

文章编号:1007-2780(2014)06-0911-05

纳米裂缝位置可控的表面传导电子发射薄膜

杨小艳, 沈志华, 吴胜利*

(西安交通大学 电子物理与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:提出一种新型结构的表面传导电子发射导电薄膜,该导电薄膜在中间位置向内有凹陷,基于电形成过程中焦耳热引起薄膜龟裂的原理,会在凹陷附近诱导纳米级裂缝形成,控制纳米裂缝形成位置。分析了此结构导电薄膜对裂缝产生位置的影响及 2 种不同电形成方法对裂缝形貌的影响,测试了电子发射性能,得到了发射电流特性曲线和发光图像。实验结果表明,这种新型导电薄膜能一定程度上控制纳米裂缝的形成位置,有利于改进表面传导电子发射的均匀性,在阳极高压 2.0 kV、阴极板电子发射单元施加的器件电压 14 V 时,新型结构导电薄膜实现了均匀发光,发射电流最大为 18 μA 。

关键词:表面传导电子发射,内陷型导电薄膜,电形成

中图分类号: **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20142906.0911

Controllable nano-scale gap formation in surface conduction-electron emitter

YANG Xiao-yan, SHEN Zhi-hua, WU Sheng-li*

(Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A conductive film with new structure for surface conduction electron emitter is proposed in this paper. Since the specific conductive film structure is narrower in the middle part, the joule heat in this region can be larger than that in the other region. This may lead to a thermal stress concentration in the middle region, and finally cause the nano-scale fissure to be generated easily from this position. With this new conductive film structure, the formation position of the nano-scale fissure can be controlled easily. The results indicate that the nano-scale gap position formed in the conductive film can be controlled to some extent. SCEs with the specific conductive film have better uniformity compared with the SCEs with the conventional conductive film structure. For an anode voltage of 2.0 kV and a device voltage of 14 V, the emission current of the SCEs with the specific conductive film can reach 18 μA .

Key words: SED; new conductive film structure; electro-forming process

收稿日期:2014-04-08;修订日期:2014-04-29.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51271140, 61275023)

* 通信联系人, E-mail: slwu@mail. xjtu. edu. cn

1 引言

近年来伴随着信息产业的飞速发展,显示技术也迎来快速发展,从传统的阴极射线管显示(CRT)到液晶显示(LCD)、等离子显示(PDP),再到今日的机电致发光显示(OLED)^[1]以及场发射显示(FED),科学技术的发展使得显示技术领域也在发生一场革命^[2]。

20 世纪 60 年代,前苏联的研究人员在研究 SnO₂ 薄膜时发现了表面传导电子发射现象^[3],表面传导电子发射显示器(SED)开始吸引显示领域中的关注。为了能使 SED 进入实用化阶段,1986 年佳能公司开始 SED 技术的研发,并从 1999 年开始与东芝共同研发 SED 显示器^[4]。

表面传导电子发射显示器是一种基于场发射技术的平板显示器,它的核心部分是表面传导电子发射源。在实际量产过程中,电子发射源的制造将是影响 SED 显示器的重要因素^[5]。制备该发射源的技术难点是如何在导电薄膜上形成统一的纳米级裂缝来实现隧穿电子发射。有关纳米级裂缝形成的方法有几种,比如佳能公司采用电形成工艺^[6],新竹大学的研究人员使用氢吸收的工艺^[7-8],以及离子束切割(FIB)技术^[9]。后两种工艺并不成熟,不适合大规模工业生产,故一般在形成过程中选择使用加电形成的工艺^[10]。

实验发现,采用电形成工艺来形成纳米级裂缝,裂缝位置的形成具有随机性,而裂缝的位置和宽度会直接影响到电子发射源的性能,尤其是其一致性。本文提出一种新型导电薄膜结构,制作了发射材料为金属 Pd 的表面传导电子发射源,对制作的工艺过程和导电薄膜纳米级裂缝形成所用电形成工艺进行了分析,初步引导纳米级裂缝位置的形成,并且得到了较好的表面传导电子发射实验结果。

2 真空实验系统

在真空实验系统中,先对导电薄膜进行电形成处理,得到用于电子发射的纳米级裂缝,然后进行表面传导电子发射特性的测试。真空实验系统构成如图 1 所示,实验中阳极基板采用 ITO 玻璃涂敷荧光粉,电子发射轰击荧光粉可观察到发光。

阴极基板上制备有电子发射源阵列,其中阴阳基板之间的间距为 2 mm,电子发射所需的直流控制电压由器件电压 V_f 提供,阳极电压 V_a 提供高压来吸引发射电子,轰击荧光粉发光,毫安表用以监测器件电流 I_f ,微安表则用来监测发射电流 I_e 。

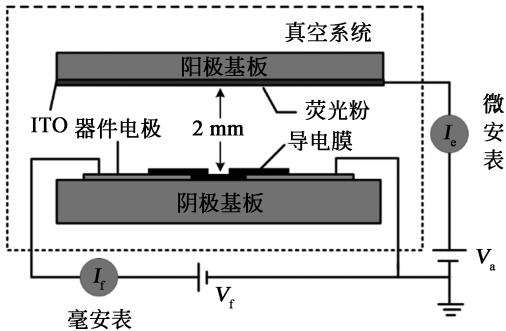


图 1 真空实验系统
Fig. 1 Experiment system configuration

3 表面传导电子发射源制备

3.1 电子源电极及导电薄膜阵列制备

实验中我们采用 64×25 表面传导电子发射源阵列,并设计了形状特殊的内陷型导电薄膜,图 2 为电子发射源阵列单元局部放大图。电子发射源的制备分为器件电极制备和导电薄膜的制备 2 个步骤,实验中采用钙钠玻璃为基板,首先采用磁控溅射法在玻璃基板上沉积 Ni-Cu-Ni 三层结构金属薄膜,溅射时间为 30 s-600 s-240 s,薄膜总厚度约为 180 nm。对制备好的薄膜进行光刻,制作成所需电极图案。完成器件电极的制备后,在器件电极 10 μm 细缝处沉积 PdO 导电薄膜,采用磁

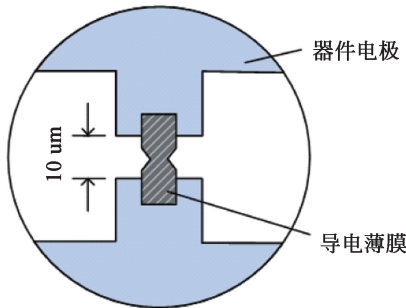


图 2 电子发射源阵列单元局部放大图
Fig. 2 Magnified structure for one cell in SCE array

控溅射和光刻相结合的方法制备,溅射时间 60 s,溅射基板温度 135 ℃,功率 100 W, O₂ 与 Ar 的气体流量比为 30 : 20 cm³/min,图 2 为单元局部放大图,电子发射薄膜形状为内陷型构造,在导电膜中间位置向内各凹陷 50 μm。

3.2 电形成工艺及电子发射测试

在完成导电薄膜制备后,要使其能实现表面传导电子发射,还需在导电薄膜上形成纳米级裂缝来实现隧穿电子发射。实验中采用与佳能公司相同的电形成工艺,具体做法是在真空环境中,通过器件电极给导电薄膜施加特定波形的电压,并持续一定的时间使导电薄膜因焦耳热而产生龟裂,其优点是方法简单高效,可以对多个像素同时进行加电形成,形成效果也比较理想。

电形成在上文提到的真空系统中进行,当真空腔气压小于 5.0×10^{-4} Pa,使用幅值渐变的三角波电压作为器件电压,经过若干个电压幅值递增周期后,器件的电压电流出现“负阻效应”或者器件电流突然减小,说明此时纳米级裂缝已初步形成,进一步增加器件电压峰值,器件电流还会继续减小,最后电流降低至合适的范围并趋于稳定,电形成即完成。

电形成结束后进行电子发射实验,测试时同样需要在真空系统中进行。当真空系统中气压低于 5.0×10^{-4} Pa 时进行测试,对器件电极施加可调的直流器件电压 V_f (0~16 V),对器件阳极施加高压 V_a (0~3 kV)用来吸引场致遂穿所发射的电子。

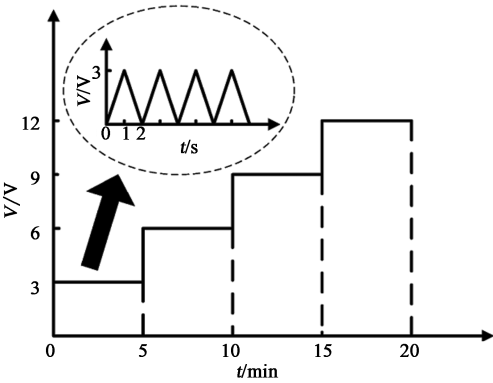
4 结果和分析

4.1 电形成的实验结果和讨论

本文采用两种加电方法形成纳米级裂缝,每组样片选取其中两行形成状况进行研究。利用金相显微镜观察导电薄膜中的纳米级裂缝位置及形貌,来确认新型结构导电薄膜对裂缝产生位置的影响。

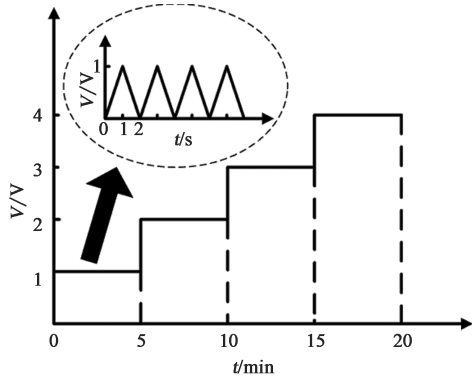
实验中第一组使用电压波形如图 3(a),它是幅值渐变的三角波,起始电压为 3 V,周期为 2 s,同一电压幅值持续 5 min,然后在此幅值基础上再增加 3 V 电压,电压幅值周期性递增。待纳米级裂缝形成完毕后,在金相显微镜下观察电子发射单元表面形貌,大多数导电薄膜单元的裂缝是

从内陷的尖端处引出形成,但裂缝位置随后很快偏移到台阶处,如图 4(a)所示;少部分导电薄膜单元的裂缝虽然没有完全在台阶位置形成,但是整个走势比较弯曲,如图 4(b)所示。我们认为,在这种加电方式下,导电薄膜这种内陷的结构对裂缝位置有控制作用,大部分导电薄膜单元的裂缝是由内陷处引出,但裂缝位置同时受台阶影响,非常容易偏移至台阶处。



(a) 幅值渐增 3 V 电压波形

(a) 3 V voltage waveform with increasing amplitude



(b) 幅值渐增 1 V 电压波形

(b) 1 V voltage waveform with increasing amplitude

图 3 电形成电压波形

Fig. 3 Voltage waveform used in electro-forming process

实验中第二组使用电压波形如图 3(b),与第一组的不同之处是在起始电压幅值基础上每次增加 1 V 电压,同样在金相显微镜下观察到有裂缝相对在中间位置形成,如图 4(c);还有一小部分导电薄膜单元成缝时直接在靠近台阶处形成,内陷的形状并没有发挥作用,如图 4(d);大部分裂

缝形貌和图 4(a)相似。分析认为,将电压幅值每次增加 1 V,形成的裂缝位置受电极与导电膜之间台阶影响还是较大,大部分裂缝由凹陷处引出后不能一直维持在中间位置,其位置沿着凹陷方向向台阶处弯曲,只有一部分导电薄膜单元能够形成理想的裂缝,一小部分完全不受内陷控制。

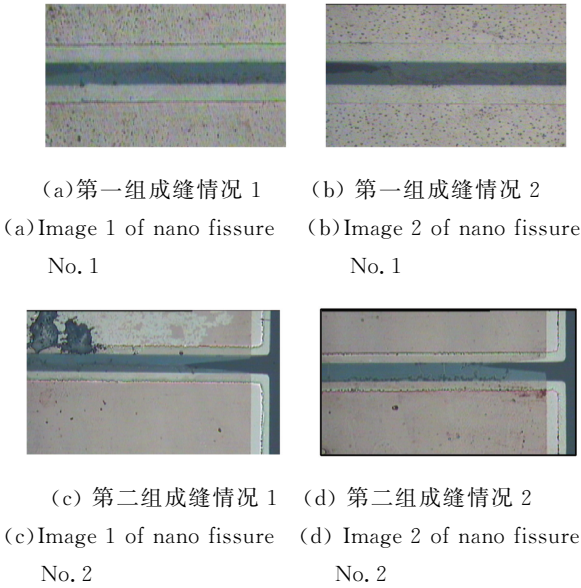


图 4 纳米级裂缝的金相显微镜图
Fig. 4 Metallurgical microscope image of nano-scale fissure obtained

总结电形成实验发现,常规导电薄膜结构中,纳米级裂缝一般位于电极与导电薄膜交界附近,而本文提出的内陷型导电薄膜,纳米级裂缝则从凹陷部分处裂开,缝隙倾向于形成在中间部位,可以一定程度控制纳米级裂缝形成的位置,从而有利于获得较为均匀一致的电子发射单元。

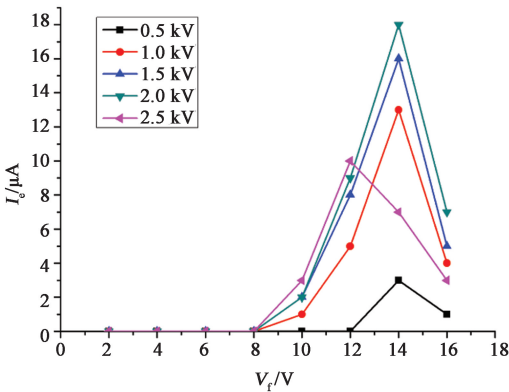
4.2 电子发射测试结果及讨论

电子发射实验中,在器件电极两端施加直流电压,幅值从 0~16 V 变化,阳极电压为 0~2.5 kV,对比测试了 I_e 随 V_f 的变化关系,结果如图 5 所示,其中图 5(a)是使用幅值渐增 3 V 电压形成的,5(b)是使用幅值渐增 1 V 电压形成的。

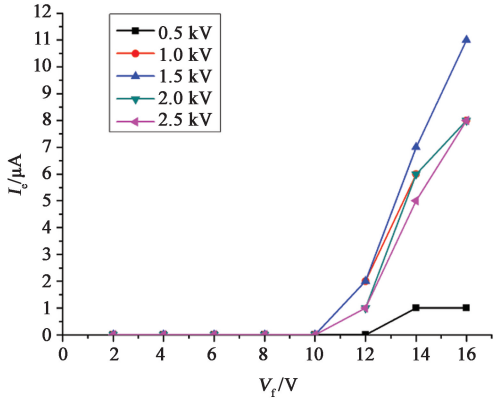
从图 5 中可以看出,两组发射电流基本均随着器件电压的升高而增长,发射电流曲线的增长有一定波动。阳极电压对第一组样片电子发射有较大影响,且当器件电压从 14 V 升至 16 V 时发射电流骤减,原因主要是器件电压过大,从而改变了原有的纳米级裂缝形貌,破坏了电子发射单元。

图 6(a)给出了第一组样片器件电压 14 V,阳

极电压为 2 kV 时所观察到的发光图案,图 6(b)给出了第二组样片器件电压 16 V,阳极电压为 1.5 kV 时所观察到的发光图案。可以看出,两组样片的两行像素均被成功点亮且亮度高,发光相对稳定,没有闪烁现象,均匀一致性很好。但由于测试时阳极电压较低,影响了电子在阳极板的聚焦,所以未能观测到对应电子发射单元的一个像素亮点。



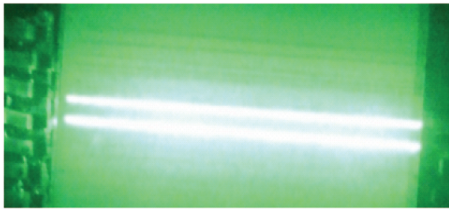
(a)第一组样片电子发射曲线
(a)Electron emission characteristics (No. 1)



(b)第二组样片电子发射曲线
(b)Electron emission characteristics (No. 2)

图 5 电子发射曲线

Fig. 5 Electron emission characteristics obtained



(a)第一组样片发光图
(a)Luminescence pattern observed (No. 1)

5 结 论

研究了基于内陷结构导电薄膜的表面传导电子发射,分析了新型结构导电薄膜对纳米级裂缝产生位置的影响并得到发射电流 I_e 和器件电压 V_f 之间的关系,观察到了发光图案。结果显示,这种内陷型薄膜结构,能够在一定程度上实现裂缝位置的可控形成,并且可以获得均匀稳定的电子发射。作为下一步研究工作,将继续调整电形成脉冲电压的幅值、周期,来探究其对纳米级裂缝宽度的影响,并且提高电子发射效率。



(b)第二组样片发光图

(b)Luminescence pattern observed (No. 2)

图6 发光效果图

Fig. 6 Luminescence pattern observed

参 考 文 献:

- [1] 袁桃利,张方辉,张微,等. 空穴传输层对有机电致发光器件性能的影响[J]. 发光学报,2013,34(11):1457-1461.
Yuan T L, Zhang F H, Zhang W, *et al.* The electroluminescent performance of OLED based on different hole transport layer [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(11): 1457-1461. (in Chinese)
- [2] 刘达,龚建荣. 新世纪的主流显示技术-平板显示(FPD)技术[J]. 现代电视技术,2003,10(4):70272.
Liu D, Gong J R. The new century's mainstream display technology-Flat panel display (FPD) technology [J]. *Advanced Television Engineering*, 2003, 10(4): 70272. (in Chinese)
- [3] Elinson MI. The emission of hot electrons and the field emission of electrons from tin oxide [J]. *Radio Engineering and Electronic Physics*, 1965, 7: 1290-1296.
- [4] 李新贝,张方辉. 表面传导电子发射显示器件电学特性研究[J]. 液晶与显示,2006,21(5):527-532.
Li X B, Zhang F H. Electrical characteristics of surface-conduction electron-emitter display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2006, 21(5): 527-532. (in Chinese)
- [5] 牟强,张方辉,费民权. 表面传导电子发射显示技术进展[J]. 液晶与显示,2006,21(3):226-231.
Mu Q, Zhang F H, Fei M Q. Development of surface conduction electron-emitter display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2006, 21(3): 226-231. (in Chinese)
- [6] Wu C X, Xu W J, Lei X, *et al.* Characteristics of an electron source of a surface-conduction electron-emitter display [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16 (5): 625-630.
- [7] Lo H Y, Li Y, Chao H Y, *et al.* Field-emission properties of novel palladium nanogaps for surface conduction electron-emitters [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18 (47): 475708 (475707pp).
- [8] Tsai C H, Pan F M, Chen K J, *et al.* Nano-gap formation by palladium hydrogenation for surface conduction electron emitters fabrication [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90 (16): 163115(1-3).
- [9] Lo H Y, Li Y M, Tsai C H, *et al.* Effect of process variation on field emission characteristics in surface-conduction electron emitters [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2008, 7 (4): 434-439.
- [10] 周子云. 表面传导电子源阵列结构设计及制备工艺研究[D]. 西安:西安交通大学,2012.
Zhou Z Y. Study on structure design and fabrication process of surface conduction electron source array [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2012. (in Chinese)

作者简介:杨小艳(1988—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要从事平板显示技术与器件的研究。E-mail: yxiaoyan@stu.xjtu.edu.cn