

毛细管快放电激励 X 光激光实验设计*

李思宁 刘 鹏 王 骐

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨, 150001)

杨大为

(中国原子能科学研究院计算机与核技术应用研究所, 北京, 102413)

摘要: 近年来, 有关利用毛细管放电激励产生 X 光激光的研究十分活跃, 国际上已经取得了许多显著的成果, 并且正向实现实用化 Table-top Laser 发展。作者首先介绍了毛细管放电激励 X 光方案的原理及国内外的重要进展, 在对两种典型机制的分析的同时, 也阐述了对该方案的发展方向及需要克服难点的看法。

关键词: 毛细管放电 X 光激光 激励

Experimental design of X-ray laser excited by capillary discharge

Li Sining, Liu Peng, Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Yang Dawei

(Institute of Atomic Energy, Chinese Acad of Sciences Source, Beijing, 102413)

Abstract: Recently the studies on generation of X-ray laser excited by capillary discharge are quite active and remarkable progress has been made. The development in this field is focused on how to make compact and practical ultra-wavelength laser. In this paper, significant progress is introduced. The development and difficulty about generation of X-ray laser by capillary discharge is expounded, and recombination and laser schemes are analyzed.

Key words: capillary discharge X-ray laser excitation

引 言

X 光激光以其具有高亮度、高相干性、短波长等优良特性及广泛的应用前景一直倍受关注。近年来, 有关短波长激光的研究工作也开展得十分活跃, 由于国内外科学家们的努力工作, 短波长激光研究取得了许多成果, 先后在实验室中实现了软 X 射线波段的几十个波长的相干输出。产生 X 光激光的增益介质大部分采用等离子体, 而高功率激光聚焦照射固体靶产生高温、高密度等离子体一直是这一研究领域最主要的手段, 以大型激光器作为泵浦源产生的软 X 激光输出能量可以达到几个毫焦^[1~3]。目前已见报道的最大脉冲输出能量是 8mJ, 是由 Nova 激光泵浦 Ne-Like Y15. 5nm 激光获得的, 这套装置可以工作在重复频率为每小时一次^[1]; 另一个稍微小规模装置是 300J CO₂ 激光复合机制泵浦的 H-Like C 18. 2nm 激光, 输出激光脉冲能量为 3mJ, 重复频率是每 3min 一次^[3]。然而, 由于产生 X 光激光本身的难点(要

* 国家自然科学基金及 863 青年基金资助。

求高泵浦功率密度, 激光上能级寿命短、量子效率低、腔镜反射率低等), 人们在研究 X 射线激光的初期就认识到, 利用这种泵浦手段制造实用 X 光激光器存在着一个重大的缺点: 大功率泵浦激光器器件庞大、造价昂贵, 且转换效率低。

因此, 在早期的 X 射线激光研究工作中, 就探索地提出了离子准分子^[4]、非线性过程、共振电荷转移等相对低激发短波长激光方案, 并进行了大量的实验工作, 虽取得了一定的进展, 但距离真正的实现实用 X 光激光器还很远。近几年, 有关毛细管快放电激励 X 光激光的研究取得了一系列的突出成果, 为短波长激光研究工作带来一种全新的概念, 从目前的成果来看, 已经接近实现实用桌上型 (Table-top) 软 X 射线 (46.9nm) 激光输出。

1 毛细管放电激励 X 光激光介绍

毛细管放电是指直径为毫米量级, 长度为几厘米的绝缘管两端加上快脉冲高电压, 首先在管壁发生沿面闪络, 然后导致毛细管中形成等离子体放电通道, 并产生 Z 箍缩效应。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。1988 年美国 Colorado 大学电子工程系的 Rocca 教授提出利用毛细管快脉冲放电产生的轴向均匀等离子体柱作为增益介质, 直接产生软 X 光激光^[5]。随后几年, 美国、德国、韩国的几个研究小组相继实现了毛细管快放电激励软 X 射线相干输出^[6, 7], 其中较为典型的方案是如下两种。

第一种方案是早期提出的, 实验装置如图 1 所示。其基本原理是: 利用毛细管内放电烧蚀并剥离毛细管壁材料 (聚乙烯、聚乙缩醛等) 中的 C 原子, 形成 C 的高温等离子体, 等离子体与毛细管壁的热传导可使等离子体快速冷却, 产生中心高温周围冷却的等离子体区, 这种条件有利于电子粒子的三体复合过程, 形成类氢碳 (CVI) H α 线的受激发射, 产生 18.2nm 相干输出。Rocca 提出该方案不久, 德国鲁尔大学实验物理研究所的

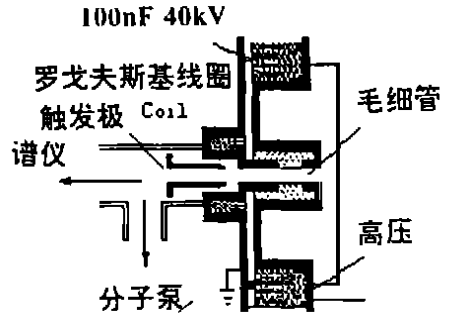


图 1 真空毛细管放电装置示意图

Kunze 便从实验上初步证实了这一方案的可行性, 他们获得的最大增益长度为 $gl = 4.5$, 并与理论计算结果相符^[6]。随后韩国的 Pohang 大学 Lee 小组也获得了相似的结果^[7]。但是由于复合机制本身具有的实验条件难于控制等缺点, 致使利用该方案未获得更进一步的结果。

第二种方案实验装置如图 2 所示, 其毛细管直径要比上一方案大几倍, 毛细管内充入一定气压的气体介质或金属蒸气, 首先利用预脉冲初步电离介质, 然后利用快放电形成毛细管内高温等离子体, 由于毛细管内等离子体箍缩效应, 最终形成积聚于毛细管中心的轴向的、均匀的高温高密度等离子体区, 其中的电子碰撞过程形成相应能级的粒子数反转和受激发射。采用这种方案, Rocca 小组在试验中首先成功地获得了波长 46.9nm 的类氘氦软 X 光激光, 其增益长度为 $gl = 7.5$ ^[4], 在随后的实验中, Rocca 等人不断改进设备和实验方法, 获得了一次又一次进展, 1996 年, Rocca 等人进行了双程放大

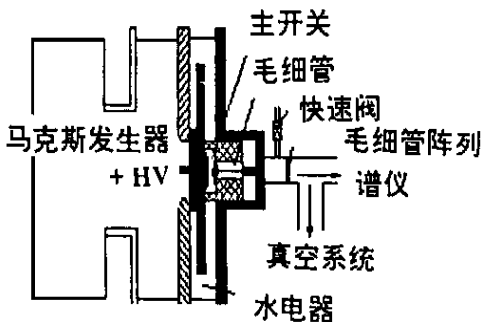


图 2 电子碰撞机制毛细管放电装置

实验,他们对阳极进行了改装,将在 47nm 波长反射率为 20% 的 Ir 平面反射镜安装在等离子体柱的一端,对 14cm 的毛细管进行了双程放大实验,其有效长度为 23.9 ± 1.3 cm,获得的增益长度积达到 27.7,并且,测得的激光能量为 30 μ J,他们还通过两个独立的辐射输运计算都证实了已达到增益饱和,在第五届 X 射线激光国际会议上,这一激光器被称为已接近成为有应用价值的装置,被大会主席评为 10 分,这也是当时世界上台式软 X 射线激光输出达到增益饱和的 3 例中的 1 例,而且他还是这 3 例^[5]中增益长度最大,装置体积最小的 1 例。在获得类氪 46.9nm 软 X 光激光输出的巨大成功后,Rocca 等人有将增益介质扩展到另一类 Z 之更低的类氪元素类氪硫,他们改进了装置,使硫蒸气进入毛细管内,获得类氪硫波长为 60.84nm 激光跃迁,增益长度积达到 $7.55^{[10\sim 13]}$ 。

经过装置与实验条件的改进,Rocca 小组于 1999 年 8 月实现了突破性的进展,在装置更加小型化的同时,把毛细管长度延长到 34.5cm,长度与直径比值超过 1000:1,类氪 46.9nm 激光脉冲的平均输出能量达到 0.88mJ,在工作条件良好的情况下输出能量超过 1mJ;最为显著的进展是重复频率达到 4Hz,并且一根毛细管可以工作 5000 次以上,这些指标说明这套装置已经是一台实用桌上型软 X 射线激光器^[14]。

2 毛细管放电 X 激光技术的几个关键问题

(1) 装置建造。毛细管放电方案的最大特点是可以使装置小型化,主要原因是能够在毛细管中实现 Z 箍缩过程,因此,装置的设计加工必须满足箍缩过程的物理条件,并且小型化要求装置设计得紧凑合理。

(2) 原子参数计算。原子参数的计算分析是开展实验研究的基础,对相应介质的能级结构、跃迁几率、振子强度进行计算,对动力学过程的分析是理论工作的前提。

(3) 等离子体参数计算。能否形成均匀的、高温高密度等离子体区域是整个物理过程中最为关键的问题,必须对箍缩过程、形成相应条件的等离子体区所需的放电条件进行详细的计算与分析。

(4) 增大激光功率。目前,毛细管放电装置中影响输出功率的因素主要有两点,首先,放电条件限制了毛细管的长度,也就限制了增益区长度;然后是放电对反射镜的损坏严重,形成不了多程放大。今后的工作主要是摸索和改进放电条件,加强对 X 波段反射镜片的研究,争取建立谐振腔,获得多程放大。

(5) 产生更短波长的激光。对于电子碰撞激励泵浦类氪离子来说,选用比氪原子序数更高的元素可以得到较短波长的激光,例如类氪离子 CaXI 和 TiXIII 的 $3p-3s, J=0-1$ 的谱线波长分别为 38.3nm 和 32.6nm, 其所需的电子温度不高,在毛细管放电中可以达到。并且由于增益系数 $g \propto Z^4.5$, 其增益有望达到更高值。而要想获得更短波长的激光,由于泵浦功率密度随波长的减小迅速增加会造成很大障碍,一个可能的替代方法是利用电子碰撞激励泵浦类镍离子 ($Z=28$)。理论和激光等离子体实验均表明,获取相同波长范围的激光,利用类镍离子的 $4d-4p$ 跃迁将比类氪离子所需的能量小。因此,利用类镍离子将有望使激光波长短于 30nm。

3 应用前景

X 光激光以其优良的特性,本身就具有广泛的应用前景;作为目前最接近实用 X 激光器的毛细管放电 X 光激光,其应用价值是不言而喻的。已经有报道利用 LiH 毛细管放电产生的

13.5nm 受激辐射应用于电子的平板刻印术。同时,随着激光介质的拓展,毛细管放电 X 光激光的波长范围也逐渐扩大,能够适应各种应用需求;另外,毛细管放电激光的光束质量改善工作也在进行,包括束散角改善和重复率激光的实现,这些方面的工作最终能够使毛细管放电 X 光激光成为激光光谱学研究的重要的激光源,例如,作为等离子体探针等。

4 毛细管放电实验装置条件分析

通过总结国外各实验参数并经过计算,对电子碰撞机制类氩氙毛细管放电装置最佳参数总结如下:(1)毛细管放电电流要接近甚至达到幅值 30kA,半高宽约 35ns,前沿 30ns 左右,其轮廓近似正弦波形。(2)由于毛细管为电感-电阻性负载,会使电压波形的平顶变窄前沿变宽,因此,在设计过程中,要求脉冲装置对纯负载的输出电压波形的前沿在 20ns 左右,并有一定的平顶。(3)由于实验采用双脉冲放电,为便于实验中寻找最佳预脉冲,要求预脉冲的幅值以及与主脉冲的延迟时间在一定范围内可调。(4)为满足增益实验的需要,要求在改变毛细管长度的同时保持放电回路的总电感基本不变。

5 毛细管快放电激励 X 光激光装置设计与分析

哈尔滨工业大学光电子技术研究所一直致力于短波长激光研究,并且较早成立了毛细管放电激励 X 光激光课题组,课题资金来源于国家 863 计划青年基金和国家自然科学基金。利用我实验室现有设备进行改造加工,我们在现有的一台 Marx 发生器的装置上设计了一套完整的毛细管放电 X 光激光装置,包括 Blumlein 传输线、毛细管放电室、测量系统、主开关以及与真空系统、充气系统、Marx 发生器的连接等部分的设计。由于与国外的同类装置相比,我们的 Marx 发生器输出电压较低,为弥补这一不足,达到足够的电流和电压,在设计过程中,我们对装置的各项参数进行了细致的计算和选取。

参 考 文 献

- 1 Da Silva L B, MacGowan B J, Mrowka S *et al.* Opt Lett, 1993; 18: 1174
- 2 Carrilon A, Chen H Z, Dhez P *et al.* Phys Rev Lett, 1992; 68: 2917
- 3 Suckewer S, Skinner C H, Milchberg H *et al.* Phys Rev Lett, 1985; 35(27): 1004
- 4 Zhou Ch, Wang Q, Ma Z G *et al.* SPIE, 1992; 1726: 544
- 5 Rocca J J, Beebe D C, Marconi M C. Opt Lett, 1988; 13(7): 565~ 567
- 6 Steden C, Kunze H J. Phys Lett(A), 1990; 151(9): 534~ 537
- 7 Shin H J, Kim D E, Nyong T. Phys Rev(E), 1994; 50(2): 1376~ 1382
- 8 Rocca J J, Tomasel F G, Marconi M C *et al.* Phys Plasmas, 1995; 2(6): 2547~ 2554
- 9 Rocca J J, Clark D P, Chilla J L A *et al.* Phys Rev Lett, 1996; 77: 1476~ 1479
- 10 Tomasel F G, Rocca J J, Shlyaptsev V N *et al.* Phys Rev(A), 1997; 55(2): 1437~ 1440
- 11 Rocca J J, Cortazar O D, Szapiro B *et al.* Phys Rev(E), 1993; 47(2): 1299~ 1304
- 12 Benware B R, Macchietto C D, Moreno C H *et al.* Phys Rev Lett, 1998; 81: 5804
- 13 Benware B R, Moreno C H, Burd D J *et al.* Opt Lett, 1997; 22(11): 796~ 798
- 14 Macchietto C D, Benware B R, Rocca J J *et al.* Opt Lett, 1999; 24(16): 1115~ 1117

*

*

*

作者简介:李思宁,男,1968年5月出生。讲师。现从事短波长激光方面的研究工作。