

高强度二倍频激光辐照银薄膜靶的烧蚀 和 X 光辐射实验研究

刘慎业[†] 黄翼翔 胡昕 张继彦 杨国洪 李军 易荣清 杜华冰 丁永坤

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2012 年 8 月 16 日收到; 2012 年 9 月 4 日收到修改稿)

激光聚变物理实验中, 背光透视照相是靶丸内爆动力学过程观测的重要方法. Ag 是一种重要的背光材料, 激光辐照产生的等离子体可以产生强 L 线辐射, 研究其烧蚀和辐射特性, 对提高内爆靶丸背光透视照相的图像质量具有十分重要的意义. 在神光 II 装置上, 采用第九路输出的 2 ns, $\sim 5 \times 10^{14}$ W/cm², 526.5 nm 激光均匀辐照 Ag 薄膜靶, 实验研究了其烧蚀特性, 获得了银薄膜靶在激光烧蚀驱动下的飞行轨迹和飞行速度的数据. 实验结果与一维辐射流体力学模拟结果相符. 火箭模型对实验数据进行拟合, 得到了 Ag 材料的质量烧蚀速率和烧蚀压的数据. 采用平面晶体谱仪和 X 射线二极管探测器阵列观测等离子体的辐射特性, 获得了 Ag 等离子体辐射光谱和 L 线转换效率, 实验结果对激光聚变内爆靶丸背光透视照相的实验设计具有重要的参考价值.

关键词: 激光惯性约束, 激光烧蚀, 激光产生的等离子体和加热, X 射线

PACS: 52.57.-z, 52.38.Mf, 52.50.Jm, 52.38.Ph

DOI: 10.7498/aps.62.035202

1 引言

靶表面材料受到高功率激光辐照被快速加热形成等离子体, 被加热后的高温物质向外高速飞散, 激光在临界面以外的电晕区被吸收, 吸收的激光能量通过电子热传导和 X 射线向低温高密度区传输, 低温高密度区的物质被加热后温度被提高到数百万度, 压力升高到数百万大气压, 被加热的物质在如此高的压力驱动下快速向外喷射, 这一过程称为激光烧蚀^[1]. 在激光惯性约束核聚变实验中^[2-4], 激光或 X 射线烧蚀靶丸表面材料, 从而驱动靶丸内爆, 使燃料压缩到高温高密度状态, 最终引发核聚变. 激光或 X 射线烧蚀是激光聚变物理实验中极其重要的物理过程, 靶丸内爆的流体力学效率取决于靶丸壳层材料和辐射源的特性, 靶丸设计中其壳层材料和厚度的选取主要由材料的烧蚀特性所决定^[5-8]. 因此, 在激光聚变物理实验中, 材料的质量烧蚀速率和烧蚀压与驱动源参数和材料参数间的定标关系是激光聚变物理研究的重要内容^[9-24].

多年来, 理论和实验上对多种可能的靶丸壳层材料如 CH, Be 和金刚石的烧蚀特性进行了广泛的研究^[9-24]. 间接驱动激光聚变实验中, 柱腔被用于吸收注入柱腔内的激光能量, 将其转换为 X 射线, 然后用 X 射线烧蚀靶丸壳层, 驱动靶丸内爆. 激光烧蚀腔壁材料产生的等离子体运动对靶丸辐照对称性有非常重要的影响, 近年来, 柱腔内壁材料的烧蚀特性也受到了广泛关注^[25-27].

激光聚变物理实验需要采用激光产生的 X 射线辐射作为背光源对内爆靶丸进行透视照相, 了解靶丸压缩的过程^[28-31]. 神光 II 装置上开展的内爆实验中使用的靶丸壳层 (CH 材料) 较薄, 一般在 10—20 μm 左右, 这就要求用于靶丸透视照相的 X 射线背光源的能点不能太高, 一般选择 2—3.5 keV 的 X 射线作为透视光源较为适宜^[23]. 激光辐照 Ag 材料产生的等离子体辐射光子能量为 3—3.6 keV 的 L 线, 是神光 II 内爆实验中靶丸透视照相的理想背光源. 实验观测强激光辐照烧蚀下 Ag 薄膜靶的动力学行为, 研究其激光烧蚀特性对优化背光源产

[†] 通讯作者. E-mail: lsye1029@yahoo.com.cn

生的条件, 检验辐射流体力学程序和理解激光与等离子体的相互作用规律具有重要的意义. 本工作从理论和实验两方面对高强度激光辐照银薄膜材料的辐射和烧蚀特性进行了研究, 获得了 Ag 等离子体的辐射光谱和转换效率, 通过对实验结果分析得到了材料的烧蚀速率和烧蚀压. 实验获得的 Ag 等离子体辐射光谱和转换效率的实验数据对内爆靶丸背光照相实验设计具有重要的参考价值, 所采用的实验方法和分析方法有望在腔壁材料的辐射烧蚀特性研究中得到应用.

2 实验安排

实验在上海神光 II 装置上完成. 神光 II 是一台可以输出 8 束 1 ns, 351 nm, 0.26 kJ 激光和 1 束 2 ns, 526.5 nm, 1.5 kJ 激光的高功率激光装置. 本实验利用第九路输出的 ~ 2 ns, ~ 1.5 kJ, 526.5 nm 激光, 从靶室东偏上 45° , 经阵列透镜后, 以 22.5° 的入射角, 均匀辐照 $1 \mu\text{m}$ 厚的 Ag 薄膜靶. Ag 薄膜靶的法线与竖直方向成 67.5° . 位于第九路入射窗口附近法兰位置的 X 射线针孔相机测量激光辐照薄膜靶的焦斑, 相机使用 $\phi 10 \mu\text{m}$ 针孔将靶面发射的 X 射线成像于成像板, 利用磷屏分析仪对相机记录的 X 射线焦斑图像进行分析, 采用厚度分别是 $15 \mu\text{m}$, $1.15 \mu\text{m}$ 和 $13 \mu\text{m}$ 的 Al, Cr 和 CH 材料构成的复合滤片滤除软的 X 射线, 相机放大倍率 $M = 6.8$, 相机空间分辨 $\sim 20 \mu\text{m}$. 置于靶室正南方位的 X 射线条纹相机^[32]从靶面切向观测薄膜靶的飞行轨迹, X 射线条纹相机使用的针孔直径为 $15 \mu\text{m}$, 从靶面切向将激光烧蚀产生的 X 射线经针孔后成像于条纹相机阴极, 观测靶面 X 射线发光区的运动, 靶到阴极距离 720 mm, 靶到针孔距离 45 mm, 成像放大倍率 15, 采用 $1.2 \mu\text{m}$ Cr 和 $26 \mu\text{m}$ CH 材料构成的复合滤片滤除软 X 射线, 条纹相机时间分辨 20 ps, 系统空间分辨 $\sim 20 \mu\text{m}$. 安装于靶室东偏南 15° 法兰位置的晶体谱仪从接近于靶面法线的方向测量 Ag 薄膜靶的 X 射线辐射光谱. XRD 探测器阵列布置于第九路激光入射窗口附近的法兰, 在 XRD 探测器前加厚度均为 $1 \mu\text{m}$ 的 Cr 和 CH 滤片, 测量 2—6 keV 能区的 X 射线辐射能流, 从而获得激光辐照 Ag 靶产生的 X 射线辐射能量和转换效率. 高速光电探测器配高速数字化示波器测量第九路激光波

形. 实验排布如图 1 所示.

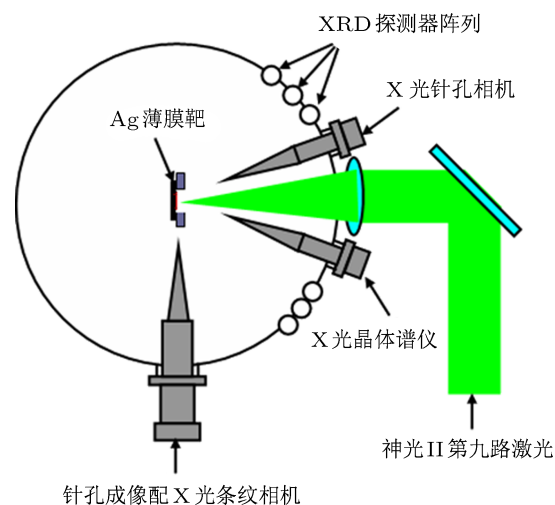


图 1 实验排布示意图

3 实验结果

神光 II 装置靶场激光能量测量系统测得入射到靶面的激光能量为 1.415 kJ, 高速光电管配示波器测量的激光波形如图 2 所示, 此激光脉冲的波形半高全宽为 2.25 ns.

X 射线针孔相机测量得到激光焦斑, 由于激光以 22.5° 的入射角入射, 激光焦斑为椭圆, 其短轴为 $350 \mu\text{m}$, 长轴为 $380 \mu\text{m}$. 计算得到入射的二倍频激光辐照 Ag 薄膜靶的激光功率密度约为 $4.73 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$. 平面晶体谱仪测量 Ag 等离子体辐射的 X 射线谱, 测谱范围为 0.2—0.50 nm, 实验得到的 Ag 等离子体的 L 线辐射光谱如图 3 所示.

由光谱可以看出, Ag 靶在 3—6 keV 能区均有 Ag 离子的 L 线辐射, 是适合较薄壳层靶丸透视照相的理想背光源. XRD 阵列测量 Ag 薄膜靶发射的 2—5 keV 能区的 X 射线辐射能量为 45.5 J, 计算得到 Ag 靶的 L 线辐射转换效率为 3.2%.

图 4 是 X 射线条纹相机从靶面切向观测到的 Ag 薄膜在激光烧蚀驱动下 Ag 薄膜的发光图像, 图中的暗区是薄膜靶支撑环遮挡 X 射线所形成的阴影.

前向等离子体受激光加热, 等离子体的温度可以达到数 keV, 是 Ag 等离子体辐射 X 射线辐射的主要区域, 因此发光区的后边缘实际上是靶面所处的位置, 其空间位置的变化反映了靶面的运动.

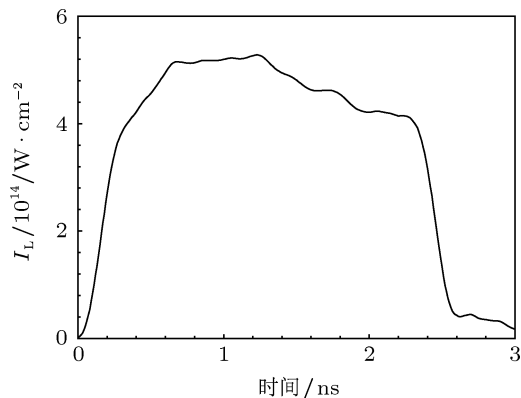


图2 入射激光波形

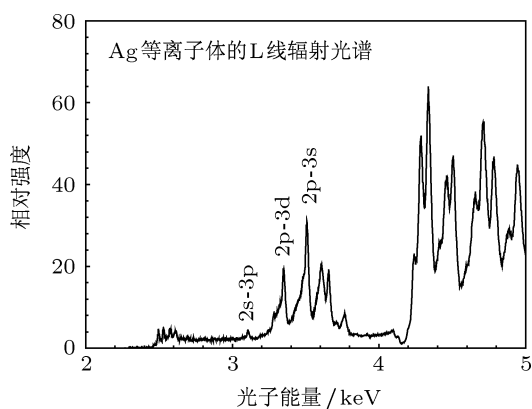


图3 Ag 等离子体辐射的光谱

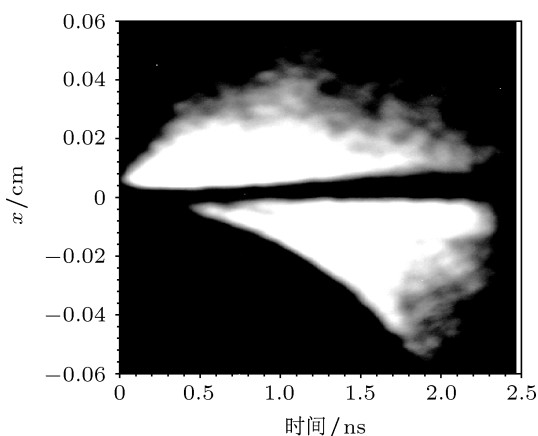


图4 X 射线条纹相机从靶面切向方向观测的时空分辨 Ag 薄膜靶辐射的 X 射线图像

4 结果分析与讨论

4.1 一维辐射流体力学模拟计算

实验中, 神光 II 第九路二倍频激光以 22.5° 的入射角辐照 Ag 平面靶, 考虑到入射角度较小, 将激

光 Ag 薄膜靶相互作用的过程做平面一维处理. 采用一维拉格朗日辐射流体动力学程序 multi-1d^[33] 对薄膜靶在激光辐照下的动力学过程进行数值计算. 实际计算中取激光从左面入射到平面样品的表面, 激光产生的等离子体沿 X 轴方向运动, 未被烧蚀的材料在烧蚀压作用下向后飞行, 靶前后表面均为自由面. 采用如图 5 所示的多边形对实际的激光脉冲波形进行近似处理.

脉宽取 2.25 ns, 峰值功率密度为 $5.58 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 原子序数 $Z = 47$, 初始密度 $\rho = 10.5 \text{ g/cm}^3$, 靶厚度 $d = 1.0 \text{ }\mu\text{m}$, 入射到临界面的激光在此处通过共振吸收沉积 10% 的激光能量, 电子热传导采用限流扩散模型, 激光吸收以韧致吸收为主. 使用 Sesame 数据库^[31] 提供的状态方程和辐射不透明度参数对内能、压力、X 射线辐射和激光吸收进行计算. 实验时入射激光波长为 526.5 nm, 但考虑到激光为斜入射, 在计算激光吸收时, 需要利用吸收的角度关系对计算进行适当修正. 平面一维情况下, 临界面外的等离子体可近似为等温区膨胀, 容易得到等温膨胀条件下等离子体密度的自相似解. 自相似解中, 等离子体密度与离开靶面距离成指数衰减的关系, 当激光以 θ 角入射时, 经简单计算后可得逆韧致吸收为^[34]

$$\eta_a = 1 - \exp\left(-\frac{1.552 \ln(\Lambda) \cdot Z^* c_s t \cos^3 \theta}{\lambda_{\mu\text{m}}^2 T_{\text{keV}}^{1.5}}\right), \quad (1)$$

式中 $\ln(\Lambda)$ 是库仑对数, Z^* 为晕区等离子体的平均电离度, C_s 为声速, $\lambda_{\mu\text{m}}$ 为以 μm 为单位的激光波长, T_{keV} 为以 keV 为单位晕区等离子体电子温度. 为了便于一维流体力学程序模拟斜入射激光情况, 将激光斜入射引起的激光吸收降低折算到波长中, 则计算中取等效波长 $\lambda^{\text{eff}} = \lambda \cos^{-1.5} \theta = 0.5929 \text{ }\mu\text{m}$. 计算时将激光功率密度降低 5%, 模拟 5% 的 SBS 散射对结果的影响. 拉氏质量坐标区间均匀地划分为 100 网格对流体进行模拟, 每个网格点不同时刻所处的空间位置曲线称为流线. 图 6 是采用 multi-1d 程序计算得到的 Ag 薄膜靶在激光驱动下的流线图, 其中最下方的流线就是靶后表面的运动轨迹.

图 7 是模拟计算结果与实验结果的比对. 对图 4 测量的 Ag 发光图像进行处理, 我们获得了薄膜靶后表面的飞行轨迹, 其中圆点是实验结果, 曲线是限流因子 $f = 0.1, 0.03$ 和 0.01 时的结果, 比较可以看出, 限流因子的选取对计算结果有非常大的影响, 当 $f = 0.01$ 时计算的结果与实验结果相符, 表

明激光与 Ag 作用时电子热传导限流严重.

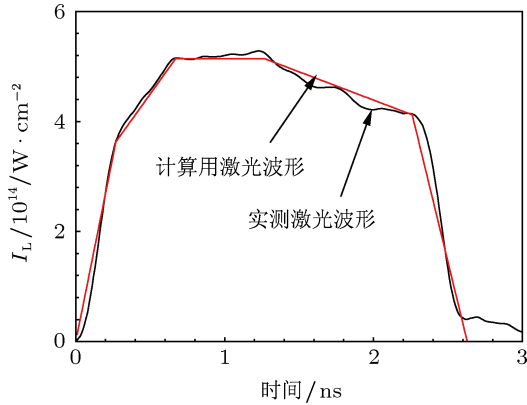


图5 模拟使用的激光波形

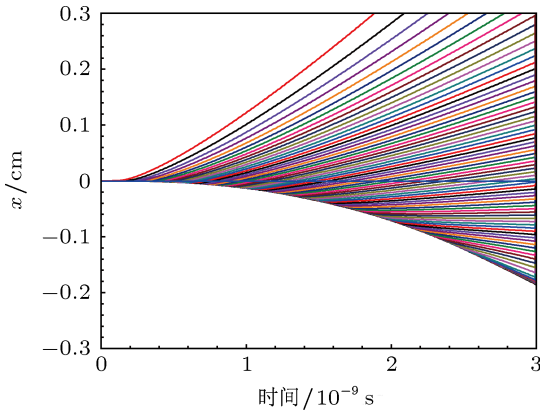


图6 Multi-1d 计算的 Ag 薄膜靶在激光驱动下的流线图

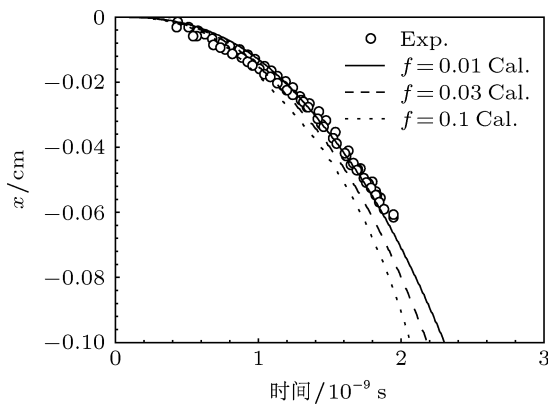


图7 Multi-1d 计算的 Ag 薄膜靶后表面飞行轨迹与实验结果的比对

4.2 火箭模型及数据拟合

下面采用火箭模型^[35-38]对激光烧蚀下薄膜靶的动力学特性进行研究. 高功率激光聚焦后辐照

薄膜材料在其表面产生高温等离子体, 高温等离子体在内部压力的作用下向自由面高速飞散, 同时驱动薄膜向后高速飞行, 该过程可用火箭模型对其进行描述

$$\frac{dM}{dt} = -\dot{m}_a A_r, \quad (2)$$

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -P_a A_r, \quad (3)$$

式中 M 是薄膜的质量, x 是薄膜后表面飞行的距离, A_r 是薄膜的表面积, \dot{m}_a 和 P_a 分别是单位面积的质量烧蚀速率和烧蚀压, t 是激光烧蚀靶的时间. 激光对 CH, Al, Be, 金刚石和 Au 等材料的烧蚀理论和实验研究表明, 烧蚀压和烧蚀速率仅与激光功率密度、激光波长和材料的特征参数有关. 因此在这里我们假定激光烧蚀 Ag 材料也遵循上述规律. 考虑到第九路激光脉冲波形接近于矩形脉冲, 在脉冲持续时间内其激光功率密度基本不变, 则烧蚀压和质量烧蚀速率保持恒定. 则有

$$\rho d \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \frac{d^2x}{dt^2} = -P_a, \quad (4)$$

式中 ρ 是材料的初始密度, d 为薄膜靶的初始厚度, τ 为激光烧透薄膜所需的时间. 求解上述微分方程可得到薄膜飞行速度和飞行距离的表达式

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{P_a \tau}{\rho d} \ln(1 - t/\tau), \\ x &= -\frac{P_a \tau}{\rho d} ((t - \tau) \ln(1 - t/\tau) - t). \end{aligned} \quad (5)$$

利用导出的上述两式可对激光烧蚀驱动下薄膜靶飞行轨迹和飞行速度的实验数据进行拟合, 由拟合参数可得到烧蚀压和质量烧蚀速率的数据. 拟合结果如图 8 和图 9 所示. 从图 8 和图 9 中可以看出, Ag 薄膜后表面在烧蚀压的驱动下, 1.88 ns 的时间内飞行距离约为 600 μm , 速度加速到 $7 \times 10^7 \text{ cm/s}$. 图 8 和图 9 表明在激光烧蚀驱动下, 薄膜后表面接近匀加速运动. 对实验结果进行拟合得到 $P_a \tau / \rho d = 27.0$ 和 $\tau = \rho d / \dot{m}_a = 8.7$, 计算得到银材料的质量烧蚀速率 $\dot{m}_a = 1.21 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 烧蚀压 P_a 为 $3.26 \times 10^{12} \text{ Pa}$.

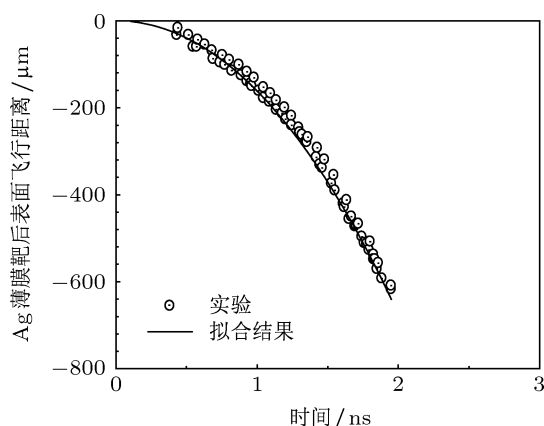


图8 火箭模型得到的 Ag 薄膜靶后表面飞行轨迹公式对实验结果的拟合

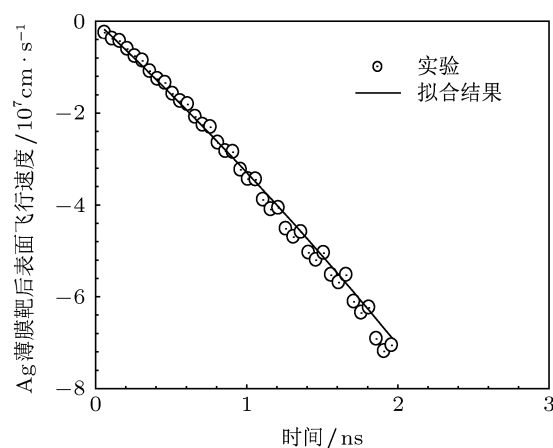


图9 火箭模型得到的 Ag 薄膜靶后表面飞行速度公式对实验结果的拟合

5 结论

在神光 II 装置上, 利用第九路输出的 $4.73 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 2.25 ns, 526.5 nm 激光束均匀辐照厚度为 $1 \mu\text{m}$ 的 Ag 薄膜靶, X 射线条纹相机从靶面的切向方向观测薄膜的动力学特性, 获得了样品的飞行轨迹. 火箭模型对样品飞行轨迹和飞行速度拟合, 给出了 $4.73 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 526.5 nm 激光辐照条件下, 银材料的质量烧蚀速率为 $1.21 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 烧蚀压为 $3.26 \times 10^{12} \text{ Pa}$. 采用一维辐射流体力学程序 multi-1d 对样品飞行的动力学行为进

行了数值模拟, 模拟表明, 限流因子的选取对模拟结果有较大影响, 当限流因子 f 取 0.01 的情况下模拟结果与观测结果符合, 表明电子热传导受到了很强的抑制. X 射线二极管阵列测量 Ag 等离子体辐射的 2.6 keV X 射线能量约占激光能量的 2.3%, 晶体谱仪测量得到的光谱表明, Ag 等离子体在 3—5 keV 能区有较强的 L 线辐射, 是内爆靶丸背光照相的理想背光源, 实验结果对背光照相实验设计有重要的参考价值. 火箭模型拟合样品飞行轨迹和速度给出样品质量烧蚀速率和烧蚀压的方法有望在靶丸材料辐射烧蚀参数的测量实验中得到应用.

- [1] De Groot J S, Estabrook K G, Kruer W L, Drake R P, Mizuno K, Cameron S M 1992 *Phys. Fluids* **B4** 701
- [2] Lindl J 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [3] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [4] Jiang S E, Ding Y K, Miao W Y, Liu S Y, Zheng Z J, Zhang B H, Zhang J Y, Huang T X, Li S W, Chen J B, Jiang X H, Yi R Q, Yang G H, Yang J M, Hu X, Cao Z R, Huang Y X 2009 *Science in China G* **39** 1571 (in Chinese) [江少恩, 丁永坤, 缪文勇, 刘慎业, 郑志坚, 张保汉, 张继彦, 黄天暄, 李三伟, 陈家斌, 蒋小华, 易荣清, 杨国洪, 杨家敏, 胡昕, 曹柱荣, 黄翼翔 2009 中国科学 G 辑 **39** 1571]
- [5] Olson R E, Rochau G A, Landen O L, Leeper R J 2011 *Phys. Plasmas* **18** 032706
- [6] Regan S P, Epstein R, Goncharov V N, Igumenshchev I V, Li D, Radha P B, Sawada H, Seka W, Boehly T R, Delettrez J A, Gotchev O V, Knauer J P, Marozas J A, Marshall F J, McCrory R L, McKenty P W, Meyerhofer D D, Sangster T C, Shvarts D, Skupsky S, Smalyuk V A, Yaakobi B, Mancini R C 2007 *Phys. Plasma* **14** 056305
- [7] Sanmartij J R, Mokta N L, ANZ E S, Ramis R 1985 *Plasma Physics Controlled Fusion* **27** 983
- [8] Azechi H, Miyayaga N, Sakabe S, Yamanaka T, Yamanaka C 1981 *Jpn. J. Appl. Phys.* **20** L477
- [9] Zeng X C, Sheng J T, Li M, Zhang L F, Gao Y M, Li Y S, Feng T G 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 195 (in Chinese) [曾先才, 盛家田, 李蒙, 张利发, 高耀明, 李运生, 冯庭桂 2004 强激光与粒子束 **16** 195]
- [10] Li S W, Feng J, Miao W Y, Ding Y K, Wang Y M, Yu Y N 1998 *Acta Optica Sinica* **18** 895 (in Chinese) [李三伟, 冯杰, 缪文勇, 丁永坤, 王耀梅, 于燕宁 1998 光学学报 **18** 895]
- [11] Li S W, Feng J, Ding Y K, Weng S H, He H E, Ding Y N, Cheng J X, Wang D H, Zheng Z J, Yang X D, Cheng X L 2000 *Journal of Atomic and Molecular Physics* **17** 205 (in Chinese) [李三伟, 冯杰, 丁永坤, 温树槐, 何海恩, 丁耀南, 成金秀, 王大海, 郑志坚, 杨向东, 程新路 2000 原子与分子物理学报 **17** 205]
- [12] Li S W, Feng J, Wang Y M, Yu Y N 1997 *High Power Laser and Particle Beams* **9** 132 (in Chinese) [李三伟, 冯杰, 王耀梅, 于燕宁 1997 强激光与粒子束 **9** 132]
- [13] Feng J, Li S W, He H E, Ding Y N, Cheng J X 1998 *High Power Laser and Particle Beams* **10** 44 (in Chinese) [冯杰, 李三伟, 何海恩, 丁耀南, 成金秀 1998 强激光与粒子束 **10** 44]
- [14] Saillard Y, Arnault P, Silvert V 2010 *Phys. Plasmas* **17** 123302
- [15] Dahmani F 1993 *J. Appl. Phys.* **74** 622
- [16] Shigemori K, Azechi H, Nakai M, Mima K 1998 *Rev. Sci. Instrum.* **69**

- 3942
- [17] Wang H X, Salzberg A P, Weiner B R 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 935
- [18] Dahmani F, Kerjia T 1991 *Phys. Fluids* **B3** 1232
- [19] Key M H, Toner W T, Goldsack T J, Kilkenny J D, Veats S A, Coningham P F, Lewis C L 1983 *Phys. Fluids* **26** 2011
- [20] Dahmani F 1992 *Phys. Fluids* **B4** 1585
- [21] Zhang S D, Zhang W J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1512 (in Chinese) [张树东, 张为俊 2001 物理学报 **50** 1512]
- [22] Burdt R A, Yuspeh S, Sequoia K L, Tao Y Z, Tillack M S, Najmabadi F 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 033310
- [23] Meyer B, Thiell G 1984 *Phys. Fluids* **27** 302
- [24] Yang J M, Ding Y N, Zhang B H, Yang G H, Zheng Z J, Zhang W H, Hu X, Wang Y M, Zhang J Y, Li J 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 877
- [25] Schneider M B, Hinkel D E, Landen O L, Froula D H, Heeter R F, Langdon A B, May M J, McDonald J, Ross J S, Singh M S, Suter L J, Widmann K, Young B K, Baldis H A, Constantinb C, Bahr R, Glebov V Y, Seka W, Stoeckl C 2006 *Phys. Plasma* **13** 112701
- [26] Tierney I V T E, Cobblea J A, DeVolderb B G, Hoffmanb N M, Tubbsb D L, Bradleyb P A, Goldmanb S R, Magelssenb G R, Paisleya D L 2006 *Proc. SPIE* **6261** 626106
- [27] Cao Z R, Li S W, Jiang S E, Ding Y K, Liu S Y, Yang J M, Zhang H Y, Yang Z H, Li H, Yi R Q, He X A 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7170 (in Chinese) [曹柱荣, 李三伟, 江少恩, 丁永坤, 刘慎业, 杨家敏, 张海鹰, 杨正华, 黎航, 易荣清, 何小安 2010 物理学报 **59** 7170]
- [28] Kalantar D H, Haan S W, Hammel B A, Keane C J, Landen O L, Hunro D H 1997 *Review of Scientific Instruments* **68** 814
- [29] Hicks D G, Spears B K, Braun D G, Olson R E, Sorce C M, Celliers P M, Collins G W, Landen O L 2010 *Review of Scientific Instruments* **81** 10E304
- [30] Liu S Y, Yang G H, Zhang J Y, Li J, Huang Y X, Hu X, Yi R Q, Du H B, Cao Z R, Zhang H Y, Ding Y K 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 3333 (in Chinese) [刘慎业, 杨国洪, 张继彦, 李军, 黄翼翔, 胡昕, 易荣清, 杜华冰, 曹柱荣, 张海鹰, 丁永坤 2011 强激光与粒子束 **23** 3333]
- [31] Dong J J, Cao Z R, Yang Z H, Chen B L, Huang T X, Deng B, Liu S Y, Jiang S E, Yi S Z, Mu B Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155208 (in Chinese) [董建军, 曹柱荣, 杨正华, 陈伯伦, 黄天暄, 邓博, 刘慎业, 江少恩, 依圣振, 穆宝忠 2012 物理学报 **61** 155208]
- [32] Zeng P, Yuan Z, Deng B, Yuan Y T, Li Z C, Liu S Y, Zhao Y D, Hong C H, Zheng L, Cui M Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155209 (in Chinese) [曾鹏, 袁铮, 邓博, 袁永腾, 李志超, 刘慎业, 赵屹东, 洪才浩, 郑雷, 崔明启 2012 物理学报 **61** 155209]
- [33] Ramis R, Schmalz R, Meyer-ter-Vehn 1988 *Comp. Phys. Communications* **49** 475
- [34] Liu S Y, Fu L B, Zhang H Y, Ding Y N, Liu Z L, Zheng Z J, Tang D Y, Chen H D 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 222 (in Chinese) [刘慎业, 傅立斌, 张海英, 丁耀南, 刘忠礼, 郑志坚, 唐道源, 陈涵德 1996 物理学报 **45** 222]
- [35] Saillard Y 2004 *Laser and Particle Beams* **22** 451
- [36] Amendt P, Shestakov A I, Landen O L, Bradley D K, Pollaine S M, Suter L J, Turner R E 2001 *Phys. Plasmas* **8** 2908
- [37] Fabbro R, Max C, Fabre E 1985 *Phys. Fluids* **28** 1463
- [38] Fabbro R, Fabre E, Amiranoff F, Labaune C G, Virmont J, Weinfeld M 1982 *Phys. Rev. A* **26** 289

Experimental research on X-ray radiation and ablation of an Ag foil targets irradiated by high intensity $2\omega_0$ laser light beam*

Liu Shen-Ye[†] Huang Yi-Xiang Hu Xin Zhang Ji-Yan Yang Guo-Hong
Li Jun Yi Rong-Qing Du Hua-Bing Ding Yong-Kun

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 16 August 2012; revised manuscript received 4 September 2012)

Abstract

The characteristics of radiation and ablation are investigated for an Ag foil irradiated with 2 ns, $\sim 5 \times 10^{14}$ W/cm², 526.5 nm laser at SGII laser facility. The flight trajectory and velocity of the Ag foil are measured by X-ray streak camera. The experimental results show that they are in good agreement with simulations of one-dimensional radiation hydrodynamics code multi-1d using a flux-limited $f = 0.01$. A rocket model is used to fit the experimental data, and the mass ablation rate and ablation pressure are obtained. The L-shell X-ray conversion and spectra of the laser-produced Ag plasma are measured with a Bragg crystal spectrometer and an array of X-ray diodes. The design for X-ray backlighting radiograph experiments will benefit from these experimental results. The result and method presented in this article are significant for the ablation research on the capsule shell and cavity wall material in laser fusion ignition experiment.

Keywords: laser inertial confinement, laser ablation, plasma production and heating by laser beam, X-ray

PACS: 52.57.-z, 52.38.Mf, 52.50.Jm, 52.38.Ph

DOI: 10.7498/aps.62.035202

[†] Corresponding author. E-mail: lsye1029@yahoo.com.cn