

# 世界上第一个软X射线激光器

B. G. Levi

在1984年10月于波士顿举行的美国物理学会等离子体分会上,以丹·马修斯为首的劳伦斯利物莫尔实验室的一个研究小组宣布,他们研制成功了世界上第一台软X射线激光器。他们对一百多次的试验发射进行了广泛的测量,其结果表明,激光器在20nm附近放出的两条谱线不仅在强度上比瞬时发射的要强近700倍,而且其行为也具有激光器的特征。自从60年代末从理论上提出X射线激光器的工作机制以来,人们一直在探索获得实际X射线激光器的途径,丹·马修斯小组宣布的结果就成了这一探索活动的新的里程碑。现在可以期望,其他研制X射线激光器的科学家将会加入利物莫尔小组的行列,共同

把他们的激光器向更高的效率,更大的输出功率及更短的波长方向推进。

大家公认,极短波长激光器不仅作为一个新的研究领域具有重要的意义,而且具有实际的用途,如生物结构的X射线全息照相,集成电路的光刻技术及更精密的光谱学研究等等。战略防卫系统的设计家们对X射线激光武器也抱有很大的希望。

在波士顿会议上,普林斯顿等离子体物理研究室的斯·苏克威尔也宣布了他们的结果,软X射线光谱强了一百倍。此后,他们在实验中又加上一个X射线反射镜,结果确实表明是受激发射。利物莫尔及普林斯顿两家的实验结果都是核聚变研究的副产物。

的银都是开采自雅典附近的拉夫里昂银矿。在某些硬币有比较高的金和锡的含量,这可以解释为它们的金属源是“爱莱克特龙”——金和银的自然合金。

**武器** 在古代应用过的某些种类的钢,继续引起现代研究工作者的好奇心。其中,大马士革钢(一种有花纹的优质钢)就是这样的。尽管有许许多多的研究,但大马士革钢的配方仍然尚未揭晓。在一篇文章<sup>[13]</sup>中报导了这种钢制品表面结构和成分的许多物理研究的结果,并试图把它特别坚固的结构形成同在严格控制条件下应用不是欧洲兵器匠所用的物质进行多次加热和冷却处理的工艺规程相联系。作者提出了一个设想:大马士革钢炼得的初始阶段是制成锭子,将铁和木炭混合加热到1200℃而成钢,含碳量约1.6%。铸件的缓慢冷却可产生两种金相:沿分界线被渗碳体包围的奥氏体粗大晶粒,

也就是“软”钢。在700—900℃锻造划分成奥氏体大晶粒和渗碳体椭圆体。中、小颗粒混合体的急剧冷却促使奥氏体转化为细针状的马氏体。冷却后退火(淬火)产生必要的复合性质——坚固性和韧性。再经过表面细加工就造成了“大马士革钢。”所以,“大马士革钢”——就是钢的优质的控制法。

在另一篇文章<sup>[14]</sup>中提出一种意见,说大马士革钢的退火是采用浸入油中或者直接用气流吹风。

所举的例子证明了核物理方法在考古学各部门的成功的应用。一整套的有关方法是极其广泛的,而且在逐年地扩大。既然,这些方法基本上是没有破坏性的,所以它们最适宜于对考古学的独一无二的古器皿的分析。〔原图3表1参14从略〕

〔王学敏摘译自《Атомная Техника За Рубежом》, 1985, №6〕

下面分别介绍利物莫尔小组及普林斯顿小组的实验情况。

**利物莫尔实验** 在制造X射线激光器的过程中遇到的一个最大的挑战是如何提供足够的功率密度使得在等离子体寿命期间能产生大量的粒子数反转。利物莫尔小组使用双束Novette532nm激光器输出的450微微秒的脉冲光泵浦他们的软X射线激光器。Novette每束的功率密度是 $5 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$ ，用它们使高Z材料（常用的是Se）做成的靶子蒸发以形成电子结构类似Ne的离子等离子体。在等离子体内的电子与这些类Ne离子碰撞使它们激发，形成理论所预言的 $2p^5 3p-2p^6 3s$ 两个能级之间粒子数填充的反转。它们之间从 $J=2$ 到 $J=1$ 之间的跃迁就产生了20.63nm和20.96nm两条谱线的放大。令人惊奇的是，理论上预言增益最大的 $J=0$ 到 $J=1$ 的跃迁谱线18.3nm，实验上却根本没有看到。这一发现就促使人们要对目前流行的并支持这种激光器工作的原子模型进行一些新的评价，同时应当在实验室内要进行进一步的研究。

利物莫尔小组认为，在早些时候的实验中没有任何放大作用，其原因是电子的密度梯度太大，导致X射线被衍射出高增益区。为此，罗森，黑格尔斯坦等利物莫尔小组成员与KMS聚变公司的人员共同合作研究了有关的流体动力学模型，并依此设计出了一种爆炸薄膜靶，它能产生扁平的电子密度分布。最佳的靶子设计是，在150nm厚的塑料基片上蒸发涂镀一层75nm厚的硒，整个膜的宽不到0.1cm，长1.1cm。

激光器的测试。测试手段对于实验的成功与否具有决定性意义。从前的几篇声称在软X射线区已看到显著放大效应的报告都没有令人信服的说服力。利物莫尔的实验使用了两台独立的摄谱仪，一台用于轴向观测，另一台观测与轴夹角 $77^\circ$ 方向的光。从其中一个谱仪获得的具有时间分辨的光谱表明在20nm附近的两根谱线不仅比较亮，而且

时间周期比邻近的瞬发辐射要短。输出的脉冲长度随放大的增加而变短。离轴摄谱仪观测的结果则证明，X射线的发射是非各向同性的，在非轴方向根本看不到20nm附近的两条谱线。

利物莫尔小组能够使两束激光紧靠在一起并行入射，并使两个靶膜沿长方向紧靠在一起，这样可连续调整焦斑的大小，使靶区的长度可扩展到2.2cm，用这种方法，他们测到的结果是，在激光器工作波长处聚集的能量随靶膜长度的变化呈高度的非线性关系。理论上，激光器的强度总是随增益介质的长度呈指数变化，其指数自变量中的常数就称作增益系数。马修斯及其同事断言，他们的实验中每条Se谱线的增益系数是 $(5.5 \pm 1.0) \text{cm}^{-1}$ 。卢瑟福实验室的(Michael Kay)凯依认为，一个真正的激光器，它的增益系数与介质长度的乘积应当超过10，而不是利物莫尔小组测到的5.5。但凯依又说，利物莫尔小组或许确实做成了真正的激光器装置，因为毫无疑问地看到了高增益。

利物莫尔小组还用高Z物质钷做了实验，测到了15.49和15.72两条谱线光的放大作用。

现在，Novette激光器已经关闭，代之以更大的Nova激光器，1985年3月就该运转。从六月开始，马修斯小组将从Nova机得到两束激光束，用来作软X射线的实验。他们的第一个目标是试图使激光器饱和。马修斯估计，通过使用一个专门为增加聚焦区域长度（可达3cm）而设计的柱体透镜，可望能把峰值功率提高几个数量级。

利物莫尔小组还将设法改进激光器的效率，方法是使用斯坦福大学的托·巴比发展的X射线反射镜，形成穿过激光介质区的双通路。这些反射镜是由高密度材料钼与低密度材料Si一层一层交替布置构成。选择每层的厚度，使得从钼层反射出来的X射线将发生相长干涉。巴比宣称，在垂直入射情况下，对波长从16nm到22.8nm的光来说，

所测到的总反射率,是50%到60%。他正在研制3nm X射线的反射镜,其反射率目前尚不到10%。更短波长的X射线将用晶体反射。

马修斯宣称,他们的小组将转向研制更短波长的激光器,用他们的碰撞激发方式,使用Mo作靶子,可望达到的最短波长是10nm。他们还在研制其它工作方式的激光器,有可能达到5nm波长区。

普林斯顿小组使用的是重复复合的激活方式。他们用入射激光蒸发低原子序数物质碳作成的靶,使碳原子外围电子全部剥掉,把它们限制在一个磁场里,这种等离子体通过电子重新填充到外围高激发态上去而被辐射冷却。苏克威尔发现,这种辐射冷却与绝热冷却相反,它有助于保证均匀等离子体密度并且能较快地致冷。冷却后所形成的类氢离子有可能在主量子数 $n=3$ 与 $n=2$ 的两组能级之间形成粒子数反转。然后在这些能级之间发生跃迁时就产生了18.2nm的辐射。同样的方法是产生类Li离子。

用重复复合工作方式,产生激光所需要的电子温度和密度要比利物莫尔使用的碰撞激发工作方式要低(在相同的工作波长条件下)。所以,这种工作方式更适合小型机器,而且激光波长随着提高靶材料的原子序数而下降的也比较快。

在普林斯顿实验中,使用了一个10—20GW的CO<sub>2</sub>激光器,把它聚焦在一个直径为200—400微米大小的斑点上来以便产生 $10^{13}$ W/cm<sup>2</sup>的能量密度,苏克威尔及其同事测量了轴向发射的18.2nm光线的强度,并用来与横向光强比较,最后得到了18.2nm谱线的增强程度。他们还比较了该谱线与其它非激射谱线的轴向横向强度比。利用固体碳靶,他们得到的增益系数和介质长度的乘积是6.5。

普林斯顿实验的几何条件避免了用改变等离子体长度的方法来观测增益随长度的变化。波士顿会议之后,普林斯顿小组从巴比处得到一个曲率半径为2m的球面X射线反

射镜,用来有效地增加靶区的长度。虽然普林斯顿小组的人员感到他们的反射镜的布置还不是最佳化,但他们使用了反射镜后得到的光线增强提高了一倍,这是与他们对使用给定反射率的反射镜和小的接受角的受激发射所期望的结果相符的。他们计划用不同的靶子使用半径更小的反射镜,用类Li氦离子及可达更短波长的工作方式作进一步的实验。

上面介绍的X射线激光器工作方式很早就有人探索过。1975年爱尔顿曾提出用碰撞激发的方式作真空紫外激光器。后来莫斯科的光谱研究所的泽里津,柯士洛夫,及雷托科夫曾介绍过一种得到类Ne离子的3P和3S两个能级之间粒子数反转填充的方法,几乎在同一时间,莫斯科的列别捷夫物理研究所的威诺格拉多夫、瑟贝尔曼及尤科夫等人非常积极地探索几种实现X射线激光器的途径,其中就包括碰撞激发方式。1977年,由伊柳辛领导的一个小组声称曾获得一个60nm的激光腔,但爱尔顿认为苏联人的结果从未令人信服,其后也从未见有关的文章发表。

在欧洲,有几个小组进行的实验都是以重复复合方式为基础。英格兰的Hull大学的G.帕特小组有一套与普林斯顿类似的装置,但靶子是用细碳纤维作的。他们报导说已经测得18.2nm谱线的增益系数与介质长度的积达到5.0。前两年,帕特及其同事又与卢瑟福实验室的凯依等人合作,正在计划作同利物莫尔类似的大规模的研究工作。在法国奥尔赛巴黎大学的皮埃尔·雅格鲁为首的小组正在用类Li Al离子作重复复合的实验,以期看到10.5nm的受激发射,他们报导已经得到了数量级为1的小的增益。

诚然,抽运激光器绝不仅只一种方法,其它的途境正在探讨之中。最近碰撞激发方式的成功并不说明将来的实验就一定沿此途径进行,现在的初步成功只说明了X射线激光器是能够实现的。

(刘冰译自《Physics Today》Vol. 38, No.3 (1985) 17—19)