

微脉冲电子枪动力学实验研究*

翟纪元¹⁾ 唐传祥 郑曙昕

(清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要 微脉冲电子枪是一种利用次级电子倍增效应产生强流电子束的微波电子枪. 使用氧化镁作为阴极材料进行了微脉冲电子枪的高功率热测实验, 给出了不同射频功率下的发射电流波形, 并观察到了高阶次级电子倍增效应. 实验结果与稳态和瞬态粒子动力学以及模拟计算结果定性符合.

关键词 微脉冲电子枪 次级电子倍增 稳态和瞬态动力学 实验研究

1 引言

微脉冲电子枪是一种利用次级电子倍增 (multiplier) 产生自聚束强流电子束的冷阴极微波电子枪. 从20世纪60年代至今, 出现了很多基于次级电子倍增的电子枪^[1-3].

近几年来, 中国工程物理研究院^[4]、中国科技大学^[5, 6]和清华大学^[7, 8]等单位也进行了微脉冲电子枪 (或称二次发射微波电子枪) 的理论设计工作, 并于近期得到了一些实验结果. 其中清华大学用铜铝镁合金作为阴极材料, 得到了最大100mA/cm²的宏脉冲电流密度, 腔内电流密度达到1A/cm².

为了获得更大的发射电流密度, 需要深入研究动力学过程. 本文主要结合实验结果讨论微脉冲电子枪的稳态和瞬态粒子动力学.

2 稳态和瞬态粒子动力学

次级电子倍增是指真空中的材料表面在外加射频电场作用下发生的次级电子发射和电子密度增长的谐振现象.

对于平行双表面次级电子倍增的稳态过程, 由同步条件和稳定相位范围可以做出次级电子倍增敏感曲线 (微波频率2998MHz), 见图1.

曲线A, B, C, D分别为一阶和二阶次级电子倍增间隙电压的下限和上限, 左侧纵坐标为间隙距离 D ,

当 $D = 2.73\text{mm}$ 时, 可以得到此距离下能够产生一阶和二阶次级电子倍增的间隙电压范围.

图1中倒三角连成的曲线表示在相同条件下束流动力学模拟程序SEEG^[7]计算得到的一阶饱和电流密度 J . 由于SEEG考虑了二次电子发射速度和延迟时间, 以及空间电荷效应, 间隙电压范围与一维单粒子计算结果相比有很大的展宽.

另外, 考虑到二次电子发射速度和延迟时间的随机涨落^[9], 反向次级电子倍增^[10]和背散射电子^[11]等因素, 可以进一步计算敏感曲线. 结果是各阶次级电子倍增区域均展宽, 甚至可能出现交叠.

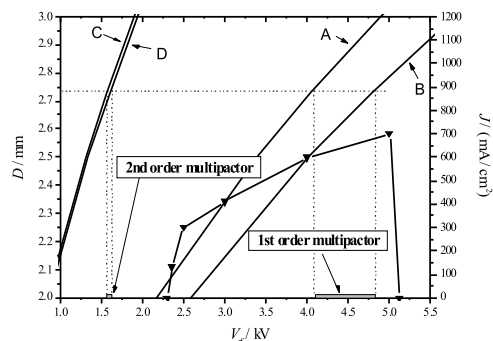


图1 次级电子倍增敏感曲线及发射电流密度

其次考虑瞬态过程. 射频腔的有载品质因数和调制器脉冲高压的斜率, 以及次级电子倍增电流的增长速度和束流负载的大小等因素决定了射频场的建场过程^[12]. 一般会出现两种情况:

一是间隙电压在稳态时恰好落在次级电子倍增的

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助
1) E-mail: zhajiy03@mails.tsinghua.edu.cn

电压范围, 次级电子倍增电流能够达到稳态; 二是间隙电压经过次级电子倍增范围并产生电流, 但最终超过上限, 而使次级电子倍增放电停止, 如图2所示.

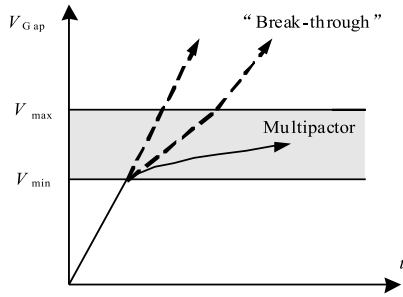
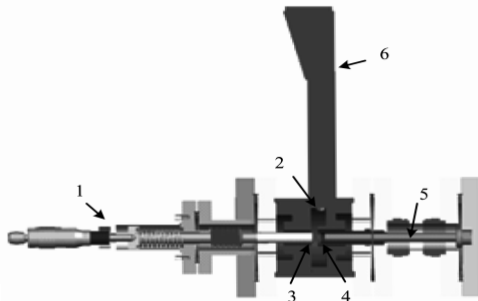


图2 射频间隙电压随时间的变化^[12]

3 实验装置

微脉冲电子枪的结构如图3所示. 当射频功率馈入腔体时, 镀有电子倍增材料的阴极和栅网之间在一定条件下会形成次级电子倍增放电, 束流从栅网一侧引出. 阴极和栅网直径均为1cm, 表面蒸镀160nm厚的MgO薄膜, 栅网透过率10%.



1. 阴极位置调节器; 2. 腔体和扼流结构; 3. 阴极;
4. 栅网; 5. 法拉第桶; 6. 耦合器、锥形波导和波导窗.

图3 微脉冲电子枪剖视图

表1列出了阴极和栅网间距 D 为2.73mm时的射频参数. 其中, 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 和品质因数 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	$Z/(\text{M}\Omega/\text{m})$	$r_s/\text{M}\Omega$
2.73	2806.65	1972	3.33	176.5	0.175

实验台由脉冲调制器、磁控管、环流器以及真空、水冷和控制系统等组成. 磁控管输出微波的中心

频率为2998MHz. 实验中真空度维持在 10^{-4}Pa . 为了准确测量发射电流, 消除二次电子的影响, 法拉第桶加工为圆锥形, 并加正偏压30V.

4 实验结果和分析

实验测得极面间距2.73mm时的发射电流随着射频功率的变化关系如图4所示.

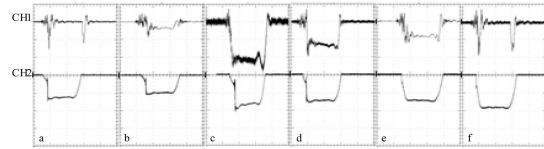


图4 微脉冲电子枪发射电流随射频功率的变化

CH1是宏脉冲电流, CH2是微波反射信号, 横坐标均为每格 $2\mu\text{s}$. 从a—f射频功率逐渐增大.

发射电流只有在一定的射频功率(或射频间隙电压)范围内才会出现, 并且随着射频功率的增大而先增大后减小.

实验还观察到, 从图4(a)的状态继续降低射频功率, 会再次出现图4(f)到图4(a)的一系列波形, 但是发射电流减小, 这是二阶multipactor效应. 以上实验结果与稳态粒子动力学一致.

图4(f)中对应于微波信号的上升和下降沿产生前后两个尖峰电流, 是由于射频间隙电压在上升或下降的过程中经过了能够产生次级电子倍增放电的范围. 图4(a)中的尖峰是二阶次级电子倍增造成的. 这些与瞬态动力学过程一致.

需要综合考虑次级电子倍增的束流负载效应、空间电荷效应、失谐以及腔的结构和射频参数等问题, 同时需要选择合适的二次电子发射材料. 配有宽带调谐装置和电场探针的进一步定量实验正在计划中.

5 结论

简要讨论了微脉冲电子枪的稳态和瞬态粒子动力学特性, 并通过模拟计算给出了发射电流密度随射频间隙电压的变化关系. 动力学理论能合理的解释实验现象, 实验结果和理论定性地一致.

参考文献(References)

- 1 Gallagher W J. The Multipactor Electron Gun. Proc. of IEEE, 1969, **57**(1): 94—95
- 2 Liska D J. Multipactoring Electron Gun for High Duty Linacs. Proc. of IEEE, 1971, **59**(8): 1253—1254
- 3 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
- 4 YANG Xing-Fan. Private communications (杨兴繁. 私人交流)
- 5 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)
- 6 PEI Yuan-Ji, SUN Hong-Bing, XIE Ai-Gen et al. Research on the Secondary Emission Microwave Electron Gun. In: Technology Committee on Accelerators, Committee on Particle Accelerators. Proceedings of the Third Symposium on Microwave and High Frequency Technology in Accelerators. Beijing: 2005. 18—22 (in Chinese) (裴元吉, 孙红兵, 谢爱根等. 二次发射微波电子枪的研制. 见: 粒子加速器学会加速器技术委员会. 第三届全国加速器微波、高频技术研讨会论文集. 北京: 2005. 18—22)
- 7 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)
- 8 ZHAI Ji-Yuan, TANG Chuan-Xiang, ZHENG Shu-Xin et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2006, **30**: 147—150 (in Chinese) (翟纪元, 唐传祥, 郑曙昕等. 高能物理与核物理, 2006, **30**: 147—150)
- 9 Riyopoulos S, Chernin D, Dialetis D. IEEE Trans. Electron Devices, 1997, **44**(3): 489—497
- 10 Riyopoulos S. Physics of Plasmas, 1998, **5**(1): 305—311
- 11 Seviour R. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, **52**(8)
- 12 Lapostolle P M, Septier A L. Linear Accelerators. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1970. 915—920

Experimental Study on the Beam Dynamics of the Micro-Pulse Electron Gun^{*}

ZHAI Ji-Yuan¹⁾ TANG Chuan-Xiang ZHENG Shu-Xin

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

Abstract The Micro-Pulse Electron Gun (MPG) is a new type of microwave electron gun that is based on the multipactor discharge. In this paper, the MPG emission currents at different RF power levels are measured and discussed. The steady-state and transient dynamics of multipactor are used to explain the experiment waveforms. The dependence of the multipactor saturation current on the RF gap voltage is also given by the SEEG code. The experimental results agree with the theory qualitatively.

Key words micro-pulse electron gun, multipactor, steady-state and transient dynamics, experimental study

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

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