



·自由电子激光和新型光源·

## 中物院太赫兹自由电子激光装置现状及升级计划

周 奎, 李 鹏, 周 征, 肖德鑫, 王建新, 王汉斌, 罗 星, 单李军,  
沈旭明, 和天慧, 劳成龙, 闫陇刚, 徐 勇, 张 鹏, 陈立均,  
王伟俊, 刘 宇, 刘 婕, 杨兴繁, 吴 岱, 黎 明

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 中国工程物理研究院太赫兹自由电子激光装置(CAEP THz FEL, CTFEL)是国内唯一运行的基于超导加速器的高平均功率自由电子激光太赫兹源,具有频率连续在线可调(0.1~4.2 THz)、高峰值功率(>0.5 MW)、高平均功率(>10 W)、高重频(54.17 MHz)、短脉冲(~ps)、窄线宽(~2%)、全相干和线性偏振等特点。自2017年出光以来,已稳定运行了四年多,并开展了诸多应用实验研究。为进一步满足用户需求,CTFEL计划升级为一台红外太赫兹自由电子激光装置,电子束能量提升至最大50 MeV,频谱范围拓展至0.1~125 THz,同时,建设材料光谱和生物医学两个实验站。

**关键词:** 自由电子激光; 太赫兹; 红外; 超导加速器; 用户实验站

中图分类号: TN248.6

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220091

## Status and upgrade plan of CAEP THz-FEL facility

Zhou Kui, Li Peng, Zhou Zheng, Xiao Dexin, Wang Jianxin, Wang Hanbin, Luo Xing, Shan Lijun,  
Shen Xuming, He Tianhui, Lao Chenglong, Yan Longgang, Xu Yong, Zhang Peng, Chen Lijun,  
Wang Weijun, Liu Yu, Liu Jie, Yang Xingfan, Wu Dai, Li Ming

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The Chinese Academy of Engineering Physics Terahertz Free Electron Laser Facility (CAEP THz FEL, CTFEL) is the only high-average power free electron laser terahertz source based on superconducting accelerators in China, with the advantages of continuously adjustable frequency (0.1–4.2 THz), high peak power (>0.5 MW), high average power (>10 W), high repetition rate (54.17 MHz), short pulse (~ps), narrow bandwidth (~2%), full coherence and linear polarization. Since the first lasing in 2017, it has been running stably for more than four years, and many experimental studies have been carried out. To further meet the demands of users, an upgrade plan for an infrared terahertz free electron laser facility based on CTFEL is proposed, where the electron beam energy is increased to a maximum of 50 MeV, and the spectrum range is expanded to 0.1–125 THz. Meanwhile, two experimental stations for material spectroscopy and biomedicine will be built.

**Key words:** free electron laser, terahertz, infrared, superconducting accelerator, user experimental station

太赫兹(THz)辐射在电磁波谱上介于微波和红外波之间,处于电子学向光学过渡的阶段,在通信技术、生物医学、危险品检测、国防安全等方面具有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。传统的电子学和光子学技术产生的太赫兹源平均功率普遍较低,大部分技术还存在波长不可调、转换效率低、重复频率低等问题,应用相对局限。基于自由电子激光(FEL)的太赫兹源,具有波长大范围连续可调、平均功率高、相干性好、偏振可控等特点,是一种理想的太赫兹辐射源。

国际上,已建设了多台太赫兹自由电子激光实验装置,其中最著名的长波FEL装置有荷兰的FELIX、俄罗斯的Novo FEL以及德国的ELBE。荷兰FELIX装置采用常温加速器技术路线,频率覆盖0.2~100 THz,是目前频率

\* 收稿日期:2022-03-29; 修订日期:2022-06-27

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ130018);国家自然科学基金项目(12005211, 11905210, 11975218);中物院创新发展基金创新项目(CX20210046)

联系方式:周 奎, zhoudukui@163.com。

通信作者:吴 岱, wudai04@163.com;

黎 明, liming@caep.cn。

覆盖范围最广的用户装置<sup>[4]</sup>。俄罗斯 Novo FEL 装置采用常温多圈能量回收技术实现了高平均功率输出,最大功率达到 500 W<sup>[5]</sup>。德国 ELBE 装置采用超导加速器技术路线<sup>[6]</sup>,频率覆盖 1.2~75 THz,并建有功能完善的用户实验站。国内,近年来长波自由电子激光的发展方兴未艾。中国工程物理研究院 2005 年实现了远红外自由电子激光受激辐射<sup>[7]</sup>,2011 年研制了一台紧凑型自由电子激光太赫兹源<sup>[8]</sup>;2016 年,华中科技大学设计并研制了一台振荡器 THz-FEL 装置<sup>[9]</sup>;同年,北京大学开展了基于超导光阴极注入器的超辐射太赫兹源实验研究<sup>[10]</sup>;中国科学技术大学负责建设的合肥红外自由电子激光装置 (FELiCHEM)<sup>[11]</sup>,频率覆盖 1.5~120 THz,现已顺利实现出光。

2017 年,由科技部“国家重大仪器设备开发专项”资助,中国工程物理研究院牵头,联合北京大学、清华大学及多家应用单位联合研制的太赫兹自由电子激光装置 (CTFEL) 实现饱和出光<sup>[12]</sup>。装置位于四川省成都市双流区银河 596 科技园区,是国内唯一运行的基于超导加速器的高平均功率太赫兹自由电子激光装置。

本文将主要介绍 CTFEL 装置的性能参数、运行现状以及升级计划。

## 1 CTFEL 装置简介

CTFEL 装置采用光阴极直流高压电子枪和射频超导加速器驱动的谐振腔型自由电子激光技术路线<sup>[13]</sup>,主要包括直流高压电子枪、聚束腔、射频超导加速器、波荡器、激光谐振腔、太赫兹传输与测试系统等,其束线布局如图 1 所示。高亮度电子束由驱动激光在砷化镓半导体光阴极表面激发,通过直流高压加速到 320 keV。电子束通过螺线管的横向聚焦和聚束腔的纵向聚束后,进入射频超导加速器,增能至 6~8 MeV,再经过消色散段传输到波荡器中,产生太赫兹辐射。辐射的太赫兹光在光腔中振荡,与后续电子束相互作用,受激放大达到饱和,腔中太赫兹光场通过下游腔镜小孔耦合输出,沿太赫兹传输束线传输至用户实验站开展实验研究。在 CTFEL 装置直线段还搭建了电子束应用实验平台,可用于开展电子束相关的应用实验。

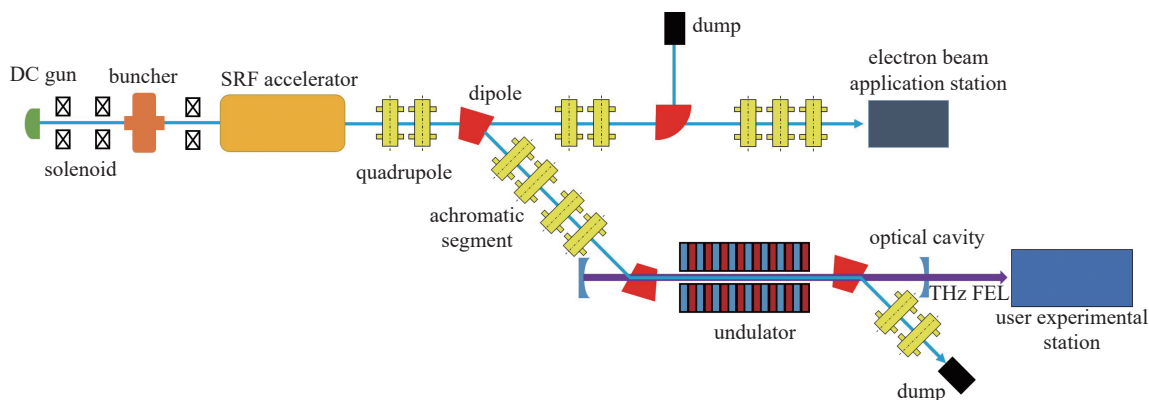


Fig. 1 Beam line layout diagram of CTFEL facility

图 1 CTFEL 装置束线布局图

CTFEL 装置示意图如图 2 所示,其中,电子源、超导加速器、波荡器和光腔系统是 CTFEL 装置的核心部件,其系统参数见表 1。电子源采用半导体光阴极直流高压电子枪技术<sup>[14]</sup>,为整个加速器系统提供高品质电子束流,主要由驱动激光系统、阴极制备系统、load-lock 系统、直流高压电子枪和聚束腔以及传输、测量元件等构成。驱动激光为波长 532 nm 的连续锁模皮秒激光,激光脉冲重复频率为 54.167 MHz,脉冲宽度约 12 ps。光阴极为负电子亲和势砷化镓光阴极 (NEA-GaAs),采用 Cs, O 交替的“YOYO”法进行激活,量子效率可以达到 10% 以上,暗室寿命超过 1000 h。直流高压电子枪通过三极溅射离子泵和非蒸散吸气泵 (NEG) 组合,真空度达到  $10^{-10}$  Pa 量级,采用电荷泄放型陶瓷绝缘子并填充 0.5 MPa 的  $\text{SF}_6$  绝缘气体,工作电压为 320 kV,阴极表面电场强度约 4 MV/m,其结构示意图如图 3 所示。

超导加速器主要包括两只 1.3 GHz 4-cell TESLA 型射频超导腔、主耦合器、调谐器、低温恒温器、低电平控制系统以及配套的低温系统和微波功率系统等<sup>[15]</sup>。低温系统为超导腔提供 2 K 超流氦的低温环境,微波功率系统为每只超导腔提供最高 30 kW 的微波功率。恒温器为超导腔提供低温低磁的超导环境,包括 2 K 和 80 K 的低温层以及磁屏蔽层。低电平控制系统通过微波功率的反馈控制,在超导腔内建立稳定的射频加速电场。在 2 K 条件下,两只超导腔的有效加速梯度均达到 10 MV/m<sup>[16]</sup>,幅相稳定度优于 0.03% 和 0.06°。

CTFEL 采用 Halbach 混合型永磁波荡器,共 42 个周期,周期长度为 38 mm,磁场间隙的机械调节通过伺服电机

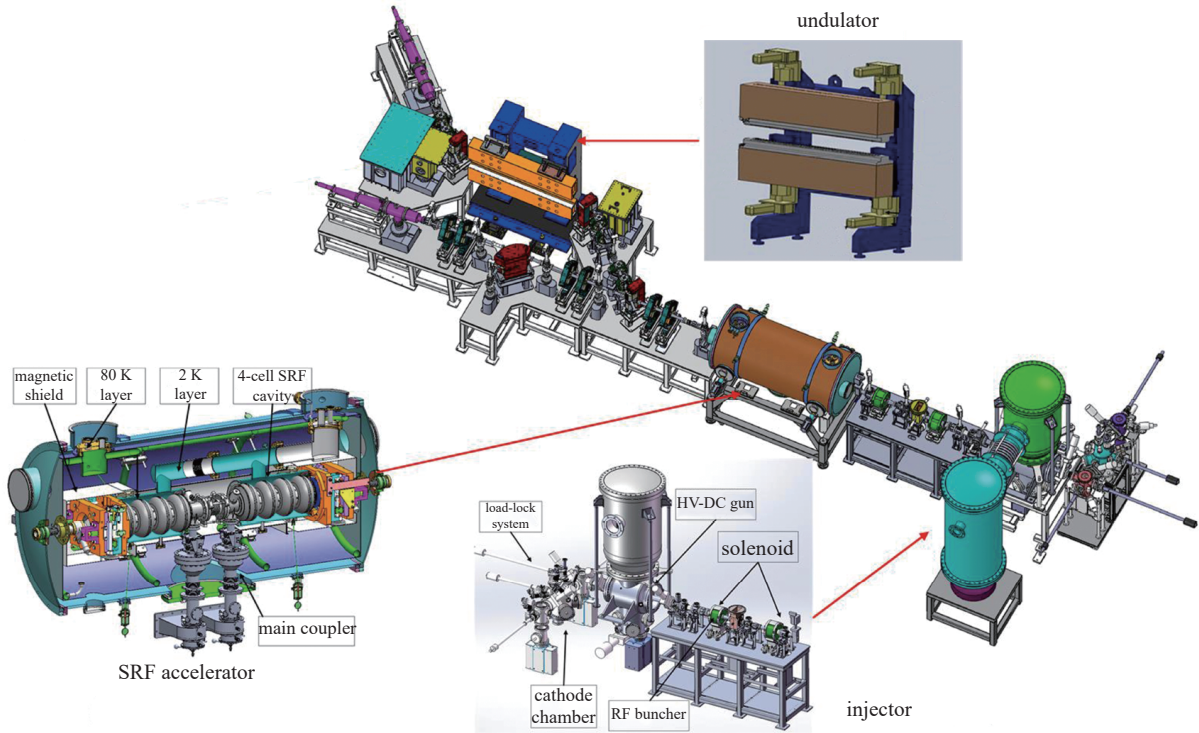


Fig. 2 Schematic diagram of CTFEL facility  
图 2 CTFEL 装置示意图

表 1 CTFEL 装置系统参数

Table 1 System parameters of CTFEL facility

injector parameter	value	SRF accelerator parameter	value	undulator parameter	value
laser wavelength/nm	532	working frequency/GHz	1.3	number of periods	42
repetition rate/MHz	54.167	working temperature/K	2	period length/mm	38
gun voltage/kV	320	effective field gradient/(MV/m)	10	gap range/mm	18~32
bunch length/ps	~12	amplitude stability	0.03%	optical cavity length/mm	2769
beam current/mA	1~5	phase stability/(°)	0.06	curvature radius/mm	2218

和光栅尺进行控制, 调节范围为 18~32 mm, 对应的 K 因子变化范围为 0.82~1.88, 间隙调节精度为 1 μm, 横向磁场好场区大于 12 mm。光腔腔镜表面为镀金膜, 反射率大于 95%, 采用小孔耦合方式输出, 耦合孔直径为 2.4 mm, 对应的耦合输出效率约为 2%。

## 2 CTFEL 运行现状

### 2.1 CTFEL 性能参数

CTFEL 作为基于自由电子激光的相干强太赫兹源, 具有频率连续可调、高峰值功率、高平均功率、高重频、短脉冲、全相干和线性偏振等特点。CTFEL 装置的太赫兹性能参数如表 2 所示。其设计的辐射频率范围为 1~3 THz, 通过对装置参数的优化, 现已实现 0.67~4.2 THz 范围内连续可调; 宏脉冲长度 0.3~8 ms 连续可调, 宏脉冲重复频率 20 Hz 以内可调; 微脉冲长度小于 10 ps, 微脉冲重复频率 54.167 MHz<sup>[17]</sup>。2020 年, 在 CTFEL 基础上新建了一条基于波荡器超辐射的太赫兹束线, 可将 CTFEL 辐射的频率拓

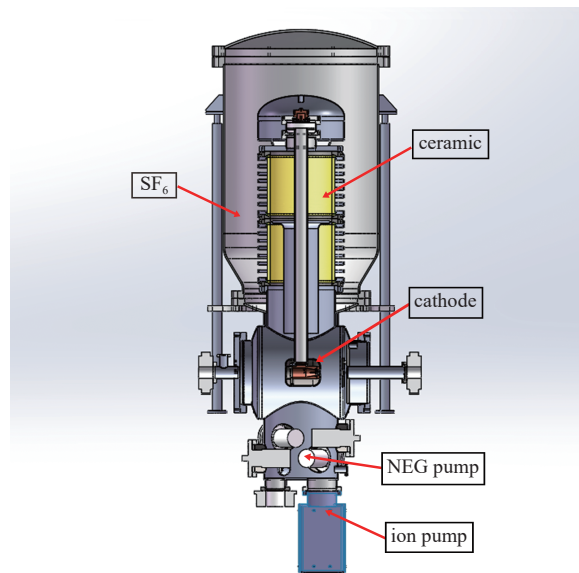


Fig. 3 Schematic diagram of the structure of the HV-DC electron gun  
图 3 直流高压电子枪结构示意图

表 2 CTFEL 装置太赫兹参数  
Table 2 THz parameters of CTFEL facility

parameters	values
THz FEL frequency range/THz	0.67~4.2
bandwidth/%	~2
macro-pulse average power/W	10~60
macro-pulse repetition rate/Hz	1/5/10/20
macro-pulse length/ms	0.3~8
micro-pulse length/ps	<10
micro-pulse repetition rate/MHz	54.17
peak power/MW	>0.1
minimum beam size/mm	<1
polarization direction/%	>99 (horizontal)
super-radiation frequency range/THz	0.1~0.7
super-radiation electric field/(MV/cm)	~1

展到 0.1 THz, 进一步拓展了 CTFEL 的应用范围<sup>[18]</sup>, 初步实验测量分别得到了 0.223 THz 和 0.437 THz 的超辐射太赫兹波输出<sup>[19]</sup>。

图 4 给出了 CTFEL 装置太赫兹极化度和太赫兹光斑尺寸的测量结果, 极化方向为大于 99% 水平极化, 太赫兹光斑横向尺寸最小约为 1 mm。图 5 为 CTFEL 的太赫兹频谱和输出功率测量结果。太赫兹光的谱宽度约为 2%, 在 1~3 THz 之间, 宏脉冲平均功率大于 10 W, 最高输出功率达到 60 W。

## 2.2 CTFEL 用户实验

CTFEL 自 2018 年开放用户实验以来, 已稳定运行四年多, 年用户机时逐年递增, 2021 年开放机时大于 1200 h,

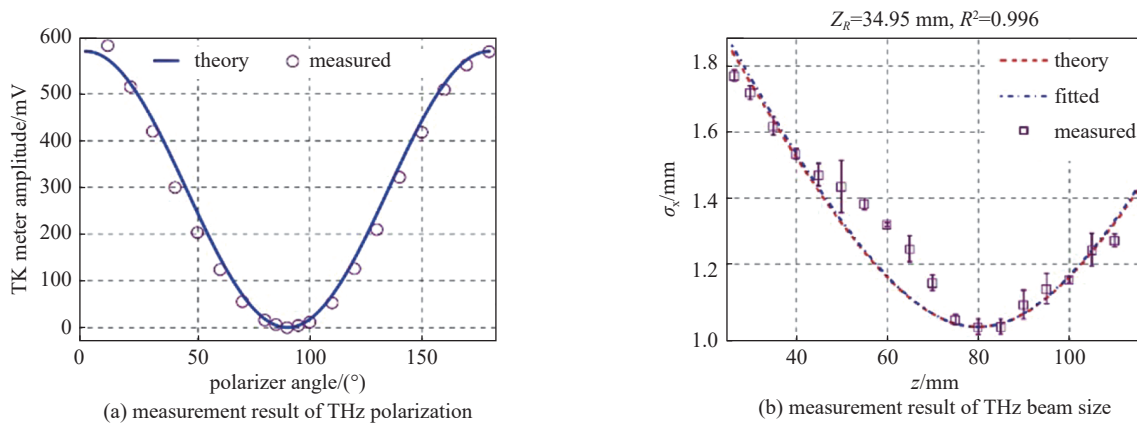


Fig. 4 Measurement results of THz polarization and beam size

图 4 太赫兹极化度与太赫兹束斑尺寸测量结果

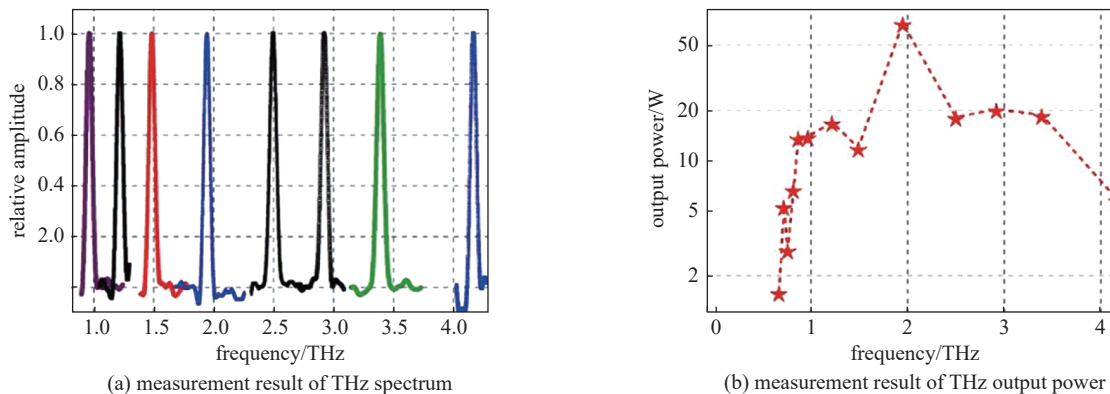


Fig. 5 Measurement results of THz polarization and beam size

图 5 太赫兹频谱与太赫兹输出功率测量结果



用户实验已超过 40 轮次, 主要研究领域涉及材料特性分析、太赫兹波谱、太赫兹器件、太赫兹生物效应、电子束应用、FLASH 闪光放疗等。下面列举几例在 CTFEL 装置上开展的用户实验。

在先进材料研究方面, 与中科院固体所合作, 开展了电子材料的太赫兹动力学特性研究。利用 CTFEL 特有的皮秒脉宽微脉冲结构, 搭建了“皮秒太赫兹泵浦-探测系统”, 测量了半导体材料的泵浦-探测特性以及电子能量弛豫时间, 并对室温下高迁移率 n-GaSb 晶体在不同太赫兹频率下的动力学电子特性进行了测试。结果表明, 在强太赫兹自由电子激光辐射下, 电子-声子散射诱导的热电子效应或非线性电子响应会导致半导体材料中电子能量弛豫时间的减小<sup>[20]</sup>。相对于其他超快光电探测技术, 基于 CTFEL 的太赫兹泵浦-探测系统在电子和光电子材料研究中具有如下优势: 不涉及光生载流子和相关激子效应, 可以测量自由电子的动量和能量弛豫动力学过程; 可实现单色太赫兹泵浦和探测, 无需对测量数据进行傅里叶变换来分析实验结果; 结合自由电子激光的频率连续可调性, 实现对太赫兹泵浦-探测的辐照频率选择。

在太赫兹生物效应研究方面, 与西安交通大学合作, 开展了太赫兹辐照对大肠杆菌红色荧光蛋白表达影响的研究, 实验观察到了 3.1 THz 辐照可以促进重组大肠杆菌细胞内的质粒复制过程, 进而提高重组质粒携带的特定基因编码的蛋白质表达水平的升高<sup>[21]</sup>。该研究充分发挥了 CTFEL 装置频率连续精确可调、高峰值功率、占空比大范围可调的特点, 实现了长时间对生物样品的连续辐照。

在医学研究方面, 利用 CTFEL 提供的高亮度电子束流, 搭建了国内首台 X 射线闪光放疗实验平台 (PARTER)。通过拉近距离的方式, 以较小射野为代价实现了世界首次高能 X 射线 FLASH 效应演示验证, 通过对荷瘤小鼠的实验对比, 证实了具有极大临床应用前景的 MV 级 X 射线源也能触发 FLASH 效应<sup>[22]</sup>。2021 年, 多家国内单位陆续在 PARTER 装置上开展了 FLASH 效应的相关实验研究, 如 FLASH 照射联合肿瘤免疫治疗的副反应研究、FLASH 小鼠半肝辐照实验研究、FLASH 肺癌体表实验研究、FLASH 辐照神经系统保护效应研究等。

### 3 CTFEL 升级计划

CTFEL 作为国内唯一运行的基于超导加速器的太赫兹自由电子激光装置, 突破了诸多关键技术, 推动了国内太赫兹领域的发展, 但总体来说能力有限, 如: 频率覆盖范围不够宽, 仅能覆盖 0.1~4.2 THz, 没有配套建设功能完善的用户实验站。受限于现有的频谱宽度和实验条件, CTFEL 装置的研究潜力没有得到充分发挥, 难以满足诸多新兴的基础科学与应用研究需求。为了进一步满足用户需求, 我们提出了 CTFEL 装置的升级计划。CTFEL 装置的升级主要包括: 将 CTFEL 装置升级为一台红外太赫兹自由电子激光装置和建设两个功能相对完善的用户实验站。

在现有 CTFEL 基础上, 增加两段 2×9-cell 超导加速段, 将电子束能量提升到最大 50 MeV, 同时增加两台波荡器, 将频谱范围拓展至 0.1~125 THz(对应波长范围 2.4~3000 μm), 建设一台基于超导加速器的红外太赫兹自由电子激光装置。其束线布局如图 6 所示, 装置总体方案采用跑道型束线结构设计, 同时可成为一台能量回收型直线加速器实验研究平台。表 3 列出了 CTFEL 升级装置的设计参数, 新增的两台波荡器(U48 和 U35), 同样采用谐振腔型自由电子激光技术路线, 将分别输出 2~20 THz 和 15~125 THz 的高功率辐射光, 最大宏脉冲平均功率大于

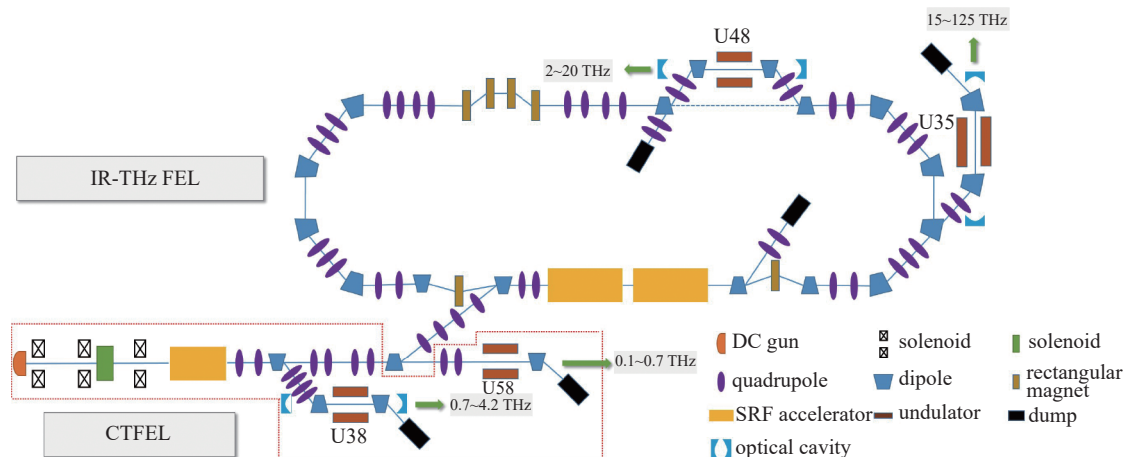


Fig. 6 Beam line layout diagram of the IR-THz FEL facility

图 6 红外太赫兹自由电子激光装置束线布局图

表 3 红外太赫兹自由电子激光装置设计参数  
Table 3 Design parameters of the IR-THz FEL facility

electron beams		IR-THz FEL	
maximum energy/MeV	50	frequency range/THz	0.1~125
energy spread/%	<0.3 (FWHM)	wavelength range/ $\mu\text{m}$	2.4~3000
normalized emittance @100 pC/ $\mu\text{m}$	<15	pulse length/ps	0.5~20
bunch charge/pC	50~100	maximum macro-pulse power/W	>100

100 W。

同时,将建设两个功能相对完善的用户实验站:材料光谱实验站和生物医学实验站。材料光谱实验站主要包括多时间尺度瞬态物性探测系统、多物理场加载时间分辨泵浦-探测系统等。生物医学实验站主要包括细胞生物学实验平台、神经生物学实验平台、X射线 FLASH 放疗动物实验平台和临床前实验平台等。用户实验站的空间布局示意图如图 7 所示。

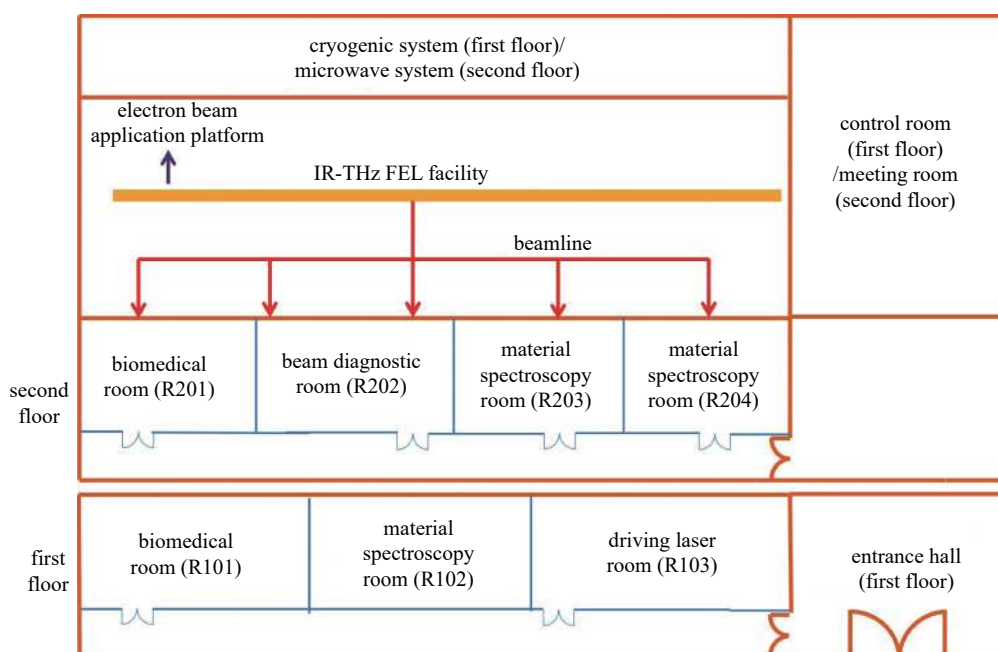


Fig. 7 Layout of the user stations of the IR-THz FEL facility

图 7 红外太赫兹自由电子激光装置用户实验站布局示意图

红外太赫兹自由电子激光装置及其配套用户实验站建成后,将为材料、生物、医学等多个学科领域前沿研究提供宽谱可调谐的相干强光加载和探测手段,其科学研究目标包括:深入理解先进功能材料的微观机制并优化宏观物性,厘清红外太赫兹辐射在生物物理、神经传递、肿瘤消融中的具体机制,探索超高剂量率放射治疗效应产生原理,突破自由电子激光极紫外光刻、高能重离子束流冷却等面临的能量回收技术难题等。

## 4 结 论

本文介绍了中物院太赫兹自由电子激光装置(CTFEL)的性能参数、运行现状和升级计划。CTFEL 装置是我国唯一运行的基于超导加速器的高平均功率太赫兹自由电子激光装置。自出光以来,已稳定运行四年多,并开展了诸多用户实验研究。受用户应用需求驱动,提出了将 CTFEL 升级为一台红外太赫兹自由电子激光装置并建设生物医学和材料光谱两个实验站的升级计划。升级后,装置频谱范围将拓展至 0.1~125 THz,最大输出功率达到 100 W,将进一步推动我国红外太赫兹研究领域的发展。

### 参考文献:

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-205.
- [2] Pawar A Y, Sonawane D, Erande K B, et al. Terahertz technology and its applications[J]. *Drug Invention Today*, 2013, 5(2): 157-163.
- [3] Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs[J]. *Semiconductor Science and*

- [Technology](#), 2005, 20(7): S266-S280.
- [4] Oepts D, Van Der Meer A F G, Van Amersfoort P W. The free-electron-laser user facility FELIX[J]. [Infrared Physics & Technology](#), 1995, 36(1): 297-308.
- [5] Shevchenko O A, Arbutov V S, Vinokurov N A, et al. The Novosibirsk free electron laser—unique source of terahertz and infrared coherent radiation[J]. [Physics Procedia](#), 2016, 84: 13-18.
- [6] Gabriel F, Gippner P, Grosse E, et al. The Rossendorf radiation source ELBE and its FEL projects[J]. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms](#), 2000, 161-163: 1143-1147.
- [7] 金晓, 黎明, 许州, 等. 中国工程物理研究院远红外自由电子激光实验研究[J]. [高能物理与核物理](#), 2006, 30(S1): 96-98. (Jin Xiao, Li Ming, Xu Zhou, et al. Experiment study on the CAEP FIR-FEL[J]. [High Energy Physics and Nuclear Physics](#), 2006, 30(S1): 96-98)
- [8] 黎明, 柏伟, 杨兴繁, 等. 紧凑型自由电子激光太赫兹源研究进展[J]. [信息与电子工程](#), 2011, 9(3): 342-346. (Li Ming, Bai Wei, Yang Xingfan, et al. Development of a compact terahertz FEL source[J]. [Information and Electronic Engineering](#), 2011, 9(3): 342-346)
- [9] Liu Xu, Liu Kaifeng, Qin Bin, et al. Optical alignment and tuning system for the HUST THz-FEL[J]. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#), 2016, 837: 58-62.
- [10] Wen Xiaodong, Huang Senlin, Lin Lin, et al. Superradiant THz undulator radiation source based on a superconducting photo-injector[J]. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#), 2016, 820: 75-79.
- [11] 李和廷, 何志刚, 吴芳芳, 等. 合肥红外自由电子激光装置[J]. [中国激光](#), 2021, 48: 1700001. (Li Heting, He Zhigang, Wu Fangfang, et al. Hefei infrared free electron laser facility[J]. [Chinese Journal of Lasers](#), 2021, 48: 1700001)
- [12] 黎明, 杨兴繁, 许州, 等. CAEP太赫兹自由电子激光首次饱和出光[J]. [强激光与粒子束](#), 2017, 29: 100101. (Li Ming, Yang Xingfan, Xu Zhou, et al. First lasing of CAEP THz free electron laser[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2017, 29: 100101)
- [13] 李鹏, 焦毅, 柏伟, 等. 中国工程物理研究院FEL-THz束线从头至尾模拟设计[J]. [强激光与粒子束](#), 2014, 26: 083102. (Li Peng, Jiao Yi, Bai Wei, et al. Start-to-end simulation of CAEP FEL-THz beamline[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2014, 26: 083102)
- [14] Wang Hanbin, Li Kai, Li Ming, et al. A GAAS photoemission DC gun for CAEP high-average-power THz FEL[C]//[Proceedings of FEL2014](#). 2014: 318-321.
- [15] Luo Xing, Lao Chenglong, Zhou Kui, et al. Design and fabrication of the 2×4-cell superconducting linac module for the free-electron laser[J]. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#), 2017, 871: 30-34.
- [16] Zhou Kui, Lao Chenglong, Wu Dai, et al. Performance of the 2×4-cell superconducting linac module for the THz-FEL facility[J]. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#), 2018, 895: 29-34.
- [17] 黎明, 杨兴繁, 许州, 等. 太赫兹自由电子激光的受激饱和实验[J]. [物理学报](#), 2018, 67: 084102. (Li Ming, Yang Xingfan, Xu Zhou, et al. Experimental study on the stimulated saturation of terahertz free electron laser[J]. [Acta Physica Sinica](#), 2018, 67: 084102)
- [18] Wu Dai, Zhou Kui, Yan Longgang, et al. Design of high-repetition terahertz super-radiation based on CAEP THz FEL superconducting beamline[C]//[Proceedings of the 39th Free Electron Laser Conference](#). FEL, 2019: 73-76.
- [19] Yan Longgang, Li Peng, Xiao Dexin, et al. Super-radiation terahertz source based on sub-picosecond electron beam at CTFEL[C]//[Super-radiation Terahertz Source Based on Sub-picosecond Electron Beam at CTFEL](#). 2021: 1-2.
- [20] Wang Chao, Xu Wen, Mei Hongying, et al. Picosecond terahertz pump-probe realized from Chinese terahertz free-electron laser[J]. [Chinese Physics B](#), 2020, 29: 084101.
- [21] Zhao Jiping, Hu Erling, Shang Sen, et al. Study of the effects of 3.1 THz radiation on the expression of recombinant red fluorescent protein (RFP) in *E. coli*[J]. [Biomedical Optics Express](#), 2020, 11(7): 3890-3899.
- [22] Gao Feng, Yang Yiwei, Zhu Hongyu, et al. First Demonstration of the FLASH effect with ultrahigh dose rate high-energy X-rays[J]. [Radiotherapy and Oncology](#), 2022, 166: 44-50.