

文章编号: 1001-4322(2007)11-1901-04

100 μm FEL 受激辐射光学诊断*

徐 勇, 黎 明, 金 晓, 杨兴繁, 黎维华, 陈天才

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 给出了基于 L 波段射频直线加速器运行的 100 μm FEL 自发辐射与受激辐射实验的光学诊断结果, 简要介绍了 100 μm FEL 的光腔准直系统。针对 100 μm FEL 实验研究的基本要求, 对辐射信号的波长光谱、功率能量和脉冲结构等主要参数进行了测量诊断。利用远红外光栅谱仪和锗掺镓光电探测器组成的测量系统, 对辐射光的宏脉冲信号进行分光, 测量得到了辐射光信号的波长光谱和宏脉冲波形, 测得受激辐射中心波长约为 115 μm ; 利用标定过的锗掺镓探测器对辐射信号的功率能量进行了测量, 测得单个宏脉冲的功率约为 mW 量级, 能量为 nJ 量级。

关键词: 自由电子激光; 射频直线加速器; 受激辐射; 光学诊断; 准直

中图分类号: TN248.6 **文献标识码:** A

在 100 μm 自由电子激光器受激振荡实验研究中, 对 FEL 光学参数的测量诊断及光腔准直关系重大, 因为它直接对 FEL 的实验结果进行了全面有效的验证, 给出了实验成功与否的证据, 实时反映了 FEL 装置的运行状态, 为调整加速器的运行状态及优化整个实验系统提供了重要依据。本文主要对辐射信号的波长光谱、功率能量和脉冲结构这几个主要参数进行测量诊断^[1-4]。

1 光学诊断实验

1.1 波长光谱测量

100 μm FEL 自发辐射与受激辐射实验利用远红外光栅谱仪和锗掺镓光电探测器系统进行光学诊断, 电子束宏脉冲产生的辐射光信号经过光栅谱仪分光, 可测得光谱信号, 系统光路如图 1 所示。

在 100 μm FEL 的激光参数诊断中, 波长光谱的测量是一个很重要的诊断项目。实验中由光谱诊断系统提供的辐射信号中心波长、谱线半高宽等数据的分析结果, 是对加速器输出的电子束能量、能散度、发射度、运输线聚焦性能、摇摆器磁场的均匀性及电子束与摇摆器磁轴、光腔光轴三轴合一等参数的综合实验检验, 也是实验中束流参数优化的依据。

目前, 中国工程物理研究院应用电子学研究所 L 波段射频直线加速器上进行的 100 μm FEL 出光实验, 已成功地观测到了自发辐射和受激辐射信号, 实验中用于辐射信号探测的系统是工作在液氮低温下具有很高灵敏度的锗掺镓光电探测器, 与之配套用来进行信号光谱扫描、数据采集和处理的是一套远红外光栅谱仪系统。整个光学诊断系统采用微机遥控光谱扫描、探测信号实时监控, 并可实现数据同步采集实时处理, 信号诊断系统框图如图 2 所示。

锗掺镓光电探测器的响应时间为 ns 级, 响应率可达 2.5 kV/W, 工作温度为液氮 (4.2 K), 在此状态下可维持工作时间为 10 d 左右, 它带有前置放大器, 放大倍数分为 100 和 1 000 两档, 工作波段为 40 ~ 140 μm , 该探测器在 100 μm 左右的响应率最高, 随入射光波长的增加响应率很快下降, 到波长 140 μm 时仅为峰值响应的 3%。

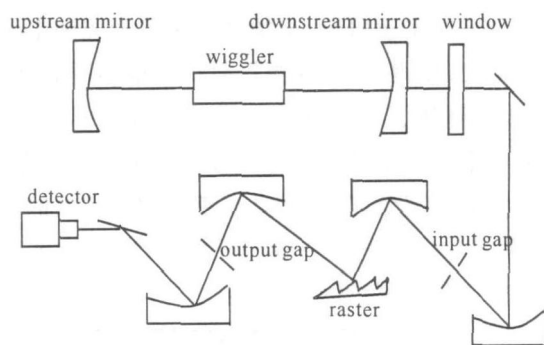


Fig. 1 Light path of diagnostic system

图 1 诊断系统光路

* 收稿日期: 2007-04-11; 修订日期: 2007-09-17
基金项目: 国家 863 计划项目资助课题
作者简介: 徐 勇 (1964 -), 男, 主要从事自由电子激光参数测量研究; xydlr@sina.com。

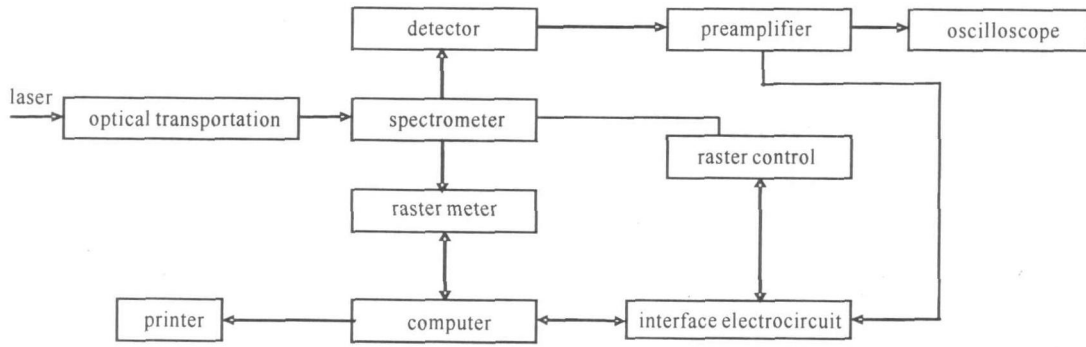


Fig. 2 Block diagram of diagnostic system

图 2 诊断系统框图

影响光谱测量精度的主要因素为束流的稳定性及远红外光栅谱仪的测量精度,光栅谱仪的测量精度主要包括光栅自身的分辨率、出入口狭缝的影响、数据的采样率等。光栅的分辨率为

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN \tag{1}$$

式中: λ 为波长; $\Delta\lambda$ 为最小波长间隔; m 为衍射级数; N 为总刻痕数。目前我们使用的光栅闪耀波长为 $112.5 \mu\text{m}$,光栅常数为 127.026 ,刻痕密度为 $8/\text{mm}$,有效刻痕面积为 $64 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$,则总刻痕数为 512 个,在波长 $\lambda = 100 \mu\text{m}$ 附近能分辨的最小波长间隔 $\Delta\lambda = 0.2 \mu\text{m}$,综合考虑其它原因,整个光谱系统的波长分辨率为 $1/200$,即波长为 $100 \mu\text{m}$ 时测量波长的精度为 $0.5 \mu\text{m}$ 。

实验中,需要使用远红外光谱诊断系统实时进行光谱测量,我们对每一设定波长点宏脉冲波形寻找峰值,利用每一波长点峰值数据绘出光谱分布曲线,得到了自发辐射谱,如图 3 所示。从图中可看出自发辐射谱宽较宽,约为 $6 \mu\text{m}$ 宽。经 FEL 理论推算^[2], $100 \mu\text{m}$ FEL 理想的自发辐射基波谱宽(FWHM)约为 2% ,但由于电子束的能散、摇摆器周期或磁场强度的误差以及探测器光学收集系统光锥接收辐射产生的影响,使得谱线会有一些的展宽,综合以上因素,实际测得的 $100 \mu\text{m}$ FEL 系统的自发辐射谱宽(FWHM)约为 6% 。

在受激辐射实验阶段,必须仔细调节光腔和电子束参数,腔镜的位移、偏转和腔长必须精细调节。由于电子束抖动较大,使得 FEL 受激辐射现象很不明显,经认真调节,最后观察到了受激辐射现象,得到了约 40 倍的放大信号,并测到了受激辐射光谱,如图 4 所示。由图 4 可见其中心波长约为 $115 \mu\text{m}$,谱线宽度明显小于自发辐射谱。由于电子束流的不稳定性及测量系统误差会对测量结果产生一定的影响,测量出的谱宽是电子束宏脉冲序列叠加宏观效应,单个电子束宏脉冲产生的光谱宽度应小于测量结果。图 3 自发辐射的中心波长与图 4 受激辐射的中心波长不一致,是因为两次开机状态下加速器电子束能量有差异,自发辐射与受激辐射是在两次开机状态下分别测量的。

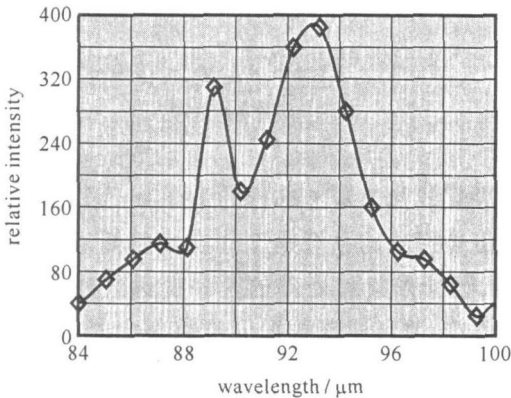


Fig. 3 Spontaneous emission spectrum of experiment

图 3 自发辐射实验光谱

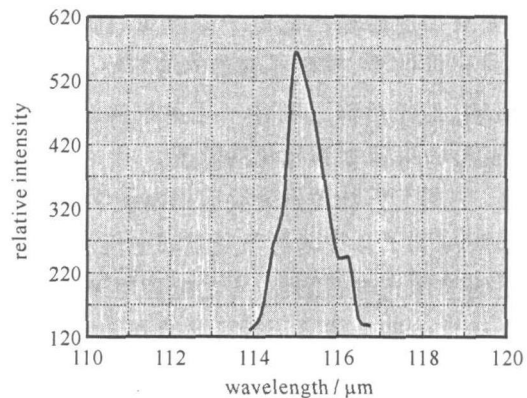


Fig. 4 Stimulated emission spectrum of experiment

图 4 受激辐射实验光谱

1.2 功率能量测量

对于激光脉冲功率和能量的测量,各种功率计、能量计、量热计、低温测辐射热计是国内外实验室常用的仪器设备,但由于目前 $100 \mu\text{m}$ FEL 的辐射能量较小,我们使用经红外光源标定过的锗掺镓探测器直接测量辐射功率和能量,该探测器响应率为 2.5 kV/W (未加前置放大),测得 $100 \mu\text{m}$ FEL 单个宏脉冲的功率约为 mW 量级,能量为 nJ 量级。

1.3 脉冲结构测量

由于 100 μm FEL 是基于 L 波段射频直线加速器提供的电子束受激辐射的, 因此辐射信号的光脉冲具有与电子束类似的时间结构, 如图 5 所示。对于辐射光信号的宏脉冲波形测量, 可以使用示波器直接对锗掺镓探测器的输出进行测量。由于该探测器的响应时间为 ns 级, 因此对于 ps 级的微脉冲结构无法直接测量, 我们只能测到一个宏脉冲的外包络波形, 如图 6 所示。

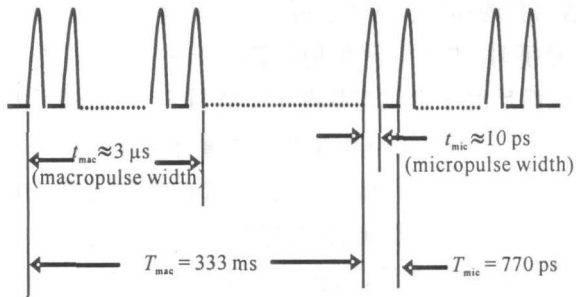


Fig. 5 Time distribution of electron-beam bunch

图 5 电子束团脉冲结构

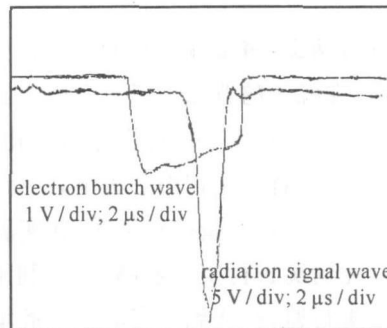
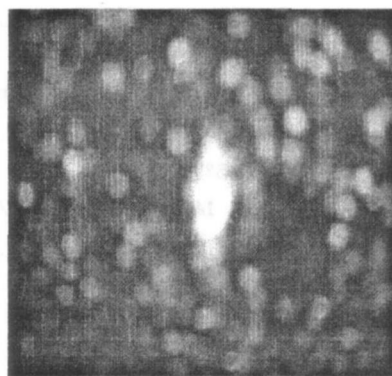


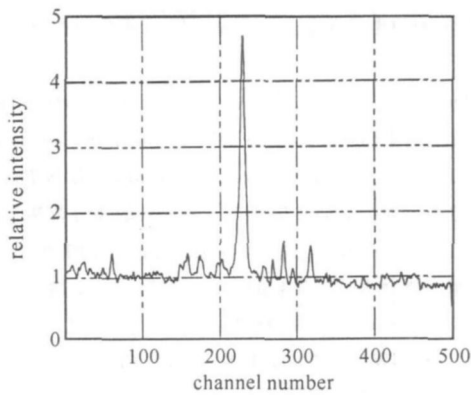
Fig. 6 Macropulse waveshape of 100 μm FEL

图 6 100 μm FEL 的宏脉冲波形

由于辐射光信号微脉冲只有几十 ps 的脉宽, 目前的探测器还没有这样短的响应时间。皮秒扫描相机是超短脉冲测量的有力工具, 但目前的皮秒扫描相机只能工作在可见光、紫外、X 波段以及近红外波段, 无法直接测量 100 μm 的远红外信号, 考虑到微脉冲光信号与电子束微脉冲有着相同的时间结构, 我们利用切伦柯夫辐射的瞬时发光机理, 先把相对论电子束打在熔石英靶片上转化为可见光, 再用皮秒扫描相机加以测量, 间接得到 100 μm FEL 的微脉冲结构测量, 经实验证明, 这个方法行之有效, 已成功地观察到了微脉冲信号^[5-7]。用这个方法测到的一个微脉冲光斑和波形, 如图 7 所示, 微脉冲波形的横坐标为通道数, 纵坐标为相对光强, 实测微脉冲宽度约为 25 ps。



(a) facula of micropulse



(b) waveshape of micropulse

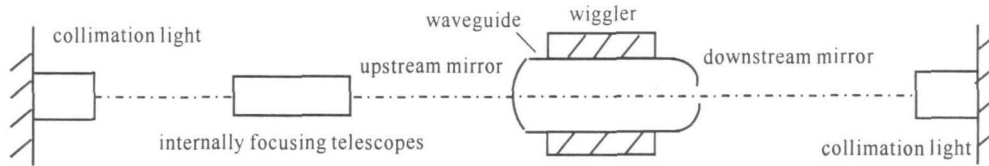
Fig. 7 Facula and waveshape of micropulse

图 7 微脉冲光斑及波形

2 光腔准直

在自由电子激光实验研究中, 光学谐振腔是激光器的重要组成部分, 光腔主要是为激光提供光学正反馈和限制激光只在几个模式或一个模式上振荡。由于自由电子激光的特殊性, 还对电子束、摇摆器和光腔的三轴共轴提出了较高的要求, 若同轴误差大, 则增益显著下降, 以至不能谐振放大输出。从 100 μm FEL 实验的过程来看, 光腔与电子束、摇摆器的同轴性好坏直接影响着自由电子激光是否能够受激振荡。

在 100 μm FEL 实验研究中, 为了保证电子束、摇摆器和光腔的三轴共轴, 本文用 He-Ne 激光束作为基准光束, 调节其它系统都与其准直。以一束与摇摆器轴线同轴的 He-Ne 光作为参考束, 然后调节光腔与 He-Ne 光同轴。腔镜置于真空腔镜室内, 可通过微机在控制室内对腔镜进行远程精密 5 维调节, 利用内调望远镜对腔镜进行准直, 利用放置在摇摆器两端可伸缩的切伦柯夫靶片监测束流截面的位置, 以便调节电子束与光腔、摇摆器同轴, 即实现了三轴共轴。光腔准直示意图如图 8 所示。

Fig. 8 Schematic diagram of 100 μm FEL optic-cavity collimation图8 100 μm FEL 光腔准直示意图

腔镜共分两面,将带输出孔的那面称为下游镜,不带输出孔的那面称为上游镜,为了精确地准直光腔,在安装上游镜时,在镜子的背面镀以十字同心圆环标记。安装腔镜时,先将内调焦望远镜与 He-Ne 准直光调节同轴,然后安装下游镜,中心以腔镜输出小孔定位,平行度以镜面反射十字线与基准十字线重合为准,最后安装上游镜,中心以腔镜背面标记中心为准,平行度调节以镜子背面反射十字线与基准十字线重合为准^[8]。

从 100 μm FEL 实验过程来看,在实验中要根据情况对上游腔镜进行微调,这就要求在控制室内必须对腔镜的位置变化情况进行实时监测,我们利用摄像机观察内调焦望远镜的目镜,使腔镜的位置变化情况可在控制室大屏幕上进行监视,达到了实时监测腔镜位置的目的。从实验结果来看,这套光腔准直系统精度较高,上游腔镜反射十字线与基准十字线重合的位置,也基本就是辐射信号输出最强的位置。

3 结论

本文介绍了 100 μm FEL 自发辐射与受激辐射实验的光学诊断和光腔准直情况,测得受激辐射中心波长约为 115 μm ;利用标定过的锗掺镓探测器对辐射信号的功率能量进行了测量,测得单个宏脉冲的功率约为 mW 量级,能量为 nJ 量级。从实验检验来看,建立的这套测量系统基本能够满足实验需要。

参考文献:

- [1] 苏憬,庄杰佳,毛成生,等. BFEL 自发辐射和受激辐射的光学诊断[J]. 强激光与粒子束, 1995, 7(1):10-15. (Su J, Zhuang J J, Mao C S, et al. Optical diagnostics of Beijing free electron laser spontaneous emission and first lasing. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, 7(1):10-15)
- [2] 惠钟锡,杨震华. 自由电子激光[M]. 北京:国防工业出版社,1995. (Hui Z X, Yang Z H. Free electron laser. Beijing: National Defense Industry Press, 1995)
- [3] Dattoli G, Renieri A, Torre A. Lectures on the free electron laser theory related topics[M]. London: World Scientific Publishing, 1993.
- [4] Okuda S, Ishida S, Isoyama G, et al. Measurement of characteristics of the infrared free electron laser with the L-band linear accelerator at Osaka University[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1996, 375(3):329-331.
- [5] 曹忠. 北京正负电子对撞机同步辐射光脉冲形状的高分辨测量[J]. 高能物理与核物理, 1990, 14(1):677-683. (Cao Z. High resolution measurement of synchrotron radiation photon pulse of BEPC. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1990, 14(1):677-683)
- [6] 牛憨笨. 变象管诊断技术[J]. 高速摄影与光子学, 1989, 18:196-205. (Niu H B. Streak image tube diagnoses technology. *High Speed Photography and Photonics*, 1989, 18:196-205)
- [7] Sheffield R L, Stein W E, Warren R W, et al. Electron-beam diagnostics and results for the Los Alamos free-electron laser[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1985, 21:895-903.
- [8] 雷仕湛. 气体激光[M]. 上海:上海人民出版社, 1975. (Lei S Z. Gas laser. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1975)

Optical diagnosis for 100 μm FEL stimulated emission

XU Yong, LI Ming, JIN Xiao, YANG Xingfan, LI Wei-hua, CHEN Tian-cai
(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1014, Mianyang 621900, China)

Abstract: The paper describes optical diagnosis result of 100 μm FEL spontaneous radiation and stimulated radiation experiment based on RF-linac running and briefly introduces 100 μm FEL optic-resonator collimation system. Wavelength spectrum, power energy and pulse structure of radiation signal are measured and diagnosed for requirements of 100 μm FEL experiment research. Ge:Ga photoelectricity detector and FIR-spectrometer measurement system can acquire wavelength spectrum, macro pulse wave of radiation light signal and 115 μm central wavelength of stimulated radiation through analyzing macro pulse of radiation light. Measurement of power and energy of radiation signal with marked Ge:Ga detector acquires mW level power and nJ level energy of marco pulse.

Key words: FEL; RF-linac; Stimulated emission; Optical diagnostics; Collimation