

# 多腔热阴极微波电子枪的实验研究

唐传祥<sup>1</sup> 吴元明<sup>2</sup> 王友智<sup>2</sup> 赵新桥<sup>2</sup>  
林郁正<sup>1</sup> 谢家麟<sup>2</sup>

1(清华大学工程物理系 北京 100084)

2(中国科学院高能物理研究所应用部 北京 100080)

1996-04-08 收稿

## 摘 要

详细介绍了用于北京自由电子激光器(BFEL)多腔热阴极微波电子枪的实验研究情况. 通过对该微波电子枪出口脉冲电流波形和宏脉冲不同时间位置电子能谱的测量, 表明该枪大大减小了电子反轰功率. 实验测量得到通过 $\alpha$ 磁铁的束流强度约为 200mA, 束流发射度约为  $20 - 30\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ . 并且, 还将实验得到的能谱与模拟结果作了比较.

**关键词** 热阴极微波电子枪, 电子反轰, 电流波形, 发射度, 能谱.

## 1 引 言

北京自由电子激光器(BFEL)是一台康普顿型、中红外自由电子激光振荡器, 已经于 1993 年 12 月实现饱和出光<sup>[1]</sup>. 目前, 它采用单腔热阴极微波电子枪作为高亮度注入器. 由于存在严重的电子反轰, BFEL 运行的重复频率比较低, 脉冲宽度为  $4\mu\text{s}$  左右.

作者在中国科学院高能物理研究所自由电子激光实验室的微波电子枪热测实验台上研究了一新型多腔热阴极微波电子枪<sup>[2]</sup>. 该微波电子枪采用双周期轴耦合驻波加速结构, 由四个加速腔组成, 工作在  $\pi/2$  模, 工作频率为 2856MHz. 该枪在设计中采用了缩短首腔以及增加腔间漂移段等设计思想, 大大减小了电子反轰功率, 并有效调节了电子束团的纵向特性, 在主加速器入口得到了较好的束流品质<sup>[6]</sup>. 为提高 BFEL 的运行重复频率及脉冲宽度创造了条件.

微波电子枪热测实验台建造的目的是为了对微波电子枪的性能、阴极发射性能、电子反轰效应以及束流输运系统进行研究. 该热测实验台是由磁控管、调制器、微波传输系统、微波电子枪、束流输运系统和控制系统等组成. 实验台的总体结构简图示于图 1. 目前实验台的微波功率源系统工作状态基本稳定, 微波包络的宽度为  $4.1\mu\text{s}$ (FWHM), 平顶  $2.7\mu\text{s}$ , 顶部纹波  $<3\%$ . 微波功率源输出微波的频率可以通过磁控管的频率调节杆机械调节, 目前可以稳定工作在  $2856 \pm 4\text{MHz}$ . 工作的重复频率可调, 可以在 3.125Hz、6.25Hz、12.5Hz、25Hz 及 50Hz 工作.

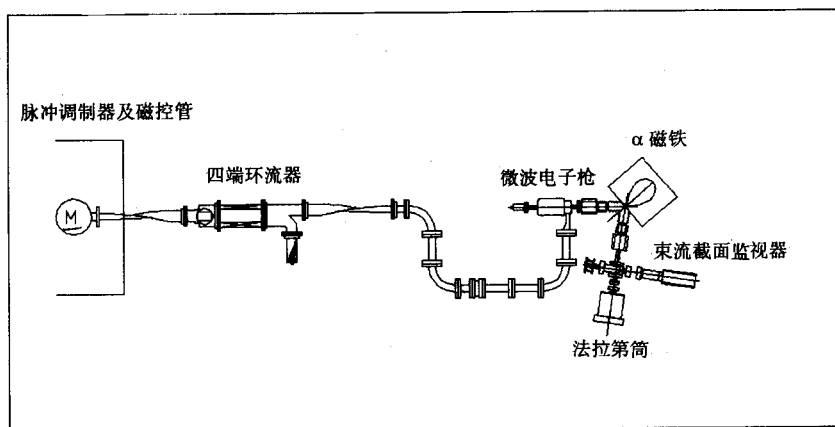


图 1 BFEL 实验室微波电子枪热测实验台结构简图

## 2 实验结果

用于北京自由电子激光器的多腔热阴极微波电子枪在实验中采用单晶  $\text{LaB}_6$  阴极，用钨丝做成的塔形热子加热。实验中利用安装在微波电子枪出口和  $\alpha$  磁铁出口的脉冲束流变压器 (BCT1 和 BCT2) 分别测量电子枪出口和通过  $\alpha$  磁铁的脉冲电流波形以及电流强度。利用  $\alpha$  铁和真空盒中的动量选择器来测量微波电子枪输出束流的电子能量，并通过改变  $\alpha$  铁的磁场得到束流的能谱曲线。束流发射度的测量采用四极透镜法<sup>[3]</sup>，图 2 给出了发射度测量系统示意图。

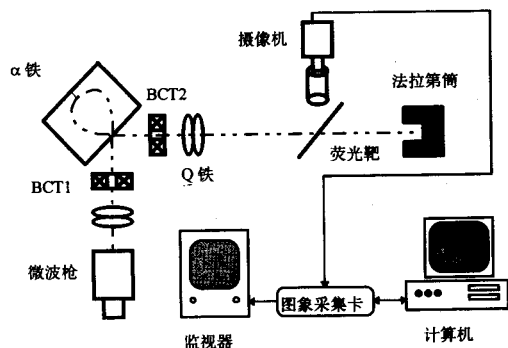
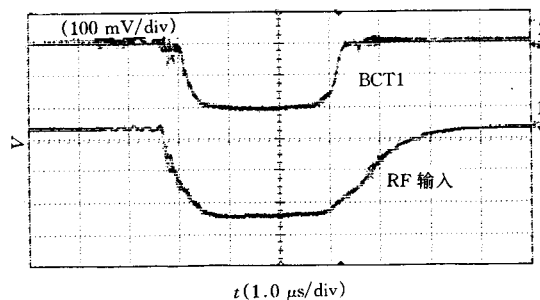
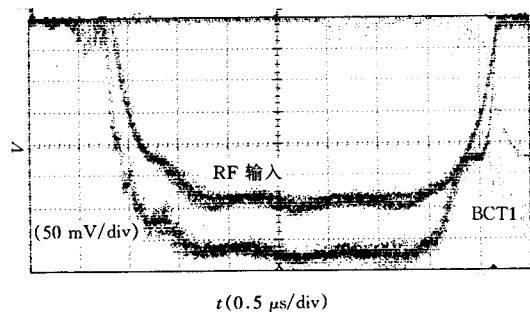


图 2 发射度测量系统



(a)



(b)

图 3 电子枪出口电流脉冲波形及微波包络

(a) 入射微波功率为 0.8MW; (b) 入射微波功率为 1.6MW.

## 2.1 电流波形

图 3(a) 给出了输入微波功率约为 0.8MW 时, 得到的电子枪出口的脉冲电流波形, 电流强度为 500mA, 电子最高能量约为 1.2MeV. 图 3(b) 给出了输入微波功率约为 1.6MW 时, 电子枪出口的电流波形顶部的细节, 这时, 得到的电流强度约为 800mA, 电子最高能量约为 1.8MeV. 通过  $\alpha$  磁铁的束流强度约为 200mA, 满足 BFEL 的实验要求.

从图 3(a) 可以看出, 该微波电子枪的输出电流波形没有出现由于电子反轰引起的斜升现象. 在增加了入射微波的功率, 提高了束流的强度和电子能量后, 图 3(b) 的电流波形顶部仍然看不出明显的因反轰引起的斜升, 并且电流波形的波动与微波包络顶部的抖动一致, 说明了电子反轰对该微波电子枪出口的电流波形的影响很小. 初步证明了在该微波电子枪的设计中采用缩短首腔长度有效地减小了电子反轰功率.

## 2.2 束团能谱

在热阴极微波电子枪中, 由于电子反轰使宏脉冲中电流强度不均匀(即电流波形的斜升), 造成宏脉冲中的各电子束团在微波电子枪中加速时的束流负载不同, 从而宏脉冲中不同时刻束团的能量出现差异. 因此, 各束团之间能量差异的大小也反映了电子反轰功率的大小. 图 4 为入射微波功率为 1.6MW 的宏脉冲中不同时间位置的能谱曲线(以微波包络的起始为时间的零点). 从图中可以看出, 处于宏脉冲前部的束流能量稍高于后部, 这一能量的差别约为 0.05MeV, 相当于电子最高能量的 2.5%. 进一步证明了该微波电子枪的电子反轰效应得到了比较好的抑制.

## 2.3 发射度

图 5 给出了电子束团打在荧光靶上亮度  $L_T$  的分布. 由图 5 可以看出束斑的亮度分布近似为圆柱状, 平顶是由于图象采集卡亮度饱和造成的. 束芯直径约为 3mm. 图 6

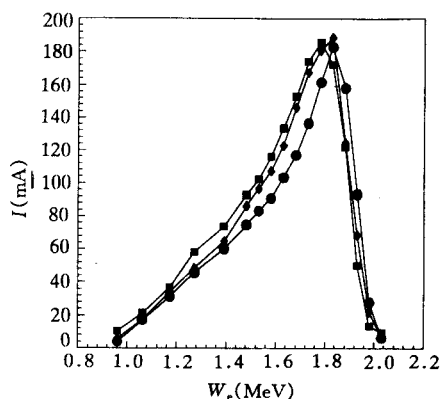


图 4 宏脉冲不同时刻的能谱曲线

● 1.0 $\mu$ s; ◆ 2.0 $\mu$ s; ■ 3.0 $\mu$ s.

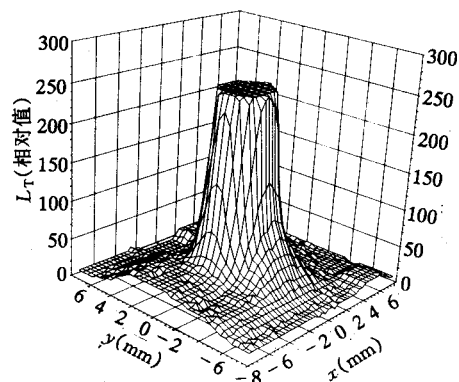


图 5 电子束团的横向亮度分布

给出了  $x$  方向束团在荧光靶上的尺寸  $D_x$  随四极磁铁电流  $I_Q$  的变化曲线, 由图可以看出它们都出现了束腰. 计算得到  $x$ 、 $y$  方向的几何均方根发射度分别约为  $28\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  和  $22\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ . 如果只考虑束芯部分电子, 则  $x$  和  $y$  方向的几何均方根发射度都约为  $5.0\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ .

### 3 与模拟计算结果的比较

图7给出了入射微波功率为1.4MW时的能谱的实验曲线与用Hotgun<sup>[4]</sup>和GTL<sup>[2]</sup>程序模拟结果的比较. 为了尽量准确地模拟实际的实验情况, 首先利用Hotgun程序在输入微波功率为1.4MW的条件下计算得到微波电子枪出口处的各个电子的运动状态, 然后用

GTL程序在不同的 $\alpha$ 铁磁场强度下, 计算通过 $\alpha$ 铁的电流量. 在利用GTL程序模拟

计算的过程中, 考虑了束流传输线中由于安装造成的 $\alpha$ 铁前面的两个四极磁铁的位置误差等因素. 模拟计算中的四极磁铁及 $\alpha$ 铁的位置及动量选择器狭缝的位置和宽度都与实验相同. 从图7可以看出模拟和实验结果吻合得很好.

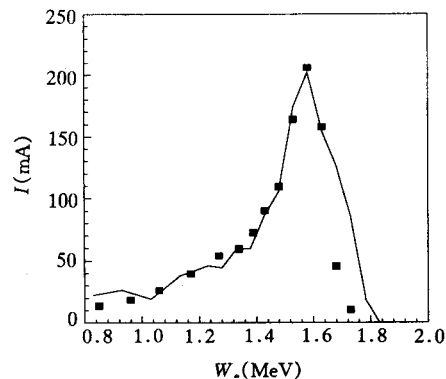


图7 能谱曲线的实验及模拟结果

■ 实验结果; — 模拟计算结果.

BFEL装置上的单腔微波电子枪小得多; 电子最高能量为1.8MeV左右, 约为单腔微波电子枪的两倍; 束流横向发射度也小于单腔微波电子枪,  $x$ 方向约为  $28\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ,  $y$ 方向约为  $22\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ; 通过 $\alpha$ 磁铁的束流强度为200mA等也都达到了设计值. 该微波电子枪在微波电子枪热测实验台作进一步的测试后将用于北京自由电子激光装置上.

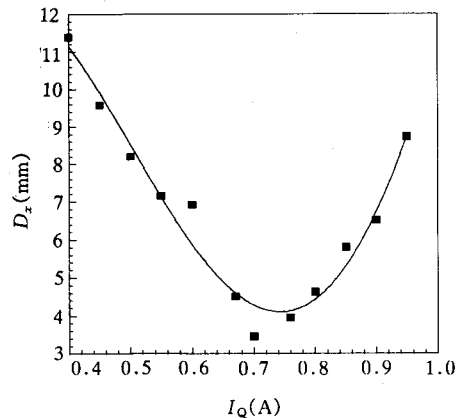


图6 束团在荧光靶上的尺寸随四极磁铁电流的变化曲线

### 4 结 论

在微波电子枪热测实验台上对用于BFEL的多腔热阴极微波电子枪进行了比较详细的实验研究, 实验测量的各束流参数基本达到了设计指标, 并且验证了关于反轰问题的设计思想<sup>[5]</sup>. 实验表明该微波电子枪的反轰功率及能散比目前

## 参 考 文 献

- [1] 谢家麟, 庄杰佳等, 高能物理与核物理, **18**(1994)765.  
[2] 唐传祥, 用于北京自由电子激光器的多腔热阴极微波电子枪的研究, 清华大学博士学位论文, 1996.  
[3] X. J. Wang *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A356**(1995)159.  
[4] 唐传祥, 杨越, 林郁正, 高能物理与核物理, **20**(1996)376.  
[5] 唐传祥, 林郁正, 强激光与粒子束, **8**(1996)61.  
[6] 唐传祥, 林郁正等, 高能物理与核物理, **21**(1997)378.

**Experimental Study of a Multi-Cavity RF Gun With Thermionic Cathode**

Tang Chuanxiang<sup>1</sup> Wu Yuanming<sup>2</sup> Wang Youzhi<sup>2</sup> Zhao Xinqiao<sup>2</sup>  
Lin Yuzheng<sup>1</sup> Xie Jialin<sup>2</sup>

*1* (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

*2* (Application Division, Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Received 8 April 1996

**Abstract**

A novel multi-cavity RF thermionic gun with much less back bombardment effect has been designed, built, tested and experimented. In this paper we mainly discuss the experimental results of this RF gun. From the pulse shapes of BCT at the gun exit and energy spectra at different positions of the pulse, we have seen that the back bombardment power is much less than the single cavity RF gun. The current after the  $\alpha$ -magnet is 200mA, and electron energy is about 1.8MeV. The geometric RMS emittance is less than  $28\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  in  $x$ -direction, and less than  $22\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  in  $y$ -direction at the linac entrance.

**Key words** RF thermionic gun, back bombardment, current pulse, emittance, energy spectrum.