

基于超像素的硅基有机发光二极管微显示器

王欣睿¹, 季 渊^{1,2*}, 张 引², 陈鸿港¹, 穆廷洲²

(1. 上海大学微电子研究与开发中心, 上海 200444; 2. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 基于超像素技术, 针对彩色硅基 OLED (Organic Light Emitting Diode) 微显示器, 提出一种数字驱动策略, 通过复用相邻像素信息, 使单像素用于多个相邻像素成像, 大幅提高显示分辨率. 设计了一种数字驱动彩色 OLED-DoS (Organic Light Emitting Diode on Silicon) 微显示器驱动电路, 在 120 Hz 帧频的条件下, 可实现 256 级灰度和 4K 显示分辨率, 且电路面积和每秒数据传输量仅为传统驱动方式的 50%. 经测试验证, 该驱动电路可实现的 OLED 像素平均电流范围为 13.1 pA~3.74 nA, 可满足微显示器近眼显示需求.

关键词: 硅基有机发光二极管; 微显示; 像素驱动电路; 超像素; 现场可编程门阵列

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

中图分类号: TN873

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)07-2291-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230049

Organic-Light-Emitting-Diode-on-Silicon Micro-Display Based on Super Pixel Strategy

WANG Xin-rui¹, JI Yuan^{1,2*}, ZHANG Yin², CHEN Hong-gang¹, MU Ting-zhou²

(1. *Microelectronics Research and Development Center, Shanghai University, Shanghai 200444, China;*

2. *School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

Abstract: Based on super pixel technology, a digital driven strategy for color silicon OLED (Organic Light Emitting Diode) micro-display is proposed. By reusing adjacent pixel information, a single pixel can be used for imaging multiple adjacent pixels to greatly improve the display resolution. A digital driving circuit for color OLED-DoS (Organic Light Emitting Diode on Silicon) micro-display is designed. Under the condition of 120 Hz frame rate, 256 grey levels and 4K display resolution can be achieved while the circuit area and data transmission per second are only 50% of the traditional driving mode. The test results show that the average current range of OLED pixel realized by the driving circuit is 13.1 pA~3.74 nA, which can meet the demand of near-eye display of micro display.

Key words: organic light emitting diode on silicon; micro-display; pixel driving circuit; super pixel strategy; field programmable gate array

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61774101, No.61674100)

1 引言

随着 5G 通讯崛起, 消费电子领域变化加速, 微显示技术应用市场也随之拓宽^[1], 其中 OLED (Organic Light Emitting Diode) 微显示器发展迅速, 已逐步取代液晶显示器 (Liquid Crystal Display, LCD) 成为微显示领域的主流屏幕之一^[2,3]. 相较于 LCD 面板, OLED 微显示器具有体积小、重量轻、显示分辨率高、响应速度快、功耗低等特点^[4,5]. 基于单晶硅的 OLED 微显示器, 作为 OLED 微显示器的重要分支之一, 其兼顾了分辨率高、

集成度高、体积小等优势^[6,7], 能更好满足新型显示需求, 是近眼显示系统的核心设备之一. 目前, 世界各地的公司一直致力于近眼显示设备开发和 OLED-DoS (Organic Light Emitting Diode on Silicon) 微显示器改进^[8]. 2011 年, eMagin 公司推出了显示分辨率为 1 920×RGB×1 200 的 0.86 英寸全彩色 OLED-DoS 面板, 这是第一款在芯片上直接集成低功耗 LVDS (Low Voltage Differential Signaling) 接口的微显示器^[9,10]. 2019 年, 视涯科技推出了一款显示分辨率为 2.5K (2 560×RGB×2 560)

的 1.03 英寸高亮度 OLEDoS 微显示器,该面板有效缓解了微显示器显示应用中的纱窗效应和眩晕问题^[11]. 2021 年,南京昶光科技公司推出了一款 1.3 英寸显示分辨率为 2K (2 048×RGB×2 048) 的全数字驱动 OLEDoS 微显示器,其亮度可高达 3 000 cd/m²,主要用于虚拟现实 (Virtual Reality, VR) 头显产品^[12]. 在如今显示领域需求日益增加的大背景下, OLEDoS 微显示器逐渐成为新型显示的最优选择之一^[13].

显示分辨率作为 OLEDoS 微显示器重要参数之一,被用作描述屏幕显示图像的精密密度,通常显示分辨率越高表示其所包含的像素数目越多,图像画面越细腻,人眼视觉观测效果越好. OLEDoS 微显示器的另一个重要参数是像素密度,其被定义为每英寸屏幕包含的像素点数量. 苹果在 iPhone4 发布会上指出,当人眼离屏幕约 10~12 英寸且屏幕像素密度大于 300 ppi 时,像素点间距小于人眼最小空间分辨力间距,此时人眼无法感知到像素点的存在,这被称作视网膜分辨率. 在微显示领域,使人眼感知到的图像效果达到视网膜分辨率一直是大家追求的目标,但随着显示分辨率和像素密度的增加, OLEDoS 微显示器尺寸也随之增加,导致其成本和功耗成倍上升. 因此在 OLEDoS 微显示器设计中,如何做到减小 OLEDoS 微显示器尺寸和功耗的同时,提高显示分辨率和像素密度成为研究的热点和难点^[8,14].

本文基于超像素技术,针对彩色 OLEDoS 微显示器,提出一种数字驱动策略,通过复用相邻像素信息,使单像素用于多个相邻像素成像,在几乎不改变微显示器尺寸和功耗的同时,提高微显示器分辨率. 并基于该策略设计了一种数字驱动彩色 OLEDoS 微显示器驱动电路,其可在 120 Hz 帧频下实现 256 级灰度和 4K 显示分辨率. 经过设计、测试验证该微显示器驱动电路 OLED 平均驱动电流和亮度基本满足近眼显示需求.

2 超像素驱动策略

在传统驱动技术中,像素驱动电路的行、列数目与显示图像的分辨率一致,即显示屏上每一个像素单元会固定对应图像中的某一个像素点,每个像素单元又由 RGB 这 3 种子像素按一定顺序组合构成. 超像素驱动技术不同于传统驱动技术,其利用人眼视觉暂留特性^[15],通过改变子像素组合方式,拆分一帧高分辨率原始图像为两帧低分辨率超像素图像,并以原始图像两倍的刷新率交替循环显示两帧超像素图像,使超像素图像显示效果在空间和时间上叠加,达到使用低分辨率显示器显示高分辨率图像的效果. 此时微显示器的像素单元不再固定地对应图像中的某一个像素点,而是不停改变的.

超像素驱动原理如图 1 所示,其中图 1(a) 截取了 Frame0 (第一帧) 和 Frame1 (第二帧) 中单个低分辨率的超像素单元,单个超像素单元又由 4 个高分辨率的子像素单元组成. 图 1(b) 为两帧低分辨率超像素单元的切换方式,将 Frame0 沿 X 轴和 Y 轴方向各偏移一个子像素后得到 Frame1,以两倍的刷新率交替显示 Frame0 和 Frame1,即原来扫描一帧高分辨率原始图像的时间用来扫描两帧低分辨率超像素图像,从而达到提高 X 和 Y 方向分辨率的效果.

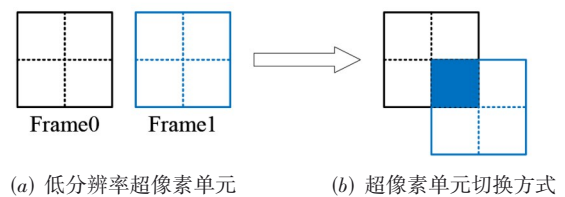


图 1 超像素驱动原理

图 2 为超像素驱动在 OLEDoS 微显示器上形成高分辨率图像的过程. 图 2(a) 中输入分辨率为 14×18 的字母 SH 彩色原图,图中每个像素单元由 RGB 这 3 种子像素构成. 图 2(b) 是图像处理过程,分别抽取原图“奇行+奇列”和“偶行+偶列”的像素数据作为 Frame0 和 Frame1,其中 Frame0 像素单元为 P₀, Frame1 像素单元为 P₁. 在分离输入图像的过程中,灰度强度也进行了分离,Frame0 和 Frame1 的灰度强度分别降低为原图的 M% 和 (1-M)%, M 是 1~100 的整数,称为分离比例系数,图中 M=50. 图 2(c) 是划分子像素生成超像素过程,通过复用相邻像素信息,划分 Frame0 和 Frame1 每个像素单元组成超像素单元,图中分别用 SP₀ 和 SP₁ 表示,SP₀ 和 SP₁ 由子像素 P₀ 和 P₁ 拓展得到. 图 2(d) 中,在第一个子帧的时间内显示 Frame0,第二个子帧的时间内显示 Frame1,将显示刷新率提高为原图的两倍,此时人眼感知的显示效果是两子帧图像在时间和空间上的叠加. 图 2(e) 为最终显示效果,其中字母 SH 较原图而言,在两子帧图像灰度跳变处会出现一些问题,但当分辨率足够高时,人眼无法分辨出单个像素,不会影响图像整体显示效果.

图 3 为使用 matlab 对超像素驱动技术显示效果进行验证后的对比图像. 由图可得,相较于 Frame0 和 Frame1 图像,经超像素处理后的图像更平滑,但仅用人眼观察无法明显分辨出 4 幅图像区别,故分别抽取 4 幅图片 379~384 行,372~377 列组成 8×8 的像素阵列. 通过像素阵列可得 Frame1 像素位置是由 Frame0 沿对角线下移一个子像素得到,且经超像素处理后图像的显示分辨率与原图一致,为 Frame0 和 Frame1 的四倍,其单个子像素的灰度信息与原图仅存在细微偏差.

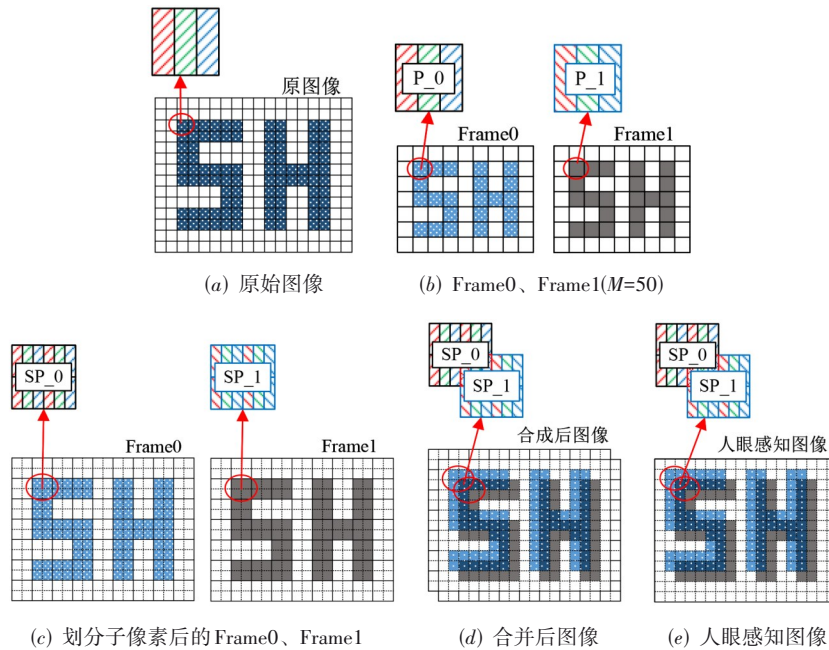


图2 超像素驱动在OLEDoS微显示器上形成高分辨率图像的过程

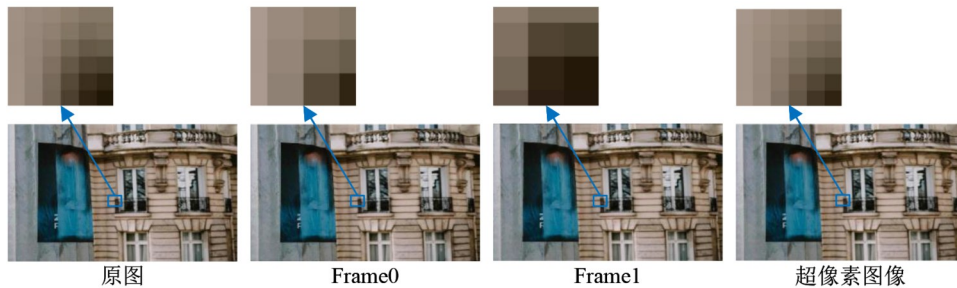


图3 matlab仿真超像素驱动显示效果

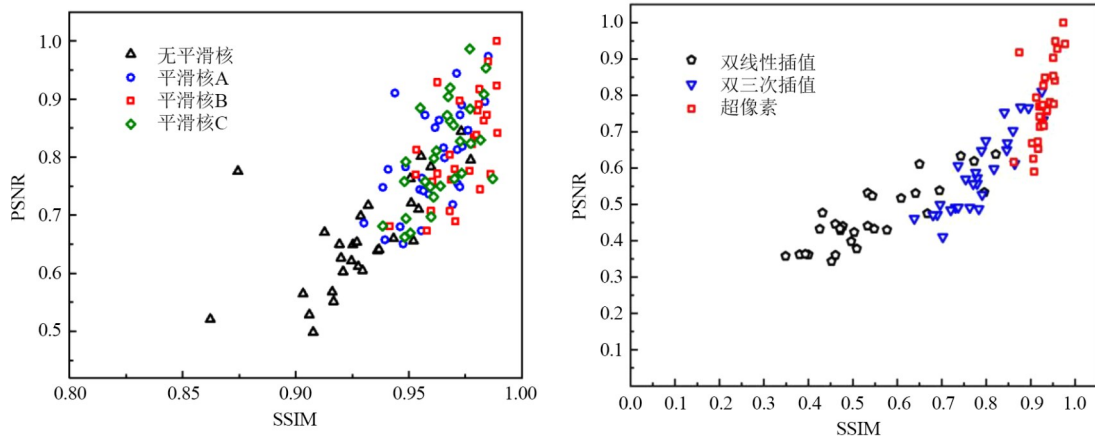
通常使用低分辨率微显示器显示高分辨率图像的传统做法是采用图像缩放策略,舍弃部分像素信息,对输入图像进行压缩处理.常用图像缩放策略有双线性插值策略^[16]和双三次插值策略^[17]等.超像素驱动策略利用人眼视觉暂留特性,通过叠加两帧图像显示效果,同样可达到提高显示分辨率的目的.为了进一步验证超像素驱动策略显示质量,联合峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)和结构相似性(Structural SIMilarity, SSIM)^[18-21],利用美国德克萨斯大学的LIVE Database(Laboratory for Image & Video Engineering Data-

base)^[22]中29幅参考图片对双线性插值策略、双三次插值策略和超像素驱动策略显示质量进行评估.仿真共得到145幅图像,其图像质量评价结果如图4和表1所示,为方便对比,图4中将PSNR值作归一化处理.

图4(a)是Frame0和Frame1与超像素图像的图片质量对比,从图中可明显看出相较于Frame0和Frame1,超像素图像的PSNR与SSIM值密集分布于图片右上角(接近1处),说明超像素图像与原图显示效果最为接近,该仿真结果与人眼主观评价结果一致.图4(b)是分别经双线性插值、双三次插值与超像素处理后所得图

表1 LIVE Database参考图像PSNR及SSIM评价结果

| 评估参数 | PSNRmin/dB | PSNRmax/dB | PSNRavg/dB | SSIMmin | SSIMmax | SSIMavg |
|--------|------------|------------|------------|---------|---------|---------|
| Frame0 | 10.299 0 | 22.897 6 | 16.224 2 | 0.441 9 | 0.637 0 | 0.555 9 |
| Frame1 | 9.862 5 | 21.930 1 | 15.990 6 | 0.389 2 | 0.637 2 | 0.542 3 |
| 超像素 | 19.235 2 | 32.602 1 | 25.458 2 | 0.862 2 | 0.977 3 | 0.929 1 |
| 双线性插值 | 11.185 4 | 20.796 2 | 15.124 8 | 0.348 8 | 0.821 5 | 0.545 3 |
| 双三次插值 | 13.379 5 | 26.428 3 | 19.244 3 | 0.683 2 | 0.928 3 | 0.786 9 |



(a) Frame0、Frame1 与超像素图像质量评价 (b) 双线性插值、双三次插值与超像素图像质量评价

图4 图像质量评价结果

像的对比. 从图中可得, 参考图像经3种策略分别处理后所得 PSNR 与 SSIM 值依次为超像素>双三次插值>双线性插值, 其所对应的图片质量也随之递减. 结合表1, 得到超像素图像的 PSNR 平均值与 SSIM 平均值远高于其他几种图像, 分别为 25.458 2 dB 和 0.929 1. 综合人眼主观评价和“PSNR & SSIM”客观评价结果, 可得出结论, 经超像素处理后的图像显示分辨率为 Frame0 和 Frame1 的 4 倍, 且其显示质量明显优于双线性插值和双三次插值图片, 基本与原图无差异, 图像质量最优.

尽管超像素驱动策略相较于常规图像缩放策略显

示效果更好, 但当输入图像相邻两个像素数据差异较大时, 其存在丢失图像部分显示细节的问题. 为了进一步优化超像素驱动策略显示质量, 完善图像显示信息, 在超像素处理之前先对输入图像进行平滑滤波操作. 式(1)是针对超像素驱动策略提出的3个4×4平滑核, 其中(a)(b)(c)依次为平滑核A、平滑核B、平滑核C. 式(2)是平滑核模型中, 超像素生成位置. 式(1)所述3个平滑核模型对式(2)中 pixel(r, c)、pixel(r, c+1)、pixel(r+1, c)、pixel(r+1, c+1)构成的2×2像素阵列起到模糊作用, 对该区域外剩余像素阵列起到锐化作用, 可有效改善超像素驱动策略显示质量.

$$(a) \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 10 & 10 & -1 \\ -1 & 10 & 10 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \frac{1}{32} \quad (b) \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 10 & 10 & -1 \\ -1 & 10 & 10 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \frac{1}{28} \quad (c) \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 10 & 10 & -1 \\ -1 & 10 & 10 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \frac{1}{30} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \text{pixel}(r-1, c-1) & \text{pixel}(r-1, c) & \text{pixel}(r-1, c+1) & \text{pixel}(r-1, c+2) \\ \text{pixel}(r, c-1) & \text{pixel}(r, c) & \text{pixel}(r, c+1) & \text{pixel}(r, c+2) \\ \text{pixel}(r+1, c-1) & \text{pixel}(r+1, c) & \text{pixel}(r+1, c+1) & \text{pixel}(r+1, c+2) \\ \text{pixel}(r+2, c-1) & \text{pixel}(r+2, c) & \text{pixel}(r+2, c+1) & \text{pixel}(r+2, c+2) \end{pmatrix} \quad (2)$$

利用加入平滑滤波处理后的超像素驱动策略显示 LIVE Database 参考图像, 其 PSNR&SSIM 客观评价结果如图5所示. 结合表2可得, 经平滑滤波处理后的超像素图像显示质量得到一定提升, 平滑核 A、B、C 分别将参考图像 PSNR 均值从 25.458 2 dB 提升至 30.660 7 dB、31.527 2 dB、31.094 6 dB, 一般认为 PSNR 值高于

30 dB 以上, 该图像质量能满足人眼观看效果. 与此同时, 经平滑核 A、B、C 处理后参考图像 SSIM 均值也从 0.929 1 分别提高至 0.960 3、0.972 8、0.965 0. 通过分析 PSNR 和 SSIM 评价结果, 得到经平滑滤波处理后的超像素图像显示质量有明显提升, 其中平滑核 B 提升效果最佳.

表2 超像素驱动策略优化后 LIVE Database 参考图像 PSNR 及 SSIM 评价结果

| 评估参数 | PSNRmin/dB | PSNRmax/dB | PSNRavg/dB | SSIMmin | SSIMmax | SSIMavg |
|-------|------------|------------|------------|---------|---------|---------|
| 无平滑核 | 19.235 2 | 32.602 1 | 25.458 2 | 0.862 2 | 0.977 3 | 0.929 1 |
| 平滑核 A | 25.111 5 | 37.594 8 | 30.660 7 | 0.930 1 | 0.985 1 | 0.960 3 |
| 平滑核 B | 25.979 4 | 38.603 1 | 31.527 2 | 0.941 5 | 0.989 2 | 0.972 8 |
| 平滑核 C | 25.546 6 | 38.083 1 | 31.094 6 | 0.938 4 | 0.987 1 | 0.965 0 |

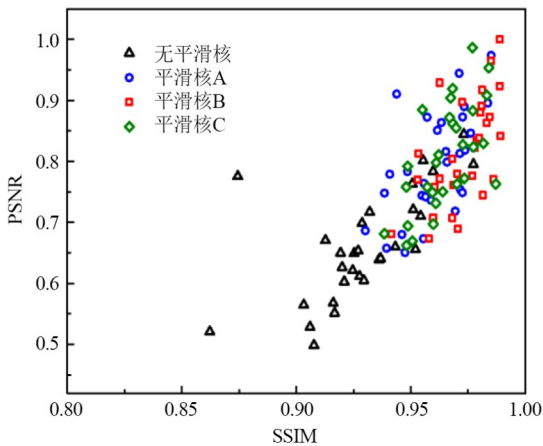


图5 平滑滤波优化后超像素驱动策略显示质量评价

3 硅基芯片设计

3.1 彩色超像素 OLED_oS 微显示器驱动背板电路框架

基于超像素驱动策略,以实现 256 级灰阶、4K 分辨率(4 096 × 3 × 4 096)为目的,提出一种数字驱动 OLED_oS 微显示器系统架构,如图 6 所示,其主要包括三部分:(1)扫描控制器:输入视频源至视频处理模块,经超像素处理后将视频数据存储至数据缓存模块,同时,时序模块产生所需控制及时序信号;(2)接口电路:将处理好的数据、控制及时序等信号传输至 OLED_oS 微显示器驱动电路;(3)OLED_oS 微显示器驱动电路,包括行、列驱动电路及像素驱动电路,主要功能是在控制和时序信号的作用下通过行、列驱动电路将数据写至对应的超像素单元。

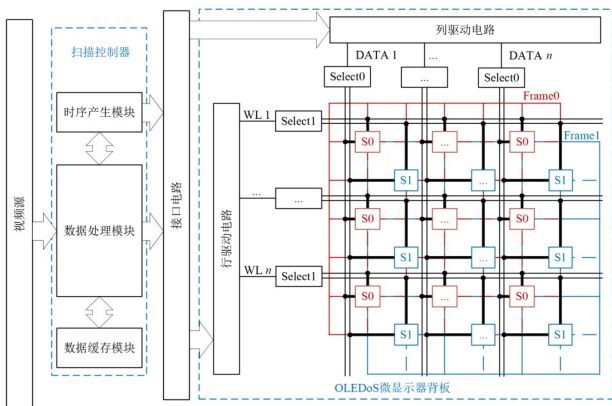


图6 彩色超像素 OLED 微显示器驱动背板电路结构图

3.2 超像素驱动电路

使用传统数字驱动像素电路^[23]实现 4K 分辨率时,一个 SRAM(Static Random-Access Memory)仅锁存一个 OLED 像素数据,故总共需要 4 096 × 3 × 4 096=50 331 648 个 SRAM,占用了大量的电路面积,不利于微

显示器应用.采用超像素驱动电路实现 4K 分辨率时,一个 SRAM 锁存一个超像素的数据,共需要 2 048 × 3 × 2 048 × 2=25 165 824 个 SRAM,数量减少为传统像素驱动电路的 50%,使得电路面积开销大幅减少.

超像素驱动电路如图 7 所示.开关管 M5、M6 和反相器 M1&M2、M3&M4 构成 SRAM(S0)锁存电路,其控制 Frame0 的单个超像素单元(由 CP0_1~3、CP4 这 4 个子像素构成);开关管 M15、M16 和反相器 M11&M12、M13&M14 构成 SRAM(S1)锁存电路,其控制 Frame1 的单个超像素单元(由 CP1_1~3、CP4 这 4 个子像素构成).S0 和 S1 用作数据保持,以确保超像素单元在下一次扫描数据写入之前,输出数据保持不变.M7~M10、M17~M20 为恒流源晶体管,导通时工作于饱和区,产生稳定的电流用于驱动 OLED,驱动电流满足式(3),其中 μ_p 为空穴迁移率, C_{ox} 为单位面积栅氧电容, W/L 为驱动管宽长比, V_{gs} 为驱动管工作在饱和区的栅源电压, V_{th} 为驱动管阈值电压.为了使超像素单元的 4 个子像素具有相同的像素信息,恒流源晶体管宽长比须相同,取 1.8/0.5 μm . M7~M9 驱动子像素 CP0_1~3, M17~M19 驱动子像素 CP1_1~3, CP4 为 Frame0 和 Frame1 的公共像素点,由 M10 和 M20 共同驱动.

$$I_{\text{OLED}} = I_{\text{DS}} = \frac{1}{2} \mu_p C_{\text{ox}} \frac{W}{L} (V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})^2 \quad (3)$$

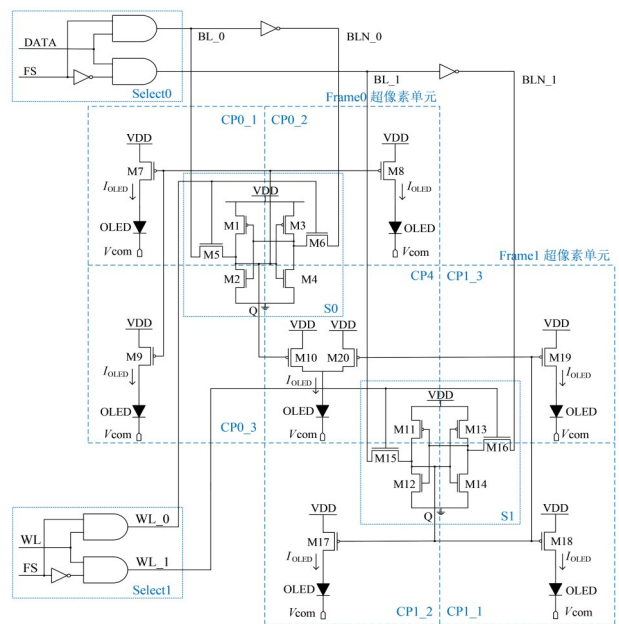
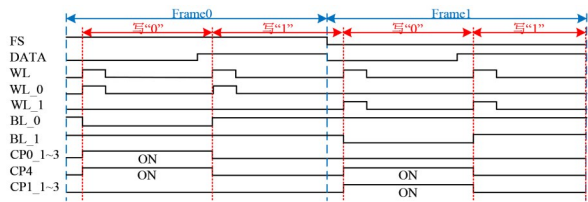


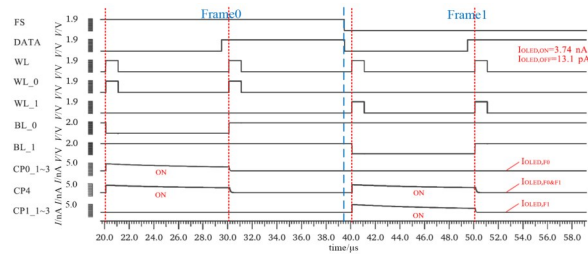
图7 超像素驱动电路图

图 8(a)是超像素驱动电路工作时序图.帧选择信号 FS 为高电平时,Frame0 有效,输入数据信号 DATA 通过 select0 模块输出 Frame0 列信号 BL_0,行扫描信号 WL 通过 select1 模块输出 Frame0 行信号 WL_0;FS 为低电平时,Frame1 有效,DATA 通过 select0 模块输出

Frame1 列信号 BL₁, 行扫描信号 WL 通过 select1 模块输出 Frame1 的行信号 WL₁. 当 WL₀ 处于高电平时, M5 和 M6 开启, S0 写入 BL₀ 像素数据, 像素数据为“0”时, M7~M10 饱和导通, OLED 上有电流流过, Frame0 超像素单元 (CP0_{1~3}, CP4) 发光; 当 WL₁ 处于高电平时, M15 和 M16 开启, BL₁ 上像素数据写入 S1, 像素数据为“0”时, M17~M20 饱和导通, Frame1 超像素单元 (CP1_{1~3}, CP4) 发光. 超像素驱动电路仿真如图 8(b) 所示, OLED 驱动电流约为 3.74 nA, 该仿真结果验证了超像素驱动电路时序设计的正确性.



(a) 时序



(b) 电路仿真结果

图8 超像素驱动电路时序和仿真结果

利用子场扫描法^[24,25]实现超像素驱动电路256级灰度, 其中子场的划分按照比特位进行, 即比特位权值与子场发光脉冲时间相对应, 不同比特位权值组合可产生不同灰度级. 设比特权值 N 为基准子场, 显示时间为 T_N , 则比特权值 n 的显示时间 $t_{SF}(n) = T \times 2^{n-N}$, 这里取 $N=4$ 即 Bit4 为基准子场进行扫描, 结构如图 9 所示.



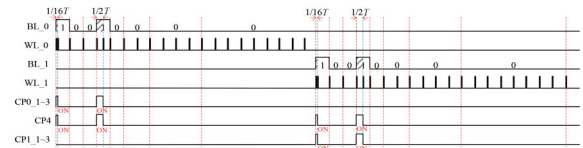
图9 256级灰度19子场扫描结构

Bit7~Bit0 分别对应 19 个子场的发光脉冲时间比为 8:4:2:1:1/2:1/4:1/8:1/16, 当帧频取 120 Hz, 扫描周期 $T = 8.33 \text{ ms}$ 时, $T_N = 438.6 \mu\text{s}$, $t_{SF}(0) \sim t_{SF}(4) = T_N = 438.6 \mu\text{s}$, $t_{SF}(5) = 2T_N = 877.2 \mu\text{s}$, $t_{SF}(6) = 2^2 T_N = 1754.4 \mu\text{s}$, $t_{SF}(7) = 2^3 T_N = 3508.8 \mu\text{s}$, 总显示时间 T 如式 (4) 所示:

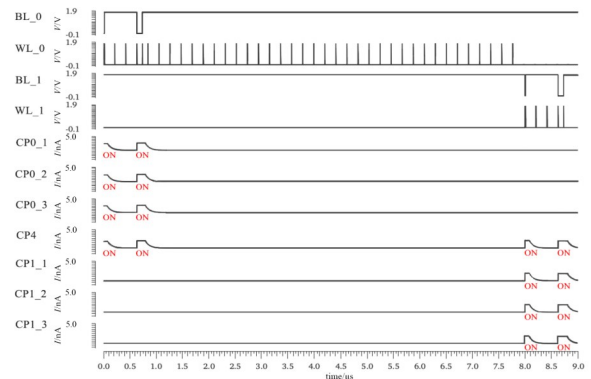
$$\begin{aligned} T &= t_{SF}(0) + t_{SF}(1) + t_{SF}(2) + t_{SF}(3) \\ &\quad + t_{SF}(4) + t_{SF}(5) + t_{SF}(6) + t_{SF}(7) \quad (4) \\ &= 19T_N = 8.33 \text{ ms} \end{aligned}$$

采用 19 子场法实现不同灰阶时, 一帧时间内, 微显示器中所有超像素单元需要被扫描 19 次, 超像素单元在每个子场时间内的亮、暗仅取决于每次扫描写入锁存器的像素数据, 根据超像素单元在 19 个子场内点亮时间和的不同, 可实现整个显示屏各个像素的不同灰度. 每个子帧数据扫描过程中, 超像素数据写入需要一定时间, 为了确保数据正确写入, 写入时间必须小于最小子帧时间 $438.6 \mu\text{s}$, 超像素阵列共 $4096/2 = 2048$ 行, 因此行扫描周期应小于 $438.6 \mu\text{s} / 2048 = 0.21 \mu\text{s}$, 本文取行扫描周期最大值即 $0.21 \mu\text{s}$. 列信号脉冲宽度应远大于行信号脉冲宽度, 以确保行开启时列信号能正确写入并锁存, 且在对应子场时间内像素状态不随列信号改变而改变.

以灰阶 9 为例, 实现灰阶 9 时, OLED 在第 1、第 4 子场处于开启状态, 其余子场均关闭, 将 8 bit 数据信号“00001001”按对应子场发光时间比 19 次写入超像素电路, 由于超像素电路实际显示效果是 Frame0 和 Frame1 叠加的显示效果, 所以需使 Frame0 和 Frame1 都实现灰阶 9. 图 10(a) 和 (b) 分别是两帧实现灰阶 9 时的时序和仿真结果, OLED 发光电流约为 $I_{CP0_1-3} = I_{CP4} = I_{CP1_1-3} = 3.74 \text{ nA}$, 与图 8(b) 中 OLED 发光电流一致, 该仿真结果进一步验证了超像素驱动电路时序正确性.



(a) 时序



(b) 电路仿真结果

图10 实现灰阶9时的时序和仿真结果

3.3 行、列驱动电路

传统行、列驱动电路中一个行信号或列信号只控制一行或一列的像素单元, 实现 4K 分辨率时, 需要 4096 行、4096 × 3 列, 列驱动电路每秒传输数据量为

4 096 × 3 × 4 096 × 8 bit × 60 Hz=24.16 Gbit/s. 而超像素驱动电路的行、列驱动电路利用超像素相邻子像素具有相同像素数据的特点,可实现一个行信号或列信号同时控制两行或两列的子像素,即一行或一列的超像素. 实现 4K 分辨率时,超像素驱动仅需 2 048 行、2 048 × 3 列,列驱动电路每秒传输数据量为[4 096 × (3) × 4 096 × 8 bit × 120 Hz]/4=12.08 Gbit/s,这使得在实现相同分辨率时,超像素的行、列驱动电路面积及每秒传输数据量都减少为传统驱动电路的 50%.

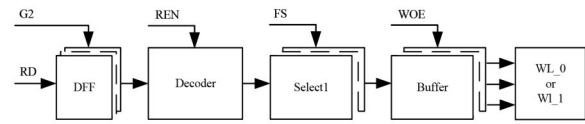
超像素行驱动电路结构如图 11(a)所示,作用是开启对应行的超像素阵列,将列驱动电路中存储的像素数据写入锁存器中. 其主要分为 4 级:(1)行数据锁存阵列(DFE array),由 DFF 组成,作用是在使能信号 G2 有效时锁存行地址信号 RD;(2)行译码模块(Decoder),由译码器构成,当译码使能信号 REN 有效时,译码行地址信号并输出译码结果至帧选择模块;(3)帧选择模块(Select1),由与门和反相器构成,通过 FS 信号高低电平切换,进行 Frame0 和 Frame1 行信号的选择;(4)缓冲输出模块(Buffer),缓冲器使能信号 WOE 有效时,行地址信号 WL₀ 或 WL₁ 通过缓冲器输出至超像素驱动电路.

列驱动电路的功能是提供超像素阵列所需像素数据 Data,结构如图 11(b)所示,其总共分为 5 级:(1)列串行移位使能电路,在串行时钟 SCLK 的作用下,通过移位寄存电路(Shift_register)将使能信号 Col_start 加载到数据串行寄存电路;(2)数据串行寄存电路(EDFF array),由移位寄存器(EDFF)构成,EDFF 采用级联的方式将串行数据 Data 转换为并行数据并输出;(3)数据锁存电路(DFF array),接收 EDFF array 输出端数据,在锁存使能信号 G1 有效时将数据稳定保存在 DFF 中;(4)帧选择电路(Select0),通过 FS 信号切换高低电平,选择输出 Frame0 或 Frame1 的列数据信号;(5)列缓冲电路(COL Buffer),用于增加列电路的驱动能力,每个缓冲器输出两个相反的信号 BL₀&BLN₀(Frame0)或 BL₁&BLN₁(Frame1).

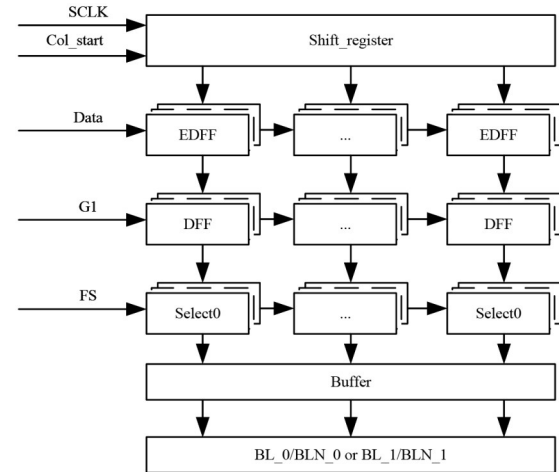
4 结果分析与验证

电路设计采用 SMIC 0.18 μm 1.8 V/5 V CMOS 工艺,设计工具采用 Cadence 平台. 驱动方式采用超像素驱动策略,实现 256 级灰度,120 Hz 帧频,4K 屏幕分辨率,部分微显示器驱动电路版图及像素版图如图 12 所示,其中单个超像素尺寸为 3.8(×3) μm × 11.4 μm.

实现 256 级灰阶时,OLED 驱动电流大小是恒定的,但是不同的灰阶,由于输入的数字信号不同,电流流过 OLED 的时间不同,所以一帧时间内流过 OLED 的平均电流大小也是不同的. 该电流用 $I_{\text{OLED,avg}}$ 表示,其大小可通过恒定电流大小与其驱动时间占空比乘积得到. 表 3



(a) 行驱动电路结构图



(b) 列驱动电路结构图

图 11 超像素行、列驱动电路结构图

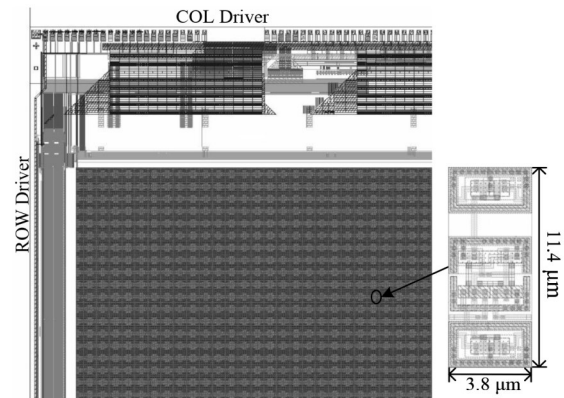


图 12 超像素驱动电路部分版图

列出了超像素驱动电路实现 256 级灰度时,部分灰度级对应的 OLED 平均驱动电流 $I_{\text{OLED,avg}}$ 和亮度 L_{OLED} (表中数据均在 $V_{\text{com}}=-6 \text{ V}$, $V_{\text{DD}}=1.8 \text{ V}$ 的条件下测得). 由表 3 可得,该微显示器 $I_{\text{OLED,avg}}$ 范围为 13.1 pA~3.74 nA,对应的 L_{OLED} 范围为 0~357.23 cd/m²,其亮度基本满足微显示器近眼显示要求.

微显示器现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)验证平台如图 13(a)所示,利用该验证平台分别显示超像素驱动图像与原始图像,并进行对比. 图 13(b)中左图是未经超像素处理的原始图像,右图是经处理后的超像素图像,此时人眼几乎无法观测出两幅图像的区别. 故使用光学目镜进一步观测,在光学目镜下,超像素图像相较于原图仅有轻微压缩

表3 实现256级灰度时部分灰度级对应的 $I_{\text{OLED,avg}}$ 及 L_{OLED}

| Gray scale | $I_{\text{OLED,avg}}/\text{nA}$ | $L_{\text{OLED}}/(\text{cd}/\text{m}^2)$ |
|------------|---------------------------------|--|
| 0 | 0.00 | 0.00 |
| 35 | 0.51 | 3.60 |
| 55 | 0.81 | 11.71 |
| 75 | 1.10 | 23.77 |
| 95 | 1.39 | 42.45 |
| 115 | 1.69 | 58.99 |
| 135 | 1.98 | 83.19 |
| 155 | 2.27 | 120.64 |
| 175 | 2.57 | 157.27 |
| 195 | 2.86 | 200.52 |
| 215 | 3.15 | 256.57 |
| 235 | 3.45 | 300.62 |
| 255 | 3.74 | 357.23 |

痕迹.

表4对比了目前较新的两种高分辨率OLED_oS微显示器性能参数.分析表中数据可得,超像素数字驱动

表4 OLED_oS微显示器参数对比

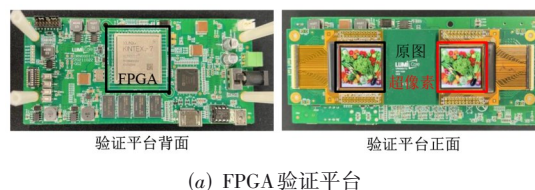
| 来源 | 文献[26] | 文献[27] | 本文 |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 显示分辨率 | 2 048 × RGB × 2 048 | 2 048 × RGB × 2 048 | 4 096 × RGB × 4 096 |
| 传输带宽/(Gbit/s) | 12.08 | 12.08 | 12.08 |
| 单个像素尺寸/ μm | 8.64 × 8.64 | 9.3 × 9.3 | 5.7 × 5.7 |
| 微显示器尺寸 | 0.99" | 1.07" | 1.3" |
| 最高帧频/Hz | 120 | 120 | 120 |

5 结论

基于超像素技术,提出了一种提高彩色OLED_oS微显示器显示分辨率的数字驱动策略,并对比了该策略和双线性插值、双三次插值策略的显示质量.经仿真验证,超像素处理后的图片显示质量最佳,与原始图像结构相似性高达0.929 1.为解决超像素驱动策略中图像部分信息丢失问题,引入平滑滤波对其进行优化.仿真结果表明,添加平滑滤波后超像素图像显示质量明显提升,其PSNR和SSIM均值分别提升至31.527 2 dB和0.972 8.设计了一种适配于超像素数字驱动策略的彩色OLED_oS微显示器驱动电路,该驱动电路可实现4K显示分辨率和256级灰度.并且在120 Hz帧频下,显示相同图像时,其每秒数据传输量仅为传统驱动策略的50%,OLED平均驱动电流为13.1 pA~3.74 nA,对应的像素亮度范围为0~357.23 cd/m^2 ,该范围基本满足近眼显示需求.

参考文献

- [1] 季渊,张凯文,陈文栋,等.数字驱动型OLED的动态假轮廓量化及改善策略[J].光子学报,2021,50(9):207-214.
JI Y, ZHANG K W, CHEN W D, et al. Dynamic false con-



(a) FPGA验证平台



(b) 原图(左)与超像素图像(右)在微显示器上的对比

图13 基于fpga的超像素图像与原图显示效果对比

OLED_oS微显示器的单个像素尺寸最小,在帧频和传输带宽相同的条件下,其显示分辨率是文献[26]和文献[27]的两倍.换言之,当利用表中3种OLED_oS微显示器显示同一张图片时,超像素数字驱动OLED_oS微显示器传输带宽仅为其余两种技术的50%.

tour quantification and improvement strategy of digital driven OLED[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9): 207-214. (in Chinese)

- [2] HAAS G. Microdisplays for wearable augmented reality - OLED vs LED based systems (invited)[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 713-716.
- [3] DUAN L F, WANG G H, DUAN Y, et al. Design simulation and preparation of white OLED microdisplay based on micro-cavity structure optimization[J]. Journal of Spectroscopy, 2021, 2021: 5529644.
- [4] ASAKI R, YOKOYAMA S, KITAGAWA H, et al. 18.1: A 0.23-in. high-resolution OLED microdisplay for wearable displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2014, 45(1): 219-222.
- [5] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, et al. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: Present status and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 105.
- [6] 季渊,余云森,高钦,等.基于人眼视觉特性的硅基OLED微显示器系统[J].光子学报,2019,48(4):57-64.
JI Y, YU Y S, GAO Q, et al. System of OLED-on-silicon micro display based on visual perception of human eye[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 57-64. (in Chinese)

- [7] 季渊, 龚淑萍, 穆廷洲, 等. 基于亮度衰减模型的硅基 OLED 微显示器寿命研究[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1923003.
JI Y, GONG S P, MU T Z, et al. Lifetime of OLED-on-silicon microdisplay based on luminance decay model[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1923003. (in Chinese)
- [8] KANG C M, LEE H. Recent progress of organic light-emitting diode microdisplays for augmented reality/virtual reality applications[J]. Journal of Information Display, 2022, 23(1): 19-32.
- [9] KHAYRULLIN I I, WACYK I, ALI T A, et al. 18.5: Late-news paper: WUXGA resolution 3D stereoscopic head mounted full color AMOLED microdisplay[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2012, 43(1): 244-247.
- [10] WACYK I, PRACHE O, GHOSH A. Ultra-high resolution AMOLED[C]//Proceedings Volume 8042, Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics V; and Enhanced and Synthetic Vision 2011. Orlando: SPIE, 2011: 886520.
- [11] 范丽亚, 马介渊. 2019 年虚拟现实热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 158-169.
FAN L Y, MA J Y. Review on hotspots of virtual reality in 2019[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(1): 158-169. (in Chinese)
- [12] LUMI. Lumicore Microelectronics OLED[EB/OL]. (2023-04-09)[2023-04-24]. <http://www.lumicore.com>.
- [13] 季渊, 许怡晴, 陈宝良, 等. 硅基微显示器发展现状与研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011007.
JI Y, XU Y Q, CHEN B L, et al. Development and research progress of silicon-based microdisplays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011007. (in Chinese)
- [14] FUJII T, KON C, MOTOYAMA Y, et al. 4032ppi high-resolution OLED microdisplay[J]. Journal of the Society for Information Display, 2018, 26(3): 178-186.
- [15] WEI W, YUAN X L. A time-split simulation method for dynamic false contours of motion images in color plasma display panel[C]//2010 WASE International Conference on Information Engineering. Piscataway: IEEE, 2010: 145-148.
- [16] HURTIK P, MADRID N. Bilinear interpolation over fuzzified images: Enlargement[C]//2015 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). Piscataway: IEEE, 2015: 1-8.
- [17] KEYS R. Cubic convolution interpolation for digital image processing[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1981, 29(6): 1153-1160.
- [18] 吴靖, 叶晓晶, 黄峰, 等. 基于深度学习的单帧图像超分辨率重建综述[J]. 电子学报, 2022, 50(9): 2265-2294.
WU J, YE X J, HUANG F, et al. A review of single image super-resolution reconstruction based on deep learning[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(9): 2265-2294. (in Chinese)
- [19] SETIADI D R I M. PSNR vs SSIM: Imperceptibility quality assessment for image steganography[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(6): 8423-8444.
- [20] JAVAHERI A, BRITES C, PEREIRA F, et al. Improving psnr-based quality metrics performance for point cloud geometry[C]//2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Piscataway: IEEE, 2020: 3438-3442.
- [21] BHATT R, NAIK N, SUBRAMANIAN V K. SSIM compliant modeling framework with denoising and deblurring applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 2611-2626.
- [22] SHEIKH H R, WANG Z, CORMACK L. LIVE image quality assessment database release 2[EB/OL]. (2006-11-01)[2023-04-27]. <http://live.ece.utexas.edu/research/Quality/subjective.htm>.
- [23] 陈弈星, 夏军. 硅基微显示芯片综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011006.
CHEN Y X, XIA J. Review on silicon-based microdisplay chips[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011006. (in Chinese)
- [24] XU B L, ZHUANG Y Q. Sub-field sequence optimization for plasma displays based on weight-modulated sub-field histogram[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, 51(4): 1248-1252.
- [25] 沈文心, 冉峰, 郭爱英, 等. 高灰阶硅基 OLED 微显示器的递归扫描算法[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2020, 26(4): 527-537.
SHEN W X, RAN F, GUO A Y, et al. Recursive scanning algorithm for high-gray micro OLED display on silicon[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2020, 26(4): 527-537. (in Chinese)
- [26] KOPIN. Lightning 2K AMOLED[EB/OL]. (2023-04-09)[2023-04-27]. <https://www.kopin.com/oled/>.
- [27] eMagin. 2K×2K OLED-XL Microdisplay[EB/OL]. (2023-04-09)[2023-04-27]. <https://emagin.com/products/>.

作者简介



王欣睿 女, 1998 年出生, 新疆巴州库尔勒人. 上海大学博士研究生. 主要研究方向为有机发光微显示器、微电子与集成电路设计.

E-mail: wangxinrui528@shu.edu.cn



季渊 男, 1980 年出生, 上海人. 上海大学副教授、博士生导师. 主要研究方向为有机发光微显示器、微电子与集成电路设计、多媒体嵌入式处理器与片上系统.

E-mail: jiyuan@shu.edu.cn