

X 光激光实验研究进展

淳于书泰

(核物理与化学研究所 成都 610003)

摘 要 自 1987 年开展 X 光激光实验以来,在许多物理机制研究上取得重要进展,尤其利用电子碰撞激发机制实现了一系列类氪离子的 X 光激光增益.在驱动能量 $\sim 600\text{J}$ 、脉宽 $\sim 1.2\text{ns}$ 条件下,首先获得 19.6~28.6nm 间的 5 条跃迁增益线, GL 值约 8,利用平面 X 光反射镜又实现双程放大,时间分辨的强度提高 10 倍.在此基础上,又完成低能量驱动和预-主脉冲驱动的 X 光激光增益实验,为在较低驱动能量下实现高增益和准单线的 X 光激光输出探索有效的技术途径.

关键词 驱动激光, X 光激光, 电子碰撞激发.

1 引 言

X 光激光是波长处于 X 光波段的激光,它的极短波长(几十 nm 至 nm)和极短持续时间(ns~ps)更引人关注.理论预言它对国防建设、科研和工程应用都具有广阔的应用前景.因此,自 70 年代起,各发达国家都陆续开展了 X 光激光研究.采用的主要技术途径是利用激光等离子体(指驱动激光与靶物质作用产生的等离子体)开展 X 光激光产生、放大及传输的研究,重点是制造激光等离子体并诊断其状态,同时判定 X 光激光品质.1984 年,美国科学家首次实现 X 光激光输出^[1],之后,该领域在理论、实验、驱动源和制靶等方面迅速发展,目前在少数范围内已开展了应用演示试验,估计不久将实现理论预言的应用前景.

CAEP 一直关注着国际 X 光激光领域的动态和发展,并在国家高技术 863-410 主题资助下正式开始了 X 光激光研究.本组利用国内星光激光器作驱动源,于 1988 年首次实现 108.9nm 激光输出^[2],实现了我国 X 光激光实验领域内的零突破.这次实验是利用光电离俄歇效应泵浦机制完成的,实验中利用 1.06 μm 驱动激光与固体钽靶作用产生的等离子体 X 光源作泵浦源,氙气作 X 光激光工作介质,它在 X 光作用下产生光电离,氙离子经俄歇衰变处于不同的激发态,由于激光

上能级 $Xe \text{ III } 5s^5 5p^6$ 与下能级 $Xe \text{ III } 5s^4 5p^5$ 简并度不同,因此在该两能级间形成粒子数反转并产生 108.9nm 激光输出.这个机制的优点是实现粒子数反转所需的电子密度和离子密度均要求不高,并且理论模型相对简单,但实现更短波长输出尚有困难.

为了寻求更短波长激光输出,1989 年在星光装置上又开展了三体复合机制的 X 光激光实验探索,观察到了一些 X 光激光增益现象^[3].这种机制的突出优点是量子效率高,但实验中对驱动激光及靶参数的要求苛刻.

1989 年后,本组用国内最大激光器——神光装置又完成电子碰撞激发类氪离子的 X 光激光增益系列实验,这些实验结果不仅为我国 X 光激光发展和应用演示奠定了基础,而且也发展和丰富了国际 X 光激光实验的内容.与此同时,本组对产生 X 光激光的其它物理机制也进行了广泛的实验探索,包括内壳层光电离机制物理现象的实验观测^[4]和自动线匹配光泵浦机制的实验探索^[5],这两个实验可归到光泵浦机制范畴,它是产生 X 光激光的另一个重要途径.

2 电子碰撞激发类氪的 X 光激光增益

2.1 类氪 X 光激光增益实验研究

当激光等离子体达到某一状态时,其中的类氪离子可以在电子碰撞作用下,由它的基态 $2p^6$ 激发到 $n=3$ 的高能态,由于各高能

态寿命的差异,出现了 3p-3s 能级间的粒子数反转,从而可能产生沿等离子体轴线方向的 X 光激光放大. 可见,X 光激光产生和放大的关键是等离子体状态,对类氦锆实验,等离子体状态参数大致为:电子密度约 $(1\sim 2)\times 10^{20}/\text{cm}^3$,电子温度约 $(400\sim 700)\text{eV}$ 、类氦离子丰度约 20%. 因此,实验研究的首要任务就是选择驱动激光和靶参数,使它们产生的激光等离子体基本满足上述指标. 1989 年,本组在国内首次实现 X 光激光的实验中^[6],选择了神光激光器作驱动源,厚块状锆平板作靶,其指标如下:单路基频激光输出,波长 $1.06\mu\text{m}$,能量 $\sim 600\text{J}$ 、脉宽 $\sim 1.2\text{ns}$,辐照锆靶一个面,焦斑为 $20\text{mm}\times 185\mu\text{m}$,靶长度在

$(8\sim 18)\text{mm}$ 间变化. 实验时靶置于靶室中心,在靶周围布放各类诊断设备,包括在靶轴向上安放的为判定 X 光激光特征量的光栅谱仪. 本次实验获得了 5 条 X 光激光增益线,图 1 给出了在靶长为 18.16mm 时轴向光栅谱仪测到的 X 光激光光谱的微密度扫描曲线. 通过不同靶长(L)下的不同 X 光激光输出强度(I),利用公式

$$I \sim [\exp(GL) - 1]^{3/2} / [GLEXP(GL)]^{1/2} \tag{1}$$

可以求出增益系数(G),具体数值见表 1. 这次实验还提供了等离子体平均电子温度及其沿等离子体轴向的分布^[7],为检验核理论预言提供了实验依据.

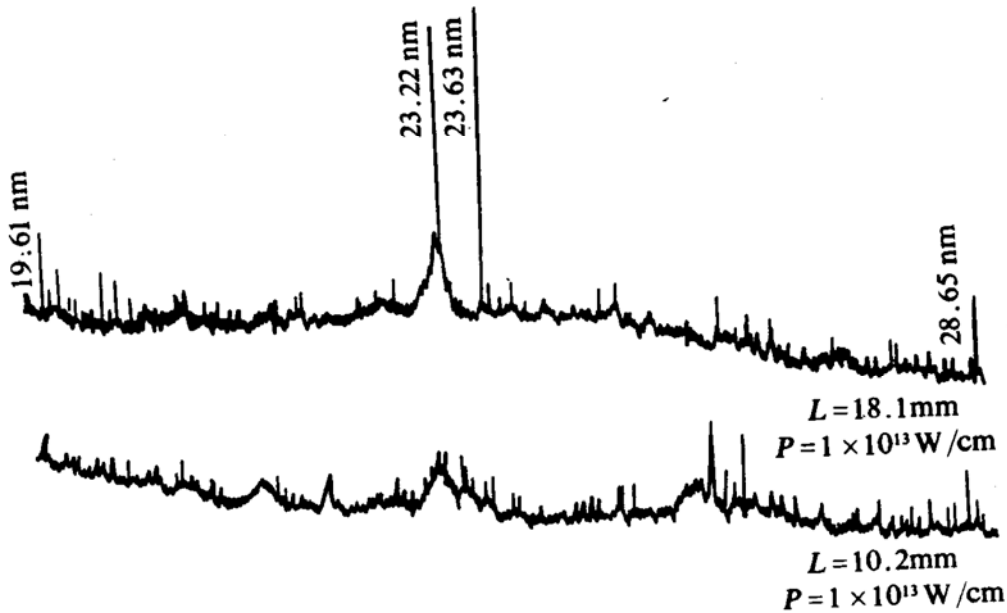


图 1 X 光激光光谱的微密度扫描曲线

表 1 增益系数的理论值及实测值

跃迁	波长 (nm)	增益系数(cm^{-1})			发射角 (mrad)	发射区厚度 (μm)
		理论值	本组测	NRL 测*		
J=0-1	19.61	8.72	3.06	3.1		
J=2-1	23.22	4.53	3.99	4.1	12.7	230
J=2-1	23.63	4.71	3.72	4.1	12.0	220
J=1-1	24.73	2.31	2.36	2.7		
J=2-1	28.65	4.53	4.59	4.1	9.0	160

* 美国海军实验室 1987 年测量.

2.2 类氟锆 X 光激光双程放大实验

提高 X 光激光输出强度的关键是提高 GL 值,但表 1 给出的发射角已证明靠增加单靶长度 L 来提高 GL 已有困难,必须寻找其它技术途径.为此,本组又开展了双程放大实验研究,双程放大是指经等离子体放大的 X 光激光再次通过该等离子体再放大过程,它

对于提高 X 光激光强度和改善光束质量均有好处.这个实验是 1990 年在神光装置上完成的^[8],实验的关键技术是靶-X 光反射镜相对位置及镜法线取向的选取,它涉及 X 光激光发射、传输及等离子体状态变化.由图 2 可见,双程放大的效果是明显的,时间分辨的 X 光激光强度提高 10 倍.

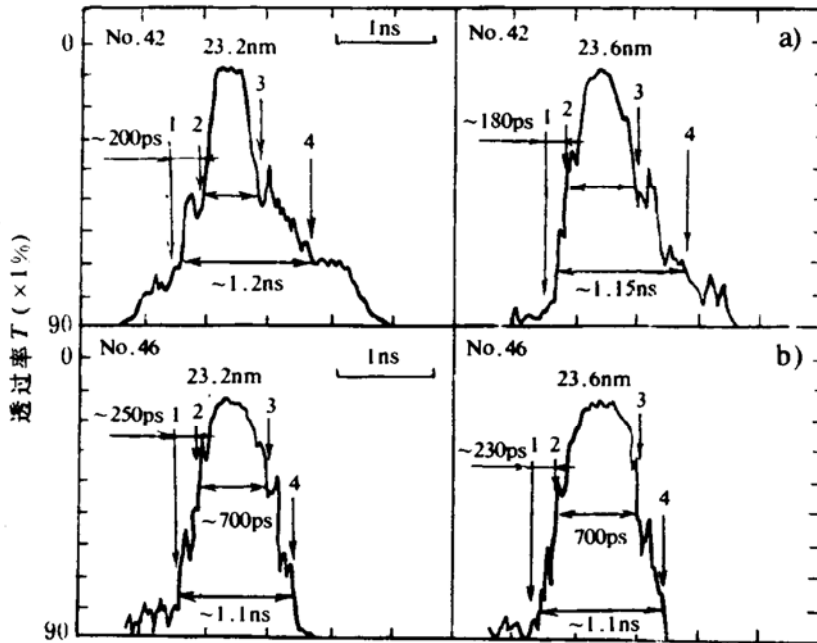


图 2 双程放大的时间分辨测量结果

上述两个实验的成功,以及在此基础上由中物院另一 X 光激光实验小组,种用多靶对接加反射镜方法完成的类氟锆饱和输出实验,使我国 X 光激光研究不仅跃上新台阶,而且步入国际先进行列,引起国际社会的广泛关注.但我们必须清醒看到:(1)上述实验均在较高驱动源能量下完成;(2)实验中同时产生多条 X 光激光增益线;(3)X 光激光特征量并不理想,这些问题对 X 光激光发展和可能的应用均带来困难.

2.3 低能驱动类氟锆 X 光激光增益实验

本实验以寻求降低驱动源能量为目的,基本物理思想是:利用倍频激光($0.53\mu\text{m}$)首先烧穿薄膜锆靶,并让等离子体自由膨胀一段时间,当等离子体的电子密度和类氟离子

丰度合适时,使具有窄脉宽的基频激光($1.06\mu\text{m}$)迅速与等离子体作用,此时基频激光能量迅速交给电子提高其温度,从而实现提高 G 值目的.实验中选择了 34nm 厚 10mm 长的薄膜锆靶,驱动激光参数为第一束 35J 、 115ps ,第二束 80J 、 160J ,两束时间距 350ps .实验结果表明^[9]:在可比条件下,双脉冲驱动产生的 X 光激光强度明显高于单脉冲.

2.4 预-主脉冲驱动单线 X 光激光增益实验

1995 年,在星光装置上完成的一轮实验以消除应用中 X 光激光多条增益线互扰、追求单条线输出为目的.在本文描述的双脉冲驱动实验中,意外地发现在可比条件下,双脉冲驱动时 $J=0-1$ 的跃迁线强度与 $J=2-1$ 跃迁线强度之比高于单脉冲驱动,这里可能包

含着新的物理图像. 为了进一步寻求提高 驱动激光能量利用率, 更好改善电子密度分布以降低 $J=0-1$ 跃迁线在传输中的损失, 从而大幅度提高其输出强度, 我们尝试性调解了双脉冲幅度比及时间间隔, 开展了类氪钛实验, 当第一束即预脉冲与第二束即主脉冲激光的峰值强度比在 $(1\sim 9)\%$ 间变化, 预-主脉冲时间间距为 5ns 时, 明显的观察到类氪钛的 $J=0-1$ 跃迁的 32.6nmX 光激光, 并且峰值强度比低时更易产生 X 光激光.

3 结束语

我们已经尝试了各种物理机制, 特别是电子碰撞激发机制产生 X 光激光实验, 取得了一系列重要成果, 这对理解 X 光激光物理过程和可能的应用演示提供了实验依据, 但与国际先进水平相比, 研究的深度和广度还不够. 今后的设想: (1) 在国内现有条件下, 突出物理方案特色, 继续开展以降低驱动源能量和提高 X 光激光光束质量为重点的电子碰撞激发机制实验. (2) 实验内容紧密围绕应用基础研究, 并创造条件开展 X 光激光应用演

示探索实验. (3) 加强对新兴学科, 例如强场物理的跟踪, 促进国内配套条件的形成.

本工作是在国家高技术 863-410 资助下完成的, 工作中得到了多位专家的帮助, 也得到国内许多单位, 尤其是神光激光器全体人员的支持, 我们深表谢意.

参加本项工作的主要科技人员是(按发表文章顺序): 沈华忠、尤永录、何绍堂、王明达、何安、张启仁、蔡玉琴、杨上金、顾元元、黄文忠、杜凤英、庄秀群、刘淑萍、弁丹岷、郭秦、孙永良、洪伟、武清勇等.

参 考 文 献

- 1 Matthews D L, et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 54: 110
- 2 沈华忠等. 强激光与粒子束, 1989, 1(1): 180
- 3 何绍堂等. 强激光与粒子束, 1990, 2(3): 291
- 4 淳于书泰等. 强激光与粒子束, 1994, 6(1): 112
- 5 杜凤英等. 强激光与粒子束, 1993, 5(4): 589
- 6 淳于书泰等. 强激光与粒子束, 1990, 2(3): 280
- 7 杨上金等. 核聚变与等离子体物理, 1992, 12(2): 105
- 8 淳于书泰等. Science in China(A), 1992, 35(12): 1509
- 9 黄文忠等. 强激光与粒子束, 1994, 6(2): 171

Experimental Investigations on X-ray Lasers

Chunyu Shutai

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract This paper introduces the progress on X-ray laser investigations in CAEP, including the experiments of X-ray lasers gain of Ne-like Ge pumped by electron-collision excitation, double-pass amplification of X-ray laser, low energy double-pulse driving and X-ray lasers pumped by other schemes. The attentions are paid to the experimental principles, designs and results. Some suggestions of future investigations are also discussed.

Key Words driving laser, X-ray laser, electron-collision excitation.