

用 X-pinch 对双丝 Z 箍缩进行轴向 X 射线背光照相

赵岫 朱鑫磊 石桓通 邹晓兵 王新新

Axial backlighting of two-wire Z-pinch using an X-pinch as an X-ray source

Zhao Shen Zhu Xin-Lei Shi Huan-Tong Zou Xiao-Bing Wang Xin-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 015203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.015203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.015203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲功率驱动器与 Z 箍缩负载耦合的全电路数值模拟

Full circuit model for coupling pulsed power driver with Z-pinch load

物理学报.2014, 63(12): 125207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125207>

Z 箍缩驱动动态黑腔中的基本能量转移特征

Basic characteristics of kinetic energy transfer in the dynamic hohlraums of Z-pinch

物理学报.2014, 63(12): 125208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125208>

快前沿电流产生气化铝单丝 Z 箍缩负载的研究

Gasified singlewire almunum Z-pinch load formed by fast rising current

物理学报.2014, 63(12): 125206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125206>

强光一号兆安电流钨丝 X 箍缩实验研究

Experimental investigations of tungsten X-pinchs using the QiangGuang-1 facility

物理学报.2014, 63(3): 035205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.035205>

Z 箍缩内爆产生的电磁脉冲辐射

Electromagnetic pulse emission produced by Z pinch implosions

物理学报.2013, 62(24): 245201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.245201>

用 X-pinch 对双丝 Z 箍缩进行轴向 X 射线背光照相*

赵岫 朱鑫磊 石桓通 邹晓兵 王新新†

(清华大学电机系, 北京 100084)

(2014 年 6 月 1 日收到; 2014 年 8 月 12 日收到修改稿)

利用 PPG-1 脉冲电流源 (400 kA, 100 ns), 同时驱动 X-pinch 和双丝 Z 箍缩负载. 用 X-pinch 作为 X 射线源, 对双丝 Z 箍缩进行了轴向背光照相的初步实验. 得到了双丝 Z 箍缩在 r - θ 平面上随时间演化的图像, 观察到了丝阵 Z 箍缩所有早期过程, 包括丝芯膨胀、冕层等离子体产生、等离子体向丝阵中心的运动、先驱等离子体形成. 利用阶跃光楔滤片, 对上述背光图像进行了等离子体质量面密度的标定, 首次得到了在 r - θ 平面上双丝 Z 箍缩等离子体质量面密度的时空分布图像.

关键词: X-pinch, Z 箍缩, X 射线背光照相, 阶跃光楔滤片

PACS: 52.59.Qy, 52.58.Lq, 42.30.Va

DOI: 10.7498/aps.64.015203

1 引言

丝阵 Z 箍缩 (wire-array Z-pinch) 具有超强的 X 射线辐射能力和电磁能量到 X 射线辐射能量的转换效率, 使其可能用于驱动惯性约束核聚变^[1]. 然而, 人们对丝阵 Z 箍缩早期物理过程的认识仍然处于初级阶段, 而研究这些物理过程的最佳选择之一是采用高时空分辨的 X 射线背光照相^[2], 其得到的结果可为相关理论研究和数值模拟^[3-5]提供实验依据.

利用 X 箍缩 (X-pinch) 作为 X 射线源, 对丝阵 Z 箍缩进行背光照相是一种较为简单易行的方法^[6,7]. X-pinch 是丝阵 Z 箍缩的一种简单变形, 它将两根或多根金属细丝交叉并接触于一点, 构成 X 形状的叉丝负载. 当脉冲大电流通过该叉丝负载时, 在叉丝交点处将产生一个或多个高温、高密度的等离子体热点, 并辐射强烈的亚纳秒脉冲 X 射线^[8,9].

以往人们利用 X-pinch 对丝阵 Z 箍缩进行背光照相时, 几乎都是从侧面进行拍照^[10-15], 或称之为径向背光照相. Z 箍缩丝阵通常为一个圆柱对称的结构, 径向背光照相只能观察该丝阵 Z 箍缩在长度方向 (即 Z 方向) 上的演变过程, 而无法观察其在 r - θ 平面上的演变过程. 显然, 只有对丝阵 Z 箍缩进行轴向背光照相, 才能观察丝阵 Z 箍缩在 r - θ 平面上的演变过程, 这对于研究丝阵 Z 箍缩等离子体的内爆过程是至关重要的. 2009 年, 美国康奈尔大学开始利用 X-pinch 作为 X 射线源, 对丝阵 Z 箍缩进行轴向背光照相^[16].

本文利用 PPG-1 脉冲电流源 (400 kA, 100 ns)^[17], 同时驱动 X-pinch 和双丝 Z 箍缩负载. 用 X-pinch 作为 X 射线源, 对双丝 Z 箍缩进行了轴向背光照相的初步实验. 实验得到了双丝 Z 箍缩在 r - θ 平面上随时间演化的图像, 利用阶跃光楔 (step-wedge) 滤片^[10-14], 对上述图像进行了等离子体质量面密度的绝对标定, 首次得到了在 r - θ 平面上双丝 Z 箍缩等离子体质量面密度的时空分布图像.

* 国家自然科学基金 (批准号: 51177086, 11135007, 51237006) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangxx@tsinghua.edu.cn

2 实验布置和诊断仪器

2.1 实验布置

为了便于读者理解本文所采用的轴向背光照相, 我们首先简介径向背光照相. 如图 1 所示, 作为被拍照目标的 Z 箍缩丝阵安装在阴阳极之间的轴线上, 作为拍照光源的 X-pinch 叉丝取代了一根回流柱并安装在其位置上. PPG-1 脉冲电流源输出脉冲大电流, 它从阴极进入 Z 箍缩丝阵而抵达阳极, 然后经由回流柱回到 PPG-1. 安装在丝阵 Z 箍缩侧面的 X-pinch 叉丝交点处辐射出 X 射线, 它们沿半径方向穿过 Z 箍缩等离子体, 抵达 X 射线胶片, 完成对丝阵 Z 箍缩的径向背光照相.

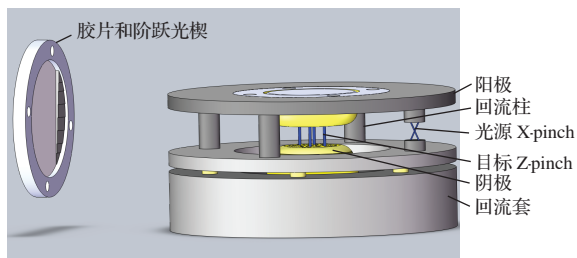


图 1 用 X-pinch 作为 X 射线源对 Z 箍缩进行径向背光照相

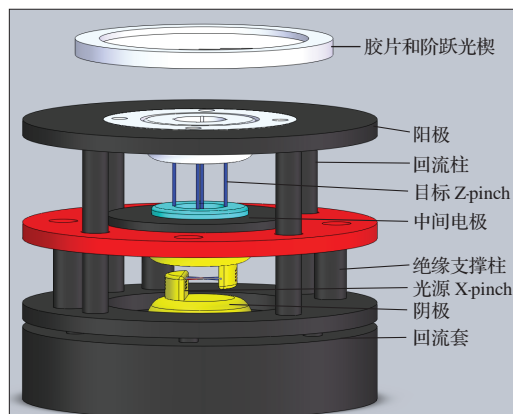


图 2 用 X-pinch 作为 X 射线源对 Z 箍缩进行轴向背光照相

理想的丝阵 Z 箍缩过程是: 丝爆等离子体融合成一个密度均匀的圆筒状壳层并对称地向轴线箍缩. 显然, 要观察这种内爆过程, 必须对丝阵 Z 箍缩进行如图 2 所示的轴向背光照相. 轴向背光照相的实验布置和图 1 基本相同, 两者的差别是: 1) 将竖直安装的 X-pinch 叉丝从回流柱位置移到 Z 箍缩正下方水平安装, 并且串接于阴极和 Z 箍缩之间; 2) 将 X 射线胶片及阶跃光楔滤片移到阳极正上方水

平放置; 3) 将圆板型的阳极更换为带中孔的圆环, 以便 X-pinch 的 X 射线从下方沿轴向穿过丝阵 Z 箍缩等离子体后, 继续从阳极的中孔穿出以抵达 X 射线胶片.

需要指出的是: 由于将 X-pinch 移到 Z 箍缩正下方并串接于阴极和 Z 箍缩之间, 使得阴阳极之间的距离从 1.4 cm 增加到了 10.4 cm, 这大大增加了 PPG-1 放电回路的电感, 导致 PPG-1 的输出电流从额定的 400 kA 减小到 200 kA. 考虑到丝阵 Z 箍缩每根细丝需要电流大约 100 kA, 我们选用双丝 Z 箍缩.

2.2 诊断仪器

实验中使用的主要诊断仪器有 Rogowski 线圈、光导探测器 (photoconducting detector, PCD) 和阶跃光楔滤片. Rogowski 线圈用于测量流过丝阵 Z 箍缩的电流波形, PCD 用于测量 X-pinch 辐射的 X 射线脉冲波形. 阶跃光楔滤片用于实验标定丝阵 Z 箍缩等离子体的质量面密度分布, 图 3 是阶跃光楔滤片实物照片及其局部放大图. 图 3 实际上是由两个滤片构成的, 一个是厚度为 $6.5 \mu\text{m}$ 、直径为 30 mm 的圆形铝箔, 称之为主滤片; 另一个是在主滤片右侧覆盖着一个深色的窄条, 它就是所谓的阶跃光楔滤片. 阶跃光楔滤片的制作方法是: 在圆形铝箔基体的右侧, 利用磁控溅射的方法镀上不同厚度的金属层, 其材料和 Z 箍缩细丝的材料相同. 本文中 Z 箍缩选用钼丝, 故镀层材料也为钼. 从图 3 右侧阶跃光楔的局部放大图可以看到, 钼镀层从下至上由 8 个颜色逐渐加深的部分组成, 它们的钼层厚度阶跃式增大, 依次为 0.016, 0.029, 0.072, 0.17, 0.304, 0.519, 0.855, $1.101 \mu\text{m}$, 故称之为阶跃光楔 (step-wedge).

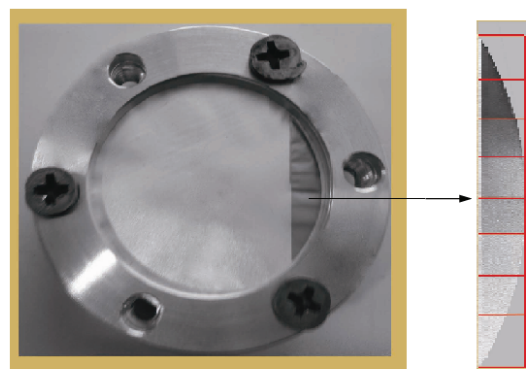


图 3 阶跃光楔滤片实物照片及其局部放大图

如上所述, 和美国康奈尔大学相同, 我们也采用阶跃光楔滤片, 对丝阵 Z 箍缩等离子体的质量面密度分布进行实验标定. 但是, 我们对康奈尔大学的方法进行了改进. 康奈尔大学的主滤片和阶跃光楔滤片是各自分离的两块滤片, 安装在空间的不同位置上. 这种方法的缺点是: 被拍照等离子体图像和阶跃光楔图像分别在两张胶片上, 两张胶片处理 (如显影、扫描等) 过程的微小差别可能带来额外的误差. 为了避免这个缺点, 我们将主滤片和阶跃光楔滤片整合在一片圆形铝箔上, 安装在空间的同一位置上. 为了使读者更方便地理解我们方法的优点, 我们给出如图 4 所示的标定原理图.

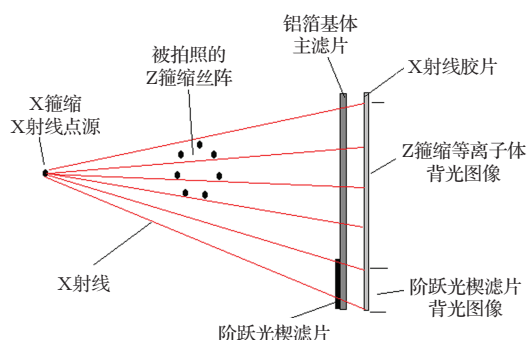


图 4 (网刊彩色) 标定丝阵 Z 箍缩等离子体质量面密度的实验原理图

从 X-pinch 辐射的 X 射线经过以下 2 条光路同时在 X 射线胶片上成像: 其一是 X 射线穿过 Z 箍缩钼等离子体, 再穿过铝箔基体; 其二是 X 射线直接穿过阶跃光楔滤片 (钼镀层和铝箔基体). 由于阶跃光楔钼镀层的面密度分布是已知的, 通过比较 X 射线胶片上 Z 箍缩钼等离子体背光图像和阶跃光楔滤片背光图像的黑度, 便可确定 Z 箍缩钼等离子体在 $r-\theta$ 平面上的质量面密度分布.

考虑到阶跃光楔滤片的 8 个钼镀层厚度的范围为 $0.016\text{--}1.101\text{ }\mu\text{m}$, 钼的密度为 10.2 g/cm^3 , 该阶跃光楔滤片可标定的钼等离子体质量面密度范围是 $16.3\text{--}1.12\text{ mg/cm}^2$.

3 实验结果及讨论

为了研究快速瞬变的丝阵 Z 箍缩早期物理过程, 必须拍摄不同时刻的背光图像, 这就要求 X-pinch 辐射的 X 射线脉冲出现在 Z 箍缩放电电流波形的不同时刻. 典型的 Z 箍缩电流和 X-pinch 辐射的 X 射线脉冲波形如图 5 所示, 其中构成 Z 箍缩的双丝和 X-pinch 的叉丝均采用直径为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的钼

丝. 若以 Z 箍缩电流波形的起始时刻为时间参考点 $t = 0$, 则 X-pinch 的 X 射线脉冲出现时刻 $t_{\text{X-ray}}$ 就是背光图像的拍摄时刻. 例如, 图 5 中的 $t_{\text{X-ray}}$ 约为 87 ns .

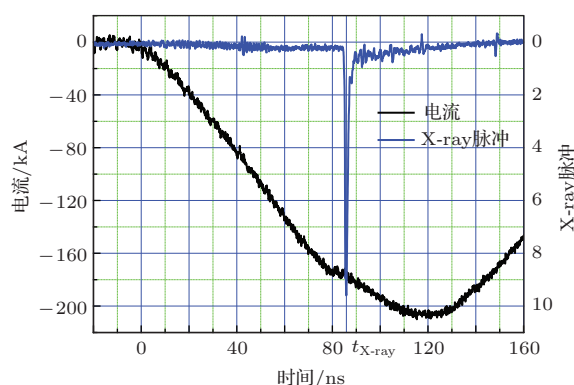


图 5 典型的 Z 箍缩电流和 X-pinch 的 X 射线脉冲波形图

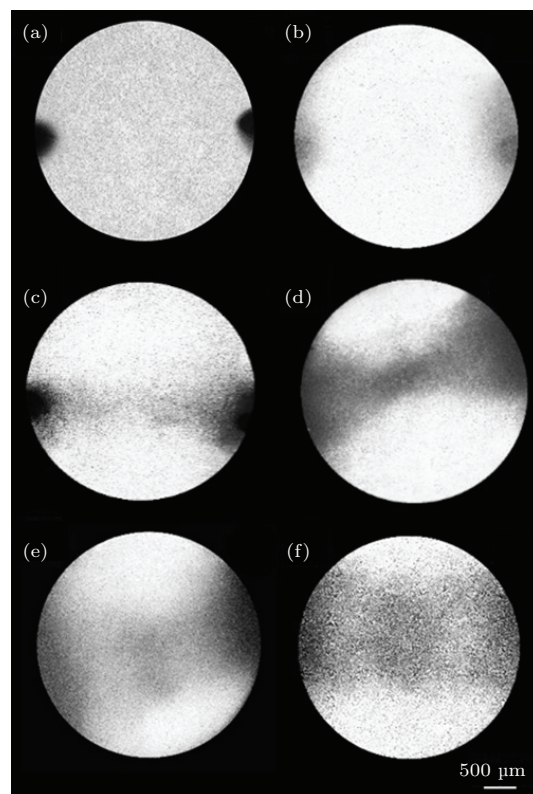


图 6 直径 $30\text{ }\mu\text{m}$ 双钼丝 Z 箍缩等离子体轴向背光图像, 拍摄时间分辨为 (a) $t = 30\text{ ns}$; (b) $t = 47\text{ ns}$; (c) $t = 60\text{ ns}$; (d) $t = 77\text{ ns}$; (e) $t = 90\text{ ns}$; (f) $t = 108\text{ ns}$

实验结果表明: 当脉冲电流波形保持不变时, 构成 X-pinch 的叉丝质量线密度越大, $t_{\text{X-ray}}$ 也越大. 这是容易理解的, 脉冲电流波形保持不变, 意味着用于压缩 X-pinch 等离子体的磁场保持不变; 而叉丝质量线密度越大, 意味着磁场需要压缩的等

离子体质量越大, 将等离子体压缩到辐射 X 射线所需的压缩时间越长. 根据这一实验结果, 我们选择不同质量线密度的细丝作为 X-pinch 叉丝, 可以方便地改变 $t_{x\text{-ray}}$, 即改变 Z 箍缩背光图像的拍摄时刻.

采用上述方法, 我们可以得到多幅不同时刻拍摄的双丝 Z 箍缩等离子体背光图像, 简称不同时刻图像. 图 6 是不同时刻的 (直径 $30\ \mu\text{m}$) 双钼丝 Z 箍缩等离子体轴向背光图像, 它们的拍摄时刻 (即 $t_{x\text{-ray}}$) 分别为 30 ns, 47 ns, 60 ns, 77 ns, 90 ns, 108 ns. 图中白色圆形为阳极板的中心圆孔, Z 箍缩双钼丝大致安装在此白色圆周水平直径的左右端点. 显然, 轴向背光图像是指双钼丝横截面所在平面上

的背光图像.

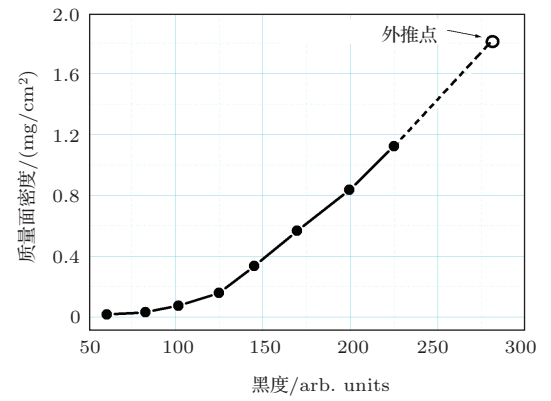


图7 阶跃光楔滤片背光图像黑度和质量面密度关系曲线

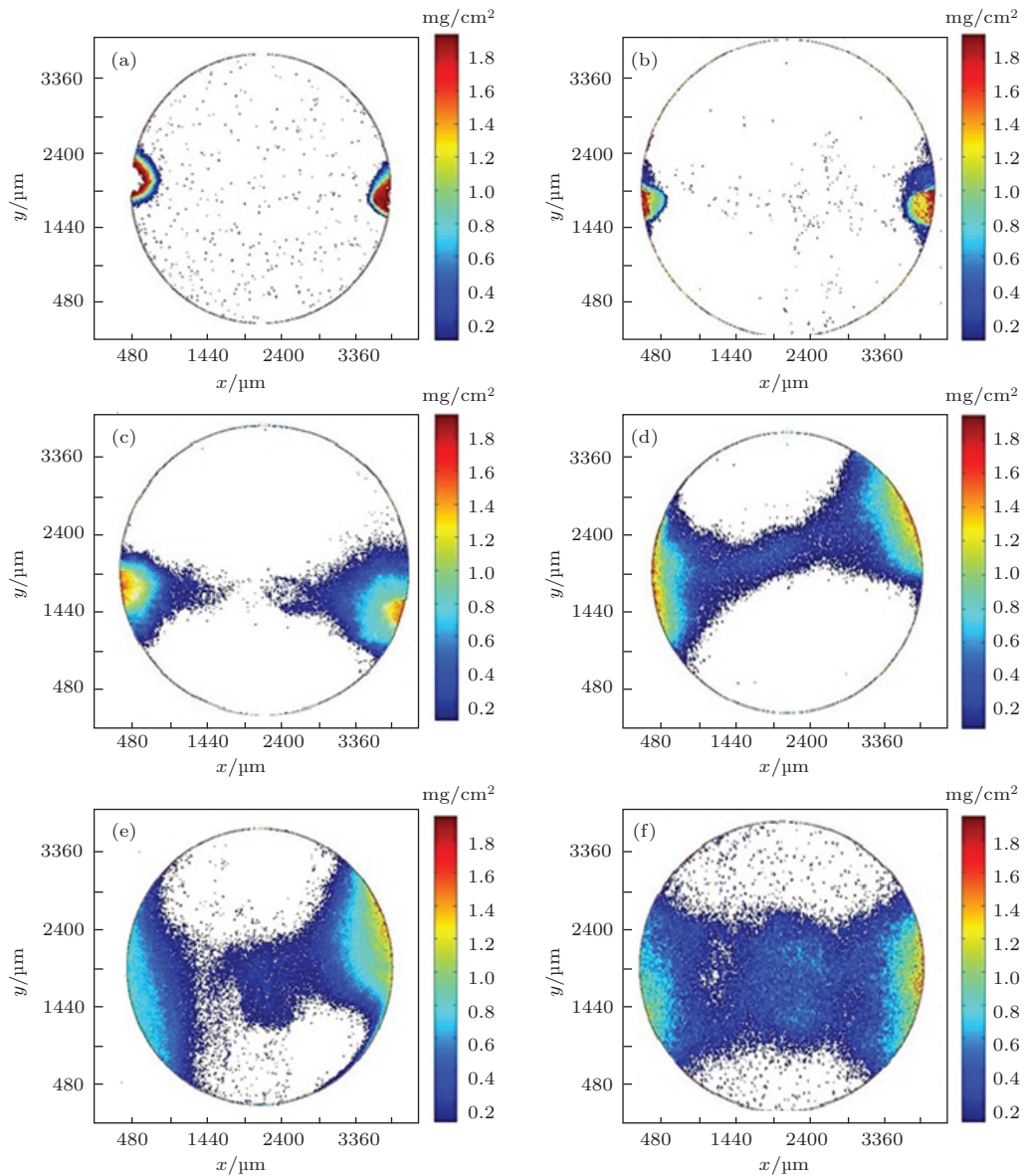


图8 (网刊彩色) 双丝 Z 箍缩等离子体质量面密度时空分布, 拍摄时间分辨为 (a) $t = 30\ \text{ns}$; (b) $t = 47\ \text{ns}$; (c) $t = 60\ \text{ns}$; (d) $t = 77\ \text{ns}$; (e) $t = 90\ \text{ns}$; (f) $t = 108\ \text{ns}$

从图 6(a) 可以看到, 位于圆周左右的两根丝芯膨胀, 其尺寸已经远大于其冷丝直径 $30\ \mu\text{m}$; 并且丝芯随时间膨胀的同时, 慢慢生出冕层等离子体, 见图 6(b). 随着通流时间及电流的继续增大, 见图 6(c) 和 (d), 等离子体开始逐渐向丝阵中心移动. 最后, 见图 6(e) 和 (f), 两丝之间的等离子体在丝阵中心汇聚, 形成了先驱等离子体 (precursor plasma). 值得注意的是: 虽然采用的只是双丝 Z 箍缩, 我们仍然可以观察到多丝 Z 箍缩所有早期过程, 包括丝芯膨胀、冕层等离子体产生、等离子体向心运动、先驱等离子体形成. 当然, 与多丝 Z 箍缩相比, 双丝 Z 箍缩产生的全局磁场 (global magnetic field) 要小得多. 因此, 在我们实验中, 无法看到多丝 Z 箍缩后期过程 (如丝芯内爆).

图 6 只是定性给出了双丝 Z 箍缩的早期物理过程, 但是, 对于某些 Z 箍缩物理研究而言, 例如丝阵 Z 箍缩的物理建模以及数值模拟程序的校验, 人们希望能够从实验中定量地得到丝阵 Z 箍缩早期过程中的某些物理参数, 例如等离子体质量密度的时空分布. 因此, 我们利用阶跃光楔滤片以及图 4 所介绍的实验标定方法, 对图 6 的各图像进行了双丝 Z 箍缩等离子体质量面密度的标定.

在比较 Z 箍缩钼等离子体背光图像和阶跃光楔滤片背光图像的黑度时发现: Z 箍缩钼丝芯位置的背光图像黑度常常大于阶跃光楔滤片最厚钼镀层处的背光图像黑度, 这表明钼丝芯位置的等离子体质量面密度高于阶跃光楔滤片所能标定的最大值 ($1.12\ \text{mg}/\text{cm}^2$). 为了解决这个问题, 如图 7 所示, 我们对实验测得的阶跃光楔滤片背光图像黑度和质量面密度关系曲线作了外推, 将其标定范围外推到 $1.8\ \text{mg}/\text{cm}^2$.

最终的标定结果如图 8 所示. 在电流起始阶段, 图 6(a) 和 (b), 我们看到的是高密度的丝芯及其周边低密度的等离子体. 丝芯密度较高, 左丝中央部分甚至超过了阶跃光楔滤片可标定的质量面密度的最大值 ($1.8\ \text{mg}/\text{cm}^2$), 故采用白色替代. 环绕丝芯周边的冕层等离子体密度比较低, 小于 $1\ \text{mg}/\text{cm}^2$. 在 $t = 60\text{--}77\ \text{ns}$, 图 6(c) 和 (d), 丝芯逐渐消融, 其周围的等离子体有了明显的径向扩展, 同时向丝阵中间区域运动, 在中间融合的等离子体面密度约为 $0.25\text{--}0.6\ \text{mg}/\text{cm}^2$. 在 $t = 90\text{--}108\ \text{ns}$, 图 6(e) 和 (f), 高密度丝芯几乎消失了, 而轴心处的先驱等离子体面积和密度都有所增大, 大片区域的等离子体面密度可以达到 $0.5\ \text{mg}/\text{cm}^2$, 局部等离

子体面密度甚至可以达到 $0.8\text{--}1\ \text{mg}/\text{cm}^2$.

4 结 论

基于 PPG-1 脉冲功率装置 ($400\ \text{kA}$, $100\ \text{ns}$), 实现了 X-pinch 对双丝 Z 箍缩的轴向 X 射线背光照相. 即使是采用简单的双丝 Z 箍缩, 在轴向背光图像上仍然可以观察到丝阵 Z 箍缩所有早期过程, 包括丝芯膨胀、冕层等离子体产生、等离子体向丝阵中心运动、先驱等离子体形成. 利用阶跃光楔滤片, 首次得到了在 $r\text{--}\theta$ 平面上双丝 Z 箍缩等离子体质量面密度的时空分布图像.

我们后续工作设想是: 将双丝 Z 箍缩改进为多丝 ($4\text{--}8$ 丝) Z 箍缩, 并将轴向 X 射线背光照相实验与相关理论研究及数值模拟工作结合起来, 深入研究丝阵 Z 箍缩内爆早期物理过程.

参考文献

- [1] Matzen M K, Sweeney M A, Adams R G, Asay J R, Bailey J E, Bennett G R 2005 *Phys. Plasmas* **12** 055503
- [2] Volkov G S, Grabovskii E V, Zurin M V, Mitrofanov K N, Oleinik G M, Porofeev I Y 2003 *Instrum. Exp. Tech. (USSR)* **47** 376
- [3] Huang J, Sun S K, Xiao D L, Ding N, Ning C, Zhang Y, Xue C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6531 (in Chinese) [黄俊, 孙顺凯, 肖德龙, 丁宁, 宁成, 张扬, 薛创 2010 物理学报 **59** 6531]
- [4] Zhang Y, Ding N 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2994
- [5] Zeng Z Z, Qiu A C 2004 *Chin. Phys. B* **13** 201
- [6] Kalantar D H, Hammer D A 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 779
- [7] Lebedev S V, Beg F N, Bland S N, Chittenden J P, Dangor A E, Haines M G, Zakaullah M 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 671
- [8] Shelkovenko T A, Pikuz S A, Hammer D A, Dimant Y S, Mingaleeva A R 1999 *Phys. Plasmas* **6** 2840
- [9] Shelkovenko T A, Sinars D B, Pikuz S A, Hammer D A 2001 *Phys. Plasmas* **8** 1305
- [10] Zhang R, Zhao T, Zou X B, Wang X X, Zhao Y C, Du Y Q 2010 *High Power Laser Part. Beams* **22** 931 (in Chinese) [张然, 赵彤, 邹晓兵, 王新新, 赵勇超, 杜彦强 2010 强激光与离子束 **22** 931]
- [11] Zhu X L, Zhang R, Luo H Y, Zhao S, Zou X B, Wang X X 2012 *High Power Laser Part. Beams* **24** 539 (in Chinese) [朱鑫磊, 张然, 罗海云, 赵岫, 邹晓兵, 王新新 2012 强激光与离子束 **24** 539]
- [12] Zhao T, Zou X B, Wang X X, Zhao Y C, Du Y Q, Zhang R, Liu R 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci* **38** 646
- [13] Liu R, Zou X B, Wang X X, Zeng N G, He L Y 2008 *Laser Part. Beams* **26** 455
- [14] Liu R, Wang X X, Zou X B, Zeng N G, He L Y 2008 *Europhys. Lett.* **83** 25002

- [15] Zhao T, Zou X B, Zhang R, Wang X X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 075205
 [16] Blesener I C, Greenly J B, Pikuz S A, Shelkovenko T A, Vishniakou S, Hammer D A, Kusse B R 2009 *Rev. Sci.*

- Instrum* **80** 123505
 [17] Zou X B, Liu R, Zeng N G, Han M, Yuan J Q, Wang X X, Zhang G X 2006 *Laser Part. Beams* **24** 503

Axial backlighting of two-wire Z-pinch using an X-pinch as an X-ray source^{*}

Zhao Shen Zhu Xin-Lei Shi Huan-Tong Zou Xiao-Bing Wang Xin-Xin[†]

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 1 June 2014; revised manuscript received 12 August 2014)

Abstract

The axial backlighting of two-wire Z-pinch using an X-pinch as an X-ray source was conducted on PPG-1, a pulsed power generator with a current of 400 kA in amplitude and 100 ns in pulse width. Its time-resolved axial backlighting images are obtained. In the backlighting images all the physical processes similar to those occurring in the early stage of the wire-array Z-pinch are observed, including the expansion of the high-density wire core surrounded by low-density coronal plasmas, the motion of the coronal plasma toward the axis of the wire-array, and the formation of precursor plasma. The areal mass density of the plasma shown in the backlighting images is calibrated with step-wedge filters. And the time-resolved radial distributions of the areal mass density of the plasma from the two-wire Z-pinch are obtained.

Keywords: X-pinch, Z-pinch, X-ray backlighting, step-wedge filter

PACS: 52.59.Qy, 52.58.Lq, 42.30.Va

DOI: 10.7498/aps.64.015203

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51177086, 11135007, 51237006).

[†] Corresponding author. E-mail: wangxx@tsinghua.edu.cn