

预脉冲在毛细管快放电软 x 射线激光中的作用^{*}

程元丽^{1)†} 栾伯含¹⁾ 吴寅初¹⁾ 赵永蓬¹⁾ 王 骐¹⁾ 郑无敌²⁾ 彭惠民²⁾ 杨大为³⁾

¹⁾ 哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室 哈尔滨 150001)

²⁾ 北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

³⁾ 中国原子能科学研究院 北京 102413)

(2005 年 2 月 5 日收到, 2005 年 4 月 11 日收到修改稿)

在一台毛细管快放电软 x 射线激光实验装置上, 在相同主脉冲条件下(电流峰值 18—30kA, 半周期 80ns), 通过观测放电产生的软 x 射线辐射, 研究了该装置固有的高幅值(2—5kA) 和外加的低幅值(10—20A) 两种预脉冲, 对聚乙烯毛细管和高纯度陶瓷毛细管(99.9%) 放电的管壁烧蚀及等离子体状态的影响. 采用装置固有的几 kA 预脉冲和聚乙烯毛细管, 放电过程中产生了大量的管壁烧蚀, 并且这种情况下的等离子体均匀性差, 没有可能获得激光输出. 而采用 20A 的预脉冲和高纯度陶瓷毛细管, 管壁烧蚀量大大减少, 预电离等离子体的均匀性好, 在这种情况下, 实验上利用 x 射线二极管观测到了激光尖峰信号.

关键词: 预脉冲, 毛细管放电, 软 x 射线激光

PACC: 0785, 6180C, 5280Y

1. 引 言

毛细管放电最初是被用来作为研究 x 射线光谱, x 射线光刻和 x 射线显微术的 x 射线源. 毛细管放电是指直径为 mm 量级, 长度为几 cm 至几十 cm 的绝缘管两端加上快脉冲高电压. 1967 年 Bogen 建立的毛细管放电装置中, 毛细管长 2cm, 内径 2mm, 放电电压 40kV, 获得了软 x 射线输出^[1]. 1994 年 Rocca 等人成功地获得类氦氩 46.9nm 激光输出^[2]; 在 1999 年, 获得的 46.9nm 激光输出近 1mJ, 重复频率达到了 4Hz^[3]. 目前利用毛细管放电获得强的极紫外辐射作为 x 射线光刻光源又成为新的研究热点^[4].

在激光打靶 x 射线激光研究中, 许多实验都使用了预脉冲技术, 获得了良好的效果^[5,6]. 在毛细管放电抽运软 x 射线激光实验中, 预脉冲也起着至关重要的作用^[7-9]. 与其它毛细管放电等离子体相比, 有预脉冲作用时, 获得的等离子体柱直径更小, 轴向均匀性更好, 电子温度更高. 预脉冲的大小直接影响着管壁烧蚀量, 并决定着能否形成均匀稳定的 Z 箍缩等离子体柱, 适当的预脉冲是产生 x 光激光的必

要条件. 在毛细管放电 x 光激光产生过程中, 预脉冲的作用体现在两方面, 一是对气体进行初步电离后形成的等离子体是一种电阻率很小的良导体, 在高电压主脉冲作用下有利于形成快脉冲大电流, 使等离子体柱能快速脱离管壁, 减少管壁烧蚀, 更主要的是利用预脉冲技术, 形成均匀预电离的等离子体柱, 为主脉冲通过 Z 箍缩效应形成轴向均匀、电子密度梯度较小的高温高密度等离子体柱体提供了可能.

本文从实验和理论两方面研究了装置固有的高幅值的(2—5kA) 和外加的低幅值的(10—20A) 两种预脉冲对毛细管放电管壁烧蚀、初始等离子体的均匀性以及出光的影响. 实验及理论计算结果表明, 装置固有的预脉冲幅值过高, 管壁烧蚀严重, 形成的等离子体均匀性差, 没有激光输出. 而幅值为 20A 的预脉冲可使管壁烧蚀量大幅减小, 获得的等离子体柱均匀性好, 为产生 x 射线激光提供了条件.

2. 毛细管快放电实验装置

毛细管放电实验装置由四部分组成^[7], 包括 Marx 发生器(输出电压 240—300kV), Blumlein 传输线、毛细管放电室、真空及检测系统, 如图 1 所示. 实

^{*} 国家自然科学基金(批准号 50038010), 国家 863 计划项目(批准号 2002AA84ts23) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: cyl_ice@hotmail.com

验时,先由预脉冲将毛细管内的气体初步电离;Marx发生器对 Blumlein 传输线进行脉冲谐振充电,充电时间大约 $1\mu\text{s}$ 左右,当传输线充电到它的峰值电压 $90\%—95\%$ 时,主开关接通,在预脉冲过后,形成一个快前沿(30ns 左右)高压脉冲加到毛细管上;毛细

管内预电离形成的等离子体在快脉冲大电流的作用下进行箍缩,形成高温、高密度、高电离度的等离子体柱,其中的电子碰撞过程形成相应能级的粒子数反转,在适当的条件下即可产生软 x 射线激射。

在 Blumlein 传输线充电时,由于接地电感的存

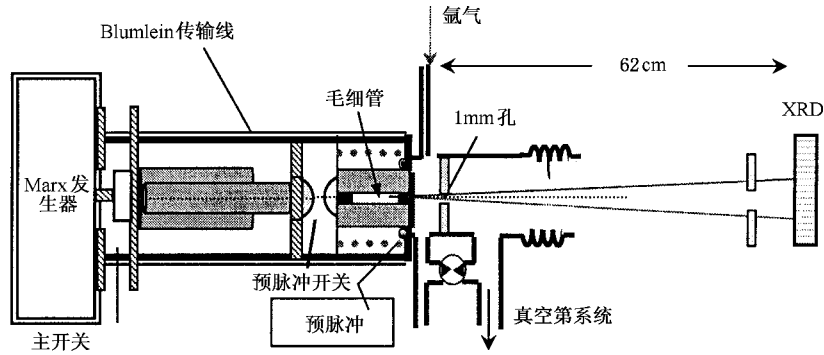


图 1 毛细管放电实验装置示意图

在,主脉冲到来前几百 ns,在毛细管两端产生一幅值为 $2—5\text{kA}$,脉宽为 $\sim 100\text{ns}$ 的脉冲,如图 2(a)所示,最初考虑用其作为预脉冲.另一预脉冲装置包括预脉冲电源和预脉冲电路两部分,其电路及电流波形如图 3 所示,采用倍压电路来提高预脉冲电压,高压变压器的最大输出电压为 10kV ,预脉冲的最大输出电压 20kV .通过一个延时触发电路,完成预脉冲和主脉冲的同步,预、主脉冲间的延迟时间在 $2\mu\text{s}—50\mu\text{s}$ 连续可调,幅值为 $10—20\text{A}$.原有的预脉冲通过一个预脉冲开关进行隔离,该开关在原有的预脉冲 (50kV , 5kA) 到来时不导通,主脉冲 ($200—300\text{kV}$) 来时导通.图 2 给出了有几 kA 预脉冲、和该预脉冲被隔离后外加 20A 预脉冲两种情况下的主脉冲电流波形.

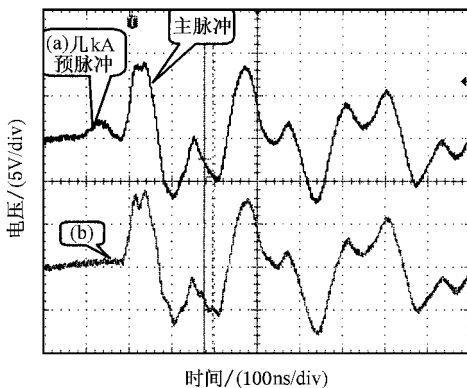
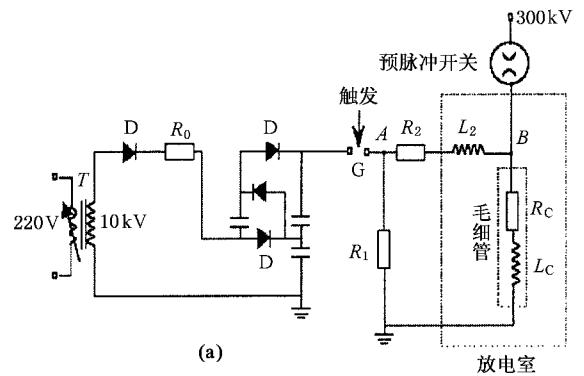


图 2 两种不同预脉冲情况下的主脉冲电流波形 (a) 前面有 5kA 预脉冲时的主脉冲 (b) 5kA 预脉冲被隔离掉后的主脉冲

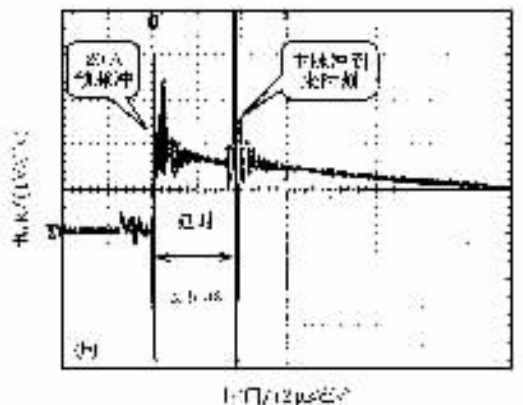


图 3 (a) 20A 预脉冲电路图 (b) 预脉冲电流波形及与主脉冲的延时 ($4\mu\text{s}$)

通过观测毛细管放电软 x 射线波段的辐射,我们研究了在相同主脉冲条件下(电流峰值 $18—30\text{kA}$,半周期 80ns),分别采用以上两种不同预脉冲

时 聚乙烯毛细管和高纯度陶瓷毛细管(99.9%)的管壁烧蚀以及 x 射线辐射输出情况. 实验时, 毛细管长 12cm, 内径 3.1mm. 毛细管内充 Ar 气, 压强 15—30Pa. 毛细管放电辐射谱的测量采用的是由 ACTON 公司 VM502 真空紫外单色仪改装而成的罗兰圆谱仪, 用上海 5FW 胶片记录. 一台 x 射线二极管用于测量毛细管放电 x 射线辐射输出能量. 该 x 射线二极管采用镀金阴极, 阳极为薄铝网, 两极间的距离为 2mm, 工作电压 -800V.

3. 实验结果与理论分析

由于高价氩离子在 200—300nm 波段的辐射比较弱, 而聚乙烯毛细管管壁材料碳、陶瓷毛细管的铝和氧在此波段有较强的辐射, 所以我们选择真空紫外单色仪的中心波长为 240nm, 对毛细管放电后的真空紫外谱进行了测量.

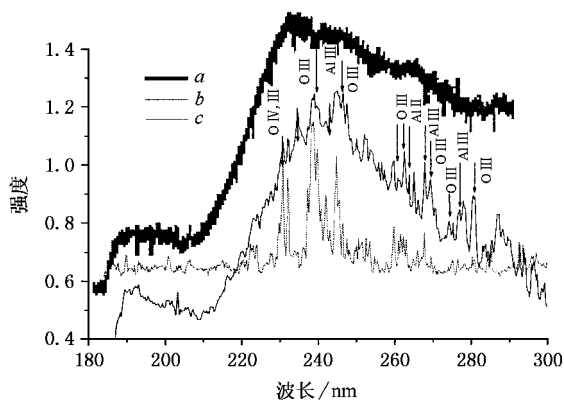


图 4 28kA 的主脉冲对充有 Ar 毛细管放电的真空紫外谱(中心波长 240nm)曲线 a 7kA 的预脉冲、聚乙烯毛细管, 曲线 b 7kA 的预脉冲、陶瓷毛细管, 曲线 c 20A 预脉冲、陶瓷毛细管

图 4 曲线 a 给出了幅值几 kA、持续时间几百 ns 的预脉冲条件下, 对聚乙烯毛细管放电的真空紫外辐射谱. 从图中可看出, 谱线呈连续状且不能分辨, 有很强的背景辐射, 而且放电后毛细管内壁和真空传输通道的内壁附有大量黑色碳粉, 所以此时的管壁烧蚀是非常严重的. 大量的管壁烧蚀, 不仅将影响主放电电流的分布, 而且对探测设备造成极大损害. 相同实验条件下陶瓷毛细管放电的结果较聚乙烯毛细管, 谱线包络能够分辨, 如图 4 曲线 b, 但背景辐射仍然很强, 谱线密集, 大部分辐射来源于管壁物质铝和氧. 高峰值预脉冲时管壁烧蚀量大的原因在于, 高峰值预脉冲作用下存在较高的电场, 在毛细管管

壁附近产生了不均匀的击穿通道, 主脉冲到来时, 没能通过有效的 Z 箍缩使等离子体与管壁快速分离, 致使管壁烧蚀严重. 没有任何预脉冲的条件下, 毛细管直接在主脉冲的作用下, 在更短时间(几个 ns)和更高电场(300kV, 30kA)下导通, 这时的情况更糟糕, 往往导致在毛细管外侧放电, 对实验装置损伤比较大.

选择幅值为 20A、延迟时间为几个 μs 的预脉冲, 在相同的主脉冲条件下, 观测了充 Ar 气陶瓷毛细管放电的辐射谱, 结果如图 4 曲线 c 所示. 可以看出 20A 预脉冲放电时的谱线包络与几 kA 时的基本相同, 但 20A 预脉冲时的背景辐射大幅减小, 谱线可分辨性强, 说明 20A 预脉冲时管壁烧蚀量大大减小了. 而且该低幅值预脉冲击穿毛细管时, 整个管子是通亮的, 而几 kA 预脉冲击穿毛细管时, 管子只有一丝闪亮, 不像低幅值那样通亮. 实际上, 幅值为 20A 的、持续时间为几 μs 的预脉冲, 因为持续时间足够短, 避免了不必要的附加加热, 另一方面, 与等离子体的维持时间相比, 预脉冲持续时间又足够长, 使扩散过程能够完成, 而较低的电场减少了碰撞电离截面, 电子更多的是发生非弹性碰撞, 所有这些都助于在主脉冲之前获得均匀的等离子体初始条件, 主脉冲到来时, 通过这个低阻抗的、均匀预电离的等离子体柱, 能使等离子体快速脱离管壁, 大幅减少管壁烧蚀量, 并在毛细管中形成均匀、电子密度梯度小的等离子体柱, 这样才有可能获得激光输出.

利用一维磁流体力学程序(XDCH)可以对不同预脉冲条件下产生的等离子体柱的均匀性进行计算. XDCH 程序是模拟毛细管放电以及产生增益全过程的程序, 其中包含细致组态模型、电离非平衡的原子过程等物理过程的细致考虑. 我们对 5A 至 2kA 的预脉冲进行了计算, 结果表明, 50A 以下低幅度预脉冲放电结束之后, 等离子体的温度密度和电离度非常均匀, 见表 1. 图 5 给出了典型的 20A 预脉冲电流下电子密度温度分布情况, 在放电接近 $2\mu\text{s}$ 的时候, 等离子体物理量空间分布变得略微的不均匀, 原因在于弱的放电也会压缩等离子体, 产生非常弱的聚心冲击波, 激波大约在 $1\mu\text{s}$ 时开始到心反弹, 在接近 $2\mu\text{s}$ 的时候激波同管壁碰撞, 使电子温度密度以及电离度略有不均, 但因为激波非常弱, 电子密度的不均匀性很小 ($< 1.5\%$), 而电子温度的不均匀性更小. 但随预脉冲电流强度提高, 这种均匀性迅速变差, 当预脉冲幅度为 2kA 时, 等离子体密度涨落达

已到了 $\pm 9.0\%$,在这种情况下 ,通过主电流放电形成均匀的预电离等离子体柱非常困难 ,不利于 x 射

线激光的放大产生 .

为进一步研究预脉冲在减少管壁烧蚀及形成均

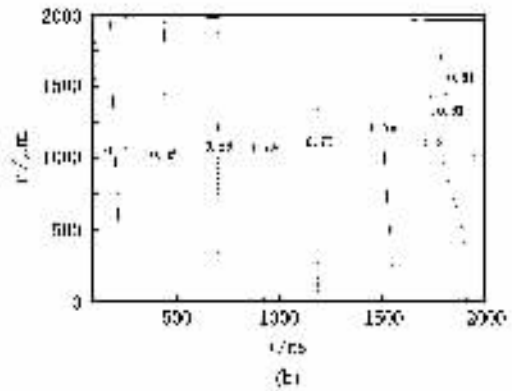
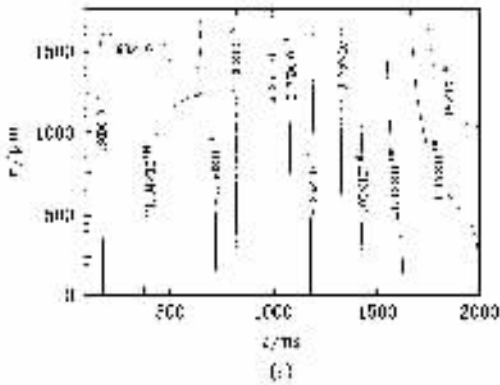


图5 放电电流 20A 脉宽 2 μ s ,等离子体电子密度 N_e/cm^{-3} (a) 和电子温度 T_e/eV (b) 在 $r-t$ 平面上的等高线 .

表 1 用不同预放电电流产生的等离子体状态

电流幅度/A	电子密度 / cm^{-3}	电子温度/eV	电离度	密度涨落
5	1.95×10^{14}	0.35	< 0.01	$\pm 1.3\%$
10	1.31×10^{15}	0.61	< 0.01	$\pm 1.1\%$
20	1.18×10^{16}	0.81	0.62	$\pm 1.4\%$
50	1.94×10^{16}	1.30	1.00	$\pm 0.5\%$
100	3.81×10^{16}	2.06	1.96	$\pm 2.5\%$
500	9.70×10^{16}	5.94	5.08	$\pm 2.8\%$
1000	1.31×10^{17}	9.75	6.82	$\pm 4.9\%$
1500	1.48×10^{17}	13.83	7.71	$\pm 5.9\%$
2000	1.52×10^{17}	18.14	7.91	$\pm 9.0\%$

均匀的等离子体柱 .

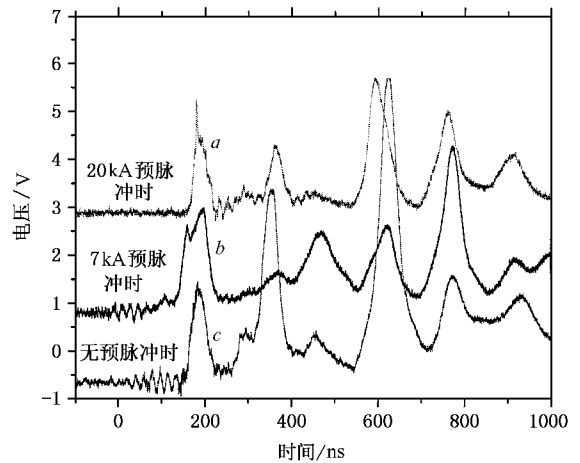


图 6 各种预脉冲条件下的 x 射线二极管输出曲线 a 20kA 的预脉冲 ,曲线 b 7kA 的预脉冲 ,曲线 c 无预脉冲、陶瓷毛细管

匀的预电离等离子体柱方面的作用 ,我们利用 x 射线二极管(XRD)测量了不同预脉冲条件下的毛细管放电 x 射线辐射输出 ,测量结果如图 6 所示 .当不加任何预脉冲 ,只由主脉冲对毛细管放电时 ,x 射线二极管输出的第 2、第 3 个电流峰值较大 ,对应比较强的 x 射线辐射输出 ,说明在第一个放电脉冲过程中已经产生了大量的烧蚀物质 .采用几 kA 预脉冲时 ,在主脉冲到来之前就已经观察到了 x 射线辐射输出 ,说明在主脉冲之前由于高幅值预脉冲的作用 ,就已经产生了 Z 箍缩效应 .这种预脉冲时 x 射线辐射产生的时间较另外两种预脉冲的情况早很多 ,对应的 x 射线背景辐射的脉宽为 62ns ,但这种情况下没有观察到激光尖峰信号 .当主放电电流已经达到出光要求 ,而仍没有增益放大的主要原因是毛细管中的初始条件不够均匀 ,即预脉冲参数不合适 ,没有使毛细管内在主放电脉冲到来之前形成低电离度的、

而当采用 20A 预脉冲时 ,x 射线背景辐射的幅度减少 ,脉宽也仅有 33ns ,并且在背景辐射的峰值附近观察到了一个窄脉宽(2ns)的尖脉冲信号 .实验发现该尖峰信号随主脉冲电流的增加(从 25.7kA 到 28.3kA)而迅速增大 ,而背景辐射的幅值几乎没有变化 ,如图 7 所示 .当氩气压强从 18Pa 提高的 25Pa 时 ,XRD 输出信号也表现出了相同的特性 ,即尖峰信号幅值迅速攀升 ,而背景辐射的幅值几乎没有变化 .这一结果表明 ,该尖峰信号具有激光的特性 ,即脉宽窄、增益特性明显 .国外几个研究小组 ,对充 Ar 毛细管放电也获得了同样实验结果 ,并已证实 XRD 上观察到的尖峰信号来源于类氩 46.9nm 激光线的放大^[2 8,10,11] .

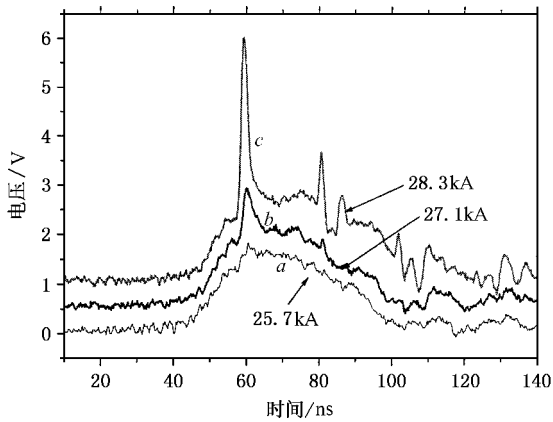


图 7 毛细管内氩气压强 24Pa, 预脉冲 20A, 预主延时 $5\mu\text{s}$, 不同主放电电流峰值条件下 X 射线二极管输出结果, 曲线 a 25.7kA, 曲线 b 27.1kA, 曲线 c 28.3kA

4. 结 论

在毛细管放电 X 射线激光实验中, 适当的预脉冲能产生稳定的压缩, 而不适当的预脉冲往往产生非均匀的等离子体柱. 预脉冲的幅值和毛细管的材料对放电过程中的烧蚀量起着决定性的作用, 预脉冲电流过高或过低都不好, 幅值过高、过快的预脉冲(如毛细管装置固有的几 kA 预脉冲)将导致在毛细管管壁附近产生不均匀击穿通道, 使管壁烧蚀严重. 而低幅值(几十 A)、持续几微秒的预脉冲, 能够有效地减少管壁烧蚀, 使气体均匀预电离, 在主脉冲到来后能够形成稳定、均匀的 Z 箍缩. 利用毛细管放电, 只有当选择适当的预脉冲, 才能够获得激光输出.

- [1] Bogen P, Conrads H and Rusbuld D 1965 *Z. fur. Physic* **186** 240
- [2] Rocca J J, Shlyaptsev V, Tomasel F G *et al* 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2192
- [3] Macchietto C D, Benware B R and Rocca J J 1999 *Opt. Lett.* **24** 1115
- [4] Boboc T, Bischoff R and Langhoff H 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 2512
- [5] Zhang J, Macphee A G, Lin J *et al* 1997 *Science* **276** 1097
- [6] Wang S J, Yuan G, Fu S Z *et al* 1998 *High Power Laser and Particle Beams* **10** 321
- [7] Qi W, Cheng Y L, Zhang X L *et al* 2002 *Chin. J. Lasers* **29** 97 (in Chinese)
- [8] Ben-Kish Admit, Shuker M, Nemirovsky R A *et al* 2001 *J. Phys. IV France* **11** Pr2-99
- [9] Kukhlevsky S V, Kaiser J, Palladio L *et al* 1999 *Phys. Lett. A* **258** 335
- [10] Tomassetti G, Ritucci A, Reale A *et al* 2002 *Eur. Phys. J. D* **19** 73
- [11] Hayashi Yasushi, Xiao Y F, Sakamoto Nobuhiro *et al* 2003 *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** 5285

Effect of pre-pulses on capillary discharge soft x-ray laser^{*}

Cheng Yuan-Li¹† Luan Bo-Han¹) Wu Yin-Chu¹) Zhao Yong-Peng¹) Wang Qi¹)
Zheng Wu-Di²) Peng Hui-Min²) Yang Da-Wei³)

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

² Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

³ China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(Received 5 February 2005 ; revised manuscript received 11 April 2005)

Abstract

On a capillary discharge setup lasing in Ne-like Ar at 46.9nm, the ablation of capillary wall was investigated for polythene and alumina material at both of inherent 2—5kA-pre-pulse of setup and separate pre-pulse of 20A by measuring soft x ray emission from the capillary discharged. For inherent pre-pulse and polythene capillary, the ablation is too large to create uniform plasma columns and it is impossible to obtain lasing. In the case of 20A-pre-pulse and alumina capillary, the ablation decreased remarkably and the laser spike pulse was distinguished on an x-ray diode because the uniform Z-Pinch plasma column had formed.

Keywords : pre-discharge, capillary discharge, soft x-ray laser

PACC : 0785, 6180C, 5280Y

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60038010) and by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2002AA84ts23).

[†] E-mail : cyl_ice@hotmail.com