

文章编号: 1001-4322(2006)08-1405-04

# 喷气 Z 箍缩 X 光辐射信号分析\*

李丰平<sup>1</sup>, 邓建军<sup>1</sup>, 邹晓兵<sup>2</sup>, 张贵新<sup>2</sup>, 韩 旻<sup>2</sup>, 王新新<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 清华大学 电机系 气体放电与等离子体实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 在清华大学喷气 Z 箍缩平台上进行了对 Ne 气的箍缩软 X 射线诊断工作。该喷气装置由 4 个充电至 23 kV 的电容器并联组成, 总储能 4.5 kJ, 放电电流峰值 210 kA, 上升沿 2.5  $\mu$ s。实验中通过观测放电电流微分信号来观测箍缩聚焦的位置(波形的下凹尖峰点), 此尖峰也是 X 光辐射的时间分辨点。利用响应时间为亚 ns 量级的光敏半导体探测器(PIN)探头获得了 Ne 气箍缩时等离子体发出的软 X 射线信号, X 光辐射出现在放电电流微分信号突变点附近。一般来说, 多次箍缩会导致多次的 X 光辐射输出, 实验中的 X 光脉冲实际为多个等离子热点辐射叠加的结果, 单次箍缩所产生的 X 光辐射比多次箍缩所产生的 X 光辐射要强。对每次箍缩来说, 单个 X 光脉冲信号比多个 X 光脉冲信号的幅值要大。

**关键词:** 喷气 Z 箍缩; X 射线; PIN

**中图分类号:** O532 **文献标识码:** A

目前, 随着高温高密度等离子体物理的长足进展, 无论热核聚变、惯性约束聚变(ICF), 还是磁约束聚变领域都获得了可喜的成就<sup>[1-4]</sup>。由于等离子体的发射光谱中含有大量的关于等离子体温度、尺寸、密度和电离状态的参量, 通过 X 射线能谱、能谱强度的诊断可推断等离子体的电子温度、电子密度、电子密度梯度和等离子体不透明度等参数。对辐射 X 光的测量, 可以用来研究如何提高实验中 X 光的产额, 用来判断和调整装置的工作状态, 对改进负载结构和建设合适的脉冲功率装置也有着重要的参考价值。大量实验证明: 辐射光谱分析在确定实验室和天体物理现象的等离子体特性过程中是一种非常有用的诊断手段<sup>[5-6]</sup>。本实验是在清华大学喷气 Z 箍缩平台上完成的, 实验对 Ne 气 Z 箍缩辐射的 X 射线做了测量, 既为我们判断和调整装置的工作状态提供了一定的依据, 又为下一步使用光敏半导体探测器(PIN)阵列测量 Z 箍缩 X 射线能谱打下了基础。实验中我们获得了 Ne 气的喷气 Z 箍缩等离子体发出的软 X 射线信号, 并对信号进行了初步分析和讨论。

## 1 实验装置

### 1.1 喷气 Z 箍缩平台

图 1 是清华大学喷气 Z 箍缩实验平台示意图, 该装置由 4 个电容器(总电容 16  $\mu$ F)并联组成, 每个电容器被充电至 23 kV, 总储能 4.3 kJ。放电电流峰值 210 kA, 上升沿约 2.5  $\mu$ s。图 2 为该平台喷嘴示意图, 实验中

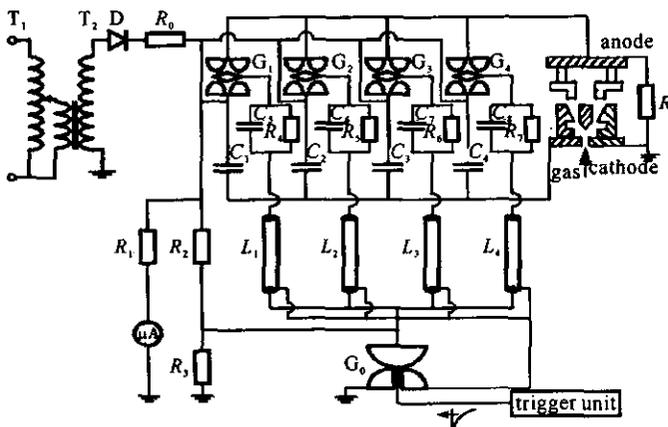


Fig. 1 Sketch map of Z-pinch device  
图 1 喷气平台 Z 箍缩平台示意图

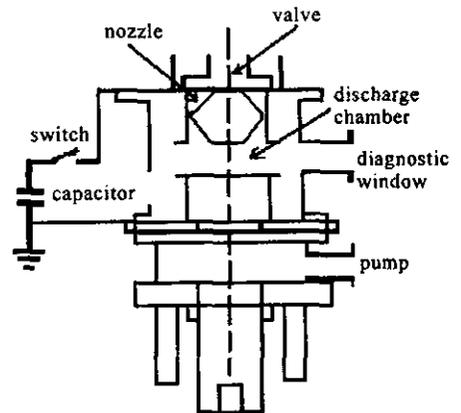


Fig. 2 Sketch map of gas puff nozzle  
图 2 喷气 Z 箍缩平台喷嘴示意图

\* 收稿日期: 2005-09-19; 修订日期: 2005-12-12  
基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10035030)  
作者简介: 李丰平(1978—), 男, 硕士, 主要从事脉冲功率及 Z 箍缩等离子体物理研究工作; erwin@ustc.edu.

所使用负载气体为 Ne 气, 喷气系统储气室气压  $3 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$  Pa, 气流外圈直径为  $\phi 36$  mm, 内径为  $\phi 30$  mm, 阴阳极之间间隙高度 12 mm, 喷嘴气流速度大于 4 个马赫。

### 1.2 PIN 测量系统

PIN 的工作原理是: 当半导体、绝缘体在吸收辐射后, 产生的电子-空穴对在电场作用下作定向运动形成电流。PIN 具有体积小、入射窗薄、产生电子-空穴对平均消耗的能量低、并在一定意义上具有电荷放大作用; 其时间响应快(一般为亚 ns 量级), 灵敏度高(约  $10^{-4}$  A/W), 软 X 光区域能量平响应特性好等优点, 因而得到了广泛应用。

我们采用的是偏压 45 V, 敏感区域面积  $1 \text{ mm}^2$ , 响应时间 0.5 ns 的 PIN 探测器, 前置滤片采用的是 6.4  $\mu\text{m}$  的铝滤片。PIN 的敏感曲线如图 3 所示<sup>[7-8]</sup>。测试电路如图 4 示。信号采集使用带宽为 500 MHz 的数字示波器。

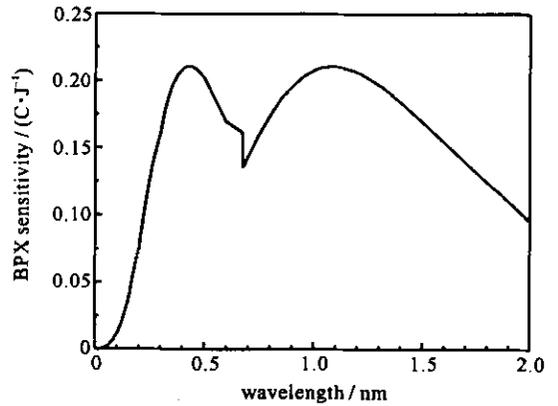


Fig. 3 BPX sensitivity of PIN  
图 3 PIN 的光学灵敏度曲线

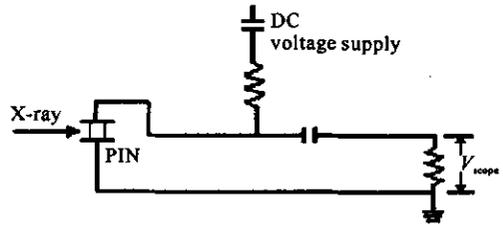


Fig. 4 Sketch map of measurement circuit  
图 4 测量电路示意图

## 2 实验数据分析

为了确认所获得的信号是 X 光信号。我们采用了下面 3 种验证方法: PIN 探头加偏压, 放电但不让气体箍缩(结果见图 5); PIN 探头不加偏压, 并放电让负载气体箍缩(结果见图 6); PIN 探头加偏压, 放电让负载气体箍缩(结果见图 7)。进行了多次重复实验, 结果发现, 除了第 3 种情况 PIN 探头有信号外, 前两种情况下 PIN 探头均无信号, 又通过比较信号出现时间、幅度、脉宽, 进一步确认我们所测到的为可信的 X 光信号。图中 CH 1 为放电电流  $di/dt$  信号, 有一个比较明显的下凹尖峰, 出现此尖峰的原因是: 装置的主放电回路是一个欠阻尼 RLC 电路, 其电流波形是一个衰减的正弦波, 而在箍缩阶段, 等离子体壳层的阻抗并不是常数, 而是随电流壳层的移动而增大的, 所以在箍缩停滞时由于等离子体被压缩, 其阻抗突增, 放电电流突然下降, 导致  $di/dt$  信号产生一个下凹尖峰。这个尖峰是箍缩焦点形成的特征, 我们用该尖峰来监测箍缩点的位置, 此尖峰也是 X 光辐射的时间分辨点。尖峰的大小也在一定程度上反映了箍缩的好坏。

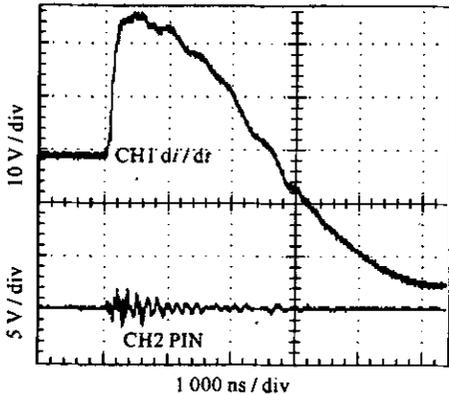


Fig. 5 No pinch with voltage on PIN  
图 5 PIN 有偏压但负载无箍缩

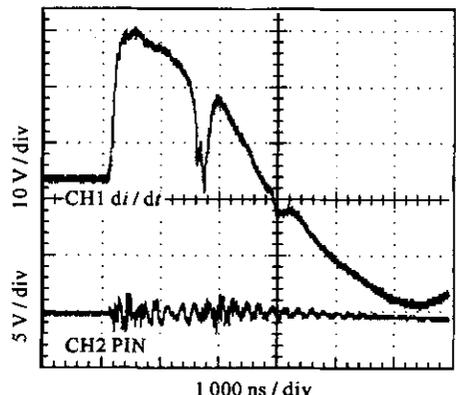


Fig. 6 Pinch but no voltage on PIN  
图 6 PIN 无偏压负载有箍缩

实验中我们发现 X 光信号的幅值和箍缩好坏有很大的关系, 调整装置喷气与放电之间的时延时间, 可以获得单次箍缩和多次箍缩的情况。出现多次箍缩是由于气体第一次箍缩、停滞、崩溃时, 放电电流还没有达到其峰值, 因此, 出现了第二次, 甚至多次箍缩。又因为喷气的不均匀性, 箍缩时的不对称性, 即在保持装置运行外部条件不变的情况下, 箍缩气体等离子体热点的出现也是具有很大的时间分散性, 所以每一次箍缩获得的 X 光信号的脉宽和幅值也是不一样的。图 7 所示为较为典型的一次箍缩, 实验中也有以下 3 种情况: 单次箍

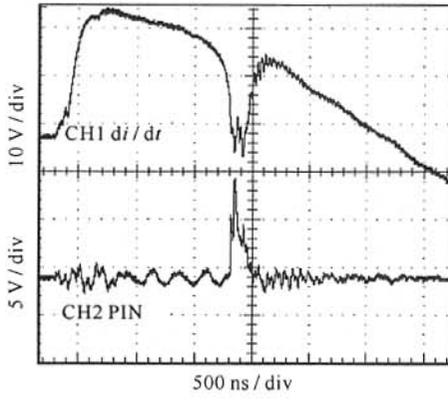


Fig. 7 A typical pinch and its X-ray signal  
图 7 典型的箍缩及其 X 光信号

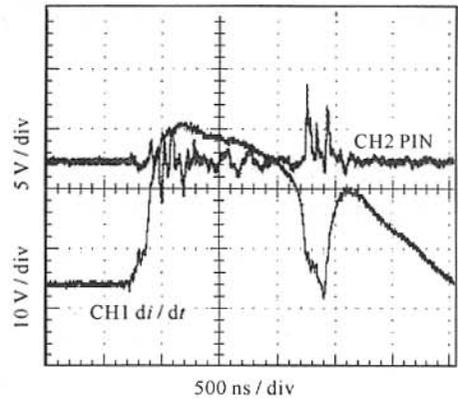


Fig. 8 One pinch with 3 X-ray radiation pulses  
图 8 1 次箍缩 3 次 X 光脉冲

缩,多个 X 光信号(结果见图 8);多次箍缩多个 X 光信号(结果见图 9);多次箍缩但有些箍缩产生的 X 射线脉冲却少到无法探测到的(结果见图 10)。一般来说,单次箍缩产生的 X 光辐射比多次箍缩产生的 X 光辐射要强,对一次箍缩来说,单个 X 光脉冲的辐射要比多个 X 光脉冲辐射的幅值大。这是因为单次箍缩时电能被更集中地转化为辐射能,箍缩所产生的等离子体温度也更高,热点也就更多,因此辐射信号也就更强;同样道理,单个 X 光脉冲表明此次箍缩所产生的等离子热点在时间上比较集中,而多次脉冲则表明等离子热点出现时间的较为分散,从而形不成信号的叠加。

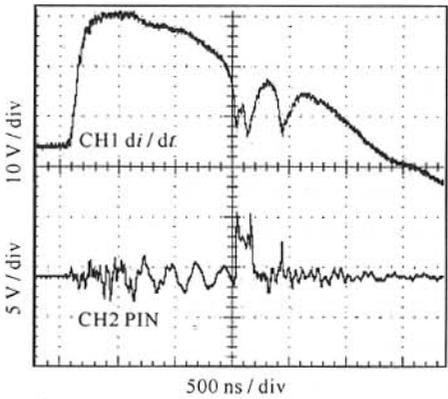


Fig. 9 3 pinches and 3 X-ray radiation pulses  
图 9 3 次箍缩 3 次 X 光辐射脉冲

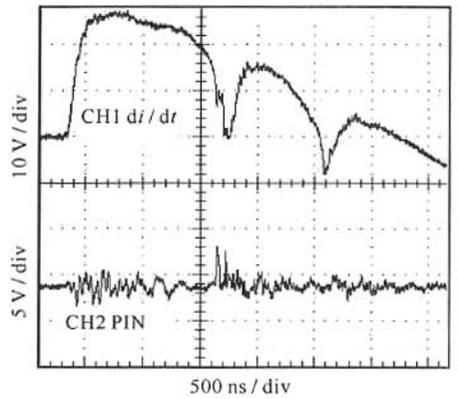


Fig. 10 2 pinches with 1 X-ray radiation pulse  
图 10 2 次箍缩 1 次 X 光辐射脉冲

实验中每个 X 光脉冲实际为很多个等离子热点发出 X 光脉冲的叠加,因此要获得单个热点的 X 光脉冲信号是比较困难的,我们调整喷气气体压力和装置工作状态,获得了一次辐射 X 光剂量较少的箍缩,X 光信号如图 11 所示,箍缩点附近 X 光信号如图 12 所示。从图 12 中可以看出,该箍缩有两个时间比较近但可以分离的 X 光信号出现,每个 X 光脉冲信号半高宽为 10~20 ns,从信号形状,脉宽和幅度来判断,可能是两个时间分散

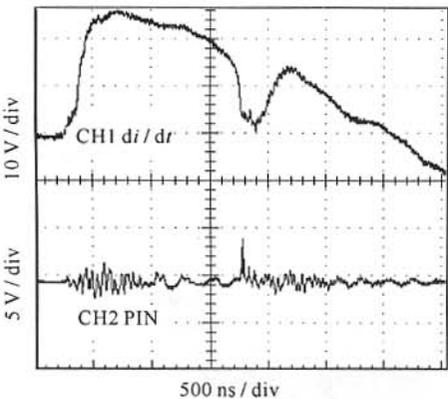


Fig. 11 A pinch and its X-ray radiation  
图 11 1 次箍缩及 X 光辐射

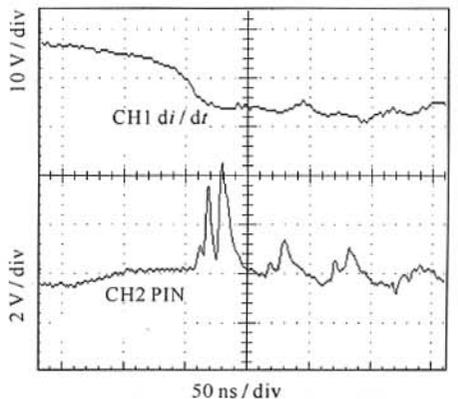


Fig. 12 X-ray radiation pulses at pinch point  
图 12 箍缩点附近的 X 光信号

的等离子体单热点 X 光辐射脉冲。但要确定是否为单个热点的辐射脉冲,还需要下一步工作中对喷气 Z 箍缩辐射进行时间分辨的 X 光照相。

### 3 结 论

实验中为了获得较好的信号波形,需提高信噪比:首先要调节好装置的运行,使箍缩达到最佳状态,提高 X 光的转换效率;其次,必须做好探头、电缆及示波器的屏蔽;最后,装置及测量系统必须较好地接地以尽量减少放电时的零电位漂移所产生的影响。通过这些实验波形我们可以看到,等离子体热点辐射 X 光的脉宽为 10~20 ns。一般来说测得的 X 光信号波形为多个等离子体热点辐射的叠加效果,单次箍缩所产生的 X 光辐射比多次箍缩所产生的 X 光辐射要强。对每次箍缩来说,单个 X 光脉冲信号比多个 X 光脉冲信号的幅值要强。

### 参考文献:

- [1] Cook D. Z, ZX and X-1: A realistic path to high fusion yield[C]//Proc of 12th IEEE Pulsed Power Conference. 1999;33-37.
- [2] Spielman R B, Deeney C, Chandler G A, et al. PBFA Z: A 60 TW/5 MJ Z-pinch driver[C]//Dense Z-pinch 4th International Conference. 1997.
- [3] Liberman M A. Physics of high-dense Z-pinch plasmas[M]. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [4] Yonas G. Fusion and the Z-pinch[J]. *Scientific American*, 1998, **279**:40-45.
- [5] 孙景文. 高温等离子体 X 射线谱学[M]. 北京:国防工业出版社, 2003. (Sun J W. High temperature plasmas X-ray spectroscopy. Beijing: National Defence Industry Press, 2003)
- [6] 孙景文. X 射线与真空紫外辐射源及其计量技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2001. (Sun J W. X-ray and VUV radiation sources and their metrology. Beijing: National Defence Industry Press, 2001)

## X-ray radiation of neon gas puff Z-pinch

LI Feng-ping<sup>1</sup>, DENG Jian-jun<sup>1</sup>, ZOU Xiao-bing<sup>2</sup>, ZHANG Gui-xin<sup>2</sup>, HAN Min<sup>2</sup>, WANG Xin-xin<sup>2</sup>

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

2. *Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

**Abstract:** X-ray radiation produced by a small gas puff Z-pinch device in Tsinghua University was detected. This device was powered by a 16  $\mu$ F capacitor bank charged to 230 kV, corresponding to a storage energy of 4.3 kJ, the discharge current reached its peak value of 210 kA at a time of 2.5  $\mu$ s. The X-ray radiation from a Neon gas puff Z-pinch was measured with a sub-ns rise time PIN detector. The differential signal of discharge current was recorded to determine the pinch point, when the X-ray radiation was emitted. The signals were analyzed and discussed in this paper.

**Key words:** Gas puff Z-pinch; X-ray; PIN