

中国激光

中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置总体设计

周奎*, 李鹏, 胥汉勋, 肖德鑫, 王建新, 罗星, 沈旭明, 和天慧, 陈立均, 闫陇刚, 王伟俊, 徐勇, 刘宇, 马帅, 桑子儒, 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红外太赫兹自由电子激光装置是一台用于材料、光谱、生物、医学等领域前沿研究的多功能用户装置, 在实验室现有的太赫兹自由电子激光装置(CTFEL)基础上, 拟新增两套 2×9 -cell 超导加速单元和两台波荡器, 将电子能量提升至最大 50 MeV, 输出频率覆盖范围拓展至 0.1~125 THz, 最大宏脉冲功率大于 100 W。同时, 采用跑道型束线设计, 拟建设一台小型能量回收型直线加速器实验研究平台。本文主要介绍了中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置的总体设计、工作模式以及用户实验站布局。

关键词 激光器; 自由电子激光; 红外太赫兹; 超导加速器; 波荡器; 能量回收型直线加速器

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230786

1 引言

自由电子激光, 作为光源发展史上的重要里程碑, 为人类认识和探索世界提供了强有力的科学研究工具。这是一种利用高品质相对论电子束在周期性磁场作用下产生的强相干脉冲激光, 波长可覆盖太赫兹到硬 X 射线范围^[1]。相对于传统激光, 自由电子激光具有频率大范围连续可调、峰值功率高、线宽窄、全相干等特点, 已被广泛应用于先进材料、凝聚态物理、原子分子物理、化学、生物、医学等前沿基础科学研究^[2-4]。

近年来, 国内自由电子激光光源装置得到了迅猛发展^[5]。在短波段, 已建成的自由电子激光装置主要有大连极紫外相干光源(DCLS)^[6]和上海软 X 射线自由电子激光装置(SXFEL)^[7]。目前, 上海正在建设一台超导加速器驱动的硬 X 射线自由电子激光装置(SHINE)^[8]。在长波段, 已建成的自由电子激光装置主要有合肥红外自由电子激光装置(FELiChEM)^[9]和中国工程物理研究院太赫兹自由电子激光装置(CTFEL)^[10], 其中, FELiChEM 是一台基于常温加速器的专用于能源化学研究的用户装置^[11]。

CTFEL 是国内唯一运行的超导加速器驱动的高功率太赫兹自由电子激光装置^[12], 于 2017 年首次饱和出光, 现已运行 6 年多, 年用户机时大于 1000 h, 已开展了诸多应用实验研究^[13-15]。但总体来说其能力

相对有限, 如: 频率覆盖范围不够宽(0.1~4.2 THz), 束流能量较低(≤ 8 MeV), 缺乏功能完善的用户实验站, 难以满足诸多前沿科学应用研究需求, 亟须进一步升级。

目前, 中国工程物理研究院在四川省政府支持下, 正在 CTFEL 装置基础上升级建设一台红外太赫兹自由电子激光装置^[16], 进一步提升电子束能量、拓展频谱覆盖范围, 并配套建设材料光谱和生物医学两个用户实验站, 为材料、生物、医学等学科领域的前沿研究提供先进的加载与探测手段。此外, 该装置还可作为一台小型的能量回收型直线加速器实验研究平台, 用于开展能量回收技术研究。本文将主要介绍中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置的总体设计、工作模式、用户实验站布局等。

2 装置总体设计

中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置采用基于光阴极直流高压注入器与超导加速器驱动的谐振腔型自由电子激光技术路线, 在 CTFEL 基础上增加两套 2×9 -cell 超导加速单元和两台波荡器。装置布局如图 1 所示, 红色框线内为实验室已有的 CTFEL 装置。新建部分采用跑道型结构设计, 以 CTFEL 装置直线段作为注入器, 两套 2×9 -cell 超导加速单元作为主加速器, 新增的两台波荡器 U35 和

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-06-06; 录用日期: 2023-07-12; 网络首发日期: 2023-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(62205319)、中国工程物理研究院创新发展基金项目(CX20210046)

通信作者: *zhoudakui@163.com

U48 位于环线外侧。建成后,不仅可以提供频率大范围可调的高功率红外太赫兹自由电子激光,还可以作为一个小型的能量回收型直线加速器实验研究平台。

此外,在第一个 180°偏转段分出了一条束线,将电子束流直接引入 R101 线站,通过辐射转换靶产生超高剂量率 X 射线,用于开展 FLASH 放疗技术研究。

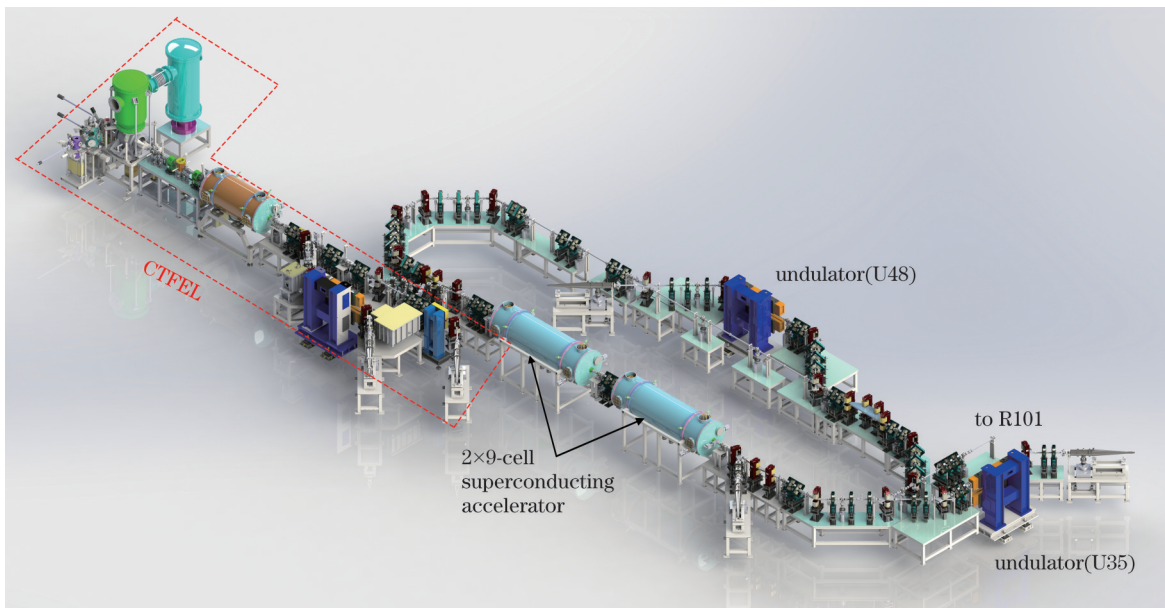


图 1 中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of CAEP IR THz FEL facility

U48 和 U35 两台波荡器的自由电子激光(FEL)辐射频率与波荡器磁场间隙、电子束流能量的对应关系如图 2 所示。U48 波荡器对应的束流能量为 10~

25 MeV,辐射频率范围为 2~20 THz;U35 波荡器对应的束流能量为 25~50 MeV,辐射频率范围为 15~125 THz。

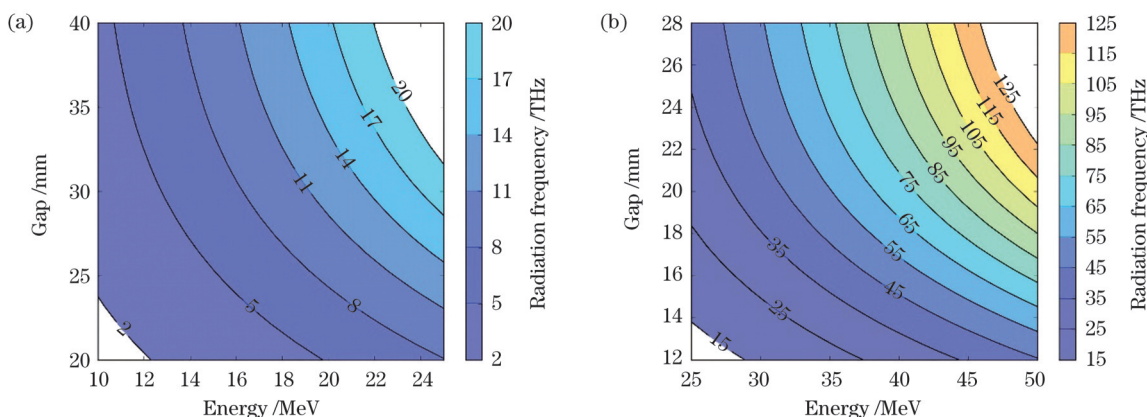


图 2 自由电子激光辐射频率与波荡器磁场间隙、电子束流能量的关系图。(a)U48 波荡器;(b)U35 波荡器
Fig. 2 FEL radiation frequency versus undulator gap and beam energy. (a) U48 undulator; (b) U35 undulator

表 1 列出了中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置与 CTFEL 的主要性能参数对比。通过新增两套 2×9-cell 超导加速单元,将最大电子束流能量从 8 MeV 提升至 50 MeV。通过新增两台波荡器(U48 和 U35),将自由电子激光辐射频率范围从 0.1~4.2 THz 拓展至 0.1~125 THz,最大宏脉冲功率从大于 10 W 提升至大于 100 W。此外,束流重复频率相对于 CTFEL 的 54.17 MHz 降至 27.08 MHz,对应的束流强度降至 2.5 mA,激光谐振腔腔长由 2.769 m 增加至 5.538 m(使得波荡器前后有更多空间放置调试和准直元件)。

2.1 注入器系统

中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置将现有 CTFEL 装置直线段束线作为注入器系统,并对其进行适当的升级改造。CTFEL 装置直线段束线主要包括一个高亮度电子源和一套 2×4-cell 超导加速单元,如图 3 所示。高亮度电子源采用半导体光阴极直流高压电子枪技术,由驱动激光器、光阴极制备系统、直流高压电子枪、聚束器、螺线管、传输元件、测试元件等构成。驱动激光器采用波长为 532 nm 的连续锁模皮秒激光器,脉冲重复频率为 54.167 MHz,脉冲宽度约为 12 ps。光阴极采用负电子亲和势砷化镓光阴极(NEA-

表1 中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置与CTFEL的主要参数对比

Table 1 Comparison of the main parameters between CAEP IR THz FEL facility and CTFEL

Parameter	Value	
	CTFEL	CAEP IR THz FEL
Frequency tuning range /THz	0.1-4.2	0.1-125
Maximum macro pulse power /W	>10	>100
Maximum beam energy /MeV	8	50
Beam current /mA	5	2.5
Micro pulse repetition rate /MHz	54.17	27.08

GaAs)。直流高压电子枪的工作电压为 320 kV, 阴极表面的电场强度约为 4 MV/m, 离子泵和非蒸散吸气泵 (NEG) 组合可使真空度达到 10^{-10} Pa 量级^[17]。聚束器采用 1.3 GHz 常温聚束腔, 并配备了一台 5 kW 固态微

波功率源, 用于对电子枪产生的低能电子束进行纵向压缩^[18]。2×4-cell 超导加速单元主要包含两只 1.3 GHz 4-cell 射频超导腔, 并配备了两台 30 kW 微波功率源和一套 2 K 液氦低温系统^[19]。2×4-cell 超导加速单元用于将电子束能量从 320 keV 提升至 6~8 MeV, 每只超导腔的有效加速梯度不小于 10 MV/m^[20]。

升级装置将对注入器的驱动激光系统和光阴极制备系统进行改造。GaAs 光阴极具有量子效率高、热发射度小的特点, 但对真空度的要求极高, 而且工作寿命较短。Cs₂Te 光阴极的量子效率相对较低, 但具有更长的工作寿命和更好的真空耐受度, 更适合高占空比和连续波模式工作。升级后的驱动激光系统可分别输出 1064、532、266 nm 三种波长的皮秒驱动激光, 而且可以切换 54.167 MHz 和 27.083 MHz 两种脉冲重复频率, 这使得注入器可以兼容 GaAs 和 Cs₂Te 两种光阴极。

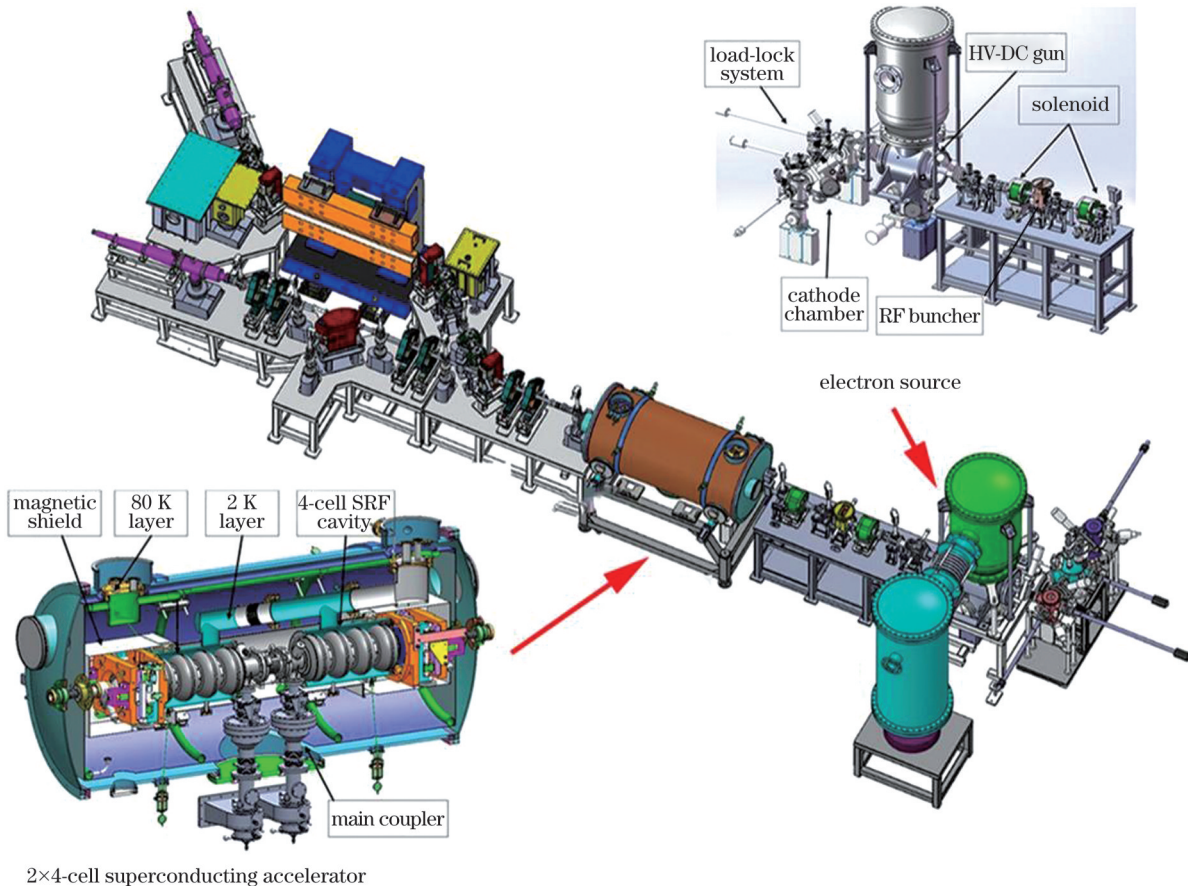


图3 CTFEL装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CTFEL facility

2.2 主加速器系统

主加速器系统由两套 2×9-cell 超导加速腔及配套的微波功率系统和低电平控制系统组成, 用于将电子束能量提升至最大 50 MeV。每套 2×9-cell 超导加速单元包含两只 1.3 GHz 9-cell TESLA 型射频超导腔, 超导加速单元的结构如图 4 所示。表 2 列出了 2×9-

cell 超导加速单元的主要设计参数, 超导腔工作在 2 K 温度下, 有效加速梯度不小于 15 MV/m, 平均束流强度为 1~3 mA, 可工作在脉冲和连续波模式下。每个超导腔各配备了一台 30 kW 全固态微波功率源和一套数字化低电平控制系统。此外, 还将新建一套液氦低温系统, 为 4 只 9-cell 超导加速腔提供 2 K 低温环境, 设

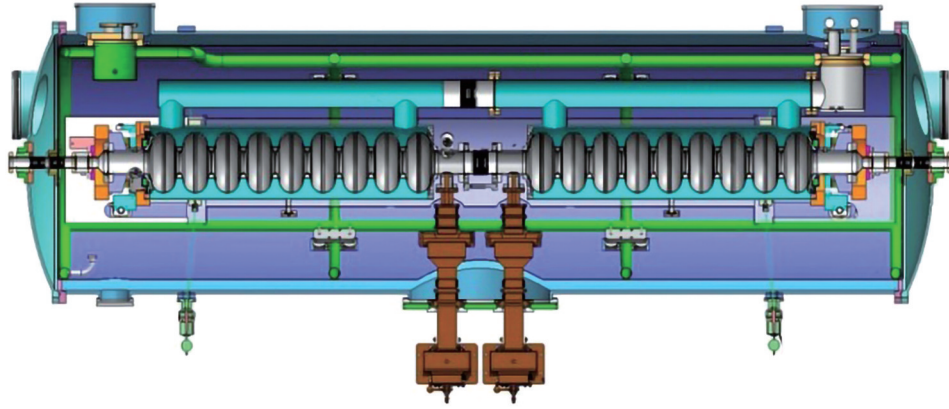


图 4 2×9-cell 超导加速模组示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the 2×9-cell superconducting cavity module

表 2 2×9-cell 超导加速单元的主要设计参数
Table 2 Main design parameters of the 2×9-cell superconducting acceleration module

Parameter	Designed value
Working frequency /GHz	1.3
Effective field gradient /($MV \cdot m^{-1}$)	≥ 15
Working mode	Pulse & continuous wave (CW)
Beam current intensity /mA	1-3
Working temperature /K	2
Tuning range /kHz	-200 to +200
Magnetic shielding field /mGs	≤ 20
2 K static thermal load /W	≤ 20

计的制冷量为 140 W@2 K。

2.3 波荡器及光腔系统

中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置仍采用谐振腔型自由电子激光技术路线,在 CTFEL 已有两台波荡器的基础上新增两台波荡器(U48和U35),并各配备一套激光谐振腔系统。表 3 和表 4 分别列出了 U48 和 U35 波荡器及光腔系统的主要设计参数。

表 3 波荡器的主要设计参数

Table 3 Main design parameters of the undulators

Undulator	Period length / mm	Period number	Minimum gap / mm
U48	48	40	20
U35	35	54	12

表 4 光腔系统的主要设计参数

Table 4 Main design parameters of the optical cavity system

Optical cavity	Optical cavity length /m	Waveguide	Mirror type	Mirror curvature /m	Mirror hole diameter /mm	Mirror diameter /mm
Optical cavity for U48	5.538	With	Upstream mirror	3.2		80
			Downstream mirror 1	3.2	1.8	50
			Downstream mirror 2	3.2	2.4	70
			Downstream mirror 3	3.2	4.0	80
Optical cavity for U35	5.538	Without	Upstream mirror 1	3.0	0.8	40 (adjustable diaphragm)
			Upstream mirror 2	3.0	1.2	40 (adjustable diaphragm)
			Upstream mirror 3	3.0	1.8	40 (adjustable diaphragm)
			Downstream mirror	3.0		40 (adjustable diaphragm)

U48 和 U35 两台波荡器均采用平面混合型永磁波荡器,上下两排磁阵列整体呈反对称配置,以保证电子轨迹中心和波荡器磁轴重合。磁块材料 NdFeB 的牌号为 N45SH,其室温剩磁和矫顽力分别大于 1.3 T 和 1400 kA/m。高矫顽力可以防止高功率电子束造成磁块退磁。磁极材料选用高饱和和磁化强度的 DT4。此外,为了减小不同间隙下的二次场积分差异,在波荡器端部适当减薄了磁极和磁块厚度。

根据电子束的重复频率和谐振条件,两套激光谐振腔的长度均设为 5.538 m。谐振腔由两面铜基底、镜面镀金的球面反射镜组成,反射率可达到 98% 以上,均通过小孔耦合输出。U48 波荡器的辐射波长位于远红外波段,衍射损失较大,需采用全波导振荡器光腔设计,以抑制衍射损失的影响。U35 波荡器的辐射波长位于近红外波段,不必考虑波导效应,由于实验室空间限制,采用上游腔镜小孔耦合输出。此外,为了满足大

范围波长调谐的需求,两条束线均配置了多面不同耦合孔尺寸的反射镜,在调试过程中这些反射镜可以根据实际需要在线切换。反射镜的直径主要取决于工作频段内到达反射镜上的最大光斑尺寸,U48由于工作在低频,具有更大的反射镜直径,而U35的反射面直径采用光阑进行调节。光学谐振腔还附带有五维调整台、准直系统及腔长测量系统,以实现谐振腔参数的精确调整。

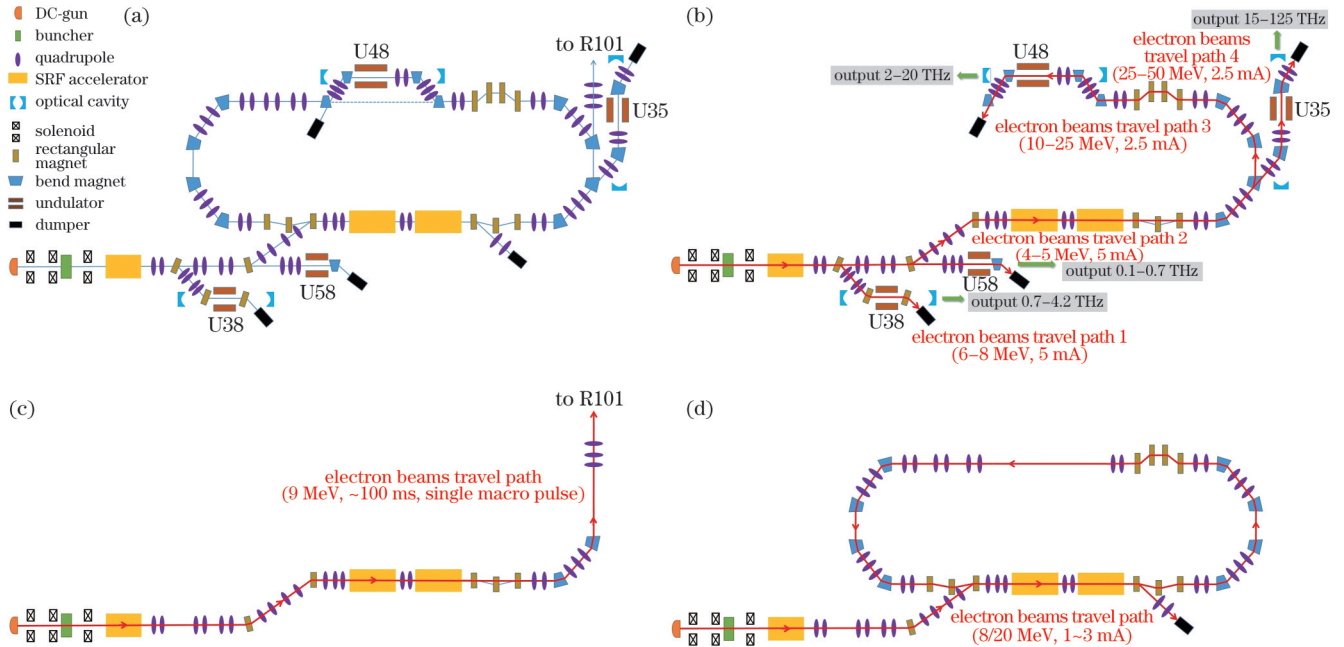


图5 装置束线布局及工作模式示意图。(a)束线布局;(b)FEL模式;(c)FLASH模式;(d)ERL模式

Fig. 5 Layout of the facility and its working modes. (a) Layout; (b) FEL mode; (c) FLASH mode; (d) ERL mode

在FEL模式下,电子束有4条传输路径,分别经过4台波荡器产生不同频段的自由电子激光输出,如图5(b)所示。电子束流只能选择其中的一条路径进行传输。不同的传输路径所对应的束流能量不相同。装置的主要参数指标如表5所示。U38和U58为CTFEL已有的两台波荡器,其中:U58产生太赫兹超辐射,两端无光腔,对应的束流能量为4~5 MeV,输出频率范围为0.1~0.7 THz;U38对应的束流能量为6~8 MeV,束流强度为5mA,重复频率为54.17 MHz,输出频率范围为0.7~4.2 THz,宏脉冲功率大于10 W^[12]。U48和U35为新建的两台波荡器,其中:U48的输出频率范围为2~20 THz,最大宏脉冲功率大于40 W,微脉冲功率大于0.5 MW,频谱带宽为1%~3%,单个微脉冲长度为1~10 ps,对应的束流能量为10~25 MeV,束流强度为2.5 mA,重复频率为27.08 MHz;U35的输出频率范围为15~125 THz,最大宏脉冲功率大于100 W,微脉冲功率大于2 MW,频谱带宽为1%~3%,单个微脉冲长度为2~3 ps,对应的束流能量为25~50 MeV,束流强度为2.5 mA,重复频率为27.08 MHz。受实验室辐射屏蔽条件的限制,装置主要工作在宏脉冲模式上,最大占空比为10%。FEL出光对电子束的

3 工作模式

中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置束线布局如图5(a)所示,装置主要有三种工作模式,分别为自由电子激光实验模式(FEL mode)、FLASH实验模式(FLASH mode)和能量回收实验模式(ERL mode)。在不同的实验模式下,电子束运行路径和对应的束流参数不同。

能散、纵向长度和发射度均提出了较高要求。在束流传输过程中,需要克服空间电荷效应、CSR效应、横向耦合效应、尾场效应等物理因素的影响,以便在获得尽可能低的能散和发射度的同时,对束流的纵向长度进行压缩和调制。

在FLASH模式下,电子束流的传输路径如图5(c)所示。电子束流经过主加速器和第一个180°偏转段后,直接进入生物医学实验站的R101线站,用于开展X射线的FLASH照射实验。装置采用单发长宏脉冲模式,电子束能量为9 MeV,宏脉冲长度从微秒到500 ms大范围可调,靶前0.5 m处单发最大总剂量大于20 Gy。FLASH模式的特点为:单发的宏脉冲很长,达到几百毫秒,而束流从电子枪到实验线站将经历多次偏转。因此,束流在传输过程中需要进行有效的消色散和横向聚焦,以保证束流在传输过程中不丢失。

在ERL模式下,装置运行于准连续波模式,平均束流强度为1~3 mA,电子束流传输路径如图5(d)所示。束流经过并束段后进入主加速器,能量从6~8 MeV提升至20 MeV,经过返航束线并通过两个180°偏转段后,再次以减速相位进入主加速器,将能量交还给超导腔,束流能量从20 MeV又降至6~8 MeV,随

表 5 FEL 模式下装置的主要参数指标
Table 5 Main parameters of the facility in FEL mode

Class	Main parameter	Value			
		U58	U38	U48	U35
Output FEL	Frequency tuning range /THz	0.1–0.7	0.7–4.2	2–20	15–125
	Maximum macro pulse power /W	~1	>10	>40	>100
	Micro pulse power /MW	>10	>0.5	>0.5	>2
	Spectrum bandwidth	20%–30%	1%–3%	1%–3%	1%–3%
	Micro pulse length /ps	0.1–0.5	1–5	1–10	2–3
Electron beam	Electron energy /MeV	4–5	6–8	10–25	25–50
	Beam current intensity /mA	5	5	2.5	2.5
	Micro pulse repetition rate /MHz	54.17	54.17	27.08	27.08
	Macro pulse repetition rate /Hz		1, 5, 10, 20		
	Duty cycle		≤10%		

后在主加速器出口偏转进入垃圾靶。表 6 给出了 ERL 模式装置的主要参数指标,设计的系统能量回收效率大于 95%,将来可作为一台小型的能量回收型直线加速器实验研究平台,用于开展束流发射度增长的抑制和优化、系统能量回收效率的提升等 ERL 关键物理与技术问题的研究。

表 6 ERL 模式下装置的主要参数指标
Table 6 Main parameters of the facility in ERL mode

Parameter	Designed value
Injector energy /MeV	6–8
Beam energy /MeV	20
Beam current /mA	1–3
Energy recovery efficiency	>95%

4 用户实验站

红外太赫兹自由电子激光装置拟建设两个实验站: 生物医学实验站和材料光谱实验站。用户实验站布局如图 6 所示,生物医学实验站位于实验楼一层,按功能分为 R101 和 R102 两个线站,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 放疗临床前实验平台等;材料光谱实验站位于实验楼二层,包括 R201、R203 和 R204 三个线站,含有瞬态激发加载-超快光谱探测系统、多物理场加载时间分辨泵浦探测系统、离位锂电池-红外太赫兹自由电子激光实验平台、太赫兹参数计量校准实验平台等。此外,R202 为光束质量诊断平台,用于对 FEL 参数进行在线实时诊断。

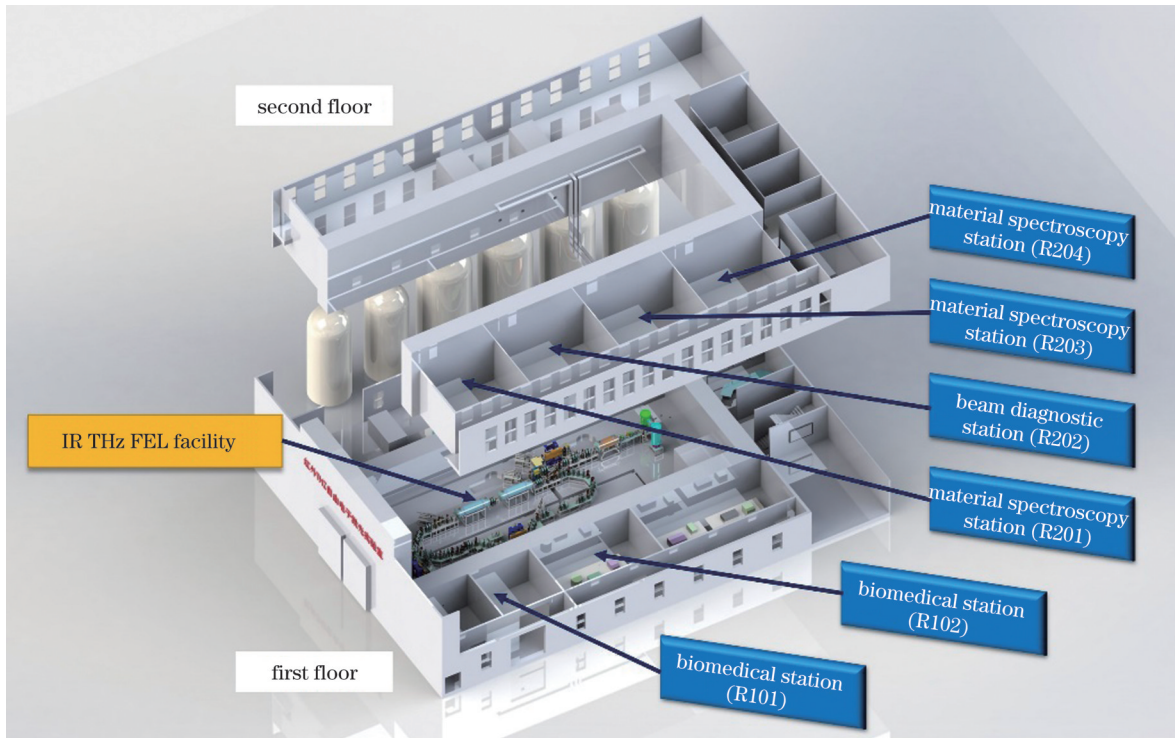


图 6 实验站布局示意图
Fig. 6 Layout of user experimental stations

生物学实验站 R101 线站主要用于研究新型的用于人类肿瘤治疗的 FLASH 放疗技术,探索解决肿瘤治疗中的物理和生物学问题。FLASH 放疗技术通过超高剂量率单次照射可在保护正常组织的同时杀灭癌细胞。前期的大量实验研究显示,与传统临床上的低剂量率长期放疗相比,相同剂量下 FLASH 放疗杀死的健康细胞明显较少,对正常组织更为友好;同时,FLASH 放疗时间不足 1 s,单次完成,在时间和患者心理成本上具有巨大优势。实验站将建设国内首台 X 射线 FLASH 放疗临床前实验平台,建立包括实验动物的固定、模拟定位、照射方案设计、FLASH 照射以及生物分析的全实验流程,为 FLASH 放疗临床前验证研究提供先进的实验条件与评价手段。

生物学实验站 R102 线站主要聚焦于细胞生物学和神经生物学这两个学科领域,研究细胞在红外太赫兹光辐照下的结构、功能变化和生命活动规律,探索其中的机制和应用。实验站将活细胞超分辨显微镜、红外激光扫描共聚焦显微仪等先进生物医学研究系统与红外太赫兹辐射技术相结合,形成先进的交叉研究平台,从细胞的整体水平、亚显微水平、分子水平等三个层次,以动态的观点全面获取红外太赫兹光对细胞的影响。

材料光谱实验站 R201 线站基于先进的红外太赫兹自由电子激光装置,配备时间分辨角分辨光电子能谱仪和多谱段时间分辨光谱仪,可以实现材料表面光电子能谱诊断和覆盖可见光到太赫兹波段的光谱探测,以及材料瞬态加载条件下反应界面的速度测量,实验平台总体指标达到了国际先进水平。此外,结合多物理场静态加载技术和超宽谱(1~70 THz)太赫兹探测技术,还可以进行材料高压光学效应、磁光效应、低温光电效应等科学前沿问题的研究。

材料光谱实验站 R203 线站内设有太赫兹参数计量校准实验平台,用于材料太赫兹光谱参数计量标准研究,即:利用自由电子激光的辐射频率可调特性,实现材料太赫兹特征光谱、光谱透射比、吸收系数、光谱漫反射比等参数的标准测量。

材料光谱实验站 R204 线站利用高功率、短脉冲的相干强太赫兹光源研究强太赫兹光辐照下纳米结构材料的物理化学特性,通过探究超快反应过程、捕获痕量中间产物,在纳米尺度上认识半导体-金属态之间发生的超快可逆相变、电子迁移与界面传质过程,可指导新型储能材料和器件的研发。

5 结 论

本文主要介绍了中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置的总体设计方案,该装置在实验室现有的 CTFEL 基础上,增加两套 2×9 -cell 超导加速单元和两台波荡器,将最大电子能量提升至 50 MeV,频谱覆盖范围拓展至 0.1~125 THz,实现最大宏脉冲平均功率大于 100 W,并拟建设材料光谱和生物学两

个用户实验站。此外,采用跑道型束线设计,将建设一台能量回收型直线加速器实验研究平台。

参 考 文 献

- [1] Kwan T, Dawson J M, Lin A T. Free electron laser[J]. The Physics of Fluids, 1977, 20(4): 581-588.
- [2] O'Shea P G, Freund H P. Free-electron lasers: status and applications[J]. Science, 2001, 292(5523): 1853-1858.
- [3] Edwards G S, Allen S J, Haglund R F, et al. Applications of free-electron lasers in the biological and material sciences[J]. Photochemistry and Photobiology, 2005, 81(4): 711-735.
- [4] Couprie M E, Ortéga J M. Free-electron lasers sources for scientific applications[J]. Analisis, 2000, 28(8): 725-736.
- [5] 李鹏,黎明,吴岱,等.我国自由电子激光技术发展策略研究[J].中国工程科学,2020,22(3):35-41.
Li P, Li M, Wu D, et al. Development strategy of free electron laser technology in China[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 35-41.
- [6] 余永,李钦明,杨家岳,等.大连极紫外相干光源[J].中国激光,2019,46(1):0100005.
Yu Y, Li Q M, Yang J Y, et al. Dalian extreme ultraviolet coherent light source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100005.
- [7] 赵振堂,王东,殷立新,等.上海软 X 射线自由电子激光装置[J].中国激光,2019,46(1):0100004.
Zhao Z T, Wang D, Yin L X, et al. Shanghai soft X-ray free-electron laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100004.
- [8] Wang D. X-ray FEL facility at Shanghai [EB/OL]. (2018-10-21) [2023-04-25]. https://accelconf.web.cern.ch/icap2018/talks/supag07_talk.pdf.
- [9] 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(17):1700001.
Li H T, He Z G, Wu F F, et al. Hefei infrared free-electron laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1700001.
- [10] 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(10):100101.
Li M, Yang X F, Xu Z, et al. First lasing of CAEP THz free electron laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(10): 100101.
- [11] Li H T, Jia Q K, Zhang S C, et al. Design of FELiChEM, the first infrared free-electron laser user facility in China[J]. Chinese Physics C, 2017, 41(1): 018102.
- [12] 黎明,杨兴繁,许州,等.太赫兹自由电子激光的受激饱和和实验[J].物理学报,2018,67(8):084102.
Li M, Yang X F, Xu Z, et al. Experimental study on the stimulated saturation of terahertz free electron laser[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(8): 084102.
- [13] Wang C, Xu W, Mei H Y, et al. Picosecond terahertz pump - probe realized from Chinese terahertz free-electron laser[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(8): 084101.
- [14] Zhao J P, Hu E L, Shang S, 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.
- [15] Gao F, Yang Y W, Zhu H Y, et al. First demonstration of the FLASH effect with ultrahigh dose rate high-energy X-rays[J]. Radiotherapy and Oncology, 2022, 166: 44-50.
- [16] 周奎,李鹏,周征,等.中物院太赫兹自由电子激光装置现状及升级计划[J].强激光与粒子束,2022,34(10):104013.
Zhou K, Li P, Zhou Z, et al. Status and upgrade plan of CAEP THz-FEL facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(10): 104013.
- [17] Wang H B, Li K, Li M, et al. A GaAs photoemission DC gun for CAEP high-average-power THz FEL[EB/OL]. [2023-02-03].

<https://epaper.kek.jp/FEL2014/papers/tua03.pdf>.

- [18] Zhou K, Li X K, Lao C L, et al. Test of an RF buncher cavity for the terahertz free electron laser facility[C]//2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), May 7-11, 2018, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [19] Luo X, Lao C L, Zhou K, 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.
- [20] Zhou K, Lao C L, Wu D, 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.

General Design of Infrared Terahertz Free-Electron Laser Facility of Chinese Academy of Engineering Physics

Zhou Kui*, Li Peng, Xu Hanxun, Xiao Dexin, Wang Jianxin, Luo Xing, Shen Xuming, He Tianhui, Chen Lijun, Yan Longgang, Wang Weijun, Xu Yong, Liu Yu, Ma Shuai, Sang Ziru, Yang Xingfan, Wu Dai, Li Ming.

Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

Abstract

Significance Free-electron lasers provide powerful scientific research tools for humans to understand and explore the world. Compared with traditional lasers, free-electron lasers have characteristics such as continuously adjustable wavelength over a significant range, high peak power, narrow bandwidth, and full coherence. They have also been widely used in frontier scientific research fields, such as advanced materials, condensed matter physics, atomic and molecular physics, chemistry, biology, and medicine.

In recent years, free-electron laser light sources have rapidly developed. CTFEL is the only high-power terahertz free-electron laser facility driven by a superconducting accelerator in China. However, its capabilities are limited. Currently, the Chinese Academy of Engineering Physics is developing an infrared terahertz free-electron laser facility based on CTFEL. The upgraded facility is a multifunctional user facility for frontier research in the fields of material science, spectroscopy, biology, and medicine.

Progress The upgraded facility adopts resonant optical cavity free-electron laser technology. A straight section of the CTFEL with a 320 kV HV-DC photocathode electron gun and a 2×4 -cell superconducting accelerator are used as the injector system. The driving laser and photocathode systems are upgraded for compatibility with both GaAs and Cs_2Te . The main accelerator system consists of two 2×9 -cell superconducting accelerator modules that can increase the electron beam energy to a maximum of 50 MeV. In addition, two new undulators (U48 and U35) are added to expand the free-electron laser frequency coverage from 0.1–125 THz, and improve the maximum macro-pulse power to over 100 W.

The upgraded facility has three different working modes FEL, FLASH, and ERL (Fig. 5). In the FEL mode, four electron beam transmission paths pass through four undulators to generate FEL radiation in different frequency bands. Notably, the electron beams can choose only one path for transmission. In the FLASH mode, after passing through the main accelerator and the first 180° deflection section, the electron beams directly enter the R101 biomedical experimental station for the X-ray FLASH irradiation experiments. In ERL mode, the facility operates in a quasi-continuous wave mode and can be used as a small energy recovery linear accelerator experimental platform for key physical and technical research on ERL. The average beam current is 1–3 mA. The injector energy is 6–8 MeV, and the recirculation energy, approximately 20 MeV.

Two experimental user stations, a biomedical experimental station and a material spectrum experimental station, were developed. The biomedical experimental station was located on the first floor of the laboratory. According to its function, it is divided into two line stations, R101 and R102, which predominantly include the cell biology experiment, neurobiology experiment, and X-ray FLASH radiotherapy experiment platforms. The material spectrum experiment station is located on the second floor of the laboratory, and it is divided into three line stations R201, R203, and R204, including the transient excitation loading-ultrafast spectral detection system, multi-physical field time-resolved pump detection system, off-site lithium battery-infrared THz free-electron laser experimental platform, and terahertz parameter measurement calibration experimental platform. In addition, R202 is a FEL beam quality diagnosis platform for the online real-time diagnosis of FEL parameters.

Conclusions and Prospects This study primarily introduces the general design of the infrared terahertz free-electron laser facility of the Chinese Academy of Engineering Physics. The upgraded facility adds two 2×9 -cell superconducting accelerator modules and two undulators based on CTFEL, to increase the maximum electron energy to 50 MeV, expand the spectrum coverage to 0.1 THz–125 THz, and realize the maximum macro-pulse average power to greater than 100 W. Through a track-shaped beamline design, an experimental energy-recovery linear accelerator research platform will be built. In addition, two user experimental stations for material spectroscopy and biomedicine are under construction.

Key words lasers; free-electron laser(FEL); infrared terahertz; superconducting accelerator; undulator; energy recovery linac