

·特邀综述·

上海软 X 射线自由电子激光装置

赵振堂^{1*}, 王东¹, 殷立新¹, 顾强¹, 方国平¹, 谷鸣¹, 冷用斌¹, 周巧根¹, 刘波¹,
唐传祥², 黄文会², 刘志³, 江怀东³, 翁祖谦³

¹中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

²清华大学工程物理系, 北京 100084;

³上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210

摘要 上海软 X 射线自由电子激光装置(SXFEL)是中国第一台 X 射线相干光源,其最短波长可达到 2 nm。这台基于 1.5 GeV C 波段高梯度电子直线加速器的激光装置包含 1 条种子型自由电子激光(FEL)束线、1 条自放大自发辐射束线以及 5 个实验站。整个装置的研制分试验装置(SXFEL-TF)和用户装置(SXFEL-UF)两个阶段进行,基于 0.84 GeV 直线加速器的 SXFEL-TF 以掌握种子型 FEL 级联技术和短波长回声型 FEL 为主要目标,而 SXFEL-UF 的目标则是建成可提供 5 个实验站的用户装置并于 2019 年底开始首批实验。介绍了 SXFEL 的基本构成和目前装置研制的进展。

关键词 激光技术; 自由电子激光; 软 X 射线; 相干光源

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0100004

Shanghai Soft X-Ray Free-Electron Laser Facility

Zhao Zhentang^{1*}, Wang Dong¹, Yin Lixin¹, Gu Qiang¹, Fang Guoping¹, Gu Ming¹,
Leng Yongbin¹, Zhou Qiaogen¹, Liu Bo¹, Tang Chuanxiang², Huang Wenhui², Liu Zhi³,
Jiang Huaidong³, Weng Zuqian³

¹Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

³School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

Abstract Shanghai soft X-ray free-electron laser facility (SXFEL) is the first coherent X-ray light source in China with the shortest wavelength down to 2 nm. SXFEL is based on a 1.5 GeV C-band linac, including one seeded FEL line, one self-amplified spontaneous emission FEL line and five experimental stations. The development of SXFEL is in two stages, the test facility SXFEL-TF and the user facility SXFEL-UF. SXFEL-TF is based on a 0.84 GeV linac, aiming to master the key technologies of a cascaded FEL with high gain harmonic generation (HGHG) and echo-enabled harmonic generation (EEHG) scheme. Meanwhile, the object of SXFEL-UF is to start user operation at the end of 2019. This paper presents the design, construction and commissioning status of SXFEL.

Key words laser technique; free-electron laser; soft X-ray; coherent light source

OCIS codes 140.2600; 140.7240

1 引言

上海软 X 射线自由电子激光装置(SXFEL)是基于自放大自发辐射(SASE)^[1-2]及外种子模式^[3-11]的自由电子激光(FEL)装置,其光谱范围可覆盖 2~

10 nm。SXFEL 位于上海同步辐射光源(SSRF^[12])园区内,如图 1 所示,其建筑总长 532 m,包括了约 250 m 长的直线加速器隧道、40 m 长的束流分配厅、160 m 长的波荡器大厅以及 80 m 长的光束线和实验大厅。SXFEL 采用常温直线加速器产生高能

收稿日期: 2018-10-25; 修回日期: 2018-11-05; 录用日期: 2018-11-19

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0401900)

* E-mail: zhaozhentang@sinap.ac.cn

量的电子束团,将此电子束送入波荡器系统中可产生高功率的相干辐射。



图 1 SSRF 和 SXFEL 的鸟瞰图

Fig. 1 Aerial view of SSRF and SXFEL

SXFEL 分成两期建设,包括试验装置(SXFEL-TF)和用户装置(SXFEL-UF),其中 SXFEL-TF 的主要目的是开展对先进 FEL,尤其是外种子型 FEL 运行模式的实验研究。主要研究内容包括高增益高次谐波产生(HGHG)^[4,9,11],回声型谐波产生(EEHG)^[5-6],以及 HGHG 和 EEHG 各种不同的级联组合。在 SXFEL 试验装置上开展的 X 射线 FEL

新原理与关键技术的研究将为未来软 X 射线用户装置以及硬 X 射线装置的建设打下坚实基础。SXFEL 的光阴极微波电子枪由清华大学研制^[13],C 波段高梯度加速单元^[14]以及不同种类的波荡器(包括平面型波荡器、椭圆极化型波荡器、真空内波荡器等)由中国科学院上海应用物理研究所研制,束线站由上海科技大学会同中国科学院上海应用物理研究所研制。通过将电子束能量提升到 1.5 GeV 并改造、新建波荡器线,试验装置将升级为一台软 X 射线 FEL 用户装置,辐射波长将覆盖水窗波段。SXFEL-UF 包括两条波荡器线、两条光束线以及 5 个实验站。图 2 给出了试验装置和用户装置的布局比较。SXFEL 用户装置将继续采用先进的外种子 FEL 模式,如 EEHG 或者级联 EEHG 等,在超高次谐波下获得更高的转化效率,同时保持外种子型 FEL 在输出特性上的优势,如稳定的中心波长、超短的辐射脉冲长度、与外部激光的自然同步以及多色运行等。

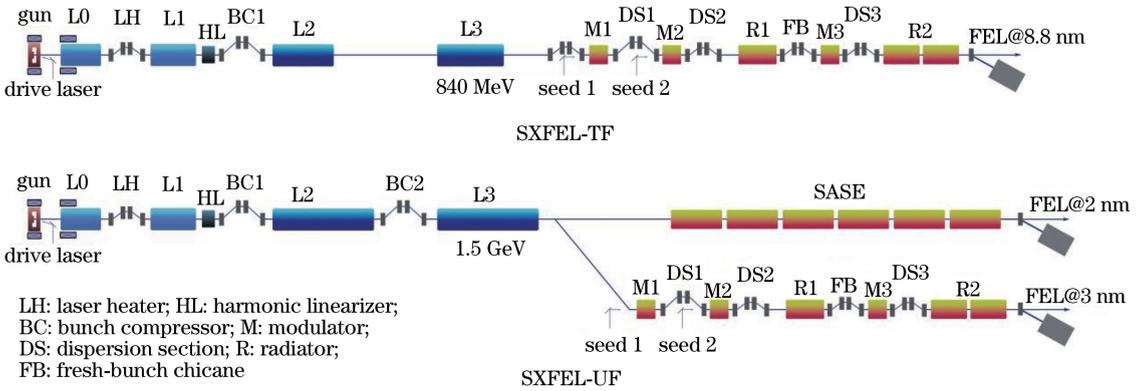


图 2 SXFEL 布局示意图

Fig. 2 Schematic of SXFEL layout

SXFEL 装置主要分成电子直线加速器、FEL 放大器(波荡器线)、光束线和实验站等部分,下面分别加以介绍。

2 电子直线加速器

SXFEL 加速器主要由光阴极注入器、主加速器和两个磁压缩段构成,试验装置和用户装置的主要参数如表 1 所示。

SXFEL 注入器包括 S 波段光阴极微波电子枪、发射度补偿线圈、驱动激光、两套 S 波段加速管、激光加热器等主要设备。SXFEL 注入器采用清华大学研制的改进型 1.6 单元光阴极微波电子枪,腔的结构设计经过仔细优化以改进高阶模抑制、模式间

表 1 SXFEL 直线加速器的主要参数

Table 1 Main parameters of SXFEL linear accelerator

Parameter	SXFEL-TF	SXFEL-UF
Electron beam energy /GeV	0.84	1.5
Energy spread (RMS) /%	≤0.1	≤0.1
Normalized emittance (RMS)	≤2.0	≤1.5
Bunch length (full width at half maximum, FWHM) /ps	≤1.0	≤0.7
Bunch charge /nC	0.5	0.5
Peak current /A	≥500	≥700
Repetition rate /Hz	10	50

隔、峰值电场等方面的性能。类似的电子枪在清华大学的汤姆孙散射 X 射线源(TTX)上进行了测试,在阴极表面电场为 110 MV/m、束团电荷量为

500 pC、峰值电流为 62.5 A 的条件下,获得了 0.78/0.92 mm·mrad 的归一化发射度。光阴极微波电子枪产生的电子束团通过一套 S 波段加速单元 L0(由两根 3 m 行波加速结构及配套功率源构成)加速到 130 MeV,加速结构上安装了两套螺线管线圈用于实现发射度补偿。在 L0 之后安装一套激光加热器以增加电子束的切片能散,从而抑制微束团不稳定性效应(MBI)对电子束品质的破坏。

SXFEL 主加速器由 S 波段加速单元 L1(包括两套 3m 的 S 波段加速结构)、X 波段谐波补偿腔(线性化器)、磁压缩器和两个 C 波段高梯度加速段(L2 和 L3)构成,如图 2 所示。其中,线性化器用于

在磁压缩器(BC1)之前补偿束团的高阶能散,BC1 用于电子束团压缩以提高峰值束流流强。在试验装置 SXFEL-TF 阶段,共有 6 套 C 波段单元,其中包括 2 套 L2 和 4 套 L3。每套 C 波段加速单元包括一套 50 MW 的速调管功率源,一个能量倍增器和两根 1.8 m 长的 C 波段加速结构。SXFEL 用户装置将在试验装置预留的位置新增一套 50 MW 的 S 波段微波功率源、4 套 C 波段加速单元和第二个磁压缩器(BC2)。除此之外,直线加速器末端还将新增一套 X 波段偏转腔,以实现高分辨率的束团纵向参数测量。设计的 SXFEL 用户装置主加速器的工作参数如表 2 所示。

表 2 所设计的 SXFEL-UF 工作参数

Table 2 Designed working parameters of SXFEL-UF

Device	Electron beam energy /MeV	Bunch length /mm	Energy spread /%	Gradient / (MV·m ⁻¹)	Phase /(°)	Momentum compression factor /mm
L0	130	0.86	0.14			
L1	273	0.86	1.44	27	-29.2	
X	256	0.86	1.51	19	180	
BC1		0.13				-48
L2	640	0.13	0.42	38	4	
BC2		0.07				-15
L3	1500	0.07	0.028	38	6	

3 FEL 放大器

3.1 FEL 运行模式

SXFEL 有多种运行模式,包括 SASE、HGHG、EEHG、级联 HGHG 和级联 EEHG-HGHG 等。如图 2 所示,种子型 FEL 线的波荡器线包括两级:第一级是典型的 EEHG 配置,包含两个调制段波荡器(M1 和 M2)、两个色散段(DS1 和 DS2)和一个辐射段(R1);第二级是典型的 HGHG 配置,包含一个调制段波荡器(M3)、一个色散段(DS3)和一个辐射段(R2),两级之间是一个小的束团刷新 Chicane(FB)。通过 HGHG-HGHG 级联或者 EEHG-HGHG 级联,SXFEL-TF 能够产生全相干的 8.8 nm 辐射。SXFEL-TF 的第一级种子激光的波长选择为 266 nm(典型钛宝石激光器的三倍频输出),第一级辐射段产生约 44 nm 的辐射,该辐射作为第二级运行的种子光,最终在 8.8 nm 产生峰值功率大于 100 MW 的输出。

通过将电子束能量提升至 1.5 GeV、束流流强提高到 700 A,SXFEL-UF 的波长将能够扩展到水窗波段。升级之前的基于外种子激光的波荡器线,用户装置将产生波长短至 3 nm 的全相干 FEL,同

时增加一条全新的基于 SASE 运行模式的波荡器线,以产生波长短至 2 nm 的 FEL。为使外种子 FEL 线能够在 3 nm 输出达到饱和,第一级辐射段由 3 台波荡器增加为 4 台,第二级辐射段由 6 台波荡器增加为 10 台。模拟结果表明,FEL 输出的脉冲峰值功率能够达到数百兆瓦,脉冲宽度约为 50 fs。为满足用户对偏振可控的需求,在第二级辐射段的下游还增加了两台椭圆极化波荡器,构成“afterburner”的运行模式。基于 SASE 运行模式的第二条波荡器线采用 16 mm 周期的真空内平面波荡器。加速器运行在 0.84 GeV 能量时输出波长可短至 8 nm,运行在 1.5 GeV 时可获得最短波长为 2 nm 的饱和 FEL 输出。

为满足用户装置对 FEL 调谐的需求,种子激光也是宽谱可调的,并且具有很高的时间、能量和指向稳定性。种子激光基于钛宝石啁啾放大器,基波输出的中心波长为 800 nm,通过采用光学参量放大技术可产生可调谐的红外输出,再通过光学和频、差频、倍频等非线性过程产生波长在 240~360 nm 范围内连续可调的紫外波段种子激光。SXFEL 装置的主要 FEL 参数如表 3 所示。

表 3 SXFEL 的 FEL 参数
Table 3 FEL parameters of SXFEL

Parameter	SXFEL-TF	SXFEL-UF	
		Seeded FEL line	SASE FEL line
FEL operation scheme	HGHG-HGHG/EEHG-HGHG	Externally seeded FEL	SASE
Seed laser wavelength /nm	266	240-360	
FEL wavelength /nm	8.8	3-20	2-10
FEL peak power /MW	≥ 100	≥ 100	≥ 100
FEL pulse length (FWHM) /fs	~ 100	~ 50	~ 100

3.2 FEL 模拟

3.2.1 SXFEL 试验装置

如前所述, SXFEL 可工作于多种模式, 这里仅列举一些典型的模拟结果, 包括两级 HGHG-HGHG 级联、EEHG-HGHG 级联以及单级 EEHG 模式, 更多的细节可参考文献[15-16]。

基于如表 1 所示的束流参数, 采用 GENESIS^[17] 进行 FEL 模拟。图 3(a)、(b) 列出了级联 HGHG 模式的模拟结果。第一级 HGHG 的种子激光(266 nm)强度约为 200 MW, 最终产生的

8.8 nm 输出峰值功率可超过 200 MW。除了传统的级联 HGHG 模式之外, 还将在 SXFEL 试验装置上进行一些先进模式的原理性验证实验, 包括 EEHG-HGHG 级联, 其主要输出特性如图 3(c)、(d) 所示。除此之外, 试验装置还计划采用单级 EEHG 模式工作在 30 次谐波, 直接产生 8.8 nm 的辐射^[18], 典型的模拟结果如图 3(e)、(f) 所示。工作于单级 EEHG 模式时, 可以采用脉冲更长的种子激光来完全覆盖整个电子束团, 这样最终的输出脉冲能量会更高, 光谱带宽会更窄。

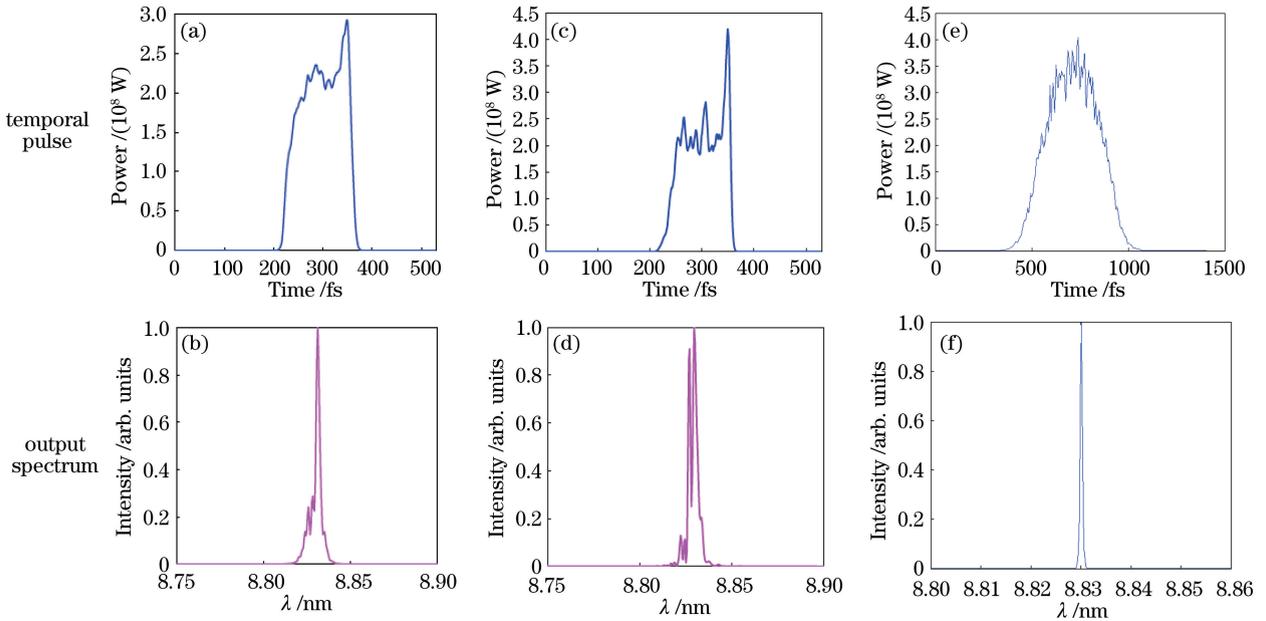


图 3 模拟的 SXFEL-TF 的 FEL 输出特性。(a)(b) HGHG-HGHG 模式;(c)(d) EEHG-HGHG 模式;(e)(f)单级 EEHG 模式

Fig. 3 Simulated FEL output characteristics of SXFEL-TF. (a)(b) HGHG-HGHG cascading scheme; (c)(d) EEHG-HGHG cascading scheme; (e)(f) single EEHG scheme

3.2.2 SXFEL 用户装置

根据用户装置的束流参数, 同样使用 GENESIS 对用户装置的 FEL 输出性能进行了模拟计算。图 4(a)、(b) 给出了 HGHG-HGHG 级联波荡器线的 FEL 性能, 图 4(c)、(d) 给出了 SASE 波荡器线的 FEL 性能。

3.3 波荡器

上海软 X 射线 FEL 装置共包括 29 台不同类型/参数的平面波荡器和椭圆极化波荡器, 其中 12 台波荡器已在试验装置阶段建成。波荡器的主要参数如表 4 所示。磁场测量结果表明, 试验装置第二级辐射段(R2)波荡器的相位误差小于 4° , 轨道偏离小于 $5 \mu\text{m}$, 满足物理要求。

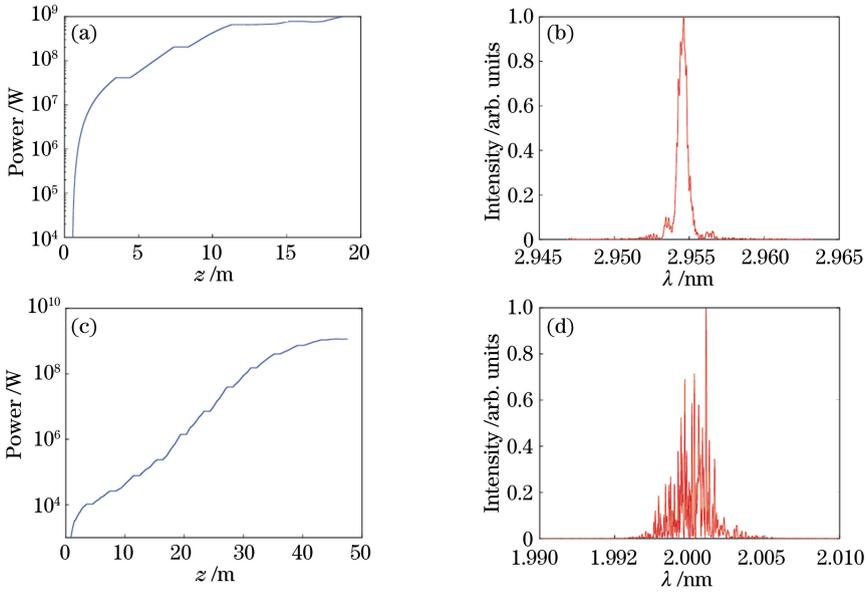


图 4 SXFEL-UF 的 FEL 性能模拟。(a)种子型 FEL 线(3 nm)沿波荡器长度 z 的增益曲线;

(b)种子型 FEL 线(3 nm)沿波荡器长度 z 的输出光谱;(c) SASE 线(2 nm)的增益曲线;(d) SASE 线(2 nm)的输出光谱

Fig. 4 Simulated FEL performance of SXFEL-UF. (a) Gain curve of seeded FEL line (3 nm) along length of undulator z ;

(b) output spectrum of seeded FEL line (3 nm) along length of undulator z ; (c) gain curve of SASE line (2 nm) ;

(d) output spectrum of SASE line (2 nm)

4 光束线与实验站

用户装置第一阶段将建设两条光束线(分别对应种子型 FEL 线和 SASE 线)和 5 个实验站,包括

生物成像(包括活细胞荧光超分辨显微镜)、超快物理、近常压光电子能谱、表面化学和原子分子光学(包括分子动态成像系统和复合速度成像系统)。图 5 显示了光束线的布局 and 关键部件。

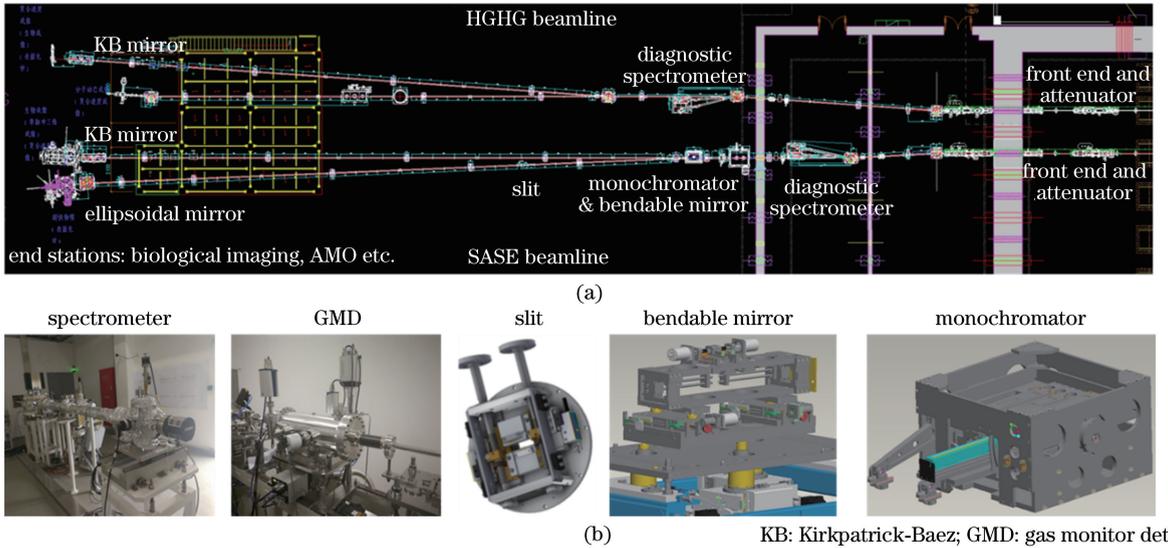


图 5 SXFEL 用户装置的(a)光束线布局及(b)关键部件

Fig. 5 (a) Beamline layout and (b) key components of SXFEL user facility

表 4 SXFEL 波荡器的主要参数
Table 4 Main parameters of SXFEL undulators

Device	Parameter	Value	
Stage 1 of seeded FEL line	Period /mm	80	
	Length /m	1.6	
	Modulator	Quantity	2
		Type	Planar, hybrid
	Maximal peak field /T	0.78	
	Minimum gap /mm	10	
	Radiator	Period /mm	40
		Length /m	3
		Quantity	4
		Type	Planar, hybrid
Maximal peak field /T		0.85	
Minimum gap /mm		10	
Stage 2 of seeded FEL line	Period /mm	55	
	Length /m	1.6	
	Modulator	Quantity	1
		Type	Planar, hybrid
	Maximal peak field /T	1.42	
	Minimum gap /mm	10	
	Radiator	Period /mm	23.5
		Length /m	3
		Quantity	10
		Type	Planar, hybrid
Maximal peak field /T	0.65		
Minimum gap /mm	8.75		
Afterburner	Period /mm	30	
	Length /m	3	
	Quantity	2	
	Type	Elliptical, APPLE-II	
	Maximal peak field /T	0.8/0.85/0.6*	
	Minimum gap /mm	4	
SASE FEL line	Undulator	Period /mm	16
		Length /m	4
		Quantity	10
		Type	Planar, hybrid, in-vacuum
		Maximal peak field /T	1.14
		Minimum gap /mm	4

* Horizontal polarization mode, vertical polarization mode and circular polarization

X 射线光学诊断系统是 SXFEL 光束线的重要组成部分, 可用于标定和监测 SXFEL 的辐射参数, 主要包括: 1) X 射线脉冲能量探测器, 该器件能够测量具有高峰值功率的 FEL 脉冲(光子通量可达 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ s}^{-1}$, 相应的 X 射线强度达到 $100 \sim 1000 \text{ GW/cm}^2$); 2) X 射线光谱仪, 该仪器的测量范围覆盖 $2 \sim 20 \text{ nm}$, 光谱分辨率 $\gg 2000$, 工作于非侵

入式模式, 可提供单脉冲信息; 3) X 射线脉冲长度测量设备, 该设备用于测量辐射脉冲的长度; 4) X 射线光斑测量器件, 该器件可实现 FEL 辐射脉冲的横向特性测量。

光束线的设计原则是在满足偏置、传输、聚焦等要求的前提下尽量提高通过率, 经过不断优化, 最终在实验站样品点获得 FEL 脉冲特性, 如表 5 所示。

表 5 SXFEL 在样品点的 FEL 参数
Table 5 FEL parameters of SXFEL at sample points

Parameter	SASE FEL beamline	Seeded FEL beamline
Wavelength /nm	1.2-12	2.4-24
Photon energy /eV	100-1000	50-500
Pulse energy / μ J	330(100 eV), 47(620 eV)	64(56 eV), 5(500 eV)
Photon number per pulse	$\sim 4.6 \times 10^{11}$ (620 eV), $\sim 1.3 \times 10^{13}$ (100 eV)	$\sim 5.0 \times 10^9$ (500 eV) $\sim 2.9 \times 10^{12}$ (50 eV)
Relative bandwidth /%	0.04-0.20	0.008-0.040
Resolving power of spectrometer	$\sim 3 \times 10^4$ (620 eV)	$\sim 4 \times 10^3$ (200 eV)
Spot size (RMS) / μ m	~ 3	~ 10
FEL pulse length (FWHM) /fs	117(620 eV)	50(300 eV)

生物成像实验站利用 X 射线 FEL 提供的全相干、超强 X 射线脉冲,采用单脉冲成像技术,在辐射损伤前记录样品的衍射信息,为细胞、病毒等微米级生物材料的活体无损成像提供先进的成像平台,同时兼顾新型材料结构分析、多物理场原位成像及 X 射线-物质相互作用等前沿性研究领域。生物成像实验站主要由多功能样品衍射腔和先进探测器系统等组成,通过结合激光抽运-X 射线探测等实验技术和方法,在飞秒时间尺度和纳米空间尺度实现材料动态成像。

活细胞荧光超分辨显微镜,包括基于 4Pi 架构的荧光单分子定位(4Pi-PALM)和荧光发射抑制(4Pi-STED)两个子系统。该显微镜系统利用单分子干涉,通过精密设计和搭建,引入变形镜消除系统和样品本身带来的像差,从而实现全细胞三维超分辨成像。

超快物理实验站利用 FEL 超短脉冲和高强度的特性实现时间分辨的共振弹性 X 射线散射(REXS)的实验测量。通过红外激光等抽运光源对关联体系内的电子有序态进行选择激发,揭示关联材料中多种自由度的有序态和集体激发之间的相互作用和超快动力学过程。该实验站研究体系涵盖非常规超导机理问题、强关联体系中的电子有序态和非平衡态下复杂体系的电子结构。

近常压光电子能谱实验站配备铬靶 X 射线源(离线光源)和电子能量分析器,主要开展以下研究:1)气-液-固三相界面研究;2)水溶液性质研究;3)电化学反应中电解液和电极界面原位研究;4)复杂生物体系(如蛋白质溶液)研究等。

表面化学实验站主要用于研究化学分子与催化剂表面的相互作用,特别是能源科学表面化学反应的催化过程。结合外源辐射脉冲与 X 射线 FEL 脉冲,利用超快抽运-探测技术,通过软 X 射线光谱学研究化学分子的电子结构于不同时间尺度(飞秒到皮秒)的变化,化学反应的实时观测,在分子层次上推导基元化学反应的过程与机理,进而深入地了

解化学反应的本质与历程。表面化学实验站由真空腔体作为主体结构,并配置光栅分光器或 TES-X 探测器,进行抽运-探测软 X 射线光谱学实验。

分子动态成像系统利用软 X 射线 FEL 作为激励源,结合反应显微成像谱仪技术,在全空间立体角内同时记录所有的反应产物(正负离子和电子),对分子动态反应进行具有超高空间和动量分辨率的多体复合成像。结合延迟分裂镜,实现单分子反应研究,即在原子坐标系下观察电子的运动或在分子坐标下观察原子核和电子量子态的瞬时演化,包括化学反应中的成键断键能量转移等。通过控制光的引入,也可以控制不同反应通道,实现一定程度上的操控过程。复合速度成像系统的核心是利用速度成像谱仪探测超快软 X 射线 FEL 脉冲作用于原子、分子、团簇、纳米颗粒等样品靶后产生的高能电子和离子,测量动能限制提高到 1120 eV,满足最新的科学需求,为国内外的原子分子和团簇物理研究提供新的实验平台。

5 建设与调试进展

SXFEL 于 2014 年 12 月启动建设。隧道、建筑及公用设施于 2016 年 4 月建成,随后即开始了设备安装工作。除注入器的激光加热器,主加速器的 X 波段线性化器、横向偏转腔,以及放大器段的第一级波荡器之外,其他设备均于 2016 年安装调试完毕。用户装置的建设于 2016 年 11 月启动,新波荡器隧道、波荡器大厅、用户实验大厅等建筑于 2018 年 4 月完成,目前已完成装修和公用设施设备的安装。用户装置的设备研制也已全面展开,包括新的 C 波段加速单元、新的波荡器、光束线和实验站等的研制。

图 6 显示了试验装置和用户装置的建设进展情况。用户装置的设备安装和调试将于 2018 年下半年开始,预计 2019 年下半年正式开展用户实验。

2016 年 12 月初步完成 SXFEL-TF 直线加速

器、波荡器和诊断光束线主要设备的安装之后,试验装置即开始了第一阶段的微波老练和束流调试工作。电子束被加速到 700 MeV,并顺利通过整个波荡器段,在第二级辐射段的末端成功地观测到波长在 15 nm 左右的波荡器辐射。2017 年上半年,对直线加速器进行长时间的功率老练,在 500 MeV 能量下进行电子束流调试和 FEL 调光,束流条件为:磁压缩之后的束流能量约为 200 MeV,束团电荷量为

350 pC,束团长度约为 5 ps,水平和垂直方向归一化发射度分别为 $1.2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 和 $1.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。2017 年 6 月,SXFEL 试验装置首次出光,实现了第一级 HGHG 模式下的二次谐波辐射和放大,实验结果如图 7 所示。2017 年 7 月底至 8 月中旬又实现了第一级 HGHG 的 3~6 次谐波的出光和放大,并测得光谱,如图 8 所示,其中 6 次谐波辐射的波长为 44 nm 左右。



图 6 (a) SXFEL 建筑(SXFEL-TF 和 SXFEL-UF);(b)注入器;(c)主加速器;(d) FEL 放大器

Fig. 6 (a) SXFEL building (SXFEL-TF and SXFEL-UF); (b) injector; (c) main accelerator; (d) FEL amplifier

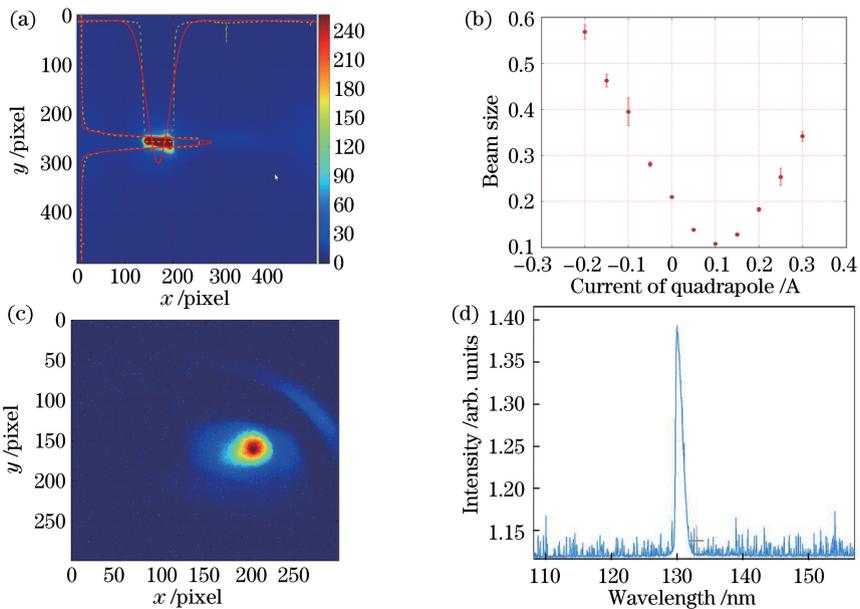


图 7 SXFEL-TF 的直线加速器和 FEL 调束结果(2017 年 6 月)。(a)束流能量;(b)横向发射度;
(c)横向光斑;(d) HGHG 模式下的 2 次谐波辐射(133 nm)

Fig. 7 Commissioning results of linear accelerator and FEL of SXFEL-TF (June 2017). (a) Beam energy; (b) transverse emittance; (c) transverse beam spot; (d) second harmonic under HGHG scheme (133 nm)

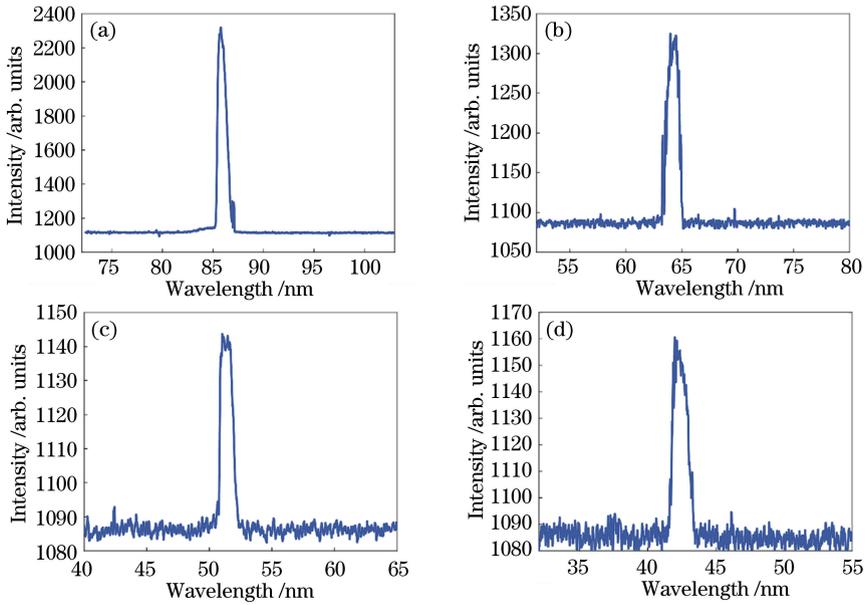


图 8 SXFEL 第一级 HGHG 的 3~6 次谐波辐射光谱测量结果。(a) 3 次谐波;(b) 4 次谐波;(c) 5 次谐波;(d) 6 次谐波

Fig. 8 3rd-6th harmonic spectra of first HGHG output of SXFEL. (a) 3rd harmonic;
(b) 4th harmonic; (c) 5th harmonic; (d) 6th harmonic

2017 年 9 月底,SXFEL 进入 EEHG 实验阶段,分别采用第一级辐射段和第二级辐射段实现低次谐波 EEHG 和高次谐波 EEHG 的出光和放大。为满足实验需求,2017 年 9 月至 11 月完成了 X 波段谐波腔、新种子激光器、光谱仪和新调制段波荡器的安装及调试,2017 年 12 月实现了 EEHG 两级种子激光的同步。2018 年 1 月实现了三次谐波 EEHG 的

出光,辐射脉冲能量达毫焦量级。2018 年 2 月至 3 月开始种子激光改造,并开展高次谐波 EEHG 实验。2018 年 4 月测得 EEHG 的 14~30 次相干谐波辐射信号,实验结果如图 9 所示,并在第二级辐射段中实现 SASE 的指数增益。2018 年 5 月底,基于 HGHG 实现 11 次谐波的出光和放大,2018 年 6 月初实现 EEHG 11 次谐波的出光和放大,24 nm 的

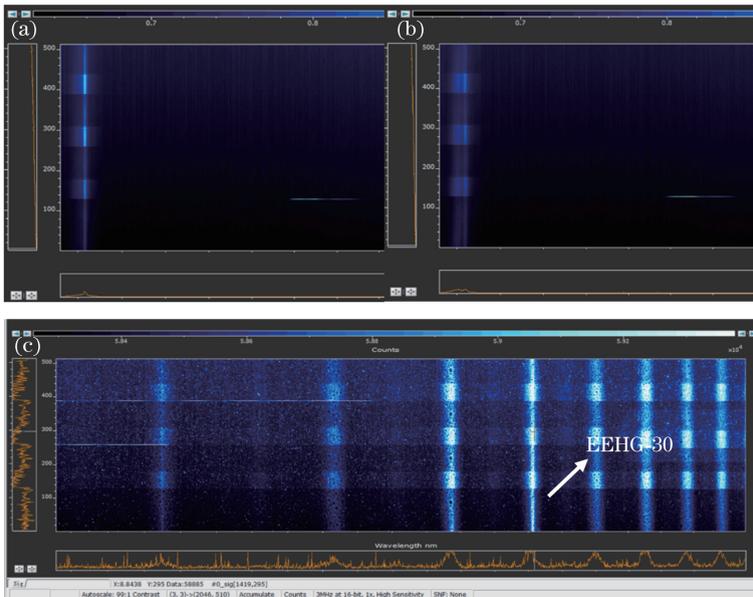


图 9 SXFEL 开展的 EEHG 实验结果。(a) 11 次谐波的 EEHG 光谱;
(b) 11 次谐波的 HGHG 光谱;(c) 30 次谐波的 EEHG 相干信号

Fig. 9 Results of EEHG experiment at SXFEL. (a) EEHG spectrum of 11th harmonic;
(b) HGHG spectrum of 11th harmonic; (c) EEHG coherent signal of 30th harmonic

HGHG 和 EEHG 的输出功率均达到百微焦量级。2018 年 6 月实现 EEHG 20 次谐波出光,目前正在进行 20 次以及更高次谐波的 EEHG 放大实验。

6 结 论

上海软 X 射线 FEL 装置正处于紧张的试验装置调试和用户装置建设并行开展的阶段。目前试验装置 SXFEL-TF 已经实现了首次出光,并且在先进的外种子激光 FEL 实验中取得了重要进展。用户装置 SXFEL-UF 的新波荡器大厅、实验大厅等相关的基建和公用设施建设已完成,很快将开始直线加速器和波荡器的升级;通过将直线加速器能量提升到 1.5 GeV 并建设 2 条波荡器线、2 条光束线和 6 个实验站,用户装置将于 2019 年底为用户提供高亮度的超快软 X 射线 FEL。

参 考 文 献

- [1] Kondratenko A M, Saldin E L. Generation of coherent radiation by a relativistic electron beam in an undulator. *Particle Accelerators*, 1980, 10: 207-216.
- [2] Bonifacio R, Pellegrini C, Narducci L M. Collective instabilities and high-gain regime in a free electron laser[J]. *Optics Communications*, 1984, 50(6): 373-378.
- [3] Yu L H. Generation of intense UV radiation by subharmonically seeded single-pass free-electron lasers[J]. *Physical Review A*, 1991, 44(8): 5178-5193.
- [4] Wu J H, Yu L H. Coherent hard X-ray production by cascading stages of High Gain Harmonic Generation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2001, 475(1/2/3): 104-111.
- [5] Stupakov G. Using the beam-echo effect for generation of short-wavelength radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(7): 074801.
- [6] Xiang D, Stupakov G. Enhanced tunable narrow-band THz emission from laser-modulated electron beams [J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2009, 12(8): 080701.
- [7] Yu L H. High-gain harmonic-generation free-electron laser[J]. *Science*, 2000, 289(5481): 932-934.
- [8] Zhao Z T, Wang D, Chen J H, *et al.* First lasing of an echo-enabled harmonic generation free-electron laser[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(6): 360-363.
- [9] Liu B, Li W B, Chen J H, *et al.* Demonstration of a widely-tunable and fully-coherent high-gain harmonic-generation free-electron laser [J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2013, 16: 020704.
- [10] Allaria E, Appio R, Badano L, *et al.* Highly coherent and stable pulses from the FERMI seeded free-electron laser in the extreme ultraviolet [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6:699-704.
- [11] Allaria E, Castronovo D, Cinquegrana P, *et al.* Two-stage seeded soft-X-ray free-electron laser [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 913-918.
- [12] Jiang M H, Yang X, Xu H J, *et al.* Shanghai synchrotron radiation facility [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(22): 4171-4181.
- [13] Zheng L M, Du Y C, Zhang Z, *et al.* Development of S-band photocathode RF guns at tsinghua university[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 834: 98-107.
- [14] Fang W C, Gu Q, Sheng X, *et al.* Design, fabrication and first beam tests of the C-band RF acceleration unit at SINAP[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 823: 91-97.
- [15] Zhao Z T, Wang D, Yin L X, *et al.* The current status of the SXFEL project [J]. *AAPPS Bulletin*, 2016, 26: 12-24.
- [16] Feng C, Huang D Z, Deng H X, *et al.* A single stage EEHG at SXFEL for narrow-bandwidth soft X-ray generation[J]. *Science Bulletin*, 2016, 61(15): 1202-1212.
- [17] Reiche S. GENESIS 1.3: a fully 3D time-dependent FEL simulation code [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1999, 429(1/2/3): 243-248.
- [18] Zhao Z T, Wang D, Gu Q, *et al.* Status of the SXFEL Facility[J]. *Applied Sciences*, 7(6): 607.