

文章编号: 1001-4322(2005)06-0901-04

丝阵靶箍缩等离子体软 X 射线辐射能谱研究*

蔡红春¹, Chernenko A S², Korolev V D², Ustroev G I², Ivanov M I²

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. Kurchatov Institute, Moscow, Russia)

摘 要: 在 S-300 装置上研究了丝阵靶 Z 箍缩等离子体的软 X 射线辐射的动态过程。利用多通道 X 射线谱仪在 50~2 000 eV 范围内测量了丝阵靶内爆等离子体 X 射线辐射谱, 辐射主要位于 60~220 eV 谱段。辐射谱可用温度为 40~50 eV 的 Planck 黑体谱近似描述。在能量高于 500 eV 的谱段, 辐射谱与 Planck 黑体谱有较大的偏离。这主要是因为等离子体热斑的出现、在 1.5~2 keV 范围内线谱的存在和加速电子韧致辐射的结果。

关键词: Z 箍缩; 丝阵靶; 多通道谱仪; X 射线辐射谱

中图分类号: TL659 **文献标识码:** A

近年来, MA 量级的强流加速器上的箍缩研究引起了极大的兴趣, 这既是解决受控热核聚变问题的途径之一, 也是高功率 X 射线和中子辐射源。1997 年, 在电流大于 20 MA 的装置 Z 上, 进行了丝阵靶箍缩实验。钨丝靶箍缩得到的 X 射线功率为 200 TW, X 射线总能量为 1.8 MJ^[1]。为了进一步理解时间过程小于 10^{-7} s 的快速 Z 箍缩物理过程和确定等离子体的辐射损失, 需要靶箍缩过程中等离子体辐射谱的动态信息。时间分辨的软 X 射线谱的测量是高温等离子体参数测量的基本方法之一。

本文是在库尔恰托夫研究院 S-300 装置^[2] (700 kV, 4 MA, 70 ns) 上进行的丝阵靶箍缩等离子体高功率 X 射线的产生和诊断实验结果。通过多级电磁脉冲压缩, 在装置上利用丝阵靶的内爆可以获得 W 级的软 X 射线脉冲。实验中使用的是铝和钨(或者是它们的组合)的丝阵靶, 其根数为 24 至 108 根。X 射线谱的动态测量范围为 50~2 000 eV, Z 箍缩等离子体的主要辐射损失落在此范围。测量是借助多通道 X 射线谱仪 APH10 进行的。基于多层干涉镜和快速作用的半导体探头, 谱仪不仅可以在每个通道选择谱段进行谱时间分析和测量辐射功率和能量, 而且可以通过对能量和时间积分测量总的辐射功率和能量。

1 测量方法

装置 S-300 是八模块的功率脉冲装置, 其短路放电电流可达 4 MA, 脉冲前沿为 100 ns, 在负载电压为 700 kV 时, 能量为 100 kJ。在本文所介绍的实验中电流为 2~3 MA。负载电压和电流分别采用电阻分压器和磁探针进行测量。

实验中负载是铝丝、钨丝或其组合的丝阵靶, 丝阵直径 12 mm, 高 10 mm。铝丝直径为 18 μm 或 15 μm , 钨丝为 5 μm 或 6 μm 。靶中丝的数量为: 铝丝靶—48, 60, 80 根, 钨丝靶—48, 80, 108 根, 铝钨丝混合靶(相互间隔一根)—12Al+12W, 24Al+24W, 30Al+30W。相应靶的质量为: 铝—336, 420, 500 μg ; 钨—264, 370, 420, 500 μg ; 混合丝靶为 250, 300, 375 μg 。

多通道谱仪 APH10 可在 50~2 000 eV 范围内对 X 射线谱进行动态测量。谱仪的工作基于以下原理: 在每个通道中使用多层射线干涉镜和边滤片进行谱的分离, 然后用快速半导体探头对光子信号进行记录。谱仪中用的是尺寸为 7 mm \times 25 mm 的 X 射线多层镜, 它是多层 ($N=20\sim 80$) 循环结构 ($d=2\sim 20$ nm), 由高和低原子序数的材料交替叠加而成^[3]。半导体探头采用硅敏元件 (SPPD11-04), 在电源电压 400 V 时负载上线性输出电流大于 1.5 A。探头时间分辨率为 1.5~3 ns, 在 0.05~1.5 keV 范围内的灵敏度为 $10^{-3}\sim 10^{-1}$ A \cdot cm²/W。

探头灵敏度的绝对标定是用特征线 C-K (0.28 keV), Fe-L (0.62 keV), Co-L (0.75 keV), Cu-L (0.93 keV) 和 Al-K (1.5 keV) 在 X 射线试验台 CC224 上进行的, 其误差不超过 12%^[4]。在能谱范围 0.05~1.5 keV 内, 探头频谱特性的相对曲线是利用标定结果和文献[5]中的数据, 根据公式 $S(E) = [1 - \exp(-\mu_{\text{Si}} ds_i)]$

* 收稿日期: 2005-01-14; 修订日期: 2005-04-06

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 蔡红春(1973—), 男, 博士, 主要从事 Z-pinch 物理实验方面的研究工作, 绵阳 919-108 信箱; E-mail: caihxlx@yahoo.com.cn。

$\exp(-\mu_x d_x - \mu_{Si} d_{eff})$ 计算而得,这里 μ_{Si} 和 μ_x 是硅和接触材料的吸收系数, d_{Si} 和 d_x 是敏感层和接触层的厚度, d_{eff} 是根据标定的“死层”有效厚度的平均值。图 1 所示为死层厚度为 $0.06 \mu\text{m}$ 时不同的入射窗口接触层的典型的硅半导体探头的频谱特性。

能量 $E < 1 \text{ keV}$ 的 X 射线边滤片是用透过率为 75 % 的金属网作骨架,其表面是厚度 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ (检测误差不大于 $\pm 5 \text{ nm}$) 不同材料的薄膜。谱仪每个通道滤片的材料和厚度是根据以下条件选取:在通道能量范围内其 K (或 L, M) 跃迁辐射透过率不小于 10 %。滤片透过率的计算是使用文献[6]中的数据,单个滤片样品是在 X 射线试验台上进行标定。表 1 中是谱仪 APH10 各测量通道的基本特性。

表 1 谱仪 APH10 各测量通道的基本特性

Table 1 Characteristics of Xrays registration channels

channel	1	2	3	4	6, 7	8, 9, 10
energy/eV	50 ~ 70	80 ~ 180	180 ~ 280	280 ~ 400	550 ~ 900	900 ~ 1500
filter thickness/ μm	Al:0.3	Zr:0.2	Ag:0.2	Sn:0.2	Cu:0.3	Al:5.0
filter transparency/ %	30 ~ 40	10 ~ 30	20 ~ 25	25 ~ 35	15 ~ 50	15 ~ 50
type of mirror	Mo/ Si	Mo/ B4C	Cr/ C	Cr/ Sc	W/ Si	W/ C
slide angle/ (°)	40 ~ 30	45 ~ 20	30 ~ 20	30 ~ 20	25 ~ 15	15 ~ 10
reflection coefficient/ %	30 ~ 50	10 ~ 30	14 ~ 40	12 ~ 45	10 ~ 20	13 ~ 25
spectral resolution/ %	20 ~ 15	7 ~ 10	4 ~ 6	3 ~ 5	1.5 ~ 2	1.5 ~ 2

谱仪测量通道的灵敏系数 $S_{(E)}$ [$\text{A} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{eV} / \text{W}$] 确定为

$$S_{(E)} = T(E) \cdot R(E) \cdot E \cdot \partial E \cdot S(E)$$

式中: $T(E)$ 是滤片通过率; $R(E)$ 和 ∂E 是镜子反射系数和能量分辨率; $S(E)$ 是探头的灵敏系数 [$\text{A} \cdot \text{cm}^2 / \text{W}$]。测量脉冲射线能谱时, t 时刻每个通道的能流谱密度值 $J_{(E)}$ [$\text{W} / \text{cm}^2 \cdot \text{eV}$] 为 $J_{(E)} = i_{(t)} / S_{(E)}$, 其中 $i_{(t)}$ 为探头电流幅度。为降低低能通道(这些能区辐射强度有时比高能通道高几个数量级)的灵敏度,采用增加滤片数量或加滤网的方法,其透过率为 25 % 和 50 %。

谱仪中央通道中使用的是铝 (Al_2O_3) 或金阴极的真空 X 射线二极管,直径为 16 mm。探头的时间分辨率为 0.2 ns,电源电压为 1 000 V 时,最大线性电流不小于 1.5 A。在 10 ~ 20 eV 能区这种探头的最大灵敏系数为 $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{cm}^2 / \text{W}$,随着光子能量增加,在能量约 2 keV 时,灵敏系数下降到 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^2 / \text{W}$ [6]。和不同的边滤片相结合,谱仪中央通道可以以较高的时间分辨率来监测不同谱范围内的辐射脉冲的形状和强度。

2 测量结果分析

图 2 为 80 根铝丝负载时,谱仪各通道中记录的软 X 射线脉冲的示波器图和输出电流波形。所有通道中的辐射脉冲出现在电流后沿发生高频振荡(即靶等离子体箍缩)时。对于不同的负载,这个时刻为从电流开始到 $(170 \pm 20) \text{ ns}$ 。不同通道中所记录的辐射脉宽($\tau_{0.5}$)随着光子能量增加显著减小。钨丝靶的箍缩更快、其辐射更强烈。无滤片的中央通道在真空紫外线辐射区具有最大灵敏度,它所记录的脉宽从 180 ns(铝丝阵)变化到 120 ns(钨丝阵)。各种负载辐射脉宽在第一个通道(对应能量 60 eV)是 $(120 \pm 20) \text{ ns}$,随着能量增大到 150 eV,脉宽减小至 35 ns,再增加几乎没有变化。最大辐射强度出现在第二、三通道,对应的能量范围为 90 ~ 120 eV。

图 3 所示为不同时刻 X 射线的频谱分布曲线(实验中靶为 80 根铝丝,曲线 1 ~ 5 为实验结果,曲线 6 为温度为 50 eV 时的黑体辐射谱),这些曲线非常清晰地演示了靶箍缩过程动力学。正如图中所示在箍缩起始(从电流开始到 150 ns)和结束阶段(从 250 ns 开始),辐射谱事实上只包含软 X 射线部分,硬 X 射线的谱功率至少小一个数量级。X 射线谱的最大值在 60 ~ 150 eV 范围内。从 150 ns 开始射线较硬部分急剧增加,而软 X 射

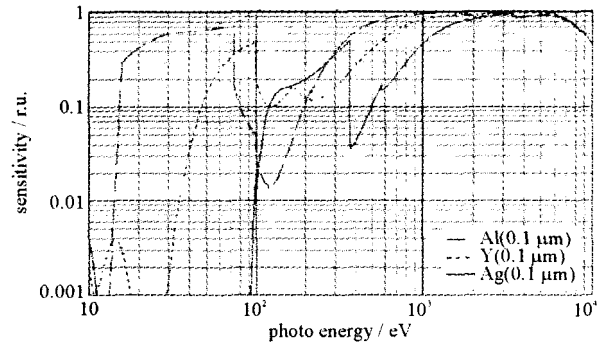


Fig. 1 Spectral sensitivity of silicon detector

图 1 硅半导体探头的频谱特性

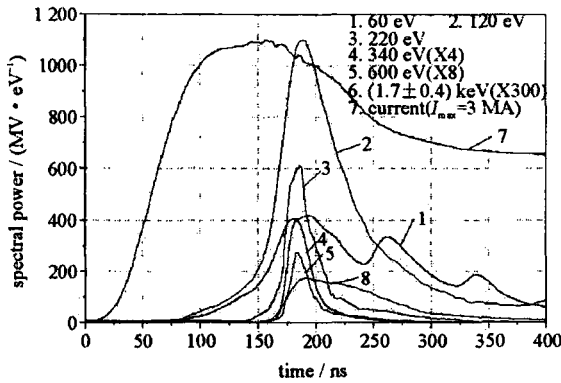


Fig. 2 Traces of the current and the X-ray signals

图 2 软 X 射线脉冲的示波器图和输出电流波形

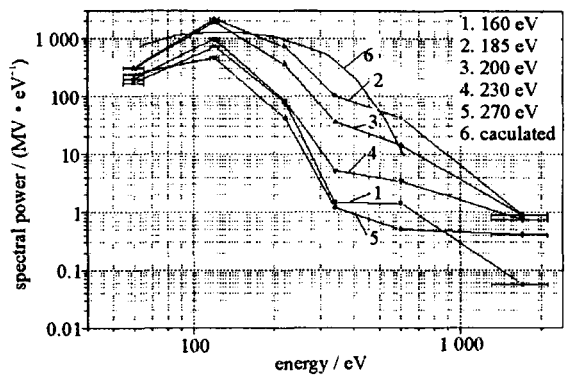


Fig. 3 Energy spectra of the X-ray at different moments

图 3 不同时刻 X 射线的频谱分布曲线

线部分增幅不大。辐射的主要部分在 60 ~ 220 eV 范围内,谱的最大值在 120 eV 附近,这对应于温度为 40 eV 的黑体辐射谱。黑体辐射的谱功率值是用直径为 2 mm、高为 10 mm 的圆柱体来计算的。借助于狭缝扫描相机所获得的靶箍缩动力学过程和上述时间辐射谱相一致。

图 4 所示为谱仪各通道中记录的软 X 射线幅值最大时刻不同类型负载的谱分布曲线,曲线 4,5 分别为温度 40,50 eV 时的黑体谱。辐射谱的最大值在 120 ~ 150 eV 范围,而在到 500 eV 能量范围内近似于温度为 40 ~ 50 eV 的黑体辐射谱。能量超过 500 eV 时,谱和计算黑体谱有较大偏差,这可能是因为亮斑的出现和在 1.5 ~ 2 keV 范围内的特征谱线群(弯晶体谱仪记录),还有就是加速电子韧致辐射的贡献。据计算对于铝靶线谱辐射的总能量达到 120 J。

根据以上进行的频谱测量,可以确定箍缩等离子体 X 射线辐射在光子能量 50 ~ 2 000 eV 范围内的总功率和总能量,其最大值分别为 0.4 TW 和 20 kJ,是用钨丝靶时取得的。

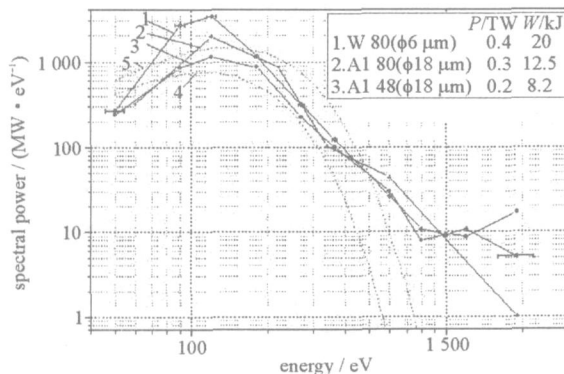


Fig. 4 Spectral of the X-ray measured for different liners at the moment of implosion

图 4 不同类型负载的软 X 射线的谱分布

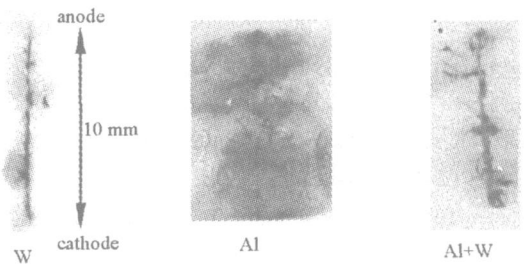


Fig. 5 X-ray pin-hole camera measurements in three experiments with different liners

图 5 多丝靶 Z 箍缩的 X 射线针孔像

图 5 为不同类型负载的 3 发试验所获得的时间积分 X 射线针孔像(滤片为 12 μm 的 mylar 膜),其中钨丝靶由直径为 6 μm 的 80 根钨丝组成,铝丝靶丝的数量为 80 根(直径 18 μm),混合靶由 30 根直径为 6 μm 的钨丝和 30 根直径 18 μm 的铝丝组成。三孔针孔相机(孔的直径皆为 50 μm,其中两孔用不同的滤片覆盖)测量结果表明钨丝靶具有较好的箍缩,此时最小的箍缩半径约 400 μm,由许多(约 20 个)均匀的亮斑组成,且沿箍缩轴均匀分布。铝丝靶箍缩等离子体的结构不均匀,亮斑大而数量少,且沿箍缩轴线极不均匀分布。此时可以观察到向箍缩周围的等离子体的喷射。在有些试验中还观察到箍缩区外围单个的等离子体喷射。

3 结 论

使用多通道谱仪详细地研究了软 X 射线源的时间特性,确定每一个谱分离区的谱功率和能量以及随时间积分的总功率和总能量。丝阵靶箍缩实验表明在最大箍缩时,辐射谱可以用温度为 40 ~ 50 eV 的黑体谱近似描述。对于能量大于 500 eV 谱的部分,与黑体谱有较大偏差。这可以解释为箍缩轴线附近出现高温等离子体区域(亮斑)而导致在 1.5 ~ 2 keV 范围内出现特征线,和加速电子的韧致辐射可能的贡献^[7]。80 根钨丝靶获得最好的箍缩和 X 射线的产额,辐射功率达到 0.4 TW,而铝丝靶箍缩的结果较差,且箍缩等离子体的形状非

常不规则。

致 谢： 本文的工作为作者在俄罗斯库尔恰托夫研究院 (Kurchatov Institute) 作博士论文期间所作,在此对 S—300 装置运行人员提供的帮助表示衷心感谢!

参考文献：

- [1] Spielman R B , Deeney C , Chandler G A , et al. Tungsten wire-array Z-pinch experiments at 200 TW and 2 MJ [J]. *Phys Plasmas* , 1998 , (5) :2105.
- [2] Chernenko A S , Gorbunov Y M , Kalinin Y G , et al. S—300 , new pulsed power installation in Kurchatov Institute. Investigation of Stable Liner Implosion[A]. Proceedings of the 11th Int. Conf. on High Power Particle Beams[C]. 1996. 154 - 157.
- [3] Gaponov S V , Gusev S A , Platonov Y I , et al. Artificial multilayer reflective and selective elements of soft X-ray[J]. *Tech Phys Letters* , 1984 , **54**(4) :755.
- [4] Veretennikov A I , Danilehko K N. Methods of diagnostic for one time pulse radiation[R]. Moscow: Institute of Pulsed Technology , 1999.
- [5] Henke B L , Lee P , Tanaka T J , et al. Low-energy X-ray interaction coefficients: photoabsorption , scattering , and reflection: $E = 100 - 2000$ eV $Z = 1 - 94$ [J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* , 1982 , **27**(1) :144.
- [6] Young F C , Stephanakis S J , Scherrer V E. Filtered X-ray diodes for imploding plasma experiments[J]. *Rev Sci Instrum* , 1986 , **57** : 2174.
- [7] Vikhrev V V , Baronova E O. Electron beam generation in the strong local electric fields of Z-pinch discharges[A]. Proc of BEAMS 98[C]. Haifa , Israel , 1998 , **2**:666.

Dynamics of soft X-ray radiation spectra of imploding wire arrays on the S—300 pulsed power generator

CAI Hong-chun¹ , Chernenko A S² , Korolev V D² , Ustroev G I² , Ivanov M I²

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China;

2. Kurchatov Institute, Moscow, Russia)

Abstract: The dynamics of radiation spectra of fast Z-pinch plasmas was studied on the S—300 machine. By means of the polychromator APCH—10, X-ray spectra of imploding wire arrays were measured in the range of 50 ~ 1 500 eV. The main part of the radiation power falls at the spectral interval 60 ~ 220 eV. The radiation spectrum is described by the Planckian-spectrum with the “black-body” temperature of 40 ~ 50 eV. For the part of radiation with more than 500 eV energy of quanta, remarkable deviation from the Planckian-spectrum is observed. The deviation seems to be the result of the appearance of hot plasma spots, existence of characteristic spectral lines in the range of 1.5 ~ 2 keV, and bremsstrahlung losses of the accelerated electrons.

Key words: Z-pinch; Wire arrays; Polychromator; Radiation spectrum of X-ray