

文章编号:1007-2780(2019)04-0395-07

基于 OLED 微显示器的原子扫描控制器设计

张春燕¹, 陈文栋², 季 渊^{1*}, 赵浩然¹, 冉 峰^{1,2}, 闫 科¹

(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:头戴式虚拟现实(Virtual Reality, VR)显示的持续升温推动微显示器不断向高分辨率、高刷新率的方向发展,然而微显示器有限的带宽难以承载虚拟世界下的海量图像数据,为了减少微显示器系统扫描成像过程中的时间冗余,提高数据传输效率和图像线性度,建立了一种伪随机扫描顺序的原子扫描模型。传统的微显示器是从第一个像素到最后一个像素连续顺序扫描的,原子扫描采用分子空间按位的扫描方法,将整个显示屏幕分成若干子空间,扫描时可以任意切换子空间。根据原子扫描模型设计了微显示器的原子扫描控制器,通过分辨率为 $1.6\text{ k} \times 3 \times 1.6\text{ k}$ 硅基 OLED 微显示器的验证,扫描达到了 100% 的传输效率和 93.8% 的线性度,相比于传统的十二子场扫描,时钟频率降低了约 3.3 倍。证明了原子扫描控制器的可行性,适用于超高清、高分辨率、海量数据的图像显示。

关键词:微显示器;原子扫描控制器;传输效率;线性度;子空间

中图分类号:TN27;TN873 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CJL20193404.0395

Design of atomic scan controller based on OLED microdisplay

ZHANG Chun-yan¹, CHEN Wen-dong², JI Yuan^{1*}, ZHAO Hao-ran¹, RAN Feng^{1,2}, YAN Ke¹

(1. College of Microelectronic Research and Development Center, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

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

Abstract: The continuous warming of the virtual reality (VR) display pushes the microdisplay to the high resolution and high refresh rate. However, the limited bandwidth of the microdisplay is difficult to carry the massive image data in the virtual world. In order to reduce the time redundancy in the scan imaging process of the microdisplay system, improve the data transmission efficiency and image linearity, an atomic scan model of pseudo-random scan order is established. The atomic scan uses a molecular space-by-bit scan method. According to the atomic scan model, the atomic scan controller of the microdisplay is designed. Through the verification of the resolution of $1.6\text{ k} \times 3 \times 1.6\text{ k}$ silicon-based OLED microdisplay, the scan achieves 100% transmission efficiency and 93.8% linearity, the clock frequency is reduced by about 3.3 times compared to the conventional twelve subfield scan. It proves

收稿日期:2018-10-12;修订日期:2018-12-17.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61674100, No. 61774101);上海市经信委专项基金(No.51-030F14-002)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61674100, No. 61774101); Special Foundation of Shanghai Economic and Information Commission(No.51-030F14-002)

* 通信联系人, E-mail:jiyuan@shu.edu.cn

the feasibility of the atomic scan controller and is suitable for image display of ultra-high definition, high resolution and massive data.

Key words: microdisplay; atomic scan controller; transmission efficiency; linearity; subspace

1 引言

微显示器具有极小物理尺寸和极低功耗的特点,可以通过光学系统呈现大屏幕高质量图像的显示效果,主要应用在投影机和近眼显示领域^[1-2]。例如,航空航天显示器、飞行员头盔系统、夜视仪、可穿戴医疗和头戴式虚拟现实、增强现实(Augmented Reality, AR)模拟器等^[3-5]。近年来虚拟现实的持续升温推动微显示器向高分辨率、高清晰度、高灰度级和高集成度方向发展,借助于成熟的 CMOS 工艺技术,硅基微显示器可以在单位面积中集成更多的显示单元,获得更高的像素密度和系统集成度,可提高佩戴舒适感,减少纱窗效应,提升用户的沉浸感^[6-7]。但是随着分辨率的提高,图像数据量大幅增加,微显示器的极小尺寸限制了数据带宽的增大,所以迫切需要一种方法来提高数据的传输效率,许多研究者将目光转向图像信息向显示芯片成像扫描的这个过程。

传统的扫描成像采用模拟驱动的方法,通过控制电压大小来调节像素的灰度,难以达到高精度的灰度值。数字驱动方式采用脉冲宽度调制(PWM)方法,通过改变像素的亮暗时间占空比来产生不同的灰度,稳定性高,切换速度快,噪声低,图像色彩丰富,得到了广泛的应用^[8]。其中直接扫描法^[9]根据每一个像素的灰度值扫描相应的时间,要求非常高的数据传输速率,适用于低灰度级的扫描。子场扫描法^[10]采用将一帧的数据分成若干部分的方法,每个部分的点亮时间对应不同的权值,通过权值组合来产生不同的灰度,提高了刷新率和线性度,但是降低了显示器的发光亮度。分形扫描^[11]采用分子空间的扫描方法,将整个显示区域分成若干空间,不同时间扫描不同的子空间,减少了亮度损失,提高了传输效率,但是降低了像素数据和灰度值之间的线性度,导致图像轮廓线现象明显。针对分形扫描的缺点,本小组提出了原子扫描策略^[12]。

原子扫描通过搜索传输效率为 100% 的扫描矩阵,建立了扫描时空图模型,采用分子空间按位

的扫描方法,有效解决了以上存在的问题。本文首先给出了原子扫描的核心算法,然后在扫描模型的基础上设计了原子扫描控制器,接着通过硅基 OLED 微显示器对所设计的控制器进行了验证,最后对比了实验结果与前人的研究成果,证明了原子扫描控制器适用于高分辨率、高灰度级微显示器。

2 原子扫描算法

原子扫描算法是在分形扫描的基础上提出的,能够同时实现高传输效率和高线性度。扫描时采用分子空间按位的扫描方法,将整个显示区域划分成一定数量的子空间,若表示一个像素点灰度的数据位宽为 n ,则可以划分的最大子空间数为 $2^n/n$ 。每个子空间有连续若干行像素数据,且扫描权值位顺序不同,权值的大小对应像素点保持亮灭状态的相对时间长度。在不同的时间扫描不同的子空间或同一个子空间的不同位,使数据在传输过程中没有时间冗余。

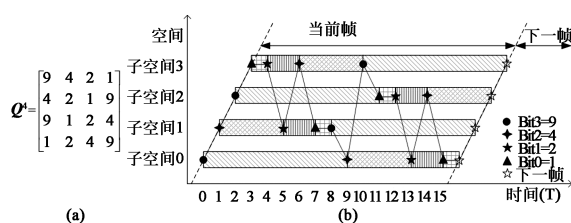


图 1 (a)可 4 倍原子扫描矩阵;(b)扫描时空图。

Fig.1 (a) 4 times atomic scan matrix; (b) Time and space map.

以 16 级灰度为例,子空间数为 4,扫描权值序列为 bit3 : bit2 : bit1 : bit0 = 9 : 4 : 2 : 1,扫描矩阵为 Q^4 ,如图 1(a)所示,4 行代表划分的 4 个子空间,每行的权值位顺序不同,4 列代表权值位数为 4。根据扫描阵列可以画出扫描时空图,如图 1(b)所示,横坐标代表扫描时间,时间单位为扫描一个子空间的一个 bit 位所需时间 T ,纵坐标代表子空间,红色线称为扫描线。在 0 时刻传输子空间 0 所有像素的 bit3 数据,对应的权值

为9,在1时刻传输子空间1的bit2数据,对应权值为4,在2和3时刻分别传输子空间2的bit3数据和子空间3的bit0数据,对应的权值分别为9和1,可以看到每一时刻数据都在传输,不存在传输等待时间,传输效率可达100%。

原子扫描的核心是通过伪穷举法搜索传输效率为100%的低灰度权值阵列 Q^m ,然后将其作为一个抽象的原子植入另一个较高灰度的权值阵列中 $Q^{(m,n)}$,最后扩展为一个更高灰度等级的扫描矩阵 Q ,其中 Q^m 称为可 m 倍原子扫描矩阵, $Q^{(m,n)}$ 称为可 m 倍植入扫描矩阵,植入过程遵循可植入原则和线性序列最优化原则,植入公式为:

$$Q = \begin{cases} Q^m & (Q_{i,j} < 0) \\ LQ^{(m,n)} & (Q_{i,j} > 0) \end{cases} \quad (i, j \text{ 为正整数}, L \text{ 为倍数}) \quad (1)$$

$$Q^{4,5} = \begin{bmatrix} 32 & 8 & 16 & 1 & 1 & 1 & 1 & 4 \\ 8 & 32 & 1 & 1 & 1 & 1 & 16 & 4 \\ 32 & 4 & 8 & 1 & 1 & 1 & 1 & 16 \\ 32 & 16 & 1 & 1 & 1 & 1 & 8 & 4 \\ 4 & 8 & 1 & 1 & 1 & 1 & 16 & 32 \\ 16 & 1 & 1 & 1 & 1 & 8 & 4 & 32 \\ 4 & 16 & 1 & 1 & 1 & 1 & 32 & 8 \\ 4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 16 & 8 & 32 \end{bmatrix}$$

图2 可4倍植入扫描矩阵

Fig.2 4 times implantable scan matrix

$$Q^r = \begin{bmatrix} 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 64 & 64 & 64 & 64 & 16 & 16 & 16 & 16 & 128 & 128 & 128 & 128 & 128 & 128 & 128 & 128 & 32 & 32 & 32 & 32 & 128 & 128 & 128 & 128 \\ 1 & 2 & 4 & 9 & 64 & 64 & 64 & 64 & 1 & 2 & 4 & 9 & 32 & 32 & 32 & 32 & 64 & 64 & 64 & 64 & 16 & 16 & 16 & 16 & 128 & 128 & 128 & 128 & 32 & 32 & 32 & 32 \\ 2 & 1 & 2 & 4 & 1 & 9 & 4 & 9 & 2 & 1 & 2 & 4 & 1 & 9 & 4 & 9 & 1 & 9 & 4 & 9 & 32 & 32 & 32 & 32 & 1 & 9 & 4 & 9 & 64 & 64 & 64 & 64 \\ 4 & 2 & 1 & 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 9 & 4 & 9 & 1 & 4 & 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 4 & 1 & 9 & 4 & 9 & 2 & 1 & 2 & 4 & 1 & 9 & 4 & 9 \\ 4 & 2 & 1 & 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 9 & 4 & 9 & 1 & 4 & 2 & 1 & 2 & 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 2 & 4 & 4 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 2 & 4 \\ 9 & 4 & 9 & 1 & 9 & 4 & 9 & 1 & 32 & 32 & 32 & 32 & 9 & 4 & 9 & 1 & 9 & 4 & 9 & 1 & 4 & 2 & 1 & 2 & 9 & 4 & 9 & 1 & 4 & 2 & 1 & 2 \\ 32 & 32 & 32 & 32 & 128 & 128 & 128 & 128 & 16 & 16 & 16 & 16 & 32 & 32 & 32 & 32 & 32 & 32 & 32 & 32 & 9 & 4 & 9 & 1 & 64 & 64 & 64 & 64 & 9 & 4 & 9 & 1 \\ 128 & 128 & 128 & 128 & 32 & 32 & 32 & 32 & 128 & 128 & 128 & 128 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 64 & 64 & 64 & 64 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 & 16 \end{bmatrix}$$

图3 256级灰度扫描矩阵

Fig.3 256-level gray scan matrix

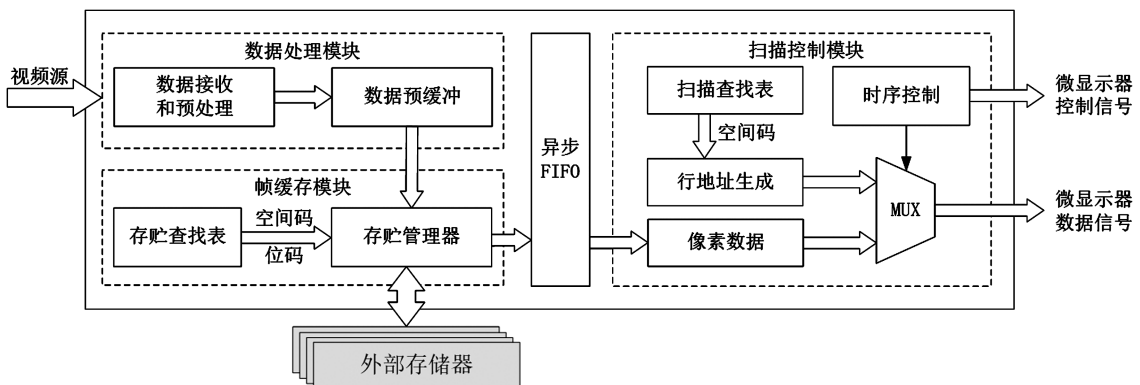


图4 原子扫描控制器框图

Fig.4 Atomic scan controller block diagram

以256级扫描矩阵为例,其可4倍原子扫描矩阵为 Q^4 ,可4倍植入矩阵为 $Q^{(4,5)}$,如图2所示,用可4倍原子扫描矩阵 Q^4 代替可4倍植入扫描矩阵 $Q^{(4,5)}$ 中连续的4个1,再将其余权值扩大为原来的4倍就可得到256级灰度的扫描矩阵 Q ,图3为 Q 的转置矩阵 Q^T 。

3 原子扫描控制器设计

针对原子扫描算法,本文提出原子扫描控制器的设计,其结构如图4所示,主要包含数据处理、帧缓冲和扫描控制3大部分。数据处理模块负责对接收的像素数据进行重新排列,并将重新排列后的数据预存放在内部存储器中。帧缓冲模块的功能是缓冲一帧的数据于外部存储器中,同时根据扫描矩阵建立存储查找表(Look Up Table, LUT),输出子空间码和位码,控制外部存储器中数据的输出。帧缓冲模块与扫描控制模块处于两个不同的时钟域,可通过异步FIFO同步数据信号,扫描控制模块是原子扫描控制器的核心模块,扫描LUT输出子空间码用于计算微显示器的行地址,时序控制部分输出微显示器的控制信号和2选1数据选择器的选择信号,控制像素数据和行数据的输出。

3.1 数据的处理和存储映射

视频源图像数据是由左及右,由上到下逐个像素输入的,传统的扫描方法也遵循“从上到下”、“从左至右”的逐行扫描方式。原子扫描采用分子空间按位的扫描方法,扫描时可以任意切换子空间。为了方便数据的读取,数据需要进行重新排列,将相同 Bit 位的数据组合在一起形成与权值位数相同的 n 个位平面(对应 n 位权值的灰度级图像数据),在传输时分 n 个通道分别传输各 Bit 的像素数据。重新排列后的像素数据按照 Bit 位的顺序缓冲在存储器中,如图 5 所示。考虑到输入图像的时钟频率与扫描输出图像的时钟频率存在差异,本文采用两块片内 RAM 乒乓操作缓冲像素数据,但是由于超高清、超高分辨率图像数据流巨大, RAM 资源极为有限,为了完整地缓冲一帧图像数据,需采用两块片外 SDRAM 乒乓操作读写图像数据。RAM 和 SDRAM 各分 n 个位平面存储区域,当 RAM 中 n 个位平面存储区域都存够一个突发长度的数据后,SDRAM 读取 RAM

中的数据,写入对应的 n 个位存储区域。SDRAM 的每个位存储区域缓冲相应子空间数的像素数据,通过存储 LUT 输出的子空间码和位码可以寻址 SDRAM,输出像素数据。

3.2 扫描控制设计

原子扫描控制电路主要包含子空间状态机模块、像素数据输出模块和扫描时序控制模块。图 6 为扫描控制器框图,为了使数据在传输过程中没有时间冗余,子空间状态机模块根据扫描时空图建立了扫描 LUT,存放子空间码。时序控制模块中的扫描使能部分根据异步 FIFO 标志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开始计数,并输出计数值给微显示器控制信号和子空间行计数这两个模块,微显示器控制信号模块输出微显示器的控制信号,子空间行计数模块输出某一个子空间的确定行,当计数到该子空间的最后一行时,输出计数标志 2 给 LUT 控制器, LUT 地址指针加 1, 输出下一个子空间码。每一个子空间码对应微显示器的一个地

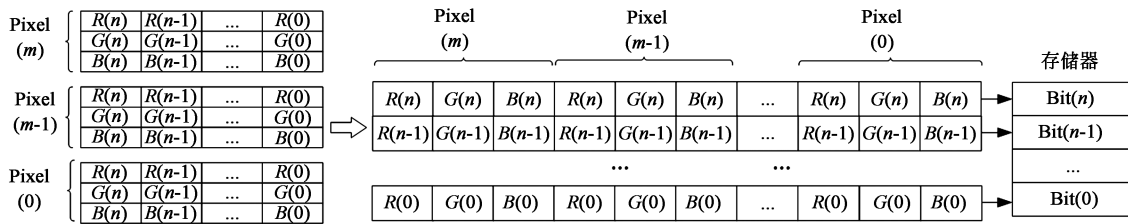


图 5 数据处理与存储映射

Fig.5 Data process and storage map

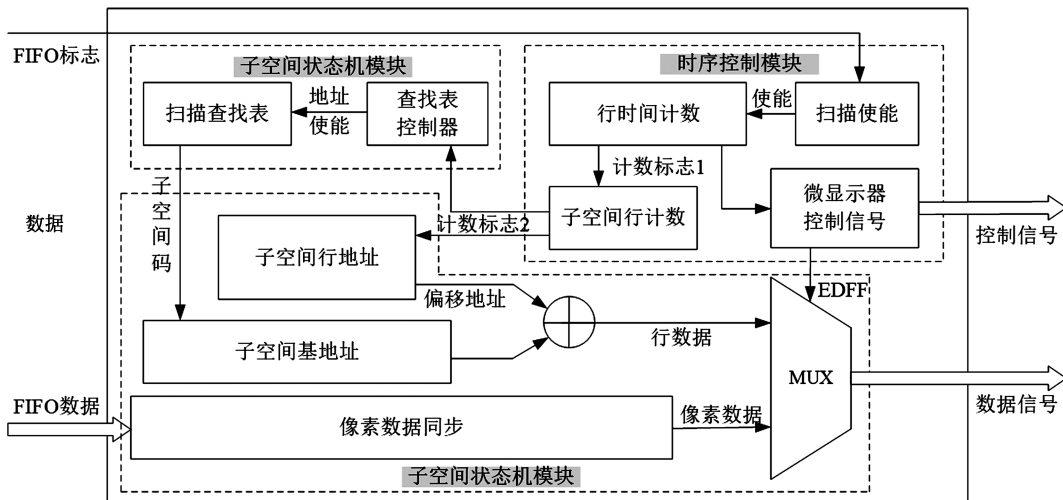


图 6 扫描控制模块框图

Fig.6 Scan control module block diagram

址,称该地址为子空间的基地址,基地址与子空间行地址的和即为将要扫描的微显示器行地址。微显示器控制信号输出 EDFF 信号给数据选择器,当 EDFF 为高电平时输出像素数据,为低电平时输出行数据。

4 硬件系统验证

本节通过硅基 OLED 微显示器测试平台验证了原子扫描控制器的可行性,所选微显示器的分辨率为 $1.6\text{ k} \times 3 \times 1.6\text{ k}$,灰度级为 256 级,扫描权值序列比为 $128:64:32:16:9:4:2:1$,划分子空间数为 32,数据传输位宽为 64,当刷新率为 60 Hz 时,所达到的帧频 f 为:

$$f = \left(\frac{N_{\text{col}} \times 3}{D_{\text{width}}} + T_{\text{RS}} \right) \times \left\lceil \frac{N_{\text{row}}}{S} \right\rceil \times B \times S \times F = 57.6\text{ MHz}, \quad (2)$$

其中: N_{col} 、 N_{row} 分别表示显示面板的列数和行数, T_{RS} 为行选时间, D_{width} 代表数据传输位宽, B 代表每一个单色像素的灰度值位宽, S 为子空间数, F 为刷新率。

针对硅基 OLED 微显示器所设计的原子扫描控制器系统如图 7 所示,主要包括视频源输入、原子扫描控制器和硅基 OLED 微显示器 3 大部分,每个部分都处于不同的时钟域,每个时钟域的电路模块内部采用同步处理方式,不同时钟域之间采用异步 FIFO 将异步信号同步化。控制器系统同时驱动两片硅基 OLED 微显示器,通过例化两个控制器实现了 3D 显示效果。视频源数据为 DVI(Digital Visual Interface)或者 HDMI(High Definition Multimedia Interface)信号,原子扫描控制器对输入数据进行预处理,并向 SDRAM 和微显示器发出命令,控制 SDRAM 的乒乓读写和微显示器扫描操作。图 8 为所搭建的硬件实验测

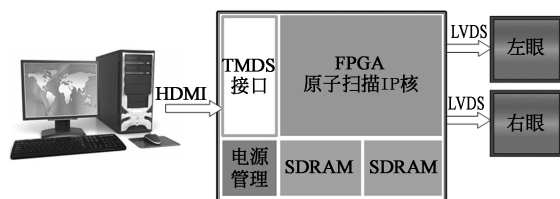


图 7 扫描系统框图

Fig.7 Scan system block diagram

试平台及视频扫描成像结果,针对图像采用光谱彩色亮度计测量了 0~255 级灰度对应的硅基 OLED 微显示器屏幕亮度,结果如图 9 所示,线性度达到了 93.8%。

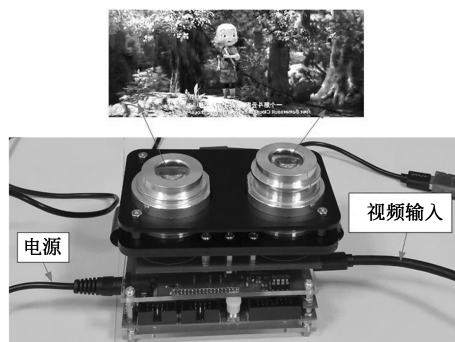


图 8 硬件实验测试结果

Fig.8 Hardware experiment test result

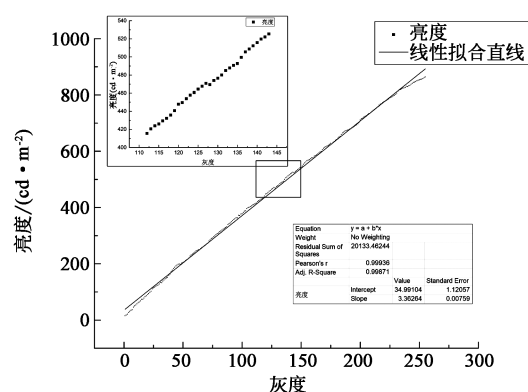


图 9 亮度与灰度等级关系图

Fig.9 Brightness and grayscale diagram

表 1 列出了在显示分辨率为 $1\ 920 \times 3 \times 1\ 080$, 100 MHz 像素时钟频率和 64 位数据宽度条件下不同扫描策略的比较结果,分别在传输效率、线性度和刷新率方面进行了比较。从表中可以看出,传统的子场扫描传输效率不高,虽然增加子场的数量能够提高传输效率,但是刷新率会明显降低,容易使用户在观看时产生眩晕感。分形扫描有效的提高了传输效率却降低了线性度,图像会产生轮廓线。原子扫描在保证传输效率的情况下,线性度相对分形扫描得到了提高,刷新率达到了 128 Hz,验证了原子扫描的整体优势和所设计的原子扫描控制器的可行性。

表 1 不同扫描策略的比较结果

Tab.1 Comparison result of different scan strategies

Scan strategy	Gray level	Transmission efficiency/%	Linearity/%	Frame rate/Hz
12 subfield	256/256	66.41	100	86
19 subfield	256/256	83.88	100	54
Z fractal	256/256	100	25	85
Atomized	241/256	100	93.8	129

5 结 论

原子扫描方法打破了传统的逐行逐列扫描方式,采用分子空间按位的扫描方法,为传统的视频扫描成像理论注入了新的思维模式。本文实现了在 FPGA 中嵌入 Verilog 硬件描述语言的原子扫

描控制器,并通过了新型硅基 OLED 微显示器的验证,实现了 3D 显示效果,解决了数据传输带宽有限的问题,传输效率达到了 100%,同时增强了图像质量,线性度达 93.8%,提高了刷新率,适用于超高分辨率、高清晰度,海量数据的微显示器显示。由于文中只研究了 256 级灰度的显示效果,建议学者可以进一步研究更高灰度级的显示。

参 考 文 献:

- [1] 张积梅,吴玉琦,刘畅.硅基 OLED 微显示技术的优势与发展现状[J].集成电路应用,2012(9):20-22.
ZHANG J M, WU Y Q, LIU C. Advantages and development status of silicon-based OLED microdisplay technology [J]. *Applications of IC*, 2012(9): 20-22. (in Chinese)
- [2] VAN KESSEL P F, HORNBECK L J, MEIER R E, *et al.* A MEMS-based projection display [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8): 1687-1704.
- [3] ASAKI R, YOKOYAMA S, KITAGAWA H, *et al.* A 0.23-in. high-resolution OLED microdisplay for wearable displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2014, 45(1): 219-222.
- [4] PARK I S, KIM T W, LEE J Y, *et al.* Data driver architecture and driving scheme of AMOLED microdisplay for mobile projectors [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(4): 2365-2371.
- [5] 季渊.超还原硅基有机发光微显示器研究[D].上海:上海大学,2012.
JI Y. Research on the super restoring OLED-on-silicon microdisplay [D]. Shanghai: Shanghai University, 2012. (in Chinese)
- [6] 季渊,褚勇男,冉峰,等.硅基 OLED 微显示的数模融合驱动电路设计[J].液晶与显示,2017,32(12):973-980.
JI Y, CHU Y N, RAN F, *et al.* Design of digital analog hybrid driving circuit for OLED-on-silicon microdisplay [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(12): 973-980. (in Chinese)
- [7] 冉峰,薛盛凯,季渊.硅基 AM-OLED 高清微显示器像素驱动电路的研究[J].微计算机信息,2012,28(10):12-13,16.
RAN F, XUE S K, JI Y. The study on AM-OLED on silicon pixel driving circuit of high-definition micro-displays [J]. *Microcomputer Information*, 2012, 28(10): 12-13, 16. (in Chinese)
- [8] 张白雪,秦昌兵,任健雄,等.一种高分辨率硅基 OLED 驱动芯片设计[J].光电技术,2016,36(4):265-269.
ZHANG B X, QIN C B, REN J X, *et al.* The design of high resolution OLED-on-silicon microdisplay driving chip [J]. *Optoelectronic Technology*, 2016, 36(4): 265-269. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 陈章进.平板显示器扫描模型与理论研究[D].上海:上海大学,2009.

- CHEN Z J. Scan model and theory research for flat panel display [D]. Shanghai: Shanghai University, 2009. (in Chinese)
- [11] JI Y, RAN F, JI W G, *et al.* Optimal scan strategy for mega-pixel and kilo-gray-level OLED-on-silicon microdisplay [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(17): 3731-3743.
- [12] 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.
- 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. (in Chinese)

作者简介:



张春燕(1993—),女,山西大同人,硕士研究生,2017 年于哈尔滨理工大学获得学士学位,主要研究方向为平板显示器驱动及显示器灰度控制算法研究。
E-mail: cy_zhang276@163.com



季 渊(1980—),男,上海人,博士,硕士生导师,2012 年在上海大学获得博士学位,2013~2014 年在美国明尼苏达大学电气工程与计算机系从事博士后研究,主要研究方向为平板显示驱动技术、平板显示器灰度控制算法及集成电路设计。E-mail: jiyuan@shu.edu.cn