

等离子体阴极电子枪的实验研究

谢文楷,黎晓云,蒙林,鄢扬,陈硕,高昕艳,刘盛纲

(电子科技大学高能电子学研究所,四川成都 610054)

摘要: 填充等离子体高功率微波器件具有独特的性能.然而等离子体正离子对电子枪的轰击通常会破坏材料阴极表面并降低其电子发射能力.解决此问题的一种新方案是采用等离子体阴极电子枪.本文设计制作了等离子体阴极电子枪,采用氦气馈气系统和脉冲调制器进行实验研究,得到电子枪放电电流与气体压强、调制器电压等的关系.实验表明,等离子体阴极可取代材料阴极作为大电流、长脉冲电子注源.

关键词: 电子枪; 等离子体; 阴极; 实验研究; 电子束

中图分类号: TN136; TN128 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0338-03

Experimental Study of the Plasma Cathode Electron Gun

XIE Wen-kai, LI Xiao-yun, MENG Lin, CHEN Shuo, GAO Xin-yan, LIU Sheng-gang

(University of Electronic Science and Technology of China, Institute of High Energy Electronics, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: The high-power microwave devices filled with plasma have unique properties. One of the major problems associated with plasma-filled microwave sources is that ions from the plasma drift toward the gun regions of the tube. This bombardment is particularly dangerous for the gun, where high-energy ion impacts can damage the cathode surface and degrade its electron emission capabilities. One of the techniques investigated to mitigate this issue is to replace the material cathode with plasma cathode. A unique plasma cathode electron gun are investigated experimentally. The PCE gun has been operated at pulser voltage up to 8kV, discharge current up to 140A, and pulse lengths up to 60 μ s.

Key words: electron gun; plasma; cathode; experimental study; electron beam

1 引言

近年来的研究表明^[1],等离子体可用于辅助电子注通过微波相互作用区的传输,并可改善电子注同电磁结构的耦合,以得到更高的器件效率.在微波源中与等离子体相关的主要问题之一是等离子体正离子以高能量朝向管子的电子枪区和收集区漂移.这一轰击对电子枪是特别有害的,在那里,高能离子碰撞可破坏阴极表面并降低其电子发射能力.为减轻这一问题而研究的一种技术是用等离子体阴极代替材料阴极.在此情况下,等离子体在封闭空腔中产生,电子从等离子体的某一边界提取并加速以形成电子注.物理上,从控制方式看,这模仿来自在 EEC(Explosive emission cathodes) 表面上的闪络等离子体的电子发射,而 EEC 等离子体密度是显著高于任何等离子体阴极至今所测试的.在等离子体电子枪中,阴极基本上是等离子体,则使由于回轰的高能粒子的破坏达到最小^[2,3].

等离子体阴极电子枪(PCE gun)使用惰性气体等离子体放电作为电子源,高导流、多孔径栅格结构来提取和加速电子以形成电子注. PCE gun 控制在源区的等离子体密度以避免等离子体闭合加速间隙并允许在高电流密度($> 20A/cm^2$)长脉冲($> 100\mu s$)提取.此外,多孔径栅格产生高导流系数电子

注($> 10\mu s$),因为每一孔径的导流系数在形成最终的电子注中是简单相加的.本文设计制作了等离子体阴极电子枪,采用氦气馈气系统和脉冲调制器进行实验研究,得到电子枪的放电电流及其与气体压强、调制器电压、维持活性电压等的关系^[4].

2 实验装置

等离子体阴极电子枪实验装置示于图1中.电子枪由空心阴极、放电阳极、加速阳极及低压电离脉冲器、高压功率电源组成.我们设计制作的电子枪结构参数如表1所示.低压电离脉冲器调制电压加在空心阴极与电离阳极之间,直流高压电源则加在电离阳极和加速阳极所构成的加速间隙之间.

表1 典型电子枪结构参数

	1# 电子枪	2# 电子枪	3# 电子枪
空腔阴极	$\phi 79 \times 99mm$ + $\phi 68 \times 42mm$	$\phi 130 \times 135mm$ + $\phi 75 \times 110mm$	$\phi 79 \times 99mm$ + $\phi 68 \times 42mm$
阳极直径及孔径	$\phi 64$ $\phi 3.0mm \times 163$ 孔 六角形排布	$\phi 64$ $\phi 3.0mm \times 163$ 孔 六角形排布	$\phi 64$ $\phi 3.8mm \times 163$ 孔 六角形排布
加速间隙*	16.4mm	15.5mm	16.4mm

*加速间隙可在典型值附近予以微调.

收稿日期:2001-12-28;修回日期:2002-04-22

基金项目:国家自然科学基金(No. 60081001)

电子枪连接于由机械泵和分子泵所组成的抽真空系统。并用压电阀 dc 电源光纤通讯装置,悬浮于 -150kV 高压之上对压电阀供电,以便控制对空心阴极馈送氦气。等离子体阴极电子枪的照片如图 2 所示。

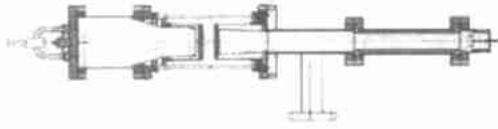


图 1 等离子体电子枪实验装置

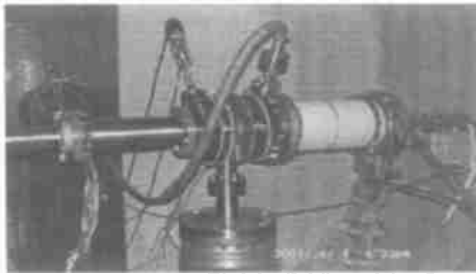


图 2 等离子体阴极电子枪

3 数值模拟

至今空心阴极等离子体电子枪的数学描述尚未有较满意的理论。目前,大多采用粒子模拟程序,采用 Monte-Carlo 方法,对空心阴极的放电过程进行模拟,并对结构进行优化,可给出带电粒子的密度、电位与电场分布。数值模拟的结果为图 3 所示,可为实际电子枪的设计提供一定的理论依据。

由图可见,在时间 $t = 40\text{ns}$ 时,电子注的束腰正好在阳极端附近,这正是我们所期待的结果。此时,电子的最大密度已有 $10^{12}/\text{cm}^3$ 的量级。

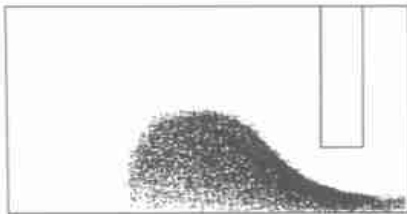


图 3 空心阴极放电过程数值模拟结果

4 实验结果与分析

4.1 电气参数测试

为了验证调制器输出脉冲波形的质量,断开直流高压电

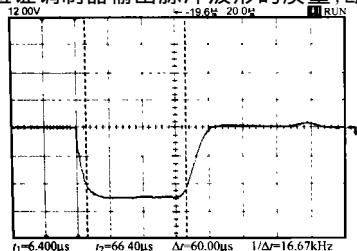


图 4 调制器输出电压波形

源,测试调制器的输出电压波形。结果为图 4 所示。可见脉冲前沿为 $6.6\mu\text{s}$,下降沿为 $15\mu\text{s}$,平均部分为 $60\mu\text{s}$,平均部分的波动 $< 5\%$ 。波形质量达到设计与使用要求。

我们也测试了维持活性电源的电流。在维持活性电压为 2kV 、空腔阴极氦气压强大约 1Pa 的情况下,测得的维持活性电流约为 10mA ,且相当稳定。证明在维持活性丝与空心阴极腔体间存在一个小电流的稳定放电,从而有利于电子枪的稳定工作。

4.2 真空与馈气系统测试

系统真空度和馈气气压的测试用安装于排管部件上的真空规进行。当真空度达到 10^{-5}Pa 量级后,打开控制氦气(或氙气)的压电阀,使真空度稳定于 10^{-3}Pa 量级,再打开控制氦气的压电阀,使真空度稳定于工作要求的气压(为 10^0Pa 量级)。然后加维持活性电压及调制器电压,进行空腔阴极放电实验。经验表明,背景真空度和馈气气压精确控制和稳定是实验成功与否的关键。典型应用与测试参数为:

- 电子枪系统真空度: $5 \sim 8 \times 10^{-5}\text{Pa}$
- $1.3 \times 10^{-5}\text{Pa}$ (烘烤温度 150°C)
- 氦气馈系统: 控制气压范围 $10^{-1} \sim 10\text{Pa}$ 连续可调
- 控制方式: 悬浮供电、光纤通讯、电压控制
- 控制精度: 0.01Pa
- 氦气(氙气)馈气系统: $\sim 10^{-3}\text{Pa}$

4.3 空心阴极电子枪

空腔阴极放电电流用调制器回路中串接环形排布并联小电阻(0.2Ω)取样测试,环形排布并联小电阻作为取样电阻是尽可能减小杂散电感对测试准确度的影响。在电子枪出口漂移区的末端,用法拉第圆筒收集传输电子注的电流,经取样电阻(0.2Ω)接地。用数字存储示波器测量取样电阻两端的压降,即可得出电流波形。

表 2 典型电子枪放电测试结果

	1# 电子枪		2# 电子枪		3# 电子枪	
氦气压强	1.6Pa	2.4Pa	1.2Pa	1.2Pa	1.6Pa	1.6Pa
维持电压	2kV	2kV	2kV	2kV	2kV	2kV
维持电流	8mA	8mA	8mA	8mA	8mA	8mA
调制器电压	9kV	5.9kV	6.3kV	6.3kV	8kV	8kV
放电电流脉宽	60μs	60μs	60μs	60μs	60μs	60μs
放电电流	166A	81.5A	93A	93A	140A	140A

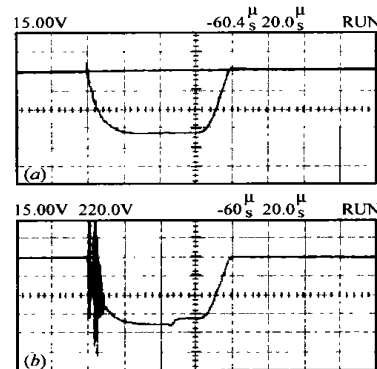


图 5 电子枪放电电流波形

我们研究了放电电流与空腔馈气压强的关系. 结果表明空腔馈气在 1Pa 到 5Pa 范围内对放电电流影响不大. 为了避免高压击穿和有利于注波互作用, 更大的压强是不可取的.

我们也研究了放电电流与调制器脉冲电压之间的关系. 实验表明放电电流的大小、波形、脉宽以及重复频率均受调制器控制. 在我们实验装置上, 放电电流的大小与调制器电压几乎成线性增长关系.

电子枪放电电流波形如图 5 所示. 可见放电电流波形的确受调制器控制, 与调制器电压波形极为相似, 细微差别系由气体低压辉光放电引起.

电子枪放电电流与调制器电压的关系为图 6 所示, 典型电子枪放电测试结果表 2 所示.

4.4 电子注传输测试

在加速间隙出口后的漂移区填充中性气体氩气(或氙气). 电子注与中性气体碰撞电离形成等离子体及离子通道. 由于 Bennett 效应, 场力 $J \times B$ 将使电子注产生自聚焦效应. 这与通常电子注必须采用外磁场(电场)聚束有很大不同. 我们实验研究了电子注在离子通道中的传输和聚焦. 在阳极后 42cm 处, 传输注电流大于 11A, 在加上一个小磁场(80 - 400Gs)后, 传输电子注电流大于 16A.

表 3 电子注自聚焦聚束系统及典型测试结果

	1 [#] 聚束系统	2 [#] 聚束系统	3 [#] 聚束系统
电子枪	1 [#] 电子枪	1 [#] 电子枪	3 [#] 电子枪
充入氩气压强	1×10^{-3} Pa	1×10^{-3} Pa	1×10^{-3} Pa
充入氙气压强	0.8Pa	0.7Pa	0.7Pa
调制器电压	5kV	4kV	4kV
直流高压	40kV	50kV	50kV
外加磁场	无	320GS	无
收集极距离*	20cm	42cm	42cm
电子注脉宽	60μs	60μs	60μs
收集极电流	22A	16A	50A

*收集极与加速间隙之间的距离.

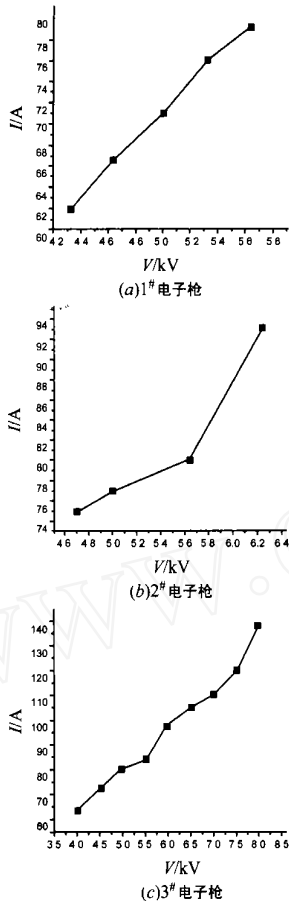


图 6 电子枪放电电流与调制器电压的关系

5 结论

空心阴极等离子体电子枪(HCP-E Gun)是一种新型的电子枪. 在空心阴极和电离阳极之间施加一定电压产生低压辉光放电, 形成等离子体, 其作用是作为电子源, 称为等离子体阴极. 这种电子枪发射电子不需要热功率、对真空条件相对不敏感, 还可承受离子轰击, 克服了热阴极空间电荷限制发射和常规冷阴极场致发射等离子体闭合加速间隙等困难.

我们经过技术攻关, 设计研制出等离子体阴极电子枪. 在电极材料、空腔容积、加速间隙、栅网结构、气体馈送压强、脉冲调制器电压等方面作了深入的实验研究, 终于成功地由低压辉光放电产生等离子体作为电子源. 电子枪典型的放电电流已达到 166A, 脉宽 60μs. 传输电子注达到 20—50A, 脉宽 60μs.

实验研究表明, 等离子体阴极可取代材料阴极, 作为一类新型的大电流、长脉冲电子注源.

致谢 感谢李明光、张冰、成永东、李存跃等同志的帮助.

参考文献:

[1] D M Gebel, et al. High-power microwave source based on an unmagnetized backward-wave oscillator [J]. IEEE Tran PS, 1994, 22(6) : 547 - 553.

[2] D M Gebel, et al. High-current, low-pressure plasma-cathode electron gun [P]. U S Patent 5537005, 1996.

[3] 谢文楷. 等离子体阴极电子枪及其特性[J]. 电子科技大学学报, 1996, 25(1) : 17 - 23.

[4] 谢文楷, 蒙林. 等离子体加载微波管技术[R]. 北京: 中国国防科技信息中心, 2001.

作者简介:



谢文楷 男, 1945年2月出生于甘肃省兰州市, 1968年毕业于四川大学物理系, 1983年获电子科技大学工学硕士, 现为电子科技大学高能物理研究所教授、博士生导师, 研究领域为相对论电子学、准光学理论与技术、高功率微波技术、等离子体电子学等, 获国家自然科学基金、教育部、电子部科技进步奖5项, 在国内外发表学术论文70余篇.



黎晓云 男, 1955年9月出生于四川省成都市, 1980年毕业于清华大学无线电电子学系, 现为电子科技大学高能电子学研究所高级工程师, 从事微波技术方面的研究工作.