

## 快报

# 北京自由电子激光最近进展—— 实现饱和振荡\*

谢家麟 庄杰佳 黄永章 张令翊 林绍波 赵春农 李立华 吴 钢 王 钢  
李承泽 傅恩生<sup>1</sup> 苏 憬 钟元元 王言山 李永贵 应润杰 杨学平 李有猛  
韩 斌 吴庆武 张玉珍 潘卫民 王建伟 张黎文 郭康柱 畅祥云 李亚南  
戴立盛 徐金强 陆辉华 汪伯嗣 任廉重 田瑞生

(中国科学院高能物理研究所应用部 北京 100080)

<sup>1</sup>(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

1994年3月21日收到

## 摘 要

北京自由电子激光 (BFEL) 装置于 1993 年底在  $10.68\mu\text{m}$  处实现了饱和振荡。输出激光能量为  $3\text{mJ}$ , 饱和平顶宽度  $2\mu\text{s}$ 。对应饱和振荡平均功率为  $210\text{kW}$  (宏脉冲), 峰值功率约为  $20\text{MW}$ , 比自发辐射高 8 个量级, 单程小讯号净增益为  $24\%$ , 转换效率为  $0.45\%$ , 与理论预期结果相符。光束质量接近衍射极限。目前装置可工作于  $9\text{--}11\mu\text{m}$ 。

**关键词** 红外 FEL, 饱和振荡, 微波电子枪, 扭摆磁铁, 光学谐振腔。

## 1 引 言

北京自由电子激光装置的研制工作始于 1986 年。它是一台用  $30\text{MeV}$  射频电子直线加速器驱动的红外自由电子激光振荡器<sup>[1]</sup>, 采用热阴极微波电子枪作为加速器的高亮度注入器。于 1992 年 7 月观测到自发辐射, 1993 年 5 月实现了激光振荡<sup>[2]</sup>, 但由于增益太小(净增益约  $6\%$ ), 没有达到饱和。之后, 为了提高增益, 围绕提高扭摆磁铁作用区的电荷密度和宏脉冲内电子束品质的一致性等问题进行了大量的工作, 终于在 1993 年年底实现了饱和振荡。本文主要介绍饱和振荡实验及其主要结果。

## 2 装置概述

BFEL 使用射频电子直线加速器驱动, 其加速结构是采用一节  $3.05\text{m}$  长的等梯度加

\* 国家高技术 863 研究经费资助。

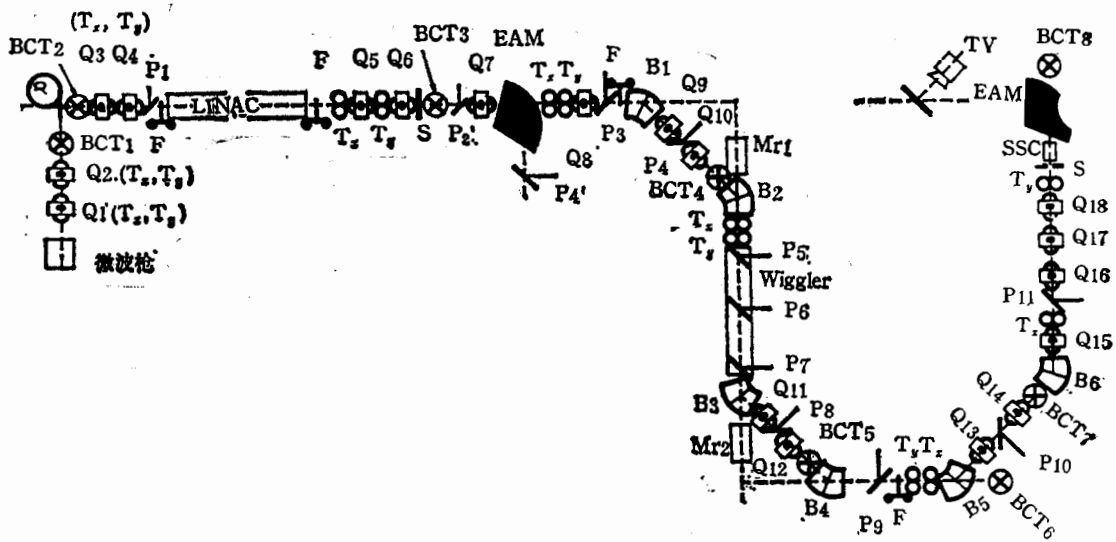


图1 BFEL 装置示意图

表1 BFEL 主要性能参数

电子束	能量 20—30MeV	宏脉冲流强 150—200mA
	宏脉冲宽度 $\sim 4\mu s$	微脉冲宽度 3—4ps
	能散度 $< \pm 0.4\%$	归一化发射度 $30\pi \text{ mm mrad}$
扭摆磁铁 (II)	周期数 50	周期长度 30mm
	间隙 115mm	K值 1.17
	电子轨迹偏离 $\leq 50\mu m$	谐波含量 1%
光学谐振腔	腔长 2.519cm	
	上下游端镜曲率半径 1.74 m, 1.7m	
	上下游端镜反射率 99.5%, 99%	
	瑞利长度 0.765m	
激光束	工作波长 9—11 $\mu m$	
	输出能量(宏脉冲) 10mJ	
	腔内平均功率(宏脉冲) $> 200\text{ kW}$	
	峰值功率(微脉冲) $\geq 20\text{ MW}$	
	单程小讯号增益 32% ( $\lambda = 10.72\mu m$ )	
	饱和功率转换效率 4.8% ( $\lambda = 10.72\mu m$ )	
	激光模式 基模	
	发散角 2mrad	
	谱宽 2—0.5%	

速管,它可将 300mA 的电子束加速到 20—30MeV.微波功率源是一台 HK-1 型 S 波段五腔大功率速调管,最大输出功率为 30MW,工作频率为 2856MHz.速调管调制器的脉冲单顶宽度大于  $6\mu s$ ,脉冲平顶纹波小于 0.5%.注入器由热阴极微波电子枪和  $\alpha$  磁铁

及磁透镜等组成。微波电子枪的基本组成部分是一个微波谐振腔,其底部装有用灯丝加热的  $\text{LaB}_6$  阴极;  $\alpha$  磁铁用以压缩电子束团宽度。热阴极微波电子枪的一个严重问题是由于电子反轰引起阴极温升,造成宏脉冲内电流波形有一个坡度,如果坡度过大会影响激光器的运转。由加速器输出的电子束,经具有消色散、准等时性功能的输运线,注入  $\text{NdFeB}$  线性永磁扭摆磁铁,光学谐振腔采用准共心光腔结构,腔长为 2.519m。瑞利长度为 0.765m。端镜为在  $\text{ZnSe}$  基底上涂有多层  $\text{ZnSe}/\text{ThF}_4$ 。上、下游镜片的曲率半径分别为 1.74m 和 1.7m,反射率为 99.5% 和 99%。下游镜作为激光输出端。二端镜置于真空镜盒中,通过遥控装置可实现五维调节,其坐标调节精度为  $0.5\mu\text{m}$ ,角度分辨达  $0.5''$ 。BFEL 结构示意图如图 1 所示,表 1 列出加速器、扭摆磁铁等的性能参数。

### 3 实验概况

BFEL 在 1993 年 5 月实现激光振荡之后,为提高增益,实现饱和振荡,又对装置进行了一系列改进提高工作。主要围绕提高扭摆磁场作用区电子束电荷密度和改善宏脉冲内电子束品质的一致性进行。采用了 II 型  $\text{NdFeB}$  扭摆磁铁取代已运行两年多的 I 型扭摆磁铁。新的扭摆磁铁具有更好的均匀性,谐波含量小,优化加速器和扭摆磁铁之间的电子束输运线,特别是其中消色散、准等时性段的运行参数,使注入电子束与扭摆磁铁和光腔基模匹配。经作用区荧光靶测定表明,其束斑有大幅度的缩小,腰处的束斑由原来  $2 \times 3\text{mm}^2$  的椭圆缩小为直径 1.3mm 的圆斑。因此电荷密度有四倍多的提高。对新扭摆磁铁进行的自发辐射实验表明:自发辐射谱宽明显变窄,由原来 4.2% 降为 3%;且辐射强度有几倍的提高;谐波含量仅为 1.1%。

为改善宏脉冲内电子束品质的一致性,采用外加横向磁场以抑制微波电子枪的反轰效应(反轰效应是引起脉冲内电子能量、能散度等参数变化的主要根源之一)。使反轰功率下降了 30%,并把注入加速器的宏脉冲宽度由  $4\mu\text{s}$  扩展至  $4.5\mu\text{s}$ 。此外,对光学准直系统的准直精度,光学诊断系统性能亦作了不少改善。

在此基础上,进行了饱和振荡实验。采用  $\text{CO}_2$  激光扫描共振技术,通过遥控调节光腔端镜中的步进马达和压电装置,使光腔光轴与扭摆磁铁的磁轴基本重合。利用输出激光讯号对光腔取向、电子束轨迹进行精细调节,使它们与扭摆磁铁磁轴完全重合。最后通

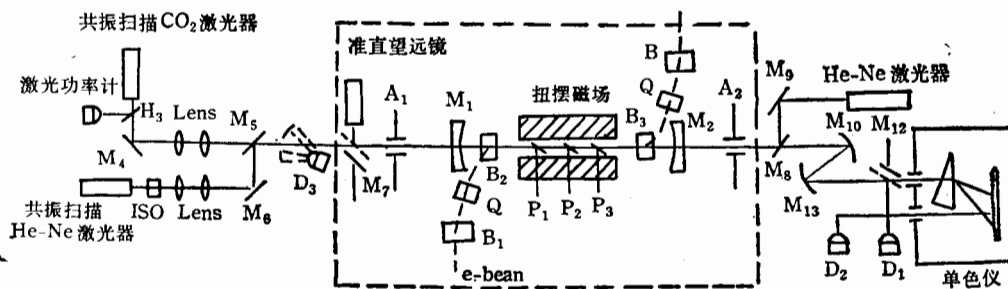


图 2 BFEL 光学诊断装置示意图

过调节腔长使之处于失谐曲线的稳定区,实现了稳定的饱和振荡.由下游端镜输出的激光讯号被引至光学诊断实验室进行测定.测量光路及其主要设备如图2所示.为适应 FEL 宽带运行,测量光路主要采用反射式光路设计,它允许同时测定激光能量、功率、光谱宽度和光强空间分布等参数.

#### 4 主要实验结果

在实现光轴、电子束平均轨迹与扭摆磁铁的磁轴共线下,通过调节腔长,使之处于失谐曲线的稳定区,实现了饱和振荡.

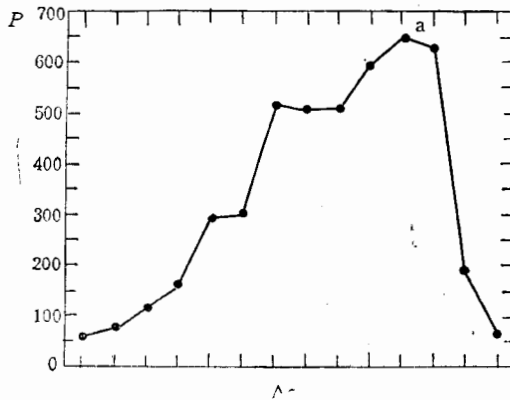


图3 输出激光功率( $P$ )与谐振腔长失谐量( $\Delta z$ )关系(横坐标每格  $2\mu\text{m}$ ,  $\lambda = 10.68\mu\text{m}$ )

图3为工作于  $10.68\mu\text{m}$  下的失谐曲线.失谐范围约为  $20\mu\text{m}$ ,稳定区大约  $6-8\mu\text{m}$ ,在接近谐振腔长的  $a$  处,虽可获得最大功率输出,但其小讯号增益小,起振晚,仍然实现不了饱和振荡,且讯号很不稳定.这是由于 Lethargy 效应在腔长较长时得不到补偿,光脉冲尚不能完全赶上电子束团,重叠因子很小,加之电子束团相位抖动的结果.图4曲线(a)是经衰减6个数量级以上,由 TeCdHg 探测器测得的饱和振荡输出功率讯号波形;图中曲线(b)为注入加速器的电流脉冲波形,其宽度为  $4.5\mu\text{s}$ .

由于微波电子枪与加速管由同一速调管供电,考虑加速管微波场的建立时间,由加速器输出实际注入扭摆磁铁的有效束流宏脉冲宽度约为  $3.7\mu\text{s}$ .由图4可见,光脉冲在光腔内往返近100个来回即达到饱和稳定区.输出激光能量由 RJP-735 能量计测定为  $3\text{mJ}$ .对应腔内饱和振荡平均功率为  $210\text{kW}$  (宏脉冲),峰值功率约为  $20\text{MW}$ ,比自发辐射高8个量级,饱和脉冲平顶的起伏,主要来自束团相位抖动.小讯号增益,由激光脉冲前沿(见图5)小讯号区的上升时间(上升  $e$  倍)计得,单程净增益为  $24\%$ .根据饱和时腔内激光功率损耗(腔耗由脉冲后沿的衰减时间测得)与电子束转换为激光的功率相平衡,得出功率转

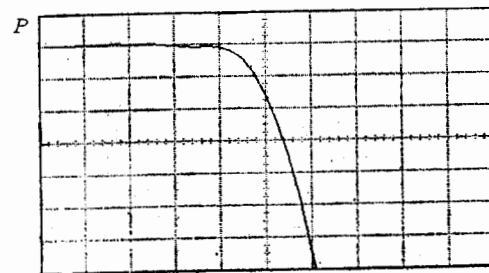


图4 (a) 饱和振荡输出激光讯号(横坐标每格  $1\mu\text{s}$ ); 图5 输出激光讯号前沿(横坐标每格  $200\text{ns}$ )  
(b) 注入加速器电流脉冲讯号

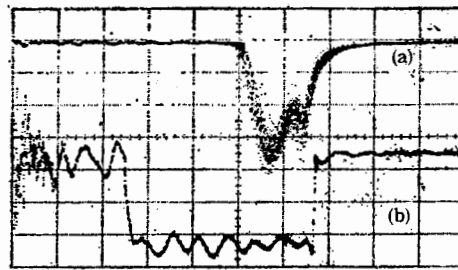


图 6 (a) 累积 31 个输出激光宏脉冲讯号(横坐标每格  $1\mu\text{s}$ );  
(b) 注入加速器电流脉冲讯号

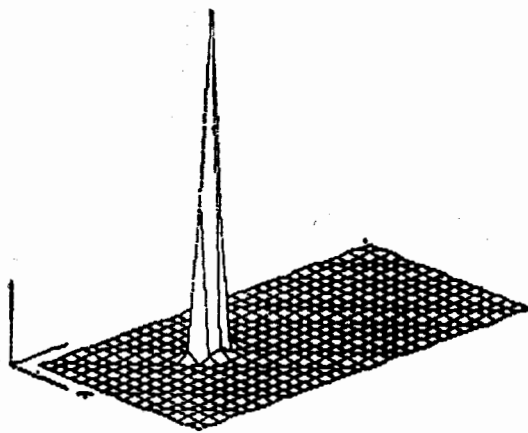


图 7 输出激光强度的空间分布  
(对应激光束发散角为  $2\text{mrad}$ )

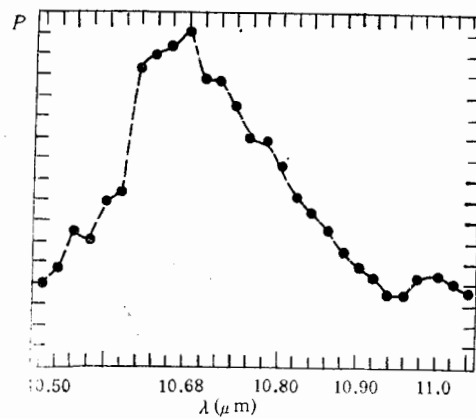


图 8 谱线宽度  
多个宏脉冲的平均结果,它隐含宏脉冲间电子束  
不稳定引起的谱加宽,单脉冲应小得多

换效率为  $4.5\%$ 。图 6 为积累 31 个宏脉冲的讯号,这表明饱和和振荡是比较稳定的。图 7 是利用置于聚焦透镜的焦平面上  $\text{LMP}-32 \times 16$  面阵热释电探测器测得的输出激光的空间分布,它表明饱和(输出波)振荡模式是基模,对应输出激光束发散角为  $2\text{mrad}$ , 接近衍射极限。图 8 是用双光栅单色仪测得多个宏脉冲的谱线宽度为  $\leq 2\%$ 。值得指出 FEL 激光谱线宽度与光腔失谐状态密切相关,在一定范围内与失谐量成反比。实验中观测到最小谱宽为  $0.5\%$ 。

目前 BFEL 已可在光学腔端镜整个反射带宽内实现饱和和振荡即  $9-11\mu\text{m}$ , 其输出平均能量为  $2-10\text{mJ}$ , 饱和脉冲宽度大于  $1\mu\text{s}$ , 最大转换效率为  $5.2\%$ 。

## 5 结 束 语

BFEL 是一台以 FEL 物理研究和应用研究为目标的装置,其成功地实现了饱和和振荡为此打下了良好的开端。下一步工作将以扩展工作波长覆盖区,实现波长连续精细调

变,改善输出激光的单色性和时间结构,提高平均功率为主要目标,以适应应用研究的需要。同时,进一步提高装置的稳定性,特别是改善宏脉冲间电子束品质的一致性(主要是各宏脉冲内,电子束团的相位抖动的不一致性)亦是非常重要的。

BFEL 整个研制过程中得到许多专家和科技工作者的支持和帮助,特别是高能所 FEL 顾问组的专家们,对改善加速的稳定性提了不少建设性意见。在此表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- [1] J. Xie and J. Zhuang et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A272** (1988) 40; **A296**(1990) 244; **A331** (1993) 204.  
 [2] J. Xie and J. Zhuang et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A341**(1994) 34.

## Recent Progress of the Beijing FEL—Realized Saturated Oscillation

Xie Jialin Zhuang Jiejia Huang Yongzhang Zhang Linyi Lin Shaobo  
 Zhao Chunnong Li Lihua Wu Gang Wang Gang Li Chengze  
 Fu Ensheng\* Su Jing Zhong Yuanyuan Wang Yanshang Li Yonggui  
 Ying Runjie Yang Xueping Li Youmeng Han Bing Wu Qingwu  
 Zhang Yuzhen Pan Weimin Wang Jianwei Zhang Liwen  
 Guo Kangzhu Chang Xiangyun Li Yanan Dai Lisheng Xu Jinqiang  
 Lu Huihua Wang Bosi Ren Lianzhong Tian Ruisheng

(Application Division, Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100080)

\*(Institute of Shanghai Optical and mechanical, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Received on March 21, 1994

### Abstract

Beijing FEL facility has been built in IHEP, the saturated oscillation has been obtained at a wavelength of  $10.68\mu\text{m}$ , on Dec. 28, 1993. The average output energy and the pulse width were measured respectively to be 3mJ,  $2\mu\text{s}$ . The corresponding oscillation power is greater than 210kW, peak power is about 20MW, which is about  $10^8$  times higher than that of spontaneous emission. The FWHM of the FEL spectral bandwidth is less than 2%. The small signal net gain is 24% per pass. The extraction efficiency is 0.45%. In the present experimental results, BFEL can be saturated by changing electron energy at the wavelength range from 9— $10\mu\text{m}$ , the maximum average output energy and extraction efficiency are 10mJ, 0.52% respectively, the minimum spectral bandwidth of 0.3% has achieved by shorting cavity length.

**Key words** IR-FEL, saturated oscillation, microwave gun, wiggler, optical cavity.