

上海宽波段自由电子激光用户装置研制进展

赵小凤 盛树刚 陈明 张锡麟

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 上海宽波段自由电子激光用户装置将分为三个阶段实施,起步阶段、前期阶段和后期阶段。起步阶段的主要目标是研制高亮度注入器,前期阶段将向用户提供红外宽调谐自由电子激光包括近红外($2\sim 8\mu\text{m}$)、中红外($10\sim 25\mu\text{m}$)和远红外($200\sim 800\mu\text{m}$),激光微脉冲峰值功率 $1\sim 10\text{MW}$,宏脉冲内平均功率 $1\sim 10\text{kW}$,带宽 $10^{-2}\sim 5\times 10^{-3}$ 。

关键词 自由电子激光, 用户装置。

目前世界上已投入运行的自由电子激光(FEL)用户装置或应用装置有近十台,并开始了紧凑型FEL装置的商业开发^[1]。1993年这些FEL用户装置的总运行机时超过万小时,其中有三分之二左右的机时提供给上百个用户,开展了大量有关生命科学、材料科学和医学等的前沿学科研究^[2],日本还成立了FEL研究所,拟定了供产业用的FEL计划,其最终目标是综合量子加工的FEL系统^[3]。

发展FEL用户装置,特别是开发远红外和紫外短波FEL用户装置甚至X射线FEL应用装置^[4],是FEL发展的主要动向。

上海宽波段FEL用户装置(起步阶段)是中国科学院“八五”重大项目,于1992年10月起动。整个用户装置分三个阶段实施:起步阶段、前期阶段和后期阶段^[5]。起步阶段的主要目标是:在完成加速器四大关键部件(高频毫微秒栅控电子枪、长脉冲高稳定大功率调

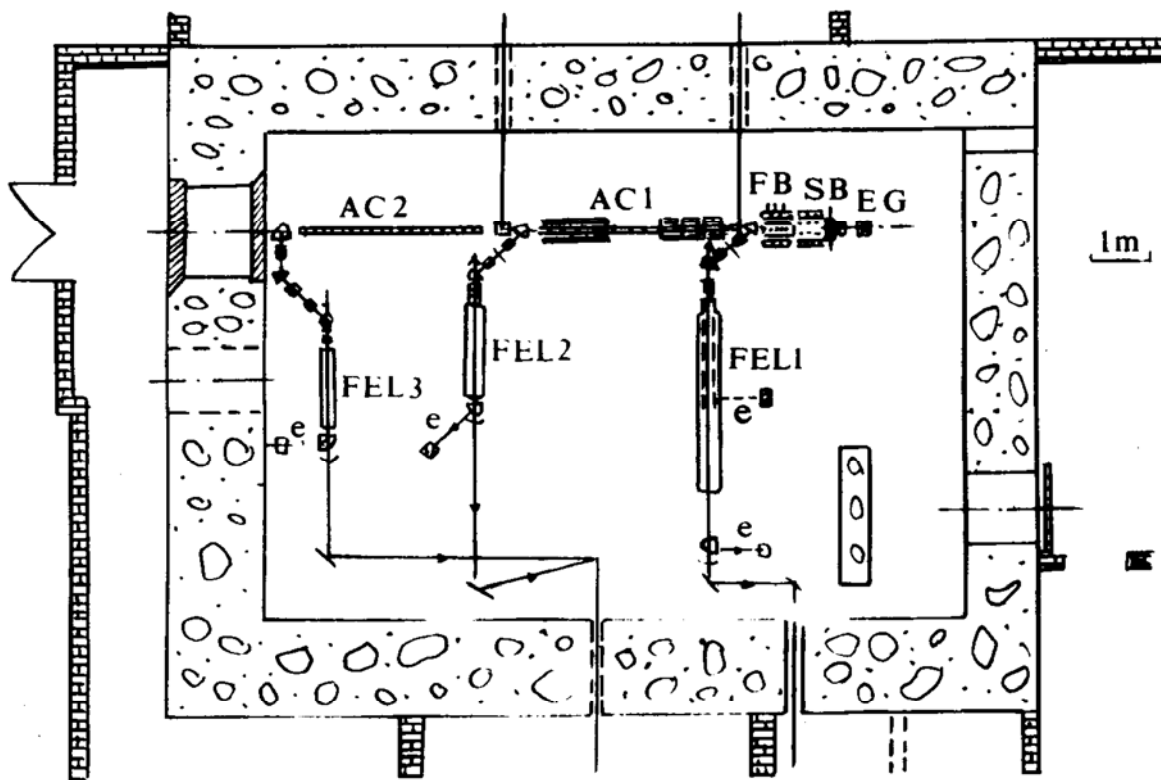


图1 上海宽波段自由电子激光用户装置红外实验布局(“九五”)

制器、高梯度聚束器和次谐波聚束器)研制的基础上,高亮度注入器出束,同时完成特种扭轨磁铁研制和用户实验室等辅助设施建设.前期阶段(即“九五”期间)的目标是:实现整个用户装置在红外波段的宽调谐目标,并开始向多用户开放,投入正常运行,使上海宽波段 FEL 用户装置跻身世界先进行列.

前期阶段加速器和自由电子激光振荡器的布局如图 1 所示,其主要电子束和激光脉冲设计参数列于表 1,包括近红外(2~8 μm),中红外(10~25 μm)和远红外(200~800 μm)三个宽调谐波长区;激光微脉冲的峰值功率在 1~10MW,宏脉冲平均功率在 1~10kW;激光带宽 $10^{-2}\sim 5\times 10^{-3}$. 用户实验室四个.

表 1 上海宽波段自由电子激光用户装置前期阶段(“九五”)目标

运行装置		FEL1(远红外)	FEL2(中红外)	FEL3(近红外)	
电 子 束 参 数	能量	~3MeV	20~30MeV	40~50MeV	
	能散	1%(狭缝限定)	1%(90%电子)	1%(90%电子)	
	峰值电流:微脉冲	20~30A	50~100A	50A	
	脉冲宽度	微脉冲	~10ps	~6ps	~6ps
		宏脉冲	6~8 μs	6~8 μs	6~8 μs
	重复频率	微脉冲	59.5MHz	59.5MHz	59.5MHz
		宏脉冲	3.125,6.25,12.5Hz	3.125,6.25,12.5Hz	3.125,6.25,12.5Hz
	电子束归一化发射度(栅控枪)	50~100 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$	50~100 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$	50~100 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$	
	激 光 参 数	波长	200~800 μm	10~25 μm	2.5~8 μm
		谱宽	$10^{-2}\sim 5\times 10^{-2}$	$10^{-2}\sim 5\times 10^{-3}$	$10^{-2}\sim 5\times 10^{-3}$
峰值功率		微脉冲	1~4MW	10~50MW	~10MW
		宏脉冲	1~4kW	10~20kW	1~10kW
脉冲能量		微脉冲	10~40 μJ	0.1~0.2mJ	0.1mJ
		宏脉冲	4~20mJ	~100mJ	~100mJ
幅度稳定(宏脉冲内)	10%	10%	10%		
束斑位置稳定	0.1 σ_{xy}	0.1 σ_{xy}	0.1 σ_{xy}		

表 2 基波聚束器参数

cell No.	β_w	β_g	E_z (MV/m)	α (1/m)	R_s (M Ω)
1	0.77	0.03241	9.62	0.07881	29.36
2	0.81	0.02775	11.19	0.08847	35.50
3	0.83	0.02489	12.22	0.09685	38.91
4	0.86	0.02306	13.10	0.10180	42.81
5	0.88	0.02214	13.59	0.10421	45.22
6~12	1.0	0.02234	14.33	0.09401	56.14

上海宽波段 FEL 用户装置的加速器由以下九个主要部分组成:

1)高亮度注入器

(1)栅控电子枪:发射 1A \times 1ns 电子束,频率 59.5MHz(光脉冲在光学谐振腔来回一次或两次的的时间),储备式钨钨阴极,阳极电压 100kV,电子束归一化发射度 10~50 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$.

(2)次谐波聚束器:重入式腔,单腔,聚束电压 20~30kV,工作频率 476MHz(2856/6, 59.5 \times 8),输入功率 10~15kW,品质因数约

3000.

(3)高梯度变相速基波聚束器:行波 $2\pi/3$ 模,共12腔,设计输入功率20MW(输出功率18MW),设计参数见表2.

2)主加速段

采用两根SLAC型行波等梯度加速管,每根长3.05m,工作频率 $2856 \pm 0.2\text{MHz}$, $2\pi/3$ 模,输入输出驻波比 <1.2 ,腔数86,带宽4MHz,每腔相移 $120^\circ \pm 2.5^\circ$,每根加速管总相移 $(85 \times 120) \pm 2.5^\circ$,填充时间 $0.83\mu\text{s}$,衰减系数0.57奈配.输入的微波功率取自基波聚束器的输出功率.当输入9MW微波功率时,电子束能量增益在 $\sim 30\text{MeV}$.

3)微波激励源

以压控锁相晶振器为激励微波的主振器,提供476MHz和2856MHz的微波源,频率稳定度好于 $10^{-7}/\text{日}$,杂波抑制比优于-40db.

4)微波功率源

采用速调管放大器作为基波聚束器和主加速器的微波功率源.整个放大器由60MW脉冲调制器、1kW行波管放大器和HK-1型30MW速调管组成.速调管调制器的高压脉宽为 $8\mu\text{s}$,平顶不平度 $\pm 0.5\%$,速调管输出脉冲功率20~22MW,微波脉宽 $6\sim 8\mu\text{s}$,重复频率最大12.5pps.采用阴控行波管放大器,增益30db,输出脉冲功率800W,脉宽 $8\mu\text{s}$,脉内相移小于 2° ,重复频率25pps.

5)高功率微波传输线

采用 $72\text{mm} \times 34\text{mm}$ 标准厚壁抽真空波导:速调管输出全功率输给基波聚束器,再把聚束器的输出功率经3db功率分配器等分功率成两路,一路输入到第一根加速管,另一路输入到第二根加速管,各路均设置高功率移相器和衰减器以调整加速管中的微波相位和功率.高功率微波传输线上设有50db耦合器,以监测速调管的输出功率和加速管的反射功率,并配有驻波比保护电路,当驻波比大于1.5时,停止调制器闸流管的触发.

6)真空系统

加速器运行时主要部位的动态真空度要求如下:

电子枪区	$6.67 \times 10^{-6}\text{Pa}$
速调管窗口	$6.67 \times 10^{-6}\text{Pa}$
加速管中心	$6.67 \times 10^{-5}\text{Pa}$
基波聚束器	$6.67 \times 10^{-5}\text{Pa}$
次谐波聚束器	$6.67 \times 10^{-5}\text{Pa}$
波导传输系统	$1.33 \times 10^{-4}\text{Pa}$

为此分别设置抽速为 $70\text{l/s} \sim 150\text{l/s}$ 的离子泵共13台,并设有真空度指示、离子泵离子流指示和真空阈值保护电路,当真空度低于阈值时停止调制器闸流管的触发.

7)水冷系统

包括三个部分:(1) $45 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 恒温水循环水路,共有三路,它可使次谐波聚束器、基波聚束器和加速管的管壁温度保持在 $45 \pm 0.1^\circ\text{C}$,同时使高功率波导壁保持在 $45 \pm 1^\circ\text{C}$ 之内.(2) 35°C 冷却水路,共有13路,用于速调管集电极和所有聚焦线圈的冷却.(3) $45 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 恒温水控制和监视电路.

8)控制系统

包括同步触发驱动电路和延时电路子系统、联锁保护(驻波比、真空、聚焦磁场、安全门等)子系统和参量监控(微波状态、真空状态、束流状态、水冷状态等)子系统等部分.

9)束测和束控

已设计的诊断电子束状态的探头共有四种:(1)束流变压器,分ns和 μs 两类,测电子束流强和波形.(2)荧光靶束流截面探测器用于诊断电子束位置、截面、发射度和能谱.(3)壁电流探测器诊断束流强和波形.(4)高频同轴型法拉弟筒诊断束流强和波形.

待设计的探头有束流损失监测器.各位置处的束流脉冲状态均通过控制台上的示波器或计算机显示屏监测.束流发射度和能谱的监测,通过四极透镜和分析磁铁,经计算机图像处理摄像机获取的荧光靶光斑得到.

(下转 41 页)

- Cheng X W, et al. Proc. 6th Int. Conf. on AMS, 1993, p. 48
- 2 Si H Z, et al. Rev. Sci. Inst., 1992, 63: 2472
- 3 易惟熙等. 核技术, 1991, 14: 33

Research and Applications of 6 MV Tandem Accelerator Mass Spectrometry at SINR

Cheng Xiaowu Liu Lianfan

(Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract An accelerator mass spectrometry facility has been installed on the 6MV tandem accelerator at SINR. The main features of the facility, its applications and improvements are described.

Key Words AMS, super-sensitive analysis, excitation function of nuclear reaction cross-section, archaeology, bio-science and medicine.

(上接 48 页)

扭轨磁铁和光学谐振腔的设计和研制, 将由本所与中科院上海光学精密机械研究所和中科院高能物理研究所合作进行.

参 考 文 献

- 1 Chan K C D, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1992, A318: 148

- 2 Amersfoort P W Van. Report of A Trip to The USA, December 1993
- 3 Yamanaka C. Nucl. Instr. and Meth., 1991, A304: 276
- 4 Pellegrini C, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1992, A331: 223
- 5 赵小风等. 上海宽波段自由电子激光用户装置论证报告, 1992

Present Status of Shanghai Broadband FEL User Facility

Zhao Xiaofeng Sheng Shugang Chen Ming Zhang Xilin

(Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Shanghai broadband free electron laser (FEL) user facility will be executed in three stages: start stage, earlier stage and later stage. The major goal is the development of a high brightness injector in the start stage. IR-FEL will be provided, including near-IR ($2 \sim 8 \mu\text{m}$), middle-IR ($10 \sim 25 \mu\text{m}$) and far-IR ($200 \sim 800 \mu\text{m}$) with peak power of $1 \sim 10 \text{ MW}$ (micropulse), average power of $1 \sim 10 \text{ kW}$ (macropulse), spectrum width of $10^{-2} \sim 5 \times 10^{-3}$ during the earlier stage.

Key Words free electron laser, user facility.