

高亮度加速器驱动的自由电子激光器

黄裕年

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京)

摘要: 美国为战略防御正在研制高功率射频型自由电子激光器, HIBAF 是一种高亮度加速器驱动的自由电子激光器, 该装置提供的电子束流亮度远远超过了其它同类设备可获得的亮度, 并能产生远红外至紫外波长的高质量激光。本文简单介绍了它的工作机理和束线的设计考虑, 最后讨论了它计算出的系统性能与实验结果。

High brightness accelerator FEL

Huang Yunian

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics)

Abstract: This paper is intended to describe a high brightness accelerator FEL (HIBAF) being developed by USA for strategic defense. HIBAF is far superior in high electron beam brightness to most other facilities. It can provide high quality laser beam of the wavelength from far infrared to ultraviolet. This paper briefly presents its operational mechanism and design idea of the beam line, discusses the calculation and experiment results of the system.

多年来, 为研制兆瓦级高峰值功率、高抽取效率的射频型自由电子激光器(RF-FEL),

京: 电子工业出版社, 1989: 75

- [2] 仲跻国, 徐观峰 *et al.* 物理学报, 1983; 32(6): 795
- [3] 王廷福, 张纯玉. 中国激光, 1983; 10(4): 198
- [4] 徐 浩, 沈鸿元, 黄小良. 硅酸盐学报, 1987; 15(3): 271
- [5] 曾政东, 沈鸿元, 徐 浩 *et al.* 人工晶体, 1987; 16(3): 274
- [6] Zeng Zhengdong, Shen Hongyuan, Huang Miaoliang *et al.* Appl Opt, 1990; 29(9): 1281
- [7] Nelson, D F, Mikulyak R M. JAP, 1974; 45(8): 3688
- [8] Boyd G D, Bond W L. JAP, 1967; 38(4): 1941

*

*

*

作者简介: 徐 浩, 男, 1933年12月出生。副教授。现在福州大学物理系从事物理教学及光学、非线性光学的研究。

收稿日期: 1992年1月21日。

一直为两个问题所困扰。第一,要能使加速器产生高亮度强束流的电子束,第二,要解决在高功率下如何减轻激光振荡器中镜面和光腔承受的功率密度问题。为此,近年来美国LANL(洛斯·阿拉莫斯实验室)和Boeing(波音公司)研究和开发了若干关键技术,如光电阴极电子枪、掠射环形激光腔等。然而,用一台高功率RF-FEL想要最终达到战略防御研究所所需的激光功率要求是不可能的。随着激光功率的提高,光腔内的功率密度大大增强,即使采用掠射环形激光腔,反射镜和腔体结构的制作更加困难,边带及一些自由电子激光器(FEL)物理问题更加复杂。这就促使人们联想到普通激光器提高功率的MOPA方案(Master Oscillator-Power Amplifier)和MOPA相阵列方案。目前Boeing, LANL, 斯坦福大学, 洛克达因公司等单位都在探索这些方案。1987年, Boeing开始研究二级RF-FEL,即用一台激光器作主振荡器,产生适中功率的激光束,再把这个激光束注入第二台作为放大器的RF-FEL中,使功率增强到所需水平。他们计划在1990年演示这个MOPA装置^[1]。斯坦福大学利用Mark III射频频加速器开展工作,也已初步获得实验结果。

LANL在发展FEL技术方面做过许多深入的工作,并准备研制一台既可调整又可定标到战略防御试验的大功率FEL。他们用1m长锥度摇摆器进行了模拟计算,认为能量转换效率可达10~20%,论证了二级MOPA的可行性,继而又研究了各种电子束发射度增长的机理,分析了弱场及弯道的影响。1988年12月LANL拆卸了原有的FEL,开始重建一台高亮度加速器驱动的自由电子激光器HIBAF(High Brightness Accelerator FEL)。在这台装置里采用单个加速器的主振荡器/功率放大器的方案,即SAMOPA概念。如果在第一个摇摆器中由激光器相互作用区引起的束质量退化能明显减少,则SAMOPA的工作便和MOPA同样有效,且结构简单还可节约大量资金。HIBAF是LANL正在执行的特别支持研究创新计划中的一个重大项目。HIBAF的试验主要目的是要验证加速器上光电阴极射频枪的高量子效率工作,验证非常高亮度电子束的产生与传输,验证SAMOPA工作的可行性。它的建造与美国战略防御计划中强激光武器的地基激光器综合试验(GBFEL-TIE)直接相关。当然HIBAF还有其它的工作目标,包括检验和标定用于设计HIBAF和其它FEL装置的计算模型INEX,证实电子束通过大弯道质量不变坏,确定和发展高亮度的诊断仪器等。本文主要讨论LANL的HIBAF的束线设计及其有关实验结果。

一、自由电子激光器的电子束质量

自由电子激光器与一般激光器不同,它是一种利用相对论电子束与电磁波,通过泵激电磁场相互作用,经受激发射放大短波长辐射的装置,高能电子束是该类激光器的工作物质,因而电子束质量的好坏对整个激光器的性能影响至关重要。在这种激光器装置里高能电子束源就是加速器,电磁场是摇摆器的周期性静磁场。电子束经过摇摆器时受到空间周期性变化的横向磁场作用,产生周期性振荡,于是被捕获和群聚在由辐射场和摇摆场产生的有质动力势阱中的电子就产生相干光辐射。表征电子束特性的一个重要参量是电子束亮度 B ,它被定义为:

$$B = \frac{2I}{\pi^2 \epsilon_n^2} \quad (\text{A/m}^2 \text{rad}^2)$$

式中, I 为电子束电流强度, ϵ_n 为归一化的电子束发射度。一台RF-FEL的输出功率正比于在势阱中可捕获的电子束流,与进入摇摆器的电子束亮度和势阱大小有关。且亮度越高光增

益也越大,特别是振荡器工作状态,必须达到一定增益才起振。所以只有高亮度的电子束才能产生高亮度的光束。

对于高功率RF-FEL而言,要提高电子束亮度,从上式看出有两个措施。第一,提高电子束电流;第二,改善电子束品质,抑制它的发射度。以往一般加速器注入器采用热阴极,发射电流为数十安,增大束电流要遇到空间电荷、束流崩溃效应、尾场效应等问题的影响,为减小这些效应造成的不稳定性和对电子束质量的损害,就希望扩大加速器加速孔径,并降低射频源激励频率,故而目前都改用较低的L波段(1.3MHz)或P波段(0.5MHz)射频频率加速器。电子束的发射度可归结为二个因素。首先电子束不能完全是单能的,即电子纵向速度有分散,热电子会降低FEL的增益和效率,至少要求

$$\left(\frac{\Delta v}{v}\right) < \frac{1}{N}$$

式中, v 为电子的能量因子, N 为摇摆器周期数。其次是电子束垂直速度分散,这种分散也会导致纵向速度分散,因而可用等效的能散度来表示:

$$\left(\frac{\Delta v}{v}\right)_{\epsilon_n} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_n}{r}\right)^2$$

式中, r 为电子束半径。

改进电子束源是获得高质量电子束的首要关键。以往大多数射频加速器的注入器使用栅控热阴极,可得电流密度仅为 $40\text{A}/\text{cm}^2$,发射度为 $8 \times 10^{-7} \sqrt{I_0} \text{m} \cdot \text{rad}$ (I_0 为阴极发射电流)。近年来LANL完成了一项重要的革新,在注入器中采用激光驱动光电阴极。阴极材料为 CsK_2Sb ,它抗毒能力强,可缩小电子束径而不损失流强。输出电流密度达 $1000\text{A}/\text{cm}^2$,发射度降为 $4 \times 10^{-8} \sqrt{I_0} \text{m} \cdot \text{rad}$,且电子束波光脉冲斩波后无需再加聚束器,避免了由此而引入的发射度,使电子束亮度显著提高^[2],这便是RF-FEL在地基激光武器竞争中获胜的主要技术因素。另外采用这种注入器还可获得较高的微脉冲重复频率,电子束团的时间晃动小,这对MOPA和MOPA相控阵列方案要求多路加速器同步工作也是十分有利的。当然要提高电子束亮度除电子束源外,还必须考虑整个束线的传输部件,在加速腔、束流输运系统一直到摇摆器的设计都要严格抑制能散度和发射度的增长,并尽量减小光脉冲和电脉冲之间的时间滑移及各种物理效应的影响。

二、HIBAF的束线和组件设计

图1示出了HIBAF的束线布局示意图,这个束线系统主要包括四个部分:(1)光电注入器,(2)加速器,(3)60°弯道和主振荡器,(4)150°弯道和第二个摇摆器。驱动光电注入器阴极的激光器是一个倍频的Nd:YLF激光器,波长为527nm。普克尔盒用来选择一段 $100\mu\text{s}$ 的微脉冲,由斩波器把微脉冲重复频率降到21.67MHz,这是7m长光学共振器要求的。光电注入器代替以前的电子枪和聚束器,激光照射光电阴极,阴极发射几百安电流。电子束经过A,B,C,D四个驻波加速箱,把束能加速到40MeV,加速后经消色差和等时的弯道使束径弯曲60°,进入第一个摇摆器和共振器,产生激光作用。输出的电子束再经过第二个弯道弯曲150°,与激光束一起进入无反射镜的单程放大摇摆器,按SAMOPA形式工作。现扼要介绍几个主要组件的设计。

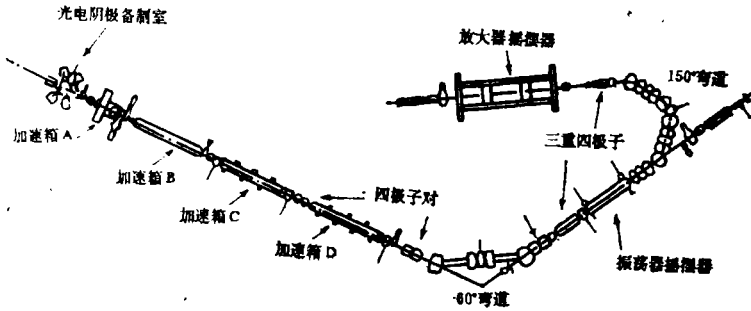


图1 HIBAF的束线设计

1. 光电注入器

图2示出了光电注入器结构，光电注入器由光电阴极和与它相连的加速箱A前端部分组成。选用光灵敏的高发射能力的CsK₂Sb作阴极，它平贴在一个插塞表面，插塞插入加速箱A第一个小腔前壁中心。激光照在阴极上，阴极表面就发射电子，每一次闪光可发出一个电子脉冲。若选择居中的射频聚焦，阴极插塞离腔壁凹进2.6mm。阴极半径尺寸最大可到7mm，选择这个形状是为了增加整个设计的灵活性。第一个小腔外面有一对螺线管和补偿线圈，用来聚焦电子束并补偿非线性空间电荷和电子速度变化对发射度的增加。改变螺线管的电流可改变它的有效位置。光电阴极最终制成6组，每组接入一个加速小腔，每次选择一个阴极。为了满足光电阴极高真空要求，6个小腔封入真空绝缘管道并烘焙到300℃。原热阴极电子枪加速器，电子束能量为20MeV，能散度为0.5%，束发射度为160π mm mrad。现新设计的电子枪加速器，电子束能量为40MeV，能散度为0.2%，束发射度<50π mm mrad。

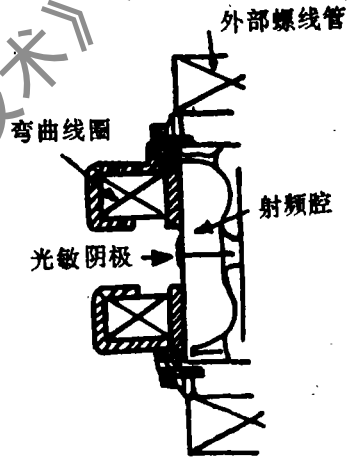


图2 光电注入器

2. 加速器

加速器由四个驻波加速箱A, B, C, D组成。加速箱A有6个小腔，由单独一个速调管供电。这6个小腔轴向耦合，工作在1300MHz。射频功率通过WR-650波导馈送到最后一个小腔。为了得到大的峰值电流，要尽量缩小电子的轴向扩展，这个扩展可以加大束径或很快把电子束加速到几乎为相对论性的能量来阻止。因为射频发射度在径向是非线性的($\propto r^2$ 或 r^4)，且工作频率是选定的，就不能用加大束径来减小轴向力，所以在第一个小腔中采用了尽可能大的场梯度。对于100μs的射频脉冲，在腔壁上允许的峰值场约为Kilpatrick极限的1.1倍，约56MV/m。腔内平均场梯度为26MV/m，功率损耗为750kW。虽然选择别种形状的小腔能使腔峰值场与阴极场之比降低，但因考虑它的射频场的非线性较小并有相当高的分路阻抗，所以采用了这种设计。每个腔的入口和出口处都有射频聚焦透镜，特别是第一个腔上

的透镜,它可以通过改变这个腔前壁中部的形状来微调聚焦强弱,但要注意它也可能引起阴极轴向场的变化和电子径向力的非线性,从而导致束发射度的增大。

B, C, D三个加速箱采用边耦合,这三个加速箱在以往的实验中用过^[3]。所有小腔的平均场梯度为8.5MV/m,每个腔功率损耗为100kW。电子束经过第一个加速箱A后,束能量加速到5.5MeV,剩下三个箱中每个箱加速11.5MeV。

3. 两个弯道

图3是两个匹配到摇摆器的弯道电子光学示意图。图3A是匹配进入第一个摇摆器的60°弯道,图3B是匹配进入第二个摇摆器的150°弯道。图中b代表偶极子,q代表四极子。第一个60°弯道由两个30°弯道的偶极子和它们之间的两个相同的四极子组成。图示的一些元件为电子束提供适当的聚焦,使弯道消色差和等时。弯道前的双合透镜匹配电子束进入弯道,弯道后有两组双合透镜匹配束进入第一个摇摆器。电子束在相位空间的分布不影响弯道的消色差特性,非零转移矩阵元件 R_{15} , R_{25} , R_{16} 和 R_{26} ,也能精确匹配电子束使色差降到最小。开头的双合透镜用来聚焦电子束,使它在水平方向(弯曲平面)于第一个偶极子中间处成腰,在垂直方向保持平行。空间电荷会使粒子动能和径向速度产生起伏,如果电子束在偶极子中间成腰,由这两个效应引起对发射度的贡献可以降低到最小,而且这种匹配方法也缩小了不同能量电子在路径长度上的误差,使弯道更近于等时。

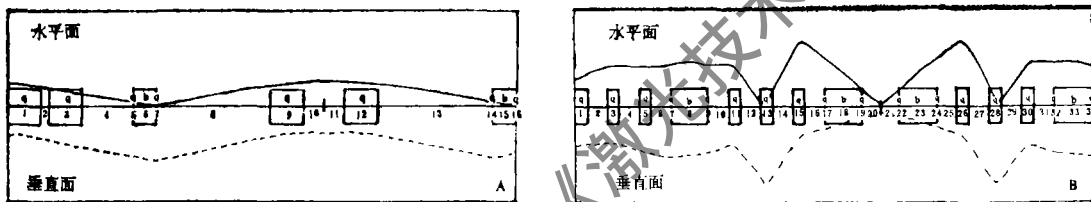


图3 两个弯道的电子光学示意图

为了消除弯道内弱场影响,采用了一种束管截面为椭圆形的的设计。椭圆束管的水平宽度是垂直宽度的三倍,这种截面束管能集中沿水平表面的壁电流,沿垂直面壁电流的不连续性可以忽略不计。在第一个偶极子前几个束管直径处由圆管过渡到椭圆管,电子束达到平衡。在最后一个偶极子之后恢复到圆形束管^[4]。

150°弯道也必须是等时的和消色差的。因为弯曲半径小,它的二次象差较大,受空间电荷的影响也大,设计弯道更为复杂,但设计原则与第一个弯道类似。当然束线也可以组合在无弯曲的空间,而这种大弯道是SAMOPA结构和能量恢复系统所特有的。弯道可以试验了解电子束的动力学,证明经过大弯道后电子束仍能保持高质量。

4. 两个摇摆器

第一个摇摆器1m长,是非锥度的。这个摇摆器和光腔与以前的设计相同^[5]。第二个摇摆器是洛克达因公司制造的,共82个周期,长2m,是单程的。在此放大器中没有镜面问题,边带和不稳定等物理问题也可减轻。它的设计特点是采用纯永久磁体(PPM),磁体材料为 SmCo_5 ,峰值场为0.65T。前几年PPM曾为永久磁铁混合结构代替,由于应用了模拟退火技术,减小了磁铁的误差效应^[6],在此摇摆器中又重新启用PPM。退火的磁体缩小了电子束的随机游动,形成一条无先例的笔直的电子束运动轨道。尽管场误差大于1%,全程82个周期长上的轨道漂移偏斜保持小于一个摇摆幅度(等效于0.055%rms的随机误差量)^[7]。除

此以外在此摇摆器中还采用了增加轴向场的方法。每周期使用6块磁体,增加磁体高度及磁体的堆积因子,使摇摆器轴向场提高到理论极限值的93%。

三、HIBAF的性能和实验结果

除了上述设计原则外,LANL还采用综合数字实验(INEX)的方法来精心设计和预测HIBAF各部分的运行情况^[8]。在各种大型装置中HIBAF是第一个采用这种模拟方法的。以往的设计通常是各个部分分别进行处理的,而INEX模拟有点像在核武器研制里所做的那样,提出一个数学模型,来描写电子从产生到消失,光从产生到消失的整个实验过程。科学家们使用了一台Caray超级计算机和500,000条代码,用于注入器的代码叫ISIS,用于加速器的代码叫PARMEIA,计算电子能转换成光能的代码是FELEX。INEX曾在斯坦福大学、洛克达因公司和LANL等九项实验中证明是正确的,它是HIBAF可靠的设计工具。下面依次列出预估的HIBAF主要性能参量。表1为光电注入器和加速箱A部分的参量,表2是进入第一个摇摆器时的束特性,表3是用洛克威尔公司提供的摇摆器组成SAMOPA工作时的增益^[9]。

表1 光电注入器-直线加速器的参量

频率	1300MHz	结构铜损耗	1810.0kW
加速场		束负荷	600.0kW
小腔*1	26.0MV/m	输出束能量	6MeV
小腔*2	14.4MV/m	聚束电荷	5nc
小腔*3-6	10.0MV/m	束电流	
占空因子	0.1%	平均值	0.1A
耦合因子	5.2%	峰值	300.0A
预测Q	19800	发射度	<50π mm mrad
预测分路阻抗	35.0MΩ/m	(90%, 归一化)	

表2 预测在进入摇摆器时的束特性

束能量	40MeV	微脉冲长度	16ps
能量分散	0.2%	发射度	<50πmm mrad
宏脉冲重复率	1Hz	聚束电荷	5nc
宏脉冲长度	10~100μs	峰值电流	310A
微脉冲重复率	21.67MHz		

表3 HIBAF工作在SAMOPA时的增益

峰值电流	小信号增益		饱和信号	
[A]	$\Delta E/E = 0.25\%$	0.50%	$P_{in} = 1MW$	10MW
250	210	104	16.7	4.9
400	1067	600	48.2	8.8

表4 HIBAF在17MeV下的出束结果

	设计值	实验值
束能量 (MeV)	17	14~17
微脉冲能量分散 (%)	0.3	0.3
宏脉冲长度 (μ s)	10~100	10~40
宏脉冲重复率 (Hz)	1	1
微脉冲长度 (ps)	15	15
微脉冲重复率 (MHz)	21.7	21.7
发射度 (π mm mrad)	25~50	35~50
微脉冲电荷 (nC)	0~5	0~10
峰电流 (A)	300	300
阴极量子效率 (%)	>1	7

LANL为测量HIBAF高质量电子束改进了以前所用的诊断设备。利用瞬态辐射技术(OTR)^[10]来测量束位置、截面、聚焦和发射度,用OTR干涉仪拍摄了不同能量电子束的光斑和发散^[11]。表4列出了HIBAF工作于17MeV电子束时的实验结果^[12],此时加速器只用加速箱A, B, 加速箱C, D在适当位置但未供电。阴极寿命在加速箱中不工作、真空度为 5×10^{-10} Torr时可大于70h时,在加速箱中工作,真空度为 2×10^{-9} Torr时为15h。

四、小 结

HIBAF是LANL新设计的一台高亮度加速器驱动的自由电子激光器装置。在这台装置中,激光驱动的光电阴极注入器代替了以往的热电子枪和聚束器,增加了射频加速箱,采用了优化磁体的技术,并第一次使用INEX来精心设计整个束线。使电子束亮度比热电子枪装置提高了近100倍,束发射度降低了4~8倍。HIBAF按SAMOPA形式运行,每个部分的性能都有较大的改善。工作在基波激光时,能提供远红外100 μ m到2.7 μ m可变波长激光,谐波工作时用短周期摇摆器,能提供紫外区各种波长的激光。通过这台装置的实验工作,不但能达到原研究计划目标,而且所有这些设计概念、结构特点自然会导致产生下一代的RF-FEL,即更为紧凑更高性能自由电子激光器的实现。以前在激光器中电子枪大得象一辆卡车,而现在的光电注入器大小像一个面包盒子,把它和激光驱动器、加速器及光学振荡器可放入8 \times 20ft的工作台。射频激励器通常也要占同样大小面积,但若用超导加速腔及能量恢复器,射频系统也可一起放在同一工作台上。

HIBAF提供的强电子束流和束品质远远超过了其它设备可得到的亮度。对于如此复杂精密的系统,对束线上的每个部件每个因素都要认真对待。很小的弱场,对于150~200 π mm mrad发射度的电子束影响可以忽略,却会使发射度为40 π mm mrad的束质量严重变坏。从实验情况看,HIBAF装置还有不少需要改进的地方。光电注入器是整个装置的关键部件,但眼下光电阴极寿命太低,价格昂贵。它在加速器中运行时真空条件为 2×10^{-9} Torr,寿命只有15h,显然这是不能符合实用要求的。因为在加速器中要保持比 10^{-9} Torr更高的真空度

相当困难,所以探索更为理想的光阴材料迫在眉睫。另外到目前为止, HIBAF的实验情况报导很少,40MeV束的实验结果没有见到。有可能是保密原因,也有可能是实验进展不很顺利,而且以上预估的参量,都是按电子束质量一成不变的理想情况推出的,实际运行的情况难免与设计有差距。从有些报导看,他们的工作比较匆忙,有些设计不够成熟,没有更深入地考虑束动力学问题。斯坦福大学的实验结果似乎意义不大,功率放大器的增益仅为60%^[12]。Boeing的二级FEL,尚没见到实验进展情况,可能资金短缺拖延了工作。

总之,LANL的HIBAF是现阶段一台最高质量的高亮度加速器驱动的自由电子激光器。它的建造和试验可验证非常高亮度电子束的产生与传输,验证SAMOPA方案的可行性,为推动和设计高功率与超高功率GBFEL-TIE探明方向。HIBAF能提供高亮度高束流电子束,可作为调整新一代FEL装置和概念的试验台,也可提供给外来用户做实验。它能产生从远红外到紫外波长的高质量激光束,对其它物理研究也是一个极好的设备。

参 考 文 献

- [1] AW&ST, 1988 Nov. 14: 13
- [2] Fraser J S, Sheffield R L, Gray E R, IEEE J Q E, 1987, QE-23: 1489
- [3] Feldman D W, Warren R W, Watson J M *et al.* Proc. 1987 IEEE Particle Accelerator Conf. IEEE Catalog No 87CH2387-9. 1987: 221
- [4] Caristen B E, Young L M, Jones M E *et al.* Nucl Instr & Meth, 1990, A296: 687
- [5] Newnam B E, Warren R W, Sheffield R L *et al.* IEEE J Q E, 1985, QE-21: 867
- [6] Cox A, Yungman B. Proc SPIE, 1986; 582: 91
- [7] Rakowsky G, Bobbs B, Burke R *et al.* Nucl Instr & Meth, 1990, A296: 597
- [8] AW&ST, 1989 Feb. 13: 88
- [9] Cornelius W D, Bender S, Meier K *et al.* LA-UR-89-2938
- [10] Caristen A H, King N S P, Wilke M D *et al.* Nucl Instr & Meth, 1989, A285: 17
- [11] Lumpkin A H, Cornelius W D, Stein W E *et al.* Nucl Instr & Meth, 1990, A296: 769
- [12] Vintro L, Benson S V, Bhowmik A *et al.* Phys Rev Lett, 1990, 64 (14): 1662

*

*

*

作者简介:黄裕年,女,1937年2月出生。高级工程师。现从事强激光研究工作。

收稿日期:1992年3月2日。

收到修改稿日期:1992年6月20日。