

中国工程物理研究院远红外自由电子激光实验研究

金晓¹ 黎明^{1,1)} 许州¹ 黎维华¹ 杨兴繁¹ 陈天才¹ 徐勇¹ 余虹¹ 王远¹ 沈旭明¹
程云¹ 谢敏¹ 卢和平¹ 邓德荣¹ 刘婕¹ 崔丽¹ 杨茂荣¹ 李正红¹ 胡克松¹
都兴绍¹ 俞泉兔¹ 黄孙仁¹ 邓仁培¹ 刘锡三¹
束小建² 丁武² 竇玉焕² 吴中发²

1 (中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)
2 (北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

摘要 中国工程物理研究院基于射频直线加速器技术的远红外自由电子激光(FIR-FEL)实验取得阶段性进展,于2005年3月24日晚8时30分首次出光,并多次重复.中心波长115 μm ,谱宽1%.介绍了实验系统的主要组成部分和主要实验结果.

关键词 自由电子激光 微波电子枪 射频直线加速器 摇摆器

1 引言

中国工程物理研究院100 μm FIR-FEL实验装置是一台采用射频直线加速器^[1]驱动的自由电子激光振荡器,采用热阴极微波电子枪作为加速器的注入器,于2000年完成装置建设,并观测到自发辐射.随后,课题组开始进行实验装置的改进工作,主要包括提高微波源的稳定性,提高电子束品质,研制高性能摇摆器,降低激光谐振腔损耗等,以满足FEL实验的要求,并于2005年3月24日首次实现了激光振荡,但由于增益较低,没有达到饱和.本文主要介绍该装置及主要实验结果.

注入器和加速段分别用两台输出功率为3.5MW的速调管驱动,速调管工作频率为1300MHz.速调管调制器的脉冲平顶宽度为6 μs ,纹波 $\sim 0.3\%$,脉冲间稳定度 $\sim 0.2\%$.表1为该装置的主要性能参数(实测值).

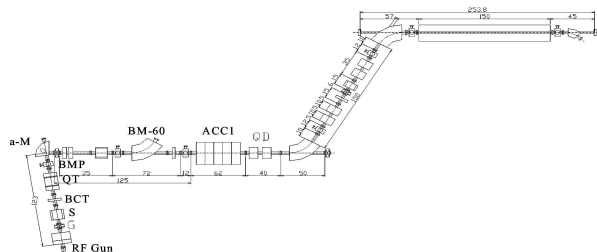


图1 实验系统总体布局图

2 实验系统

2.1 概述

图1是中国工程物理研究院远红外自由电子激光总体布局.系统包括:热阴极微波电子枪、 α 磁铁、五腔L波段驻加速管、消色散传输系统、摇摆器及光腔等.从微波电子枪引出的电子束经 α 磁铁进行能量选择和动量压缩后,得到 $\sim 2\text{MeV}$ 的电子束,再经过一段5腔驻波加速管加速后,得到的电子束能量为6.5MeV.

表1 主要性能参数(实测值)

电子束	
能量: $\sim 6.5\text{MeV}$	宏脉冲流强: 120mA
宏脉冲宽度: $\sim 4\mu\text{s}$	微脉冲宽度: $\sim 20\text{ps}$
能散度: $\sim 1\%$	归一化发射度: $\sim 20\text{mm}\cdot\text{mrad}$
摇摆器	
周期数: 44	周期长度: 3.2
间隙: 18mm	峰值磁场: 3200Gs
电子轨迹偏移: $< 0.1\text{mm}$	
光学谐振腔	
腔长: 2.536m	上下游腔镜曲率半径: 1.768m

1) E-mail: liming@caep.ac.cn

2.2 微波源

微波源稳定性直接影响电子束的稳定性, 提高微波源的稳定性主要包括通过使用双人工线减小调制器高压顶部纹波和使用高稳定信号源. 经过改造后, 脉冲间高压稳定性好于0.2%, 脉冲高压顶部纹波约0.3%, 如图2所示.

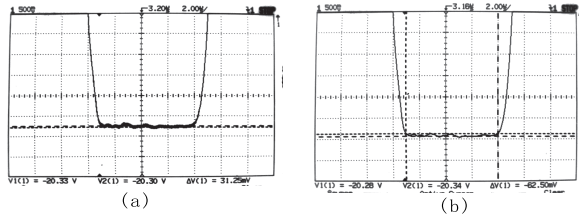


图2 调制器脉冲高压稳定度(a)和顶部纹波(b)

2.3 注入器

进行自由电子激光研究需要高亮度电子束, 而电子束品质主要由注入器性能决定, 为了获得高亮度的电子束, 对几种注入器方案进行了分析与模拟计算, 先后研制了栅控电子枪型注入器和热阴极微波电子枪型注入器, 经过注入器束流调试和束流参数测量, 最后选定了热阴极微波电子枪型注入器方案. 注入器束流参数测量结果与理论设计较吻合. 图3是利用BCT测量了宏脉冲束流强度波形, 图4是利用条纹相机测量了束流微脉冲宽度.

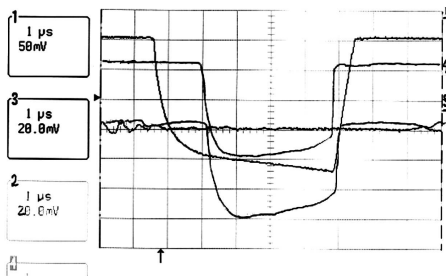


图3 不同位置测量的束流波形

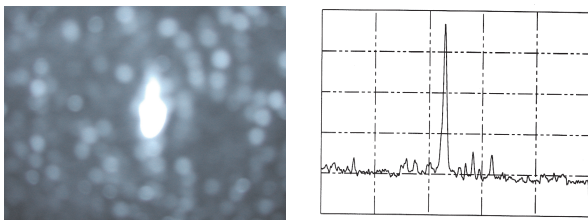


图4 利用条纹相机测得的束流微脉冲宽度

2.4 摇摆器

摇摆器的作用是使电子束产生横向的速度分量, 从而实现与光场的耦合, 产生能量交换. 在自由电子激光研究中对摇摆器的峰值磁场强度, 峰峰值误差,

好场区范围, 单电子模拟中心轨迹偏移等有着严格要求, 为了满足实验要求, 2003年开始研制新的摇摆器. 摇摆器的安装依据混合型摇摆器的原理进行, 为了获得更高的峰值磁场并有效降低高次谐波分量, 周期长度由30mm改为32mm, 磁块与磁极宽度的比值由9:6改为11:5. 参数调试先依据电子在摇摆器中所受的洛仑兹力计算电子的运动轨迹进行调试, 轨迹调后再调峰峰值误差, 在保证轨迹和峰峰值误差的前提下对好场区进行调试. 最后得到摇摆器峰值磁场达到0.32T, 峰峰值误差小于0.1%, 单电子轨迹偏移小于0.1mm.

2.5 光腔

波导光腔的损耗主要为传输损耗和耦合损耗, 理论分析和模拟计算表明, 对于远红外波段的自由电子激光, 采用封闭的波导光腔可以有效降低传输损耗. 改进后, 损耗降低到原来损耗的1/3, 小于10%, 光腔损耗降低后, 降低了对电子束品质的要求. 激光谐振腔参数为: 腔长为2536mm, 腔镜曲率半径为1768mm, 采用孔耦合输出, 耦合孔直径为1mm.

对束线、光腔、波导、摇摆器进行了准直, 束线上的磁学元件装配精度为 ± 0.1 mm, 电源稳定性好于万分之五.

3 主要实验结果

经过改造后使该实验系统的性能和稳定性得到了大幅度提高, 在此基础上自由电子激光振荡实验. 通过观测自发辐射进行实验调试. 将上游镜片对准形成光腔, 但其长度还未达到共振条件, 此时观测到信号约增强3倍, 这是由于自发辐射贮存在光腔内的缘故. 调节腔长到最佳值时, 输出信号远大于储存自发辐射, 如图5所示. 利用远红外光栅谱仪测量受激辐射波长

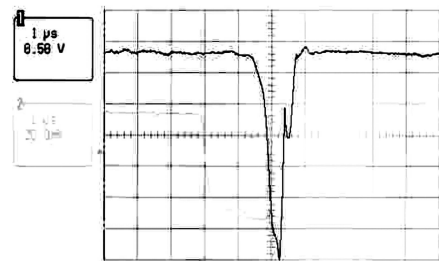


图5 FEL振荡输出信号

和受激辐射谱, 如图6所示, 中心波长为 $115\mu\text{m}$, 谱宽为1%, 而自发辐射的谱宽约为6%. 这些结果与FEL理论预期是一致的, 说明所观测到的是FEL振荡信号.

但由于光腔损耗较大, 加上微波电子枪反轰的影响使得电子束脉冲内能散较大, 因而系统净增益很小, 远小于理论设计值($\sim 26\%$), 这是 FEL 没有达到饱和的主要原因.

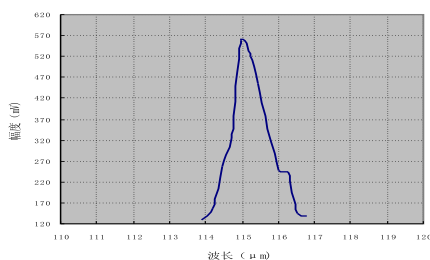


图 6 FEL 振荡输出谱

4 结语

中国工程物理研究院 $100\mu\text{m}$ FIR-FEL 实验装置以物理研究为目的, 其首次出光为开展进一步的研究打下了良好的基础. 下一步, 将进行结果优化和稳定性改进, 并按照边建设边应用的原则, 将实验装置做成一个研究和应用平台, 为各相关学科研究和 THz 辐射在其他高新技术领域的应用奠定理论和实验基础, 使我国的太赫兹光源技术及应用研究在国际上这一新兴领域占有一席之地.

参考文献(References)

1 HU Ke-Song et al. High Power Laser and Particle Beams,

2002, **13**(1): 85 (in Chinese)

(胡克松等. 强激光与粒子束, 2002, **13**(1): 85)

Experiment Study on the CAEP FIR-FEL

JIN Xiao¹ LI Ming^{1;1)} XU Zhou¹ LI Wei-Hua¹ YANG Xing-Fan¹ CHEN Tian-Cai¹ XU Yong¹
 YU Hong¹ WANG Yuan¹ SHEN Xu-Ming¹ CHENG Yun¹ XIE Min¹ LU He-Ping¹
 DENG De-Rong¹ LIU Jie¹ CUI Li¹ YANG Mao-Rong¹ LI Zheng-Hong¹
 HU Ke-Song¹ DU Xing-Shao¹ YU Quan-Tu¹ HUANG Sun-Ren¹
 DENG Ren-Pei¹ LIU Xi-San¹ SHU Xiao-Jian² DING Wu²
 DOU Yu-Huan² WU Zhong-Fa²

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

2 (Institute of Applied Physics and Calculated Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract First lasing of the CAEP FIR-FEL at the center wavelength of 115 microns was observed in March 2005. The facility is based on RF linac, which consists of an RF-gun, an alpha magnet, an L-band SW accelerator, a beam transport line, a wiggler, an optical cavity and a measurement system. In this paper, the main parts of the facility and the main experimental results are introduced.

Key words free electron laser(FEL), RF gun, RF linac, wiggler

1) E-mail: liming@caep.ac.cn