

X 射线激光的研究进展

Progress in the Research of X-ray Laser

奇 云

(安徽省淮南职工大学, 副教授 淮南 232001)

一、历史回顾

1960 年,在美国加州南部的休斯顿实验室内,梅曼(T. H. Maiman)以红宝石作为工作介质制成了世界上第一台激光器。这种新光源一问世,就以其高亮度、单色性和方向性等区别于普通光源的特性吸引了广大科技工作者致力于进一步的基础研究和应用研究,使激光技术获得了迅速发展。60~70 年代,前苏联科学家提出 X 射线激光的概念。70~80 年代初,美国利用核爆炸产生的 X 射线激发产生了 X 射线激光,并于 1984 年宣布成功地实现了核泵浦的 X 射线激光。当时,美国氢弹之父泰勒向里根政府建议,以 X 射线激光器作为先进防御系统的基础,并由此促成了美国的战略防御计划。继美国之后,英国、法国、日本和中国等国均投入较大力量进行研究,一场世界性的 X 射线激光研究、开发的角逐遂日趋升级。

二、前景诱人的 X 射线激光

X 射线激光为什么会引起科学家们如此大的兴趣?它与普通激光有什么不同?其科学意义科学价值何在?根据现已掌握的研究成果和知识,X 射线激光将会具有一般 X 射线源所没有的许多特点。(1)高亮度。其亮度(光子/脉冲/立体角)比同步辐射源高 6 个量级,比激光等离子体 X 射线源高 4 个量级。(2)单色性优于所有 X 射线源。(3)相干性可以用来产生原子尺度的全息图像。(4)高时间分辨率。可以用来观察 1PS(10^{-12} S)内的原子距离的运动,可用于击波阵面运动的观察,位错运动的衍射实验。(5)可用于光刻,线宽可细达 20 纳米($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)。(6)利用其干涉效应,可制成线宽和间隔小于 100nm 的大面积的光栅。

X 射线激光将带来材料、半导体、精密机械、生物工程等许多领域的革命。例如:美国密歇根大学于 1991 年开发出“T 立方激光”(Table Top Terawatt,桌上型太瓦),其装置大小可放在桌面上,在

一瞬间可产生太瓦级(1 太瓦等于 1 万亿瓦)的输出功率。我国三峡水电站完全建成后装机容量为 176 亿瓦,所以太瓦的瞬时功率相当于 60 个三峡水电站的功率。只是这种已开发出的 T 立方激光的振荡、出功时间只限于 100 飞秒这样短的时间间隔里(1 飞秒等于 1000 万亿分之一秒)。密歇根大学下一步的两个目标:一是使输出功率提高到百太瓦级,并实现振荡 10 次以上;二是使振荡次数仍保持现状,但输出功率提高到拍瓦级(1 拍瓦等于 1000 万亿瓦)。T 立方激光还能产生出几亿个大气压这种人类从未面临过的环境,因此它本身就具有开拓诸多新用途的潜力。例如可进行极限状态下物理性能及金属氢合成等新材料制备的研究,还可以开发合成人工钻石新方法。然而,人们开发 T 立方激光的最终目的,仍在于要实现 X 射线激光。

可以有把握地说,X 射线激光广泛应用的前景一旦实现,将会对非线性光学、原子分子物理、等离子体物理、生命科学、表面科学以及工业和医学等研究和应用领域产生重大而深远的影响。

三、X 射线激光的产生

X 射线激光固然美妙诱人,但促使 X 射线激光激发、产生却非易事。因为 X 射线激光的光子能量比普通激光的光子能量大几个数量级,不能用中性原子或分子作为激光工作物质,除非用内壳层电子,但普通内壳层电子不易被泵浦。理论和实验均证明,要产生 X 射线波段的激光,一个重要的途径是用高剥离态的离子作工作物质。

为了使中性原子达至高剥离态,必须“拔去”原子较外层中的 10 个或更多个电子,使跃迁得以在很大的能级差上进行。这就需要能提供极大能量的泵浦源。同时,产生激光的另一个必要条件是对激光能级的泵浦速率必须大于该能级向下能级跃迁的自发跃迁速率,对于高次离化的离子的高能级来说,自发跃迁速率也大得多。因此,产生 X 射线激光的泵浦源还必须能提供极高的功率密度($\geq 10^{13}\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)。大量研究表明,产生 X 射线激光需要应用

与惯性约束聚变相类似的泵浦源。这样高功率的泵浦源只有三种方式可以产生,即大型高功率光学激光装置、高强度粒子束和核爆炸泵浦。

被拔去部分电子的原子,其核仍为原来原子的核,如外层电子数与氦原子相同,我们就把它称作类氦离子。同理,如外层电子数与氢原子相同,就称作类氢离子。此外还有类锂离子、类镍离子等。

1984年,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)首次成功地演示了类氦离子电子碰撞激励法产生的软X射线激光;此后,普林斯顿大学的研究小组采用类氢或类锂离子的“三体复合法”产生X射线激光。从此,X射线激光研究进入了新阶段。

这两种方法均靠大功率脉冲激光器在等离子体中产生相应的激光作用条件,而且,受激辐射和激光增益所需的粒子数反转均由较低能级的快速辐射性衰变产生。下面对这两种方法予以简介。

四、三体复合法简介

1. 类氢离子三体复合法

类氢离子三体复合法是利用激光器先产生具有高比例全裸离子的等离子体的。激光脉冲过后,等离子体被封闭在磁场之中,而且通过辐射损失进行冷却。磁场使电子保持在高密度状态,这有利于三体复合,因为三体复合的速率随电子密度增大而提高。这也有利于把等离子体变成符合激光器要求的细长的几何形状,能使激光器的效率比其它已投入使用的X射线激光系统几乎提高100倍。

三体复合使高激发能级进入高密状态,而碰撞辐射级联过程又能使能级密度发生衰变。在氢离子中,能级2通过辐射迅速衰变,进而在能级2和能级3之间实现粒子数反转。

2. 类锂离子三体复合法

类锂离子的原子结构与类氢离子的原子结构相似。因而,类锂系统中会产生同样的过程。这样,3~2能级跃迁具有高辐射衰变率,而且会在4~3能级和5~3能级跃迁产生增益。类锂离子的优点是:对具有相同电离潜力的离子,它具有更短波长的激光跃迁。也就是说,具有更好的“量子效率”。

近年利用高亮度、超短脉冲激光作为泵浦源的强光场场致电离等离子体,通过复合机制产生X射线激光的方案正引起人们重视。高亮度超短脉冲激光的功率密度高,它提供的强电场引起的场致电离可使电离后的自由电子温度低,泵浦激光脉冲过去后马上就可开始三体复合,不需要通常复合机制设计的冷却降温过程。而且这种电离差不多是完全的,可以造成激发态和基态之间的反转,形成短波长X射线激光,大大降低对泵浦激光能量的要求。

五、电子碰撞激励法简介

电子碰撞激励的基本思想是:通过激光等离子体中的自由电子与离子碰撞,将处于基态的电子激发到增益介质的上能级。由于上能级与基态之间有较强的偶极跃迁相连,较容易被抽空,有可能实现上下能级之间的粒子数反转布局。

1. 类氦离子电子碰撞激励法

1984年,劳伦斯·利弗莫尔实验室利用当时世界上最大的激光装置Novette的两路激光,从两面聚焦在晒的薄膜靶上,首次成功地在20.6nm和20.9nm的波长上产生了高增益的软X射线激光。他们所用的就是电子碰撞激发机制中的“类氦法”。高密度的高温等离子体是由大型激光器产生的。在类氦等离子体中,大量离子被碰撞激发到3P能级。3S能级离子数相对较少,因为3S能级很快辐射跃迁到基态,而且在3P与3S能级之间实现粒子数反转,产生受激辐射。

用双束激光打到薄膜靶上形成的等离子体,有较好的空间均匀性,并且两边对称,因而激光束在传播增益过程中不发生偏转(偏转角为零)。但由于整个过程是薄膜靶烧穿膨胀过程,等离子体温度密度缓慢下降,所以维持时间较短。

美国海军实验室(NRL)用激光束单方面照射厚靶取得了成功。厚靶的优点是可以获得较稳定的增益区和较长的维持时间,但等离子体中电子密度向着泵浦激光入射方向有较陡的空间梯度,这将引起X射线激光在传播过程中发生折射而偏转到增益区外。为了克服这一缺点,中国工程物理研究院等单位于1990年采用双靶对接方案,即利用LF-12激光器的两束激光相对照射两块成一定角度放置的锗靶,使总靶长达到4厘米,测得类Ne-Ge的波长 $\lambda=23.2\text{nm}$ 和 23.6nm 线的增益值达到14,以后又采用四靶串接,加反射镜和其它改善光束质量的措施,使上述两条激光线达到深度饱和的激光输出和发散角小于 1mrad 的高质量光束。

英国卢瑟福实验室(RAL)也于1990年采用相似的双靶对接加反射镜方案,在类Ne-Ge离子上测得 $\lambda=23.6\text{nm}$ 线达到饱和增益的激光输出。

近几年,利用电子碰撞激发产生X射线激光的实验相继进行,在类氦的Ti、Ni、Cu、Zn、Ge、Br、Rb、Sr、Mo、Ag等离子体中观察到了波长从34.8nm到8.2nm的一系列激光辐射放大。这些实验加深了人们对X射线激光物理的认识。

2. 类镍离子电子碰撞激励法

与类氦结构类似,由电子碰撞对类镍离子中的4d上能级有较大的单极激发速率,4p下能级与3d基态能级由很强的共振偶极跃迁相联。因此,类镍

离子中的 4d 与 4p 能级之间有可能通过电子碰撞实现粒子数反转,产生 X 射线激光。

1987 年劳伦斯·利弗莫尔实验室用激光装置 Nova,在类镍 Eu 离子的 4d—4p 能级间实现了粒子数反转,产生波长为 7.1nm 的 X 射线激光。稍后,又和英国卢瑟福实验室分别在类镍 Yd(5.0nm)、类镍 Ta(4.5nm)、类镍 W(4.3nm)、类镍 Au(3.6nm)等离子中观察到激光辐射,成功地进入了“水窗”波段。

类镍离子比类 Ne 离子有较高的泵浦效率,为了得到同样波长和增益的 X 射线激光,同类 Ni 离子所需的泵浦源强度只需类 Ne 离子的几十分之一。

电子碰撞激发机制只能利用同一主层之间的跃迁,泵浦效率低。美国麻省理工学院(MIT)提出了一种用系列脉冲打靶的泵浦方案。他们用间隔 7.5ns 脉宽 80PS 的两个脉冲,先后打 Nb 靶,实现了类 Ni—Nb 离子的波长 20.42nm 谱线的增益输出。

利用毛细管放电装置产生电子碰撞激发 X 射线激光的方案也取得初步进展,它的泵浦效率高,并且技术简单,因而大大降低 X 射线激光器的成本。

3. 激光靶分类

在类氦结构和类镍结构的 X 射线激光实验中,使用的激光靶通常分为两类。第一类是泵浦激光从靶的两面线状聚焦在薄膜靶上,使薄膜靶迅速加热,爆炸后形成温度和密度都比较均匀的柱状等离子体,这样的均匀等离子体的密度和温度的变化梯度均较大,而且对 X 射线激光束的折射严重。这种构型具有制靶容易、增益区维持时间长等优点,但不适宜产生波长很短的 X 射线激光。第二类如后所述。

六、X 射线激光的波长和增益改善

从 X 射线激光应用要求看,X 射线激光波长要进一步缩短,激光波长须在 2.3~4.4nm 的“水窗”波段中,因为生物细胞都是碳氢化合物,在 4.4nm 处正好是碳的吸收边,所以可用这个波长拍摄生物活体细胞全息图。为了产生波长短于 4.4nm 的 X 射线激光,需用动能较大的电子碰撞激发由原子序数较高的元素所组成的等离子体,因此,泵浦激光的能量也要相应提高($\geq 10^{16} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)。与电子显微术相比,用 X 射线成像,生物样品可完全处于水合物状态,使活细胞能与原来状况相同的生理学条件下成像。X 射线激光源的光亮度和窄脉宽,更提供了胜过常用同步辐射 X 射线成像的独特优点,因为它能拍摄在 1nm 内的“快照”,从而消除细胞内或细胞器内布朗运动产生的模糊。生物界评论说,这对现代生物基因研究是划时代的革命性变化。

在“水窗”波段实现了 X 射线激光的放大之后,X 射线激光研究工作者的注意力转到了第二个目标:在“水窗”波段实现 X 射线的饱和输出。

1983 年,劳伦斯·利弗莫尔实验室提出采用“双靶对接方法”。这种方法采用两束相向的泵浦激光线聚焦后辐照相向依次排列的平板厚靶的相对面,以产生膨胀方向相反的两段等离子体柱。X 射线激光从第一段等离子体的增益区折射出来,进入第二段等离子体的增益区而得到进一步的放大。

1991 年 6 月,卢瑟福实验室在对接的双靶远端加上 X 射线反射镜,形成“半腔”式结构,使 X 射线激光两次通过增益区,“双通”放大了 X 射线激光。在实验中,类氦 Ge 离子中的两条 $J=2 \rightarrow 1$ 跃迁激光线的增益长度(GL)达 21,在世界上首次实现了波长为 23.2nm 和 23.6nm 的软 X 射线激光的增益饱和输出。随后,劳伦斯·利弗莫尔实验室用薄膜靶实现了类氦 Se 离子的 X 射线激光(波长为 20.6nm 和 20.9nm)的增益饱和输出。

大量计算和实验证明,采用电子碰撞激励机制不可能在现有的激光装置上产生波长比 20nm 短得多的饱和增益 X 射线激光。目前虽已将波长推到了“水窗”,但增益强度还不太高,光束质量也不高。近两年的研究进展引人注目,使人们看到了在“水窗”波段实现 X 射线激光增益饱和输出的希望。迄今,美国已经作了两个重要演示,一是用 4.4nm 激光拍摄了大白鼠精子的全息像,另一个是利用 20nm 左右的激光做了 X 射线分辨率演示。

我国在 X 射线激光研究中也成果显著。中国科学院上海光机所于 1988 年在国际上首先获得波长为 10.57nm 的软 X 射线激光后,第二年又在“神光”激光装置低功率运行条件下继续实验,在国际上首次获得复合泵浦类锂离子的 4 条新波长的软 X 射线激光。随后又在 1990 年、1991 年分别获得了 7.22nm 和 5.77nm 的 X 射线激光,确立了这方面的国际领先地位。我国的这些实验成果,已被日本、德国等一些著名实验室重复证实。近年,我国科学家采用独创的多靶串接加反射镜技术,利用“神光”装置为驱动源,使锗等离子体类氦离子产生的波长为 23.3nm 和 23.6nm 的 X 射线激光谱线饱和,也达到了世界先进水平。

X 射线激光器研究工作进展迅速,尤其在向小型化发展及开始将其应用于实践方面取得的进展令人振奋。而影响程度则将取决于它们性能的改进和成本的降低,如若把 X 射线激光器成功地转入商品化,那么这些设备应能在高增益长度($GL > 4$)下工作,而且所需的驱动激光器的造价也要低得多。

X 射线激光的研究正在深入展开,在富有创造力的科学家们的努力下,有希望把 X 射线激光技术应用到更多更新的领域。(责任编辑:蔡德诚)