



一种用于Z箍缩实验的软X射线成像系统

周少彤 任晓东 黄显宾 徐强

Soft x-ray imaging system used for Z-pinch experiments

Zhou Shao-Tong Ren Xiao-Dong Huang Xian-Bin Xu Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 045203 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20200957

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200957>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Z箍缩动态黑腔形成过程MULTI程序一维数值模拟

One-dimensional numerical investigation on the formation of Z-pinch dynamic hohlraum using the code MULTI

物理学报. 2017, 66(21): 215201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.215201>

基于MULTI2D-Z程序的Z箍缩动态黑腔形成过程模拟

Simulation of forming process of Z-pinch dynamic hohlraum based on the program MULTI2D-Z

物理学报. 2017, 66(12): 125202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.125202>

Z箍缩动态黑腔驱动靶丸内爆动力学

Numerical studies on dynamics of Z-pinch dynamic hohlraum driven target implosion

物理学报. 2018, 67(2): 025203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171640>

软X射线激光背光阴影成像技术的空间分辨研究

Spatial resolution study of soft X-ray laser backlight shadow imaging technique

物理学报. 2018, 67(1): 015203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171124>

小型条纹管数值模拟及实验研究

Numerical calculation and experimental study on the small-size streak tube

物理学报. 2018, 67(18): 188501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180643>

双能X射线光栅相衬成像的研究

Research on dual energy grating based X-ray phase contrast imaging

物理学报. 2017, 66(1): 018701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.018701>

一种用于 Z 箍缩实验的软 X 射线成像系统

周少彤[†] 任晓东 黄显宾 徐强

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 脉冲功率重点实验室, 绵阳 621999)

(2020 年 6 月 22 日收到; 2020 年 8 月 19 日收到修改稿)

基于塑料闪烁体转换和光学条纹相机的方法建立了一套用于 Z 箍缩实验中的软 X 射线条纹图像诊断系统, 解决了以往实验中使用的 X 射线条纹相机易被电磁环境干扰以及相机电极部件易被实验产生的高速粒子损伤的问题. 诊断系统的光谱响应范围主要集中在 0.2—10 keV, 系统的空间分辨率经过理论评估小于 120 μm , 通过标定闪烁体对 X 射线的时间响应特性给出了系统的时间分辨率约为 1 ns. 诊断系统拍摄到了铝丝阵内爆等离子体的一维空间和时间分辨的 X 射线条纹图像, 给出了等离子体的内爆一致性和辐射均匀性等特征信息.

关键词: Z 箍缩, X 射线, 塑料闪烁体, 条纹相机

PACS: 52.58.Lq, 52.59.-f, 52.59.Qy, 52.77.-j

DOI: 10.7498/aps.70.20200957

1 引言

Z 箍缩技术是目前在实验室产生强软 X 射线辐射源的有效途径之一^[1]. 在 Z 箍缩驱动的惯性约束聚变^[2]和 X 射线辐射应用^[3]等实验研究中, 箍缩等离子体的向心运动、辐射热波的传输以及靶丸压缩等主要物理过程, 都伴随着能量转换和传输问题, 而这些物理过程所遵循的规律都与等离子体自身发射的 X 射线所携带的信息密切相关. 因此, 对 X 射线的辐射参数及其时空分布特性等物理参量的精密诊断技术^[4,5]就成为了 Z 箍缩技术的重要研究内容. 条纹相机作为重要的时空诊断方法之一, 可以直接拍摄发光光源的一维空间分辨和时间分辨图像, 获取其辐射强度的空间和连续时间分布信息^[6,7]. 目前, 用于拍摄紫外到红外波段的光学条纹相机的最快时间分辨能力已经达到了 100 fs, 空间分辨可大于 20 lp/mm, 动态范围也达到 10000:1; 而对 X 射线光源进行诊断的 X 射线条纹相机, 由于其应用范围较窄, 对时间的分辨能力需求不高,

因此, 其最快时间分辨一般为 10 ps 量级. 但是, 在对 X 射线光源进行时间扫描图像的实验诊断中, 其实验环境更加复杂, 而实验目的更侧重于如何获取各类不同条件下产生的 X 光源的光谱、特定位置的光强等时空信息, 因此, 研究方向更集中于如何将 X 射线条纹相机与滤片、晶体等光谱色散器件耦合使用. 在美国的 OMEGA 激光装置和 NIF 国家点火装置上的惯性约束聚变实验研究中, 使用了针孔成像部件、晶体色散器件与 X 射线条纹相机耦合的方法拍摄到了不同光谱能段 X 射线的空间和时间分布图像, 从而给出了黑腔壁运动轨迹、辐射热波传播轨迹和速度以及等离子体不稳定性发展等动力学特征参量^[8,9]. 在中国工程物理研究院神光系列装置上的高能量密度实验研究中, 采用多个平面镜、滤光片配接 X 射线条纹相机的诊断方法, 实现了在亚千电子伏特能区内三个不同波段软 X 射线的时间和空间分辨测量^[10].

中国工程物理研究院流体物理研究所于 2014 年成功研制了一台输出电流峰值 8—10 MA、电流上升前沿 (10%—90%) 约 70 ns 的强脉冲功

[†] 通信作者. E-mail: jadegoat@163.com

率源装置^[11], 随后在此装置上开展了多轮与惯性约束聚变和辐射效应相关的高能量密度物理实验, 并获得了较好的实验结果^[12,13]. 实验中, 多套用于各类物理数据测量的诊断系统安装于靶室周围^[14], 其中, 一台位于负载径向方向的 X 射线条纹相机用于拍摄箍缩等离子体径向或轴向方向一维空间分辨的软 X 射线条纹图像, 获取 X 射线辐射强度的时空分布信息^[15]. 相机的光谱响应为 0.1—10 keV, 在实验中的典型时间分辨率为百皮秒量级, 空间分辨率为百微米量级. 根据诊断需求, X 射线条纹相机必须安装在靶室近端并与靶室诊断窗口连通, 同时相机的阴极正对靶心, 这就导致相机的光电阴极和金属栅网容易被放电过程中产生的高速带电粒子和爆炸颗粒损坏; 而装置放电时产生的瞬态强电磁场^[16]也会干扰相机的触发和扫描电路, 使其无法正常工作. 本文设计了一套基于塑料薄膜闪烁体转换的 X 射线条纹相机系统, 利用塑料闪烁体和光纤传像束将 X 射线图像转换成可见光图像并传输到靶室远端的电磁屏蔽柜内, 再使用光学条纹相机对图像进行扫描, 最终获取 X 射线的条纹图像. 这种方法在保证诊断图像的技术参数基本不变的情况下, 避免了高速粒子对条纹相机元器件的损坏, 并最大限度地降低了强电磁场对相机电路的干扰, 提高了相机的使用寿命.

2 诊断系统设计

基于塑料薄膜闪烁体转换的 X 射线条纹相机系统主要由 X 射线成像狭缝、塑料薄膜闪烁体、光

纤传像束、光学条纹相机以及同步触发单元组成, 系统的结构和实验布局如图 1 所示. 圆柱形等离子体辐射的 X 射线经过成像狭缝, 在塑料薄膜闪烁体的入射面上成径向或轴向方向的 X 射线一维空间分辨图像; 闪烁体紧贴光纤传像束的输入面, 将 X 射线图像转化为可见光图像后, 通过传像束将可见光图像输入光学条纹相机; 光学条纹相机利用取样狭缝沿图像的空间分辨方向截取图像, 并对取样图像进行扫描, 最终获取箍缩等离子体的一维空间分辨 X 射线条纹图像, 并由 CCD 相机记录.

实验中, 为了保证光学条纹相机的工作时间与 X 射线的发光时间同步, 建立了诊断系统的同步触发单元. 选取驱动装置激光触发气体开关的激光信号作为诊断系统的触发源信号^[17], 经过光电倍增管转换为电信号后触发数字延时发生器, 经过延时后输出三路不同时间间隔的 TTL 信号, 分别触发光学条纹相机的光阴极电压、像增强器电压和扫描电路偏压, 确保条纹相机的工作时间与 X 射线发光时间同步. 实验中, 条纹相机工作时间与 X 射线发光时间之间的时间抖动主要由触发源信号与 X 射线信号之间的时间抖动、同步触发单元中各电子器件本身的时间抖动和条纹相机固有延时的抖动来决定. 其中, 电子器件和条纹相机的固有延时抖动一般在几十到几百皮秒量级, 均远小于触发源信号与 X 射线信号之间的时间抖动, 因此, 诊断系统工作时间与 X 射线信号之间的同步时间抖动主要决定于触发源信号与 X 射线信号之间的时间抖动. 经过多次测量, 对于同一类型负载的实验, 激光触发气体开关的激光信号与 X 射线信号

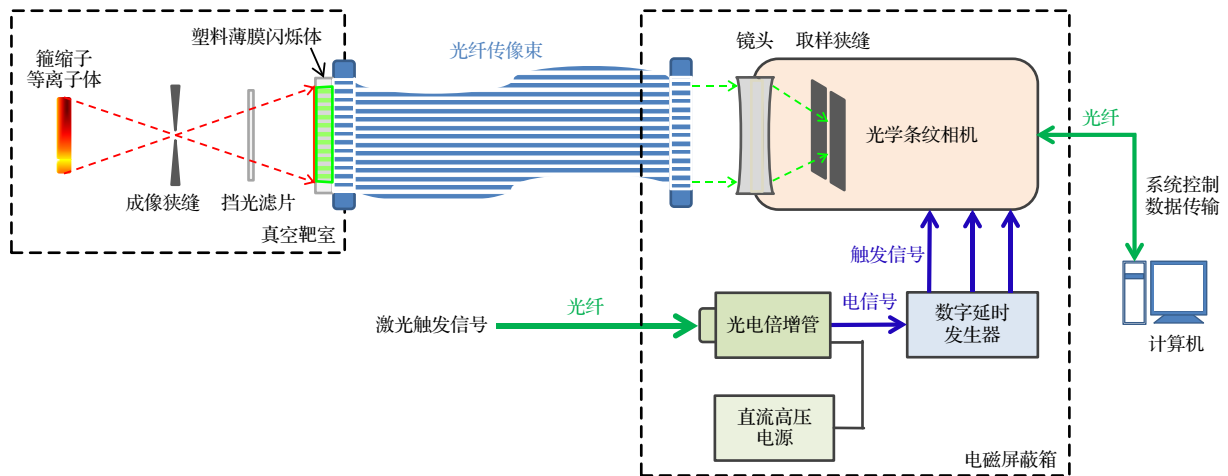


图 1 诊断系统结构和实验布局

Fig. 1. Schematic of components of the diagnostic system and experimental setup.

之间的时间抖动小于 2 ns, 完全满足实验中相机系统工作在全屏扫描时间为 50/100 ns 模式下对时间同步的要求 [18].

采用这种方法设计的 X 射线条纹相机系统的优点在于: 第一, 光学条纹相机通过光纤传像束与真空靶室隔离, 消除了高速粒子对相机阴极器件的损坏, 实验中只需要更换被高速粒子损坏的成像狭缝即可; 第二, 光学条纹相机被放置在一个全封闭的电磁屏蔽柜中, 最大限度地降低了强电磁环境对相机电子器件的干扰; 第三, 在诊断设计上可以缩小等离子体与成像狭缝以及成像面之间的距离, 增强了接收 X 射线的辐射强度, 同时降低成像狭缝对低能光子的衍射效应, 提高图像的空间分辨率; 第四, 诊断系统不含真空设备, 消除了由于真空带来的系统结构设计、线路布局、抗电磁干扰以及工作稳定性等方面的问题.

2.1 系统的光谱响应

诊断系统的光谱响应主要由塑料薄膜闪烁体对 X 射线的谱响应来决定. 另外, 系统采用了挡光滤片来遮挡实验中发射的可见光, 因此, 还需要考虑挡光滤片对 X 射线的透过率.

系统采用了 ELJEN 公司生产的 EJ-232 型塑料闪烁体, 它由聚苯乙烯 (C_8H_8) 作为基质, 掺入微量闪烁物质和移波剂制成, 其密度为 1.02 g/cm^3 . 挡光滤片采用 $2 \mu\text{m}$ 厚的 Mylar 膜表面镀 200 nm 厚的铝膜. 因此, 相机系统的光谱响应可以表示为

$$R(E) = T_{\text{Mylar}}(E) T_{\text{Al}}(E) A_{\text{PS}}(E), \quad (1)$$

式中, $T_{\text{Mylar}}(E)$ 和 $T_{\text{Al}}(E)$ 分别表示 Mylar 膜和铝膜对不同光子能量 X 射线的透过率; $A_{\text{PS}}(E)$ 表示塑料闪烁体对不同光子能量 X 射线的吸收效率. 它们分别表示为:

$$T_{\text{Mylar}}(E) = e^{-l_1 \mu_{\text{Mylar}}(E)}, \quad (2)$$

$$T_{\text{Al}}(E) = e^{-l_2 \mu_{\text{Al}}(E)}, \quad (3)$$

$$A_{\text{PS}}(E) = 1 - e^{-l_3 \mu_{\text{en-PS}}(E)}. \quad (4)$$

式中 l_1, l_2, l_3 分别是 Mylar 膜、铝膜和塑料闪烁体的厚度; $\mu_{\text{Mylar}}(E), \mu_{\text{Al}}(E), \mu_{\text{en-PS}}(E)$ 分别表示对于不同光子能量的 Mylar 膜的线衰减系数、铝膜的线衰减系数和塑料闪烁体的线质能吸收系数. 图 2 分别给出了 $2 \mu\text{m}$ 厚的 Mylar 膜和 200 nm 厚的铝膜对 X 射线的透过率、0.05 mm 厚的 EJ-232 型塑

料闪烁体对 X 射线的吸收效率以及诊断系统对 X 射线的光谱响应范围. 从图中可以看出, 光子能量小于 1 keV 的 X 射线被塑料薄膜闪烁体全部吸收, 随着光子能量的增加, 塑料闪烁体的吸收效率逐渐减少, 对于光子能量大于 10 keV 的 X 射线, 几乎全部透射. 另外, 由于挡光滤片阻挡了大部分光子能量小于 1 keV 的 X 射线, 因此相机系统对于小于 1 keV 范围的光谱响应, 仅分别在 280 和 530 eV 处有一个透过率约 8% 的透射窗口, 并且当光子能量大于 700 eV 后, 其透射率超过 10%. 总体来说, 相机系统的光谱响应范围大约在 0.2—10 keV 之间, 响应峰值为 1.55 keV.

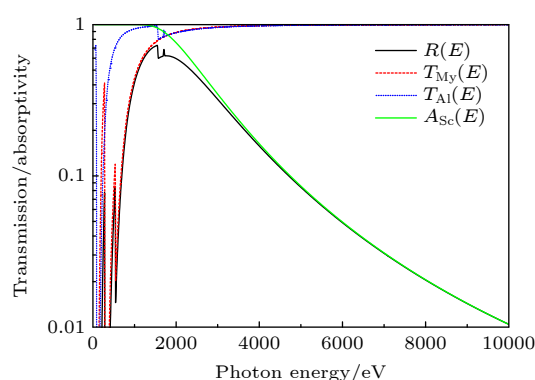


图 2 Mylar 膜对 X 射线的透过率曲线 (红色虚线)、铝膜对 X 射线的透过率曲线 (蓝色点)、塑料闪烁体对 X 射线的吸收效率曲线 (绿色实线) 以及诊断系统的光谱吸收曲线 (黑色实线)

Fig. 2. The red dash is the transmission of $2 \mu\text{m}$ thick Mylar film, the blue dot is the transmission of 200 nm thick aluminum, the green line is the absorption of the 0.05 mm thick plastic scintillator foil, and the black line is spectral response curve of the diagnostic system.

2.2 系统的时间分辨

相机系统的时间分辨主要由光学条纹相机的时间分辨、取样狭缝宽度以及塑料薄膜闪烁体对 X 射线的响应时间决定. 其中, 条纹相机在扫全屏时间为 50—100 ns 的扫速下的时间分辨小于 60 ps; 取样狭缝宽度的典型尺寸为 $50 \mu\text{m}$, 它在条纹相机时间长度上对应的时间分辨也小于 60 ps. 由于它们远小于闪烁体对 X 射线的响应时间, 因此相机系统的时间分辨能力主要决定于塑料薄膜闪烁体对 X 射线的时间响应.

利用 X 箍缩 [19] 产生的 X 射线脉冲, 对厚度 0.05 mm 的 EJ-232 型塑料闪烁体的时间响应进行标定. X 箍缩光源的发射光谱一般在 1—10 keV 范

围内, 与系统的光谱响应范围较一致; X 箍缩光源发射的 X 射线脉冲的持续时间为百皮秒量级, 远小于塑料闪烁体对 X 射线的响应时间 (纳秒量级), 可以作为标准时间光源. 标定实验中, 同时获取 X 箍缩产生的 X 射线脉冲的辐射强度随时间变化的信息和 X 射线脉冲经过闪烁体转换后产生的荧光的发光强度随时间的变化信息, 通过对时间信息的对比就可以获取塑料闪烁体对 X 射线的时间响应参数. 实验测量中, X 射线脉冲由 X 射线二极管测量, 闪烁体转换后产生的荧光通过光电倍增管测量, 测量结果由示波器记录, 以上测试设备和用于信号传输的同轴电缆的时间响应均小于 100 ps, 满足对 X 射线脉冲和荧光脉冲时间参数的测量要求. 因为在 X 箍缩产生的 X 射线脉冲中, 低能光子的发射持续时间较长, 因此选择 5 μm 厚的 Ti 作为挡光滤片, 滤掉光子能量小于 1.5 keV 的 X 射线, 以保证标定光源具有较短的发光持续时间.

图 3(a) 给出了同一实验发次中示波器记录的 X 射线二极管和闪烁体-光电倍增管的输出电信号. 可以明显看出, X 射线脉冲经过闪烁体转换成荧光后, 在时间坐标上存在明显的展宽现象. 信号的半

高宽从 290 ps 增加到 1230 ps; 信号上升沿 (10%—90%) 从 200 ps 增加到 310 ps; 信号下降沿 (10%—90%) 从 290 ps 增加到 1830 ps. 闪烁体对多个 X 射线脉冲信号的时间响应如图 3(b) 所示. 图中 X 射线二极管测量的结果为 2 个 X 射线脉冲信号, 其中第 1 个脉冲信号具有双峰结构, 同时, 从闪烁体-光电倍增管的测量结果中也可以观察到 2 个脉冲信号, 但是无法分辨第 1 个脉冲信号的双峰结构. 如果定义第一个脉冲信号的半高宽的中间时刻为这个脉冲信号的峰值时刻, 那么, 2 个脉冲信号峰值时刻的时间间隔为 1020 ps. 也就是说, 对于 2 个时间间隔为 1020 ps 的脉冲信号, 闪烁体具有对其进行时间分辨的能力.

2.3 系统的空间分辨

根据诊断系统的构成, 拍摄图像的空间分辨率可由以下经验公式给出:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{SI}}^2 + \sigma_{\text{PS}}^2 + \sigma_{\text{Fi}}^2 + \sigma_{\text{Le}}^2 + \sigma_{\text{SC}}^2}, \quad (5)$$

式中, σ_{SI} 表示 X 射线通过成像狭缝所成的一维空间分辨图像的空间分辨率, σ_{PS} 表示塑料闪烁体将 X 射线转化为可见光的空间分辨率, $\sigma_{\text{Fi}} = 26 \mu\text{m}$ 为传像束的光纤芯直径, $\sigma_{\text{Le}} < 10 \mu\text{m}$ 是系统中镜头的空间分辨率, σ_{SC} 是光学条纹相机的动态空间分辨率, 通过标定数据给出 $\sigma_{\text{SC}} < 35 \mu\text{m}$.

其中, 成像狭缝对 X 射线成像的空间分辨率 σ_{SI} 可以表示为

$$\sigma_{\text{SI}} = \sqrt{W^2 \left(1 + \frac{1}{M}\right)^2 + \left(\frac{k\lambda L_1}{W}\right)^2}, \quad (6)$$

式中, W 为成像狭缝宽度; M 为成像放大倍数; $k = 2.44$ 为常数; λ 为入射 X 射线的波长; L_1 为成像物距. 公式右边的前半部分为图像的几何分辨率, 后半部分为狭缝衍射对图像分辨率的影响.

塑料闪烁体紧贴光纤传像束输入面, 将 X 射线转换成荧光并输入传像束. 因此, 塑料闪烁体对 X 射线图像的空间分辨主要决定于闪烁体的厚度和传像束的最大入射角, 可以表示为:

$$\sigma_{\text{PS}} = 2t \times \tan \theta_{\text{In}}, \quad (7)$$

$$n_1 \sin \theta_{\text{In}} = n_0 \sin \theta_{\text{Re}}, \quad (8)$$

式中, t 是闪烁体的厚度; θ_{In} 是当荧光从塑料闪烁体内部射出时, 折射角 θ_{Re} 等于传像束最大入射角时的入射角; $n_0 = 1$ 和 $n_1 = 1.58$ 分别为真空和塑

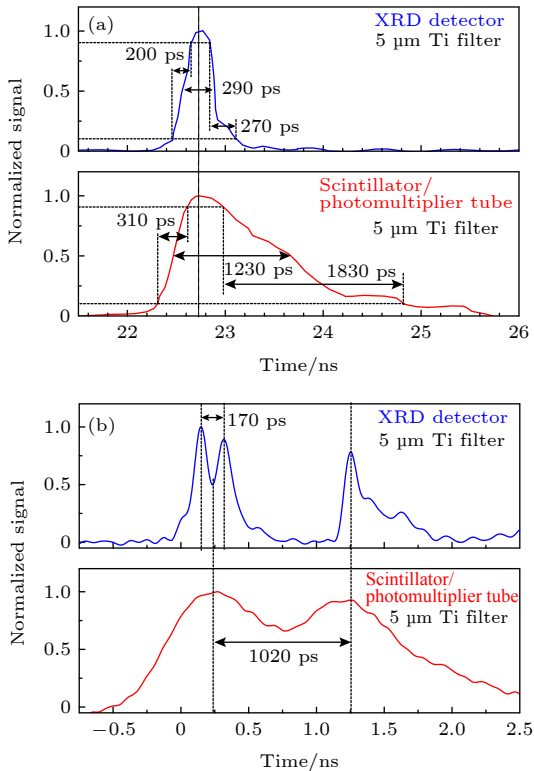


图 3 塑料薄膜闪烁体对 X 射线时间响应特性的标定结果
Fig. 3. The calibration results of the time response of the scintillator foil to X-rays.

料闪烁体的折射率; 其中 $\theta_{Re} = 25.4^\circ$.

实验中, 考虑接受到的 X 射线强度对图像信噪比的影响, 诊断系统的成像狭缝宽度设置为 $W = 50 \mu\text{m}$, 成像物距 $L_1 = 300 \text{ mm}$, 成像放大倍率 $M = 1$, 塑料闪烁体厚度 $t < 0.1 \text{ mm}$, 可以计算得出, 系统的理论空间分辨率 $\sigma < 125 \mu\text{m}$.

3 实验结果

诊断系统在装置驱动的铝丝阵 K 壳层辐射光源^[20]构建技术的实验中进行了考核, 拍摄到了铝等离子体发射的 X 射线条纹图像. 首先对诊断系统拍摄的 X 射线图像的本底进行确认, 获取了未加塑料闪烁体情况下的本底图像, 图像强度的平均读数与用于图像记录的 CCD 相机的噪音读数相当, 这说明系统中挡光滤片较好地完成了对光源中发射的可见光的屏蔽.

诊断系统拍摄的 X 射线条纹图像如图 4(a) 所示. 图像中的本底信号强度读数的平均值约 450, 最强信号的读数大于 10000, 图像的信噪比大于 20. 图中横坐标为时间轴, “0”时刻对应 X 射线辐射功率的峰值时刻; 纵坐标为负载的轴向方向. 可以明显看出, 铝等离子体的发光持续时间较长, 可分为两个阶段: 以“0”时刻为中心持续时间约 10 ns 的主要发光阶段和超过 50 ns 的发光拖尾阶段. 这也与实验中拍摄到的 X 射线分幅图像所显示出的等离子体出现较强的不稳定性现象相符合.

在图 4(a) 的时间坐标上分别选取 -2, 0, 2 和 10 ns 四个内爆时刻, 每个时刻沿轴向方向给出 X 射线图像的强度分布曲线图, 如图 4(b) 所示. 可以看出, 在 -2 到 2 ns 的时间内, 等离子体在轴向不同位置的发光强度并不一致, 这说明了等离子体向心运动的同步性较差. 以 X 射线条纹图像的时间轴为横坐标, 对图像在轴向方向上的曝光强度进行积分并归一化, 可以获得等离子体发射的 X 射线的辐射功率, 将它与 X 射线二极管探测器获得的 X 射线的辐射功率波形的归一化曲线进行比较, 结果如图 4(c) 所示. 图中, 红色曲线通过扫描图像处理得到, 蓝色曲线为 X 射线二极管测量获得. 可以看出, 两种诊断方法获得的 X 射线的辐射功率波形较为符合. 差别在于, 扫描图像获取的 X 射线脉冲的上升前沿、脉冲宽度和脉冲后沿的时间都略

大于 X 射线二极管的测量结果. 经分析, 导致这两套诊断设备获取的 X 射线脉冲在时间特性上的差别可能有两个原因: 一是两套诊断设备的光谱响应不同; 二是相机系统对于能量小于 1.5 keV 光子的时间响应较长. 在所有的 10 发次考核实验中, 诊断系统没有出现相机电路被强电磁场干扰的现象, 获取图像的成功率达到 100%; 另外, 从诊断系统开始使用到目前为止, 共参与实验近 100 发次, 相机始终工作正常, 没有任何器件出现故障.

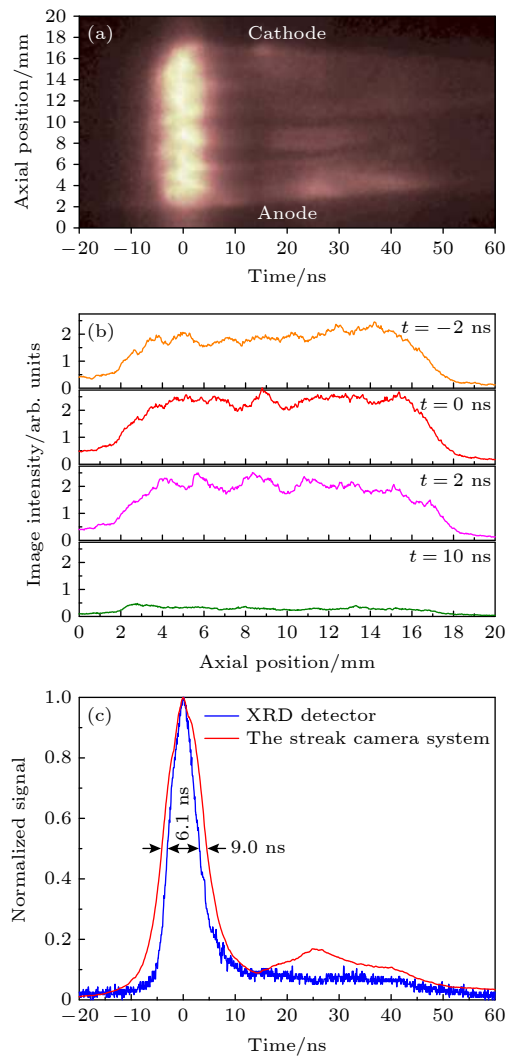


图 4 诊断系统拍摄的 X 射线条纹图像结果 (a) 铝等离子体的 X 射线条纹图像; (b) X 射线在不同时刻沿轴向方向的辐射强度分布曲线; (c) 成像系统和 XRD 探测器获取的 X 射线辐射强度随时间变化的归一化曲线比较

Fig. 4. Images obtained by the diagnostic system are shown: (a) The X-ray streak image of aluminum plasmas; (b) the radiation intensity distribution of x-ray source in the axial direction at different time; (c) the normalized curve of X-ray radiation measured by the diagnostic system and XRD detector.

4 小结与展望

设计了基于闪烁体转换的 X 射线条纹成像系统. 利用塑料闪烁体和光纤传像束将 X 射线图像转换成可见光图像并传输到远离真空靶室的位于电磁屏蔽柜内的光学条纹相机, 既保护了条纹相机的元器件不会被实验中发射的高速粒子损坏, 同时又解决了条纹相机易被强电磁环境干扰的问题. 系统的光谱响应范围主要集中在 0.2—10 keV, 其空间分辨率的理论评估结果小于 125 μm , 通过塑料闪烁体对 X 射线的时间响应特性的标定实验给出了系统的最高时间分辨率约为 1 ns. 系统在考核实验中获取了铝等离子体光源的 X 射线一维空间分辨和时间分辨条纹图像, 给出了光源辐射强度的时空分布信息.

成像系统对光谱的非平响应特征影响了对图像数据的物理分析, 尤其是系统在光子能量小于 1.5 keV 范围内的非平响应特征, 对于 X 射线光源的总能量在这一范围内占有较大比例的 Z 箍缩实验进行物理分析时, 其影响不能忽略. 因此, 下一步将通过开展对塑料闪烁体的光谱响应曲线的实验标定工作, 给出诊断系统较精确的光谱响应数据; 另外, 试图通过对阻挡本底可见光的方法进行优化, 消除挡光滤片对相机系统在低能段光谱响应效率的影响.

参考文献

- [1] Spielman R B, Deeney C, Chandler G A, Douglas M R, Fehl D L, Matzen M K, McDaniel D H, Nash T J, Porter J L, Sanford T W L, Seaman J F, Stygar W A, Struve K W, Breeze S P, McGurn J S, Torres J A, Zagar D M, Gilliland T L, Jobe D O, McKenney J L, Mock R C, Vargas M, Wagoner T, Peterson D L 1998 *Phys. Plasmas* **5** 2105
- [2] Cuneo M E, Herrmann M C, Sinars D B, Slutz S A, Stygar W A, Vesey R A, Sefkow A B, Rochau G A, Chandler G A, Bailey J E, Porter J L, McBride R D, Rovang D C, Mazarakis M G, Yu E P, Lamppa D C, Peterson K J, Nakhleh C, Hansen S B, Lopez A J, Savage M E, Jennings C A, Martin M R, Lemke R W, Atherton B W, Smith I C, Rambo P K, Jones M, Lopez M R, Christenson P J, Sweeney M A, Jones B, McPherson L A, Harding E, Gomez M R, Knapp P F, Awe T J, Leeper R J, Ruiz C L, Cooper G W, Hahn K D, McKenney J, Owen A C, McKee G R, Leifeste G T, Ampleford D J, Waisman E M, Harvey-Thompson A, Kaye R J, Hess M H, Rosenthal S E, Matzen M K 2012 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 3222
- [3] Bailey J E, Chandler G A, Cohen D, Cuneo M E, Foord M E, Heeter R F, Jobe D, Lake P W, MacFarlane J J, Nash T J, Nielson D S, Smelser R, Torres J 2002 *Phys. Plasmas* **9** 2186
- [4] Nash T J, Derzon M S, Chandler G A, Fehl D L, Leeper R J, Porter J L, Spielman R B, Ruiz C, Cooper G, McGurn J, Hurst M, Jobe D, Torres J, Seaman J, Struve K, Lazier S, Gilliland T, Ruggles L A, Simpson W A, Adams R, Seaman J A, Wenger D, Nielsen D, Riley P, French R, Stygar B, Wagoner T, Sanford T W L, Mock R, Asay J, Hall C, Knudson M, Armijo J, McKenney J, Hawn R, Schroen-Carey D, Hebron D, Cutler T, Dropinski S, Deeney C, LePell P D, Coverdale C A, Douglas M, Cuneo M, Hanson D, Bailey J E, Lake P, Carlson A, Wakefield C, Mills J, Slopek J, Dinwoodie T, Idzorek G 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 1167
- [5] Zheng Z J, Ding Y K, Ding Y N, Liu Z L, Liu S Y, Sun K X, Cheng J X, Jiang S E, Qi L Y, Zhang B H, Yang C B, Yang J M, Su C X, Chen J B, Li W H, Yi R Q, Tang D Y, Huang T X, Cao L F, Wen S H, Peng H S, Jiang X H, Miao W Y 2003 *High Power Laser and Particle Beam* **15** 1073 (in Chinese) [郑志坚, 丁永坤, 丁耀南, 刘忠礼, 刘慎业, 孙可煦, 成金秀, 江少恩, 祁兰英, 张保汉, 杨存榜, 杨家敏, 苏春晓, 陈家斌, 李文洪, 易荣清, 唐道源, 黄天y, 曹磊峰, 温树槐, 彭翰生, 蒋小华, 缪文勇 2003 强激光与粒子束 **15** 1073]
- [6] Sheng L, Wang L P, Li Y, Peng B D, Zhang M, Wu J, Wang P W, Wei F L, Yuan Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 105201 (in Chinese) [盛亮, 王亮平, 李阳, 彭博栋, 张美, 吴坚, 王培伟, 魏福利, 袁媛 2011 物理学报 **60** 105201]
- [7] Sheng L, Peng B D, Yuan Y, Zhang M, Li K N, Zhang X J, Zhao C, Zhao J Z, Li M, Wang P W, Li Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 235205 (in Chinese) [盛亮, 彭博栋, 袁媛, 张美, 李奎念, 张信军, 赵晨, 赵吉祯, 李沫, 王培伟, 李阳 2014 物理学报 **63** 235205]
- [8] Keiter P, Gunderson M, Foster J, Rosen P, Comley A, Taylor M, Perry T 2008 *Phys. Plasmas* **15** 056901
- [9] Moore A S, Cooper A B R, Schneider M B, Maclaren S, Graham P, Lu K, Seugling R, Satcher J, Klingmann J, Comley A J, Marrs R, May M, Widmann K, Glendinning G, Castor J, Sain J, Back C A, Hund J, Baker K, Hsing W W, Foster J, Young B, Young P 2014 *Phys. Plasmas* **21** 063303
- [10] Hu X, Jiang S E, Cui Y L, Huang Y X, Ding Y K, Liu Z L, Yi R Q, Li C G, Zhang J H, Zhang H Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **54** 1447 (in Chinese) [胡昕, 江少恩, 崔廷莉, 黄翼翔, 丁永坤, 刘忠礼, 易荣清, 李朝光, 张景和, 张华全 2007 物理学报 **54** 1447]
- [11] Deng J J, Xie W P, Feng S P, Wang M, Li H T, Song S Y, Xia M H, He A, Tian Q, Gu Y C, Guan Y C, Wei B, Zou W K, Huang X B, Wang L J, Zhang Z H, He Y, Yang L B 2013 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **41** 2580
- [12] Huang X B, Zhou S T, Ren X D, Dan J K, Wang K L, Zhang S Q, Li J, Xu Q, Cai H C, Duan S C, Ouyang K, Chen G H, Ji C, Wang M, Feng S P, Yang L B, Xie W P, Deng J J 2014 *AIP Conf. Proc.* **1639** 96
- [13] Huang X B, Ren X D, Dan J K, Wang K L, Xu Q, Zhou S T, Zhang S Q, Cai H C, Li J, Wei B, Ji C, Feng S P, Wang M, Xie W P, Deng J J 2017 *Phys. Plasmas* **24** 092704
- [14] Ren X D, Huang X B, Zhou S T, Zhang S Q, Dan J K, Li J, Cai H C, Wang K L, Ouyang K, Xu Q, Duan S C, Chen G H, Wang M, Feng S P, Yang L B, Xie W P, Deng J J 2014 *9th International Conference on Dense Z Pinches* **1639** 142
- [15] Kimbrough J R, Bell P M, Christianson G B, Lee F D,

- Kalantar D H, Perry T S, Sewall N R, Wootton A J 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 748
- [16] Dan J K, Ren X D, Huang X B, Zhang S Q, Zhou S T, Duan S C, Ouyang K, Cai H C, Wei B, Ji C, He A, Xia M H, Feng S P, Wang M, Xie W P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 245201 (in Chinese) [但加坤, 任晓东, 黄显宾, 张思群, 周少彤, 段书超, 欧阳凯, 蔡红春, 卫兵, 计策, 何安, 夏明鹤, 丰树平, 王勐, 谢卫平 2013 物理学报 **62** 245201]
- [17] He A, Ren J, Feng S P, Xie W P, Wang M, Wei B, Ji C, Xia M H, Wang Y J, Fu Z, Li Y, Wang Z, Yao B, Ding Y 2012 *High Power Laser and Particle Beam* **24** 839 (in Chinese) [何安, 任济, 丰树平, 谢卫平, 王勐, 卫兵, 计策, 夏明鹤, 王玉娟, 傅贞, 李勇, 王治, 姚斌, 丁瑜 2012 强激光与粒子束 **24** 839]
- [18] Zhou S T 2018 *M. S. Thesis* (Mianyang: Institute of Fluid Physics) p33 (in Chinese) [周少彤 2018 硕士学位论文 (绵阳: 流体物理研究所) 第33页]
- [19] Zhou S T, Li J, Huang X B, Cai H C, Zhang S Q, Li J, Duan S C, Zhou R G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 165202 (in Chinese) [周少彤, 李军, 黄显宾, 蔡红春, 张思群, 李晶, 段书超, 周荣国 2012 物理学报 **61** 165202]
- [20] Xiao D L, Ning C, Lan K, Ding N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 430 (in Chinese) [肖德龙, 宁成, 蓝可, 丁宁 2010 物理学报 **59** 430]

Soft x-ray imaging system used for Z-pinch experiments

Zhou Shao-Tong[†] Ren Xiao-Dong Huang Xian-Bin Xu Qiang

(Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

(Received 22 June 2020; revised manuscript received 19 August 2020)

Abstract

As an important imaging diagnostic manner in Z-pinch experiments, an X-ray streak camera can record a continuous time evolution of X-ray emission and has a better temporal resolution of about several picoseconds. Unfortunately, during experiment the transient strong electromagnetic noise produced by the device interferes with sensitive electronic components of the X-ray streak camera, making it unworkable frequently. In addition, the camera's position is close to the load chamber so that the photocathode and metallic grid of the camera may suffer the risk of being broken by high speed charged particles and exploding debris. In order to solve this problem, a novel soft X-ray streak imaging system based on the conversion of fast scintillator and an optical streak camera is designed. In the streak camera system, the plastic scintillator foil and fiber bundles are used to convert X-ray image into optical image and transmit it into an optical streak camera which is placed in a shielding cabinet far from the target chamber. The camera system proves efficient in avoiding the damage caused by high speed particles and suppressing the electromagnetic interference. The scope of response spectrum of the camera system is given by theoretical calculation and roughly from 0.2 to 10 keV. The spatial resolution of the camera system is designed to be less than 120 microns and the temporal resolution of the camera system is calibrated to be about 1 ns in X-pinch experiments. The camera system is used in aluminum wire-array experiments to capture the time-resolved and 1D space-resolved images of imploding plasmas. The spatiotemporal distribution information about the X-ray emission is presented.

On the other hand, because of the transmission of the filter in sub-kilo-electron-volt emission, the spectral response of the camera system in the sub-kilo-electron-volt photon energy range decreases obviously, which affects the physical analysis of the image. In addition, because of the slow response time of the scintillator to X-rays, the temporal resolution of the camera system decreases obviously and is about 1 ns. How to solve these problems will be carried out in the future work.

Keywords: Z-pinch, X-ray, plastic scintillator, streak camera

PACS: 52.58.Lq, 52.59.-f, 52.59.Qy, 52.77.-j

DOI: 10.7498/aps.70.20200957

[†] Corresponding author. E-mail: jadegoat@163.com