

毛细管放电激励软 x 射线激光的产生时间^{*}

赵永蓬^{1)†} 程元丽¹⁾ 王 骥¹⁾ 林 靖²⁾ 崛田荣喜²⁾

¹⁾ 哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001, 中国)

²⁾ 日本东京工业大学能源科学系, 东京 226-8502, 日本)

(2004 年 8 月 20 日收到, 2004 年 10 月 1 日收到修改稿)

利用 x 射线二极管(XRD), 实验上测量了毛细管放电激励下类氩氩 46.9nm 软 x 射线激光的尖峰信号. 改变毛细管的充气气压和主脉冲放电电流, 研究了激光尖峰的产生时间随实验参数的变化情况. 实验结果表明, 激光产生于主脉冲电流波形的前沿, 此时的主脉冲电流是其峰值的 65%—75%. 增加毛细管充气气压或者减小主脉冲峰值电流, 激光的产生时间将会稍有延迟. 同时改变毛细管充气气压时, 激光尖峰信号在 42Pa 存在最大值.

关键词: 毛细管放电, 软 x 射线激光, 激光产生时间

PACC: 4255V

1. 引 言

自软 x 射线激光被实现以来, 高功率激光与固体靶相互作用产生合适的等离子体, 一直是产生软 x 射线激光的主要方案^[1]. 但由于该方案需要使用高功率激光器, 使得装置庞大、复杂、造价昂贵, 限制了软 x 射线激光的广泛应用. 因此实现低激发阈、台式软 x 射线激光一直是重要的研究方向. 利用毛细管放电激励产生软 x 射线激光, 是实现台式软 x 射线激光的主要方案之一. 与高功率激光激励的方案相比, 它具有装置简单、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.

1994 年美国罗拉多州立大学的 Rocca 利用电子碰撞机理, 首次实现了毛细管放电类氩氩 46.9nm 软 x 射线激光输出^[2]. 他们采用预主脉冲工作方式, 其主脉冲峰值电流为 40 kA, 前沿 20ns, 测得的增益系数为 0.6cm^{-1} , 增益长度积为 7.2. 1996 年该小组又利用镀膜反射镜实现双程放大, 输出激光能量 $30\mu\text{J}$ ^[3]. 1999 年该小组采用 34.5cm 长陶瓷毛细管, 获得重复频率 4Hz, 平均输出能量 0.88mJ 的类氩氩 46.9nm 软 x 射线激光饱和输出^[4]. 利用该激光器已开展了许多应用实验, 特别是软 x 射线激光作为探针, 对高密度等离子体的诊断^[5]. 此外该小组还实

现了类氩硫 60.8nm 和类氩氯 52.9nm 激光输出, 从而证明了利用毛细管放电激励可实现多种物质的激光输出^[6-8].

此后国际上许多研究小组也开展了毛细管放电软 x 射线激光的研究工作, 并得到了许多重要的理论和实验结果^[9-11]. 其中以色列的 Ben-Kish 小组^[10]在 1999 年, 以及日本的 Hotta 小组^[12]在 2001 年也分别获得了毛细管放电类氩氩 46.9nm x 射线激光输出. 为了提高抽运能量转换为 x 射线激光能量的效率, 各研究小组对产生软 x 射线激光的最佳条件进行研究, 其中包括毛细管材料、内径和长度以及预脉冲电流、主脉冲电流等. 实验结果表明, 产生激光的最佳时间是主脉冲电流波形的峰值附近, 因为此时能充分利用电流波形前沿的能量^[3]. 同时主脉冲电流的峰值附近, z 箍缩产生的冲击波到达轴心容易实现平衡箍缩, 因而等离子体状态相对稳定有利于激光在等离子体中的传输和放大. 然而在我们的实验中, 软 x 射线激光并没有在电流波形的峰值时刻产生, 而是产生于电流波形的上升沿. 为了延迟激光的产生时间, 使其更接近于电流的峰值时刻, 实验上我们研究了毛细管充气气压和主脉冲峰值电流对激光产生时间的影响. 根据实验结果得到的结论, 将对提高激光的能量转换效率, 选择主脉冲电流波形等方面提供重要的指导.

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号 60038010)资助的课题.

[†] E-mail: zhaoy3@yahoo.com.cn

2. 实验装置

研究毛细管放电软 x 射线激光的实验装置如图 1 所示,它包括三级 Marx 发生器、2:30 脉冲变压器、3nF 水电容、充 SF₆ 的火花隙开关及毛细管负载等.装置的工作过程为,首先由三级 Marx 发生器产生脉冲高压输出,然后经脉冲变压器升压以后给水电容充电,当水电容上的充电电压达到峰值附近时,火花隙开关导通对毛细管负载放电,此时在毛细管负载上产生大电流、快脉冲输出.采用的陶瓷毛细管的内径 3mm,长度 15cm.由于长 3cm 的钨电极棒插入毛细管中作为一个电极,所以毛细管的有效长度为 12cm.另一个电极中心钻有 3mm 的孔使得氙气可以流入毛细管中,而毛细管放电产生软 x 射线可以通过小孔输出.在距离该电极 1cm 处,直径 1mm 的小孔用来保持充气室和探测室的压强差.

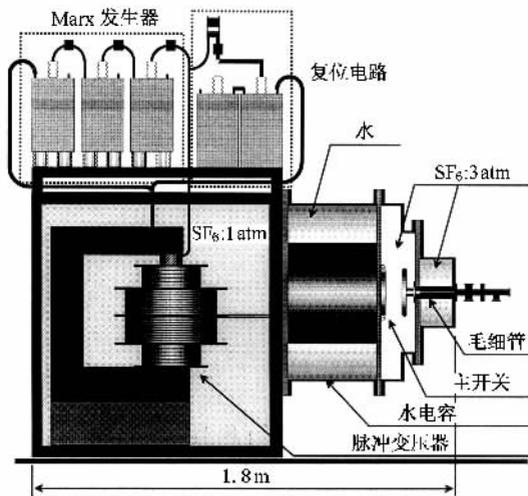


图 1 实验装置示意图

首先毛细管中的氙气被预电离形成初始的等离子体,其电流幅值 20A,脉宽 5 μ s.然后幅值 ~30kA,前沿 52ns,脉宽 ~120ns 的主脉冲电流流过毛细管.当该电流流过毛细管时有大电流产生的自磁场作用,会使初始的等离子体向轴心箍缩.由于箍缩过程中原子、离子及电子的频繁碰撞,使得电子温度升高,类氙离子形成.在合适的电子温度、电子密度、离子温度的条件下,可实现类氙 46.9nm 软 x 射线激光的产生和放大.我们使用 x 射线二极管 (XRD) 测量输出光信号随时间的演变情况,并且观察到了激光尖峰信号.该 XRD 包括镀金的

阴极和网状阳极,阴阳极之间的距离为 2mm,阴极上的直流偏压为 -500V,阳极接地.

3. 实验结果及讨论

典型的毛细管放电主脉冲电流波形和 XRD 输出波形如图 2 所示.此时毛细管中氙气的气压为 39Pa,预脉冲电流为 20A,主脉冲电流峰值为 33kA.当实验条件不适合产生软 x 射线激光时,XRD 输出的波形为脉宽 ~50ns 的背景光.在等离子体状态适宜产生软 x 射线激光的条件下,XRD 将输出一个脉宽仅为 ~2ns,幅值明显高于背景光的激光尖峰信号,如图 2 所示.该尖峰信号表明,当激光产生时会使得毛细管放电产生的软 x 射线强度明显增加,由于产生软 x 射线激光的等离子体状态很难控制,致使激光尖峰的持续时间仅为 ~2ns.文献中利用该装置,在相同的毛细管几何尺寸和相同的电参数的条件下,已经对该尖峰信号的方向性及光谱情况进行了研究,实验结果表明该尖峰信号是类氙 46.9nm 软 x 射线激光信号^[9,12,13].此外,国际上其它研究小组也测量到了该激光尖峰信号,其脉宽在 1—2ns 之间,与我们测得的结果一致^[3,4].

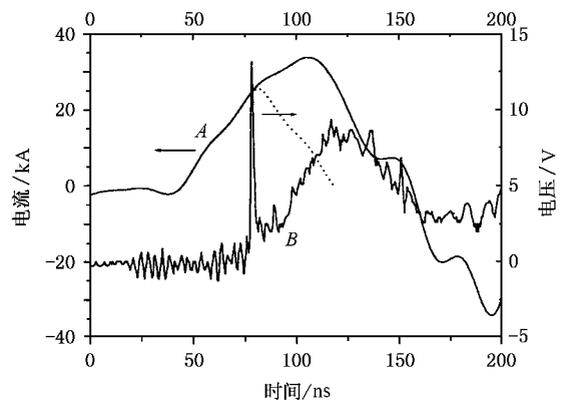


图 2 主脉冲电流波形(曲线 A)和 XRD 输出波形(曲线 B)

我们定义激光产生时间为激光尖峰信号相对于主脉冲电流波形开始增长的起始点的时间差.图 2 的实验结果表明激光产生的时间为 38ns,而主脉冲电流在激光尖峰信号出现后的 26ns 达到峰值.另外在激光尖峰信号产生时,主脉冲电流的幅值为 24kA,是其峰值的 73%.理论计算表明,此激光尖峰产生的时刻,对应于等离子体向轴心箍缩的过程中,此时等离子体正向轴心运动,其稳定性较差.如果激光在主脉冲电流峰值附近产生,可以增加等离子

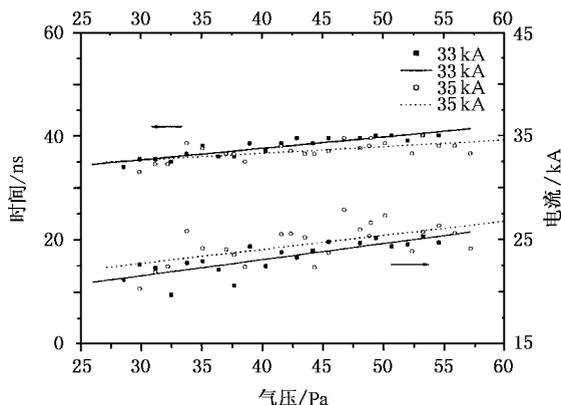


图3 激光产生时间和激光产生时主脉冲电流随气压的变化

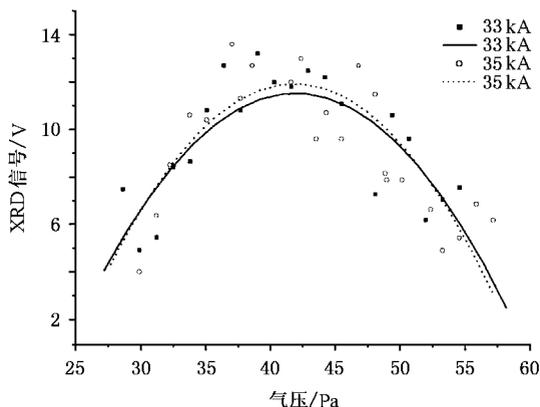


图4 激光尖峰幅值随气压的变化

体的稳定性,减小等离子体的密度梯度,有利于激光的产生与放大.此外由于激光信号产生于电流波形的前沿,使得激光尖峰信号出现之后,到主脉冲电流峰值之间的能量没有被利用.如果激光在主脉冲电流峰值附近产生,将有利于提高能量利用率,增加能量转换效率.

为了延迟激光的产生时间,使其更接近于主脉冲电流的峰值,我们改变毛细管中氩气的气压和主脉冲电流的峰值,研究了激光产生时间随实验条件的变化情况,所得的实验结果如图3所示.图中给出了主脉冲峰值电流分别为33kA和35kA时,激光的产生时间随气压的变化情况以及激光产生时刻的主脉冲电流随气压变化的实验数据和拟合曲线.图中可以看出,当气压在28Pa—55Pa之间增加时,激光的产生时间在35ns—40ns之间增加,同时对应于激光产生时刻的主脉冲电流在21kA—27kA之间增加.理论研究表明,当气压升高时等离子体的箍缩变得更加困难,因而产生激光的时间比低气压时有所延迟,但延迟的时间仅为几ns.主脉冲峰值电流分别为33kA和35kA的实验数据比较可以看出,主脉冲峰值电流35kA时产生激光的时间更早.这主要是在电流波形的脉宽一定的条件下,增加主脉冲的峰值电流,会增加电流的变化率,这将使得等离子体的箍缩过程更迅速,因而产生激光的时间更早.尽管主脉冲峰值电流35kA时产生激光的时间更早,但产生激光时的主脉冲电流却比33kA时明显增加,这主要与电流的变化率增加有关.总之,增加毛细管的充气气压或者减小主脉冲峰值电流都可以使产生激光的时间延迟.

实际上,当毛细管的充气气压增加时,激光尖峰的幅值并不是单调增加,而是存在最佳气压值.当

气压在28Pa—55Pa之间变化时,XRD输出的激光尖峰信号的幅值变化情况如图4所示.从图中可以看出,当气压为42Pa时,XRD输出的激光尖峰信号幅值最大,此气压为产生激光的最佳气压.当气压大于55Pa时激光尖峰信号消失,从而通过增加气压来延迟激光的产生时间是有限的.同时由于最佳气压的存在,使得当改变气压来延迟激光产生时间时,很可能要影响激光的输出能量,这对实现最佳激光输出不利.由于软x射线激光的产生只与激光产生前的主脉冲电流有关,而与激光产生以后的电流波形无关,因此假设用图2中虚线所示的波形代替实际的主脉冲电流波形,产生的软x射线激光强度应该是相同的.如果用虚线所示的波形代替实际的主脉冲电流波形,激光就会在主脉冲峰值附近产生,而主脉冲的峰值由实际波形的33kA减小到25kA,主脉冲电流波形的上升前沿也由52ns减小到约30ns.由于主脉冲峰值电流的减小,会使得毛细管放电装置的电学参数更容易实现,体积更小,这将有利于激光器的小型化.因此为了使激光在主脉冲电流峰值附近产生,应该改变主脉冲的电流波形形状或者改变毛细管的参数.

4. 结 论

在实验上我们研究了毛细管放电激励的类氩氩46.9nm软x射线激光的产生时间随实验参数的变化情况.实验结果表明,通过增加毛细管中氩气的气压可以延迟激光的产生时间.但由于最佳气压的存在,很难在延迟激光产生时间的同时增加激光输出能量.另外增加气压仅能使激光产生时间延迟几ns,所以对于我们当前的主脉冲电流波形,不可能通

过增加气压使激光在主脉冲峰值附近产生. 同时减小主脉冲的峰值电流可以延迟激光的产生时间, 但当减小主脉冲的峰值电流时, 输出激光的强度将减弱, 因而不利于最佳的激光能量输出. 因此如果利用如图 2 虚线所示的主脉冲电流波形, 将更有利于

激光的产生, 并且此时主脉冲的峰值电流只是实际波形的 76%. 因此在今后的实验中我们将进一步研究主脉冲电流波形的形状, 特别是前沿对软 x 射线激光产生时间的影响.

- [1] Ben-Kish A *et al* 1999 *Inst. Phys. Conf. Ser.* **159** 191
- [2] Rocca J J *et al* 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2192
- [3] Rocca J J, Clark D P, Chilla J L A and Shlyaptsev V N 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1476
- [4] Macchietto C D, Benware B R and Rocca J J 1999 *Opt. Lett.* **24** 1115
- [5] Rocca J J *et al* 2003 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **507** 515
- [6] Rocca J J *et al* 1995 *Phys. Plasma.* **2** 2547
- [7] Tomasel F G, Rocca J J, Shlyaptsev V N and Macchietto C D 1997 *Phys. Rev. A* **55** 1437
- [8] Frati M, Seminario M and Rocca J J 2000 *Optics Letters* **25** 1022
- [9] Niimi G *et al* 2002 *IEEE Transactions on Plasma Science* **30** 616
- [10] Ben-Kish A *et al* 1999 *Proc. SPIE* **3776** 166
- [11] Nemirovsky R, Ben-Kish A, Shuker M and Ron A 1999 *Inst. Phys. Conf. Ser.* **159** 183
- [12] Niimi G *et al* 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 2123
- [13] Hayashi Y *et al* 2003 *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** 5285

The lasing time of soft x ray laser pumped by capillary discharge^{*}

Zhao Yong-Peng^{1)†} Cheng Yuan-Li¹⁾ Wang Qi¹⁾ Yasushi Hayashi²⁾ Eiki Hotta²⁾

¹⁾*National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

²⁾*Department of Energy Sciences, Tokyo Institute of Technology, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8502, Japan*

(Received 20 August 2004; revised manuscript received 1 October 2004)

Abstract

The laser spike of Ne-like argon at 46.9nm pumped by capillary discharge is measured with x-ray diode. Changing the pressure of Ar gas filled in the ceramic capillary and the peak value of the main discharge current, we study the effects of experimental parameters on lasing time, which is the time of spike after the onset of the main discharge current. The experimental results show that the soft x-ray laser is produced at the rise-time of the main discharge current which is 65%—75% of the peak at the lasing time. The lasing time can be delayed several ns when the pressure increases from 28Pa to 55Pa or the peak of main discharge current decreases. In addition, there is maximum amplitude of the laser spike about 42Pa.

Keywords: capillary discharge, soft x-ray laser, lasing time

PACC: 4255V

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60038010).

[†]E-mail: zhaoy3@yahoo.com.cn