

X射线激光研究的进展

奇 云

(安徽省淮南职业医专)

一、大放异彩的X射线激光

自从1960年第一台激光器问世以来,科学家们一直在寻求能工作在X射线波段的激光器。根据现有的认识,X射线激光具有X射线源所没有的许多特点:

1. 亮度(光子/脉冲/立体角)比同步辐射高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象。
4. 高时间分辨率(10^{-12} s),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测,位错运动的衍射实验。
5. 用它来进行光刻,线宽可达20nm(10^{-9} m)。
6. 用它的干涉效应,可以制成大面积的线宽和间隔小于100nm的光栅。

毫不夸张地说,X射线激光的最终目标的实现,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。

二、X射线激光的产生

普通的激光原理是利用激光增益介质中的受激辐射过程产生的光放大,激光光子的能量

等于激光介质中的电子由高能级向低能级跃迁时的能量损失。

由于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,因此,产生X射线激光不能用中性原子或分子作为激光介质。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,一个重要的途径是激光介质用高剥离态的离子而不是原子。

为了使中性原子高剥离态,必须“拔去”原子较外层的10个或更多个电子,使跃迁得以在很大的能级差上进行。这就需要极大能量的泵浦源,并且采用与产生传统光学激光完全不同的泵浦手段。

70年代至80年代初,美国花了很大力量,利用核爆炸产生的X射线来激励产生X射线激光。1984年,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室和普林斯顿大学的研究小组首次做了无可争辩的高增益激光作用表演。这两个研究小组产生X射线激光的方法不同:一个是基于类氢或类锂离子“三体复合法”,另一个是基于类氢或类镍离子的“电子碰撞激励法”。从此之后,这两种方法便成为X射线激光研究取得成功的基础。

这两种方法均靠大功率脉冲激光器在等离

特定规则的组合成了文字、语言,进而有了逻辑、思想……。

人在婴儿期的事情,我们都记不得,到了一岁、二岁才牙牙学语。等到学会了语言之后的事情才慢慢能记得。这与电脑是相似的,电脑如没有DOS或Window的软体,是不能工作的,这些工作的规则是后来输入的。但是一旦进入Window中工作时,我们就不再思考原有的0与1是最基本的运作方式。

人又何尝不一样呢?我们活在自行开发的软体之中,爱得要命,恨得要死。但是回到其根本,不过是神经中的一些0与1,是电位差而已。只要你跳出了Window,一切都变成没有意义了。

我想以苏东坡大师的一首诗,作为这篇文章的收尾:横看成岭侧成峰,远近高低各不同,不识庐山真面目,只缘身在此山中。

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。

三、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用激光器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。而且,这样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,也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度状态,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,而且在能级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跃迁具有高辐射衰变率,而且会在4~3和5~3跃迁上产生增益。

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”。

四、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居。

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,从两面聚焦在硒的薄膜靶上,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。

在这种反转的等离子体中,增益系数随着电子密度的增大而增大,但极大值受3s与3p能级间的碰撞退激发过程制约。3p上能级的碰撞布居速率还随电子温度的升高而增加,但电子温度过高时,可能会造成等离子体的过离子化,对产生高增益的激光不利。

英国、法国、中国、日本等国的几个国家级实验室也相继进行了大量的电子碰撞激发产生X射线激光的实验,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,产生了波长为7.1nm的X射线激光。稍后,它又和英国卢瑟福实验室分别在类镍Yb(5.0nm)、类镍Ta(4.5nm)、类镍W(4.3nm)、类镍Au(3.6nm)等离子体中观察到激光辐射,成功地进入了“水窗”波段。

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容易使X射线激光束在其中得到充分的放大,但增益区的维持时间有限。

第二类是泵浦激光线聚焦后单面辐射平板厚靶,这种构型产生出的等离子体的密度和温度的变化梯度均较大,因而对X射线激光束的折射严重。但这种构型具有制靶容易、增益区维持时间长等优点,但不适于产生波长很短的X射线激光。

五、X射线激光的波长和增益改善

从X射线激光应用要求看,激光波长须在2.4—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。

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射线激光的饱和输出。

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表面,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后,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。

大量理论计算和实验结果证明,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。工作在“水窗”波段的饱和增益X射激光需要泵浦激光能量至少大于10kJ。目前虽已将波长推到了“水窗”,但增益强度还不够,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射线激光增益饱和和输出的希望。

目前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象,另一个是利用20nm左右的激光做了X射线分辨率演示。

中国在X射线激光研究中成就卓著。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,确立了在国际上的领先地位。中国科研人员的实验结果,已被日本、德国等一些著名实验室重复证实。近年,中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,达世界先进水平。

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。如果把X射线激光器成功地转入商品化,那么这些设备应在高增益长度($GL > 4$)下工作,而且所用的驱动激光器的造价要低。X射线激光的研究正在深入开展,富有创造力的科学家们正把X射线激光技术应用到崭新的领域。

书讯 由首都师范大学物理系王德云教授编著的《原子核物理和粒子物理概论》,适宜师范院校师生和中学教师参考。欲购者请按每本4元汇款至本刊编辑部。