

金属等离子体 Z-Pinch 软 X 射线源上 X 射线能谱与 X 射线能量的测量

李永安 王大椿

(北京师范大学低能核物理所, 北京市辐射中心, 射线束、
材料工程开放实验室, 北京 100875)

摘要 本文介绍了国内首次利用针孔透射光栅谱仪对金属等离子体 Z 箍缩 X 射线源能谱的测量结果及数据处理方法。同时用量热计对该源的单脉冲 X 射线能量进行了测量并讨论了其结果。

关键词: 金属等离子体; 软 X 射线; 针孔透射光栅; 量热计

1 利用透射光栅仪测金属等离子体 Z 箍缩 X 射线源能谱

金属等离子体 Z 箍缩 X 射线源能有效地将电能转换成 X 射线能量, 尤其是对 X 光刻有效的软 X 射线 (0.7~1.9keV) 能量。X 射线斑点直径约为 0.1mm, 斑点跳动范围约 2~3mm。由于条件的限制, 我们选择了针孔透射光栅谱仪 (上海光机所提供) 测量金属等离子体 Z 箍缩 X 射线源能谱。这属于国内首次把针孔透射光栅^[1]用于金属等离子体 Z 箍缩 X 射线源能谱测量。针孔透射光栅谱仪和晶体谱仪、掠入射谱仪相比, 它具有更宽的光谱范围, 特别是在实验操作上又克服了准直调整的困难, 其缺点是分辨率较差^[2]。

我们使用的透射光栅是由西德 Heidenhain 公司制作的无支撑型针孔透射光栅, 材料为金。光栅有两种: 光栅 A, 线周期为 1 μ m, 针孔直径 Φ 50 μ m。光栅 B, 线周期为 0.5 μ m, 针孔直径 Φ 25 μ m。

1.1 实验测量布局

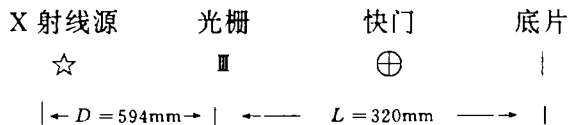


图1 透射光栅谱仪实验测量布局

所有器件均处于真空中。利用自动水准仪调整 X 射线源、光栅、底片三者在水平面上同

轴，光栅平面与该轴垂直，光栅细丝和水平面垂直。

根据光栅衍射成像原理（如图 2），在像平面上沿垂直于光栅细丝排列方向由于光栅的衍射效应给出谱信息。沿光栅细丝平行方向则由于针孔成像给出线源的一维空间分布。光栅的色散由光栅方程

$$d \sin \theta = m \lambda (\text{正入射}) \quad (1)$$

所决定。 d 是光栅线周期， m 是衍射级次，是相应波长。射线源的源大小限制最短波长。而在长波段则受到接收灵敏度和金反常色散造成的衍射效率起伏等影响，光栅的实际摄谱范围 $< 300 \text{ \AA}$ 。

在小角度近似下， $\sin \theta = x/L$ 。 x 是从底片上零级中心到光谱分析点距离。 L 为光栅到像平面的垂直距离。结合方程（1）得到一级（ $m = 1$ ）线色散为：

$$dx/d\lambda = L/d \quad (2)$$

光栅的光谱分辨本领受衍射效应和射线源的尺度两方面的限制。由源所限制的光谱分辨为：

$$\Delta \lambda_s = (dx/d\lambda)^{-1} A \cdot S_T \quad (3)$$

式中 S_T 是衍射方向 X 射线源宽度。

$$A = L/D \quad (4)$$

是像的放大率。取 $S_T = 100 \mu\text{m}$ ，则有：

对于光栅 A， $\Delta \lambda_s$ 经计算为 1.68 \AA ；

对于光栅 B， $\Delta \lambda_s$ 经计算为 0.84 \AA 。

光栅有限条数造成的衍射分辨极限为

$$\Delta \lambda_d = \lambda/M \quad (5)$$

M 是孔径范围内光栅细丝的线条数，光栅 A 的 M 为 50，光栅 B 的 M 为 50。在 2 \AA 处，光栅 A 的 $\Delta \lambda_d = 0.04 \text{ \AA}$ 。在 1 \AA 处，光栅 B 的 $\Delta \lambda_d = 0.02 \text{ \AA}$ 。所以光栅 A 的测谱范围为 $1.7 \text{ \AA} \sim 300 \text{ \AA}$ 。光栅 B 的测谱范围为 $0.9 \text{ \AA} \sim 300 \text{ \AA}$ 。

1.2 冲洗底片

摄谱底片用医用 5F 胶片（上海第一感光胶片厂产）和无保护膜 X 光胶引进（上海光机所在上海第一感光胶片厂独家定做）两种。每张底片放电曝光一次。

显影液为上海冠龙照相材料商店产 D-76 显影粉配制。定影液为上海冠龙照相材料商店产酸性定影粉配制。

对于 5F 胶片，显影温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，显影时间 15 分钟 ± 5 秒，定影温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，定影时间 10 分钟 ± 5 秒。对于无保护膜 X 光胶片，显影温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，显影时间 5 分钟，定影温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，定影时间 5 分钟。根据经验可知，定影时间大于 3 分钟后，定影时间长短对底片黑度的影响很小^[3]。

1.3 底片分析处理

(1) 拍摄出的典型 X 射线底片见照片（图 3）。所用光栅为 A（线周期为 $1 \mu\text{m}$ ，针孔直径 $\phi 50 \mu\text{m}$ ），底片为 5F 胶片，放电电压为 20 kV 。

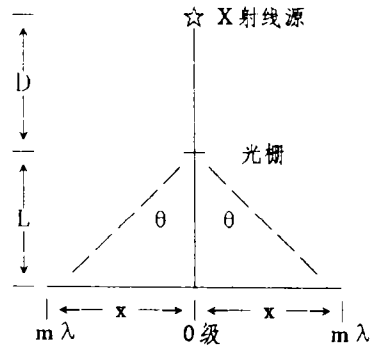


图 2 衍射成像原理图

(2) 利用北师大分析测试中心的微机图像处理系统对底片进行一次成像, 然后分析其灰度分布。灰度范围0~255, 无底片时, 光源本底灰度误差小于1。对于无谱的底片, 灰度值最大相差为8。像元对应尺寸 $25.0\mu\text{m} \times 25.0\mu\text{m}$ 。利用公式(1), 在光谱衍射方向, 一个像元对应 0.78\AA 。



图3 利用透射光栅谱仪测得的 X 光源衍射谱底片

(3) 利用自编程序对以 TGA 格式存储的图像检索, 每个像元对应的位置坐标为 (X_i, Y_i) , X 方向与光谱衍射方向平行, Y 方向与光谱衍射方向垂直。以寻找最大值分布中心的方式找出最黑点(衍射零级黑度分布的中心)的对应的像元位置 (X_0, Y_0) , 再以对称的两个一级衍射峰值的坐标 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 连线中分点的坐标对 (X_0, Y_0) 进行修正。以该点中心沿光谱衍射方向取一条直线上的像元灰度值可作图4。该图以 $X = X_0$ 为轴左右对称。

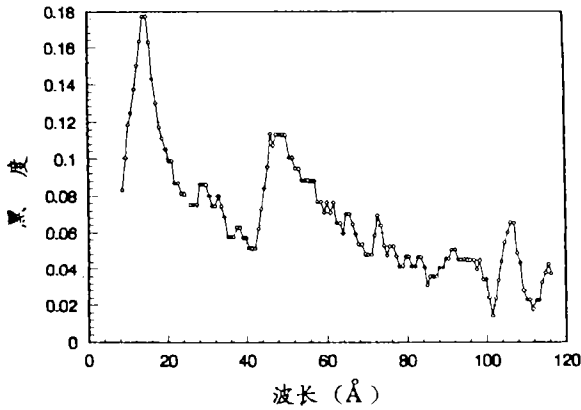


图4 透射光栅谱仪拍摄的 X 射线底片沿其衍射方向的像元灰度分布

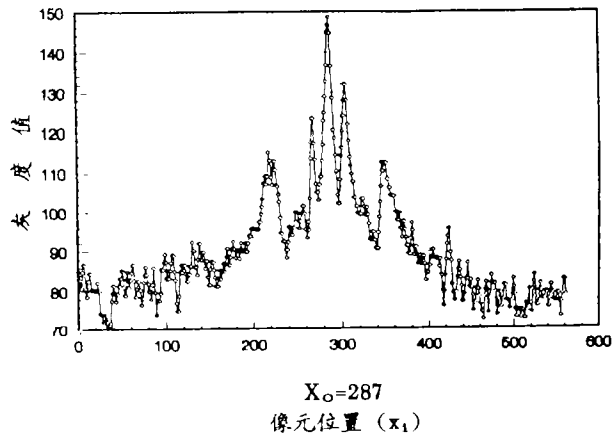


图5 透射光栅谱仪的测得的 X 光源发射的 X 射线谱(黑度值)

(4) 以 (X_0, Y_0) 为坐标原点, 取图 4 的右侧一半, 并略去谱图的零级(因零级相当复杂, 无法作强度标定)把 X_i 乘以相应系数 0.78, 使 x 轴的单位变为 \AA 。把相应像元的灰度转换为黑度^[4] $D = \log(T_0/T)$, 其中 T_0 为灰度极大值255减 X 射线底片的本底灰度, T 为灰度极大值减相应像元的灰度。则图4变为初级谱图(图5)。根据上海光机所的数据^[2]可知二级衍射相对于一级衍射效率很低(小于8%), 可略去不计。由图5可知, 该 X 光谱有两个峰带, 第一个峰带值在 14.0\AA , 半宽度约 13\AA 。第二个峰带峰值在 52\AA , 半宽度约 25\AA 。

(5) 利用自己做的底片标定(图6)使黑度转换为相对强度, 图6中 I 是 X 射线总计数。从而得到金属等离子体 Z-Pinch 软 X 射线的能谱分布图(图7)。

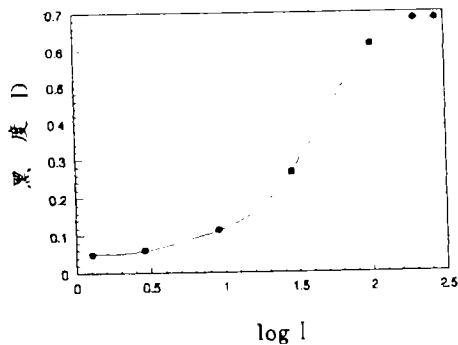


图6 底片标定曲线

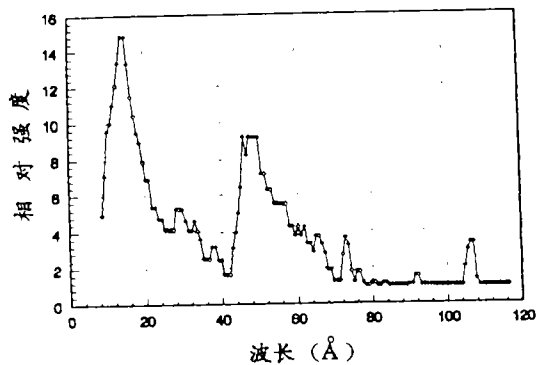


图7 透射光栅谱仪测得的 X 光源发射的 X 射线谱 (相对强度值)

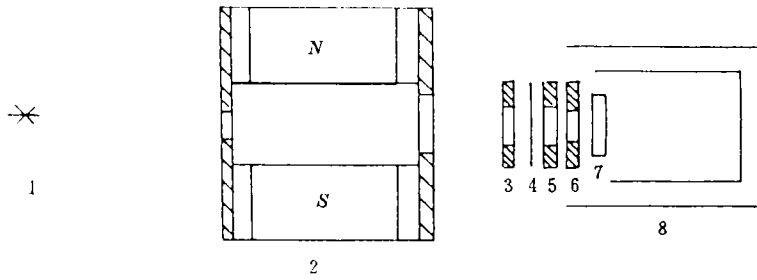
由于金属等离子体箍缩的不稳定性, 相同的放电电压可能产生不同的等离子体的焦点温度和等离子体密度。等离子体焦点发射 X 射线能谱和强度会有所差别。此外, 在软 X 射线能区, 目前, 国内还没有已知强度的单色标准源, 不能对国产 X 胶片进行严格的标定。因此, 目前我们所测量的金属等离子体 X 射线源的能谱只能是定性的或半定量的。

2 金属等离子体 X 射线源上的单脉冲 X 射线能量的测量

根据透射光栅谱仪测的金属等离子体 X 光源的光谱特性可知, 除了红外光、可见光、紫外光和真空紫外辐射外在软 X 射线能区主要包含 14 \AA 左右和 52 \AA 左右的软 X 射线。波长大于 20 \AA 的 X 射线, 很容易被光刻掩膜的底衬所吸收, 如 $2 \mu\text{m}$ 厚的 Si_3N_4 底衬膜可把波长大于 27 \AA 的 X 射线衰减 4 个量级以上; 可把波长 14 \AA 的 X 射线衰减到只剩 20%。对亚微米 X 射线光刻而言, 真正起作用的是 $7 \sim 19 \text{ \AA}$ 左右的 X 射线, 它是等离子体中不同电离度的 Fe 元素发射的 L 线系 (或称为 L 线系发射带) 的总和^[5]。我们采用上海光机所研制的量热计^[6]测得了金属等离子体 X 射线源发射的各种辐射能量。该量热计是在 PT-1 型激光能量计的基础上设计加工而成的, 上海光机所的激光打靶装置上曾用它来监测打靶过程的 X 射线产额。该量热计用钽片作吸收体。钽片具有较小的热容和较高的热导, 而表面辐射损失 (主要是散射) 小, 因而有较高的灵敏度。该量热计采用电定标方法可测得其整体灵敏度刻度因子 η , 它与测量范围有关, 对 20、200 两档的 η 值分别为 0.365 毫焦/字 和 0.325 毫焦/字 。

测量装置如图 8 所示; 为了把放电产生的带电碎片、溅射微粒或离子团偏离掉, 以保护吸收片 (或过滤膜), 在量热计 1° 前端加了一个磁感应强度约为 4 千高斯的永久磁铁。X 射线源到 Ta 吸收体前的 $\phi 12$ 光栏距离 D 为 242.4 mm 。吸收片有四种: $1.0 \mu\text{m}$ 厚的聚丙烯膜; $1.0 \mu\text{m}$ 聚丙烯 + 1000 \AA 左右的铝镀层; 约 $1.0 \mu\text{m}$ 厚的铝箔以及 1.5 mm 厚的光学玻璃片。 1000 \AA 左右的铝镀层可把 6328 \AA 的 He-Ne 激光挡去 98%。估计可把金属等离子体源的可见光部分基本挡掉。 1.5 mm 的光学玻璃对波长 $230 \text{ nm} - 1.8 \mu\text{m}$ 的光辐射具有 $T = 88\%$ 的透过率。而对软 X 射

线却能全部被吸收。在 X 射线源后与上述量热计对称位置上安放了另一个量热计 2[#]，该量热计前不加吸收片。用该量热计的读数作为监测，以观察不同放电脉冲 X 光产额的稳定性。



1 X 射线源；2 永久磁铁；3、5 光栏 φ14；4 吸收片；6 光栏 φ12；7 量热计 Ta 吸收体；8 量热计
图8 X 射线总能量测量装置示意图

设无吸收片时 1[#] 量热计测得的 X 射线源各种辐射照射下量热计读数为 R ，则每脉冲 X 射线源的各种辐射（包括光和 X 射线）的总能量为：

$$E_0 = 4\eta \left(\frac{D}{r}\right)^2 \frac{R}{1-\zeta} \quad (6)$$

式中 $r = 6\text{mm}$ 是光栏半径， $D = 242.4\text{mm}$ 是 X 光源到光栏的距离。 η 是量热计的灵敏度刻度因子， $\eta = 0.325\text{毫焦/读数}$ 。 ζ 是 Ta 吸收体的辐射（主要是散射）损失因子，计算表明 $\zeta < 0.002$ ，故可忽略。当用 1.5mm 厚的光学玻璃作吸收片时，量热计测得的辐射能量（读数 R' ）仅是红外光、可见光和紫外光部分。这种分辐射的总能量为：

$$E'_0 = 4\eta^* \left(\frac{D}{r}\right)^2 \frac{R'}{1-\zeta} \quad (7)$$

其中 $\eta^* = 0.365\text{毫焦/字金属等离子体 X 射线源发射的软 X 射线及真空紫外辐射的总能量}$ 为：

$$E = E_0 - E'_0 = 4\left(\frac{D}{r}\right)^2 \left(\eta R - \eta^* \frac{R'}{T}\right) / (1-\zeta) \quad (8)$$

实验测量表明 E'_0 不到 E_0 的 5%。即软 X 射线辐射和真空紫外辐射占 X 射线源总辐射能量的 95% 以上。如表 1 所示。

表1 金属等离子体 X 射线源（10μF 电容器时）
在不同放电电压下的各种辐射能量

放电电压 (kV)	12	15	18	20
总辐射能量 (E_0 (J/pulse))	109.2	161.9	194.0	227.7
红外、可见、紫外辐射能量 E'_0 (J/pulse)	3.82	6.60	8.67	10.73
X 射线和真空紫外辐射能量 E (J/pulse)	105.4	155.2	185.3	217.2
E 占电能之比	0.29	0.28	0.23	0.22

表 1 显示出真空紫外和软 X 射线的产额高达放电能量的 20% 以上。这样高的光电转换效

率中, 不排除放电残渣微粒直接打在量热计 Ta 吸收体上的贡献, 由于条件的限制, 未能消除这部分贡献。

用不同的吸收片可测得 X 射线源发射不同谱段 (即不同能量范围) 的 X 射线总能量 W_0 。

$$W_0 = 4\left(\frac{D}{r}\right)^2 \frac{\eta^*}{k} R_c = \frac{W}{K} \quad (9)$$

其中, R_c 是某一吸收片条件下, 量热计的读数值。W 是 X 射线源中能通过吸收片的 X 射线能量。K 是 X 射线源的 X 射线谱和吸收片透过率的加权平均因子, 即

$$K = \frac{\sum I_i \Delta \lambda_i e^{-\mu_i t}}{\sum I_i \Delta \lambda_i} = \frac{\sum I_i e^{-\mu_i t}}{\sum I_i} \quad (10)$$

式中 t 是吸收片的厚度 (g/cm^2), μ_i 是吸收片材料对 X 射线 ($E_i = 12.4/\lambda_i$ 时) 的质量吸收系数 (cm^2/g)。 I_i 是 X 射线波长为 λ_i 时的相对强度, $\Delta \lambda_i$ 是所选取的波长间隔 (我们取分析光栅谱仪所拍摄底片其灰度分布时的一个像元对应的波长间隔 0.78125 \AA) 为 $\Delta \lambda_i$ 。

表2 用不同吸收片测得 $8 \text{ \AA} \sim 19 \text{ \AA}$ 谱段的 X 射线总能量

放电电压 (kV)	12	15	18	20	
电容器储能 Q (J)	360	562.5	810	1000	
K	A	0.733			
	B	0.571			
W (J/Pulse)	A	2.74	4.08	5.53	7.53
	B	3.74	5.57	6.05	6.70
W_0 (J/Pulse)	A	3.74	5.57	7.54	10.3
	B	6.55	9.25	10.6	11.7

* 表中 A 为 $1.0 \mu\text{m}$ 聚丙烯 + 1000 \AA Al 膜; B 为 $1.18 \mu\text{m}$ Al 膜

根据光栅谱仪摄得的不同衍射照片可求得不同的 X 射线强度分布。因此可求得 $1.18 \mu\text{m}$ Al 和 $1.0 \mu\text{m}$ 聚丙烯 + 1000 \AA Al 膜为吸收片时, $\lambda = 8 \text{ \AA} \sim 19 \text{ \AA}$ 范围的 K 值分别为 $0.598 \sim 0.571$ 及 $0.741 \sim 0.733$ 。

表2是用 $1.0 \mu\text{m}$ 聚丙烯 + 1000 \AA Al 膜和 $1.18 \mu\text{m}$ Al 膜为吸收片时, 在 $\lambda = 8 \text{ \AA} \sim 19 \text{ \AA}$ X 射线谱段的 K 值、X 射线源在 $8 \text{ \AA} \sim 19 \text{ \AA}$ 谱段穿过吸收片后的 X 射线能量 W 射线总能量差别比较大, 这主要是不同吸收片对同一能谱的衰减不一样 ($1.18 \mu\text{m}$ Al 膜对 $\lambda > 20 \text{ \AA}$ 的 X 射线几乎全部吸收, 而 $1.0 \mu\text{m}$ 聚丙烯 + 1000 \AA Al 膜对 $\lambda > 20 \text{ \AA}$ 的 X 射线还有不小的透过率) 及我们给定 X 射线源能谱与实际能谱之间的差异造成的。也就是说, 由于条件的限制, 我们所得的 X 射线源的 X 射线总能量误差比较大, 可能超过 50%。因此, 我们只能给出有效 X 射线总能量的范围。关于 X 射线源中对 X 光刻有用部分 X 射线的能量也可通过 X 射线光刻实验予以旁证。我们在距离 X 射线源 300mm 处, 用国产 PCMS 负胶做光刻实验, 放电 40 次左右可得到比较清晰的光刻条纹, 根据微电子中心的估计, 该胶的灵敏度是 $10 \sim 20 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。由此可推出每脉冲 X 射线源发出的有用 X 射线的总能量约为 $2.8 \sim 5.7 \text{ J}$ 。计及掩膜底衬 ($1.0 \mu\text{m}$ BN 层) 对 X 射线的吸收, 在 $8 \sim 19 \text{ \AA}$ 范围内的 X 射线总能量约为 $6.1 \sim 12.3 \text{ J}$ 。同样, 用国产 XHR-EP-1 (PMMA) 正胶做光刻实验, 在相同的条件下, 约需 500 次放电才能有比较清晰的光刻条纹, 按此胶的灵敏度为 $200 \sim 400 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 计算, 平均每脉冲有用的 X 射线总能量约 $9.7 \sim 19.3 \text{ J}$ 。总之, 无论是从量热计测量, 还是从 X 光刻实验估计: 当电容为 $5 \mu\text{F}$, 20 kV 放电时, 金属等离子体

X 射线源发射的可用于 X 光刻的 X 射线总能量约为 8.5~17 焦耳/脉冲。

参 考 文 献

- [1] H. Brauninger, *Appl. Opt.*, 1979, **18**: 3502
- [2] 王晓方等, *Chinese Journal of Lasers*, 1990, **17** (7): 407-411;
- [3] 王晓方等, *Chinese Journal of Lasers*, 1991, **18** (3): 186-191
- [4] 毛楚生等, 用于激光等离子体实验的 X 光底片的相对标定. *核聚变与等离子体物理*, 1983, **3** (2): 102
- [5] 王晓方等, *光学学报*, 1992, **12** (4): 353
- [6] K. W. Hill et al., *Low Energy X-ray Emission from Magnetic Fusion Plasmas in "Low Energy X-ray Diagnostics"*. Edit. by D. T. Attwood and B. L. Henke, American Institute of Physics, New York, 1981
- [7] 林康春等, *光学学报*, 1985, **5** (1): 32

Measurement of Spectrum and Energy of Soft X-ray Source Produced by Z-pinch Metal Plasma

Li Yongan Wang Dachun

*(Institute of low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Radiation Beam
and Material Engineering Laboratory, Beijing Radiation Centre, Beijing 100875)*

Abstract

By using a pinhole transmission grating (PTG) spectrograph, the experiment of measuring spectrum of soft X-ray source produced by Z-pinch metal plasma has been performed. the experimental results and the data processing of spectrum are firstly presented. At the same time, the pulse X-ray energy of the Soft X-ray source was measured by using a calorimeter and the experimental results are discussed.

Key Words: Metal Plasma, Soft X-ray, Pinhole transmission grating (PTG), calorimeter