

用于 Z-pinch 诊断的 266nm 激光探针分幅 阴影成像系统*

王 真^{1,2)} 杨建伦²⁾ 徐荣昆²⁾ 李林波²⁾ 许泽平²⁾ 章法强^{1,2)} 钟耀华²⁾

1) 清华大学工程物理系, 北京 100084)

2) 核物理与化学研究所 绵阳 621900)

(2006 年 2 月 23 日收到 2006 年 3 月 24 日收到修改稿)

采用 Nd-YAG 激光器的四倍频激光(266nm)设计了激光探针分幅阴影成像系统,该系统具有时间分辨率和收光效率高,测量范围大,可有效屏蔽可见光干扰的优点.在钨丝阵实验中成功获得晚期内爆等离子体的分布图像.对系统结构和性能参数做了介绍,对测量结果进行了讨论.

关键词: Z-pinch, 激光探针, 等离子体分布, 分幅成像

PACC: 5270, 0760H, 0768, 4278D

1. 引 言

Z-pinch 作为实验室强 X 射线辐射源具有广泛的应用前景,但是不稳定性的显著增长破坏了 Z-pinch 等离子体内爆的整体性,影响并限制了 X 射线辐射功率的提高,获取并分析内爆过程中等离子体的空间分布及时间演化信息,对于研究等离子体不稳定性,深化对 Z-pinch 等离子体内爆规律的认识,优化负载设计以调制 X 射线辐射波形和提高辐射功率具有非常重要的意义.在 Z-pinch 等离子体分布的主动诊断技术上,国际上已经开展了许多研究工作.利用受激布里渊散射技术产生的纳秒级($\sim 1\text{ns}$)激光作为探针光源,研制了激光探针阴影、纹影、干涉及法拉第旋转诊断系统^[1-4],可以同时给出等离子体内爆过程中不同时刻的密度、密度梯度和磁场的空间分布信息,其中干涉系统可以定量地给出较低密度的等离子体密度分布信息,但是这些系统所使用的激光波长为 532nm,诊断能力有限,时间分辨能力取决于所使用的布里渊介质.本文介绍了为“强光一号”丝阵实验所设计的一种 266nm 波长的紫外激光探针分幅成像系统,利用门控技术对较宽脉冲的激光($\sim 10\text{ns}$)进行选通成像以实现亚纳秒级时间分辨,并结合使用干涉滤光片以屏蔽强可见光本底的干扰,主要用于研究早期丝等离子体形成过程、

分布特性及其对内爆过程的影响和等离子体内爆的动力学演化过程,给出等离子体密度边界的运动速度、滞止阶段最小分布半径等重要的物理信息.文中具体介绍了系统的结构、主要性能指标和最新的实验结果.

2. 系统结构及主要性能指标

图 1 给出了该系统的结构示意图,系统主要由激光器、分光延迟系统、分幅成像系统、门控选通像增强器(MCP)和时间同步系统等部分组成,利用 Nd-YAG 激光器输出的 4 倍频紫外光作为探针光源(266nm/10ns/100mJ)经过由一系列光学元件组成的分光延迟系统后转换成由 4 个脉冲组成的幅度相等、相邻脉冲时间间隔连续可调的序列激光脉冲照射等离子体,随后经过分幅成像系统分别成像在 4 只门控 MCP 的光阴极上,通过时间同步系统控制 4 只门控 MCP 的开门时刻与 4 个激光脉冲到达 MCP 光阴极的时刻一致,即获得 4 幅不同时刻的等离子体二维空间分布的图像,如图 2 所示,用底片记录图像.

2.1. 截止密度

根据等离子体内电磁波的色散关系 $\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2$ ^[5],当激光频率 ω 与等离子体频率 ω_p 相等时, $k = 0$,激光传播截止,此时的电子密度即该波长激

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:10035030)资助的课题.

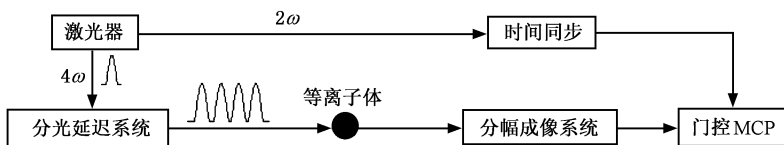


图 1 266nm 激光探针阴影成像系统示意图

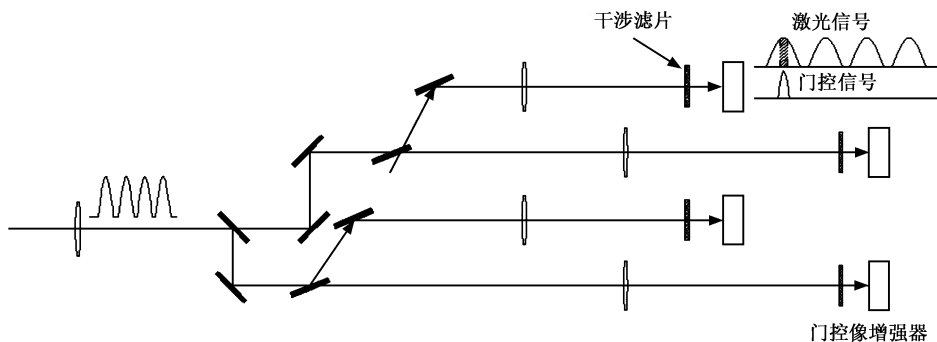


图 2 分幅成像系统示意图

光可诊断的等离子体临界密度,由公式^[5]:

$$\omega = \omega_p = \sqrt{4\pi n_e e^2 / m_e}. \quad (1)$$

因此,266nm 波长的紫外激光理论上可诊断的等离子体电子密度上限为 $1.6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$,比 532nm 波长激光可诊断的电子密度高 4 倍。

2.2. 可见光本底的抑制

Z 箍缩等离子体在内爆过程中除了高强度的 X 射线辐射外还伴随着从红外波段到紫外波段的本底辐射,其发光特性前沿上升时间约 50ns,峰值半宽度大于 700ns^[6],为避免等离子体发光 $E(\nu, T)$ 造成探测系统不必要的响应,除采用门控技术大幅缩短本底辐射的曝光时间($\sim 1\text{ns}$)外,还使用了窄带干涉滤光片过滤可见光本底,同时要求激光器输出脉冲的功率密度必须超过等离子体同波段($\nu - \nu + \Delta\nu$, $\Delta\nu$ 取决于系统设计)的辐射强度,图 3 给出了滤光片的透过率曲线。

以黑体辐射模型估算等离子体自发辐射强度,根据 Planck 黑体辐射定律,波长 ν 的光子单位面积辐射总功率为

$$P(\nu, T) d\nu = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu. \quad (2)$$

记探测系统对物方的立体角为 Ω ,则激光功率密度 W_L 必须满足条件

$$W_L \gg \Omega \int_{\nu}^{\nu+\Delta\nu} P(\nu, T) d\nu. \quad (3)$$

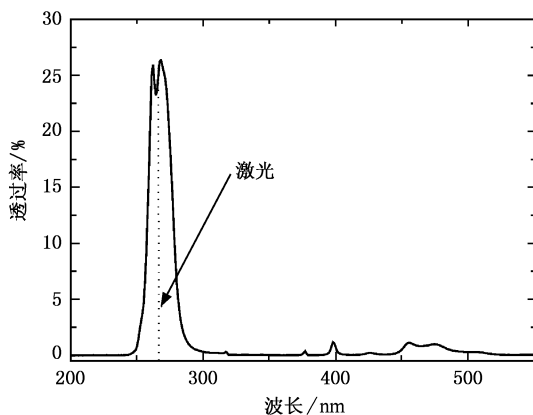


图 3 滤光片的透过率曲线

4 倍频紫外激光光子能量为 $h\nu \approx 4.7\text{eV}$,因此可对 Planck 公式取低能近似,以丝阵内爆实验聚心阶段等离子体特征温度 $kT = 100\text{eV}$,系统记录光谱段 $\Delta\nu = 20\text{nm}$,立体角 $\Omega = 7.56 \times 10^{-4}$ 计算,可得 $W_L \gg 9.13 \times 10^7 \text{ W/m}^2$. 激光器的输出参数为 100mJ/10ns,光斑大小约 1cm^2 ,其功率密度约为 10^{11} W/m^2 ,经过分光延迟系统后照射在等离子体上时各脉冲的功率密度约 10^{10} W/m^2 ,高出等离子体自发光强 2 个量级。

2.3. 时间分辨

系统的时间分辨能力主要由门控信号的脉冲宽度 (FWHM) 决定,并受到 MCP 带宽的限制,已知高

斯分布的脉冲电压

$$V(t) = V_0 \exp[-\ln(X t/t_{1/2})^2]. \quad (4)$$

半高宽为 $2t_{1/2}$, 理想状态下其增益的直流模型为

$$G(t) = G_0 V_0^r \exp[-\ln(X r^{1/2} t/t_{1/2})^2], \quad (5)$$

式中 r 为取决于 MCP 结构参数的常量, 显然, 增益也是高斯分布, 其宽度为 $2t_{1/2}/r^{1/2}$.

门控信号的脉冲宽度为 2.0ns , r 取值为 9, 则增益脉宽为 0.68ns , 在 MCP 的时间响应范围之内, 即系统的时间分辨率为 0.68ns .

2.4. 空间分辨

影响系统空间分辨的主要因素包括光学系统、MCP 和底片的空间分辨, 其中光学系统分辨率为 $50\mu\text{m}$, MCP 的空间分辨为 $47.6\mu\text{m}$, 底片的空间分辨约 $10\mu\text{m}$, 则总空间分辨为 $f = [(50)^2 + (47.6)^2 + (10)^2]^{1/2} \approx 70\mu\text{m}$.

2.5. 几何收光孔径角

电磁波在等离子体中传播时, 等离子体对电磁波的折射率随等离子体密度变化, 导致电磁波传播方向偏离入射方向, 其偏转角 ϵ 与等离子体密度梯度 ∇N_e 满足关系 $\epsilon = 4.46 \times 10^{-14} \lambda^2 L \times \nabla N_e$ [31], 式中 L 为沿激光传播路径的等离子体尺度, 由于探测系

统几何收光孔径角有限, 只有部分偏转角较小的光线能被探测系统探测到, 激光波长越短, 经过相同密度分布的等离子体区域后的偏转角越小, 系统实际收光效率也就越高, 对于相同几何收光孔径角的探测系统, 266nm 激光系统的实际收光效率是 532nm 激光系统的 4 倍. 该探测系统几何收光孔径角 ϵ 为 45mrad , 以等离子体尺度 $L = 8\text{mm}$ 计算, 理论上该系统可记录的等离子体临界密度梯度约为 $1.8 \times 10^{21} \text{cm}^{-4}$. 由于较稠密的等离子体主要出现在加速内爆和滞止阶段, 此时等离子体密度和梯度均较大, 沿激光传播路径的等离子体尺度 L 较小, 因此实际可探测的等离子体临界密度梯度要略大.

3. 实 验

在“强光一号”装置上进行的实验使用了由 32 根 $5\mu\text{m}$ 钨丝组成的圆柱构形的丝阵负载, 负载直径 8mm , 长度 2cm , 部分负载在丝阵轴线位置安装一根 $50\mu\text{m}$ 直径的聚氩丝. 负载电流约 1.5MA 左右, 电流上升时间约 80ns . 实验获得了等离子体内爆后期和轴线滞止阶段的分幅阴影图像, 如图 4 和图 5, 为便于比较分析, 图 6 给出了部分时刻相近的纳秒 X 射线分幅图像, 图中各幅图像的照像时刻均以 X 射线辐射功率的峰值时刻为时间零点.

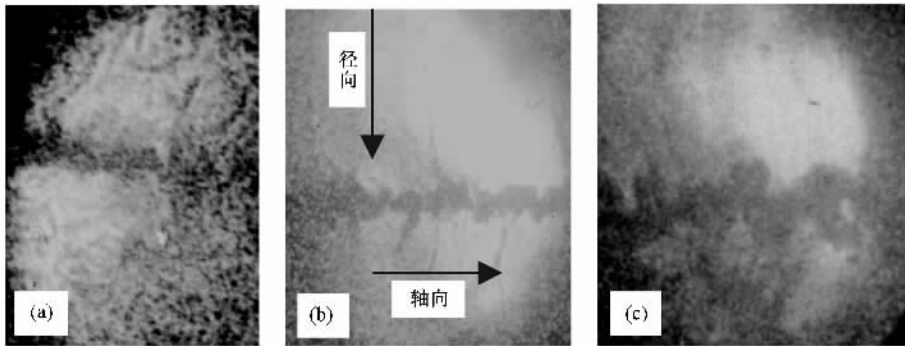


图 4 shot 05143 获得的 $5\mu\text{m}$ 钨丝阵负载“滞止”等离子体的分布图像(时间零点为 X 射线辐射功率峰值时刻) (a) -2ns (b) $+1\text{ns}$ (c) $+5\text{ns}$

对图 4 中图像进行处理的结果显示, -2ns 到 $+1\text{ns}$ 之间等离子体边界的径向运动速度约为 $8.5 \times 10^5 \text{cm/s}$, -2ns 和 $+1\text{ns}$ 时刻在丝阵轴线滞止的稠密等离子体直径分别为 0.76mm 和 0.81mm , 负载初始半径为 8mm , 则最大径向收缩比约为 10.5. X 射线辐射的峰值功率约为 0.91TW , 根据辐射温度 T 与 X 射线辐射功率 P 的定标关系 $T \propto P^{1/4}$ [7], 等离子体

“滞止”时的温度约 60eV , 在此温度下钨原子基本完全电离, 由此可估算出等离子体平均电子密度约为 $6 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$, 相当于理论上 266nm 激光可诊断的临界电子密度的 38% 和 532nm 激光的临界电子密度的 1.5 倍, 而且激光强度在激光阴影区边界附近迅速衰减, 一个很可能的原因是在此阴影区边界附近等离子体密度梯度较大且变化很快, 接近于系统几

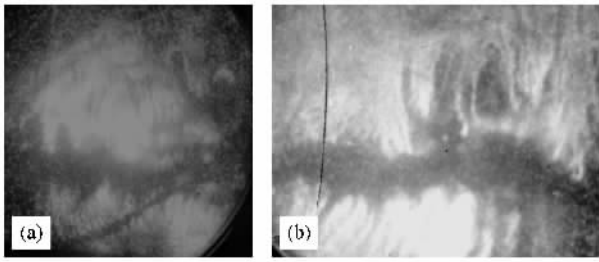


图 5 钨丝阵 + 中心聚氘丝负载内爆过程晚期的等离子体分布图像((a)(b)分别为 shot 05171 和 shot 05170 获得的阴影像)
(a) - 26ns (b) - 13ns

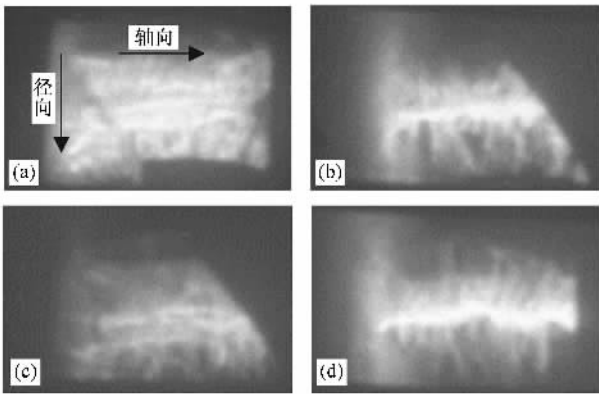


图 6 钨丝阵 + 中心聚氘丝负载内爆过程晚期的纳秒 X 射线图像((a)(b)为 shot 05171 (c)(d)为 shot 05170 的实验结果;
(a)-(d)分别为 -29.0, -19.0, -19.2 和 -9.2ns)

何收光孔径角所对应的临界密度梯度,相应地激光

偏转角也迅速变化,偏转较大的光线偏出系统记录范围之外,利用激光探针纹影成像系统进一步验证该结果的实验正在计划之中。

比较图 5 和图 6 可知,对 $5\mu\text{m}$ 钨丝阵 + 中心聚氘丝负载, -26ns 时大部分等离子体质量已经被压缩到一个较小的区域内($\sim 1.5\text{mm}$),而相对应的 -29ns 时刻的分幅像则显示等离子体发光区域半径仍接近于初始负载半径,但中心区域的发光强度远高于外围的发光强度,这很可能是由于外围的“稀薄”等离子体被中心区域辐射的 X 射线“照亮”的结果,至峰前 -19.0ns 时刻发光区域已经显著减小,由此可以合理地推测,在峰前 -26ns 时刻等离子体已处于径向加速运动的后期阶段,大部分质量已压缩到中心区域,但外围较“稀薄”的等离子体仍在快速地向心加速运动。

4. 结 论

新研制了测量等离子体分布的多幅紫外激光探针阴影成像系统,该系统可对丝阵内爆动力学过程和不稳定性发展进行诊断.系统设计中采用 Nd:YAG 激光器的四倍频 266nm 激光以提高系统诊断能力,利用门控技术实现亚纳秒级时间分辨,并结合使用窄带滤光片屏蔽可见光本底的干扰.系统在钨丝阵实验中获得了成功的应用,测到了最大径向收缩比的物理数据。

- [1] Sinars D B , Cuneo M E , Yu E P *et al* 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 145002
- [2] Volkov G S , Grabovskii E V , Zaitsev V I *et al* 2004 *Instruments and Experimental Techniques* **47** 74
- [3] Yu G Kalinin , Korel'skii V A , Kravchenko E V *et al* 2002 *Plasma Physics Reports* **28** 858
- [4] Tatarakis M , Aliaga-Rossel R , Dangor A E *et al* 1998 *Phys.*

Plasmas **5** 682

- [5] Chen F F 1984 *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion* (Plenum Press) p85 & p115
- [6] Xu R K , Li Z H , Guo C *et al* 2003 *Acta. Phys. Sin.* **52** 1203 (in Chinese)[徐荣昆 李正宏 郭存等 2003 物理学报 **52** 1203]
- [7] Lindl J 1995 *Phys. Plasma* **2** 3833

Framing shadowgraphy of 266nm laser probing for the diagnosis of Z-pinch plasmas^{*}

Wang Zhen^{1,2)} Yang Jian-Lun²⁾ Xu Rong-Kun²⁾ Li Lin-Bo²⁾ Xu Ze-Ping²⁾ Zhang Fa-Qiang^{1,2)} Zhong Yao-Hua²⁾

¹ *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

² *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

(Received 23 February 2006 ; revised manuscript received 24 March 2006)

Abstract

Framing shadowgraphy of UV laser probing with the 4th harmonic Nd-YAG Laser was developed for the diagnosis of Z-pinch plasmas. This system can effectively shield visible light and has advantages of high temporal resolution, large optical angular aperture and wide measuring range. The designed parameters and experimental results in implosions of tungsten wire array are presented in this paper.

Keywords : Z-pinch, laser probing, plasma distribution, framing shadowgraphy

PACC : 5270, 0760H, 0768, 4278D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10035030).