

上海光机所X射线激光研究进展

徐 至 展

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

摘要: 回顾中国科学院上海光学精密机械研究所在八十年代从事X射线激光研究所做出的努力和取得的主要成果,并展望今后的研究方向。

X射线波段激光的开拓是激光科学技术发展中的重大前沿领域之一,它在军事和科学技术众多领域中的应用前景也引人瞩目,然而,从七十年代初起步的实验室研究,一直进展缓慢,直到七十年代末,八十年代初,利用激光等离子体作为工作物质以实现X射线激光的方案才受到重视并逐步成为主流。

八十年代初,上海光机所已开始从事以高功率激光产生的高温高阶电离等离子体为增益介质的X射线激光研究。1981年,徐至展研究组在上海光机所的六路激光装置上,采用两类实验方案(即加进可控的预脉冲激光的方案及加铜箔的“冷阱”方案),并利用自行研制成功的多用途的X光晶体谱仪,观察到了复合泵浦机制导致 Mg^{+10} 离子的主量子数 $n=3,4$ 能级间(跃迁波长 154\AA)的粒子数分布反转。这是我国首次获得的软X光波段粒子数反转的实验证明。在国际上,当时也只有美、英等少数几个实验室实现。这一成果受到国际同行学术界的承认与引用,例如,徐至展、殷光裕于1981年利用“预脉冲激光”方案获得的软X光粒子数反转的成果,已被美国利弗莫尔国家实验室的国际著名X射线激光科学家P. L. Hagelstein的论著“短波长激光评论”所正式引用,认为是X射线激光发展中的一项重要进展。尤其应提到的,在采用加入可人为控制的预脉冲激光的方案中,不仅观察到了通常的高靶面较远的粒子数反转区,而且我们还在国际上首次发现了接近靶面且有更高电子密度的新的粒子数分布反转区。这种新的近靶面反转区不同于离靶面较远的反转区,它具有过热地偏离稳态的新特征。由于能建立有更高反转粒子数密度及增益的新工作区,这一创新结果为X射线激光的探索研究提出了新的技术途径,故有十分重要的意义。

在上述成果的基础上,我们又开展了光共振激发泵浦机制以实现软X光波段粒子数反转的实验研究,取得了重要的新结果。我们采取了以类氦Al XII离子为激发离子、以类氢Na XI离子为激光工作离子的实验方案,观察到了Al XII离子的互组合线光共振激发Na XI离子的 $n=4,5$ 能级间($\sim 334\text{\AA}$)的粒子数反转的结果。与此同时,上海光机所还在与上述软X光波段粒子数反转实验研究直接有关的X射线光谱学及其诊断、靶设计等领域中也得到了许多重要的成果。

多年来,我们在理论和实验两方面深入并较广泛地进行了作为X射线激光增益介质的线状激光等离子体的特性及有关相互作用方面的基础性研究。1985年以来,利用谱波显微成像诊断技术,从实验上观察到线聚焦激光在等离子体中因自聚焦效应而分裂成丝的重要现象。同时,利用多分幅激光探针成像诊断详细研究了激光等离子体中的各类喷流结构及时间演化过程。尤其是首次发现大尺度喷流结构,并指出这类不均匀性结构将可能触发湍流及其它非线性

性效应,从而严重影响X射线激光在介质中的传播以及可能达到的增益。这一创造性结果为我们后来的X射线激光实验中靶结构的设计,提供了明确的物理依据。我们还研制了多种重要的诊断设备,尤其是与X射线激光实验研究直接有关的仪器设备和技術,诸如掠入射光栅谱仪、针孔透射光栅谱仪、各种晶体谱仪、五分幅激光探针诊断、 $\omega_0, 2\omega_0, 3\omega_0/2$ 谐波成像诊断以及无保护层X光底片的研制等等,广泛开展了线聚焦激光产生等离子体的X射线发射特性,尤其是XUV和X射线光谱方面的研究。上述研究都为我们近几年成功进行的软X射线激光总体实验奠定了坚实的基础。

在X射线激光研究中,最重要的两种泵浦方案是电子碰撞激发泵浦及三体复合泵浦。前者要求的激光泵浦功率密度高(一般高于 $10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$),只有拥有大型激光驱动器的实验室才能进行此类方案的演示实验;如果要进一步实现波长短于 100\AA 的软X射线激光,利用此类方案(如类Ni离子等),则需动用 10^{13}W 量级以上的巨型激光驱动器。然而,在复合泵浦方案中,尤其是在类锂离子复合泵浦方案中,得到同样波长的激光,所要求的电离能,比吸收能乃至激光泵浦功率密度不仅比电子碰撞激发泵浦的要求低得多,而且,比另一类类氢离子的复合泵浦方案也远为低,这就是说,采用类锂离子复合泵浦方案,我们有可能在较小规模的激光驱动器上演示X射线激光作用;而在较大规模的激光驱动器上则有可能得到更大的增益长度乘积值或得到具有重大应用价值的“水窗”波长范围($43.8\text{\AA}-23.3\text{\AA}$)的X射线激光。正是基于上述分析,我们选择了类锂离子复合泵浦方案作为主攻方向,探索在中国实现软X射线激光并继而将其波长推进入“水窗”范围。

1988年底,我们在上海光机所六路激光装置上成功地进行了复合泵浦类锂铝离子软X射线激光实验,首次在国内获得类锂铝离子 $5f-3d$ 跃迁(105.7\AA)和 $4f-3d$ 跃迁(154.7\AA)的软X射线激光的实验证明。实验中,线聚焦激光焦线长为 10mm ,靶面激光(脉宽 500ps)强度为 $1.5\times 10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$ 。测量表明,类锂铝离子 $5f-3d$ 及 $4f-3d$ 跃迁的软X射线激光的增益(G)分别为 3.1cm^{-1} 及 2.7cm^{-1} 。这一实验结果检验了我们的测试设备并证实了我们的预想,即可用类锂离子复合泵浦方案在较小规模的激光驱动器上实现软X射线激光。

1989年8月,我们在上海光机所的LF12激光装置(1053nm 激光波长)上,进行了复合泵浦类锂硅离子软X射线激光的初步实验。在泵浦激光(脉宽 900ps)能量仅 50J 的低功率运行条件下,首次成功地演示了复合泵浦类锂硅离子的 $5f-3d$ (88.9\AA)和 $5d-3p$ 跃迁(87.3\AA)的软X射线激光,激光波长已突破 100\AA 的界限。紧接着,于当年10—11月,我们又进一步利用LF12激光装置并在较低的靶面激光泵浦功率密度下完成了类锂硅离子软X射线激光的系统实验研究。实验中,我们不仅观察到类锂硅离子 88.84\AA ($5f-3d$)和 87.28\AA ($5d-3p$)两条谱线非常显著的激光放大,而且还同时观察到类锂硅离子 75.83\AA ($6f-3d$)和 74.64\AA ($6d-3p$)两条新谱线的显著的激光增益。实验中,采用了LF12靶场提供的多单元组合柱面透镜系统,能获得照明均匀性优良的线聚焦激光焦线。打靶用的线聚焦激光焦线有 20mm (长) $\times 130\mu\text{m}$ (宽)和 31.5mm (长) $\times 180\mu\text{m}$ (宽)两种。测量到的上述各跃迁波长的软X射线激光增益系数为 $(1.0-2.0)\text{cm}^{-1}$,最大增益长度乘积已达 4.2 。这是国际上第一次同时实现类锂硅离子 $5f-3d$ 、 $5d-3p$ 、 $6f-3d$ 和 $6d-3p$ 四个跃迁的软X射线激光,最短波长已达 74.6\AA ;尤其是第一次发现类锂离子软X射线激光的新的跃迁能级对 $6f-3d$ 和 $6d-3p$ 。这显然将大大更新人们对复合泵浦类锂离子X射线激光机制的认识。另外,我们还从实验上研究了激光增益沿靶面法线方向的空间分布和增益系数随靶面激光泵浦强度的变化。研究表明,在我们的实验条件下,类锂硅离子软X射线激光的最佳激光泵浦强度大约为

$2.5 \times 10^{12} \text{W/cm}^2$ 。如此低的泵浦激光强度 ($\sim 10^{12} \text{W/cm}^2$)，充分显示出复合泵浦类锂离子方案，在中国已有高功率激光装置上将软 X 射线激光推进到“水窗”波段及研制出实用性的 X 射线激光器等方面的巨大潜力。

类钠离子与类锂离子的电子层结构都是在封闭的内壳层外存在单个的价电子；故可以预料，和类锂离子一样，类钠离子的复合泵浦机制也会具有效率高、泵浦功率低且能迅速按原子序数 Z 定标至短波长等方面的优点。所以，我们在主攻类锂离子机制的同时，也在积极进行复合泵浦类钠离子 X 射线激光方面的研究。在多年的准备工作后，近年我们又成功地完成了类钠铜离子的复合 X 射线激光的初步实验。实验中，也是在低泵浦激光 ($\sim 2.5 \times 10^{12} \text{W/cm}^2$, 900ps) 条件下，首次观察到类钠铜离子的 $6g-4f$ 跃迁、波长为 72.22\AA 的软 X 射线激光。这是世界上第一次用类钠离子复合泵浦机制获得软 X 射线激光的实验证明。

与此同时，我们已将国际著名的计算原子结构与光谱的大型 Cowan 程序调试成功并投入运转。利用该程序计算了类锂硅离子和类钠铜离子的能级和有关波长，计算得到的各激光谱线的波长值与实验测量值符合得很好。我们也利用 Cowan 编码，通过模拟计算，探索了复合泵浦类锂和类钠离子两种方案按等电子序列将软 X 射线激光推进到“水窗”波长的具体离子及其跃迁。这些理论计算为进一步深入开展 X 射线激光的实验研究提供了依据。

另外，我们还致力于设计新型、有效的 X 射线激光靶。例如，通过对线聚焦激光辐照所谓“半圆柱型凹槽靶”产生的等离子体特性的全面诊断，发现此类靶设计，能产生向心会聚状等离子体，不仅可获得较高的电子密度与温度，而且有可能产生横向的较平坦的密度分布，从而有可能成为一种新型 X 光激光靶设计。这些贮备性研究也将为 X 射线激光研究的深入发展作出贡献。

关于上海光机所在九十年代的 X 射线激光研究的方向，建议如下：

1. 实验室 X 射线激光的近期应用目标重点可放在实现 X 射线激光全息，摄取活生物微结构(如：活的生物大分子)的全息图。X 射线激光全息术能达到原子和分子水平的高分辨率并获得高反差的完全三维全息图像。这将为生物结构和生命科学的研究带来革命性的推动。

2. 实验室 X 射线激光的近期研究目标是研制波长短于碳的 K 壳层吸收边即 43.8\AA (这是获得生物内部结构的高反差全息图像所必需)的高亮度软 X 射线激光。为此，一方面要将 X 射线激光的波长推至 43.8\AA 以下，即处在 $43.8-23.3 \text{\AA}$ 的所谓“水窗”波段；另一方面要致力于改善和提高 X 射线激光的相干性和单色亮度，开展 X 射线激光腔实验并探索 X 射线激光全息术。

3. 开拓新路。继续注意在中小型激光装置和其它类型的驱动装置上开展新的高效率的泵浦物理机制，如多光子电离、内壳层光电离过程的研究等，寻找新的更有效的泵浦机制与新的激光谱线，为 X 射线激光的不断持续发展和及早投入广泛实际应用铺路。

4. 加强技术基础。X 射线光学、X 射线光谱技术是 X 射线激光研究的重要技术基础，应当加强支持；高亮度超短脉冲激光作为 X 射线激光的新泵浦源也极有前途，不可忽视。激光等离子体 X 射线源作为非相干强 X 射线源的近期应用，如 X 射线显微术、X 射线光刻等，亦可促进有关技术基础的发展。

5. 实验室 X 射线激光及其应用的研究涉及激光物理、等离子体物理、原子物理、X 射线光学、X 射线光谱学以及生物物理学等多种学科，是有很强基础性和综合性的高技术科学，应在全国范围内建立广泛的学科基础及配套的研究队伍。

十年来，在 X 射线激光的研究中，得到来自多方面的关心和支持。该项研究得到了中国

科学院重大项目、国家自然科学基金和国家高技术项目的资助。许多研究工作是在上海光机所高功率激光物理实验室的六路激光装置和LF12激光装置运行组的密切配合下完成的。王之江所长一直对本项研究工作给以支持和指导。西德马普学会生物物理化学研究所所长 Schafer 教授为我们提供了 Kodak101-01 软片。在此,对所有支持者和合作者表示衷心感谢。

X-ray Laser Researches in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics

Xu Zhizhan

Abstract

The X-ray laser researches in this institute in 1980' s, by using high power laser produced plasma, are briefly reviewed and the main results are listed. The scheme of further studies are proposed.