

·测试、试验与仿真·

激光诱导 Al 等离子体发射光谱分析

韩真真, 郝晓剑

(中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 激光诱导等离子体技术长期以来都是研究激光与物质相互作用的重要课题。研究并设计了激光诱导等离子体实验系统, 应用 Nd:YAG 激光器诱导 Al 样品产生等离子体, 获得了不同能量下的 Al 等离子体发射光谱, 分析了 Al 样品中所含元素种类以及谱线强度与激光能量之间的变化关系。实验结果表明, Al 样品中含有 Fe、Mg 元素, 随着激光能量的增大, 谱线强度明显增大。

关键词: 激光诱导等离子体; Nd:YAG 激光器; 发射光谱; 激光能量

中图分类号: O657

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-06-0064-04

Emission Spectra Analysis of Aluminum Plasma Induced by Laser

HAN Zhen-zhen, HAO Xiao-jian

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Laser-induced plasma technology is an important topic of the research on interaction between laser and material for a long time. The experiment system of laser induced plasma is researched and designed. Nd:YAG laser is used to induce Aluminum sample to produce plasma. And the Aluminum plasma emission spectra under different energies are obtained. The element types contained in Aluminum sample and the changing relationship between spectral line intensity and laser energy are analyzed. Experimental results show that the Aluminum sample contains Fe and Mg elements and with the increase of laser energy, spectra intensity increases obviously.

Key words: laser-induced plasma; Nd:YAG laser; emission spectra; laser energy

随着激光应用的发展,人们对激光诱导等离子体技术进行了大量的研究,激光与物质的相互作用与很多因素有关,尤其是激光和材料的性质(如激光的能量、波长等)。近年来,在激光光谱分析技术方面,利用激光等离子体的特征辐射对固体、液体、气体样品的分析已经取得了极大的进展,在材料、环境、地球科学和商品检测等各行业得到了广泛的应用^[1-3]。

强脉冲激光冲击固体材料,引起材料烧蚀、诱导产生等离子体,从表面溅射出大量的电子、原子、分子以及它们的正负离子等,因此激光诱导等离子体是很复杂的过程^[4-6]。金属 Al 是很常见也很重要

的金属材料,因此对于 Al 元素等离子体光谱的研究,不仅在 AlN 薄膜材料制备、等离子体本身特征的研究、同位素分离等领域有重要的应用价值,还对谱线测温中原子发射光谱的研究有重大意义。针对激光能量这一影响因素,测试并分析了不同激光能量下 Al 样品的等离子体光谱,并以 Al 样品为例对所含元素进行判断分析。

1 激光诱导过程及机制

应用激光的强脉冲光源对固体、液体、气体样品进行照射,样品因吸收高能光子而熔化、气化,产

收稿日期: 2014-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(61473267); 山西省人社厅留学人员科研活动资助项目; 太原市科技局明星专项项目(120247-20)

作者简介: 韩真真(1989-), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 研究方向是光电探测理论与技术。

生大量的自由电子。只要激光的能量足够强,作用时间足够,自由电子在激光的作用下去轰击其他的原子,使原子发生电离,形成雪崩效应,最终在样品表面形成粒子团(等离子体)^[7-8],如图1所示。

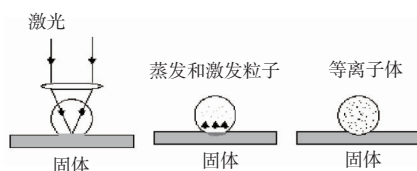


图1 等离子体形成过程

激光诱导击穿光谱的形成大致有三个过程:一是激光等离子体的形成,高能量的激光加热并蒸发少量的样品,形成一个等离子体状态的高温区;二是连续光谱的形成,在等离子体冷却过程中,韧致辐射和复合辐射形成的连续光谱,其中主要是等离子体中各元素电离线形成的连续背景谱线,该过程持续时间一般为几百纳秒;第三个过程是原子或离子线状光谱的形成,电子在分立的束缚能级之间的跃迁而形成的线状光谱。

原子受电或热等的激发,外层电子获得能量,由 E_1 低能级激发到 E_2 高能级,此时原子处于激发态,但是激发态不稳定,在能级上的电子会直接跃迁回到原来的能级并发射一定波长的光,即一条谱线,其波长为

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{ch}{E_2 - E_1} \quad (1)$$

式中, c 为光速; h 为普朗克常数; E_2 为高能级能量; E_1 为低能级能量。

当处于激发态的原子中的电子经过中间能级跃迁回到原来的能级时,就会产生不同波长的光,在光谱中形成几条谱线。等离子体中可能产生的跃迁光谱有四种:分立谱、韧致辐射、自由-束缚跃迁、自由-准连续态跃迁,后三者为连续谱,因此在等离子体的发射光谱中会伴随着大量的连续谱。

2 实验部分

实验装置中采用的激光器为脉冲 Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet, 掺钕钇铝石榴石) 激光器,是一种固体激光器,可产生脉冲或连续式的激光,发射的激光波长为 1 064 nm。Nd:YAG 激光器具有量子效率高、热效应小、增益高、阈

值低、机械性能良好等优点,广泛应用于激光诱导击穿光谱技术中。实验采用的光谱仪是荷兰 Avantes 公司的 AvaSpec-2048FT 光谱仪,该光谱仪基于 USB 平台,可接收外来触发信号,同时可向外输出 TTL 信号触发激光器等仪器,具有多个通道,光谱范围为 200~1 000 nm,光谱分辨率小于 0.1 nm,如图2所示。

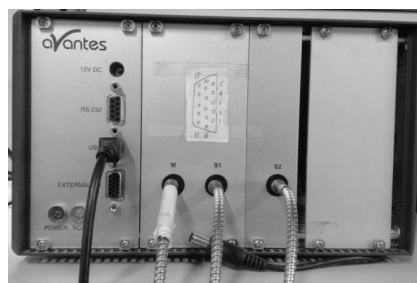


图2 AvaSpec-2048FT 光谱仪

如图3所示,激光器发射一定强度的激光,经过反射镜、分光镜和聚焦透镜后,聚焦到样品表面产生等离子体,光谱仪通过聚焦系统采集等离子体光谱,并将数据存储在计算机中。其中,分光镜将光束传到焦耳计,用以计算激光能量。信号发生器产生固定频率的方波信号,光谱仪接收信号发生器的上升沿信号,并产生一个相同频率的窄脉冲信号来触发激光器。等离子体辐射包括连续背景辐射、离子谱线辐射和原子谱线辐射,但是其衰减速度^[9]是不同的,原子光谱辐射的增长速度和衰减速度比连续背景辐射和离子辐射慢,故一段时间延迟后,原子谱线辐射将占主导地位。因此,为了获得较好的信噪比,需要对光谱仪设置适当的延迟时间。实验中设置光谱仪的延迟时间为 200 ns,积分时间为 20 ms。

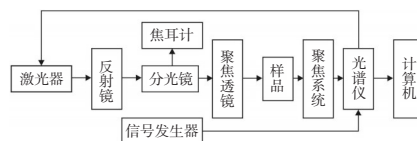


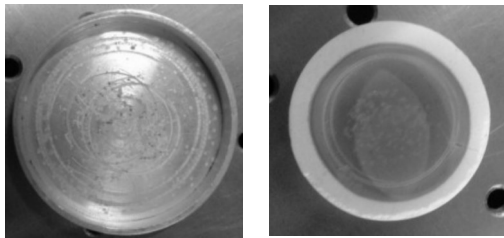
图3 实验装置图

3 实验结果及分析

实验中,对样品进行连续的激光诱导激发,每次实验采集 100 组数据。为保证每次激发情况相同,产生稳定的等离子体,样品置于步进转台上,步进转台的转速为 10 Hz。实验所用光谱仪为三通道光谱仪,每

通道采集2 048个数据,通过USB接口传到计算机中,构成226.59~816.90 nm的光谱波段,并用Origin软件绘制出光谱图。本实验主要针对Al金属样品,利用得到的谱线图和NIST(national institute for standards and technology)元素谱线库,可判断样品所含的元素,并比较不同的激光能量产生的谱线强度变化。

利用Al样品进行激光诱导等离子体实验,对Al进行多次激发,激发后的样品如图4a所示。可见样品消耗量小,只有很小的凹坑,与传统的光谱分析手段相比有很大优势。对于Cu、Al等金属样品,可直接采用金属薄片,对于粉末状的样品,为保证每次激发的情况相同,通常将粉末状样品压成饼状,有利于产生稳定的等离子体,图4b所示为石灰粉压成的饼状样品。

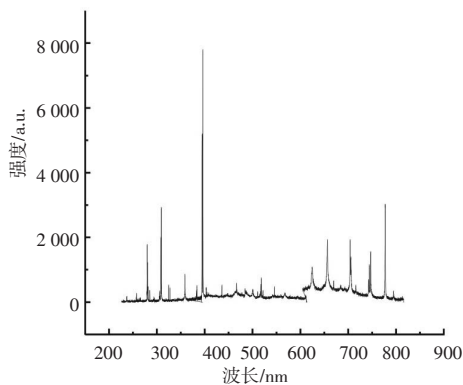


(a) 激发后的Al样品块

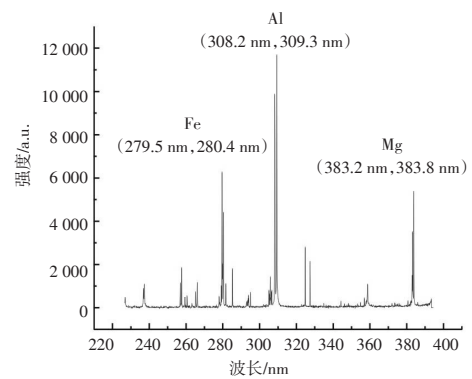
(b) 石灰样品

图4 实验样品

考虑到光谱仪的分辨率为0.1 nm,谱线范围设置为中心波长的 ± 0.05 nm范围内,结合NIST(national institute for standards and technology)元素谱线库,对图5中强度较大的几条谱线进行了查找。由图5中可以看到383.2 nm、383.8 nm的两条谱线,对照NIST,其为Mg的两条原子谱线。一般来说,光谱图中含有某种元素的两条谱线,即可认为含有该种元素。只考虑光谱仪第一通道的数据,故可以认定实验所用Al样品中,含有Fe、Mg元素。



(a) 三通道光谱图



(b) 第一通道光谱图

图5 Al光谱图

图6为Al不同激光能量下的光谱图。虚线表示高激光能量,实线为低激光能量。从图6中可以明显看出,激光能量大小对谱线强度有明显的影响。随着激光能量的增大,谱线强度也明显增大,谱线的半高宽也随激光能量的增加有所增大,但谱线峰值处的波长是不变的。

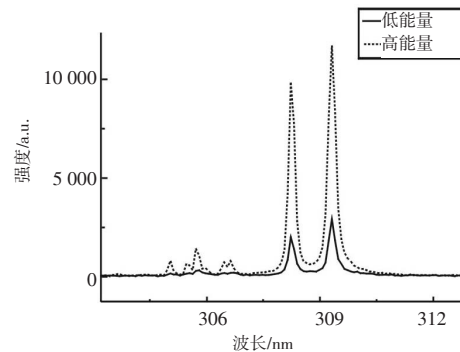


图6 不同能量下的Al光谱

4 结论

阐述了激光诱导等离子体的过程及机制,并通过实验研究了激光诱导Al等离子体的方法,设计了激光诱导等离子体的实验系统。根据实验光谱图,参照NIST元素谱线库,分析了Al样品中所含的其他元素种类:383.2 nm、383.8 nm两条谱线是Mg的原子谱线。探究了激光能量对谱线的影响:随着激光能量的增大,谱线强度和半高宽增加,但峰值处波长没有变化。

参考文献

- [1] 姚红兵,邢博, Donna Strickland, 等. 紫铜等离子体特征谱线及其展宽形成机制[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(9):2117-2120.
- [2] 赵小侠,罗文峰,张相武,等. 基于 LIBS 技术的黄铜等离子体特征参量的研究[J]. 激光技术, 2013, 37(1):93-96.
- [3] 余亮英,陆继东,张娟,等. 激光感生击穿光谱及研究现状[J]. 激光技术, 2004, 28(1):103-107.
- [4] Pasquini C, Cortez J, Silva L M C, et al. Laser induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2007, 18(3):463-512.
- [5] 李倩. 激光在原子发射光谱分析中的应用研究[D]. 沈

阳: 沈阳理工大学, 2011.

- [6] Yamamoto K Y, Cremers D A, Foster L E, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy analysis of solids using a long pulse (150ns) Q-switched Nd:YAG laser[J]. Applied Spectroscopy, 2005, 59(9): 1082-1097.
- [7] 尹王保,张雷,张建宏,等. 基于激光诱导击穿光谱的镁元素分析研究[J]. 测试技术学报, 2011, 25(4):356-359.
- [8] 黄庆举. 激光烧蚀铜产生原子和离子光谱线的研究[J]. 光子学报, 2006, 35(12):1818-1821.
- [9] 罗文峰. 激光诱导击穿光谱技术的初步研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.

(上接第31页)

3 结论

利用两孔振幅掩膜的傅里叶变换法在双掺 Mg:Fe:LN 晶体和 Fe:LN 晶体中制作一维光子晶格, 通过功率探测器测量透射、衍射及二级衍射光强, 绘制光强、衍射效率随时间变化曲线。对比研究了波长 488 nm 与 532 nm 光波在双掺 Mg:Fe:LN 晶体与 Fe:LN 晶体中制作光子晶格的不用, 发现双掺 Mg:Fe:LN 晶体在相同波长下制作的光子晶格反应快、衍射效率高; 波长 532 nm 光在制作光子晶格时比 488 nm 达到最高衍射效率的用时短。

参考文献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20):2059-2061.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. Phys Rev Lett, 1989, 58(23): 2486-2489.
- [3] 刘思敏,郭儒,许京军. 光折变非线性光学及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 265-279.
- [4] 杨春辉,孙亮,冷雪松,等. 光折变非线性光学材料铌酸

锂晶体 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 233-255.

- [5] 杨立森,武瑞祥,陆改玲,等. 光诱导光子晶格折射率调制制度的实验研究 [J]. 光电子·激光, 2008, 19(11): 1530-1533.
- [6] 李永辉,杨立森,逯文婷,等. 光子晶格的制作及衍射效率的研究 [J]. 信息记录材料, 2012, 13(5): 17-21.
- [7] 杨立森,刘思敏,张光寅,等. 快速响应的光致折射率改变效应的实验研究 [J]. 物理学报, 2004, 53(2): 461-467.
- [8] 刘思敏,陈晓虎,汪大云,等. 光子晶体光纤和波导 [J]. 物理, 2001, 30(11): 675-680.
- [9] 王清月,栗岩峰,胡明列,等. 光子晶体光纤非线性特性的研究 [J]. 物理, 2005, 34(1): 43-49.
- [10] 王伟,侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(2): 43-58.
- [11] 李曙光,刘晓东,侯蓝田. 光子晶体光纤进展及其应用 [J]. 世界科技研究与发展, 2001, 23(6): 7-11.
- [12] 赵玲慧,魏志义. 光子晶体光纤及其应用 [J]. 物理, 2004, 33(5): 335-339.
- [13] 王龙飞,杨立森,武一洁,等. 空间二次谐波产生对光子晶体结构的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 071901.
- [14] 王龙飞,杨立森,武一洁,等. 光折变晶体中空间二次谐波产生的影响因素 [J]. 光电技术应用, 2013, 28(5): 19-23.