

“阳”加速器钛丝 X 箍缩光源辐射特性实验研究*

周少彤 李军 黄显宾 蔡红春 张思群 李晶 段书超[†] 周荣国

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2011年9月13日收到; 2012年2月8日收到修改稿)

为了利用 X 箍缩产生的点光源作为背光源对丝阵 Z 箍缩内爆早期的负载内部结构进行背光照相, 在“阳”加速器 (电流峰值为 500—800 kA, 上升时间约 80 ns) 上开展了钛丝 (丝交叉角度为 60°) X 箍缩光源辐射特性的初步实验研究. 通过 X 射线二极管探测器、透射光栅谱仪、晶体谱仪和狭缝相机等诊断设备获取了箍缩点光源的辐射功率达到 1.5 GW 左右, 辐射能量约为 1 J, 光子能量为 keV 量级的辐射能谱范围主要集中在 1—4 keV 能段, 点光源尺寸小于 15 μm , 其时间尺度 (辐射脉冲半高宽) 达到了 200 ps. 对光源特征信息进行了初步分析, 同时掌握了有效获取钛丝 X 箍缩单脉冲点光源的方法.

关键词: X 箍缩, X 射线背光照相, X 射线, Z 箍缩

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

1 引言

X 箍缩是 Z 箍缩的一个特殊结构, 它使用两根或多根金属丝 (典型直径为 5—50 μm) 相互交叉在同一个点上, 形成 X 形状. 作为一个大电流脉冲发生器的负载, 金属丝发生电爆炸并在丝交叉处产生一个 10² μm 级尺度的微 Z 箍缩, 形成一个小尺寸的 (μm 量级)、短寿命的 (亚 ns 量级)、高亮度的 X 射线点光源, 并且从电流开始到箍缩的时间具有较强的可重复性^[1,2].

X 箍缩背光照相技术是一种新型的图像诊断技术^[3,4]. 利用 X 箍缩产生的强 X 射线光源作为背光源, 可以对金属丝电爆炸和金属丝阵 Z 箍缩内爆动力学^[5,6] 过程进行有效的图像诊断^[7-9], 如丝爆等离子体的密度分布、丝爆等离子体质量占初始丝质量的份额同脉冲电流上升沿和电流峰值的关系、丝阵内爆初期金属丝等离子体的形成过程、等离子体质量分布的均匀性、先驱等离子体的形成过程、瑞利-泰勒 (RT) 不稳定性的扰动源等. 此外 X 箍缩产生的 X 射线源还可用于 X 射线显微成像技术研究.

在国外, 美国康奈尔大学、英国帝国理工大学等部分研究机构对 X 箍缩的内爆过程、辐射特性等内容进行了较为详细的研究并获取了较理想的背光点光源, 其能谱范围主要分布在 1—10 keV 并随负载材料的不同而有差异, 点光源空间尺寸小于 10 μm , 光源发光时间尺度为 10² ps 量级, 有时甚至达到了 10 ps 量级. 同时, 利用产生的光源对微小生物进行了背光照相并取得了不错的背光图像. 但是, 在利用 X 箍缩对丝阵 Z 箍缩进行背光照相的研究中, 由于实验中驱动电流的分配问题、电流与负载的匹配以及箍缩同步等问题带来的困难, 使得这方面的结果却寥寥无几. 国内, 中国工程物理研究院、西北核技术研究所以及清华大学都对 X 箍缩技术进行了初步的研究, 其中清华大学也获取了不错的微小生物背光图像^[10,11].

本文介绍了在“阳”加速器上开展的钛丝 X 箍缩点光源辐射特性实验研究的初步结果, 该研究的目的是为 X 箍缩背光照相技术在丝阵 Z 箍缩中的应用奠定基础. 实验采用叉丝负载加分流丝的方法获取了较理想的钛丝 X 箍缩单脉冲点光源, 光源的辐射功率达到 1.5 GW 左右, 能量约为 1 J, 光子能量为 keV 量级的 X 射线的能谱范围主要集中

* 中国工程物理研究院双百人才基金 (批准号: 2008R0104) 资助的课题.

[†] E-mail: s.duan@163.com

在 1—4 keV, 光源的时间尺度 (辐射脉冲半高宽) 达到了 200 ps, 其空间尺寸小于 15 μm .

2 实验设备和方法

2.1 实验装置

钛丝 X 箍缩实验是在中国工程物理研究院流体物理研究所的“阳”加速器上开展的. “阳”加速器是一台 TW 量级的脉冲功率装置, 全长为 17.5 m, 最大处直径为 4.5 m, 主要由 Marx 发生器、Blumlein 脉冲形成线、主开关、变阻抗水介质传输线、真空磁绝缘传输线和负载组成. 在钛丝 X 箍缩实验中, 加速器实际充电电压为 60 kV, 驱动电流峰值在 500—800 kA 左右, 上升前沿 (10%—90%) 约为 80 ns.

2.2 诊断设备

用于钛丝 X 箍缩光源辐射诊断的仪器设备主要有 X 射线二极管 (XRD) 探测器^[12]、透射光栅谱仪^[13]、晶体谱仪^[14]和狭缝相机.

XRD 探测器用于测量 X 射线辐射绝对强度, 其前置滤片由 1 μm 碳膜加 8 μm Mylar 膜组成, 允许光子能量大于 1 keV 的 X 射线穿过, 信号由一台频带宽度为 6 GHz、采样率为 25 GS/s 的数字示波器记录. 透射光栅谱仪用于确定箍缩光源辐射的能谱范围, 光栅周期为 300 nm, 光栅前加 8 μm 厚的 Mylar 膜用于吸收光子能量小于 1 keV 的 X 射线, 在位于光栅前紧贴光栅处放置一直径为 50 μm 的针孔用作限光, 并使其测量的光谱图像在光栅栅线方向因小孔成像而具有一维空间分辨, 谱仪采用电荷耦合装置 (CCD 相机) 记录衍射图像. 晶体谱仪主要用来测量箍缩等离子体的线谱辐射, 采用的晶体为云母, 探测范围为 2—6 keV, 其能谱分辨能力 $\lambda/\Delta\lambda \geq 200$. 另外, 一台高分辨狭缝积分相机用来对箍缩光源的尺寸进行测量, 狭缝尺寸为 10 μm , 狭缝距光源 150 mm, 相机放大倍率为 3.66 倍. 晶体谱仪和狭缝相机都采用柯达公司生产的 BioMax MS 型胶片记录图像.

3 实验结果及分析

实验使用的负载为两根直径 50 μm 的钛丝, 丝

交叉角度为 60°, 电极间距为 14 mm.

在实验中发现, 负载为 2×50 μm 钛丝 X 箍缩产生的 X 射线辐射全部为多脉冲结构, 脉冲发射时间覆盖了从电流上升沿几十 ns 开始到电流峰值之后的时间范围. 分析认为, 由于负载质量较小, X 箍缩内爆发生在电流的起始阶段, 内爆过程结束后, 驱动电流继续流过剩余的等离子体, 使它们在电磁力的作用下向负载轴心处运动并在多处再次发生箍缩, 这是产生多峰的主要原因. 针对上述原因, 在实验中增加了负载金属丝的根数, 但结果并没有明显改善. 分析认为, 由于负载质量密度与驱动电流不匹配, 以及负载金属丝根数的增加导致叉丝交叉点的结构更加复杂, 从而影响了箍缩的质量.

为了使负载线质量密度与驱动电流匹配, 实验采用了在负载电极之间加一根金属丝, 通过对电流分流的方法来减少通过叉丝的电流. 实验中发现, 通过此方法减少流过叉丝负载的电流后, 箍缩产生 X 射线脉冲的数量明显减少, 实验中小于等于 2 个脉冲的出现概率超过了 90%, 结果的重复性较好. 另外, 单个 X 射线脉冲的持续时间也进一步缩短. 图 1 是 XRD 探测器获取的典型的 2×50 μm 钛丝加分流丝 X 箍缩的 X 射线辐射功率波形, 分流丝采用一根直径为 300 μm 的铜丝. 实验中 XRD 测量到了一个光子能量大于 1 keV 的 X 射线单脉冲, 脉冲发射时刻在电流起点后 73.9 ns, 其峰值功率约为 1.5 GW, 对功率波形进行时间积分即可获得此单脉冲 X 射线能量为 1.14 J. 从图 1 的内插图可以测量单脉冲的半高宽 (FWHM) 约为 200 ps. XRD 探测器前的滤片为 1 μm 碳加 8 μm Mylar 膜, 允许光子能量大于 1 keV 的 X 射线透过.

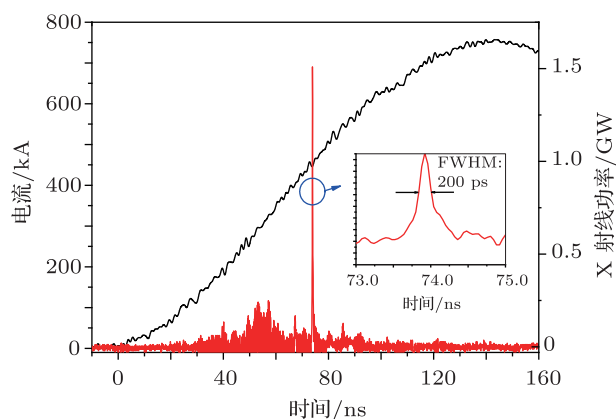


图 1 典型驱动电流波形和钛丝 X 箍缩 X 射线辐射波形, 内插图为脉冲的局部放大图

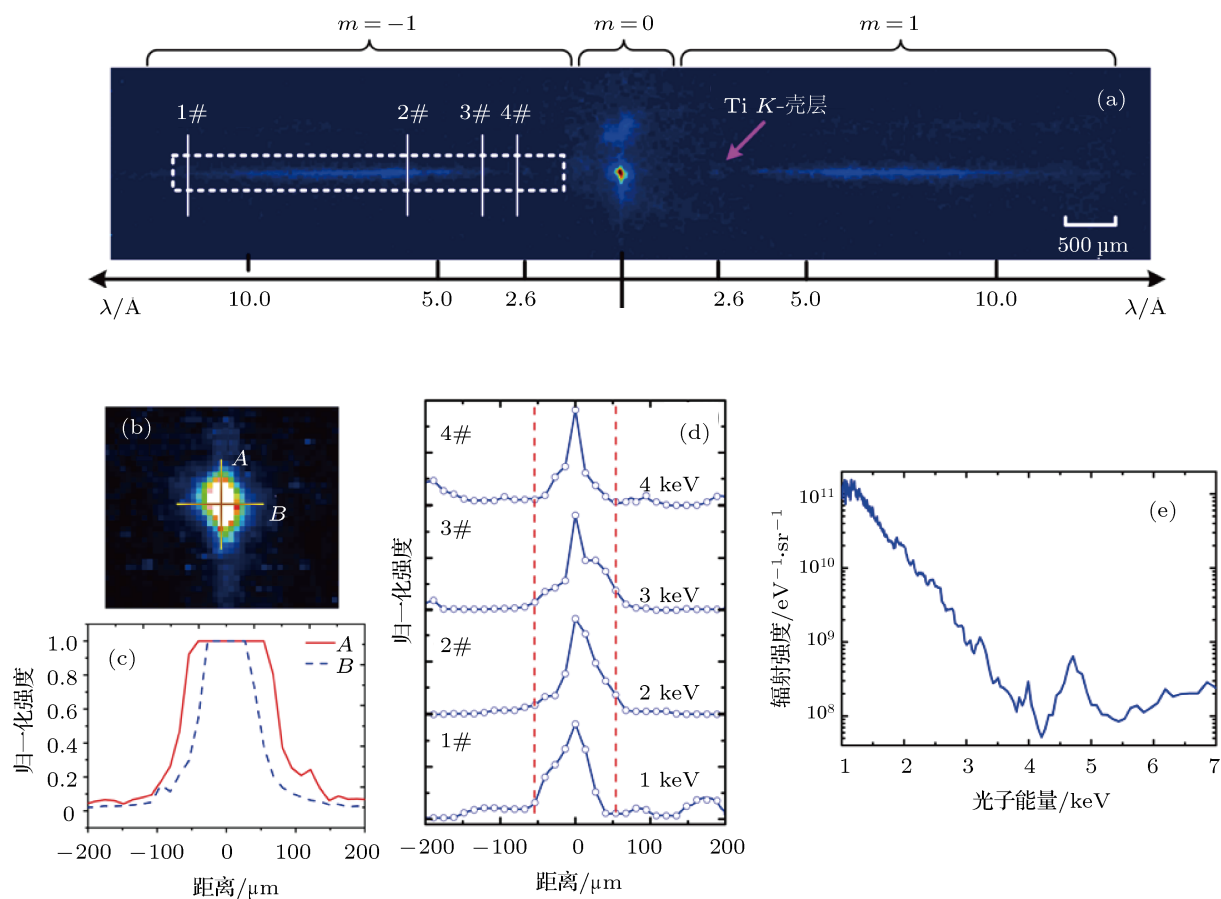


图2 钛丝 X 箍缩的透射光栅谱仪测量结果 (a) 光谱衍射图像; (b) 热点的放大图像; (c) 热点区域图像强度的变化曲线; (d) 衍射图像强度沿垂直色散方向的变化曲线; (e) 由图 2(a) 中白色虚线矩形包围区域的图像强度计算出的热点的光谱辐射强度

图 2 给出了与图 1 对应发次的针孔式透射光栅谱仪的测量结果, 光栅前加 $8\ \mu\text{m}$ 厚的 Mylar 膜. 其中图 2(a) 是光谱衍射图像, 图 2(b) 是热点的放大图像, 图 2(c) 是热点区域图像强度的变化曲线, 图 2(d) 是衍射图像强度沿垂直色散方向的变化曲线, 分别对应图 2(a) 中 1#—4# 白色实线的位置.

根据图 2(a) 中的 0 阶衍射图像可确定该发实验仅产生了一个 keV 量级的热点光源. 图 2(b) 中 A, B 方向的强度分布由图 2(c) 给出, 由此可确定热点尺寸约为 $200\ \mu\text{m}$. 从 1 阶衍射图像可看出该热点在 $0.33\text{—}1.3\ \text{nm}$ 谱段内有连续谱辐射放出. 当光子能量进一步增加时, 衍射信号变得非常弱, 仅在 $0.26\ \text{nm}$ 附近能够观察到微弱的钛等离子体的 K 壳层辐射. 为了了解辐射源尺寸随光子能量的变化, 图 2(d) 给出了衍射信号沿图 2(a) 中 4 条白色实线的分布图, 它们分别与光子能量 $h\nu = 1, 2, 3, 4\ \text{keV}$ 相对应. 由于 1 阶衍射的影响, 谱仪对 $1\text{—}4\ \text{keV}$ X 射线的空间分辨率在 $102\text{—}120\ \mu\text{m}$ 之间, 因此图 2(d) 中测量的 4 条曲线的半高宽 (光源尺寸) 约为 $100\ \mu\text{m}$ 并不是特别精确, 但是仍能够看出

在 $1\text{—}4\ \text{keV}$ 能段范围内源尺寸不超过 $100\ \mu\text{m}$. 同时, X 射线波形的半高宽由 $1\ \text{keV}$ 时的约 $46\ \mu\text{m}$ 减小至 $4\ \text{keV}$ 时的约 $19\ \mu\text{m}$, 表明热点尺寸随着光子能量的升高在迅速减小.

图 2(e) 给出了由图 2(a) 中白色虚线矩形包围区域的图像强度计算出的热点的光谱辐射强度. 实验产生的这个 keV 量级热点的光谱强度由 $1\ \text{keV}$ 时的约 $10^{11}\ \text{eV}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ 迅速减小至 $4\ \text{keV}$ 时的 $10^8\ \text{eV}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$. 在 $4.7\ \text{keV}$ 附近有对应钛 K 壳层辐射的小峰.

图 3(a) 是负载为 $2\times 50\ \mu\text{m}$ 钛丝 X 箍缩的凸圆柱晶体谱仪的测量图像, 图 3(b) 是图像的灰密度曲线. 可以看出, 最突出的是 $2.62\ \text{\AA}$ 的类氢 α 线谱, 也出现了强度相对较弱的类锂线谱, 而类氢线谱只是勉强可见. 由谱线强度结果可知, 在 Ti 丝 X 箍缩热点等离子体中, 大部分带电粒子为电离后只剩下 2 个电子的类氢钛离子, 而剩下 3 个电子的类锂钛离子相对较少, 这是由于类锂钛离子的电离能为 $1.4\ \text{keV}$, 而类氢钛离子的电离能则跃迁到 $6.2\ \text{keV}$, 存在明显的电离瓶颈; 同时可以说明, 热

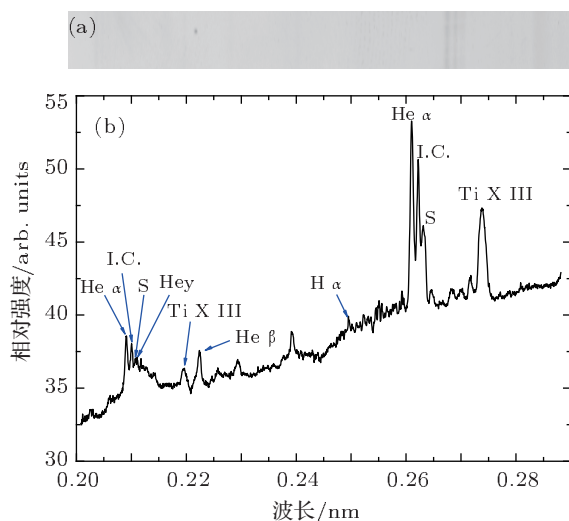


图3 凸圆柱晶体谱仪的典型结果

点处等离子体的电子温度主要分布在 1 keV 左右或更高. 类氢线谱非常弱也证明了等离子体中的大部分类氦钛离子的电子不足以摆脱 6.2 keV 的束缚能而变为类氢离子, 即热点等离子体的温度比 6.2 keV 低很多, 在 Ti 丝辐射谱的长波段, 较强且宽的线谱 (其光子波长对应为 2.74 Å) 为 Ti 的类氦线谱, 可能是热点外围的温度相对较低的冷等离子体发射所致.

使用狭缝相机对钛丝 X 箍缩的点光源尺寸进行了测量. 相机采用了 10 μm 的狭缝, 狭缝垂直于负载轴向方向, 图像放大倍率为 3.66, 在记录胶片前有一组由不同厚度的 Al 滤片组成的阶梯契用来阻挡不同波段的 X 射线, 图 4(a) 是狭缝相机拍摄到的负载为 4 × 50 μm 钛丝 + 分流铜丝 X 箍缩的 X 射

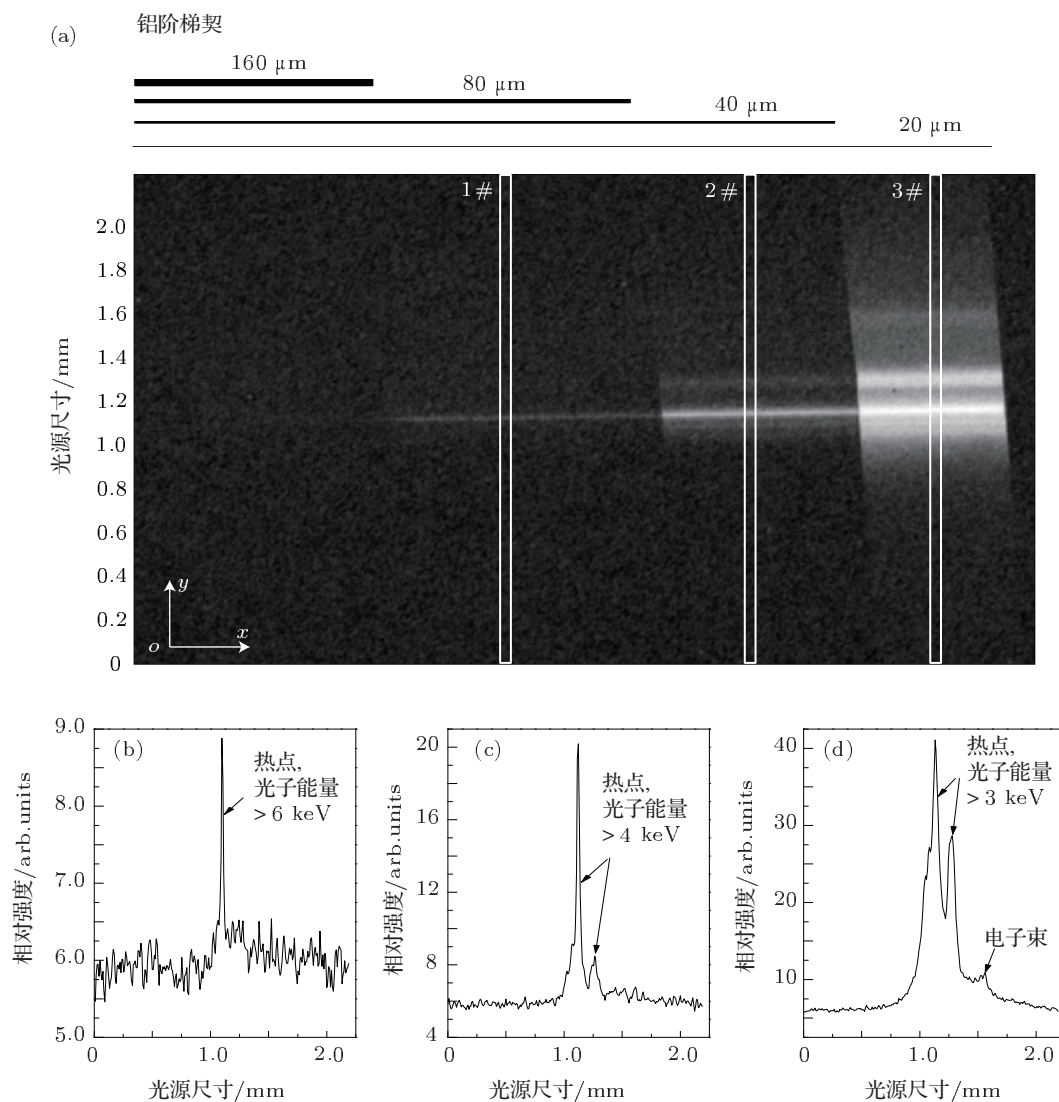


图4 钛丝 X 箍缩的狭缝积分相机测量结果 (a) 负载为 4 × 50 μm 钛丝 + 分流铜丝 X 箍缩的 X 射线狭缝积分图像; (b)–(d) 分别对应 1#–3# 条形区域的灰密度曲线

线狭缝积分图像以及 Al 阶梯契的参数. 其中 y 轴方向为叉丝负载轴向方向, 即对点光源实现了一维的空间分辨, 标识的尺寸是按相机放大倍数计算得出. 图像在 x 轴方向上利用不同厚度滤片组合的阶梯契对光源发射的 X 射线进行了不同光子能量上的展开. 图 4(b), (c), (d) 是对应 1#—3#条形区域的灰密度曲线. 可以看到, 在光子能量大于 3 和 4 keV 的能段, 箍缩产生了两个热点, 这与 XRD 探测器测量的 X 射线辐射波形相符合. 热点的尺寸随光子能量的增加而减小, 在光子能量大于 6 keV 的能段, 其中一个热点消失, 而另外一个热点的尺寸进一步减小. 当光子能量大于 8 keV 时, 热点消失.

考虑到光子的衍射效率, 光子能量大于 6 keV 时狭缝相机的分辨率为 14.9 μm , 而图 4(b) 测得的热点尺寸 (取灰密度扫描曲线的半高宽) 为 12.7 μm , 已经超过了狭缝相机的分辨率. 所以可以肯定的是, 在光子能量大于 6 keV 时, 热点的尺寸小于相机的分辨率 14.9 μm . X 箍缩内爆结束后, 由于金属丝交叉位置等离子体飞散导致此区域阴阳极之间电压增大, 从而有可能产生电极之间的电子束发射现象, 我们认为这种情况下产生的电子束位置距交叉点较远、尺寸较大并且能量不高, 电子束

的能谱一般为 keV 量级, 这似乎从图 4(d) 中可以得到验证.

4 结论

本文报告了在“阳”加速器上开展的钛丝 X 箍缩光源辐射特性实验研究的初步结果. 针对“阳”加速器驱动电流与负载线质量密度不匹配 (驱动电流过大) 的情况下, 采用叉丝负载加分流铜丝的方法获取了用于开展背光照相的 X 箍缩单脉冲点光源. 实验采用 XRD 探测器、透射光栅谱仪、晶体谱仪和狭缝相机等诊断设备获取了钛丝 X 箍缩点光源的辐射能量、能谱范围、热点的时间和空间尺度等特征参量, 在确认产生的点光源可用于背光照相的同时加深了对 X 箍缩技术及其光源辐射特性的认识, 掌握了在“阳”加速器的驱动电流条件下用于背光照相的单脉冲点光源的获取方法, 为下一步开展背光照相奠定了技术基础.

感谢中国工程物理研究院流体物理研究所 108 室负责运行“阳”加速器的全体同志在实验中提供的帮助.

- [1] Pikuz S A, Shelkovenko T A, Sinars D B, Hammer D A, Lebedev S V, Bland S N, Skobelev Y, Abdallah J, Fontes C J, Zhang H L 2001 *J. Quant. Spectrosc. Ra. Trans.* **71** 581
- [2] Sinars D B, Pikuz S A, Shelkovenko T A, Chandler K M, Hammer D A, Apruzese J P 2003 *J. Quant. Spectrosc. Ra. Trans.* **78** 61
- [3] Liu R, Wang X X, Zou X B, Zeng N G, He L Y 2008 *Euro. Phys. Lett.* **83** 25002
- [4] Liu R, Zou X B, Wang X X, Zeng N G, He L Y 2008 *Laser Part. Beams* **26** 455
- [5] Ding N, Yang Z H, Ning C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 808 (in Chinese) [丁宁, 杨震华, 宁成 2004 物理学报 **53** 808]
- [6] Qiu A C, Kuai B, Zeng Z Z, Wang W S, Qiu M T, Wang L P, Cong P T, Lü M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5917 (in Chinese) [邱爱慈, 蒯斌, 曾正中, 王文生, 邱孟通, 王亮平, 丛培天, 吕敏 2006 物理学报 **55** 5917]
- [7] Volkov G S, Grabovskii E V, Zurin M V, Mitrofanov K N, Oleinik G M, Porofeev I Y 2004 *Instrum. Exp. Tech.* **47** 376
- [8] Sze H, Coleman P L, Banister J, Failor B H, Fisher A, Levine J S, Song Y, Waisman E M, Apruzese J P, Clark R W, Davis J, Mosher D, Thornhill J W, Velikovich A L, Weber B V, Coverdale C A, Deeney C, Gilliland T L, MCGurn J, Spielman R B, Struve K W, Stygar W A, Bell D 2001 *Phys. Plasmas* **8** 3135
- [9] Zhang R, Zhao T, Zou X B, Wang X X, Zhao Y C, Du Y Q, Wang L H 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 931 (in Chinese) [张然, 赵彤, 邹晓兵, 王新新, 赵勇超, 杜彦强, 王联辉 2010 强激光与粒子束 **22** 931]
- [10] Zhao T, Zou X B, Zhang R, Wang X X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 075205
- [11] Ye F, Zhang F Q, Yang J L, Li Z H, Guo C, Xu Z P, Xu R K, Xia G X, Ning J M, Song F J, Chen J C, Zhong Y H, Jin Y J 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1359 (in Chinese) [叶凡, 章法强, 杨建伦, 李正宏, 郭存, 许泽平, 徐荣昆, 夏广新, 宁家敏, 宋凤军, 陈进川, 钟耀华, 金永杰 2006 强激光与粒子束 **18** 1359]
- [12] Zhang S Q, Huang X B, Li J, Yang L B, Cui M Q, Zhao Y D 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **7** 1106 (in Chinese) [张思群, 黄显宾, 李晶, 杨礼兵, 崔明启, 赵屹东 2009 强激光与粒子束 **7** 1106]
- [13] Li J, Huang X B, Xie W P, Yang L B, Zhu X L, Duan S C, Pu Y K 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 683 (in Chinese) [李晶, 黄显宾, 谢卫平, 杨礼兵, 朱效立, 段书超, 蒲以康 2010 强激光与粒子束 **22** 683]
- [14] Li J, Xie W P, Huang X B, Yang L B, Cai H C, Xiao S L 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 2037 (in Chinese) [李晶, 谢卫平, 黄显宾, 杨礼兵, 蔡红春, 肖沙里 2010 强激光与粒子束 **22** 2037]

Experimental investigation of radiation characteristics of Ti wire X-pinch X-ray source on Yang accelerator*

Zhou Shao-Tong Li Jun Huang Xian-Bin Cai Hong-Chun Zhang Si-Qun
Li Jing Duan Shu-Chao[†] Zhou Rong-Guo

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 13 September 2011; revised manuscript received 8 February 2012)

Abstract

The X-ray radiation properties of titanium wire X-pinch are investigated on the Yang accelerator at 500–800 kA peak current with a rise time of about 80 ns. The radiation power, spectrum and source size of the X-pinch X-ray source are measured and analyzed using X-ray diodes, a transmission grating spectrometer, a crystal spectrometer and a slit camera. The hot dense spot smaller than 15 μm emits 1 J of X-ray with an FWHM of 200 ps and a peak power of 1.5 GW distributed in the range of 1–4 keV. A method to efficiently generate a single X-ray pulse during the X-pinch implosion is demonstrated. The X-pinch presented here is useful for imaging the early stage interior structure of Z pinch as a backlight source.

Keywords: X-pinch, X-ray backlighting, X-ray, Z-pinch

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

* Project supported by the Foundation of Double-Hundred Person of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2008R0104).

[†] E-mail: s.duan@163.com