

星战自由电子激光器赛马

任国光

(中国工程物理研究院, 北京)

摘要: 经过几年的竞赛, 地基自由电子激光技术组合实验的激光器子系统投标已结束。本文评述了感应型自由电子激光器和射频型自由电子激光器的性能和取得的重大进展, 并介绍了高功率激光的大气补偿和束传播研究的最新结果。

SDI free electron laser horse race

Ren Guoguang

(China Academy of Engineering Physics)

Abstract. After several years race, proposals for the laser subsystem of GBFEL Technology Integration Experiment had been finished. This paper reviews performance and significant progress in the induction linac FEL and radio frequency linac FEL, and introduces the recent results of high-power laser atmospheric compensation and beam propagation research.

为了论证地基激光系统用于星球大战计划的可行性, 战略防御计划局 (SDIO) 将在白沙导弹靶场进行地基自由电子激光技术组合实验, 估计耗资15~20亿美元。这项大型实验包

四、结束语

由于受条件限制, 不能用高级的时间合成器进行严格的逐点检测, 但用晶振分频信号可以较精确校正结果。因此, 该电路较简单, 可靠, 在众多的高分辨率计数器中, 我们认为不失为一种较理想、实用和可行的电路。

参 考 文 献

- [1] 871厂, 《ECL电路使用手册》, 1983年。

收稿日期: 1989年8月19日。

括研制地基部分的激光器部件，束控制部件，自适应光学部件，以及进行地基激光原理论证系统实验所必需的其它设备。实验将解决激光功率的产生和控制，系统定标，大气补偿和束传播的问题。

以劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 和汤普森、拉莫·伍德里奇公司 (TRW) 为一方提出建造一台感应型自由电子激光器 (LIA-FEL)〔¹〕，以洛斯·阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 和波音公司为另一方提议建造一台射频型自由电子激光器 (RFA-FEL)〔²〕，双方为取得建造自由电子激光组合实验中这台激光器的大合同 (估计七亿美元) 而展开了激烈的竞争。由于SDI经费削减，迫使白沙靶场实验的自由电子激光器的选型工作推迟了一年，竞争的双方的所有计划都是力争在1989年春天拿出结果。SDIO的一个特别顾问委员会将根据这些结果进行评审，最后由陆军战略司令部在1989年夏天作出决定。

一、自由电子激光器投标结束，但又面临大幅度调低功率指标

经过几年的竞赛，两种装置都取得了重大的进展，它们所达到的性能给人们留下了深刻的印象，看来是难分高低。SDIO在1988年10月公布了它对自由电子激光器投标的要求，投标已在1989年2月15日进行，预定在8月7日签订建造白沙靶场实验的激光器合同。在1991年或1992年再增加一个运行和维护的承包商，预料将在1994财年底联机〔³〕。

人们把这场竞赛比喻为一场赛马，当这两匹赛马又跑了一年多之后，眼看就冲到终点了，但由于SDI预算削减，为了降低费用，SDI的地基自由电子激光器将大大降低功率要求，并可能再次推迟几个月作出选型决定。为SDIO管理自由电子激光计划的陆军战略司令部已开始改写计划，为在较低功率下运行，功率系统和振荡器都需要作某些重新设计。

较低功率的激光器可以降低费用，而它提供的有关激光器性能的资料与高功率激光器提供的资料一样多。但设计的白沙靶场自由电子激光器的一个重要目标，是要在作战系统所用的束功率密度和束宽情况下评价束的传播效应，它将检验自由电子激光作为武器的有效性，看能否克服或控制这些现象对束传播产生的影响。激光物理学家们早先曾主张必须建造较高功率的系统来论证热晕和大气补偿效应，但是他们最近已改变了观点，并向国防部推荐采用较低功率的系统〔⁴〕。这就使SDIO决定降低自由电子激光器的功率。

这种降低功率要求的作法，可能会影响到自由电子激光器的选型工作。在原来设计的实验功率值下，两种型式的自由电子激光器都需要采用一个激光振荡器和一个激光放大器。但是在降低后的新功率值下，RFA-FEL或许不需要放大器就能达到所要求的功率。这将使得建造RFA-FEL的费用大大低于LIA-FEL的费用，据一位熟悉该计划的科学家估计，恐怕要低2~3亿美元。

为了保证自由电子激光技术组合实验的预言获得成功，SDIO也补充进行了关于大气传播、热晕、湍流和受激喇曼散射的计算机模拟，实验室研究和场地试验。了解大功率激光与大气的相互作用，对地基激光计划获得成功至关重要。

采用低功率激光束的实验已证实能补偿在大气层中由湍流引起的束畸变。用自适应光学部件预先矫正输出波前，在远至600km装有测量仪器的靶标火箭处，输出束的亮度可比未补偿的输出束亮度提高1000倍。

关于热晕的问题，1985年就用航天飞机进行过实验，由于激光束功率低，没有发现这种现象。后来林肯实验室的科学家进行的计算机模拟和分析表明，当实战的1 μ m高功率激光穿

过大气层时将产生热晕。林肯实验室在理想的实验室条件下进行的实验已证实产生了热晕，但是他们也证明了在这种理想的条件下，能用自适应光学部件进行补偿。最近的实验室实验已证明引起热晕不稳定性激光功率值比预估值高三倍^[5]，这就允许使用较小的束导向器，同时也降低了成本和减小了风险。

理论预测地基激光功率密度大于 $1\text{MW}/\text{cm}^2$ 时由于大气层中氮的受激喇曼散射，将使穿过大气的激光强度遭到损耗，林肯实验室进行的实验室实验已证明，展宽输出激光束的频谱可以减轻喇曼散射效应。

二、两种类型的自由电子激光器势均力敌

自由电子激光器由于波长可调，能定标到高功率、转换效率高，光束品质好，而且装置能极快地散热和采用了成熟的加速器技术，因而成为SDI定向能武器的首要候选者。在开始时，人们认为只有LIA-FEL能定标到SDI作战系统所需的功率。而RFA-FEL的束流太小，难于达到这一功率。但是由于RFA-FEL取得的进展，使人们相信它也能定标到所需的功率。经过几年的竞赛，这两种技术途径都取得了重大的进展，目前的状态似乎是势均力敌，难分高低。

1. LIA-FEL取得的进展

LIA-FEL的固有优点是峰值功率高。由于它的束流强，因此其效率就高。另外，LIA-FEL有很大的灵活性，可以满足各种任务的需要，这就增强了它在SDI中应用的潜力。它的这种灵活性来自设计的积木性，增加加速组件数目就能提高电子束功率。

LIA-FEL的关键问题是它能否定标到 $1\mu\text{m}$ 波长，并需要提高平均功率和改善束的品质，以满足SDI的要求。LLNL是分两个计划来解决这些问题的。一个计划是Paladin实验，它将论证把自由电子激光器的物理学和工程问题定标到 $10.6\mu\text{m}$ ，这被认为是LIA-FEL朝着SDI所需 $1\mu\text{m}$ 波长迈进的重要一步。这个实验还将证实光学导向和用渐变摇摆器来提高转换效率。第二个计划是建造一台高亮度、高重复频率的新一代感应加速器，以改善束的品质和提高平均功率。为了提高束品质，还必须解决强流束在加速中引起的发射度变坏的问题。

LLNL和TRW在LIA-FEL中已取得了一些论证性的重要进展。采用世界上最长的25m摇摆器^[6]和10kA、50MeV的高级试验加速器进行的Paladin实验，最近已将输入的 CO_2 激光束放大了1000倍^[7]，这与理论预测一致。由于信号在摇摆器中7~8m处饱和，所以得到的 $10.6\mu\text{m}$ 激光束的功率为60MW。Paladin实验验证了把LIA-FEL定标到 $1\mu\text{m}$ 波长的数学模型，并清楚地证明了增益导向的原理，即利用摇摆器的磁场来减小束的发散。

为了研究产生和传输高亮度、高重复频率的电子束，评价新设计的电子注入器和其它提高束品质的技术，LLNL建造了一台高亮度、高平均功率的感应加速器ETA II^[8]，1988年12月在ETA II上进行的试验，证明新的加速器设计能产生高质量的电子束和达到高的平均功率。

ETA II的电子能量为10MeV，束流3kA，脉宽5ns、脉冲重复频率为5kHz，它代表了新一代的感应加速器，并把几个创新的概念付诸实现。

感应加速器的技术难关之一是设计可靠的高重复频率的快速动作开关。以前采用的火花隙，开关频率仅为每秒一次，它严重地限制了平均功率。LLNL新研制的固体器件开关，其脉冲重复频率可达5~10kHz。

提高束品质的关键在注入器。ETA II 采用了新的高亮度注入器，它比高级试验加速器的电子注入器亮度提高了一个量级。这台注入器的参数为注入电压1MeV，束流1kA，束亮度超过 $1.3 \times 10^6 \text{ A}/(\text{rad cm})^2$ ，这个亮度已经满足自由电子激光器 $1\mu\text{m}$ 波长目标的要求。而且采用磁开关技术后，在高重复频率下也得到了这样的高亮度。一台束亮度更高的3kA注入器将于1989年安装在ETA II上，预计ETA II和摇摆器将在1989年或明年联机。

为了减小强流束在加速段中发射度变坏的问题，LLNL已发展了一种引导电子束通过加速器的技术，它使得电子束的横向运动变得非常之小。另外，他们也研究成功一组“微调磁场”，用来调整电子束通过加速段的路径，以磁准直的方法来减小发射度变坏。

2. RFA-FEL取得的进展

RFA-FEL频率可调，其波长已达 $0.5\mu\text{m}$ ，这是一项巨大的成就。因为在不降低束品质的情况下朝着短波长迈进时，所有的技术都变得更加困难了。RFA-FEL产生的束品质好，并且它的输出是微脉冲串，因此有利于激光的大气传输。

因为射频加速器的束流要比感应加速器的束流小得多，因此其能量萃取效率也低得多，这对需要极高功率的SDI应用来说是个致命的缺点。因此要与LIA-FEL相竞争必须提高束流，并发明一种技术提高RFA-FEL的总效率。另外，RFA-FEL是一个振荡器，因此必须解决高功率密度将损坏光学腔反射镜的问题。

由于能量萃取效率低，所以电子束的大部分能量未被利用。LANL不是简单地采用使用通过摇摆器后的电子“转储”起来的办法，而是用这些电子去产生微波功率，用来提供加速电子所需的部分射频功率，他们在能量回收方面已取得了创记录的进展。据理论估计，若采用这种电子束再循环技术，RFA-FEL的总效率可达20%。LANL已在1988年证明，在 $10\mu\text{m}$ 波长时自由电子激光效率为5%。这比以前提高了近5倍。LANL正朝着达到20%的效率而努力。LANL的自由电子激光器在 $10\mu\text{m}$ 波长的输出功率为10MW，波音的自由电子激光器在 $0.5\mu\text{m}$ 波长的输出功率达1GW。

为了提高束流，波音公司采用了增加每个微脉冲串中的微脉冲数目的办法。他们把微脉冲之间的间隔时间从370ns缩短到200ns，使束流从100A增至300A^[9]。而且波音的加速器已证实它能把微脉冲间隔缩短到20ns。另外，LANL正在为激光器设计大功率的射频直线加速器，束流可达2kA^[10]。

LANL发展的另一项改革新技术，是减轻光学共振腔反射镜承受大功率激光束的负担。新技术采用了抛物面“掠入射”反射镜。光束以低掠射角(约4度)射入反射镜。束在入射点的直径被扩大了14倍，即把光学表面的功率负载降低了49倍^[11]。另外，为了彻底克服RFA-FEL的这一固有缺点，LANL和波音已提出两级的主振荡器/功率放大器设计，这样主振荡器中的光束能量就能限制在适当大小，避免了反射镜的损坏。然后再通过无反射镜的单程摇摆器，把激光束能量提高到所需的数值。

为了支持投标，LANL已在改建现有的自由电子激光器，以便进行高亮度、高束流试验，这台高亮度加速器的自由电子激光器的结构与他们将在白沙靶场进行试验的激光装置的设计相似。通过增多加速器空腔数目和加长摇摆器，从而能把激光器的功率提高几个量级、在这台新的激光器中，将采用LANL研制的新型光电注入器^[12]。它除了小而轻之外，最重要的一点是能产生高亮度的束，它比原来的电子枪产生的束亮度高100倍，给出的束品质超过了陆军在地基激光计划中提出的要求。这台新激光器的设计采用了计算机模型，这在自由电

子激光器的设计中还是首次。LANL采用了三个独立的代码对装置从头至尾进行模拟，模型能以很高的精度预测装置的性能。如果这些模型的精度在1989年的实验中得到证实的话，那么今后就能用超级计算机模型来设计价值几十亿美元的整个激光器装置了。

三、结 束 语

地基自由电子激光技术组合实验的自由电子激光器投标已经结束，但激光物理学家们最近改变了观点，建议采用较低功率的系统。陆军战略司令部正在修改计划，功率系统和振荡器都需作某些重新设计。在降低激光器功率的情况下，为了研究强激光通过大气的传输问题，若要保持激光强度，势必将减小激光束直径，因此束控制部件和自适应光学部件都可减小。如上所述，近几年来LIA-FEL和RFA-FEL都取得了重大进展，特别是缩短了波长，获得了高的增益和效率。这两类自由电子激光器的性能良好，都达到了地基自由电子激光技术组合实验的要求。在SDIO降低实验功率后，若RFA-FEL仅采用振荡器就能达到指标，那么它的建造费用就比LIA-FEL低得多。考虑到国会大量削减SDI经费，很可能RFA-FEL会中标。当然，这里指的仅仅是它可能在白沙靶场实验的中等功率装置中获胜。但在今后建造半标度或全标度SDI自由电子激光器原型的竞争中，LIA-FEL由于峰值功率高，转换效率高，以及随着束质量的改善和平均功率的提高，它仍将是SDI地基激光器最强有力的竞争者。

参 考 文 献

- [1] UCRL-94583.
- [2] J. of Fusion Energy, 1987, Vol.6, P.337.
- [3] Military Space, 1989, Jan.30, P.1.
- [4] AW & ST, 1989, May 22, P.22.
- [5] 1989 Report to the Congress on the SDI, 1989, Mar., P.4~8.
- [6] UCRL-96292.
- [7] AW & ST, 1989, May 9, P.81.
- [8] Energy and Technology Rev., 1987, July, P.58.
- [9] AW & ST, 1988, Nov. 14, P. 113.
- [10] LA-UR-87-1242.
- [11] 1988 Report to the Congress on the SDI, 1988, Mar., P.4, 3~14
- [12] IEEE 1985 Particle Accelerator Conference, P.1791.

*

*

*

作者简介：任国光，男，1938年5月出生。高级工程师，室主任。现从事情报研究工作。

收稿日期：1989年8月22日。