

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0156-04

# 自由电子激光器电子束性能与出光

杨兴繁, 黎明, 金 晓, 黎维华, 陈天才, 徐 勇

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 介绍了在自由电子激光研究中获得高亮度电子束的研究过程。电子束能量 6.5 MeV, 微脉冲束流强度大于 4 A, 微脉冲束流宽度 25~28 ps, 电子束能散小于 1%, 发射度小于  $20\pi$  mm · mrad。进行了出光实验, 测量到受激辐射信号, 受激辐射中心波长 115  $\mu\text{m}$ , 谱宽 1%。

**关键词** 激光技术; 自由电子激光; 微波电子枪; 射频加速器; 受激辐射

**中图分类号** TN248.6 **文献标识码** A

## Electron Beam Properties and Lasing Experiment of FEL

YANG Xing-fan, LI Ming, JIN Xiao, LI Wei-hua, CHEN Tian-cai, XU Yong

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

**Abstract** The main parts and experimental results of free electron laser (FEL) are introduced. The electron energy is about 6.5 MeV, the micropulse beam current is 4 A, the width is about 25 ps, the energy spread is 1%, the beam emittance is about  $20\pi$  mm · mrad. First lasing of the far infrared FEL (FIR-FEL) at center wavelength of 115  $\mu\text{m}$  is observed, the spectral width is 1%.

**Key words** laser technique; free electron laser; microwave gun; RF Linac; stimulated emission

### 1 引 言

自由电子激光器(FEL)是一种将相对论性电子的动能转换成电磁辐射的装置。FEL 具有波长连续可调、高功率和光束品质好等优点,在军事和基础科学研究中有很好的应用前景。美国、日本以及一些欧洲国家对自由电子激光的研究极为重视,并获得了很好的成果。2004 年 7 月美国的 JLAB 实验室获得了 10 kW 的自由电子激光<sup>[1]</sup>,使人们对自由电子激光的定位进行了重新思考。

中国工程物理研究院 100  $\mu\text{m}$  远红外自由电子激光器(FIR-FEL)研究工作始于 1997 年,实验装置主要由高稳定度微波源系统、高亮度注入器系统、射频电子直线加速器、摇摆器系统、光腔、控制与测试系统等几部分组成。2000 年初步建立了 FEL 实验系统,并观测到自发辐射信号。2001 年完成了自发辐射信号的测试和分析。2002 年开始进行实验装置的改造工作,主要包括提高微波源的稳定性、提高电子束品质、研制高性能摇摆器和降低激光谐振腔损耗等。

### 2 自由电子激光电子束品质分析

自由电子激光的工作物质是相对论性电子束,电子束品质决定了是否能够产生自由电子激光,对它的研究贯穿了自由电子激光研究的始终。电子束品质主要包括电子的能量、束流强度、电子束能散度、电子束发射度和束团长度等。其中电子束能量决定了自由电子激光的波长

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2}(1 + K^2), \quad (1)$$

式中  $\lambda_w$  为波荡器周期长度,  $\gamma$  为电子束的相对论因子,  $K = 0.934B_0(T)\lambda_w$  为波荡器参量,  $B_0$  为磁场峰值强度。由(1)式可以看出,自由电子激光的波长具有可设计性,并可以在较大范围内调节,这是自由电子激光独特的优点。

束流强度决定了激光的小信号增益<sup>[2]</sup>

$$G = 29.4 \frac{I}{I_A} \frac{N_w^2}{\gamma} B \eta_1 \eta_r \eta_\mu, \quad (2)$$

其中  $I$  为束流强度,  $I_A$  为 Alfvén 电流,  $I_A = 17000$  A,  $N_w$  为波荡器周期数,  $B = 4\xi[J_0(\xi) - J_1(\xi)]^2$ ,  $\xi =$

**基金项目:** 国家 863 计划(863-802-6)资助课题。

**作者简介:** 杨兴繁(1969—),男,辽宁海城人,中国工程物理研究院副研究员,博士,主要从事自由电子激光和加速器物理的研究。E-mail: xingfan\_y@hotmail.com

$K^2/2(1+K^2)$ ,  $\eta\eta\eta_m$  为修正因子,包括电子束能散、发射度,光、电子束重叠因子,光脉冲与电子束之间滑移对小信号增益的影响。为了实现高效的束波相互作用,要求电子束的横截面积与电磁波的横截面积相匹配,在激光波长较长时,滑移影响较大,并限制了波荡器的周期数。为了得到较大增益,对电子束能散度和发射度的要求为<sup>[3]</sup>

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} < \frac{1}{2N_w}, \quad \epsilon < \frac{\lambda}{2\pi}. \quad (3)$$

### 3 高亮度注入器研制

电子束品质主要由注入器性能决定,在自由电子激光研究中,高亮度注入器研制是一个富于挑战性的课题。热阴极微波电子枪型注入器是在自由电子激光研究的推动下发展起来的,由于微波电子枪具有很高的加速梯度,能够在很短的距离内将电子加速到相对论速度,有效地抑制了空间电荷效应<sup>[4]</sup>。

注入器设计过程中主要关注微脉冲束流强度、电子能量、电子束能散度、反轰功率和发射度等。为了满足自由电子激光研究的需要,要求峰值流强大于 4 A。由于热阴极微波电子枪存在电子反轰,束流负载效应将引起能散度的增加,因此为了降低能散度,要求尽量降低反轰。利用 SUPERFISH 程序进行了腔形优化设计,分析了加速腔内的电场分布,计算了腔壁的损耗。利用 PARMELA 程序进行了束流动力学计算。为了提高首腔的电子俘获系数,减小电子反轰,设计过程中采用了缩短首腔长度,注入器为 1+1/4腔结构。计算得到的电子束能量为 1.8 MeV,峰值流强为 5.5 A,归一化发射度为  $10\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。从计算结果看到缩短首腔长度有利于降低电子反轰,模拟计算得到的参量满足了设计要求。图 1 为注入器结构示意图,模拟计算结果如图 2 所示。注入器冷测电场分布如图 3 所示。

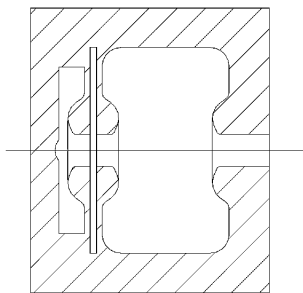


图 1 注入器结构示意图

Fig. 1 Scheme of the injector

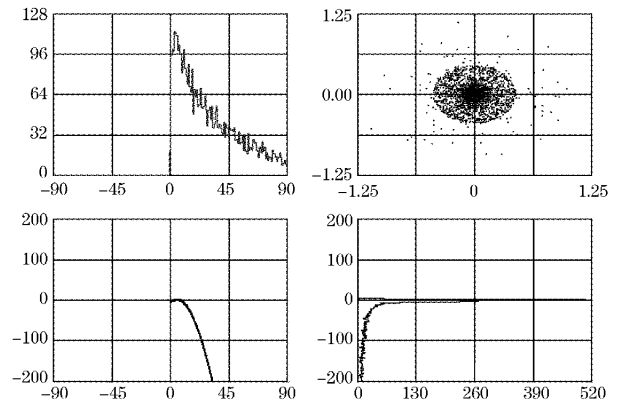


图 2 注入器模拟计算结果

Fig. 2 Simulation of the injector

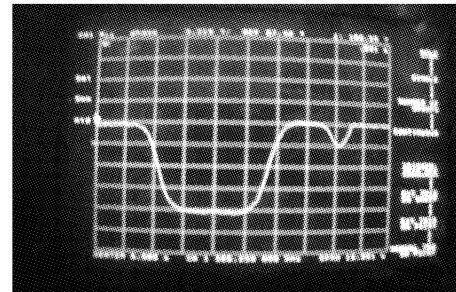


图 3 注入器中电场分布

Fig. 3 Electric field in the injector

### 4 加速器束流调试实验

图 4 是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,  $\alpha$  磁铁, 5 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  $\alpha$  磁铁进行能量选择和动量压缩后,得到约 2 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 6.5 MeV。注入器和加速段分别用两台输出功率为 3.5 MW 的速调管驱动,速调管工作频率为 1300 MHz。

为了得到稳定的电子束,对微波源稳定性进行了改进。提高波源的稳定性主要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%,微波源高压纹波小于 0.3%。

对该注入器进行了束流参量测量,调试过程中利用靶片监视束流斑点,计算了束斑大小,  $x$  和  $y$  方向的束斑尺寸都小于 2 mm。利用 BCT 测量了束线上不同位置的宏脉冲束流强度,如图 5 所示。利用条纹相机测量了束流微脉冲宽度,微脉冲束流宽度为 25~28 ps,如图 6 所示。仔细调节束线上的磁学元件,使电子束保持了良好的传输状态。

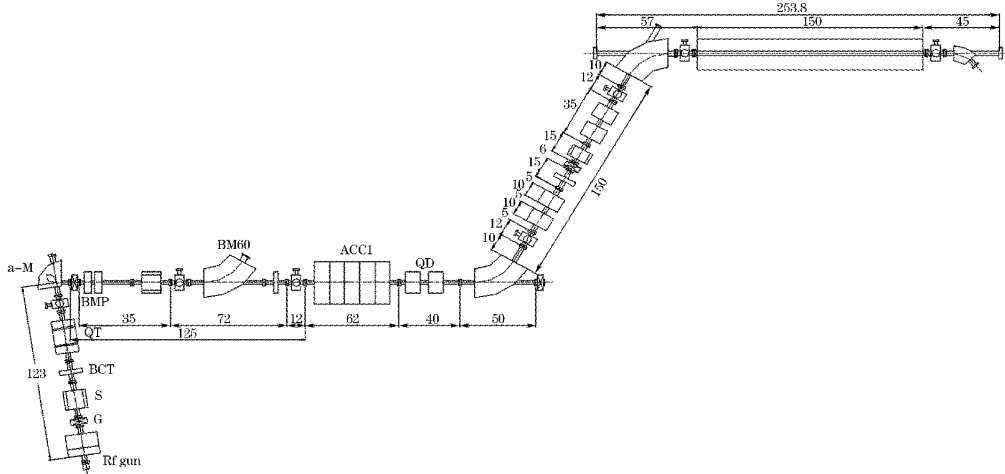


图 4 实验系统总体布局图

Fig. 4 Scheme of the facility

大幅度提高,实验系统参量如表 1 所示。在此基础上进行了自由电子激光自发辐射和受激辐射实验,获得了受激辐射信号,如图 7 所示。利用远红外光栅谱仪测量了受激辐射波长和受激辐射谱,如图 8 所示,中心波长为  $115 \mu\text{m}$ ,谱宽为 1%。

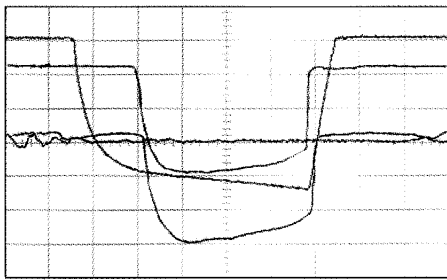


图 5 束线上束流波形图

Fig. 5 Beam current

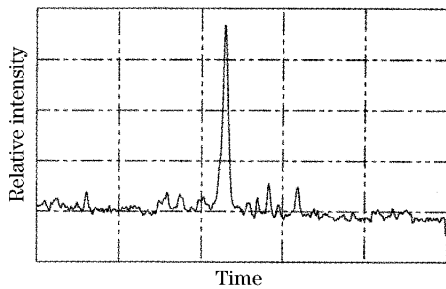


图 6 电子束微脉冲宽度

Fig. 6 Width of the micropulse

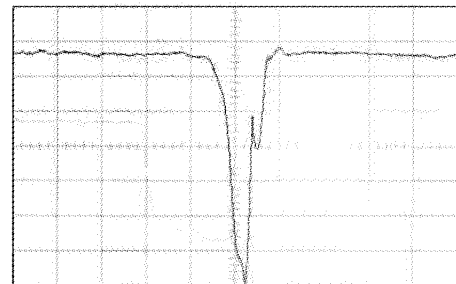


图 7 受激辐射信号

Fig. 7 Stimulated signal

表 1 实验系统主要性能参量

Table 1 Main parameters of the facility

Electron energy /MeV	6.5
Macropulse width / $\mu\text{s}$	$\sim 4$
Energy spread /%	$\sim 1$
Wiggler period number	44
Wiggler gap /mm	18
Electric trajectory error /mm	$< 0.1$
Optical resonator length /m	2.536
Curvature radii of the mirror /m	1.768
Macropulse current /mA	130
Micropulse width /ps	$\sim 25$
Normalized emittance /( $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ )	$\sim 20\pi$
Wiggler period length /cm	3.2
Magnetic peak value /T	$32 \times 10^{-2}$

经过改造,该实验系统的性能和稳定性得到了大幅度提高,电子束参量为:电子束能量 6.5~7 MeV,微脉冲束流强度大于 4 A,微脉冲束流宽度 25~28 ps,电子束能散小于 1%,发射度小于  $20\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

## 5 自由电子激光实验

经过改造后该实验系统的性能和稳定性得到了

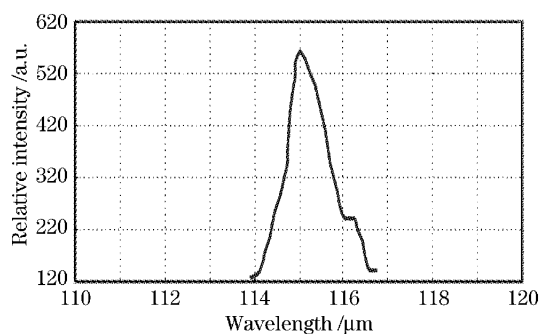


图 8 受激辐射谱

Fig. 8 Spectrum of the stimulated signal

## 6 结 论

以热阴极微波电子枪为注入器的 $100\ \mu\text{m}$  FIR-FEL 实验装置实现了受激辐射,为开展进一步研究打下了良好的基础。但由于增益较低,没有达到饱

和。为了达到饱和输出,下一步的工作将进一步提高束流强度和增益。FIR-FEL 是一种理想的太赫兹光源,作为一种新型相干光源,太赫兹辐射的独特性质在物理、化学、信息和生物学等基础研究领域以及材料、通信、国家安全等技术领域具有科学价值和广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 S. Benson, D. Douglas, M. Shinn *et al.*. High power lasing in the upgrade FEL at Jefferson lab [R]. *FEL Proceedings*, 2004, 229~232
- 2 George R. Neil, Lia Merminga. Technical approaches for high-average-power free-electron lasers [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2002, 74: 685
- 3 W. B. Colson, C. Pellegrini, A. Renieri. Free Electron Lasers [M]. London: World Scientific, 1990
- 4 A. Westenshop, J. M. J. Madey. Microwave electron gun [J]. *Laser and Particle Beam*, 1984, 2(2): 223