

金箔靶背侧 X 光辐射的实验研究

杨家敏 丁耀南 郑志坚 孙可煦

陈正林 黄天暄 胡 昕 王耀梅

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

摘 要 利用星光 II 激光装置钽玻璃三倍频激光辐照金箔靶, 实验研究了金箔靶背侧发射的 X 光能谱、时间过程和透过激光能量。结果表明: 金箔背侧发射的 X 光可以作为一种较干净的强 X 光辐射源。

关键词 X 光源, 金箔靶, X 光发射, 透过激光能量。

1 引 言

强激光与高 Z 物质相互作用产生的强 X 光辐射具有非常广泛的用途^[1], 它可作为 X 光激光的泵浦光源, 也可用作间接驱动惯性约束聚变的驱动源, 而且在高温物质的特性研究如不透明度研究、状态方程测量等基础研究中, 也可用作加热源和诊断背光源。激光辐照金箔靶时背侧发射的 X 光作为 X 光源, 虽然强度比腔靶 X 光源约低一些, 但通过选取金箔靶参数, 并在背侧衬上一定厚度的 CH 低 Z 材料, 吸收少量的透过激光和抑制等离子体发射, 可以使其具有比腔靶 X 光源更干净的特点。国外从八十年代后期开始对波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $0.53 \mu\text{m}$ 激光辐照金箔靶时产生的 X 光辐射进行了测量研究^[2, 3], 得到了背侧 X 光的角分布、转换效率、能谱分布和时间过程; 对波长为 $0.35 \mu\text{m}$ 的激光辐照金箔靶(厚度为 $0.1 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$ 和 $1.2 \mu\text{m}$ 三种)背侧产生的 X 光辐射也进行了测量^[4], 在激光功率密度为 $1.5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 条件下, $0.1 \mu\text{m}$ 厚金箔背侧的 X 光转换效率为 23%。但由于激光烧穿金箔, 透过金箔的激光能量占入射激光能量的 37%; 而 $0.5 \mu\text{m}$ 厚金箔背侧虽然透过的激光能量已可忽略, 但背侧 X 光转换效率又明显降低。为获取比较干净且强度较高的 X 光辐射源, 经过模拟近似计算, 选取 $0.17 \mu\text{m}$ 厚金箔并加上 $0.17 \mu\text{m}$ 厚 CH 底衬作为金箔 X 光辐射源靶, 利用星光 II 激光装置上 $0.35 \mu\text{m}$ 波长激光辐照该源靶, 用多种诊断设备对源靶背侧 X 进行了测量研究。

2 金箔厚度的选取

强激光辐照金箔靶时首先发生激光烧蚀过程, 同时由于高 Z 材料 Au 具有高的激光 X 光转换效率, 激光与等离子体相互作用产生的强 X 光辐射也会对金箔发生辐射烧蚀, 从而形成典型的激光 X 光转换区、X 光再发射区和冲击波区三区结构^[4], 其中激光 X 光转换区和 X 光

再发时区可分别看作激光烧蚀区和辐射烧蚀区。因此, 强激光与金箔靶相互作用, 随着时间的推移将首先发生金箔的辐射烧穿, 此后在金箔背侧将获得强的 X 光辐射, 随后再发生激光烧穿, 透过金箔的激光能量将显著增加。为在金箔背侧获得干净、强度高的 X 光辐射, 金箔靶的厚度应取为稍大于金箔的激光烧穿厚度。Babonneau 等人给出了一个描述金箔靶最佳厚度的解析模型^[5]:

$$d = 26.2 (A/z)^{1/2} T_0^{1/2} t / \rho_0 \lambda^2 [1.0 + 0.946(A/Z)^{1/2}] \quad (1)$$

$$T_0 = 7 \times 10^6 I_{\text{abs}}^{2/3} \lambda^{5/3} / f^{2/3} \quad (2)$$

其中: d 为最佳厚度(cm), T_0 为临界面处的温度(K), f 为限流因子, ρ_0 、 A 和 Z 分别为金材料的初始密度(g/cm^3)、原子质量数和原子序数, λ 、 t 和 I_{abs} 分别为激光波长(μm)、脉宽(s)和吸收的激光功率密度($10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$)。

利用星光三倍频激光装置上的打靶实验条件 [λ : $0.35 \mu\text{m}$; I_{abs} : $(0.5 \sim 1.5) \times 10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$; t : $(600 \sim 900) \text{ ps}$], 并取限流因子 f 为 0.3, 预估金箔靶最佳厚度则为: $(0.06 \sim 0.14) \mu\text{m}$, 考虑到激光光束空间不均匀及制靶质量问题, 选取金箔靶的实际厚度应稍大于该估计值, 同时在其后衬一层 CH 材料, 以减弱透过激光及背侧喷射金等离子体的影响, 提高干净性。实验所用金箔源靶结构如图 1(b) 所示, 它是由 $0.17 \mu\text{m}$ 厚金沉积在 $0.17 \mu\text{m}$ 厚 CH 衬底上制作而成, CH 密度为 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

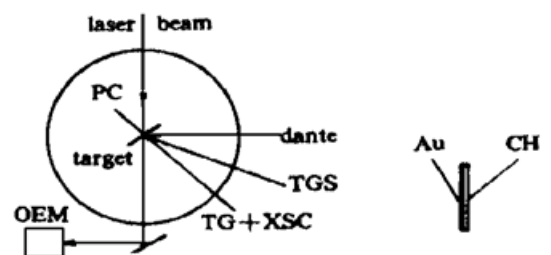


Fig. 1 Experimental arrangement and target. (a) Experimental arrangement, (b) Gold foil target

3 实验布置

实验在星光 II 激光装置上进行, 探测器布置如图 1(a) 所示, 利用钨玻璃三倍频激光(波长为 $0.35 \mu\text{m}$) 辐照金箔靶, 入射激光束与金箔靶法线方向成 30° 角, 透过金箔靶的激光能量是通过金箔靶透镜及反射镜用光学能量卡计测量, 在金箔靶背侧与法线方向成 15° 、 37.5° 、及 60° 角三个方向分别用透射光栅配 X 光条纹相机诊断系统、透射光栅谱仪和亚千 X 光能谱仪分别测量金箔靶背向 X 光的能谱时间过程、能谱分布和 X 光转换效率。在金箔靶前法线方向用针孔相机监测激光焦斑。

透射光栅谱仪采用 $1050 \text{ lp}/\text{mm}$ 无衬底透射光栅作色散元件, 用上海 5F 胶片作记录介质, 谱仪能谱分辨为 0.5 nm ; 透射光栅配 X 光条纹相机诊断系统也采用 $1050 \text{ lp}/\text{mm}$ 无衬底透射光栅, 系统能谱分辨为 0.8 nm , 时间分辨为 34 ps ; 针孔相机空间分辨为 $10 \mu\text{m}$; 亚千 X 光能谱仪由十道滤片 X 光二极管阵列组成, 测量 X 光能区范围为 $60 \sim 1500 \text{ eV}$; 实验中激光能量为 $20 \sim 80 \text{ J}$, 激光脉宽为 $500 \sim 850 \text{ ps}$, 激光焦斑直径为 $300 \pm 50 \mu\text{m}$ 。

4 实验结果及讨论

4.1 透过金箔靶激光能量

透过金箔靶激光能量是用光学能量卡计在金箔靶背侧进行了测量, 三发打靶的实验测量结果见表 1。从表 1 中看到, 激光功率密度在 $(1.1 \sim 1.3) \times 10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$ 范围, 透过金箔靶的激光能量与入射激光能量之比为 $1.4\% \sim 14\%$, 涨落变化很大, 其中第一和第二发实验透过

金箔靶激光能量较高,这主要是可能由于制备的 $0.17\ \mu\text{m}$ 厚金箔靶自身存在缺陷(如膜厚不均匀,存在较多沙眼)所致,另外,打靶入射激光光束不均匀也是原因之一;第三发实验透过金箔靶激光能量较低,这与低于 $100\ \text{J}$ 的 $0.35\ \mu\text{m}$ 波长激光烧蚀金厚度小于 $0.17\ \mu\text{m}$ 的理论计算结果相一致。因此,选取 $0.17\ \mu\text{m}$ 厚金箔再衬上 $0.17\ \mu\text{m}$ 厚 CH 膜作为金箔靶,可以获得低激光透过率的 X 光源,但为消除入射激光光束不均匀性及制靶质量问题等随机因素引起的较高的激光透过率,一方面要提高制靶质量,改善入射激光光束均匀性;另一方面适当加厚 CH 底衬膜,可大大降低透过激光能量,而低 Z 材料 CH 对 X 光透过率较高,其对背侧 X 光辐射源强度影响不大。

Table 1. Experimental results of transmitted laser energy

target no.	$I_L / (10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2)$	E_{IL} / J	t_L / ps	E_{TL} / J	$E_{\text{TL}}/E_{\text{IL}}$
1	1.30	78.6	856	4.8	6.1%
2	1.20	63.5	742	8.7	14%
3	1.14	58.0	716	0.80	1.4%

I_L : laser irradiance; t_L : laser pulse duration; E_{IL} : Incident laser energy; E_{TL} : Transmitted laser energy.

4.2 金箔背侧 X 光转化效率

金箔背侧发射的 X 光用亚千能谱仪测量,测得的各道信号通过解谱处理,得到金箔背侧的 X 光辐射源能谱,典型能谱如图 2 所示,对该能谱进行积分,并假定金箔背侧 X 光角分布按余弦分布,进行空间 2π 立体角积分,得到金箔背侧发射的 X 光总能量,将它与入射激光能量相比,即得到金箔背侧 X 光的转化效率。

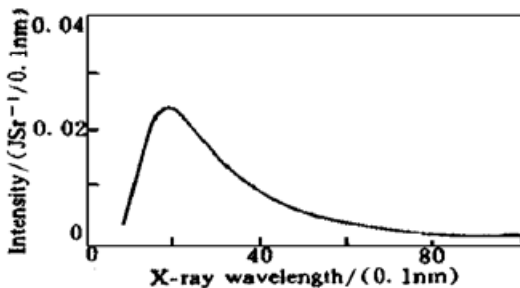


Fig. 2 X-ray spectrum from the rear side of gold foil, measured with subkilo-electronvolt X-ray spectrometer, the laser irradiance on gold foil is about $6.0 \times 10^{13}\ \text{W}/\text{cm}^2$

入射激光能量为 $58.0\ \text{J}$ 激光脉宽为 $716\ \text{ps}$ 时,激光功率密度为 $1.14 \times 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$,测得金箔背侧发射的 X 光总能量为 $(7.5 \pm 1.5)\ \text{J}$,背侧 X 光转化效率则为 $(13.0 \pm 2.6)\%$;入射激光能量为 $25.5\ \text{J}$,激光脉宽为 $600\ \text{ps}$ 时,激光辐照功率密度为 $6.0 \times 10^{13}\ \text{W}/\text{cm}^2$,测得金箔背侧 X 光总能量为 $(4.0 \pm 0.8)\ \text{J}$,背侧 X 光转换效率则为 $(15.6 \pm 3.1)\%$ 。

随着入射激光功率密度的增加,金箔背侧 X 光转化效率略有降低,这与文献[4]中实验结果一致;实验测得的 $0.17\ \mu\text{m}$ 厚金加 $0.17\ \mu\text{m}$ 厚 CH 膜组成的金箔靶背侧 X 光转化效率略低于文献[4]中 $0.1\ \mu\text{m}$ 厚金箔背侧 X 光的转化效率(23%),而明显高于 $0.5\ \mu\text{m}$ 厚金箔靶背侧 X 光转化效率(4.6%)。

4.3 金箔背侧发射 X 光能谱

在入射激光功率密度为 $6.0 \times 10^{13}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,透射光栅谱仪测得金箔背侧 X 光记录信号如图 3(a) 所示,对该 X 光记录信号进行解谱处理,得到金箔背侧 X 光能谱如图 3(b) 所示, X 光能谱分别在波长为 $2.0\ \text{nm}$, $4.0\ \text{nm}$ 和 $7.2\ \text{nm}$ 附近存在明显峰值。其中波长为 $2.0\ \text{nm}$ 和 $4.0\ \text{nm}$ 附近峰值分别来源于金等离子体的 N 带和 O 带发射,金材料对 X 光的吸收系数在 $7.0\ \text{nm}$ 附近存在最小值,因此在金箔背侧测得的 X 光能谱,在 $7.0\ \text{nm}$ 附近出现了峰值。

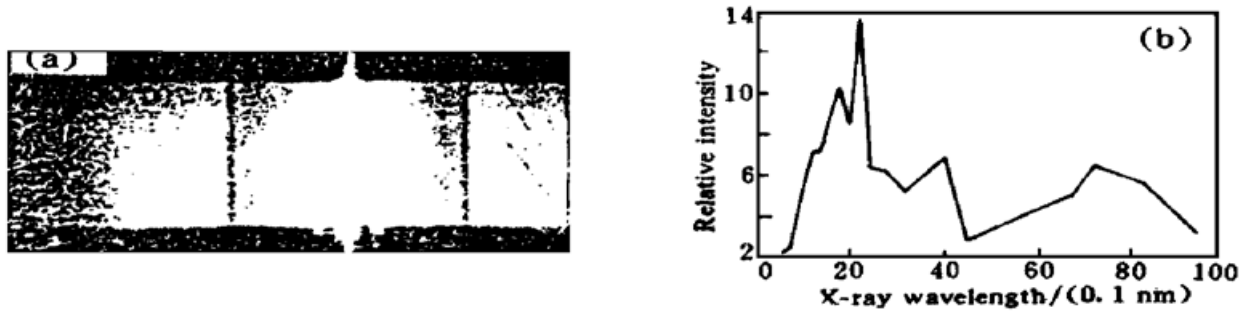


Fig. 3 X-ray spectrum from the rear side of gold foil, measured with transmission grating spectrometer, the laser irradiance on gold foil is about $6.0 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$

4.4 金箔背侧 X 光能谱时间过程

在入射激光功率密度为 $6.0 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 情况, 还同时用透射光栅配 X 光条纹相机测量了金箔背侧发射的 X 光的能谱时间过程。对金箔背侧发射 X 光能谱划分为八个能区分别进行时间扫描处理, 得到八个能区 X 光时间过程, 如图 4 所示。从图 4 看到, 金箔背侧 X 光能谱从高能段到低能段, 其时间过程有如下特点: 时间波形前沿和后沿逐渐变缓, 时间波形半高宽由短变长, 变化范围从 400 ps 到 600 ps, 以时间波形前沿峰值半高处定义为各能区 X 光时间起点, 则低能段 X 光发射比高能段 X 光发射存在一定延迟, 最大延迟时间为 70 ps。

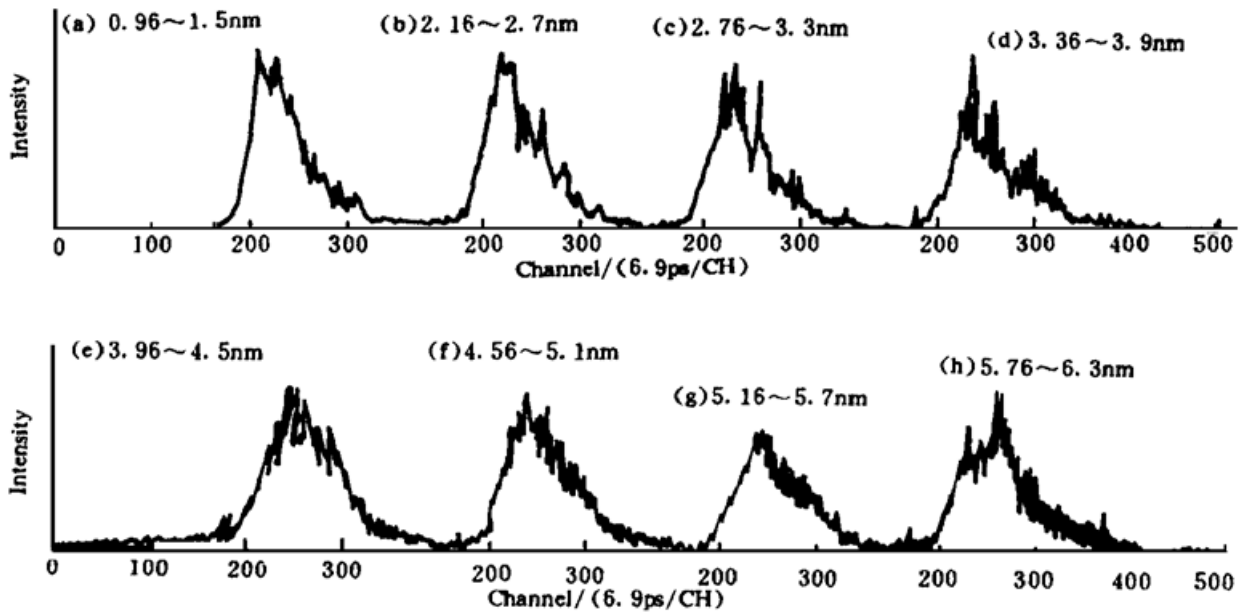


Fig. 4 Temporal evolution of X-ray from the rear of gold foil in eight wavelength intervals, as indicated on the curve. The laser irradiance on the gold foil is about $6.0 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$

激光与金等高 Z 物质相互作用, 将形成典型的激光 X 光转换区、X 光再发射区和冲击波压缩区三区结构^[4]。背侧发射的较高能 X 光成份将主要由激光 X 光转换区发射的较高能 X 光经金属材料衰减后组成, 由于金属材料对较高能 X 光成份的吸收衰减系数较低, 因此, 较高能 X 光成份的时间过程基本反映了激光 X 光转换区的相互作用过程。一旦入射激光将激光 X 光转换区等离子体加热到一定温度, 就能从金箔靶背侧测得较高能 X 光成分, 而对 X 光较低能区成份, 由于金属材料的吸收衰减系数相对较大, 只有当 X 光再发射区接近或穿出金箔靶背后, 才能从靶背测得较低能区 X 光信号, 所以, 从金箔背侧测得的较低能区 X 光相对较高能

区 X 光存在一定的时间延迟。

结 论 在 $0.17\ \mu\text{m}$ 厚的 CH 底衬上制作 $0.17\ \mu\text{m}$ 厚的金膜作为金箔靶, 利用星光 II 激光装置上波长为 $0.35\ \mu\text{m}$ 的激光辐照金箔靶, 激光辐照功率密度约为 $10^{13}\sim 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 范围, 在其背侧得到较高的 X 光转化效率和低的透过激光能量。但由于制靶和光束质量存在问题, 透过激光能量涨落较大, 为此, 适当加厚 CH 底衬, 有效降低透过激光能量而对 X 光强度影响不大, 可以得到较为干净的强 X 光辐射源, 该强 X 光辐射源的建立为实验室进行辐射烧蚀和不透明度的测量研究提供了条件。

感谢星光激光装置运行人员和制靶人员的协作。

参 考 文 献

- [1] T. Mochizuki, K. Mima, N. Ikeda *et al.*, Experiment evidence of ionization burnthrough and absorption resonance in radiative energy transport in dense matter. *Phys. Rev. (A)*, 1987, **36**(7) : 3279~ 3287
- [2] P. Celliers, K. Eidmann, Conversion of laser light into X rays in thin foil targets. *Phys. Rev. (A)*, 1990, **41**(6) : 3270~ 3279
- [3] D. Rkaria, H. Kornblum, B. A. Hammel *et al.*, Characterization of an X-ray-flux source for the production of high-energy-density plasma. *Phys. Rev. (A)*, 1992, **46**(12) : 7853~ 7868
- [4] H. Nishimura, H. Takake, K. Kondo *et al.*, X-ray emission and transport in gold plasmas generated by 351 nm laser irradiation. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **43**(6) : 3073~ 3085
- [5] D. Babonneau, J. L. Bocher, C. Bayer *et al.*, X-ray emission by the rear side of laser-irradiated gold targets. *Laser and Particle Beams*, 1991, **9**(2) : 527~ 540

Experimental Study of X-Ray Emission from the Rear Side of Gold Foil

Yang Jiamin Ding Yaonan Zheng Zhijian Sun Kexu
Cheng Zhenlin Hu Xing Wang Yaomei Huang Tianxuan
(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

(Received 3 May 1997; revised 4 August 1997)

Abstract Temporal and spectral behaviors of X-ray radiation emitted from the rear side of laser-irradiated gold foil, and transmitted laser energy have been investigated experimentally. An X-ray source with high X-ray flux and low transmitted laser energy could be obtained in laboratory.

Key words X-ray source, gold foil, X-ray emission, transmitted laser energy.