

新型有源矩阵有机发光显示电流编程像素电路

周 雷¹, 张立荣¹, 宋小锋², 吴为敬^{2*}, 姚若河¹

(1. 华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510641, E-mail: zhoulei007@yahoo.com.cn;

2. 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510641)

摘 要: 提出了一种新型有源矩阵有机发光显示用电流编程型像素驱动电路。该像素电路由 3 个开关薄膜晶体管、一个驱动薄膜晶体管、一个存储电容和两条控制线构成。仿真结果表明, 该 4T1C 像素电路可以补偿薄膜晶体管阈值电压的非均匀性以及有机发光二极管阈值电压的漂移, 发光电流的平均非均匀性为 4.63%。值得指出的是, 同传统的电流编程型像素电路相比, 本像素电路存储电容的接法可有效提高电路响应速度。此外, 还分析了寄生电容对像素电路工作的影响。

关 键 词: 有源有机发光二极管; 薄膜晶体管; 像素电路; 电流编程

中图分类号: TN27

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132803.0386

New Current-Programmed Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode Pixel Circuit

ZHOU Lei¹, ZHANG Li-rong¹, SONG Xiao-feng², WU Wei-jing^{2*}, YAO Ruo-he¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology,

Guangzhou 510640, China, E-mail: zhoulei007@yahoo.com.cn;

2. State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology,

Guangzhou 510640, China)

Abstract: A new current-programmed pixel circuit for active-matrix organic light-emitting diode (AMOLED) displays is presented. The pixel circuit consists of three switching thin-film transistors (TFTs), one driving TFT, one capacitor and two control lines. Simulation results show that the pixel circuit can effectively compensate for the nonuniformity of the TFT threshold voltage and the shift of OLED threshold voltage. And the average nonuniformity of the emitting current is 4.63%. Compared with the traditional current-programmed pixel circuits, the connection mode of the capacitor in the pixel circuit makes the circuit works faster. Furthermore, the influence caused by the parasitic capacitor in the pixel circuit is analysed.

Key words: active-matrix organic light-emitting diode; thin-film transistor; pixel circuit; current-programmed

收稿日期: 2013-01-19; 修订日期: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61204089); 广东省自然科学基金(No. S2012010008648); 广东省优秀博士学位论文作者资助项目(No. sybzzxm201026)

作者简介: 周雷(1987-), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事金属氧化物 AMOLED 面板设计的研究。

* 通信联系人, E-mail: wuwj@scut.edu.cn

1 引言

有源有机发光二极管 (AMOLED) 显示具有高亮度、宽视角、低功耗以及响应速度快等优点,近年来受到了广泛的研究^[1-8]。非晶硅 (a-Si) 薄膜晶体管 (TFT) 和多晶硅 (p-Si) TFT 是 AMOLED 目前的主流技术。a-Si TFT 在均匀性、低成本方面具有优势,然而其迁移率太低,且在长时间工作时,其阈值电压会发生漂移。p-Si TFT 迁移率高,但是在晶化过程中会产生晶界从而导致阈值电压和迁移率都很不均匀,不适合大面积显示。近年来,金属氧化物 TFT 技术的发展备受关注,由于其优良的迁移率 ($10\sim 100\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) 以及稳定性,且成本方面可与 a-Si 相比,在 AMOLED 显示中显示出巨大优势,因此越来越受到人们的关注^[9]。

然而,无论是对于 a-Si TFT, p-Si TFT 或者是金属氧化物 TFT,传统的 2 个薄膜晶体管和一个存储电容组成的像素电路 (简称 2T1C) 都不能满足均匀性显示的要求,必须设计能够补偿驱动晶体管阈值电压变化的像素补偿电路。并且 OLED 在工作时,其阈值电压也会发生漂移^[10],所以在设计像素补偿电路时, OLED 的阳极电压的变化所引起的发光亮度降低也必须考虑。基于此,一些研究人员提出了电压编程型的像素电路, Lee J H 等人提出的 6T1C 像素电路^[10] 和 Wu W J 提出的 5T2C 像素电路^[11] 都能补偿 TFT 和 OLED 的阈值电压变化。然而过多的电路元件在底发射型 AMOLED 中会限制像素开口率,在顶发射型 AMOLED 中会限制像素的大小不适合高 PPI 的高精细化显示应用。Nathan A 提出了电流镜像素电路^[12],然而在 p-Si TFT 中很难做到 T3 和 T4 管的工艺参数完全相同,这势必会影响像素点的发光均匀性。He Y 等人提出了一种电流感程型像素电路^[13],该像素电路能够补偿驱动 TFT 阈值电压的非均匀性,但是该电流感程型像素电路的充放电时间较长,尤其是低灰阶显示时,较长的充放电时间会使数据写入不充分,影响正常显示。

本文提出的电流感程型像素电路 (4T1C),时序控制简单,电容跨接在驱动管栅端和源端,在充放电时,电容上电荷的变化量会更小,充放电时间更短,速度较 He Y 等提出的像素电路^[13] 快,对

TFT 和 OLED 阈值电压变化补偿效果好, OLED 发光电流平均非均匀性 4.63%, 适合应用于中小尺寸的 AMOLED 显示。

2 像素电路设计与工作原理

图 1 是采用 ITO (170 nm)/MeO-TBD:F4-TCNQ (150 nm, 4%)/NPB (20 nm)/Alq₃:C545T (40 nm, 2%)/Alq₃ (25 nm)/LiF (1 nm)/Al (150 nm) 的 OLED 器件结构,发光大小为边长 3 mm 的正方形,在恒定 2 mA 电流条件下阳极电压的漂移特征。经过 180 h 的老化实验, OLED 阳极电压从 6.6 V 升高到 7.2 V。

虽然 AMOLED 正常工作时,其发光电流密度远小于实验中条件,但是其 OLED 阈值电压漂移对 AMOLED 像素电路的影响是不容忽视的。

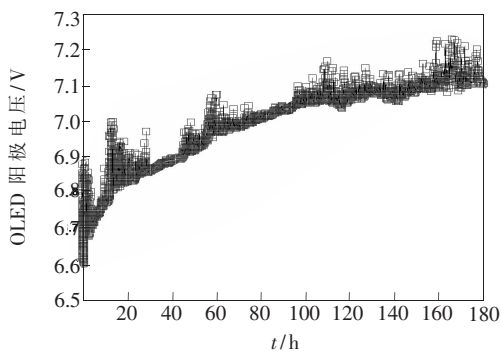


图 1 OLED 加 2 mA 条件下阳极电压的漂移特征
Fig. 1 Anode voltage shift of OLED versus time by applying 2 mA current in stress

如图 2 所示,该 4T1C 像素电路由 4 个薄膜晶体管和 1 个存储电容构成。其中 T1、T2 和 T3 是开关管, T4 是驱动管。电路工作原理如下: ①当扫描线 V_{scan} 是高电平时, T1 和 T2 管开启, V_{ems} 为低电平, 将 T3 管关断, 这时数据信号 I_{data} 写入, 驱动管 T4 栅极电位发生变化直到稳定, 这时流过 OLED 的电流是 I_{data} 。

$$I_{\text{data}} = \frac{1}{2} \mu C_{\text{ox}} \frac{W}{L} (V_A - V_B - V_{\text{th}})^2 \quad (1)$$

其中 μ 是 TFT 的迁移率, C_{ox} 是绝缘层单位面积电容, $\frac{W}{L}$ 是 T4 管的宽长比, V_A 和 V_B 分别是图 2 中 A 点和 B 点电位。 V_{th} 是 T4 管的阈值电压。

②当扫描线 V_{scan} 是低电平时, T1 和 T2 管关闭, 同时发光控制线 V_{ems} 开启 T3 管, 进入发光阶

段。由于驱动管 T4 栅极没有泄放电荷的通路, 电容 C_s 两端的电位 V_{AB} 能够保持, 所以这时流过 OLED 的电流是仍然是 I_{data} 。

OLED 发光亮度由流过的电流密度决定, 而该像素电路中 OLED 发光电流密度仅与 I_{data} 相关, 与电路中 TFT 和 OLED 的参数无关, 所以该像素电路能够较好的补偿因 TFT 阈值电压变化和 OLED 阈值电压退化导致的发光亮度非均匀性。

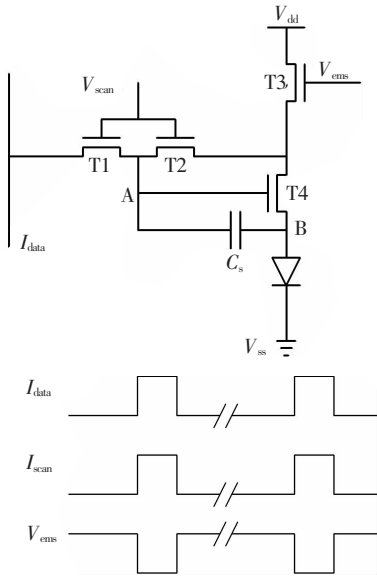


图 2 电流编程型电路图和驱动时序图

Fig. 2 Proposed current-programmed pixel circuit and timing scheme of the signal lines

3 电路仿真与分析

为了验证该像素电路的阈值电压补偿功能, 我们采用 silvaco SMART-SPICE 对像素电路进行了仿真分析, 仿真中使用 RPI poly-Si TFT 模型 (Level=36), 在仿真中使用一个 TFT 和一个电容并联的方式来代替真实的 OLED 电路模型。像素电路设计的各参数如表 1 所示。

以下分别设定不同的 TFT 阈值电压和不同的 OLED 阈值电压, 对电路的发光电流非均匀性进行仿真, 非均匀性 (F_{non}) 表达式如下:

$$F_{non} = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{AVG}} \times 100\% \quad (2)$$

其中 I_{MAX} 表示发光电流的最大值, I_{MIN} 表示发光电流的最小值, I_{AVG} 表示发光电流的平均值。

当驱动管阈值电压设定为 1.7 V、2 V 和 2.3 V 时分别对该像素电路进行仿真, 其电流非均匀性

表 1 该像素电路的设计参数

Table I Design parameters of the proposed pixel circuit

设计参数	值
V_{dd}/V	15
V_{scan}/V	-10~15
V_{ems}/V	-10~15
C_s/pF	0.3
C_{OLED}/pF	5
$W/L(TFT1) /(\mu m/\mu m)$	5/5
$W/L(TFT2) /(\mu m/\mu m)$	5/5
$W/L(TFT3) /(\mu m/\mu m)$	5/5
$W/L(TFT4) /(\mu m/\mu m)$	10/5
$W/L(OLED) /(\mu m/\mu m)$	25/5

如图 3 所示。没有补偿功能的 2T1C 像素电路其发光电流非均匀性是 25.07%~93.03%, 而我们设计的像素电路其发光电流非均匀性是 0.31%~3.97%, 图 3 表明我们设计的像素电路对 TFT 的阈值电压非均匀性具有很好的补偿效果。

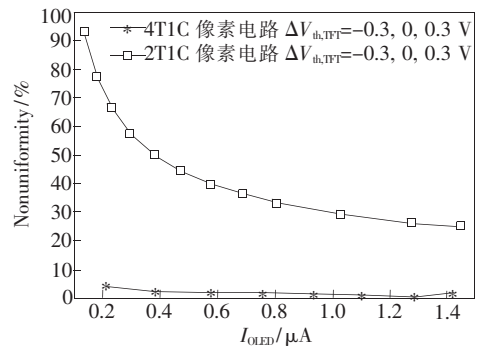


图 3 不同 TFT 阈值电压下输出电流的非均匀度
Fig. 3 Non-uniformity of different output current with different TFT threshold

当 OLED 阈值电压设定为 3 V、3.3 V 和 3.6 V 时分别对该像素电路进行仿真, 其电流非均匀性如图 4 所示。没有补偿功能的 2T1C 像素电路发光电流非均匀性是 23.69%~80.92%, 而我们设计的像素电路其发光电流非均匀性是 1.09%~8.93%, 图 4 表明我们设计的像素电路对 OLED 老化导致的阈值电压漂移具有很好的抑制效果。

最后同时考虑 TFT 阈值电压的非均匀性和 OLED 阈值电压的漂移, 其中 $\Delta V_{th,TFT} = -0.3 V$ 、 $0 V$ 、 $0.3 V$, $\Delta V_{th,OLED} = 0 V$ 、 $0.3 V$ 、 $0.6 V$, 则在该条件下, 像素补偿电路的发光电流非均匀性如

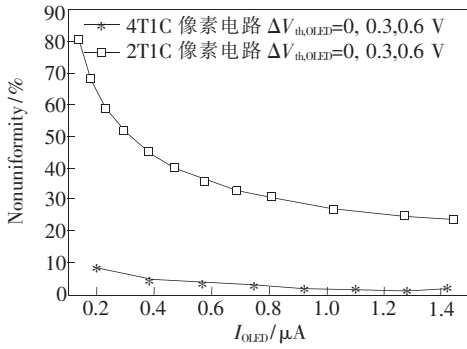


图 4 不同 OLED 阈值电压下输出电流的非均匀度

Fig. 4 Non-uniformity of different output current with different OLED threshold voltage

图 5 所示。没有补偿功能的 2T1C 像素电路发光电流非均匀性是 47.38%~157.3%，而我们设计的像素电路其发光电流非均匀性是 1.48%~11.9%，由此表明，我们设计的电流编程型像素电路既可以补偿 TFT 的阈值电压非均匀性又可以补偿 OLED 老化导致的阈值电压漂移。

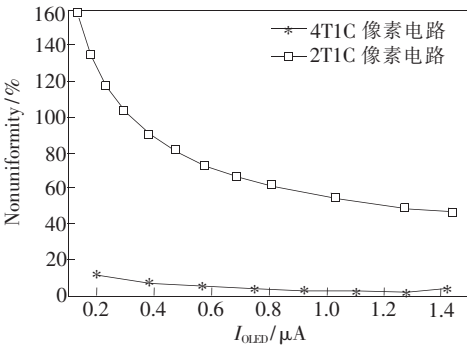


图 5 不同发光电流下输出电流的非均匀度

Fig. 5 Non-uniformity of different output current with different input voltage

图 6 是该像素电路的传输特性,理想情况下发光电流 I_{OLED} 与数据电流 I_{data} 相等,但是由于时钟馈通效应,会使得发光电流 I_{OLED} 比数据电流 I_{data} 低一些。图 7 是该像素电路的电流灰阶响应特性,在该电流灰阶响应中,每隔 0.1 ms 给电路输入不同的 I_{data} , 分别是 0.2 μA 、0.4 μA 、0.6 μA 、0.8 μA 、1 μA 、1.2 μA 、1.4 μA 、1.6 μA 。仿真结果表明,在发光阶段,电压和电流都比在编程阶段会低一些。这是由于时钟馈通效应造成的。具体分析如下:

当扫描控制线 V_{scan} 跳变为低电平时, A 点电位由于时钟馈通效应会有相应变化,变化量由式

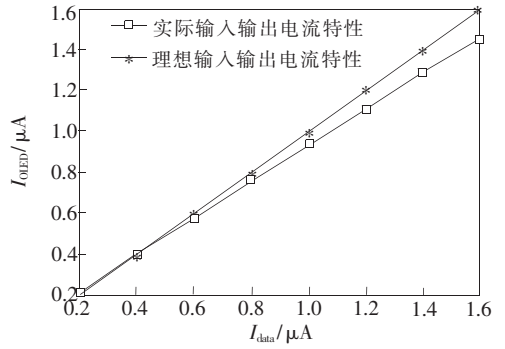


图 6 像素电路转移特性

Fig. 6 Transfer characteristic of the proposed pixel circuits

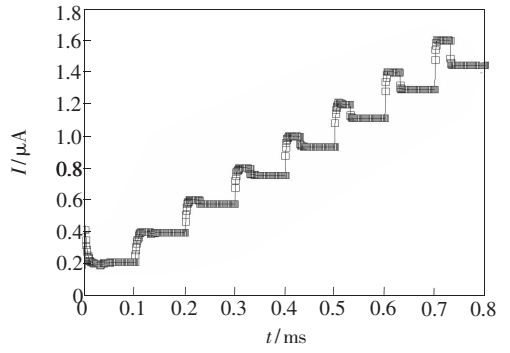


图 7 电流灰阶响应特性

Fig. 7 Current grayscale response of the proposed pixel circuit

(3)可以计算。

$$\Delta V_{A1} = \frac{C_{gs1} + C_{gd2}}{(C_s + C_{gs4}) \cdot C_{OLED} + C_{gs1} + C_{gd2}} \Delta V_{scan} \quad (3)$$

设计中如果 T1 和 T2 宽长比相同,设 TFT 栅源、栅漏交叠电容 $C_{gs1} = C_{gd2} = C_p$ 。实际中 C_{OLED} 一般比 C_s 大 10 倍以上,且栅源、栅漏交叠电容一般都是几十 fF,远小于 C_s ,所以式(3)可以近似简化为:

$$\Delta V_{A1} = \frac{2C_p}{C_s + C_{gs4} + 2C_p} \Delta V_{scan} \quad (4)$$

B 点电位随着 A 点电位的变化也会有相应变化:

$$\Delta V_{B1} = \frac{C_s + C_{gs4}}{C_s + C_{gs4} + C_{OLED}} \Delta V_{A1} \quad (5)$$

A 端和 B 端电压差的变化:

$$\Delta V_{AB1} = \Delta V_{A1} - \Delta V_{B1} = \frac{C_{OLED}}{C_s + C_{gs4} + C_{OLED}} \Delta V_{A1} \quad (6)$$

所以发光阶段电流

$$I_{\text{OLED}} = \frac{1}{2} \mu C_{\text{ox}} \frac{W}{L} (V_{\text{AB}} - \Delta V_{\text{AB1}} - V_{\text{th}})^2 \quad (7)$$

相比 I_{data} 会有少许下降,这是像素电路存在的共性问题。从设计像素电路版图的角度,可从两个方面着手解决这个问题:一是尽量减少 TFT 栅源、栅漏交叠电容;二是增加存储电容 C_s ,但是存储电容太大就存在两方面的问题,一是会增加充放电时间,从而降低电路速度;二是大的存储电容面积会使像素开口率下降,功耗增加。

当 OLED 长时间工作后,其阈值电压会发生漂移,则在电路工作时,表现为 OLED 阳极电位会相应升高。则相应存储电容两端电位 V_{AB} 也会发生变化。

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{AB2}} &= \Delta V_{\text{B2}} - \Delta V_{\text{A2}} = \\ \Delta V_{\text{th,OLED}} - \frac{C_s + C_{\text{gs4}}}{C_s + C_{\text{gs4}} + 2C_p} \Delta V_{\text{th,OLED}} &= \\ \frac{2C_p}{C_s + C_{\text{gs4}} + 2C_p} \Delta V_{\text{th,OLED}} \end{aligned} \quad (8)$$

$$I_{\text{OLED}} = \frac{1}{2} \mu C_{\text{ox}} \frac{W}{L} (V_{\text{AB}} - \Delta V_{\text{AB2}} - V_{\text{th}})^2 \quad (9)$$

由 OLED 阈值电压变化引起的 AB 两端电位的变化是导致产生 OLED 电流非均匀性的主要原因,尤其是在低灰阶时更为明显,如图 4 所示,在 $I_{\text{data}} = 0.2 \mu\text{A}$ 时,由 OLED 阈值电压变化 $\Delta V_{\text{th,OLED}} = 0.6 \text{ V}$ 引起的电流非均匀性是 8.93%。

图 8 是两种电流编程型像素电路在 $I_{\text{data}} = 1 \mu\text{A}$

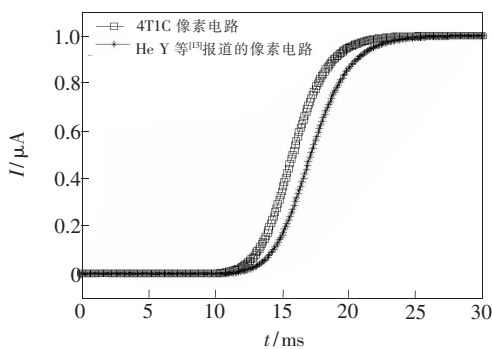


图 8 两种电流编程型像素电路响应特性

Fig. 8 Rresponse characteristic of two current programmed pixel circuits

时响应特性。仿真表明,新的 4T1C 像素电路比 He Y 等人^[13]报道的像素电路在启动时响应要快。原因在于电容的接法,采用跨接在驱动管栅源两端的电容接法,电容充放电的电量更小,因此在更短的时间可以达到充放电稳定。

特别是从该像素点在从最低灰阶到最高灰阶变化时,该区别更加明显。对于新的 4T1C 像素电路,在最高灰阶时

$$I_{\text{data_max}} = \frac{1}{2} \mu C_{\text{ox}} \frac{W}{L} (V_{\text{A_max}} - V_{\text{B_max}} - V_{\text{th,TFT}})^2 \quad (10)$$

其中 $I_{\text{data_max}}$ 代表最高灰阶下对应的编程电流, $V_{\text{A_max}}$ 表示最高灰阶下驱动管栅极电位, $V_{\text{B_max}}$ 表示最高灰阶下 OLED 阳极电位, $V_{\text{th,TFT}}$ 表示驱动管的阈值电压。值得注意的是,在最低灰阶时,驱动管的栅源电压就是 $V_{\text{th,TFT}}$ 。对于新的 4T1C 像素电路,电容两端电量变化

$$\Delta Q_1 = C_s (V_{\text{A_max}} - V_{\text{B_max}} - V_{\text{th,TFT}}) \quad (11)$$

对于 He Y 等^[11]报道的 4T1C 像素电路,电容两端电量变化

$$\Delta Q_2 = C_s (V_{\text{A_max}} - V_{\text{th,OLED}} - V_{\text{th,TFT}}) \quad (12)$$

其中 $V_{\text{th,OLED}}$ 是 OLED 的阈值电压,在最低灰阶时, OLED 的阳极电压就是 $V_{\text{th,OLED}}$ 。显然, $V_{\text{B_max}} > V_{\text{th,OLED}}$, 所以 $\Delta Q_1 < \Delta Q_2$, 新的 4T1C 像素电路会更快达到充放电稳定。

4 结 论

设计了一种 AMOLED 显示用电流编程型像素驱动电路,并给出了驱动方法。仿真表明,该 4T1C 像素电路可以有效补偿 TFT 阈值电压的非均匀性以及 OLED 阈值电压的退化。电流编程型像素电路在低灰阶时充放电慢,然而本像素中存储电容的接法可以提高电路响应速度。本文分析了寄生电容对像素电路工作的影响以及影响发光电流非均匀性的关键因素,对像素电路的设计和分析有一定参考意义。本像素电路的发光电流平均非均匀性 4.63%, 适合应用于中小尺寸的 AMOLED 显示。

参 考 文 献:

- [1] Dawson R, Shen Z, Furst D A, et al. The impact of the transient response of organic light emitting diodes on the design of active matrix OLED displays [C] // IEDM Tech. Dig., San Francisco, CA; IEEE, 1998: 875-878.

- [2] Lee J H, Nam W J, Jung S H, *et al.* A new current scaling pixel circuit for AMOLED [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2004, 25(5):280-282.
- [3] Lin Y C, Shieh H P, Kanicki J. A novel current-scaling a-Si H TFTs pixel electrode circuit for AM-OLEDs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, 52(6):1123-1131.
- [4] Servati P, Nathan A. Functional pixel circuits for elastic AMOLED displays [J]. *Proceedings of IEEE*, 2005, 93(7):1257-1264.
- [5] 张彤,郭小军,赵毅,等. a-Si TFT OLED 有源驱动阵列参数的优化与布局设计 [J]. *液晶与显示*, 2003, 18(5):332-337.
- [6] 郭英英,李荣玉,梁宝闻,等. AM-OLED 四管像素驱动电路特性研究 [J]. *液晶与显示*, 2008, 23(6):667-670.
- [7] 尹盛,江博,李喜峰. 17.8 cm 彩色 AMOLED 驱动模块的研制 [J]. *液晶与显示*, 2012, 27(3):347-351.
- [8] 李国强,章坚武,占志伟. AMOLED 驱动电路和 LINUX 下驱动程序设计 [J]. *液晶与显示*, 2011, 26(4):527-531.
- [9] 詹润泽,谢汉萍,董承远. 采用不同透明电极的非晶铟镓锌氧化物薄膜晶体管 [J]. *液晶与显示*, 2013, 28(1):55-58.
- [10] Lee J H, Kim J H, Han M K. A new a-Si:H TFT pixel circuit compensating the threshold voltage shift of a-Si:H TFT and OLED for active matrix OLED [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2005, 26(12):897-899.
- [11] Wu W J, Zhou L, Yao R H, *et al.* A New Voltage-Programmed Pixel Circuit for Enhancing the Uniformity of AMOLED Displays [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2011, 32(7):931-933.
- [12] Nathan A, Kumar A, Sakariya K, *et al.* Amorphous silicon thin film transistor circuit integration for organic LED displays on glass and plastic [J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2004, 39(9):1477-1486.
- [13] He Y, Hattori R, Kanicki J. Improved a-Si H TFT pixel electrode circuits for active matrix organic light emitting displays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(7):1322-1325.