

脉冲激光诱导 Cu 靶产生发光羽的特性分析*

黄庆举

(茂名学院物理系, 广东茂名 525000)

摘 要 通过在不同的环境气压下拍摄脉冲激光烧蚀金属 Cu 诱导产生的发光羽, 获取了不同区域具有不同颜色特征的发光羽照片. 结果发现: 发光羽的颜色随环境气压的改变而变化. 采用空间分辨光谱技术, 测定了激光诱导金属 Cu 靶产生发光羽辐射强度的空间分布, 以及不同烧蚀环境气压对发光羽辐射强度的影响. 研究了脉冲激光烧蚀 Cu 表面诱导发光的动力学过程, 建立了可能的发光羽分区模型, 对发光羽的不同区域发光粒子的激发机理进行了探讨, 并用之定性地解释了所观察的实验现象. 结果分析表明: 脉冲激光诱导 Cu 产生的发光羽可以分为三个区域, 不同区域的发光机理不同, Cu 原子和 Cu 离子的激发机理不完全相同.

关键词 激光烧蚀; 发光羽; 金属 Cu; 脉冲激光

中图分类号 TN249; O536; O644. 18

文献标识码 A

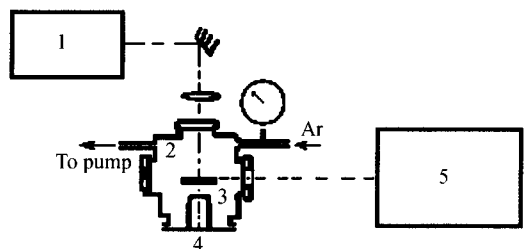
0 引言

激光烧蚀在沉积薄膜、材料合成、表面清洁与改性、外科手术、切割打孔以及光谱分析等许多科学技术领域有着广泛的应用前景^[1~4]. 在外观上, 激光烧蚀引起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, 可诱导产生一个等离子体的发光羽. 从动力学来分析发光羽的形成、传播到消失, 经历从靶面溅射出的粒子之间以及与环境气体分子间相互激烈碰撞作用的过程. 通过对发光羽的时间和空间分辨的光谱测量技术^[5~8], 对羽光的光谱特征及其对时空的变化规律和烧蚀环境气体的影响等方面来探讨激光烧蚀的微观机理. 激光等离子体的羽光辐射包括原子线、离子线、连续背景光, 它能够反映等离子体发光羽的整体特征, 揭示激光烧蚀金属的机理^[9~10]. 为了进一步认识激光烧蚀产生等离子体的发光机理, 本文用脉冲激光对金属 Cu 进行烧蚀, 拍摄在不同环境气压下的发光羽照片. 采用时空分辨光谱测量技术, 测定了发光羽的辐射强度随空间的分布, 通过对实验结果的分析, 对发光羽的辐射机理进行了探讨.

1 实验装置

实验装置如图 1. 脉冲 1064 nm 激光器(脉冲宽度为 20 ns, 功率密度为 2×10^9 W/cm²)发出的激光通过一个透镜($f=100$ 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 240R/min. 激光与 Cu 靶作用的光斑直径为 0.8 mm

左右, 烧蚀室里的气体压强在 13 Pa~101.3 kPa 内可调. 实验使用 Ar 气作为环境气体, 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 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发光羽成像在相机的彩色底片上, 利用快速照相的办法获得清晰的发光羽的彩色照片. 关于测量发光羽辐射的实验装置与文献[11]相同, 在此不再重述.



1. Pulsed laser 2. Ablation chamber 3. Cu target 4. Motor 5. Camera

图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

2 实验结果与讨论

图 2 为在烧蚀室内充入不同压强的 Ar 气时拍摄的发光羽照片. 从图中可以看出, 等离子体发光羽随着环境气压的增大而逐渐减小. 根据照片的特征把发光羽分为三个区, 如图 3. 从烧蚀点开始垂直法线方向呈喷射状的中心区为 I 区, 围绕它的中间层为 II 区, 最外层为 III 区. 0 为金属 Cu 靶面, I 区的颜色呈白色. 随压强的增大, 发光范围逐渐减小, 但其颜色始终为白色. II 区在低压下呈紫黄色, 随压强的增大, 发光范围逐渐减小, 但其颜色逐渐淡化为近白色; III 区在低压下呈深绿色, 随压强的增大, 绿色区的范围减小, 颜色逐渐淡化, 最后仍呈较窄的浅

*国家自然科学基金(29273130)资助

Tel: 0668-3145897 Email: qjhuang@sohu.com

收稿日期: 2006-02-27

绿色光环. I、II、III 区的发光范围随环境气压的增大而被压缩的程度依次减小. 若改用氧气和氢气作为环境气体, 所观察的现象类同.

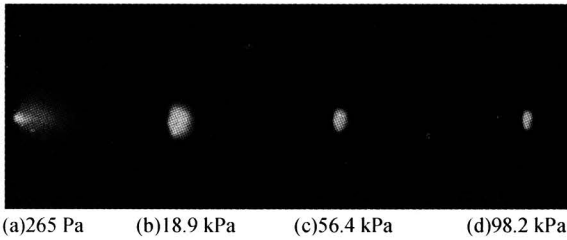


图 2 在不同的 Ar 压强下拍摄的发光羽照片
Fig. 2 The photograph of plume taken in different pressure of argon

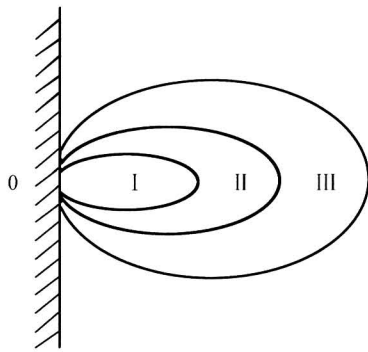


图 3 脉冲激光烧蚀 Cu 产生发光羽的分区模型
Fig. 3 The model of plume produced by pulsed laser ablation of metal Cu

在 0.01 kPa~101.3 kPa 的 Ar 气压强范围内进行了发光羽辐射的空间分布测量与计算, 其结果如图 4. 从图中可以看出: 随着环境气压的增大, 发光羽辐射强度有一个先增大后减小的过程. 另外, 在烧蚀靶的后面也观测到了少量的辐射线. 峰值的位置呈压缩—膨胀—压缩的趋势. 假定粒子(包括电子、离子、原子)之间的作用能使粒子发光, 称之为有效碰撞. 当环境气压很低时, 金属 Cu 和环境气体的多光子电离较弱, 形成的等离子体中电子的密度很小, 粒子的平均运动自由程较大, 粒子之间的有效碰撞次数较少, 电子与粒子的碰撞传能激发较少, 因此发光羽的辐射强度较弱, 发光羽的辐射强度最大值处离靶面较远; 随着环境气体压强的增加, 金属 Cu 和环境气体的多光子电离增强, 形成的等离子体中电子的密度增大, 粒子运动平均自由程减小, 有效碰撞的次数增加, 电子与粒子的碰撞传能激发较多, 发光羽的辐射强度增大, 发光羽的辐射强度最大值处离靶面较近; 当环境气体压强适当时, 金属 Cu 和环境气体的多光子电离最强, 等离子体中的电子密度较大, 使粒子运动的平均自由程最理想时, 有效碰撞次数达到最大值, 电子与粒子的碰撞传能激发量最大, 此时发光羽的辐射强度达最大值, 发光羽的辐射强度最大值处离靶面的距离又稍微增大; 如

果继续增大环境气压, 金属 Cu 和环境气体的多光子电离又减弱, 等离子体中的电子密度减小, 粒子运动的平均自由程较短, 虽然这时粒子之间的作用次数很多, 但由于消激发碰撞以及激发原子和离子无辐射跃迁的增加, 有效碰撞次数又减少, 故发光羽的辐射强度将减弱, 发光羽的辐射强度达最大值的位置呈压缩—膨胀—压缩的趋势. 在激光与靶作用的过程中, 由于靶面的尺寸不大(直径为 1 cm 左右), 烧蚀点离靶边缘距离很小, 靶对辐射线无衍射作用, 所以在靶后区域范围内观测到的辐射来自脉冲激光的散射光.

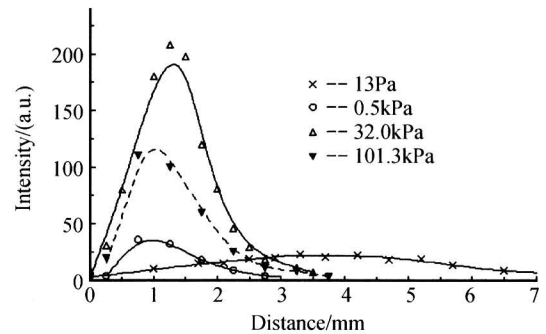
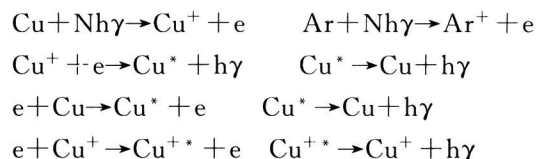


图 4 在不同的 Ar 压强下, 发光羽辐射强度的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of the emission intensity of the plume at various pressure of argon

在激光脉冲作用期间, Cu 原子与 Ar 原子中的一部分可以发生多光子电离. 电子将通过逆韧致辐射作用, 吸收激光能量, 而达到很高的温度与能量. 在 Cu 原子和离子的激发机理中, 包括电子的碰撞传能激发以及电子与离子的复合激发使原子和离子处于激发态, 复合过程中伴随着连续辐射. 用主要公式表示为:



高能电子在密集等离子体环境中快速运动, 产生了较强的韧致辐射, 形成背景光中占主要地位的连续辐射, 同时发光羽被压缩. 相对原子激发而言, 离子激发还需要气相等离子体有更高的温度. 在气相等离子体随时间降温的过程中, 离子的激发将比原子的激发提前停止. 随着环境气压的增大, 出射粒子的运动自由程缩短, 激烈的碰撞阻碍了粒子的迁移, 使发光羽更加靠近靶的表面, 因此发光羽随环境气压的增大而减小. III 区在外围, 受环境气压的影响最大, 所以发光范围受环境气压的影响最大; II 区在发光羽的中间, 受环境气压的影响次之; I 区在发光羽的最内层, 受环境气压的影响最小. 在垂直和平行于靶面的方向上, 随着离烧蚀点距离的增大, 温

度逐渐减小。I区的温度最高,为高能电子韧致辐射区,产生连续辐射的背景光,所以呈白色。随着环境气压的增加,等离子体中的电子密度增加,电子产生的韧致辐射强度增加,因而始终呈白色。II区的温度中等,此区存在电子与原子及离子的碰撞传能激发、电子和离子的复合激发以及高能电子的韧致辐射。在低压下从靶面出射的电子的速度较大,以电子与原子以及离子碰撞传能激发至高能态为主,根据测量的等离子体发光羽的光谱图可知,谱线的波段大多在紫光波段和紫外区,产生 CuI417.8 nm(视见函数为0.003)、CuI427.5 nm(视见函数为0.011)、CuI437.8 nm(视见函数为0.012)等紫光和CuI570.0 nm(视见函数为0.952)、CuI578.2 nm(视见函数为0.871)的黄光,所以II区呈紫黄色。随压强的增大,气体的电离度增加,电子的密度增大,粒子平均运动的自由程逐渐减小,电子与原子、离子碰撞传能激发至高能态的几率减小,电子与离子的复合几率增大,因此II区的紫黄色逐渐变淡。若继续增大环境气体的压强,等离子体中的电子密度将进一步增大,粒子之间的消激发碰撞逐渐增加,电子与原子、离子碰撞传能激发至各个能态的几率几乎相等,电子与离子的复合激发所占的比重增大,从而使连续辐射强度增强。同时电子的韧致辐射随环境气压的增大而继续增强,所以颜色变淡,最后变为白色;III区的温度最低,此区主要是以电子与原子的传能碰撞激发为主,因此III区主要辐射铜的原子谱线,最强的CuI327.4 nm、CuI324.7 nm、CuI217.89 nm等原子线分布在紫外区,我们无法看到。另外还有比较强的CuI510.5 nm(视见函数为0.503)、CuI515.3 nm(视见函数为0.605)、CuI521.8 nm(视见函数为0.701)等绿光波段的原子线,III区产生的原子线大多由电子与原子的传能碰撞激发而产生,因此发光羽的外围的颜色呈深绿色。随环境气压的增大,发光羽的外围颜色呈绿色。在低压下电子的出射速度最大,到达III区时的速度较大,电子与原子的传能碰撞激发的效率较高。随着环境气压的增大,电子的速度减小,电子与原子的传能碰撞激发的效率较低,同时激发原子无辐射跃迁增加,所以III区的辐射强度逐渐减弱,发光羽的颜色逐渐变淡。

3 结论

本文通过在不同的 Ar 环境气压下拍摄脉冲激光烧蚀 Cu 产生发光羽的照片,利用空间分辨光谱测量技术,测定了脉冲激光烧蚀金属铜诱导产生发光羽的辐射强度随空间的变化。实验结果表明:发光羽可以分为三个区,其不同区域的颜色不同,发光羽随着环境气压的增大而逐渐减小,其颜色逐渐淡

化,说明不同区域的发光机理不同。连续辐射主要来自激光烧蚀出射电子的运动而产生的韧致辐射与电子和离子的复合,原子和离子的激发主要是通过电子碰撞传能以及电子与离子的复合激发产生。等离子体的辐射强度随时间和空间的变化反映了激光烧蚀诱导等离子体的形成、增强以及随激光脉冲终止以后的膨胀、减弱到消失的过程。由于激光烧蚀金属诱导产生发光羽的过程十分复杂,还有待于进一步地研究。

参考文献

- 倪晓昌,王清月,梁建国.飞秒脉冲参量影响金属表面特性的研究.光子学报,2006,35(1):1~4
Ni X C, Wang C Y, Liang J G. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(1):1~4
- 李明,张宏超,沈中华,等.激光导致水击穿和等离子体形成过程的物理分析.光子学报,2005,34(11):1610~1614
Li M, Zhang H C, Shen Z H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(11):1610~1614
- 赵元安,王涛,张东平,等.脉冲激光辐照光学薄膜的缺陷损伤模型.光子学报,2005,34(9):1372~1375
Zhao Y A, Wang T, Zhang D P, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(9):1372~1375
- Docchio F, Regondi P, Capon M R C, et al. Study of the temporal and spatial dynamics of plasma dynamics of plasmas induced in liquids by nanosecond Nd:YAG laser pulses. 1. Analysis of the plasma staring times, 2. Plasma luminescence and shielding. *Appl Opt*, 1988, 27(24):3661~3674
- 李晓溪,贾天卿,冯东海,等.超短脉冲照射下氟化锂的烧蚀机理及其超快动力学研究.光学学报,2005,25(11):1526~1530
Li X X, Jia T Q, Feng D H, et al. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11):1526~1530
- 倪晓昌,王清月.时空分布的超短激光脉冲烧蚀电介质材料时等离子体的产生.光子学报,2004,33(9):1035~1039
Ni X C, Wang C Y. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(9):1035~1039
- 张运海,王宝泉,吕国华,等.脉冲激光烧蚀碲镉汞材料的等离子体发射谱.光学学报,2005,25(5):678~682
Zhang Y H, Wang B Q, Lu G H, et al. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(5):678~682
- Man B Y, Dong Q L, Liu A H, et al. The line-broadening analysis of plasma emission produced by laser ablation of metal Cu. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2002, 6(1):17~21
- Itina T E, Hermann J, Delaporte P, et al. Laser-generated plasma plume expansion: Combined continuous-microscopic modeling. *Phys Rev (E)*, 2002, 66(6):66406~66417

- 10 Harilal S S, Bindhu C V, Tillack M S, *et al.* Internal structure and expansion dynamics of laser ablation plume into ambient gases. *J Appl Phys*, 2003, **93**(5): 2380~2388
- 11 黄庆举, 方尔梯. 脉冲激光烧蚀 Al 产生等离子体特征辐射的机理研究. *原子与分子物理学报*, 2000, **17**(1): 63~66
- Huang Q J, Fang E T. *Chinnes Journal of Atom and Molecular Physics*, 2000, **17**(1): 63~66

The Properties Analysis of Plume Produced by Pulsed Laser Ablation of Metal Cu

Huang Qingju

Phys. Dept., Maoming college, Maoming, 525000

Received date: 2006-02-27

Abstract The plume photograph from laser ablation of metal Cu in different Ar pressure was taken, and it has different colour in different region. The effect of pressure over 265 kPa—98.2 kPa on plume colour was studied. Spatial-resolved spectral measurement technique was used to study the spatial emission intensity distributions of plume by pulsed laser ablation of metal Cu in different pressure. The excimer dynamics of laser ablation of Cu surface was studied, the microscopic excimer mechanism of laser laser ablation of Cu surface was discussed. The results show that the plume may be explained using a simple model based on plume is made of three region, the region ablation mechanism is different from one another, the excited Cu atoms and Cu ions may be produced from different mechanism. The model can be used to explain the experimental results qualitatively.

Keywords Laser ablation; Plume; Metal Cu; Pulsed laser

Huang Qingju was born in 1965 in Shandong Province. He received the master's degree from East China University of Science and Technology in 1997. Now he is a vice professor in Maoming college. He is working in the field of laser interaction with material.

