

文章编号 1004-924X(2007)11-1686-04

激光诱导铜产生等离子体羽辉的颜色特性

黄庆举

(茂名学院 物理系, 广东 茂名 525000)

摘要: 为了研究等离子体羽的辐射特性,建立了激光诱导辐射模型。通过时空分辨光谱测量技术,测定了激光烧蚀铜诱导产生等离子体羽辉在氧气环境下的发射光谱及其发射强度随时间与空间的分布;利用快速照相法,拍摄了等离子体羽的照片。结果表明:等离子体羽光谱主要由Cu的原子谱线、一价离子谱线组成;其不同区域的颜色不同,且随环境气压而变化。认为等离子体羽的不同区域诱导发光机理不同,中心区域以连续辐射为主;中间区域以原子谱线和一价离子谱线为主;外围区域以原子谱线为主。连续辐射主要来自近靶处高能电子运动而产生的韧致辐射以及电子和一价离子的复合;一价离子谱线主要来自近靶处高能电子与一价离子碰撞传能;原子谱线主要来自电子与原子的碰撞传能以及近靶处电子与一价离子的复合。

关键词: 激光烧蚀;等离子体羽辉;颜色;金属Cu

中图分类号: TN249;O536 **文献标识码:** A

Colour properties of plasma plume produced by pulsed laser ablating metal Cu

HUANG Qing-ju

(*Department of Physics, Maoming College, Maoming 525000, China*)

Abstract: In order to study plasma plume radiation properties, a radiation model of plasma plume was established. Based on time and spatial-resolved measurements the plasma plume emission spectrum in oxygen by pulsed laser ablating copper was analyzed, and the photographs of plasma plume were given. The experimental results show that plasma emission spectra are primarily composed of atomic spectrum and univalent ion spectrum. The plasma plume has different colours in different regions, the region colour is changed with ambient gas pressure. The core region spectra are primarily composed of bremsstrahlung radiations, and the middle region spectra are primarily composed of atomic spectrum and univalent ion spectrum, while the outskirt region spectra are primarily composed of atomic spectra. The continuous background radiation comes from the bremsstrahlung radiation ejected from the electron moving near target and recombination of the electron and univalent ion near target, and the primary mechanism of atomic radiation is electron collision energy transfer and recombination of electron and univalent ion near target, while the primary mechanism of univalent ions radiation is electron collision energy transfer.

Key words: laser ablation; plasma plume; colour; copper

收稿日期:2006-12-03;修订日期:2007-02-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 29273130);广东省社会发展科技计划资助项目(No. 73065);茂名学院科学研究基金项目(No. 203396)

1 引言

强激光脉冲辐照固体材料将引起材料烧蚀,诱导产生等离子体发光,并从靶面溅射出大量电子、原子、分子、原子分子簇以及它们的正负离子。激光烧蚀的过程十分复杂,从动力学来分析等离子体的形成、传播到消失,经历了一个电子、原子、离子、分子和粒团之间相互剧烈碰撞作用的过程^[1-2]。在研究的过程中,人们往往通过改变作用条件的方法,诸如不同的激光波长、脉宽、强度、靶材料、环境气体的压强与性质以及其它因素^[3-5],对靶的烧蚀速率、产物平动能以及产物的光辐射规律等进行大量的研究,使人们对激光烧蚀过程有了一定的认识。但迄今为止,人们对等离子体光辐射的机理颇有争议。Harilal 等人^[6]认为,等离子体的原子辐射来自激光烧蚀溅射出的物质团簇或颗粒在等离子体中被电子汽化并激发;Timmer 等人^[7]认为在汽相等离子体中电子与离子的复合是原子和离子激发的主要过程。激光烧蚀材料诱导发光的机理非常复杂,激光等离子体的羽光发射包括特征原子线、离子线、连续背景光,它能够反映等离子体羽的整体特征,揭示激光烧蚀金属的机理。时空分辨光谱测量是了解激光烧蚀诱导等离子体传播过程的有用工具。本文采用 1 064 nm 的脉冲激光烧蚀金属 Cu 的方式,拍摄等离子体羽的照片,采用时间与空间分辨光谱测试技术,测量了等离子体中的发射光谱,研究了不同环境气压下等离子体羽的外观颜色特性,并对激光等离子体的辐射机理进行了探讨。

2 实验

实验装置如图 1 所示,脉冲 Nd:YAG 1 064 nm 激光器(脉冲宽度为 20 ns)发出的 1 064 nm 激光通过一个透镜($f=100$ mm),经过石英窗进入烧蚀室,垂直聚焦到一个可旋转的 Cu 靶上,靶的转速为 240 r/min。激光与 Cu 靶作用的光斑直径为 0.85 mm 左右,烧蚀室内的氧气压强在 3 Pa~101.3 kPa 内可调。实验使用氧气作为缓冲气体,激光辐照表面时,在垂直于靶面的方向上,能够清楚地看到一个等离子体羽状发光体。实验中所用的铜靶纯度为 99.99%,在垂直于靶

面的法线方向上,用 $f=28$ mm 的照相机在适当的距离处把等离子体羽成像在照相机彩色底片上。激光脉冲为 5 次/秒,光信号触发器可以使照相机与激光脉冲信号同步,照相机的幅率为 6,利用快速照相的办法获得清晰的等离子体羽的彩色照片,关于测量等离子体羽发射光谱的实验装置与文献[8]相同,在此不再重述。

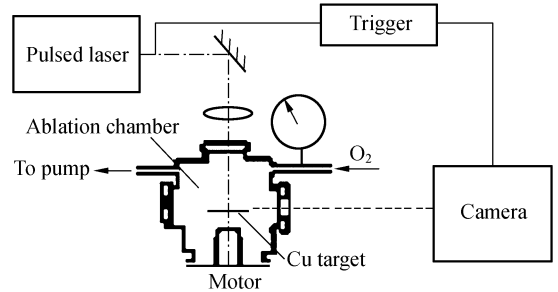
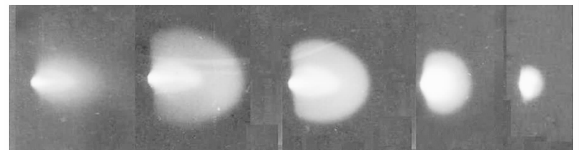


图 1 拍摄激光烧蚀金属 Cu 产生等离子体羽的实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for plasma plume taken by laser ablating Cu sample

3 实验结果与讨论

在不同的氧气压强下,拍摄了激光烧蚀金属 Cu 产生等离子体羽的照片,如图 2 所示,从照片可以看出,等离子体羽的中心在低环境气压下为白色,中间为黄、红、紫等混合色,外围为黄绿色。等离子体羽的范围随着环境气压的增大而逐渐减小,内层的颜色逐渐变淡,最后呈白色;外层在低压下呈黄绿色,随压强的增大,发光区的范围减小,最后呈较窄的淡黄绿色光环。各层的发光范围随环境气压的增大而被压缩的程度依次减小,等离子体羽辉的辐射强度随氧气压强的增加有一个先增大后减小的过程。



(a)3 Pa (b)1.3 kPa (c)16.8 kPa (d)38.5 kPa (e)81.3 kPa
图 2 在不同的氧气压强下,拍摄的激光烧蚀金属 Cu 产生等离子体羽的照片

Fig. 2 Photographs of plasma plume taken in different oxygen pressures

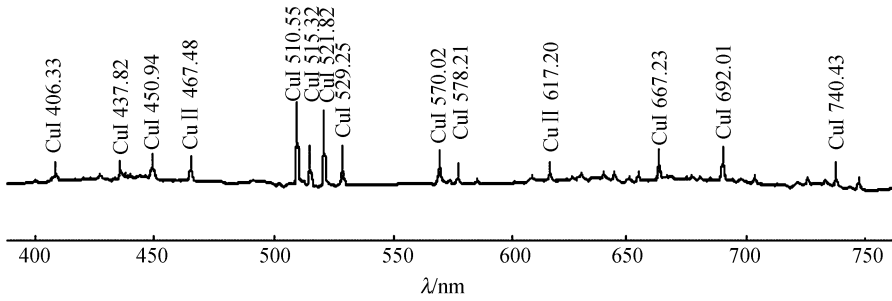


图 3 在 16.8 kPa 氧气压强下,离靶 1.15 mm 处的等离子体发射光谱图

Fig. 3 Emission spectrum of Nd:YAG laser ablating Cu sample in 16.8 kPa oxygen pressure at 1.15 mm from target

表 1 主要发射光谱的归属和特性

Tab. 1 Designation and properties of emission spectra

波长(nm)	归属	颜色	视见函数	波长(nm)	归属	颜色	视见函数
406.33	CuI	紫	0.001	529.52	CuI	绿	0.862
437.82	CuI	紫	0.020	570.02	CuI	黄	0.952
450.94	CuI	蓝	0.038	578.21	CuI	黄	0.860
467.48	CuII	青	0.090	617.20	CuII	橙	0.432
510.55	CuI	绿	0.503	667.23	CuI	红	0.034
515.32	CuI	绿	0.605	692.01	CuI	红	0.007
521.82	CuI	绿	0.701	740.43	CuII	红	0.000 25

图 3 是在 16.8 kPa 的氧气压强下,离靶 1.15 mm 处所测定的激光烧蚀金属 Cu 诱导等离子体的可见光(390~760 nm)发射光谱图。表 1 为主要发射光谱的归属和特性,从图 3 与表 1 可以看出,等离子体的发射特征光谱线主要由 Cu 原子激发谱线 CuI 构成,CuI 来自铜原子内部的电子从高能级到低能级之间的跃迁,其次为一价离子激发谱线 CuII,CuII 来自一价铜离子内部的电子从高能级到低能级之间的跃迁。从发射总强度来看,铜的原子谱线与离子谱线相比,不仅数目多,而且强度也大。这些原子和离子辐射谱线都叠加在较强的连续发射谱的背景光上。在可见光范围内原子线较强的是 CuI510.55 nm、CuI515.32 nm、CuI521.82 nm 的绿光,其次是 CuI437.82 nm、CuI406.33 nm 的紫光 and CuI450.94 nm 的蓝光,再次是强度较弱但视见函数不大的 CuI667.23 nm、CuI692.01 nm 的红光,最后是强度较弱但视见函数最大的 CuI570.02 nm、CuI578.21 nm 的黄光。

在 16.8 kPa 的 O_2 压强下,羽光中 CuI510.55 nm、CuII467.48 nm、CuI578.21 nm

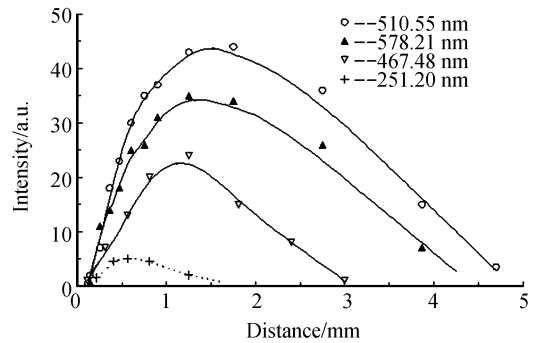


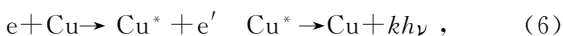
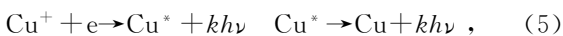
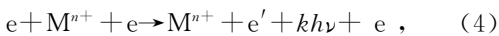
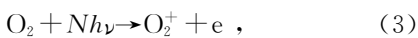
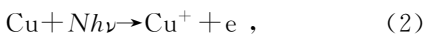
图 4 在 16.8 kPa 氧气压强下,不同谱线发光强度的空间分布

Fig. 4 Spatial-resolved intensity distribution of different radiation from recorded following laser ablating Cu in 16.8 kPa O_2

特征谱线辐射强度以及 251.20 nm 背景光辐射强度的空间分布如图 4 所示。从图中可以看出,背景光的辐射范围为 1.7 mm,其辐射强度最大处离靶面 0.6 mm,这对应于等离子体羽的最中心区;青色 Cu II 467.48 nm 的辐射范围为 3.1 mm,其辐射强度最大处离靶面 1.2 mm,视

见函数为 0.860,人眼对此类光谱最敏感,对应于等离子体羽的中间区;绿色 CuI510.55 nm 的辐射范围为近 4.8 mm,其辐射强度最大处离靶面 1.7 mm,视见函数为 0.503,人眼对此类光谱较敏感,对应于等离子体羽的外围区。

铜在强激光作用下几个 ns 内吸收激光光子的能量转化为蒸气,包括热传导、铜表面的熔化和蒸发等物理过程。在较高能量激光的作用下,首先是蒸气的形成,然后再形成等离子体是一个连续的过程,在高速电子和后续激光作用下,靶面附近的环境气体发生电离击穿,形成一种汽相等离子体,而电子又将通过逆韧致辐射作用,吸收激光能量,而达到很高的速度^[9]。所有的蒸发物质以很高的速度向靶外传播,形成等离子体发光羽。由于激光光子的能量小于铜原子和 O₂ 分子的电离能,只能对其多光子电离,激光可使 Cu 表面的部分环境气体 O₂ 分子和 Cu 原子发生多光子电离。1 064 nm 激光光子的能量为 1.17 eV,Cu 原子的电离能为 7.726 eV,激光使 Cu 原子电离需要 7 个光子;一价 Cu 离子电离能为 20.292 eV,激光使一价 Cu 离子电离需要 15 个光子;二价 Cu 离子的电离能为 36.830 eV,使二价 Cu 离子电离需要 32 个光子;O₂ 分子电离能为 13.618 eV,使 O₂ 分子电离需要 12 个光子;一价 O₂ 离子的电离能为 35.116 eV,使一价 O₂ 离子电离需要 31 个光子。由于激光脉冲的持续时间短,使二价 Cu 离子及一价 O₂ 离子电离的几率很小,用主要公式表示为:



式中 $n=1,2;k=0$ 时,电子的能量被原子或离子吸收; N 为大于 1 的自然数; $k=1,2,3\cdots$ 时,产生单光子或多光子辐射, M^{n+} 表示带电粒子,式(1)表示电子的逆韧致辐射,式(2)、(3)表示靶原

子的多光子电离,式(4)表示电子的韧致辐射,式(5)表示电子与离子的复合激发辐射,产生原子和离子特征辐射线,式(6)、(7)表示电子与原子、离子的碰撞传能激发,产生原子和离子的特征辐射线。

在等离子体辐射过程中,若将碰撞与复合过程同时考虑,可表示^[10]:

$$\frac{dN^z(g)}{dt}=\alpha_{\text{CR}} N^{z+1} N_e-S_{\text{CR}} N^z(g) N_e,$$

式中 N_e 为电子密度, N^z,N^{z+1} 为电离度为 Z 和 $Z+1$ 的离子密度, α_{CR} 和 S_{CR} 分别为碰撞电离和辐射复合的速率系数,它们既是电子密度的函数,又是电子温度和原子参数的函数。

如果电子与原子、离子的碰撞传能激发为主要过程,由于离子的运动速度大于原子的运动速度^[11],那么铜离子线的发光范围应大于原子线的发光范围,但通常却相反。如果电子与离子的复合激发为主要过程,由于在等离子体羽中,铜的二价离子的密度远小于一价离子的密度,那么离子线的数量及强度与原子线相比,可以忽略不计,但事实并非如此。本文认为铜的原子线大多来源于近靶处的电子与一价铜离子的复合激发与远靶处的电子与铜原子的碰撞传能激发,而离子线大多来源于近靶处的高速电子与一价铜离子的碰撞传能激发。因此,在通常情况下,原子线的强度和发光范围比离子线的大,等离子体羽的外围应以原子辐射线为主。

等离子体羽的内层温度最高,为高速电子韧致辐射区,产生连续辐射,所以呈白色。随着环境气压的增大,多光子电离增加,等离子体中的电子与离子密度增加,高速电子产生的韧致辐射强度增加,因而始终呈白色。中间层的温度中等,此区主要存在电子与原子和一价离子的碰撞传能激发、电子和一价离子的复合激发,故呈混合色。在低压下从靶面出射的电子的动能较大,以电子与原子以及一价离子碰撞传能激发至高能态为主,可以产生 CuI406.33 nm, CuI437.82 nm、CuI450.94 nm 等原子线,强度较弱但视见函数不大的 CuI667.23 nm、CuI692.01 nm 的红光,及强