

文章编号: 1007-4627(2005)01-0091-03

膺火花脉冲电子束的特征*

刘志坚¹, 江兴流¹, 乐小云¹, 文雄伟²

(1 北京航空航天大学理学院, 北京 100083;

2 清华大学机械学院, 北京 100084)

摘要: 基于电场递增效应理论, 讨论了多极板膺火花脉冲电子束的特征. 通过电子束对固体变色片和金属靶的轰击, 对膺火花电子束的不稳定性、细丝效应和自箍缩效应等现象做了研究和分析.

关键词: 脉冲电子束; 膺火花; 气体放电

中图分类号: TL99 **文献标识码:** A

1 引言

膺火花放电装置最早由德国 Christiansen 等^[1] 在 1979 年提出, 随后国内外众多实验室开展了膺火花放电研究. 具有空心阴极的膺火花放电装置可以产生峰值电流密度约为 10^6 A/cm², 功率密度约为 10^9 W/cm² 的脉冲电子束和电流密度约为 10^4 A/cm², 功率密度约为 10^6 W/cm² 的脉冲离子束. 目前对于膺火花束流产生机制尚未有统一的认识, 先后有等离子泡模型^[1]、场递增效应理论^[2]、自持自溅场模型、场增强肖特基模型^[3] 和爆炸式电子发射模型^[4] 等, 其中, 场递增效应理论更加客观地反映多极板膺火花放电过程. 随着对膺火花放电机制认识的深化和相应装置的不断改进, 膺火花放电将会在许多领域得到应用^[5-7]. 本文基于电场递增效应理论, 讨论了多极板膺火花放电机制及膺火花脉冲电子束的特征.

2 膺火花脉冲电子束的产生与电场递增效应

膺火花脉冲电子束的产生是基于场致发射过程. 单间隙膺火花放电过程的研究表明^[1], 阴极表面存在许多场致电子发射斑点, 而这些斑点分布在阴极孔的面对阳极的内径周围, 即使是用高熔点的钨、钼等金属, 也在相应的地方出现熔化的斑

点. 对于多极板膺火花放电室, 强脉冲电子束的产生存在电场递增过程. 这一过程与放电室的几何结构(电极孔径大小、电极总数和放电室总高度)、外部并联充电电容和内部气压等许多因素有关, 而强脉冲电子束和离子束的产生主要发生在阳极附近的那一对电极^[8].

实验表明, 在某一特定的气体密度、电极形状和外加电压下, 电离因子首先引起阳极附近气体电离, 产生以 10^6 m/s 的速度向阴极运动的初始游离团. 当这一游离团抵达阴极附近时, 引起阴极孔附近的电场强度急剧增加, 从而引起强的场致发射电子流. 由于电极产生的电场分布使这一电子束在穿过放电室的中心孔时, 受到很强的聚焦作用, 此时, 整个放电室尚未处于高电离, 也即高导通状态. 众所周知, 对于任何气体, 电子在 100 eV 左右有最大的碰撞游离截面, 而随着能量增长, 游离截面急剧减小, 所以从阴极发射的电子束只能在阴极附近产生较强的游离, 首先击穿阴极附近的第一个间隙. 由于多极板放电室两端并联有一较大的充电电容(通常为数百 pf), 而电容两端的电压不能突变, 因此, 全部电压加在了缩短了一个间隙的放电室. 基于同样的过程, 放电室的间隙将从阴极到阳极顺序击穿, 最后外加电压全部加在了阳极附近的最后一个间隙上. 在这一间隙内出现类似真空二极管击穿过程, 强电子束从阳极出射, 离子束从阳

收稿日期: 2004 - 08 - 31

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19275020)

作者简介: 刘志坚(1974 -), 男(汉族), 辽宁本溪人, 博士研究生, 从事强脉冲粒子束与物质的相互研究;

E-mail: lzj927@sina.com

极产生(离子束中含有阳极金属离子和放电室气体离子),穿过整个放电室从阴极射出.德国纽伦堡大学的 Christiansen 教授等^[10]用快速条纹照相机拍下了多极板火花放电室在放电过程中的发光照片,形象地证明了我们提出的电场递增效应模型.

基于以上分析可以看出:(1)放电过程与外加电压幅度、电极形状、气体密度和种类有关;(2)电子束的产生是场致发射的结果,尤其与加在最后一个间隙上的电压有关,而这一电压又与外加电容与间隙等效电容有关.

3 火花脉冲电子束的特征

基于电场递增效应,火花脉冲电子束穿过低压中性气体时,随着放电电压和工作气压等参数的不同,束流特性具有不稳定性、自箍缩效应、细丝效应和集团加速等特征.

脉冲电子束在低压气体中传输时,将发生电中和和磁中和.其不稳定性主要由径向力所决定.其径向动力学方程为

$$\beta m \ddot{r} = -eE_r [1 - f_e - \beta^2 (1 - f_m)], \quad (1)$$

其中, $\beta = v_e/c$ 为电子入射速度与光速之比, m 为电子的质量, e 为电子电荷, E_r 为轴向感应电场强度, f_m 为磁中和系数, f_e 为电荷中和系数. 电子束流的传输特性主要取决于 f_e 和 f_m . 我们试验的环境压力约为 10 Pa, 根据 Link 得到的电子束在不同气压下的空气中传输时的 f_e 和 f_m 值^[11], 即 $f_e \approx 1$, $f_m \approx 0$ 时, 式 (1) 近似为

$$\beta m \ddot{r} = -eE_r [1 - f_e - \beta^2]. \quad (2)$$

因此, 单个火花脉冲电子束进入低压气体后将经历 3 个阶段: (1) 束前端电离阶段, $0 < f_e < (1 - \beta^2)$, 由于空间电荷斥力, 束前端电子急剧扩张; (2) 径向力中和阶段, $f_e = (1 - \beta^2)$, 束流在一个平衡半径下飞行; (3) 束流自收缩阶段, $(1 - \beta^2) < f_e < 1$, 束流半径以正弦波方式不断收缩.

由于电子、离子的热运动及其随机性, 以及束流中横向电磁波及其它各种干扰因素的存在和影响, 束流在传输过程中会出现各种不稳定性, 主要由蛇管不稳定性、腊肠不稳定性和中空不稳定性等. 所有这些不稳定性都是由磁中和系数 f_m 、电中和系数 f_e 和等离子体电导率 σ 所决定的.

为了观察火花脉冲电子束的自箍缩效应和细丝效应, 在束流飞行路径的不同位置放置金属靶片、单晶硅片、酸敏变色片和交叉磁场(见图 1).

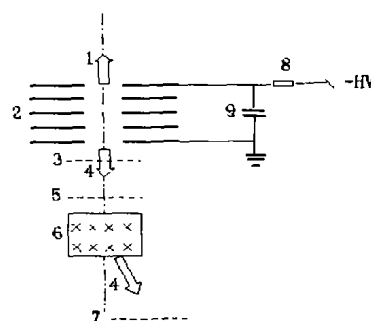


图 1 脉冲电子束发生装置及交叉磁场、金属靶、变色片的相对位置示意图

1 离子束, 2 放电室, 3 金属靶, 4 电子束, 5 单晶硅片, 6 磁场区, 7 变色片, 8 电阻, 9 电容.

能量为 44 keV, 电流为 kA 级脉冲电子束, 对置于阳极出口处的纯铁靶片进行多次轰击后出现椭圆形凹坑(见图 2), 周围呈蜂窝状. 从坑的直径和深度可以推断出, 自由磁场效应引起的自收缩作用出现在靠近阳极的最后一个间隙之内.

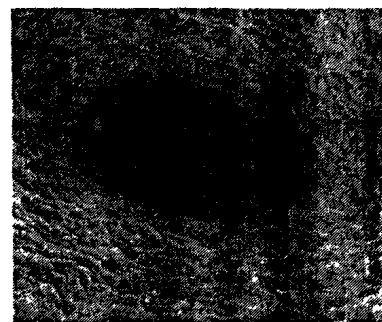


图 2 纯铁电子注入后的椭圆形微孔的 SEM 照片(放大 1 000 倍)

能量为 55 keV, 电流为 kA 级的单个电子束脉冲, 在低压气体中飞行 6 cm 后, 在单晶硅片上轰

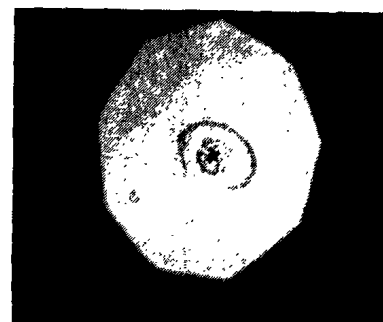


图 3 单晶硅片上的轰击斑显微照片(放大 20 倍)

击出椭圆形变色区(见图3)。

图4给出了用BH-2型光学显微镜拍摄的两个不同能量的电子束通过交叉磁场后在变色片的表面形成的细丝效应。从图中可以看出,两个能量不同

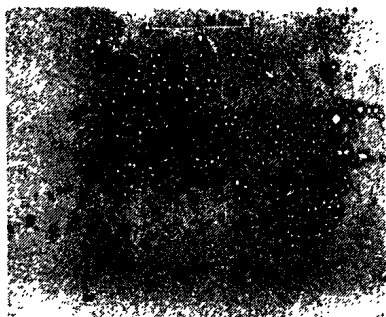


图4 两个不同能量的电子束通过交叉磁场后形成的细丝效应(放大238倍)

的电子束脉冲,在受到相交磁场的强烈扰动后,分裂成直径2—6 μm 的许多细丝。分裂后的小束团仍有很高的功率密度,变色片的基体受到明显的烧蚀作用。

脉冲电子束穿过低压中性气体时,电子束径向受到的空间电荷的斥力和磁自收缩力的不平衡是电子束发生磁自箍缩现象和细丝效应的最基本原因。

4 结论

基于电场递增效应,赝火花脉冲电子束的产生是场致发射的结果,放电过程与外加电压幅度、电极形状、气体密度和种类有关。束流具有不稳定性,自箍缩效应和细丝效应等特征。

参考文献:

- [1] Christiansen J, Schultheiss C Z. *Phys*, 1979, **A290**: 35.
- [2] Jiang X L, Han L J. *Rev Sci Instrum*, 1992, **63**(4): 2 420.
- [3] Anders A, Anders S, Gundersen M A, *et al.* *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1995, **23**: 275.
- [4] Zhu J B, Wang Z J, Zhuang J J, *et al.* *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1996, **24**: 1 285.
- [5] 韩丽君, 江兴流. *科学通报*, 1989, **34**(3): 196.
- [6] Jiang X L, Xu N. *Appl Phys*, 1989, **66**(11): 5 594.
- [7] 江兴流, 王天民, 韩丽君等. *核技术*, 1990, **13**(8): 474.
- [8] Jiang X L, Xu N. *Rev. Sci Instrum*, 1990, **61**(1): 644.
- [9] Jiang X L, Han L J. 1981, CERN/PS/Note - 81.
- [10] Stark R, Christiansen J, Frank K, *et al.* *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1995, **23**: 258.
- [11] 丁厚本, 王乃彦. *中子源物理*. 北京: 科学出版社, 1984: 431.

Characteristics of Pseudospark Pulsed Electron Beam *

LIU Zhi-jian¹, JIANG Xing-liu¹, LE Xiao-yun¹, WEN Xiong-wei²

(1 *Departement of Applied Physics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;*

2 Departement of Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The characteristics of pulsed electron beam generated by multiplate pseudospark chamber (MPC) on the basis of field escalation effects have been described in this paper. The phenomena such as instability, filament effect, and self-pinch effect of pseudospark electron beam were studied and analyzed by the bombardment of solid evident films and metal targets.

Key words: pulsed electron beam; pseudospark; gas discharge

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(19275020)