

北京自由电子激光装置的红外 激光振荡实验

谢家麟 庄杰佳 黄永章 李永贵 林绍波 毛成生 应润杰
钟元元 张令翊 吴钢 张玉珍 李立华

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

傅恩生

(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

刘慰仁

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1993年9月3日收到

摘 要

本文阐述了北京自由电子激光装置所采取的优化电子束质量等措施以满足出光条件,和利用这台装置相继观察到了自发辐射、储存自发辐射和受激辐射的情况。测定的受激辐射讯号的强度、光谱、失谐曲线和波长移动均证明其为红外自由电子激光振荡讯号。

关键词 红外自由电子激光,微波电子枪,摇摆器,光学谐振腔,射频电子直线加速器。

1 引 言

北京自由电子激光装置的设计和一般情况可参看以前发表的文章^[1]。图1是北京自由电子激光装置的总体图。系统包括:由热阴极微波电子枪、 α 磁铁和输运磁铁构成的注入器,等梯度加速管,90°能量分析器,1.5m长、50个周期的NdFeB摇摆器和2.519m长由ZnSe端镜组成的准共心光腔。射频功率源是一台30MW的速调管,调制器脉冲长达9 μ s。测得的电子束和摇摆器的参数如下:宏脉冲能散度为 $\pm 0.35\%$;归一化发射度为50 π mm·mrad;宏脉冲电流170mA;微脉冲宽度约为4ps;Halbach型摇摆器在间隙为13.5mm时摇摆器参数 $K = 1.0$,电子束轨道偏离小于 $\pm 50\mu$ m。这些参数基本符合设计要求^[1],并于1992年8月观测到自发辐射讯号。此后根据自发辐射讯号反映的装置性能,对稳定性,加速器、输运线等作进一步改善。于1993年5月观测到红外FEL的振荡讯号。由于增益较低尚未达到饱和。

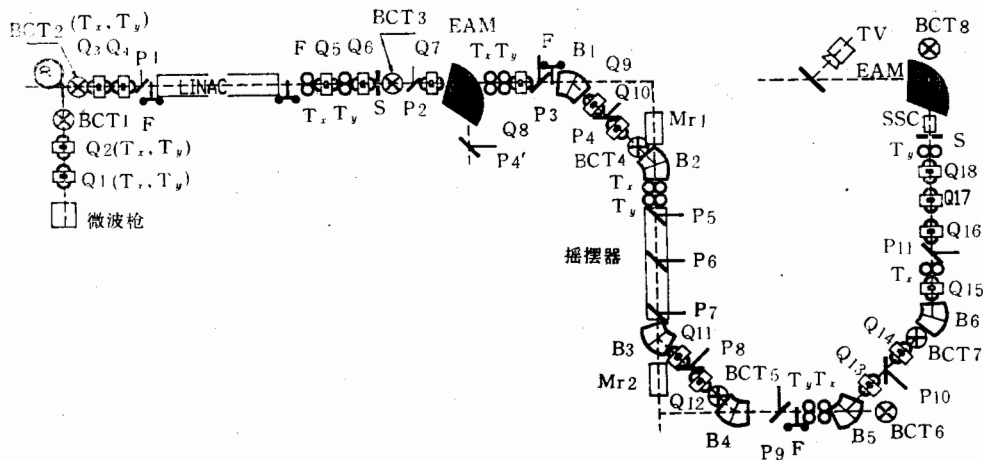


图 1 北京自由电子激光装置总体图

2 加速器运行的优化

在加速器运行中由热阴极微波枪, α 磁铁和输运磁铁组成的注入器起到关键作用. 它

影响到电子束微脉冲的峰值电流、发射度和能散度. 由 *Parmela* 程序计算^[2]知, 为了在加速管入口处束团宽度为 4ps, 电子束在微波枪出口处的能量应是 1.1MeV. 图 2 是在 α 磁铁前后用束流变压器测得的电流分布. 从图 2(a) 可以看到由于反轰引起阴极温度升高, 使宏脉冲束流随时间增加,

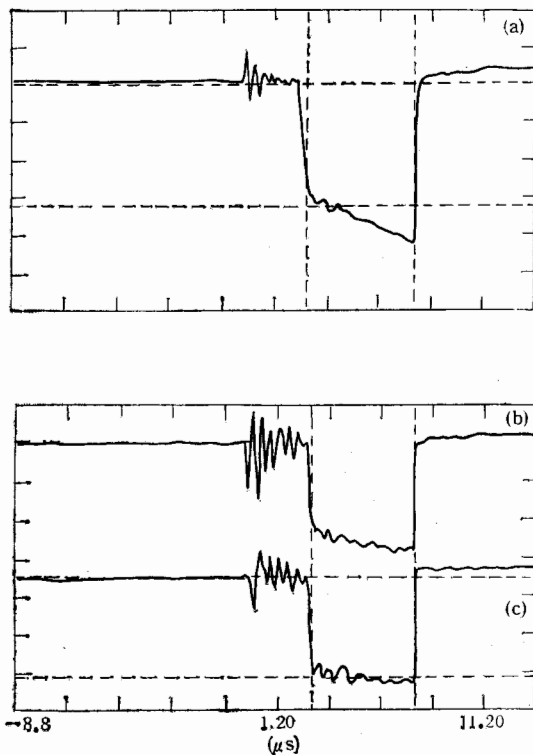


图 2 不同地点的 BCT 波形
(a) 微波枪出口 (BCT1); (b) α 磁铁出口 (BCT2); (c) 加速管出口 (BCT3).

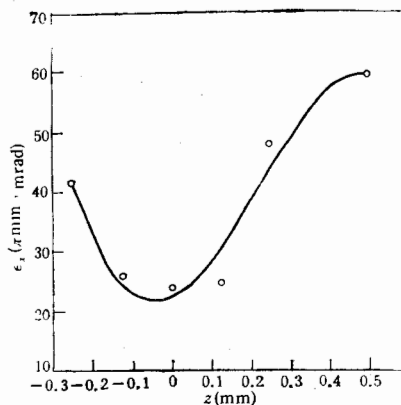


图 3 电子束发射度和阴极在微波枪的腔内位置的关系

但从图 2(b,c)看到在经过 α 磁铁和加速管后,宏脉冲束流平顶“提升”现象逐渐平缓。其动量散度约为 10%。

阴极在微波电子枪的腔内的位置与电子束的初始发射度有密切的关系。这是因为阴极表面附近的场分布对于其位置是十分敏感的,由于刚离开阴极表面的电子纵向速度很低,因此需要一个合适的横向场来抵消空间电荷力。图 3 画出了在典型工作条件下束流发射度与阴极位置的关系。

图 4 说明了出加速管的束流能量和能散度与注入相位的关系。可以看到相应于最小能散度的相位区域是很窄的,且与极大能量增益的相位不一致。能散度是用能量分析磁铁测量的,它表示的是多个宏脉

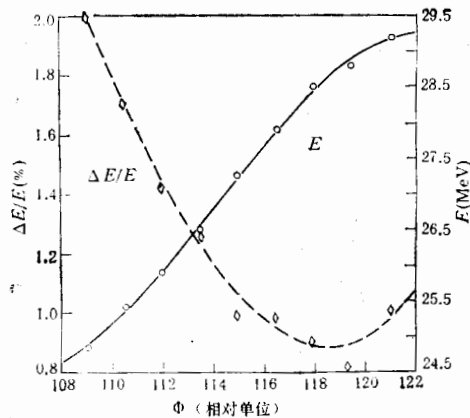


图 4 出加速管电子束的能量和能散度与注入相位的关系

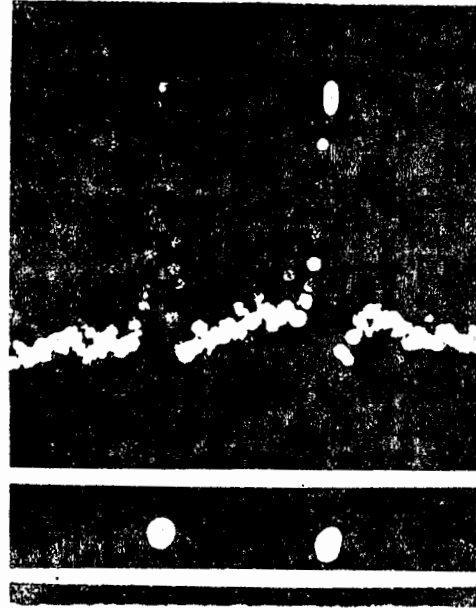


图 5 束团宽度的条纹相机照片

冲累加的能散度,因此对于单个宏脉冲的能散度应是更小。

为了使得加速后束流的宏脉冲能散度保持在设计值之内,必须使调制器脉冲的平顶十分平坦。通过改变 PEN 的电感使得调制器电压波纹达到极小。为了进一步减小相位或振幅的变化,正在做一个新的脉冲发生器,用它产生一系列可调振幅的宽度为 $0.1 \mu s$ 的电压脉冲,来控制连接在速调管线路中的电子相移器或衰减器。从而使射频场在宏脉冲内的相位和振幅的波动减小。

微脉冲的宽度用条纹相机测量,图 5 是一个典型的测量结果。图中有两个脉冲,一个直接来自 Cerenkov 光,另一个是在光路中插入一块 38mm 厚的光学玻璃片,使脉冲延迟了 63ps。于是可以读出图上每道相当于多少 ps 的标度常数,进而知道束团宽度的 FWHM 值是 6ps。经过光学系统的有限斑点大小等一系列的修正后,束团宽度为 3.8ps,相应的微脉冲峰值电流为 13.8A。考虑到体系的许多运转参数都可能影响束团的宽度,这个结果与理论预言如此一致是意想不到的。

3 首次出光的实现

自发辐射是一个很好的诊断工具,它的谱反映了电子束、摇摆器、电子束输运线和准直等的性能,它为改进系统提供了实验依据。

准共心的光腔由两片具有多层介质增反涂层的 ZnSe 镜片组成。上方和下方镜片的曲率半径是 1.74m 和 1.7m, 反射率分别是 99.5% 和 99%(作输出镜)。安装镜片的架子置于端镜真空盒中,可以进行五维大范围高精度的遥控调节,角度分辨率为 0.5", 长度精度为 0.1 μ m。瑞利长度为 0.765m,基模的腰位于中间,半径为 1.6mm。考虑到摇摆器中的真空管道会挡掉一部分光束,Fresnel 数约为 2,对于 TEM₀₀ 模衍射损失小于 0.35%。输出的波长为 10 μ m 左右的光用高灵敏度的 HgCdTe 探测器进行测量。以后将用热电阵列作瞬时谱的测量。准直采用与摇摆器磁轴共线的 He-Ne 激光作参考光,利用摇摆器区内的荧光靶使电子束与靶上光斑重合的方法进行。此外还采用扫描共振方法,用 CO₂ 激光束作准直质量的监测。

电子束注入光腔以后首先通过偏转上方镜片来测量自发辐射的讯号强度。然后将上方镜片对准形成光腔,但其长度还未达共振条件,此时观察到的讯号约增强 20 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,出现输出讯号远大于储存自发辐射讯号,平均输出功率达百毫瓦量级,比自发辐射高三个量级以上,表明系统产生了受激辐射。图 6 是首次出光的信号。由脉冲上升的陡度可以估计得小讯号增益约为 6%。一台红外谱仪用来测量它的谱,但它是许多宏脉冲的累计结果。自发辐射谱的半高全宽与峰值之比是 4%,受激辐射是 1%,谱峰的位置后者较前者往长波方向移动 1.6%。图 7 是失谐曲线。这些结果与 FEL 理论预期结果是一致的,都说明所观测到的讯号确是 FEL 振荡讯号。

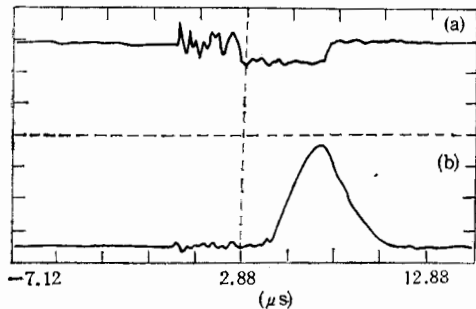


图 6
(a) 束电流; (b) 激光信号。

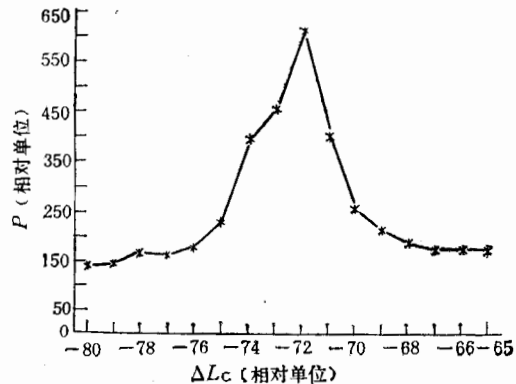


图 7 输出功率与光腔失谐的关系

4 结 论

概述了北京自由电子激光装置的当前情况和观测到的红外波段的 FEL 振荡讯号。

估计小讯号增益约为6%,所以还未达到饱和。下一步的工作是改善系统的稳定性,使用一个性能更好的摇摆器,对宏脉冲内射频源的振幅和相位变化给以补偿等,以实现稳定的饱和振荡和宽调谐范围的工作。

参 考 文 献

- [1] J. Xie and J. Zhuang et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A272**(1988) 40; **A296**(1990) 244; **A331**(1993) 204.
[2] 宋煥,亚洲第一届自由电子激光会议,中国北京(1993).

The Infrared Laser Oscillation Experiment on BFEL

Xie Jialin Zhuang Jiejia Huang Yongzhang Li Yonggui Lin Shaobo
Mao Chengsheng Ying Runjie Zhong Yuanyuan Zhang Lingyi
Wu Gang Zhang Yuzhen Li Lihua

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

Fu Ensheng

(*Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

Liu Weiren

(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*)

Received on September 3, 1993

Abstract

Beijing FEL is a rf linac based facility designed to work in the IR spectrum rang. In this paper, system layout is first briefly reviewed. Then various measurements adopted to optimize the electron beam quality for the lasing requirement are described. Spontaneous emission, stored spontaneous emission and lasing were observed in sequence. Optical spectrum, detuning curve and wave length shift were measured to confirm the first lasing.

Key words infrared FEL, microwave electron gun, wiggler, rf linac, optical resonator