

1.053 μm 激光辐照金箔靶发射 X 射线能谱的实验研究

杨家敏 丁耀南 孙可煦 黄天喧 张文海 王耀梅 胡 昕 张保汉 郑志坚

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳市 919 信箱-216 分箱 绵阳 621900)

(2000 年 2 月 21 日收到 2000 年 7 月 25 日收到修改稿)

在“星光-II”单束高功率激光装置上利用束匀滑的钽玻璃基频激光辐照不同厚度的金箔靶,测量了金箔靶前向和背向的 X 射线能谱、X 射线辐射能量角分布及 X 射线能谱时间变化过程,研究了金箔靶中激光烧蚀及辐射烧蚀过程,获得了不同厚度金箔、不同激光功率密度及不同角度等几种条件下其前后向 X 射线能谱的定量测量结果,同时从不同厚度的金箔背侧 X 射线能谱时间过程观察到明显的辐射热波时间延迟。

关键词:金箔靶, X 射线能谱, 辐射烧蚀, 辐射热波

PACC: 5250J, 5225P, 5270, 2970

1 引 言

辐射烧蚀作为间接驱动惯性约束聚变的一个重要物理过程,通过实验研究各种材料的辐射烧蚀规律,能直接为提高惯性约束聚变中间驱动内爆流体学效率、选择靶材料提供实验依据;同时,通过研究辐射烧蚀特性,也能对激光靶相互作用中能量输运机理进行研究。从 80 年代开始,国外逐步开展了一些辐射烧蚀的实验研究与探索,观察到高 Z 介质中的辐射热波信号和中低 Z 材料中的离化烧穿现象^[1-3]。国内从 80 年代末开始进行了铝介质背侧辐射热波信号的观察和低 Z 材料的辐射烧蚀测量^[4]。同时,对钽玻璃三倍频激光辐照金箔靶 X 射线源特性进行了初步测量^[5,6],但实验中激光焦斑分布不均匀,在一定程度上影响到金箔靶 X 射线源测量结果的重复可靠性及干净性。

随着“星光”激光器技术改造的进行,在“星光”装置上能提供相对较为均匀的激光束打靶。为此,我们利用束匀滑的 1.053 μm 激光束辐照具有不同厚度的金箔靶,测量了不同厚度金箔靶前后向 X 射线能谱及能谱时间过程,研究激光与高 Z 金属材料相互作用过程中的激光烧蚀和辐射烧蚀过程。

2 实验安排

金箔靶结构如图 1 所示。金箔厚度分别为 0.08, 0.1 和 0.2 μm 三种,有机膜底衬厚度为 0.15 μm 。打靶实验中各诊断设备布置如图 2 所示。束匀滑后激



图 1 金箔靶结构示意图

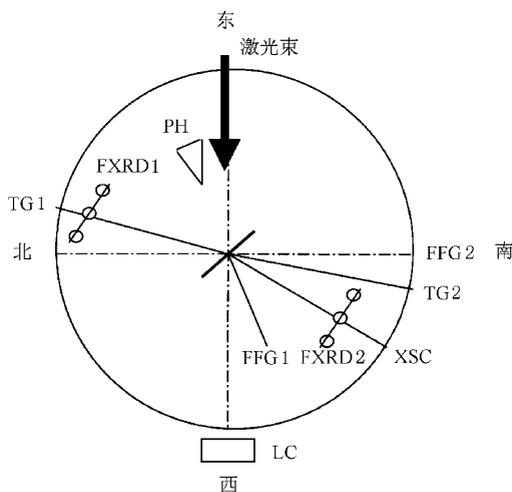


图 2 激光与金箔靶相互作用实验测量布置示意图
东北方向为金箔靶前向,西南方向为金箔靶后向

光以与靶法线方向成 15° 角辐照金箔靶。

激光参数为: $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$, $E_1 \approx 80 \sim 150 \text{ J}$, $\tau_1 \approx 0.80 \text{ ns}$ 。束匀滑后激光均匀焦斑直径为 $\phi \approx 600 \mu\text{m}$ 。在金箔靶后向,用透射光栅谱仪 TG2(透射光栅配 X 射线 CCD)测量金箔靶背向发射的中等谱分辨的 100—2000 eV 能区的 X 射线能谱;用一台透射光

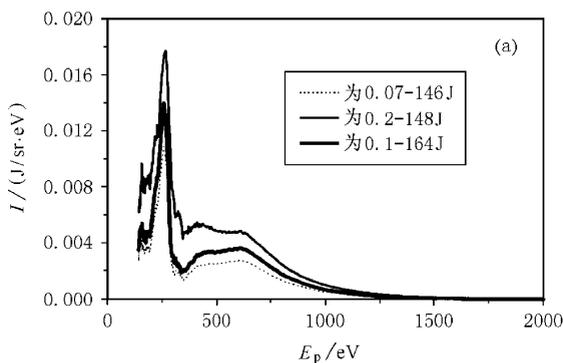
栅配 X 射线条纹相机测量后向发射的 X 射线能谱时间过程;用三只平响应 XRD (FXRD2) 测量后向 X 射线角分布;同时用激光能量卡计 (LC) 测量金箔靶漏激光量。在金箔靶前向,用一台针孔相机 (PH) 监测激光打靶焦斑;用另一台透射光栅谱仪 (TG1) 测量 X 射线时间积分能谱;用三只平响应 XRD (FXRD1) 测量前向 X 射线角分布;并同时用一套亚千 X 射线能谱仪测量 X 射线能谱。

3 实验结果

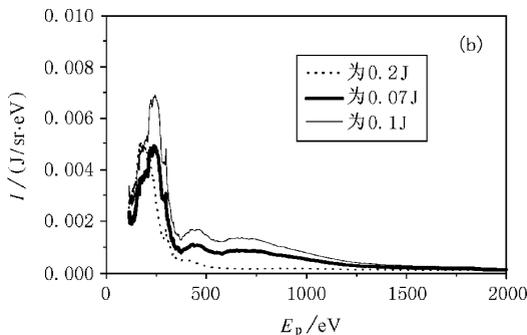
在 $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$, $E_1 \approx 150 \text{ J}$, $\tau_1 \approx 0.80 \text{ ns}$ 束匀滑后激光均匀焦斑直径为 $\phi \approx 600 \mu\text{m}$ 的激光打靶条件下,由两台透射光栅谱仪记录信号,经过解谱处理,分别给出金箔靶前向和后向 X 射线时间积分能谱。获得的不同厚度金箔靶前向和后向 X 射线时间积分能谱如图 3(a) 和 3(b) 所示。从图 3(a) 和 3(b) 中看到,随着金箔靶厚度的增加,金箔靶前向发射的 X 射线辐射强度增加,而金箔靶后向发射的 X 射线

辐射强度开始增加,而后又降低;从能谱结构看,前向发射 X 射线能谱结构变化不大,而后向发射 X 射线能谱结构变化很大。随着金箔厚度增加,较高能区 (500—1000 eV) X 射线强度降低很多,而较低能区 (150—300 eV) X 射线强度降低相对较少,而且其低能区强度峰位明显向低能方向移动。

在 $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$, $E_1 \approx 150 \text{ J}$, $\tau_1 \approx 0.80 \text{ ns}$ 束匀滑后激光均匀焦斑直径为 $\phi \approx 600 \mu\text{m}$ 的激光打靶条件下,厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 金箔靶前向和后向不同角度发射的 X 射线时间积分能谱如图 4(a) 和 4(b) 所示。从图 4(a) 和 4(b) 中看到,金箔靶前向不同角度发射的 X 射线谱差别相对较小,较高能区 (500—1000 eV) X 射线谱强度基本不变,而在较低能区 (150—300 eV) X 射线谱强度随角度增加有所降低;金箔靶后向不同角度发射的 X 射线谱差别很大,随角度增加,较高能区 (500—1000 eV) X 射线谱强度降低很多,而在较低能区 (150—300 eV) X 射线谱强度随角度增

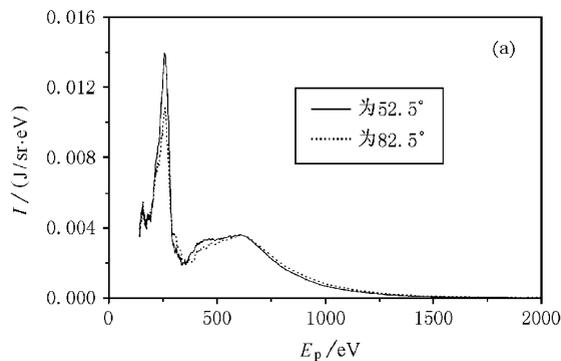


(a) 为金箔靶前向

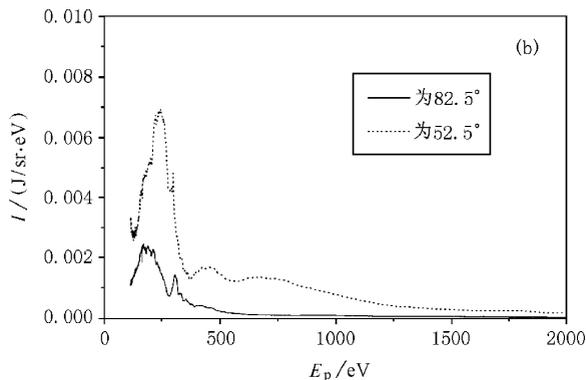


(b) 为金箔靶后向

图 3 透射光栅谱仪测得的激光辐照不同厚度金箔靶前向和后向辐射 X 射线谱的比较。钨玻璃基频激光功率密度约为 $6.6 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$



(a) 为金箔靶前向

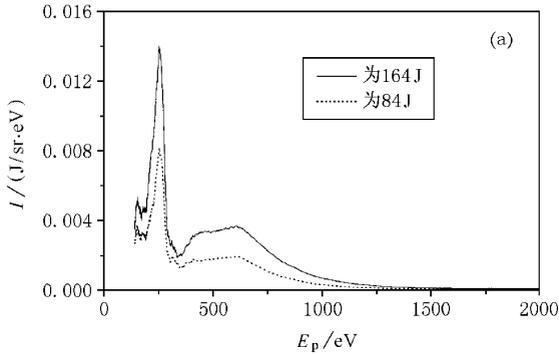


(b) 为金箔靶后向

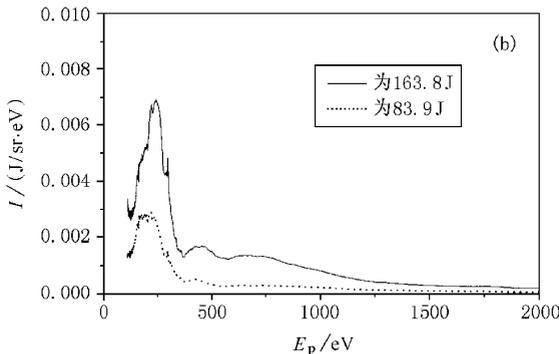
图 4 透射光栅谱仪测得的激光辐照 $0.1 \mu\text{m}$ 厚度金箔靶前向和后向不同角度发射 X 射线谱的比较。钨玻璃基频激光功率密度约为 $6.6 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$, 金箔靶前后向角度分别以其前后靶面法线方向为基准

加也有较大降低,同时,其较低能区(150—300 eV) X 射线谱强度峰位也向低能方向移动。

透射光栅谱仪测得的不同激光功率密度激光辐照 0.1 μm 厚度金箔靶后向发射 X 射线谱的比较如图 5(a)和 5(b)所示,钽玻璃基频激光功率密度分布约为 $3.4 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ ($E_1 = 84 \text{ J}$)和 $6.6 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ ($E_1 = 164 \text{ J}$)。从图 5 中看到,随着激光功率密度增加,金箔靶前向发射 X 射线谱中较高能区(500—1000 eV) X 射线谱强度增加相对较多,而在较低能区(150—300 eV) X 射线谱强度增加相对较少;而金箔靶后向发射 X 射线谱中较高能区(500—1000 eV) X 射线谱强度增加很多,较低能区(150—300 eV) X 射线谱强度增加相对较少;但与前向发射 X 射线谱相比,整个能区 X 射线谱强度都增加得更多,受激光辐照功率影响更大。



(a)为金箔靶前向



(b)为金箔靶后向

图 5 透射光栅谱仪测得的不同激光功率密度激光辐照 0.1 μm 厚度金箔靶前向和后向发射 X 射线谱的比较 钽玻璃基频激光功率密度分布约为(细线) 3.4×10^{13} 和(粗线) $6.6 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$

由亚千 X 射线能谱仪测得的激光辐照不同厚度金箔靶前向发射 X 射线谱的比较如图 6 所示,钽玻璃基频激光功率密度分布约为 $6.6 \times 10^{13} \text{ W/}$

cm^2 。从图 6 中看到,随着金箔靶厚度增加,前向发射的 X 射线谱强度增加,与前面透射光栅谱仪测得结果一致。

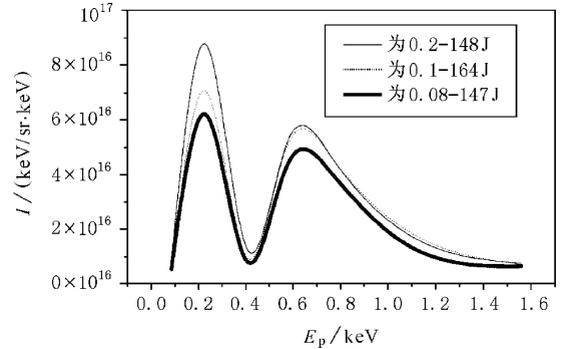


图 6 亚千 X 射线能谱仪测得的激光辐照不同厚度金箔靶前向发射 X 射线谱的比较 钽玻璃基频激光功率密度约为 $6.6 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$

由平响应 XRD 阵列测量得到的不同厚度金箔靶前向和后向 X 射线角分布如图 7 所示,钽玻璃基频激光功率密度约为 $6.6 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 。从图 7 中看到,金箔靶前向 X 射线辐射强度随角度增加而降低相对较少,而金箔靶后向发射 X 射线辐射强度随角度增加而降低相对较多;对金箔靶前向 X 射线辐射,随金箔靶厚度减少, X 射线辐射强度随角度增加而降低相对越少而越接近各向同性分布;对金箔靶后向 X 射线辐射,随金箔靶厚度增加, X 射线辐射强度随角度增加而降低相对越少而越接近各向同性分布。总的看来,金箔靶前后向发射的 X 射线辐射强度的角分布不能简单认为遵循角度余弦分布。

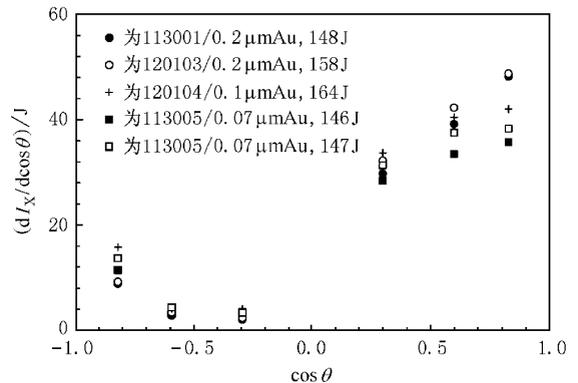
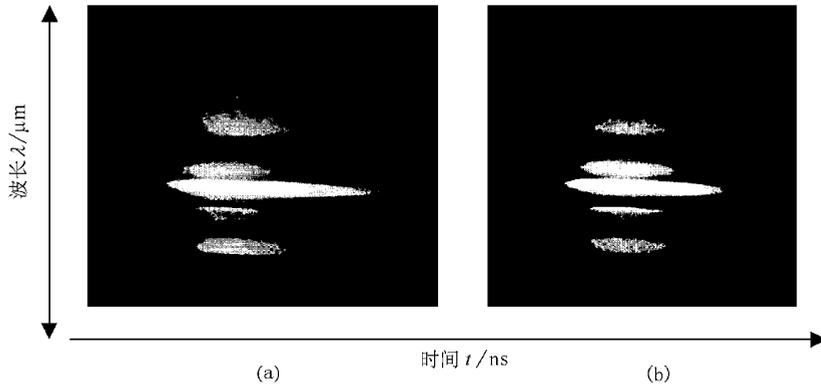


图 7 平响应 XRD 阵列测量得到的不同厚度金箔靶前向和后向 X 射线角分布 钽玻璃基频激光功率密度约为 $6.6 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$,角度以前向靶面法线为基准。

由透射光栅配 X 射线条纹相机测量得到不同

厚度金箔后向发射的 X 射线辐射能谱时间变化图象如图 8(a) 和 8(b) 所示, 钽玻璃基频激光功率密度约为 $6.6 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$. 从图 8(a) 和 8(b) 比较看到, 金箔背侧较低能区 X 射线辐射相对较高能区 X 射

线辐射存在明显的时间延迟, 而且金箔靶厚度越大, 时间延迟越长; 同时, 对较厚的金箔靶, 低能区 X 射线辐射相对高能区 X 射线辐射持续更长时间.



(a) 为 $0.2 \mu\text{m}$ 厚度金箔靶; (b) 为 $0.1 \mu\text{m}$ 厚度金箔靶

图 8 透射光栅配 X 射线条纹相机测量得到金箔靶后向发射的 X 射线辐射能谱时间变化图象 钽玻璃基频激光功率密度约为 $6.6 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$

4 讨 论

强激光与高 Z 金属材料相互作用时, 将形成如图 9 所示的典型的四区结构. 在激光转换区, 具有高温低密度特点, 并在其中低于临界密度的区域将激光吸收, 通过电子热传导将吸收的能量向稠密等离子体区域运输, 同时在该区域有效地将激光能量转换成 X 射线辐射. 紧接激光转换区的是中等温度 ($100\text{--}200 \text{ eV}$) 和中等密度的 X 射线再发射区, X 射线再发射区属于光性厚区域, 其中的能量传输主要依靠辐射运输, 在再发射区的等离子体同时将从激光转换区入射的 X 射线辐射再发射出去. 在再发射区前面是冲击波压缩区, 该区温度仅为几个电子伏, 密度高于未扰动区密度, 在冲击波压缩区前面未扰动区, 该区温度密度保持初始状态不变. 开始从背侧发射的 X 射线辐射主要是经冲击波压缩区和未扰动区衰减后的再发射区发射的 X 射线辐射, 随着时间的发展, 转换区和再发射区向金箔靶背移动, 从背侧发射的 X 射线辐射直接来自再发射区, 而未经衰减, 这时称之为发生辐射烧穿; 时间进一步发展, 最后从金箔靶背侧发射的 X 射线将主要来源于激光 X 射线转换区, 这时称之为发生激光烧穿. 当金箔靶很薄时, 会很快发生激光烧穿, 后向漏激光量会显著增加, 随着金箔靶厚度逐步增加, 将不发生激光烧

穿, 只发生辐射烧穿, 甚至不发生辐射烧穿.

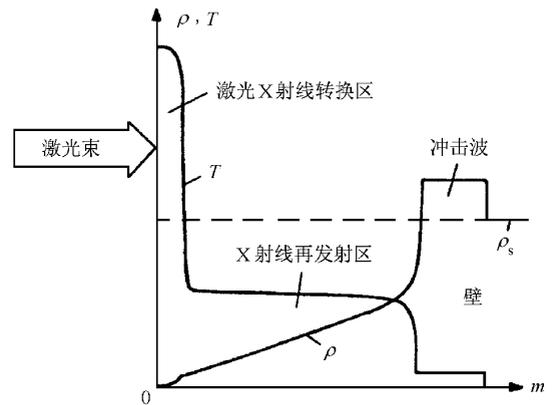


图 9 激光与高 Z 材料相互作用示意图

激光与金箔靶相互作用时, 很快形成如图 9 所示的典型的四区结构. 从金箔靶前向测量的 X 射线辐射谱主要来源于两部分, 一部分是直接来源于激光转换区, 另一部分来源于 X 射线再辐射区并经激光转换区等离子体吸收衰减后的 X 射线辐射, 由于激光转换区温度较高而密度较低, 对 X 射线的吸收衰减影响相对较小; 从金箔靶后向测量的 X 射线辐射谱也主要来源于两部分, 一部分是来源于激光转换区并经整个 X 射线再辐射区等离子体吸收衰减后的 X 射线辐射, 另一部分来源于 X 射线再辐射区并经部分 X 射线再辐射区等离子体吸收衰减后的

X 射线辐射,由于 X 射线再辐射区温度较低而密度较高,对 X 射线的吸收衰减影响相对较大;同时,对于 X 射线能谱中较高能区 X 射线辐射则主要来源于激光转换区.

对金箔靶前向测量的 X 射线辐射谱,由于金箔靶越厚,从激光转换区进入 X 射线再发射区的 X 射线向靶前经再发射的份额越大,因此,靶前向 X 射线辐射越强,而不同角度 X 射线辐射由于通过了不同厚度转换区等离子体的吸收衰减,大角度 X 射线谱相对较弱,但由于转换区等离子体温度高而密度小,所以前向 X 射线谱随角度变化相对较小.对金箔靶后向测量的 X 射线辐射谱,由于金箔靶在较薄时,由于部分激光未能充分被激光等离子体吸收而转换为 X 射线辐射,因此随金箔厚度增加,后向 X 射线辐射初始会增加,但金箔靶厚度较大时,又由于 X 射线再辐射区及未扰动区的吸收衰减, X 射线辐射强度会随厚度增加而减小;同时由于 X 射线再辐射区温度低密度高,对 X 射线的吸收衰减较大,因此,测量得到的后向 X 射线谱结构及强度随金箔厚度和辐射角度变化较大.在激光辐照功率密度较大时,激光转换区金等离子体温度相对较高,更易于发射较高能区 X 射线辐射,所以其前后向 X 射线能谱中较高能区 X 射线强度相对增加较多.

激光与金箔靶相互作用时能在其中形成辐射热波,金箔背侧 X 射线能谱中高能区 X 射线辐射主要来源于激光转换区,由于其受激光等离子体吸收衰减影响小,一旦激光与等离子体相互作用形成激光

转换区,就能在金箔背侧测得该 X 射线信号;而较低能区 X 射线辐射由于受激光等离子体吸收衰减影响大,只有在辐射热波达到金箔背侧时才能从金箔背侧获得该信号,所以金箔背侧 X 射线辐射谱中,较低能区 X 射线辐射相对高能区 X 射线辐射存在时间延迟,而金箔靶越厚,辐射热波达到靶背时间越长,因此延迟时间也越长.

5 结 语

利用星光激光装置上束匀化后的钨玻璃基频激光辐照不同厚度的金箔靶,利用透射光栅谱仪系统测量了金箔靶前向和后向的定量 X 射线能谱强度及谱结构与金箔厚度、激光辐照功率密度和 X 射线辐射角度的关系;同时利用平响应 XRD 阵列测量了不同厚度金箔靶前后向 X 射线能量角分布,进一步利用透射光栅配 X 射线条纹相机测量了金箔背侧的 X 射线能谱时间过程,观察到激光与金箔相互作用中形成的辐射热波时间延迟.

实验中获得的 X 射线能谱定量实验结果,由于光束匀滑后,激光焦斑较均匀,一维近似较好,激光参数条件相对准确,可供理论计算参考,开展理论计算与实验测量的初步比对工作,为实验与理论研究进一步相结合奠定了基础.

感谢星光激光装置运行人员的良好配合和制靶人员提供的实验用靶.

- [1] R. Sigel, G. D. Tsakiris *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1992), 587.
- [2] T. Afshar-rad, M. Desselberger *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **73**(1994), 74.
- [3] W. Schwanda, K. Eidmen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1992), 3507.
- [4] Y. N. Ding, Z. Y. Yao *et al.*, *High Power Laser and Particle Beams* **8**(1996) 83 [in Chinese] 丁耀南、姚震宇等, *强激光*

与粒子束 **8**(1996) 83].

- [5] J. M. Yang, Y. N. Ding *et al.*, *Acta Optica Sinica*, **18**(1998), 426 [in Chinese] 杨家敏、丁耀南等, *光学学报*, **18**(1998), 426].
- [6] J. M. Yang, Y. N. Ding *et al.*, *Acta Physica Sinica* **49**(2000), 747 [in Chinese] 杨家敏、丁耀南等, *物理学报*, **49**(2000), 747].

EXPERIMENTAL STUDY ON X-RAY SPECTRA FROM GOLD FOIL TARGET IRRADIATED BY 1.053 μm LASER

YANG JIA-MIN DING YAO-NAN SUN KE-XU HUANG TIAN-XUAN ZHANG WEN-HAI WANG YAO-MEI

HU XIN ZHANG BAO-HAN ZHENG ZHI-JIAN

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry ,China Academy of Engineering Physics ,
Mianyang P. O. Box 919-216 , Mianyang 621900 , China*)

(Received 21 February 2000 ; revised manuscript received 25 July 2000)

ABSTRACT

X-ray spectra , angular distributions of X-ray fluxes and evolutions of X-ray spectra from the front and the rear of gold foil target with different thickness have been measured on “ Xingguang ” laser facility , in which the gold foil targets were irradiated by smoothing 1.053 μm laser beam . The processes of laser and radiation ablation to gold foil have been studied. Quantitative X-ray spectra from the front and the rear of gold foil under several conditions such as different foil thickness , different laser power densities and X-ray emission angles have been obtained. At the same time , radiative heat wave has also been observed from the evolutions of X-ray spectra emitted from the rear of gold foils of different thickness.

Keywords : gold foil target , X-ray spectrum , radiative ablation , radiative heat wave

PACC : 5250J , 5225P , 5270 , 2970