

文章编号: 0258-7025(2009)04-0819-04

放电电极对毛细管放电软 X 光激光的影响

谢 耀 赵永蓬 王 骐 栾伯哈 刘 涛

(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 150080)

摘要 自软 X 光激光发现以来, 实现低激发阈、台式软 X 光激光一直是一个十分重要的研究方向。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。实验采用 20 cm 长的毛细管, 利用 X 射线二极管(XRD)探测了毛细管放电抽运软 X 光 46.9 nm 激光输出。研究表明, 放电电极的材料并不是影响激光输出质量的决定性因素。但考虑到电极元素的飞溅, 在长时间的实验研究中, 选择钼电极更为有利。电极形状在放电过程中只影响预脉冲的导通情况, 而对激光影响并不大。在更长毛细管的实验中, 选择锥状端面的电极将有利于预脉冲的导通, 以便获得激光输出。

关键词 X 射线光学; 软 X 光激光; 毛细管放电; 放电电极; Blumlein 传输线

中图分类号 TN 248.6 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0819

Influence of the Electrode on Capillary Discharge Soft-X-Ray Laser

Xie Yao Zhao Yongpeng Wang Qi Luan Bohan Liu Tao

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract Since the first soft-X-ray was achieved, to realize the low excited threshold and table-top soft-X-ray laser is a significant research. Capillary discharge soft-X-ray laser is one of the crucial quomodo to realize table-top soft-X-ray laser. The capillary discharge 46.9nm soft-X-ray laser has been detected by X-ray diffraction diode(XRD). The experimental results indicate that the influence of the material of the electrode on capillary discharge soft-X-ray laser is not the critical factor. Considering the sputtering of the element, choosing the electrode made of molybdenum is advantageous. The shape of the electrode mainly influences on the conduction of the pre-current pulse but not on laser, and it is easier for the pre-current pulse to conduct in longer capillary by choosing the pyramidal electrode.

Key words X-ray optics; soft-X-ray laser; capillary discharge; electrode; Blumlein transmission line

1 引 言

毛细管放电软 X 射线激光作为一种小型、台式的激光方案, 具有很高的研究价值与很强的实用性。Rocca 小组^[1]第一次成功地演示了毛细管放电抽运的电子碰撞激发软 X 射线激光的显著放大, 之后又进行了双程放大实验并获得饱和输出^[2]。在陶瓷毛细管中用重复频率 7 Hz 的电流脉冲产生轴向均匀的等离子体柱^[3]。产生平均功率约 1 mW 的 46.9 nm 激光输出, 实验装置占 0.4 m×1 m 面积的

台面, 可和广泛应用的可见光及紫外气体激光器相比。在装置更加小型化的同时, 采用长 34.5 cm 陶瓷超长毛细管, 获得类氩氦 46.9 nm 激光脉冲的平均输出能量达到 0.88 mJ, 最大输出能量 1 mJ, 重复频率 4 Hz^[4]。此后, Amit Ben-Kish 等研究小组^[5~7]也分别获得了 46.9 nm 软 X 光的激光输出。

由于电极的影响^[8], 当主脉冲电流流经毛细管对等离子体进行压缩时, 在电极端面处的等离子体会发生圆锥状的压缩, 因而毛细管内放电等离子体

收稿日期: 2008-06-26; 收到修改稿日期: 2008-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(60608007), 国家 863 计划(2007AA804705), 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: 谢 耀(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事软 X 射线激光研究。E-mail: xy5090@yahoo.com.cn

导师简介: 王 骐(1942-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事短波长激光, X 光激光以及激光空间信息技术等方面的研究。E-mail: qiawang@hit.edu.cn

的状态除了取决于外部放电参数,还有可能受到放电电极形状的影响,不同形状的电极产生的空间电场形状不同,会引起高压击穿的特性发生变化,造成等离子体状态的改变。放电电极的材料关系到电极在放电过程中电极材料元素的飞溅,可能会影响等离子体的状态和毛细管管壁的腐蚀,进而影响激光的输出。因而对放电电极形状和材料的实验研究,对今后的实验工作有着十分重要的意义。

2 实验装置

实验装置^[9]包括脉冲发生单元、脉冲整形单元、毛细管放电单元、探测单元和预脉冲单元。首先是预脉冲电源工作,使幅值 20 A 的预脉冲将毛细管中的氩气预电离形成等离子体。预脉冲电流产生的同时输出一路信号,经延时电路^[10]和 MOS 管触发电路触发高压脉冲发生器。高压脉冲发生器的输出信号触发 Marx 发生器中的火花隙开关,使预先以并联形式充电完毕的电容器串联放电,以使电压倍加来获得很高的脉冲电压输出。该输出电压对 Blumlein 传输线充电,当充电电压达到某一值时主开关^[11]电极击穿导通,经过 Blumlein 传输线整形的电流主脉冲流经毛细管。当主脉冲电流流过毛细管时有大电流产生的自磁场作用,会使已经由预脉冲电离的初始等离子体向轴心自箍缩。通过箍缩过程中原子、离子及电子的频繁碰撞,电子温度升高,形成类氩离子,并在合适的电子温度、密度和离子温度的条件下,实现类氩 46.9 nm 软 X 射线激光的产生和放大。毛细管放电电极存在于毛细管的一端,探伸到毛细管中,与另外一端的地电极构成放电回路,因而放电电极的形状和材料将可能直接关系到放电的质量,进而影响到产生激光的效果^[12]。

3 实验结果及分析

XRD 实验结果如图 1(a)所示。位于上方的是主脉冲电流波形,下方是探测器 XRD 所采集的光信号。激光尖峰产生于主脉冲电流上升起始后的 36 ns 左右,尖峰脉宽为 1.6 ns。图中第二以及第三个激光尖峰为接入示波器的同轴电缆反射所致,这已经在其他文章中给以阐述。

Mo 电极的特点是高压击穿放电时,只有较少的金属元素溅射,能保证管内气体的纯度,但它硬度很高,难以加工。Cu 电极在高压放电时将可能有大量 Cu 元素溅射,影响等离子体状态,但它具有成本

低、易加工的优点。实验研究了不同材料电极的激光输出,对金属元素在等离子体箍缩过程中产生的影响作出了判断。改变电极的形状,通过观察对激光输出的影响,分析了电极形状对气体击穿以及等离子体状态的影响。

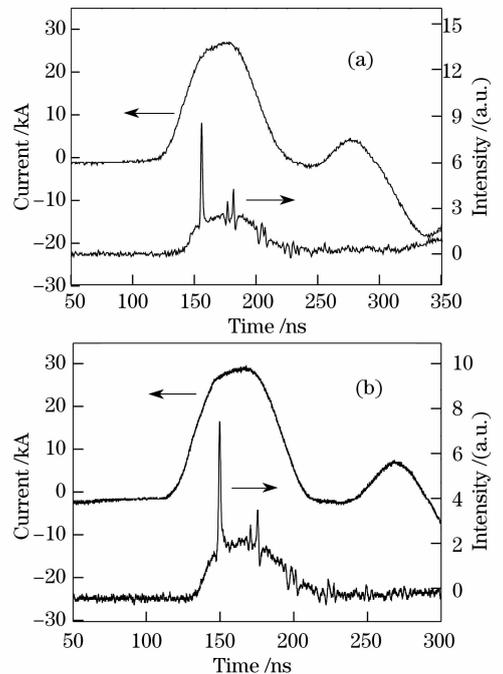


图 1 使用 4 cm Mo (a) 和使用 4 cm Cu (b) 电极的实验结果
Fig. 1 Experimental results of using Mo electrode (a) and copper electrode Cu (b)

图 1(b)给出了使用 Cu 电极的实验结果。激光输出幅值为 6,无论从激光输出的能量,还是 XRD 探测到的背景辐射的变化情况,都与使用 Mo 电极时基本一致。图 2 给出了分别使用两种电极连续 8 次放电实验的激光输出结果和 8 个点的平均值曲线对比。从图中可以看出,使用 Cu 电极的平均幅值比钼电极稍低一点,但考虑到气体放电的不稳定性,实际上两种情况差别很小。

理论上虽然 Cu 的硬度比钼要低,在高压放电时更容易产生烧蚀和溅射,对等离子体中离子的纯度有不利的影 响。但是实验结果表明,这种影响对激光输出的作用很小。这说明短时间内电极烧蚀给等离子体带来的杂质是很少的,不足以破坏产生激光的等离子体状态或者说对等离子体状态的影响并不是十分明显。

但如果长期使用 Cu 电极,则积累下来的溅射物质必然附着在毛细管壁上,会对管壁的表面平整度和几何对称性造成不良影响,最终将破坏等离子体初始条件的一致性,导致箍缩不均匀,不能形成产生激光的增

益条件。基于长期考虑,仍然首选使用 Mo 电极。

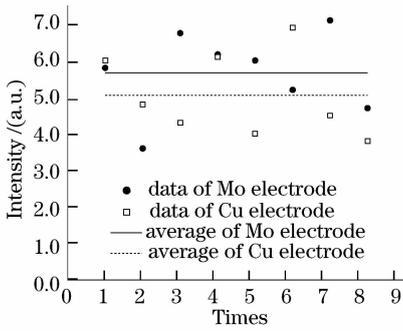


图 2 Cu 电极和 Mo 电极实验结果分析

Fig. 2 Analysis of the experimental data of Cu and Mo electrode

图 3 所示为分别使用了平端面(a)、球状端面(b)和锥状端面(c)的钼制电极。按照带电导体的电场理论,导体内的电场为零,表面为等势面,表面上的电场强度 E 线垂直于表面。所以,导体表面形成的面电荷分布能够使导体内的电场为零,这样对于带有尖端的表面,就必然会在尖端处积聚大量的电荷,引起在尖端处的局部电场很高。因此,这三种电极中,锥状端面电极形成的中心电场最强,有利于预主脉冲的导通;平端面电极边缘电场最强,将可能更有利于 Z 箍缩早期等离子体剥离毛细管壁;球状端面电极的效果鉴于两者之间。而且考虑到日本研究小组提到的等离子体在电极端面附近的锥状压缩的影响,锥状端面电极将会削弱这种压缩形式,球状端面电极次之,而平端面电极削弱效果最差。电极形成的电场分布不同,首先会影响到毛细管放电的击穿电压,其次由于电极弧光放电的位置不同,会影响到放电等离子体的初始状态,进而可能改变产生激光的等离子体条件。这种假设需要通过实验验证。

实验结果表明不同形状电极的击穿电压确实不同。在外加预脉冲电压幅值相同情况下,锥状端面的电极最容易击穿毛细管中的气柱,使预脉冲顺利导通。球状端面的电极最不容易击穿气体,经常发生预脉冲不能导通的情况,造成预脉冲失效,不能产生激光。而平端面电极则介于这两者之间。不同形状电极放电产生的 XRD 信号都如图 1 所示,背景光和激光尖峰形状没有差别。为了验证三种电极对激光输出的影响,同样对每种电极连续 8 次成功激光输出的实验数据进行了对比,结果如图 4 所示。图中的点表示激光尖峰信号的幅值,曲线表示 8 个实验数据的平均值。从中可以看出,三种电极的平均激光输出幅值差别很小。这是因为,电极形成的电场分布不同,仅在预脉冲击穿气柱时引起等离子体

状态的差异。但是,由于预脉冲与主脉冲之间的延时长达几个微秒,在这个时间内放电持续进行,气体可以充分地获得电离,使得等离子体趋向均匀一致。当主脉冲到来时,电极之间已是导通状态,物理过程不再是静电场问题,电极的形状不会对放电电流造成影响。所以,三种电极在预脉冲正常导通情况下,获得的激光输出结果基本一致。但如果从预脉冲容易导通的结果看,使用锥状端面电极最有利,因为它能保证预脉冲的正常击穿,提高实验的效率,特别是在更长的毛细管实验中对于预脉冲的导通起到关键的作用。

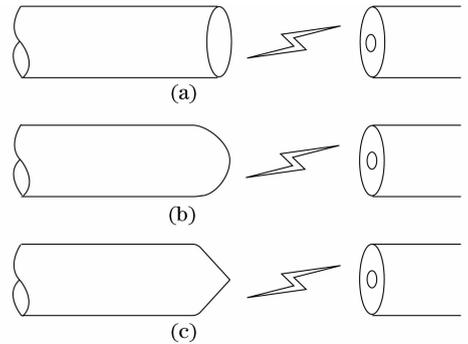


图 3 几种不同形状的毛细管放电电极

Fig. 3 Several capillary electric pole with different shape

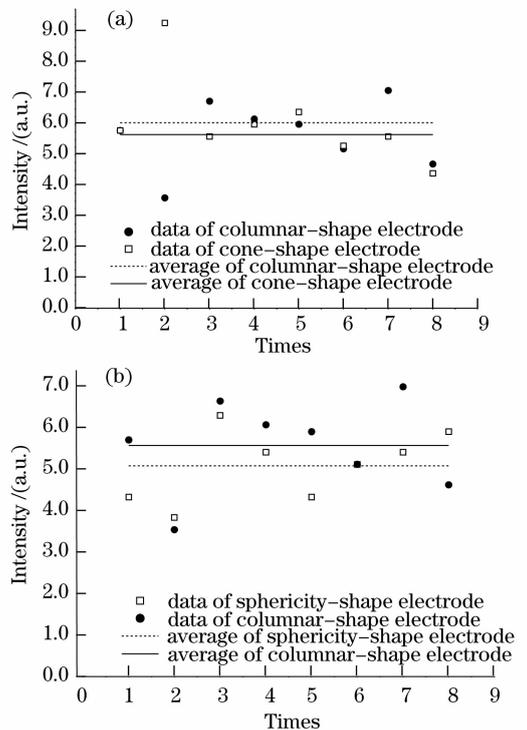


图 4 平端面电极与锥端面(a)及球端面(b)电极实验结果分析

Fig. 4 Analysis of the experimental data of columnar-shape and cone-shape electrode (a) and sphericity-shape electrode (b)

4 结 论

实验表明,电极的形状所决定的电场强度分布仅对毛细管的击穿有影响,而不会造成放电等离子体状态的改变,在更长毛细管的实验中,选用锥状端面的电极以便毛细管的导通,而电极材料不同导致的放电烧蚀和溅射对产生激光没有决定性的影响。但考虑到长时间的实验研究,选择 Mo 电极将会更加有利。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 J. L. A. Chilla, J. J. Rocca. Beam optics of gain-guided soft-X-ray lasers in cylindrical plasmas[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1996, **13**(12): 2841~2851
- 3 B. R. Benware, C. D. Macchietto, C. H. Morero *et al.*. Demonstration of a high average power tabletop soft-X-ray laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(26): 5804~5807
- 4 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
- 5 A. Ben-Kish, R. A. Nemirovsky, M. Shuker *et al.*. Parametric investigation of capillary discharge experiment for collisional excitation X-ray lasers[C]. *SPIE*, 1999, **3776**: 166~174
- 6 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
- 7 Luan Bohan, Zhao Yongpeng, Wu Yinchu *et al.*. Experimental investigation of lasing condition for soft-X-ray laser pumped by capillary discharge[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1189~1192
- 8 栾伯哈, 赵永蓬, 吴寅初 等. 毛细管放电抽运软 X 光激光产生条件的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1189~1192
- 8 Y. Hayashi, N. Sakamoto, Yongpeng Zhao *et al.*. On the time of lasing onset and the end-effect of a soft-X-ray laser device using a capillary Z-pinch discharge[J]. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2004, **13**: 675~679
- 9 Yongpeng Zhao, Yuanli Cheng, Yinchu Wu *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
- 10 Zhang Xingqiang, Cheng Yuanli, Wang Qi *et al.*. Influence of delay time on Ne-like Ar 46.9 nm soft-X-ray laser in capillary discharge[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 363~366
- 10 张兴强, 程元丽, 王 骐 等. 延时对毛细管放电类氩 46.9 nm 软 X 光激光的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 363~366
- 11 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
- 11 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
- 12 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
- 12 赵永蓬, 程元丽, 王 骐 等. 毛细管放电激励软 X 射线激光的产生时间[J]. *物理学报*, 2005, **54**(6): 2731~2734