

# 基于双帧数模融合扫描的硅基有机发光二极管微显示器

穆廷洲\*, 季渊\*\*, 陈文栋, 余云森, 冉峰

上海大学微电子研究与开发中心, 上海 200444

**摘要** 提出了一种双帧数模融合扫描策略,优化了数字脉宽调制部分。设计了一种硅基有机发光二极管(OLED)微显示器驱动电路,该电路包括像素驱动电路,在帧率为 60 Hz、灰度等级为 256、分辨率为 1920 pixel×3 pixel×1080 pixel 的条件下,扫描效率可达 99.22%,数据传输频率降低至 23.328 MHz。结果表明,该像素驱动电路可有效减少漏电流,保证灰度精度,降低最小电流,并提高硅基 OLED 微显示器的对比度。

**关键词** 光学器件; 光电器件; 硅基有机发光二极管微显示器; 双帧数模融合扫描策略; 像素驱动电路; 扫描效率

中图分类号 TN27

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.092302

## Organic-Light-Emitting-Diode-on-Silicon Microdisplay Based on Double-Frame Digital-Analog-Hybrid Scanning Strategy

Mu Tingzhou\*, Ji Yuan\*\*, Chen Wendong, Yu Yunsen, Ran Feng

Microelectronic Research & Development Center, Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract** A double-frame digital-analog-hybrid scanning strategy is proposed, and the part of digital pulse width modulation is optimized. The driving circuit of an organic-light-emitting-diode (OLED) -on-silicon microdisplay is designed, which includes the pixel driving circuit. The scanning efficiency can reach 99.22% and the data transmission frequency can be reduced to 23.328 MHz under the conditions of frame rate of 60 Hz, gray level of 256, and resolution of 1920 pixel × 3 pixel × 1080 pixel. The results show that this pixel driving circuit can effectively reduce the leakage current, guarantee the gray precision, reduce the minimum current, and improve the contrast of the OLED-on-silicon microdisplay.

**Key words** optical devices; optoelectronic devices; organic-light-emitting-diode-on-silicon microdisplay; double-frame digital-analog-hybrid scanning strategy; pixel driving circuit; scanning efficiency

**OCIS codes** 230.0250; 100.2000; 250.3140; 200.3050

## 1 引言

硅基有机发光二极管(OLED)微显示器是一种特殊形态的显示器,物理尺寸很小(对角线长度约 2.54 cm),通过光学系统形成大屏幕显示。具有体积小、厚度薄、色彩丰富、响应速度快、功耗低和视角范围大等优点<sup>[1-2]</sup>。硅基 OLED 微显示器技术是集成电路设计、集成电路制造与 OLED 制造工艺三个

学科的交叉融合。随着 OLED 工艺的不断成熟和智能可穿戴设备<sup>[3-4]</sup>的广泛应用,硅基 OLED 微显示器技术也迅速发展。

硅基 OLED 微显示器系统主要有两大部分,即微显示器驱动电路和控制电路。微显示器扫描策略主要分为模拟幅值调制和数字脉宽调制<sup>[5-6]</sup>两种调制方式。前者通过数模转换器(DAC)将数字信号转换为模拟信号,然后将电压存储至存储电容以产

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-10-29; 录用日期: 2018-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(61674100,61774101)、上海市经信委专项资金(D.51-0307-14-002)

\* E-mail: 714077081@qq.com; \*\* E-mail: jiyuan@shu.edu.cn

生不同的灰度等级,然而灰度等级越高,DAC需要越高的转换精度和转换速度,同时要求越低的面积开销;后者通过调制发光时间长度产生不同的灰度等级,具有精度高和对电路特性要求低等优点,随着分辨率和帧频的增加,驱动电路设计存在较大压力。数模融合扫描策略综合了数字脉宽调制和模拟幅值调制的优点,在扫描数据相同的条件下降低了电路设计的难度与复杂度。像素驱动电路的性能对整个微显示器驱动芯片的影响很大<sup>[7-11]</sup>。首先,开关管存在漏电流和存储电容充电时间不充足可导致产生的灰度等级存在偏差;其次,在低灰度时流过 OLED 的电流较小,传统的模拟驱动方式较难进行精确控制,在低亮度时分辨率不足,会导致微显示器的对比度下降。

为降低扫描数据流量、数据传输频率和功耗,降低驱动电路的整体设计精度与难度,提高扫描效率,本文提出一种双帧数模融合扫描策略。该方法在数模融合扫描策略的基础上对数字脉宽调制部分进行双帧融合处理,从而提高扫描效率,降低数据传输频

率。设计了一种硅基 OLED 微显示器驱动电路,可以有效提高灰度等级的准确性,同时提高微显示器的对比度。经过设计、流片并测试验证了该微显示器驱动电路可以有效提高灰度精度同时降低最小电流,从而提高屏幕的对比度。

## 2 双帧数模融合扫描策略

### 2.1 双帧融合扫描策略

衡量扫描策略的主要性能指标包括线性度、扫描效率和数据传输频率。灰度等级与最大落差之间的比值为灰度线性度,每帧数据有效传输时间与一整帧时间的比值为扫描效率。

传统的子场扫描算法需要额外的消隐操作,因此会存在一定的时间冗余,不可避免地导致扫描效率下降和亮度损失。双帧融合扫描策略将两帧的对应相同比特位的子场融合为同一个子场,利用上一帧子场的消隐冗余时间进行下一帧的子场扫描,将两帧中不足一个基本场时间长度的子场权值合并,进行两帧的子场融合调制。

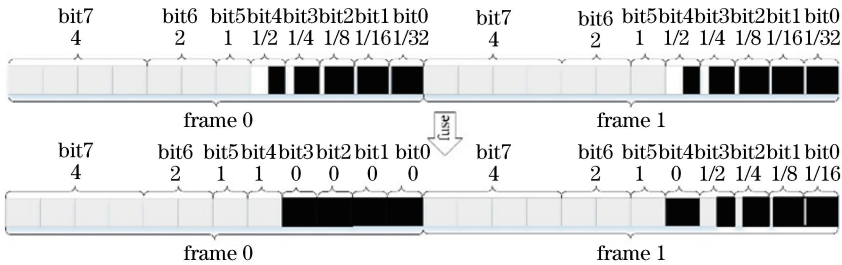


图 1 双帧融合扫描策略

Fig. 1 Double-frame hybrid scanning strategy

以 8 bit 数据实现 256 级灰度为例。8 bit 分为 12 子场,每 bit 数据所对应的权重分别为 4、2、1、1/2、1/4、1/8、1/16、1/32。12 子场的扫描效率仅为 66.41%。而经过双帧融合调制后,帧内占子场时间长度为 0 的 bit 位不需要扫描操作。图 1 所示为 8 bit 双帧融合扫描策略原理图,融合后的 frame 0 仅需要 8 个有效子场,frame 1 需要 11 个有效子场,扫描效率为 88.38%。在提高扫描效率的同时,减少了亮度损失。而融合之后 frame 0 或 frame 1 中的子场扫描顺序,可以视实际情况决定。

### 2.2 双帧数模融合扫描策略

双帧数模融合扫描策略在数模融合扫描策略的基础上对数字脉宽调制部分进行双帧融合处理。数字脉宽调制部分可以采用子场、子空间、Z 字形等扫描方式,经过处理后可降低数据传输频率,提高扫描效率,减少亮度损失。模拟幅值调制利用斜

坡 DAC 将数字信号转换为模拟信号相应的电压值,进而产生相应的灰度等级。将数字、模拟调制方式结合既能够有效降低数据的传输量,也能够降低 DAC 设计的复杂程度。随着帧频和分辨率的不断提高,该扫描算法的优势会越来越明显。

子空间位权值扫描算法<sup>[12]</sup>是将微显示器屏(一个空间)划分为  $s$  个子空间,对各个独立的子空间进行独立的位权值灰度扫描,让各个子空间的冗余操作与有效操作实现交错,即利用某一子空间冗余操作时间片对其他子空间进行有效控制输出。数字脉宽调制部分利用子空间位权值扫描算法实现。若采用双帧数模融合扫描策略对  $n$  bit 数据进行调制,首先通过双帧融合方式处理 frame 0 和 frame 1 两帧的 bit 位权值分布,然后利用模拟幅值调制(Ramp DAC)实现低  $(m + 1)$  位的灰度调制,利用子空间位权值调制(数字脉宽调制)实现高

$(n - m - 1)$ 位灰度调制。双帧数模融合扫描策略 如图 2 所示。

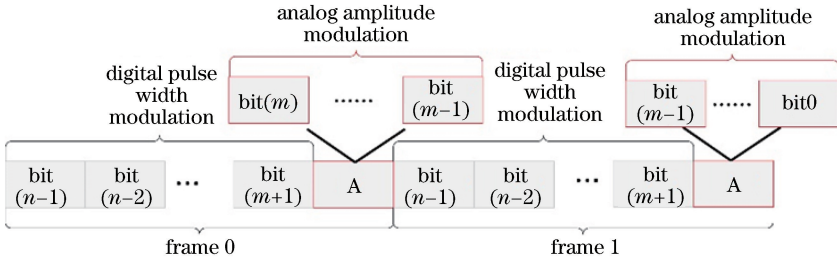


图 2 双帧数模融合扫描策略

Fig. 2 Double-frame digital-analog-hybrid scanning strategy

双帧数模融合扫描策略的调制机制可描述为

$$\left\{ \begin{aligned} L_{\text{Frame0}} = L_{\text{Frame1}} = & \frac{1}{2^H} \cdot \int \theta \cdot V(N_{\text{Fn}}) \cdot T_g \cdot dN_{\text{Fn}} \\ H = n - m - 1 & \rightarrow \\ L_{\text{Frame0}} = L_{\text{Frame1}} = & \frac{1}{2^{(n-m-1)}} \cdot \int \theta \cdot V(N_{\text{Fn}}) \cdot T_g \cdot dN_{\text{Fn}} \end{aligned} \right. , \quad (1)$$

经过双帧数模融合扫描算法优化后,所需数据传输频率为

$$f = \frac{i_{\text{rows}} \times i_{\text{cols}} \times 3 \times 2^{n-m-1} \times F_{\text{rate}}}{D_{\text{width}} \times s}, \quad (2)$$

式中: $s$ 为整屏分屏数目; $n$ 为灰度数据位宽; $m$ 为模拟幅值调制的位数; $H$ 为数字调制的位数; $g$ 为灰度 $G$ 的因子; $\theta$ 为与硅基 OLED 微显示器相关的系数; $N_{\text{Fn}}$ 为帧循环的位权; $V(\cdot)$ 表示电压输出特性; $T_g$ 为帧调制的单位周期时间; $L_{\text{Frame0}}$ 和 $L_{\text{Frame1}}$ 分别对应两帧中一个像素单元单位周期的灰度输出特性; $i_{\text{rows}}$ 和 $i_{\text{cols}}$ 分别为图像像素的行数和列数; $F_{\text{rate}}$ 为图像刷新帧率; $D_{\text{width}}$ 为数据传输位宽; $f$ 为算法优化后所需的数据传输频率。

### 3 硅基芯片设计

#### 3.1 硅基 OLED 微显示驱动电路系统架构

硅基 OLED 微显示器系统结构如图 3 所示。主要包括三部分:1) 扫描控制器,视频处理模块通过双帧数模融合扫描策略对视频数据进行处理,将处理后的数据存储在数据缓存模块,时序模块产生所需要的控制信号和时序信号;2) 接口电路,数据、控制、时序等信号通过该部分传输到硅基 OLED 微显示器驱动电路;3) 硅基 OLED 微显示器驱动电路,主要包括行驱动电路、列驱动电路、像素驱动电路。行、列驱动电路利用时序、控制信号将数据写到相应的像素电路单元。

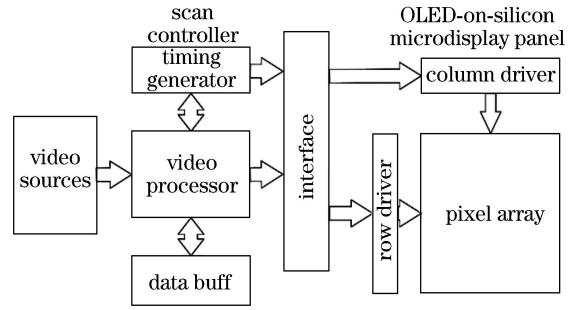


图 3 硅基 OLED 微显示器系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of OLED-on-silicon microdisplay system

#### 3.2 列驱动电路

在模拟驱动方式中,DAC 是微显示器驱动电路的重要模块。随着微显示器的分辨率、帧频和灰度等级的不断提高,要求 DAC 的精度也越来越高。若驱动芯片的工作电压范围为  $0 \sim 5 \text{ V}$ ,数据位宽为 10 bit,则对于 1024 级灰度,DAC 的精度要求达到 4.8 mV,设计难度大且容易产生误差。

采用所提算法对传统微显示器列驱动电路进行改进。列驱动电路结构如图 4 所示,数据通道包括模拟信号通道和数字信号通道。模拟调制部分的信号通过模拟通道,column\_start 为使能信号通过 shift register 加载到 load register, register array 一般采用锁存器,col\_en 为使能信号,用来同步数据信号 data。comparator 将数据信号与 counter 的计数输出信号进行对比,相同则为“1”,并作为 column switch 的控制信号。若开关开启,则 DAC 所输出的电压信号加载至像素电路。由于一个 DAC 需要驱动一行数据,因此需要一个较大的缓存器增加驱动能力,以保证信号的完整性。数字调制部分的信号通过数字通道,如图 4 中虚线箭头所示。当进行数字调制时,复用部分 load register 和 register array。最后,通过 signal switch 加载至像素驱动电路。该结构只需要一个 DAC,电路面积开销大幅减

少;而且只对部分 bit 位进行模拟调制,降低了 DAC 的位宽和设计复杂度,避免了因 DAC 精度未达到而引起的误差。同时,进行数字调制的 bit 位也减少了,在一定程度上降低了数据传输量。

在模拟调制中,像素单元的数据加载时间由比较器的输出结果决定。一个 DAC 驱动一行像素单元,若采用等于比较器,则数据的加载只有一个 DAC 时钟周期的时间,存储电容上的电压可能无法达到规定值,导致无法实现精确的灰度级。由于 OLED 器件的发光亮度与流过它的电流成正比,且像素亮度是一段时间内亮度的积分,若采用小于比较器,数据输入时间就会增加,流过 OLED 器件的

电流随之增加,最终的亮度积分会超过规定值,进而产生亮度误差,且灰度等级越高亮度偏差越大。

针对上述问题,本文提出一种新型结构,如图 4 左侧虚线框内结构所示,对图 4 中列驱动电路(右侧虚线框)进行部分结构优化。其中,dff 为 D 触发器,or 为或门。将 DAC 的输入信号和比较器输出信号进行延时,提前一个或几个 DAC 时钟周期的时间打开控制开关,对像素存储电容进行充电。具体需要延时几个时钟周期可根据电容大小和充电时间调整。该结构既可满足电容的充电时间,又可以控制亮度积分接近输入的灰度等级,因此,可以提高灰度等级的精确度。

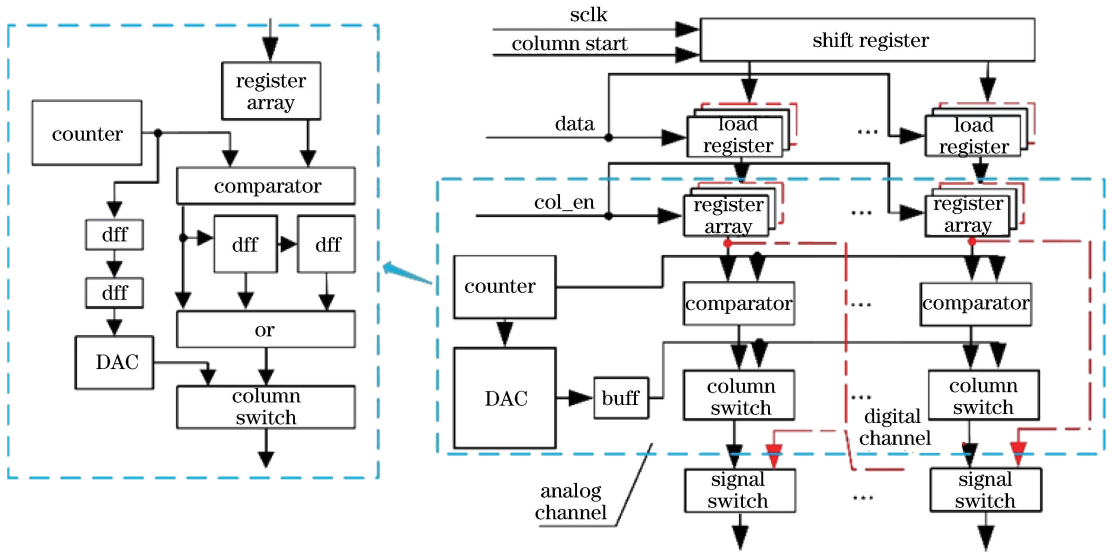


图 4 列驱动电路结构

Fig. 4 Structural diagram of column driving circuit

### 3.3 像素驱动电路

图 5 为像素电路结构及其工作时序图。如图 5 (a) 所示,像素驱动电路采用了改进的 4T1C(4 Transmission 1 Capacitance) 结构。开关管 p1、p2 控制电压数据  $v_{data}$  的写入,p3 管作为有源电阻使

用。n1 作为驱动管,N 型金属-氧化物-半导体(NMOS)能够使低电压通过,可有效提高显示器的对比度。 $c1$  为存储电容,像素面积为  $3.3 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$ , $c1$  大小为  $60 \text{ fF}$ 。

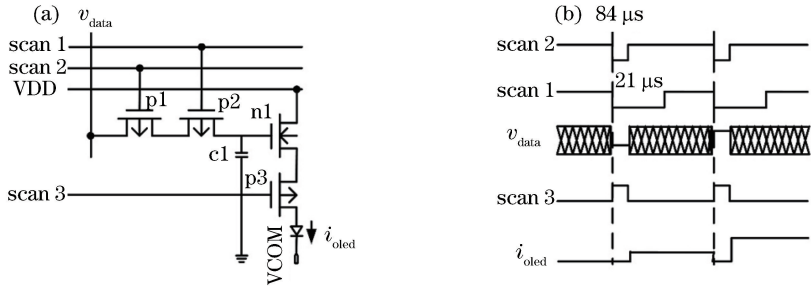


图 5 像素驱动电路。(a)像素电路结构;(b)像素电路时序

Fig. 5 Pixel driving circuit. (a) Structural diagram of pixel circuit; (b) pixel circuit timing

图 5 中,VDD 为工作电源,VCOM 为负电源,  $i_{oled}$  为发光电流,  $v_{data}$  为输入电压, scan 1 为行开关



控制信号, scan 2 为列开关控制信号。所提出的像素电路采用两个开关管,且分别采用不同控制信号控制的方式,具有如下优点:1) 串联多个 MOS 管可降低源极和漏极两端的漏电流,从而提高像素数据的准确性;2) 在某列工作时可以防止该列数据对其他列像素的影响;3) 防止在列数据线上寄生的电容对像素数据产生影响;4) 可降低流过发光材料的最小电流,提高显示器的对比度。

在  $v_{data}$  数据写入存储电容的过程中, scan 3 为高电平, p3 管关闭,  $i_{oled}$  为 0; 在  $v_{data}$  保持时间内, scan 3 为低电平, p3 管打开, 此时 p3 管作为有源电阻使用, 增加 p3 管可以降低流经发光材料的最低电流, 从而提高微显示器的对比度<sup>[13]</sup>。图 6 所示为

增加 p3 管对  $i_{oled}$  的影响。当输入电压比较低时, p3 管的等效阻值很大,  $i_{oled}$  很小; 当输入电压比较高时, p3 管的等效电阻比较小, 相当于短路, 与不加 p3 管时电流相同, 对  $i_{oled}$  没有影响。

各控制信号时序如图 5(b) 所示, 帧频为 60 Hz 时, 行控制信号 scan 1 有效时间为 21  $\mu s$ , 整个一行的第一个开关管开启。列控制信号 scan 2 有效时间为 84 ns(DAC 的工作周期), 不同的像素电路所对应的电压值不同, 因此, scan 2 信号的有效时间不同。当两个控制信号同时有效时, 数据写入像素电路存储电容, scan 2 信号保证了像素数据的准确写入。图 7 所示为像素电路的充电情况, 其中两个圈所标出的电压分别为同一时刻的 DAC 输出电压 DAC\_out 和电容充电电压  $v_{cl}$ 。图 7(a) 给出了 DAC 输出电压, 极限情况 DAC 需要对整行存储电容充电, 而且输入电压越低, DAC 驱动能力越弱, 所需要的充电时间越长。因此需要一个较大的缓存器增加驱动能力, 并适当增加 DAC 的充电时间; 如图 7(b) 所示, 输入电压为 2.11 V, 充电时间为 200 ns, 因为 DAC 的工作周期为 84 ns, 因此数据写入时间至少延长两倍, 具体实现结构如图 4 左侧虚线框内结构所示。像素版图、微显示器驱动电路版图、芯片实物图、微显示器现场可编程门阵列(FPGA)验证测试平台如图 8 所示。

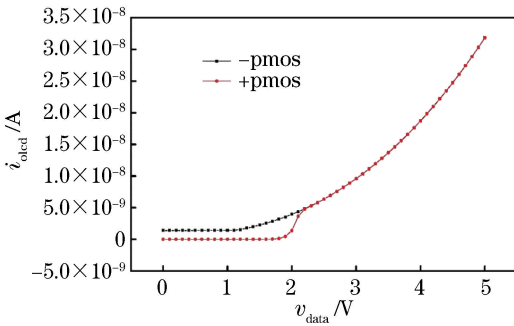


图 6 有 p3 和无 p3 时  $i_{oled}$  的情况

Fig. 6  $i_{oled}$  in cases with and without p3

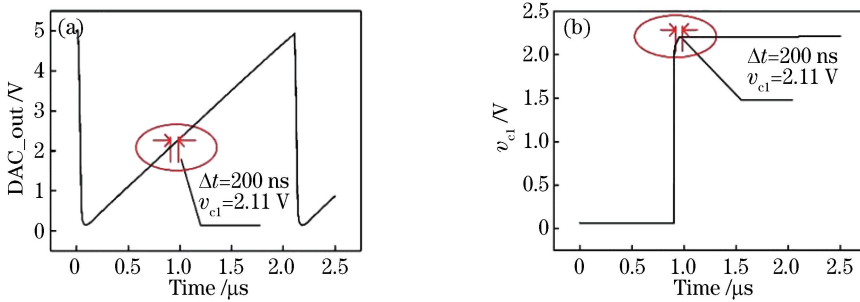


图 7 像素电路充电情况。(a) DAC 输出电压; (b) 存储电容

Fig. 7 Charging conditions of pixel circuit. (a) DAC output voltage; (b) memory capacitor

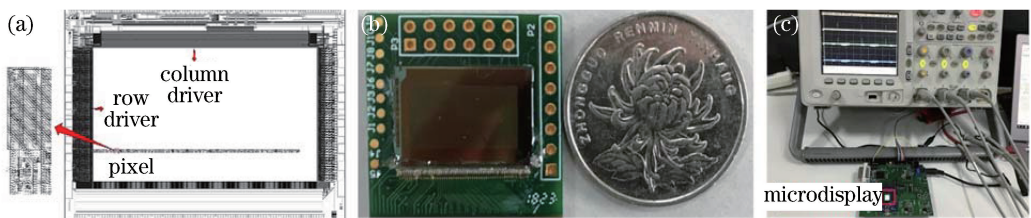


图 8 微显示器实物图。(a) 单个像素版图; (b) 微显示器芯片与 1 元硬币对比图; (c) 硅基 OLED 微显示器 FPGA 验证测试平台  
Fig. 8 Physical map of microdisplay. (a) Single pixel layout; (b) comparison of microdisplay chip and one-yuan coin; (c) FPGA verification test platform of OLED-on-silicon microdisplay

## 4 结果分析

电路设计采用 SMIC 0.18  $\mu\text{m}$  1.8 V/5 V CMOS 工艺,设计工具采用 Cadence 平台。扫描方式采用双帧数模融合扫描策略,数据位宽为 8 bit 实现 256 级灰度,60 Hz 帧频,屏幕分辨率为 1920 pixel $\times$ 3 pixel $\times$ 1080 pixel。

表 1 不同扫描算法的性能对比(60 Hz 帧频,256 灰度级,1920 pixel $\times$ 3 pixel $\times$ 1080 pixel 分辨率)

Table 1 Performance comparison of different scanning algorithms (60 Hz frame frequency, 256 grayscale, 1920 pixel $\times$ 3 pixel $\times$ 1080 pixel resolution)

Scanning algorithm	Linearity /%	Scanning efficiency /%	Data transmission frequency /MHz
Traditional weight scanning	100.0	3.14	1487.16
12 subfield scanning	100.0	66.41	69.99
19 subfield scanning	100.0	83.88	110.82
Optimization (Z fractal scan)	25.0	100	70.59
Double-frame hybrid scanning	99.8	75	46.656
Double-frame digital-analog hybrid scanning	99.8	99.22	23.328

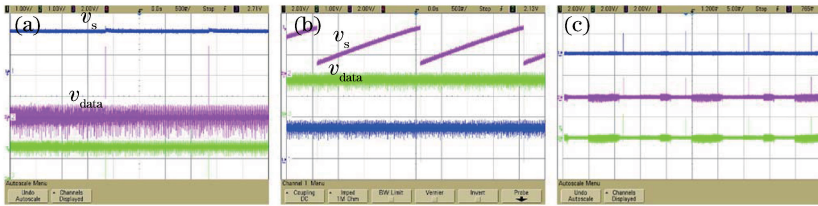


图 9 驱动电路测试波形图。(a)输入为高电平;(b)输入为低电平;(c)行驱动电路

Fig. 9 Test waveforms of driving circuit. (a) High input of pixel circuit; (b) low input of pixel circuit; (c) row driving circuit

由于 OLED 的驱动电流非常小,约为 1 pA $\sim$ 1.1 nA。若直接测量电流,测量工具的精度不足,会导致结果存在误差,无法直接实测电流值。因此,采用测量驱动管源极电压在一帧时间内的变化量来验证漏电流的变化情况。

像素电路实测波形如图 9 所示,其中图 9(a)给出了输入为高电平时驱动管源极电压, $v_{\text{data}}$ 为列驱动电路输出电压, $v_s$ 为驱动管源极电压。 $v_{\text{data}}$ 写入周期为 500 ms,数据电压几乎没有下降。图 9(b)给出了输入为低电平时驱动管源极电压, $v_{\text{data}}$ 写入周期为 500 ms,在 2 s 内  $v_s$  上升幅度为 4 V,当帧频为 60 Hz 时,在一帧 16 ms 的刷新时间内电压上升量为 32 mV,该误差可忽略。由此可以看出,所提出的像素电路有效保持了数据电压,减少了开关管漏电所带来的数据偏差。图 9(c)即图 8(c)中示波器显示的波形,为行驱动电路测试波形图,其中第一条波形为第 0 行选通信号输出测试,第二条波形为第 1 行选通信号输出测试,第三条波形为第 1079 行

衡量扫描策略的主要性能指标包括线性度、扫描效率、数据传输频率<sup>[4]</sup>。在上述条件下不同扫描算法的性能对比如表 1 所示。从表 1 可以看出,虽然双帧数模融合扫描算法的线性度略微降低,但扫描效率大幅提升至 99.22%;同时,数据传输频率也降低至 23.328 MHz,明显低于其他扫描方式。

选通信号输出测试,依次对入行信号进行编解码,对测试点进行测试,可观测到行驱动电路可以正常工作。

## 5 结 论

提出了一种双帧数模融合扫描策略,并基于该扫描策略设计了一种硅基 OLED 微显示器驱动电路。所提出的扫描算法对数模融合扫描的数字脉宽调制部分进行优化,将扫描效率提高至 99.22%,数据传输频率降低至 23.328 MHz。测试数据表明,所提出的列驱动电路结构有效地保证了像素数据的准确写入;像素驱动电路结构可减少漏电,使像素数据能够保持完整的一帧时间;同时,该像素电路可以有效防止列数据线线上的寄生电容对像素数据产生影响,进而提高像素电压的精度,并降低噪声。

## 参 考 文 献

[1] Geffroy B, Le Roy P, Prat C. Organic light-emitting

- diode (OLED) technology: materials, devices and display technologies [J]. *Polymer International*, 2006, 55(6): 572-582.
- [2] Reineke S, Lindner F, Schwartz G, *et al.* White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency[J]. *Nature*, 2009, 459(7244): 234-238.
- [3] He L P, Zeng Z H, Lin F. Optical design of catadioptric off-axis helmet-mounted display [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 122201.  
何丽鹏, 曾振煌, 林峰. 折/反射式离轴头盔显示器光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 122201.
- [4] Wang S M, Cheng D W, Huang Y F, *et al.* Design of wide FOV optical-tiled head-mounted display with high-resolution [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 062201.  
王士铭, 程德文, 黄一帆, 等. 大视场高分辨率光学拼接头盔显示器的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 062201.
- [5] Ji Y, Wang C Q, Chen W D, *et al.* An atom scan strategy for OLED micro display [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 998-1005.  
季渊, 王成其, 陈文栋, 等. OLED 微显示器的原子扫描策略[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(4): 998-1005.
- [6] Man L P, Ji Y, Chu Y N, *et al.* Digital and analog hybrid scan strategy for high definition microdisplay on silicon [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 012301.  
满丽萍, 季渊, 褚勇男, 等. 高清硅基微显示数模融合扫描策略[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 012301.
- [7] 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.
- [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] Zhao B H, Huang R, Ma F, *et al.* The realization of an SVGA OLED-on-silicon microdisplay driving circuit[J]. *Journal of Semiconductors*, 2012, 33(3): 035006.
- [10] Kimura K, Onoyama Y, Tanaka T, *et al.* 28-3: distinguished paper: new pixel driving circuit using self-discharging compensation method for high-resolution OLED microdisplays on a silicon backplane [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 398-402.
- [11] Hong S W, Kwak B C, Na J S, *et al.* Simple pixel circuits for high resolution and high image quality organic light emitting diode-on-silicon microdisplays with wide data voltage range [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(2): 110-116.
- [12] Chen Z J, Xu M H, Ran F. IP core implementation of fractal scanning model for FPD system [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(5): 880-885.  
陈章进, 徐美华, 冉峰. 平板显示系统分形扫描模型的 IP 核实现[J]. *电子学报*, 2008, 36(5): 880-885.
- [13] Yang M, Zhang B X, Chen J J, *et al.* A new pixel circuit for high-contrast ratio OLED-on-silicon microdisplay [J]. *Research & Progress of Solid State Electronics*, 2015, 35(3): 267-271, 283.  
杨森, 张白雪, 陈建军, 等. 一种提高硅基 OLED 微显示器对比度的像素电路[J]. *固体电子学研究与进展*, 2015, 35(3): 267-271, 283.