

丝网印刷碳纳米管显示器灰度失真的研究

潘金艳, 朱长纯, 商世广, 于灵敏

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 通过研究两级结构丝网印刷碳纳米管显示器(CNT-FED)引线电极的线性分压问题,发现电极的线性电阻导致不同像素点间存在0.2%的电场偏差,引起8位元(256级)灰度显示中的24级灰度被湮没.为解决电极引线引起的灰度图像显示失真的问题,提出了一种CNT-FED电极的改造方法,通过改进屏内部引线电极和增加阴极反馈电阻,使像素点间的等效电阻值偏差从总电阻值的0.2%减小到0.0003%,且抑制了发射电流的波动,增加了像素点的过流保护.计算和仿真结果显示,新电极消除了256级灰度显示的失真,有效提高了CNT-FED的发光均匀性.

关键词: 碳纳米管显示器; 丝网印刷; 灰度; 发光均匀性

中图分类号: TN873 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)06-0734-05

On Distortion of Greyscale Display for Silk Screen Printed Carbon Nanotube Display

PAN Jinyan, ZHU Changchun, SHANG Shiguang, YU Lingmin

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: By investigating voltage division caused by linear impedance of electrode in screen printed carbon nanotube field emission display (CNT-FED) with diode structure, it was found that linear impedance of electrodes caused 0.2% variation of electrical field between different pixels, that resulted in 24 grey-scale died away in 8-bit grayscale display (256 grey scales). Therefore, a reconstruction method for electrode of CNT-FED is presented. By amending the electrode and adding a feedback impedance on cathode, the impedance variation between pixels and the total impedance are decreased from 0.2% to 0.0003%. Field emission current variation is restrained, and the pixels are protected against over-current. Distortion of 256 grey scales display is eliminated with new electrodes, and luminance uniformity of CNT-FED is effectively improved.

Keywords: carbon nanotube field emission display; silk screen print; greyscale; luminance uniformity

碳纳米管(CNTs)因具有高化学稳定性,良好的热传导、电传导特性,对器件封装真空度的要求低等特点,已成为广受关注的场发射显示器的阴极材料.自Wang等人^[1]用移植的CNT阴极膜制备了第一个二极管场发射显示器(CNT-FED)以来,CNT-FED已成为平板显示器的又一研究热点^[2-4].CNT-FED的制作方法主要有丝网印刷^[5]和直接生长

法^[6]两种,其中丝网印刷技术在等离子显示器的制作中已有成熟的应用,适宜制作大面积显示器,与直接生长方法相比较具有明显的价格优势.然而,发光亮度不均匀始终是CNT-FED产品化的一个瓶颈.

本文就两级结构丝网印刷CNT-FED存在灰度显示失真的问题进行了研究,并提出了一种改善各像素点的发光均匀性、消除灰度失真现象的方法.

1 CNT-FED 简介及问题分析

1.1 CNT-FED 简介

两级结构的 CNT-FED 是由相互垂直的阴极条和阳极条构成的像素点阵列,结构如图 1 所示.在两级结构的 CNT-FED 的阴、阳电极间施加一定直流电压,使阴极各像素点中的碳纳米管发射电子,打击阳极荧光粉发光.

采用丝网印刷工艺制作 CNT-FED,可能造成不同像素点的阴、阳电极间距有所不同^[7],阴极 CNT 膜厚度、形状不同^[8],从而引起像素点间的亮度不一致.另外,像素点内 CNTs 的随机分布或 CNT 发射体的尖端曲率不一致,也会导致发射电流不均匀^[9-10].

除了制作工艺和发射体特征影响亮度均匀性外,引线电极引入的线性回路电阻也会影响亮度均匀性.从图 1 可以看出,各像素点阳极条和阴极条离外部公共电极的距离不同,导致各像素点的等效电阻间产生阻值偏差,使得矩阵寻址方式下不同像素点有不同的驱动电压,这必然引起像素点间发射电流强度不一致,最终导致 CNT-FED 亮度不均匀,甚至灰度显示失真.因此,在制作工艺精度、结构一致的情况下,电极分压是引起丝网印刷 CNT-FED 灰度失真的重要因素.

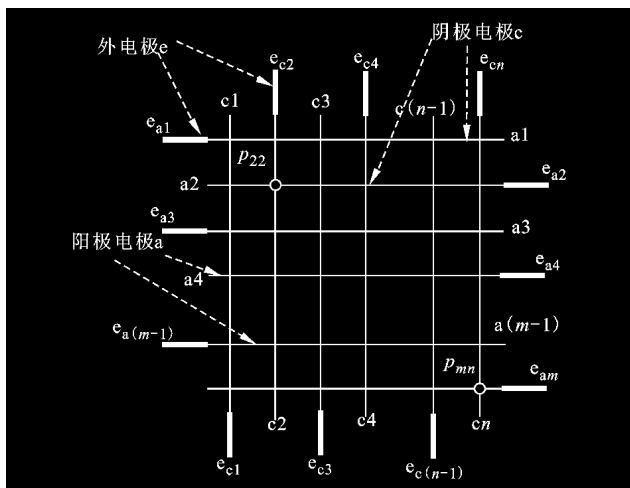


图 1 CNT-FED 电极结构示意图

1.2 电极分压问题

CNT-FED 的单个像素点在结构上相当于一个平行板电容 C_p .当外电压使阴、阳极间达到一定场强(开启场强)后,阴极发射电子导通,此时像素点又相当于一个有一定阻值的发光二极管^[11].单个像素

点的回路电阻 R 包括阴、阳公共电极电阻 R_c ,阴极引线电阻 R_c ,阳极引线电阻 R_a 和像素点自身电阻 R_p 4 部分,像素点集效电流如图 2 所示.

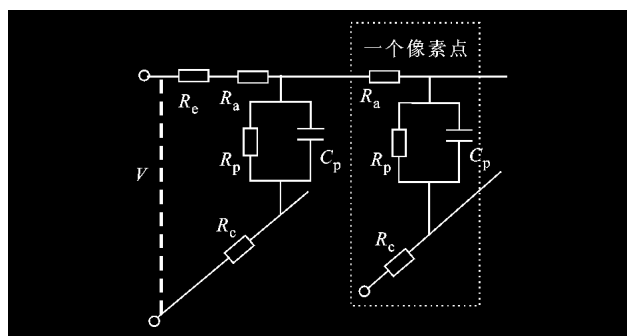


图 2 像素点等效电路图

设定印刷电极条的截面积 S 、电阻率 ρ 一致,行、列电极间距 d 一致,则 160×120 像素 CNT-FED 的第 i 行、 j 列对应的像素点 $P_{i,j}$ 的回路电阻为

$$R_{i,j} = R_c + R_a + R_c + R_p = R_c + \rho \frac{l_i}{S} + \rho \frac{l_j}{S} + R_p$$

$$\left. \begin{aligned} l_i &= id \quad i = 1, 2, \dots, 159 \\ l_j &= jd \quad j = 1, 2, \dots, 119 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: l_i 为像素点 $P_{i,j}$ 距离行公共电极的长度; l_j 为 $P_{i,j}$ 距离列公共电极的长度.可见,不同材料(ρ 值不同)作电极会引起阻值不同,对于同种材料,不同像素点对应的 l_i 、 l_j 不同,也会引起 CNT-FED 的 $R_a + R_c$ 不同.

测得采用 ITO 电极的 CNT-FED 中 2 个像素点间引线电极阻值约为 45Ω ,则在分辨率为 160×120 像素的显示屏上,像素点的引线电极阻值偏差可达到 $8 \sim 12 \text{ k}\Omega$,而像素点的总等效电阻约 $6 \sim 8 \text{ M}\Omega$,即 CNT-FED 的电极分压可达到 0.2% .

1.3 像素点特性测试

为深入研究电极线性电阻分压对亮度均匀性的影响,本文研究了单个像素点的场发射特性及发光特性. CNT-FED 的单个像素点的场发射特性如图 3 所示.图 4 为图 3 相应的 Fowler-Nordheim (F-N) 图.从 F-N 图可以看出,单个像素点的 F-N 特性在低压、高压两段都能较好地符合 F-N 理论模型^[12],通常认为 F-N 曲线的斜率发生改变是由于电子隧穿概率不同^[13].

采用 Chroma7100 色彩分析仪测试了 CNT-FED 中单个像素点的电压与亮度的关系,像素点面积为 $0.35 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$,结果如图 5 所示.由图 5 可见,像素点的发光亮度随电场强度的增加而迅速增加.测试数据的拟合曲线为指数函数,因而当外加

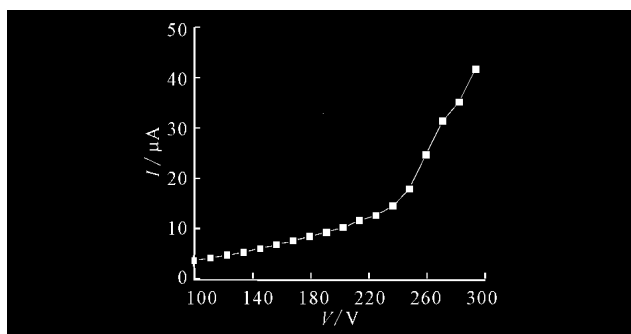


图3 CNT-FED单个像素点的场发射特性

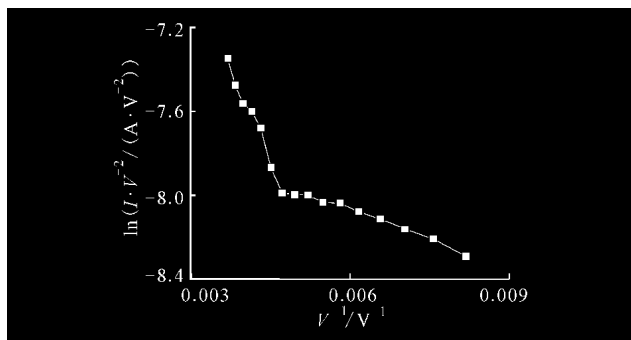


图4 CNT-FED单个像素点的场发射特性

电压很高时,电压的微小变化就会引起亮度的急剧增加。当CNT-FED的驱动电压为270 V时,像素点的发光亮度为507.15 cd/m²,若此时像素点两端电压变化0.2%,则显示亮度值的变化达-11.31~11.61 cd/m²。

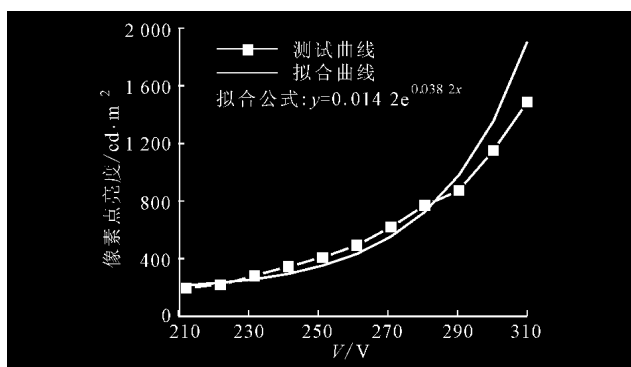


图5 单个像素点的电压与亮度关系

1.4 像素点亮度失真分析

CNT-FED采用基于脉宽调制的ADS驱动方法进行灰度显示。该方法是将一帧显示时间分为 N 个子场,每个子场按 $1:2:4:8:16:\dots:2^N$ 划分一帧时间段,光强 $I(t)$ 在不同子场时间内的积分值为显示亮度值,观看者基于人眼的视觉滞留效应,感应到不同的灰度。对第 n 级灰度的显示亮度 $L(n)$ 可等效为

$$L(n) = \int_0^n I(t) dt \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

为实现CNT-FED的高质量显示,各像素点在相同外电场作用下应具有基本一致的发光强度,即 $I(t)$

为常数。然而,对于阴、阳极均采用ITO做导电电极的 160×120 像素点的CNT-FED,结合本文1.3节的测量值进行计算,第1行第1列对应的像素点与第160行、第120列对应的像素点之间的阻值差为12.6 k Ω ,达到单个像素点阻值的0.2%。我们计算了外电压分别为260 V、270 V、280 V时,阻值有0.2%偏移的像素点在256级灰度显示中的失真情况,图6为仿真结果,内嵌图为第64级灰度显示中的失真情况。从图6中可以看出,在不同电压下,当有标准阻值的像素点显示64级灰度时,阻值有0.2%的偏差的像素点的灰度级在60~68级之间,而在256级灰度显示中,灰度失真级数达 ± 12 级。

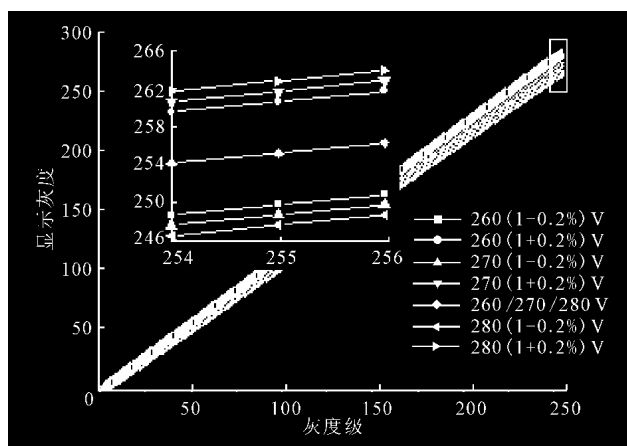


图6 单个像素点在256级灰度显示中的失真情况

本文仿真计算了同一电场下全屏像素点的显示失真情况。当CNT-FED的外加电压为270 V时,像素点的等效阻值为6 M Ω ,第64级灰度显示时各像素点的亮度分布情况如图7所示。从图中可以看出,显示屏上不同位置像素点有不同的亮度值。灰度失真最严重的像素点在显示屏的边缘区域,这与电极引线方向有关。

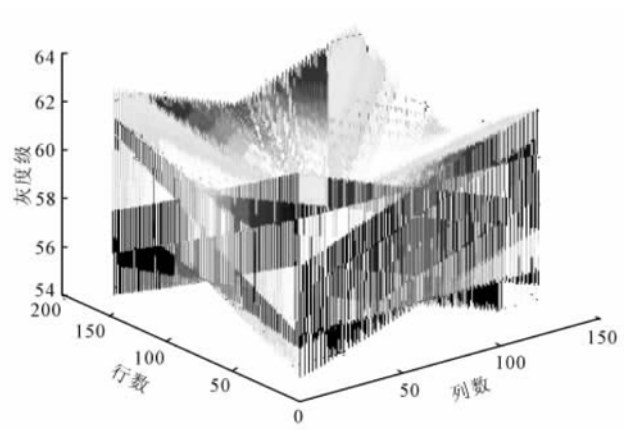


图7 全屏各像素点在第64级灰度显示中的失真情况

为保证256级灰度显示,本文计算了不同像素

点之间允许存在的最大外电压偏差. 结合本文 1.3 节像素点的亮度测试值, 丝网印刷 CNT-FED 的发光亮度为

$$L(V) = ae^{bV} \quad (3)$$

式中: a 、 b 为常数; V 为外电场电压.

若要显示 256 级灰度, 各像素点在外电压 V_1 作用下最大的亮度偏差为

$$\Delta L(V) = \frac{1}{256} L(V_1) \quad (4)$$

计算最大允许的电压偏差

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{\ln(L(V_1)/a)}{b} - \frac{\ln(L(V_2)/a)}{b} = \ln \frac{255}{256} \quad (5)$$

式中: V_2 为像素点的最小电压值. 对 256 级灰度显示的 CNT-FED, 各像素点间允许的最大电压偏差为 3.91 mV.

2 CNT-FED 发光均匀性改善方法

2.1 屏内部引线电极的改进

为了提高 CNT-FED 的灰度显示质量, 本文提出通过降低显示屏内部电极的线性电阻, 来改善像素点之间的亮度均匀性. 在不改变行、列矩阵结构的情况下, 显示屏内部的行、列的引线电极选用银或者镍等高导电性材料, 减小像素点间引线电极的电阻, 进而减小像素点间的电阻差值.

采用银制作屏内部的引线电极, 得到像素点间引线电极的电阻为 0.06Ω , 此时全屏各像素点引线电极线性电阻的偏差最大为 16.80Ω , 该偏差值与像素点的阻值比不足 0.0003% . 对于外加 270 V 驱动电压的 CNT-FED, 由线性阻值偏差引起的各像素点上的外电压偏差减小到 0.756 mV. 可见改进屏内部的引线电极后, CNT-FED 各像素点间的亮度偏差不影响 256 级灰度显示.

2.2 反馈电阻

在改造了显示屏内部电极的基础上, 本文还采用高阻值材料制作阴极的公共电极部分, 即增大 R_c . 值达到几千 Ω , 等效在阴极列上串入了一个大阻值的电阻, 从而进一步湮没了屏内引线电极引起的线性电阻偏差, 使电极分压被进一步消除.

新增电阻在电流回路中也是一个反馈电阻, 对消除场发射过程中像素点的自身阻值变化也有一定作用. CNT-FED 各像素点的 R_p 因为发射体数目、形状、与阳极距离的差异及周围气氛、电场的影响,

同一时刻不同像素点的 R_p 会不同, 不同时刻同一像素点的 R_p 也会有变化. 根据欧姆定律, 阻值 R_p 的偏差会引起不同像素点间发射电流的不同. 增加了反馈电阻后, 当某像素点的发射电流增加时, 相应的反馈电阻上的压降升高, 降低了像素点的电场强度, 从而使发射电流减小, 当某像素点发射电流较弱时, 对应的阴极上反馈电阻分压降低, 从而相对提升了该像素点的发射电流. 可见该反馈电阻提高了各像素点等效阻值的一致性.

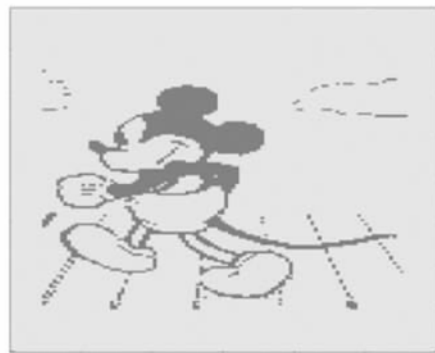
另外, 反馈电阻也起到限流保护作用. CNT-FED 的像素点具有高电压、低电流导通特性. 电路中增加了反馈电阻后, 抑制了突发大电流, 从而保护了像素点内的发射体^[14]不被强电流烧毁. 对于相邻像素点, 反馈电阻通过限流作用减少了可能存在的串扰现象^[15].

2.3 电极改进效果

新电极的设计结合了屏内部引线电极改造和反馈电阻的增加, 大大减小了引线电极线性电阻引起的像素点外电场的偏差, 因而可以在保证 256 级灰度显示质量的前提下, 使驱动电路可以在一定范围内提升驱动电压, 进一步提高显示亮度. 图 8 给出了电极改进前后的模拟显示效果图.



(a) 电极改进前



(b) 电极改进后

图 8 电极改进前后灰度显示效果

3 结 论

本文研究了电极的线性电阻分压对像素点间的发光均匀性的影响,发现屏内部电极引线会引起不同位置像素点具有不同的电场强度.为此,本文提出了一种2步改进电极的方法,先使各像素点的电极阻值偏差减小到总电极阻值的0.0003%,并增加阴极公共电极的阻值,通过反馈控制发射电流,保证了各像素点场发射电流的一致性.仿真结果显示该电极改进方法有效提高了像素点间的发光一致性,不仅消除了CNT-FED 256级灰度显示失真的问题,也有益于提高CNT-FED的亮度和寿命.

我们下一步的工作是在工艺上实现新电极的制作,并组装碳纳米管显示器件.

参考文献:

- [1] WANG Q H, SETLUR A A, LAUERHAAS J M, et al. A nanotube-based field-emission flat panel display [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(22): 2912-2913.
- [2] KIM J M, CHOI W B, LEE N S, et al. Field emission from carbon nanotubes for displays [J]. *Diamond and Related Materials*, 2000, 9 (3/6): 1184-1189.
- [3] CHOI W B, CHUNG D S, KANG J H, et al. Fully sealed, high-brightness carbon-nanotube field-emission display [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 75 (20): 3129-3131.
- [4] SHIROISHI T, HOSONO A, SONO A, et al. Improvement of emission characteristics uniformity of carbon nanotube field emission display by surface treatment [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology: B*, 2006, 24(2): 979-982.
- [5] SHI Yongsheng, ZHU Changchun, WANG Qikun, et al. Large area screen printing cathode of CNT for FED [J]. *Diamond and Related Materials*, 2003, 12(9): 1449-1452.
- [6] HUANG S, DAI L, MAU A W H. Patterned growth and contact transfer of well-aligned carbon nanotube films [J]. *Journal of Physical Chemistry: B*, 1999, 103 (21): 4223-4227.
- [7] SAITO Y, NISHIYAMA T, KATO T, et al. Field emission properties of carbon nanotubes and their application to display devices [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2002, 387: 303-310.
- [8] SHIBAYAMA K, HIRAKI M, SAITOU Y, et al. Improvement of lighting uniformity in field emission display with carbon nano-tube cathodes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 2003, 42 (6): 3698-3701.
- [9] SHIROISHI T, HOSONO A, SONO A, et al. Improvement of emission characteristics uniformity of carbon nanotube field emission display by surface treatment [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology: B*, 2006, 24 (2): 979-982.
- [10] KWON S J, LEE S H. Field emission characteristics depending on emitter patterns of a screen-printed carbon nanotube field emission array [J]. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 2006, 45 (1): 355-358.
- [11] GUO X, SILVA S R P. Circuit simulation of current-modulated field emission display pixel driver based on carbon nanotubes [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40 (18): 1113-1115.
- [12] FOLWER R H, NORDHEIM L. Electron emission in intense electric fields [J]. *Proceedings of the Royal Society of London: Series A*, 1928, 119(781): 173-181.
- [13] CHUNG M S, YOON B G. Analysis of the slope of the Fowler-Nordheim plot for field emission from n-type semiconductors [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology: B*, 2003, 21(1): 548-511.
- [14] PURCELL S T, VINCENT P, JOURNET C, et al. Hot nanotubes: stable heating of individual multiwall carbon nanotubes to 2000 K induced by the field-emission current [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88 (10): 105502.
- [15] JEONG Y C, PARK C C, KIM L S. A new crosstalk compensation method in line inversion TFT-LCD's [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1997, 44(6): 552-555.

(编辑 刘杨)