# 用透射光栅谱仪测量金箔背侧 X 射线能谱\*

杨家敏 丁耀南 孙可煦 成金秀 江少恩 郑志坚

(中国工程物理研究院西南核物理与化学研究所 绵阳市 919 信息 216 分箱 绵阳 621900) (1999年6月3日收到;1999年9月17日收到修改稿)

在星光激光装置上利用波长为 0.35 µm 的激光辐照金箔靶 在金箔靶背侧用透射光栅配 X 射线 charge coupled device 系统测量了其发射的软 X 射线能谱 并与用亚千能谱仪测量的结果进行了比较 获得了比较一致的结果.测 量结果表明  $0.17~\mu\mathrm{m}$  厚度的金箔靶背侧的 X 射线能谱偏离平衡辐射谱 具有明显的金等离子体 N 带和 O 带辐射 结构.

PACC: 4280F; 4272; 52501; 5270

#### 引 1

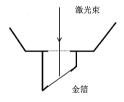
由于激光与金箔靶相互作用产生的金箔靶背侧 X 射线辐射具有相对于净的特点, 金箔靶背侧 X 射 线辐射源被广泛应用于辐射不透明度、辐射烧蚀及 辐射输运等的实验研究中[12] 国外已有多家实验 室对金箔靶背侧 X 射线辐射源的特性进行过实验 研究[3-5] 获得了不同厚度金箔靶背侧 X 射线辐射 总量、漏激光量及 X 射线能谱分布的结果 ,从国外 发表的结果来看, 各实验室测量的金箔背侧 X 射线 能谱之间及与理论计算结果还存在相当大的差异。 国内我们曾利用透射光栅配 X 射线胶片对金箔背 侧 X 射线能谱进行过实验测量 .但由于 X 射线胶片 对X射线响应的非线性及响应的重复稳定性易受 胶片冲洗条件、生产批次的影响 影响了测量结果的 准确性.而 X 射线 charge coupled device(缩写为 CCD)具有线性响应特性,线性动态范围较大,而且 响应重复稳定 近年来逐渐替代了 X 射线胶片得到 越来越广泛的应用.

为此 本文利用最近引进的 X 射线 CCD 作为 透射光栅谱仪的记录设备,在星光装置上对波长为 0.35 µm 的激光与金箔靶相互作用产生的后侧 X 射 线能谱进行了实验测量,实验测量结果与用亚千 X 射线能谱仪测量结果进行了比较,获得了比较一致 的实验结果.

#### 实 验 2

实验是在星光激光装置上进行的,实验用腔金

箔靶结构如图 1 所示. 腔金箔靶为 Ø400 μm 斜金柱 腔加上金箔柱腔底构成,其中激光注入孔直径为 300 μm ,柱腔底为 20 μm 厚度的金板 ,在金板中间开  $350~\mu\mathrm{m}\! imes\!100~\mu\mathrm{m}$  的方孔 ,并在方孔上贴  $0.17~\mu\mathrm{m}$  厚 的金箔,并衬上 0.17 µm 厚度的 CH 底衬,柱腔底面 法线与柱腔轴线成 45°角, 在柱腔靶注入口一端设 计了一锥形屏蔽片.



腔金箔靶结构示意图

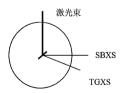




图2 实验测量布置示意图 SBXS 为亚千 X 射线能谱仪; TGXS 为透射光栅谱仪

实验布置如图 2 激光正入射注入柱腔金箔靶, 在与注入激光束成 90°和 112.5°方向分别用亚千 X 射线能谱仪和透射光栅配 X 射线 CCD 系统测量金 箔靶背侧 X 射线能谱.

透射光栅谱仪中透射光栅与柱腔金箔靶和 X 射线 CCD 记录面距离分别为 880 和 1110 mm .同时

<sup>\*</sup>国家高技术研究发展计划(批准号 863-416-3.3.1)资助的课题.

为降低 X 射线源强度以避免 X 射线 CCD 产生饱和 ,在靶与透射光栅之间距靶 280 mm 处加了一个与透射光栅狭缝正交的空间分辨狭缝 ,空间分辨狭缝宽度为  $20~\mu m$  ,透射光栅狭缝宽度为  $100~\mu m$  .透射光栅为 1000~1~p/mm (1p/mm 为每毫米中包含光栅线对)的无底衬自支撑光栅 ,X 射线 CCD 型号为 SX-TE/CCD-1024TKB .透射光栅谱仪谱分辨为 0.3~mm .

打靶激光参量如下:激光能量为 75.6J 激光波长为  $0.35~\mu m$  激光脉宽为 704 ps 激光聚焦在腔金箔靶注入口处.

# 3 实验数据处理与结果

透射光栅谱仪测得的金箔背侧 X 射线能谱原始记录如图 3 所示. 其中竖直方向为透射光栅色散方向,中间最强处为透射光栅零级衍射像,水平方向为空间分辨方向. 为了与空间积分的亚千 X 射线能谱仪测量的金箔背侧 X 射线能谱结果进行比较,将图 3 中结果沿空间分辨方向积分并取平均后得到透射光栅谱仪测得的金箔背侧 X 射线能谱的原始谱曲线如图 4 所示. 为了得到真实的 X 射线能谱,需要对图 4 的原始谱进行解谱处理.

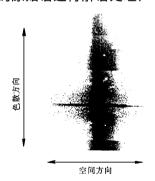


图 3 X 射线 CCD 记录能谱图像

### 3.1 透射光栅谱仪测谱解谱方法

X 射线源发射的连续谱 X 射线经透射光栅衍射后 ,在远场形成 X 射线衍射图像. 波长为  $\lambda_{m,i}$  的 X 射线的 m 级衍射光在远场的记录面上的位置  $y_i$  由光栅方程决定 ,

$$y_i = \frac{mD\lambda_{m,i}}{d}$$
  $m = 1, 2, ..., N$ , (1)

其中 d 为透射光栅周期 D 为透射光栅到记录面的

垂直距离.

用  $I_s$  表示等离子体 X 射线源在单位立体角内发射的在  $\Omega$  方向的某波长处单位波长区间的 X 射线光子数,即 X 射线源空间时间积分源强; $\eta_m(\lambda_{m,i})$ 为透射光栅对波长为  $\lambda_{m,i}$ 的 X 射线的 m 级衍射效率.  $\eta_Q(\lambda_{m,i})$ 为 X 射线 CCD 的量子效率, $E_p(\lambda_{m,i})$ 是波长为  $\lambda_{m,i}$ 的 X 射线单个光子能量. 对 X 射线 CCD 的各像素的计数沿空间分辨方向取平均得到,

$$N_{m}(y_{i},\lambda_{m,i}) = NABm^{-1}\eta_{m}(\lambda_{m,i})$$

$$\cdot \eta_{Q}(\lambda_{m,i})E_{1}(\lambda_{m,i})I_{s}, (2)$$

式中 A 为与透射光栅谱仪的几何结构有关的常量, B 为与 X 射线 CCD 的参量有关的常量.

如果在 X 射线 CCD 灵敏面上  $y_i$  处的透射光栅一级衍射 X 射线产生的计数为  $N_1(y_i,\lambda_1,i)$  ,则该波长的 X 射线的 m 级衍射 X 射线位于记录面上  $y_f(y_j=my_i)$ 处 ,其产生的 X 射线 CCD 的计数  $N_m(y_i,\lambda_m)$ 由下式决定:

$$N_{m}(y_{j},\lambda_{m,j}) = \frac{\eta_{m}(\lambda_{m,j})}{m\eta_{1}(\lambda_{1,i})}N_{1}(y_{i},\lambda_{1,i}), (3)$$

式中  $\lambda_{m,j} = \lambda_{1,j}$ .

由于 X 射线 CCD 是线性响应系统 ,在同一个 CCD 像素上透射光栅不同衍射级 X 射线产生的计数在线性响应范围内可直接相加. 在透射光栅谱仪的 X 射线 CCD 记录面上  $y_i$  处的某像素的总计数表示为

$$N(y_i) = \sum_{m=1}^{M} N_m(y_i \lambda_{m,i}).$$
 (4)

在解谱处理时,首先选取透射光栅谱仪记录面上零级衍射峰作为色散方向 y 轴的零点,读取各  $y_i$  处的像素的计数  $N(y_i)$ . 取光栅能测量的 X 射线最短波长为  $\lambda_0$  ,该波长 X 射线的一级衍射位于记录面上  $y_0$  处,在  $y_0 \leqslant y_i < 2y_0$  范围内像素的计数只考虑一级衍射;对于(m-1) $y_0 \leqslant y_i < my_0$  范围内的CCD 的像素计数  $N(y_i)$ 考虑是由透射光栅 1 至(m-1)级衍射 X 射线产生的,其中的 2 至(m-1)级衍射 X 射线产生的,其中的 2 至(m-1)级衍射 X 射线产生的计数可由前面求得的  $y_i < (m-1)y_0$  范围的一级衍射 X 射线计数和(3)式得到,再通过(4)式可得到在(m-1) $y_0 \leqslant y_i < my_0$  范围内一级衍射 X 射线产生的计数. 将上述过程得到的全范围求得的一级衍射 X 射线计数代入(2)式,即得到X 射线源真实谱  $I_s$ .

解谱处理中,透射光栅衍射效率采用实验标定

结果<sup>6</sup>] [X] 射线 [CCD] 对 X] 射线响应的量子效率曲线采用仪器说明书中给出结果<sup>7</sup>] ,并考虑了碳沾污对量子效率的影响。

### 3.2 金箔背侧 X 射线能谱测量结果

由透射光栅谱仪测得的金箔背侧 X 射线能谱原始谱结果如图 4 所示 采用上述透射光栅谱仪解谱方法和透射光栅衍射效率及 X 射线 CCD 响应特性 ,得到金箔背侧 X 射线能谱的真实结果如图 5 所示 图 5

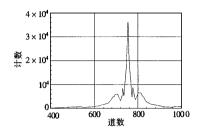


图 4 金箔背侧 X 射线谱原始谱曲线

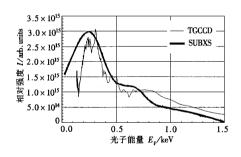


图 5 金箔背侧 X 射线能谱测量结果比较

中同时给出了由亚千 X 射线能谱仪测量给出的金箔 背侧能谱结果. 从图 5 中看到透射光栅谱仪测量结果 与亚千 X 射线能谱仪测量结果在大部分能区基本一致 表明用透射光栅谱仪测量的结果是可靠的. 在低能区(低于 150 eV)和较高能区(大于 1200 eV)透射光栅谱仪测量结果与亚千 X 射线能谱仪测量结果存在一定差异 这主要是由于该两能区基本超出了亚千 X 射线能谱仪系统的响应范围 亚千 X 射线能谱仪测量的结果本身存在较大误差.

# 4 讨 论

图 6 中给出了透射光栅谱仪测量的金箔背侧 X

射线能谱与平衡普朗克发射谱的相对比较 ,从图 6 中看到 ,金箔背侧 X 射线能谱明显偏离平衡发射 X 射线谱 ,具有明显的带谱特征 ,在 200—300 eV 能区存在明显的金等离子体 O 带谱发射 ,在 500—800 eV 能区存在明显的金等离子体 N 带谱发射.

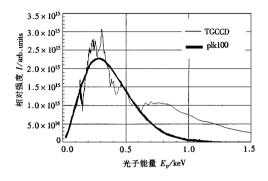


图 6 金箔背侧 X 射线能谱测量结果与普朗克谱比较 普朗克谱温度为  $100~{\rm eV}$ 

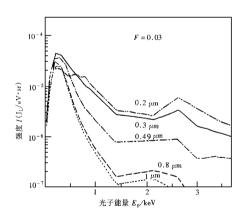


图 7 不同厚度金箔靶背侧 X 射线能谱计算结果比较

作为比较 在图 7 中给出了法国 Limeil 实验室用理论程序计算的 0.35 μm 激光辐照不同厚度的金箔产生的背侧 X 射线能谱结果 51. 从图 7 中看到 ,在金箔厚度为 0.2 μm 时 ,金箔背侧 X 射线能谱也具有明显的带谱结构 ,而且带谱所处的能区范围与我们实验测量结果所在能区范围基本符合.同时 ,从图 7 中进一步看到 随着金箔厚度的增加 ,带谱结构逐渐减少 特别是在 X 射线亚千能区逐步接近平衡发射 X 射线能谱

## 5 结 论

利用引进的 X 射线 CCD 配上透射光栅 ,建立 了透射光栅谱仪诊断技术 ,测量了  $0.35~\mu m$  激光辐 照金箔靶产生的背侧 X 射线能谱 ,并与亚千 X 射线能谱仪测量结果进行了比较 ,获得了比较一致的实验结果 表明该透射光栅谱仪系统测量结果是可靠的 ,可进一步应用于辐射输运的 X 射线能谱改造及其他物理研究的实验中.同时 ,从透射光栅谱仪测量的  $0.17~\mu m$  厚度的金箔背侧 X 射线能谱明显偏  $0.17~\mu m$  厚度的金箔背侧发射的 X 射线能谱明显偏

离平衡辐射谱 具有明显的带谱结构.

由于透射光栅衍射效率还是相对标定结果,本文未能给出绝对强度的 X 射线能谱测量结果,进一步的工作将是开展透射光栅衍射效率和 X 射线 CCD 响应的绝对标定,以便用该透射光栅谱仪测量得到绝对强度的 X 射线能谱;同时进一步开展不同厚度金箔靶背侧 X 射线能谱的实验研究工作,并与相应理论计算结果进行比对,以校验理论计算程序及参量

作者对星光激光装置全体运行人员的良好合作和制靶 人员提供了实验用靶表示感谢。

- [1] J. Edwards , V. Barrow et al., Europhys. Lett., 11(7) 1990),631.
- [2] T. Mochizuki K. Mima et al. , Phys. Rev. , A36(1987) 3279.
- [3] 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].
- [4] H. Nishimura , H. Takabe et al. , Phys. Rev. , A43(1991), 3073
- [5] D. Babonneau J. L. Bocher et al., Laser and Particle Beam, 9 (1991) 527.
- [6] J.M. Yang ,R. Q. Yi *et al.* ,*Acta Physca Sinica* ,**47**(1998), 613 in Chinese I 杨家敏、易荣清等 ,物理学报 ,**47**(1998), 613].
- [7] Princeton Instruments Catalog of High Performance Digital CCD Cameras (January ,1997). p. 78.

# MEASUREMENT OF X-RAY SPECTRUM FROM THE BACK OF A GOLD FOIL\*

YANG JIA-MIN DING YAO-NAN SUN KE-XU CHENG JIN-XIU JIANG SHAO-EN ZHENG ZHI-JIAN ZHANG WEN-HAI (Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics,

Mianyang P.O. Box 919-216 Mianyang 621900 ,China )

(Received 3 June 1998; revised manuscript received 17 July 1999)

#### Abstract

Soft-X-ray spectrum from the back of a gold foil ,which was irradiated by 0.35  $\mu$ m laser of "XingGuang" Facility , has been measured by a transmission grating spectrometer. The measured result was compared with that measured with a subkiloelectronvolt-X-ray spectrometer and the two measured spectra were in good agreement. The experimental results show that the X-ray spectrum from the back of 0.17  $\mu$ m thick gold foil mainly consists of N-band and O-band emission of gold and apparently differs from the Planck emission spectrum.

PACC: 4280F; 4272; 5250J; 5270

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 863-416-3.3.1).