

文章编号:1001-9014(2009)02-0093-04

# 激光诱导等离子体光谱技术应用于 月球探测的可行性研究

亓洪兴, 潘明忠, 吕刚, 何志平, 闫志欣, 舒嵘  
(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 阐述了激光诱导等离子体光谱技术的物理机制, 分析了气压影响激光诱导等离子体光谱探测的机制和规律, 建立了低气压环境下进行激光诱导等离子体光谱探测的试验装置, 开展了不同等级低气压环境下的试验研究, 通过试验数据具体量化了气压对激光诱导等离子体光谱探测的影响, 进而论证了激光诱导等离子体光谱技术应用于月球探测的可行性。

**关键词:** 月球探测; 激光诱导等离子体光谱技术; 低气压; 雪崩电离; 多光子吸收电离

**中图分类号:** TN 247; TH744.11 **文献标识码:** A

## FEASIBILITY STUDY ON THE APPLICATION OF LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY TO LUNAR EXPLORATION

QI Hong-Xing, PAN Ming-Zhong, LV Gang, HE Zhi-Ping, YAN Zhi-Xin, SHU Rong  
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The physical principle of laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) was interpreted. How the pressure affects the laser induced plasma was analyzed. A LIBS experimental system for the low pressure condition was setup and the experiments at the different pressures were carried out. The experimental result expresses how the pressure affects the laser induced plasma quantitatively. The feasibility on the application of LIBS to lunar exploration was discussed.

**Key words:** lunar exploration; laser-induced breakdown spectroscopy; low pressure; avalanche ionization; multiphoton absorption ionization

### 引言

“嫦娥一号”绕月探测卫星的成功发射和正常运行, 标志着我们国家在深空探测领域迈出了具有里程碑意义的一步. 根据我国探月工程的总体部署, 在第二阶段将发射月面软着陆器和巡视探测器, 对软着陆区和巡视区的月岩、月壤成分及有用资源作就位分析, 以获得样本精细的化学元素组成, 确定主要矿物和岩石的类型; 合理选择着陆器和巡视器上的有效载荷是实现这一科学目标的根本保证. 激光诱导等离子体光谱技术<sup>[1-3]</sup>是一种新兴的物质元素组成分析技术, 它利用激光诱导等离子体辐射出的原子光谱信息进行物质元素组成的定性定量分析,

能够对不同状态样品中的各种元素进行快速、非接触式探测. 目前, 激光诱导等离子体光谱技术已经被美国国家航空航天局 (NASA) 和欧洲航空航天局 (ESA) 选定为下一代火星探测计划中的重点技术<sup>[4,5]</sup>, 其中, NASA 在预计 2009 年发射的火星探测器 MSL 上装载了基于该技术的探测仪器 ChemCam. 火星与月球相比有很多不同之处, 星体表面气压环境之间的差异就是其中之一; 火星表面被 7 torr 左右的二氧化碳气体笼罩着, 而月球表面没有任何大气, 是高度真空的环境, 大约平均在  $10^{-9}$  torr 的量级上; 因此, 激光诱导等离子体光谱技术适用于火星探测的事实并不意味着该技术也一定适用于月球探测. 本文从激光诱导等离子体光谱技术的物理机制出

收稿日期: 2008-02-26, 修回日期: 2008-09-16

基金项目: 国家自然科学基金 (60678057) 资助项目

作者简介: 亓洪兴 (1977-), 男, 山东莱芜人, 助研, 主要从事激光光谱技术研究

通讯作者: 舒嵘 (1971-), 男, 上海人, 研究员, 主要从事激光技术和成像技术研究.

Received date: 2008-02-26, revised date: 2008-09-16

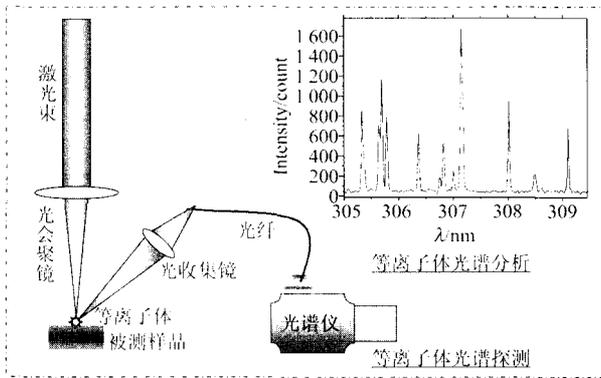


图1 激光诱导等离子体光谱技术的物理机制

Fig. 1 Physical mechanism of laser induced breakdown spectroscopy

发,分析了周围气压对等离子体光谱探测的影响,并通过试验研究具体量化了这种影响,从而充分论证了激光诱导等离子体光谱技术应用于月球探测的可行性.

## 1 激光诱导等离子体光谱技术的物理机制

脉冲激光束在被测样品表面会聚形成一个直径很小的光斑,光斑处的高密度激光能量使得微量物质电离形成等离子体;等离子体辐射出的原子光谱代表了元素的“指纹”,其中原子谱线的波长位置代表了元素的种类,原子谱线的信号强度反映了元素的含量;原子光谱被光谱仪器接收以后就可以进行元素组成的分析,其过程如图1所示.

激光诱导产生等离子体的过程非常复杂,通常认为激光和物质之间会发生吸热、熔融、气化、电离、形成等离子体等作用过程.激光对物质的电离依次经历两个阶段,即多光子吸收电离和雪崩电离.多光子吸收电离指的是物质的原子同时吸收多个入射光子的能量而发生电离,产生少量的电子和离子;由于光子的能量与光频率成正比,所以通常只有紫外激光才能使得物质发生单光子吸收电离,而对于可见和近红外激光,只有多个光子的能量合起来才能达到物质的电离能.多光子吸收电离产生的电子虽然数量少,但是却起着诱发的作用,这些诱发电子在激光电场的加速作用下和周围的原子、离子发生剧烈碰撞,使得又一部分原子和离子发生电离而产生更多的电子,这些电子又继续参与到碰撞电离过程中,从而使得更多的原子和离子电离,如此反复,该过程使得电子密度指数增加,这就是雪崩电离;当电子密度达到一定阈值,体系就会发生所谓的“击穿”而形成高温高能态的等离子体,同时伴随着强烈的闪光

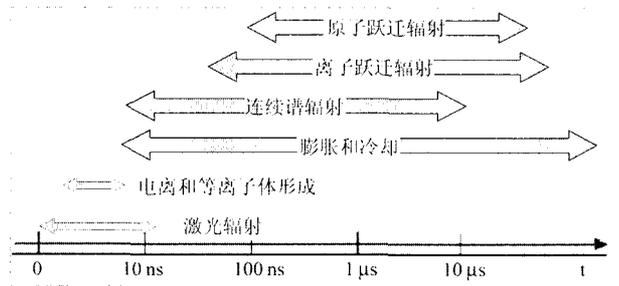


图2 激光诱导等离子体的产生和辐射过程

Fig. 2 Generation and radiation process of laser induced plasma

和清脆的冲击波声响.由于激光脉冲持续时间很短,等离子体很快开始膨胀和冷却,并伴随着高能态向低能态的衰变,衰变过程辐射出强烈的背景连续谱和离散的原子光谱;连续谱主要来自于轫制辐射和复合辐射,轫制辐射是自由电子和激发态的原子、离子碰撞产生的,复合辐射是自由电子和离子重新复合产生的;离散的原子谱线主要是各种元素的原子能级跃迁产生的,是各种元素的特征谱线,也是激光诱导等离子体光谱技术进行元素组成分析的依据.激光诱导等离子体产生、辐射的过程在时间上是连续的,如图2所示.

## 2 气压对激光诱导等离子体光谱的影响

从激光诱导等离子体产生的物理机制来分析,对于纳秒量级脉冲宽度的激光,多光子吸收电离主要起着诱发作用,而雪崩电离是等离子体产生的主体因素;更重要的是,雪崩电离的作用程度决定着元素特征原子谱线的强度,这是由局部热动力学平衡条件下,等离子体辐射出的原子光谱信号强度式(1)决定的

$$I_{\lambda}^{ki} = N_s A_{ki} \frac{g_k e^{-(E_k/k_B T)}}{U_s(T)}, \quad (1)$$

式中, $I_{\lambda}^{ki}$ 是针对某种元素的粒子s电子从能级 $E_k$ 跃迁到能级 $E_i$ 所辐射出的原子谱线的信号强度, $\lambda$ 是电子跃迁产生的原子谱线波长, $N_s$ 是发射波长为 $\lambda$ 的粒子数密度, $A_{ki}$ 是从能级 $E_k$ 跃迁到能级 $E_i$ 所对应的跃迁几率, $g_k$ 是第k能级的简并度, $k_B$ 是波尔兹曼常数, $T$ 是等离子体的温度, $U_s(T)$ 是等离子体在温度为 $T$ 时发射粒子的分布函数,由式(2)表达

$$U_s = \sum_i g_i \exp\left(\frac{-E_i}{k_B T}\right), \quad (2)$$

式(1)中,当温度 $T$ 确定以后,除 $N_s$ 以外的其它量都是定值, $N_s$ 是唯一决定原子谱线强度 $I_{\lambda}^{ki}$ 的变量. $N_s$ 是发射波长为 $\lambda$ 的粒子数密度,也对应着具有激

发态能级  $E_k$  的粒子数密度,  $N_k$  的数值取决于雪崩电离发生的深度,也就是体系中自由电子和原子、离子碰撞的充分程度.当激光会聚光斑处的物质由熔融态气化时,体积瞬间膨胀,与周围的环境形成显著的压强差;根据已有的研究<sup>[6,7]</sup>,如果周围的气压处于一个合适值,使得周围气体将对气化物质体系产生一种束缚作用,这种束缚作用使得气化物质体系不至于很快膨胀开来,从而为雪崩电离的充分作用赢得了较多的时间.但如果周围气压大大超过这个合适值,那么物质气化体系会被束缚的“过紧”,使得气化体系周围形成一圈“保护层”,从而抑制激光和体系的能量耦合效率.如果周围的气压小于这个合适值,则周围气体对物质气化体系的束缚变小,使得气化体系很快膨胀开来,导致雪崩电离的作用时间变短.如果周围的气压远远小于这个合适值,比如近似真空环境,则物质气化体系膨胀的将非常快,雪崩电离的贡献将变得很小.由于雪崩电离的作用程度直接决定了式(1)中  $N_k$  的数值,所以气压会很显著地影响等离子体光谱的信号强度.

### 3 气压对激光诱导等离子体光谱影响的试验研究

为了量化周围气压对激光诱导等离子体光谱辐射的影响,从而更科学地论证激光诱导等离子体光谱技术应用于月球探测的可行性,本文开展了低气压条件下的试验研究.

试验装置如图3所示,核心组件是激光器、真空室和光谱仪.激光波长 1064nm,激光脉冲能量 100mJ,激光脉冲宽度 5ns.真空室顶部的会聚镜在保证密封的前提下对入射的激光束进行会聚;底部样品台能够适应不同高度样品的会聚;光纤探头通过真空光纤接口与真空室外界的光路相通.试验时,激光束通过一个 45°折返镜入射到真空室,使得激光束在铝合金样品表面良好会聚,利用真空泵改变真空室中的气压环境,光纤探头接收等离子体能量,并通过真空接口和光纤耦合到光谱仪中,光谱数据进入计算机存储、分析.试验过程中气压从 1 个标准大气压开始逐渐减小,有效数据点取自 750torr、600torr、75torr、0.03torr、0.01torr、0.00075torr、0.000075torr、0.0000075torr 等气压条件下时的测量数据,试验数据如图4所示.

图4(a)中 B、C、D、E、F、G、H、J 等 8 条曲线分别代表在各个气压点处采集到的试验数据,其中 F、G、H、J 等 4 条曲线在图4(b)图中单独描述,目的是

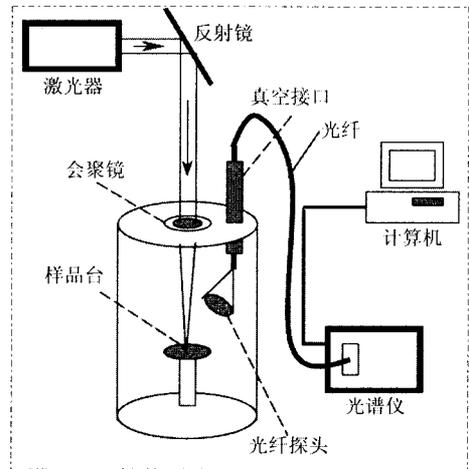


图3 低气压试验装置图  
Fig.3 Experimental setup for low pressure experiment

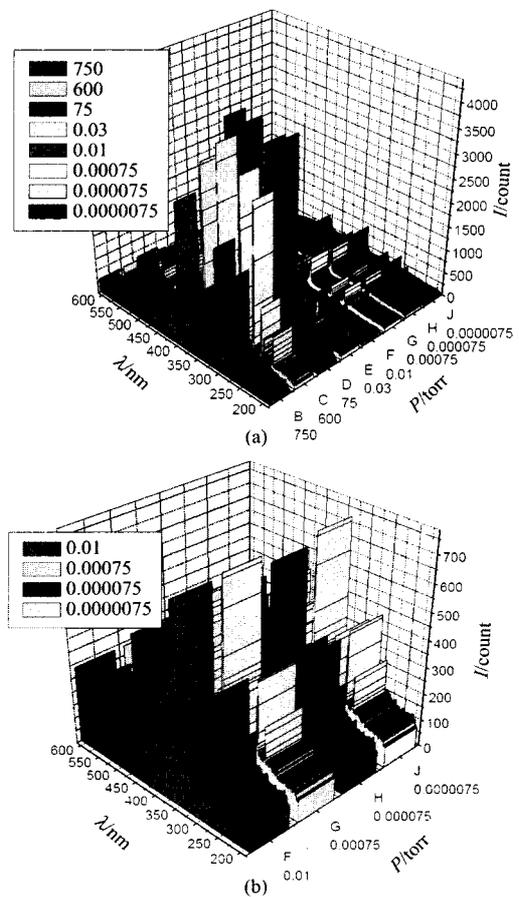


图4 低气压试验数据  
Fig.4 Experimental data for low pressure experiment

为了比较它们的相对强度.分析这些数据发现,当气压从 750torr(接近 1 个标准大气压)减小时,谱线信号强度首先增加,根据上文的阐述,出现这种趋势可能是因为随着压强的减小,物质气化体系受周围气压的束缚变小,体系周围抑制激光能量耦合的“保

护层”得以“松懈”,导致更多的激光能量耦合到体系中,从而使得雪崩电离的作用增强.当气压从75torr进一步减小时,谱线信号强度明显衰减,这可能是由于周围气压太低,导致物质气化体系迅速膨胀,雪崩电离的作用程度显著减弱.当气压从0.01torr继续减小,一直到0.0000075torr的过程中,谱线信号强度的衰减逐渐平缓,并趋于稳定,这种现象有两种可能的解释,一种解释是在如此低的气压环境下,雪崩电离的作用太小以至于可以忽略,谱线的信号强度主要来源于多光子吸收电离的贡献,而多光子吸收电离几乎不受气压影响;另一种解释是在如此低的气压环境下,雪崩电离的作用趋于稳定,当气压继续减小时对其产生的影响可以忽略.

#### 4 结语

本文要论证激光诱导等离子体光谱技术应用于月球探测的可行性,通过分析该技术的物理机制,初步总结出气压影响等离子体光谱探测的可能规律,进而开展不同等级低气压环境下的试验研究,研究结果表明,存在一个合适的气压使得激光诱导等离子体光谱的信号强度最大,当周围气压高于或者低于这个气压值时,光谱信号强度都受到不同程度的衰减;在气压很低的环境下(小于0.01torr),信号强度相比于750torr时有大约5倍的衰减,但是当气压进一步减小时,信号强度的衰减逐渐平缓,并趋向平稳.本文的试验环境虽然局限于0.0000075torr的低压极限值,但从0.01torr到0.0000075torr的过程,气压经历了几个量级的变化,而谱线信号强度却趋于稳定,尤其是在0.00075torr、0.000075torr、0.0000075torr三种气压条件下得到的信号强度基本一致.因此,可以预测在气压更低的环境下,比如月球表面环境(平均约 $10^{-9}$ torr),激光诱导等离子体光谱技术仍然可以获取有效的数据,但由于信号强度的衰减,相比于地球表面环境,该技术在月球表面的探测性能将受到较大的影响,比如探测距离、探测灵敏度等.

已有研究显示<sup>[8]</sup>,如果基于飞秒激光器进行激光诱导等离子体光谱探测,相比于纳秒激光器,等离子体产生的物理机制存在较大的差异,其中一点对本文的研究很有意义,那就是,在飞秒激光脉冲作用下,多光子吸收电离机制占主体,雪崩电离机制居次要地位.因此可以推测,在低气压环境下进行激光诱导等离子体光谱探测,利用飞秒激光器可能会在一定程度上缓解低气压对探测结果的负面影响,这是本文计划下一步开展的工作.

#### REFERENCES

- [1] QI Hong-Xing, SHU Rong, MA De-Min, *et al.* Elemental recognition method based on laser induced breakdown spectroscopy[J]. *J. Infrared Millim. Waves* ( 齐洪兴,舒嵘,马德敏,等.基于激光诱导解离光谱技术的元素识别方法. *红外毫米波学报*), 2007, **26**(1):52—55.
- [2] Kurniawan H, Nakajima S, Batubara J E, *et al.* Laser-induced shock wave plasma in glass and its application to elemental analysis[J]. *Appl. Spectrosc.*, 1995, **49**(8):1067—1072.
- [3] Yamamoto K Y, Cremers D A, Ferris M J, *et al.* Detection of metals in the environment using a portable laser-induced breakdown spectroscopy instrument [J]. *Appl. Spectrosc.*, 1996, **50**(2):222—233.
- [4] Knight A K, Scherbarth N L, Cremers David A, *et al.* Characterization of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for application to space exploration [J]. *Appl. Spectrosc.*, 2000, **54**(3):331—340.
- [5] Salle B, Lacour J L, Mauchien P, *et al.* Comparative study of different methodologies for quantitative rock analysis by laser-induced breakdown spectroscopy in a simulated martian atmosphere [J]. *Spectrochim. Acta Part B*, 2006, **61**:301—313.
- [6] Cremers D A, Sevostiyanova E V, Gibson L, *et al.* LIBS analysis of geological sample at low pressures: application to Mars, the moon, and asteroids [C]. *Lunar Planet. Sci.*, 2004, XXXV, 1589.
- [7] Harris R D, Cremers D A, Khoo C, *et al.* LIBS-based detection of geological samples at low pressures (<0.0001 TORR) for moon and asteroid exploration [C]. *Lunar Planet. Sci.*, 2005, XXXVI, 1796.
- [8] Margetic V, Pakulev I A, Stockhaus A, *et al.* A comparison of nanosecond and femtosecond laser-induced plasma spectroscopy of brass samples [J]. *Spectrochim. Acta Part B*, 2000, **55**:1771—1785.