

文章编号:1007-2780(2017)12-0973-08

硅基 OLED 微显示的数模融合驱动电路设计

季 渊*, 褚勇男, 冉 峰, 穆廷洲, 满丽萍

(上海大学 微电子研究与开发中心, 上海 200072)

摘要:当前,硅基 OLED(organic light-emitting diode, OLED)微显示器正向高分辨率、高刷新频率方向发展。为了实现像素面积微型化、降低扫描数据流量从而更好满足高分辨率、高刷新率的要求,提出了一种新型的有源矩阵硅基微显示驱动电路结构。该电路采用数模融合的扫描策略,该策略结合了数字脉宽调制方式和模拟幅值调制方式;设计了多列像素复用列驱动通道的结构,满足数模融合扫描方式的时序要求。最后通过对列驱动单元后仿真,得到关键时序参数,结合数模融合扫描策略确定了几个具体结构方案。在保证红绿蓝三色像素尺寸在 $10\ \mu\text{m}$ 以下的情况下,与单纯的数字扫描策略相比,每秒数据流量降低了 $25\%\sim 64\%$ 。结果表明:基于数模融合扫描策略的硅基 OLED 微显示驱动电路在保证像素面积微型化基础上,降低了扫描数据流量,有利于高分辨率高刷新率的显示。

关键词:数模融合扫描策略;硅基 OLED 微显示驱动电路;多路复用结构;数据流量

中图分类号:TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173212.0973

Design of digital analog hybrid driving circuit for OLED-on-silicon microdisplay

JI Yuan*, CHU Yong-nan, RAN Feng, MU Ting-zhou, MAN Li-ping

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

Abstract: The OLED-on-silicon microdisplay with high resolution and high refresh frequency is required in future applications. A novel active matrix OLED-on-silicon microdisplay driver architecture is proposed to reduce the pixel area and the data throughput to meet the new requirements. The proposed architecture adopts the digital-analog-hybrid scan strategy, which combines the digital pulse width modulation method and the analog amplitude modulation method. The multi-column multiplexing column drive channel is designed to meet the timing requirements. The critical timing parameters are obtained through the simulation of the column driving units. Several circuit structure schemes are compared by combining the digital-analog-hybrid scan strategy. The data throughput decreases 25% to 64% per second compared with the simple digital scanning strategy with the pixel pitch below $10\ \mu\text{m}$. The results show that the OLED-on-silicon microdisplay driver circuit based on digital-analog-hybrid scan strategy can reduce the scanning data throughput and help to realize the high resolution and high

收稿日期:2017-05-22;修订日期:2017-08-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61674100, No. 61774101)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61674100, No. 61774101)

* 通信联系人, E-mail:jiyuan@shu.edu.cn

refresh rate OLED microdisplay.

Key words: digital-analog-hybrid scan strategy; OLED-on-silicon microdisplay driving circuit; multiplexing structure; Data throughput

1 引言

对角线尺寸小于 1 in (1 in = 2.54 cm) 的微显示器开始被应用于医学、军事、航空航天、工业控制和消费电子等领域,特别是穿戴器件、虚拟现实、增强现实等新型应用。硅基 OLED 微显示器具有面积小、重量轻、视角大、功耗低、对比度高、响应速度快等优点,目前,硅基 OLED 微显示器正不断向高分辨率、高刷新频率、小型化方向发展^[1-5]。

硅基 OLED 微显示驱动电路有模拟幅值^[6-8]调制和数字脉宽调制^[9-10]两种扫描策略。在模拟幅值调制方式中,微显示系统要求像素驱动电路一般需要较大的电容以保存像素电压,随着显示分辨率以及刷新率的提高,又要求像素电容具有较快充放电速度、数模转换器(Digital-to-analog converter, DAC)具有更高的分辨率和信号转换速度,又要确保模拟量具有足够高的精度^[11];与模拟幅值调制相比,数字扫描利用脉冲宽度来调制亮度,扫描精度和进度高、图像噪声低、画面质量稳定、灰度等级高、对电路特性的要求也比较低;但在高刷新率和高分辨率条件下,数字扫描策略带来极高的扫描数据流量。

为了突破单纯的模拟或数字扫描策略对分辨率、芯片面积等带来的限制,本文提出一种新型的数模融合扫描策略,结合模拟幅值调制和数字脉宽调制方式的特点,利用模拟扫描策略调制像素灰度幅值,利用数字扫描策略调制像素的发光时间,在保证芯片面积小型化基础上实现大分辨率高清显示;同时基于数模融合的扫描方式,重点设计了一种新型的有源矩阵硅基 OLED 微显示驱动电路,并设计了列驱动多路复用的驱动电路结构。经仿真实验,该 OLED 微显示驱动电路符合数模融合扫描策略的时序要求,拥有较小的像素面积,降低了数据传输流量,有利于高分辨率高刷新率的显示。

2 数模融合扫描策略

现有扫描策略在一定程度上降低了扫描时钟频率和数据带宽,例如:子场扫描法、分形扫描法^[12]等。子场扫描法将一帧数据分为若干个子场,在权重较低的位平面中插入等待时间;分形扫描利用空间划分和时间灰度分型的拓扑结构对每维空间划分实施自相似时间灰度扫描。

在子场扫描法或分形扫描法基础之上,结合模拟幅值调制方式,本文提出一种新型的数模融合扫描策略。该扫描策略采用数字脉宽调制的方法实现高位(Hb)灰度调制,即采用子场扫描方法或者分形扫描方法实现高位灰度数据的调制驱动;同时,采用模拟幅值调制的方法实现低位(Lb)灰度调制,即采用硅基 OLED 面板的数据驱动芯片所具有的数据灰度电压产生机理并通过 DAC 来完成低位灰度数据的调制驱动。

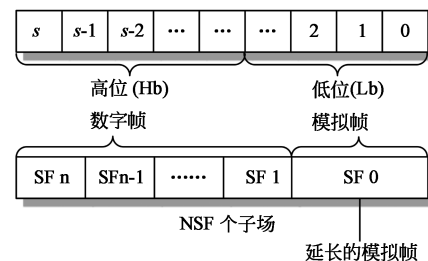


图 1 扫描策略原理框图

Fig.1 Block diagram of the scanning strategy

以子场扫描方式与模拟调制方式结合为例介绍数模融合扫描策略:如图 1 所示,对于 N 位灰度调制,分为 Hb 位数据高位,Lb 位数据低位;将一幅完整图像分为包含模拟帧和数字帧的多个子场。在扫描数字帧时,根据数据高位(Hb),直接驱动最高或最低电压输出至像素列;在扫描模拟帧时,低位(Lb)经 DAC 转换成模拟电压输出至像素列。其中,需要延长模拟帧的传输时长,从而保持数字帧与模拟帧内灰度数据传输速率一致。以 $V(x, y)$ 代表加在某一像素点 OLED 两端电压。用子场扫描法对 Hb 位高位数据进行扫描,结合模拟调制方

式对 Lb 位低位数据进行扫描。将整个扫描过程划分为 NSF 个子场。对于高位 Hb 子场扫描:

$$V(SFn) = \begin{cases} V_{\text{MAX}} & g_{\text{SF}n} = 1 \text{ } SFn \in [1, NSF] \\ V_{\text{MIN}} & g_{\text{SF}n} = 0 \text{ } SFn \in [1, NSF] \end{cases}, \quad (1)$$

对于低位 Lb 模拟调制:

$$V(Lb) = V(\text{DAC}(Lb)), \quad (2)$$

则加在 OLED 两端电压均值为:

$$V_{\text{TF}} = \frac{1}{TF} \left[\left(\int V(SFn) \cdot TDF \cdot dSFn \right) + V(Lb) \cdot TAF \right], \quad (3)$$

其中: SFn 为数字帧子场序号; V_{MAX} 和 V_{MIN} 分别代表该数字子场下 OLED 两端最高和最低电压; $g_{\text{SF}n}$ 代表该数字子场扫描因子; TF 代表帧调制单位周期时间, TDF 代表单个数字子场时长。 TAF 代表单个模拟帧时长。

3 硅基芯片设计

3.1 硅基 OLED 微显示驱动电路系统架构

基于数模融合扫描策略的硅基 OLED 微显示驱动框图及各主要输入信号如图 2 所示。OLED 微显示器驱动电路集成了像素驱动电路以及行、列驱动电路。其中,行驱动用于解码以及驱动行地址线 SEL;列驱动电路是该硅基 OLED 微显示驱动电路的关键,列驱动主要有 4 个任务:

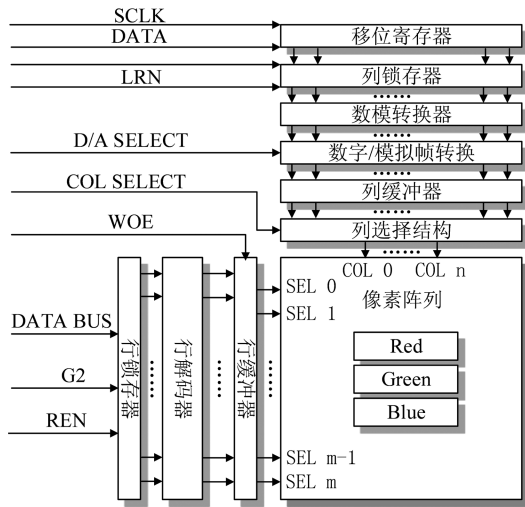


图 2 硅基 OLED 微显示驱动框图

Fig.2 Block diagram of OLED-on-silicon microdisplay driver circuit

(1)数模转换;(2)数字帧与模拟帧的切换;(3)列选择;(4)将像素电压驱动至像素电容中。该驱动电路可采用上下分屏策略进行扫描,即像素驱动阵列上下都可安排列驱动电路。

3.2 像素驱动电路

本例采用 3T1C 的驱动结构。其输入是行选通信号 SEL 和数据信号 COL。SEL 和 COL 分别由行驱动电路和列驱动电路产生。像素驱动电路中的电容是 MOS 电容,其尺寸由像素电压需要保存的时间长短决定。像素间距为 $10 \mu\text{m}$,像素单元横向排列,如图 2 所示,从而给集成更复杂的列驱动单元留下充足的空间。

3.3 硅基 OLED 微显示驱动电路列驱动结构

在矩阵驱动方法中,每个列线应当由独立的列驱动单元驱动。但是对于纯模拟调制策略,其需要分辨率较高的 DAC(一般大于 8 位),但是分辨率较高的 DAC,它的面积较大,同时对转换速度以及转换精度的较高要求也会使 DAC 具有复杂的结构。结合了 DAC 以及模拟缓冲器的列驱动,单列像素的宽度对于列驱动单元的集成来说太窄,即使是最先进的紧凑型 DAC 的尺寸也会大于单列像素的宽度,也不可能集成到列驱动阵列中。因此,采用纯模拟调制方式的硅基 OLED 微显示驱动电路,其整个像素阵列都共用 DAC,列驱动电路集成采样与保持电路阵列以保持 DAC 的输出电压或电流^[3]。此外,高分辨率、高刷新率以及上述的数模融合的扫描策略要求模拟缓冲器具有较强的驱动能力,这也要求模拟缓冲器必须有足够大的面积。基于以上考虑,对于列驱动结构集成 DAC 和模拟缓冲器的驱动电路设计,采取了 3 种措施上述问题:

(1)采用上述数模融合扫描策略。由于将像素灰度数据分为数字扫描驱动和模拟调制驱动两部分,因此列驱动的 DAC 所需的分辨率很大程度上小于纯模拟驱动的 DAC,同时对转换精度的要求也降低,其结构相对而言更为简洁,其所占用的芯片面积会小得多,更容易集成在列驱动中;

(2)像素单元横向排列的像素阵列,较宽的像素列给 DAC 和列缓冲器的集成带来充足的空间。

(3)设计列驱动多路复用的结构,即若干像素列复用一条列驱动通道,如图 3 所示,将像素列分组,多列像素通过多路开关复用数模转换器和缓冲器。当扫描某一行时,该列驱动通道下每一列依次打开,读入来自复用的列缓冲器的像素电压。

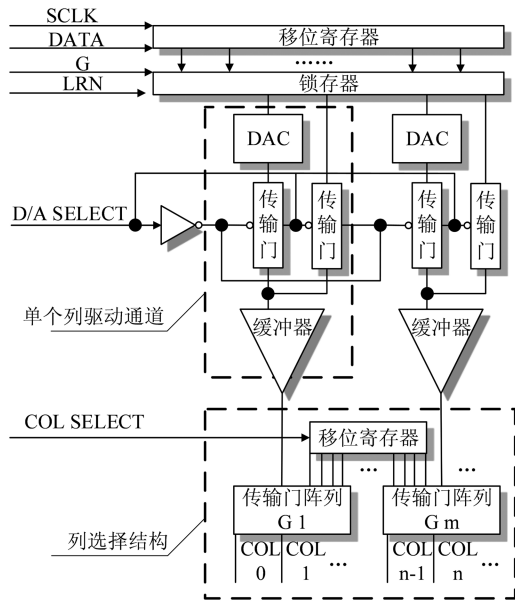


图 3 列驱动结构图

Fig.3 Block diagram of the column driving circuit

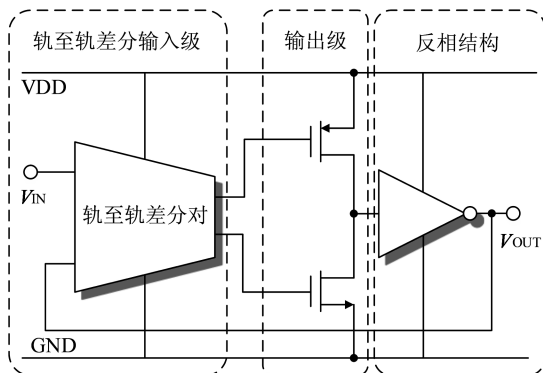


图 4 轨至轨缓冲器框图

Fig.4 Block diagram of rail to rail buffer

在图 3 中,第一级为移位寄存器,分为模拟扫描数据寄存器阵列和数字扫描数据寄存器阵列, SCLK 是系统时钟, DATA 是像素数据输入;第二级是锁存器,相应的分为模拟扫描数据锁存器阵列和数字扫描数据锁存器阵列,当 G 信号有效时,并行移位寄存器上的数据保存至锁存器, LRN 为列数据清零信号,用于快速清零;第三级为数模转换器阵列, DAC 阵列用于将低位模拟帧数据转换为输出模拟电压;第四级为数字帧/模拟帧转换结构,由传输门阵列组成,信号 D/A SELECT 用于数字帧或模拟帧之间的切换;第五级为列缓冲器(BUFFER),由于列缓冲器需要驱动来自 DAC 以及锁存器的电压,因此采用如图 4 所

示的轨至轨缓冲器,由轨至轨差分输入级、输出级、反相结构组成;第六级为列选择结构,由移位寄存器和传输门阵列组成,移位寄存器的位数即单个列驱动通道所驱动的像素列数。在移位寄存器控制下,各组传输门阵列(G1~Gm)并行工作,并且各阵列内部的传输门依次打开,将电压驱动至像素列 COL。

4 仿真及分析

采用 SMIC 0.18 μm 1.8 V/5V CMOS 工艺对目标电路进行设计。以子场扫描法与模拟幅值调制结合、256 级灰度(8 bit)、100 Hz 刷新率为例,考虑以下两个问题。

4.1 Hb 与 Lb 的划分

数模融合扫描策略要求将像素灰度数据划分为数字扫描高位(Hb)以及模拟扫描低位(Lb), Hb 与 Lb 的划分由 3 个因素决定:(1)像素电容的电压保持时间;(2)DAC 和 BUFFER 的结构复杂度;(3)列驱动单元的响应时间。

对于该电路中的 3T1C 像素驱动电路,以 100 Hz 的刷新率为例,对于纯模拟驱动方式,则电压至少需要在 MOS 电容上保持 10 ms,对像素电路中 MOS 电容仿真测试,如图 5(a)所示,在 10 ms 内电压下降不超过 10%(1.8 V~1.62 V),电容至少需要 110 fF,则 MOS 电容的面积至少要 40 μm^2 。对于数模融合扫描策略,由于一帧图像的扫描过程被分为多个子场,相当于刷新率进一步提高,所以当数字扫描位越多,子场数划分越多时,像素电压需要保持的时间越短,则所需要的 MOS 电容越小。本设计像素驱动电路采用 36 fF (12 μm^2) 的 MOS 电容,该电容上电压能保持大约 3.6 ms,如图 5(b)所示。另外,较小的电容也使得充电点速度加快,对于 36 fF 的 MOS 电容,其充电时间小于 1 ns,如图 6 所示。另一方面,数字扫描位的增多带来的较高刷新率要求列驱动单元具有更快的响应时间,同时也使单位时间内的数据流量提高,这与降低数据流量的初衷不符。而模拟调制位数越多,不仅要求更大的像素电容,降低充电速度,而且要求 DAC 具有更高的分辨率,对于转换精度和转换速度的要求也更高,则 DAC 的结构复杂度也相应提高。综合上述因素,研究模拟调制位分别为 2 位、3 位、4 位时的列驱动复用方案。

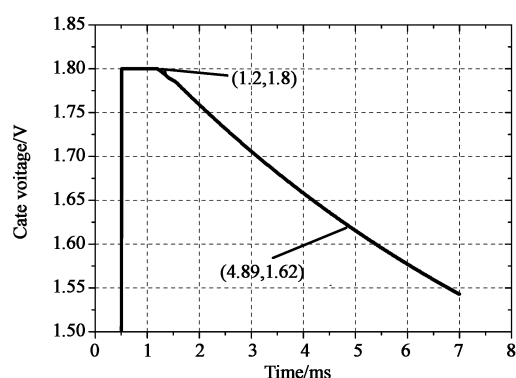
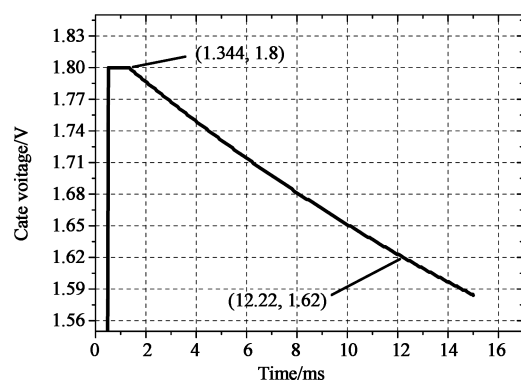
(a) 110 fF 电容 ($40 \mu\text{m}^2$)(a) 110 fF capacitance ($40 \mu\text{m}^2$)(b) 36 fF 电容 ($12 \mu\text{m}^2$)(b) 36 fF capacitance ($12 \mu\text{m}^2$)

图 5 像素电路 MOS 电容漏电情况仿真

Fig.5 Leakage of MOS capacitor

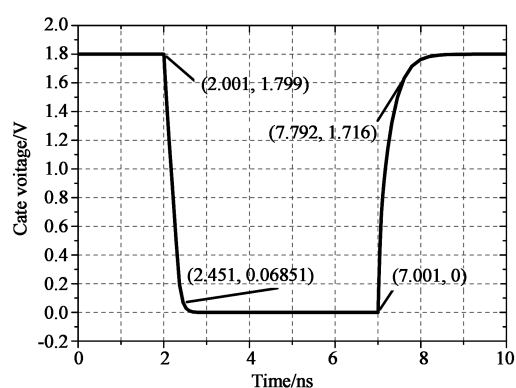


图 6 像素电容充放电仿真

Fig.6 Pixel capacitor charge and discharge simulation

4.2 列驱动多路复用结构的划分

单个驱动通道所驱动的像素列 COL 的数目 (即像素列的分组) 由 3 个因素决定: (1) 单个列驱动通道所占用的面积; (2) 数字帧扫描刷新

率; (3) 列驱动的时延。单个列驱动通道所占用的面积从空间上决定了每个通道至少由几列 COL 复用; 而数字帧扫描刷新率和列驱动的时延从时间上决定了每个通道最多可由几列 COL 复用。

本设计像素阵列分辨率在 $1\text{K} \times 1\text{K}$ 以上, 像素列 COL 上的负载电容及电阻大约在 $1 \sim 3 \text{ k}\Omega$ 和 $3 \sim 8 \text{ pF}$ 。图 7 是 4 bit DAC 以及列缓冲器阵列版图的一部分, DAC 以及列缓冲器尺寸标在它们的放大图上, DAC 功能仿真如图 8 所示, 对其响应时间的后仿真结果如图 9 所示; 列缓冲器瞬态响应波形如图 10 所示。上述列驱动单元及像素驱动电路的时延特性总结在表 1 中。

由上文所述, Hb 和 Lb 的划分与列驱动单元响应速度、列驱动结构复杂度、像素电容大小有关; 像素列的分组与列驱动所占面积、刷新率、时

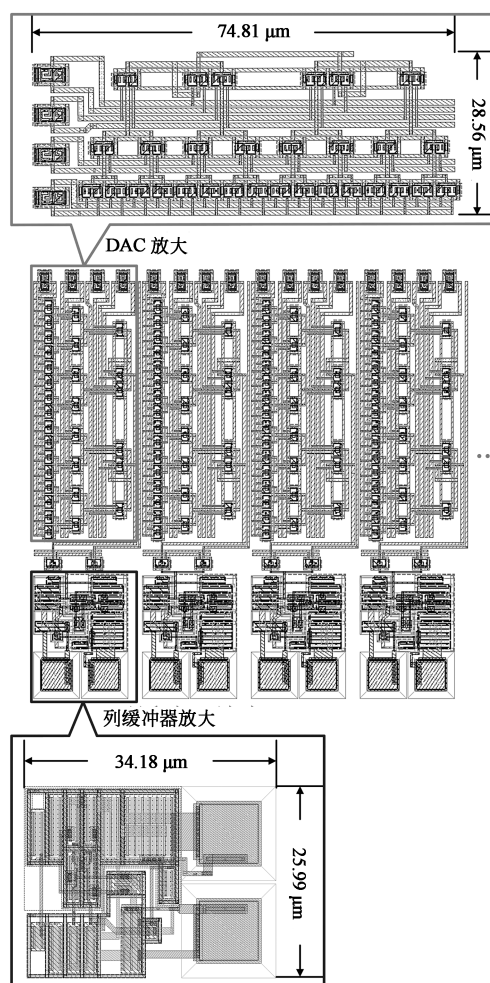


图 7 DAC 和列缓冲器阵列部分版图

Fig.7 Part of the DAC and column buffer array layout

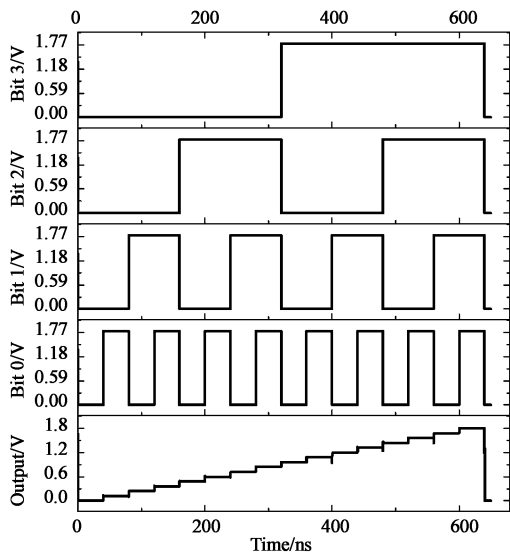


图 8 DAC 功能仿真
Fig.8 DAC function simulation

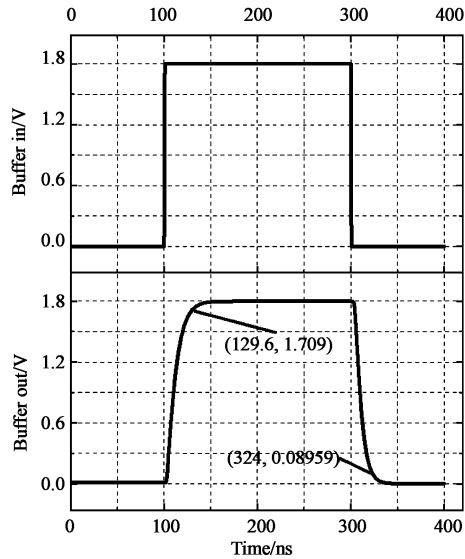


图 10 轨至轨缓冲器响应时间仿真
Fig.10 Rail-to-rail buffer response time simulation

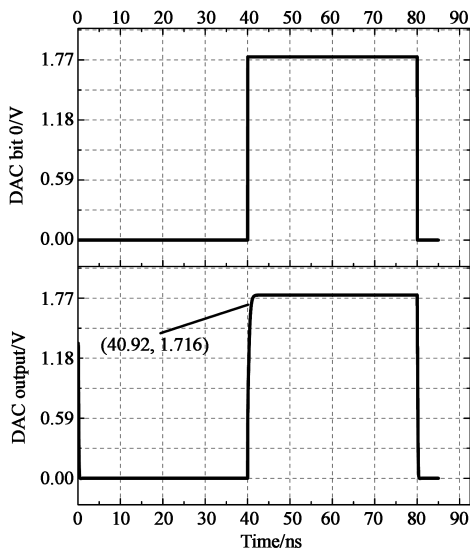


图 9 DAC 响应时间仿真
Fig.9 DAC response time simulation

延有关。表 2 展示了 $2K \times 2K(\times 3)$ 以及 $1.6K \times 1.6K(\times 3)$ 两种分辨率规格的各方案对比。表第二行是模拟扫描位数;第三行是划分的子场数,即包含了所有数字帧子场以及模拟帧的总子场数,子场数划分同样考虑到像素电压的保持时间以及

表 1 列驱动单元时间预算总结

Tab.1 Time budget of column driving units

驱动电路单元	时延/ns
数模转换	1
缓冲器	30
列驱动结构	1
像素驱动电路	1

表 2 各列驱动方案对比

Tab.2 Comparison of column driving schemes

分辨率	2K×2K(×3)					2K×2K(×3)				
	2		3		4	2		3		4
	8	11	7	10	9	8	11	7	10	9
模拟扫描位数										
总子场数										
模拟帧时长(ms)	2.22	1.67	3.33	2.50	3.33	2.22	1.67	3.33	2.50	3.33
单帧发光率(%)	66.0	82.3	76.4	89.6	95.8	66.0	82.3	76.4	89.6	95.8

续 表

分辨率 模拟扫描位数 总子场数	2K×2K(×3)					2K×2K(×3)				
	2		3		4	2		3		4
	8	11	7	10	9	8	11	7	10	9
数字帧单行 单子场预算(μs)	0.185	0.138	0.185	0.138	0.138	0.231	0.174	0.231	0.174	0.174
列分组	3~4	3	3~4	3	3	3~5	3~4	3~5	3~4	3~4
数据流量(Gbps)	10.058	13.411	10.058	13.411	13.411	6.437	8.583	6.437	8.583	8.593
流量减少比率(%)	25	37			64	25	37			64

列驱动单元的响应速度;第四行是模拟帧需要保持的时长;第五行是模拟/数字发光比率,代表扫描调制时长与一帧图像总时长(TF)的比率;第六行是单行单子场扫描时间预算,表示在扫描一个子场时,传输一行像素数据的最大允许时长。通过该表以及列驱动响应时间、列驱动单元面积,可以确定每个列驱动通道能驱动的像素列 COL 的数目,如表第七行所示。第八行计算出各方案下单位时间数据传输量。第九行代表的是在同等发光比率情况下,与纯数字灰度调制方式相比,单位时间内的数据流量的减少比率。从表 2 中可以看出:数据流量降低了 25%~64%。

5 结 论

硅基 OLED 微显示器具有显示色彩能力强、尺寸小、轻量化、功耗低等优点,非常适合于近眼显示产品中的应用。本设计提出了以数模融合的扫描策略为基础的硅基 OLED 微显示驱动电路结构,从而降低扫描数据流量。测试数据和最后陈列的方案表明:基于数模融合扫描策略的硅基 OLED 微显示驱动电路在保证像素面积微小化基础上,单位时间内的数据流量得到了较大程度的降低(25%~64%)。更有利于实现高分辨率、高刷新率硅基 OLED 微显示器的设计。

参 考 文 献:

- [1] 马东阁.OLED 显示与照明——从基础研究到未来的应用[J].液晶与显示,2016,31(3):229-241.
MA D G. OLED display and lighting—from basic research to future applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3): 229-241. (in Chinese)
- [2] 张天瑜,张义鑫,张乐天,等.基于双极性蓝色荧光材料的高效混合型白色有机发光器件[J].光学精密工程,2015,23(10z):253-258.
ZHANG T Y, ZHANG Y X, ZHANG L T, *et al.* Efficient hybrid white organic light-emitting devices based on ambipolar blue fluorescent material [J]. *Optics and Precision Engineering*, 23(10z): 253-258. (in Chinese)
- [3] WACYK I, GHOSH A, PRACHE O, *et al.* Ultra-high resolution and high-brightness AMOLED [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8383: 83830Q.
- [4] LEVY G B, EVANS W, EBNER J, *et al.* An 852/spl times/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.
- [5] 段瑜,张筱丹,孙浩,等.高亮度顶发射单色绿光 OLED 微显示器件制备[J].红外技术,2015,37(12):1022-1026.
DUAN Y, ZHANG X D, SUN H, *et al.* Fabrication of high brightness top-emitting green OLED micro-display [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(12): 1022-1026. (in Chinese)
- [6] ONOYAMA Y, YAMASHITA J, KITAGAWA H, *et al.* 70.4L: late-news paper: 0.5-inch XGA micro-OLED display on a silicon backplane with high-definition technologies [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*,

- 2012, 43(1): 950-953.
- [7] 杨森, 黄晓刚, 张白雪, 等. 分辨率为 800×600 的硅基 OLED 微显示驱动芯片设计[J]. 固体电子学研究进展, 2016(2): 142-147, 164.
- YANG M, HUANG X G, ZHANG B X, *et al.* The design of an OLED-on-silicon micro-display with the resolution of 800×600 [J]. *Research & Progress of SSE*, 2016(2): 142-147, 164. (in Chinese)
- [8] KWAK B C, KWON O K. A 2822-ppi resolution pixel circuit with high luminance uniformity for OLED microdisplays [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(10): 1083-1088.
- [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] 季渊, 王成, 冉峰, 等. 一种支持 OLED 亮度补偿的电流型 PWM 像素驱动电路[J]. 液晶与显示, 2016, 31(6): 563-568.
- JI Y, WANG C, RAN F, *et al.* Current PWM pixel driving circuit with OLED luminance compensation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(6): 563-568. (in Chinese)
- [11] CHOI B D, PARK I S, KIM J S, *et al.* Image quality enhancement in AMOLED microdisplay for mobile projectors [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, 57(2): 313-319.
- [12] 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, 主要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: jiyuan@shu.edu.cn

褚勇男(1992—), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 从事有机发光微显示和微电子与集成电路设计方面的研究。

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。