

文章编号:1007-2780(2009)02-0174-05

铁电阴极低真空电子发射性能的分析

蔡雪梅¹, 周应华², 吴贵能³

(1. 重庆邮电大学 光电学院, 四川 重庆 400065, E-mail:caixm@cqupt.edu.cn;
2. 重庆邮电大学 计算机学院, 四川 重庆 400065; 3. 重庆邮电大学 光电学院, 四川 重庆 400065)

摘 要: 采用锆钛酸铅(PZT)铁电阴极, 在高真空 4×10^{-3} Pa 和低真空 1.4 Pa 条件下分别进行了电子发射实验。对收集电流波形进行积分, 计算出收集电荷, 低真空与高真空的电荷比值为 0.193 3, 说明低真空条件下发射出的电子损失较大。运用分子运动理论和等离子体放电理论对发射电子损失的原因进行了分析。通过分子运动理论计算了分子碰撞对到达收集极的电子数目的影响, 得到的低真空与高真空的电子到达几率分别为 89.58% 和 99.97%, 二者的比值为 0.896 1。该数值与通过实验收集电流波形计算出的到达电子比值相差很大。考虑低真空下等离子体的作用, 发射电子除了与气体分子碰撞有部分损失外, 还有通过等离子体和栅电极形成的对地放电损失。由等离子体放电理论计算出等离子体覆盖栅电极时间为 23.8 ns, 与低真空的收集电流振荡周期 20 ns 非常接近, 是低真空下等离子体放电损失的有力证明。

关 键 词: 铁电阴极; 分子运动论; 等离子体放电
中图分类号: TN141 **文献标识码:** A

1 引 言

作为电子源的阴极材料在显示技术、核技术、激光技术、真空电子技术及微电子技术等各方面均有广泛的应用。根据驱动方式的不同, 阴极材料分为热阴极、光阴极和场阴极。铁电阴极是场阴极的一种, 其研究受到重视始于 1989 年, 欧洲原子核研究委员会(CERN)的 Hans Riege, Hartmut Gundel 等人在锆钛酸铅系铁电陶瓷中获得了 160 A/cm^2 的发射电流密度。这一结果引发了各国研究机构和大学近 20 年的研究热潮^[1-4], 如美国国家航空航天局(NASA)、劳伦兹国家实验室(LLNL)、康奈尔大学、麻省理工等离子科学和聚变中心, 俄罗斯的物理实验室 P. N. Lebedev, 一些大公司如日本东芝、荷兰菲力普等。我国的工程物理研究院、西北核技术研究所、清华大学、电子科技大学、浙江大学、第二炮兵工程学院和重庆邮电大学等也开展了这方面的研究。

铁电阴极作为强流电子束源, 在加速器、平面显示、自由电子激光器、X-射线和微波源和高功

率开关管等方面都有重要应用, 尤其是在既要求强发射电流密度又要求轻巧紧凑和低成本的平板显示器领域, 铁电阴极的优势更能得到充分发挥。平板显示器主要包括液晶、等离子、电致发光和场致发射显示器。场致发射显示器兼顾了传统阴极射线管(CRT)的图像质量好与液晶、等离子、电致发光显示器重量轻、体积薄的特点, 是一种综合性性能占优势的平板显示技术。目前法国、美国、俄罗斯、日本、韩国、中国台湾地区等都在大力开发。场致发射显示器的阴极材料主要有高熔点金属(Ti、Mo、W 等)、半导体材料(Si、SiC、GaAs)、碳质材料(金刚石材料、类金刚石材料、碳纤维、纳米结构碳和碳纳米管等^[5])和宽禁带半导体材料(GaN、ZnO^[6]等)。铁电阴极材料和以上材料相比较, 具有以下优势^[7-10]:

- (1) 发射电子密度高 ($0.5 \sim 800 \text{ A/cm}^2$), 可保证高显示亮度;
- (2) 发射电子能量高 (-130 eV), 不需加速电子的装置;
- (3) 发射起始阈值低, 相同发射密度所对应的

激励电压更低,可大幅降低功耗;

(4)需要的工作真空度更低(PZT 薄膜在 $1.3\sim13\text{ Pa}$ 时发射电子密度可达 100 A/cm^2),制造更容易。

真空显示器件的高真空度难以长期保持,所以器件不可避免地要在较低真空度下工作。低真空下的电子发射性能对铁电阴极显示器的寿命有非常重要的影响。本文研究了低真空环境下 PZT 阴极的发射性能并与高真空环境下的性能进行了对比。运用分子运动理论和等离子体放电理论对低真空环境下发射电子损失的原因进行了分析。认为在低真空环境下,收集极所收集到的阴极发射电子之所以大幅减少,除了与气体分子碰撞有关,大部分损失来自于通过等离子体和栅电极形成的对地放电。实验和分析计算结果表明,提高低真空电子发射性能的关键在于改善阴极的表面性能和设计更为合适的栅电极结构。

2 实 验

PZT 阴极材料的制备方法如下:

选用 Pb_3O_4 、 La_2O_3 、 ZrO_2 、 TiO_2 、 SnO 和 MnO_2 等原料,按一定比例配好后放入尼龙球磨罐中球磨 40 h,然后在 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 预烧 2 h。造粒后将粉料压成直径为 30 mm、厚度约为 3 mm 的圆片,在 $1\text{ }160\text{ }^\circ\text{C}$ 烧结 1.5 h,得到致密度良好的样品。样品表面抛光后,被银极化,去除银层后蒸镀金电极。预极化时,施加正极性电压的一面为实电极(SE),而另一面为条栅电极(GE),并使该面向集电极(FC)放置。周围相互连接的 $200\text{ }\mu\text{m}$ 宽的金栅电极为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 宽的裸露铁电材料所间隔。

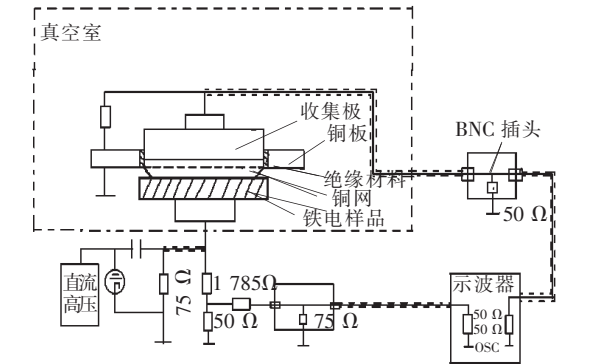


图 1 电子发射实验装置

Fig. 1 Electron emission device

来自脉冲产生器的一个负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电极之间的激励电压。

发射装置如图 1 所示。

3 结果与讨论

图 2 和 3 分别为收集到的 PZT 阴极在真空度为 1.4 Pa 和 $4\times10^{-3}\text{ Pa}$ 时的激励电压波形和发射电流波形。通过对收集电流波形积分,可以求出收集到的发射电子总数目。低真空的积分结果为 $5.8\times10^{-7}\text{ C}$,高真空的积分结果为 $3.0\times10^{-6}\text{ C}$,二者比值为 0.193 3。可以看出,低真空下收集到的发射电子总数目明显减少。

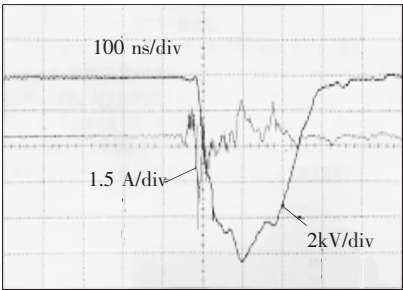


图 2 低真空下收集到的激励电压和发射电流波形
Fig. 2 Collected current and drive voltage under low pressure

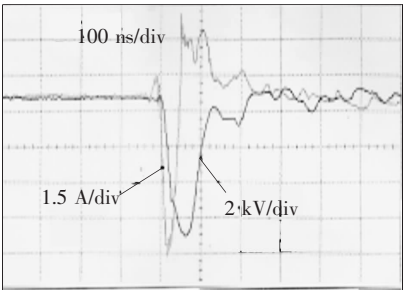


图 3 高真空下收集到的激励电压和发射电流波形
Fig. 3 Collected current and drive voltage under high pressure

根据铁电阴极电子发射的快极化反转理论,快极化反转致电子发射包括 4 个过程:自发极化、电荷屏蔽、快极化反转和屏蔽电荷的发射。铁电体在外电场作用下发生极化,电偶极子呈单向排列,形成铁电相。被表面限制的电偶极子,具有不配对的正负极性束缚电荷,在宏观上表现出极性,

即自发极化。如果表面束缚电荷被极性相反的电荷补偿,极性就被屏蔽了。施加外电场,会导致极化的转向,此时将在铁电体表面出现大量非补偿性电荷,在表面引起强瞬变电场。非补偿性电荷的出现是由于 P_s 的快速反转时间(即开关时间)和表面屏蔽电荷的 Maxwell 松弛时间的差异造成的,开关时间一般短于松弛时间,极化反转之后就有一部分表面电荷来不及被屏蔽而呈现出宏观极性。未被屏蔽的电荷之间的斥力以及材料内电场的作用使多余的电子越过表面势垒而向真空发射。

铁电材料极化改变在表面产生的非屏蔽电荷密度为:

$$\Delta\rho = \Delta P_s \quad (1)$$

由于采用的是同一种样品且极化激励电压相同,所以可认为不管是在高真空还是低真空环境下,铁电材料极化改变在表面产生的非屏蔽电荷密度相等,发射出来的电荷数目也相等。但低真空下收集到的电子数目减少,其原因之一是低真空下气体分子的密度更大,发射出的电子将与更多的气体分子碰撞,能量损失更多,到达收集极的就相应减少。根据气体分子动力学理论,可以计算电子到达的几率。

气体分子的平均自由程为:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 p} \quad (2)$$

其中 n 为气体分子数密度, σ 是气体分子的有效直径, k 是波尔兹曼常数, T 是温度, p 是压强。

电子在气体中运动的平均自由程 $\bar{\lambda}_e$ 为:

$$\bar{\lambda}_e = \frac{4}{\pi\sigma^2 n} = \frac{4kT}{\pi\sigma^2 p} = 4\sqrt{2}\bar{\lambda} \quad (3)$$

电子在气体中运动的自由程大于一给定长度 X 的几率为:

$$P_e(\lambda_e > x) = \exp\left(-\frac{x}{\bar{\lambda}_e}\right) \quad (4)$$

利用这种分布规律,结合平均自由程计算公式(2)、(3),可以计算出做定向运动的电子束流穿过空间气体时到达收集极的几率。

取空气的分子有效直径 $\sigma = 3.72 \times 10^{-10}$ m, 发射表面与收集表面距离 $x = 3$ mm, 可以计算出在低真空度 1.4 Pa 时, 电子的到达几率为 89.58%; 在高真空度 4×10^{-3} Pa 时, 电子的到达几率为 99.97%。二者的比值为 0.896 1, 和前面根据收

集电流波形计算出的电荷比值 0.193 3 相差巨大。说明分子碰撞引起的电子损失只是很小一部分, 大部分发射电子由于其它原因发生损失而未能到达收集极。

D. Shur G. Rosenman 和 Ja. E. Krasik 等人对表面电子和离子电流的研究证明: 铁电体表面存在等离子体^[12]。等离子体是由铁电体的表面放电产生的, 初始电子和沿介质表面的切向电场是表面放电的重要条件。更深入的研究表明: 表面放电是由金属-介质-真空形成的三结在亚微秒时间内的高电压下发射电子而产生的。在切向电场作用下, 绝缘体表面电子雪崩产生, 切向电场与阳极-阴极-绝缘体系统的形状有关。极化反转首先出现在电极及靠近栅电极的铁电体处, 产生的非屏蔽表面电荷引起高表面切向电场, 在未反转区和反转区引起的切向电场导致电子雪崩和覆盖整个表面的等离子体。由此可以认为: 放电所必须的初始电子和切向电场均来自铁电体极化反转。正是在此意义上, 可以说等离子体是由铁电体极化反转现象产生的。

真空度越低, 产生等离子体所需的场强越低。本实验所采用的低真空度为 1.4 Pa, 在电场作用下易于产生等离子体。等离子体在样品表面的传播速度 $V_{pp} = 8.4 \times 10^5$ cm/s, 栅电极间隔为 $d = 200$ μ m, 可计算出等离子体覆盖整个电极的时间为:

$$t = d/V_{pp} = 23.8 \text{ ns} \quad (5)$$

观察图 2 的电流波形, 可以看到一共出现了 5 次有规律的振荡衰减, 间隔时间为 20 ns, 和等离子体覆盖整个栅电极的时间 23.8 ns 非常接近。可以认为: 在低真空下, 每间隔约 20 ns, 从铁电体表面发射出来的电子, 就通过等离子体覆盖栅电极而直接放电到地 1 次, 大部分发射电子就不会再通过真空隙到达收集极, 因此收集到的电流只有发射出来的一小部分, 并且呈现出周期性的振荡衰减, 这和图 2 观察到的结果是一致的。而在高真空下, 由于没有达到等离子体产生所需的电压, 没有等离子体存在, 发射电子就不会通过栅电极放电, 因而大部分到达收集极, 即图 3 所示结果。

4 结 论

采用 PZT 阴极, 在高真空 4×10^{-3} Pa 和低真空 1.4 Pa 时分别进行了电子发射实验, 观察到低真空时收集电流明显减少, 通过积分计算出低真空

和高真空时的收集电荷比值为 0.193 3。通过动力学理论计算了分子碰撞对电子到达收集极的影响,低真空与高真空的到达电子比值为 0.896 1。由于以上 2 个比值相差很大,所以可以认为低真空下等离子体对收集电流具有很大影响。发射电子除了与气体分子碰撞有部分损失外,大部分损失来自于

通过等离子体和栅电极形成的对地放电。等离子体覆盖栅电极时间 23.8 ns 与低真空的收集电流振荡周期 20 ns 非常接近,是低真空下等离子体放电损失的有力证明。以上实验和分析计算结果表明:提高低真空电子发射性能的关键在于改善阴极的表面性能和设计更为合适的栅电极结构。

参 考 文 献:

[1] Chirko K, Krasik Ya E, Felsteiner J, *et al.* Enhanced emission mode of a ferroelectric plasma cathode[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002,92(10):5691-5697.

[2] Shur D, Rosenman G. Figures of merit for ferroelectric electron emission cathodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, 80(6):3445-3449.

[3] Gurdel H, Handerek J, Reige H, *et al.* Pulsed electron emission from PLZT ceramics [J]. *Ferroelectrics*, 1990, 109:137-145.

[4] 蔡雪梅. PZT 阴极的 XPS 研究 [J]. 重庆邮电大学学报,2008,20(1):119-122.

[5] 樊志琴,蔡根旺,王世建,等. 碳纳米管膜场发射三极管的制备及特性研究 [J]. 液晶与显示,2008,23(1):30-34.

[6] 于灵敏,朱长纯. 提高丝网印刷 ZnO 纳米针场发射的均匀性和稳定性研究 [J]. 液晶与显示,2008,23(2):148-152.

[7] 季振国. 金刚石薄膜与新一代平面显示器 [J]. 半导体光电,1998, 19(5):291-295.

[8] 张庆辉,郑曙听,唐传祥,等. 铁电阴极制备与性能实验研究 [J]. 强激光与粒子束,2005,17(6):935-941.

[9] Jun-ichi Asano, Yoshihiro hamakawa, Masanori Okuyarna. Electron emission from lead - zirconate - titanate ferroelectric ceramic induced by pulse electric field [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1994, 33:5504-5508.

[10] Shur D, Rosenman G, Erasik Y E. Surface discharge plasma induced spontaneous polarization switching [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997,70(5):574-578.

Analysis on Electron Properties of
Ferroelectric Cathode Under Low Pressure

CAI Xue-mei¹, ZHOU Ying-hua², WU Gui-neng³

(1. College of Optoelectronics Engineering, Chongqing 400065, China, E-mail:caixm@cqupt.edu.cn;

2. College of Computer Science, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065,China;

3. College of Optoelectronics Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Changqing 400065,China)

Abstract

The electron emission experiments on PZT cathode were done under high pressure of 4×10^{-3} Pa and low pressure of 1.4 Pa. The number of collected electrons was given by integrating the curve line of collected current. The ratio of collected electrons under low pressure and high pressure is 0.193 3 and it can be drawn that many electrons emitted from the cathode were lost under low pressure. The reasons why electrons were lost were analyzed based on the theory of molecular motion and plasma discharge. The probability of electrons which can reach anode after collision with the gas molecular can be calculated through theory of molecular motion. The value are respectively 89.58% and 99.97% under low and high pressure, thus the ratio is 0.896 1 which is far away from the ratio calculated from collected current. Only a little fraction of the emitted electrons were lost due to the collision with the

gas molecular, but more due to the plasma discharge through the grid electrode as the plasma should be considered under low pressure. The time that the grid electrode was covered by the plasma is 23.8 ns based on plasma discharge theory, which is near to the periodic time 20 ns observed from the wave-forms of the collected current. Thus it can be testified that the palsma discharge is the main reason for the losing of electrons under low pressure by the above results.

Key words:ferroelectric cathode; theory of molecular motion; plasma discharge

作者简介:蔡雪梅(1970—),女,四川威远人,博士,副教授,主要从事电子材料与器件的研究。



科技参考文献著录的规则

根据中华人民共和国国家标准“文后参考文献著录规则”(GB/T7714-2005),《液晶与显示》编辑部希望广大作者在向本刊投稿时注意参考文献的著录。

1. 文后参考文献书写格式

期刊:[序号]作者. 文献题名[文献类型标志]. 连续出版物题名:其他题名信息,年份,卷号(期号):起止页码[引用日期]. 获取和访问路径.

例:[1]凌志华. STN-LCD 技术的发展[J]. 液晶与显示,2002,17(4):233-242.

例:[2]李晓东,张庆红,叶瑾琳. 气候学研究的若干理论问题[J]. 北京大学学报:自然科学版,1999,35(1):101-106.

例:[3]邵喜斌,王丽娟,李梅. a-Si:H TFT 亚阈值区 SPICE 模型的研究[J/OL]. 液晶与显示,2005,20(4):267-272. [2005-10-18]. http://www.wanfangdata.com.cn/src/szhqk/wf_szhqk_browser.Asp.

专著:[序号]作者. 题名[文献类型标志]. 析出文献其他责任者//专著主要责任者. 专著题名:其他题名信息. 版本项(第 1 版略). 出版地:出版者,出版年:析出文献的页码[引用日期]. 获取和访问路径.

例:[4]周其凤,王新久. 液晶高分子[M]. 北京:科学出版社,1994:27-38.

例:[5]日本学术振兴会第 142 委员会. 液晶器件手册[M]. 黄锡珉,黄辉光,李之熔,译. 北京:航空工业出版社,1992.

例:[6]母国光. 白光光学信息处理及期彩色摄影术[M]//陈星旦. 光学与光学工程,北京:科学出版社,2005:62-72.

例:[7]赵耀东. 新时代的工业工程师[M/OL]. 台北:天下文化出版社,1998[1998-09-26]. <http://www.ie.nthu.edu.tw/inf/ie.newie.htm> (Big5).

例:[8]陈兵,徐寿颐. 新型烷基环己基炔类液晶的合成与性质[C]//2002 年中国平板显示会议论文集. 深圳:深圳天马微电子股份有限公司,2002:167-168.

例:[9]闫石. 液晶光控取向膜材料的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2001.

例:[10]全国文献工作标准化技术委员会第七分委员会. GB/T5795-1986 中国标准书号[S]. 北京:中国标准出版社,1986.

专利:[序号]专利所有者. 专利题名:专利国别,专利号[文献类型标志]. 公告日期或公开日期[引用日期]. 获取和访问路径.

例:[11]吕永积,王群伟,邵佑军,等. 平板真空摄像器件:中国,ZL95241185. 7[P]. 1997-08-09.

(下转 P182)