

铝靶三倍频激光烧蚀参数实验研究

李三伟 冯 杰 缪文勇 丁永坤 王耀梅 于燕宁

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所,

高温高密度等离子体物理重点实验室, 成都 610003)

摘 要 叙述了采用时间空间积分晶体谱仪和时间分辨晶体谱仪等探测器测量铝平面靶强激光烧蚀参数的方法, 给出了三倍频强激光烧蚀铝平面靶的质量烧蚀速率和烧蚀压。实验结果与收集到的国外数据进行了比较, 它们在误差范围内一致。

关键词 激光烧蚀, 铝硅层靶, 时间分辨晶体谱仪, 烧穿时间。

1 引 言

强激光对材料烧蚀的研究是激光等离子体相互作用研究的基础。当强激光辐照靶材料时, 临界面附近的电子在吸收激光后向靶的内部传热, 受热的介质迅速向真空膨胀, 这就是激光烧蚀过程^[1, 2]。由于动量守恒, 高速飞散的等离子体对固体靶材产生强烈反冲, 形成向靶内推进的高压冲击波。因为激光驱动的高压是由靶面烧蚀引起的, 因此对烧蚀参量(激光烧蚀深度, 质量烧蚀速率, 烧蚀压等)的实验测定就很有意义。烧蚀过程研究有助于加深对电子传热、冲击波形成及传播的认识, 同时为靶结构优化设计提供实验依据。将实验结果与理论计算比较, 可以考核数值模拟计算程序。

2 实验原理和方法

高功率激光辐照靶面后, 形成高温等离子体, 它们快速向靶外膨胀飞散, 造成靶面烧蚀。通常将等离子体与靶固体部分的界面称作烧蚀面。在激光脉冲持续时间, 烧蚀面不断向靶内推进, 直到激光脉冲结束。按定义: $m^{\circ} = \rho d / \tau$, 其中 m° 为单位面积质量烧蚀速率($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$), ρ 和 d 为烧蚀材料的密度(g/cm^3)和厚度(cm), τ 为某一功率密度下靶厚 d 相应的烧穿时间(s)。采用两种方法获得 m° : 1) 固定靶厚度 d , 用晶体谱仪配软 X 光条纹相机直接测量某一功率密度下相应的烧穿时间 τ , 根据公式, 单次就可以给出 m° ; 2) 认为烧穿时间就是激光脉宽 τ , 固定靶厚度 d , 改变激光功率密度, 用时间积分晶体谱仪测量衬底材料高剥离态特征谱线的相对强度随激光功率密度的变化, 外推刚好烧穿靶厚度 d 时所需要的临界激光功率密度 I_a , 多发次外推出 I_a 。该方法假定 τ 、 d 、 ρ 已知, m° 即可求出, 实验只是确定对应的 I_a 。原实验计划是固定激光功率密度, 改变靶厚度 d , 外推刚好烧穿时的靶厚度 d 。但实验时, 打靶发次

有限, 光束质量(激光能量, 激光脉宽, 激光焦斑等)可控制性差, 因此较为可行的办法是第二种。

把电子热传导区波阵面(即烧蚀面)处的压力称为烧蚀压 P , 烧蚀压是激光驱动冲击波和压缩靶丸的压力源。采用“火箭”模型, 烧蚀出来的物质(远离靶表面, 等离子体热能大部分已转换成等离子体动能)以大大快于声速的速度向外飞散, 同时在烧蚀面处对冷介质产生一个流体力学反作用压力 P 。按动量守恒: $P = m^{\circ}V$, 其中 V 为远离靶表面等离子体平均速率(cm/s), 按能量守恒(忽略辐射和离化能等能量损耗)^[2, 3]则有 $I_a = m^{\circ}V^2/2$, $P = (2m^{\circ}I_a)^{1/2}$ 。

3 实验条件

实验是在“星光 II”装置上进行的。三倍频激光能量为 25 J~ 65 J, 激光脉宽为 480~ 600 ps, 激光焦斑直径为 $\phi 200 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$; 靶为 Al+ Si 平面层靶, 尺寸为 3 mm × 3 mm, 激光第一打击 Al 层厚度为 1.5 μm , Si 衬底厚度为 0.2 mm; 入射激光与靶法线夹角约为 35°。

实验中使用了四种探测器。时间空间积分晶体谱仪(PET, $2d = 0.874 \text{ nm}$)用来测量铝和硅谱线强度的相对变化; 时间分辨晶体谱仪(TAP, $2d = 2.57 \text{ nm}$)用来测量铝层烧穿时间, 时间分辨约为 30 ps, 所测波长范围为 0.53~ 0.64 nm; X 光针孔相机用于监测 X 射线焦斑; 放大倍数约 10 倍; 法拉第杯离子探头测量离子飞行速率谱。靶室内探头布局见图 1。在整个实验过程中, 晶体谱仪位置始终保持不动, 谱线的黑度值是同一胶片用 3CS 微密度计扫描 3 个不同位置获得的黑度平均值。

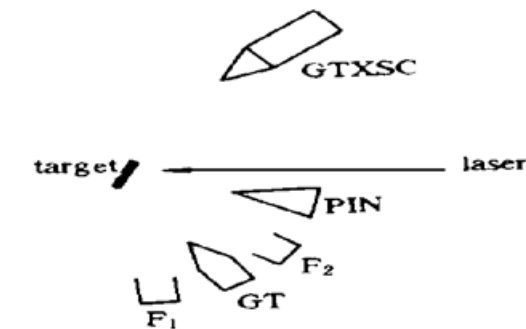


Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement in target chamber of Xin Guang laser facility. GTXSC: time-resolved crystal spectrometer, PIN: X-ray pinhole camera, GT: flat-crystal spectrometer, F: Faraday cup charge collector

4 实验结果与分析

4.1 时间空间积分晶体谱仪获得的实验结果

三倍频激光入射, 铝材料吸收系数取 0.75^[4]。图 2 示出了第 94051 发铝硅层靶的高剥离态谱线黑密度扫描图, 实验条件见表 1。从图 2 中看出, 晶体谱仪已明显记录到衬底类氢硅离子谱线。采用固定靶厚度 d , 认为烧穿时间等于激光脉宽, 改变激光功率密度, 用时间空间积分晶体谱仪测量硅衬底谱线的相对强度的变化, 外推烧穿厚度 d 时相应的激光功率密度。表 1 列出了类氢铝和类氢硅主共振线相对黑度数据。 $D(\text{Al}^{+12})$ 表示类氢铝主共振线黑度, 相应的波长为 0.7173 nm, $D(\text{Si}^{+13})$ 表示类氢硅主共振线黑度, 相应的波长为 0.6182 nm, 表中 E_L 为激光能量, τ 为激光脉宽, I_a 为吸收激光功率密度。

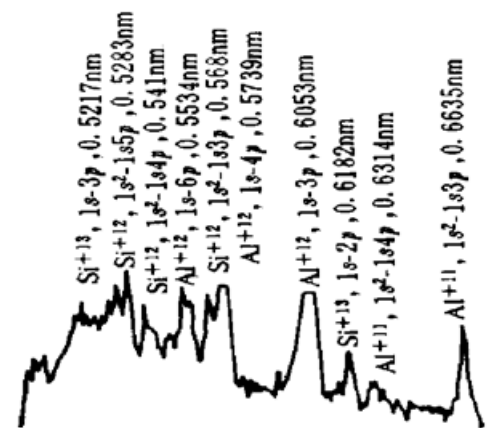


Fig. 2 The microdensitometer trace of X-ray emission spectrum of Al-Si planar layer target, recorded by PET crystal spectrograph

Table 1. Experimental results of Al-Si planar layer target

experiment order	94043	94042	94041	96011	94040	94051
E_L / J	4.3	21.7	28.8	38	60.4	65.2
τ / ps	~ 500	~ 600	~ 600	~ 500	~ 600	~ 600
$I_a / (10^{14} W/cm^2)$	0.2	0.8	1.0	1.6	2.0	2.2
$D (Si^{+13})$	0	0	0	0.10	0.25	0.33
$D (Si^{+13}) + D (Al^{+12})$						

图 3 给出了两个法拉第探测器测得的离子平均速率随吸收激光功率密度的变化关系。图 4 显示了硅衬底谱线相对黑度随吸收激光功率密度的变化关系。从图中外推获得烧穿 $1.5 \mu m$ 铝层相应的吸收激光功率密度为 $1.4 \times 10^{14} W/cm^2$, 烧穿时间认为是激光脉宽约 600 ps, 由公式得出铝样品质量烧蚀速率

$$m^{\circ} = \rho d / \tau = 6.8 \times 10^5 (g/cm^2 \cdot s)$$

从法拉第探测器测得的离子速度谱看出此功率密度下离子平均速度约为 $7 \times 10^7 cm/s$ 。按动量守恒推得烧蚀压

$$P = m^{\circ} V = 4.7 \times 10^{12} Pa$$

按能量守恒则得到

$$P = (2m^{\circ} I_a)^{1/2} = 4.4 \times 10^{12} Pa.$$

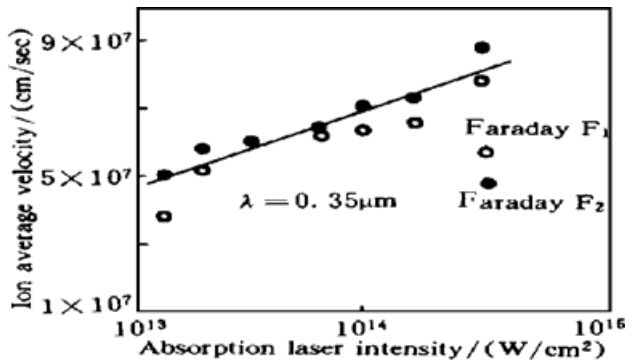


Fig. 3 Variation of ion average velocity with absorbed laser intensity for the Al-Si planar layer targets

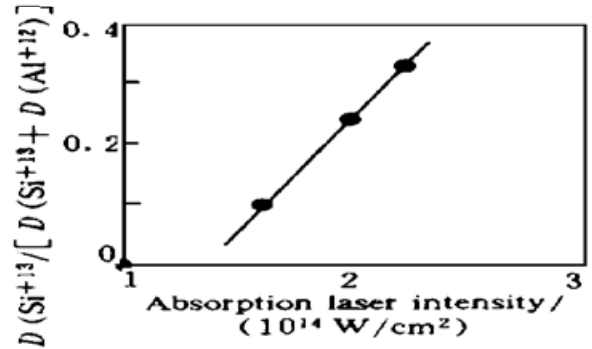


Fig. 4 Variation of 6.18 nm line intensity as a function of absorbed laser intensity for Al-Si planar layer targets

4.2 时间分辨晶体谱仪获得的实验结果

采用平面晶体(TAP)谱仪配软 X 光条纹相机^[5]测量铝层烧穿时间, 软 X 光条纹相机光阴极长 18 nm, 时间分辨约 30 ps, 光阴极中心距靶点约 373 mm, 谱仪测谱范围为 0.53~ 0.64 nm。三倍频激光烧蚀铝硅层靶实验结果见图 5 和图 6。

三倍频激光能量为 38 J, 激光脉宽 510 ps, 铝材料吸收系数取 $0.75^{[4]}$, 靶面吸收激光功率密度则为 $1.6 \times 10^{14} W/cm^2$ 。激光第一打击铝层厚度为 $1.5 \mu m$ 。从图 5 看出铝线发射先于硅线。选择铝硅强线分析, 把图 5 中类氢铝共振线($Al^{+12}, 1s - 3p, 0.605 nm$)和类氢硅共振线($Si^{+13}, 1s - 2p, 0.6182 nm$)时间过程扫描图画在同一图上, 见图 6, 时间轴重合, 相对强度轴错开, 便于识别。激光脉冲波形近似为高斯分布, 脉冲前沿部分功率密度较低, 脉冲中间部分较平, 功率密度较高, 计算脉冲宽度时取半宽度。因此取铝线强度上升过程中 1/2 峰值处的时刻作为激光烧蚀铝靶的时间起始时刻, 取硅线强度上升过程中 1/2 峰值处的时刻作

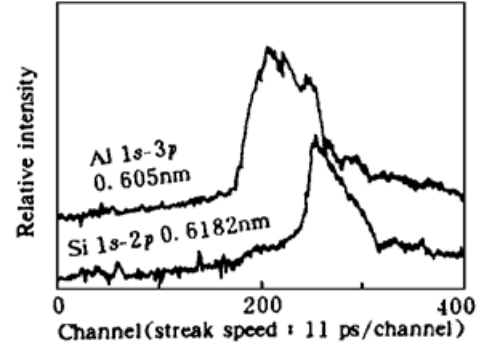
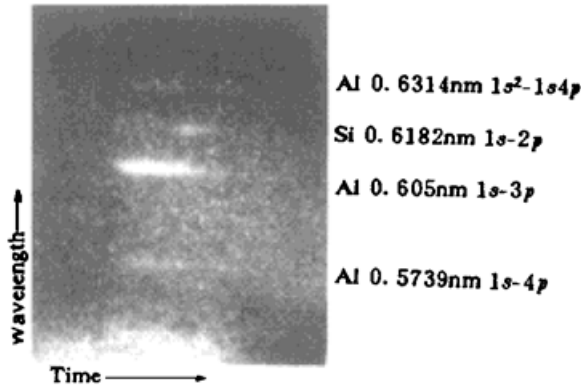


Fig. 5 Time-resolved X-ray spectrum of Al-Si planar layer target Fig. 6 Temporal behaviour comparison of Al¹² and Si¹³ line emission

为激光烧穿铝层时刻。图 6 中横轴标尺为软 X 光条纹相机扫描道数，该相机扫速为每道 11 ps，二者时间之差 660 ps 便是激光烧穿 1.5 μm 厚铝层所需要的时间，给出铝材料质量烧蚀速率 $m^\circ = 6.1 \times 10^5 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，由能量守恒，得烧蚀压 $P = 4.4 \times 10^{12} \text{ Pa}$ 。

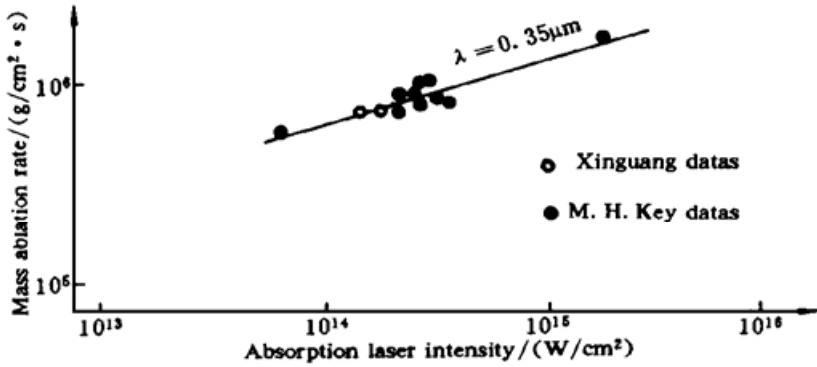


Fig. 7 Comparison of mass-ablation rates of planar aluminium targets by 0.35 μm laser

峰值过后。把测得的两个数据点与收集到的国外数据^[2, 6]汇集在一起，见图 7，在误差范围内基本一致。

4.3 理论估算

激光与等离子体相互作用过程十分复杂，激光能量输运与很多因素(靶型、靶材料，激光波长、激光能量、激光波形等)有关。目前，从理论上要严格求解质量烧蚀速率和烧蚀压很困难，但在一定的假设条件下，问题可以简化。描述烧蚀模型很多，本文作者采用最简单的连续性方程推导出质量烧蚀速率和烧蚀压的解析关系，假设从烧蚀面至临界面区域是稳态烧蚀区，激光吸收发生在临界面，吸收的能量转换成等离子体热能 E_m 和等离子体动能 E_k ，忽略辐射和离化能等能量损耗。取绝热指数 $\gamma = 5/3$ ， ρ_c 为临界面物质密度， C_0 为临界面声速， m° 为质量烧蚀速率， P 为烧蚀面处的烧蚀压。

$$\text{质量守恒: } m^\circ = \rho u = \rho_c C_0 \tag{1}$$

$$\text{能量守恒: } I_a = E_m + E_k = \frac{3}{2} \rho_c C_0^3 + \frac{5}{2} \rho_0 C_0^3 = 4 \rho_c C_0^3 \tag{2}$$

$$\text{动量守恒: } P = \rho u^2 + \rho c^2 = 2 \rho_c C_0^2 \tag{3}$$

原子由原子核和核外电子组成，而原子核是由质子和中子组成的，质子数等于电子数，质子和中子的质量也十分相近。对铝原子来说，核子数(质子数和中子数之和)为 27，基本上

是核外电子数目的两倍。假设铝原子全部全电离(中低 Z 材料), m_p 为质子质量, 于是: $\rho_c = 2m_p n_e = 2m_p \frac{10^{21}}{\lambda^2}$, 很容易推出:

$$m^\circ = \rho_c C_0 = \rho_c \left(\frac{I_a}{4\rho_c} \right)^{1/3} = 0.65 \times 10^5 \lambda^{-2/3} \times \left(\frac{I_a}{10^{13}} \right)^{1/3} (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (4)$$

$$P = 2\rho_c C_0^2 = 0.25 \times 10^{12} \lambda^{-4/3} \times \left(\frac{I_a}{10^{13}} \right)^{2/3} \text{Pa} \quad (5)$$

这里, λ 取 μm 为单位, I_a 取 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 为单位, 把实验条件 $I_a = 1.6 \times 10^{14} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $\lambda = 0.35 \mu\text{m}$ 代入(4)和(5)两式得出

$$m^\circ = 6.6 \times 10^5 (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}), \quad P = 3.2 \times 10^{12} \text{Pa},$$

测量结果则为

$$m^\circ = 6.1 \times 10^5 (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}), \quad P = 4.4 \times 10^{12} \text{Pa},$$

估算结果与测得的结果大致相近。

5 误差讨论

在分析处理数据时, 选用衬底硅元素的 Si^{+13} 谱线来分析。该谱线主要是由电子热传导区大量的热电子通过碰撞激发产生的。铝材料属于中低 Z 元素, 它产生的高能电子和 X 射线份额较小, 由高能电子和 X 射线激发产生的谱线份额也就很少。

目前“星光”装置上的光束质量不够好, 特别是激光焦斑的测量尚无较好的办法, 现在仍采用 X 光发射区尺寸粗估激光焦斑大小, 况且实验发次也很少。这些因素都会给实验结果带来误差。激光能量测量误差 $\pm 5\%$, 激光脉宽测量误差 $\pm 10\%$, 激光焦斑测量误差 $\pm 20\%$, 吸收系数误差取 $\pm 10\%$, 再考虑到制靶厚度误差 $\pm 5\%$, 数据处理误差 $\pm 10\%$, 底片冲洗和扫描误差 $\pm 15\%$ 后, 则估计激光烧蚀速率总误差约为 $\pm 30\%$ 。

本工作得到温树槐、郑志坚、唐道源、丁耀南、刘忠礼等人的关心和指导, 制靶人员、“星光”运行人员和本实验室陈正林、胡昕、温天舒、李雅轩、于瑞珍等人的大力配合, 在此一并感谢!

参 考 文 献

- [1] 常铁强, 张均, 张家泰等, 激光等离子体相互作用与激光聚变, 长沙, 湖南科学技术出版社, 1991: 185~ 200
- [2] A. Rubenchik, S. Witkowski, Physics of laser plasma, *Handbook of Plasma Physics*, Vol. 3, North-Holland, Elsevier Science Publishers B. V., 1991: 576~ 591
- [3] H. T. 巴索夫, H. A. 沙哈林柯夫, A. A. 鲁巴索夫等著, 华欣生主译, 稠密等离子体诊断学, 绵阳科学城, 强激光与粒子束杂志社, 1992: 304~ 320
- [4] W. Seka, R. S. Craxton, J. Delettrez *et al.*, Measurements and interpretation of the absorption of 0.35 μm laser radiation on planar targets. *Opt. Commun.*, 1982, **40**(3): 437~ 440
- [5] 蔡玉琴, 杨上金, 张启仁等, 线状铬等离子体 X 射线线谱的时间分辨测量 强激光与粒子束, 1992, **4**(2): 175~ 180
- [6] M. H. Key, W. T. Toner, T. J. Goldsack *et al.*, A study of ablation by laser irradiation of plane targets at wavelength 1.05, 0.53, and 0.35 μm *Phys. Fluids*, 1983, **26**(7): 2011~ 2025

Experimental Study of Ablation Parameters of Aluminium Target by 0.35 μm Laser

Li Sanwei Feng Jie Miao Wenyong Ding Yongkun
Wang Yaomei Yu Yanning

(Laboratory for Laser Fusion, Institute of Nuclear Physics and Chemistry of the China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003)

(Received 9 March 1997; revised 25 July 1997)

Abstract The laser-driven ablation parameters are measured by using the method of time-integrated and time-resolved crystal spectrometers. The following experimental results are obtained. For aluminium target driven by 0.35 μm laser with absorbed laser intensity of $1.4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, mass ablation rate measured by time-integrated crystal spectrometer, is $6.8 \times 10^5 (\text{g/cm}^2 \cdot \text{s})$, and ablative pressure is estimated to be $4.7 \times 10^{12} \text{ Pa}$ and $4.4 \times 10^{12} \text{ Pa}$ according to momentum conservation and energy conservation, respectively. Mass ablation rate with absorbed laser intensity of $1.6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, measured by time-resolved crystal spectrometer, is $6.1 \times 10^5 (\text{g/cm}^2 \cdot \text{s})$ and ablative pressure is estimated to be $4.4 \times 10^{12} \text{ Pa}$ from energy conservation. These results are in accordance with the results obtained by other laboratories within the experimental error.

Key words laser ablation, Al-Si planar layer target, time-resolved crystal spectrometer, burnthrough time.