

微脉冲电子枪的初步实验研究*

翟纪元¹⁾ 唐传祥 郑曙昕 李泉凤

(清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要 给出了微脉冲电子枪的模拟计算及其初步实验结果. 该电子枪采用铜铝镁合金作为冷阴极材料, 在以磁控管作为微波功率源的出束实验中得到了 $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 的电流密度. 实验结果与次级电子倍增解析计算和SEEG程序的模拟计算结果基本符合, 初步验证了微脉冲电子枪的基本原理, 为今后实验中得到更大的电流密度打下了基础.

关键词 微波电子枪 微脉冲电子枪 次级电子倍增 冷阴极材料 铜铝镁合金

1 引言

微脉冲电子枪(micro-pulse electron gun, 简称MPG)是一种新型的冷阴极微波电子枪. 它具有不需要外界激发、电流密度大、寿命长以及结构简单等优点, 适合应用于各类加速器及高功率微波的产生, 具有广阔的应用前景. 1993年F. M. Mako等人提出了MPG的设计思想^[1], 随后的实验取得了很好的结果^[2, 3], 其中S波段的MPG得到了 $10\text{A}/\text{cm}^2$ 的宏脉冲电流. 清华大学工程物理系加速器研究室从1999年至今进行了微脉冲电子枪的理论分析、模拟计算^[4, 5]、设计^[5]、加工、冷测、焊接和热测实验. 国内其他单位也对微脉冲电子枪进行了研究^[6-8], 但是未见热测出束的报道. 本文将给出微脉冲电子枪的初步实验结果.

2 微脉冲电子枪的结构和射频参数

微脉冲电子枪的结构如图1所示, 主要由以下几部分组成: 1) 阴极位置调节装置. 用来调节阴极面和栅网之间的距离(即极面间距), 精度 0.01mm , 高真空密封, 无机械回程和抽真空抖动; 2) 带有鼻锥结构的射频腔(材料是无氧铜), 建立类 TM_{010} 模式射频场. 腔内有阴极和栅网, 采用了防止微波击穿的扼流结构; 3) 束流引出管道和法拉第桶, 用于束流测量. 法拉

第桶采用了抑制二次电子的结构; 4) 耦合器、锥形波导、抽真空管道和波导窗等.

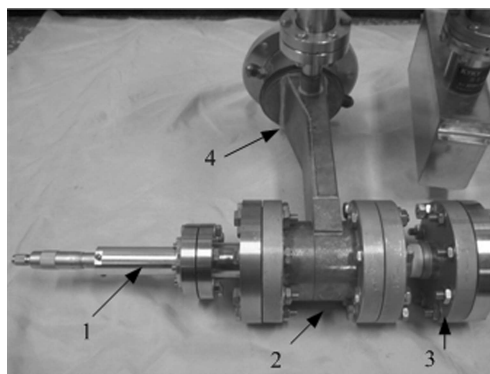


图1 微脉冲电子枪

表1列出了微脉冲电子枪的射频参数(选取热测实验中设定的两个极面间距). 其中 D 为极面间距, f_0 , Q_0 , β_c 分别为冷测得到的谐振频率、无载品质因数和无载耦合度. 单位长度分流阻抗 Z , 品质因数 Q 由SUPERFISH程序计算而得. 分流阻抗 $r_s = ZDQ_0/Q$.

表1 微脉冲电子枪的射频参数

D/mm	f_0/MHz	Q_0	β_c	$Z/(\text{M}\Omega/\text{m})$	$r_s/\text{M}\Omega$
1.2	2512	835	1.38	202	0.042
3.34	2856	2000	3.6	154	0.179

3 热测实验设计和计算

微脉冲电子枪的基本原理是次级电子倍增

2005-04-22 收稿

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助

1) E-mail: zhajiy03@mails.tsinghua.edu.cn

(multipactor)^[9, 10]: 对于一定的微波频率 f 、极面间距 D 、稳定相位范围、二次电子发射速率和发射延迟时间等, 存在产生次级电子倍增放电的微波腔压范围(V_{gmin} , V_{gmax}), 同时要求(V_{gmin} , V_{gmax})对应的初级电子轰击能量(E_{min} , E_{max})内阴极材料的二次电子发射系数大于1. (V_{gmin} , V_{gmax})内的每一个值对应于不同的稳定相位和相汇聚能力, 从而对应于不同的饱和电流密度和微脉冲宽度.

热测实验首先需要根据微波源的频率和材料的倍增特性, 选择合适的极面间距, 然后根据微波腔压 V_g 、束流负载 P_b 和腔的射频参数(见表1)确定需要的微波源功率:

$$P_g = \frac{P_c + P_b}{4\beta_b^{-1} \left[(1 + \beta_b^{-1})^2 + \left(\frac{Q_0}{\beta_c} \right)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c} - \frac{\omega_c}{\omega} \right)^2 \right]}, \quad (1)$$

其中 $P_c = V_g^2/r_s$ 为腔壁损耗. P_b 使用SEEG程序模拟计算的值, 也可以进行解析估算. 有载耦合度 $\beta_b = \beta_c/(1 + P_b/P_c)$. 腔的固有角频率 $\omega_c = 2\pi f_0$. 式(1)假设束流负载只改变微波等效电路的电导而不改变其电纳.

SEEG是用C语言编写的微脉冲电子枪束流动力学模拟程序^[4, 5], 可以给出一定条件下的发射电流密度、束流负载、发射度等参数. 该程序采用三维多粒子跟踪计算, 考虑了相对论效应、射频场对粒子的纵向及横向作用以及纵向和横向空间电荷效应, 不考虑瞬态束流负载效应^[11]、频率响应^[12]、反向次级电子倍增^[13]等. 采用的二次电子发射模型是: 二次电子发射系数 δ 与初级电子轰击能量 E_i 的关系 $\delta = \delta_{max}(w \cdot e^{1-w})^k$, 其中 δ_{max} 是最大二次电子发射系数, E_{max} 是相应的初级电子能量, $w = E_i/E_{max}$, $w < 1$ 时 $k = 0.62$, $w > 1$ 时 $k = 0.25$. 不考虑入射角度对 δ 的影响. 二次电子垂直表面发射. 可以预设一定的二次电子发射速率和发射延迟时间, 不考虑其随机涨落.

实验中使用铜铝镁合金^[14]作为阴极和栅网材料, 阴极和栅网半径均为5mm. 初级电子能量在70eV到7.3keV之间时, 铜铝镁合金的二次电子发射系数 $\delta > 1$, $\delta_{max} = 3$, $E_{max} = 1keV$ ^[15]. 该材料耐电子轰击, 寿命长, 发射性能稳定, 且使用前无需进行激活处理^[14].

首先使用最大输出功率300W的固态微波源作为功率源进行低功率实验. 实验台由固态微波发生器、隔离器、定向耦合器等组成. 发射电流引出后经过大额定功率的电阻, 由示波器测量电阻上

的电压波形. 微波频率2856MHz, 功率谐振馈入, $D = 3.34mm$, 使用透过率2%的栅网. 因为SEEG在 V_{gmin} 附近发射电流的模拟结果产生很大的振荡, 所以采用单粒子动力学^[16, 17]解析估算微波源功率 $P_g = 300W$ 对应的电流密度. 设二次电子的发射能量2eV(因为铝镁合金的发射体为氧化镁和氧化铝, 而氧化物的二次电子发射能量一般在0—3eV), 发射延迟2ps(忽略二次电子能量和延迟时间的随机分布), 解析计算得到(V_{gmin} , V_{gmax})=(5.34kV, 7.7kV), 相应的(E_{min} , E_{max})=(2.1keV, 3.4keV), 对应的二次电子发射系数大于1. 取最低间隙电压5.34kV, 由式(1)可以计算出, 微波源功率 $P_g = 300W$ 对应的电流密度为 $0.6mA/cm^2$.

然后使用最大输出功率2MW的磁控管作为功率源进行高功率实验. 实验台由脉冲调制器、磁控管、四端环流器、水冷和控制系统等组成. 微波频率2995MHz, 失谐馈入, 设定 $D = 1.2mm$, 使用透过率10%的栅网. 由SEEG程序计算不同微波源功率下的发射电流密度. 假设二次电子发射动能2eV, 发射延迟2.1ps. 图2给出了SEEG程序模拟计算的结果. 横坐标是磁控管输出功率, 纵坐标是发射电流密度.

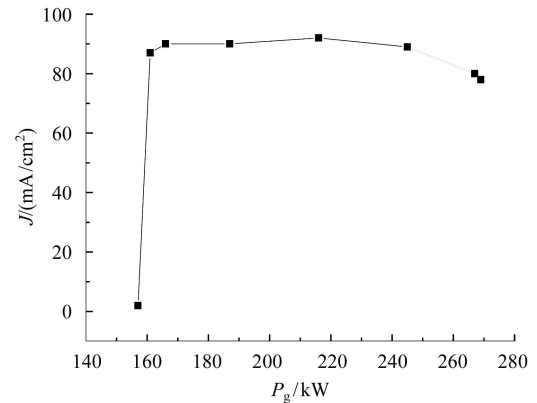


图2 SEEG程序模拟计算结果

4 实验结果

图3是固态微波源功率300W时的微脉冲电子枪宏脉冲电流波形和微波反射信号. 图中宏脉冲电流0.8mA, 电流密度 $1mA/cm^2$, 与解析估算的结果 $0.6mA/cm^2$ 大致符合. 解析估算与实验存在差别, 主要是因为解析估算没有考虑空间电荷效应, 另外不同的二次电子发射速度也会对结果造成较大影响.

为了判定发射电流是否真为次级电子倍增放电, 在低功率情况下研究了放电电流随真空度的变化. 在电流为0.8mA、真空度为 $6.5 \times 10^{-4}Pa$ 时, 关闭分子泵,

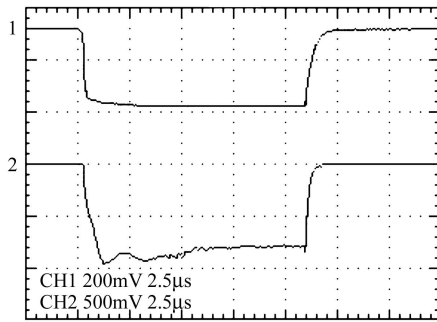


图3 微脉冲电子枪宏脉冲电流(通道2)和微波反射信号(通道1)

极面间距3.34mm, 微波功率300W, 重复频率5Hz, 谐振馈入, 电流通过阻值为1kΩ的电阻, 实验过程中真空度维持在 6.5×10^{-4} Pa左右.

观察电流波形随真空的变化情况. 随着真空变差, 电流逐渐稳定下降. 当电流下降至0.3mA时突然增大到0.6mA左右, 然后缓慢下降. 电流突然增大是因为放电机制由单纯的次级电子倍增放电转化为次级电子倍增引起的等离子体放电^[18], 气压更高时则变为一般的气体放电. 因此可以确认测得的电流是次级电子倍增放电.

图4是磁控管输出功率180kW时的宏脉冲电流波形和微波反射信号. 图中宏脉冲电流80mA, 电流密度 $100\text{mA}/\text{cm}^2$. 腔内电流密度达到 $1\text{A}/\text{cm}^2$. 电流波形有时不很稳定, 平均电流密度 $80\text{mA}/\text{cm}^2$. 模拟计算的结果 $90\text{mA}/\text{cm}^2$ (见图3). 两者基本相符.

增大栅网的透过率和极面间距并选择与之相适应的阴极材料, 同时结合瞬态束流负载效应等因素选择

合适的微波源, 将会进一步提高发射电流密度.

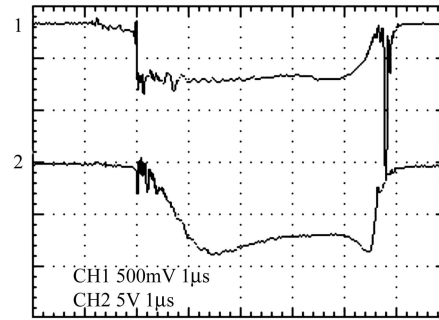


图4 微脉冲电子枪宏脉冲电流波形(通道2)和微波反射信号(通道1)

极面间距1.2mm, 微波功率180kW, 重复频率1Hz, 失谐馈入, 电流通过阻值为100Ω的电阻, 实验过程中真空度维持在 7×10^{-4} Pa左右.

5 结论

本文研究了微脉冲电子枪在300W微波功率谐振馈入, 及180kW失谐馈入的出束实验情况. 分别得到了 $1\text{mA}/\text{cm}^2$ 和 $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 的发射电流密度. 实验结果与在相同条件下的解析计算和SEEG模拟结果基本相符, 初步验证了次级电子倍增理论以及SEEG模拟软件建立的微脉冲电子枪模型, 为今后实验中得到更大的电流密度打下了基础.

作者对提供铜铝镁合金材料的有研亿金新材料股份有限公司的王欣平教授表示感谢.

参考文献(References)

- Mako F M, Peter W. A High-Current Micro-Pulse Electron Gun. In: Proc. of the 1993 Particle Accelerator Conference. IEEE, 1993. 2702—2704
- Len L K, Mako F M. Self-Bunching Electron Guns. In: Proc. of the 1999 Particle Accelerator Conference. IEEE, 1999. 70—74
- Guharay S K, Len L K, Mako F M. High-Current Micro-Pulse Electron Guns and Accelerator Applications. In: Proc. of the 2001 Particle Accelerator Conference. IEEE, 2001. 2084—2086
- TANG Chuan-Xiang, JIANG Zhan-Feng, TIAN Kai et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2003, **27**(6): 546—550 (in Chinese)
(唐传祥, 蒋占峰, 田凯等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(6): 546—550)
- TANG Chuan-Xiang, TIAN Kai, CHEN Huai-Bi et al. High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(8): 788—792 (in Chinese)
(唐传祥, 田凯, 陈怀璧等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(8): 788—792)
- PEI Yuan-Ji, HE Wen-Can, JIN Kai. The Simulation and Analysis of Secondary Emission Microwave Electron Gun. In: Proc. of 2001 APAC. Beijing: Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, 2001. 562—564
- SUN Hong-Bing, PEI Yuan-Ji, XIE Ai-Gen et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2005, **29**(1): 95—98 (in Chinese)
(孙红兵, 裴元吉, 谢爱根等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(1): 95—98)
- YANG Xing-Fan. A High DF, Thermionic 4+1/2 cells RF-gun Studies. Ph.D. Thesis. Mianyang: CAEP, 2000 (in Chinese)
(杨兴繁. 高工作比、热阴极4+1/2腔微波电子枪研究. 博士论文. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2000)
- Vaughan J R M. IEEE Trans. Electron Devices, 1988, **35**(7): 1172—1180
- Kishek R A, Lau Y Y, Ang L K. Phys. Plasmas, 1998, **5**(5): 2120—2126

- 11 Kishkek R. A. Interaction of Multipactor Discharge and RF Structures. Ph.D. Thesis. Ann Arbor: University of Michigan, 1997
- 12 Valfells A. Multipactor Discharge: Frequency Response, Suppression, and Relation to Window Breakdown. Ph.D. Thesis. Ann Arbor: University of Michigan, 2000
- 13 Riyopoulos S. Phys. Plasmas, 1998, **5**(1): 305—311
- 14 PAN Qi-Han, WANG Xin-Ping, LI Jie-Lan et al. Copper Alloy for Cold-Cathode Material and Production Method Therefor. China Patent, CN1062608-C, 2001-02-28 (in Chinese)
- 15 PAN Qi-Han. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, **10**(3): 374—377 (in Chinese)
(潘奇汉. 中国有色金属学报, 2000, **10**(3): 374—377)
- 16 Riyopoulos S, Chernin D, Dialetis D. Phys. Plasmas, 1995, **2**(8): 3194—3213
- 17 Riyopoulos S, Chernin D, Dialetis D. IEEE Trans. Electron Devices, 1997, **44**(3): 489—497
- 18 Höhn F, Jacob W, Beckmann R et al. Phys. Plasmas, 1997, **4**(4): 940—944

Multipactor Experiment on a Micro-pulse Electron Gun*

ZHAI Ji-Yuan¹⁾ TANG Chuan-Xiang ZHENG Shu-Xin LI Quan-Feng

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

Abstract The micro-pulse electron gun (MPG) is a new type of cold cathode microwave electron gun that can produce short duration, high current density electron beam. The principle of MPG is multipactor (or multipacting). In this paper, our proof-of-principle experiment on a MPG is presented. One kind of Cu-Al-Mg alloy has been used as the cold cathode. A current with the density up to $100\text{mA}/\text{cm}^2$ was observed. The results agree well with the analytical calculation and the computer simulation. The experiment verifies both the analytical theory and the computer code, and prepares the way for the higher current density approach.

Key words microwave electron gun, micro-pulse electron gun, multipactor, cold cathode, Cu-Al-Mg alloy

Received 22 April 2005

*Supported by National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)

1) E-mail: zhajy03@mails.tsinghua.edu.cn