

文章编号: 1007-2780(2026)03-0363-10

硅基 OLED 微显示双模融合扫描算法

刘兴艳¹, 季 渊^{1,2*}, 张 引¹, 黄忻杰²

(1. 上海大学 微电子研究与开发中心, 上海 200444;

2. 昀光微电子(上海)有限公司, 上海 200072)

摘要: 针对硅基 OLED 微显示器数字驱动中的低灰阶非线性、灰度翻转及精度不足等问题, 本文提出双模融合扫描 (DMFS) 算法, 该算法将子帧分为高位子帧 (HBSF) 和低位子帧 (LBSF)。HBSF 采用逐行发光 (PE) 模式以保证发光效率, LBSF 采用同步发光 (SE) 模式以实现精细亮度调控并进行线性度矫正。在 $2560 \times 2560 \times 3@90$ Hz 全彩微显示器上的实验表明, DMFS 显著提高了灰度线性度, 灰阶翻转点减少了 13 872 个, DMFS-4 和 DMFS-6 的亮度误差均方根较 25 子场法分别降低了 96.63% 和 99.31%, 且可实现最小亮度精度为 0.076 cd/m^2 , 将 gamma 有效映射覆盖区间拓展至 253 灰阶。DMFS 有效提升了显示线性度和灰阶精度, 改善了图像细节表现与人眼视觉体验, 为近眼显示设备的高精度数字驱动提供了可行方案。

关键词: 硅基 OLED 微显示器; 双模融合扫描; 灰度线性度; 低灰阶精度

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2025-0237 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2025-0237

Dual-mode fusion scanning algorithm for OLED-on-silicon microdisplay

LIU Xingyan¹, JI Yuan^{1,2*}, ZHANG Yin¹, HUANG Xinjie²

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

2. LumiCore Microelectronics (Shanghai) Co. Ltd., Shanghai 200072, China)

Abstract: To solve the problems of low greyscale nonlinearity, greyscale inversion and low precision in the digital driving of OLED-on-silicon microdisplay, a dual-mode fusion scanning (DMFS) algorithm is proposed in this paper. The sub-frames are divided into high bit subframe (HBSF) and low bit subframe (LBSF), in which HBSF adopts progressive luminescence (PE) mode to ensure luminous efficiency, while LBSF adopts synchronous luminescence (SE) mode to achieve fine brightness regulation and linearity correction. Experiments on a $2560 \times 2560 \times 3@90$ Hz full-color microdisplay show that DMFS significantly improves greyscale linearity, reduces greyscale inversion points of 13 872, and reduces the root mean square of luminance error of DMFS-4 and DMFS-6 by 96.63% and 99.31% compared with the 25-subfield method. Furthermore, DMFS can achieve a minimum brightness accuracy of 0.076 cd/m^2 and expand the effective mapping coverage range of gamma to 253 greyscale. The DMFS algorithm achieves significant advancements

收稿日期: 2025-11-20; 修订日期: 2026-02-13.

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61774101)

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

*通信联系人, E-mail: jiyuan@shu.edu.cn

in display linearity and greyscale precision, effectively enhancing image detail performance and immersive visual experience, providing a feasible solution for high-precision digital driving in near-eye display devices.

Key words: OLED-on-silicon microdisplay; dual-mode fusion scanning; greyscale linearity; low greyscale accuracy

1 引言

近年来,虚拟现实(Virtual Reality, VR)与增强现实(Augmented Reality, AR)技术广泛应用于医疗、军事和教育领域,并逐步向消费电子行业拓展。作为VR/AR沉浸式体验的硬件载体,近眼显示设备正从二维信息呈现向三维视觉感知演进,对显示器提出了更为严苛的要求^[1]。硅基有机发光二极管(OLED)、硅基液晶、微发光二极管以及微量子点发光二极管等技术持续发展,拓展着近眼显示的技术边界^[2]。在众多显示技术中,硅基OLED微显示技术以其高分辨率、高对比度、快响应速度及高能效等核心优势脱颖而出,成为实现下一代近眼显示的关键技术方案^[3]。

硅基OLED微显示器的灰度实现分为模拟驱动和数字驱动两种方式^[4]。模拟驱动通过电压幅值调制灰度,受模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)分辨率的限制,灰度等级低于40时难以实现高精度灰度控制。数字驱动方式采用脉宽调制精确控制OLED像素发光时长来实现灰度级,具有较好的灰度特性与更低的功耗,是当前高端VR/AR设备的核心技术。然而,现有数字驱动方法如直接扫描场、原子扫描法和子场法等^[5],存在量化精度不足以及灰阶非线性问题,严重影响图像质量^[6-7]。季渊等提出基于人眼恰可觉差的区域梯度调光算法^[8],通过凝视点自适应亮度压缩在提高视觉体验的同时优化系统能效,但其亮度平滑度与连续性高度依赖驱动灰阶的精度与线性度。为提高灰阶线性度,Zhou等提出一种多元线性扫描算法^[9],将人眼在不同灰度级下的灵敏度参数加入到随机灰度映射函数中进行优化搜索,对灰度权重进行修正,降低灰度映射函数的非线性失真。陈宝良等提出一种场堆叠调制算法^[10],构建时间-幅值参数空间,通过遗传算法对扫描参数优化,改善灰度翻转现象。但这些方法仍未能解决低灰阶区域的精度劣化问题。

考虑到人眼对低灰阶亮度变化更为敏感,且

gamma校正对低灰精度要求更高^[11],低灰阶线性度的提升尤为关键。为此,本文提出双模融合扫描(Dual Mode Fusion Scan, DMFS)算法,旨在提高灰度线性度,特别是在低灰阶区域提升校准精度,改善图像暗场的细节表现。详细阐述了DMFS的扫描算法原理与硬件架构,并在基于SMIC 0.18 μm 工艺制造的 $2\,560 \times 2\,560 \times 3@90\text{ Hz}$ 全彩硅基OLED微显示器上开展实验。结果表明,DMFS能有效优化灰阶表现,为高精度数字驱动提供了可行路径。

2 硅基OLED数字灰度调控技术

硅基OLED微显示数字驱动通过控制像素在时间维度上的发光状态来生成灰度等级, n 位灰度位宽理论上可实现的灰度等级为 2^n ,第 i 级灰度的亮度可表示为:

$$L = \sum_{i=1}^n W_i \times b_i \times I_{\max}, b_i \in \{0, 1\}, \quad (1)$$

其中: W_i 为第 i 子帧的权值; b_i 表示第 i 位的二进制值,0表示像素“关闭”,1表示像素“打开”; $I_{\max}$ 为像素最大发光强度。

灰度生成的质量不仅取决于位宽和子帧权重的分配,还与子帧发光模式密切相关。根据数据编程与发光过程的时序组织方式,数字灰度发光模式分为逐行发光(Progressive Emission, PE)和同步发光(Simultaneous Emission, SE)^[12]。PE模式与SE模式时序安排的差异,直接影响了子帧权值精度、发光效率以及灰度的线性表现。

2.1 PE发光模式

PE模式是数字驱动硅基微显示器的一种常用扫描方式。在完成一行的数据编程后,像素电路立即进入发光阶段,当达到预定的权值时间后,执行清行操作以关断像素,如图1所示。PE模式相邻行的发光时段与数据写入操作在时间上重叠,提高了发光时间的占空比,具有较高的发光效率。

PE模式子帧的权值精度由数据写入到清除

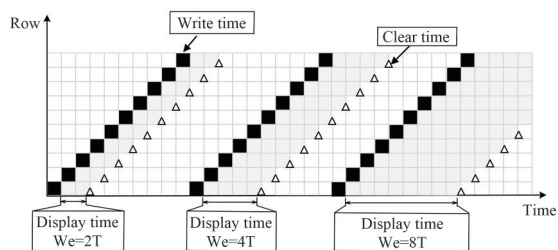


图1 PE模式原理图

Fig. 1 Block diagram of PE mode

的时间间隔控制,理论上可实现的最小亮度精度为1行显示时间的亮度。一行的显示时间可表示为:

$$T_{pe_min} = \frac{1}{N_{SF} \times N_{row} \times F_{refresh}}. \quad (2)$$

PE模式的理论精度由子帧数量 N_{SF} 、行数 N_{row} 和刷新率 $F_{refresh}$ 共同决定,然而,这些参数在设计中相互制约,取值确定后,系统的 T_{pe_min} 也随之确定,低于 T_{pe_min} 的子帧权重无法实现,从而限制了灰度调制的最低亮度精度。

2.2 SE发光模式

与PE模式的逐行扫描逐行发光不同,SE模式在完成所有行的数据编程后再同步显示,数据写入周期和发光周期分离。SE模式利用 V_{oled} 与 V_{com} 的压差,控制像素电路的关闭与显示,如图2所示。写入阶段压差低于阈值,像素关闭;写入完成后施加脉冲,压差超过阈值,像素点亮。脉冲宽度对应位平面权值。

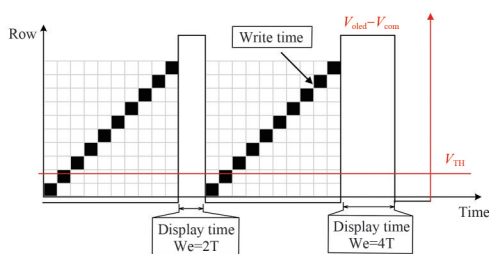


图2 SE模式原理图

Fig. 2 Block diagram of SE mode

SE模式的权值时间可由高频外部时钟独立、灵活地进行配置,理论上可实现最小权值时间 T_{se_min} 为1个CLK, $T_{se_min} \ll T_{pe_min}$,从而细化了亮度精度,降低亮度颗粒度。但是由于驱动电路写入时间较长,SE模式发光效率较低,为了保障足够的发光亮度,最大可实现帧率会受到限制,不利于高动态范围或高刷新率应用。

3 双模融合扫描算法

3.1 DMFS算法工作原理

数字灰度调控通过调制时间长度产生灰度,并用SRAM作为像素电路的存储单元,存储“1”、“0”两种数字逻辑状态。由于OLED存在寄生电容,在像素电路开关瞬间会产生过充电流,引入额外的亮度误差 L_{extra} ,导致实际发光强度高于理论值,从而抬升了系统最低亮度精度,如图3所示。

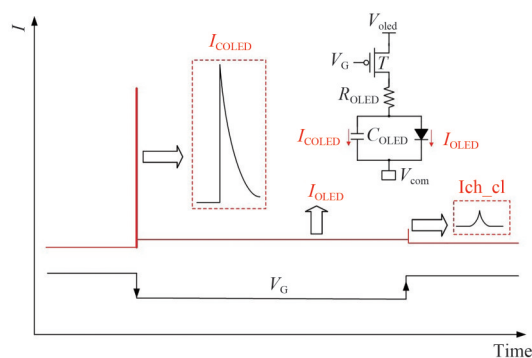


图3 OLED电流仿真图

Fig. 3 OLED current simulation diagram

采用PE模式进行驱动, T_{pe_min} 所确定的最低亮度精度决定了系统可实现的理论最低灰阶,若该值偏高,在低灰阶区域内将出现多个相邻灰阶被映射至同一亮度区间的现象,导致这部分灰阶无法获得有效的gamma校正值,压缩实际可区分的灰阶数量。同时,该误差在灰度叠加过程中会随子帧组合累积,出现多个低权值子场组合的亮度大于单个高权值子场亮度的情况,使得亮度灰阶曲线呈锯齿状非单调递增,严重影响图像的灰度还原质量。为了解决硅基OLED微显示在低灰阶区域的灰度缺失问题,增强暗场细节表现并提高灰度线性度,本文提出一种双模融合扫描算法,原理如图4所示。

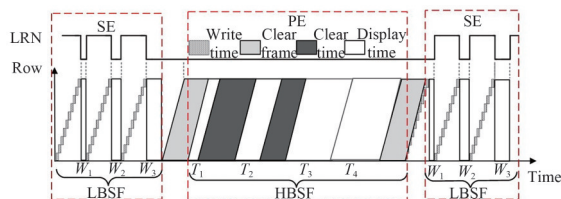


图4 DMFS原理图

Fig. 4 Block diagram of DMFS algorithm

对于一帧的显示数据,DMFS算法将子帧拆分为高比特子帧(High Bit Subframe, HBSF)和低比特子帧(Ligh Bit Subframe, LBSF)。LBSF采用SE模式进行扫描显示,子帧权值用 W 表示。LBSF各比特位对应的 W 随位序单调递增,该权值并非传统二进制量化的固定幂次关系,而是基于实际光学测量反馈的亮度偏差进行动态校准优化所得,在低灰阶区间提供高精度的灰度控制,并为高位子帧提供精细的灰度亮度基准,修正系统非理想效应引起的理论亮度与实测亮度的系统性偏差。HBSF采用PE模式进行扫描显示,子帧权值用 T 表示, T 满足二进制权重关系,为显示提供足够的发光效率。图4中 T_1 、 T_2 对应的子帧表示小数子帧,权值时间小于基准子帧时间,由清行操作实现; T_3 、 T_4 对应的子帧表示整数子帧,子帧权值时间等于基准子帧时间。为保证灰度生成的连续性和平滑性,需对SE模式与PE模式的权值进行约束,即SE模式的最高位子帧权值 W_3 要小于PE模式的最低位子帧权值 T_1 。同时,在两种扫描模式切换节点,需引入独立的清行帧(Clear Frame),对全局像素电荷进行清零操作,消除前一子帧的电荷残留,并为后一子帧的行列数据加载与驱动时序初始化提供充足的时间裕量,保证模式切换过程中的显示稳定性与灰度精度。

3.2 DMFS算法亮度模型及性能分析

PE模式通过调制发光时间的长度从而产生不同的权值,不同子场权值在时间维度按照一定的顺序进行堆叠从而产生不同的灰度等级,考虑到显示过程中的非理想因素,PE模式的亮度模型为:

$$\begin{aligned} J(\text{PE}): (x, y, G(x, y)) &\rightarrow (F_n, V(F_n), T_i), \\ V(F_n) &= \begin{cases} b \times V_{\text{oled}}, & b = 1 \\ b \times V_{\text{oled}}, & b = 0 \end{cases}, \\ T_{\text{PE}} &= T_i \times 2^{F_i}, F_n \in [0, n-1], \\ L_{\text{PE}} &= L_{\text{OLED}} + L_{\text{extra}} = \\ &\sum_0^{F_n} (T_{\text{PE}}(F_n) f(V_{\text{oc}}(F_n)) + L_{\text{extra}}(F_n)), \end{aligned} \quad (3)$$

其中: F_n 是子场索引, T_i 是帧扫描的基准时间, b 表示比特位对应的二进制权值, T_{PE} 是有效发光时间,流过OLED的稳定发光电流由电函数 $f(V_{\text{oc}}(F_n))$ 描述, $V_{\text{oc}} = V_{\text{oled}} - V_{\text{com}}$ 。 L_{extra} 是帧周期内的亮度误差,主要由OLED寄生电容过充以及MOS开关的时钟馈通(Clock Feedthrough, CF)和电荷注入(Charge Injection, CI)产生的额外电流亮度构成。在0.18 μm 工艺节点的OLED微显示器件测试条

件下,CI与CF效应产生的瞬态电流 $I_{\text{ch,cl}}$ 约为fA级,与器件常规工作电流nA级相差6个数量级,因此CI和CF对亮度的贡献度可忽略,OLED等效电容是 L_{extra} 的主要来源:

$$L_{\text{extra}} = L_{\text{COLED}} + L_{\text{ch,cl}} = V_{\text{oc}} C_{\text{OLED}} \left(e^{-\frac{t_0}{\tau_{\text{RC}}}} - e^{-\frac{t_1}{\tau_{\text{RC}}}} \right), \quad (4)$$

式(4)中, t_0 为 C_{OLED} 两端电压化的时刻, t_1 为 L_{COLED} 下降至0的时刻。

从模型可以看出, L_{PE} 的实际值由 T_{PE} 所决定的稳态亮度和 L_{extra} 产生的瞬态亮度共同决定。为提升显示系统性能,使 L_{PE} 趋近于理论值,可以从两个方面进行优化:(1)缩短 T_{PE} ,提升系统在时间维度上的量化精度,减小由离散化驱动引入的固有误差;(2)减少开关频率,抑制开关操作产生的 L_{extra} 对亮度的破坏。SE模式子帧像素的编程阶段与发光阶段在时间上分离,这种结构为在发光阶段使用更高频率、更精细的脉冲宽度调制(PWM)子帧来精确控制 T_{SE} 创造了条件。在DMFS算法中,低灰阶的细节表现和线性度由SE模式子帧控制,SE模式子帧组合形成的亮度必须与理论目标亮度保持高度一致。我们定义SE模式子帧的权值向量为 $W_{\text{SE}} = [W_0, W_1 \dots W_{\text{MSE}-1}]^T$,其中每个元素都代表一个子帧的亮度权重。寻找一组最优的权值 T_{SE} ,使灰阶亮度接近目标亮度,最小化误差,即:

$$T_{\text{SE}} = \min_{W_{\text{SE}}} \sum_0^{2^n} (B^T W_{\text{SE}} - L_{\text{lb}}), \quad (5)$$

其中: B^T 是由低 2^{MSE} 个灰阶的二进制表示位构建的特征矩阵; L_{lb} 是目标亮度, $L_{\text{lb}} = \left(\frac{G}{256} \right)^{2.2}$, $0 < G < (2^{\text{MSE}} - 1)$ 。通过最小二乘法求解理论最优权值配置,解得权值为:

$$W_{\text{SE}} = (B^T B)^{-1} B^T L_{\text{lb}}. \quad (6)$$

在该权值下,SE模式子帧的亮度被精确控制,则SE模式的亮度模型表示为:

$$\begin{aligned} J(\text{SE}): (x, y, G(x, y)) &\rightarrow (F_n, V(F_n)), \\ V(F_n) &= \begin{cases} V_{\text{oled}}, & b = 1 \\ 0, & b = 0 \end{cases}, \\ L_{\text{SE}} &= \sum_0^{F_n} (W_{\text{SE}} f(V(F_n))). \end{aligned} \quad (7)$$

对于一个 N bit的显示系统,子帧数量为 M ,其中PE模式子帧数量为 M_{PE} ,SE模式子帧数量

为 M_{SE} ,且 $M_{PE}+M_{SE}=M$ 。结合以上公式,DMFS算法的亮度模型可表示为:

$$J(DMSF):(x,y,G(x,y))\rightarrow(F_n,(V(F_n),T_f),$$

$$V(F_n)=V_{oled}\times b_{F_n}, F_n\in[0,M-1],$$

$$T_{SEP}=\begin{cases} T_f\times 2^{F_n-F_{ab}}, & F_n\in[M_{SE},M-1] \\ \theta W, & F_n\in[0,M_{SE}-1] \end{cases},$$

$$L(g)=\sum_{M_{SE}-1}^{M-1}(T_{SEP}f(V(F_n))+L_{extra})+\sum_0^{M_{SE}-1}V(F_n)\times T_{SEP}, \quad (8)$$

式中, θ 是子帧的跳变系数,用于修正相邻子帧间的灰度反转。低灰阶时亮度非常小,可根据亮度测量结果对SE模式子帧的权值进行精调,提高亮度精度。

DMFS算法通过引入SE模式子帧对低灰阶精度和线性度进行修正。理论上, M_{SE} 越大,所能覆盖的灰阶越多,对低灰阶线性度的修正效果越好。然而,SE模式所需的全局数据写入操作增加了数据写入的时间,刷新率随 M_{SE} 增加而下降,理论刷新率可由公式(9)~(12)计算:

$$F=\frac{1}{T_{SE_total}+T_{PE_total}+T_{clear_total}}, \quad (9)$$

$$T_{SE_total}=T_{SE_write}+T_{SE_emiss}=\sum_{i=1}^{M_{SE}}(M_{SE}N_{row}T_{write}+W_{SE,i}T_{CLK}), \quad (10)$$

$$T_{PE_total}=\sum_{j=1}^{M_{PE}}(N_{row}(T_{write}+T_{emiss,PE,j})), \quad (11)$$

$$T_{clear_total}=N_{clear}N_{row}T_{write}, \quad (12)$$

式中: T_{CLK} 是SE模式子帧权值配置时钟, N_{clear} 是清行帧的数量, T_{write} 是一行数据的写入时间。DMFS算法中清行帧占用一个子帧的时间,会增加3.7%的时间开销。根据公式分析, M_{SE} 每增加一个,刷新率约降低2~4 Hz。PE模式25子场扫描法(SF-25)理论上可实现120 Hz刷新率。当 M_{SE} 为4时,DMFS刷新率上限为108 Hz;若 M_{SE} 为6,则DMFS刷新率进一步降至约102 Hz。SF-25是采用25子帧的PE模式灰度算法,即25子帧子场法。DMFS-4和DMFS-6是SE模式子帧的数量分别为4和6时的DMFS算法。发光效率是有效发光时间与总帧时间的比值,总帧时间随 M_{SE} 线性增加, M_{SE} 每增加一个,发光效率约下降2%~3%。SE子帧数对性能的影响如图5所示。因此,DMFS策略需通过动态调整 M_{SE} 与 M_{PE} 子帧数量,实现精度、效率与帧率的灵活权衡。综合性能评估显示, M_{SE} 取4~6可

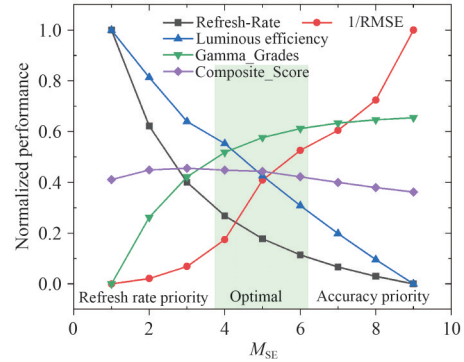


图5 DMFS算法中 M_{SE} 对性能的影响

Fig. 5 Impact of M_{SE} on performance in DMFS

获得较优的性能配置。子场法在0~16灰阶范围内存在最大的亮度偏离误差,4个SE模式子帧可以覆盖低16灰阶的亮度精度需求,因此,本设计中 M_{SE} 设定为4。

3.3 DMFS算法硬件电路实现与验证

DSFM通过扫描控制逻辑实现子帧的切换以及数据控制,扫描控制模块如图6所示。根据异步FIFO标志,时序控制产生扫描控制器的工作使能信号。该信号为高电平时,行时间计数器和子帧计数器开始计数,微显示器控制信号模块根据计数值结果输出控制信号。扫描控制模块的核心是一个有限状态机,该状态机可以根据当前配置参数,动态决定下一状态的显示模式,从而确保子帧能够按预设顺序和时序要求切换。扫描模式状态机模块根据寄存器配置建立扫描查找表(LUT),存放子帧权值和模式信息。当LUT控制器接收到子帧计数信号时,子帧计数器的当前值与扫描状态机中存储的LUT值进行比较。当子帧计数器值小于设定的SE模式子帧数时,扫描控制器输出SE模式数据和控制信号,子帧权值由 V_{oled} 权值计数($V_{oled} We cnt$)模块控制,扫描控制器产生并发送SE模式的控制信号和数据;反之,则子帧工作在PE模式,子帧权值由权值计数($We cnt$)模块控制。

在分辨率 $2560\times 2560\times 3@90$ Hz的全彩硅基OLED微显示器上完成DMFS算法的硬件系统验证,如图7(a)所示,主要包含数据输入处理模块、数据缓存模块、扫描控制模块以及寄存器配置模块。数据输入处理模块先对数据来源进行选择,随后将原始8 bit数据映射为14 bit高位深数据,并将灰度数据转换为25个子帧的PWM

数据,总数据位宽为 512 bit;帧缓存模块将处理后的数据按配置寄存器设定的场序缓存以及按照扫描逻辑进行数据读出;扫描控制模块生成时序控制信号,实现对子帧显示模式与权值的精确控制;时序控制信号与读出数据对齐后通过 18 路动态比较 LVDS 接收器传输到微显示器,

完成扫描显示^[13]。硅基 OLED 微显示器亮度测试系统如图 7(b)所示,亮度计型号为 KONICA MINOLTACA410,采用 RS232 接口与上位机软件通信。为了降低硅基 OLED 微显示器的亮度测试误差,将微显示器平均分成 9 个区域,分别测试对应区域内的亮度值,并取平均值作为最终结果。

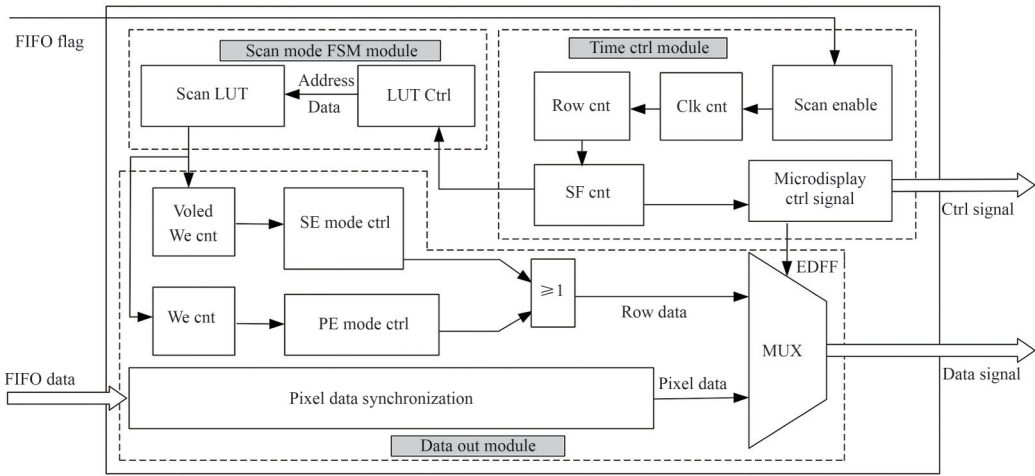


图 6 DMFS 扫描控制模块

Fig. 6 Scanning control module of the DMFS algorithm

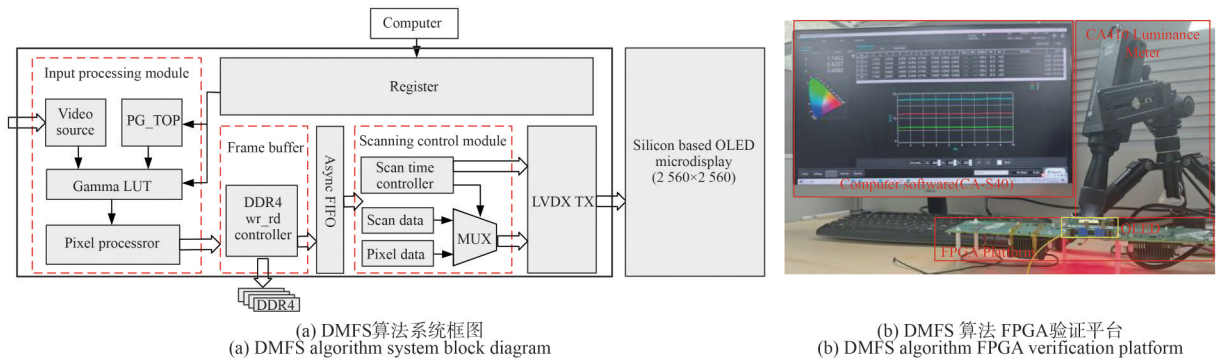


图 7 DMFS 算法电路原理图

Fig. 7 Schematic diagram of DMFS algorithm

DMFS 算法子帧权值确定以及亮度测试流程如图 8 所示,包含初始化、粗调和精调 3 个阶段。初始化阶段,设定系统的工作参数,确认屏幕亮度的最大值,并生成理论亮度。随后进入初调阶段,先由公式(4)和公式(5)确定的理论权值,获得初始权值信息,再由上位机配置子帧权重参数进行亮度逼近。当系统输出与理论向量误差收敛至 5% 后,锁定权值配置。最后执行伽马校正进行迭代优化,实现亮度残差的极小化,获得更高的亮度一致性,并记录最终数据。循环

操作该过程以确认最优值。

表 1 为 25 个子帧的配置信息,其中:0~3 子帧为 SE 模式子帧,其子帧权值表示时钟计数的个数;4~24 子帧为 PE 模式子帧,其子帧权值表示其显示行数; θ 是子帧的跳变系数。在 DMFS 算法中,需对子帧模式进行判断,产生正确的清行使能控制信号,使子帧按设定的模式进行显示。 $\text{clr_en} < 0 >$ 是帧内清行控制信号,控制 PE 模式小数子帧的清行, $\text{clr_en} < 1 >$ 是清行帧控制信号。

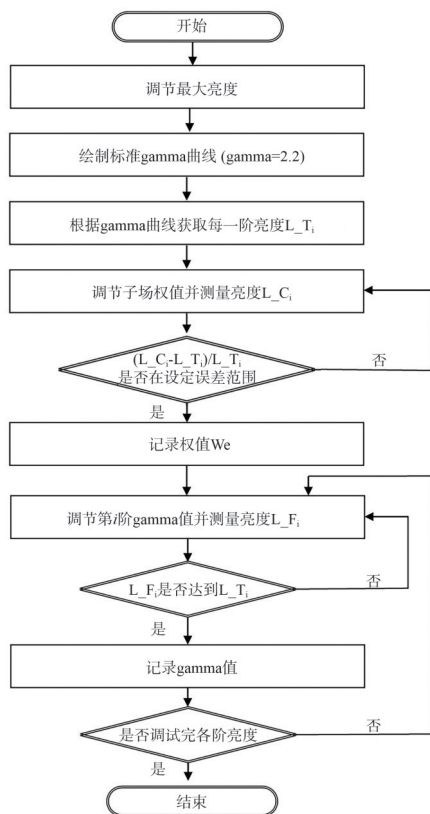


图8 亮度测试流程

Fig. 8 Flowchart of luminance measurement

表1 子帧权值及控制使能

Tab. 1 Subframe weight and control enable

子帧 顺序	子帧 类型	子帧 权值	时长/ μs	θ	clr_en <1>	clr_en <0>
0	SE	86	0.96	1.59	0	0
1	SE	99	1.1	1.54	0	0
2	SE	127	1.41	1.49	0	0
3	SE	178	1.98	1.44	1	0
4	PE	14	2.49	1.39	0	1
5	PE	32	5.69	1.34	0	1
6	PE	79	17.24	1.29	0	1
7	PE	197	35.02	1.24	0	1
8	PE	452	80.36	1.16	0	1
9	PE	1 143	203.2	1.14	0	1
10	PE	2 560	455.11	/	0	0
24	PE	2 560	455.11	/	1	1

4 结果分析与讨论

4.1 灰度线性度分析

本研究采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)与灰阶反转点的个数来评估灰度

线性度的优劣。灰阶反转点数为高灰阶亮度低于低灰阶亮度的点数, RMSE如公式(13)所示:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{i=1}^G (Lg_i - L\hat{g}_i)^2}, \quad (13)$$

式中: G 表示灰度级的数量, Lg 表示实际灰度级的亮度, $L\hat{g}$ 表示理想灰度级亮度。

将最终确认的参数输入寄存器配置上位机, 连接测试平台, 通过上位机将参数信息输入到现场可编程门阵列(FPGA)平台中, 使 OLED 的灰度从 0 到 16 383 显示, 同时, 利用亮度测量仪器对亮度进行测量, 记录 16 383 级灰度, 得到最终的 14 bit 灰阶曲线, 如图 9 所示。

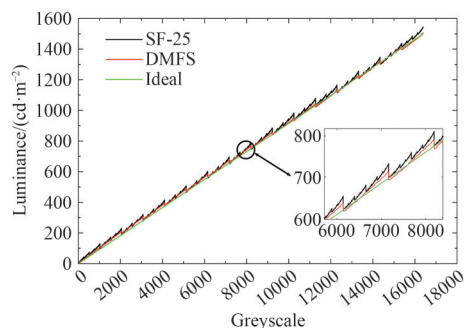


图9 14 bit 灰阶曲线

Fig. 9 14 bit greyscale curve

子场扫描方式实现 16 383 级灰度, 采用 14 个权值, 其中包含 4 个整数权值, 10 个小数权值, 所有小数权值的 L_{extra} 均参与到亮度的累积中, 最大灰度翻转出现在灰度 $n \times 2^{10}$ 与灰度 $n \times (2^{10} - 1)$ 之间, $n \in [1, 2^4]$; 最小灰度翻转出现在灰度 $n \times 2^2$ 与灰度 $n \times (2^2 - 1)$ 之间, 灰度翻转的差值随着灰度等级的增加而增加, $n \in [1, 2^{12}]$ 。DMFS 算法中引入 SE 模式子帧后, 小数权值数量依旧是 10, 最大灰度翻转仍然出现在灰度 $n \times 2^{10}$ 与灰度 $n \times (2^{10} - 1)$ 之间, 但是 SE 模式子帧可实现最小亮度精度为 0.076 cd/m^2 , 使得最大翻转点处的亮度误差降低, 最大灰度翻转点的亮度误差由 40.067 cd/m^2 降低至 13.698 cd/m^2 , 并且, 由于 SE 模式子帧不产生 L_{extra} , 最小灰度翻转出现在灰度 $n \times 2^6$ 与灰度 $n \times (2^6 - 1)$ 之间, $n \in [1, 2^8]$ 。灰阶翻转频次由每 4 灰阶翻转一次降低到每 64 灰阶翻转一次, 实际测得灰阶翻转点数减少了 13 872 个, 灰阶的 REMS 提升了 76.01%, 线性度显著改善。

4.2 gamma 校正结果

本研究采用位宽映射法进行 gamma 校正,即将低位宽灰阶数据扩展为高位宽数据,在高位灰阶中寻找低位灰阶的映射,灰阶映射公式为:

$$G_H = G_L^{2.2}, \tag{14}$$

式中, G_L 是低位宽灰阶曲线的灰度值, G_H 是其对应的高位宽曲线上的灰度值,在映射阶段,先根据公式(14)计算 G_L 的值,获得对应的 G_H 的灰度值,然后在高位灰阶中查找最接近的值即可。高位灰阶的线性度越高,查找所需要的时间越少,校正精度也就越高。最终校正的 gamma2.2 灰阶曲线如图 10 所示,在 256 个灰阶点上测量实测与理想 gamma2.2 灰阶曲线的 RMSE 为 2.086 cd/m²,拟合精度较高。

DMFS算法在提升亮度精度方面具有显著优势,且可通过优化 SE 子场数实现更优的误差控制,表 2 给出了 SE 模式子帧数量分别为 4(DMFS-4)和 6(DMFS-6)时的性能对比。相比于 SF-25,DMFS-4 和 DMFS-6 的 gamma2.2 校正灰阶 REMS 分别降低了 96.63% 和 99.31%,显著改善了低灰阶性能。

图 11 显示了 DMFS-4 与传统的 SF-25 算

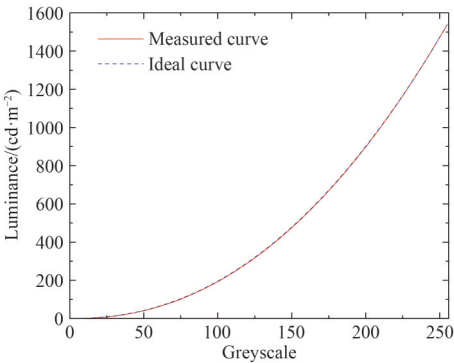


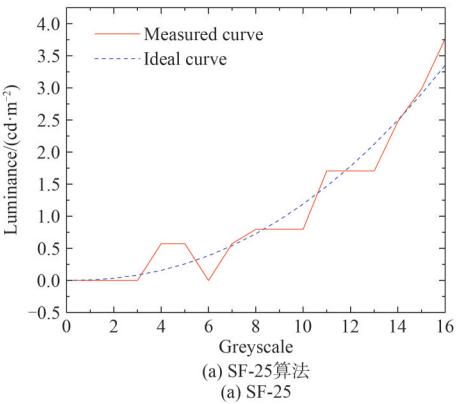
图 10 实测与理想 gamma2.2 灰阶曲线

Fig. 10 Actual gamma 2.2 curve and ideal gamma 2.2 curve

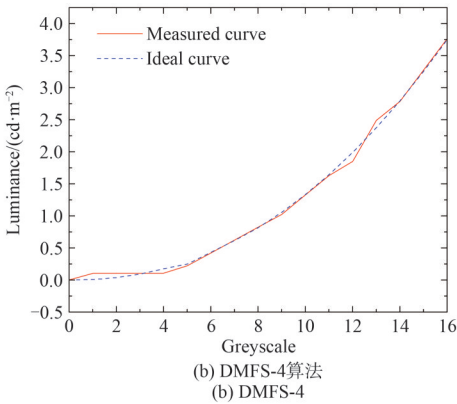
表 2 DMFS 与 SF-25 的性能比较

Tab. 2 Performance comparison of DMFS and SF-25

	SF-25	DMFS-4	DMFS-6
最低亮度/(cd·m ⁻²)	0.703	0.076	0.076
无效灰度数	14 891	1 019	943
低 16 灰 RMSE/(cd·m ⁻²)	0.253	0.088 6	0.059
14 bit RMSE/(cd·m ⁻²)	46.341	11.117	8.011
gamma2.2 RMSE/(cd·m ⁻²)	56.686	2.086	0.39
刷新率/Hz	60~120	60~108	60~102
发光效率/%	63.99	51.16	48.48



(a) SF-25算法
(a) SF-25



(b) DMFS-4算法
(b) DMFS-4



(c) SF-25低16灰阶实拍图
(c) Low 16 greyscale real shot of SF-25



(d) DMFS-4低16灰阶实拍图
(d) Low 16 greyscale real shot of DMFS-4

图 11 SF-25 和 DMFS-4 的低 16 灰阶对比图

Fig. 11 Comparison of low 16 greyscale between SF-25 and DMFS-4

法的低 16 灰阶区域曲线对比。SF-25 低 16 灰阶采样精度低,无法产生精细的灰度级,灰度区分度精度低,在灰阶图上产生明显的灰阶过渡不均匀、灰度翻转以及跳灰等情况。DMFS-4 低 16 灰阶的灰度线性度高,曲线的 RMSE 仅为 0.086 cd/m^2 ,映射后的灰阶曲线具有更高的拟合精度,灰阶区分度明显、校正的精度高。DMFS 可在 3~255 灰阶范围内实现精细的灰度级,相较于传统的模拟幅值调制及其他数字驱动方案,具有最优的细节还原能力。同时,DMFS 以 SRAM 存储单元为核心,仅通过增加模式切换状态机与子帧权值寄存器实现功能,在实现低灰阶优化的同时,避免了 DAC 或多路 V_{com} 等复杂设计(表 3),更符合对暗场细节要求高的 AR/VR 应用。

本研究验证了 DMFS 算法在 $2.5\text{K}@90\text{ Hz}$ 系统中的优越性。DMFS 算法利用 SE 模式子帧的可配置权值实现低灰阶精细调控,其精度由外接时钟频率决定,与全局刷新率无关,故其性能优势可扩展至更高刷新率场景。然而,在面向更高规格系统(如 $4\text{K}@120\text{ Hz}$)时,算法面临双重挑战:一方面,分辨率提升会显著增加 SE 模式的全局写入时间,制约刷新率;另一方面,提升 SE 子帧时钟频率虽可进一步优化低灰阶精度,但会引入电磁干扰(EMI)风险,对系统完整性设计提出更高要求。因此,未来设计需在系统层面进行权衡,通过多通道并行写入、分段同步发光等时序压缩策略缓解刷新率制约,并结合 EMI 抑制电路与低噪声时钟树设计,协同优化灰度精度、刷新率、功耗及可靠性。

表 3 不同扫描算法的性能比较
Tab. 3 Performance comparison of different scan algorithms

	DMFS-4	模拟幅值调制 ^[14]	场堆叠数字驱动 ^[10]	FSL ^[7]
灰阶级数	16 384	4 096	16 384	4 096
RMSE/($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)	2.086	6.049	1.27	5.33
可分辨灰阶级数	3~256	40~256	8~256	22~256
时钟域	行时钟+外接 V_{oled} 高频时钟	单一行时钟	行时钟+ V_{com} 选择时钟	行时钟+ V_{com} 选择时钟
清行控制	帧内清行和清行帧	无	帧内及帧末清行	帧末清行
硬件开销	Register+FSM	DAC	多路 V_{com} +GA 优化	多路 V_{com} +反偏置
刷新率/Hz	60~120	60~120	60~125	60~144
低灰阶优化	是	否	是	否

5 结 论

针对硅基 OLED 微显示器在数字驱动中存在的低灰阶非线性、灰度翻转及精度不足等问题,本文结合其产生的机理,探讨了两种典型发光模式的技术特点与固有局限。在此基础上,提出了一种双模融合扫描算法。该算法依据各子帧在亮度合成中的贡献及精度需求分配发光模式,并通过动态校准优化子帧权值,有效

降低了灰度翻转现象,提升了灰阶曲线的精度。在 $2\,560\times2\,560\times3@90\text{ Hz}$ 全彩微显示器平台上的验证结果表明,gamma 2.2 校正后,亮度均方根误差从 56.686 cd/m^2 降至 2.086 cd/m^2 ,低 16 灰阶亮度均方根误差仅为 0.086 cd/m^2 ,显著提升了低灰阶区域的细节表现与视觉平滑度。本研究为面向 VR/AR 的高精度硅基 OLED 微显示驱动提供了一种有效的解决方案。

参 考 文 献:

[1] FAN Z B, CHENG Y F, CHEN Z M, *et al.* Integral imaging near-eye 3D display using a nanoimprint metalens array [J]. *eLight*, 2024, 4(1): 3.
[2] JING Y Y, YAO M Y, YANG M, *et al.* Photolithographic fabrication of high-resolution micro-QLEDs towards

- color-conversion microdisplay [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 370.
- [3] 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)
- [4] 刘万林, 季渊, 冉峰, 等. 硅基 OLED 微显示器最优扫描算法的非线性校正[J]. 光电工程, 2016, 43(12): 200-205. LIU W L, JI Y, RAN F, *et al.* Nonlinear correction of optimal scan strategy on the OLED-on-silicon microdisplay [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(12): 200-205. (in Chinese)
- [5] XU H Y, LIU B, ZHENG F, *et al.* A compensation pixel circuit with high bits using PWM method for AMOLED [J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 194-199.
- [6] LV Z G, WANG P, WANG H X, *et al.* Adaptive high-gray image enhancement algorithm based on logarithmic mapping and simulated exposure [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 136: 105030.
- [7] MU T Z, JI Y, ZHANG Y, *et al.* Field stack lighting driving method for low power organic light emitting diode-on-silicon microdisplay [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2024, 30(2: Integrated Optoelectronics for VR/AR/MR): 2000511.
- [8] 季渊, 马新德, 孙严睿, 等. 低功耗硅基 OLED 微显示器的区域梯度调光策略[J]. 光学精密工程, 2024, 32(9): 1408-1419. JI Y, MA X D, SUN Y R, *et al.* Regional gradient dimming strategy for low-power silicon-based OLED microdisplays [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(9): 1408-1419. (in Chinese)
- [9] ZHOU H D, GUO A Y, WANG F, *et al.* Multi-dimensional linear scanning algorithm for silicon-based micro-OLED [C]//*Proceedings of 2020 17th China International Forum on Solid State Lighting & 2020 International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS)*. Shenzhen: IEEE, 2020: 203-206.
- [10] 陈宝良, 季渊, 黄忻杰, 等. 基于遗传算法的场堆叠硅基 OLED 微显示器伽玛校正研究[J]. 光子学报, 2024, 53(8): 0811002. CHEN B L, JI Y, HUANG X J, *et al.* Research on gamma correction of field-stacked silicon-based OLED microdisplays based on genetic algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(8): 0811002. (in Chinese)
- [11] 黄振兴, 黄苒, 赵博华, 等. 应用于硅基 OLED 微显示器的分段可调伽马校正[J]. 液晶与显示, 2020, 35(8): 825-830. HUANG Z X, HUANG R, ZHAO B H, *et al.* Gamma correction with adjustable segmentation for OLED-on-silicon microdisplay [J]. *Chinese Journal of Liquid and Display*, 2020, 35(8): 825-830. (in Chinese)
- [12] 朱宇轩, 廖聪维, 张盛东. AM-MicroLED 显示驱动技术[J]. 光电子技术, 2024, 44(4): 265-272. ZHU Y X, LIAO C W, ZHANG S D. AM-MicroLED display driving technologies [J]. *Optoelectronic Technology*, 2024, 44(4): 265-272. (in Chinese)
- [13] 王杰, 季渊, 金忠蓓, 等. 基于动态比较的硅基 OLED 微显示器接口设计[J]. 液晶与显示, 2025, 40(9): 1289-1295. WANG J, JI Y, JIN Z B, *et al.* Design of interface circuitry for silicon-based OLED microdisplays employing dynamic comparison technique [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(9): 1289-1295. (in Chinese)
- [14] NA S H, MIN W K, KIM D H, *et al.* Enhancement of picture quality on ultra-low brightness by optimizing the electrical potential required for OLED charging in the AMOLED displays [J]. *Journal of Information Display*, 2021, 22(4): 275-284.

作者简介:



刘兴艳, 女, 硕士研究生, 2022 年于上海大学获得学士学位, 主要研究方向为微显示驱动、集成电路设计。E-mail: liusy@shu.edu.cn



季渊, 男, 博士, 副研究员, 2012 年于上海大学获得博士学位, 主要研究方向为有机发光微显示、集成电路设计。E-mail: jiyuan@shu.edu.cn