

CNIC-01324  
CAEP-0012

# 辐射加热不同材料靶的 X 光再发射研究

孙可煦 易荣清 杨家敏 王红斌 黄天暄

崔延莉 陈久森 丁耀南 丁永坤

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

## 摘 要

研究辐射加热不同材料再发射 X 光特性。实验利用星光 II 三倍频激光, 以  $10^{14} \text{ W/cm}^2$  激光强度辐照金盘形成辐射加热源, 加热不同材料, 利用多种诊断设备组合, 并采取时、空、谱关联测量, 给出辐射加热不同材料的再发射时间延迟, 再发射效率, 再发射光谱结构以及等离子体碰撞滞后发射的时、空特性。

# **Experimental Study of X-Ray Reemission from Different Material Target Heated by Radiation**

*(In Chinese)*

SUN Kexu YI Rongqing YANG Jiamin WANG Hongbin HUANG Tianxuan  
CUI Yanli CHEN Jiuse DING Yaonan DING Yongkun  
(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

## **ABSTRACT**

Experiments to study the soft X-ray reemission properties from different material heated by the radiation produced by laser plasma are reported. Thermal source is performed with the laser pulse (intensity  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>) to act on Au disk target in Xing Guang laser facility, which heated different material. Temporal, spatial and spectral composition measurement is performed with varied soft X-ray diagnostic facilities. Finally, reemission time delay, reemission efficiency, reradiation spectrum construction and delay emission time-space properties of the stagnation plasma are given.

## 引言

在间接驱动惯性约束聚变 (ICF) 研究中, 通常采用激光辐照黑靶。激光在源区转换成 X 光, 然后通过辐射输运把 X 光能量转移到内爆区, 均匀驱动燃料靶丸<sup>[1,2]</sup>, 实现内爆。由于在腔内激光等离子体相互作用过程非常复杂, 给理论研究带来困难, 为了抓住物理实质, 降低难度, 简化物理图像, 采用双盘靶实验代替复杂的腔靶实验, 研究辐射加热材料再发射特性, 为辐射弛豫过程研究提供实验依据。

目前, 辐射加热材料的 X 光再发射研究是国际上关注的焦点。美国 LLNL 实验室在理论数值模拟和实验上都走在前列, 其结果已应用在内爆能量耦合效率的计算中。

在国内已作过两次实验, 对此已有一定的认识, 但由于实验条件的限制, 还有许多内容需要进一步研究, 比如: X 光再辐射延迟时间的基准问题, 滞后等离子体发光的原因<sup>[3]</sup>, 位置和能谱范围的问题以及不同材料的反照率问题, 除此以外, 我们还发现, 由于滞后等离子体发光, 在 X 光再辐射的份额中又增加了等离子体的影响。过去通过剥谱给出的结果是不够准确的, 因此, 在今年的星光实验中, 我们改进了靶型, 给出了较为理想的实验结果。

## 1 物理模型

三倍频激光辐照金盘靶, 形成等离子体辐射。等离子体向空间快速膨胀的同时, X 光以光速辐射加热次级靶物质。由于 X 光波长短, 热波烧蚀区为光性厚, 次级 X 光辐射可粗略认为是黑体辐射, 所以谱被软化, 没有明显的带谱结构。辐射加热次级材料, 形成等离子体, 这种热等离子体辐射初期, 具有较强非平衡特性, 通过区域间的能量传递和粒子间的能量交换, 等离子体很快趋向局部热动平衡, 这个过程称作弛豫过程。由于初级等离子体运动速度快, 密度梯度小, 次级等离子体运动速度慢, 密度梯度大, 所以两部分等离子体在次级靶面附近汇聚, 产生 X 光辐射。

## 2 实验条件和实验安排

在星光 II 装置上, 采用不同结构的双盘靶研究不同材料的 X 光再发射特性和滞后等离子体的发光。如图 1 所示, 以波长为  $0.35\ \mu\text{m}$ , 能量为 60 J, 脉宽为 800 ps, 离焦  $200\ \mu\text{m}$  的激光脉冲辐照初级金盘, 产生的 X 光辐射加热次级靶。采取时间关联测量, 用两台软 X 光能谱仪<sup>[4]</sup>, 10 个平响应 XRD 探测器, 一台 12 分幅相机, 两台透射光栅谱仪, 一台 X 光条纹相机, 一台空间分辨的透射光栅谱仪, 一台针孔相机, 分别监测初、次级的 X 光能谱、X 光总量、X 光空间发射和激光焦斑分布等物理参量。

靶型: 初级盘靶  $\Phi 600\ \mu\text{m}$ , 有两种厚度:  $5\ \mu\text{m}$  和  $0.17\ \mu\text{m}$ , 次级盘靶  $\Phi 600\ \mu\text{m}$ , 材料有 CH(4  $\mu\text{m}$ ), Au, Au(掺 Gd), 盘间距  $L = 500$  和  $800\ \mu\text{m}$ 。实验安排: 靶结构和实验安排如图 1 所示。

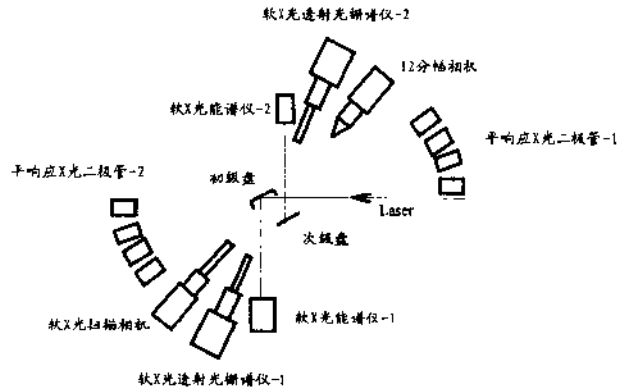


图 1 实验布局

### 3 实验结果分析

#### 3.1 改进时间关联

在过去时间关联的基础上，使各能道采用相同的滤片，用镀金玻璃球靶作时间关联实验，确定各道信号与时标之间的固有延迟。时间关联改进后，采用恒比定时计算延迟时间，由于 X 光脉冲前沿上升时间很快 (小于 1 ns)，我们选上升前沿的 50% 作基准，能够测量 100 ps 量级的时间间隔，误差小于 30 ps。延迟时间测量结果与 1996 年基本一致，列于表 1。

表 1 辐射加热不同材料再发射 X 光时间延迟

| 实验条件           | $\frac{E_L}{J}$ | $\frac{\tau_L}{ps}$ | 再发射 X 光能量/eV |      |       |      |      |      |      |
|----------------|-----------------|---------------------|--------------|------|-------|------|------|------|------|
|                |                 |                     | 60           | 170  | 260   | 400  | 580  | 670  | 810  |
| Au-Au          | 63.1            | 763                 | 0.10         | 0.20 | 0.25  | 0.25 | 0.25 | —    | 0.30 |
| 800 $\mu m$ 间隔 | 61.6            | 796                 | 0.10         | 0.20 | 0.25  | 0.20 | 0.30 | 0.30 | 0.25 |
| Au-Au+Gd       | 61.1            | 796                 | 0.15         | 0.20 | 0.20  | 0.20 | 0.25 | 0.35 | 0.25 |
| 800 $\mu m$ 间隔 | 46.3            | 965                 | 0.15         | 0.20 | 0.30  | 0.35 | 0.40 | 0.40 | 0.45 |
| Au-Au          | 57.5            | 1035                | 0.10         | 0.20 | 0.30  | 0.40 | 0.50 | 0.50 | 0.40 |
| 500 $\mu m$ 间隔 | 72.8            | 877                 | 0.10         | 0.25 | ~0.25 | 0.25 | 0.45 | 0.50 | 0.40 |

#### 3.2 不同材料 X 光再发射

实验中我们采用了三种不同的材料：CH，Au 和 Au+Gd 混合材料，通过透射光栅谱仪观测，看到如图 2 所示的谱结构，可以看出，Au 和 Au+Gd 混合材料的 X 光再辐射谱在 200 eV 附近有明显的差别，根据能量推算，这个能带是 Gd 的 O 带。我们利用软 X 射线能谱仪给出不同靶型，不同材料的 X 光再辐射率，列于表 2，从表中我们可以看到，在功率密度为  $1.2 T \cdot W/cm^2$  时，CH 的 X 光峰值再发射率很小，只有百分之几，Au 为 50%~54% 和 Au+Gd 混合材料为 58%，Au+Gd 混合材料的再发射率略大于 Au，再辐射率与 X 光辐照强度有关，辐照强度越高，再辐射率就越高。

3.3 等离子体碰撞发光

在 1996 年的双盘靶实验中, 间距为 700  $\mu\text{m}$  的双盘靶, 在次级 X 光再辐射时间波形中, 我们观察到了双峰结构, 说明在我们的能谱仪观测到的范围内在时间上存在着两次发光, 根据 X 光与等离子体存在飞行时间差, 说明第二个峰是等离子体发光。根据当时的实验设计, 这种情况存在两种可能, 第一种可能是由于初级等离子体喷射过高, 能谱仪没有空间分辨而产生的; 另一种可能是初级等离子体和次级等离子体碰撞产生的。

在今年的星光II实验中, 我们设计了专门的靶型, 通过改变两盘之间的间距, 观察到双峰的间距随双盘的间距而变化, 说明滞后等离子体发光与两盘的间距有关。采取在初级加不同的屏蔽片, 实验没有观察到明显的变化, 说明滞后等离子体发光不是初级等离子体膨胀的结果, 同时也说明了发光位置在次级附近, 通过针孔+X 光条纹相机的测量结果也说明了这一点, 如图 3 所示。根据软 X 射线能谱仪的实验结果, 如图 4 所示, 给出滞后等离子体发光的能谱范围主要在 200~700 eV。

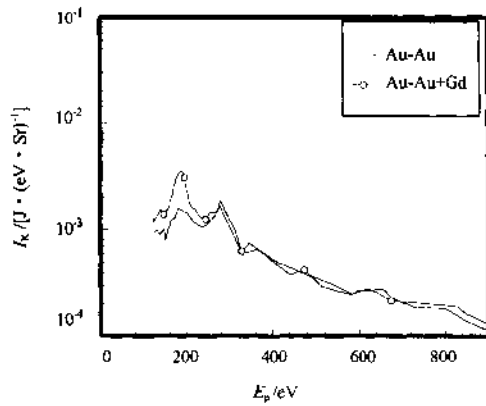


图 2 Au 和 Au+Gd 合金 X 光再辐射谱

表 2 辐射加热不同材料的再发射效率

| 实验条件                                    | 发次  | $\frac{E_L}{J}$ | $\frac{\tau_L}{ps}$ | 激光强度<br>$I/(W \cdot cm^{-2})$ | 初级盘 45° 发射<br>强度/(keV · sr <sup>-1</sup> ) | 次级盘 45° 发射<br>强度/(keV · sr <sup>-1</sup> ) | 再发射率<br>% |
|-----------------------------------------|-----|-----------------|---------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------|
| 890 $\mu\text{m}$ 间隔<br>Au-Au 双盘靶       | 166 | 63.1            | 763                 | $1.25 \times 10^{14}$         | $4.12 \times 10^{16}$                      | $3.23 \times 10^{15}$                      | 50        |
|                                         | 168 | 61.1            | 796                 | $1.17 \times 10^{14}$         | $3.50 \times 10^{16}$                      | $3.00 \times 10^{15}$                      | 54        |
| 800 $\mu\text{m}$ 间隔<br>Au-Au+Gd<br>双盘靶 | 170 | 61.1            | 796                 | $1.16 \times 10^{14}$         | $3.16 \times 10^{16}$                      | $2.98 \times 10^{15}$                      | 59        |
|                                         | 175 | 46.3            | 965                 | $7.26 \times 10^{13}$         | $3.07 \times 10^{16}$                      | $2.82 \times 10^{15}$                      | 58        |
|                                         | 171 | 29.0            | 655                 | $6.70 \times 10^{13}$         | $1.76 \times 10^{16}$                      | $1.13 \times 10^{15}$                      | 41        |

3.4 金的再辐射率

由于滞后等离子体发光, 在 X 光再辐射的份额中又增加了等离子体的影响。过去通过剥谱给出的结果是不够准确的, 因此, 在今年的星光实验中, 我们改进了靶型, 进一步研究金的再辐射率。初级采用 CH 镀金, 镀金层厚 0.17  $\mu\text{m}$ , 该厚度是根据激光烧蚀深度确定的。初级盘  $\Phi 600 \mu\text{m}$ , 外围加 1×2 mm 金屏蔽片, 次级金盘  $\Phi 600 \mu\text{m}$ , 厚 5  $\mu\text{m}$ , 盘间距  $L = 800 \mu\text{m}$ 。激光辐照初级盘产生 X 光和等离子体, 等离子体背向激光方向运动, 部分 X 光透过靶背, 我们从靶背得到干净的 X 光源, 辐照次级金盘靶, 避开等离子体碰撞的影响, 研究金的 X 光再发射率问题。通过实验, 我们获得了不同能道 X 光再辐射的时间波形, 如图 5 所示。通过数据处理, 我们给出了辐射加热强度为  $5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  时, 金的 X 光再辐射率为 42%。

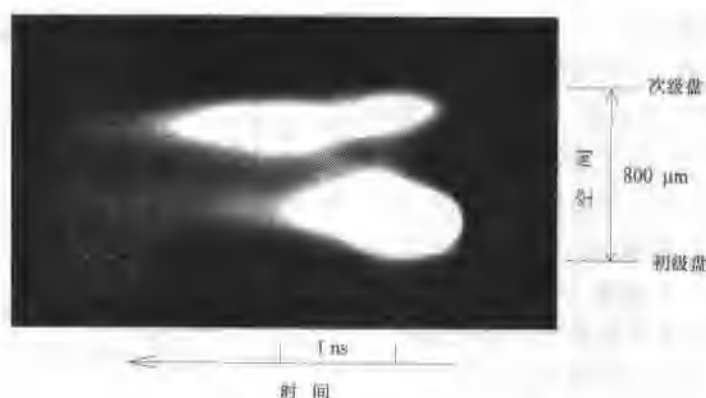


图3 再辐射 X 光空间和时间分辨图象

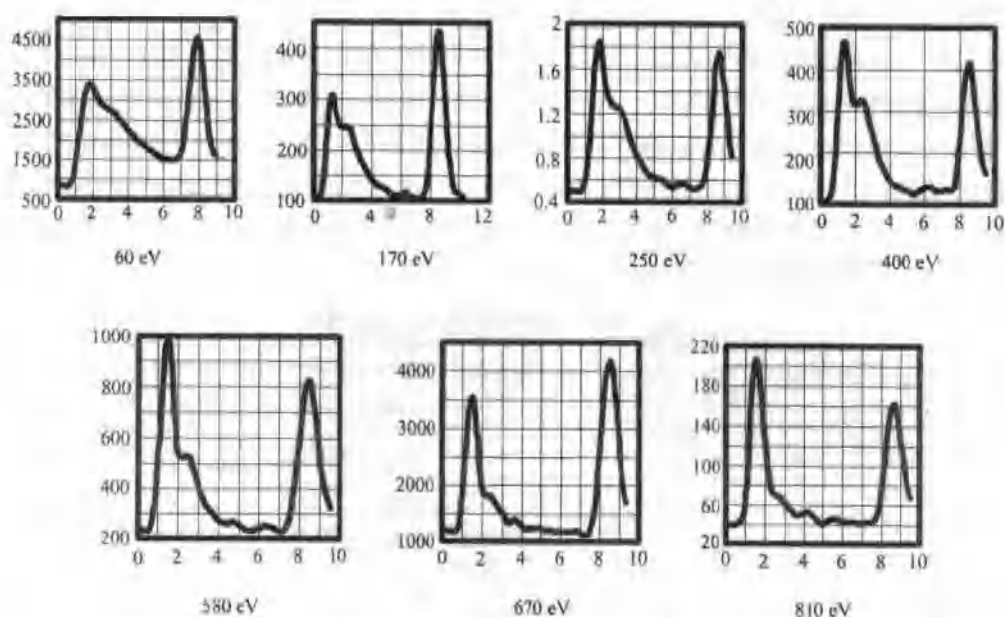


图4 977170 发不同能区的 X 光再辐射时间波形

纵坐标为能量的电信号强度,第三道(250 eV)以“V”为单位,其余各道均以“mV”为单位,横坐标以“ns”为单位。

## 4 结 论

通过实验可以证明,实验结果和物理模型是一致的,三倍频激光,功率密度为  $1.2 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>,辐照在初级金盘靶上,产生等离子体,辐射 X 光,等离子体以近似  $6 \times 10^7$  cm/s 的速度向空间快速膨胀,它的膨胀速度与激光功率密度有关,功率密度越高,它的膨胀速度就越快。X 光以光速辐射加热次级靶物质,辐照强度约为  $1.2 \text{ T} \cdot \text{W/cm}^2$ ,由于 X 光波长短,热波烧蚀区为光性厚,次级 X 光辐射接近黑体辐射,所以谱被软化,没有明显的带谱结构,不同物质的再辐射率是不一样的,再辐射率与原子序数有关,原子序数越大,再辐射

率就越高, CH 的 X 光再辐射率只有百分之几, 而金的再辐射率为 50%~54%, 由于金钨混合材料在发射能区上互补, 再辐射率略大于金的再辐射率。X 光加热次级靶, 温度逐渐升高, 次级开始产生等离子体, 辐射 X 光, 这个过程有一定的时间延迟, 我们把这段时间称为再辐射延迟时间。不同能量的光子延迟时间是不一样的, 低能再发射延迟时间短, 60 eV 处延迟约 0.1 ns, 随着能量增大, 再发射延迟时间逐渐变长, 800 eV 能区, 再发射延迟可达 0.4 ns 左右。由于初级等离子体运动速度快, 密度梯度小, 次级等离子体运动速度慢, 密度梯度大, 所以两部分等离子体在次级靶面附近约 160  $\mu\text{m}$  处汇聚, 产生 X 光辐射, 其能谱成分在 Au 的 N 带能区相对高。

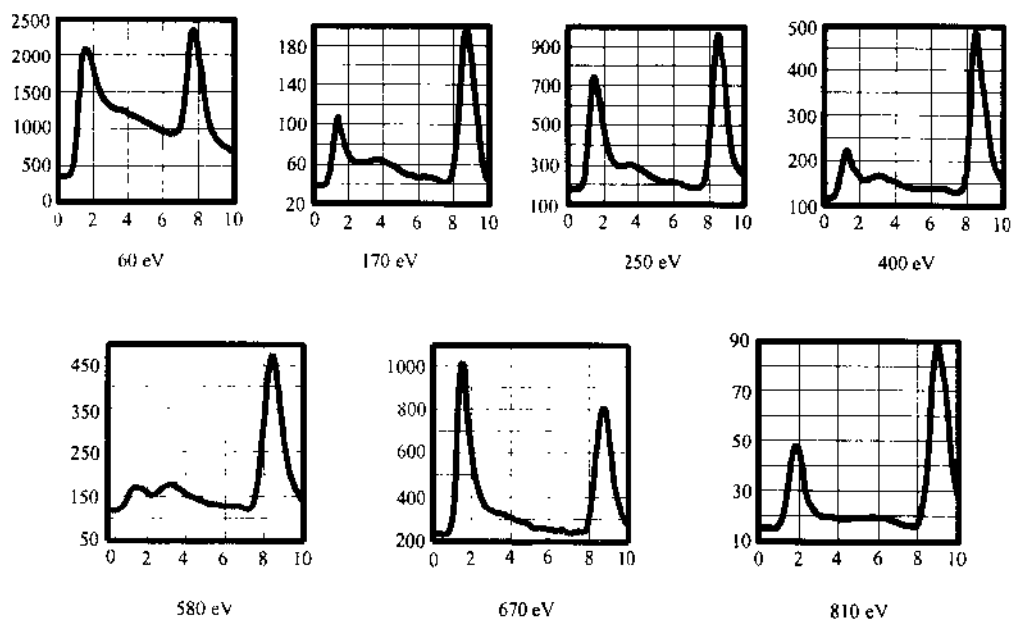


图 5 No97194 发不同能道 X 光再辐射的时间波形

纵坐标为能量的电信号强度, 以“mV”为单位, 横坐标以“ns”为单位。

感谢星光 II 装置的运行人员和 209 室制靶人员的人力配合。

## 参 考 文 献

- 1 Nakamury M, Kondo K, et al. Laser and Particle Beams, 1992, 10(3): 421~433
- 2 Nishimura H, Shiraga H, et al. Laser and Particle Beams, 1993, 11(1): 89~96
- 3 Andre M, Babonneall D, et al. Laser and Particle Beams, 1994, 12(3): 329~341
- 4 孙可照, 郑志坚, 杨建国. 强激光与粒子束, 1990, 2(1): 16~22