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 张文海

(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 μm 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; 5250J; 5270

1 引 言

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.

2 实 验

实验是在星光激光装置上进行的,实验用腔金

*国家高技术研究发展计划(批准号 863-416-3.3.1)资助的课题.

箔靶结构如图 1 所示. 腔金箔靶为 $Ø400 \ \mu m$ 斜金柱 腔加上金箔柱腔底构成,其中激光注入孔直径为 $300 \ \mu m$ 柱腔底为 $20 \ \mu m$ 厚度的金板,在金板中间开 $350 \ \mu m \times 100 \ \mu m$ 的方孔,并在方孔上贴 $0.17 \ \mu m$ 厚 的金箔,并衬上 $0.17 \ \mu m$ 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.







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 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 μm,透射光栅狭缝宽度为 100 μm.透射 光栅为 1000 1 p/mn(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 nm.

打靶激光参量如下 激光能量为 75.6J ,激光波 长为 0.35 μm ,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 Ω 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 ,

$$N_m(y_i , \lambda_m , i) = NABm^{-1} \eta_m(\lambda_m , i)$$

· $\eta_Q(\lambda_{m,i})E_p(\lambda_{m,i})I_s$, (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 $y_j(y_j = my_i)$ 处,其产生的 X 射线 CCD 的计数 $N_m(y_i, \lambda_{mi})$ 由下式决定:

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

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 λ_0 ,该波长 X 射线的一级衍射位于记录面 上 y₀ 处,在 y₀ \leq y_i < 2y₀ 范围内像素的计数只考虑 一级衍射;对于(m - 1) y₀ \leq y_i < my₀ 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 射线产生的计数可由前面求得的 y_i < (m - 1) y₀ 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) y₀ \leq y_i < my₀ 范围内-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^[6] ;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^[7],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 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^[5]. 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 μ 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 μ m 厚度的金箔背侧 X 射线能谱结果看 , 0.17 μ 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 I 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 Physica Sinica*, **47(** 1998), 613(in Chinese L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 μ 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 μ 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

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 863-416-3.3.1).