

自由电子激光与加速器

谢 家 鳞

自由电子激光 (Free Electron Laser, 以下简称 FEL) 是近年发展的一种将电子束能量直接转换为激光的装置。它具有一系列的特点, 如光的波长随电子束能量而变, 改变加速器输出电子束的能量, 就可以大范围地连续地调变激光波长; 电子束能量转换为光能的效率较高, 而电子束可由加速器获得很大的能量, 因此可以产生高强度的辐射等等。这些特点使它在物理、化学、医学、能源、国防等等方面有广阔的应用可能。自从 1975 年美国斯坦福大学 J. Maoley 教授首先在一个直线加速器上产生 FEL 以来, 它引起国际科技界很大的重视, 竞相开展研究。

为什么人们给 FEL 如此多的注意? 它的工作原理是什么? 它与加速器发展有什么关系, 它目前状况和发展前景又如何?

(一) 为什么要研究 FEL

人类现代文明与进步可以说在很大程度上与电磁波谱的开拓分不开的。我们可以回想: 无线电、电视、雷达使人类生活起了多大的变化, 六十年代初期发展

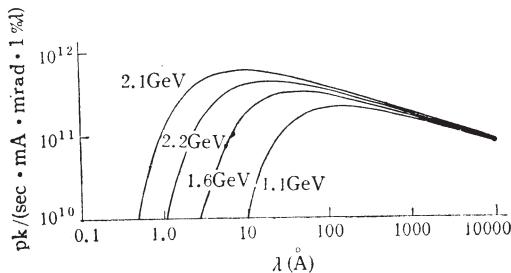


图 1 BEPC 储存环同步辐射频谱 (从主 B 铁处辐射)

起来的激光又对科技进步起了多大的推动, 我们就不难理解这句话的含意了。有人说, 谁掌握了新的电磁波谱, 谁就掌握了未来, 这话也并不夸张。

四十年前, 人们发现在加速器中作迴旋运动的电子会产生一种光辐射, 叫做同步辐射, 它是一种非相干的宽频带电磁辐射, 频谱如图 1 所示, 它的亮度比一般光源高出好几个数量级。对元素分析、结构研究、精细加工、医学诊断等等方面非常有用。目前世界各国已经先后建造了二十余台(专用的和兼用的)同步辐射加速器, 进行同步辐射应用研究, 我国也正在北京、合肥和台湾新竹进行建造。

另一方面, 六十年代初发展的激光的工作是基于原子、分子、离子系统中能级之间的跃迁, 因此一般说

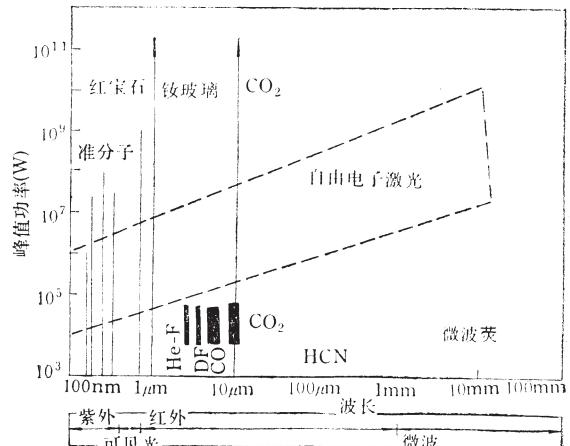


图 2 激光频谱图

来,它产生的受激辐射是单频、相干但波长基本是固定的,如图 2 所示,与同步辐射相比,两者的性质是各有优劣的。

从对光源的要求看来,具有狭谱线和宽带调变的高亮度、相干光源最为理想,这正是 FEL 的特点,就是说它兼有同步辐射和激光的优点,而又摆脱了两者各自的缺点。这样的光源,在光谱学、光化学、惯性聚变、高能加速器、国防、生物、医学等等方面都有重要的应用前景,这就是 FEL 自从发现以来,受到很大的注意,得到很大的发展的原因。

(二) FEL 的发现与它的工作原理

在科学技术领域,一种新的发现是不能脱离过去已有的基础的。对 FEL 而言,它的工作原理是与 1950 年左右 J. Pierce 发明的行波管相似的。它的具体装置又是与 1951 年 H. Motz 在斯坦福大学用电子直线加速器的束流通过扭摆磁铁(提供极性呈周期变化的磁场)产生毫米波自发辐射的扭摆器相近的。1960 年美 R. M. Phillips 发明了一种名叫 ubitron 的毫米波微波管,当时军方很感兴趣,认为有作为武器的可能。它实际上是使用低能电子束工作的 FEL。1968 年斯坦福大学 Pantell 教授又在 Motz 的实验装置中增加了反射镜来改进性能。就是在这些先驱者的工作的基础上,1975 年 J. Macley 使用一个 24 MeV 超导直线加速器的束流,第一次实现了红外波段的 FEL,从而开拓了一个崭新的科技领域。

FEL 的工作原理可用图 3 所示的以射频直线加速器提供束流的振荡器作为例子,加以说明。

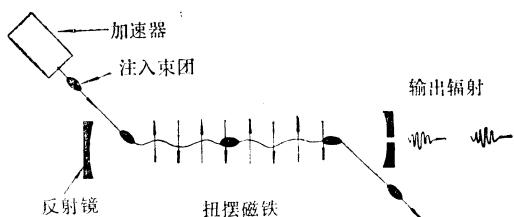


图 3 FEL 工作原理图

图中由射频直线加速器产生的束团,经过束流输送系统注入到由两个反射镜组成的光学腔中,腔的一部份空间有由扭摆磁铁产生的空间交变磁场。这样,注入的电子束团将在磁场中受力而作扭摆运动,产生横向速度分量。此时如有横向偏振的光辐射(由噪音本底或自发辐射产生)与电子束团一齐前进,则在一定条件下光辐射可由电子束团获取能量,得到放大。这个振幅放大了的光辐射经过两个端镜的反射将在光腔入口处再一次与新的电子束团会合,进一步得到放大。如此重复,直至最后振幅达到一个稳定的饱和值,而辐射则由下游的反射镜小孔输出。

从电子的运动状态的角度看,电子与光辐射电场

作用的结果是在光的波长范围内产生了群聚,即大多数电子将聚集在光波的某特定的相位附近。这样,不但大多数电子的辐射相位相同,而且相隔一个波长的各团电子的辐射相位也是相同的。因此辐射功率(它正比于振幅的平方)将与同一相位的电子数的平方成比例,并大为增强(对较均匀分布的电子的辐射而言)。这就是 FEL 产生相干辐射的物理过程。由此看来,FEL 的更为恰当的名称应该是“相干同步辐射”。

从另一个角度看,对于相对论性运动的电子而言,扭摆磁铁的磁场可以看做是一个入射波,而它产生的辐射可以看做是一个散射波。由于相对论的洛伦兹转换和多普勒效应的双重作用, FEL 的波长将与扭摆磁场周期成正比,与 r^2 成反比(r 为电子总能量与静止能量之比)。因此改变电子束能量,就能改变 FEL 的波长。

图 3 描述的是以康普顿散射模式工作的 FEL。另外还有一种以喇曼散射模式工作的 FEL,它使用低能强流电子束,适于产生毫米波,这里限于篇幅,就不多讨论了。

(三) 用于产生 FEL 的加速器

根据理论分析和实验结果, FEL 工作对电子束团的性能有十分严格的要求,即:流强要很大,发射度要很小(束流截面尺寸和散角都很小),能散度也要很小(所有电子基本具有同样的能量)。提供这样高品质的电子束,从加速器的角度看是十分困难的任务。所以, FEL 研究的一个中心环节是加速器性能的提高。有些专家说,有一个高品质的束流,就有自由电子激光了,这句话反映了加速器性能的重要性。

产生不同波长的 FEL 需要使用不同类型的加速器。下面我们就从 FEL 要求的角度对各种可能使用的加速器加以评述。

- (1) 脉冲线加速器——这种加速器为击穿所限,电压一般小于 3 MV,且多是单次工作。可以提供几十 kA 的电流。但若要传输一定距离并有一定的发射度的要求,则电流限于 1 kA 左右。它适于做喇曼散射模式的毫米波研究。
- (2) 静电加速器——电压一般低于 10 MV,可用电流受到充电电流的限制一般很小,不适于 FEL 应用。有人使用能量回收的办法,在脉冲状态工作获得较大的放电电流($\sim 1\text{A}$)而不引起过大的电压波动,可用于康普顿散射模式的远红外 FEL 研究。
- (3) 储存环——可以提供 GeV 级的高能电子,同时束流的起始能散度、发射度都很好,适于向短波长(紫外、软 X 光)发展。但 FEL 工作与储存环粒子运动相互影响。FEL 平均功率较低,而且设备庞大复杂,造价很高。
- (4) 电子迴旋加速器——是电子直线加速器的变种。

- 束流多次通过同一加速结构得到加速，故与同样能量的其他加速器相比，设备简单，造价较低，适于推广，而且能散度、发射度也都较好。但它有一个致命的弱点就是电流较小，难于建立振荡。
- (5) 感应直线加速器——基于变压器原理，它适于加速强流 ($\sim 10\text{kA}$)，能散度也可做到千分之几，故宜用于产生高功率 FEL。但它的加速梯度很小 ($<0.6\text{MeV/m}$)，发射度很差（归一化值约为 $10^4 \text{ mm} \cdot \text{mr}$ ），而且束流脉冲宽度限于几十 ns，重复频率的提高也受到一定的限制。
- (6) 电子直线加速器——利用行波或驻波电磁场加速，流强有一定限度（在 L 波段使用谐波聚束器后，峰值脉冲电流 $\gtrsim 1000\text{A}$ ）。能散度也不易做得很好。但它的加速梯度很大 ($\gtrsim 10\text{MeV/m}$)，发射度也可以做得很好（归一化发射度 $\sim 10 \text{ mm} \cdot \text{mr}$ ），束流脉冲宽度为 ps 量级，对传播有利，适于产生高质量的激光。
- 由以上简单的介绍，可见使用于 FEL 研究的各种加速器是互有短长的，没有哪种加速器的性能完全适应 FEL 的要求。不过，对研究大功率 FEL 而言，普遍认为感应和射频两种直线加速器最有希望，当前的研究工作集中在克服各自的局限，发挥各自的优势上。
- #### (四) 关键的加速器物理与技术问题
- 前面谈到，能提供高流强、低发射度、低能散度的束流的加速器是 FEL 研究的中心环节。事实上，如何获得这种高品质束流，也正是高能物理实验研究中提高正负电子对撞机的能量与亮度的关键问题。因此，在学术讨论中常把 FEL 与超高能对撞机的要求放在一起列为当前加速器物理与技术的前沿课题。
- 为了推进 FEL 的研究与应用，除了加速器束流品质之外，还有提高电子束—光辐射的转换效率、光学元件性能、系统稳定性，电子束与光束的高速诊断等等大量的重要的工作有待进行，这里就不拟详述了。在加速器方面，主要的努力集中在下列一些问题上。
- (1) 改进注入器——注入器是高质量束流的基础。近年发明了微波枪、光阴极等高亮度的注入器。
 - (2) 研究强流传输——强流电子束的输运过程中存在着破坏束流品质的因素。近年发明了使用激光产生电离导引强流束的技术。
 - (3) 改进加速结构——电子束在加速器中加速的过程常常导致能散度和发射度的增长。为此，近年研究了尾场的控制、偏转模的抑制、双频加速等等措施。
 - (4) 改进扭摆磁铁——扭摆磁铁是电子束与光辐射相互作用的关键环节。为了改进性能，发展了线偏振、圆偏振、均匀、渐变、凹极面、电磁、永磁、复合、微型等等种类的扭摆磁体。
 - (5) 能量回收——在较短波长工作时，FEL 效率一般只有百分之几，提高效率的一个途径是将剩余的电子能量回收，重新利用。已在两种加速器上成功地进行了实验。
- (6) 微微秒 (ps) 级电、光监测诊断——FEL 有些物理过程是在几个 ps 中进行的，为了深入了解物理过程，高时间分辨率的监测诊断技术是非常重要的。现在对电子束和光辐射监测的时间分辨已达 $\sim 10\text{ps}$ 量级
- (7) 小型化——为了推进 FEL 的应用，小型化（包括操纵简单、运行可靠、寿命较长、投资较少等等）是必不可少的发展任务，近年有不少研究单位在这方面做出了努力。

(五) 当前水平与应用展望

由于 FEL 具有巨大的应用潜力，各科研先进国家都开展研究。根据公布的材料，美国为了推动它做为定向能武器的应用，已投入了大量的经费，也取得了较多的进展。下面以 Lawrence Livermore 国家实验室 (LLNL) 和 Los Alamos 国家实验室 (LANL) 的最近发展水平做为代表加以介绍。

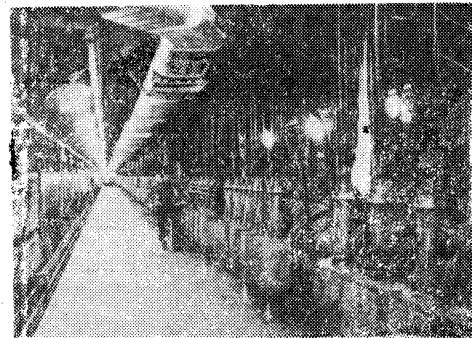


图 4 LLNL 的 FEL 装置

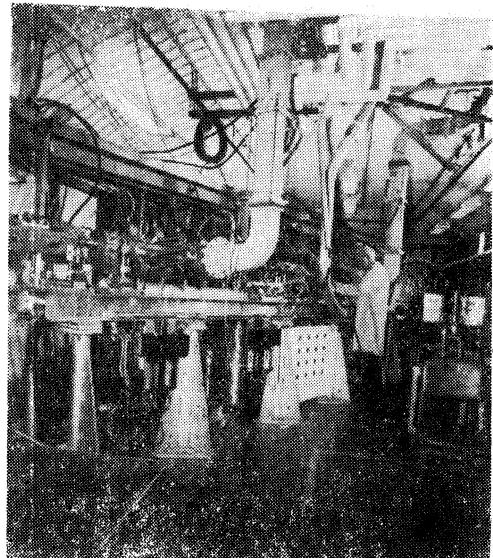


图 5 LANL 的 FEL 装置

(1) LLNL——以研究放大器为主, 使用感应直线加速器。曾以 3.6MeV, 850A 的束流将 35GHz, 100kW 的信号放大到 180MW。增益大于 30dB/m, 效率为 6%。高次模及谐波较多、后改用变渐型扭摆磁铁, 将效率提高到 40%。最近使用能量为 50MeV 的束流, 进行了波长为 10.6μm 的实验。使用扭摆磁铁长达 25m, 束流功率达 1GW 左右, 目前正在进行实验。(图 4)

(2) LANL——以研究振荡器为主, 使用 1.3GHz 的射频直线加速器。电子束能量为 21 MeV, 流强为 40 A, 在 9.8 μm 波长产生了 140 MW 谐振腔功率, 引出 9.7 MW, 效率为 2.3%。光束质量极好, 接近衍射极限, 而且在该装置上实现了束流能量回收 90%。该加速器提供的峰值电流可达几百安培, 因此还有很大的潜力。(图 5)目前正在建造功率更强的装置。

在国内也有几个单位开始了 FEL 的研究工

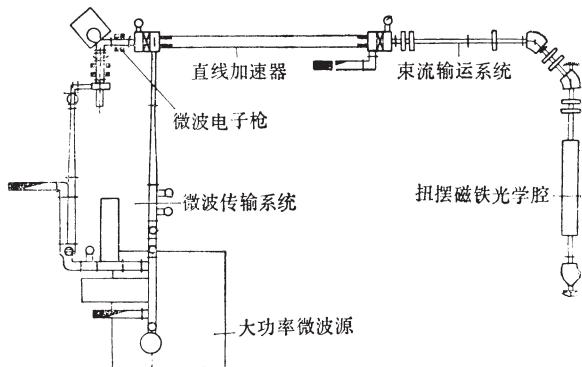


图 6 中国科学院高能物理所 FEL 装置

作, 上面图 6 给出中国科学院高能物理研究所正在建造的一台红外直线加速器 FEL 装置。它使用了微波注入器, 较长脉冲大功率速调管及调制器, 等梯度加速管等新技术, 比一般的电子直线加速器复杂得多。这是为了获得高品质束流所必需付出的代价。