

# 高强度脉冲软X光源

罗承沐 李成榕 富耀宗 杨津基

(清华大学电机工程系)

**摘要:** 本文介绍清华大学电机工程系研制的一种高强度软 X 光源, 这种光源是由喷气式 Z 箍缩等离子体产生的。阐述了 Z 箍缩装置的工作原理, 研究了装置的运行参数 (如充电电压、充气密度等) 对软 X 射线发射的影响。用热电堆测量了 X 射线的产额。并介绍了用无窗 XRD (X 射线二极管) 测量脉冲 X 射线的初步结果, 光源处的 X 射线总能量超过 100J, 发射时间约 100ns, 其功率达  $10^9$ W 以上。

## 一、引 言

近年来强软 X 射线的产生和应用取得了很大进展。人们最感兴趣的软 X 射线应用有<sup>[1]</sup>: X 射线光刻术<sup>[2]</sup>、X 射线显微术<sup>[3]</sup>、表面退火<sup>[4]</sup>、X 射线衍射分析、扩展的 X 射线吸收精细结构分析 (EXAFS) 及 X 射线激光的激发等<sup>[5,6]</sup>。用普通的转动阳极靶的 X 射线机, 其效率很低, 产生的软 X 射线是很少的。现在较为公认的产生强软 X 射线的方法有:

1. 激光等离子体。用强激光打靶产生等离子体, 从此等离子体辐射出 X 射线。装置复杂, 效率很低。
2. 同步辐射加速器产生软 X 射线, 占地大, 造价高。
3. 喷气式 Z 箍缩等离子体。用放电的方法产生等离子体, 装置和运行都简单, 造价低、占地小。

喷气式 Z 箍缩等离子体所产生的 X 射线, 其能谱范围很宽 ( $10\text{eV} < h\nu < 10\text{keV}$ ), 大型的装置, 如 Blackjack 5, 每次放电产生的软 X 射线的总能量达  $50\text{kJ}$ <sup>[7]</sup>。小型装置, 每次放电产生的软 X 射线能量约  $200\text{J}$ <sup>[8]</sup>。这种装置发射的 X 射线的持续时间约 100ns, 因此软 X 射线的功率是很大的, 为  $10^9 \sim 5 \times 10^{11}\text{W}$ 。

我们有一小型的喷气式 Z 箍缩装置, 在其上进行了一些诊断, 包括用激光干涉术测量等离子体运动、用 PIN 和热电堆测 X 射线按时间的变化规律和总产额 (Yield)、用 XRD (无窗 X 射线二极管) 测 X 射线的时间变化及总产额。这个装置运行稳定, 发射的 X 射线的光子能量小于  $6\text{keV}$ , 每次放电产生的 X 射线总产额超过 100J, 持续时间 100ns, 功率达  $10^9\text{W}$ 、X 射线发射源为一小圆柱体, 其直径  $100 \sim 300\mu\text{m}$ , 长度为  $0.2 \sim 1\text{mm}$ 。

## 二、实验装置

喷气式 Z 箍缩等离子体装置主要是由快速充气阀、超音速喷嘴, 放电电极和电容器组所组成。图 1 是装置的结构示意图和电路图。

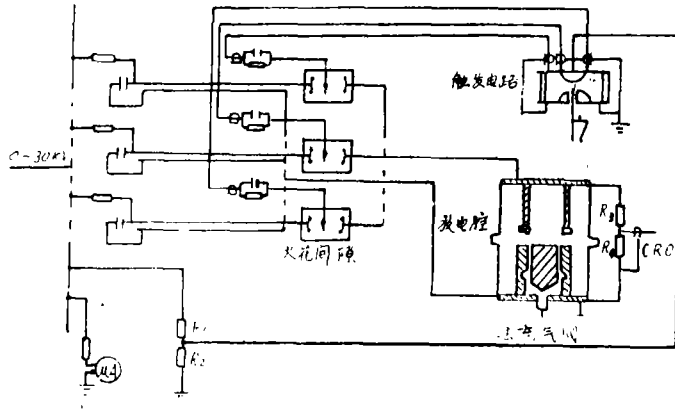


图1 喷气式Z箍缩装置的电路图

在充气阀电路中，一个  $8.8\text{kA}$  的脉冲电流通过充气阀的线圈，使充有 5 个大气压氩气的充气阀迅速打开，气体通过喷嘴进入真空为  $8 \times 10^{-6}\text{Torr}$  的放电室，在两电极间形成一个空心圆柱状的气流。同时在外加高电压的作用下，两电极通过圆柱形气体柱放电，而形成大电流脉冲放电。所产生的等离子体受洛伦兹力的作用而发生径向箍缩，产生高密度的等离子体。这样，放电可以被限制在气体柱的范围内，等离子体不与放电腔壁相接触，可以避免传统 Z 箍缩的一些缺点。在此装置中，喷嘴同时作为阴极并接地，中空圆柱形的阳极被固定在它的对面。形成 Z 箍缩所需要的冲击大电流是由电容器组来供应的。电容器组是由 3 台电容器 ( $4\mu\text{F}/50\text{kV}$ ) 并联而成，正常的运行电压为  $25\text{kV} \sim 30\text{kV}$ 。调整喷气时刻和放电时刻之间的时延，可以调整电极间的气体密度，使最后的箍缩出现在电流最大值附近，把最大的电能输送给气体负载，以获得较大的转换效率。

### 三、X射线发射的实验研究

#### 1. X射线的发射与等离子体的箍缩

为了研究等离子体的箍缩，我们同时拍摄了等离子体收缩时的  $dI/dt$  波形和 X 射线输出波形。 $dI/dt$  波形是采用罗可夫斯基线圈来测量的，其响应时间小于  $5\text{ns}$ 。X 射线波形是用金硅面垒半导体 X 射线探测器测量的，其响应时间小于  $3\text{ns}$ 。在  $dI/dt$  波形上出现突降的期间 X 射线探测器输出一个脉冲。 $dI/dt$  波形上的突降反映了等离子体的箍缩引起了等离子体阻抗的变化，X 射线的脉冲说明了等离子体被加热到了较高的温度。从  $dI/dt$  波形上还可以测量出等离子体的最后箍缩相对于起始放电的时间  $t$ 。大量的试验结果表明，等离子体箍缩的重复性是较好的。

#### 2. 起始气体密度对 X 射线产额的影响

为了研究起始气体密度对等离子体中 X 射线发射剂量的影响，我们利用快速电离探头对喷嘴出口的中性氩气气流的时间及空间分布进行了测量。图 2 是距喷嘴出口  $5\text{mm}$  处起始气体密度沿径向的分布。

图 3 是我们在实验中测得的软 X 射线产额与起始气体密度的关系。软 X 射线的产额是用热电堆脉冲 X 射线能量计来测量的。它可以测量能量大于  $2\text{keV}$  的 X 射线总能量。测量时所运行的电压为  $25\text{kV}$ 。从图中可以发现，X 射线的输出随着起始气体密度的变化而改变。当

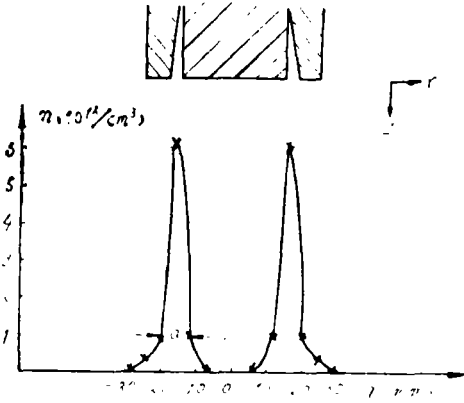


图2 气体密度沿径向的分布 ( $Z = 5\text{mm}$ )

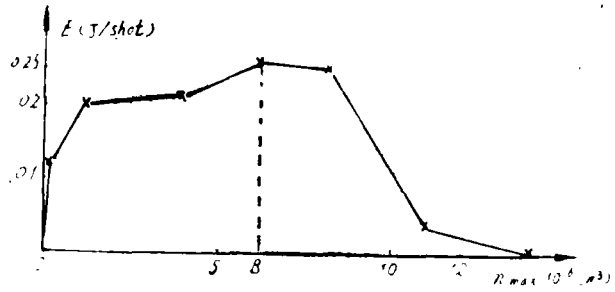


图3 起始密度和X射线输出的关系

气体的起始密度大于  $1.5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  时, 没有X射线输出, 同时在  $dI/dt$  波形上也看不到陡峭的下降, 这说明等离子体的箍缩不好, 没有形成高密度的热等离子体。因此, 等离子体的箍缩是在一定的起始密度范围之内才出现的。

### 3. 施加电压对X射线产额的影响

了解所加电压与软X射线发射剂量的关系, 我们在起始气体质量为  $36.7\mu\text{g}/\text{cm}$  的条件下, 测量了不同电压下的X射线剂量。图4是测量结果。在计算总剂量时, 假设等离子体各向同性地发射X射线。图中每个点是5次实验结果的平均值。从图中可以看出, 随着电压的增加, X射线的输出剂量也迅速增加, 几乎成线性关系。因此, 增加运行电压, 也即增加运行电流是提高装置X射线产额的一条途径。图4中的软X射线输出剂量与国外同类小装量的测量结果是很接近的(光子能量在  $2\text{keV} < h\nu < 6\text{keV}$  的范围内)。

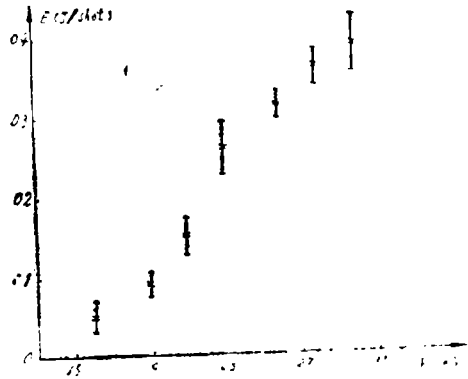


图4 所加电压和X射线输出的关系  
图中的  $I$  表示测量的分散性

### 4. 软X射线的发射区域

时间积分的X射线针孔照像被用来确定热等离子体在空间的位置和形状。所用针孔直径为  $30\mu\text{m}$ , 孔前加装有一块  $0.8\mu\text{m}$  厚的聚丙稀膜, 膜上镀有  $400\text{\AA}$  厚度的铝以遮挡住可见光。针孔照像机被封入真空室内, 利用这个针孔像机可以测量能量大于  $0.4\text{keV}$  的X射线的发射区域。从大量的针孔照片可以知道, 热等离子体都是一些小点, 热点的位置都在轴线附近, 热点之间彼此分开。每次箍缩所形成的热点大小和形状各不相同, 热点的长度在  $0.2\text{mm} \sim 1\text{mm}$  范围内, 热点的直径在  $100\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$  的范围内。热点的形状不规则, 有圆的还有长的。

为了研究热点所发出的X射线的能量范围, 我们在针孔像机前加装不同的滤片, 以滤掉不同能量的X射线。测量结果表明, 热点所发出的X射线能量小于  $6\text{keV}$ 。

### 5. 用XRD测量脉冲软X射线 ( $20\text{eV} < h\nu < 2\text{keV}$ )

喷气式Z箍缩等离子体装置不仅可以产生软X射线,而且还可以产生大量的超软X射线。我们用X射线二极管(XRD)对装置所发射的超软X射线进行了测量。XRD的响应时间为300ps,铝阴极的有效接收面积为 $2.5\text{cm}^2$ ,它可以测量 $20\text{eV} < h\nu < 2\text{keV}$ 的X射线。此装置所发生的超软X射线的脉冲宽度为100ns左右。根据我们的测量结果以及XRD的灵敏度和参考文献<sup>[9]</sup>中的能谱曲线,我们对此装置所发出的超软X射线进行了估算。其估算结果为每次放电可以产生约100J以上的超软X射线。

#### 参 考 文 献

- [1] J.S.Pearlman et al., A Bright Pulsed X-Ray Source for Soft X-Ray Research and Processing Application, *Radiat. Phys. Chem.*, 25(1985)709
- [2] J.S.Pearlman et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, 19(1981)1190
- [3] J.Bailey et al., *Appl. Phys. Lett.*, 40(1982)33
- [4] T.W.Sigmon et al., *Appl. Phys. Lett.*, 41(1982)452
- [5] J.Davis et al., *IEEE, Trans. on Plasma Science*, 16(1988)469
- [6] J.Davis et al., Z-Pinch Neon-like X-Ray Laser, *ibid.*, p.482
- [7] M.Gersten et al., *Phys. Rev.*, A33(1986)477
- [8] I. Okada et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, B4(1986)243
- [9] J.Bailey, Effect of Radiation Cooling and Plasma Atomic Number on Z-Pinch Dynamics, Ph.D. Dissertation, University of California, Irvine, 1983

### High Intensity Pulsed Soft X-ray Sources

Luo Chengmu Li Chengrong Fu Yaozhong Yang Jinji

#### Abstract

A high intensity soft X-ray source has been developed in this laboratory by using gas puff Z-pinch plasma. The working principles are described and the dependence of X-ray radiation on operating parameters (such as charged voltage, gas pressure, etc.) are discussed. The X-ray irradiation rate are tested by using heat-electric stack, and the measurements of pulsed X-ray using XRD show that the total energy of X-ray is greater than 100 J, the irradiating time is about 100 ns, and the power is greater than  $10^9$  W.