

# 中国激光

## 合肥红外自由电子激光装置

李和廷<sup>1</sup>, 何志刚<sup>1</sup>, 吴芳芳<sup>1</sup>, 唐雷雷<sup>1</sup>, 赵周宇<sup>1</sup>, 张通<sup>1</sup>, 何天龙<sup>1</sup>, 宣科<sup>1</sup>, 张海燕<sup>1</sup>,  
尉伟<sup>1</sup>, 卢平<sup>1</sup>, 周泽然<sup>1</sup>, 尚雷<sup>1</sup>, 刘功发<sup>1</sup>, 徐宏亮<sup>1</sup>, 何晓业<sup>1</sup>, 蒋诗平<sup>1</sup>, 裴香涛<sup>1</sup>,  
高琛<sup>1, 2</sup>, 贾启卡<sup>1</sup>, 鲍骏<sup>1</sup>, 张善才<sup>1\*</sup>, 王琳<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029;

<sup>2</sup>中国科学院大学物理科学学院, 北京 101408

**摘要** 合肥红外自由电子激光装置是一台专用于能源化学研究的用户装置, 利用一个最高电子能量为 60 MeV 的 S 波段直线加速器驱动中红外和远红外两个自由电子激光振荡器, 分别产生波长范围为 2.5~50  $\mu\text{m}$  和 40~200  $\mu\text{m}$  的红外激光。两个振荡器产生的激光经同一条光束线被传输至实验大厅内的五个实验站。中红外振荡器于 2019 年调试出光, 并于 2020 年 11 月达到任务指标。介绍了合肥红外振荡器的自由电子激光装置及其调试进展, 重点介绍了中红外振荡器辐射的激光性能。

**关键词** 激光技术; 自由电子激光; 红外波段; 振荡器

**中图分类号** TN248

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.1700001

### 1 引言

科学仪器的发展与重要科学现象的发现、重大科学问题的解决以及技术领域的突破性进展是密不可分的, 而光谱类科学仪器往往强烈依赖于光源。红外光谱学是重要的谱学方法之一, 但是中红外、远红外波段可用的商品光源非常有限。红外自由电子激光(IRFEL)可以产生波长范围为几个到几百微米的连续可调激光, 且具有高功率、短脉冲及窄带宽等优点, 适用于中红外-远红外区的光谱研究, 是目前唯一可用于远红外波段红外检测、光解离和光激发研究的理想高强度脉冲光源。

2014 年, 在国家自然科学基金委员会的资助下, 由厦门大学、中国科学技术大学、复旦大学以及中国科学院大连化学物理研究所共同承担的重大科学仪器研制项目“基于可调谐红外激光的能源化学研究大型实验装置”启动。其科学目标是研制一台具有国际先进水平的波长连续可调且覆盖中红外到

远红外的红外自由电子激光光源, 建立基于可调红外激光的五个面向能源化学基础研究的实验站, 发展和建立基于可调谐红外自由电子激光光源的表界面研究、分子结构解析和反应动力学研究的新方法, 开展从分子体系到团簇到表界面真实体系的反应机理研究, 解决能源材料化学发展的瓶颈问题。其中, 中国科学技术大学国家同步辐射实验室承担红外自由电子激光光源的研制。

### 2 装置总体介绍

合肥红外自由电子激光装置(FELiChEM)<sup>[1]</sup>是基于振荡器模式的自由电子激光(FEL)装置, 其波长范围为 2.5~200  $\mu\text{m}$ 。装置建设于中国科学技术大学国家同步辐射实验室园区内, 如图 1 所示, 包括光源大厅和实验大厅。光源大厅分为南北两部分, 南厅(图 2)主要放置电子直线加速器、FEL 振荡器及光束线的引出部分, 四周及顶部均按照辐射防护要求建有混凝土屏蔽墙, 北厅主要放置速调管、调制

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-02-25; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(21327901, 11975233)

通信作者: \*shancai@ustc.edu.cn; \*\*wanglin@ustc.edu.cn

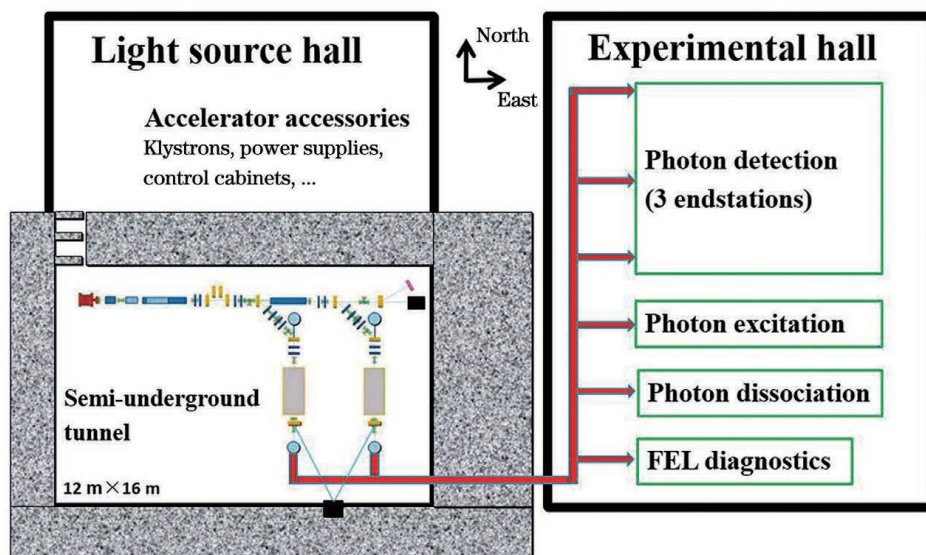


图 1 合肥红外自由电子激光装置的布局图

Fig. 1 Layout of FELiChEM



图 2 合肥红外自由电子激光装置的主体照片

Fig. 2 Photo of core device of FELiChEM

器、磁铁电源、控制机柜等加速器附属设备。实验大厅内建有激光诊断站和五个实验站,按照出光口的位置顺序依次是光解离实验站、光激发实验站、光检测实验站,其中光检测包含三个实验站。两个振荡器产生的中红外和远红外激光经同一条光束线被传输至各个实验站。

### 2.1 电子直线加速器

FELiChEM 直线加速器主要由热阴极栅控电子枪、预聚束器、聚束器、两个 2 m 加速段和一个磁压缩段构成,电子束的主要参数如表 1 所示。

表 1 FELiChEM 直线加速器的主要参数  
Table 1 Main parameters of FELiChEM linac

Parameter	Designed value	Achieved value
Electron beam energy /MeV	Max: 60	65
Energy spread (root mean square) /MeV	<0.24	<0.24
Normalized emittance / (mm · mrad)	<30	20-50
Peak current /A	100	>100 (calculated)
Charge /nC	1.0	1.0-1.5
Macrobunch repetition rate /Hz	Max: 10	1-10
Macrobunch width / $\mu$ s	Max: 10	Max: 10
Microbunch repetition rate /MHz	238/119/59.5/29.75	238/119/59.5/29.75
Microbunch width (root mean square) /ps	4.5	<5 (calculated)

热阴极电子枪的工作高压为 100 kV,可产生最大脉冲长度为 20  $\mu$ s 的电子束宏脉冲,其中含有脉冲宽度约为 1 ns、重复频率为 238, 119, 59.5, 29.75 MHz 可选择的微脉冲束团串。宏脉冲的长

度和微脉冲的重复频率主要通过高压脉冲电源来控制。在电子枪出口处,不同重复频率下电子束微脉冲的电荷量为 1~2 nC。

电子枪出射束流经磁透镜聚焦后进入预聚束器

进行预聚束。预聚束器是一个由不锈钢制成的工作在 476 MHz 频率处的驻波腔,工作腔压为 40 kV。电子束经过预聚束器后漂移至聚束器,在聚束器入口处每个微束团长度将被压缩至初始长度的 1/20。聚束器工作在 2856 MHz 处,加速梯度约为 9 MV/m。经过聚束器后,电子束能量约为 7 MeV,束团均方根(RMS)长度约为 5 ps。

两个加速段均是工作在 2856 MHz 处的等梯度行波加速管。其中,同一个速调管为第一个加速段和聚束器提供微波功率。当电子束的平均电流强度最大(约 300 mA)时,在第一个加速段出口处能达到的最高电子能量约为 30 MeV。经过第二个加速管后,最高电子能量可超过 60 MeV。

位于两个加速管之间的磁压缩段是为未来提升装置性能而预留的,在目前的调试中尚未使用。它可以用来进一步压缩束团,缩短电子束微束团的长度,同时提高其峰值电流强度。这既可以为百飞秒级超短脉冲的产生提供条件,还可以满足用户对更高激光峰值功率的需求。另一方面,由于远红外波段波长较长,滑移效应严重,磁压缩段还可以用来拉长电子束以克服滑移效应。

## 2.2 振荡器

振荡器工作模式是当前自由电子激光的三个主

要工作模式之一。1977 年首次成功运行的自由电子激光装置即采用振荡器工作模式<sup>[2]</sup>。1993 年北京自由电子激光装置在中红外波段实现饱和振荡,是亚洲第一个实现饱和出光的振荡器工作模式的自由电子激光装置<sup>[3]</sup>。目前运行在红外、可见、紫外波段的 FEL 大多采用振荡器工作模式,如法国的 CLIO<sup>[4]</sup>、荷兰的 FELIX<sup>[5]</sup>、德国的 FHI<sup>[6]</sup>、美国的储存环 FEL<sup>[7-8]</sup>等。

当前,我国已建有大连极紫外相干光源<sup>[9]</sup>和上海软 X 射线装置<sup>[10]</sup>,二者均采用基于外种子激光的谐波放大机制<sup>[11-13]</sup>。此外,上海硬 X 射线自由电子激光装置 SHINE<sup>[14]</sup>正在建设中,采用的是自放大自发辐射(SASE)及自种子工作模式<sup>[15-16]</sup>。在太赫兹波段,2017 年中国工程物理研究院在成都建成了一台基于超导加速器的振荡器型自由电子激光 CTFEL<sup>[17-18]</sup>,其频率范围已实现 0.67~4.2 THz。目前我国尚无在中红外波段运行的自由电子激光装置,FELiChEM 建成后将实现我国自由电子激光光源在中红外和远红外波段的覆盖。

FELiChEM 有两个振荡器,分别产生中红外和远红外的激光。振荡器主要有波荡器和光学谐振腔两个重要组成部分,其主要参数如表 2 所示。

表 2 FELiChEM 振荡器的主要参数

Table 2 Main parameters of FELiChEM oscillators

Component of oscillator	Parameter	Mid-infrared band	Far-infrared band
	Type	Planar, permanent	Planar, permanent
Undulator	Period /mm	46	56
	Period number	50	40
	Maximum undulator deflection parameter	3.2	3.3
	Cavity length /m	5.04	5.04
Optical cavity	Reflectivity of mirrors /%	98.5	98.5
	Diameter of mirrors /mm	50	80
	Curvature radius of mirrors /m	2.756	3.018
	Diameter of coupling holes /mm	1.0/1.5/2.5/3.5	1.0/2.0/4.0

中红外和远红外两台波荡器长度分别为 2.3 m 和 2.24 m,均为钕铁硼材料的永磁型平面波荡器,且均对称地放置在光学谐振腔的中心。在本装置中,波荡器周期长度的选取特意偏大一些,这是为了满足用户对波长连续调谐能力的需求,即在固定电子能量下,仅通过改变波荡器的磁间隙来实现尽可能宽的波长调谐范围。

光学谐振腔在原理上是由两个对心的球面反射

镜构成。两个反射镜的镜面距离即谐振腔的腔长主要取决于电子束微束团的重复频率,须保证前面微束团产生的光脉冲在谐振腔中往返一次,到达波荡器入口时能正好与后继的微束团相遇。由于 FELiChEM 电子束微束团的重复频率为 238,119,59.5,29.75 MHz 可选,兼顾上述几个频率,两台振荡器的腔长均为 5.04 m。此时,上述频率对应的腔内光脉冲个数分别为 8、4、2、1。

光学谐振腔的反射镜为铜基底、镜面镀金的球面镜,实测反射率均达到 99%左右。FELiChEM 采用下游谐振腔耦合输出,下游腔内的反射镜中心均开有小孔。在不同的工作波长下,到达反射镜上的光斑大小不同,因此为了满足大范围波长调谐的需求,下游腔内的反射镜需要根据工作波长选择合适的耦合孔尺寸,以实现激光输出最优。在中红外下游谐振腔内放置了四个不同耦合孔的反射镜,远红外下游谐振腔则包含三个不同耦合孔的反射镜,其尺寸如表 2 所示,这些反射镜根据需要可在线切换。反射镜的直径大小主要取决于工作波段内到达反射镜上的最大光斑尺寸,以尽量减小衍射损失。反射镜的曲率半径与腔长共同决定了腔内光场的瑞利长度,光场在腔内各处的横向尺寸由辐射波长确定。

对于一个波长覆盖范围很宽的振荡器,需要综合考虑参数优化,既要考虑不同波长的情况,还要考虑腔内不同位置的情况。在 FELiChEM 中的红外振荡器中,最短工作波长为  $2.5 \mu\text{m}$  时的增益偏低,

为了降低总腔耗,使光场能够顺利起振,选择相对较短的瑞利长度,使反射镜上的光斑尺寸较大,因此耦合输出功率较小,总腔耗较小。这样的参数选择会使长波的衍射损耗有所增大,但由于长波的增益较高,综合起来长波的光 FEL 工作不会受到太大影响,输出的 FEL 强度仍能达到较高水平。

### 2.3 光束线与实验站

FELiChEM 产生的中红外和远红外激光通过同一条光束线被传输至实验大厅,如图 3 所示。其中,D1 和 D2 为金刚石窗口,用于隔断光束线和振荡器的真空;S 为分束镜,用于取出约 5%(能量占比)的激光进行诊断站在实时测量以诊断激光;M1,M3,M7,M9,M10,M11 和 M13 为抛物面聚焦反射镜,其他反射镜均为平面反射镜;M4 反射镜控制中红外或远红外激光进入光束线。光束线采用低真空方案,真空度好于  $10^{-2}$  Pa,总长约为 34 m。考虑远红外波段的最大光束尺寸,管道内径设为 200 mm。

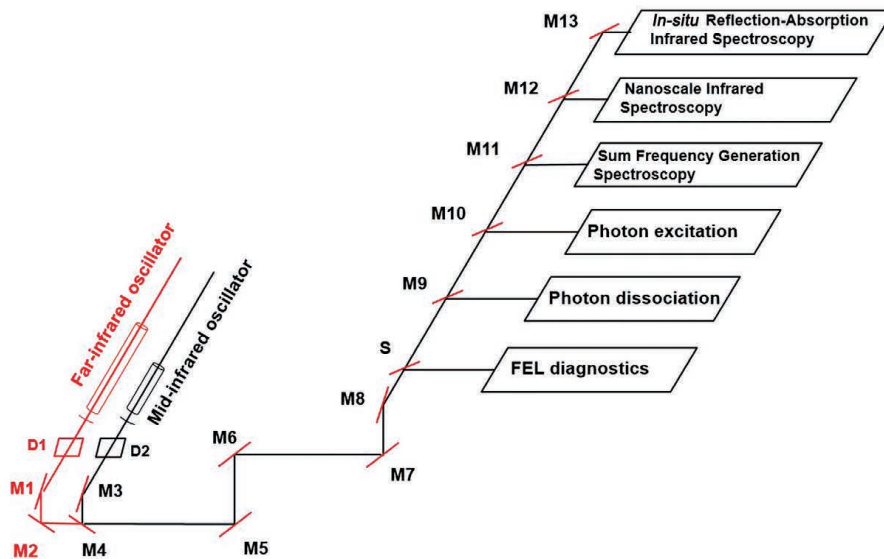


图 3 FELiChEM 的光束线及实验站的布局图

Fig. 3 Layout of beamline and research stations of FELiChEM

红外激光诊断系统是光束线的重要组成部分,通过分束镜 S 在线分出小部分光强,用来实时监测激光性能参数,主要包括以下器件。1) 红外光强探测器/光能量计(可切换)。光强探测器能够测量出激光宏脉冲的波形和微脉冲的能量,通过标定能给出宏脉冲的能量,光能量计则可以直接给出每个宏脉冲的能量。2) 红外光栅光谱仪。该仪器能够测量  $2.5 \sim 200 \mu\text{m}$  的激光光谱,实时给出每个激光脉冲的中心波长和频谱带宽。3) 傅里叶变换红外光谱仪。该仪器可精准测量中心波长和频谱带宽,但每

次测量时间相对较长,不能作为在线实时测量的手段,但可以用来标定光栅光谱仪的中心波长,还可通过傅里叶变换由时空相干性推断微脉冲的波列长度。4) 红外光斑探测器(IR Viewer)。该仪器可实时给出每个激光脉冲的光斑。

FELiChEM 当前建有五个实验站,按照光束线出口位置顺序依次为光解离实验站、光激发实验站和光检测实验站(包括原位反射吸收光谱站、纳米红外光谱站和和频光谱站)。

光解离实验站将红外光解离光谱与离子迁移

谱、双红外激光共振解离、大范围变温离子阱(10~600 K)等多种技术相结合,形成了一套新型的红外光解离光谱研究装置,用于与能源和材料等相关的团簇结构及其反应动力学的研究。

光激发实验站的主要研究目标在于揭示反应物的振动态激发对化学反应动力学的影响。通过交叉分子束实验,一束分子被红外激光激发至振动激发态,并与另一束分子发生反应碰撞,反应产物由相应探测器探测。采用通用型质谱探测技术和时间切片离子成像技术对化学反应的全局动力学以及态态动力学进行探测,全面获取振动激发对化学反应的整体影响以及具体量子态的细节信息。

光检测实验站从能量、空间和时间分辨三个层面来解析能源化学相关界面反应及其过程,包括原位反射吸收光谱站、纳米红外光谱站和和频光谱站。原位反射吸收光谱站利用高亮度、波长可调且覆盖远红外波段的激光光源,研究多相催化和电催化过程中一些痕量的关键反应中间体结构和吸附状态,从分子水平阐明反应机理;纳米红外光谱站将先进的红外激光与原子力显微技术结合,可以在接近真实反应环境下,原位检测与分辨纳米尺度区域表面上的吸附及反应特征,为依赖于形貌和尺寸的纳米粒子反应活性研究提供关键性的证据;和频光谱站用于固气、固液界面的多相催化和电化学原位和频光谱表征,具有表面选择性,还可以进行表面亚分子层检测。

### 3 调试进展

#### 3.1 调试历程

FELiChEM 于 2015 年 1 月启动物理设计,于 2016 年 10 月完成加速器设备的研制和离线调试。光源大厅的隧道、建筑及公用设施于 2017 年 12 月建成,随后即开始了加速器设备的安装及线缆桥架的铺设,2018 年 7 月开始进行加速器微波老练及调试,8 月高品质电子束贯通中红外振荡器。此时光束线加工尚未完成,只能在加速器隧道内测量红外辐射,但由于空间辐射剂量的干扰,探测器未能正常工作。2019 年 5 月完成光束线安装,将激光测量点转移至实验大厅光解离实验站出口处,6 月开始进行调试,并于 2019 年 6 月 9 日上午探测到自发辐射,同日下午探测到 FEL 信号,其强度比自发辐射高出 500 倍以上,后经过优化,微脉冲能量达到 27  $\mu\text{J}$ <sup>[19]</sup>。从 2019 年 8 月起,我们陆续完成在线激光准直系统和 FEL 诊断平台的研制、安装及调试,

并对此前调试中加速器各系统出现的问题进行了针对性的研究,2020 年 5 月再次进行调试,2020 年 11 月中红外振荡器全面达到任务指标。

目前,中红外振荡器正在向各实验站供光,用于实验站仪器的在线调试。2021 年上半年进行了远红外振荡器的调试,由于在中红外振荡器调试过程中,已经对直线加速器和光束线进行了细致的优化,同时也对远红外振荡器的辐射性能进行了充分的理论计算,预计 2021 年完成远红外振荡器的调试,之后进行实验站的全面调试,并正式开始用户实验。

#### 3.2 中红外激光性能

FELiChEM 中红外激光于 2020 年 11 月调试达标,表 3 给出了中红外激光的主要性能,其中 FWHM 表示半峰全宽。宏脉冲能量是在光解离实验站窗口外测得的,光谱特性和脉冲时间是在激光诊断站测得的,微脉冲能量是根据宏脉冲能量和脉冲时间计算得到的。微脉冲宽度暂时无直接测量手段,研究人员正在研制一套基于自相关原理的脉冲长度测量装置。

表 3 中红外激光的主要性能

Table 3 Main performances of mid-infrared laser

Parameter	Achieved value
Wavelength range / $\mu\text{m}$	2-50
Continuous tunability / %	~300
Macropulse energy / mJ	Max: 182
Macropulse width / $\mu\text{s}$	1-10
Macrobunch repetition rate / Hz	1-10
Micropulse energy / $\mu\text{J}$	Max: 170
Micropulse width (RMS) / ps	-
Micropulse repetition rate / MHz	119/59.5/29.75
Bandwidth (FWHM) / %	0.2-2

图 4 给出了中红外激光宏脉冲能量随波长的变化,对应的电子束宏脉冲宽度为 10  $\mu\text{s}$ ,微脉冲重复频率为 119 MHz,耦合输出孔直径为 2.5 mm。这里我们选取并优化了四个电子能量,分别为 60, 48, 30, 22 MeV。可以看出,在 2~50  $\mu\text{m}$  波长范围内,在实验站窗口外均有较强的激光输出。当固定电子能量,仅改变波荡器磁间隙时,波长连续调节范围为 ~300%。在 6~10  $\mu\text{m}$  波长范围内,宏脉冲能量均达到 100 mJ 以上。在 20.5  $\mu\text{m}$  波长附近,存在功率间隙,这是波导效应造成的<sup>[20-21]</sup>。对此我们发展

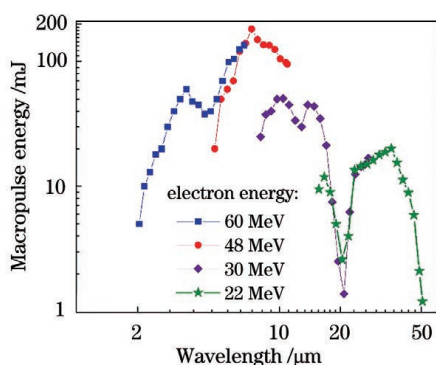


图 4 当电子束宏脉冲宽度为  $10 \mu\text{s}$ , 微脉冲重复频率为  $119 \text{ MHz}$ , 耦合输出孔直径为  $2.5 \text{ mm}$  时, FELiChEM 中红外激光的宏脉冲能量随波长的变化  
Fig. 4 Macropulse energy of mid-infrared laser of FELiChEM versus wavelength when macrobunch width of electron beam is  $10 \mu\text{s}$ , repetition rate of microbunch is  $119 \text{ MHz}$ , and diameter of out-coupling hole is  $2.5 \text{ mm}$

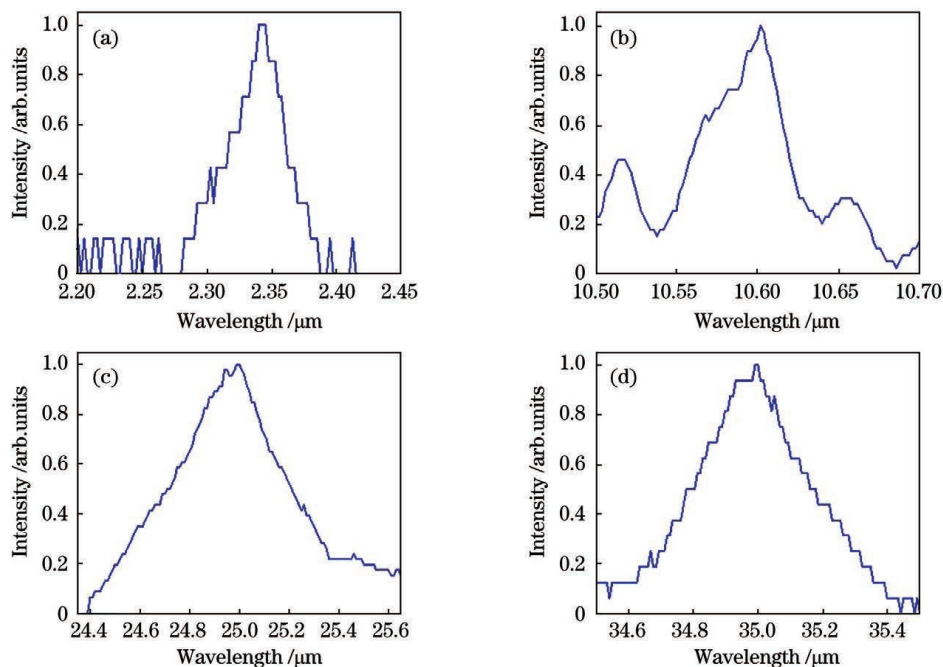


图 5 不同中心波长下光栅光谱仪测得的 FELiChEM 中红外激光的典型光谱图。(a)  $2.34 \mu\text{m}$ ; (b)  $10.6 \mu\text{m}$ ; (c)  $25 \mu\text{m}$ ; (d)  $35 \mu\text{m}$

Fig. 5 Typical spectra of mid-infrared laser of FELiChEM measured by grating spectrometer under different center wavelengths. (a)  $2.34 \mu\text{m}$ ; (b)  $10.6 \mu\text{m}$ ; (c)  $25 \mu\text{m}$ ; (d)  $35 \mu\text{m}$

## 4 结束语

合肥红外自由电子激光装置已经实现了中红外激光性能指标, 目前处于实验站调试阶段, 预计将于 2021 年实现全波段激光性能达标。此后, 将正式开始用户实验, 同时将会对装置的稳定性和可靠性进行改进和完善。

了数值模拟的方法<sup>[22]</sup>, 并进行了深入的研究, 结果表明, 通过更换现有的波荡器真空室, 可将此功率间隙对应的波长移动至  $50 \mu\text{m}$  波长以上。当波长在  $40 \mu\text{m}$  以上时, 碘化铯窗口的透过率急剧降低, 导致实验站窗口外测到的脉冲能量锐减, 用户实验时可通过更换窗口来解决这个问题。

图 5 给出了光栅光谱仪测得的中红外激光的四个代表性光谱。由于诊断站的建设还没有完全结束, 目前仍是在大气状态下进行光谱测量。而光栅光谱仪与诊断站出口处的距离为  $1.5 \text{ m}$  左右, 在波长大于  $\sim 40 \mu\text{m}$  时, 由于大气中的传输损耗以及衍射效应, 进入光谱仪的激光强度较弱, 难以测到稳定的光谱。对测得的光谱进行分析, 其 FWHM 带宽均在  $1\%$  左右。在装置运行过程中, 可以通过改变谐振腔腔长来控制腔内纵向模式, 从而在一定范围内改变输出的激光辐射带宽。

合肥红外自由电子激光装置的首要科学目标是解决能源化学领域的一些关键基础和前沿科学问题。该装置还可以在生物物理、核科学技术及国防等众多重要领域发挥重大作用。

## 参 考 文 献

- [1] 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 Physica C*, 2017, 41 (1): 018102.
- [2] Deacon D A G, Elias L R, Madey J M J, et al. First operation of a free-electron laser [J]. *Physical Review Letters*, 1977, 38(16): 892-894.
- [3] Xie J L, Zhuang J J, Huang Y Z, et al. Recent progress of the Beijing FEL: realized saturated oscillation [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1994, 18(8): 763-768.  
谢家麟, 庄杰佳, 黄永章, 等. 北京自由电子激光最近进展: 实现饱和和振荡 [J]. *高能物理与核物理*, 1994, 18(8): 763-768.
- [4] Ortega J M. Operation of the CLIO infrared laser facility [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1994, 341(1/2/3): 138-141.
- [5] van Amersfoort P W, Bakker R J, Bekkers J B, et al. First lasing with FELIX [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1992, 318(1/2/3): 42-46.
- [6] Schöllkopf W, Gewinner S, Junkes H, et al. The new IR and THz FEL facility at the Fritz Haber Institute in Berlin [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9512: 95121L.
- [7] Litvinenko V N, Park S H, Pinayev I V, et al. Operation of the OK-4/Duke storage ring FEL below 200 nm [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2001, 475(1/2/3): 195-204.
- [8] Litvinenko V N, Mikhailov S F, Shevchenko O A, et al. The OK-5/Duke storage ring VUV FEL with variable polarization [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2001, 475(1/2/3): 407-416.
- [9] 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.  
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.
- [10] 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.  
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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Stupakov G. Using the beam-echo effect for generation of short-wavelength radiation [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(7): 074801.
- [14] Zhu Z Y, Zhao Z T, Wang D, et al. SCLF: an 8-GeV CW SCRF linac-based X-ray FEL facility in Shanghai [C] // *Proceedings of 38th International Free Electron Laser Conference*, August 20-25, 2017, Santa Fe, NM, USA. Tsukuba: JaCoW, 2017: 182-184.
- [15] 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.
- [16] Feldhaus J, Saldin E L, Schneider J R, et al. Possible application of X-ray optical elements for reducing the spectral bandwidth of an X-ray SASE FEL [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1997, 393(1/2/3): 162-166.
- [17] 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.  
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.
- [18] 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.  
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.
- [19] Li H T, Jia Q K. Commissioning and first lasing of the FELiChEM: a new IR and THz FEL oscillator in China [C] // *Proceedings of 39th International Free Electron Laser Conference*, August 26-30, 2019, Hamburg, Germany. Tsukuba: JaCoW, 2019: 15-19.
- [20] Prazeres R, Glotin F, Ortega J M. Analysis of periodic spectral gaps observed in the tuning range of free-electron lasers with a partial waveguide [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2009, 12: 010701.
- [21] Ortega J M, Berthet J P, Glotin F, et al. Evidence

for competition modes in a partially guided far-infrared free-electron laser[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2014, 17(10): 100701.

[22] Li W, Zhao Z, Huang R, et al. Fully 3D time-dependent simulation of free electron laser within an overmoded rectangular waveguide [J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 15(3): P03008.

## Hefei Infrared Free-Electron Laser Facility

Li Heting<sup>1</sup>, He Zhigang<sup>1</sup>, Wu Fangfang<sup>1</sup>, Tang Leilei<sup>1</sup>, Zhao Zhouyu<sup>1</sup>, Zhang Tong<sup>1</sup>, He Tianlong<sup>1</sup>, Xuan Ke<sup>1</sup>, Zhang Haiyan<sup>1</sup>, Wei Wei<sup>1</sup>, Lu Ping<sup>1</sup>, Zhou Zeran<sup>1</sup>, Shang Lei<sup>1</sup>, Liu Gongfa<sup>1</sup>, Xu Hongliang<sup>1</sup>, He Xiaoye<sup>1</sup>, Jiang Shiping<sup>1</sup>, Pei Xiangtao<sup>1</sup>, Gao Chen<sup>1, 2</sup>, Jia Qika<sup>1</sup>, Bao Jun<sup>1</sup>, Zhang Shancai<sup>1\*</sup>, Wang Lin<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> *National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230029, China;*

<sup>2</sup> *School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 101408, China*

### Abstract

**Objective** Under the financial support of Natural Science Foundation of China, a new infrared free-electron laser (FEL) facility, named FELiChEM, is being developed at University of Science and Technology of China in Hefei. It will be a user facility dedicated for energy chemistry research, and will deliver the infrared laser in the spectral range of 2.5–200  $\mu\text{m}$  to five research stations. National Synchrotron Radiation Laboratory is responsible for the development of the FEL light source and optical beam line.

**Methods** FELiChEM consists of mid-infrared (MIR) and far-infrared (FIR) free-electron laser oscillators driven by one 60 MeV linac. The linac mainly contains: a 100 kV electron gun, a 476 MHz subharmonic standing wave pre-buncher, a 2856 MHz fundamental frequency traveling-wave buncher and two 2856 MHz fundamental frequency traveling-wave accelerating tubes separated by a magnetic compressor (chicane). Now we have achieved the electron beam with the maximum electron energy of 65 MeV, root mean square value of energy spread of less than 240 keV, normalized transverse emittance of 20–50  $\text{mm}\cdot\text{mrad}$  and bunch charge of 1.0–1.5 nC. The time structure of the electron beam can be easily tuned with the macrobunch width of less than 10  $\mu\text{s}$ , macrobunch repetition rate of 1–10 Hz and optional microbunch repetition rate within 238, 119, 59.5, 29.75 MHz. The two oscillators cover the wavelength ranges of 2.5–50  $\mu\text{m}$  and 40–200  $\mu\text{m}$ , respectively. In each oscillator, two spherical mirrors with copper base and gold coatings are used to form a symmetrical optical cavity. Two planar permanent-magnet undulators are placed in the center of the two optical cavities. The cavity length for both two oscillators is 5.04 m. The infrared radiation is outcoupled from the downstream cavity, which contains multiple mirrors with different outcoupling hole sizes and mechanical conditioners for switching mirrors. Laser beam generated from the two oscillators transports through the same beam line in low vacuum environment ( $\sim 10^{-2}$  Pa) to the experimental hall. The total length of the beam line is about 34 m. In the experimental hall, five research stations in one line are: photon dissociation endstation, photon excitation endstation, and photon detection endstation (containing 3 sub-endstations: sum frequency generation spectroscopy, nanoscale infrared spectroscopy, and *in-situ* reflection-absorption infrared spectroscopy). The layout of FELiChEM is shown in Fig. 1.

**Results and Discussions** The design of FELiChEM started from 2015. In July 2018, we began to commission the linac and made the high-quality electron beam travel through the mid-infrared oscillator in one month. Then, after finishing the installment of the optical beamline in May 2019, we successfully detected the spontaneous radiation at the research station in the morning of June 9, 2019 and we achieved the first FEL lasing at 15  $\mu\text{m}$  with the electron beam energy of 35 MeV in the afternoon of the same day. After several months we shut down the machine to install the online laser alignment system and the FEL diagnostics station. We restarted the commissioning of the MIR oscillator from May 2020, and until November 2020, the MIR oscillator had achieved the task object. It generates the laser beam covering the spectral range of 2–50  $\mu\text{m}$  with four electron beam energies of 60 MeV, 48 MeV,



30 MeV and 22 MeV, as shown in Fig. 4. The continuous wavelength tunability is about 300%. Based on the electron beam with the macro-pulse width of 10  $\mu$ s and micro-pulse repetition rate of 119 MHz, the maximum macro-pulse energy reaches 182 mJ at the window exit of photon dissociation endstation, while the maximum micro-pulse energy is about 170  $\mu$ J. In the wavelength range of 6–10  $\mu$ m, the macro-pulse energy exceeds 100 mJ. An obvious power gap appears around the wavelength of 20.5  $\mu$ m and the corresponding wavelength of this power gap will be moved to above 50  $\mu$ m by changing the size of the waveguide in the future. At the wavelengths longer than 40  $\mu$ m, the laser intensity drops rapidly mainly because the transmittance of the cesium iodide (CsI) window decreases rapidly with the increase of laser wavelength. The spectra measured by the grating spectrometer demonstrated that the full width at half maximum of FEL bandwidth was about 1% (Fig. 5). Currently, each research station is commissioning their instruments online with the mid-infrared FEL, and we will start the commissioning of the far-infrared oscillator soon in 2021.

**Conclusions** The mid-infrared oscillator of FELiChEM has achieved its task object and can provide 2–50  $\mu$ m laser for research stations. The commissioning of the far-infrared oscillator will start soon. We expect to finish the commissioning of the FEL source in 2021, and then the facility will be fully open to the users, and at the meantime we will make continuous efforts to improve the stability and reliability of this FEL machine.

**Key words** laser technique; free-electron laser; infrared band; oscillator

**OCIS codes** 140.2600; 140.3070