

金 M 带谱时空特性研究

李三伟 冯 杰 缪文勇 丁永坤 王耀梅 唐道源

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

给出了金 M 带谱细致结构及金 M 带发射的空间尺度和时间尺度。用晶体谱仪配软 X 光条纹相机测得三倍频激光与发泡金盘靶相互作用金 M 带发射的时间尺度是: $E_L = 46$ J, $\tau = 571$ ps 时, 金 M 带发射持续时间 (FWHM) 约 850 ps。用狭缝配晶体谱仪测得金 M 带发射的空间尺度是: 当 $\lambda = 1.06$ μm , $E_L = 106$ J, $\tau = 550$ ps 时, 金 M 带发射的空间尺度 (FWHM) 为 57 μm ; 当 $\lambda = 0.35$ μm , $E_L = 25 \sim 38$ J, $\tau = 510$ ps 时, 金 M 带发射的空间尺度 (FWHM) 为 27 $\sim$ 37 μm 。

Temporal and Spatial Characters Measurement of Gold M-Band Emission

(In Chinese)

LI Sanwei FENG Jie MIAO Wenyong DING Yongkun

WANG Yaomei TANG Daoyuan

(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

Duration of gold M-band emission was measured to be 850 ps by coupling a crystal spectrometer to an X-ray streak camera under laser condition of $\lambda=0.35\text{ }\mu\text{m}$, $E_j=46\text{ J}$, $\tau=571\text{ ps}$. While the dimensions of gold M-band emission were measured to be $57\text{ }\mu\text{m}$ and $27\sim39\text{ }\mu\text{m}$ under laser condition of $\lambda=1.06\text{ }\mu\text{m}$, $E_L=106\text{ J}$, $\tau=550\text{ ps}$ and $\lambda=0.35\text{ }\mu\text{m}$, $E_L=25\sim38\text{ J}$, $\tau=480\sim570\text{ ps}$, respectively.

引言

在间接驱动惯性约束聚变研究中,为了获得高的吸收效率和高的X光转换效率,靶材料一般采用高Z元素金。激光加热的金等离子体X光辐射具有显著的非平衡特性,即X光谱具有明显的带谱结构,通常由M, N, O带谱和连续谱组成。X光谱的结构强烈依赖于等离子体状态和相关的原子动力学过程。在理论上有许多描述金等离子体X光谱时空行为的物理模型,但这些物理模型和假设均需要经过实验数据校验才能更加完善。因此金M带发射的空间尺度和时间尺度,对我们了解等离子体状态及运动特性有积极意义,同时可以为建立正确的理论模型和校核程序提供部分实验数据。

金原子M壳层电子被强激光剥离掉一部分后,处在激发态的电子跳回基态,辐射的X光称为金M带,其光子能区主要为1.8~3.6 keV。在三倍频激光强度为 10^{14} W/cm²时,金M带转换效率(M带能量与入射靶面激光能量之比)约3%,当激光强度为 10^{15} W/cm²时,金M带转换效率约7%,随着激光功率密度的升高,金M带谱峰值向高能段移动^[1]。国外对金M带空间特性研究一般采用复合滤片(25 μm厚的铍与3~7 μm厚的锡组成带通滤片)与针孔相机组合测量,对金M带时间特性研究一般采用复合滤片与X光条纹相机组合测量^[2],二者不足的是经滤片滤波后的X光谱不是严格的金M带谱,还有高能尾部连续谱的贡献。我们采用衍射晶体代替滤片,消除了连续谱的贡献。

1 实验方法

用晶体谱仪分别与狭缝和软X光条纹相机结合测量金M带发射的空间尺度和时间尺度,选择M带几条有代表性的强线来分析谱线强度随空间和时间的变化关系。理论上认为:金M带空间尺度与激光焦斑有较好的线性关系,靶法线方向观测M带空间尺度可以间接提供激光功率密度;靶切线方向观测M带空间尺度可以粗看等离子体密度陡缓情况。由于金M带发射主要来自电子温度较高的冕区,峰值位于 N_{c2} 与 N_{c4} 密度之间(N_c 为临界面密度),因此从金M带发射时间过程,可以初步了解冕区电子温度随时间的变化情况和金M壳层驰豫时间。

2 实验条件和布局

实验是在“星光”装置上完成的。单束激光输出,激光波长有两种,1.06 μm和0.35 μm,三倍频激光能量为25~46 J,激光脉宽480~570 ps;基频光能量约100 J,激光脉宽约550 ps。实验用靶有三种,见图1,金硅层靶,硅片上镀约0.02 μm的金;金圆盘靶,直径φ600 μm,厚4 μm;发泡金盘靶,发泡金层(密度 $\rho=170$ mg/cm³, 8 μm)涂在衬底金层($\rho=19.3$ g/cm³, 4 μm)上,靶直径φ600 μm,入射激光直接辐照到发泡金层上,入射激光与靶法线方向夹角约35°。

靶室内探头布局见图2,一台时间、空间积分晶体谱仪(PET, $2d=0.874$ nm),测量

金M带能谱细致结构, 测量范围 0.32~0.6 nm; 一台时间分辨晶体谱仪^[3] (平面晶体 TAP, $2d = 2.57$ nm), 测量金M带发射持续时间, 靶距离X光条纹相机光阴极中心 373 mm, 光阴极C₁I, 长 18 mm, 时间分辨约 30 ps, 该谱仪所测波长范围 0.53~0.64 nm; 一台空间分辨晶体谱仪 (PET), 从金盘靶切线方向测量金M带发射的空间尺度。空间分辨晶体谱仪狭缝宽度约 18 μ m, 狭缝距靶点 11 mm, 放大倍数 6.6 倍, 经晶体衍射后的X光采用天津 III 号胶片记录, 狭缝处用 1 μ m 厚的 Al 膜挡掉可见光。一台针孔相机用来监测激光焦斑。

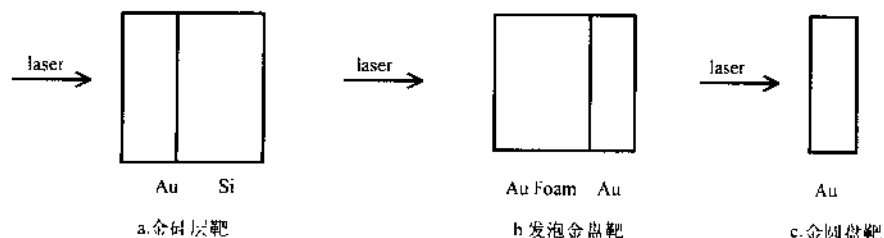


图1 靶结构示意图

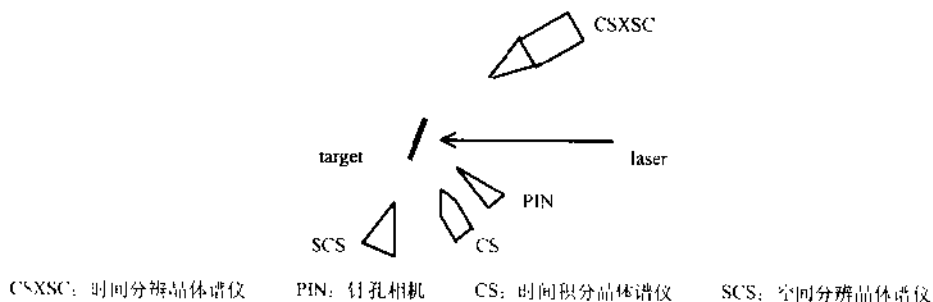


图2 实验现场探头布局示意图

3 实验结果与分析

3.1 金M带能谱

用时间、空间积分晶体谱仪 (PET, $2d = 0.874$ nm) 测量了三倍频激光打镀金硅片靶所发射的线谱, 在一张底片上同时记录到硅线和金M带谱, 谱线识别采用已知波长的两条硅线 (Si^{13+} , $1s-3p$, 0.5217 nm; Si^{12+} , $1s^2-1s4p$, 0.541 nm) 对金M带谱线 0.3~0.5 nm 谱段进行了初步的标识。实验测得的金M带能谱见图 3, M带谱很宽, 谱线很多, 主要是类 Co, 类 Ni, 类 Cu, 类 Zn 等离子 $4f-3d$, $4s-3p$, $4p-3d$, $5f-3d$, $6f-3d$ 跃迁发射的谱线。金M带发射主要来自高温低密度的电晕区, 在这个区域, 等离子体对金M带吸收很弱, 可视为光性薄介质, 从半导体 PIN 探头测得的金盘靶M带发射的角分布结果看出, M带发射基本上是各向同性的。谱线发射强度取决于离子激发态的占据数密度和跃迁几率。根据实验测得的M带细致结构, 结合理论计算分析, 可给出金等离子体平均离化度。从图 3 看出, 金M带发射峰值主要位于 0.4~0.5 nm, 用多组态程序 MCDF 计算标识结果, 该谱段谱线主要来自类 Cu 离子, 结合文献 [1], 初步估算出此条件 ($\lambda = 0.35 \mu\text{m}$, $I \approx 1.5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$)

下金原子平均离化度 $Z \approx 50$ 。

3.2 金 M 带谱发射空间特性

用空间分辨晶体谱仪从金圆盘靶切线方向观测金 M 带发射情况,典型实验结果见图 4。金 M 带空间发射区域很窄,离开靶面,金 M 带发射强度越来越弱。表 1 列出了金 M 带发射空间尺寸的实验结果, λ 为入射激光波长, E_L 为激光能量, τ 为激光脉宽, L_1 为谱线强度下降到 1/10 峰值处的全宽度, L_2 为谱线强度下降到 1/2 峰值处的全宽度 (FWHM)。在二倍频激光打靶 ($E_L = 25 \sim 38$ J, $\tau = 480 \sim 570$ ps) 时,金 M 带峰值发射空间区域 (FWHM) 为 $27 \sim 39$ μm ,用空间发射区域除以激光脉宽,就可以初步估算出此条件下 $N_e/2 \sim N_e/4$ 密度之间区域运动速度的上限 $(5 \sim 7) \times 10^6$ cm/s,因为 $N_e/2 \sim N_e/4$ 密度区域本身有一空间宽度,所以它的运动距离也就小于金 M 带发射空间尺寸。

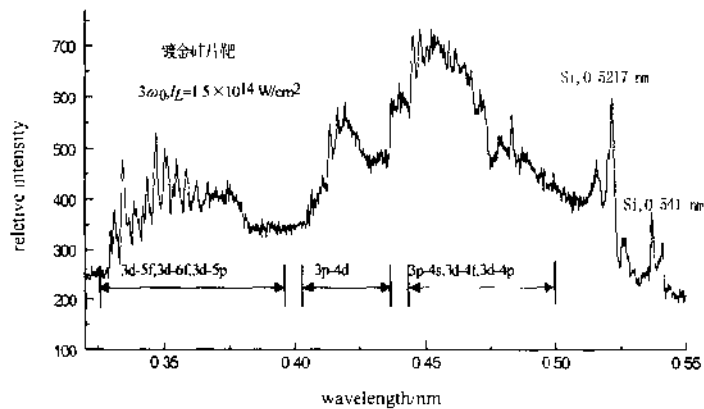


图3 金 M 带能谱

表1 金 M 带发射的空间尺寸

$\lambda / \mu\text{m}$	E_L / J	τ / ps	$L_1 / \mu\text{m}$	$L_2 / \mu\text{m}$
1.06	106	550	110	57
0.35	38	482	66	37
0.35	30	570	58	39
0.35	26	547	60	36
0.35	25	513	48	27

3.3 金 M 带谱发射时间特性

用时间分辨晶体谱仪测量发泡金盘靶 (见图1) M 带发射持续时间,实验结果见图5。实验中条纹相机光阴极距离靶点较远 (受靶室法兰的限制),条纹相机灵敏度又较低,故测得的谱线强度较弱。

三倍频激光能量 46 J, 激光脉宽 571 ps, 靶面激光强度约 2×10^{14} W/cm²,发泡金盘靶 M 带发射持续时间 (FWHM) 约 850 ps,比激光脉宽长,金 M 带 (光子能量约 2 keV)

发射要求电子温度达到约 450 eV, 而靶区平均电子温度 $T_e \approx 1.2$ keV, 按文献[2]中LASNEX程序给出的金盘靶定标关系 $T_e = 2.3 I_{14}^{0.45} \lambda_{\mu\text{m}}^{0.85}$, keV 计算, I_{14} 是靶面激光强度, 为 10^{14} W/cm², λ 是激光波长 (μm)。从实验结果看等离子体靶区 (金 M 带发射主要来自 $N_e/2$ 与 $N_e/4$ 之间的密度区域) 电子温度从 1.2 keV 降到 450 eV 的时间过程较长。英国人 M.H.Key 测得激光烧蚀铝硅层靶时, 线谱发射持续时间是激光脉宽的两倍^[4]。我们认为, 发泡金材料有保温作用, 8 μm 厚的发泡金层 (密度为 170 mg/cm³) 等效自然界常态金材料 (密度为 19.3 g/cm³) 厚度为 0.07 μm , 按日本人的实验结果^[5], 三倍频激光烧蚀金, 在同样实验条件下激光烧蚀深度约 0.12 μm , 说明激光能烧穿发泡金材料, 但靶边缘可能没烧穿, 靶边缘对等离子体有约束作用, 使发泡金材料有类似腔靶的保温效果。再者高 Z 材料电子热传导受阻严重, 使 X 光发射时间波形在起始阶段迅速上升之后不能随激光脉冲高斯型分布继续迅速上升, 而出现缓慢上升或平顶 (金 M 带发射时间波形不象入射激光高斯波形), 也会造成 X 光时间波形展宽。

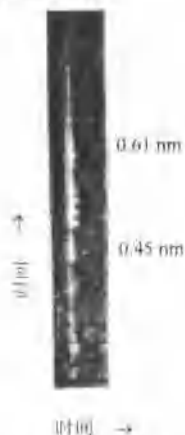


图4 基频激光打金平面靶时 M 带发射的空间特性

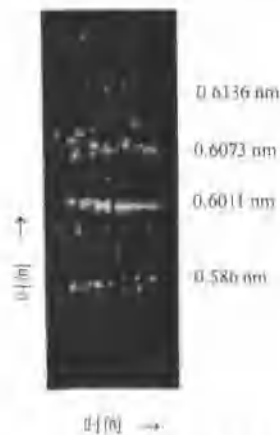


图5 三倍频激光打发泡金盘靶时 M 带发射的时间特性

4 结束语

“星光”装置上的光束质量, 特别是激光焦斑的测量等因素, 会给实验结果带来误差。考虑到激光能量测量误差 $\pm 5\%$, 激光脉宽测量误差 $\pm 10\%$, 激光焦斑测量误差 $\pm 15\%$, X 光条纹相机扫描误差 $\pm 10\%$ 后, 估计金 M 带发射持续时间总误差 $\pm 20\%$ 。

本工作得到制靶人员、器件运行人员和本室人员的大力配合, 笔者表示感谢。

参考文献

1. Kauffman R.L. X-Ray Conversion Efficiency, UCRL-50021-1986, 1987, 9~13
2. Gahl E.F. Phys. Fluids, 1990, B2(10): 2437~2447
3. 蔡玉斗等. 强激光与粒子束, 1992, 4(2): 175~180
4. Key M.H., Toner W.T. et al. Phys. Fluids, 1983, 26(7): 2011~2025
5. Nishimura H. Phys. Rev. A, 1981, 23: 2001