

铁电阴极用于小功率电推力器

盛兆玄^{1,2}, 冯玉军², 徐 卓², 孙新利¹

(1 第二炮兵工程学院 103 教研室, 陕西 西安 710025;

2 西安交通大学 电子材料研究所, 陕西 西安 710049)

摘 要: 分析了当前小功率电推力器对零流动无推进剂阴极的需求现状。提出铁电阴极用于小功率电推进中和器的可能性。研究了厚度为 0.5mm 的 PLZT (锆钛镧酸铅) 铁电陶瓷在低电压 (1.0~1.2kV) 条件下的电子发射性能。实验采用脉宽为 1 μ s 的单极性正高压脉冲作为激励源, 在收集极获得了脉宽为 320ns~3000ns, 最高峰值为 34A 的发射电流。在 10⁻⁴ 托的真空环境中得到了非常可靠的电子发射。

关键词: 电推进; 中和器; 铁电阴极; 电子发射

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: (2008) 02-0037-04

Ferroelectric emission cathodes for low-power electric propulsion

Sheng Zhaoxuan^{1,2}, Feng Yujun², Xu Zhuo², Sun Xinli¹

(1 Teaching and Researching Laboratory 103 of the Second Artillery Engineering Institute, Xi'an, 710025;

2 Electronic Materials Research Laboratory, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049)

Abstract: Low- or no- flow electron emitters required for low power electric thrusters have been analyzed. Feasibility of ferroelectric cathode used for neutralizer is proposed. The PLZT used in experiment is 0.5mm thick. Electron emission property of PLZT under low voltage (1.0~1.2kV) has been studied. Ferroelectric cathodes are driven by unipolar positive pulse 1 μ s in duration. Emission current 320ns~3000ns in duration with peak current up to 34A has been acquired. Reliable emission has been achieved in air background at pressures as high as 10⁻⁴ Torr.

Key words: electric propulsion; neutralizer; ferroelectric cathode; electron emission

收稿日期: 2007-07-02; 修回日期: 2007-09-05。

作者简介: 盛兆玄 (1979—), 男, 博士, 研究领域为铁电阴极技术在武器系统中的应用研究。

1 引言

电推进是利用电能加热、离解和加速工质形成高速射流而产生推力的技术。电推进系统具有比冲高、寿命长、能重复启动、推力小和控制精度高等优点,因而广泛应用于航天器的姿态控制、位置保持、阻力补偿、轨道提升、轨道修正、轨道转移、重新定位、离轨处理、深空探测和星际航行等方面^[1-3]。

随着小卫星、微小卫星、行星探测器、及深空探测、星际航行等空间探测技术的兴起,发展质量更轻、体积更小、效率更高、结构紧凑、消耗工质少、寿命长、成本低廉的小功率电推进系统已成为迫切需要。

阴极技术是在高度节流调节下,提高电推力器性能,延长寿命,向小、微型化发展的关键技术之一。对于电推进的阴极研究在于寻求减少需要的推进剂流量、延长阴极寿命、降低成本、减小推进剂清洁度要求等。目前研究正扩展到零流动阴极概念。作为一种新兴的发射阴极,铁电阴极具有发射电流密度大、抗中毒和抗离子溅射能力强、不需要流动工质、可控发射、装配灵活、成本低廉等优点,已经引起了众多研究者的兴趣。美国航空航天局格林研究中心(NASA-GRC)将铁电阴极评价为零流动阴极电子源。GRC对铁电阴极发射作了大量的实验研究,并准备应用于低功率电推力器的中和器。本文主要研究铁电阴极在小功率推力器中和器中的应用。

2 中和器

中和器是离子推力器、场效应发射离子推力器、凝胶离子发动机、霍尔推力器、回旋加速谐振离子推力器等多种推力器的关键部件。在上述推力器的工作过程中,持续喷射出正离子束,将带有负电的电子留在其中,这就形成了推力器中强大的负电场,严重阻碍了正离子的继续排出,电子积累足够多的话,甚至会将排出的正离子再吸引回来。解决此问题的方案是在喷射离子的排

气羽流附近再安装一支电子枪作为电中和器,持续向离子束中注入电子,既可以中和离子束,又避免了推力器过度带电,如图1所示。

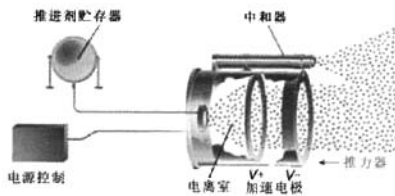


图1 离子推力器中和器示意图

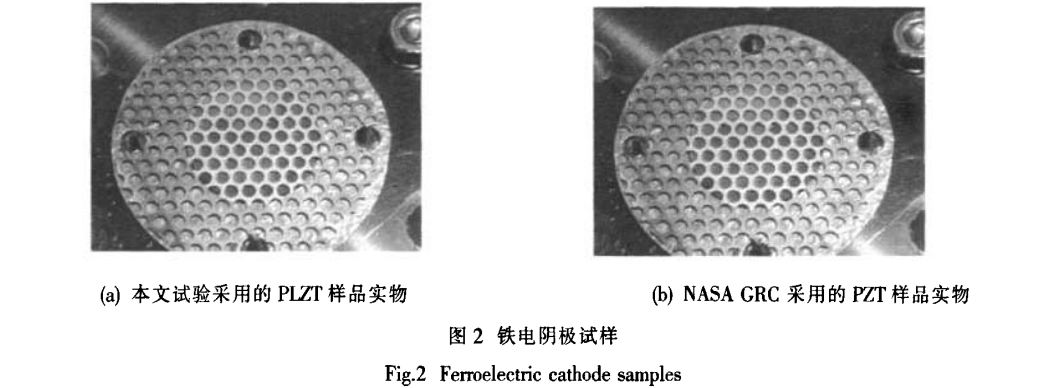
Fig.1 Schematic of the neutralizer in ion thruster

早期的电推力器中和器是热钨阴极,热钨阴极不需要推进剂,但是在电推力器的工作条件下,其寿命太短。场致发射阴极阵列被广泛地研究并作为无推进剂阴极,不幸的是当其暴露在 10^{-8} 托以上的环境中时,离子溅射和表面腐蚀限制了场致发射阴极的寿命。目前电推力器使用的中和器是空心阴极,空心阴极工作需要稳定足够的推进剂,复杂的推进剂贮供系统降低了航天器的有效载荷,不利于电推进系统小型化、微型化发展。美国新研制的小型胶体离子推力器,中和器采用碳纳米管场发射阴极,这种阴极制作工艺复杂,发射场强高。相比之下,铁电阴极作为无推进剂发射阴极,抗“中毒”能力强,能够工作在 10^{-5} 托以下的低真空环境中,而且发射电流密度大,理论上可产生 $105\text{A}/\text{cm}^2$ 的最大电流密度,在小功率电推进系统中有广阔的应用前景。

3 铁电阴极

最先报道铁电陶瓷表面高电流密度电子发射的是Hartmut Gundel。在数毫米厚的铁电陶瓷两极加载几千伏的快速脉冲电压,陶瓷表面将发射 $1\sim 100\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度。不发射电子的表面全部被导体电极覆盖,通常称为背电极。陶瓷发射电子的一面,被栅格形状的电极覆盖,通常称为栅电极。如图2所示,(a)为本文实验中的铁电阴极试样,(b)为NASA GRC采用的锆钛酸铅(PZT)试验样品实物图。对铁电阴极发射机制的基本假

设是: 电畴快速极化反转^[9]、“三相点”发射假设^[10]和等离子体爆炸发射理论^[8]等。铁电阴极已经应用于行波管阴极^[7]、气体开关、平板显示等领域, 它能够工作在 $10^{-7}\sim 1$ 托的真空环境中。

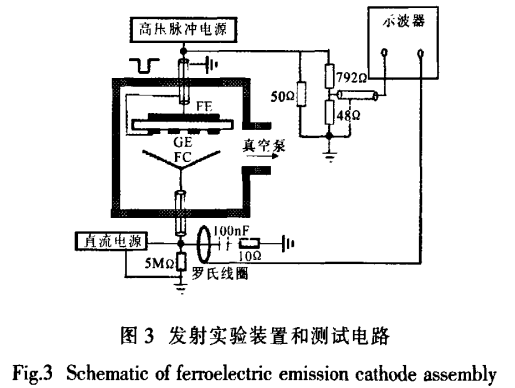


4 电子发射实验

实验中选用厚度为 0.5mm, 半径为 9mm 的 PLZT (锆钛镧酸铅) 铁电陶瓷。陶瓷栅电极的有效发射面积 (裸露的陶瓷部分) 为 0.43cm^2 , 如图 2(a)所示。铁电阴极发射试验装置及测试电路由一台上升前沿为 10ns, 最高输出电压为 2kV 的高压脉冲电源、装有铁电阴极的真空室、分压电路和罗氏线圈构成, 如图 3 所示。试验中, 铁电阴极的真空室真空度保持在 4×10^{-4} 托。

图 3 中 FE 为铁电样品; GE 为条栅电极; FC 为电子收集极, 是一圆锥形石墨, 用来测量到达的发射电流和电荷。来自脉冲发生器的高压脉冲加到阻抗匹配的负载上, 引起铁电样品中的电子发射。发射出表面的电子以非零的速度向 FC 渡越, 通过双向匹配的测量电路可以观测和

记录到达 FC 的电子电流和跨接在样品两极之间的激励电压。根据样品的结构和尺寸, 可以计算样品发射的电流密度。



5 实验结果与讨论

表 1 为实验中得到的实验结果。

表 1 电子发射试验结果

Tab.1 Results of electron emission experiment

脉冲幅值 /kV	脉冲极性	脉宽 /ns	电子收集极 电压/V	电流幅值 /A	电流脉宽 /ns	电流密度 /A·cm ⁻²
1.0	正	1000	0	0.1	320	0.23
1.1	正	1000	0	0.15	450	0.37
1.2	正	1000	0	0.35	2076	0.81
1.2	正	1000	500	34	3129	79

图4为实验中得到的典型波形。从表1中可以看出,当电子收集极偏压 $U_1=0$ 时,脉冲电压升至1.0kV,示波器才能检测到发射电流,只有230~280mA/cm²。随着脉冲电压的升高,发射电流明显增大,这说明随着样品两端场强的增加,发射电子的数量增加,发射电子的初动能也随着增加,这样有更多的电子能够到达电子收集极,因此我们可以通过调节激励电压的幅值来控制铁电阴极的发射和电流的大小。石墨电子收集极加500V偏压,脉冲电压大于800V时就有电流出现,而且当脉冲电压为1.2kV时,电流突然增大至79A/cm²,这可能是栅极表面形成的大量等离子体中的电子在抽取电压下被加速到收集极,从而形成较大的电子发射。从图4中可以看出,在电压下降沿之前有发射电流出现,电子的产生可能来源于真空、介质和金属“三相点”处电子发射,在条形栅极切向电场加速下,电子进一步轰击裸露出的陶瓷,产生等离子体,从而形成等离子爆炸发射。发射电流的最大值出现在脉冲电压的下降沿,这与铁电陶瓷内部电畴反转有关,在下降沿处,电场的迅速消失导致了电畴的突变 ΔP ,由于变化很快,陶瓷表面屏蔽电荷来不及达到新的平衡,形成了非常强的自洽电场,表面电荷在自洽场的作用下,向表面发出,从而形成发射电流。

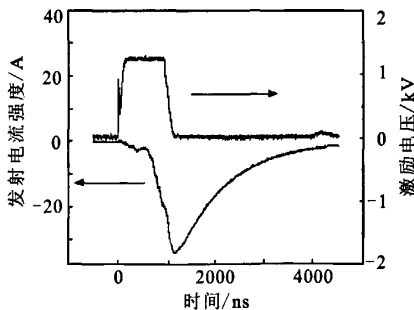


图4 激励脉冲和抽取电场下测量的发射电流波形

Fig.4 Emitted current and positive pulse wave forms measured under an external extraction potential

6 结论

在单极性正脉冲激励下,从PLZT铁电陶瓷

的表面成功地获得了较强的发射电流。不加抽取电压时,得到了最大810mA/cm²的发射电流密度。收集极加500V抽取电压时得到了最大79A/cm²的发射电流密度。用于电推进系统中中和器,要求铁电阴极有连续可靠的电子发射,试验中采用的是单极性脉冲,所得到的只是电流脉冲。为得到可靠连续的电子发射,需要在铁电陶瓷的两端加载一定频率的射频电压脉冲。2002年,美国NASA GRC采用PZT陶瓷在70~400Hz射频电压激励下得到了10~700 mA/cm²发射电流密度。通过调节激励脉冲电压幅值,来控制发射电流的大小。这表明,射频电压驱动下铁电阴极稳定可靠的电子发射能够中和电推力器喷出的离子流,在电推力器中和器方面有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 张郁. 电推进技术的研究应用现状及其发展趋势[J]. 火箭推进, 2005, 31(2): 27-35.
- [2] 杨乐, 李自然, 尹乐, 等. 脉冲等离子体推力器研究综述[J]. 火箭推进, 2006, 32(2): 32-36.
- [3] 牛禄, 王宏伟, 杨威, 等. 用于微小卫星推进装置的脉冲等离子体推力器[J]. 上海航天, 2004, (5): 39-42.
- [4] Rosenman G, Shur D, Garb K, et al. Polarization Switching in Ferroelectric Cathodes [J]. J Appl. Phys. 1997, 82(7): 772-778.
- [5] Puchkarev V F, Mesyats G A. On the Mechanism of Emission from the Ferroelectric Ceramic Cathode[J]. J Appl. Phys. 1995, 78(11): 5633-5637.
- [6] Dunaevsky A, Krasik Y E, Felsteiner J, et al. Electron/Ion Emission from the Plasma Formed on the Surface of Ferroelectrics I. Studies of Plasma Parameters without Applying an Extracting Voltage [J]. J Appl. Phys. 1999, 85(6): 8464-8473.
- [7] Rosenman G, Shur D, Krasik Y E, et al. Electron Emission from Ferroelectrics[J]. J. Appl. Phys. 2000, 88(12): 6109-6161.

(编辑: 陈红霞)