

文章编号:1007-2780(2016)06-0563-06

一种支持 OLED 亮度补偿的电流型 PWM 像素驱动电路

季 渊*, 王 成, 冉 峰, 李 天, 刘万林
(上海大学 微电子研究与开发中心, 上海 200072)

摘要: OLED (organic light-emitting diode, OLED) 微显示器长时间工作在高对比度、高亮度的状态下, OLED 像素衰退不一致, 发光亮度衰退也不一致, 会产生残影现象。因此, 提出了一种改进的电流型 PWM 像素驱动电路, 保持了对 OLED 像素衰退补偿效果, 同时可以读出 OLED 阳极电压, 计算得到 OLED 衰退信息, 以便于对 OLED 亮度衰退进行有效的补偿。文章中分析了改进的电流型 PWM 驱动电路结构, 及其对 OLED 衰退补偿和亮度补偿的原理。通过模拟仿真, 得到几个影响 OLED 衰退补偿效果的关键参数。当 OLED 像素衰退电阻 R_{oled} 小于 40 M Ω 时, 该电流型 PWM 驱动电路电流衰退度与传统 2T1C 驱动电路相比, 只为其衰退度的 50%。

关键词: 衰退补偿; 电流型 PWM 驱动电路; 残影; OLED 阳极电压

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20163106.0563

Current PWM pixel driving circuit with OLED luminance compensation

JI Yuan*, WANG Cheng, RAN feng, LI Tian, LIU Wan-lin

(*Microelectronic Research & Development Center, Shanghai University, Shanghai 20072, China*)

Abstract: OLED microdisplay will suffer the pixel degradation and the luminance degradation after working in the high light and high contrast ratio state for a long time, which induces the ghost phenomenon. Therefore, this article proposes an improved current PWM pixel driving circuit which make compensations for the OLED pixel degradation. At the same time, the proposed circuit can also read the anode voltage of the OLED pixel, so the degree of the OLED degradation can be calculated and the luminance degradation can be compensated. This paper analyses the circuit structure and the compensation principle on the OLED degradation and luminance degradation. The key parameters which affect the OLED degradation compensation are obtained by the simulations. The experiment results show that the ratio of the OLED degradation of the proposed current PWM driving circuit is only 50% of the traditional 2T1C driving circuit when the difference of pixel degradation is less than 40 M Ω .

Key words: recession compensation; current PWM driving circuit; sticking; OLED anode voltage

收稿日期: 2015-12-11; 修订日期: 2015-12-31.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61376028)

Supported by National Natural Foundation of China (No. 61376028)

* 通信联系人, E-mail: Jiyuan@shu.edu.cn

1 引言

OLED 显示器具有视角大、响应速度快、功耗低、固态显示^[1-2]等优点,成为了新一代显示技术研究热点,有着广阔的市场前景^[3]。硅基 OLED 微显示器利用成熟的 CMOS 工艺,将驱动电路和 OLED 像素制作于一块单晶硅片上形成高度集成的微型显示器^[4-5]。与基于非晶硅、多晶硅的 TFT-OLED^[6-7]相比,硅基 OLED 的像素面积更小、驱动电流更小、功耗更小、系统集成度更高^[7]。硅基 OLED 结合了微电子技术和光电子技术,可应用于医学、军事、航空航天、工业控制以及消费电子等领域^[8],特别是穿戴器件、虚拟现实、增强现实等新型应用。

经过长时间的高对比度,高亮度显示后的 OLED 像素会产生像素发光不一致^[9-10]、亮度衰退的问题,并且缩短了 OLED 显示屏的使用寿命。文献^[10]提出了一种可快速充电的电流型 PWM 像素驱动电路,但是仅对电流衰退进行了补偿,而不能补偿亮度衰退。本文在此基础上,依据人类视觉的时间积分特点,设计了一种改进型的电流型 PWM 像素驱动电路,可通过 PMOS 传输管读出 OLED 阳极电压的变化值,得到 OLED 的衰退信息,通过外部的数字补偿方式对 OLED 衰退做出补偿,最大程度地还原发光亮度。

2 像素驱动电路及工作原理

2.1 OLED 衰退

当 OLED 像素经过长时间的静态高对比度和高亮度发光后,在人体的视觉感官上会产生残影现象,如图 1 所示。经检测,长时间点亮的 OLED 的导通电阻会不断增加,所以将 OLED 的衰退等效为一个串联的衰退电阻 R_{oled} 。



图 1 OLED 显示器的残影现象

Fig. 1 Sticking phenomenon of OLED recession

2.2 OLED 衰退模型以及数字补偿原理

本文设计的电路对 OLED 进行比较精确的亮度衰退补偿是基于 OLED 的衰退模型。首先需要建立 OLED 发光的衰退模型,建立 $L-I_{oled}$ 和 $L-V_{oled}$ 曲线^[13]。 L 为 OLED 的发光强度。 I_{oled} 为发光电流, V_{oled} 为 OLED 阳极电压。用 V_{oled} 的衰退度定义 OLED 的衰退度,用 $OLED_{de}$ 表示,可得到:

$$OLED_{de} = \frac{V_{read} - V_{oled, expect}}{V_{oled, expect}}, \quad (1)$$

其中: $V_{oled, expect}$ 为初始状态 OLED 阳极电压。

根据 OLED 的衰退程度大小来区分补偿模型的类别。例如,图 2 表示根据 $OLED_{de}$ 确定衰退模型的边界^[11];若 $OLED_{de}$ 超过预设值 $a\%$,补偿模型从 A 模型变化为 B 模型;当 $OLED_{de}$ 超过预设值 $b\%$,补偿模型从 B 模型到 C 模型的转变。不同工艺下的 OLED 的衰退特性不同,因此需要根据工艺情况测试来建立 OLED 衰退模型。由于 OLED 的发光亮度是时间的函数,灰度可由开关管的导通时间控制的,而通过数字 PWM 驱动方式产生灰度可比传统的模拟驱动方式达到更高的精度和速度。本设计的补偿模型是基于开关管的导通时间长度来调整补偿程度。因此可以通过子场扫描、分形扫描^[12-13]等数字驱动方式来进行 OLED 亮度补偿。

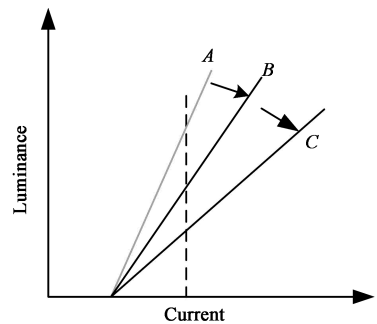


图 2 OLED 衰退模型

Fig. 2 OLED recession model

2.3 改进的电流型 PWM 驱动电路

设计的驱动电路结构如图 3 所示。左侧的虚线框为像素单元电路, $T1 \sim T6$ 构成 SRAM 结构, $T8$ 为开关管, $T9$ 为驱动管。当 SEL 为低电平时, Data line 信号控制开关管的导通或关闭,当开关管导通时, OLED 在驱动管 $T9$ 与负电源共同作用下发光,亮度可由右边 I_{ref} 控制。当开关

管关闭时, OLED 不发光;当 SEL 为高电平时, SRAM 将之前的 Data line 信号锁存,若开关管的状态不发生变化, OLED 工作状态也不变。中间下面的虚线框是读出电路, T7 为读出管,当 Read 为低电平时, T7 打开, V_{oled} 通过 T7 传输出来得到 V_{read} ;当 Read 为高电平时, T7 关闭, V_{oled} 通过 T7 传输出来得到 V_{read} 。图右侧的虚线框为参考电流产生电路, T9~T14 组成共源共栅电流镜。根据电流镜原理可得:

$$\frac{I_{oled}}{I_{ref}} \approx \left(\frac{W_9/L_9}{W_{10}/L_{10}}\right) \cdot \left(\frac{W_{11}/L_{11}}{W_{12}/L_{12}}\right) \cdot \left(\frac{V_{GS9} - V_{T,T9}}{V_{GS10} - V_{T,T10}}\right)^2 \cdot \left(\frac{V_{GS11} - V_{T,T11}}{V_{GS12} - V_{T,T12}}\right)^2 \quad (2)$$

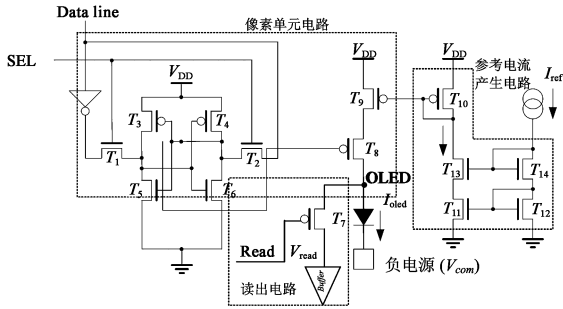


图 3 提出的像素驱动补偿电路

Fig. 3 Proposed drive pixel circuit with luminance compensation

由于 CMOS 制造工艺的一致性比较好,差异不超过 10%。例如, SMIC 0.35 μm CMOS 工艺的 PMOS 阈值电压为 $-0.619 \text{ V} \pm 0.060 \text{ V}$, NMOS 阈值电压为 $-0.494 \text{ V} \pm 0.033 \text{ V}$,不一致性为 6~10%。所以忽略 T9~T12 晶体管沟道长度调制效应,同时忽略晶体管特性的不一致性,则:

$$\frac{I_{oled}}{I_{ref}} = \left(\frac{W_9/L_9}{W_{10}/L_{10}}\right) \cdot \left(\frac{W_{11}/L_{11}}{W_{12}/L_{12}}\right) \quad (3)$$

因此,可调节 I_{ref} 或者 T9~T12 的宽长比来得到满足要求的输出电流 I_{oled} 。

2.4 衰退补偿原理

MOSFET 的电流饱和方程为:

$$I_{DS} \approx 0.5 \mu_n C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_T)^2 \quad (4)$$

OLED 像素衰退时,由于电流镜的作用, T8 的栅极电压不变,只有提高 OLED 的驱动电压来保持 I_{oled} 不变。通过降低 T9 的源漏电压补偿像素衰退。我们把 V_{GS} 看作阈值电压 V_T 和过驱动电压的和,过驱动电压用 V_{OD} 表示 (PMOS 为 $|V_{OD}|$),则有:

$$|V_{OD}| = |V_{GS} - V_T| = \sqrt{\frac{2I_{DS}}{K(W/L)}} \quad (5)$$

将晶体管的饱和深度 V_{SD} 定义为:

$$V_{SD} = |V_{ds}| - |V_{OD}| \quad (6)$$

表 1 驱动晶体管 T9 的静态工作点 ($V_T = -0.946 \text{ V}$)

Tab. 1 Static working points of driving transistor T9 ($V_T = -0.946 \text{ V}$)

Roled(M Ω)	0	10	20	30	50	100
Ioled(nA)	19.9	18.08	17.1	16.2	14.1	10.09
$V_{D,T8}$ (T8 漏极电压, V)	2.76	2.89	3.0	3.10	3.21	3.258
$V_{S,T8}$ (T8 源极电压, V)	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
$V_{DS,T8}$ (T8 源漏电压, V)	-0.54	-0.41	-0.3	-0.2	-0.09	-0.042
$V_{OD,T8}$ (T8 过驱动电压, V)	-0.286	-0.286	-0.286	-0.286	-0.286	-0.286
$V_{SD,T8}$ (T8 饱和深度, V)	0.254	0.124	0.014	-0.086	-0.196	-0.224
$R_{DS,T8}$ (T8 导电电阻 M Ω)	27.14	22.68	17.54	12.34	6.38	4.16
ΔI_D (I_{oled} 衰退度)	0%	9.15%	14.07%	18.59%	29.15%	49.3%

表 1 所示为衰退电阻 R_{oled} 在 0~100 M Ω 变化时, OLED 发光时驱动管 T9 的静态工作情况。由表可知,驱动管 T9 的饱和深度越大,输出电流也越稳定, OLED 衰退补偿的效果也越好。因此

晶体管的饱和深度对 OLED 衰退的补偿有着重要的意义。表中的 ΔI_D 为 I_{oled} 的衰退幅值与未衰退值 (R_{oled} 为 0 时 I_{oled} 的值的值), 表示 I_{oled} 的衰退程度。

2.5 仿真结果及比较

采用 SMIC 0.18 μm 1.8 V/5 V CMOS 工艺库,对图 3 电路进行 Cadence spectre 模拟仿真, T1~T10 的宽长比 W/L 为 0.5 μm /0.5 μm ; T11~T14 的宽长比 W/L 为 1 μm /1 μm 。当工作环境为 TT(典型工作状态)时, NMOS 和 PMOS 的 V_T 分别为 0.687 V 和 -0.946 V, 取 $I_{\text{ref}} = 20 \text{ nA}$, $V_{\text{com}} = -2.7 \text{ V}$, 使 OLED 上的电压 V_{oled} 为 5.5 V、电流 I_{oled} 为 20 nA 左右。通过改变衰退电阻 R_{oled} 的阻值大小, 测试其对 OLED 阳极电压影响。 V_{read} 的读出数据及衰退度 ΔV_{read} 图 4 所示, 当 R_{oled} 为 0 时(OLED 未衰退), V_{read} 为 2.756 V; 当 R_{oled} 为 20 M Ω 时, V_{read} 变为 3.003 V, ΔV_{read} 为 9.01%; 当 R_{oled} 为 50 M Ω 时, V_{read} 变为 3.205 V, ΔV_{read} 为 14.18%; 当 R_{oled} 为 100 M Ω 时, V_{read} 变为 3.258 V, ΔV_{read} 为 15.412%。从图中可看出随着 OLED 的衰退电阻 R_{oled} 逐渐增大, V_{read} 也逐渐增大, ΔV_{read} 也逐渐变大。因此, 可以从 V_{read} 的变化得出 OLED 的衰退程度, 然后根据式(1)计算 OLED 衰退程度, 选择适合的补偿模式对亮度进行补偿。

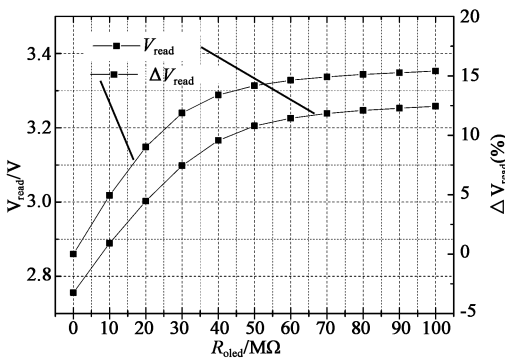


图 4 V_{read} 读出值及衰退程度

Fig. 4 V_{read} read value and recession degree

为了对比补偿效果, 同时对传统 2T1C 驱动电路进行了仿真, 图 5 和图 6 所示为本文设计与传统电路的对比结果。在传统的 2T1C 驱动电路中, 当 $R_{\text{oled}} > 20 \text{ M}\Omega$ 时, ΔI_D 均已超过 20%, 负端电压 V_{com} 越低, ΔI_D 越大。而本文设计的驱动电路, 当 R_{oled} 为 10 M Ω 时, ΔI_D 为 5.57%, 当 R_{oled} 为 20 M Ω 时, ΔI_D 为 10.65%。与传统的 2T1C 驱动电路相比, 本设计对 OLED 的衰退有着比较好的补偿效果。当 $R_{\text{oled}} < 20 \text{ M}\Omega$ 时, 本驱动电路的 ΔI_D 仅为 2T1C 驱动电路的 50%。从图 5 中还可

以发现, 当 $R_{\text{oled}} > 30 \text{ M}\Omega$ 时, I_{oled} 和 ΔI_D 都有一个非线性跳变。由表 1 可知, 此时 T3 工作区变为线性区, 补偿效果下降, 因此需要进一步提升补偿效果, 例如改变驱动管 T4 的宽长比。

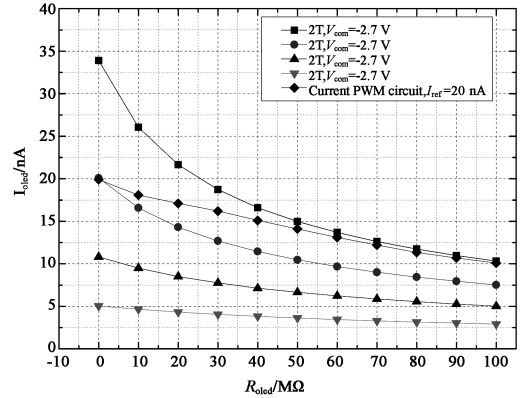


图 5 与传统驱动电路 OLED 像素电流比较

Fig. 5 Pixel current comparison

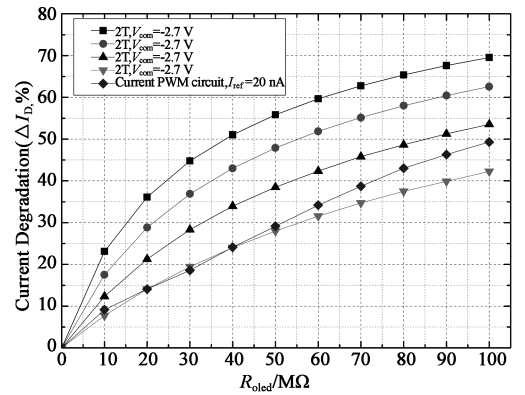


图 6 与传统驱动电路 OLED 像素衰退补偿比较

Fig. 6 Pixel recession compensation comparison

3 改善补偿效果

3.1 调节驱动管宽长比

仿真中驱动晶体管 T9 的 W_9/L_9 均取 CMOS 0.18 μm 5 V 工艺的最小值 0.5 μm /0.5 μm 。 V_{com} 取 -3.2 V, W_9/L_9 取 0.5 μm /0.5 μm 、5.0 μm /0.5 μm 和 0.5 μm /5.0 μm , I_{ref} 取 10 nA、20 nA、30 nA 时, $I_{\text{oled}} - R_{\text{oled}}$ 和 $\Delta I_D - R_{\text{oled}}$ 关系的仿真结果如图 7 和图 8 所示。 W_9/L_9 取 0.5 μm /5.0 μm 时, 输出电流变小, ΔI_D 也变小; W_9/L_9 取 5.0 μm /0.5 μm 时, 输出电流变大, ΔI_D 也变大。所以驱动管 T9 的宽长比越小, 对 OLED 衰退补偿效果也就越好。

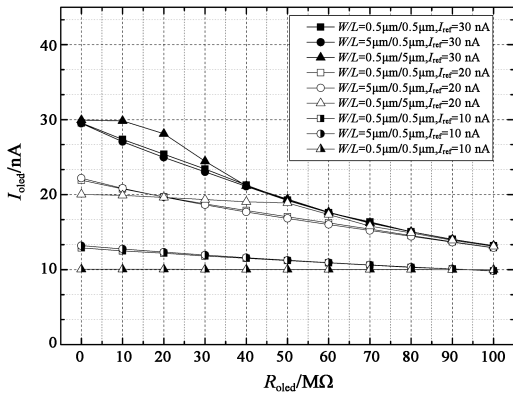


图 7 T9 宽长比不同的电流比较

Fig. 7 Different value current of W/L of T9

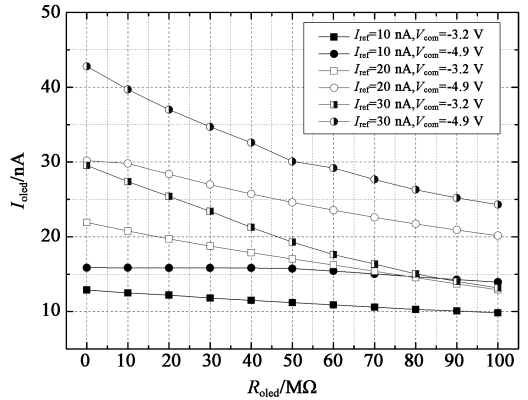


图 10 Vcom 和 Iref 不同条件下的补偿比较

Fig. 10 Different condition comparison of V_{com} and I_{ref}

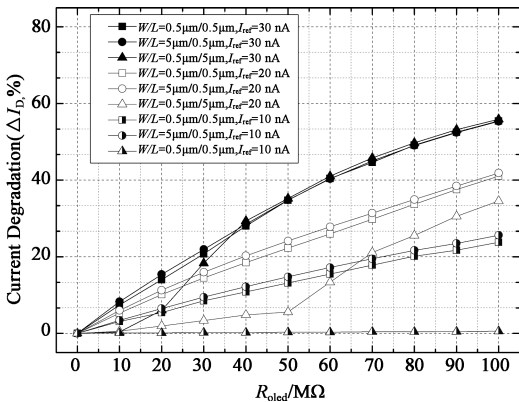


图 8 T9 宽长比不同的补偿比较

Fig. 8 Different value comparison of W/L of T9

3.2 调节 V_{com} 和 I_{ref}

如图 9 和图 10 所示,当保持 I_{ref} 不变的情况下,负电源 V_{com} 越低,ΔI_D 也越小。由于 V_{com} 降低时,B 点和 C 点的电压也降低,T9 的 V_{ds} 也变大,提

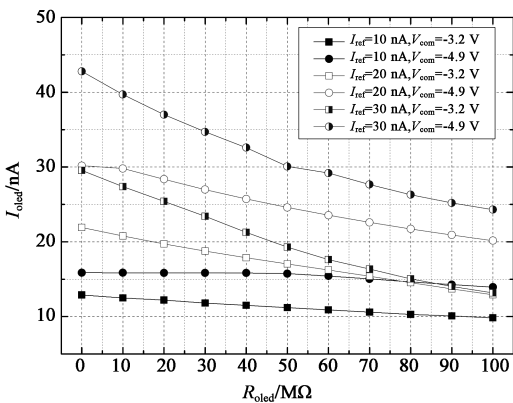


图 9 V_{com} 和 I_{ref} 不同条件下的电流比较

Fig. 9 Different condition current comparison of V_{com} and I_{ref}

高了 T9 的饱和深度,所以补偿效果更好。但是晶体管的耐压要求不能无限制的降低 V_{com},必须在耐压范围内。

驱动管 T9 的栅极电压随 I_{ref} 的值的增加而减小,因此过驱动电压 V_{OD} 也在减小,同时饱和深度也减小,OLED 衰退的补偿效果也会降低。所以,为了得到好的补偿效果,在保证 OLED 发光亮度要求的前提下,尽量减小 I_{ref} 的值。

4 实验结果

由仿真结果可知,可以通过适当的调节 V_{com}、I_{ref} 和驱动管 T9 的宽长比来得到较好的补偿效果。负电源 V_{com} 越低,补偿效果越好;I_{ref} 越大,补偿衰退效果越差;驱动管 T4 的宽长比越小,补偿效果越佳。相对于没有补偿的传统的 2T1C 驱动电路,对 OLED 的衰退有很好的补偿效果。与改进前的电流型 PWM 驱动电路相比,保持了对 OLED 衰退的补偿效果。同时可以通过 PMOS 读出的 OLED 阳极电压,计算得到其衰退程度。最终采用 SMIC 0.18 μm 1.8 V/5 V CMOS 工艺库对像素电路进行设计实现,单元像素电路的面积为 12 μm×4 μm。

5 结 论

硅基 OLED 微显示器体积小、易携带、功耗低、温度适应性好等优点,可制作成近眼显示或投影仪产品以小体积实现大视场。本设计通过改进电流型 PWM 像素驱动电路,对 OLED 衰退有较好的补偿效

果,同时可以得知 OLED 像素衰退程度。从测试数据可见,当 OLED 等效衰退电阻达到 100 M Ω 时,本设计电流 PWM 驱动电路的 OLED 衰退率仅有传统驱动电路的 50% 并且电路可以根据 OLED 的阳极

电压变化得到 OLED 的衰退程度。该补偿电路可以结合数字扫描方式如分形扫描等,可以在电路扫描效率达到 100% 的情况下,对像素的电流衰退进行补偿,进一步提高像素灰度的精度和一致性。

参 考 文 献:

- [1] LEVY G B, EVANS W, EBNER J, *et al.* An 852 \times 600 pixel OLED-on-silicon color microdisplay using CMOS sub-threshold-voltage-scaling current drivers [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2002, 37(12): 1879-1889.
- [2] 杜晓刚,王华,刘慧慧,等. 基于 Ir(ppy)₃ 载流子直接复合发光的 OLED 机理研究[J]. *发光学报*, 2014, 35(4): 481-485.
DU X G, WANG H, LIU H H, *et al.* Investigation on the direct charge-recombination mechanism of Ir(ppy)₃ in OLED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(4): 481-485. (in Chinese)
- [3] 才华,司玉娟,郎六琪,等. 彩色有源 OLED 显示屏上像素仿真及外围驱动电路设计[J]. *发光学报*, 2006, 27(4): 618-623.
CAI H, SI Y J, LANG L Q, *et al.* Pixel simulation and peripheral driving circuit design on the color AMOLED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2006, 27(4): 618-623. (in Chinese)
- [4] 季渊,冉峰,徐洪光,等. Si 基 OLED 微显示器阳极图案化研究[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(9): 1717-1721.
JI Y, RAN F, XU H G, *et al.* Research on the anode patterning of the OLED-on-silicon microdisplay [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(9): 1717-1721. (in Chinese)
- [5] JI Y, RAN F, XU H G, *et al.* Improved performance and low cost OLED microdisplay with titanium nitride anode [J]. *Organic Electronic*, 2014, 15(11): 3137-3143.
- [6] LIN C L, CHOU K W, HUNG C C, *et al.* Reducing OLED degradation using self-compensated circuit for AMOLED displays [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2011, 32(10): 1403-1405.
- [7] LEE K Y, CHAO P C P. A new AMOLED pixel circuit with pulsed drive and reverse bias to alleviate OLED degradation [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, 59(4): 1123-1130.
- [8] 刘艳艳,耿卫东,代永平,等. 硅基 OLED 像素及驱动电路研究[J]. *光电子技术*, 2009, 29(3): 201-205.
LIU Y Y, GEN W D, DAI Y P, *et al.* Study of pixel and driving circuits of OLED on silicon [J]. *Optoelectronic Technology*, 2009, 29(3): 201-205. (in Chinese)
- [9] JI Y, RAN F, XU H G, *et al.* A digitally driven pixel circuit with current compensation for AMOLED microdisplays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2014, 22(9): 465-472.
- [10] 冉峰,储楚,季渊,等. 针对 OLED 衰退补偿的电流 PWM 像素驱动电路研究[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(4): 534-538.
RAN F, CHU C, JI Y, *et al.* Current PWM pixel driving circuit for OLED recession compensation [J]. *Liquid Crystals and Display*, 2013, 28(4): 534-538. (in Chinese)
- [11] LEE K Y, HSU Y P, CHAO P C P, *et al.* A new compensation method for emission degradation in an AMOLED display via an external algorithm, new pixel circuit, and models of prior measurements [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(3): 189-197.
- [12] JI Y, RAN F, JI W G, *et al.* Optimal scan strategy for mega-pixel and kilo-gray-level OLED-on-silicon microdisplay [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(17): 3731-3743.
- [13] 徐美华,陈章进,冉峰,等. 平板显示系统的最优扫描结构及分形模型[J]. *电子学报*, 2006, 34(8): 1376-1380.
XU M H, CHEN Z J, RAN F, *et al.* Optimal scanning architecture and fractal model for flat panel display system [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(8): 1376-1380. (in Chinese)

作者简介:季渊(1980—),男,上海人,博士,硕士生导师,从事有机发光微显示、微电子与集成电路设计、多媒体嵌入式处理器与片上系统的研究。E-mail:jyuan@shu.edu.cn

王成(1991—),男,江苏盐城人,硕士,从事 OLED 补偿驱动电路技术研究。

冉峰(1954—),男,山东济宁人,教授,博士生导师,长期从事 LCD, OLED 驱动控制芯片的设计研究。