

文章编号: 1007-2780(2005)04-0318-06

## 有源 OLED 像素电路的设计与仿真

黄金英<sup>1</sup>, 安吉宇<sup>1</sup>, 张志伟<sup>1</sup>, 赵玉环<sup>1</sup>, 荆海<sup>1</sup>, 凌志华<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 北方液晶研究开发中心,

吉林 长春 130031, E-mail: [huang\\_jinying@yahoo.com.cn](mailto:huang_jinying@yahoo.com.cn);

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 设计了有源 OLED 显示用非晶硅薄膜晶体管恒流型 4-TFT 像素驱动电路, 并给出了驱动方法。应用 HSPICE 仿真了恒流型像素驱动电路的工作过程, 详细分析了源(Source)电压  $V_{DD}$ 、存储电容  $C_s$ 、以及开关晶体管  $T_1$ 、驱动晶体管  $T_3$  的宽长比等参数对电路的输出特性的影响。仿真结果表明, 此电路可以在整个帧周期持续供给 OLED 器件电流, 并且解决了由于各像素驱动管阈值电压的差异带来的 OLED 亮度的不均匀问题。

**关 键 词:** 有源 OLED; 非晶硅薄膜晶体管; 像素驱动电路; 仿真

中图分类号: TN27 文献标识码: A

## 1 引 言

有源有机发光二极管 (AMOLED) 由于在高分辨率、大面积平板显示有着很大的潜力而成为当今平板显示领域的研究热点。在过去的几年中, 人们在有机发光二极管显示的有源驱动方面开展了大量的研究工作<sup>[1~8]</sup>, 提出了多种驱动方案, 设计了 1-TFT、2-TFT、4-TFT 甚至 6-TFT 的像素电路。1-TFT 的结构因为无法实现在整个帧周期持续供给 OLED 器件电流而被淘汰<sup>[1]</sup>。OLED 的亮度和流过它的电流成正比, 为了得到均匀的亮度, 必须将分配到每个像素的电流做到相同。2-TFT 结构虽然能够实现在整个帧周期持续供给 OLED 器件电流, 但是无法解决由于各像素 TFT 阈值电压 ( $V_{th}$ ) 的差异带来的 OLED 亮度的不均匀。因 OLED 基本构造是属于电流驱动, 需要稳定的电流来控制发光, 与 TFT-LCD 利用稳定电压控制发光不同, AM-OLED 为了达到足够的亮度, 需要有可以提供较大电流的 TFT, 电子迁移率高的低温多晶硅薄膜管 (LTPS TFT) 技术便成为 AMOLED 的理想驱动技术<sup>[9]</sup>。虽然 LTPS TFT 是理想的 AMOLED 驱动载台, 但目前 LTPS TFT 的生产成本高, 加上 LTPS 表面晶体形成上的误差不易控制, 使得 OLED 在发光

时, 因不均匀而形成波纹 (MURA) 等问题, 一直是困扰 LTPS-TFT-OLED 发展之所在。相对的非晶硅薄膜晶体管 (a-Si TFT) 的生产技术已相当成熟, 且大小尺寸基板的产能相当充裕, 成本也较 LTPS TFT 低, 如果应用在 OLED 的量产上, 将能大幅降低 AMOLED 制造成本。

为解决 TFT 阈值电压差异带来的 OLED 亮度的不均匀问题, 并且考虑到开口率, 本文设计了基于 a-Si TFT 的 4-TFT OLED 用恒流型像素驱动电路。并利用 HSPICE 软件进行仿真分析, 给出各个参数的变化对电路性能的影响, 为 OLED 像素驱动电路的设计提供依据。

## 2 像素电路的设计和工作原理

图 1 是 4-TFT 恒流型像素驱动电路的示意图。其中  $T_1$ 、 $T_2$  为开关晶体管, 由扫描电压控制信号输入像素;  $T_3$  为驱动晶体管, 直接驱动 OLED 像素发光;  $T_4$  同样作为一个开关使用, 由控制电压  $V_{ctrl}$  使其开或者关。  $V_{select}$ 、 $I_{data}$ 、 $V_{DD}$  和  $V_{ctrl}$  分别为扫描电压、电流数据信号、源电压和控制电压, 各信号的波形如图 2 所示。在图 2 中各信号下像素电路的工作原理为: 当扫描电压  $V_{select}$  为高电平时, 开关晶体管  $T_1$ 、 $T_2$  同时导通,  $T_1$  的导通使数据信号给存储电容  $C_s$  充电, 同时使  $T_3$  的

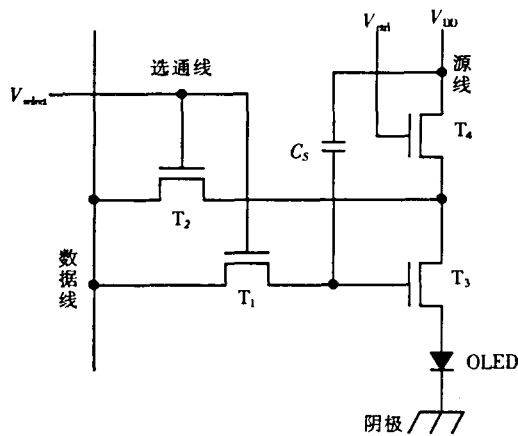


图 1 4-TFT 恒流型像素驱动电路。其中  $C_s$  是存储电容,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  分别代表  $TFT_1$ 、 $TFT_2$ 、 $TFT_3$  和  $TFT_4$ 。

Fig. 1 Schematic of constant-current, 4-TFT pixel electrode circuit.  $C_s$  represents the storage capacitor.  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  and  $T_4$  represent  $TFT_1$ ,  $TFT_2$ ,  $TFT_3$  and  $TFT_4$ , respectively.

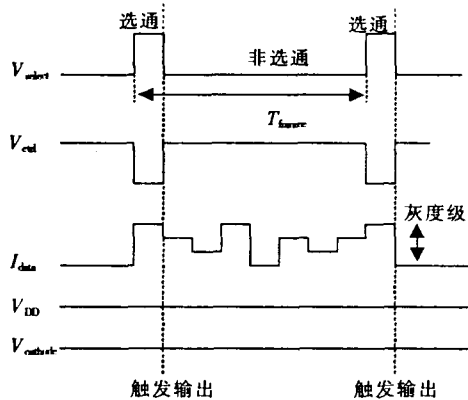


图 2 4-TFT 恒流型像素驱动电路各外部输入信号  
Fig. 2 Operation waveforms used for different external terminals

栅极电势升高, 超过  $T_3$  的阈值电压时  $T_3$  导通, 数据信号  $I_{data}$  流经  $T_2$ 、 $T_3$  供给 OLED 的阳极 (ITO 电极) 驱动 OLED, OLED 的发光亮度与电流成正比。在此过程中控制电压  $V_{ctrl}$  为低电平,  $T_4$  处于截止状态。选通状态下各 TFT 的工作状态是:  $T_1$ 、 $T_2$  工作在线形区,  $T_3$  工作在饱和区,  $T_4$  截止。当扫描电压  $V_{select}$  为低电平时,  $T_1$ 、 $T_2$  截止, 存储电容  $C_s$  提供给  $T_3$  的栅电压使  $T_3$  保持导通状态, 此时控制电压  $V_{ctrl}$  为高电平, 使  $T_4$  导通, 电流由  $V_{DD}$  经由  $T_3$ 、 $T_4$  供给 OLED 的阳极, 实现了在一帧内 OLED 持续发光。非选通状态

下, 各 TFT 的工作状态是:  $T_1$ 、 $T_2$  截止,  $T_4$  工作在线性区,  $T_3$  依然工作在饱和区。

在实际工艺制作中, 各个 TFT 的阈值电压很难做到相同。本设计中解决了像素 TFT 阈值电压的差异带来的 OLED 亮度的不均匀问题。图 3 为驱动晶体管  $T_3$ 、阈值电压  $V_{th3}$  取不同值时像素的直流特性仿真。从仿真结果可以看到, 像素的直流特性不受  $V_{th3}$  的影响。这是因为: 如果驱动晶体管  $T_3$  的阈值电压  $V_{th3}$  不均匀, 在像素选通阶段, 供给像素的数据电流根据负载自动调节, 这样各像素的驱动晶体管  $T_3$  的栅压  $V_{G3}$  也自动调节 (图 4) 使输出电流保持一致, OLED 的亮度也

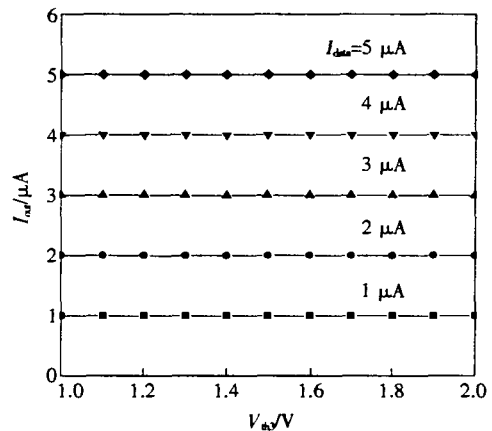


图 3 驱动晶体管  $T_3$  的阈值电压  $V_{th3}$  对像素驱动电路直流特性的影响

Fig. 3 Influence of the drive TFT ( $T_3$ ) threshold voltage on the DC characteristics of the 4-TFT pixel electrode circuit

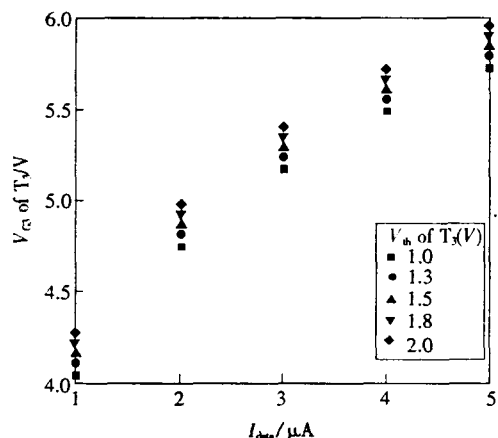


图 4 加在  $T_3$  栅上的电压根据驱动晶体管  $T_3$  的阈值电压  $V_{th3}$  自动调整

Fig. 4 Automatic adjustment of the drive TFT ( $T_3$ ) gate voltage during the ON state for different driving TFT threshold voltage

就一样了。而开关晶体管  $T_1$ 、 $T_2$  及  $T_4$  的阈值电压差异不影响输出电流。

因为 OLED 的亮度与流过它的电流成正比，而从像素电路可以看到流过 OLED 的电流由输入的数据电流  $I_{data}$  决定，所以像素的灰度由输入的数据电流  $I_{data}$  水平决定，输入不同的数据电流  $I_{data}$  就会有不同的电流输出到 OLED，从而实现灰度显示。

### 3 电路仿真与结果讨论

考虑实际应用，以 13.2 cm (5.2 in) 显示屏 (320 × 3) × 240 阵列为例，设计了单元像素为 110 μm × 330 μm 的 4-TFT 驱动电路，单元像素的布局如图 5 所示。考虑到像素驱动能力及开口率，各参数及其使用的各外部输入信号设定值如表 1 所示，其中  $V_{select}$  的占空比为 1/64。通过 HSPICE 软件仿真，验证了电路能在整个帧周期为 OLED 提供电流。

图 6 给出了源电压  $V_{DD}$  对输出电流  $I_{out}$  的影

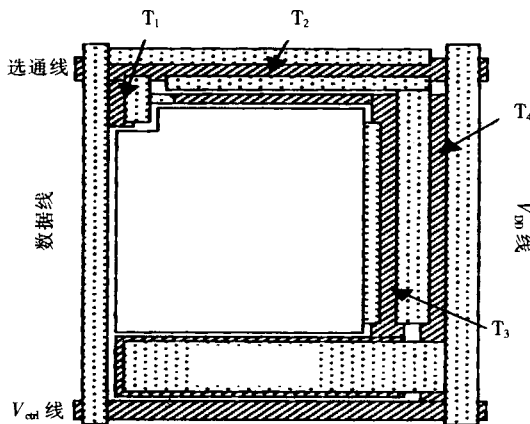


图 5 单元像素布局示意图

Fig. 5 Top view of the 4-TFT pixel electrode circuit

表 1 像素电路各参数及输入信号

Table 1 Pixel electrode circuit parameters and input signals used for the 4-TFT pixel electrode circuit

参数名称	数值	信号名称	数值
$W_1/L_1$	30/6 μm	$V_{select}$	0 → 25 V
$W_2/L_2$	66/6 μm	$V_{ctrl}$	0 → 25 V
$W_3/L_3$	200/6 μm	$I_{data}$	0 → 5.4 μA
$W_4/L_4$	200/6 μm	$V_{DD}$	5.5 V
$C_s$	3 pF	$V_{cathode}$	0 V

响，其中存储电容  $C_s$  为 3 pF。从图中我们可以看到在像素被选通状态下，输出电流  $I_{out}$  逐渐增大直到近似等于输入的数据电流  $I_{data}$ ，然后在选通过程中维持不变；当  $V_{select}$  由高电平变为低电平，同时  $V_{ctrl}$  由低电平变为高电平时，像素处于非选通状态，输出电流  $I_{out}(OFF) \neq I_{out}(ON)$ ，而是下降到某一值后保持稳定。输出电流  $I_{out}(OFF)$  不为零，说明此电路能够实现整个帧周期为 OLED 提供电流。 $I_{out}(OFF)$  与  $I_{out}(ON)$  相比都有所下降，下降的幅度与  $V_{DD}$  有关， $V_{DD}$  越大  $I_{out}$  下降的幅度越小，在像素非选通状态下供给 OLED 的电流就越接近选通状态下供给 OLED 的电流，这样 OLED 的亮度抖动就越小。但是并不是  $V_{DD}$  越大越好，当  $V_{DD}$  很大时，即使输入电流  $I_{data}$  为零，都有输出电流  $I_{out}$  供给 OLED。这是因为即使输入电流  $I_{data}$  为零， $T_3$  的漏电压等于栅压，使  $T_3$  微小开启，有少量电荷流过， $V_{DD}$  越大， $T_3$  栅压越大，输入电流为零的情况下输出电流越大。除此以外， $V_{DD}$  的选择要使  $T_4$  在像素非选通状态下工作在线性区。

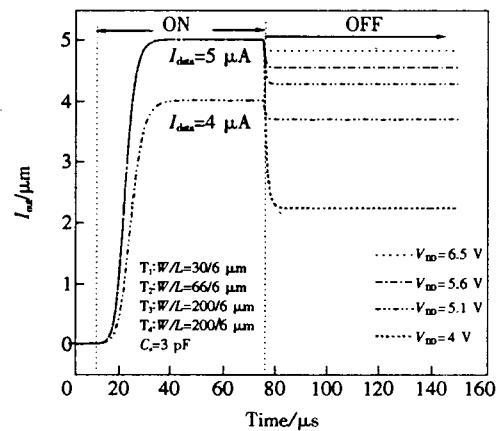


图 6  $V_{DD}$  对输出电流的影响

Fig. 6 Influences of  $V_{DD}$  voltage on output current characteristics of the 4-TFT pixel electrode circuit

除了源电压  $V_{DD}$  外，影响像素非选通状态下输出电流  $I_{out}$  大小的另一因素是存储电容  $C_s$ 。从图 7 中可以看到在给定的源电压  $V_{DD}$  时，像素选通状态下，输出电流  $I_{out}$  由零逐渐增大到近似输入数据电流  $I_{data}$ ，然后稳定，存储电容  $C_s$  越大所用时间越长，但实际的充放电时间是一定的，所以  $C_s$  电容的大小要适当。进入非选通状态时，输出电流  $I_{out}$  迅速下降然后在某一值稳定，存储电容  $C_s$

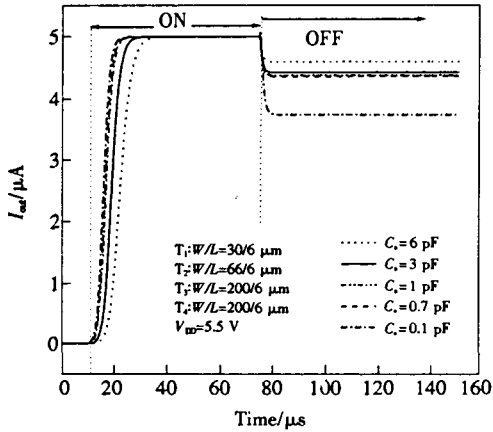


图 7 存储电容  $C_s$  对输出电流  $I_{out}$  的影响,  $I_{data} = 5 \mu A$ 。  
Fig. 7 Influences of storage capacitor on output current characteristics of the 4-TFT pixel electrode circuit. Data current is  $5 \mu A$ .

越大,  $I_{out}(OFF)$  就越接近  $I_{out}(ON)$ 。这是因为开关晶体管  $T_1$  的寄生电容  $C_{p1}$  引起  $T_3$  栅压降低, 从而使非选通状态下输出电流  $I_{out}(OFF)$  减小。如果在给定  $I_{data}$  下,  $T_3$  的栅压理想情况下能达到的值为  $V_{data}$ , 而由于  $T_1$  的寄生电容  $C_{p1}$  的存在实际达到的值为  $V$ , 那么  $\Delta V = |V - V_{data}|$ , 有<sup>[10]</sup>:

$$\Delta V = \frac{C_{p1} \Delta V_{select}}{C_{p1} + 2C_{p3} + C_{OX} + C_s} \quad (1)$$

其中  $\Delta V_{select}$  为  $V_{select}$  的高低电平差,  $C_{p1}$ 、 $C_{p3}$  和  $C_{OX}$  分别为  $T_1$ 、 $T_3$  的寄生电容和栅氧化层电容。上式可以写为:

$$\frac{1}{\Delta V} = \frac{C_{p1} + 2C_{p3} + C_{OX} + C_s}{C_{p1} \Delta V_{select}} = \frac{C_s}{C_{p1} \Delta V_{select}} + \frac{C_{p1} + 2C_{p3} + C_{OX}}{C_{p1} \Delta V_{select}} \quad (2)$$

设  $A = \frac{1}{C_{p1} \Delta V_{select}}$ ,  $B = \frac{C_{p1} + 2C_{p3} + C_{OX}}{C_{p1} \Delta V_{select}}$ , 式(2)可以改写为:

$$\frac{1}{\Delta V} = AC_s + B \quad (3)$$

当像素参数、工艺确定以后,  $A$ 、 $B$  均为常数,  $1/\Delta V$  与  $C_s$  是线性关系。存储电容越大,  $\Delta V$  越小。

选通时间结束后, 在一帧周期内像素驱动晶体管  $T_3$  的栅压应该保持不变, 供给 OLED 的电流才能不变, 所以要求存储电容有很高的保持率。驱动晶体管  $T_3$  工作在饱和区, 输出电流与  $T_3$  的

栅压  $V_G$  有如下关系:

$$I_{out} = \frac{W}{2L} \mu_{FE} C_{OX} (V_G - V_T)^2 \quad (4)$$

其中  $\mu_{FE}$  为沟道有效迁移率。存储电容对驱动管  $T_3$  栅压的保持率与开关晶体管  $T_1$ 、漏电流  $I_{off}$  有关。图 8 中给出了帧周期为 16.7 ms 时不同存储电容对  $T_3$  栅压的保持率以及因此引起的输出电流  $I_{out}$  的变化。从图中可以知道, 如果  $T_1$  的漏电流  $I_{off}$  确定了, 选择的存储电容  $C_s$  越大, 对  $T_3$  栅压的保持特性越好, 引起的输出电流的变化就越小。

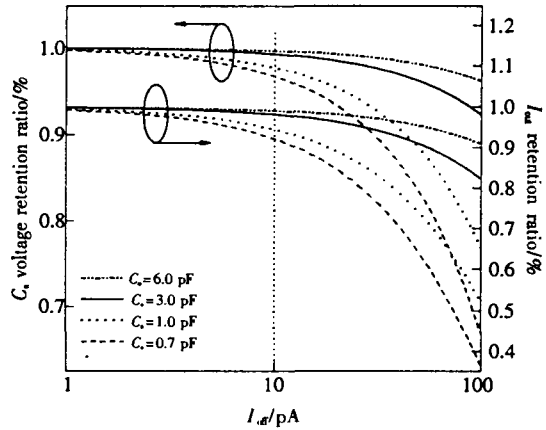


图 8 存储电容  $C_s$ 、电压保持率与开关晶体管  $T_1$  的漏电流  $I_{off}$  的关系和对输出电流的影响

Fig. 8 Retention ratio of  $C_s$  voltage related to off-current level of switch TFT ( $T_1$ ) and its impact on output current

从上面的分析我们知道, 存储电容  $C_s$  越大, 显示图像的质量越好, 但是存储电容  $C_s$  太大, 会引起数据信号的写入不足, 造成图像亮度不足和信号的严重失真。另一方面存储电容  $C_s$  的大小与其底电极的面积成正比, 存储电容增大, 底电极的面积增大, 这将严重影响像素的开口率。

#### 4 各个 TFT 的宽长比对电路输出特性的影响

我们主要考察开关晶体管  $T_1$  和驱动晶体管  $T_3$  的宽长比 ( $W/L$ ) 对电路输出特性的影响, 因为输出特性对开关晶体管  $T_2$  和  $T_4$  的宽长比的依赖很小。

图 9 给出了开关晶体管  $T_1$  的宽长比对输出电流  $I_{out}$  的影响。选通状态下的输出电流  $I_{out}(ON)$  接

近  $I_{data}$ , 而在非选通时,  $T_1$  的  $W/L$  越大输出电流  $I_{out}(OFF)$  下降幅度越大。这是因为  $T_1$  的寄生电容  $C_{p1}$  增大了, 因为 TFT 的寄生电容  $C_p$  为:

$$C_p = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 W L_{overlap}}{t} \quad (5)$$

其中  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_r$ 、 $t$ 、 $L_{overlap}$  和  $W$  分别代表真空介电常数、TFT 的栅绝缘层的相对介电常数、厚度、栅源交叠长度和沟道宽度。根据式(1)可知  $T_1$  的寄生电容  $C_{p1}$  越大,  $T_3$  栅压变化量  $\Delta V$  越大, 从而引起输出电流下降幅度越大。

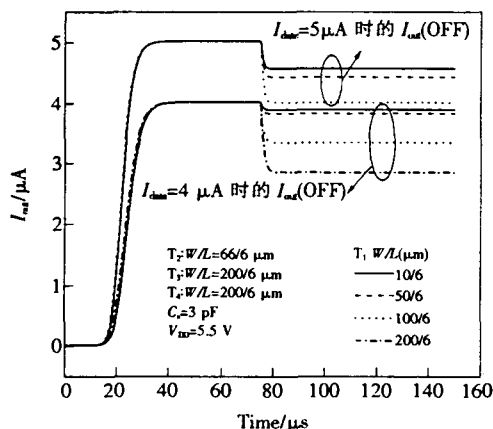


图 9 开关晶体管  $T_1$  的宽长比对输出电流的影响  
Fig. 9 Influences of  $T_1$   $W/L$  ratio on the output current characteristics of 4-TFT pixel electrode circuit

如果确定了存储电容  $C_s$  的大小,  $T_1$  的漏电流  $I_{off}$  越大,  $T_3$  的栅压就越不容易保持, 输出电流变动幅度就越大(如图 8 所示), 而漏电流  $I_{off}$  与  $W/L$  有如下关系:

$$I_{off} = q(n\mu_n + p\mu_p) \frac{Wd_s V_{DS}}{L} \quad (6)$$

其中  $q$ 、 $n$ 、 $p$ 、 $\mu_n$ 、 $\mu_p$ 、 $d_s$  和  $V_{DS}$  分别代表电子电荷量、电子密度、空穴密度、电子迁移率、空穴迁移率、有源层沟道厚度和源漏电压。

开关晶体管  $T_1$  的宽长比越大, 它的漏电流  $I_{off}$  就越大,  $T_3$  的栅压在整个帧周期内不能保持不变, 供给 OLED 的电流在帧周期结束时已经很小, 造成亮度不足或信号失真。从上面的分析可知, 在保证数据信号能够正确输入像素的前提下, 开关晶体管  $T_1$  的  $W/L$  控制得尽可能地小是非

常有利的。

图 10 给出了驱动晶体管  $T_3$  的  $W/L$  对像素电路输出特性的影响。  $T_3$  的  $W/L$  越小, 选通结束后输出电流的变化  $\Delta I$  ( $\Delta I = |I_{out}(OFF) - I_{out}(ON)|$ ) 就越大, 显示图像的质量就越差。如果希望  $\Delta I$  小, 那么  $T_3$  的栅压变化量  $\Delta V$  就要求很小, 从式(1)中可以看到增大  $T_3$  的寄生电容  $C_{p3}$  就可以减小  $\Delta V$ , 而增大  $T_3$  的宽  $W$  实际上就增大了  $T_3$  的寄生电容  $C_{p3}$  (参看式 5), 也就是说增大  $T_3$  的宽  $W$  ( $L$  不变) 就能减小  $\Delta I$ , 提高图像质量。实际设计中  $T_3$  的  $W/L$  还要受到像素尺寸的限制。

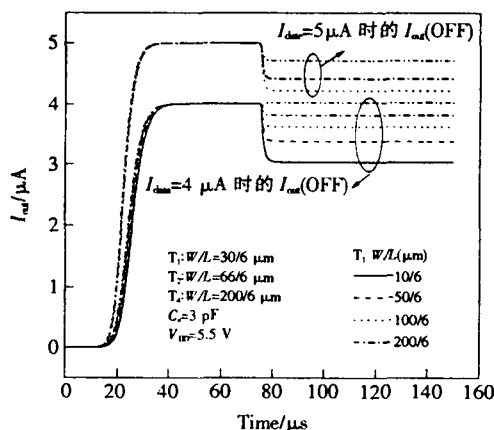


图 10 驱动晶体管  $T_3$  的宽长比对输出电流的影响  
Fig. 10 Influences of  $T_3$   $W/L$  ratio on the output current characteristics of 4-TFT pixel electrode circuit

## 5 结 论

设计了基于非晶硅薄膜晶体管恒流型 4-TFT OLED 像素驱动电路。以 13.2 cm(5.2 in) 显示屏  $(320 \times 3) \times 240$  阵列、单元像素面积为  $110 \mu\text{m} \times 330 \mu\text{m}$  为例, 设计了具体像素版图及具体参数, 仿真分析了像素驱动电路输出特性与各个参数之间的关系。从仿真结果可以看到, 像素电路不仅解决了由 TFT 的阈值电压  $V_{th}$  不均匀引起的 OLED 亮度不均匀问题, 而且能够使图像维持一帧时间。在实际应用中, 根据具体要求综合考虑选取参数。

## 参 考 文 献:

- [1] Wu C C, Theiss S, Lu M H, *et al.* Integration of organic LEDs and amorphous Si TFTs onto unbreakable metal foil substrates[A]. *Tech. Dig. IEDM*[C]. 1996. 957-960.
- [2] Stewart M, Howell R S, Pires L. Polysilicon VGA active matrix OLED displays-technology and performance[A]. *Tech. Dig. IEDM*. [C]. 1998. 871-960.
- [3] Shimoda T, Ohshima H, Miyashita S, *et al.* High resolution light emitting polymer display driven by low temperature polysilicon thin film transistor with integrated driver[A]. *Proc. Asia Display'98*[C]. 1998. 217-220.
- [4] Dawson R M A, Shen Z, Furst D A. Design of an improved pixel for a polysilicon active matrix organic EL display[A]. *Symp. Dig. 1998 SID*[C]. 1998. 11-14.
- [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图设计[J]. *液晶与显示*, 2003, 18(5): 332-337.
- [6] 张志伟, 荆海, 邝俊峰, 等. TFT OLED 驱动电路的研究[J]. *液晶与显示*, 2004, 19(6): 472-477.
- [7] 谢强, 李宏建, 黄永辉, 等. 几种 OLED 有源驱动电路中像素单元电路的分析[J]. *液晶与显示*, 2004, 19(6): 462-467.
- [8] 邵作叶, 郑喜凤, 陈宇, 平板显示器中的 OLED[J]. *液晶与显示*, 2005, 20(1): 52-56.
- [9] Sanford James L, Libsch Frank R. TFT AMOLED pixel circuits and driving methods[A]. *SID 03' Digest*[C]. 2003. 10-13.
- [10] He Yi, Hattori Reiji, Kanicki Jerzy. Four-thin film transistor pixel electrode circuits for active -matrix organic light-emitting displays [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, 40(3): 1199-1208.

## Design and Simulation of 4-TFT Pixel Electrode Circuit for Active-matrix OLED

HUANG Jin-ying<sup>1</sup>, AN Ji-yu<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-wei<sup>1</sup>, ZHAO Yu-huan<sup>1</sup>, JING Hai<sup>1</sup>, LING Zhi-hua<sup>2</sup>

(1. North Liquid Research and Development Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Science, Changchun 130031, China, E-mail: huang\_jinying@yahoo.com.cn;

2. Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

### Abstract

Constant-current, four-thin-film-transistor (TFT) pixel electrode circuit, based on amorphous silicon thin-film-transistor (a-Si TFT) for active-matrix organic light-emitting display, was designed and its driving method was proposed. Influence of  $V_{DD}$  voltage, storage capacitor ( $C_S$ ) and  $W/L$  ratio of switching TFT ( $T_1$ ), driving TFT ( $T_3$ ) on the output characteristics of four-TFT pixel electrode circuit were analyzed in details using HSPICE software. Simulation results indicate that continuous pixel electrode excitation can be achieved with this circuit, and the heterogeneousness of luminance induced by TFT threshold voltage variation was eliminated.

**Key words:** active-matrix organic light-emitting device; amorphous silicon thin-film-transistor; pixel electrode circuit; simulation

作者简介: 黄金英(1976—), 女, 内蒙古人, 在读博士, 主要从事有源 LCD/OLED 显示用高品质薄膜晶体管的研究。