

# 自由电子激光器

孙 驹 亨

(北京大学物理系)

1984年,美国 Lawrence Livermore 国家实验室完成了一项在长波区获得高增益的自由电子激光实验。该实验室用 3MeV 的电子束去放大一束 9mm 的微波辐射,获得了 35dB 的增益,100 MW 的饱和功率输出。这是自 1976 年首次自由电子激光实验成功以来所取得的最令人鼓舞的成果,成为 1984 年物理学进展重要新闻之一。

## 一、为什么自由电子激光器受到各国科学家们的极大关注?

1985年6月21日至25日在美国召开的庆祝激光问世二十五周年《激光和光电子学学术报告会》上,五位在激光研究中作出重大贡献的诺贝尔奖获得者就激光的历史作用和发展前景作了专题报告。他们指出,二十五年来,激光已经从实验室走向实际应用的各个方面,已经形成了一个高达数十亿美元的产业,远远超出了人们当初的预料。然而,今后发展的前景,在很大程度上取决于能否将激光器的功率、效率以及波长的调谐范围大幅度的提高,能否将造价大幅度的降低。自由电子激光器是一种可以同时具备高功率、高效率、宽调谐范围的激光器,它的潜力和应用前景引起了各国科学家们的极大兴趣,成为八十年代一颗正在兴起的明星。

自由电子激光器所具有的这些重要特性是由它与普通激光器完全不同的工作方式决定的。首先,从基本原理来看,普通激光器的激光发射都是基于原子、分子或凝聚态物质的束缚电子的跃迁,因而辐射的波长总是受到束缚能态本身(包括能带和排斥态)的限制,调谐范

围有限,目前绝大多数激光器的波长都是单一的。自由电子激光器则完全不同,它的激光发射是来自“自由电子”本身即自由电子的动能,因而它的波长原则上可以覆盖从X射线到毫米波的整个波段,这是迄今任何一种激光器都无法与之比拟的。其次,自由电子激光器的工作物质是“自由电子”本身而不是固体、液体或气体等一般激光器所使用的工作物质,不会出现普通激光器所固有的那些自聚焦、自击穿等破坏工作物质和限制激光功率密度提高的非线性现象,因而可以获得极高的功率密度。此外,自由电子激光器的能量转换效率因没有中间能量转换环节而可以远远高于普通激光器。基于这些极为重要的特性,自由电子激光器从产生之日就引起各国科学家的广泛重视。

## 二、自由电子激光器的工作原理

产生自由电子激光发射的方法有多种,其中已经被广泛采用并被认为是最有希望的一种方法是,将一束由加速器提供的相对论(高速)电子束通过一个称为“扭摆器”的周期磁场(见图1),由于磁场的作用,电子在磁场中作周期性摆动运动,与此同时,一束相干光沿轴向通过扭摆器,光场将使电子加速或减速(取决于光场与电子摆动的相位关系),如果使光场与电子的摆动保持反相,则电子将减速并辐射电磁波,只要设法把辐射的电磁波引出来,或者加上谐振腔使之产生振荡,就可以得到激光放大或激光振荡。图2是一个典型的自由电子激光器示意图。电子通过扭摆器时,横向摆动并在前向发射出相干辐射。这一相干辐射加到 CO<sub>2</sub> 激光束上,并象普通激光器那样将之放大。如果加上反射

镜,提供产生自持激光振荡所需的反馈,就可以成为激光振荡器。

相对论电子束通过周期磁场产生电磁辐射的理论是 H. Hotz 在 1951 年提出来的。假定周期磁场的场强为  $B$ , 空间周期长度为  $l$ , 则电磁辐射的能量可用下式表示:

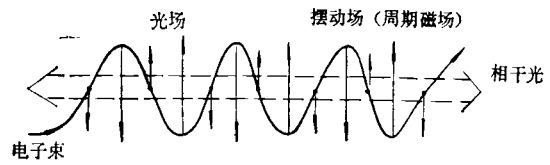


图 1 周期场产生激光的原理图

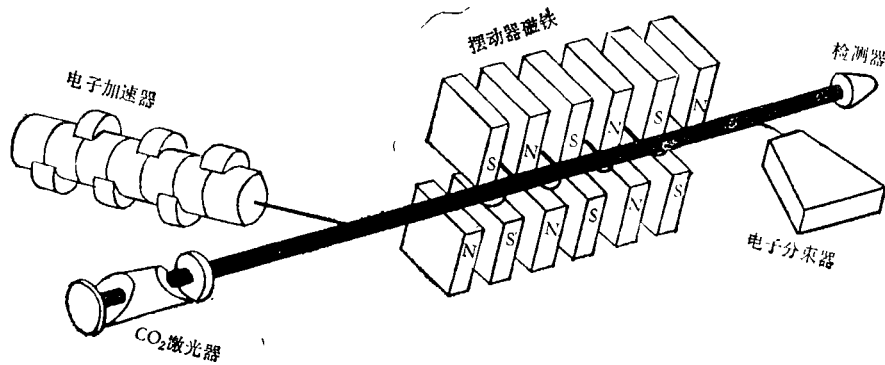


图 2 自由电子激光器示意图

$$W = \left(\frac{2}{3}\beta\right)\left(\frac{e^2}{m_e c^2}\right)^2 B^2 l / (1 - \beta^2),$$

其中  $m_e$  是电子的静止质量,  $e$  是电子的电荷,  $\beta = v/c$ ,  $v$  是电子运动速度,  $c$  是光速。辐射的频率可表示为

$$\omega = 2\pi\beta c / l(1 - \beta \cos\theta),$$

其中  $\theta$  是电子运动方向与辐射方向之间的夹角。由上式不难看出, 辐射的频率(波长)可以通过控制电子的速度加以改变, 这就是自由电子激光器波长调谐范围极宽的原因。

除了利用相对论电子束通过周期磁场获得自由电子激光辐射外, 还有一些其它方法。例如, 可以利用电子在介质中的高速运动(电子的群速度大于电磁波的相速度)产生切伦科夫辐射, 由此获得激光, 这个方法已经由 Walsh 等人在哥伦比亚大学实验成功。还可以利用史密斯-珀赛尔效应(即高能电子束掠过金属光栅表面时产生类似于偶极子的辐射)来获得, 这种相干辐射已在亚毫米波段实验成功。此外, 还可以利用回旋管(即电子在一特殊磁场中做回旋运动)以获得相干辐射。但是所有这些方法都不如电子束通过周期磁场的方法有效, 因而未被置于重要地位。

### 三、自由电子激光器的发展现状

通常自由电子激光器都必须有一个大型高能加速器, 耗资甚大。尽管如此, 各国科学家的研究热情毫不衰减, 一个又一个庞大的装置已经建成, 目前世界上至少已有十多个大型装置正在运转, 其中美国海军实验室和 Lawrence Livermore 实验室的大型装置已为人们熟知。从研究方面来看, 测量比较精确, 数据比较完整的要数美国斯坦福大学研究小组的工作。前几年, 他们利用射频直线加速器产生的能量为 43 MeV 的电子束, 在波长为  $3.3\mu\text{m}$  处, 获得激光振荡, 其峰值功率达 180kW, 平均功率约 7W, 转换效率约为 0.2%。由于使用了短脉冲组成的电子束, 并与加速器频率同步运转, 从而起到了锁模的效果。法国的奥尔赛实验室利用 ACO 储存环产生的高能电子束, 完成了一系列有意义的实验, 去年他们在  $6000\text{Å}$  附近获得了平均功率为  $100\mu\text{W}$  的长时间输出。储存环之所以令人感兴趣是因为它能提供很高能量(150—500MeV)的电子束, 其能束散很小, 准直性极好, 波段可以扩展到紫外区。苏联在西伯利亚

地区用 VEPP-III 储存环也进行了一系列实验,在他们的实验中,自由电子激光器具有光学速调管那种形式。美国西北数学科学公司、TRW 公司和洛斯·阿拉莫斯国家实验室将扭摆器作了很大改进,证明可以大大提高能量转换效率,最好的结果可达 9%,这比斯坦福大学的效率提高了一个多数量级。TRW 公司的研究小组利用斯坦福大学的加速器在  $1.6\mu\text{m}$  处获得了平均功率为 10W 的激光输出。此外,Los Alamos 的研究小组建成了一台可以在  $9-11\mu\text{m}$  范围内调谐的自由电子激光器,平均功率为 3kW,脉冲宽度为  $100\mu\text{s}$ ,转换效率为 0.4%。然而,美国 Lawrence Livermore 国家实验室利用感应直线加速器产生的束流为 500 A,能量为 3 MeV 的电子束,去放大一束来自磁控管的 9mm 微波辐射,增益达 35dB,饱和功率达 100MW,转换效率为 5%,这是当今最好的成果。

由于实验工作的进展,理论工作也显得颇有生气。目前理论工作主要有两个方面:一是处理自由电子激光器中光束质量问题。由于电子束必须沿着扭摆器轴线会聚形成一种非均匀介质,当电子减速时,它把能量辐射到光学谐振腔的许多高阶模上,影响了光束质量。然而理论计算表明,如果单程增益较小,腔的结构适当调整,可以得到很好的光束质量,对于高增益的情形,计算机模拟表明,上述的聚焦效应也是可以控制的。二是关于储存环中的能束散问题。当功率增大而出现饱和效应时,可以引起电子束的能束散变大,造成电子横向扩散,理论研究也找到了某些克服这一困难的途径。总的来讲,理论工作相当活跃,每年都有数以百计的论文发表。

#### 四、自由电子激光器的应用前景

自由电子激光到底有多大的潜力,人们众说不一,但是“潜力相当大”这一结论却是一致的。对自由电子激光器最关心的莫过于美苏两国的军方了,一些大实验室的巨大投资,如果没有军方在背后支持几乎是不可能的。用自由电

子激光器作武器的优点在于它的高功率、高效率及波长可调性,可以选择大气传输窗口的波长输出,避免在传输过程中能量的巨大损失,而高效率则使它能很快达到武器所需要的功率水平,这就是为什么在最近美国总统里根提出的“星球大战”计划中,把自由电子激光器作为地基激光武器的最优候选者的原因。其次,自由电子激光器有可能作为激光核聚变的光源,根据 Segall 的计算,能量为 250MeV,电流为 800 A 的电子束通过强度为  $1\text{nOe}$ ,周期为 15cm 的磁场,对于波长为  $1\mu\text{m}$  的光,单程转换效率为 10%,所得到的光功率可达  $5.3 \times 10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$ ,可以满足核聚变的要求。同时,自由电子激光器极有希望成为激光分离同位素的理想光源,因为它的波长可调谐性及很好的光束质量,使它可以提供所需要的波长去激发有关同位素的能级跃迁。除上述这些大型工程项目中的应用以外,在激光光谱学、光通信、光雷达、光化学、超导、加工、以及医学等多方面,其应用前景也都被大多数科学家所公认。例如在医学方面,医学专家们曾预言,自由电子激光器可能是今后二十五年中最令人兴奋的医疗器械。长期以来医学工作者们一直在寻找一种能根除癌细胞而又不损害健康细胞的方法。由于自由电子激光具有异常的多面性和可控制性,可以获得任意波长的极小的光斑,从而可以在难度很大的部位进行外科手术,切除病变而又不影响周围正常的细胞,同时合适的波长又可以用于对特定部位进行某种特殊治疗(光辐射医学)。

现在我们来评述自由电子激光器的最终效果似乎还为时过早,整个研究工作尚处在发展初期,许多问题还不太清楚,很多工程技术难关还有待解决,但它的潜力不可低估。由于自由电子激光器装置庞大、造价昂贵和技术复杂,人们确实还存在某些担心。如何使装置简单化、小型化并降低造价,是当前普遍关心的一个问题。但是,不管怎样,那种认为自由电子激光器“具有根本技术障碍”的观点已经逐步被“确有前途”的观点取代了。