

# 喷气式 Z 箍缩等离子体辐射软 X 射线能谱的研究\*

邹晓兵<sup>†</sup> 王新新 张贵新 韩 旻 罗承沐

(清华大学电机工程系, 电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

(2005 年 5 月 11 日收到, 2005 年 6 月 8 日收到修改稿)

研制了一台五通道 ROSS-FILTER-PIN 软 X 射线能谱仪, 能谱范围为 0.28—1.56keV. 它由 5 个连续能段组成, 每个能段的起止边由罗斯滤片对(ROSS-FILTERS)的 L 或 K 吸收边确定. 罗斯滤片对的厚度通过优化计算得到, 为了使每个通道的灵敏区外响应(即所测能段外响应)与通道总响应之比最小, 在滤片对的第二滤片上镀上了一定厚度的第一滤片材料, 为了缩减滤片表面积以增强低能滤片的抗冲击能力及方便滤片加工, 能谱仪采用了小探测面积的 PIN 探测器(1mm<sup>2</sup>). 借助此能谱仪, 测量得到了喷气式 Z 箍缩(Z-pinch)等离子体辐射软 X 射线能谱的分布, 并研究了软 X 射线产额随箍缩状况的变化趋势.

关键词: Z 箍缩等离子体, 罗斯滤片, 软 X 射线能谱

PACC: 5225P, 5270, 5225

## 1. 引 言

高温等离子体的辐射光谱可用来确定等离子体的辐射总量、电子温度、电离状态、电子能量分布等<sup>[1-3]</sup>. 研究 Z 箍缩等离子体辐射软 X 射线能谱的分布, 有助于加深对该等离子体的物理过程及其辐射特性的理解<sup>[4,5]</sup>.

Z 箍缩等离子体辐射软 X 射线的能谱由放电电流波形、负载的初始质量线密度、负载位形等参数决定, 罗斯滤片法<sup>[6]</sup>是研究该能谱的基本方法之一, 其优点是对能谱强度可进行绝对测量, 每个能段完全由一对罗斯滤片对决定. 在过去, 光子能量高于 0.8keV 的 Z 箍缩等离子体的辐射 X 射线能谱已有较多的实验数据, 由于制作低能滤片比较困难, 光子能量低于 0.8keV 的实验数据非常少<sup>[1]</sup>. 随着滤片制作技术的进步, 现在能利用罗斯滤片法研究能量低至 0.1keV 的光子分布. 本文优化计算了 7 对罗斯滤片对, 覆盖能谱范围为 0.07—1.56keV. 选择其中的五对滤片对配合 PIN(半导体探测器)探头组成了一台能谱范围为 0.28—1.56keV 的 ROSS-FILTER-PIN 软 X 射线能谱仪. 为防止喷气式 Z 箍缩等离子体放电时产生的强烈冲击波损毁滤片, 本文选择的 PIN

探头探测面积只有 1mm<sup>2</sup>, 这样可大大缩减探头前置滤片的面积, 从而增强滤片的抗冲击能力. 借助此能谱仪, 我们测量得到了喷气式 Z 箍缩等离子体辐射软 X 射线能谱的分布, 并研究了软 X 射线产额随箍缩状况的变化趋势.

## 2. 实验装置

### 2.1 喷气式 Z 箍缩装置

喷气式 Z 箍缩装置的驱动源由四个电容器并联组成, 总电容为 16μF<sup>[7]</sup>. 装置的充电电压为 22.5kV, 放电电流峰值为 210kA, 上升时间为 2.4μs. 负载采用喷气式负载, 由超声速喷嘴喷射到放电腔中的空心圆环状气流层构成. 喷嘴储气室压力为 5 × 10<sup>5</sup> Pa, 喷气为非定常过程, 气流负载质量线密度将随时间的变化曲线<sup>[8]</sup>. 通过调整喷嘴阀门开启与主放电回路触发脉冲之间的放电时延能调整箍缩放电的负载初始质量线密度及位形.

装置的箍缩聚焦状况及聚焦时刻点通过 di/dt 线圈监测, 图 1 是 di/dt 线圈测量到的典型箍缩放电波形.

\* 国家自然科学基金(批准号:10035030,19975029), 国际原子能机构协同研究计划(批准号:CRP12409)和中国博士后科学基金(批准号:2004035002)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: juxb@mail. tsinghua. edu. cn

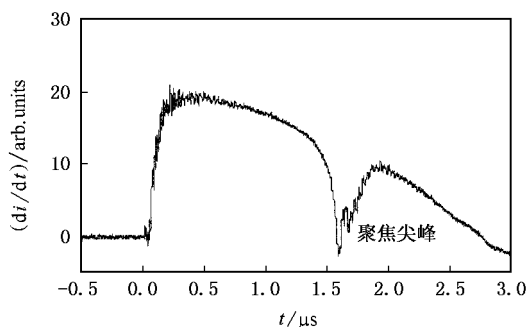


图 1 箍缩放电的 di/dt 波形

在图 1 的 di/dt 波形上,可以看到一个明显的下凹尖峰,此尖峰是箍缩聚焦点形成的特征,尖峰的大小反映箍缩聚焦的好坏.

### 2.2 ROSS-FILTER-PIN 软 X 射线能谱仪

罗斯滤片法又称差分法,每个通道的罗斯滤片对由元素周期表中邻近或接近邻近的两种元素箔所组成.两种不同元素的滤片分别放置在两个同样的 X 射线探测器前,调整滤片厚度,使得两种滤片的透过率在其上下两个 L 边(或 K 边)之外接近相等.因而,两个探测器的读数差直接反映两吸收边之间能段的 X 射线通量,此能段也称为通道的灵敏区间.图 2 为单通道的罗斯滤片法原理示意图.

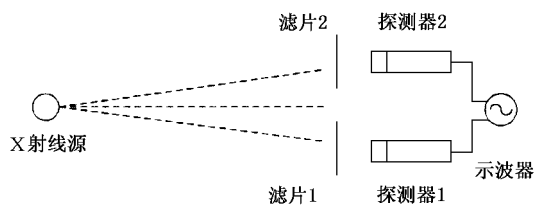


图 2 单通道罗斯滤片法原理示意图

设  $I_1, I_2$  分别为两个探测器的输出值,  $A$  为探测器的灵敏面积,  $E_1, E_h$  为所测能段的起止边,即通道灵敏区间.图 2 所示通道灵敏区内光子量  $Q$  (单位灵敏面积)可近似给出

$$Q = (I_1 - I_2) \int_{E_1}^{E_h} R(E) dE \quad (1)$$

式中  $R(E)$  为光子通过滤片对及探测器后的通道总响应函数,设  $S(E)$  为探测器对入射光子的响应函数,  $R(E)$  可表示为

$$R(E) = S(E) \left[ \exp(-\mu_1(E) \cdot d_1) - \exp(-\mu_2(E) \cdot d_2) \right] \quad (2)$$

式中  $\mu_1, \mu_2$  分别罗斯滤片对材料的总质量吸收系数,  $d_1, d_2$  为其厚度,指数项的差为这对滤片透过率的剩余响应.测量出通道探测器的输出信号  $I_1, I_2$  后,通过(1)(2)式可计算得到所测能段内软 X 射线的强度.

假定  $(E_{min}, E_{max})$  能区外,没有光子到达测量通道,通道的灵敏区外响应与通道总响应的比值  $\delta^{[6]}$  可表示为

$$\delta = \left( \int_{E_{min}}^{E_1} |R(E)| dE + \int_{E_h}^{E_{max}} |R(E)| dE \right) / \int_{E_{min}}^{E_{max}} |R(E)| dE \quad (3)$$

最佳罗斯滤片对的判据是在灵敏区内通道总响应函数  $R(E)$  尽量平直,而灵敏区外响应与总响应的比值  $\delta$  最小.这可通过调整罗斯滤片对的滤片厚度来实现.

由于小型 Z 装置的辐射量较小,我们采用灵敏度较高的 PIN 即半导体探测器来探测软 X 射线. PIN 型号为 BPX65,典型参数:探测面积为  $1\text{mm}^2$ ,上升时间为  $0.5\text{ns}$ ,死层厚度为  $0.5\mu\text{m}$ ,耗尽层厚为  $10\mu\text{m}$ .其灵敏度响应曲线如图 3(a)所示,图 3(b)为 PIN 探测器采集信号的电路图.每个测量通道的一对 PIN 探测器通过响应一致性试验来选定,即多个 PIN 置于同一滤片后测量 Z 箍缩装置一次放电的辐射信号,选出响应相同的 PIN 构成每个测量通道.

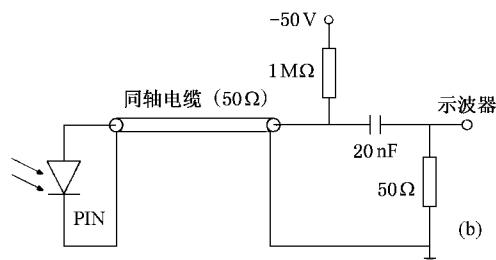
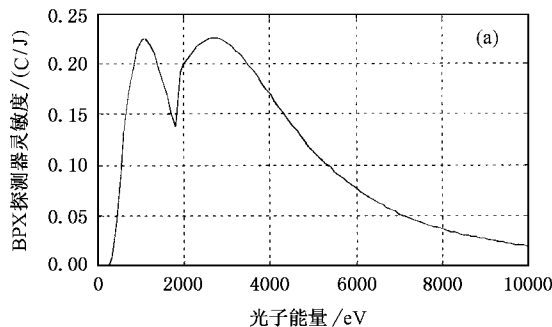


图 3 (a) PIN 灵敏度曲线 (b) PIN 探头信号采集电路图

滤片制备分别采用轧制法、电阻加热法及碳弧法。滤片厚度测量则采用称重法及  $\alpha$  粒子测厚法。考虑到制作工艺等原因,选取了相对易加工的 B, C, V, Fe, Ni, Zn, Al 等 7 种材料构成罗斯滤片对。这 7 组滤片覆盖了 0.072—1.559 keV 的能量范围。罗斯滤片对厚度通过编程优化得到,优化准则为通道响应函数在灵敏区内尽量平直,而在灵敏区外最小即  $\delta$  最小。取  $E_{\min} = 0.03 \text{ keV}$ ,  $E_{\max} = 2.0 \text{ keV}$ , 计算时为了使  $\delta$  最小,我们在滤片对的第二滤片上都镀上适当厚度的第一种滤片材料或轻元素材料如 Al 等。先制备复合滤片,按复合滤片的实际厚度调整单一滤片的制作厚度,再从多片单一滤片中挑选满足要求的滤片。滤片对设计结果如表 1 所示。

表 1 罗斯滤片对的设计结果

编号	第一滤片	第二滤片	$\delta_1/\%$	$\delta_2/\%$	能段区间/keV
	$/\mu\text{m}$	$/\mu\text{m}$			
1	B0.5	Al0.2 + B0.3	15		0.072—0.192
2	C0.6	B0.2 + C0.48	6.1		0.192—0.283
3	V0.6	C0.36 + V0.56	5.2	16	0.283—0.512
4	Fe0.73	V0.62 + Fe0.4	3.4	3.5	0.512—0.708
5	Ni0.8	Fe0.28 + Ni0.6	3.4	2.6	0.708—0.853
6	Zn1.2	Ni0.19 + Zn1.0	1.4	1.2	0.853—1.021
7	Al8.0	Zn0.3Al7.0	0.23	0.22	1.021—1.559

表 1 中  $\delta_2$  为通道的灵敏区外响应与通道总响应的比值,  $\delta_1$  为该通道滤片对剩余响应曲线上的灵敏区外剩余响应与滤片对总剩余响应的比值,与  $\delta_2$  相比,  $\delta_1$  在计算时不包括探测器响应。当采用 PIN 作为软 X 射线探测器时,由于 PIN 探测器硅的 L 吸收边为 0.1 keV 左右,使用滤片对和 PIN 组成能谱仪时应避开此吸收边,故我们选择后 5 对滤片与 PIN 探测器一起组成一台 5 通道 ROSS-FILTER-PIN 软 X 射线能谱仪。它由 5 个连续能段组成,覆盖范围为 0.28—1.56 keV。图 4(a) 为 5 对滤片对的总剩余响应曲线,图 4(b) 为 5 对滤片及探头的通道总响应曲线。

### 3. 实验结果与分析

使用 ROSS-FILTER-PIN 软 X 射线能谱仪,对 Z 装置(210 kA/2.4  $\mu\text{s}$ )在不同放电时延(即喷嘴阀门开启与主放电回路触发脉冲之间的时延)下的软 X 射线信号进行了测量。图 5 为放电时延为 800  $\mu\text{s}$  时的

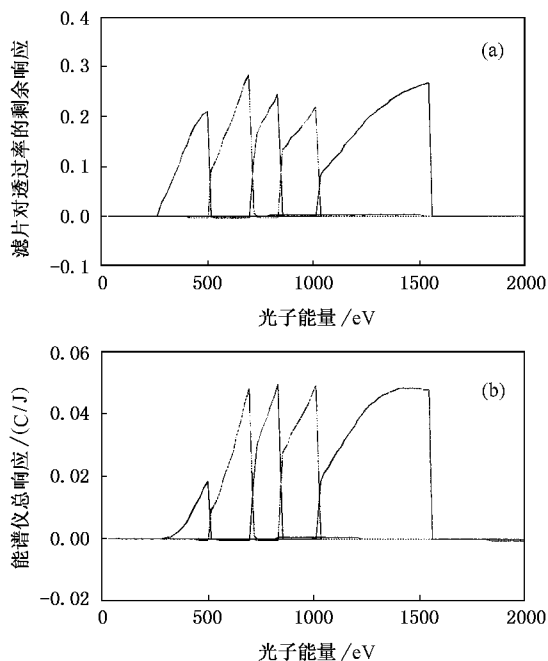


图 4 (a) 滤片对总剩余响应曲线 (b) 五对滤片及探头的总响应曲线

软 X 射线典型信号。本 Z 装置在放电时延为 800  $\mu\text{s}$  时聚焦最稳定且聚焦尖峰较深,使用热电堆能量计测量到的光子总产额约为 740 J<sup>[7]</sup>。

放电时延为 800  $\mu\text{s}$  时连续三次测量结果如表 2 所示。

表 2 连续三次软 X 射线能谱测量结果

能段区间 /keV	软 X 射线强度/J			平均强度 /J
	第一次	第二次	第三次	
0.283—0.512	1.49	1.45	1.41	1.45
0.512—0.708	1.56	1.53	1.48	1.52
0.708—0.853	0.05	0.05	0.04	0.05
0.853—1.021	0.26	0.24	0.23	0.24
1.021—1.559	0.65	0.61	0.59	0.62

采用表 2 中的软 X 射线平均强度值,可得到图 6 所示的能谱分布直方图。

Z 箍缩等离子体的辐射能谱由连续谱和线谱叠加组成,总辐射量  $Y$  及 K 层(或 L 层)辐射量  $Y_K$  与放电电流峰值  $I_{\max}$  之间的定标率大致符合  $Y \propto I_{\max}^2$ ,  $Y_K \propto I_{\max}^4$ 。由于 Z 装置的放电电流峰值只有 210 kA,实验测量到的能谱范围在 0.28—1.56 keV 内的软 X 射线辐射量较小,约 4 J,可见装置的辐射光子能量绝大部分都在软 X 射线以下。在图 6 中,后两个能段区间(0.85—1.02 keV 及 1.02—1.56 keV)上的总辐

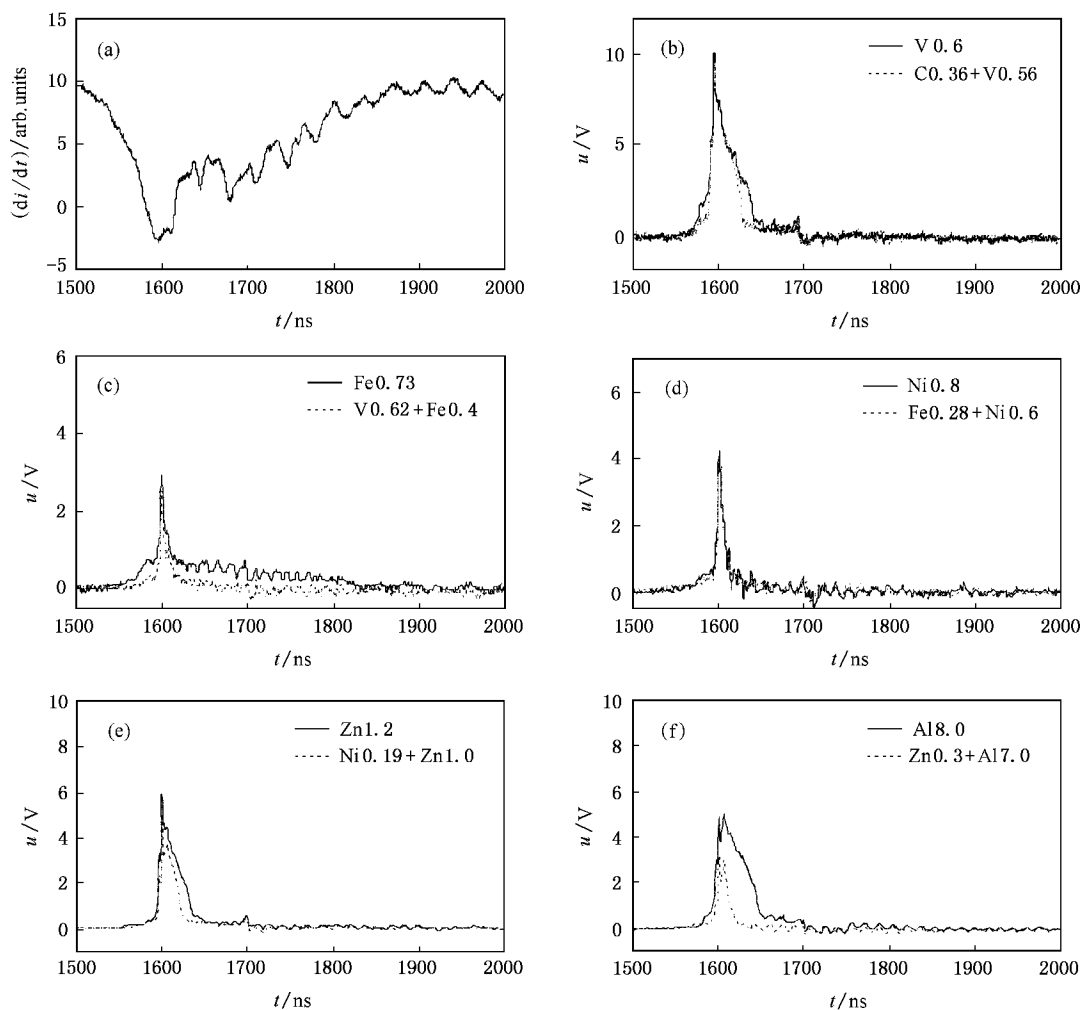


图5 放电时延  $800\mu\text{s}$  时, 软 X 射线典型信号(a)  $di/dt$  信号 (b)–(f) 能谱仪各通道软 X 射线信号

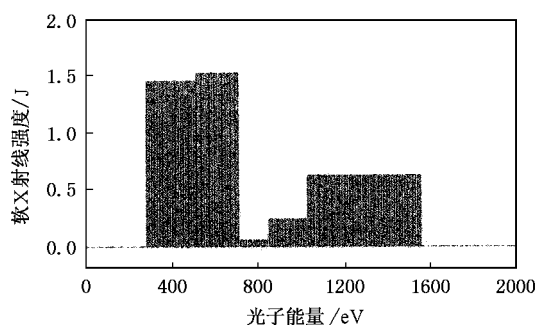


图6 软 X 射线能谱分布直方图

射量约为  $0.85\text{J}$ ,  $\text{Ne IX}$  及  $\text{Ne X}$  的各条谱线就分布在这两个区间中. 参考 Lexis 装置的实验结果<sup>[1]</sup>:  $I_{\text{max}}$  为  $600\text{kA}$ , 氦气的 L 层辐射量约为  $20\text{J}$ , 可知我们的 Z 装置辐射状态也属正常之列.

改变实验条件, 增大主放电延时至  $860\mu\text{s}$ , 这时

$di/dt$  信号上箍缩聚焦尖峰将减小, 并偶尔会出现两次箍缩现象. 图 7 为典型的两次箍缩电信号波形.

由图 7 可知, 随着放电时延增加, 软 X 射线的辐射量有所减少. 这可从气流负载的初始位形来理解<sup>[9]</sup>. 超声速喷嘴喷出的气流层沿 Z 轴方向前进的同时, 将径向 (r 方向) 扩散. 这使得气流层呈喇叭形状, 即喷嘴端气流层薄且半径小, 与喷嘴相对的另一电极端气流层厚且半径大, 并且气流在撞击对应电极后将加剧喇叭状的张开和破坏气流层的轴对称分布. 在负载线密度随时间的变化曲线上<sup>[8]</sup> 时延在  $800\mu\text{s}$  和  $860\mu\text{s}$  时均处于平顶处, 即负载线密度相等, 但气流层形状不同. 时延为  $860\mu\text{s}$  时喇叭状气流扩散更大, 分布也更加偏离轴对称. Z 箍缩对这种喇叭状的气体负载放电时, 将使得等离子体箍缩轴向不同步, 这种现象被称为“拉锁效应”(zippering effect)<sup>[1]</sup>. “拉锁效应”以及气流分布的非轴对称将会

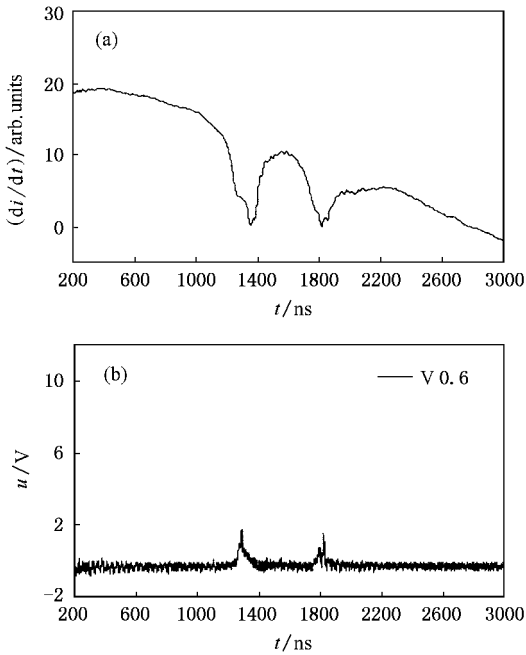


图 7 放电延时为  $860\mu\text{s}$  时, 偶然出现的两次箍缩放电波形 (a)  $di/dt$  信号 (b) 通过钒滤片后的软 X 射线信号

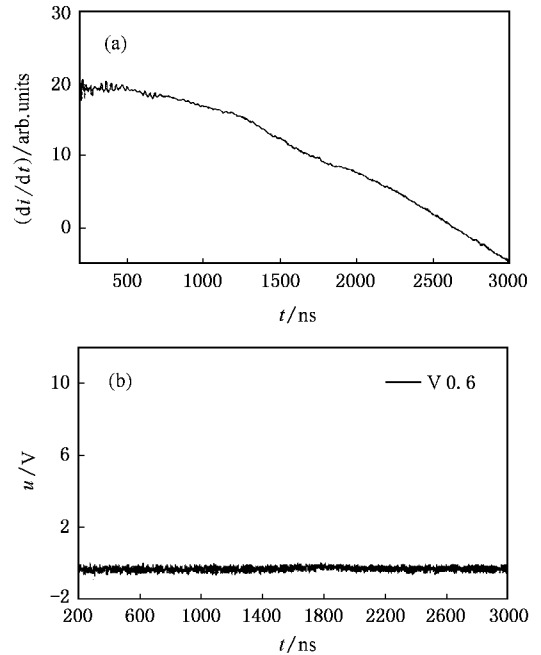


图 8 放电延时为  $1050\mu\text{s}$  时, 等离子体不再辐射软 X 射线 (a)  $di/dt$  信号 (b) 通过钒滤片后的软 X 射线信号

引发等离子体箍缩的不稳定性, 导致等离子体聚焦差, 聚焦柱温度低, 从而影响软 X 射线的辐射量. 聚焦等离子体柱崩溃后, 向外扩散的部分等离子体在剩余电流作用下可能会再次向心压缩而出现两次箍缩现象. 经多次测量发现两次箍缩的总辐射功率基本都小于一次箍缩的总辐射功率. 当放电延时继续增加到  $1050\mu\text{s}$  时, 如图 8 所示,  $di/dt$  信号上不再出现聚焦尖峰, 即等离子体已形不成聚焦, 这时各路 PIN 探测信号都为 0, 等离子体不再辐射软 X 射线.

实验表明要获得温度高的辐射源, 就必须设计气流密度上升快的喷气系统, 以缩短放电延时改善气流负载的初始位形.

## 4. 结 论

研制了一台 5 通道 ROSS-FILTER-PIN 软 X 射线

谱仪, 能谱范围为  $0.28\text{--}1.56\text{keV}$ . 它由 5 个连续能段组成, 每个能段的起止边由罗斯滤片对的 L 或 K 吸收边确定. 为了使每个通道的灵敏区外响应与通道总响应之比最小, 我们在滤片对的第二滤片上都镀上了一定厚度的第一滤片材料, 并通过优化计算得到每片滤片的厚度; 为了缩减滤片表面积以增强低能滤片的抗冲击能力及方便滤片加工, 能谱仪采用了小探测面积的 PIN 探测器 ( $1\text{mm}^2$ ). 借助此能谱仪, 我们测量得到了喷气式 Z 箍缩等离子体的辐射软 X 射线能谱的分布. 通过系统的研究后还发现, “拉锁效应”及气流负载的非对称性将严重影响 Z 箍缩等离子体的聚焦及其辐射特性, 等离子体辐射的软 X 射线产额随聚焦状况的变坏而明显降低.

- [1] Pereira N R, Davis J 1988 *J. Appl. Phys.* **64** R1  
 [2] Comisso R J, Apruzese J P, Black D C et al 1998 *IEEE Trans. on Plasmas Science.* **26** 1068  
 [3] Cai S D, Li X, Hu J L, Chen Y P 1997 *Chin. Phys.* **6** 690

- [4] Mosher D, Qi L S, Krishnan M 1998 *IEEE Trans. on Plasma Science.* **26** 1052  
 [5] Ning C, Yang Z H, Ding N 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 415 (in Chinese) 宁成、杨震华、丁宁 2003 物理学报 **52** 415

- [ 6 ] Khutoretsky I V 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 773 *Plasma Science* **30** 482
- [ 7 ] Zou X B , Wang X X , Luo C M , Han M 2005 *Plasma Sources Science and Technology* **14** 268 [ 9 ] Zou X B , Wang X X , Luo C M , Han M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 173 ( in Chinese ) 邹晓兵、王新新、罗承沐、韩 旻 2005 物理学报 **54** 173 ]
- [ 8 ] Zou X B , Wang X X , Luo C M , Han M 2002 *IEEE Transactions on*

## Study of soft X-ray energy spectra from gas-puff Z-pinch plasma<sup>\*</sup>

Zou Xiao-Bing<sup>†</sup> Wang Xin-Xin Zhang Gui-Xin Han Min Luo Cheng-Mu

( Department of Electrical Engineering , State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment  
Tsinghua University , Beijing 100084 , China )

( Received 11 May 2005 ; revised manuscript received 8 June 2005 )

### Abstract

A ROSS-FILTER-PIN spectrometer in the spectral range of 0.28keV —1.56keV was developed to study the soft X-ray radiation emitted from gas-puff Z-pinch plasma. It is composed of five channels covering the energy interval of interest without gaps. Soft X-ray spectral energy cuts were determined by the L absorption edges of selected filter elements ( K absorption edges being used for light filter elements ) , and the optimum thickness of filter material was designed using computer code. To minimize the residual sensitivity outside the sensitivity range of each channel , element of the first filter was added into the second filter of all the Ross pair. To diminish the area of each filter , PIN detector with small sensitive area of 1 mm<sup>2</sup> was adopted for the spectrometer. A filter with small area is easy to fabricate and would be helpful to withstand the Z-pinch discharge shock wave. With this ROSS-FILTER-PIN spectrometer , the energy spectra of soft X-ray from a small gas-puff Z-pinch were investigated , and the correlation between the soft X-ray yield and the plasma implosion state was also studied.

**Keywords :** Z-pinch plasma , Ross filter , soft X-ray energy spectra

**PACC :** 5225P , 5270 , 5225

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10035030 and 19975029 ) , and the International Atomic Energy Association ( IAEA ) under Research Contract ( Grant No. CRP12409 ) , and by China Postdoctoral Science Foundation ( Grant No. 2004035002 ) .

<sup>†</sup> E-mail : juxb@mail.tsinghua.edu.cn