

文章编号: 1001-4322(2008)01-0071-04

皮秒分幅相机在 Z 箍缩实验光谱测量中的应用*

陈进川, 许泽平, 夏广新, 章法强

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 在 Angara-5-1 装置进行的中俄联合 Z 箍缩实验中, 通过在皮秒分幅相机针孔上粘贴不同种类和厚度的滤片, 并利用皮秒分幅相机的光谱响应特性, 对丝阵靶实验中产生的强脉冲软 X 光进行拍照, 获得了各种负载不同能段的 X 光分幅像。通过对皮秒分幅相机和 2.3 μm 厚 formvar 膜滤片的光谱响应特性分析, 以及对同一时刻粘贴 2.3 μm 厚 formvar 膜滤片和未粘贴 2.3 μm 厚 formvar 膜滤片两幅图像径向辐射强度波形的对比, 确定出获取的 X 光辐射图像的能谱范围: 不加 formvar 膜滤片的 X 光辐射图像光子能量大于 70 eV, 加 formvar 膜滤片的 X 光辐射图像光子能量大于 150 eV, 同时还确定出图像各部分的光子能量分布。

关键词: Z 箍缩; 皮秒分幅相机; 光谱灵敏度; 径向辐射强度

中图分类号: O536; O434.12 **文献标识码:** A

快过程 Z 箍缩(Z-pinch)过程中的不稳定性会使其物理过程异常复杂, 给理论模拟 Z-pinch 过程带来困难, 有关 X 光辐射的数值模拟目前只能依据实验结果来进行修正。据报道, 美国 Sandia 实验室已经建立了相关测量设备对 Z-pinch 过程不稳定性进行研究^[1], 实验获得了一批等离子体流动和 X 光辐射时空分辨图像数据。多年来, 快速 Z-pinch 的研究工作集中于优化 1~5 keV 谱段中 X 射线的能量和功率输出, 为辐射与物质相互作用研究提供 X 射线源^[2]。在 Z-pinch 实验诊断中, 能谱测量是判断辐射源是否平衡辐射的重要诊断手段^[3], 可以为研究 X 射线辐射特性和能量转换机制提供实验依据, 并为评估负载与装置的匹配质量、优化负载设计以及校验理论计算数值模拟程序提供参数^[4-5]。由于实际能谱测量的是多能点(或多窄能带)处的 X 辐射能通量密度的时间谱, 要求测量系统具有满足要求的能量分辨能力和时间响应能力。国内外一般采用光栅谱仪、晶体谱仪等测量手段进行能谱测量, 但操作复杂、数据处理繁琐。而软 X 射线 MCP 选通皮秒分幅相机是兼有时间和空间分辨特性的图像测量高速诊断设备, 并具有 0.1~10.0 keV($\lambda=0.12\sim12.43$ nm)的软 X 射线能谱响应范围, 操作较为简便。本文利用软 X 射线 MCP 选通皮秒分幅相机的时空分辨和光谱响应特性, 选定合适的针孔直径, 配以不同厚度的 formvar 膜滤片, 获得了不同能段的 X 光皮秒量级分幅像。通过对皮秒分幅相机光谱响应特性的分析和对同一时刻两幅 X 光辐射图像径向辐射强度波形的对比, 确定出所获取的 X 光辐射图像及图像各部分的光子能量分布。

1 实验装置及测量系统的主要性能指标

1.1 实验装置及靶室布局

实验在世界三大 Z 箍缩装置之一的 Angara-5-1 装置上进行, 其运行的主要参数为^[6]: 负载电流 2.5~3.6 MA; 电流脉冲前沿 70 ns; 有效的驱动质量约 300 μg (负载长度 15 mm)。Angara-5-1 装置由 8 个脉冲功率模块并联构成, 靶室设计有水平测试通道 8 个。皮秒分幅相机安装在靶室水平位置进行拍摄(负载的径向)。

1.2 测量系统

软 X 射线 MCP 选通皮秒分幅相机测量系统主要由针孔阵列、MCP 分幅相机、CCD 相机、电控箱、真空系统和计算机数据采集系统等组成, 是用于时间分辨等离子体 X 光辐射图像测量的高速诊断设备, 可在数 ns 内连续拍摄多幅图像, 画幅尺寸最大可为 6 mm \times 35 mm, 空间分辨率可达到 25 mm^{-1} , X 射线能谱响应范围 0.1~10.0 keV ($\lambda=0.12\sim12.43$ nm)。皮秒 MCP 门控选通 X 射线分幅照相系统中的皮秒电控箱被触发后输出 4 路高压脉冲, 脉冲的半高宽度 260~330 ps, 每两路脉冲的时间间隔(分幅相机相邻两微带的像时间间隔)0~2.5 ns 可调, 从而获取丝阵负载 Z-pinch 内爆过程中各个时间段(特别是内爆聚心时刻)的 8 幅 ps 量级

* 收稿日期: 2007-05-14; 修订日期: 2007-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10035030)

作者简介: 陈进川(1974—), 女, 学士, 从事 Z-pinch 等离子体脉冲辐射图像测量研究; zywjc929@163.com。

分幅像(利用针孔阵列相机使每条金阴极成两幅像,两幅像之间相差 130 ps,相对于数 ns 的拍摄过程,可近似认为是同时刻)。图 1 为实验皮秒分幅相机的时间分辨结构示意图。从图中可看出:每幅像的曝光时间为 50 ps,分幅相机相邻两微带的像时间间隔根据需要依次调整为 1.5, 2.0, 2.5 ns, 整个图像记录时间为 6 ns。

1.3 系统分辨率及灵敏度调节

皮秒分幅相机测量系统的灵敏度调节可通过调整针孔尺寸、滤片厚度来实现。实验中 X 射线源(靶心)到针孔板的距离为 2.095 m,针孔板到 MCP 分幅相机(金阴极)的距离为 1.047 m,针孔尺寸选定为 $\phi 100 \mu\text{m}$,高低真空的隔膜为 $0.9 \mu\text{m}$ 的 formvar 膜,一系列针孔前粘贴薄膜滤片,滤片粘贴位置如图 2 所示,滤片选用厚度为 $2.3 \mu\text{m}$ 的 formvar 膜;另一列不加薄膜滤片,拍摄到 8 幅皮秒分幅像(利用针孔阵列使每条金阴极成两幅像)。

系统空间分辨率 f 取决于针孔尺寸、图像放大倍数、分幅管分辨率及针孔的衍射效应,即

$$f = \sqrt{d^2(1 + 1/M)^2 + \lambda^2 L^2/d^2 + c^2} \quad (1)$$

式中: d 为针孔直径, μm ; M 为图像放大倍数; λ 为 X 射线的波长, μm ; L 为针孔到金阴极的距离, μm ; c 为分幅管的分辨率, μm 。由于金阴极的响应范围为 $0.1 \sim 10.0 \text{ keV}$ (波长范围为 $0.12 \sim 12.43 \text{ nm}$),针孔衍射项很小,可忽略。实验时针孔直径 $\phi 100 \mu\text{m}$,放大倍数 $1/2$,分幅管的分辨率 $40 \mu\text{m}$,则系统的空间分辨约为 $300 \mu\text{m}$ 。

2 实验方法

实验中采用 $0.9 \mu\text{m}$ 厚 formvar 真空挡板膜将靶室与 MCP 相机隔离开来(实验过程中皮秒分幅相机中的 MCP 分幅相机需要 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ Pa}$ 中高真空测试工作环境),且针孔板上两列针孔:一排针孔前粘贴 $2.3 \mu\text{m}$ 厚 formvar 膜滤片,一排针孔前不粘贴 $2.3 \mu\text{m}$ 厚 formvar 膜滤片,获取了丝阵负载 Z-pinch 内爆过程(特别是内爆聚心时刻)不同软 X 光能段的 8 幅 ps 量级分幅像。通过对皮秒分幅相机在同一时刻两种状态下光谱响应特性的对比和同一金阴极上所成两幅 X 光辐射图像径向辐射强度波形的对比,就可以确定出所获取的 X 光辐射图像及图像各部分的光谱范围。

由于软 X 射线 MCP 选通皮秒分幅相机选择 Au 作为阴极材料,光阴极的灵敏度随厚度变化,故本皮秒分幅相机的光阴极采用最佳厚度 30 nm ,阴极以透射方式工作^[7]。图 3(a)和(b)分别为 $0.9 \mu\text{m}$ 厚 formvar 膜和 $2.3 \mu\text{m}$ 厚 formvar 膜的质量吸收系数曲线。图 4 为实验中两种状态下皮秒分幅相机的光谱响应曲线,图 5 则为上述两种状态下皮秒分幅相机光谱响应比值曲线(未加滤片的光谱响应曲线与粘贴滤片的光谱响应曲线中

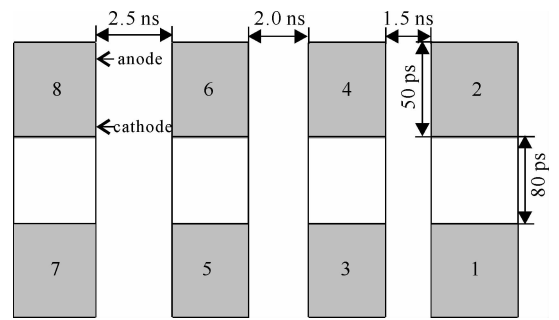


Fig. 1 Time-resolved structure abridged general view of picosecond-frame camera

图 1 皮秒分幅相机时间分辨结构示意图

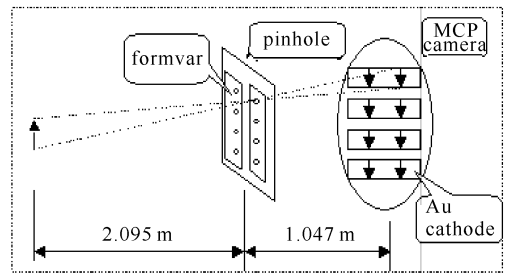


Fig. 2 Abridged general view of the imaging system

图 2 成像系统示意图

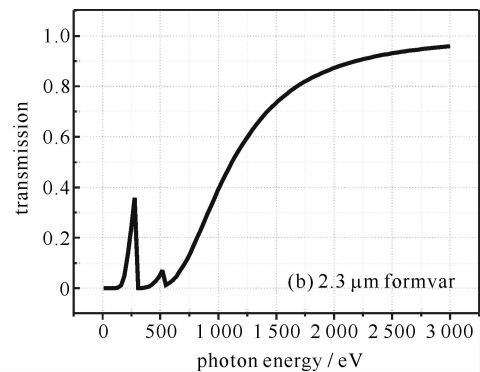
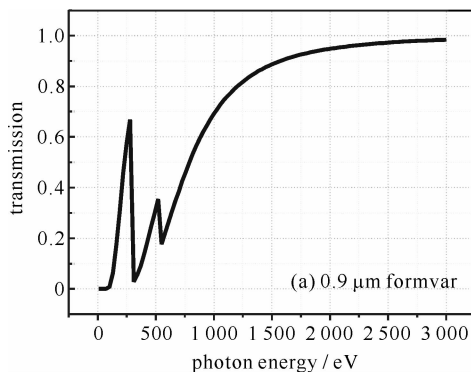


Fig. 3 Mass absorption coefficient curves of the filters

图 3 滤片质量吸收系数曲线

的值之比得到),可以用来确定所获取的 X 光辐射图像及图像各部分的光谱范围。

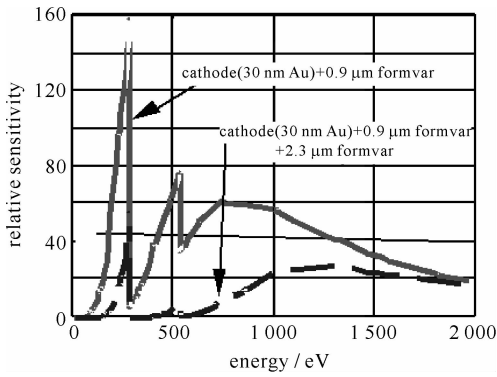


Fig. 4 Spectral response curves of picosecond-frame camera

图 4 皮秒分幅相机光谱响应曲线

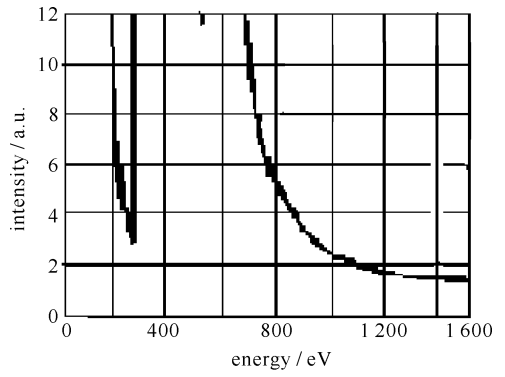


Fig. 5 Relation of spectral responses of picosecond-frame camera

图 5 皮秒分幅相机光谱响应比值曲线

3 实验结果

采用大小为 $\phi 100 \mu\text{m}$ 的针孔对丝阵靶的内爆聚心过程进行了研究。图 6 为 4080 次(俄方 60 根单层钨丝阵,丝直径 $\phi 6 \mu\text{m}$,丝阵直径 $\phi 12 \text{ mm}$,丝阵高 15 mm)聚心阶段皮秒分幅像数据,图中(a)~(d)为针孔前无滤片,(e)~(f)为针孔前粘贴 $2.3 \mu\text{m}$ 厚 formvar 膜滤片;“-”表示位于 X 光峰时刻(作为零点)之前,“+”表示位于 X 光峰时刻之后。从图中可看出,在 X 光峰前 3.6 ns (-3.6 ns)到峰前 0.1 ns (-0.1 ns)的时间内辐射是逐渐增强的,且两端的辐射发生时间较早。根据图 3 可确定出图 6(a)~(d)的能量范围属于大于 70 eV 能段,图 6(e)~(f)的能量范围属于大于 150 eV 能段。

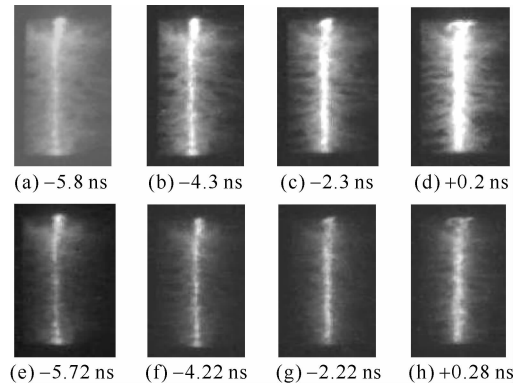
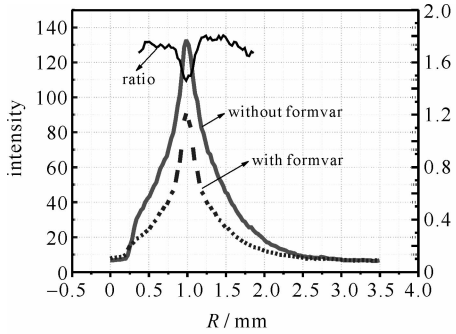


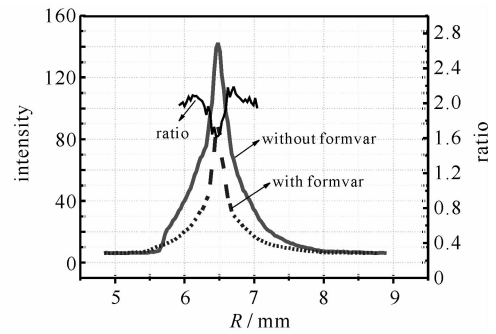
Fig. 6 Images obtained by picosecond-frame camera for shot 4080

图 6 4080 次皮秒分幅像数据

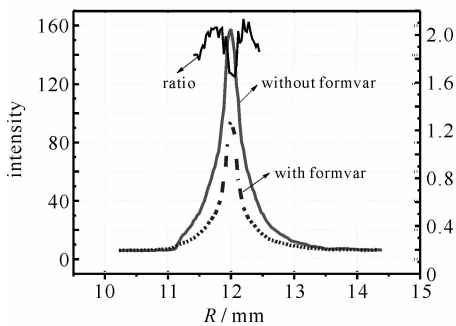
图 7 为 4080 次 8 幅皮秒分幅像所对应的 X 光图像径向辐射强度轮廓曲线。



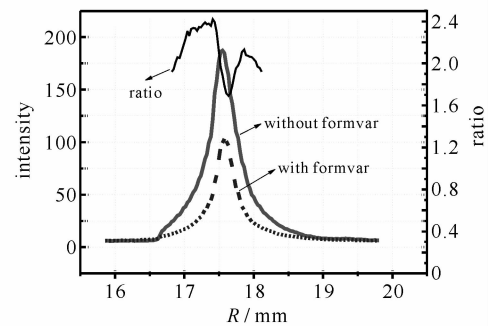
(a) radial profiles of images (a) and (e) in Fig. 6



(b) radial profiles of images (b) and (f) in Fig. 6



(c) radial profiles of images (c) and (g) in Fig. 6



(d) radial profiles of images (d) and (h) in Fig. 6

Fig. 7 Radial radiation intensity profiles of X-ray images

图 7 X 光图像径向辐射强度轮廓曲线

根据图 7: X 光峰后 0.2 ns(+0.2 ns)时刻拍摄的皮秒分幅像最接近等离子体箍缩到心时刻,此时 pinch 区直径为 0.5~1.0 mm,相应的光子能量最高。由图 7(d)相对于这一区域的值为 1.65~2.00,对应图 6 可得这一区域光子能量范围为 1 050~1 100 eV;而在 0.5~1.0 mm 直径范围之外的区域,光子能量范围小于 1 050 eV。

4 结 论

利用软 X 射线 MCP 选通皮秒分幅相机,配合不同种类、不同厚度的滤片(具有不同的 K 吸收边)可以获得不同软 X 光能段的皮秒分幅像。根据皮秒分幅相机自身的光谱响应特性和滤片的光谱响应特性,可以确定拍摄到的 X 光辐射图像的能谱范围和图像各部分的光子能量分布,这为光谱诊断提供了一种新的有效途径,并有助于认识 X 光的辐射机制。该方法在 Angara-5-1 装置中俄 Z-pinch 联合实验中得到了初步应用。

参考文献:

- [1] Rochau G A, Derzon M S, Chandler G A, et al. Design of the PST: a diagnostic for 1-D imaging of fast Z-pinch power emissions[R]. SAND2000-1960C.
- [2] 徐荣昆,李正宏,郭存,等. Z-pinch 一维时空分辨 X 光辐射功率测量系统[J]. 物理学报, 2003, **52**(5):1203-1206. (Xu R K, Li Z H, Guo C, et al. 1-D imaging system for the diagnose of the Z-pinch X-rays radiation. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(5):1203-1206)
- [3] 刘庆兆. 脉冲辐射场诊断技术[M]. 北京:科学出版社, 1994:630-678. (Liu Q Z. The diagnosis technology of pulse radiation field. Beijing: Science Press, 1994:630-678)
- [4] 项志遯,俞昌旋. 高温等离子体诊断技术[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1982:142-154. (Xiang Z L, Yu C X. The diagnosis technology of high-temperature plasmas. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982:142-154)
- [5] 宁家敏,蒋世伦,徐荣昆,等. 强脉冲软 X 光辐照薄塑料闪烁体发光特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(7):1215-1218. (Ning J M, Jiang S L, Xu R K, et al. Linear luminescence for thin plastic scintillator under intense soft X-ray irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(7):1215-1218)
- [6] Xu R K, Li Z H, Ning J M, et al. X-ray radiation characteristics of nested-wire array implosion in Sino-Russian joint Z-pinch experiments on Angara-5-1[J]. *Chin Phys Lett*, 2005, **22**:413-415.
- [7] 孙景文. 高温等离子体 X 射线谱学[M]. 北京:国防工业出版社, 2003:250-253. (Sun J W. High temperature plasma X-ray spectroscopy. Beijing: National Defence Industry Press, 2003:250-253)

Exploratory research of spectral diagnosis on Z-pinch plasmas with picosecond-frame camera

CHEN Jin-chuan, XU Ze-ping, XIA Guang-xin, ZHANG Fa-qiang

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, P.O. Box 919-212, Mianyang 621900, China)

Abstract: In the Sino-Russian joint Z-pinch experiments on Angara-5-1 facility, the framing camera with an exposure time of several 10 picosecond was employed. By setting different kinds of filters of various thickness values before the pinholes of camera and using the spectral sensitivity of the camera, multi-frame X-ray images of wire arrays Z-pinch implosions in different energy ranges were obtained. By analysing the relationship between the intensity profiles of corresponding frames and the spectral sensitivity of the camera, it is allowed to estimate X-ray photon energy range in local areas of images. And it is determined that the spectral sensitivity of the picosecond-frame camera belongs to a range from 70 eV(without 2.3 μm formvar filter) and from 150 eV (with 2.3 μm formvar filter).

Key words: Z-pinch; Picosecond-frame camera; Spectral sensitivity; Radial radiation intensity