246

文献标识码: A

巨脉冲激光冲击样品材料, 在高温高压下样品表面产生等离子体火焰, 解析其温度可进一步研究物质的内部结构、分子原子的跃迁特性及表面压力等情况, 对材料分析, 结构力学乃至工业、军事上都有重要意义^[1]。激光冲击样品靶材产生的等离子体火焰温度很高, 常在 10000K 以上, 这样的高温通常只能用光谱学方法测量。由于等离子体火焰通常在较大波长范围内是透明的, 其辐射谱的连续部分与黑体辐射谱有明显偏离, 故不能用普朗克辐射定律解析火焰温度; 但等离子体火焰光谱多包含分离的原子或离子激发谱, 这些分离谱较好地符合玻耳兹曼分布, 因此可按玻耳兹曼分布公式解析火焰温度^[2~5]。

由于激光与物质相互作用的时间很短(激光脉宽约为 6ns), 这就需要快速、准确地采集光谱, 阵列探测器 CCD (Charge Couple Device) 正是具有这一特点, 它兼有光电转换、信号存储以及信号传输(即自扫描)的功能, 由于它体积小、重量轻、功耗低、可靠性高以及光谱响应范围宽等优点, 有着广泛的应用^[6~8]。我们使用以 CCD 阵列为探测器的光学多道分析器很好地完成了光谱的采集工作。

1 脉冲激光等离子体温度测量原理

脉宽为 10^{-8} 秒的脉冲激光与物质相互作用, 电场能量被自由电子吸收, 并且几乎瞬间采用电子与分子或晶格中的离子碰撞的形式转变成晶格振荡, 使电磁能量转换成热能, 物质表面温度急剧上升, 以致在冲击点附近物质气化电离形成等离子体。在热力学平衡态下, 等离子体中分配在各激发态和基态的原子浓度, 由玻耳兹曼公式所决定, 即

$$N_i = N_0 \frac{g_i}{g_0} \exp\left[-\frac{E_i}{kT}\right] \quad (1)$$

式中 N_i 、 N_0 分别为单位体积内处于激发态 i 和基态 0 的原子数; g_i 、 g_0 分别为激发态和基态的统计权重(统计权重是和这个能级的简并度有关的常数); E_i 为激发态 i 的能量(激发电位); k

* 国防科技重点实验室基础研究基金资助课题。
1999 年 4 月 26 日收到原稿, 1999 年 7 月 13 日收到修改稿。
靳丽红, 女, 1974 年 4 月出生, 硕士, 助教

$= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 为玻耳兹曼常数; T 为激发温度。这个公式表明, 激发温度越高, 越容易将原子激发到高能级, 处于激发态的原子数越多。光谱线强度可表示为

$$I_i = N_0 \frac{g_i}{g_0} \exp\left[-\frac{E_i}{kT}\right] A_i h \nu_i \quad (2)$$

式中 A_i 为跃迁几率; h 为普朗克常数; ν_i 为发射谱线的频率。对于离子线的强度, 都可以同样形式的公式表示, 但 E_i 应加上电离能。根据热辐射样品不同能级间粒子的跃迁, 选取其中两条或几条谱线, 整理公式(2)得

$$\ln(\lambda_i I_i / g_i A_i) = C - E_i / kT \quad (3)$$

其中, λ_i 为各激发光谱线波长; I_i 为光谱强度; C 为一常数。 I_i, ν_i 可直接从计算机读出, 只要知道等离子体每条谱线对应的 g_i, A_i 值, 对式(3)的 $\ln(\lambda_i I_i / g_i A_i) \sim E_i$ 实验曲线作直线拟合, 其斜率等于 $-1/kT$, 由此即可得到等离子体温度 T 。

2 实验装置及主要测量结果

脉冲激光冲击样品材料产生等离子体火焰的温度测量实验装置如图 1 所示。激发源为调 Q 的 Nd:YAG 激光器, 发射波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的近红外激光, 调 Q 染料为 BDN 二氯乙烷溶液, 将激光输出脉宽压缩到 10 ns , 输出功率达到约 10^7 W 。脉冲激光经透镜 L_1 (焦距为 5 cm) 聚焦到样品上, 在样品表面形成很高的能量密度, 并导致样品发光。以金属 Cu 作为样品, 表面与激光光束成 45° 角放置, 采用侧向采集光谱法, 多色仪与激光光束呈垂直放置。由于样品表面产生的火焰包括两部分: 一部分为热辐射的连续谱, 另一部分为等离子体的线状谱, 为减小热辐射谱的干扰和提高收集效率, 使样品火焰通过透镜 L_2 (焦距为 4 cm) 扩束成平行光后, 进入 CCD 光学多道分析器, 经放大和采样保持后, 光谱电信号被送入模数变换器 (A/D 变换器, ADC574, 12 bit, 变换时间为 $25 \mu\text{s}$)。由特定软件控制, 在显示屏上可观察到清晰的光谱波形, 直接读出谱线波长和光谱强度, 根据玻耳兹曼分布公式解析其温度。

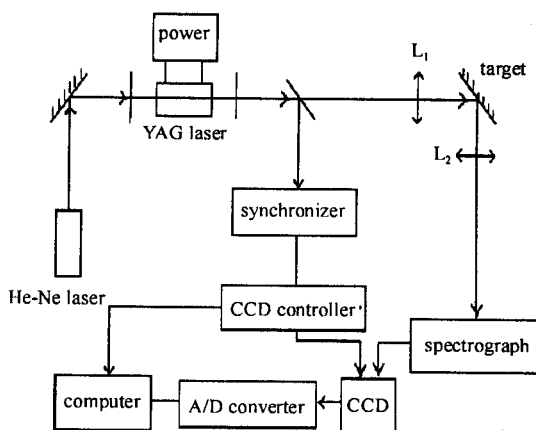


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

图 1 脉冲激光冲击金属靶材的实验装置图

在脉冲光谱采集中, 同步是一个至关重要的问题。同步信号是用高透低反镜 (透射率约 96%) 反射的一束激光, 以光电二极管作为光敏元件产生同步电信号, 将同步电信号输入 CCD 控制器, 通过调整同步延迟时间即可实现对脉冲光谱的同步采集。单模 He-Ne 激光器发射波长为 632.8 nm 的激光, 用于调整实验光路, 同时它和 Hg 灯还作为 CCD 光学多道分析器的标准光源, 用于标定谱线波长。

我们使用光栅多色仪色散光谱, 以 Hg 灯的一级谱线 435.83 nm 、 546.07 nm 与二级谱线 730.97 nm 及 He-Ne 激光的 632.8 nm 为标准^[9], 用线性内插法对波长进行了标定, 波长标定误差 $\leq 0.9 \text{ nm}$ 。还对 CCD 不同波长下的强度响应进行了校正。

实验所用 YAG 激光器输出脉冲能量为 0.1 J , 脉宽为 10 ns , 样品表面脉冲激光功率密度

约 $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。为提高信噪比多道分析器采用 8 次采样平均法采集,光谱如图 2 所示。

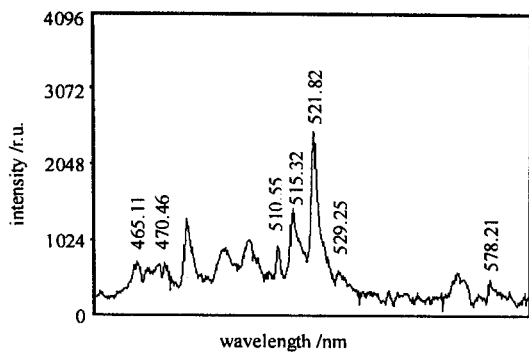


Fig. 2 The spectra of Cu plasma

图 2 Cu 等离子体谱

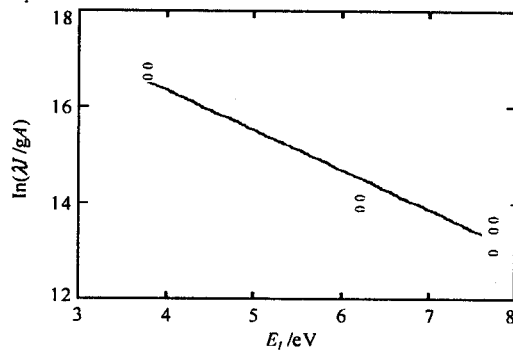


Fig. 3 Plot of $\ln(\lambda I_i/g_i A_i) \sim E_i$

图 3 $\ln(\lambda I_i/g_i A_i) \sim E_i$ 关系图

Cu 谱温度用 465.11nm 至 578.21nm(见图 2)的 7 条原子激发线进行直线拟合,各谱线的 g_i 、 A_i 值均由文献[10]给出,把这些参数代入(3)式,直线拟合结果如图 3,其直线方程为

$$\ln(\lambda I/gA) = (19.64 \pm 0.79) - (0.8244 \pm 0.1097)E_i \quad (4)$$

得出 Cu 等离子体温度为 $14063 \pm 1870\text{K}$ 。

3 讨论与结论

该测温方法的优点在于没有测量温度范围的限制,同时由于是直接测量谱线辐射强度,光谱光源就是火焰本身,光路上极具方便性。实验使用的光学多道分析器具有很高的信噪比,主要误差来源于 A 值的不确定度(通常达 25%)和自吸收的影响,当跃迁的低能级为基态或接近于基态时,后者的效果比较明显,此时的测量温度误差很大。跃迁几率 A 的不确定度给温度测量结果带来的影响可由公式(3)得出

$$-\frac{\Delta T}{T} = \frac{kT}{E_i} \frac{\Delta A}{A} \quad (5)$$

如取 $E_i \approx 4\text{eV}$, $T \approx 10000\text{K}$, $\Delta A/A \approx 25\%$, 可以估算得

$$\Delta T/T \approx 6\% \quad (6)$$

可见尽管参数 A 有较大的不确定度,其引起的测温误差仍在可接受的范围内。

为考察等离子体温度随激发条件的变化,实验室曾用交流电弧发生器,以 Cu 棒和 C 棒分别作为两个电极,以高频方式产生 Cu 弧等离子体光谱,如图 4,测得相应 Cu 弧等离子体温度为 7562K 。而激光冲击 Cu 靶产生的等离子体温度为 14063K (见图 2 和图 3)。

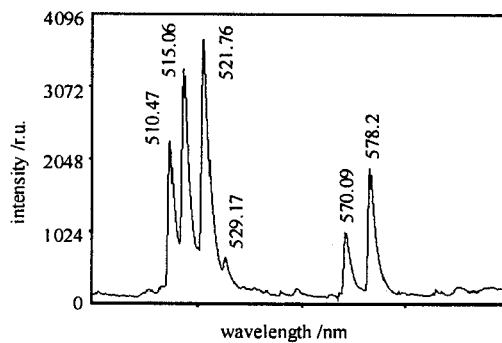


Fig. 4 The Cu plasma spectra excited by alternating arc

图 4 交流电弧产生的 Cu 等离子体光谱

图 4、图 2 均为 Cu 等离子体谱。交流电弧发生器产生的谱用 510.47nm 至 578.2nm 的六条原子激发线解析温度;激光冲击靶材产生的谱用 465.11nm 至 578.21nm 的七条原子激发线解析温度。比较可知,各谱线的相对强度发生改变,故而得出的温度不同。用激光冲击靶材

能得到相当高的温度,以至于能使样品小范围内熔化,并且紫光部分谱线多而清晰;用交流电弧发生器产生的等离子体温度低,但谱线中没有热辐射谱的干扰。

冲击火焰并非点光源,它具有一定的体积,是非均匀光源,不同位置上的空间点的发光强度不同。为了直观地说明各点的差异,我们测量了等离子体火焰的空间分布。实验光路同前述,在多色仪出射焦平面上换用二维面阵 CCD 接收光谱,代替前面实验部分的一维线性阵列。采集的一部分 Cu 谱如图 5 所示,三维图中的 x 轴(象素坐标值为 $0 \sim 630$)代表波长(波长范围 $426.0 \sim 584.0 \text{ nm}$),对应二维面阵 CCD 的长度方向; y 轴(象素坐标值为 $0 \sim 380$)代表火焰的空间方向,对应面阵 CCD 的宽度方向; z 轴代表光谱强度。

火焰在入射狭缝上的点与 y 轴一一对应,各点通过色散后在焦面上形成各自的一套光谱,它们的形状相同,具有相同的谱线,呈规则排列,沿 y 轴方向(即沿火焰上垂直方向)光谱强度明显不同,大致呈山丘状,光谱强度从火焰中间部分向两端减弱,说明了火焰的近球状。

把激光技术与等离子体温度的测量结合起来,以 YAG 调 Q 脉冲激光冲击金属样品 Cu,采用 CCD 技术采集瞬态光谱,根据玻耳兹曼分布对激光等离子体的温度可以进行测量。实验表明这种测量方法的可行性和方便性,及其应用前景。

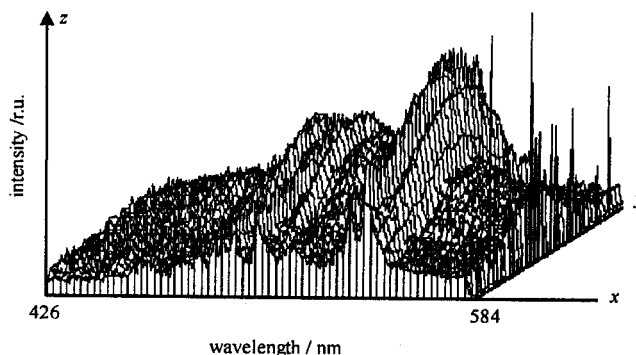


Fig. 5 The spatial distribution of Cu plasma spectra

图 5 Cu 等离子体火焰光谱的空间分布

参考文献

- 1 尚惠春,吴检保译. 激光加工物理学基础. 长春:吉林科学技术出版社,1987
- 2 Reif I, Fassel V A, and Kniseley R N. *Spectrochem Acta*, 1973, **28B**:105~123
- 3 John A, Dean, Theodore C Rains. *Flame Emission and Atomic Absorption Spectrometry*. New York and London: MARCEL DEKKER, 1969
- 4 Wang Junde, Li Baoming. *Spectroscopy Letters*, 1998, **31**(1):243~252
- 5 《发射光谱分析》编写组. 发射光谱分析. 北京:冶金工业出版社,1977
- 6 蔡文贵等. CCD 技术及应用. 北京:电子工业出版社,1992
- 7 靳丽红等. 四川大学学报(自然科学版), 1998, **35**(4):546~550
- 8 杨经国等. 光电子技术. 成都:四川大学出版社,1990
- 9 冶金工业部科技情报产品标准研究所. 光谱线波长表. 北京:中国工业出版社,1971
- 10 CRC Handbook of Chemistry and Physics. Cleveland: CRC Press. p. E-348

MEASURING THE TEMPERATURE OF THE LASER PLASMA WITH BOLTZMANN DISTRIBUTION METHOD

JIN Li-hong, YANG Jing-guo, HA Yuan-qing, XUE Kang, ZHONG Xian-qiong, MENG Jian-ping
Sichuan University, Sichuan, Chengdu, 610064

ABSTRACT: Employing Q-modulating YAG pulse laser as source, using metal Cu as sample, using CCD detector to collect the transient spectrum and using Boltzmann distribution method, the temperature of the laser plasma is measured. From the results we know when the laser pulse energy is 100mJ, Cu spectrum mainly consists of atomic excitation lines and its temperature is 14063.8K. This work has great potential for investigating the interaction processes between laser and matter.

KEY WORDS: pulse laser; Cu plasma temperature; CCD technology; Boltzmann distribution

第五届高电压新技术学术年会征文通知

为推动高电压新技术水平的提高和有效地为经济建设、国防和社会发展服务,高压新技术分专委会拟于2000年10—11月间召开第五届高电压新技术学术年会,会前将出版论文集。热诚欢迎从事科研、教学、开发和应用的各界有识之士尤其是分专委会成员积极参加交流,请将尚未在具有正式刊号的公开出版物上发表过的论文写成不超过400字的摘要于2000年4月30日前寄到高电压新技术分专委会秘书处(100080,北京第2703信箱,张适昌收)。对与实践相结合密切并具有实用前景的论文将优先录用。

主要相关内容如下:

一、高电压新技术基础

1)快脉冲电晕放电特性的分析和推进;2)储能元件电容、电感、惯性等,特性的分析和发展;3)高重复频率,长寿命开关基础;4)脉冲压缩和传输;5)运行控制方法;6)负载特性分析;7)各类高压电磁场的环保效应;8)各类高压电磁场的生物医学效应;9)各类高压电磁场的生态效应。

二、脉冲功率技术

1)实用化脉冲功率发生系统分析;2)脉冲功率技术中的放电与击穿过程;3)脉冲陡化和调制;4)磁脉冲压缩;5)脉冲电源系统与负载匹配;6)高重复频率,长寿命开关系统,包括:闸流管、引燃管、高气压和吹气火花间隙开关、溅火花隙开关、磁开关、大容量固体开关、半导体开关、真空开关等;7)高储能密度,小体积,长寿命无(低)感电容器;8)高效低感传输线;9)高效脉冲变压器;10)惯性储能系统。

三、等离子体技术

1)实用化等离子体发生系统分析;2)等离子体稳定性和辐射效应;3)等离子体聚焦;4)等离子体加热;5)等离子体化学过程;6)射频等离子体;7)微波等离子体。

四、高电压新技术应用

1)烟气脱硫、脱硝、除尘、尾气治理等;2)污水净化和废物处理;3)强电磁环境对人体伤害的防治;4)物种改良和新品物种培育;5)促生、保鲜、干燥、脱水、消毒、灭菌、防蛀;6)医疗与诊断;7)缉爆与缉私;8)探矿与无损检测等;9)电子束、离子束加工、辐射加工、材料表面抛光与改性、熔化、切割、焊接、淬火、破碎、成形、清洗;10)冶炼、化学合成、超细粉末制备与喷涂、O₃制取、橡胶硫化、油漆固化;11)等离子体化学沉积与刻蚀;12)强脉冲光源;13)强电磁脉冲辐射对电力、通讯和微电子系统干扰的防治;14)测量与诊断技术;15)在其它高、新技术领域中的应用。

高电压新技术分专委会 1999.12.20