

太赫兹自由电子激光的受激饱和实验

黎明 杨兴繁 许州 束小建 鲁向阳 黄文会 王汉斌 窦玉焕 沈旭明 单李军 邓德荣 徐勇 柏伟 冯第超 吴岱 肖德鑫 王建新 罗星 周奎 劳成龙 闫陇刚 林司芬 张鹏 张浩 和天慧 潘清 李相坤 李鹏 刘宇 杨林德 刘婕 张德敏 李凯 陈亚男

Experimental study on the stimulated saturation of terahertz free electron laser

Li Ming Yang Xing-Fan Xu Zhou Shu Xiao-Jian Lu Xiang-Yang Huang Wen-Hui Wang Han-Bin Dou Yu-Huan Shen Xu-Ming Shan Li-Jun Deng De-Rong Xu Yong Bai Wei Feng Di-Chao Wu Dai Xiao De-Xin Wang Jian-Xin Luo Xing Zhou Kui Lao Cheng-Long Yan Long-Gang Lin Si-Fen Zhang Peng Zhang Hao He Tian-Hui Pan Qing Li Xiang-Kun Li Peng Liu Yu Yang Lin-De Liu Jie Zhang De-Min Li Kai Chen Ya-Nan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 084102 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172413

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172413>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹波段 Smith-Purcell 辐射的介质加载光栅高频特性

High frequency characteristics of dielectric-loaded grating for terahertz Smith-Purcell radiation
物理学报.2016, 65(1): 014101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014101>

介质加载复合光栅结构的色散特性研究

Dispersion characteristics of dielectric loaded metal grating
物理学报.2014, 63(2): 024101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024101>

短波长自由电子激光器电子运动特性研究

Characteristics of electron motion in a short-wavelength free-electron laser
物理学报.2013, 62(14): 144103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144103>

带光速调管的高增益高次谐波振荡器自由电子激光模拟

Simulation of high gain high harmonics oscillator with optical klystron free electron laser
物理学报.2013, 62(9): 094102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094102>

拉曼型自由电子激光器中相对论电子运动稳定性的比较研究

Comparative study of relativistic electron motion stability in a Raman free-electron laser
物理学报.2013, 62(8): 084104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.084104>

太赫兹自由电子激光的受激饱和实验*

黎明¹⁾ 杨兴繁¹⁾ 许州²⁾ 束小建³⁾ 鲁向阳⁴⁾ 黄文会⁵⁾ 王汉斌¹⁾
 窦玉焕²⁾ 沈旭明¹⁾ 单李军¹⁾ 邓德荣¹⁾ 徐勇¹⁾ 柏伟¹⁾ 冯第超¹⁾
 吴岱^{1)†} 肖德鑫¹⁾ 王建新¹⁾ 罗星¹⁾ 周奎¹⁾ 劳成龙¹⁾ 闫陇刚¹⁾
 林司芬¹⁾ 张鹏¹⁾ 张浩¹⁾ 和天慧¹⁾ 潘清¹⁾ 李相坤¹⁾ 李鹏¹⁾
 刘宇¹⁾ 杨林德¹⁾ 刘婕¹⁾ 张德敏¹⁾ 李凯¹⁾ 陈亚男¹⁾

1) (中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

2) (四川省国防科技工业办公室, 成都 610051)

3) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

4) (北京大学重离子物理研究所, 北京 100871)

5) (清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2017年11月9日收到; 2017年12月21日收到修改稿)

中国工程物理研究院基于半导体光阴极高压直流电子枪和超导直线加速器的高平均功率太赫兹自由电子激光达到了受激饱和, 并实现了太赫兹光输出频率可调. 在1.99, 2.41和2.92 THz三个频率点上进行测试, 测得太赫兹宏脉冲内平均功率大于10 W, 最高达17.9 W. 本文介绍了太赫兹自由电子激光装置的主要组成部分及受激饱和实验的结果.

关键词: 自由电子激光, 太赫兹光, 光阴极高压直流电子枪, 射频超导加速器

PACS: 41.60.Cr, 29.20.Ej

DOI: 10.7498/aps.67.20172413

1 引言

从Madey^[1]于1971年首次提出自由电子激光(FEL)原理至今的47年里, 世界上至少已建成了51台FEL装置, 并有20台以上的装置在建或计划建造^[2]. 这些FEL装置目前已经实现了从太赫兹到硬X射线谱段的激光出光^[3-6], 并作为目前最高峰值亮度的先进光源推动了生命科学、信息技术、材料等多个学科的进步^[7-10], 成为当前研究物质世界的强有力工具.

从20世纪80年代开始, 我国针对FEL开展了大量理论与实验研究^[11-15]. 1993年, 分别代表谱

振腔型技术路线和放大器型技术路线的“北京自由电子激光”(BFEL)^[16]和“曙光一号”自由电子激光^[17]出光; 2005年, 中国工程物理研究院远红外自由电子激光获得受激辐射^[18]; 2012年, 中国科学院上海应用物理研究所世界首台回声放大型自由电子激光出光^[19]; 2017年, 中国科学院大连化学物理研究所深紫外自由电子激光出光^[20]. 上海应用物理研究所目前正在调试国内首台软X射线自由电子激光^[21], 未来还将在上海建设国内首台硬X射线自由电子激光装置^[22].

近几年随着太赫兹(THz)技术的迅猛发展, 在FEL辐射的长波长一端, THz FEL获得了非常高的关注度. 全世界计划未来建造的20台FEL装置

* 国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2011YQ130018)和国家自然科学基金(批准号: 11475159, 11505173, 11505174, 11575264, 11605190, 11105019)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wudai04@163.com

中就有8台能工作在THz波段^[2],这充分说明THz FEL在FEL领域占据热点位置,并将为诸如强光场下THz非线性效应等基础研究提供先进稳定的光源^[23-25].国内前期在加速器驱动的摇摆器超宽带THz辐射源开展了大量工作,包括上海应用物理研究所^[26]、北京大学^[27]和清华大学^[28]都进行了相关研究,但摇摆器超宽带辐射源中心频率调节范围一般不易大于1 THz,且频谱宽度较宽.长期以来,我国都缺乏一台工作在THz频段、调节范围足够宽的自由电子激光器.

由中国工程物理研究院牵头,北京大学、清华大学等多家单位联合研制的高平均功率THz自由电子激光装置(CTFEL)是国内首台基于光阴极高压直流电子枪和超导射频加速器,工作在高重复频率、高占空比状态下的THz自由电子激光器^[29-32].CTFEL采用谐振腔型技术路线,于2017年8月29日首次实现受激饱和出光^[33].本文主要介绍CTFEL装置的系统组成以及受激饱和的实验情况.

2 装置系统组成

CTFEL装置布局示意图如图1,装置的主要参数如表1所列.装置采用谐振腔型FEL技术路线,主要包括直流高压光阴极电子源系统、射频超导加速器、平面型摇摆器、激光谐振腔、THz传输与测量系统等.高亮度电子束由波长532 nm的皮秒驱动激光从砷化镓光阴极表面激发,由高压直流电子枪发射,经过发射度补偿和微波聚束后,进入两段由

2 K超流氦冷却的4-cell TESLA型超导射频加速腔,获得6—8 MeV能量,再经过消色散段,最终进入摇摆器产生THz自发辐射. THz自发辐射在光腔中谐振,并受激放大获得饱和输出.

表1 CTFEL装置主要参数
Table 1. Main parameters of CTFEL facility.

组成	参数	设计值	单位
电子束	单束团电荷量	10—100	pC
	微脉冲重复频率	54.167	MHz
	宏脉冲重复频率	1—10 ³	Hz
	宏脉冲长度	0.01—1.00	ms
	占空比	10 ⁻⁵ —1	—
	归一化发射度	~ 10	mm·mrad
	纵向长度	4—8	ps
	动能	6—8	MeV
加速器	能散度	< 0.75	%
	工作频率	1.3	GHz
	工作温度	2	K
	加速梯度	10	MV/m
	幅度稳定性	0.05	%
	相位稳定性	0.1	deg
摇摆器	磁结构	平面反对称	—
	周期数	42	—
	周期长度	38	mm
	间隙范围	18.5—32(可调)	mm
	最大磁场	0.55	T
光腔	腔长	2767.3	mm
	腔镜曲率半径	2218	mm
	波导管尺寸	22 × 44	mm × mm

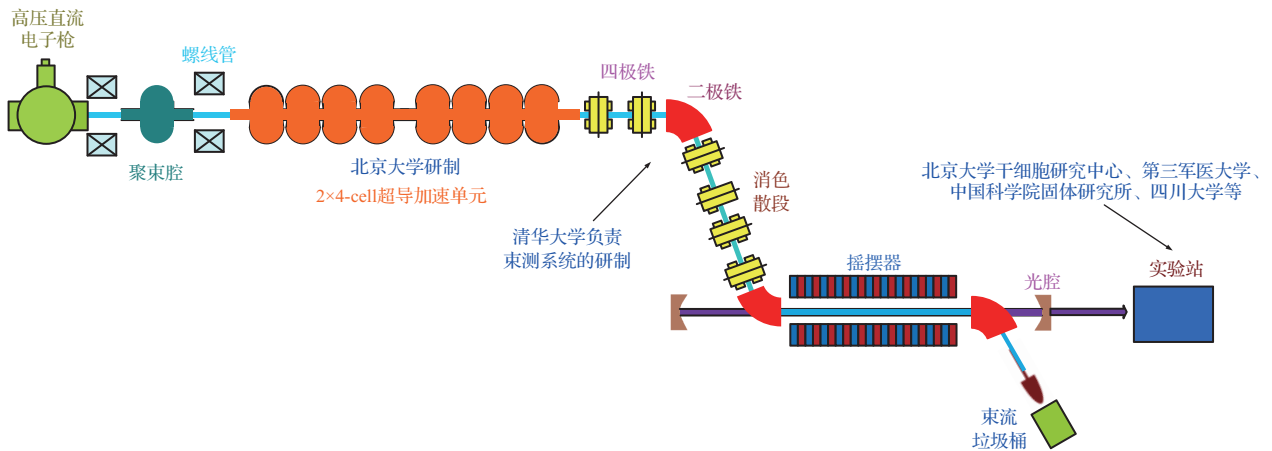


图1 CTFEL装置布局示意图

Fig. 1. Layout of CTFEL facility.

2.1 高亮度电子源系统

高亮度电子源系统主要包括砷化镓光阴极制备系统、load-lock系统、驱动激光以及高压直流电子枪(DC gun). DC gun结构如图2所示^[34,35],枪体为四通型,径向尺寸达到 $\phi 500$ mm以降低电极表面场强;高压绝缘子采用电荷泄放型陶瓷绝缘子,提高强电场工作稳定性;阴极支撑杆和地电位之间加一电极,降低阴极支撑杆表面电场强度;绝缘子外表面为5 atm ($1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$)的 SF_6 气体绝缘,并置空间非均匀分布金属环分压;超高真空由三极溅射离子泵和非蒸散吸气泵(NEG)的组合实现.通过烘烤、NEG等一系列手段,工作状态下的真空度稳定在 3×10^{-9} Pa左右,电子枪出口处电子束动能约为200—350 keV,目前工作在320 keV.

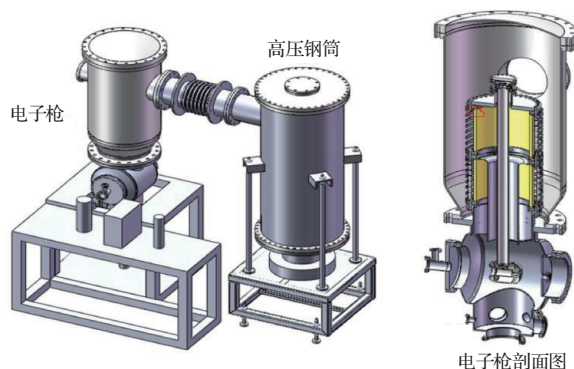


图2 CTFEL高压直流电子枪外观及细节示意图

Fig. 2. Appearance and detail of the CTFEL high-voltage direct-current gun.

2.2 射频超导加速器系统

射频超导加速器系统包括超导加速器、低温系统、微波源系统和低电平控制系统^[36].

2×4 -cell超导加速器结构示意图如图3所示,加速器核心部件为两只4-cell TESLA型超导加速腔,其内部建立1.3 GHz TM₀₁₀模式的电磁场,电子束从超导腔中心经过,受腔内部的电场作用获得加速.大功率微波耦合器用于将微波源产生的功率传输至超导腔内部建场,最大可传输功率达到30 kW以上(连续波(CW)模式).为获得高品质的电子束,采用低电平控制系统维持超导腔内电磁场的幅、相稳定度分别好于0.05%和 0.1° .同时,由于

抽真空降温、麦克风效应、洛伦兹失谐等作用,将导致超导加速腔失谐,调谐器用于将超导加速腔在2 K下的工作频率稳定在1.3 GHz.此外,低温恒温器为超导加速腔提供低温低磁的工作环境,设有2 K和80 K两层低温层,以减小低温系统热损.恒温器外筒和内磁屏蔽层共同用于磁屏蔽,实现内部磁场环境低于12 mGs ($1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$).

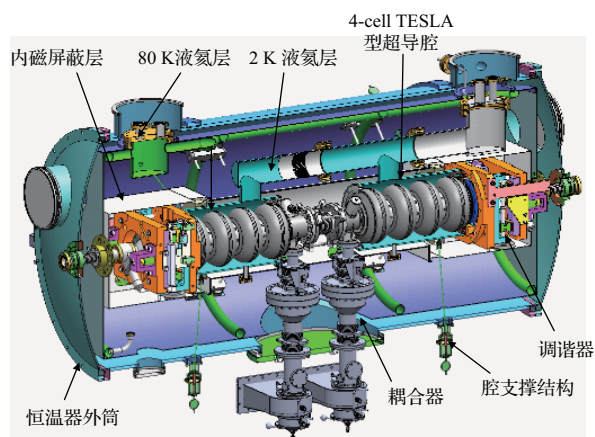


图3 2×4 -cell超导加速器结构示意图

Fig. 3. A schematic of the 2×4 -cell superconducting accelerator structure.

基于高阶模、束载、能散、工作环境等方面的物理分析,我们对 2×4 -cell超导加速器进行了设计与制造.目前加速器已实现2 K下长时间稳定运行,平均加速梯度可达到10 MV/m以上,实现电子束增能6—8 MeV可调.

2.3 摇摆器和光腔系统

CTFEL包括一台Halbach结构的混合型永磁摇摆器,其周期长度为38 mm,有42个标准周期,间隙在18—32 mm之间可调,最小间隙下峰值磁场可达0.55 T.摇摆器机械驱动系统采用伺服电机和光栅尺闭环控制,间隙调节分辨率为 $1 \mu\text{m}$.单电子轨迹中心偏移小于0.1 mm.横向磁场好场区大于12 mm,好场区内磁场误差小于0.1%.

CTFEL采用光学谐振腔实现光场的受激增益,光场被束缚在腔镜之间的波导中,波导可有效降低传输损耗.光腔采用下游腔镜孔耦合输出,耦合孔直径为2.4 mm,耦合输出效率为2%左右(计算值).腔镜采用铜材料表面镀金,反射率优于95%.

3 THz 光测试

3.1 实验布局及测试原理

THz 传输光路如图 4 所示. THz 由激光谐振腔下游腔镜耦合输出孔输出, 再经过隔离真空环境和氮气环境的熔融石英输出窗进入扩束整形系统中, 经过传输管道, 穿过辐射隔离墙, 进入到位于实验室用户间内的聚束收集系统(为标示简单, 分别采用一块凹面镜标示整个扩束整形系统和聚束收集系统), 经过聚束后穿过迈拉膜(Mylar)输出窗进入位于大气环境中的 THz 测量系统.

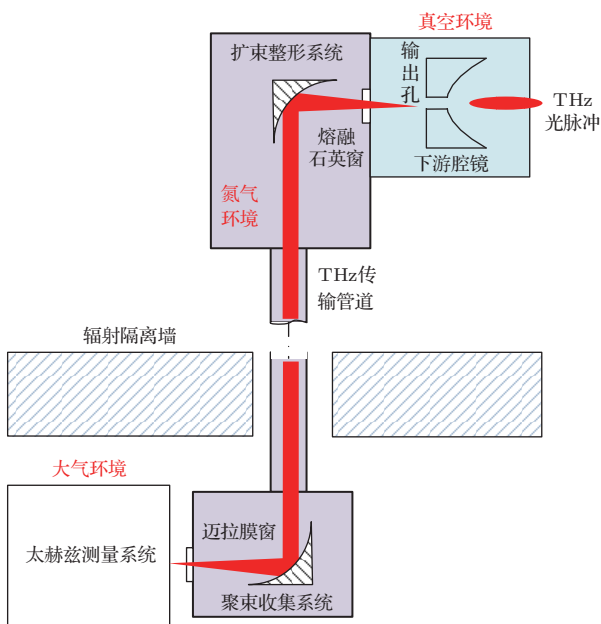


图 4 THz 传输光路示意图

Fig. 4. Layout of THz transmission.

THz 测量系统光路如图 5 所示. THz 由聚束收集系统的迈拉膜输出窗输出, 传入功率计测量 THz 宏脉冲能量, 透过功率计的 THz 光进入傅里叶光谱仪 (Bruker VERTEX 80V 型) 进行频谱测量, 在功率计表面反射的 THz 进入到高灵敏快响应的锗掺杂低温探测器中测量宏脉冲波形.

THz 宏脉冲内平均功率测量采用 Thomas Keating Instruments (以下简称 TK) 的功率计, 该功率计在测量较低占空比时不能工作在功率测量模式, 只能工作在能量测量模式. 测量时激光照射在能量计窗口, THz 光能量在探测器上沉积产生电压信号, 电压信号的幅值与沉积能量的对

应关系事先已经经过计量单位标定, 标定系数为 $r = 0.233 \text{ mV} \cdot \mu\text{J}^{-1}$. 利用示波器测量该电压信号 V_0 , 经过计算得到沉积在探测器上的能量 E 为

$$E = \frac{V_0}{r}. \quad (1)$$

再利用示波器测量锗掺杂探测器得到的宏脉冲宽度 τ , 计算得到宏脉冲内的平均功率 P_{avg} 为

$$P_{\text{avg}} = \frac{E}{0.49T\tau\eta}, \quad (2)$$

其中 0.49 是功率计上的能量吸收效率, T 是功率计窗口的 THz 传输效率, η 是由 THz 光腔耦合孔到达功率计的传输效率. 高真空输出窗的材料为熔融石英, 聚束系统输出窗材料为迈拉膜. 由于这两种材料的透射率与 THz 波长有关, 实验中需要对特定波长的两种窗口材料的透射率进行现场测量: 将石英窗口插入功率测量光路中, 得到探测器上的电压信号为 V_1 , 取出石英窗口, 插入迈拉膜窗口, 得到探测器上电压信号为 V_2 , 则有 $\eta = V_1V_2/V_0^2$.

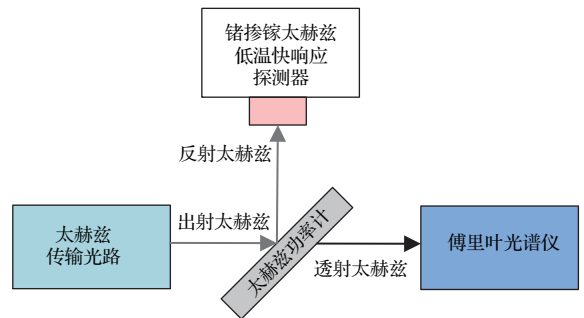


图 5 THz 测量光路示意图

Fig. 5. Layout of THz measurement.

3.2 测量结果

在 $f = 2.0, 2.5, 3.0 \text{ THz}$ 三个频率点附近选取三种输出状态, 测量得到的 CTFEL 受激饱和功率输出如表 2 所列. 测试过程中, 由于装置保护系统尚未完成安装调试, 因此选用脉冲宽度为 1.0 ms 或 1.5 ms、重复频率为 1 Hz 的宏脉冲模式.

图 6 给出了 CTFEL 的功率和频率测量结果, 其中图 6 (b) 以 1.99 THz 为例给出了 TK 功率计上 V_0, V_1 和 V_2 的结果, 由此计算出到达单个宏脉冲的能量. 图 6 中纵坐标 S, U 分别为相对强度、电压, 横坐标 t 为时间.

表2 CTFEL受激饱和和功率输出结果
Table 2. Stimulated saturation power measurement of CTFEL.

参数/单位	数值		
f/THz	2.92	2.41	1.99
V_0/mV	46.8	66.4	96.0
V_1/mV	2.68	7.00	20.60
V_2/mV	24.6	38.0	61.2
η	0.03	0.06	0.14
$E/\mu\text{J}$	200	285	412
$\tau/\mu\text{s}$	1420	1416	884
T	0.537	0.528	0.560
P_{avg}/W	17.9	12.8	12.4

通过锗掺镓探测器的宏脉冲信号可以测量宏脉冲长度和CTFEL的平均单程净增益. 图7(a)给出了2.92 THz下的宏脉冲平顶, 其前沿如图7(b)所示. 由图7(a)可以看出, THz宏脉冲的长度略小于电子束的宏脉冲长度, 这是因为装置宏脉冲状态下的低电平前馈系统尚未调试完成, 宏脉冲前100 μs 的电子束无法受激饱和, 饱和后在长时间尺度内微脉冲的功率一致性较差, 1 ms以后信号趋于稳定, 微脉冲束团间的功率一致性好于1%. 这是因为低电平在较大束流负载时需要较长的稳定时间, 这些不利因素将在未来CW工作状态下被消除.

图7(b)中将横坐标时间换算成光在光腔中经过的来回的次数(pass数), 由此计算出在激光功率的指数上升区, 平均单程净增益大于2.5%.

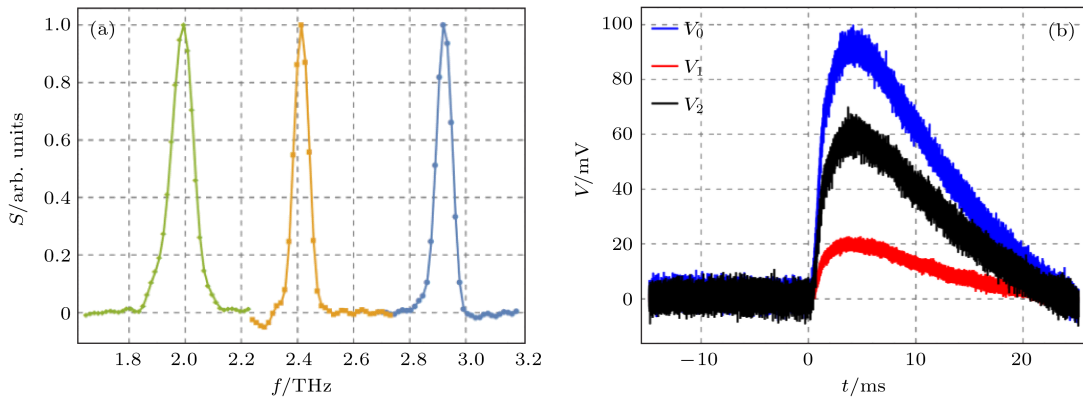


图6 频率与功率测量 (a)三个频率点的频谱; (b) 1.99 THz下TK功率计波形
Fig. 6. Measurement of frequency spectrum and THz power: (a) Spectrum; (b) oscilloscope waveform of TK power meter at 1.99 THz.

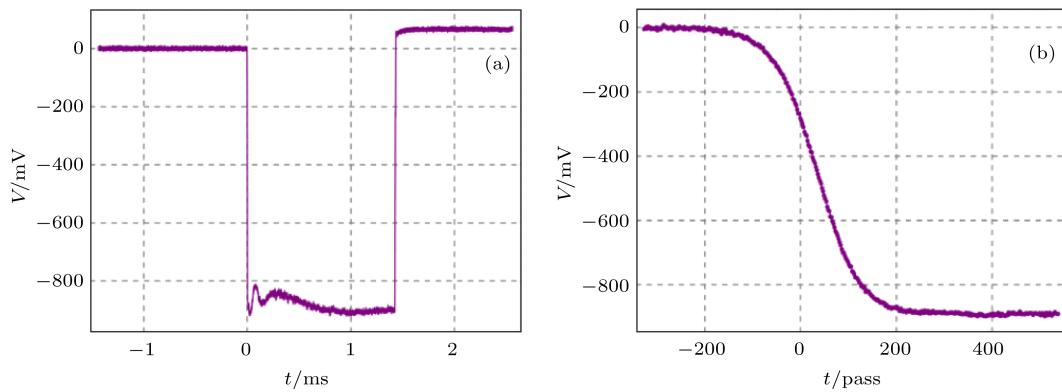


图7 2.92 THz宏脉冲受激饱和输出波形 (a) THz宏脉冲信号; (b) 宏脉冲前沿
Fig. 7. Stimulated saturation signal at 2.92 THz: (a) Macro-pulse signal; (b) the signal front of the macro-pulse.

微脉冲功率方面, 由于缺乏THz自相关仪, 因此不能准确测量纵向长度, 采取下述方法进行估计: 读取傅里叶变换光谱仪的时域信号, 其时域

干涉图类似于自相关曲线, 做出其包络, 包络半高全宽的 $\sqrt{2}/2$ 倍近似为光的微脉冲半高全宽^[37]. 图8所示为中心频率2.92 THz时取包络半高全宽

的结果, 横坐标 z 为光谱仪动镜造成的光程差, 纵坐标为探测器相对信号, 图中用三根横线分别表示干涉图的 0 点、最高位置和半高全宽位置, 用两根竖线来表示半高全宽, 测量得到光束的纵向半高全宽约为 930 fs, 此处的微脉冲能量约为 331 nJ, 微脉冲功率为 0.36 MW. 图中的时域干涉图误差较大, 因此这一结果仅能作为估测结果. 这一方法得到的纵向半高全宽与傅里叶变换光谱仪的频域结果看似存在矛盾, 因为如图 6 (a) 中的频谱, 每一个峰的谱宽度都相对较窄, 按照傅里叶变换的性质, 时域上的光束长度就不可能这么短. 实际上, 由于采用的占空比过低, 因此光谱仪的频谱信号是采用 30 min 多次测频谱平均得来, 时域上由于宏脉冲之间存在时间抖动, 长期的结果将使频谱收窄. 在实验中, 这一判断通过取不同时间长度进行测量得到了验证.

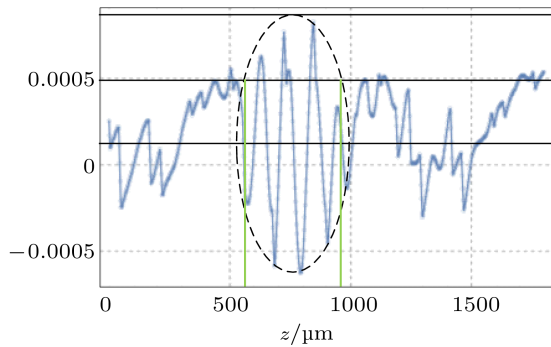


图 8 2.92 THz 微脉冲时域干涉图

Fig. 8. Time-domain interferogram of the micro-pulse at 2.92 THz.

4 结 论

中国工程物理研究院高平均功率 THz 自由电子激光装置采用谐振腔型技术路线, 达到了自由电子激光受激饱和, 并实现了 THz 输出频率可调. 在 1.99, 2.41 和 2.92 THz 三个频率点进行测试, THz 宏脉冲内平均功率大于 10 W, 最高 17.9 W. 下一步, CTFEL 将升级保护控制系统, 争取早日实现 CW 运行, 同时将开展装置用户实验, 多渠道发掘该装置的应用潜力与推广前景, 为各相关学科研究和 THz 辐射在其他高新技术领域的应用提供支撑. 同时, 在现有装置的基础上进一步拓展 FEL 波长范围, 使其成为我国光源体系中的重要组成部分, 推动我国 THz 技术的发展.

参考文献

- [1] Madey J M J 1971 *J. Appl. Phys.* **42** 1906
- [2] Cohn K, Blau J, Colson W, Blau J, Ng J 2015 *Proceedings of FEL 2015* Daejeon, Korea, August 23–28, 2015 p625
- [3] Ayvazyan V, Baboi N, Bohnet I, Brinkmann R, Castellano M, Castro P, Catani L, Choroba S, Cianchi A, Dohlus M, Edwards H T 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 104802
- [4] Shintake T, Tanaka H, Hara T, Tanaka T, Togawa K, Yabashi M, Otake Y, Asano Y, Bizen T, Fukui T, Goto S 2008 *Nature Photon.* **2** 555
- [5] Emma P, Akre R, Arthur J, Bionta R, Bostedt C, Bozek J, Brachmann A, Bucksbaum P, Coffee R, Decker F J, Ding Y 2010 *Nat. Photon.* **4** 641
- [6] Pile D 2011 *Nat. Photon.* **5** 456
- [7] Young L, Kanter E P, Krässig B, Li Y, March A M, Pratt S T, Santra R, Southworth S H, Rohringer N, DiMauro L F, Doumy G 2010 *Nature* **466** 56
- [8] Vinko S M, Ciricosta O, Cho B I, Engelhorn K, Chung H K, Brown C R, Burian T, Chalupský J, Falcone R W, Graves C, Hajkova V 2012 *Nature* **482** 59
- [9] Takahashi S, Brunel L C, Edwards D T, van Tol J, Ramian G, Han S, Sherwin M S 2012 *Nature* **489** 409
- [10] McSweeney S, Fromme P 2014 *Nature* **505** 620
- [11] Zhao D H 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 1447 (in Chinese) [赵东焕 1994 物理学报 **43** 1447]
- [12] Yin Y Z 1983 *Acta Phys. Sin.* **32** 1407 (in Chinese) [尹元昭 1983 物理学报 **32** 1407]
- [13] Hui Z X, Yang Z H 1983 *Free Electron Laser* (Beijing: National Defense Industry Press) (in Chinese) [惠中锡, 杨震华 1983 自由电子激光 (北京: 国防工业出版社)]
- [14] Li J, Pei Y J, Hu T N, Chen Q S, Feng G Y, Shang L, Li C L 2014 *Chin. Phys. C* **38** 103
- [15] Jia Q K 2017 *Chin. Phys. C* **41** 18101
- [16] Xie J L, Fu E S 1994 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **18** 572 (in Chinese) [谢家麟, 傅恩生 1994 高能物理与核物理 **18** 572]
- [17] Zhou C M 1993 *High Power Laser and Particle Beams* **2** 1 (in Chinese) [周传明 1993 强激光与粒子束 **2** 1]
- [18] Jin X, Li M, Xu Z, Li W H, Yang X F, Chen T C, Xu Y, Yu H, Wang Y, Shen X M 2006 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **30** 96 (in Chinese) [金晓, 黎明, 许州, 黎维华, 杨兴繁, 陈天才, 徐勇, 余虹, 王远, 沈旭明 2006 高能物理与核物理 **30** 96]
- [19] Zhao Z T, Wang D, Chen J H, Chen Z H, Deng H X, Ding J G, Feng C, Gu Q, Huang M M, Lan T H, Leng Y B 2012 *Nat. Photon.* **6** 360
- [20] Dennis N 2017 *Science* **355** 235
- [21] Zhao Z T, Wang D, Gu Q, Yin L, Fang G, Gu M, Leng Y B, Zhou Q, Liu B, Tang C, Huang W 2017 *Synchrotron Radiation News* **30** 29
- [22] Zhu Z, Zhao Z T, Wang D, Liu Z, Li R, Yin L, Yang Z H 2017 *Proceedings of FEL 2017* Santa Fe, NM, USA, August 20–25, 2017 MOP055
- [23] Liu M, Hwang H Y, Tao H, Strikwerda A C, Fan K, Keiser G R, Sternbach A J, West K G, Kittiwatanakul S, Lu J, Wolf S A 2012 *Nature* **487** 345

- [24] Fan K, Hwang H Y, Liu M, Strikwerda A C, Sternbach A, Zhang J, Zhao X, Zhang X, Nelson K A, Averitt R D 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 217404
- [25] Kulipanov G N, Gavrilov N G, Knyazev B A, Kolobanov E I, Kotenkov V V, Kubarev V V, Matveenko A N, Medvedev L E, Miginsky S V, Mironenko L A, Ovchar V K 2008 *Terahertz Sci. Technol.* **1** 107
- [26] Zhang J, Deng H X, Lin X, Dai D, Sun Q, Lu S, Yu T, Zhao H, Yang H, Dai Z 2012 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **693** 23
- [27] Wen X, Huang S L, Lin L, Wang F, Zhu F, Feng L, Yang L, Wang Z, Fan P, Hao J, Quan S 2016 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **820** 75
- [28] Su X L, Wang D Tian Q L 2017 *Proceedings of IPAC 2017 Copenhagen, Denmark, May 14–19, 2015* p1488
- [29] Xu Z, Yang X F, Li M 2013 *J. Terahertz Science and Electronic Information Technology* **1** 1 (in Chinese) [许州, 杨兴繁, 黎明 2013 太赫兹科学与电子信息学报 **1** 1]
- [30] Dou Y H, Shu X J, Wang Y Z 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1345 (in Chinese) [窦玉焕, 束小建, 王元璋 2006 强激光与粒子束 **18** 1345]
- [31] Dou Y H, Shu X J, Deng D R, Yang X F, Li M 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 662 (in Chinese) [窦玉焕, 束小建, 邓德荣, 杨兴繁, 黎明 2013 强激光与粒子束 **25** 662]
- [32] Li P, Jiao Y, Bai W, Wang H B, Cui X H, Li X K 2014 *High Power Laser and Particle Beams* **26** 3102 (in Chinese) [李鹏, 焦毅, 柏伟, 王汉斌, 崔小昊, 李相坤 2014 强激光与粒子束 **26** 3102]
- [33] Li M, Yang X F, Xu Z, Shu X J, Lu X Y, Huang W H, Wang H B, Dou Y H, Shen X M, Shan L J, Deng D R, Xu Y, Bai W, Feng D C, Wu D, Xiao D X, Wang J X, Luo X, Zhou K, Lao C L, Yan L G, Lin S F, Zhang P, Zhang H, He T H, Pan Q, Li X K, Li P, Liu Y, Yang L D, Liu J, Zhang D M, Li K, Chen Y N 2017 *High Power Laser and Particle Beams* **29** 101 (in Chinese) [黎明, 杨兴繁, 许州, 束小建, 鲁向阳, 黄文会, 王汉斌, 窦玉焕, 沈旭明, 单李军, 邓德荣, 徐勇, 柏伟, 冯第超, 吴岱, 肖德鑫, 王建新, 罗星, 周奎, 劳成龙, 闫陇刚, 张鹏, 张浩, 和天慧, 林司芬, 潘清, 李相坤, 李鹏, 刘宇, 杨林德, 刘婕, 张德敏, 李凯, 陈亚男 2017 强激光与粒子束 **29** 101]
- [34] Wang H B, Yang X F, Pan Q, Li M 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 145 (in Chinese) [王汉斌, 杨兴繁, 潘清, 黎明 2013 强激光与粒子束 **25** 145]
- [35] Wu D 2014 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [吴岱 2014 博士学位论文(北京: 清华大学)]
- [36] Luo X, Lao C, Zhou K, Li M, Yang X, Lu X, Quan S, Wang F, Mi Z, Sun Y, Wang H 2017 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **871** 30
- [37] Murokh A, Rosenzweig J B, Hogan M, Suk H, Travish G, Happek U 1998 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **410** 452

Experimental study on the stimulated saturation of terahertz free electron laser*

Li Ming¹⁾ Yang Xing-Fan¹⁾ Xu Zhou²⁾ Shu Xiao-Jian³⁾ Lu Xiang-Yang⁴⁾
 Huang Wen-Hui⁵⁾ Wang Han-Bin¹⁾ Dou Yu-Huan²⁾ Shen Xu-Ming¹⁾ Shan Li-Jun¹⁾
 Deng De-Rong¹⁾ Xu Yong¹⁾ Bai Wei¹⁾ Feng Di-Chao¹⁾ Wu Dai^{1)†} Xiao De-Xin¹⁾
 Wang Jian-Xin¹⁾ Luo Xing¹⁾ Zhou Kui¹⁾ Lao Cheng-Long¹⁾ Yan Long-Gang¹⁾
 Lin Si-Fen¹⁾ Zhang Peng¹⁾ Zhang Hao¹⁾ He Tian-Hui¹⁾ Pan Qing¹⁾ Li Xiang-Kun¹⁾
 Li Peng¹⁾ Liu Yu¹⁾ Yang Lin-De¹⁾ Liu Jie¹⁾ Zhang De-Min¹⁾ Li Kai¹⁾ Chen Ya-Nan¹⁾

1) (Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2) (Sichuan Defense Science and Technology Industry Office, Chengdu 610051, China)

3) (Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

4) (Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

5) (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 9 November 2017; revised manuscript received 21 December 2017)

Abstract

China Academy of Engineering Physics terahertz free electron laser (CAEP THz FEL, CTFEL) is the first THz FEL oscillator in China, which is jointly built by CAEP, Peking University and Tsinghua University. It is designed as a high-repetition-rate and high-duty-cycle linac-based FEL facility.

This THz FEL mainly consists of a gallium arsenide (GaAs) photocathode high-voltage direct current (DC) gun, a superconducting radio frequency (RF) linac, a planar undulator, and a quasi-concentric optical resonator. The DC gun provides a high-brightness electron beam with the bunch charge of about 100 pC and the repetition rate of 54.167 MHz. The normalized emittance of the electron beam is less than 10 μm , and the energy spread is less than 0.75%. A 2×4 -cell superconducting RF accelerator provides an effective field gradient of about 10 MV/m and energizes the electron beam to 6–8 MeV. The beam then goes through the undulator and generates the spontaneous radiation, which is reflected back and forth in the optical resonator and then stimulated by the electron beam.

The first stimulated saturation of CTFEL in the macro-pulse mode was obtained in August, 2017. In this paper, the THz spectrum is measured by a Fourier spectrometer (Bruker VERTEX 80 V). The macro-pulse energy is measured by an absolute energy meter from “Thomas Keating Instruments”. The longitudinal beam length is preliminarily calculated by the auto-correlation curve from the time-domain signal of the spectrometer. The macro-pulse duration is captured by a GeGa cryogenic detector from “QMC Instrument”. The measurement results indicate that the terahertz laser frequency is continuously adjustable from 2 THz to 3 THz. The macro-pulse average power is more than 10 W and the micro-pulse power is more than 0.3 MW. The single-pass gain is larger than 2.5%.

This facility is now working in macro-pulse mode in the first step, also called “step one”. The minimum macro-pulse

* Project supported by the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (Grant No. 2011YQ130018) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11475159, 11505173, 11505174, 11575264, 11605190, 11105019).

† Corresponding author. E-mail: wudai04@163.com

duration is about 50 μs and the maximum is about 2 ms. The macro-pulse repetition is 1 Hz or 5 Hz. The typical pulse duration and repetition rate are 1 ms and 1 Hz, respectively. In the middle of 2018, the duty cycle will upgrade to more than 10 % as “step two”. And the continuous wave (CW) operation will be obtained in “step three” by the end of 2018. The spectrum adjustment range will also be expanded to cover from 1 THz to 4 THz by then.

Some application experiments have been carried out on the platform of CTFEL. This facility will greatly promote the development of THz science and its applications in material science, chemistry science, biomedicine science and many other cutting-edge areas in general.

Keywords: free electron laser, terahertz, photocathode high-voltage direct-current electron gun, radio-frequency superconducting accelerator

PACS: 41.60.Cr, 29.20.Ej

DOI: [10.7498/aps.67.20172413](https://doi.org/10.7498/aps.67.20172413)