

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0163-03

毛细管放电产生软 X 光激光的稳定输出

栾伯哈, 赵永蓬, 程元丽, 李 岩, 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 对毛细管放电产生类氩 46.9 nm 激光进行了实验研究,发现毛细管放电装置中布鲁姆林传输线所产生的固有预脉冲对软 X 光激光的产生及稳定输出都有十分不利的影响。在理论上,用雪耙模型计算并证明了固有预脉冲对毛细管均匀预电离的破坏作用,而在主电流脉冲到来之前能否均匀地预电离毛细管所充气体是能否产生激光的关键条件。为了消除固有预脉冲的影响,使用了外加隔离开关和隔离电容对装置进行改进。实验证明,该方法能够有效隔离固有预脉冲,使整个放电装置达到稳定运行。在此基础上,得到了毛细管放电类氩 46.9 nm 激光输出,并实现了激光稳定输出,输出强度变化范围小于 28%。

关键词 激光技术; X 射线激光; 软 X 光激光; 毛细管放电; 布鲁姆林传输线; 固有预脉冲

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

Influence of the Inherent Pre-Pulse of Blumlein Transmission Line on Soft X-Ray Laser Pumped by Capillary Discharge

LUAN Bo-han, ZHAO Yong-peng, CHENG Yuan-li, LI Yan, WANG Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The Ne-like argon 46.9 nm laser pumped by capillary discharge was investigated experimentally. An adverse influence of the inherent pre-pulse generated by Blumlein transmission line of the capillary discharge setup on arising and stable output of soft X-ray laser was observed. The destroying effect of the inherent pre-pulse on uniformly pre-discharging the capillary has been calculated and proved theoretically. Actually, uniformly pre-discharging gas filled in capillary before the current main-pulse is the key condition of laser arising. In order to decrease the influence of the inherent pre-pulse, a method of installing switch and capacitor for insulating the inherent pre-discharge pulse has been proposed. The experimental results show that the method can insulate the inherent pre-discharge pulse efficiently and make the discharge setup steadily operate. On the basis of this the laser spike of Ne-like argon 46.9 nm has been observed. And the stability of laser output has been realized. The range of variety of laser intensity is less than 28%.

Key words laser technique; X-ray laser; soft X-ray laser; capillary discharge; Blumlein transmission line; inherent pre-pulse

1 引 言

过去的十几年中在小型化实用型的软 X 光激光器研究方面取得了很大的进步。其中,基于毛细管快放电技术发展软 X 光激光器被证明是最成功的机制之一。

1994 年美国科罗拉多州立大学的 J. J. Rocca 等^[1]利用电子碰撞机制,首次实现了毛细管放电类氩 46.9 nm 软 X 光激光输出。1999 年该小组采用 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 46.9 nm 软 X 光激光饱和输出^[2]。此后国际上许多研究小组也开展了毛细管放电软 X 光激光的研究工作,并相继获得了

激光输出。实验证明,在主放电脉冲到来之前,利用合适的电流脉冲对毛细管内的气体进行预电离是软 X 光激光产生的必要条件。比如美国的 J. J. Rocca 小组使用的是几个微秒,10 A 的预脉冲^[1],以色列的 A. Ben-Kish^[3]小组使用的是 10 μ s, 18 A 的预脉冲,意大利的 A. Ritucci^[4]小组使用的是 3~5 μ s, 20 A 的预脉冲。

我们利用在哈尔滨工业大学建造的一台毛细管放电装置研究了类氩 46.9 nm 激光。在实验中发现布鲁姆林传输线所产生的固有预脉冲对产生激光有着十分重要的影响。为了去掉这个固有预脉冲,实验中采用了两种方法:将布鲁姆林传输线和毛

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60038010)和国家 863 高技术(863-804-7-10)资助课题。

作者简介: 栾伯哈(1971-),男,辽宁本溪人,哈尔滨工业大学博士研究生,主要从事毛细管放电短波长激光的研究。

E-mail: luanbh119@yahoo.com.cn

细管用一预脉冲开关隔离开;在毛细管上并联了一个隔离电容。这个双重隔离方法达到了很好的效果,实现了毛细管放电软 X 光激光稳定输出。

2 布鲁姆林传输线固有预脉冲的产生及影响

实验装置的脉冲形成线采用布鲁姆林传输线,由于本身结构的原因,它会产生一个固有预脉冲。图 1 是布鲁姆林传输线向毛细管放电的等效电路图。如图 1 所示,布鲁姆林传输线的内筒 C1 不能直接接地,而是通过一个接地电感与外筒 C2 相连来接地。这是因为,当 Marx 发生器对布鲁姆林传输线的内外筒充电时,为了构成充电回路,内外筒必须同时接地。与此同时,按照布鲁姆林传输线的放电原理,又要求在放电时内筒与地电位之间是完全开路的,这样才能保证内筒与外筒之间正常对毛细管放电。所以,接地电感的结构是满足布鲁姆林传输线的工作条件所必须的。但是,由于接地电感在充电时总有一个低的阻抗,就会在上面出现一个电压,这就是呈现在毛细管上的布鲁姆林传输线的固有预脉冲电压。

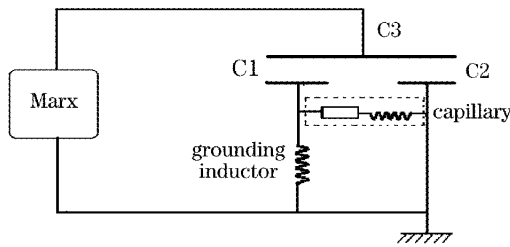


图 1 布鲁姆林传输线对毛细管放电的等效电路图
Fig. 1 Equivalent circuit diagram of discharge from Blumlein line to capillary

大量的实验结果表明,当主脉冲电流出现固有预脉冲时,不能产生激光。图 2 给出了带有固有预脉冲的主脉冲电流放电产生毛细管光辐射信号的典型波形,图中曲线 1 代表主脉冲电流,曲线 2 代表 X 射线二极管(XRD)记录的毛细管放电产生的光信号。如图所示,由于固有预脉冲的影响,毛细管放电产生的光信号出现了明显的不规则。

为了解释该实验结果,我们利用雪耙模型对毛细管中预电离等离子体在固有预脉冲作用下的 Z 箍缩过程进行了计算。雪耙模型的公式如下

$$\frac{d}{dt} \left[\pi \rho_0 (a^2 - r^2) \frac{dr}{dt} \right] = -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r} + 2\pi r P_{in}, \quad (1)$$

ρ_0 为毛细管中的气体密度, a 和 r 分别为毛细管的内

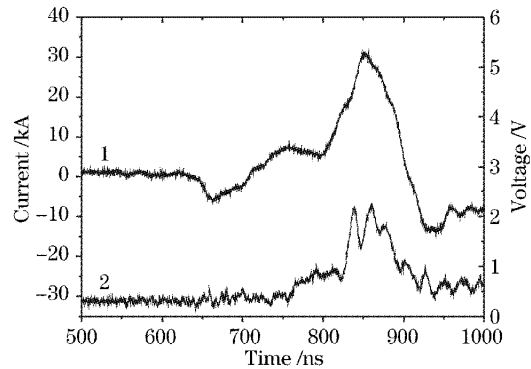


图 2 带有固有预脉冲的主脉冲电流和光辐射的 X 射线二极管输出信号

Fig. 2 Waveforms of main discharge current and XRD output signal

径和毛细管中等离子体的半径, I 为毛细管中流过的电流, P_{in} 为等离子体柱内的压强。

该方程可以用四阶龙格-库塔法数值求解。由于实验中毛细管放电产生的波形不能用解析表达式精确地描述,为了保证计算的准确性,我们利用实验测量的电流波形进行数值计算。在整个电流波形中选取负向固有预脉冲这一段进行了计算,其中每一时刻的电流幅值由对已知数据点的拉格朗日插值计算给出。图 3 给出了计算的结果,图中虚线代表等离子体柱半径随时间的变化情况,这表明固有预脉冲在主脉冲到来之前已经预先压缩了等离子体柱,而且电流方向是与主脉冲相反的。当主脉冲随后到来对等离子体进一步压缩时,由于瞬间改变电流方向必然引起等离子体轴向的不均匀性,使等离子体初始条件的一致性被破坏,因此当等离子体 Z 箍缩到最小半径时,不能形成轴向一致的等离子体柱,导致不能产生激光。

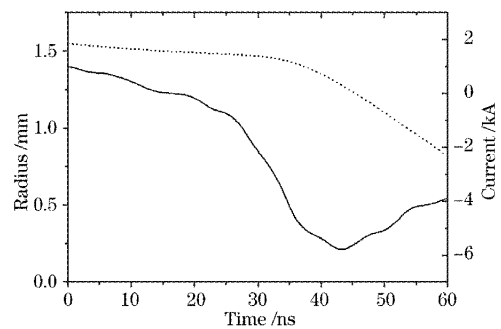


图 3 固有预脉冲电流波形(实线)和计算出的等离子体半径(虚线)

Fig. 3 Waveforms of inherent pre-discharge current (solid line) and the calculated radius of plasma (dashed line)

3 消除固有预脉冲的实验方案及结果

为了去掉固有预脉冲对放电的影响,如图 4 所示,起先采用了在布鲁姆林传输线内筒 C1 和毛细管之间加上隔离开关的方法。隔离开关由间距可调的球状铜电极火花隙构成。实验中根据 Marx 发生器输出电压的大小调节隔离开关火花隙的间距,使固有预脉冲在主脉冲到来之前不能击穿隔离开关,从而消除固有预脉冲对毛细管预电离的影响。在作了这项装置改进后,于 2004 年在较低的气压下成功地获得了类氩 46.9 nm 软 X 光激光输出^[5]。

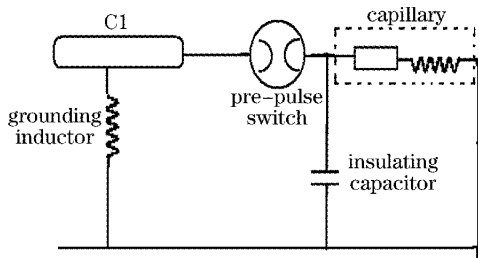


图 4 固有预脉冲隔离开关和隔离电容等效电路图
Fig. 4 Equivalent circuit diagram of the switch and the capacitor for insulating the inherent pre-discharge pulse

继续实验,发现如果 Marx 发生器输出电压较高,即使将火花隙间距调到很大,隔离开关也很难起作用。不仅如此,固有预脉冲的干扰常会引起主放电通道之外的旁路放电,使整个装置不能稳定运行。为了完全消除固有预脉冲的作用,又设计了一个外加的隔离电容,使它和毛细管并联,如图 4 所示。这个隔离电容与毛细管并联构成一个电容电感元件,它与隔离开关串联形成分压电路。由于充电是只有几百个纳秒的快过程,电容不能当作断路,所以隔离电容与隔离开关串联起到了分压的作用,使隔离开关更难被击穿。而当主脉冲到来时,隔离电容因为容值较大,所以隔离开关上的电压更高,保证隔离开

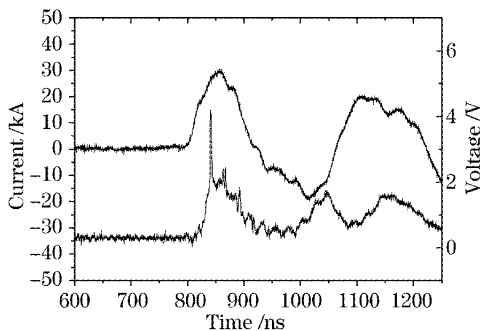


图 5 X 射线二极管记录的类氩 46.9 nm 激光尖峰信号
Fig. 5 Laser peak of Ne-like argon 46.9 nm detected with XRD

关被顺利击穿,使放电正常进行。实验验证了这种设计的有效性,保证了毛细管放电实验的稳定运行,最终实现了类氩 46.9 nm 激光的稳定输出。毛细管内氩气气压 14 Pa 的激光输出的结果见图 5, X 射线二极管记录的尖峰信号即为类氩 46.9 nm 激光,激光的持续时间约为 2 ns。在同样的条件下,连续 6 次放电实验所测得的 X 光激光信号幅值变化情况如图 6 所示,软 X 光激光信号幅值大小基本一致,变化范围小于 28%。

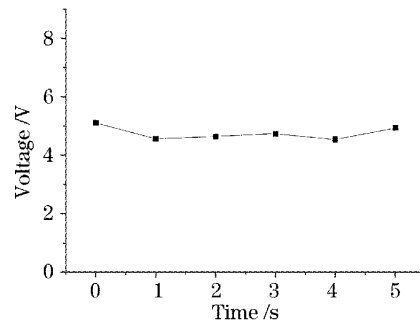


图 6 同一条件下连续 6 次输出的激光尖峰信号幅值
Fig. 6 Intensity of laser peak of 6 consecutive outputs in the same condition

4 结 论

在毛细管放电产生软 X 光激光的实验中,由于实验装置采用的布鲁姆林传输线带有幅值很高的固有预脉冲,这严重破坏了产生激光所要求的在主脉冲之前对毛细管进行均匀的预电离。经过大量实验的探索和分析,采用了外加隔离开关和隔离电容的方法消除固有预脉冲,获得了很好的结果,使装置达到了连续稳定运行,实现了毛细管放电类氩 46.9 nm 激光的稳定输出。

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 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
- 3 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
- 4 G. Tomassetti, A. Ritucci, A. Reale *et al.*. Capillary discharge soft X-ray in Ar pumped by long current pulses [J]. *Eur. Phys. J. D*, 2002, **19**: 73~77
- 5 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
栾伯哈,赵永蓬,吴寅初等. 对毛细管放电抽运软 X 光激光产生条件的实验研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1189~1192