

用于BFEL的多腔热阴极微波电子枪 的设计研究

唐传祥 林郁正 童德春

(清华大学工程物理系 北京 100084)

吴元明 王友智 赵新桥 谢家麟

(中国科学院高能物理研究所 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)的多腔热阴极微波电子枪的物理设计以及模拟计算结果,给出了出束及热测实验研究结果.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2856 MHz.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,并有效地调节了电子束团的纵向特性.

关键词 热阴极微波电子枪, 电子反轰, 纵向特性, 电流脉冲波形.

1 引 言

自由电子激光器的出现拓宽了电子加速器的应用领域,也给加速器物理提出了新的研究课题.为满足自由电子激光器对电子束流品质的要求,高亮度注入器已经成为人们研究的焦点.其中热阴极微波电子枪具有亮度高、结构简单、容易实现等特点,在自由电子激光器中有重要的应用.但是,电子反轰的存在严重影响了热阴极微波电子枪的性能,限制了其应用.

北京自由电子激光器(BFEL)是振荡器型中红外FEL装置^[1].它使用30 MeV射频直线加速器驱动,用单腔热阴极微波电子枪作为高亮度注入器,用 α 铁压缩电子束团.它是我国863高技术项目,并在1993年12月实现饱和振荡.但是,由于其微波电子枪电子反轰比较严重,而使微波功率源提供的6 μ s的微波脉冲不能得到充分利用,目前北京自由电子激光器一般工作在4 μ s,而且重复频率小于10 Hz.为此,本文借助于粒子动力学模拟计算,分析了热阴极微波电子枪中电子反轰的实质以及纵向和横向的粒子动力学过程,在此基础上,设计并实验了一多腔热阴极微波电子枪^[2],在保证电子枪出口束流品质的前提下,有效地抑制了电子反轰.该微波电子枪拟用于北京自由电子激光装置上,

以进一步提高其运行性能。

图1给出了该微波电子枪的剖面结构简图。它是一个双周期轴耦合驻波加速结构,由四个加速腔组成,微波功率从最后一个加速腔馈入。它工作在 $\pi/2$ 模,工作频率为2856 MHz。阴极采用目前BFEL实验室的单晶 LaB_6 ,放在首腔的端面处,用绕成塔形的钨丝加热。

2 用于BFEL的多腔热阴极微波电子枪的物理设计

热阴极微波电子枪中存在电子反轰,使枪出口的宏脉冲电流波形出现斜升,图2给出了目前BFEL装置的单腔热阴极微波电子枪得到的由于电子反轰而出现斜升的电流波形。由于宏脉冲中各束团的束流负载不同,在通过传输线的传输和主加速段的加速后,会使各束团的电子能量出现较大的差别,从而严重影响自由电子激光的增益。因而,在热阴极微波电子枪的设计中应该详细考虑如何抑制电子反轰。

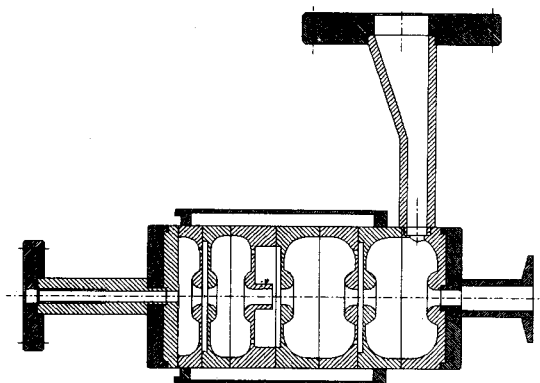


图1 用于BFEL的多腔热阴极微波电子枪的剖面结构简图

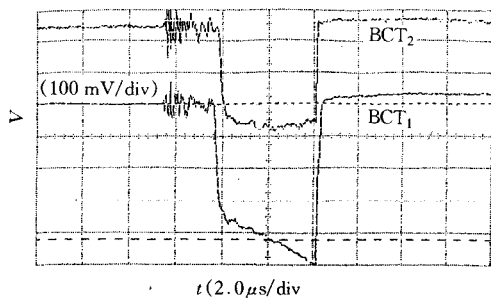


图2 出现斜升的电流脉冲波形
BCT1和BCT2分别表示在微波电子枪和 α 磁铁出口的电流脉冲波形。

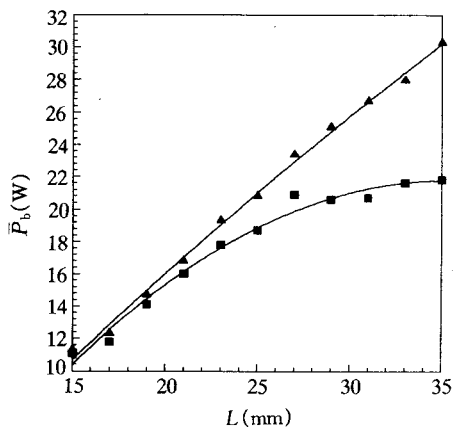


图3 平均反轰功率随腔长的变化

图3 平均反轰功率随腔长的变化曲线

▲ 总的平均反轰功率; ■ 打到阴极上的平均反轰功率。

用于BFEL的多腔热阴极微波电子枪的首腔的加速长度约为整腔的 $1/3$,从而在保持一定的阴极表面电场强度下,减小从首腔反轰电子的能量,并减少反轰电子的数目,以达到减小反轰功率的目的^[3]。并且,阴极表面可以保持较高的电场强度,从而提高阴极发射的电流密度以及抑制空间电荷效应。图3给出了阴极参数和馈入微波功率等参数不

变的条件下,反轰功率随加速腔长度的变化曲线^[3].其中, \bar{P}_0 为平均反轰功率, L 为加速腔的长度.

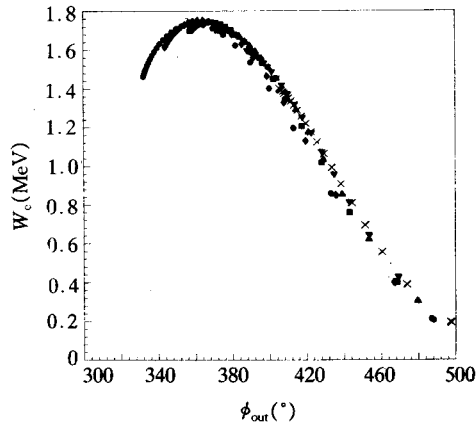


图4 不同漂移段长度的电子枪出口束团的
 $W_e - \phi_{out}$ 关系曲线

● DFT=0mm; ◆ DFT=4mm; ■ DFT=8mm;
▲ DFT=12mm; ▼ DFT=16mm; × DFT=20mm.

(DFT)的变化情况.在计算过程中,保持各高频腔的电场幅值不变.其中, W_e 为电子枪出口的电子能量, ϕ_{out} 为电子在电子枪出口处的相位.

另外,该微波电子枪在设计中还采用了大鼻锥、大束流孔径,以减小RF场在轴线附近的非线性分量.首腔电场强度的选择综合考虑了其对电子枪出口束团纵向特性的影响和对电子反轰效应及空间电荷效应的抑制等因素^[2].

3 模拟计算

利用热阴极微波枪电子注入器模拟计算程序 Hotgun^[4]和 GTL^[2],对用于BFEL的多

表1 用于BFEL的多腔及单腔热阴极微波电子枪的模拟计算结果

微波电子枪	多腔	单腔	微波电子枪	多腔	单腔
平均反轰功率 (W)	18.3	99.2	加速器入口参数		
电子枪出口参数			脉冲流强 (A)	0.41	0.33
脉冲流强 (A)	0.74	1.05	$\epsilon_x (\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad})$	24.4	27.9
电子最大能量 (MeV)	1.76	0.96	$\epsilon_y (\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad})$	9.9	6.8
$\epsilon_x (\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad})$	6.4	4.3	束团长度 (ps)	~5	~5
$\epsilon_y (\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad})$	8.4	4.6			

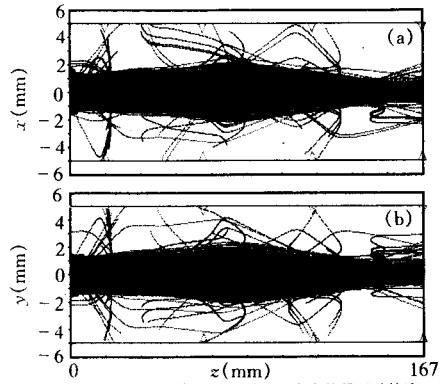


图5 微波电子枪中 a) x 及 b) y 方向粒子运动轨迹

图5 微波电子枪中 x 及 y 方向粒子运动轨迹

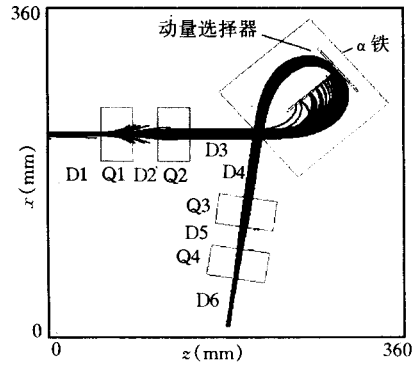


图6 束团在传输线 x-z 平面中的运动轨迹

图6 束团在传输线 x-z 平面中的运动轨迹

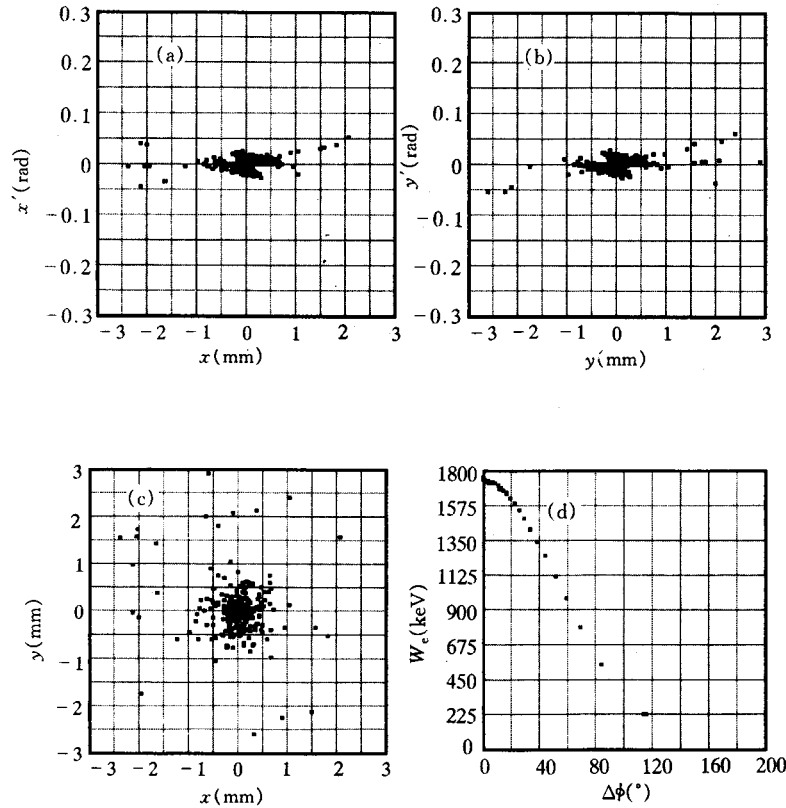


图7 微波电子枪出口处电子束团的空间分布
(a) (x, x') , (b) (y, y') , (c) (x, y) , (d) $(\Delta\phi, W_c)$.

腔热阴极微波电子枪的工作性能进行了全面的模拟，并在相同的运行条件下，与BFEL实验室的单腔热阴极微波电子枪的模拟结果作了比较。模拟计算的条件如下：

微波参数: 馈入功率 $P_{in}=1.6$ MW, 工作频率 $f_{RF}=2856$ MHz,
工作模式 $\pi/2$, 脉冲宽度 $\tau=6$ μ s,
重复频率 $F=50$ Hz;

阴极参数: 直径 $D=3$ mm, 工作温度 $T_c=1800$ K,
零场发射电流密度 $J_0=18.0$ A/cm², 均匀发射.

电子枪出口及加速器入口的模拟计算结果见表1, 表1还给出了BFEL实验室的单腔热阴极微波电子枪在相同的条件下的模拟结果, 与之相比该微波电子枪的平均反轰功率减小了5倍左右, 而且提高了束流能量. 在加速器入口处的束流的其它参数两者基本相当.

另外, 在图5、6分别给出了束团在微波电子枪和束流传输线的运动轨迹, 其中, 图6中的Q和D分别表示四极磁铁和漂移段. 图7给出了在微波电子枪出口束团的 (x, x') 、 (y, y') 、 (x, y) 以及 $(\Delta\phi, W_c)$ 空间分布. 相当相位 $\Delta\phi$ 定义为粒子在电子枪出口与最先到达电子枪出口的粒子的相位差.

4 实验结果

用于BFEL的多腔热阴极微波电子枪加工测试完成后, 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进行了出束实验, 并在现有条件下做了部分束流品质的测量和实验研究^[2]. 图8给出了重复频率为12.5 Hz时电子枪出口的电流和入射微波脉冲波形, 可以看到电流脉冲波形没有出现电子反轰引起的斜升的现象. 在不同的人射微波功率下, 得到的电流脉冲波形都没有出现明显的斜升现象. 由此可见, 该微波电子枪的电子反轰得到了很好的抑制.

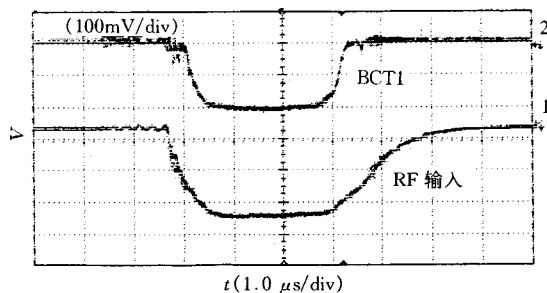


图8 微波电子枪出口的电流脉冲波形及入射微波包络

另外, 还利用 α 磁铁测量了该微波电子枪输出的电子束团的能谱, 用四极透镜法测量了束团的横向发射度. 该微波电子枪的实验结果见表2.

表2 用于BFEL的多腔热阴极微波电子枪的实验结果

多腔热阴极微波电子枪实验参数	
重复频率 (Hz)	12.5
脉冲宽度 (μ s)	2.5
电子最高能量 (MeV)	1.8
电子枪出口流强 (mA)	800
通过 α 磁铁流强 (mA)	200
束团间能量差	$\sim 2.5\%$
束团能散	$\sim 15\%$
电流波形斜升	$< 2\% - 3\%$
发射度 ε_x ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$)	~ 28
发射度 ε_y ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$)	~ 22

5 结 论

通过模拟计算和实验研究表明, 缩短首腔可以大大减小电子反轰功率; 利用腔间漂移段可以有效地调节微波电子枪出口的束团的纵向特性. 该微波电子枪在作进一步的实验研究后, 将用于北京自由电子激光装置上.

参 考 文 献

- [1] 谢家麟等, 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] 唐传祥、林郁正, 强激光与粒子束, **8**(1996)61.
- [4] 唐传祥、杨越、林郁正, 高能物理与核物理, **20**(1996)376.

R&D of a Multi-cavity RF Gun With Thermionic Cathode for BFEL

Tang Chuanxiang Lin Yuzheng Tong Dechun

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

Wu Yuanming Wang Youzhi Zhao Xinqiao Xie Jialin

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Received 8 April 1996

Abstract

This paper describes the design, simulation and experiment of a multi-cavity RF gun with thermionic cathode for BFEL. This RF gun consists of 1/2+3 cavities (its first half cavity is about 1/3 of a full cavity) with a axis coupling bi-period standing-wave accelerating structure, and works at $\pi/2$ mode, 2856 MHz. We shortened the length of the 1st cavity and added a short drift between the 2nd and 3rd cavities, so that the power of back bombardment electrons was greatly decreased and the longitudinal properties were adjusted properly.

Key words RF gun with thermionic cathode, back bombardment, longitudinal property, current pulse shape.