

文章编号: 0258-7025(2009)02-0347-04

# 快速 Z 箍缩时毛细管放电软 X 射线尖峰的激光特性

赵永蓬 刘涛 谢耀 程元丽 王骥

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 在低气压(25 Pa)快电流前沿(27 ns)下,利用镀金 X 射线二极管(XRD)测量获得了毛细管放电软 X 射线激光尖峰输出。研究该软 X 射线激光输出特性,为其未来的应用打下基础。低气压和快前沿导致等离子体的快速箍缩,此时激光产生于背景光峰值附近,脉宽 1.6 ns。实验测量了快速 Z 箍缩时激光的束散角和增益特性。采用小孔扫描法,测得激光束散角为 5.3 mrad。通过改变增益介质长度的方法,测得介质的增益系数为  $0.45 \text{ cm}^{-1}$ ,最大的增益长度积为 8.28。此外利用单色仪在 46.9 nm 处测得了激光尖峰输出。

**关键词** X 射线光学;软 X 光激光;毛细管放电;增益系数;激光尖峰

**中图分类号** TN248.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0347

## Lasing Characteristic of Soft X-Ray Spike Pumped by Capillary Discharge at Fast Z-Pinch

Zhao Yongpeng Liu Tao Xie Yao Cheng Yuanli Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Laser spike of soft X-ray pumped by capillary discharge is measured at 25 Pa pressure and 27 ns rise time of the current pulse with X-ray diode (XRD) coated with a gold layer. The characteristic of this laser is studied. The low pressure and the short rise time of the current pulse lead to a fast compression of the plasma. In this condition, the laser spike with the duration of 1.6 ns near the peak of the ground light is obtained. The angle of divergence and gain coefficient of the spike at fast Z-pinch are measured. The angle of divergence measured by shifting the pinhole is 5.3 mrad. By changing the length of gain medium, the gain coefficient is measured as  $0.45 \text{ cm}^{-1}$  and gain-length product as 8.28. In addition, a monochromator is used and the laser spike about 46.9 nm is observed.

**Key words** X-ray optics; soft X-ray laser; capillary discharge; gain coefficient; laser spike

## 1 引言

利用毛细管放电激励产生软 X 光激光,是实现台式软 X 光激光的主要方案之一。该方案采用放电激励的方式,具有装置简单、造价低、可重复频率工作、能量转换效率高、增益体积大等诸多优点,有望使软 X 射线激光得以广泛的应用。美国小组利用电子碰撞机制,首次实现了毛细管放电类氩氩

46.9 nm 软 X 光激光输出<sup>[1]</sup>,测得的增益系数为  $0.6 \text{ cm}^{-1}$ ,增益长度积为 7.2。该小组采用 34.5 cm 长陶瓷毛细管,获得重复频率 4 Hz,平均输出能量 0.88 mJ 的类氩氩 46.9 nm 软 X 光激光饱和输出<sup>[2]</sup>。利用该激光器已开展了许多应用实验,特别是软 X 光激光作为探针,对高密度等离子体的诊断<sup>[3]</sup>。目前以色列<sup>[4]</sup>、日本<sup>[5]</sup>、意大利<sup>[6]</sup>、中国本小组<sup>[7]</sup>和俄

收稿日期:2008-01-25;收到修改稿日期:2008-05-30

基金项目:国家自然科学基金(60608007),国家 863 计划(863-804-7),哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划(HITQNJ.S.2006.23)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助项目。

作者简介:赵永蓬(1973—),男,副教授,博士,主要从事紫外和软 X 射线激光研究。

E-mail: zhaoy3@yahoo.com.cn

罗斯<sup>[8]</sup>也分别获得了毛细管放电类氩氩46.9 nm X光激光输出。意大利研究小组利用45 cm长的毛细管获得了光强近高斯分布的软 X 射线激光输出,单脉冲输出能量达300  $\mu\text{J}$ <sup>[6]</sup>。

获得毛细管放电抽运类氩氩46.9 nm激光输出所采用的主脉冲电流前沿各不相同,但均大于30 ns<sup>[2,5,6]</sup>。我们实验中的主脉冲电流前沿只有27 ns,快前沿导致电流的变化率增加,进而使等离子体的 Z 箍缩过程变得更快,气压只有25 Pa。理论计算表明,低气压和快电流前沿都会增加等离子体的压缩速度,进而影响产生激光时的等离子体状态。因此研究快速压缩时的激光特性,对获得最佳等离子体状态具有重要意义。

## 2 实验装置

实验装置<sup>[7,9]</sup>包括预脉冲电源,主脉冲电源,放电室,真空和充气系统,X射线二极管(XRD)探测器和控制系统等几部分构成。首先在内径3.1 mm,长度20 cm的陶瓷毛细管中充入氩气,然后20 A的预脉冲流过毛细管,形成均匀的低价氩等离子体。主脉冲电流在预脉冲开始后的7  $\mu\text{s}$ 产生,并对初始的等离子体进行箍缩,以形成适合激光产生的等离子体状态。主脉冲由 Marx 发生器输出300 kV电压脉冲经 Blumlein 传输线对毛细管负载放电产生,其电流幅值约26 kA,前沿27 ns,半周期110 ns。采用 XRD 测量毛细管输出的软 X 射线强度随时间的变化情况,XRD 的阴极镀有金膜以增加电子发射效率,阳极为金属网,阴极上的电压为-600 V。在测量尖峰对应的波长时,利用美国 Acton 公司的 VSN-515 型 0.5 m 真空紫外单色仪分光。此时将 XRD 连接到单色仪的输出端,以测量光栅分光后不同波长光信号的输出。

表 1 各研究小组的实验参数

Table 1 Experimental parameters of different research groups

	American <sup>[2,10]</sup>	Italy <sup>[11]</sup>	Japan <sup>[12]</sup>	China
Main current slope ( $dI/dt$ ) / ( $\times 10^{12}$ A/s)	0.65	0.6	0.52	0.96
Optimum pressure of laser /Pa	62	60	54	25
Time of lasing onset /ns	~40	31	30.6	38

激光产生时间与毛细管中充的氩气的气压有关<sup>[11]</sup>,即毛细管中的氩气气压越高,等离子体压缩越缓慢,激光产生时间就越晚。也观察到氩气气压的升高激光产生时间变晚的实验现象。与其他小组相比,氩气气压是最低的,但激光产生时间却没有提前。此外,其他研究小组获得的激光尖峰一般位于

## 3 实验结果及讨论

获得的典型的毛细管放电主脉冲电流波形和 XRD 输出波形如图 1 所示。此时毛细管中氩气的气压为26 Pa,主脉冲电流峰值为26 kA,主脉冲前沿时间为27 ns。

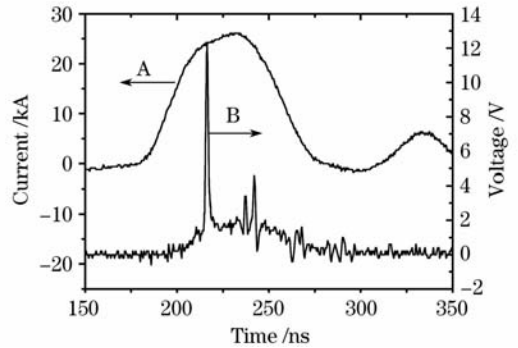


图 1 典型电流(A)和 XRD 输出波形(B)

Fig. 1 Typical waveform of current (A) and XRD signal (B)

从图 1 可以看出在背景光峰值附近,叠加了脉宽1.6 ns的软 X 射线尖峰。其他研究小组用 XRD 测量也都测量到与背景光明显不同的尖峰输出。并把测量到该尖峰信号的输出作为获得软 X 射线激光的标志<sup>[5,8]</sup>,并称其为激光尖峰。其实验参数列于表 1 中。从表 1 可以看出其他小组的主脉冲电流的变化率都在 $0.6 \times 10^{12}$  A/s左右。而本装置的主脉冲电流的变化率为 $0.96 \times 10^{12}$  A/s,明显高于其他小组的装置,这主要与主脉冲电流前沿短有关<sup>[13]</sup>。主脉冲电流变化率增加会导致等离子体压缩过程变快,从而影响软 X 射线激光的参数。定义激光产生时间是指电流开始上升的时刻到激光尖峰出现的时刻这段时间。从表 1 可以看到意大利和日本的小组得到的激光产生时间是30 ns左右,而本文测得的激光产生时间是38 ns,相差较大,但是与美国小组获得的激光产生时间较接近。

背景光之前,而从图 1 可以看出激光尖峰却位于背景峰值附近。为了解释上述现象,提出了激光产生前等离子体可能存在多次箍缩的假设<sup>[7]</sup>。即由于主脉冲电流的变化率较大,造成等离子体的压缩迅速,并不是在等离子体第一次压缩到最小半径时产生激光,而是经过多次箍缩才产生激光的。为了验证低

气压、快电流前沿下的等离子体快速压缩对激光的影响,对激光尖峰特性进行了测量。

激光束散角的测量采用小孔扫描法<sup>[11]</sup>。为了测量激光束散角,在 XRD 阳极网上安装直径 2 mm 的小孔光阑。然后使 XRD 进行空间一维扫描,观察 XRD 输出尖峰的幅值随空间位置的变化情况,测量结果如图 2 所示。图 3 给出了尖峰幅值随空间位置变化的曲线。该结果表明,激光光斑形状近似高斯分布,并没有观察到空心光斑。而美国小组报道的光斑形状大多为空心光斑。可能是我们采用的气压较低,压缩过程相对容易,因此最终形成的等离子体中心处有利于激光放大。根据半峰全宽(FWHM)处的位置,可以计算出激光的束散角为 5.3 mrad,与意大利小组的测量结果相似<sup>[11]</sup>。比较图 1 和图 2 可以发现,加上 2 mm 小孔以后,背景光幅值几乎减小到 0,而激光的峰值只减少 1 倍,所以与背景光相比激光尖峰具有更好的方向性。

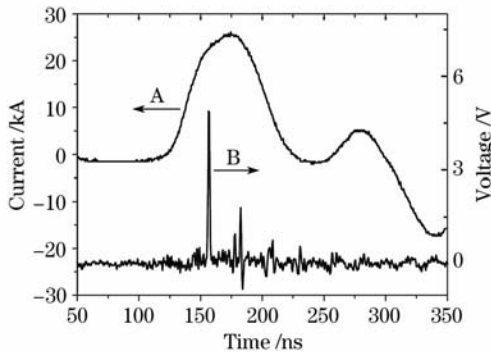


图 2 阳极网上安装 2 mm 小孔光阑时的主脉冲电流波形(A)和 XRD 波形(B)

Fig. 2 Waveform of main current (A) and XRD signal (B) with 2 mm hole at anode mesh

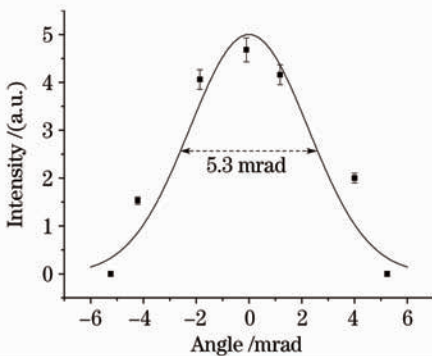


图 3 激光束散角的测量结果

Fig. 3 Measurement result on laser angle of divergence

采用改变增益介质长度对增益测量,观测激光强度非线性增长的方法。考虑谱线宽度,对线形轮廓求平均后,强度  $I$  与增益系数  $g$  及增益介质长度  $L$

的关系满足著名的 Linford 公式

$$I = \frac{J_s (e^{gL} - 1)^{3/2}}{g (gL e^{gL})^{1/2}},$$

式中  $J_s$  为单位长度的自发辐射强度。只要测得多组不同长度  $L$  下的强度  $I$ ,即可拟合出系统的增益系数  $g$ 。采用在毛细管中插入不同长度放电电极的方法来改变增益介质长度。一方面在改变增益介质长度中可以保证毛细管完全内径相同,同时插入的电极可以补偿由于等离子体柱长度的减小引起的负载电感减小,从而保证主脉冲电流波形在改变等离子体柱长度时保持不变。实验中观察了采用该方法改变等离子体柱长度后主脉冲的电流波形,测量结果表明主脉冲电流波形具有很好的重复性。如图 4 所示,利用 Linford 公式拟合的增益系数为  $0.45 \text{ cm}^{-1}$ ,对应 18.4 cm 的增益介质长度,增益长度积为 8.28。增益系数较低,这主要与氩气气压较低有关。初始气压低导致产生激光时类氩离子的粒子数密度低,因此增益较小。

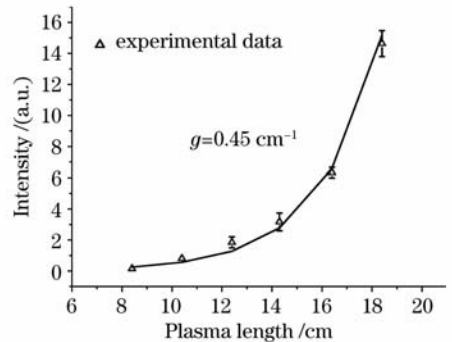


图 4 激光尖峰强度随等离子体柱长度的变化

Fig. 4 Intensities of laser spike versus length of plasma

为了验证尖峰对应的波长,采用单色仪分光,并用 XRD 进行了测量。由于单色仪入射狭缝和出射狭缝的存在,要求软 X 射线激光与单色仪的光路保持精确地一致。利用 He-Ne 激光器对光路进行了精确的调节。在波长为 46.9 nm 处 XRD 输出的尖峰波形如图 5 所示。由于单色仪不是掠入射的方式,因此光栅对软 X 射线的反射效率不高,加之入射和出射狭缝对激光的遮挡,使得 XRD 测量到的尖峰信号明显减弱。从图中可以看出软 X 射线尖峰幅值小于 1.5 V,并且经过多次测量脉宽与未分光时相同,均为 1.6 ns。在 46.9 nm 附近约 1 nm 的范围内都测量到了该尖峰的输出,只是幅值相对较低。在 30~80 nm 范围内,对其他波长的扫描中没有观察到尖峰信号输出。因此实验结果表明尖峰信号对应的波长约为 46.9 nm。

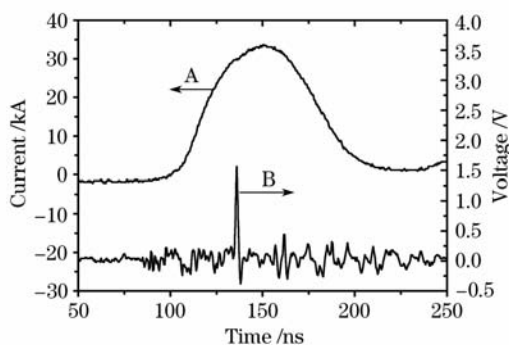


图5 46.9 nm处主脉冲电流波形(A)和XRD输出波形(B)

Fig. 5 Waveform of main current (A) and XRD signal (B) at 46.9 nm

以上实验结果表明,在快电流前沿、低气压下获得了类氩氙激光输出。在等离子体快速箍缩的情况下,获得了较好的软X射线激光光束质量。获得的激光产生时间相对较晚<sup>[14]</sup>,并且激光产生于背景光峰值附近。

## 4 结论

利用XRD作为探测器,在快前沿的主脉冲电流作用时,低气压下(25 Pa)测量了毛细管放电软X射线辐射随时间的演变情况,获得了类氩氙46.9 nm软X射线激光尖峰。为了证明尖峰具有激光特性,对尖峰的束散角进行了测量,测量结果表明软X射线激光的束散角为5.3 mrad。改变增益介质长度对增益系数测量结果为 $0.45 \text{ cm}^{-1}$ ,增益长度积可达8.28。实验结果充分证明尖峰信号对应激光的输出。利用单色仪对尖峰波长测量表明激光尖峰对应的波长为46.9 nm。可见低气压、快电流前沿下激光产生时间的滞后并没有影响激光的其他特性,而且这种激光产生时间的滞后有助于等离子体对主脉冲电流的能量吸收。导致激光产生时间滞后的原因可能与主脉冲前沿时间过快有关,使等离子体的箍缩过程发生了变化。初步判断初始气压较低可能与电流前沿较快有关,改变电流前沿,观察气压与电流前沿之间关系的实验正在进行中。本文的结果对深入研究低气压下输出激光的特性,以及如何实现主脉冲电流前沿与初始气压的最佳配合,提高主脉冲电流的能量利用率具有一定指导意义。

## 参考文献

- J. J. Rocca, V. Shlyaptsev, F. G. Tomasel *et al.*. Demonstration of a discharge pumped table-top soft-X-ray laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(16):2192~2195
- C. D. Macchietto, B. R. Benware, J. J. Rocca. Generation of millijoule-level soft-X-ray laser pulses at a 4-Hz repetition rate in a highly saturated tabletop capillary discharge amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16):1115~1117
- J. J. Rocca, E. C. Hammarsten, E. Jankowska *et al.*. Application of extremely compact capillary discharge soft x-ray lasers to dense plasma diagnostics [J]. *Phys. Plasmas*, 2003, **10**(5):2031~2038
- A. Ben-Kish, M. Shuker, R. A. Nemirovsky *et al.*. Plasma dynamics in capillary discharge soft X-ray lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**:015002
- G. Niimi, Y. Hayashi, M. Nakajima *et al.*. Observation of multi-pulse soft X-ray lasing in a fast capillary discharge [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, **34**:2123~2126
- A. Ritucci, G. Tomassetti, A. Reale. Coherence properties of a quasi-Gaussian submilliradiant divergence soft-x-ray laser pumped by capillary discharges [J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **70**:023818
- Zhao Yongpeng, Cheng Yuanli, Luan Bohan *et al.*. Effects of capillary discharge current on the time of lasing onset of soft x-ray laser at low pressure [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**:342~346
- V. I. Ostashev, A. M. Gafarov, V. Y. Politov *et al.*. Evidence of soft X-ray lasing in SIGNAL pulsed-power facility experiments with argon capillary plasma [J]. *IEEE Trans. Plasma Science*, 2006, **34**(5):2368~2376
- Luan Bohan, Zhao Yongpeng, Cheng Yuanli *et al.*. Influence of the inherent pre-pulse of Blumlein transmission line on soft X-ray laser pumped by capillary discharge [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):163~165  
栾伯哈,赵永蓬,程元丽等. 毛细管放电产生软X光激光的稳定输出[J]. 中国激光, 2006, **33**(增刊):163~165
- B. R. Benware, C. H. Moreno, D. J. Burd. Operation and output pulse characteristics of an extremely compact capillary-discharge tabletop soft-x-ray laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**:796~798
- G. Tomassetti, A. Ritucci, A. Reale *et al.*. Capillary discharge soft X-ray lasing in Ne-like Ar pumped by long current pulses [J]. *Eur. Phys. J. D*, 2002, **19**:73~77
- Y. Hayashi, Y. Xiao, N. Sakamoto *et al.*. Performances of Ne-like Ar soft X-ray laser using capillary Z-pinch discharge [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, **42**:5285~5289
- Zhao Yongpeng, Li Yan, Xie Yao *et al.*. Influence of the main-switch of the capillary discharge setup on soft X-ray laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1176~1179  
赵永蓬,李岩,谢耀等. 毛细管放电装置主开关结构对产生软X射线激光的影响[J]. 中国激光, 2006, **33**(9):1176~1179
- Zhao Yongpeng, Cheng Yuanli, Wang Qi *et al.*. The lasing time of soft x ray laser pumped by capillary discharge [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6):2731~2734  
赵永蓬,程元丽,王骥等. 毛细管放电激励软x射线激光产生时间[J]. 物理学报, 2005, **54**(6):2731~2734