

文章编号: 0258-7025(2010)01-0005-13

毛细管放电软 X 光激光及应用

王 骐 谢 耀* 赵永蓬 栾伯晗 朱秋石

(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 介绍了在毛细管放电实验中采用预脉冲开关,成功地抑制了由于采用 Blumlein 传输线作为电流脉冲成形线时存在的前置固有脉冲对 Z 箍缩过程的破坏。同时成功地加载了预脉冲,建成了毛细管放电 X 光激光装置,实现了类氩 46.9 nm 软 X 光激光输出,准确地测量了激光波长,并对激光的一系列特性,包括激光的方向性、增益特性和束散角等进行了实验研究。这一装置提高了 Marx 发生器的使用效率,为进一步实现毛细管放电装置的小型化提供了一条有效的途径。此外还介绍了毛细管放电抽运机制可能的应用。

关键词 激光器;软 X 光激光;毛细管放电;Blumlein 传输线

中图分类号 TN248.6 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103701.0005

Capillary Discharged Soft-X-Ray Laser and Application

Wang Qi Xie Yao Zhao Yongpeng Luan Bohan Zhu Qiushi

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

Abstract A method to eliminate the damage aroused by intrinsic prepulse of Blumlein transmission line is proposed. It is used as the forming line in the experiment of capillary discharge soft-X-ray laser, and an additional prepulse is loaded successfully. Ne-like Ar 46.9 nm soft-X-ray laser whose spectra detected by a Rowland spectrograph is obtained. We also detected the directionality, divergence and the gain characteristics of Ne-like Ar 46.9 nm soft-X-ray laser. With the help of Blumlein transmission line, the service efficiency of Marx generator is increased, which is helpful to achieving miniaturization of capillary discharge soft-X-ray. Finally, the supposed applications of 46.9 nm soft-X-ray are also discussed in this paper.

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

1 引 言

X 光激光是波长位于电磁波谱的 X 射线波段的短波长激光,目前一般称波长在 0.1~100 nm 间的激光为 X 光激光。由于 X 光激光具有波长短、瞬间亮度高、脉冲持续时间短(\leq ns)等特性,可用于需要极高的时间和空间分辨的微观快过程研究领域,在活细胞全息摄影、受控热核反应等离子体状态诊断、短波段激光光谱技术、极大规模集成电路光刻及材料科学等领域具有其他波段激光所不可替代的应用价值^[1~6]。自 1984 年国际上第一次获得 X 光

激光以来^[7],国内外在这一领域已经取得了显著的成果,实现了闭合壳层如类氩、类镍等序列离子的电子碰撞激发 X 光激光^[8~13]。王世绩课题组^[14,15]双靶对接类氩锗、四靶对接类氩锗 X 光激光,实现了深度饱和及高离化度离子如类氢、类锂、类铍及类钠复合机制 X 光受激放大。徐至展课题组^[16,17]利用复合机制已获得了接近水窗波段的 X 光激光。

自软 X 光激光被实现以来,实现低激发阈、台式软 X 光激光一直是重要的研究方向,在 20 世纪 80 年代提出了台式 X 光激光概念(table-top),1985

收稿日期:2009-09-21;收到修改稿日期:2009-10-15

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: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方面的研究。
E-mail:qi wang@hope.hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail:xy5090@yahoo.com.cn

年曾提出过可做到超真空紫外(VUV)波段的离子准分子方案^[18,19],1994年提出了光场电离X光激光方案^[20]等。其中以1988年提出的毛细管放电软X光激光方案^[21]进展最快,并已成功应用于等离子诊断等研究领域。

2 国内外发展概况

1988年J. J. Rocca小组^[21]首先提出了利用毛细管放电三体复合机制获X光激光的方案,并获得类氩碳18.2 nm相干输出。但由于复合机制实验条件难以控制,增益不易做得很高,该方案未获得更进一步结果。之后国际上又有几个小组采用复合机制利用毛细管放电进行X光激光探索,但是进展不显著。

1994年J. J. Rocca小组^[22]采用电子碰撞机制,装置采用水介质平行板电容器(即水电容),首次实现了毛细管放电类氩氩46.9 nm X光激光输出,其增益长度积为 $gl=7.2(g=0.6\text{ cm}^{-1}, l=12\text{ cm})$ 。

1996年J. J. Rocca小组^[23]采用一个反射镜(I_r 平面反射镜反射率20%)实现了双程放大,较1995年采用20 cm长毛细管获得的激光, $gl=14(g=0.9\text{ cm}^{-1})$,输出能量6 μJ 的实验结果又有了明显提高^[24],输出能量达30 μJ ^[23]。在第五届X射线激光国际会议上,由于这一激光器已接近成为有应用价值的装置,被会议评为10分。

1997年J. J. Rocca小组^[25]建成了用Blumlein传输线的毛细管放电装置,并实现了46.9 nm X光激光输出。但采用Blumlein传输线会存在一个固有前置脉冲,报道中就如何消除它并未做任何说明,其

后J. J. Rocca小组放弃了这一方案,之后又改用水电容作为脉冲成形线。

1999年J. J. Rocca小组^[26]采用水电容作为传输线,氧化铝陶瓷毛细管,管长34.5 cm,内径3.2 mm,获得了类氩氩46.9 nm激光平均单脉冲能量达到0.88 mJ,重复频率达到4 Hz,并且一根毛细管可以工作5000次以上的实验成果。

1994年第一次实现毛细管放电抽运软X光激光输出以来,国际上亦有若干小组进行相关研究,直到2000年前后,以色列A. Ben-Kish小组^[27]、日本H. Eiki小组^[28]、意大利G. Tomassetti小组^[29,30]先后利用此方案获得了X光激光输出,2006年俄罗斯研究小组有了获得46.9 nm激光输出的相关报道^[31],2007年至今,马来西亚的研究小组利用20 cm长,直径为3 mm的毛细管获得了激光的增益饱和输出^[32,33]。

2004年本小组利用Blumlein传输线作为电流脉冲成形线,解决了由于Blumlein线带来的前置固有脉冲对Z箍缩破坏的问题,成功加载了低电流幅值的(20~50 A)预脉冲电源系统,在自己研制的毛细管放电装置上获得了类氩氩46.9 nm X光激光输出,是迄今为止国际上第5个获得这一激光输出的小组,并研究了预主脉冲延时、放电电极等实验条件对于激光输出的影响^[34,35]。表1介绍了各国研究小组的实验条件和相关实验参数,从表中可以看出,本研究小组与国外各小组最大的区别在于采用了Blumlein线作为传输线,并获得了较高能量的激光输出。

表1 国内外实验条件及相关参数

Table 1 Experiment condition and parameters of workgroups

Workgroup	Year	Material of capillary and size /mm	Style and charge voltage of transmission line /kV	Amplitude of main discharge current /kA	Ar pressure / Pa	Gain coefficient / cm^{-1}	Energy / μJ
America	1994, 1999	Ceramics 120×3.2, 340×3.2	Water filled pulse-forming-line 600	40, 26	94.3, 62	0.6, 1.16	6, 800
Israel	2000	Ceramics 165×4	Water filled pulse-forming-line 600	50	66.5	0.75	Unknown
Japan	2001	Ceramics 150×3	Water filled pulse-forming-line 600	30	54	0.80	30
Italy	2002, 2004	Ceramics 150×3, 450×3	Water filled pulse-forming-line 600	33, 20	52, 60	0.65	10, 300
China	2004, 2008	Ceramics 150×3, 350×3	Blumlein transmission line 300	31, 24	32, 26	0.46	3, 30
Malaysia	2008	Ceramics 200×3	Water filled pulse-forming-line 350	16	22	1.20	Unknown

在这期间,国际上还有德国、法国、韩国、捷克等小组开展同样的研究工作,但尚未见获得激光输出的报道。

3 毛细管放电 X 光激光机理

毛细管放电抽运是指在直径为几毫米、长度为几十到几百毫米的毛细管两端加上电极,在电极两端加上快脉冲高压,使在毛细管中形成快脉冲电流产生的 Z 箍缩来产生作为增益介质的等离子体,形成高价离子间跃迁,获得软 X 射线辐射并放大,实现 X 光激光输出。

Z 箍缩是 20 世纪 50 年代,在核聚变实验研究中提出的一种机理,它是依靠在气体中轴向电流产生的电磁力使自身箍缩或向轴线(z 轴)内聚运动的柱对称等离子体构形^[36]。1988 年 J. J. Rocca 小组^[21]将 Z 箍缩原理应用到毛细管放电中,首次提出了利用毛细管放电抽运获得 X 光激光的方案。

毛细管放电 X 光激光的基本原理如图 1 所示,图中的毛细管(capillary)是一支内径为几毫米(通

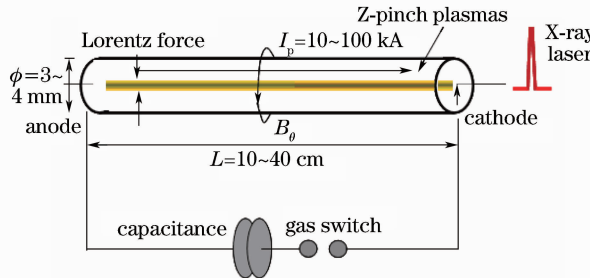


图 1 毛细管放电 X 光激光基本原理

Fig.1 Fundamental of capillary discharge soft-X-ray laser

常为 3~4 mm),长为几十到几百毫米(目前已做到最长 450 mm)的陶瓷管。管内充工作气体。两端首先加上一预脉冲电流(20~50 A)使管内气体电离(电离成+1,+2 价离子),然后加上一脉冲高电压(峰值电压在 300 kV 以上),由于已电离的等离子体电阻小,脉冲高电压会在管内形成脉冲大电流(峰值电流几十千安),此时柱内外就会产生磁力线环绕自身电流的径向磁场,这个磁场和电流的相互作用,产生洛伦兹力,此力对等离子体中的电子作用方向是指向中心轴 z 轴,这就使得沿毛细管内管壁形成的等离子体中的电子,会同步向轴心运动,形成可认为是均匀运动的电子壳层(这是本方案中最重要的一步,即形成一个均匀的电子壳层向轴心运动),这种运动即为 Z 箍缩过程,在脉冲磁场存在时间内,电子壳层向轴心运动,并被加速,但是箍缩过程中,电子间又存在排斥力,抵抗等离子体柱的压缩,这一阻力称为欧姆加热,使等离子体柱温度不断提高,其动力压强也增加,当动力压强和磁压强之间达到平衡时,柱半径不再随时间改变,达到平衡,这时等离子体柱的高温使周围气体介质达到高价电离,形成一个会聚的等离子体壳层很薄的区,壳层的直径在 100 μm 左右,均匀壳层长度可达毛细管的长度,即几十到几百毫米,形成了 X 光激光介质区。此后便可可靠高价离子间电子碰撞机制,或复合机制获得 X 光激光输出。

4 实验装置的建造

图 2 给出了本课题组使用的实验装置示意图,图中右侧给出实物照片。

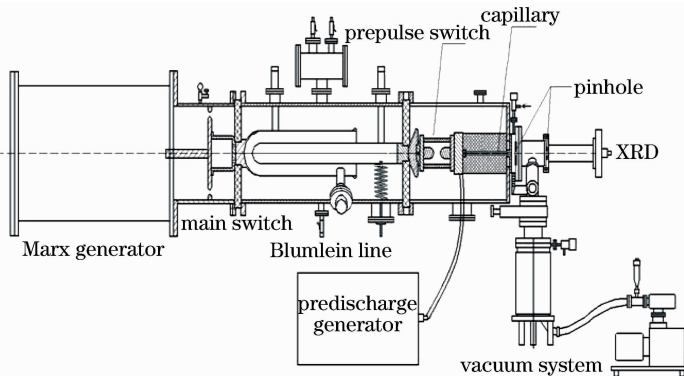


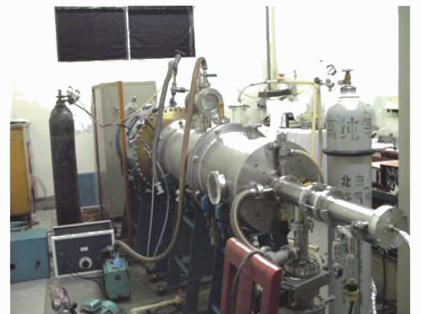
图 2 实验装置示意图

Fig.2 General diagram of experimental equipment

本实验装置中的 Marx 发生器,由 10 级串联电容组成,最高输出电压为 300 kV。

采用 Blumlein 传输线,较之已经报道的其他几

个小组采用的水电容不同,文献[25]报道过 J. J. Rocca 小组曾用 Blumlein 传输线获得激光输出,随后他们放弃了这个方案。本文将展开讨论本课题组



采用 Blumlein 传输线时所克服的难题,以及取得的成果。

装置中外加了预脉冲电源,由于它加到毛细管阴极上,主脉冲300 kV的高压会耦合到预脉冲电路中,击穿预脉冲电源。为此在预脉冲线路上串联了一个隔离电感,保证预脉冲能顺利导通的情况下保护了预脉冲。

4.1 Blumlein 传输线所带来的固有前置脉冲对 Z 箍缩的破坏

国际上其他已获得毛细管放电 X 光激光输出的科研小组的出光系统均采用水电容作为能量传输线。但由于水电容的能量传输效率只有 50% 左右,因此需要配合使用放电电压更高的 Marx 发生器来保证激光输出所需要的主脉冲电流幅值,增加了电源的体积。

Blumlein 传输线是一种公认的理论电压传输效率可达到 100% 以上的传输技术,采用它代替水电容可以显著提高高压脉冲电源的利用效率。Blumlein 传输线的三套筒结构如图 3(a) 所示,其对毛细管放电的等效电路如图 3(b) 所示。当 Marx 发

生器对 Blumlein 传输线的内外套筒充电时,为了构成充电回路,内外筒必须同时接地,但 Blumlein 传输线内筒不能直接接地,为此通过一个接地电感与外筒相连以达到接地的目的;与此同时,按 Blumlein 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。也就是说,接地电感的结构是为了满足 Blumlein 传输线的工作条件而设的。但是由于接地电感在充电时总有一个低的阻抗,在电源对内筒充电的过程中,会有电流流过电感,由于这个充电电流是非恒定的,它就会在电感上产生感生电动势,即电感上出现一个压降,这就是主脉冲放电前存在的一个固有前置脉冲电压,产生的相应固有前置电流脉冲如图 4 所示。它出现在主脉冲电流到来前几十纳秒,幅值通常为 5~7 kA,持续时间约为 50 ns。这个高峰值固有前置脉冲会在毛细管管壁附近产生不均匀的击穿通道,使得无法通过有效的 Z 箍缩使等离子体与管壁在主电流脉冲到来时快速分离,致使管壁烧蚀严重。

当高纯度陶瓷毛细管内充入 60 Pa 氩气,带有

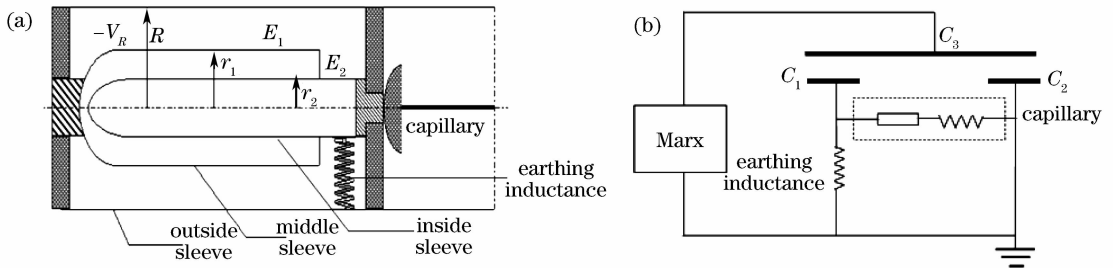


图 3 Blumlein 线结构图(a)与其对毛细管放电的等效电路图(b)

Fig. 3 Diagram (a) and equivalent circuit diagram (b) of Blumlein transmission line

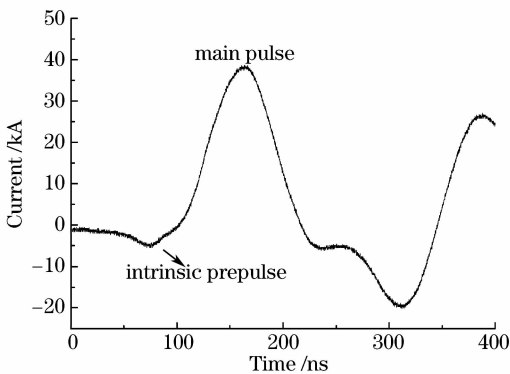


图 4 前置固有脉冲图示

Fig. 4 Main discharge current with intrinsic prepulse

Blumlein 线高峰值固有前置脉冲的主放电电流脉冲对毛细管放电时的实验结果如图 5 所示。此时背景辐射很强,谱线密集;通过谱线标定,发现大部分

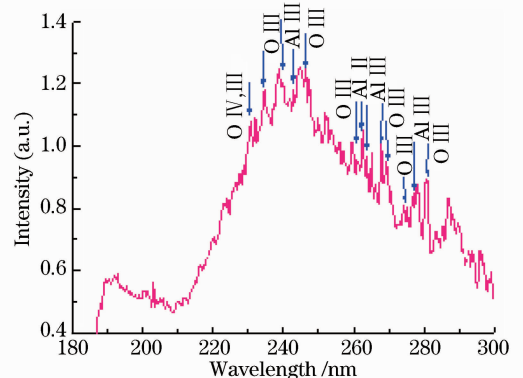


图 5 5 kA 真空紫外辐射谱

Fig. 5 Spectra of Ar gas in alumina capillary at the intrinsic prepulse of 5 kA

辐射来源于管壁物质铝和氧(O III, Al III)^[37,38]。为了进一步证实烧蚀物质来源于管壁和电极,测试了

多次放电后的毛细管内表面,如图 6 所示。通过测试得知附着在管壁内表面白点状物质是铜锌合金电极高压放电产生的碎片。测试了毛细管内表面所含物质的谱图表明,其内表面上附着大量的铜、锌、硅、铝等物质,分别来源于铜锌合金电极和陶瓷毛细管。

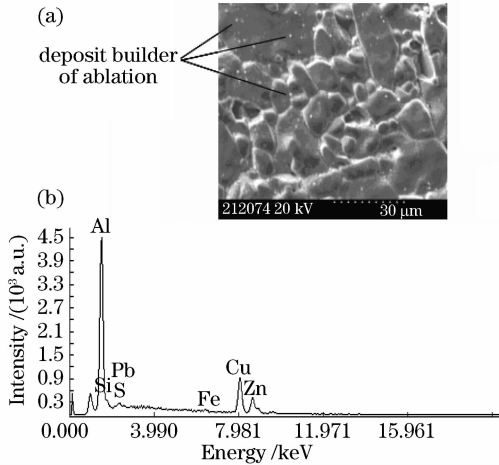


图 6 放电后毛细管内表面电镜图像(a)和谱线(b)

Fig. 6 Photograph (a) and spectra (b) of material analysis of inner surface for alumina capillary after discharge

而毛细管放电后观察到的辐射谱也主要以这些物质的谱线为主。

由于管壁烧蚀严重,出光所需的等离子体状态被 Blumlein 传输线的 5~7 kA 高峰值固有前置电流脉冲严重破坏,无法得到激光输出。

为了在提高 Marx 电源利用效率的同时,保证正常的主放电电流,获得出光所需等离子体状态,最终获得 X 光激光输出,毛细管放电 X 光激光系统采用 Blumlein 传输线以及最大输出 300 kV 的 Marx 发生器,并且通过采用自行研制的固有前置脉冲隔离装置,并成功加载了外加预脉冲装置,有效地保证了主放电电流,消除了 Blumlein 传输线的高峰值固有前置电流脉冲,获得了稳定的激光输出。

4.2 抑制固有前置脉冲实验方案

自行研制的一套预主脉冲放电系统工作流程如图 7 所示。这套脉冲装置中有两个重要部分:固有前置脉冲隔离装置(也就是图 2 中“预脉冲开关”)和外加预脉冲装置。这套系统消除了 Blumlein 传输线的高峰值固有前置脉冲,使得毛细管中气体在主脉冲的作用下能形成轴向均匀,电子密度、温度适合出光的等离子体柱,保证了激光的输出。

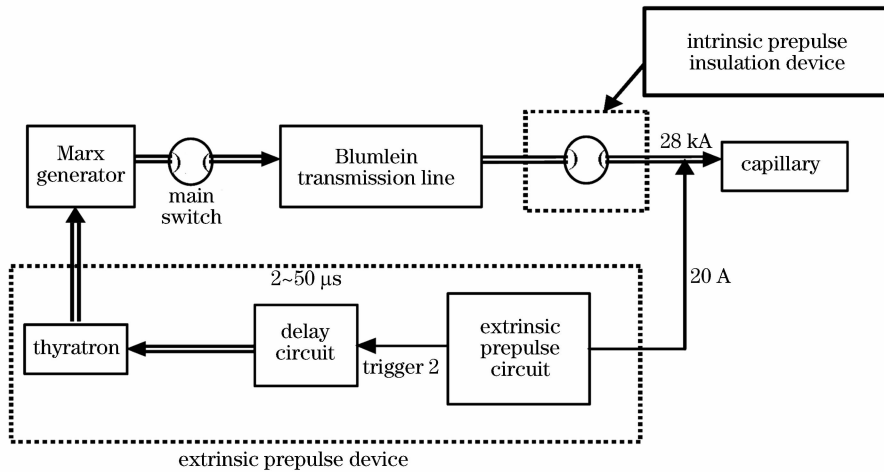


图 7 预-主脉冲放电系统结构示意图

Fig. 7 Frame diagram of prepulse and main pulse discharge system

4.2.1 固有前置脉冲隔离装置——预脉冲开关

固有前置脉冲隔离装置是串联在毛细管前面的一个小电容值的“预脉冲开关”,由间距可调的球状铜电极火花隙构成。实验根据 Marx 发生器输出电压的大小调节隔离开关火花隙的间距,它利用毛细管阻抗和预脉冲隔离开关的阻抗比值,对预脉冲电压分压,使固有前置脉冲在主脉冲到来之前不能击穿预脉冲开关,简化电路如图 8 所示,这样就抑制了固有前置脉冲,并为外加预脉冲电路的引入创造了

条件。同时为了保证预脉冲开关工作的稳定性,预脉冲开关采用密封设计,在其中充以 N_2 或 SF_6 气体,且可以通过调节开关气压来调节开关导通状态。

4.2.2 外加预脉冲装置以及延时电路

外加预脉冲电路如图 9 所示,该预脉冲电路的输出电压为 20 kV,电流幅值为 20~50 A 可调。同时主放电电路与预脉冲电路之间加入了隔离电感 L_2 ,以消除 Marx 发生器输出的 300 kV 主放电脉冲电压到达毛细管时对外加的预脉冲装置造成破坏。

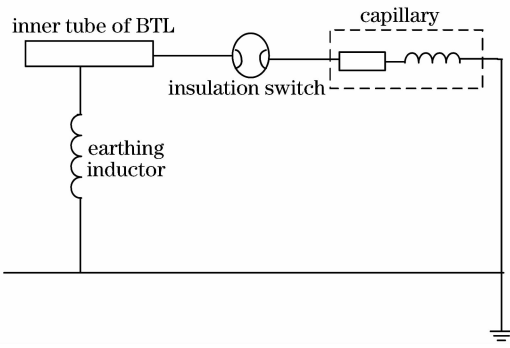


图 8 预脉冲开关装置示意图

Fig. 8 Equivalent circuit of intrinsic prepulse insulation device

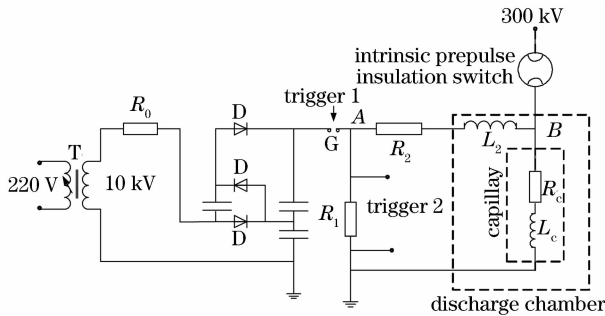


图 9 预脉冲装置示意图

Fig. 9 Extrinsic prepulse circuit

延时触发电路的作用是完成预脉冲和主脉冲的同步,预、主脉冲间的延迟时间在 $2 \sim 50 \mu\text{s}$ 连续可调。工作过程如下:在预脉冲产生的同时,预脉冲电路输出一个触发信号 trigger 2,该信号经过延时电路后,使闸流管导通,产生一个脉冲高压信号,触发 Marx 发生器的火花隙开关,使 Marx 发生器中的并联充电的电容串联放电对脉冲成形线充电,此后主开关导通,脉冲成形线提供一个快前沿的脉冲,加到毛细管负载上,形成快脉冲大电流放电。

4.3 加载预脉冲后的实验结果分析

4.3.1 Blumlein 传输线传输效率

本工作做到电压传输效率 $\eta_V \geq 120\%$,能量传输效率 $\eta_E \geq 60\%$ 。

4.3.2 Blumlein 传输线的固有高值前置脉冲被有效消除

图 10 为固有前置脉冲被消除、且有外加预脉冲时的主脉冲电流波形。毛细管中充以 30 Pa 氩气,气柱长 13 cm ,预脉冲峰值 20 A ,预主延时 $3.9 \mu\text{s}$,此时主放电电流波形第一个峰的峰值为 40 kA ,上升沿 26.6 ns ,脉宽 38 ns 。可以看出,Blumlein 带来的高值固有前置脉冲已被抑制。

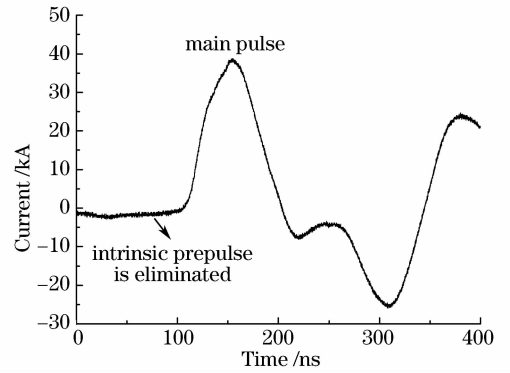


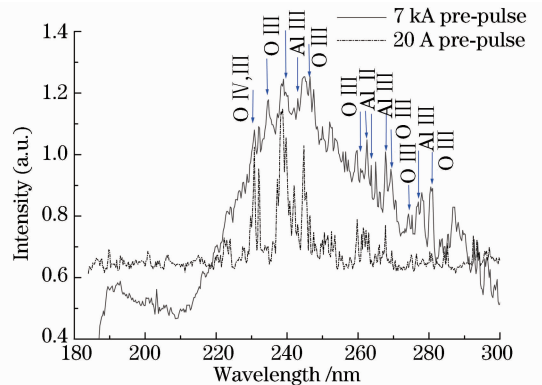
图 10 消除了固有前置脉冲后的主放电电流

Fig. 10 Main discharge current without intrinsic prepulse

4.3.3 外加预脉冲的作用

图 11 为 Blumlein 带来的固有 7 kA 和预脉冲装置产生的 20 A 预脉冲作用下放电实验时的真空紫外辐射谱的比较。可见 20 A 预脉冲时的背景辐射大幅减小,谱线可分辨性强,说明 20 A 预脉冲大大减小了管壁烧蚀量,有利于获得均匀的满足激光输出条件的等离子体。

最终利用这一装置获得了类氩 46.9 nm 软 X 光激光输出。

图 11 7 kA 和 20 A 预脉冲作用下放电实验时的真空紫外辐射谱比较Fig. 11 Spectra of Ar gas in alumina capillary at the intrinsic prepulse of 7 kA and 20 A

5 多次 Z 箍缩现象

理论上描述 Z 箍缩过程的模型,目前最成熟的是称为雪耙模型。基本思想是:在电流壳层向中间箍缩过程中,电流壳层像活塞或推雪机一样将所遇到的等离子体堆积在壳层内,和壳层以同样的速度向内运动。

利用雪耙模型较好地描述了毛细管放电形成 Z 箍缩的物理过程,可以利用这一模型计算出等离子体壳层的演变过程。

实验中获得的主放电电流波形如图 12 所示, 上升沿为 30 ns, 而 X 光激光出光的时间在 45 ns 左右。如果说按雪耙模型计算, 毛细管中箍缩到平衡点的时间应在 20~23 ns, 也就是说出光时间不是在箍缩时间内出现的, 对这一理论计算与反复实验、重复性很好的实际情形的时间上差异现象, 提出了一个假设, 即很可能存在这样的过程, 在产生 Z 箍缩、达到平衡点时, 产生的高价离子密度还没有达到 X 光增益足够高的程度, 也就是没有明显的 X 光激光输出, 当等离子体 Z 箍缩到最小半径时, 这时动力压强与磁压强平衡。然后动力压强比磁压强大, 这时等离子体半径开始增加, 在电流幅度增加时间内, 并最后达到 32 ns 后, 磁压将随电流增加而增加, 并再次变得比动力压强大, 这时等离子体半径第二次 Z 箍缩到最小值, 这个过程将连续进行 n 次。这样就可能出现一个振荡过程。也就是可能出现多次 Z 箍缩过程。

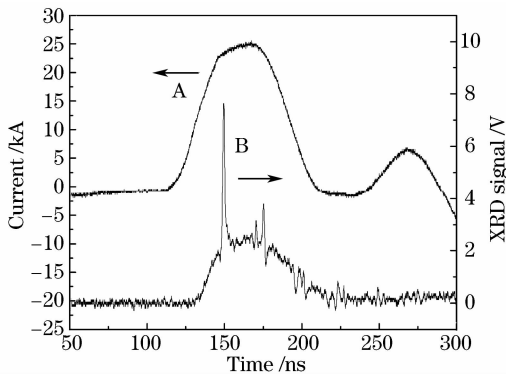


图 12 主脉冲电流波形(A)与 X 射线二极管(XRD)信号波形(B)

Fig. 12 Main discharge current (A) and X-ray diode (XRD) signal (B)

最初的雪耙模型只计算到一次箍缩。试图对雪耙模型做一个修正, 在程序中等离子体柱半径达到最小时刻的速度将近似地从正向最大值变到负向最大值, 通过这样处理得到了多次箍缩的结果。如图 13 所示, 将修正理论计算结果与实验对照, 可见出光的时间应对应着第三次箍缩的时间。

通过对等离子体壳层反弹速度的设定研究、对不同电流幅值每次箍缩过程的数值模拟, 及对实验中实测电流进行多次箍缩模拟等研究可以证实最初提出的设想是符合客观的物理过程的^[39]。

6 类氩氩软 X 光激光实验

6.1 类氩氩 X 光激光机理

图 14 为跃迁能级图, 氩的 +8 价离子与氩原子

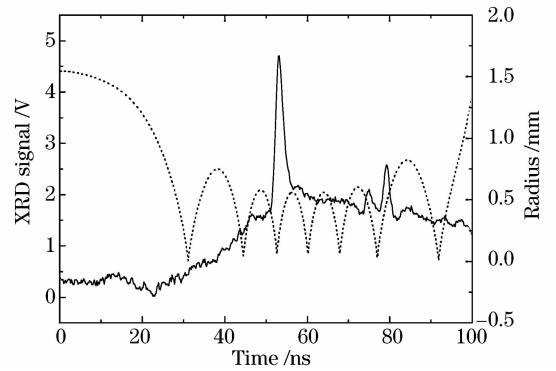


图 13 实验激光输出结果与数值模拟
Fig. 13 Experimental laser output and calculated results

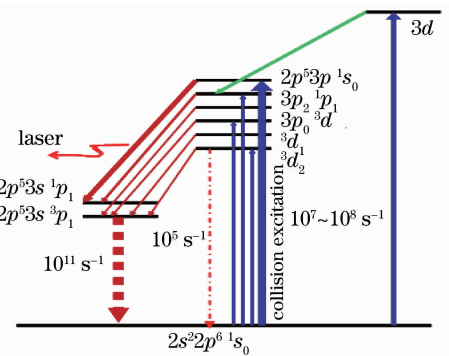


图 14 类氩氩 3p-3s 激光能级及跃迁

Fig. 14 Diagram of laser levels and transition of Ne-like Ar 3p-3s

是等电子序的, 称氩的 +8 价离子为类氩氩, 其基态为 $2s^2 2p^6 1s_0$, 在电子碰撞激发下, 激发到上能级 $2p^5 3p^1 s_0$, 此能级与下能级 $2p^5 3s^1 p_1$ 间跃迁便是 46.9 nm 的软 X 光辐射。当毛细管中 Z 箍缩条件达到阈值条件, 便存在 X 光激光放大, 获得软 X 光激光。

在此跃迁过程中, 激光下能级衰变速率为 10^{11} s^{-1} , 而基态向上激发速率为 $10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$, 这有利于激光下能级的抽空, 有利于粒子数反转的形成。再者激光上能级衰变速率为 10^5 s^{-1} , 而碰撞激发速率为 $10^7 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$, 这就说明有利于上能级粒子数积累。

6.2 利用 Cowan 程序对类氩氩离子参数的计算

利用 Cowan 程序对类氩氩离子参数进行计算, 获得的计算结果如表 2 所示。

从计算值可见在 $3p^1 s_0 - 2p^5 3s^1 p_1$ 间跃迁波长为 46.7906 nm, 实测是 46.9 nm, 计算误差为 0.2%, 实际获得的激光波长与理论计算值符合得较好。

表 2 类氩有关能级跃迁的计算数据

Table 2 Calculation of transition levels of Ne-like Ar

	$\lg gf$	gA / s^{-1}	$\Delta E / (10^3 \text{ cm}^{-1})$	$\lambda / (10^{-1} \text{ nm})$	$R / (10^{-11} \text{ cm}^3 / s)$
$2p^6 1s_0 - 2p^5 3p^1 s_0$	-7.0948	2.743×10^5	2261.71	44.214	14.852
$2p^6 1s_0 - 2p^5 3p^3 p_0$	-9.1405	2.311×10^3	2187.96	45.705	0.14776
$2p^6 1s_0 - 2p^5 3s^1 p_1$	-0.755	4.921×10^{11}	2047.992	48.828	2.3846
$2p^6 1s_0 - 2p^5 3s^3 p_1$	-1.019	2.632×10^{11}	2030.373	49.252	1.5420
$3p^1 s_0 - 2p^5 3s^1 p_1$	-0.691	6.207×10^9	213.718	467.906	
$3p^1 s_0 - 2p^5 3s^3 p_1$	-1.088	2.917×10^9	231.337	432.269	
$3p^3 p_0 - 2p^5 3s^1 p_1$	-1.354	5.783×10^8	139.971	714.436	
$3p^3 p_0 - 2p^5 3s^3 p_1$	-0.855	2.312×10^9	157.590	634.559	

6.3 X 光激光的获得

在充入 31 Pa 纯氩的 20 cm 长的毛细管放电实验中获得了较强的激光输出,主脉冲放电电流为 30.7 kA。在 X 射线二极管上测得激光脉冲幅值为 30,如图 15 所示,其中 A 为主脉冲电流波形,B 为 XRD 所获得的激光信号。

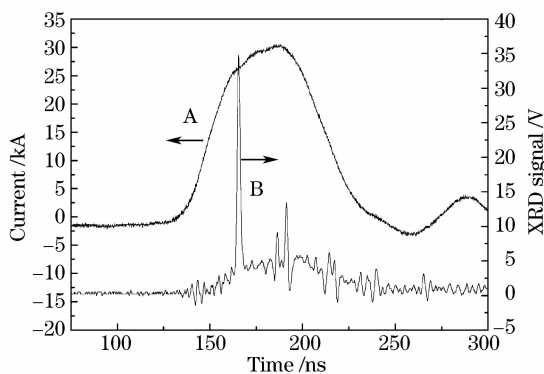


图 15 主脉冲电流波形(A)和 XRD 所获得激光信号(B)

Fig. 15 Main discharge current (A) and XRD signal (B)

6.4 X 光激光特性研究

6.4.1 增益特性

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,这种方法还能够起到对放电回路的电感补偿作用,以保证放电回路总电感基本一致,同时也保证了放电电流波形的一致。实验中采用的电极长度分别为 1.6 cm, 3.6 cm, 5.7 cm, 7.6 cm, 9.6 cm 和 11.6 cm,实验结果表明,使用最短电极的放电电流波形半周期为 110 ns,而最长电极的放电电流半周期为 115 ns,可见电极对于总电感的补偿作用基本能保证放电电流波形的一致,使对于不同增益介质长度的增益测量实验都在基本相同的条件下进行。实验结果如图 16 所示,图中曲线为拟合结果,可以看出明显的指数增长趋势,用 Linford 公式拟合计算出小信号增益为 $g = 0.46 \text{ cm}^{-1}$ 。

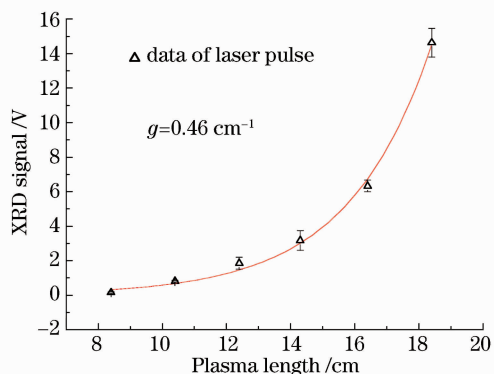


图 16 不同增益长度 X 光激光输出强度变化

Fig. 16 Signals of laser spike as a function of plasma length and the results of fit

6.4.2 激光方向性验证

实验中通过改变 XRD 距毛细管阳极处的距离,观察输出强度如图 17(a)所示,激光光强随着距离的增加没有明显变化,但背景光都明显下降,表明激光有很好的方向性。在测量束散角实验中,将 XRD 安置在一个波纹管上,调节两边的螺杆就可以方便地使 XRD 沿着水平方向偏转,在偏转的量非常小时,可以近似认为 XRD 是作平移运动,可测出光强随角度的空间分布,便可测得激光束散角如图 17(b)所示,测得激光束散角为 5.3 mrad。

6.4.3 激光能量测量

根据目前国际通用的做法,用 XRD 测得光强后,采用一个公式算出对应的 X 光激光能量。本实验中获 XRD 上测到信号幅度为 30,计算出对应 X 光激光能量为 $7 \mu\text{J}$ 。2008 年采用 35 cm 长的毛细管,测得的激光能量达到了 $30 \mu\text{J}$ 。

6.4.4 最佳实验条件研究

在 20 cm 长毛细管实验中发现,改变毛细管中充入的 Ar 气压和改变放电电流幅值观察出光情况,激光输出幅值随着条件的改变会出现一个最大值。最佳 Ar 充气气压范围,在放电电流幅值 28 kA

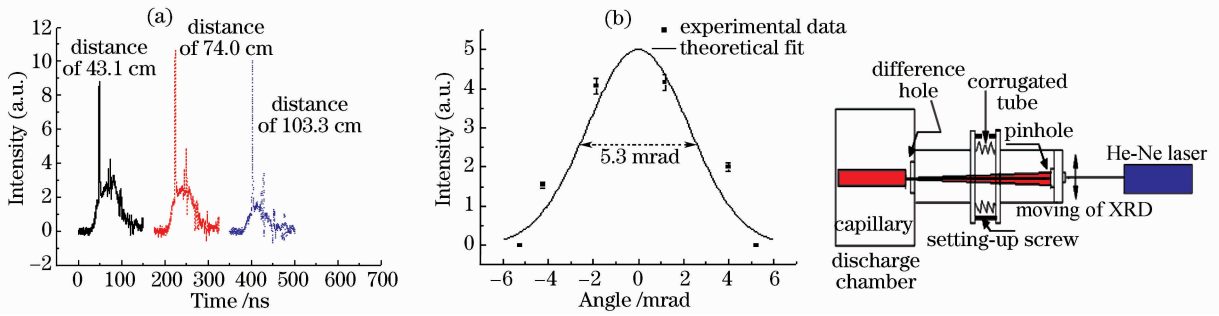


图 17 激光方向性验证(a)和束散角测量(b)

Fig. 17 Directionality (a) and divergence (b) of soft-X-ray laser

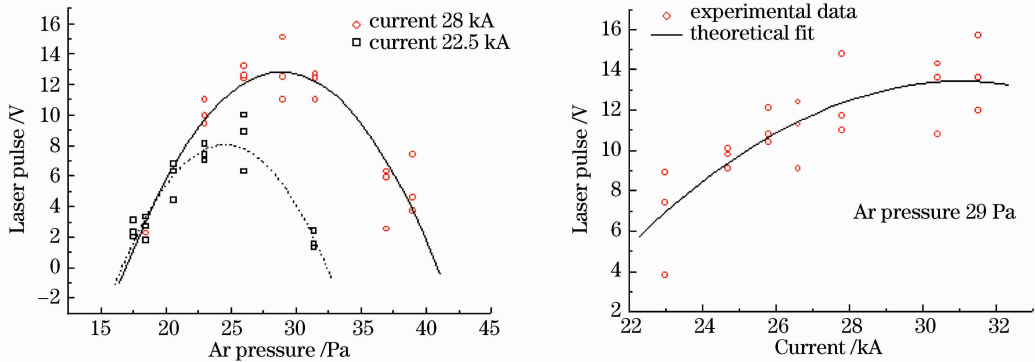


图 18 激光强度随不同气压和不同主放电电流的变化趋势

Fig. 18 Signal of laser pulses as function of Ar pressure and main discharge current

时为 27~33 Pa, 放电电流幅值 22.5 kA 时为 22~25 Pa; 而当 Ar 气压 29 Pa 时, 放电电流幅值最佳值为 30 kA, 如图 18 所示。从图中可以看出, 如果要在高压下获得激光输出, 以便提高激光能量, 需要相应提高主脉冲电流幅值, 这将是今后我们努力的方向之一。

6.4.5 光谱测量工作

罗兰圆谱仪是 X 射线实验中最主要的探测设备, 被探测的激光信号经过入射狭缝进入谱仪, 经光栅衍射成像于 CCD 上, CCD 直接连入 PC 机。工作过程由 PC 机控制, 结果直接在 PC 机上显示。罗兰

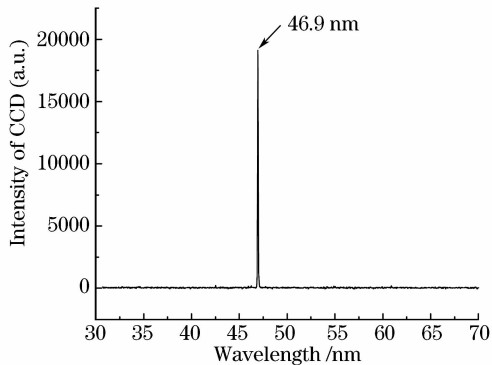


图 19 类氩 46.9 nm 激光谱线

Fig. 19 Spectra of Ne-like Ar 46.9 nm

圆谱仪选用 Andor Technology 公司生产的 248/310G 型谱仪, 入射狭缝 50 μm 。获得的谱线信息如图 19 所示, 由图可见, 在 30~70 nm 的波长范围内, 没有发现其他谱线, 从而验证所获得的激光信号为类氩 $J=0-1, 46.9 \text{ nm}$ 激光谱线。

7 毛细管放电抽运软 X 光激光应用实例

7.1 毛细管放电实现更短波长的可能性

利用毛细管放电实现更短波长的激光输出, 对等离子体诊断、X 射线显微等实际应用具有重要意义。J. J. Rocca 小组^[40]利用 200 kA, 上升沿 10 ns 的放电电流还获得电子温度为 300 eV, 电子密度 $1 \times 10^{20} \sim 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的高温、高密度氩等离子体, 等离子体柱半径最小为 250 μm 。这个实验结果表明, 有可能利用毛细管放电获得更短波长的 X 射线激光。2008 年, 通过将镉蒸气充入毛细管, 利用 200 kA, 上升沿 15 ns 的放电电流获得了高温高密度镉等离子体, 并观察到了类镍镉 Ni-Cd 13.2 nm 很强的谱线^[41], 该实验结果实现了利用毛细管放电电子碰撞机制获得更短波长的可能性。

几个小组在理论上已经论证了利用毛细管放电

产生类氩氮13.4 nm激光的可能性,对复合机制类氩氮13.4 nm,所需的电流在50 kA左右,比产生相同波长激光的碰撞机制低得多(100 kA以上),电流上升沿30 ns左右。如果获得该波长的激光输出,将极大拓展毛细管放电软 X 射线激光的应用范围。

7.2 毛细管放电软 X 光激光的应用研究

毛细管放电 X 射线激光是一种小型化的台式 X 射线激光器,在等离子体状态诊断、短波段激光光谱技术以及 X 光光刻等领域都具有重要应用前景。在提高激光输出能量、重复频率和使装置不断小型化、实用化的同时,J. J. Rocca 小组在提高输出光束质量以及 X 射线激光的应用方面也开始了探索性的研究工作,并取得了显著成绩。1996 年利用外加轴向磁场,减小等离子体密度梯度,从而抑制折射效应,改善了输出光束的均匀性,减小了束散角^[42]。1997 年,利用已接近实用、台式的毛细管放电类氩氮46.9 nm激光器,J. J. Rocca 小组^[43]成功地进行了软 X 射线的干涉研究,为开展进一步的应用奠定了基础。随后几年该小组利用毛细管放电46.9 nm作为等离子体检测光源,研究了 X 射线多层膜的损伤阈值和损伤机理,对激光打靶线状等离子体的电子密度分布情况($1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)进行了诊断,并测量了一些物质在46.9 nm附近的光学常数,还用其作为光源实现了60 nm刻线。

7.2.1 测量一些物质的光学常数

用台式46.9 nm激光作为辐射源照射样品,并用反射计测量了各种物质(Si, GaP, InP, GaAs, GaAsP 和 Ir)在这个波长的光学常数。固体物质在35~50 nm波段的光学特性越来越受到关注,这个波长范围的小型化软 X 光激光器和高次谐波辐射源的发展推动了这个领域的研究。而这一领域的研究很大程度上取决于对各种物质在这个波长范围光学常数的测量。通常测量所用的光源是采用同步电

表3 用46.9 nm软 X 光激光测得光学常数

Table 3 Optical constants detected by 46.9 nm soft-X-ray laser

Number	Specimen	Result of experiment		Result of optical handbook	
		n	k	n	k
1	Si	0.82	0.015	0.803	0.0178
2	GaP	0.82	0.052	None	0.100
3	InP	0.88	0.087	None	None
4	GaAs	0.84	0.060	None	0.083
5	GaAsP	0.83	0.059	None	None
6	Ir	0.81	0.530	0.67	0.69

子加速器的 X 光辐射源,但 J. J. Rocca 小组用高重复频率的台式软 X 光激光器进行了测量,取得了很好的结果。表3给出了所测得几种物质光学常数和光学手册上可查到的值的对比结果。

从表3可以看到,所测得的光学常数非常接近已知的结果,而且对于化合物 InP 和 GaAsP 是在这个波长下首次测出实验值。这个实验将软 X 光激光应用在材料科学研究中,并且显示出在某些方面小型高重复频率的软 X 光激光器可以作为电子同步加速器辐射源方便的替代装置。

7.2.2 用毛细管放电46.9 nm软 X 光激光进行等离子体诊断研究

当普通的可见光和极紫外(EUV)激光探针因为等离子体的折射和吸收作用而无法穿越等离子体时,软 X 光激光作为探针可以用来诊断高密度等离子体,毛细管放电软 X 光激光具有极高的亮度和优于一般激光抽运软 X 光激光的重复频率,可以用于发展一种小型化的,能探测多种等离子体密度的软 X 光激光诊断工具。美国的 J. J. Rocca 小组已经利用46.9 nm软 X 光激光开展大量等离子体诊断的研究工作。其实验示意图如图20所示。线聚焦等离子体由调 Q Nd:YAG 激光脉冲 $[\lambda = 1.06 \mu\text{m}, 0.36 \text{ J}, 13 \text{ ns}$ 半峰全宽(FWHM)]照射 Cu 靶产生。毛细管放电产生的46.9 nm软 X 光激光经光栅的0级和1级衍射分成两束。两束激光经反射镜反射,一束通过 YAG 激光与固体靶作用产生等离子体,而另一路不穿过等离子体,两束激光的干涉条纹由 MCP-CCD 系统记录。等离子体产生后不同的延迟时间所拍摄的干涉图样如图21所示,边缘处的凹陷可见整个等离子体演变过程。在轴向均匀的几何形状中,这种凹陷表示等离子体电子密度分布在轴心处有最小值。在距靶25~30 μm 检测的等离子体电

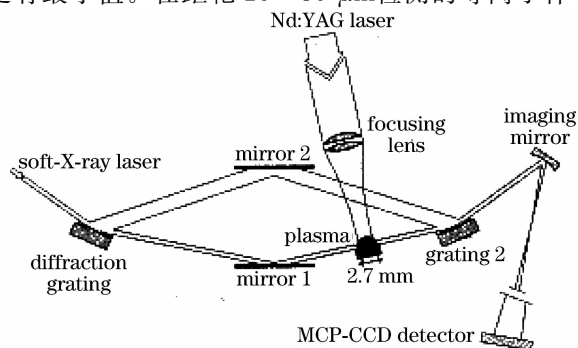


图20 毛细管放电软 X 射线激光诊断等离子体

Fig. 20 General diagram of plasma diagnosis using capillary discharge soft-X-ray laser

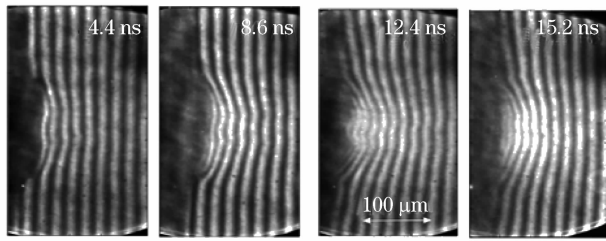


图 21 不同延迟时间的等离子体干涉图

Fig. 21 Interferogram of plasma under different time delay

子密度约为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。测量 0.6 J Nd:YAG 激光脉冲产生的 1.8 mm 长的等离子体的电子密度达到 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。

7.3 毛细管放电极紫外光源

极紫外光刻被认为是下一代光刻的首选技术,将在 2015 年以后取代光学光刻成为半导体生产主流光刻技术。极紫外光刻系统是一个全面的高技术系统,它由 EUV 光源、照明光学系统、微缩投影光学系统、掩模及硅片精密工作台、减震系统及相应的真空室组成。极紫外光源是整个极紫外光刻系统中非常重要的一部分,实现极紫外光刻的关键问题之一就是是否有符合应用标准的、适于工业生产的极紫外光源。

小型 Z 箍缩气体放电极紫外光源是近十几年发展起来的一种新型光源。它巧妙地将惯性约束核聚变中获得高温、高密度等离子体的 Z 箍缩技术移植到毛细管放电中,产生相同温度的等离子体所需放电电流低,降低了对放电装置的要求。自 1988 年国际上提出毛细管 Z 箍缩放电小型化 X 射线激光的方案后,这种台式的 X 射线光源在 X 光领域掀起了研究热潮,并最终获得了极大的成功,产生类氩氦 46.9 nm 激光的能量达到 1 mJ,成为最亮的 X 射线源之一,在等离子体诊断、纳米级刻线加工等方面已经实现了应用。这一演示结果证实小型放电 Z 箍缩装置也可以获得高亮度的软 X 射线辐射。2000 年前后,在这一思想启发下,美国、德国、日本、法国相继开展了基于 Z 箍缩原理的放电激励 EUV 光源研究^[44~48],并迅速取得进展。2004 年,日本极紫外光刻研发组(EUVA)在 13.5 nm 带宽内获得 54.4 W 每 $2\pi\text{sr}$ 每 2% 带宽的输出。2005 年欧洲 Medal 计划中研制 EUV 光源的单位 XTREME,利用氩气和锡介质 Z 箍缩放电,光源中部焦点处(IF)功率分别达到 25.7 W 和 51.4 W,转换效率为 1% 和 2%,并预计技术上很快可以实现 224 W,高于工业生产 EUV 光源输出功率的最低要求 100 W。放电激励

EUV 光源仍存在一些关键问题有待解决,如进一步提高能量转换效率、有效冷却电极、减少碎片的产生以及提高稳定性等。因为工业生产需求迫切,EUV 光源的研究一直是从工程化的角度出发,忽略了对物理本质的研究。为从本质上解决光源效率、烧蚀等技术问题,对光源的研究目前正逐步返回到对等离子体磁流体力学基本物理特性的研究上来。

8 结 论

介绍了国内外在毛细管放电抽运软 X 光激光领域的研究进展。分析本课题组采用 Blumlein 传输线作为脉冲成形线的利弊,采用自制的预脉冲开关,解决了由于 Blumlein 传输线自身结构所带来的固有前置脉冲的问题。在 20 cm 长毛细管实验中,获得较稳定的激光输出。采用小孔扫描法测得激光束散角为 5.3 mrad,利用 LinFord 公式计算出小信号增益为 $g = 0.46 \text{ cm}^{-1}$ 。在 35 cm 长毛细管实验中获得了激光能量为 30 μJ 的较强的激光输出,运用罗兰圆谱仪精确地测量了激光谱线,确定获得的激光为类氩氦 $J = 0-1, 46.9 \text{ nm}$ 软 X 光激光。最后举例说明毛细管放电机制在测试物质光学常数、等离子体诊断以及获得更短波长激光等领域的应用。可见毛细管放电软 X 光激光经过二十几年的发展,取得了显著成果,在某些领域体现出其他波长激光所无法替代的重要性,有着重要的研究价值。

致谢 感谢彭惠民研究员和郑无敌副研究员对理论计算上的大力支持和帮助。感谢中国原子能研究院的杨大为研究员在实验装置建造与改进中给予的帮助,以及在实验中提出的宝贵意见和建议。感谢程元丽副教授在本课题研究上所做的贡献,我们将永远怀念她。

参 考 文 献

- 1 Y. Izumi, O. Teranuma, T. Sato *et al.*. Development of flat panel X-ray image sensors sharp [J]. *Technical Journal*, 2001, **80**(8):25~30
- 2 Y. J. Lee, J. S. Lee, Y. S. Park *et al.*. Synthesis of large monolithic zeolite foams with variable macropore architectures [J]. *Advanced Materials*, 2001, **13**(16):1259~1263
- 3 J. Lihara, A. Yamaguchi, K. Yamaguchi. Development of a specimen fabrication method for an analytical electron microscope to reduce the effects of the sample matrix [J]. *SEI Technical Review*, 2001, **52**(6):99~102
- 4 R. C. Elton. X-Ray Laser [M]. Fan Pinzhong transl. First Edition. Beijing: Science Press, 1996
R. C. 埃尔顿 著. X 射线激光[M]. 范品忠 译. 第一版. 北京: 科学出版社, 1996
- 5 Peng Huimin, Wang Shiji, Qiu Yubo *et al.*. X-Ray Laser [M].

- First Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 1997
 彭惠民, 王世绩, 邱玉波等. X射线激光[M]. 第一版. 北京: 国防工业出版社, 1997
- 6 D. Atwood. Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications [M]. Zhang Jie transl.. First Edition. Beijing: Science Press, 2003
 D. 阿特伍德著. 软X射线与极紫外辐射的原理和应用[M]. 张杰译. 第一版. 北京: 科学出版社, 2003
- 7 D. L. Matthews, P. L. Hagelstein, M. D. Rosen *et al.*. Demonstration of a soft X-ray amplifier [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **54**(2):110~113
- 8 A. Caeillon, H. Z. Chen, P. Dhez *et al.*. Saturated and near-diffraction-limited operation of an XUV laser at 23.6 nm [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(19):2917~2920
- 9 J. A. Koch, B. J. Macgowan, L. B. Dasilva *et al.*. Observation of gain-narrowing and saturation behavior in Se X-ray laser line profiles [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(22):3291~3294
- 10 L. B. Da Silva, D. L. Matthews, J. H. Onderwood. Power measurements of a saturated yttrium X-ray laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14):1174~1176
- 11 J. Zhang, P. J. Warwick, E. Wolfrum *et al.*. Saturated output of a GeXXIII X-ray laser at 19.6 nm [J]. *Phys. Rev. A*, 1996, **54**(6):4653~4656
- 12 J. Zhang, A. G. Macphee, J. Nilsen *et al.*. Demonstration of saturation in a Ni-like Ag X-ray laser at 14nm [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(20):3856~3859
- 13 J. Zhang, A. G. Manphee, J. Lin *et al.*. A saturated X-ray laser beam at 7 nanometers [J]. *Science*, 1997, **276**:1097~1100
- 14 Wang Shiji, Gu Yuan, Fu Sizu *et al.*. Experiments of high-gain soft X-ray laser in Ne-like Ge plasma [J]. *Science in China (Series A)*, 1991, **34**(11):1388~1399
- 15 Wang Shiji, Gu Yuan, Zhu Guanlin *et al.*. Experimental research on saturated-gain for soft X-ray laser from Neon-like Germanium plasma [J]. *Chinese Phys. Lett.*, 1991, **8**(12):618~621
- 16 Xu Zhizhan, Han Shensheng, Shen Baifei *et al.*. A study on "water window" range $2p-3d$ population inversion of He-like Al ions X-ray laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 1993, **42**(6):940~948
 徐至展, 韩申生, 沈百飞等. "水窗"波段类氦 Al 离子 $2p-3d$ X射线激光粒子数反转研究[J]. *物理学报*, 1993, **42**(6):940~948
- 17 Li Ruxin, Zhang Zhengquan, Xu Zhizhan *et al.*. Li-like Ti ions recombination X-ray laser [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, **40**(18):1723~1725
 李儒新, 张正泉, 徐至展等. 类锂钛离子复合 X 射线激光[J]. *科学通报*, 1995, **40**(18):1723~1725
- 18 N. G. Basov, M. G. Voltik, V. S. Znev *et al.*. Feasibility of stimulated emission of Radiation from ionic heteronuclear molecules I [J]. *Spectroscopy Sov. J. Quantum Electron.*, 1985, **15**(11):1455~1460
- 19 R. Sonerbrey, H. Longhoff. Excimer ions as possible candidates for VUV and XUV lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(3):179~181
- 20 B. E. Lemoff, C. P. J. Barty, S. E. Harris. Femtosecond-pulse-driven electron-excited XUV lasers in eight-times-ionized noble gases [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(8):569~571
- 21 J. J. Rocca, D. C. Beethe, M. C. Maroni. Proposal for soft-X-ray and XUV lasers in capillary discharges [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(7):565~571
- 22 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
- 23 J. J. Rocca, D. P. Clark, J. L. A. Chilla *et al.*. Energy extraction and achievement of the saturation limit in a discharge-pumped table-top soft-X-ray amplifier [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(8):1476~1479
- 24 J. J. Rocca, F. G. Tomasel, M. C. Marconi. Discharge-pumped soft-X-ray laser in neon-like argon [J]. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(6):2547~2555
- 25 B. R. Benware, C. H. Moreno, D. J. Burd *et al.*. Operation and output pulse characteristics of an extremely compact capillary-discharge table-top soft X-ray laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16):796~798
- 26 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 table-top capillary discharge amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16):1115~1117
- 27 A. Ben-Kish, R. A. Nemirowsky, M. Shuker *et al.*. Parametric investigation of capillary discharge experiment for collisional excitation X-ray lasers [C]. *SPIE*, 1999, **3776**:166~174
- 28 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**:2123~2136
- 29 G. Tomassetti, A. Ritucci, A. Reale. Capillary discharge soft X-ray lasing in Ne-like Ar pumped by long current pulses [J]. *Eur. Phys. J. D*, 2002, **19**:73~77
- 30 A. Rittucci, G. Tomassetti, A. Reale *et al.*. Coherence properties of a quasi-gaussian submilliradiant divergence soft X-ray laser pumped by capillary discharges [J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **70**:023818
- 31 Vladimir Ivanovich Ostashev, Ayrat M. Gafarov, Vadim Yurievich Polotov *et al.*. Evidence of soft X-ray lasing in signal pulsed-power facility experiments with argon capillary plasma [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, **34**(5):2368~2376
- 32 C. A. Tan, K. H. Kwek. Development of a low current discharge-driven soft X-ray laser [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**:4787~4792
- 33 C. A. Tan, K. H. Kwek. A gigawatt high-voltage generator for coherent soft X-ray generation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, **57**:1023~1028
- 34 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
 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
- 35 Xie Yao, Zhao Yongpeng, Wang Qi *et al.*. Influence of the electrode on capillary discharge soft-X-ray laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4):819~822
 谢 耀, 赵永蓬, 王 骐等. 放电电极对毛细管放电软 X 光激光的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4):819~822
- 36 M. A. Liberman, J. S. DeGroot, A. Toor *et al.*. Physics of High Density Z-Pinch Plasmas [M]. Sun Chengwei transl.. First Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2003
 M. A. Liberman, J. S. DeGroot, A. Toor等. 高密度 Z 箍缩等离子体物理学[M]. 孙承纬译. 第一版. 北京: 国防工业出版社, 2003
- 37 Cheng Yuanli, Luan Bohan, Wu Yinchu *et al.*. Effect of pre-pulses on capillary discharge soft X-ray laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(10):4979~4984
 程元丽, 栾伯哈, 吴寅初等. 预脉冲在毛细管放电软 X 射线激光中的作用[J]. *物理学报*, 2005, **54**(10):4979~4984
- 38 Zhao Yongpeng, Cheng Yuanli, Wang Qi *et al.*. Device of capillary discharge with pre-pulse and main pulse to excite soft X-ray laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6):733~736

- 赵永蓬, 程元丽, 王 骐 等. 激励软 X 光激光的毛细管预-主脉冲放电装置[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(6):733~736
- 39 Yongpeng Zhao, Yuanli Cheng, Bohan Luan *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**:342~349
- 40 M. A. Klosner, H. A. Bender, W. T. Silfvast *et al.*. Intense plasma discharge source at 13.5 nm for extreme-ultraviolet lithography [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1):34~36
- 41 F. G. Tomasel, V. N. Shlyaptesv, J. J. Rocca. Spectroscopically pure metal vapor source for highly charged ion spectroscopy and capillary discharge soft X-ray lasers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, **79**:013503
- 42 F. G. Tomasel, V. N. Shlyaptesv, J. J. Rocca. Enhanced beam characteristics of a discharge-pumped soft X-ray amplifier by an axial magnetic field [J]. *Phys. Rev. A*, 1996, **54**:2474~2478
- 43 M. C. Marconi, J. L. A. Chilla, C. H. Moreno *et al.*. Measurement of the spatial coherence buildup in a discharge pumped table-top soft X-ray laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**:2799~2802
- 44 T. Boboc, R. Bischoff, H. Langhoff. Emission in the extreme ultraviolet by xenon excited in a capillary discharge [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, **34**:2512~2517
- 45 S. R. Mohanty, E. Robert, R. Dussart *et al.*. A novel fast capillary discharge system emitting intense EUV radiation: possible source for EUV lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2003, **65**(1-2):47~59
- 46 Sergei Churilov, Yogi N. Joshi, Joseph Reader. High-resolution spectrum of xenon ions at 13.4 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(16):1478~1480
- 47 R. Lebert, L. Aschke, K. Bergman, *et al.*. Preliminary results from key experiments on sources for EUV lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2001, **57-58**:87~92
- 48 V. Y. Banine, J. P. H. Benschop, H. G. C. Werij. Comparison of extreme ultraviolet sources for lithography applications [J]. *Microelectronic Engineering*, 2000, **53**(1-4):681~684