

毛细管放电 X 射线激光研究进展*

刘 鹏 王 骐 李思宁

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨, 150001)

摘要: 近年来,毛细管放电 X 射线激光研究工作十分活跃,为短波长激光的研究带来一种全新的概念。较为详尽地总结了这一领域所取得的主要进展,并说明今后发展要注意的问题。对电子碰撞机制毛细管放电 X 射线激光研究具有一定参考价值。

关键词: 毛细管放电 电子碰撞 X 射线激光

Progress of X-ray laser in capillary discharge

Liu Peng, Wang Qi, Li Sining

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronics,
Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: The study of X-ray laser in capillary discharge is very active and a new concept for short-wave laser research has been put forward. The detailed evolution of X-ray laser in capillary discharge is summarized in the paper and the important development factor in the future is pointed out. This work is valuable to the research of X-ray lasers in capillary discharge by electron collision excitation regimes.

Key words: capillary discharge electron collision X-ray laser

引 言

从1960年激光问世以来,不断有人设想将它向短波长的X射线激光推进。由于X射线激光亮度高、相干性好、频带宽、脉冲短,因此,X射线激光在生物科学、材料科学及微电子学领域具有极大的应用价值。例如,X射线显微镜可以用来观察生物活体细胞及亚细胞结构的显微图像;X射线全息技术获得高分辨三维图像;X射线激光作为受控热核反应(ICF)等离子状态诊断手段;在超大规模集成电路(刻线 $< 0.1\mu\text{m}$)的X射线光刻等领域的应用等。X射线激光的研究已成为当前激光科学技术领域发展的前沿、研究热点。

X射线激光介质是高能量密度非储能介质,需要很高的泵浦功率密度,目前,常规仍是用高功率激光束作为泵浦源,如美国NOVA装置(10^{15}W),中国的神光①($6 \times 10^{12} \sim 7 \times 10^{12}\text{W}$)等,这些装置造价昂贵、实验复杂,因而限制了实际应用。因此,寻找低激发阈值的X射线激光机制和研制低价的、小型台式X射线激光器一直倍受人们的关注。近年来,毛细管放电X射线激光的研究工作十分活跃,为短波长激光的研究带来一种全新的概念。有人总结了1994年以前毛细管放电软X射线激光的实验进展^[1],笔者则较为详尽地总结了这一领域至今所取得的主要进展,并提出今后发展要注意的关键问题。

1 毛细管放电 X 射线激光方案的提出及早期探索实验

1984年,美国劳伦斯·利弗莫尔实验室(LLNL)的Matthew^[2]等人利用电子碰撞激励法首

次获得了类氪 Se 波长为 20.6nm 和 20.96nm 的软 X 射线激光放大, 该实验被认为是 X 光激光研究领域最成功、最具代表性的实验。由于实验所用的泵浦激光器体积庞大且运行费用昂贵, 所以, 世界范围内只有很少几个实验室可以开展相应的工作。此后, 人们开始寻找降低泵浦激光能量及提高能量转换效率的途径, 围绕小型化、高重复率进行研究, 使 X 射线激光器实用化。

1988 年, 美国 Colorado 大学 Rocca^[3] 小组提出, 可以采用在长度远大于直径 ($l/d > 100$) 的毛细管中快放电激发管内的气态物质, 产生均匀等离子体来作为 X 射线激光增益介质。这种毛细管体积较小, 具有较大的阻抗, 有利于欧姆加热。在激发电脉冲结束之后, 等离子体与毛细管壁的热传导可使等离子体快速冷却, 进而导致电子与离子的快速复合, 结果造成上下能级间的粒子数反转。

1990 年, 德国 Ruhr 大学物理研究所的 C. Steden 和 Kunze^[4] 从实验上初步证实了这一方案的可行性。他们用毛细管放电剥离管壁 (聚乙缩醛材料) 形成的等离子体作为增益介质, 在内径 0.5~1mm 毛细管中, 观测到了类氢碳 $n=3-2$ 跃迁, 波长 18.2nm 的软 X 射线辐射放大。放电脉冲宽度 240ns, 最大放电电压 40kV, 平均增益系数在 $1.2 \sim 2.7 \text{ cm}^{-1}$ 之间, 最大增益长度积为 $GL = 4.5$ 。

随后 Rocca^[5], Edison^[6] 以及韩国 Lee^[7] 小组等相继进行了复合机制类氢碳软 X 射线激光实验。Edison 及 Lee 小组实验观察到类氢碳 H_{α} 线的放大, 但 GL 值约为 4, 效果并不理想。Rocca 等人则认为在毛细管放电等离子体中 H_{α} 线完全没有增益, 主要原因是大量能量用于剥离管壁, 使等离子体难以达到较高温度, 不足以产生碳裸核 ($C \times$), 无法通过三体复合造成 $C \nu n=3-2$ 跃迁的光放大。

但在这一实验中, Rocca 小组敏锐地发现, 如采用上升沿极快的放电脉冲可使真空毛细管等离子体达到较高的温度和密度, 有可能满足电子碰撞激发软 X 射线放大的条件。1992 年 Rocca^[8] 等演示了产生超热 ($T_e > 150 \text{ eV}$) 的稠密氩等离子体实验。与真空放电不同的是, 他们在利用预脉冲技术获得的低温、低密度等离子体上, 加上快速高压放电主脉冲, 使其成为高电离度的细等离子体柱。这种等离子体柱直径更小, 温度密度更高, 且其电离度可通过放电脉冲的电流大小控制。

Rocca 等人的毛细管快速放电实验装置如图 1 所示, 主要由一快速高压电脉冲 (Marx) 发生器和一个内装乙二醇液体电介质的 3nF 圆形平行板电容器构成。Marx 发生器可产生上升时间 13ns, 半高宽 28ns 的快速电脉冲, 七级 Marx 最大输出电压 700kV。毛细管安装在电容器一块板的中心, 与板垂直, 一端与该板相连, 另一端装一弧形电极, 与电容器的另一块极板构成火花隙开关。六氟化硫 (SF_6) 控制火花隙开关使电容器放电激发毛细管中介质。对 Marx 发生器还做了特殊设计, 能在主放电脉冲之前产生幅度 10A、宽度约几个微秒的低幅长预电离脉冲。实验中, 放电电流 40kA 左右, 脉冲上半周期宽度 60ns, 从幅值 10%~90% 的上升时间 20ns。聚缩醛

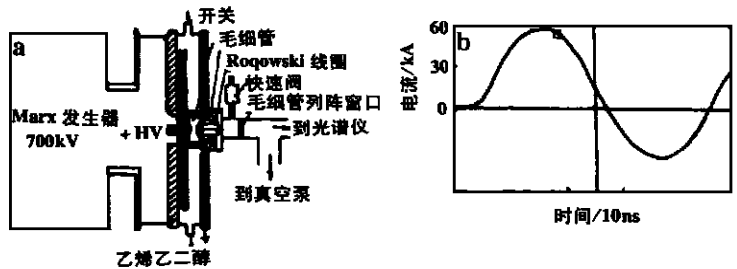


图 1 Rocca 等人的毛细管快速放电装置
a—放电装置 b—放电脉冲波形

毛细管直径 4mm, 长度分别为 3mm, 6mm, 12mm。实验时毛细管内约保持 2.67mPa 的真空, 然后在主脉冲到来之前通过快速阀充入纯氩或氩氢混合气体。

随后, Rocca 等又用适当的放电电流产生具有一定类氦离子丰度的高度电离的 Ca 和 Ti 等离子体柱。上述两个实验结果表明快速毛细管放电产生等离子体, 可以获得产生电子碰撞激发软 X 射线激光的类氦和类镍离子系统。从此, 小型台式 X 射线激光的研究重点就转移到电子碰撞激发机制方面, 而 Rocca 小组的进一步实验取得了突破性的成果, 使 X 射线激光的研究进入到增益实验阶段。

2 毛细管放电 X 射线激光增益实验

1994 年, Rocca^[9] 小组第一次成功地演示了毛细管放电泵浦的电子碰撞激发软 X 射线激光的显著放大。实验条件为电流上升时间 20ns, 在长 12cm 直径 4mm 的毛细管中充氩气约 93.3Pa, 放电电压 700kV, 放电电流 40kA, 观测到类氦氩 $J = \theta 1$ 跃迁的放大, 波长 46.9nm, 增益系数 0.6cm^{-1} , 增益长度积 $GL = 7.2$, 束散角小于 9mrad。在此基础上, 1995 年, Rocca 将放电装置进行了改装, 使之能用于长达 20cm 的毛细管。在 15cm 长的毛细管快放电等离子体中获得了类氦氩 46.9nm 谱线软 X 射线放大, 最大增益长度积接近饱和 ($GL \approx 14$), 增益系数 0.9cm^{-1} , 激光输出脉冲能量 6 μJ 。

1996 年, Rocca^[10] 等又进行了双程放大实验并获得饱和输出。他们对阳极进行了改装, 将在 47nm 波长反射率为 20% 的铱平面反射镜安装在等离子体柱的一端, 用 14cm 长的毛细管获得输出脉冲能量 30 μJ , $GL > 25$ 。在第 5 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, 被评为 10 分, 这也是当时世界上几个小型系统获得软 X 射线激光输出达到增益饱和的 3 例中的 1 例, 而且是增益长度最大、装置体积最小的 1 例。

1998 年, Rocca^[11] 在陶瓷毛细管中用重复频率 7Hz 电流脉冲产生轴向均匀的等离子体柱。产生平均功率约 1mW 的 46.9nm 激光输出, 实验装置占 $0.4\text{m} \times 1\text{m}$ 面积的台面, 可和广泛应用的可见光及紫外气体激光器相比较。经过装置与实验条件的改进, 1999 年, Rocca^[12] 小组实现了突破性的进展。在装置更加小型化的同时, 采用长 34.5cm 陶瓷超长毛细管, 获得类氦氩 46.9nm 激光脉冲的平均输出能量达到 0.88mJ, 最大输出能量 1mJ, 平均功率 3.5mW, 重复频率 4Hz, 这是目前光亮度最高的 X 射线源之一。该实验的条件为毛细管直径 3.2mm, 充预电离氩气约 61.3Pa, 放电电流 26kA, 脉冲上升时间 40ns。该实验装置与传统 X 射线激光装置相比已经非常小了, 称之为台式 X 射线激光方案。

表 1 列出了 Rocca 小组从 1994 年以来主要的实验进展情况。从中可以看出, Rocca 小组在 1994~1996 年的工作重点一直在如何提高输出能量, 使装置小型化这两个方面。通过增加毛细管长度 (从 12cm 到 18.6cm), 使用在 47nm 波长反射率为 20% 的铱平面反射镜, 实现了双程饱和放大输出, 最大输出能量达到了 30 μJ 。另外, 把内装乙烯乙二醇液体电介质的圆形平行板电容器换成了 Blumlein 传输线。由于 Blumlein 传输线具有电压传输效率高的优点, 所以, 降低了对 Marx 发生器的要求, 电压从 700kV 降为 400kV, 大大缩小了放电装置的体积。

而 1999 年的工作与前几年相比有三个很重要的变化。一是将毛细管材料从聚缩醛改为氧化铝陶瓷。陶瓷材料机械强度好, 可以做到超长而不变形, 如果加工得好, 加工精度高, 可比聚缩醛毛细管内径光滑, 这对形成稳定均匀放电是非常有益的。毛细管长度 34.5cm 达到两倍饱和长度, 直径由 4mm 缩小为 3.2mm, 内充 Ar 气气压也由约 93.3Pa 降低为 61.3Pa。这些因素

都有利于形成稳定、均匀等离子体放电通道。二是将 Blumlein 传输线改成了水介质平行板电容器。这不仅可以大大缩小整个实验装置的体积,而且水电容中的水在作为电介质的同时也能冷却毛细管,从而延长了毛细管寿命,使一根毛细管可以放电 5000 次以上。三是放电参数降低了要求,放电电流由 37kA 降为 26kA,前沿由 20ns 变为 40ns,但实验结果却很好,已实现平均毫焦量级激光输出。这可能是由于采用了氧化铝陶瓷毛细管,外加了轴向磁场及预脉冲,因而较容易形成稳定、均匀等离子体放电通道的缘故。

在使装置不断小型化并逐步提高激光脉冲能量工作的同时, Rocca 小组在改善激光输出光束质量方面,以及 X 射线激光的应用方面也进行了一些工作。1996 年报道^[13]在毛细管放电等离子体上外加轴向磁场,可以减小等离子体密度梯度,抑制折射效应,从而改善输出光束的均匀性,减小束散角。当磁感应强度为最佳值 0.15T 时,折射效应明显降低, X 射线激

表 1 Rocca 小组毛细管放电类氙 46.9nm 激光增益实验对比

年 份	1994	1995	1996	1999
输出能量(J)	—	6	30	880
束散角(mrad)	8.7	7	6.5	4.6
增益系数(cm^{-1})	0.6	0.94	1.16	—
增益长度积	7.2	14	27.7	—
放电电流(kA)	40	39	39	26
上升前沿(ns)	20	20	20	40
放电电压(kV)	700	700	400	400
Ar 气压(Pa)	93.3	96	93.3	61.3
毛细管材料	聚缩醛	聚缩醛	聚缩醛	氧化铝陶瓷
毛细管长度(cm)	12	15	18.6	34.5
毛细管直径(mm)	4	4	4	3.2
能量传输	平行板电容器	平行板电容器	Blumlein 线	水电容器
备 注	首次增益放大	单程近饱和	双程饱和	重复频率 4Hz

光的发射强度最大,光束的角分布也得到改善,由双峰结构变为高斯分布。

1998 年, Rocca 小组系统测量了类氙 46.9nm 激光出射光束的光斑尺寸和束散角,得到了二维远场和近场像^[14]。实验发现,光斑尺寸和束散角随着放电气压的降低而显著增大;同时激光束强度分布由单峰变成环形分布。这是低气压情况下,等离子体柱较大的密度梯度导致的较强折射效应的结果。1999 年, Rocca 等人^[15]用毛细管放电类氙 46.9nm 激光进行了软 X 射线激光干涉术的研究,这标志着已经具有了应用价值。另外, Rocca 等人又将增益介质扩展到元素硫,探索在毛细管中使用固体靶的可能性,为将来选用原子序数更高的元素作增益介质,把波长向更短的方向推进做准备。他们改进了装置,使硫蒸气进入毛细管内,获得类氙硫 $J=0-1$ 跃迁放大,波长 60.8nm,增益系数 0.45cm^{-1} , $GL=7.5$ ^[16]。在这一时期,毛细管放电复合机制 X 射线激光方案也有所进展,在氙毛细管放电中观察到 10^{-16}nm 强的软 X 射线辐射^[17]。

3 毛细管放电 X 射线激光研究国内进展及展望

哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室一直致力于短波长激光研究。1995 年,首先在国内立项开展研究,课题名称为“毛细管放电激励 X 光激光研究”。在这一研究期间,课题组与中国原子能科学研究院合作,设计建造了整套开展电子碰撞机制毛细管放电 X 射线激光研究的实验装置,包括 Marx 发生器、Blumlein 传输线、毛细管放电室、主

开关、测量系统及真空系统等。由于与国外的同类装置相比, 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^[18]。现已完成了整套系统的安装与放电调试实验。图 2a 为 Marx 输出电压 190kV、

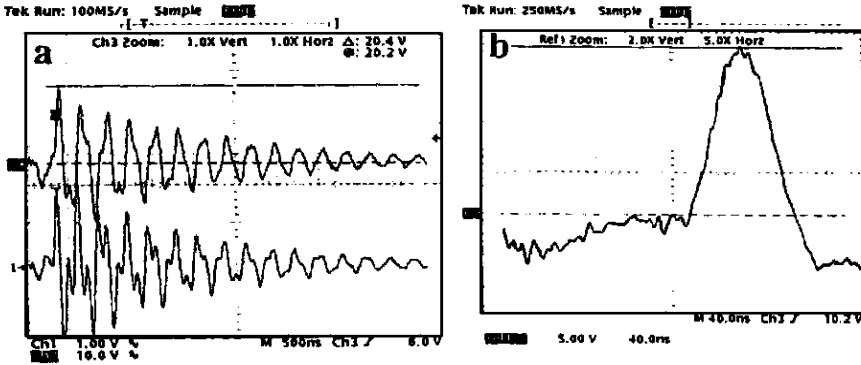


图2 Blumlein 传输线向充氩气毛细管负载放电波形
a—放电电流及电压波形 b—第 1 个电流脉冲波形

毛细管内氩气气压 67Pa 时, 放电电流及电压波形。从图中可见, 电流波形是阻尼衰减振荡波形, 与设计时的估计相吻合。由于毛细管等离子体柱电阻较小, 只有多次

振荡后, 才能将储存在 Blumlein 线上的能量消耗掉。图 2b 为第 1 个电流脉冲, 从图中可知, 电流峰值 38kA, 上升前沿 44ns, 半高宽 62ns。对比 Rocca 小组 1999 年实验研究中毛细管放电参数, 我们的装置输出参数完全达到了 Rocca 小组装置的水平, 现正开展充氩气毛细管放电荧光光谱的实验研究。

在理论研究方面, 北京应用物理与计算数学研究所已经开展了毛细管放电 X 射线激光理论模拟的工作, 初步建立了相应的计算程序, 对 Rocca 小组的报道进行了一系列计算模拟, 得到了较好的结果^[19], 国内其他研究者也作了一些工作^[20]。另外, 中国工程物理研究院也建造了电子碰撞机制的毛细管放电 X 射线激光研究装置。

由于毛细管放电 X 射线激光是一种小型、台式 X 射线激光方案, 具有很高的研究价值和很强的实用性, 因此, 开展此项研究意义重大。Rocca 小组已获得了很大的成功。但目前国际上也只有 Rocca 小组一家获得饱和输出的实验报道, 这说明这种方案是可行的, 但也是有相当难度的, 特别对 Rocca 小组工作中一些实质性的技术关键问题及数据尚无法获得, 因而, 在国内开展这一研究, 通过我们自己的探索、实践在该机制上获得突破, 是一件有意义的事情。

参 考 文 献

- 1 马国彬, 王世绩. 强激光技术进展, 1995; 5(6): 31~ 36
- 2 Mathews D L, Hagelstein P L, Rosen M D *et al.* Phys Rev Lett, 1985; 54(2): 110~ 113
- 3 Rocca J J, Beathe D C, Marconi M C. Opt Lett, 1988; 13(7): 565~ 567
- 4 Steden C, Kunze H J. Phys Lett A, 1990; 151(9): 534~ 537
- 5 Rocca J J, Marconi M C, Tomasel F C. IEEE J Q E, 1993; 29(1): 182~ 191
- 6 Edison N, Young P E, Holmes N *et al.* Phys Rev E, 1993; 47(2): 1305~ 1308
- 7 Shin H-J, Kim D-E, Lee T-N. Phys Rev E, 1994; 50(2): 1376~ 1382
- 8 Rocca J J, Cotazar O D, Szapiro B *et al.* Phys Rev E, 1993; 47(2): 1299~ 1304
- 9 Rocca J J, Shlyaptsev V, Tomasel F G *et al.* Phys Rev Lett, 1994; 73(16): 2192~ 2195
- 10 Rocca J J, Clark D P, Chilla J L A *et al.* Phys Rev Lett, 1996; 77(8): 1476~ 1479
- 11 Rocca J J, Moreno C H, Benware B R *et al.* X-ray Lasers. IOP Publishing Ltd, 1998, 1999: 9
- 12 Macchietto C D, Benware B R, Rocca J J. Opt Lett, 1999; 24(16): 1115~ 1117

激光光学中的逆问题*

吕百达 张 彬 罗时荣

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 从对光学中逆问题的一般评述开始, 对激光光学中两个重要的逆问题, 即激光的相干模分解(M^2 因子的逆问题) 和脉冲激光放大系统的逆问题, 作了详细分析。最后, 还对相关的一些问题作了讨论。

关键词: 逆问题 相干模分解 M^2 因子 脉冲激光放大器

The inverse problems in laser optics

L Baida, Zhang Bin, Luo Shirong

(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: Besides general review of the inverse problems in optics, this paper exactly analyzes two important inverse problems, namely, the coherent mode decomposition of lasers (inverse problem of the M^2 factor) and inverse problem of a pulsed laser amplifier system. Finally, some relevant subjects are briefly discussed.

Key words: inverse problem coherent mode decomposition M^2 factor pulsed laser amplifier system

引 言

光学中的逆问题引起强烈研究兴趣的原因是多方面的。理论上, 它需要反解方程(代数方程、算子方程、微分方程或积分方程等), 与数学中的逆问题有类似之处。而更为重要的是, 在实际工作中, 例如光学和激光系统的工程设计中常常对逆问题更为关注。以美国用于实验室激光核聚变研究的国家点火设施(NIF) 为例, 提出的主要设计指标为^[1]: 输出激光能量 1. 8MJ, 输出功率 500TW (0. 35 μ m), 192 束, 功率平衡小于 8% (脉宽 2ns), 有灵活的脉冲整形能力。因

* 国家高技术激光技术主题和惯性约束聚变主题有关项目资助。

- 13 Tomasel F G, Shlyaptsev V N, Rocca J J. Phys Rev A, 1996; 54(3): 2474~ 2478
14 Moreno C H, Marconi M C, Shlyaptsev V N *et al.* Phys Rev A, 1998; 58(2): 1509~ 1514
15 Rocca J J, Moreno C H, Marconi M C *et al.* Opt Lett, 1999; 24(6): 420~ 422
16 Tomasel F G, Rocca J J, Shlyaptsev V N *et al.* Phys Rev A, 1997; 55(2): 1437~ 1440
17 Klosner M A, Silfvast W T. Opt Lett, 1998; 23(20): 1609~ 1611
18 李思宁, 刘 鹏, 王 骐 *et al.* 激光技术, 2000; 24(6): 35
19 Lan K, Zhang Y Q, Zheng W D. Phys Plasma, 1999; 6(11): 4343~ 4348
20 张毓泉, 张覃鑫, 王光裕 *et al.* 强激光与粒子束, 1997; 9(1): 41~ 46

* * *

作者简介: 刘 鹏, 男, 1972 年 1 月出生。在读博士生。课题方向为短波长激光, X 射线激光。