

# 大电流稳定发射铁电阴极的模拟与实验研究\*

张庆辉 郑曙昕<sup>1)</sup> 唐传祥 李泉凤 李文君

(清华大学工程物理系 北京 100084)

**摘要** 讨论了铁电阴极的发射机理,借助MAFIA对不同电极结构的铁电阴极表面电场分布进行了模拟计算.计算中发现,发射面电极结构对铁电阴极表面三界点处的场增强效应影响很大,特别是具有孤岛电极结构的铁电阴极具有更大的三界点场强,从而获得更大和更稳定的发射电流.通过对电极结构及其工艺的改进,使用PLZT铁电阴极在实验中得到了大于100A的电流.

**关键词** 铁电阴极 孤岛电极 快极化反转 表面等离子体

## 1 引言

铁电阴极作为近年来新兴的一种强流电子束源,在高功率微波、加速器、高功率开关、平面显示等领域都有很好的应用前景.相对于热阴极和光阴极等传统阴极,铁电阴极具有很多独特的优点,如:高电流密度;较低的发射度;不易中毒;常温工作;工艺简单成本低等.

目前最常用的铁电阴极都是在片状铁电陶瓷表面覆盖特定形状金属电极,通过外电场激励等手段改变阴极表面的电荷平衡,从而实现电子发射的.这种阴极结构最早由H.Riege等人于1988年提出<sup>[1]</sup>,并在实验中发现了大于100A/cm<sup>2</sup>的发射电流.从那以后,有关铁电阴极的研究迅速开展,研究者分别独立发展了快极化反转、场致发射、表面闪络等离子体等发射理论.

本文根据铁电阴极的发射机理,通过MAFIA软件的静电场模拟,提出了一种可以得到更稳定电子发射的阴极发射面电极结构,并在实验中获得了较为理想的结果.

## 2 铁电阴极发射机理概述

快极化反转理论<sup>[2]</sup>指出,铁电阴极的内极化场使得阴极的表面附有电荷(自由电荷以及来自表面或杂

质能级中的电荷),以保持中性.如果外加电场在很短时间内逆转了极化场,那么表面上原先用于中和作用的电子便被排斥出来,形成铁电发射.

由于快极化反转理论并不能解释高介电常数顺电相铁电材料中发生的强流电子发射现象.有人提出了三界点场致发射理论<sup>[3]</sup>,其基本观点是:外场作用下铁电体内部的电场强度正比于其介电常数,当铁电材料的介电常数很高时,在金属-介质-真空三界点处的电场强度可达10<sup>7</sup>V/cm量级以上,电场增强可以引起微爆炸过程,进一步导致爆炸电子发射(Explosive Electron Emission, EEE).

近年来随着研究的深入,人们开始关注铁电发射中等离子体的产生过程<sup>[4]</sup>.极化反转或场致发射产生的先导电子,在切向场作用下,沿介质表面运动,触发电子雪崩过程,形成闪络等离子体,最后等离子体中的电子在阳极电压作用下被抽取出来.

实际的铁电阴极发射过程是比较复杂的,由于通常的铁电阴极材料同时具有较高的压电常数和介电常数,以上几种机制一般同时存在并相互关联,但无论是基于以上哪种理论的铁电发射,阴极表面特别是三界点附近的电场分布都是十分重要的,而发射面电极的加工工艺和结构则是影响阴极表面场分布的关键.

目前,针对铁电阴极电极结构的研究已经引起很多国内外科研机构的重视,CERN的H.Gundel等人利用电磁场计算软件MAFIA模拟了极化反转模型下铁

2005-03-09 收稿

\* 国家高技术研究发展计划(863)资助

1) E-mail: zhengsx@mail.tsinghua.edu.cn, zhqh02@mails.tsinghua.edu.cn

电阴极内部纵向电场分布情况<sup>[5]</sup>, 指出极化反转引发的电子发射只能发生在铁电阴极表面接近三界点的裸露陶瓷部分; INFN的I.Boscolo等人在使用不同电极结构的铁电阴极进行发射实验后指出<sup>[6]</sup>, 相对传统栅网型电极而言, 具有孤岛型电极结构的铁电阴极可以获得更稳定的发射.

### 3 模拟与分析

图1(a)所示为目前较常用的铁电阴极所具有的发射面电极结构, 即金属栅条与环形电极相连成一体, 在此基础上切断部分金属栅条与环形电极的连接, 如图1(b)所示, 可使阴极表面形成若干栅条形孤岛电极. 为了研究不同电极结构对铁电阴极内电场分布的影响, 使用MAFIA的S模块对两种结构的铁电阴极分别进行静电场模拟, 简化后的阴极截面及其电场分布如图2所示. 从图中可以看出, 孤岛电极的引入可以显著改变铁电阴极中的电场分布情况, 使电场更加集中在接地电极的三界点附近. 另外, 具有孤岛电极的铁电阴极, 其表面电场在两电极之间的切向分量始终沿同一方向, 这更有利于电子的切向运动形成表面闪光等离子体.

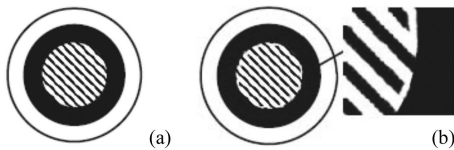


图1 铁电阴极发射面电极结构示意图

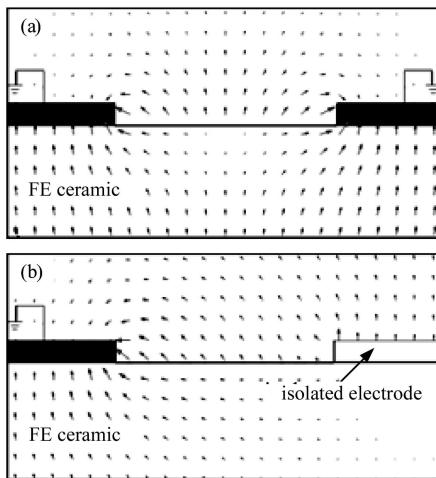


图2 MAFIA模拟铁电阴极电场分布示意图  
(a) 完整电极; (b) 有孤岛电极.

根据铁电阴极发射机理的解释, 极化反转发生在铁电陶瓷内部, 主要由垂直于阴极表面的纵向电场分

量引发, 而先导电子引发等离子体的过程则是陶瓷表面外切向电场作用的结果, 两种机制均发生在三界点附近. 利用MAFIA的模拟结果, 对图2中两种电极结构三界点附近的电场进行定量比较, 从图3中的比较结果可以看出, 具有孤岛电极的铁电阴极, 无论是陶瓷内部的纵向场, 还是其表面切向场都明显大于完整电极的铁电阴极.

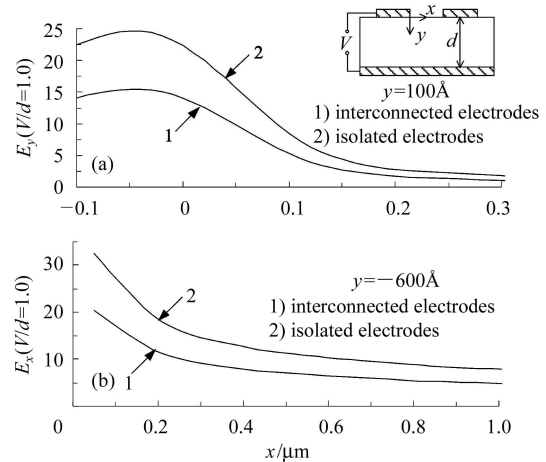


图3 不同电极结构铁电阴极三界点附近电场比较  
(a) 阴极材料内深度100Å处纵向电场( $y$ 分量);  
(b) 阴极材料外600Å处切向电场( $x$ 分量).

由此可见, 有孤岛电极的铁电阴极具有更显著的三界点场增强效应, 这对于铁电发射过程中的极化反转、场致发射、表面等离子体产生都是十分有利的, 使得铁电阴极可以在较低的脉冲电压下实现稳定电子发射.

### 4 发射实验

实验中选用的阴极材料均为PLZT8/65/35型铁电相铁电陶瓷, 这种材料具有良好的介电和压电性能, 阴极直径2cm, 厚度3mm, 采用烧银法制备前后表面电极, 背电极为实电极, 发射面电极加工成图1中所示的两种电极结构以便比较, 即图1(a)中的普通栅条型结构和图1(b)中具有孤岛电极的栅条型结构. 实验真空度为 $2.7 \times 10^{-3}$ Pa, 样品前电极接地, 背电极加脉宽250ns的负高压脉冲触发电子发射, 收集阳极为石墨, 阴阳极间距离40mm, 使用6595型PEARSON线圈测量阳极收集到的电流, 在触发脉冲4000V时, 使用普通栅条型电极的铁电阴极并未得到发射电流, 而在相同条件下使用带孤岛电极的铁电阴极则观察到了稳定的电子发射, 实验中在不同阳极抽取电压下分别记录了发射电流波形.

为了观察铁电发射中具有初始动能的电子, 首先在阳极电压为 0 的条件下进行实验, 测得的电流波形如图 4 所示, 发射电流脉宽很窄, 峰值处于触发脉冲的后沿, 电流强度约为 1.2A, 这部分电子主要由阴极表面的极化反转和场致发射产生, 而表面闪络等离子体中的电子由于几乎没有初动能, 并不能到达阳极形成电流。

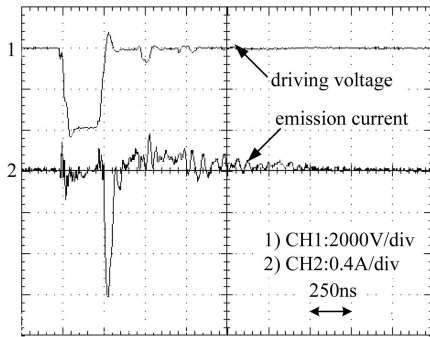


图 4 无阳极抽取电压时铁电阴极发射电流波形

保持触发电压不变的条件下, 在石墨阳极施加正偏压, 随着电压的升高, 发射电流增长很快, 阳极偏压 +200V 时测得的电流波形如图 5 所示, 其电流峰值达到 110A, 远远高于无抽取电压时的铁电阴极发射电流. 对于这一实验结果可有如下解释: 三界点处产生的先导电子, 在切向场的作用下, 穿过介质表面并迅速增殖, Miller 称之为表面二次电子雪崩发射<sup>[3]</sup>(surface secondary electron emission avalanche), 增殖过程中原先吸附在铁电材料中的气体被释放出来, 释放出的气体一部分被表面切向运动的电子电离, 形成表面等离子体, 同时, 由于等离子体中的电子被阳极偏压抽取出来, 打破了刚刚形成的表面等离子体电荷平衡环境, 使得剩余的气体被进一步电离, 由于整个表面等离子体增殖过程持续时间较长, 电流峰值出现在触发电压后 12 $\mu$ s 左右, 此时表面闪络等离子体已经在发射中起主导作用。

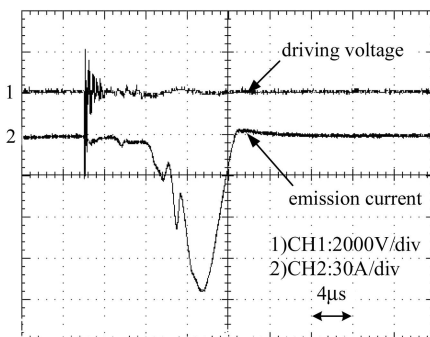


图 5 阳极电压 +200V 时铁电阴极发射电流波形

将阳极偏压由正值调节为负值, 可以观察到阳极电流逐渐减小到零, 最后变为反向的离子电流, 如图 6 所示, 当阳极电压为 -600V 时, 阳极电流稳定在 0.2A 左右, 这就直接地证明了铁电发射过程中等离子体的产生. 图中在触发脉冲的前沿附近即可观察到离子流, 说明三界点放电时间远远小于触发脉冲的持续时间。

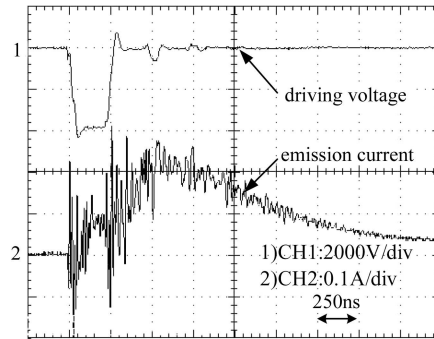


图 6 阳极电压 -600V 时铁电阴极发射电流波形

对实验结果与国内外已有的铁电发射结果<sup>[7]</sup>进行比较, 无抽取电压条件下, 孤岛电极铁电阴极与传统铁电阴极发射电流密度一般都小于 10A/cm<sup>2</sup>, 电流脉冲均位于触发脉冲的前沿或后沿, 即此时两种铁电阴极的发射性能相近; 当存在阳极正抽取电压时, 虽然发射电流密度都能达到 100A/cm<sup>2</sup> 以上, 但传统铁电阴极的发射电流脉宽一般仅为几百 ns, 而孤岛电极铁电阴极的发射电流脉宽可以达到 10 $\mu$ s 以上, 这在实际应用中有利于束流的引出. 同时, 孤岛电极铁电阴极还具有较低的触发阈值和较好的稳定性。

## 5 讨论与总结

PLZT 铁电阴极的电子发射是多种机制共同作用的结果, 除了三界点场致发射和快极化反转铁电发射外, 还有由此引发的表面等离子体增殖过程。

理论模拟和实验结果均表明, 使用带有孤岛电极结构的铁电阴极可以在较低电压下获得稳定的宽脉冲电子发射. 但由于发射过程中的较强的三界点放电与表面闪络等离子体效应, 工作一定时间后的铁电阴极, 发射面电极出现了比较明显的腐蚀, 这一问题可以通过改进电极材料等手段来解决. 在最近的实验中, 使用铜电极作为发射面电极, 已经使铁电阴极的发射寿命得到大幅提高. 下一步的工作主要是通过改变触发与抽取电压等实验条件, 进一步改善阴极寿命与铁电发射的束流品质。

## 参考文献(References)

- 1 Gundel H, Reige H. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, 1989, **A280**: 1
- 2 Auciello O, Ray M A, Palmer D et al. Applied Physics Letters, 1995, **66**: 2183
- 3 Miller H C. IEEE Transactions, Electrical Insulation, 1989, **24**: 765
- 4 Shur D, Rosenman G. Applied Physics Letters, 1997, **70**: 574
- 5 Gundel H. Electron Emission from Ferroelectrics. In: Science and Technology of Electroceramic Thin Films. Norwell: Kluwer Academic, 1995. 335
- 6 Boscolo I. Ceramic Disks as Efficient and Robust Cathodes. In: Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. New York, 1999. 1982
- 7 Rosenman G, Shur D. Journal of Applied Physics, 2000, **88**: 6109

## Simulation and Experimental Investigations of an Efficient and Stable Ferroelectric Cathode\*

ZHANG Qing-Hui ZHENG Shu-Xin<sup>1)</sup> TANG Chuan-Xiang LI Quan-Feng LI Wen-Jun

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

**Abstract** The mechanism of electron emission from ferroelectric cathode is introduced. Distribution of the applied static field in ferroelectric cathodes is simulated by MAFIA codes. It is shown that the structure of front electrode can obviously influence the static field at the triple-point of ferroelectric cathode. A ferroelectric cathode with isolated electrodes can attain stronger multiplicative field at the triple-point, which may be helpful in getting efficient and stable electron emission. In the recent experiments, we have already got stable electron emission over 100A from a PLZT8/65/35 cathode with isolated electrodes.

**Key words** ferroelectric cathode, isolated electrode, polarization reversal, surface plasma

---

Received 9 March 2005

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

1) E-mail: zhengsx@mail.tsinghua.edu.cn, zhqh02@mails.tsinghua.edu.cn