

文章编号:1007-2780(2016)01-0097-07

一种驱动 MOS 管工作在饱和区的硅基 OLED 微显示像素电路

戴爽,谢杉杉,陈鑫,杨春城,张健,赵毅,李传南*

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室 吉林大学实验区,吉林 长春 130012)

摘要:硅基 OLED 微显示中为了在极小的像素面积内实现微小的 OLED 工作电流,其像素驱动电路的驱动 MOS 管一般工作在亚阈值区,存在 OLED 电流对驱动 MOS 管的阈值电压和栅源电压失配敏感、外围电路复杂等问题,如果驱动 MOS 管工作在饱和区则可避免这些问题,但为了获得微小的驱动电流,必须采用尺寸大的倒比 MOS 管,这又与极小的像素面积冲突。本文提出了一种采用脉宽调制(PWM)技术、驱动 MOS 管工作在饱和区的 OLED 微显示像素驱动电路,PWM 信号减少了一帧内 OLED 的实际工作时间,OLED 的脉冲电流变大,使驱动 MOS 倒比管的尺寸减小;由于 PWM 信号占空比小,同时实现了 OLED 微小的平均像素驱动电流和亮度。结果表明 PWM 信号占空比为 3% 时,实现的 OLED 驱动电流和像素亮度范围分别为 27 pA~2.635 nA、2.19~225.1 cd/m²,同时采用双像素版图共用技术,在 15 μm×15 μm 的像素面积内实现了像素驱动电路的版图设计。

关键词:硅基 OLED 微显示;像素驱动电路;脉宽调制(PWM);驱动 MOS 管;饱和区

中图分类号:TN383.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163101.0097

Pixel circuit for OLED-on-silicon microdisplay using a driving MOS transistor operated in saturation region

DAI Shuang, XIE Shan-shan, CHEN Xin, YANG Chun-cheng, ZHANG Jian, ZHAO Yi, LI Chuan-nan*

(*State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*)

Abstract: Due to the tiny pixel area of OLED-on-silicon microdisplay and the weak driving current, the driving MOS transistor operated in sub-threshold region is generally applied in the pixel driving circuit of OLED microdisplay. Unfortunately the sub-threshold current of MOS transistor is sensitive to the mismatch of threshold voltage and gate-source voltage and its peripheral circuit becomes complex, but a driving MOS transistor operated in saturation region instead of in sub-threshold region can avoid these problems. In this paper a pixel driving circuit for OLED microdisplay using the pulse width modulation (PWM) technique is proposed, in which the driving MOS transistor operates in saturation region, and the small average driving current and brightness are realized by shortening the operating time of OLED during a frame period. In the meanwhile the OLED pulse current is enlarged and the

收稿日期:2015-03-06;**修订日期:**2015-11-12.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61177025, No. 61275024);国家重点基础研究发展计划项目(No. 2010CB327701);吉林省科技发展计划项目(No. 20130102009JC)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61177025, No. 61275024); National Key Basic Research and Development Program of China(No. 2010CB327701); Scientific and Technological Developing Program of Jilin Province(No. 20130102009JC).

* 通信联系人, E-mail: licn@jlu.edu.cn

area of the MOS transistor operated in saturation region is decreased. The simulation results show that the average OLED current of the proposed PWM pixel driving circuit is from 27 pA to 2.635 nA, and the brightness of pixel is 2.19~225.1 cd/m² correspondingly. The layout of the pixel driving circuit on silicon is realized among the pixel size of 15 μm ×15 μm using double-pixel layout sharing technique.

Key words: OLED-On-Silicon microdisplay; pixel driving circuit; pulse width modulation (PWM); driving MOS transistor; saturation region

1 引言

微显示器是一种物理尺寸仅为英寸量级,但可通过配套的光学系统实现大屏幕、高品质显示的集成器件,也是一种融光电器件、集成电路和光学系统于一体的精密综合系统^[1]。微显示器具有重量轻、体积小、图像分辨率高和功耗低等优点,被广泛应用在近眼显示和便携式微型投影仪等装置中,在航天、军事、医疗以及消费电子等诸多领域具有广阔的应用前景^[1-4]。

随着有机发光器件(Organic Light-emitting Device, OLED)技术的日渐成熟,将 OLED 集成于硅基 CMOS 驱动电路基板上的硅基有机发光(OLED on Silicon)微显示器也越来越受到科研界和工业界的重视。与数字微镜器件和液晶微显示器等微显示技术相比,OLED 微显示器具有全固态、自发光、功耗低、视角宽、对比度高、响应时间短和适用温度范围广等优点^[4-6],被业界视为非常具有潜力的下一代微显示技术之一。

但由于微显示中的每个像素面积极小,比如只有 15 μm ×15 μm 或者更小,流过 OLED 发光器件的电流也很小,比如小至几十 pA,这给 OLED 微显示像素驱动电路的设计带来了很大的困难^[3-4]。由于 MOS 管电流与其宽长比(W/L)成正比,为了实现这一量级的小像素驱动电流,驱动 MOS 管的宽长比的值必须很小,需采用倒比管,沟道长度 L 要增大到上百微米^[3],如此大尺寸的驱动 MOS 管难以放置在极小的像素面积内;也导致留给存储电容的硅片面积很小,而小的存储电容容易造成输入的数据电压很难保持,使 OLED 亮度不稳定。因此,OLED 微显示像素驱动电路的设计中,如何实现 OLED 微显示所需的微小驱动电流成为研究的热点和难点。

目前常用的方法是驱动 MOS 管工作在亚阈值区而非饱和区,从而减小管子的尺寸并且实现

微小的像素驱动电流,然而 MOS 管的亚阈值电流对栅源电压和阈值电压的失配非常敏感,且其外围驱动电路也比较复杂^[7]。为了避免这些问题,最好是让驱动 MOS 管工作在饱和区,但是这又带来了驱动 MOS 管面积过大的问题。文献[8]报道了一种驱动 MOS 管工作在饱和区的 OLED 微显示像素驱动电路,解决办法是在 OLED 上并联一个分流 MOS 管,使得驱动 MOS 管电流大,但是 OLED 电流减小,但数量庞大的像素电路由于分流而产生很大的无用功耗,增加了显示器的功耗,同时使芯片的工作温度升高,影响 OLED 微显示器的稳定性。

本文提出了一种采用脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术的 OLED 微显示像素驱动电路,其中的驱动 MOS 管工作在饱和区而非亚阈值区,PWM 信号减少了一帧内 OLED 的实际工作时间,OLED 的脉冲电流变大,使驱动 MOS 倒比管的尺寸减小;由于 PWM 信号占空比小,同时实现了 OLED 微显示所需要的微小像素驱动电流,最终的版图设计表明,PWM 像素驱动电路可以放置在该像素面积内。

2 PWM 像素驱动电路及其仿真分析

2.1 PWM 像素驱动电路结构及其工作原理

本设计中的 OLED 微显示像素尺寸为 15 μm ×15 μm ,顶发射 OLED 器件的发光面积为 14 μm ×14 μm ,相邻发光器件的间距为 2 μm ,显示屏的开口率约为 87%,OLED 微显示中器件结构及实际测量的 OLED 电流-亮度曲线如图 1 所示,可以看出 OLED 的亮度基本与其驱动电流成线性^[9],从其中的放大图也可看出小亮度时 OLED 驱动电流很小。

众所周知,人眼对亮度的感知取决于发光体的发光强度与时间,显示系统中,一帧时间内人眼感受到的实际亮度是发光器件的亮度及其发光时

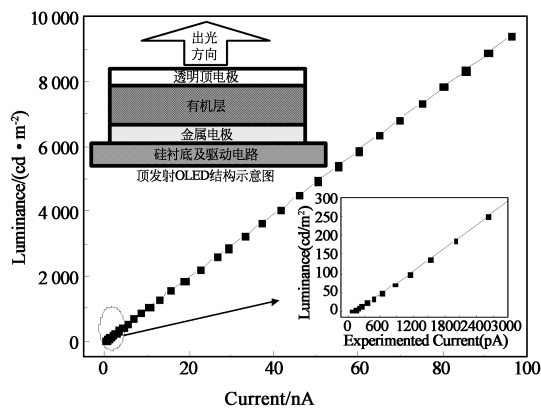
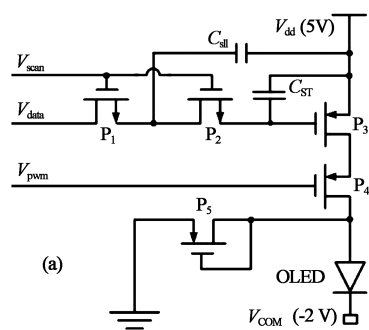


图 1 微显示中 OLED 结构示意图及其电流-亮度曲线
Fig.1 Structure of OLED for microdisplay and its luminance vs. current curve

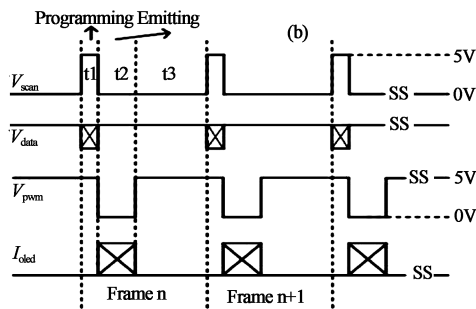
间的积分,是其平均值。因此,设计的 OLED 微显示像素驱动电路加入了一个 PWM 信号,通过其占空比减少一帧内 OLED 实际工作时间(即发光时间),从而减小 OLED 的平均亮度和电流,实现要求的微小像素驱动电流。而由于 OLED 发光时驱动 MOS 管的工作脉冲电流变大,可采用工作在饱和区的驱动 MOS 管,同时可减小倒比驱动 MOS 管的沟道长度 L ,使驱动 MOS 管所占的面积减小。

提出的 PWM OLED 微显示像素驱动电路如图 2(a)所示,电路包含 5 个 MOS 管 $P_1 \sim P_5$ 和 2 个存储电容 C_{ST} 及 C_{SH} , MOS 管 P_1 、 P_2 和 P_4 用作开关管, MOS 管 P_3 是 OLED 的驱动 MOS 管,工作在饱和区,电路中的二极管代表像素的 OLED 发光器件,其阴极接负电压 -2 V ,以增大 OLED 的工作电压范围,进而扩大其亮度范围。电路工作电源 V_{dd} 为 5 V ,为防止 OLED 损坏时 P_3 和 P_4 管源漏电压过大,引入保护管 P_5 ,当 P_4 的漏端电压降低至 P_5 管的阈值电压时 P_5 管导通,进而将 P_4 管的漏端电压钳位在 P_5 管的阈值电压左右。

图 2(b)是 PWM OLED 微显示像素驱动电路的信号时序图, V_{data} 是输入数据电压(也是 OLED 显示阵列的列线信号),其大小直接决定了存储电容上的电压值和驱动 MOS 管 P_3 导通程度、流过的电流大小; V_{scan} 是行扫描信号,高电平时开关管 P_1 和 P_2 导通; V_{pwm} 是 PWM 信号,可通过调节其占空比控制 P_4 管导通与关断的时间,从而控制 OLED 的工作时间, I_{oled} 为流过 OLED 的驱动电流。



(a) 电路原理图
(a) Schematic of the circuit



(b) 信号时序图
(b) Signal timing diagram

图 2 PWM OLED 微显示像素驱动电路

Fig. 2 PWM pixel driving circuit for OLED microdisplay

每帧内像素电路包含 3 个工作段 ($t_1 \sim t_3$), 其中 t_1 为输入数据信号 V_{data} 写入阶段, 此时 V_{scan} 为高电平, 开关管 P_1 和 P_2 导通, V_{data} 通过 P_1 和 P_2 管给存储电容 C_{ST} 和 C_{SH} 充电, 此时 V_{pwm} 为高电平, P_4 管关断, 没有电流流过 OLED; t_2 为 OLED 发光阶段, 此时 V_{scan} 变为低电平, P_1 和 P_2 管关断, 直至下一帧扫描信号 V_{scan} 到来, C_{ST} 两端的电压保持不变, 使驱动 MOS 管 P_3 工作于饱和导通状态, 采用双电容 C_{ST} 和 C_{SH} 的目的是改善开关管 P_1 和 P_2 关断之后存储电容上的数据信号的保持效果^[10], 同时 PWM 信号 V_{pwm} 由高电平变为低电平使 P_4 管导通, 此时饱和导通的驱动管 P_3 为 OLED 提供驱动电流, OLED 发光; t_3 阶段为关断阶段, 此时 V_{pwm} 变为高电平, V_{scan} 仍为低电平, P_1 、 P_2 和 P_4 都处于关断状态, OLED 上没有电流流过。

从以上分析可知, 尽管工作在饱和区的驱动管 P_3 为 OLED 提供较大的脉冲驱动电流, 但由于加入了 PWM 信号, 一帧内 OLED 只在较短的时

间内工作,OLED 像素的实际亮度和电流只是脉冲亮度和脉冲电流的平均值。因此,通过这种方式可解决 OLED 微显示中,较小的像素面积内工作在饱和区的驱动 MOS 管无法提供微小驱动电流的难题。另外,由于每帧内 OLED 的工作时间变短,因此存储电容的保持时间也相应变短了,有利于 OLED 微显示像素驱动电路的电容电压保持,甚至可以适当减小存储电容值,以节省驱动电路有限的硅片面积。

2.2 PWM 像素驱动电路的仿真结果及其版图

电路中的 MOS 管和电容等元件采用标准的 0.35 μm CMOS 工艺库,仿真软件为 Hspice。为了确保在现有的像素面积内能放下所有的元件,需在确定电路具体参数的同时设计像素电路的版图,设计的 PWM 像素驱动电路的具体元件参数见表 1,其中驱动 MOS 管 P_3 的宽长比 $W/L = 0.45\text{ }\mu\text{m}/28.0\text{ }\mu\text{m}$ 。

表 1 PWM 像素驱动电路参数

Tab.1 Parameters of PWM pixel circuit

Parameters	Device Type	Values
$(W/L)_{P_1}$	NMOS	$0.50\text{ }\mu\text{m}/0.50\text{ }\mu\text{m}$
$(W/L)_{P_2}$	NMOS	$0.50\text{ }\mu\text{m}/0.50\text{ }\mu\text{m}$
$(W/L)_{P_3}$	PMOS	$0.45\text{ }\mu\text{m}/28.0\text{ }\mu\text{m}$
$(W/L)_{P_4}$	PMOS	$0.50\text{ }\mu\text{m}/0.50\text{ }\mu\text{m}$
$(W/L)_{P_5}$	PMOS	$0.45\text{ }\mu\text{m}/0.50\text{ }\mu\text{m}$
C_{ST}	PiP	37 fF
C_{SH}	PiP	37 fF

为了放置沟道长度为 28 μm 的倒比驱动 MOS 管,版图设计时将两个像素的面积($15\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$)合并为一个单元,让两个 PWM 像素电路放置在同一单元中,采用集成电路设计软件 Cadence

设计的像素电路版图单元如图 3 所示,其中的虚线框是单个像素电路的版图。

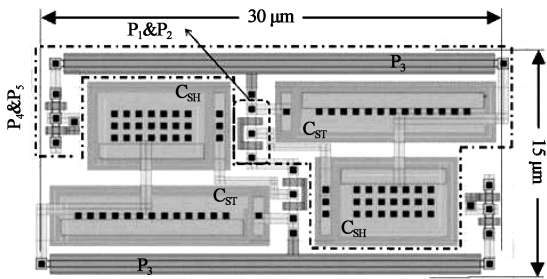
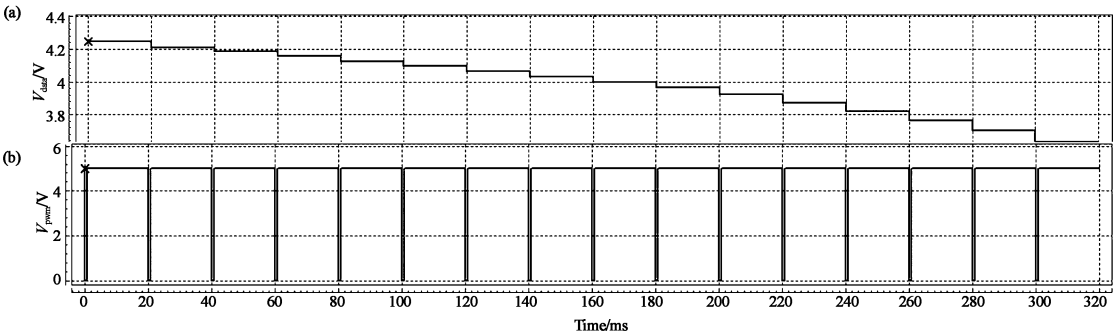


图 3 两个像素电路的版图单元
Fig.3 Layout unit of two pixel circuits

实现 16 级灰度时电路的仿真结果如图 4 所示,其中图 4(a)~(d)分别是输入电压数据信号 V_{data} 、PWM 控制信号 V_{pwm} 、OLED 两端电压 V_{oled} 和流过 OLED 的电流 I_{oled} (由图 1 的 OLED 亮度和电流曲线可得到发光亮度),其中 PWM 控制信号的占空比为 3%,输入电压 V_{data} 的范围为 3.633~4.246 V,该电压范围内驱动 MOS 管 P_3 一直在饱和区,OLED 电压 V_{oled} 和电流 I_{oled} 范围分别为 3.512 V~6.345 V 和 905 pA~87.849 nA,对应的 OLED 脉冲亮度范围为 83.84 $\text{cd}/\text{m}^2 \sim 8\,613.33\text{ }\text{cd}/\text{m}^2$ 。考虑到 PWM 信号的占空比为 3%,则流过 OLED 的平均电流范围为 27 pA~2.635 nA,由于像素开口率为 87%,因此人眼实际感知到的像素亮度为 2.19 $\text{cd}/\text{m}^2 \sim 225.1\text{ }\text{cd}/\text{m}^2$,该亮度范围满足一般微显示的需求^[1]。

表 2 列出了像素驱动电路在实现 16 级灰度时,每级灰度所对应的 OLED 上的电压 V_{oled} 、脉冲电流 I_{oled} 及其平均电流 I_{avg} 、OLED 亮度 L_{oled} 和像素的实际亮度 L_{pixel} 以及电路的输入数据电压 V_{data} 。在像素的亮度范围为 2.19~225.1 cd/m^2 时,16 级灰度所对应的亮度最小可觉差(Just No



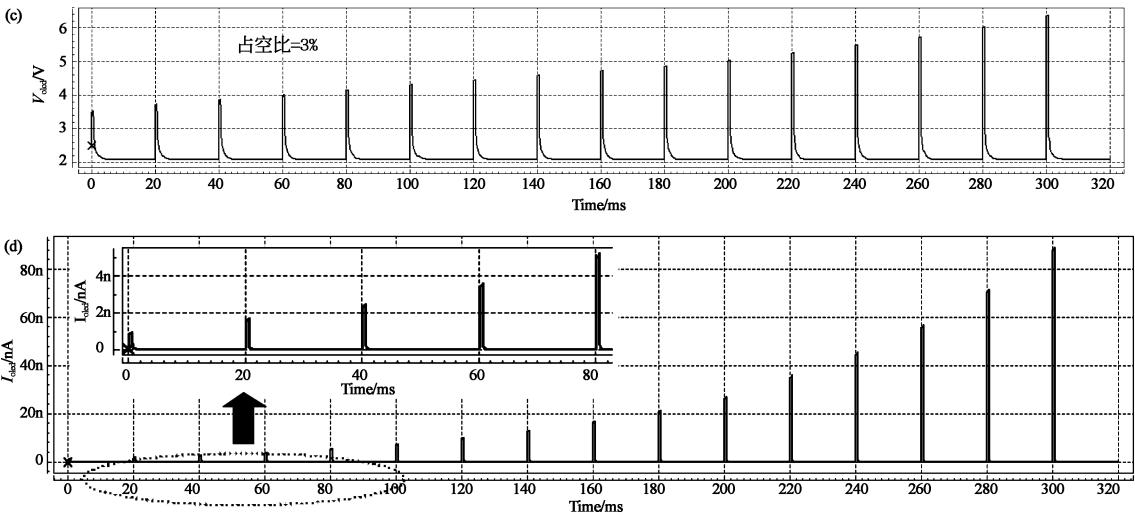


图 4 16 级灰度时 PWM 像素驱动电路的仿真结果。(a)输入数据电压;(b)PWM 信号;(c)OLED 电压;(d)流过 OLED 电流

Fig. 4 Simulated results of PWM pixel circuit with 16 grade grayscales. (a) Input data voltage; (b) PWM signal; (c) OLED voltage; (d) OLED current

ticeable Difference, JND)范围为 109~589,相邻 灰度之间的 JND 差值都是 32。

表 2 16 级灰度时输入数据电压、OLED 电压、电流及对应的亮度

Tab. 2 Input data voltage, OLED voltage, current and luminance of 16 grade grayscales

Gray scale	V_{data}	V_{oled}/V	$I_{oled} \text{ nA}$	I_{avg}/nA	$L_{oled}/(cd \cdot m^{-2})$	$L_{pixel}/(cd \cdot m^{-2})$
1	4.246	3.512	0.905	0.027	83.84	2.19
2	4.210	3.715	1.606	0.048	142.54	3.73
3	4.184	3.855	2.369	0.071	224.08	5.86
4	4.156	4.001	3.475	0.104	333.67	8.72
5	4.126	4.147	5.023	0.151	477.93	12.49
6	4.095	4.291	7.042	0.211	664.71	17.37
7	4.064	4.428	9.531	0.286	903.75	23.62
8	4.031	4.571	12.669	0.380	1 207.00	31.54
9	3.998	4.710	16.302	0.489	1 589.12	41.53
10	3.963	4.856	20.718	0.622	2 067.93	54.04
11	3.924	5.091	26.279	0.788	2 665.41	69.66
12	3.871	5.243	34.926	1.048	3 408.29	89.07
13	3.820	5.466	44.398	1.332	4 329.57	113.15
14	3.765	5.713	55.796	1.674	5 469.38	142.93
15	3.702	6.009	70.367	2.111	6 877.16	179.72
16	3.633	6.345	87.849	2.635	8 613.33	225.10

综上可知,本文提出的采用 PWM 技术的像素驱动电路用于像素面积为 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 的 OLED 微显示是可行的,电路中驱动 MOS 管工作在饱和区而非亚阈值区,可提高显示阵列的稳定性和一致性;电路工作在 PWM 方式下,电容上的数据电压需要维持的时间由原来的整帧缩短为 PWM 工作时间,变成了 20 ms (一帧时间) 的 3%,有利于存储电容上数据电压保持,因此发光期间 OLED 的驱动电流也相对稳定,或者可以减小存储电容,节省像素电路所占的宝贵硅片面积;由于在 PWM 电路中,实现相邻灰阶时对应的输入数据电压 V_{data} 差值变大了,因此还可以降低 OLED 微显示外围驱动电路的设计难度,比如产生 V_{data} 的 DAC 精度要求降低了^[11]。

此外,可以通过调整 PWM 信号的占空比方便地改变显示屏的亮度范围,以满足不同的显示亮度需求,这一特点可用于近眼微显示设备中显示屏亮度的调整。例如,改变 PWM 信号的占空比为 5% 时,可实现的亮度范围变为 $3.65 \sim 375.2\ \text{cd}/\text{m}^2$ 。PWM 驱动方式中,OLED 器件工作时的脉冲亮度变大了,可能会对 OLED 器件的可靠性产生一定的负面影响,但是随着 OLED 发光器件技术日渐成熟,目前其性能尤其是可靠性得到了较大的提高,比如,无源 128×64 点阵的 OLED 显示屏已经投放到市场多年,其可靠性已经得到了市场和用户的证明,而其中的每一个 OLED 发光器件是由占空比为 1/64 的脉冲电信号驱

动^[12],即 OLED 的脉冲亮度是人眼感知亮度的 64 倍之高,在本文提出的 PWM OLED 微显示像素驱动电路中,OLED 的工作脉冲占空比仅为 3%,因此对于 OLED 产品来说是可行的。

3 结 论

设计了一种采用 PWM 技术的 OLED 微显示像素驱动电路,其中的驱动 MOS 管工作在饱和区而非亚阈值区,可以避免 MOS 管对栅源电压和阈值电压的失配敏感,配套的外围电路设计也相对简单;通过引入占空比较小的 PWM 信号,缩短了一帧内 OLED 的实际点亮时间,增大了 OLED 工作时的脉冲电流,从而减小了驱动 MOS 倒比管的尺寸,也获得了所要求的微小的 OLED 平均电流和亮度;设计中给出了具体电路结构及其参数,Hspice 仿真结果和采用集成电路设计软件 Cadence 设计的版图证实了该方法和设计的可行性,实现的 OLED 平均驱动电流和像素平均亮度的范围分别为 $27\ \text{pA} \sim 2.635\ \text{nA}$ 和 $2.19 \sim 225.1\ \text{cd}/\text{m}^2$,该亮度范围满足一般近眼显示的需求。同时,每帧内 OLED 实际工作脉冲电流为平均电流的 33 倍,使得倒比驱动 MOS 管所需的面积减小,其宽长比仅为 $0.45\ \mu\text{m}/28.0\ \mu\text{m}$;另外,为了在 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 的像素面积内部能够放置该尺寸的元件,版图设计时使两个像素共用一个版图单元,完成了像素电路的版图设计。

参 考 文 献:

- [1] ARMITAGE D, UNDERWOOD I, WU S T. Introduction to Microdisplays[M]. West Sussex, England Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [2] GHOSH A P, ALI T A, KHAYRULLIN I, *et al.* Recent advances in small molecule OLED-on-silicon microdisplays[J]. *SPIE*, 2009, 7415: 74150Q.
- [3] LEVY G B, EVANS W, EBNER J, *et al.* An 852×600 pixel OLED-on-silicon color microdisplay using CMOS subthreshold-voltage-scaling current drivers[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2002, 37(12): 1879-1889.
- [4] 王晓慧,王文博,陈淑芬,等. 硅基有机发光微显示像素驱动电路设计[J]. 液晶与显示, 2008, 23(1): 68-72.
WANG X H, WANG W B, CHEN S F, *et al.* Design of OLED-on-silicon microdisplay pixel driving circuits[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(1): 68-72. (in Chinese)
- [5] 严利民,龙云腾,郭丽媛. 一种新型的 OLED 像素补偿驱动电路[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 728-732.
YAN L M, LONG Y T, GUO L Y. A novel OLED pixel compensation driving circuit[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 728-732. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] ZHAO B H, HUANG R, MA F, *et al.* The realization of an SVGA OLED-on-silicon microdisplay driving circuit [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2012, 33(3): 035006.
- [8] HUANG R, WANG X H, WANG W B, *et al.* Design of a 16 gray scales 320×240 pixels OLED-on-silicon driving circuit[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2009, 30(1): 015010.
- [9] 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)
- [10] PARK H S, SHIN H S, LEE W, *et al.* A new thin-film transistor pixel structure suppressing the leakage current effects on AMOLED[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, 30(3): 240-242.
- [11] CHEN A R, AKINWANDE A I, LEE H S. CMOS-based microdisplay with calibrated backplane[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, 40(12): 2746-2755.
- [12] 陈文彬,成建波. 无源 OLED 显示屏亮度均匀性研究[J]. 半导体光电, 2005, 26(3): 205-207, 211.
- CHEN W B, CHENG J B. Brightness uniformity of passive matrix OLED[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, 26(3): 205-207, 211. (in Chinese)

作者简介:戴爽(1991—),女,吉林省吉林市人,硕士研究生,主要从事集成电路设计研究。E-mail: daishuangjlu@163.com

李传南(1969—),男,江西莲花人,博士,教授,主要从事集成电路设计及其应用、有机半导体器件研究。
E-mail: licn@jlu.edu.cn