

文章编号: 0253-2239(2010)12-3574-06

一种电子束自会聚型后栅场发射显示器的研究

吴朝兴 张永爱 张 杰 李 昱 郭太良

(福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350002)

摘要 提出一种具有凹面阴极结构的电子束自会聚型后栅场发射显示器(FED)。利用 Ansys 软件模拟此器件的电场分布和电子束轨迹,研究凹面阴极不同曲率半径对阳极光斑尺寸的影响,并与平面阴极型后栅 FED 进行比较。仿真结果表明此器件可有效减小电子束的发散角和阳极光斑尺寸,阳极光斑尺寸随着凹面阴极曲率半径的减小而减小,同时可获得更高的电流密度。利用丝网印刷技术制备 10 cm×10 cm 的电子束自会聚型后栅 FED,对其场发射性能进行测试。结果表明此器件可有效减小阳极光斑尺寸,提高显示器的分辨率;阳极电压为 600 V,栅极电压在 100~250 V 范围内对电子发射有良好的调控作用。

关键词 光电子学;场致发射;自会聚;计算机模拟;后栅结构

中图分类号 TN873 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3574

Study on Under-Gate Field Emission Display with Electron Beams Self-Focus Effect

Wu Chaoxing Zhang Yongai Zhang Jie Li Yu Guo Tailiang

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract An under-gate field emission display (FED) with a concave cathode is proposed. Ansys software is used to simulate the electric field distribution and the focus effect of electron beams. The curvature radius of a concave cathode which affects the self-focus is investigated. The results demonstrate that the concave cathode focuses electron beams which emit from cathode obviously. As the curvature radius of a concave cathode decreases, the focus effect is enhanced and the radius of spots on the anode decreases too. A 10 cm×10 cm FED with a good self-focus effect is successfully prepared using screen printing. The field emission image shows that the structure can decrease the size of spots and improve the resolution. The anode current is well modulated by a gate voltage of 100~250 V under an applied anode voltage of 600 V.

Key words optoelectronics; field emission; self-focus; computer simulation; under-gate structure

1 引 言

场发射显示器(FED)是一种利用强电场(大于 10^9 V/m)使电子从阴极表面发射,经阳极电场加速轰击荧光粉而发光的一种真空显示器件^[1]。FED因结合了阴极射线管(CRT)高画质和液晶显示器(LCD)薄型低功耗的双重优势而成为平板显示领域

研究开发的热点。目前 FED 采用的荧光粉一般为 CRT 用高压荧光粉,为了获得更高的荧光粉发光效率必须增大阳极电压,由此决定前后基板必须有足够大的距离。由于电子束有一定的发散角,大的前后基板间距导致阳极电子束斑被放大,图像的分辨率降低,这就要求开发具有电子束自会聚功能的

收稿日期: 2010-03-03; 收到修改稿日期: 2010-05-03

基金项目: 国家 863 计划(2008AA03A313)、福建省科技厅资助省属高校项目(2008F5001)、福建省教育厅资助项目(J09003)和福建省自然科学基金(2009J05145)资助课题。

作者简介: 吴朝兴(1985—),男,硕士研究生,主要从事纳米材料及场发射显示器等方面的研究。

E-mail: nnnwxc@yahoo.com.cn

导师简介: 郭太良(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事 FED 显示器和信息显示技术等方面的研究。

E-mail: gtl_fzu@yahoo.com.cn

FED。对此科研人员在器件结构设计方面做了大量尝试。Keslign 等^[2]采用有聚焦极的四极场发射阵列。Choi 等^[3]发现碳纳管(CNT)发射表面周围的等电位台阶状电极可以使电子束具有良好的自会聚效果。此外同心圆环型阵列、凹面阴极结构同样具有良好的自会聚效果^[4,5]。

目前关于电子束自会聚的研究多集中于前栅结构,对后栅结构尚未开展深入研究。后栅 FED 结构简单从而可采用丝网印刷技术完成器件的制作,工艺复杂度低,易于实现大面积化和均匀化显示^[6,7]。CNT 和氧化锌(ZnO)等一维纳米材料因长径比大,而具有较大的场增强因子^[8~12]。将其作为阴极发射材料可有效降低后栅 FED 的工作电压,使后栅 FED 具有潜在的实用价值。后栅 FED 缺点之一是电子束发散严重,即使将 CNT 浆料印刷在电极单侧也难以实现分辨率的提高^[13]。

本文将凹面阴极结构引进到后栅 FED,利用有限元分析软件(Ansys)对其电场分布及电子束轨迹进行模拟,研究电子束的发散情况及凹面阴极曲率半径对自会聚效果的影响。采用丝网印刷技术制作 10 cm×10 cm 的电子束自会聚型后栅场发射阵列,对其进行场发射性能测试。

2 器件制作与测试

具有凹面阴极结构的电子束自会聚型后栅 FED 后基板简要制作步骤为:1)在洁净玻璃基板表面印刷图形化的银浆电极,经 570 °C 烧结后作为栅极电极;2)在栅极电极表面制作介质材料。为了提高介质层的绝缘性能,采用多次印刷并分别进行高温烧结(烧结峰值温度为 550 °C),这有利于获得致密的介质层从而保证其良好的绝缘性能;3)在介质层表面印刷一层可刻蚀性介质,高温烧结。接着印刷感光胶,利用光刻技术制作一系列宽度为 150 μm,

间隙为 750 μm 的沟道;4)在以上材料表面印刷整层银浆,使介质层沟道内填满银浆。经 150 °C 烘烤 30 min 后用 NaOH 溶液进行退胶,从而只保留介质层沟道内的银浆材料。最后进行高温烧结,烧结后银浆厚度收缩使得电极具有凹曲面的特殊形貌;5)采用精确对位的方法在阴极电极单侧印刷 CNT 浆料,并于氮气氛围中进行热处理。最后进行场发射材料的激活,即在 CNT 薄膜表面贴一层胶带,刮擦后将其撕开。这一过程撕破 CNT 薄膜而暴露出大量的 CNT 尖端,有效地增强场发射电流^[14]。具体制作流程如图 1 所示。

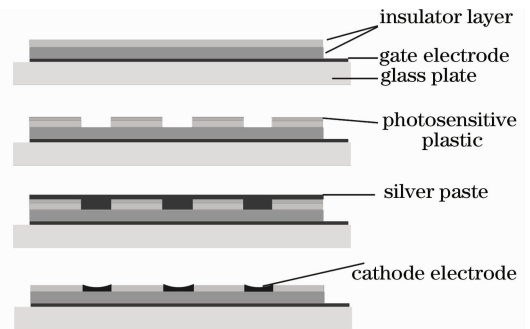


图 1 后基板制作过程示意图

Fig.1 Fabrication process of base plate

图 2(a)为后基板视频显微照片,(b)为相应的台阶仪测试图。可以看出银浆填充在介质层沟道内,阴极电极为凹曲面结构。

对于平面阴极结构,其制作过程相对简单:首先在栅极电极表面制作整层介质材料[与步骤(1),(2)相同];其次在介质层表面印刷图形化的银浆电极,烧结后作为阴极电极;最后是发射材料 CNT 的转移、激活[与步骤(5)相同]。

测试时阴、极接地,在阴阳极和阴栅极间各加一台电压连续可调的电压源。阳极屏采用印刷有绿色荧光粉的氧化铟锡(ITO)玻璃,阴极屏与阳极屏的间距为 1 mm,场发射测试系统真空度为 1×10^{-4} Pa。

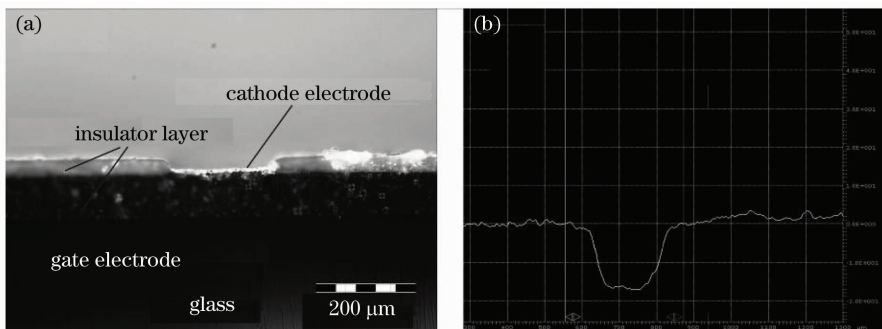


图 2 (a)后基板实物视频显微照片,(b)台阶仪测试图

Fig.2 Image of a concave cathode electrode. (a) Video microscopy image,(b) image ststed by profilometer

3 结果与讨论

利用 Ansys 软件模拟电子束自会聚型后栅 FED 的电子束自会聚效果。根据结构的对称性作了简化而得到二维模型,此模型的建立基于以下假设:1)电极的电阻率为零,电极各点电位相等;2)栅极宽度远大于阴极宽度,因而可近似采用二维模型;3)研究表明当发射电流密度超过 10^8 A/cm^2 时才须考虑空间电荷效应^[15]。实际发射电流密度一般小于此值,因而忽略空间电荷对电场分布的影响;4)假设电子的初速度为零,忽略电子初速度的统计分布。

仿真模型如图 3 所示: R 为凹面阴极曲率半径,

W_c 为阴极宽度, W_d 为阴极间隙, H 为前后基板间距, U_a 为阳极电压, U_c 为阴极电压, U_g 为栅极电压。具体模型参数如表 1 所示。

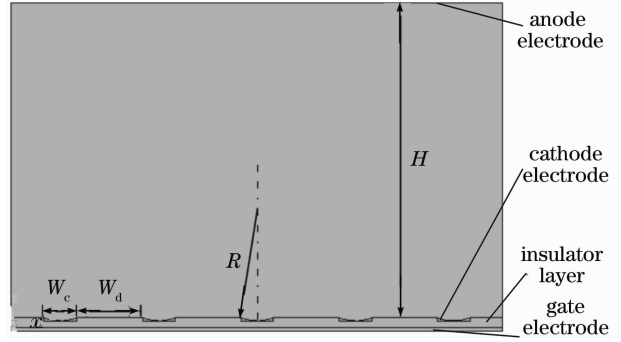


图 3 仿真模型

Fig.3 Model of simulation

表 1 模型参数

Table1 Parameters of simulation model

$R / \mu\text{m}$	$W_c / \mu\text{m}$	$W_d / \mu\text{m}$	$H / \mu\text{m}$	U_a / V	U_g / V	U_c / V
70~160	100	200	1000	1000	0~200	0

图 4 为不同栅极电压作用下,凹面阴极(曲率半径为 $130 \mu\text{m}$)和平面阴极附近的电场分布。图 4(a)~(c)为平面阴极结构,对应的栅压分别为 0,100,200 V;图 4(d)~(f)为凹面阴极结构,对应的栅压分别为 0,100,200 V。图 4 表明阴极表面电场存在着不为零的水平分量,电子在水平方向受到电场力的作用而具有水平方向的位移。对于平面阴极,电子逸出电极时受到向外的作用力而背离阴极中心运动,这导致电子束的发散角变大,如图 4(c)中 A 所示(箭头方向为电子所受电场力的方向)。对于凹面阴极,由于电场方向必须垂

直于电极表面,因此电子首先受到向内的作用力而向电极中心运动,这有效减小电子束发散角,如图 4(f)中 B 所示。以上分析说明了凹面阴极结构具有电子束自会聚效果的机理。

图 4 中内嵌图片为相应条件下电子束轨迹模拟图,由于只将 CNT 转移在阴极电极单侧,因此只考虑阴极单侧的电子束轨迹。可以看出随着栅极电压的增加,两种阴极结构对应的电子束发散角均扩大,但由于凹面阴极的电子束自会聚作用,其电子束发散角比平面阴极结构的电子未发散角小。

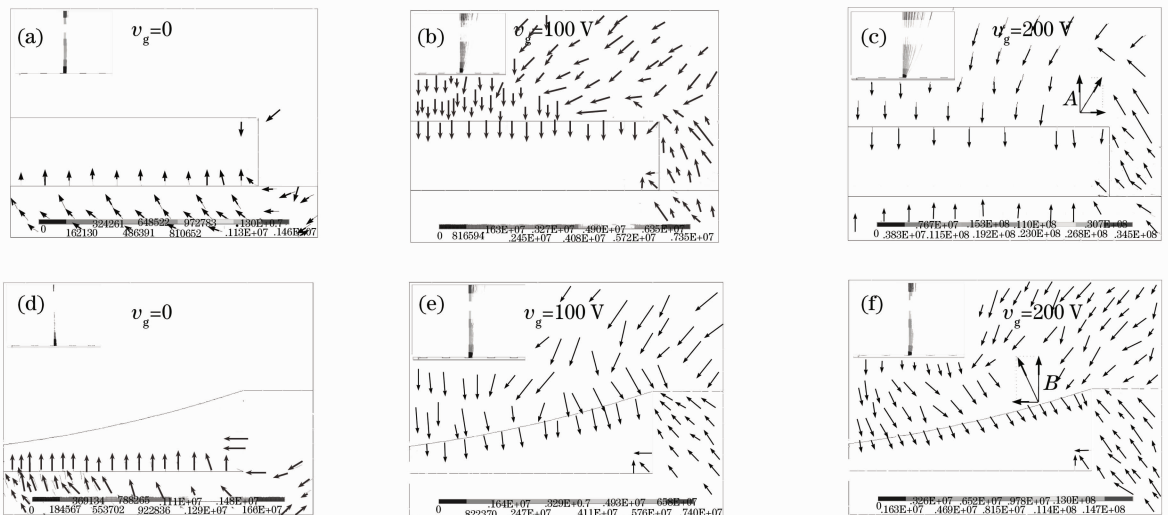


图 4 不同栅压阴极表面电场分布。(a)~(c)平面阴极结构(d)~(f)凹面阴极结构

Fig.4 Distribution of electric field on cathode surface under different gate voltages in (a)~(c) plate cathode structure and (d)~(f) concave cathode structure

图 5(a)为凹面阴极曲率半径 $100\ \mu\text{m}$ 时电子束轨迹图,图 5(b)为平面阴极电子束轨迹图。由仿真结果可知平面阴极器件的阳极光斑半径为 $373.3\ \mu\text{m}$,大于像素的间距($300\ \mu\text{m}$)。其电子束发散角大,电子打到相邻像素的荧光粉,严重损害显示器的分辨率和色

纯度。对于曲率半径为 $100\ \mu\text{m}$ 的凹面电极,其阳极光斑半径为 $133.3\ \mu\text{m}$,电子束发散角明显较小,不会产生交叉效应,有利于显示器分辨率的提高,增大色纯度。

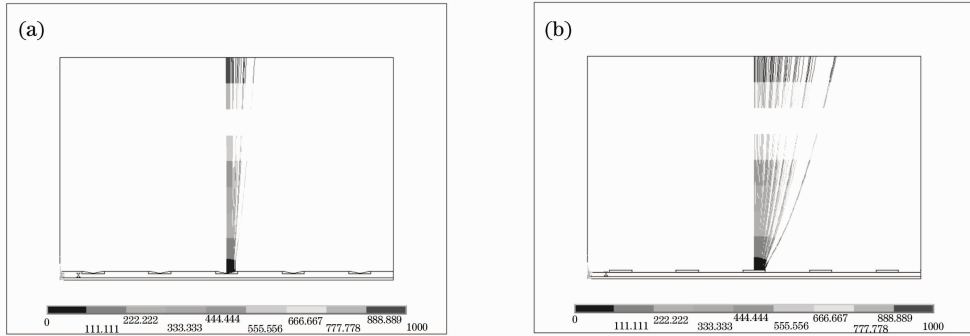


图 5 电子束轨迹模拟图,(a)凹面电极,(b)平面电极

Fig. 5 Simulated trace of emitting electrons in (a) concave electrode, (b) plate electrode

假设阴极发射的电子能全部到达阳极屏,利用 Fowler-Nardheim (F-N)方程:

$$J = 2.262 \times 10^6 \times E^2 \times \exp(-48.076/E). \quad (1)$$

可以计算出阳极屏电流强度分布^[16]。图 6 为凹面阴极器件(曲率半径 $100\ \mu\text{m}$)和平面阴极器件所对应的阳极屏电流强度分布图,纵坐标为电流密度,横坐标为距阴极电极中心的水平距离。此时阳极电压固定为 $1000\ \text{V}$,可以看出凹面阴极器件的电流分布范围较窄($\leq 133.3\ \mu\text{m}$),电子束发散角小,如图 6 中 A 所示。在相同栅压下平面阴极器件的电流密度比凹面阴极器件小得多,且电子束的分布范围更大($\leq 373.3\ \mu\text{m}$),如图 6 中 B 所示。为了增加平面电极器件的电流密度可以适当提高栅极电压,然而这将以损失器件的分辨率为代价,因为更大的栅压意味着更大的电子束发散角,如图 6 中 C 所示。

其中 ∞ 表示凹面阴极曲率半径为无穷大,即相当于平面阴极情况。当曲率半径为 $70\ \mu\text{m}$ 时,阳极屏光斑半径仅为平面阴极的 $1/5$ 。在所考虑的参数范围内,随着曲率半径的减小阳极屏光斑半径减小,这意味着可以通过适当缩小凹面阴极的曲率半径来提高器件的分辨率。

表 2 凹面阴极不同曲率半径对应的阳极光斑半径
Table 2 Different radius of light spot in anode with different curvature radius of concave cathode

Curvature radius / μm	Light spot radius / μm
70	69.8
100	133.3
130	205.5
160	279.7
∞	373.3

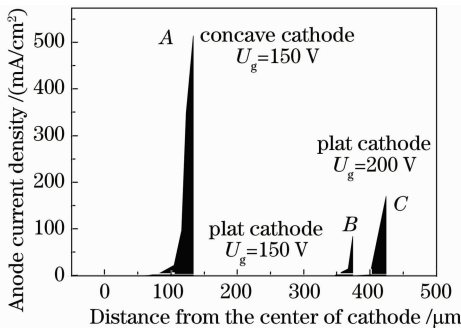


图 6 凹面电极和平面电极阳极屏电流强度分布

Fig. 6 Anode current intensity distribution of concave and plate cathode

表 2 为阳压 $1000\ \text{V}$,栅压 $200\ \text{V}$ 时,凹面阴极不同曲率半径对应的电子束在阳极屏的会聚情况。

图 7 给出了阳极电压 $600\ \text{V}$ 时,具有凹面阴极结构和平面阴极结构的后栅 FED 工作特性曲线。开启电压定义为发射电流达到 $10\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 时对应的工作电压。从图 7(a)可看出凹面阴极器件具有较低的开启电压,约为 $160\ \text{V}$;平面阴极器件的开启电压约为 $210\ \text{V}$ 。凹面阴极器件中栅压对电子发射具有良好的调控效果,当栅压为 $250\ \text{V}$ 时,其阳极电流达到了 $160\ \mu\text{A}$,而平面阴极器件的阳极电流仅为 $50\ \mu\text{A}$ 。

根据场发射理论有^[17]

$$\ln\left(\frac{I_0}{V}\right) = -\frac{B\phi^{3/2}\theta(y)}{\beta} \cdot \frac{1}{V} - \ln\left[\frac{t^2(y)\phi}{AS\beta^2}\right], \quad (2)$$

其中 β 为场增强因子, ϕ 为阴极材料的功函数, $\theta(y) = 0.95 - y^2$ 为 Nordheim 函数, $t^2(y) \approx 1.1$,

A, B, S 分别为与场发射阴极有关的常数, V 为工作电压, I_0 为场发射电流。

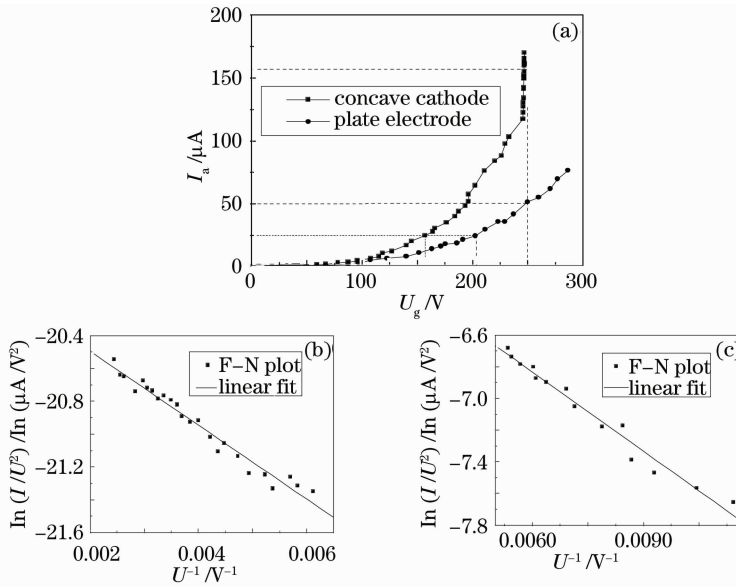


图 7 后栅 FED 场发射(a)I-V 特性曲线及(b)平面阴极器的和(c)凹面阴极器中的 F-N 曲线

Fig. 7 (a) filed emission I-V and F-N characteristics of under-gate FED, (b) plate cathode structure and (c)concave cathode structure

对 F-N 曲线进行线性拟合,可以得到平面阴极器件的 F-N 直线斜率为 -225 ,截距为 -20 ;凹面阴极器件的这两个数值分别为 -167 和 -5.8 。对于同一种发射材料, $\phi, \theta(y), A, B, S$ 均可认为是常数,由(2)式可知凹面阴极器件的 F-N 直线具有更大的斜率,即具有更大的场增强因子 β ,其值约为平面阴极的 1.3 倍。模拟计算可知在相同结构参数和相同工作电压下,凹面阴极表面最大电场强度约为平面阴极的 1.18 倍。

造成凹面阴极具有更大场增强因子的原因有两个。一方面阴极电极具有特殊的凹面形状,刻蚀后的介质层沟道呈上宽下窄的倒梯形结构,这有利于凹面阴极的形成,高温烧结后,银浆内有机溶剂挥发造成电极厚度收缩,这两方面的共同作用形成了凹面阴极结构。由于边缘效应,电极边缘的发射明显

强于电极中部,这种特殊的凹面形状进一步加大电极边缘的电位梯度,从而获得更强的电场,即具有更大的场增强因子。另一方面此结构在一定程度上解决了介质层表面积累电荷对栅极电场的屏蔽效应。介质层表面的积累电荷主要来源于电极侧壁在场发射电子^[18,19]。结构中阴极电极侧壁被介质材料包裹,从而避免电子发射材料聚集在电极侧壁,减少电极侧壁在场发射电子,有效地削弱了介质层表面的积累电荷对栅极电场的屏蔽效应。

图 8 为后栅 FED 器件的发光图,图 8(a)为具有自会聚效应的凹面阴极器件,图 8(b)为平面阴极器件。图 8(b)中光斑为鱼鳞片形状,相邻像素的光斑交织在一起,如图 8 中 A 所示。由于电子受到背离阴极的电场力作用,且电子本身具有一定的横向初速度,导致了电子束的发散角较大。电子打到相

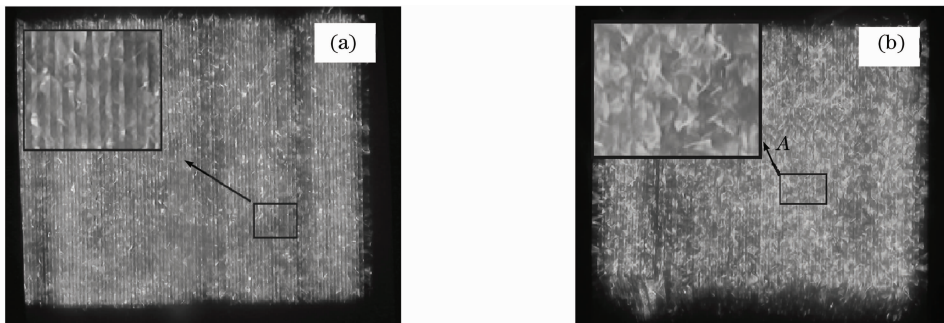


图 8 (a)凹面阴极和(b)平面阴极发光图

Fig. 8 Emission images for (a) concave cathode and (b)plate cathode

邻像素的荧光粉而发生交叉效应,严重影响显示器色纯度和分辨率的提高。对于凹面阴极器件,场发射电子刚逸出阴极表面时受到指向阴极中心的电场力作用,这使得电子束具有较小的发散角,从而获得较小的光斑尺寸。可以看出阳极屏几乎不存在鱼鳞状光斑,相邻像素间不存在明显的交叉效应。凹面阴极器件在提高显示器件分辨率和显示均匀性方面比平面阴极器件具有更大的优势。

4 结 论

提出一种具有凹面阴极结构的电子束自会聚型后栅 FED。采用 Ansys 软件模拟此器件的电场分布及电子束轨迹。仿真结果显示凹面阴极可以有效减小阳极光斑尺寸,曲率半径为 $100\ \mu\text{m}$ 的凹面阴极对应的光斑尺寸仅为平面阴极的 $1/3$,光斑尺寸随着凹面阴极曲率半径的减小而减小。采用凹面阴极结构可以在阴极表面获得更大的电场强度,明显提高场发射电流密度,降低栅极工作电压。利用丝网印刷技术制作 $10\ \text{cm} \times 10\ \text{cm}$ 的具有电子束自会聚功能的后栅 FED,场发射测试表明此器件能有效减小像素间的交叉效应,显示图像均匀。凹面阴极的边缘效应明显、场增强因子大,阳极电压为 $600\ \text{V}$,栅压在 $100 \sim 250\ \text{V}$ 范围内对电子发射有良好的调控作用。

参 考 文 献

- Guo Tailiang, Lin Zhixian, Wu Xinkun *et al.*. Development of novel printable field emission display prototype[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, **14**: 404~408
郭太良,林志贤,吴新坤等. 新型可印刷 FED 场致发射显示器的研制[J]. 中国有色金属学报, 2004, **14**: 404~408
- W. D. Keslign, C. E. Hunt, Beam focusing for field-emission flat-panel displays[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1995, **42**(2): 340~347
- Y. S. Choi, Y. S. Cho, J. H. Kang *et al.*. Field-emission display with a self-focus cathode electrode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(20): 3565~3567
- Zeng Baoqing, Yang Zhonghai. Simulation of in-plane lens field emission cathodes[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(4): 611~615
曾葆青,杨中海. 同心圆环型场发射阵列阴极的粒子模拟[J]. 强激光与粒子束, 1998, **10**(4): 611~615
- Yao Yuanzhao, Wu Yugong. Simulation of CNT-FED with a novel self-focus cathode[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2006, **21**(6): 636~639
姚远昭,吴裕功. 新型碳纳米管场发射显示器自会聚阴极的计算机模拟[J]. 液晶与显示, 2006, **21**(6): 636~639

- Y. S. Choi, J. H. Kang, H. Y. Kim *et al.*. A simple structure and fabrication of carbon-nanotube field emission display[J]. *Proc. SID*, 2001: 718~721
- Lin Zhixian, Guo Tailiang. Tetrapod-like Nano ZnO field emission display with triode structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 500~505
林志贤,郭太良. 三板结构四针状纳米 ZnO 场致发射显示器的研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 500~505
- L. Yukui, Z. Changchun, L. Xinghui. Field emission display with carbon nanotubes cathode prepared by a screen-printing process[J]. *Diamond and Related Materials*, 2002, **11**(11): 1845~1847
- Chen Ting, Sun Zhuo, Guo Pingsheng *et al.*. Deposition of carbon nanotubes film by LPCVD and related field emission property[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 777~782
陈婷,孙卓,郭平生等. LPCVD 法制备碳纳米管薄膜及其场发射性能的研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(5): 777~782
- Zhu Qingfeng, Zhang Haiyan, Chen Yiming *et al.*. Synthesis of aligned carbon nanotubes film by plasma-enhanced hot filament chemical vapor deposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1824~1829
朱清锋,张海燕,陈易明等. 热丝和射频等离子体化学气相沉积法制备定向碳纳米管薄膜[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1824~1829
- Qu ke, Zhang Xiaobing, Lei Wei *et al.*. Synthesis of tetrapod-like zinc oxide and its field emission characteristic[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, **29**(3): 542~546
屈科,张晓兵,雷威等. 四针氧化锌制备及其场致发射特性[J]. 发光学报, 2008, **29**(3): 542~546
- Zhao Maocong, Hu Guohua, Zhou Hao *et al.*. Dielectrophoretic assembly of ZnO nanowires[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(3): 235~237
- N. S. Lee, D. S. Chung, I. T. Han *et al.*. Application of carbon nanotubes to field emission displays[J]. *Diamond and Related Materials*, 2001, **10**: 265~270
- T. J. Vink, M. Gillies, J. C. Kriege *et al.*. Enhanced field emission from printed carbon nanotubes by mechanical surface modification[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003 **83**(17): 3552~3554.
- Zheng Cui, Linsu Tong. Optimum geometry and space-charge effects in vacuum microelectronics devices[J]. *IEEE Trans.*, 1993, **40**(2): 448~452
- Zhong Xuefei, Yin Hanchun, Wang Baoping. A carbon nanotube-based normal on under-gate field emission display panel [J]. *Journal of Southeast University (Natural science edition)*, 2004, **34**(1): 19~24
仲雪飞,尹涵春,王保平. 一种基于纳米碳管的常开型后栅极场致发射显示板[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, **34**(1): 19~24
- Y. S. Choi, J. H. Kang, Y. J. Park *et al.*. An under-gate triode structure field emission display with carbon nanotube emitters [J]. *Diamond and Related Materials*, 2001, **10**: 1705~1708
- Robert J. Bouchard, Lap-Tak Cheng, David H. Roach *et al.*. Screen printable dielectric for field emission displays[J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2005, **88**(6): 1465~1467
- A. M. Fennimore, L. T. Cheng, D. H. Roach. A stable under-gate triode CNT field emitter fabricated via screen printing [J]. *Diamond & Related Materials*, 2008, **17**: 2005~2009