

靶材偏置低电压对激光等离子体诱导靶上电势信号的影响^{*}

纪运景[†] 卞保民 童朝霞 陆 建

(南京理工大学信息物理与工程系, 南京 210094)

(2007 年 3 月 12 日收到, 2007 年 5 月 10 日收到修改稿)

针对激光等离子体在 Cu 靶上诱导产生的电势信号展开实验研究, 主要讨论了靶材偏置低电压时对电势信号的影响. 实验结果表明, 外加低电压时, 靶上电势信号呈现单峰脉冲结构, 且靶材偏置负压时为正脉冲, 偏置正压时为负脉冲, 脉冲幅值随偏置电压增大而增大. 通过对靶上电势信号演化特性的详细分析, 从等离子体荷电效应出发, 结合靶材偏压造成的电场效应成功解释了靶材偏压对靶上电势信号的影响.

关键词: 激光等离子体, 电势, 金属元靶, 偏置电压

PACC: 5250J, 5270

1. 引 言

从 20 世纪 50 年代起, 等离子体物理学迅速发展并在薄膜沉积、表面成形、化学分析以及激光清洗等许多方面都得到了广泛的应用^[1-3], 引起了人们极大的兴趣. 然而由于脉冲激光诱导激光等离子体所涉及的过程太快, 很难建立一个完整的系统的理论和模型, 有许多现象不能得到合理的解释. 目前, 激光烧蚀信号诊断成为解释激光参数和材料性质之间关系, 并监测激光烧蚀过程的重要手段, 并在等离子体声、光探测等方面开展了许多工作^[4-6]. 而为了能够对激光等离子体更加全面、深入而细致的了解, 电信号的探测显然是非常必要的.

目前, 探测激光等离子体电信号的手段大多采用法拉第圆筒^[7]、探针方法^[8-10]等. 然而, 在这些技术中的探测电极的尺寸与激光等离子体相比都是无法忽略的, 从而必然会对待测等离子体场造成干扰, 并进而影响测试精度, 同时这些方法都是基于等离子体带电粒子与探测电极之间的直接相互作用, 其中必然引起的二次带电粒子发射也会影响测试的准确性^[11, 12]. 近年有些学者利用外加平行板直流电场的测试方法, 一定程度上解决了二次带电粒子发射

的问题. 本文采用“元靶探针”方法, 利用一个小 Cu 靶作为探针对激光等离子体电学效应进行实验研究, 此方法不仅灵敏度高、测试简单, 而且由于不存在外部电极而从根本上避免了上述测试手段中存在的种种缺点. 利用该方法, 主要探测了靶材在不同偏置电压条件下的靶上电势信号, 并结合等离子体荷电效应, 从理论上解释了偏压对靶上电势信号的影响.

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示. 激光光源 1 为 SL II-10 型 YAG 固体激光激光器, 工作波长为 1.064 μm , 脉宽 7 ns. 出射脉冲激光束经由扩束准直系统 3、4 后成为平行光, 在经直径 50 mm, 焦距 200 mm 的透镜 5 聚焦在金属元靶 10 的表面, 焦斑直径小于 0.5 mm, 激光能量为 5—115 mJ (激光单脉冲能量可调, 功率密度约 10^9 — 10^{10} W/cm²). 金属元靶 10 为直径 2.5 mm, 长度 20 mm 的铜靶 (纯度 99.99%). 同时, 快响应光电管 7 通过接收分束镜 6 透射光产生一个电信号来触发示波器, 反射光进入型号为 EPM 1000 的能量计 8 实现对出射激光能量的实时监测.

靶材与直流稳压电源 11 (-29.6—29.6 V 可

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 60378003) 和南京理工大学科研发展基金资助的课题.

[†] E-mail: jyunjing@mail.njust.edu.cn

调),10 k Ω 的电阻 12 相接后接地. 高功率脉冲激光辐射到元靶金属表面后,瞬间产生等离子体,电路中出电信号,由数字存储示波器 9(Tektronix TDS 2024 型,带宽为 2 GHz)观察和记录测试信号. 为了排除外界环境中的电磁干扰,整个实验装置位于金属屏蔽罩中.

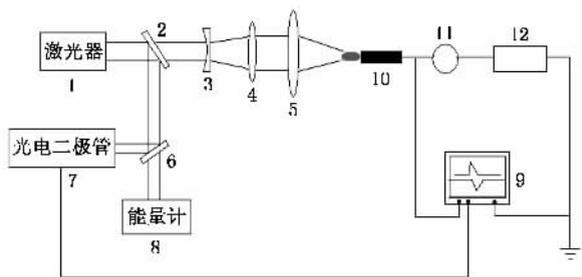


图1 激光等离子体荷电特性测试实验原理图 1 为激光器,2 为分束镜,3 为扩束镜,4 为准直透镜,5 为聚焦透镜,6 为分束镜,7 为光电二极管,8 为能量计,9 为数字示波器,10 为靶,11 为直流稳压电源,12 为电阻

3. 实验结果与分析

利用图 1 所示实验装置,对不同靶材偏压条件下的靶上电势信号进行了测试,靶材偏置电压分别取: -29.6, -20, -10, -5, 0, 4, 10, 20 和 29.6 V. 图 2 为激光能量 91 mJ 时获得的不同偏压情况下的靶上电势信号演变图.

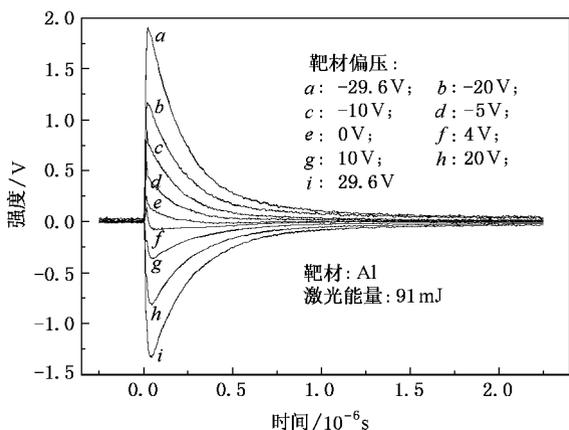


图2 激光能量 91 mJ 时,不同靶材偏压条件下的靶上电势信号

由图 2 可见,1)在靶材偏置电压情况下,靶上电势信号表现为一个具有陡峭上升沿的单峰结构. 2)当靶材偏压为负时,靶上电势信号为正峰;当靶材偏压为正时,靶上电势为负峰,但是当靶材偏置正电

压很低时(< 2 V),靶上电势仍为正峰. 3)靶电势幅值随外加电压绝对值的增大而呈线性增大关系,而且在靶材偏置电压绝对值相同的情况下,偏置负压时的电势信号幅值比正电压时要大,如图 3 所示. 4)不同的靶材偏压条件下,靶上电势信号的衰减阶段演变规律相同,持续时间一致,分析后发现由峰值点下降到峰值 $1/e$ 处所需时间约 14×10^{-8} s. 根据 RC 电路放电原理,放电时间常数为 $\tau = 15.9 \times 10^{-8}$ s,与实验值基本吻合,说明此过程即为测试电路的放电过程.

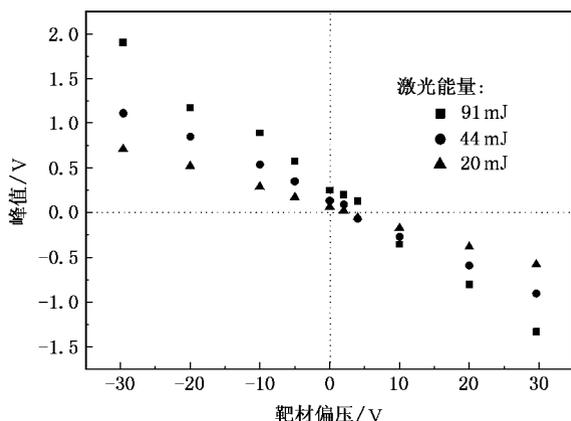


图3 靶上电势信号峰值随靶材偏置电压的变化

对图 2 所示的靶上电势信号演变可以从激光等离子体的荷电效应出发,结合靶材偏置电压形成的电场效应进行解释.

一方面,在高功率脉冲激光辐照金属靶材时,高温高密度的等离子体团瞬间产生,在脉冲持续时间内激光又与等离子体相互作用,造成极微量具有较高速度的电子出现,并从等离子体区域逃逸出去,等离子体内部出现净余正电荷,呈现微弱的正电性,即等离子体具有微弱的荷电效应^[13]. 所以,荷正电的等离子体在周围空间产生弱的正电场,金属靶材因处于该电场中而受到静电感应作用,在靶材接地的状况下靶材远端的离子流向大地而在示波器中出现正脉冲信号.

另一方面,当靶材偏置负电压时,在靶面附近形成负电场,等离子体正好处于该电场的区域范围,其中的正离子必然向靶运动,并转移到金属靶(如图 4 所示),在示波器上形成一个急剧上升的正脉冲信号;反之,当靶材偏置正电压时,在靶面附近形成指向靶面的正电场,等离子体中的电子在电场力的作用下向靶面运动,并转移到靶上,则形成了一个急剧下降的负脉冲信号. 显然在等离子体荷电效应与外

加电场的共同作用下,使得靶材偏置负电压时的信号幅值高于靶从偏置正电压的情况,这一点与实验获得的结果完全一致.同时,靶材偏置电压越大,电场效应越强,电势信号幅值必然越大.

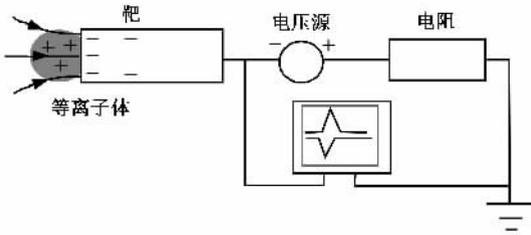


图 4 靶材偏置负电压时形成的电场效应使得测试电路中获得正脉冲信号

但是,当靶材偏置正电压很小(或为零)时,尽管也在靶附近形成了正的电场,但是由于该电场较弱,仍然是等离子体荷电效应占据主导地位,所以获得的靶上电势仍表现为正脉冲信号,如图 2 中曲线 e , f 所示.

4. 等离子体等效电流源模型的建立

为了从理论上对激光等离子体诱导产生的靶上电势信号进行分析,我们将示波器等效为一电阻 R_2 ($10\text{ M}\Omega$)和电容 C (16 pf)的并联,则原测试电路图 4 可以等效为图 5 所示.显然在该测试电路中,等离子体对金属靶材的作用是使得靶上出现电势信号的唯一“源”.所以为简单起见,将激光等离子体诱导金属靶产生电势信号的作用等效为一瞬态电流源的作用,并考虑成与作用激光脉冲相似的三角形分布结构,建立等效电路模型,如图 6 所示.

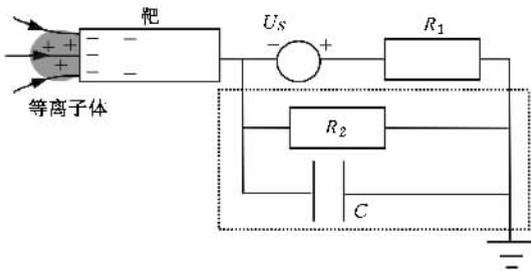


图 5 激光等离子体诱导靶上电势信号测试等效电路示意图

则可设瞬态电流源 I_s 具有如下数学函数关系:

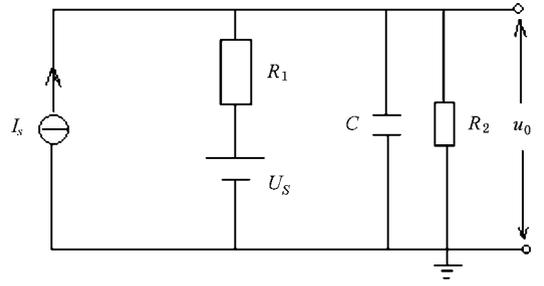


图 6 靶上电势测试的等效电路模型示意图

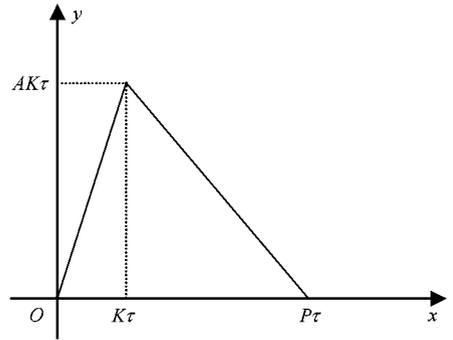


图 7 呈三角形分布的等效瞬态电流源

$$I_s = \begin{cases} At & t \leq K\tau, \\ \frac{KA}{P-K}(P\tau - t) & K\tau < t \leq P\tau, \\ 0 & t > P\tau, \end{cases} \quad (1)$$

其中, τ 是激光脉冲的宽度, $K\tau$ 是激光脉冲作用的时间, $P\tau$ 设为激光等离子体已经较弱对靶材的“源”区作用已经基本消失的时刻, A 为与作用激光能量、靶材偏置电压有关的参数. $t \in (0, K\tau)$ 阶段对应激光烧蚀靶材阶段, 该阶段中等离子体不断产生, 其荷电效应不断增强, 对应瞬态电流源逐渐增大; $t \in (K\tau, P\tau)$ 阶段对应激光脉冲熄灭后, 但是等离子体中的电荷仍然不断向靶上转移, 但是转移效率越来越弱, 对应电流源逐渐变小的过程; 最后, $t > P\tau$ 后等离子体已经消失或很微弱, 已经不再有电荷向靶上转移, 但是已经转移到靶上并储存在等效电容 C 中的电荷通过回路释放的过程.

对图 6 所示测试电路建立微分方程, 有

$$I_s = C \frac{du}{dt} + \frac{u}{R}, \quad (2)$$

其中, $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$.

将瞬态电流源(1)式带入, 求解可得

$$u = \begin{cases} AR^2 C \left(e^{-\frac{t}{RC}} + \frac{t}{RC} - 1 \right) & t \leq K\tau, \\ AR^2 C e^{-\frac{t}{RC}} \left(1 - \frac{P}{P-K} e^{\frac{K\tau}{RC}} \right) + \frac{KAR^2 C}{P-K} \left(1 + \frac{P\tau}{RC} - \frac{t}{RC} \right) & K\tau < t \leq P\tau, \\ \frac{AR^2 C}{P-K} \left(K e^{\frac{P\tau}{RC}} - P e^{\frac{K\tau}{RC}} + P - K \right) e^{-\frac{t}{RC}} & t > P\tau. \end{cases} \quad (3)$$

图 8 为由上式计算所得靶材偏置负压时的靶上电势理论曲线,计算中各参数分别取值为 $\tau = 7 \text{ ns}$, $K = 1$, $P = 4$, $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 9990 \Omega$, $C = 16 \text{ pf}$. 与实

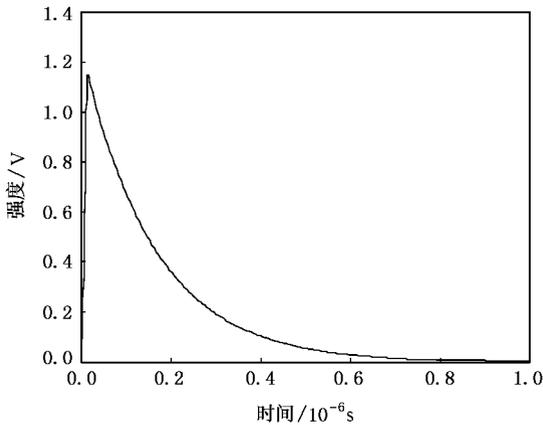


图 8 激光等离子体诱导金属靶上电势信号演变理论曲线

验测试曲线(图 2)相比较可以发现,不论在电势演变规律还是峰值到达时间上都与实验结果符合较好。

5. 结 论

本文主要对金属靶偏置电压情况下的脉冲激光等离子体诱导靶上电势信号演变进行了实验测试与理论分析。在实验中,观测到偏置电压时靶上电势信号呈现单峰脉冲结构,偏置负电压时靶上电势为正脉冲信号,而偏置正电压时为负脉冲信号;但是在偏置正电压很低($< 4 \text{ V}$)的情况下,靶上电势仍然表现为正信号;而且在相同的正、负偏置电压情况下,正峰幅值稍大于负峰。为了解释实验观察到的现象,从激光等离子体的荷电效应与外加电场的作用出发,建立了测试等效电路模型,并给出了计算公式。计算结果表明,由该模型获得的靶上电势信号理论曲线与实验结果基本一致。

- [1] Giao M A P, Rodrigues N A S, Riva R, Schwab C 2004 *Review of Scientific Instruments* **75** 5213
- [2] Maria M S, Sar S, Anung K, Rinda H, Syahrin N A 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 53305
- [3] Novodvorsky O A, Khranova O D, Wenzel C, Bartha J W, Philippovaa E O 2003 *SPIE* **5121** 337
- [4] Zhang Z, Vanrompay P A, Nees J A, Pronko P P 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 2867
- [5] Krasa J, Jungwirth K, Kralikova B, Laskal, Pfeifer M, Rohlenak, Skalaj, Ullschmied J, Hnatowicz V, Perina V, Badziak J, Parys P, Wolowski J, Woryna E, Szydowski A 2003 *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* **205** 355
- [6] Zhang Z, Zhang J, Li Y T, Hao Z Q, Zheng Z Y, Yuan X H, Wang Z H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 357 (in Chinese) [张

杰、李玉同、郝作强、郑志远、远晓辉、王兆华 2006 物理学报 **55** 357]

- [7] Dana M, Constantin G, Dumitru D et al 1996 *Opt. Eng.* **35** 1325
- [8] Hendron J M, Mahony C M O, Morrow T 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 2131
- [9] Amoroso S, Armenante M, Bruzzese R, Spinelli N, Velotta R, Wang X 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 7
- [10] Hong M H, Lu Y F 1999 *Appl. Phys. A* **69** s605
- [11] Lu Y F, Hong M H 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 2812
- [12] Syahrin N M, Iwao K, Kiichiro K 2002 *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** 1
- [13] Roth J R 1998 *Industrial Plasma Engineering* (Beijing: Science Press) p84 (in Chinese) [Roth J R 1998 工业等离子体工程(中译本)北京:科学出版社 第 84 页]

Study on the electrical potential signals induced by laser plasma in the target with bias-voltage^{*}

Ji Yun-Jing[†] Bian Bao-Min Tong Chao-Xia Lu Jian

(Department of Information Physics and Engineering , Nanjing University of Science & Technology , Nanjing 210094 , China)

(Received 12 March 2007 ; revised manuscript received 10 May 2007)

Abstract

The electrical potential signals induced by laser-plasma generated on a copper target with bias-voltage using a Nd :YAG laser (7 ns) were detected , and the effect of the additional voltage on the potential signals was mainly studied. The experimental results show a single-peak distribution in the temporal profile , which is positive for negative bias voltage and negative peak when with positive bias voltage. Taking into account the effect of plasma charging and the electric field produced by the target bias-voltage , a clear explanation of the observed effect is given.

Keywords : laser-plasma , electrical potential , tiny metal target , bias-voltage

PACC : 5250J , 5270

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60378003) and the Scientific Research and Development Foundation of Nanjing University of Science & Technology.

[†] E-mail : jyunjing@mail.njust.edu.cn