

X 射线激光介质中的原子动力过程

李家明

(中国科学院物理研究所)

X 射线激光的研究是目前的一个重要的课题。它的实现将对基础研究和实际应用有着重大的影响。实现 X 射线激光的一个关键是如何提高增益系数。本文着重讨论 X 射线激光介质中的微观原子过程以及我们最近的软 X 射线条纹相机诊断实验。

自从在实验室里成功地观察到软 X 射线自发辐射放大以后^[1-3],人们对 X 射线激光的研究产生了很大的兴趣。X 射线激光的实现不仅将在基础科学研究中发挥重大的作用,而且还会对国防战略产生重要的影响。在基础科学研究方面,X 射线激光可以作为一种穿透力强的探针,它的时、空分布具有相干的特性,将为物理、化学、材料科学甚至生命科学提供前所未有的观测手段。例如在水的窗口波段(即 26—40 Å 软 X 射线区),通过 X 射线全息,可直接观测在水中活细胞蛋白质分裂活动的动态变化。在国防方面,核泵 X 射线激光的实现将可提供一种具有定向特性的能量束装置,对未来国防战略有重要的影响。同时,具有定向特性的核能量释放装置可提高核武器系统的效率,这可能将是新一代核武器的发展方向。但是目前已示范的软 X 射线自发辐射放大,其能量效率非常低;远远无法满足实际应用的需要。还有,自发辐射放大的软 X 射线波长也较长。因此,当前 X 射线激光研究的主要目标有二:(1)探索实现高效率的新方案,采用高功率激光器作为泵激能源,通过设计各种新颖的宏观激光靶,以促使特定的微观原子动力过程高效率地形成布居数反转。(2)寻求较短波长的 X 射线自发辐射放大,例如在水的窗口波段。下面介绍我们最近的一些研究结果。

一、我们的最近研究结果

首先,简单地说明 X 射线激光的工作原理。在 X 射线激光激励时,其工作介质必须包含某些特定的离化态原子而处于等离子体状态,因为在 X 射线波段尚无合适的反射镜材料(如何

制备这种特殊材料目前还处于研究阶段,尚未成熟),所以 X 射线激光是属于自发辐射放大型。当泵激能量淀积于工作介质而形成等离子体时,要求工作介质必须:(1)在宏观时、空上动态地组装成柱状构形,以利于自发辐射放大;(2)同时形成微观特定离子的能级布居数反转。宏观动态的组装成功与否完全取决于宏观靶的设计和泵激能源的安排。而有效地形成能级布居数反转则要依靠特定的微观原子过程。X 射线自发辐射放大的增益系数 K 是离化态原子特性和对应能级布居数反转的函数,即

$$K = (\lambda^3/8\pi)(\nu/\Delta\nu)(1/c\tau)\Delta N \\ = (\pi e^2/mc\Delta\nu)f\Delta N, \quad (1)$$

式中的 X 射线波长 λ , 频率 ν , 线宽 $\Delta\nu$, 激发态寿命 τ 和发射振子强度 f 皆为表示特定离化态原子的物理性质的量。能级布居数反转 ΔN 可由下列六种特定原子过程形成:(1)三体复合过程,即电子碰撞电离的逆过程。基于此过程,已示范出 X 射线自发辐射放大^[4,5,6]。(2)电子碰撞过程。以此过程为主,也已示范出软 X 射线自发辐射放大^[2,5]。(3)光共振激发过程,即利用工作介质中的强共振软 X 射线泵激。(4)光电离过程,即利用工作介质中的强连续 X 射线泵激。(5)共振电荷转移激发过程。(6)离子共振能量转移过程。因此,欲寻求理想的 X 射线激光方案,需要根据原子动力过程而选取合适的工作介质,并进行宏观靶的设计。

在相对论原子自洽场理论基础^[6,7]上,建立了离化态原子能级结构的数据库^[6,7]。对有兴趣的 X 射线波段,能够很方便地选取所有合适的元素和其相应的离化态原子,为设计宏观靶服务。对主量子数变化 ($\Delta n \approx 0$) 的跃迁 X 射

线,其波长与离化度平方成反比。对主量子数不变化 ($\Delta n = 0$) 的跃迁 X 射线(一般通过电子碰撞激发),其波长与离化度成反比。对于选定的 X 射线激光跃迁,还建立了相对论性原子组态相互作用理论计算程序^[4],可精确地计算波长 λ 和发射振子强度 f 。线宽形成机理主要有激发态寿命加宽、多普勒加宽、电子碰撞加宽和斯塔克加宽。斯塔克加宽在高密度等离子体中较为重要^[5],它对线宽的贡献将影响能量增益系数值的确定。对应着已建立的离化态原子能结构数据库的能级,我们系统地研究了电子碰撞激发过程^[6]和 X 射线吸收过程^[7],X 射线吸收截面不仅在光电离泵激方案中可用来计算 ΔN ,而且它还是计算 X 射线激光损耗系数的必要基础。只有在损耗系数小于增益系数的条件下,才能实现 X 射线激光。

我们最近提出一种新型激光靶设计^[12,13],即采取微管靶以达到较高的电子密度,从而增强了三体复合过程。其工作原理如下:首先采用高功率激光将能量淀积于微管靶内,并在微管靶的约束下,形成了高温高密度的等离子体柱。然后,通过辐射冷却和电子导热过程,该高密度等离子体柱处于非平衡的复合状态。由于电子密度很高,三体复合为主要过程。三体复合过程优先形成激发态,则产生了能级布居数反转。这里,我们给出了皮秒时间分辨的 X 射线光谱的新结果^[14]。这个结果清楚地阐明了三体复合方案的工作原理。实验采用了镁微管靶。由中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所和中国科学院物理研究所的有关课题组协作完成。所有的实验都是在国家高功率激光物理开放实验室里完成的。时间分辨的 X 射线光谱测量,采用了中国科学院西安光学精密机械研究所最近研制成功的“可拆卸的软 X 射线皮秒变象管扫描相机”,其时间分辨率可达 33ps。扫描相机观察时间发展的记录清楚地表明等离子体柱的温度非常高,所以其中只有类氢 Mg 离子(例如 $Mg_{xii} 3 \rightarrow 1$ 线)。扫描相机记录还表明,在以后的冷却复合中,三体复合过程优先产生类氢 Mg

离子的激发态(如 $Mg_{xi} 1snp, n=5, 4, 3$)。因此,在发射类氢($Mg_{xii} 3 \rightarrow 1, 7.11 \text{ \AA}$)线后,依次出现类氦($Mg_{xi} 5 \rightarrow 1, 7.31 \text{ \AA}$)线, ($Mg_{xi} 4 \rightarrow 1, 7.47 \text{ \AA}$)线,最后才是($Mg_{xi} 3 \rightarrow 1, 7.85 \text{ \AA}$)线。在这样强烈的复合过程中,可形成($Mg_{xi} 4 \rightarrow 3$)能级布居数反转 ($\Delta N \approx 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$),预期将产生 ($Mg_{xi} 4 \rightarrow 3$) 154.6 \AA 的 X 射线自发辐射放大。

二、讨论

在实验手段方面,已建立了一套完整的皮秒级时间分辨 X 射线光谱测量系统。因此,能够很清楚地监测各种 X 射线激光方案中的原子动力过程,从而可以判断各类宏观靶设计的效果。目前正在发展软 X 射线光谱 (100 \AA 波段)的测量手段,不久即可直接测量软 X 射线自发辐射放大,这将能够更有效地判断各类靶设计的效果。在理论方面,已建立了初步的原子物理数据库和一维拉格朗日流体模拟计算程序(WL 码)^[15],可以对各类激光靶实验进行设计和模拟。若要清楚地分析 X 射线激光实验结果,理论模拟是至关重要的。WL 码已成功地模拟了高功率激光内爆微球靶的动力过程^[15],与四分幅 X 射线阴影成像诊断结果(即在纳秒内获得四幅不同时刻的二维 X 射线阴影图象)相符合,阐明了一维模拟程序的适用范围。为了获得 X 射线激光的最佳能量效率,在时、空演变过程中,动态地将激光工作物质组装成柱状是至关重要的。因此,发展皮秒级分幅成像技术将是非常有用的。最后要指出的是,在高功率激光泵激 X 射线激光的研究工作中,实验和理论方法的进一步发展和完善对激光惯性约束聚变研究都是很有用的。激光惯性约束聚变的内容已超出本文的范围,故不在此赘述,但它是探讨应用聚变能量的一种重要方案。

- [1] D. L. Matthews et al., *App. Phys. Lett.*, **45**(1984), 226.
 [2] D. L. Matthews et al., *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 110.

(下转第 732 页)