

# 激光等离子体软 X 射线辐射能谱 时间分辨测量研究\*

唐永建 郑志坚 何海恩 冯 杰 丁跃南

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

苏永刚 傅绍军 洪文麟 陶晓明

(中国科学技术大学同步辐射实验室, 合肥 230026)

## 提 要

利用(国内最近研制成功的)带聚酰亚胺膜底衬的金透射光栅与软 X 射线条纹相机相配合,(在 LF11\* 激光装置上)使用波长为  $0.53\mu\text{m}$  的激光打靶, 测量了平面 Au 靶软 X 射线时间分辨能谱。测量结果观察到了金等离子体的 O 带辐射强度随时间增加的现象。文章计算了光栅的衍射效率, 并讨论了影响测量谱的几个关键因素。

关键词: 等离子体, 软 X 射线辐射谱, 透射光栅条纹谱仪。

## 一、引 言

高功率短脉冲激光产生的等离子体是短寿命的, 时间变化范围一般只有几十 ps 到几千 ps, 变化十分激烈和迅速, 所以, 研究动态等离子体的时间分辨能谱就显得十分重要。通过分析等离子体中发射的 X 射线能谱, 也可以了解到激光等离子体的许多性质。

广泛用于研究快变激光等离子体过程的时间分辨 X 射线能谱测量仪器有两类: 一类是多道分析器, 又叫 Dante 谱仪, 目前已广泛地用于惯性约束聚变实验中<sup>[1]</sup>。但用 Dante 谱仪研究快变过程的等离子体辐射谱存在着一定的误差。为了弥补 Dante 谱仪的不足, 80 年代初期发展起来的一种新的测量技术——无支撑透射光栅条纹谱仪(TGSS)<sup>[2]</sup>, 其主要优点是能量分辨比较好, 使用方便、灵活、效率高, 因此, 世界各大实验室都用它来进行惯性约束聚变和 X 射线激光的实验诊断。

自 1982 年以来根据惯性约束聚变实验研究的需要曾设想研制无支撑透射光栅谱仪, 但很长一段时期内因工艺条件不能满足制做光栅的精度要求, 所以迟迟没有研制成功。1989 年 5 月在中国科技大学同步辐射实验室的合作下研制成功了  $853\text{ l/mm}$  的带聚酰亚胺膜的金透射光栅, 并于同年 7 月在 LF12\* 激光打靶实验中用微通道板观察了光栅的软 X 射线波段的衍射现象。11 月又在 LF11\* 装置上与软 X 射线条纹相机配合成功地观察到了用  $2\omega_0$  (波长  $0.53\mu\text{m}$ ), 激光打击平面金靶时的软 X 光能量时间分辨谱。并获得了金等离子体的 O 带辐射强度随时间增加而增强的现象。

收稿日期: 1990 年 3 月 27 日; 收到修改稿日期: 1990 年 11 月 14 日

\* 中国工程物理研究院科学基金资助的课题。

## 二、实验原理和仪器安排

当激光脉冲照射平面金靶时, 因激光的功率密度很大(约  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>), 很快通过多光子作用过程使靶中物质电离形成等离子体损失能量 这些等离子体又通过韧致辐射( $f-f$ ), 复合辐射( $f-b$ )、线辐射( $b-b$ )等形式释放能量, 形成一个快变(ns 量级)的 X 光源。利用具有软 X 光谱色散能力的透射光栅作为色散元件, 将由激光等离子体中发射的 X 光谱色散开来, 然后, 在适当的位置设置时间分辨能力很强( $<30$  ps)的软 X 射线条纹相机对这些光谱进行监测, 从而获取一幅具有时间分辨的能谱图象。其原理如图 1 所示。根据布喇格衍射条件知

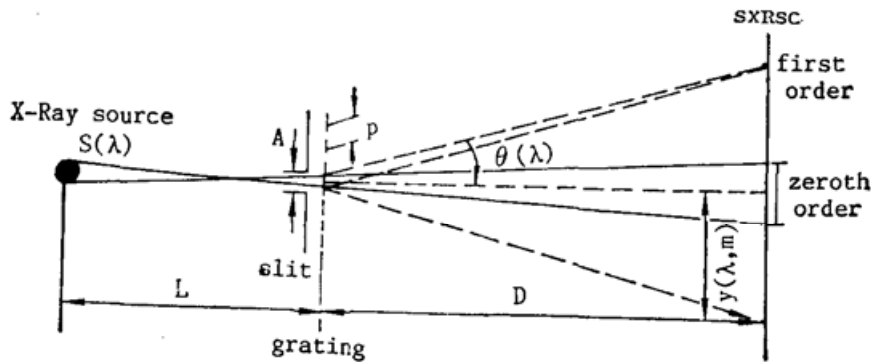


Fig 1. Diffraction diagram of a TGSS

$$\sin \theta = n\lambda/d, \quad (1)$$

式中  $d$  为光栅常数,  $m$  为衍散级,  $\lambda$  为波长;  $\theta$  为衍射角。考虑到探测面到光栅的距离  $D$  远大于光栅的有效面积, 从(1)式可导出

$$y = m\lambda D/d, \quad (2)$$

由此可得探测面的线色散关系为

$$\frac{dy}{d\lambda} = \frac{mD}{d}. \quad (3)$$

考虑到谱线分辨要受到 X 光源  $S(\lambda)$  和狭缝宽度  $A$  的限制, 所以, 光谱仪能量分辨的表达式为

$$\Delta\lambda_s = \frac{(S+A)(d/L) + (dA/D)}{m}. \quad (4)$$

式中  $L$  为 X 光源到光栅的距离,  $D$  为光栅到相机探测面的距离。根据(2)、(4)式可得 X 光能谱的测量范围

$$\Delta\lambda_s < \lambda < (dy_{\max}/mD), \quad (5)$$

式中  $y_{\max}$  为探测平面的最大距离。

图 2 是实验布置图, 图中激光经纬仪、反射镜用于靶、狭缝、光栅、软 X 射线条纹相机狭缝的瞄准; 象增强器、分析器、图形显示器是条纹相机的图象获取和数据分析系统。光源到光栅和光栅到软 X 射线条纹相机\*探测面的距离分别为 30 cm、63.5 cm, 狭缝宽度  $A$  为

\* 1988 年由中国科学院西安光学精密机械研究所研制而成, 其能谱响应范围: 100 eV~10 keV, 时间分辨  $<30$  ps。

120  $\mu\text{m}$ , 透射光栅金线厚 0.5  $\mu\text{m}$ , 底衬膜厚 0.5  $\mu\text{m}$ , 光栅常数为 1.17  $\mu\text{m}$ , 线空比  $\sim 1:1$ 。图 3 是光栅的电子显微镜扫描照片。

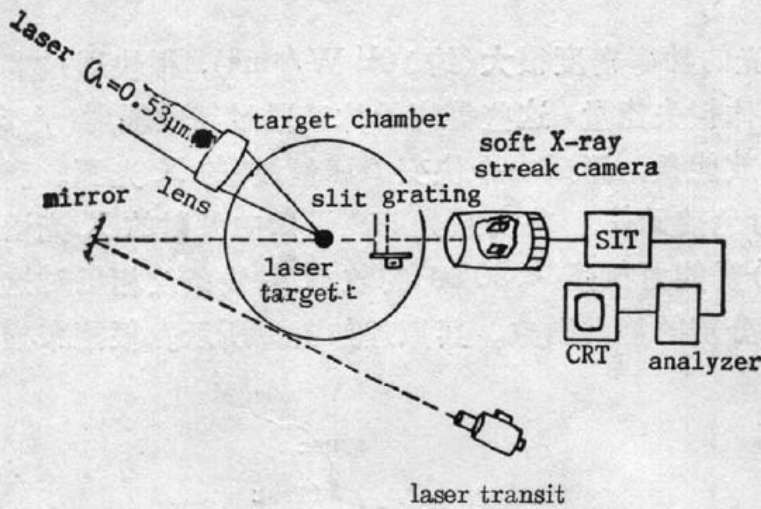


Fig. 2 Schematic of the experimental setup

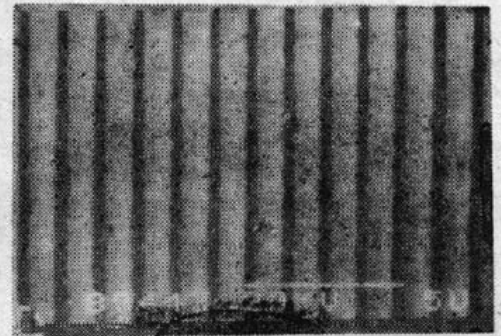


Fig. 3 SEM micrographs of a free-standing gold transmission grating

图 4 是无底衬膜的光栅衍射效率, 该效率采用了 Schnopper 的计算模型<sup>[3, 6]</sup>, 其中金的光学常数选用了 Lindu 等人的结果<sup>[4]</sup>。

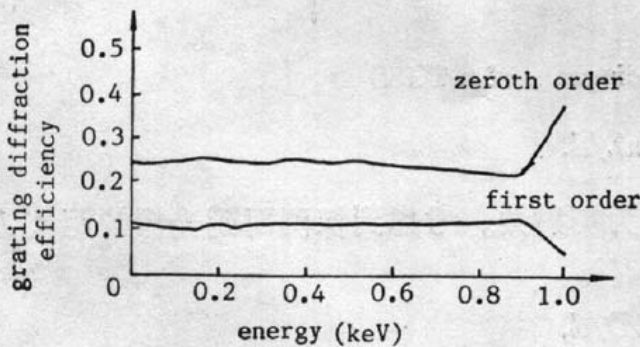


Fig. 4 Transmission grating diffraction efficiency (calculated)

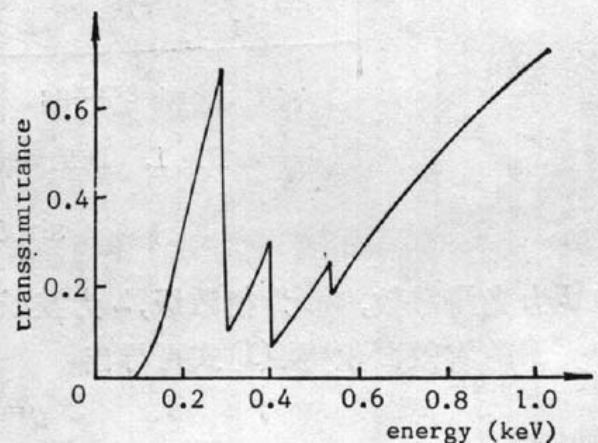


Fig. 5 Transmittance of a polyimide membrane with 0.5 micron

在有聚酰亚胺膜底衬的情况下, 简单地忽略底衬膜的 X 光折射现象, 于是得到光栅效率相当于无底衬时的光栅效率与底衬膜的透射率相乘。图 5 是聚酰亚胺( $\text{N}_2\text{O}_{22}\text{O}_5\text{H}_{10}$ )膜的透射率曲线。

### 三、实验结果

实验用  $2\omega_0$  激光打平面 Au 靶(靶厚 20  $\mu\text{m}$ ); 激光脉冲半宽度为 679 ps, 靶面最大功率密度为  $5.8 \times 10^{14} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。图 6 是测量的典型结果。从图 6 中可以看出金等离子体 N 带( $\sim 16.9 \text{\AA}$ )、O 带( $\sim 54 \text{\AA}$ )的辐射峰, 而 M 带辐射由于能量分辨的影响已被淹没在零级中。另外, 根据实验条件, 本文所获得的谱区范围为  $8.3 \text{\AA} \sim 118.0 \text{\AA}$ , 图 6 的结果是时间从 320 ps  $\sim$  450 ps 的积分谱\*。

\* 未经条纹相机能量响应和光栅底衬膜吸收的修正。

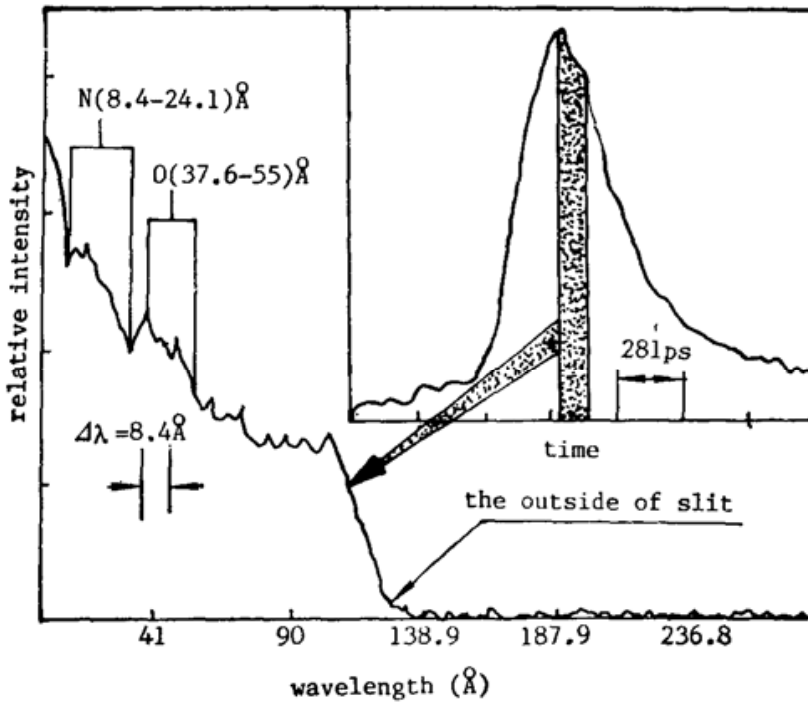


Fig.6 X-ray spectra for a gold planar target with  $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$  laser in  $t = 100\text{ps}$

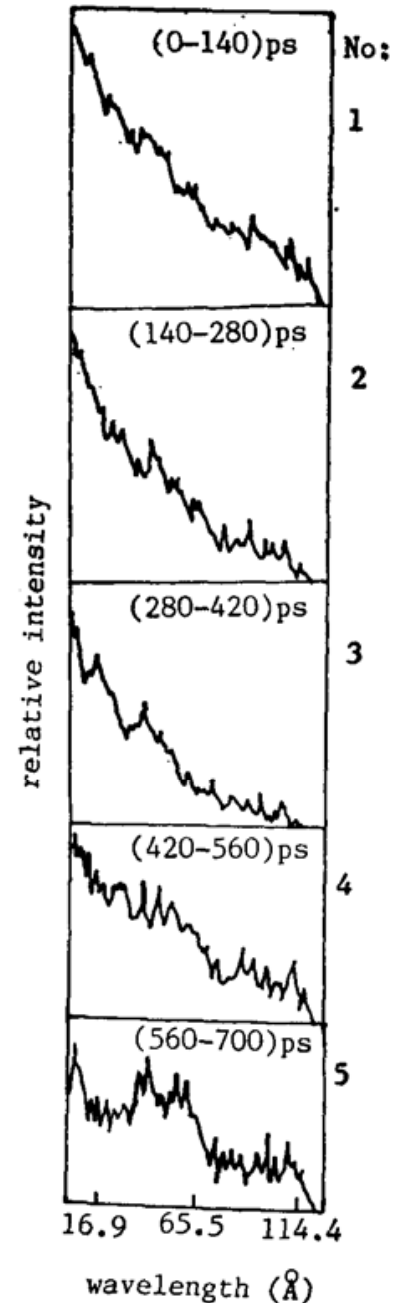


Fig.7 The time evolution of emission spectra

根据条纹象,作者也曾对色散谱的全部时间过程进行了研究,图7是其处理结果。图7中的每一个谱分布,时间间隔为140.6 ps,序号1~5表示时间的增加方向。从图中可以明显地看到,随着时间的增加O带区域的X光辐射强度也在相对增加,而M带和N带的辐射强度却随时间增加而减弱。这说明激光打靶初期等离子体处于非平衡态过程,其辐射形式大多以线辐射为主,此时的光子能量偏高,相对来讲,M带、N带和更短波长的X光比长波长X射线光子数要多一些。当弛豫一段时间后等离子体区域不断扩大,并已不再象初始阶段属于光性薄物质,等离子体逐渐趋于热平衡状态。因此,低能X光的成分变得越来越多,整个能谱变软。这个现象也可以从Tsakiris等人的工作<sup>[5]</sup>中看到,尽管Tsakiris等人打靶用的激光波长为0.44  $\mu\text{m}$ ,而本文实验所用的激光波长为0.53  $\mu\text{m}$ ,但从谱形的时间变化关系上看,可以认为这种现象是存在的。另外,与Tsakiris结果的差别还在于靶形不同,一个是球形腔靶,一个是平面靶。

## 四、讨 论

### 1. 散射光影响

在打靶过程中,除了经过狭缝和光栅的 X 光外,还有其它光存在,这些光可能被条纹相机直接记录,形成影响测量结果的背景光,图 8 是在无光栅时测量的狭缝像(这个结果相当于有光栅时的零级衍射像)。由于条纹相机的能量范围限制,能够记录到的散射光也只能是远紫外以下的短波长光。散射光的存在给谱回推工作带来了困难,所以,实验中应尽可能避免和消除影响。



Fig. 8 The background light

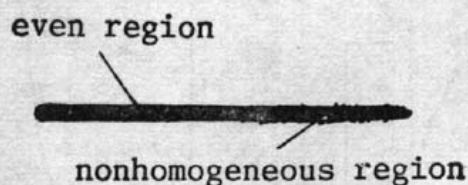


Fig. 9 The slit image from streak camera photocathode

### 2. 相机狭缝均匀性问题

条纹相机狭缝均匀性有两种情况:一种是狭缝宽窄呈波浪形的起伏;一种是系统性的不均匀。所谓系统性的不均匀是指缝的宽窄一部分较均匀,一部分较差。本文测量中遇到的是第二种情况,图 9 是条纹相机静态情况下的测量结果,表明这个狭缝是系统不均匀的。为了克服这种影响,可以在测量时把光栅的零级衍射位置设在均匀区,另外,也可以更换相机光阴极。

### 3. 能量响应

能量响应问题分三个部分,即条纹相机响应、光栅效率和底衬膜的透射率。众所周知,能量响应是测量结果进行谱回推的关键,设  $F(\lambda)$  为真实辐射能谱,  $F_G(y)$  为位置  $y$  处的测量值,  $G(y, \lambda)$  为能量响应和几何影响因子,于是

$$F_G(y) = \int_0^{\infty} F(\lambda) G(y, \lambda) d\lambda, \quad (6)$$

$$G(y, \lambda) = \sum_m \eta_m(\lambda) S_G(\lambda) T(\lambda) \delta \left[ \left( \frac{d}{mD} y \right) - \lambda \right] C, \quad (7)$$

式中  $\eta_m$  为光栅效率;  $S_G$  为条纹相机响应函数<sup>[4]</sup>;  $T$  为底衬膜透射率(见图 5);  $\delta$  为布喇格衍射条件;  $C$  为散射光修正因子。从图 4 的结果可以看出,光栅的一级衍射在所列谱区中占 10% 以上,图 4 中没有画出二级衍射效率,但作者曾计算得各能点的二级衍射效率  $< 0.1\%$ 。因此,在实验中可以不考虑二级衍射以上的修正。

显然,能量响应在谱迭代过程中至关重要,因此有必要对各量进行准确测量和严格计算。目前,这一工作正在进行中。

衷心感谢 LF11\* 激光装置的全体运行值班人员, 他们为打靶实验付出了辛勤劳动。

### 参 考 文 献

- [1] Laser Program Annual Report-79 Vol. 2, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-50021-79, (1979), 5-2.
- [2] N. M. Coglio *et al.*; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 2 (15 Jan), 318.
- [3] Schnopper *et al.*; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 4 (Apr), 1088.
- [4] I. Lindu *et al.*; «AIP Conference Proceedings Low Energy X-ray Diagnostics Monterey, Calif., June 8~10, 1981», (American Institute of Physics, New York, 1981), No. 75, 355.
- [5] G. D. Tsakiris *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1988, **A38**, No. 11 (1 Dec), 5766.
- [6] 李跃林等; «光学学报», 1989, **9**, No. 6 (Jun), 1~7.

## Time-resolved soft X-ray spectra measurement of laser-produced plasmas

TANG YONGJIAN, ZHENG ZHIJIAN, HE HAIJEN, FENG JIE AND DING YAONAN  
(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610008)

SU YONGGANG, FU SHAOJUN, HONG YILIN AND TAO XIAOMING  
(Hefei National Synchrotron Radiation Laboratory (HNSYRL) University  
of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(Received 27 March 1990; revised 14 November 1990)

### Abstract

Time-resolved soft X-ray spectra measurement has been developed for studying laser-produced plasmas by using a gold transmission grating (TG) coupled to a soft X-ray streak camera. Recently we fabricated the TG with a line density of about 853 l/mm on a substrate of a 0.5 micron thick polyimide membrane. Timeresolved spectra of gold (20 $\mu$ m in thickness) planar targets were obtained. The planar targets were irradiated with 680 ps laser pulses ( $\lambda=0.53\ \mu$ m) from the LF11\* Nd: glass laser system. The emission intensity with temporal variation for O band from gold plasmas was observed.

**Key words:** plasma, X-ray spectrum, transmission-grating streak spectrometer.