

硬 X 射线激光器研制进展

陈百万 编译

最近一些实验上的发现,指出了一种制造 X 射线激光器的可能的途径.这就是发现了在稀有气体原子团中,原子内壳层多光子激发的新机制,使得我们更加接近制成实际可用的、硬 X 射线激光器的目标.

早在本世纪 50 年代后期,在近可见光谱区域内,已经获得了受激辐射的光放大器件.其后不久,接踵而来的是努力设计更短波长的激光器.1960 年,美国人梅曼(T.H.Maiman)研制成了世界上第一台可见光(波长为 694.3nm 的红光)激光器——红宝石激光器.另一个很大的进步是美国劳伦斯·利物莫尔国家实验室,取得了用大功率“NOVA”激光器驱动类氪离子产生 20nm 自发发射强放大的实验证据.紧接着在软 X 射线范围内出现了相当大的进展.然

而,通向更短波长的 X 射线激光器的路始终被证明是艰难曲折的.目前,世界各地的研究小组都在致力于 X 射线激光器的研究.这种巨大的努力是被这种器件的广泛应用潜力所驱使的,它的应用从生物成像技术(具有分子分辨能力的成像技术)到原子和分子物理学、材料科学和化学,以及工业加工和防卫工程等广泛的领域内都有非常巨大的潜力.

要获得更短激光波长的最大困难,是要在介质中实现粒子数反转必然需要更强大的抽运功率.众所周知,相关的原子激发态的寿命大体上与波长的平方(λ^2)成正比,因此单位时间内必须抽运到该能级上去的原子数必然与 λ^{-2} 成正比.而跃迁能量(ϵ)是与 λ^{-1} 成正比的.由此可知,为了维持受激粒子数,单位时间内所需要的

双眼视网膜上的视象差异(双眼视差),这种差异引起的神经冲动传送到大脑皮层,经大脑皮层视区的综合作用便形成一个具有立体感的视觉影象,从而产生立体知觉.在观察相隔一定距离的两个物体时,便能感知到一个物体是位于另一个物体的前面或后面,还能判断它们相隔的距离,这就是深度知觉.所以,双眼视差是深度知觉的基础.正是由于人双眼的这种特殊的

构造和生理机能,被绘画艺术家们加以巧妙利用,通过运用物体间透视关系、光影变化、颜色深浅等深度知觉线索,在平面上表现空间,为我们在一张平面图上“观看出”物体的空间立体图案提供了重要信息.

风靡一时的三维立体画,并非时下的产物,它的发明已有近 100 年的历史.早期的立体画一般制成左、右对称周期性图形.这样,利用左右眼对视从而将两个物体看成三个物体呈现立体效果.近年来,由于电脑介入三维立体画的制作,情况和以往有所不同,这类立体画在平面看来,是一些花布似的图案,但若利用双眼融合功能,则可看出隐藏在其中的立体图形.当然,无论是早期制作的还是近几年制作的立体画,都是利用了人眼的生理机能(双眼视差和焦距的协调作用)从而在二维平面上创造出三维立体效果.

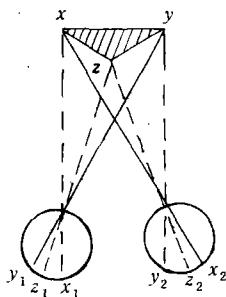


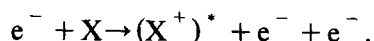
图 2

能量与 λ^{-3} 成正比。例如,为了在一个铜原子的最内层保持一个空位(具有 10^{-15} 秒的寿命),每秒钟需要对 8keV 的光子(波长 0.15nm)吸收 10^{15} 次,即要保持这一个 K 层空位大约需要 1 瓦的功率。美国全部的电力消耗将仅够保持 0.1 纳克的铜被连续抽运。另外,还必须使同时受激的原子数相应地提高。粗略的分析表明,对于给定的光放大,所需要的抽运功率必须大体上与相应波长的负 5 次方(λ^{-5})成正比。

显而易见,只有依靠在极短的时间内达到实现粒子数反转的目的和寻找向被限定的介质体积内大量释放能量的最有效的手段,才有可能获得更短波长的 X 射线激光。因此,功率的集中就成了 X 射线激光器设计的中心问题。解决方法就是寻找新的能量释放和集中的方式。这就是美国麦克菲森等人 1994 年在英国《自然》杂志上所报告的工作的关键问题。他们用超强度的短脉冲(亚皮秒脉冲)紫外激光照射氙(Xe)原子团,观测到了 Xe(L)发射的波长为 0.2~0.3nm 的 X 射线,得到了 L 壳层空位的高度离子化的氙原子所构成的气相氙原子团直接产生多光子的实验证据。他们的氙原子团是用冷却的脉冲气体喷注产生的。所用的紫外线激光器具有 248nm 的激光波长,约 0.3 皮秒的光脉冲宽度和约 0.7 太瓦(0.7×10^{12} W)的峰值功率。聚焦系统产生约 8 艾瓦(EW, 即 10^{18} W)的最大强度。在此之前,他们用同样的方法已经观测到氙原子团的原子由于 L 壳层的跃迁而产生的 0.5~0.7nm 的 X 射线。在他们的实验中,有两个物理现象发挥着重要作用:其一是原子团多光子激发新方式;其二是高强度光脉冲在等离子体中传播的相对论效应(自沟道效应)。多光子激发能使原子团中的原子形成具有深部电子空位的离子;然后,这种离子通过与电磁辐射的自沟道传播方式相联系的 X 射线的发射而衰变。

当用强短波脉冲光源照射范德瓦尔斯原子

团或分子时,强外场引起其原子外层弱束缚电子的振荡。外壳层电子的这种运动是相干运动,形成一种振荡的电荷云。只要辐射强度和原子团的大小满足一定关系,就能使能量高效率地向紧束缚的内壳层电子转移。就是说,大量抽运光子的能量能够通过来自外层的光电子而转移给内壳层电子并引起内壳层电子的电离,产生深部原子空位。这个过程是通过原子团内的电子-原子非弹性碰撞产生的:



这种现象能够使构成原子团的原子产生大量的内壳层空位,而保留一些束缚较弱的外层轨道电子。具有这样的“翻转的”电子组态的原子叫做“空原子(hollow atoms)”。通过调整激发强度(取决于原子间距和内壳层束缚能),就使得人们能够有选择地产生内壳层激发类型。对于这样的系统,空原子的产生能够成为占优势的激发方式。它的发现和利用,可使 X 射线激光器的实现具有了实际的可能性。

在等离子体中,强亚皮秒紫外辐射在空间上受约束的(即沟道式的)稳定的传播方式的形成,表明了相对论效应(自沟道效应)的存在。由于相对论质量移动和等离子体电子组分位移的联合作用而出现了这种自沟道效应。它导致抽运功率释放的空间结构,产生沿电离沟道的多光子内壳层电子喷射。

原子团的多光子激发方式以及等离子体中电磁辐射传播的约束方式(即自沟道相对论效应)的蓝图,给了我们实现对积存能量进行特殊的相-空间控制的希望。对于实现 X 射线的放大作用,它无论在产生所必须的功率密度方面,还是在能量传播的约束方面,都会大大超过迄今为止已知的其他方法。它给硬 X 射线激光器的实现带来了新的希望。

(编译自英《自然》370 卷, 1994.8.25)