

# 高清硅基微显示数模融合扫描策略

满丽萍, 季渊, 褚勇男, 冉峰, 黄舒平

上海大学微电子研究与开发中心, 上海 200072

**摘要** 为了提高硅基微显示器灰度等级及分辨率,同时保持像素灰度线性度,结合模拟幅值调制和数字脉宽调制的优点,对数模融合扫描策略进行研究。介绍了子空间位权值扫描算法及其对扫描效率提高的作用,介绍了数模融合扫描的比特位和灰度调制,以及256级灰度案例推导。结果表明:所述方法能有效降低数据传输所需频率,且随着灰度等级及分辨率增加这一优势更加明显。在256级灰度、1920 pixel×1080 pixel的分辨率时,所需数据传输频率只需52.49 MHz,扫描效率达到92.58%,且线性度为100%。该方法缩小了所需数据传输频率,有效降低了对显示器件的要求。

**关键词** 光学器件; 光电器件; 硅基微显示; 数模融合; 高清; 子空间

中图分类号 TN27 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.012301

## Digital and Analog Hybrid Scan Strategy for High Definition Microdisplay on Silicon

Man Liping, Ji Yuan, Chu Yongnan, Ran Feng, Huang Shuping

Microelectronic Research and Development Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China

**Abstract** In order to improve the grayscale level and resolution of the micro display on silicon, and maintain pixel grayscale linearity at the same time, the study of digital and analog hybrid scan strategy is proposed with the advantages of analog amplitude modulation and digital pulse width modulation. The subspace weight-bit scan algorithm and its effect of improving the scanning efficiency are introduced. Then, the bit and grayscale modulation of the digital and analog hybrid scan strategy are introduced, and a 256-level grayscale case is deduced. The result shows that the method can reduce the data transfer frequency effectively and this advantage becomes more obvious with the increasing of the grayscale and resolution. In the case of 256 grayscale and 1920 pixel×1080 pixel resolution, the required data transfer frequency can be reduced to 52.49 MHz, the scanning efficiency is 92.58% and the linearity keeps at 100%. This method reduces the required data transfer frequency and the requirement of the display device.

**Key words** optical devices; optoelectronic devices; microdisplay on silicon; digital and analog hybrid; high definition; subspace

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

## 1 引言

硅基微显示正不断向高分辨率、高灰度级数、高刷新频率方向发展。现有硅基微显示器的像素灰度调制技术可分为模拟幅值调制和数字脉宽调制<sup>[1-3]</sup>。在模拟幅值调制方式中,随着显示图像分辨率以及

灰度等级数的提高,整个显示系统要求像素电路中的电容具有更高的充放电速度,驱动电路中的数模转换器(DAC)具有更高的信号转换速度,同时又要确保模拟量的精度满足显示高灰度级数的精度要求,这些约束给驱动电路的实现带来了巨大挑战<sup>[4-5]</sup>。数字扫描则利用脉冲宽度来调制亮度,具有

收稿日期: 2017-06-25; 收到修改稿日期: 2017-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61376028,61674100,61774101)

作者简介: 满丽萍(1992—),女,硕士研究生,主要从事显示器驱动方面的研究。E-mail: mlp2015@i.shu.edu.cn

导师简介: 季渊(1980—),男,博士,硕士生导师,主要从事光电子器件、平板显示、集成电路等方面的研究。

E-mail: jiyuan@shu.edu.cn(通信联系人)

更高的扫描速度,更容易达到高清、高灰度和高帧率的要求。数字脉宽调制扫描一般可分为直接扫描、子场扫描和分型扫描<sup>[6-8]</sup>。直接扫描驱动的扫描时钟频率随着分辨率和灰度位数的不断提高而等比例增加,不适用于大分辨率显示<sup>[9]</sup>。子场扫描将一帧数据分为若干个子场,通过在权重较低的位平面中插入等待时间来降低时钟扫描频率,但是这种做法降低了扫描效率<sup>[10-11]</sup>。“Z”字分形扫描的时间冗余率为零,传输效率达到100%,但是它的非线性权值在一定程度上影响像素灰度的线性度,降低图像质量<sup>[12]</sup>。

为了进一步提升硅基微显示器的分辨率和数据传输效率,优化线性度,本文根据模拟幅值调制和数字脉宽调制方式的不同特征,提出一种数模融合扫描策略:通过模拟电路驱动每个像素点的灰度幅值,同时根据数字扫描调制像素的发光时间,两者结合实现大分辨率高灰度显示。通过开发一个包含有一组低成本DAC的显示实验模型,证实了数模融合扫描驱动策略的有效性和实用性。

## 2 数模融合扫描驱动策略

### 2.1 子空间位权值算法

相较于直接灰度扫描,位权值灰度扫描能更加有效地控制输出操作次数,并且具有权重顺序任意改变而不影响显示驱动效果的优点,常用做数字电路的逻辑控制扫描驱动。当灰度位数为 $n$ 时,传统位权值的扫描效率可表示为

$$\Phi = \frac{n}{2^n - 1} \times 100\% \quad (1)$$

将微显示器显示屏看成一个空间,划分为 $s$ 个子空间。当其中某个子空间的扫描操作为无效或等待时,称之为冗余操作。此时,对另一子空间进行扫描,可以充分降低扫描时间冗余,称之为子空间位权值算法。

灰度位数为 $n$ 的子空间权值扫描驱动中,每个子空间独立完成一遍 $2^n$ 级灰度扫描进程中有效输出次数为 $n$ ,所有子空间完成 $2^n$ 级灰度扫描进程中有效输出次数共为 $s \times n$ ,由此得到子空间权值扫描效率 $\Phi$ :

$$\Phi = \frac{s \times n}{2^n - 1} \times 100\% \quad (2)$$

### 2.2 数模融合扫描驱动策略

数模融合扫描驱动架构中,数字调制采用子空间位权值扫描来实现数字驱动时间与模拟驱动

时间的耦合,以及高 $H$ 位的灰度扫描;模拟调制采用硅基微显示面板本身的DAC灰度电压产生机理实现低 $L$ 位的灰度调制。显示灰度等级为硅基微显示本身面板的灰度等级与数字调制驱动等级的乘积。

传统的数字权值扫描,灰度调制只有两种驱动电压 $V_{\max}$ 和 $V_{\min}$ ,但是模拟扫描有 $2^L$ 种电压等级。在所述数模融合扫描算法中,当调制低 $L$ 位灰度时,通过DAC电压产生机制产生低 $L$ 位权值对应的 $2^L$ 种电压等级,电压值以 $V_a$ 表示。当调制到高 $H$ 位数据时,使用低 $L$ 位的DAC可产生的最大驱动电压 $V_{\max}$ 和最小驱动电压 $V_{\min}$ 来完成数字调制,即当权值为1时,对应灰度为低 $L$ 位可产生的最大灰度 $G_{\max}$ ,当权值为0时,对应灰度 $G_{\min}$ 为0。

同时利用子空间权值法实现模拟幅值调制与数字脉宽调制的融合扫描,将低 $L$ 位模拟调制看为一次有效扫描操作,所占扫描权值为 $(2^L - 1)/2^L$ ,高 $H$ 位数字调制所占扫描权值分别为 $2^0, 2^1, \dots, 2^{H-1}$ 。由此可得高 $H$ 位的灰度调制如下式所示:

$$G(H) = G_{\max} \cdot \sum_{i=0}^{H-1} 2^i |_{g_{L+i}=1} + G_{\min} \cdot \sum_{i=0}^{H-1} 2^i |_{g_{L+i}=0}, \quad (3)$$

式中 $g_{L+i}$ 为灰度位数为 $n$ 的扫描调制中第 $L+i$ 比特位的值,进而可得数模融合扫描驱动的数学模型:

$$G(H+L) = \frac{2^L - 1}{2^L} \cdot G(V_a) + G(V_{\max}) \cdot \sum_{i=0}^{H-1} 2^i |_{g_{L+i}=1}. \quad (4)$$

以256级灰度的数模融合扫描为例,数字驱动部分为高4位,以 $X_0 \sim X_3$ 权重序号表示,模拟调制低4位可作为一次有效扫描 $X_A$ ,完成一个像素单元的扫描共需5次有效扫描操作,权值分别为8,4,2,1,15/16,扫描循环周期为16,可划分为三个子空间。由于搜索或穷尽扫描空间序列的运算量非常大,需要采用优化的扫描算法提高运算效率,本研究通过遗传算法得到256级数模融合扫描序列如表1所示,子空间0的扫描权重顺序为 $X_A - X_3 - X_1 - X_0 - X_2$ ,子空间1的扫描权重顺序为 $X_2 - X_0 - X_A - X_1 - X_3$ ,子空间2的扫描权重顺序为 $X_1 - X_3 - X_A - X_0 - X_2$ 。当扫描序号为5时,为一次无效扫描操作。由于 $X_A$ 权重只占15/16,剩余1/16时间需额外消隐操作。256级三子空间法扫描效率可达92.58%。

表 1 256 级扫描序列实例

Table 1 Example of 256 gray-level scanning sequence

Scan number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Subspace 0	X <sub>A</sub>	X <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	X <sub>1</sub>	—	X <sub>0</sub>	X <sub>2</sub>	—	—	—
Subspace 1	—	—	X <sub>2</sub>	—	—	—	X <sub>0</sub>	X <sub>A</sub>	X <sub>1</sub>	—	X <sub>3</sub>	—	—	—	—	—
Subspace 2	—	—	—	X <sub>1</sub>	—	X <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	X <sub>A</sub>	X <sub>0</sub>	X <sub>2</sub>

图 1 为数模融合驱动电路结构框图,内侧模拟调制主要包括 DAC 转换器和列驱动电路。电压及灰度级数的实现可利用硅基微显示自带的 DAC 转换器实现,由于本算法中低  $L$  位灰度电压值和高  $H$  位灰度电压值都通过低位权值产生并利用数字脉宽调制每个比特位的扫描时间,故 DAC 只需产生低  $L$  位灰度级数,信号转换速度快、精度高。外侧由行选择器、行驱动、列移位寄存器和列保持寄存器完成分屏子空间位权值扫描的数字脉宽调制。图 1 右侧部

分为有机发光二极管(OLED)像素单元<sup>[13-14]</sup>,采用 4T1C 结构,当晶体管 T1 和 T2 打开时,data 上的数据存入至电容 C 上,T1 和 T2 关闭后 em 信号有效,晶体管 T4 打开,晶体管 T3 作为驱动管,将电容 C 上的电压转变为电流,驱动 OLED 像素发光。该驱动电路架构可使用  $L$  位 DAC 实现模拟调制所需  $L+H$  位 DAC 的功能,同时以较低频率达到数字调制所需较高频率的要求,可较大程度地降低硬件设计需求,实现高分辨率和高刷新帧率的目的。

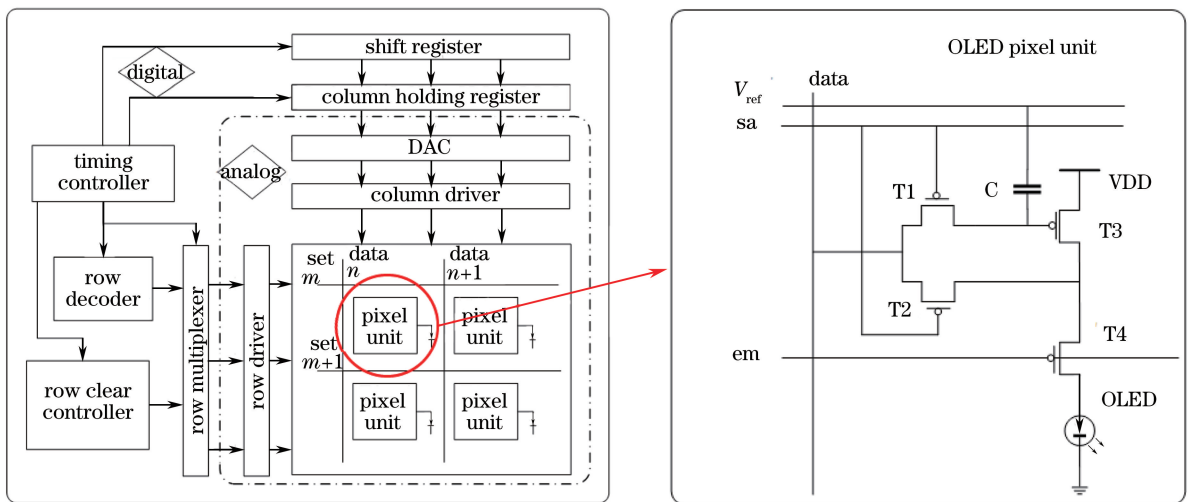


图 1 数模融合驱动电路结构图

Fig. 1 Digital and analog hybrid drive system structure

### 3 实验与结果

当灰度位数为  $n$  时,模拟调制为低  $L$  位,传统位权值扫描和经数模融合扫描算法优化后的数据传输频率计算公式分别如下:

$$C_{lk\_sys} = \frac{i_{rows} \times i_{cols} \times 3 \times (2^n - 1) \times C_{lk}}{D_{width}}, \quad (5)$$

$$C_{lk\_sys} = \frac{i_{rows} \times i_{cols} \times 3 \times (2^{n-L} - 1) \times C_{lk}}{D_{width} \times s} + \frac{i_{rows} \times i_{cols} \times 3 \times L \times C_{lk}}{D_{width}}, \quad (6)$$

式中  $i_{rows}$  和  $i_{cols}$  表示图像像素单元的行数和列数,  $C_{lk}$  表示图像刷新频率,  $D_{width}$  表示数据传输位宽。

假设模拟调制低 4 位,分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$  的彩色图像,所需数据传输频率计算结果如表 2 所示,可知同一灰度位数和分辨率下,经所述数模融合扫描方法优化后所需的数据传输频率相较于传统位权值法有效减小。同时,随着灰度位数的增加,可划分的子空间数也在不断增加,所述扫描方法所需数据传输频率下降的优势更加明显。

表 3 列举了在 256 级灰度,  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel} \times 3$  分辨率时,所述算法与现有的扫描方法的性能对比,可知所述数模融合扫描算法兼具线性度好、扫描效率高、所需传输频率低等优点,具有良好的实用性。

表 2 所述算法和传统权值扫描算法在 1920 pixel×1080 pixel×3 分辨率下不同灰度等级时所需的数据传输频率对比

Table 2 Data transfer frequency comparison between the proposed method and traditional scanning method at the resolution 1920 pixel×1080 pixel×3 and different grayscale levels

Grayscale	64	128	256	512	1024	2048	4096
Number of subspace	1	2	3	5	8	13	26
Data transfer frequency with proposed method /MHz	40.83	43.75	52.49	59.49	69.26	80.31	80.53
Data transfer frequency with traditional weight-bit /MHz	367.42	740.67	1487.16	2980.16	5966.14	11938.11	23882.04

表 3 256 级灰度和 1920 pixel×1080 pixel×3 分辨率下不同扫描算法的性能对比

Table 3 Performance comparison of different scan algorithms under 256 gray level and 1920 pixel×1080 pixel×3 resolution

Scan algorithm	Linearity / %	Scanning efficiency / %	Data transfer frequency / MHz
Traditional weight-bit	100	3.14	1487.16
12 subfield scan	100	66.41	69.99
19 subfield scan	100	83.88	110.82
Optimization (Z fractal scan)	25	100	70.59
Proposed method	100	92.58	52.49

本算法采用 1920 pixel×1080 pixel×3 的硅基微显示的版图进行功能仿真验证,该微显示器内置了三个 4 位 DAC 转换器,同时兼容数字和模拟信号驱动,分时复用,可同时完成三个像素单元的模拟调制。芯片(IC)的整体版图及像素点的放大结构如图 2 所示,设计采用 180 nm 的用户定制互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺,像素驱动电路的金属氧化物半导体场效应晶体管(MOS)管电容为 36 fF。根据表 1 所列的 256 级灰度扫描序列,可以得到图 3 中 R、G、B 像素的 DAC 调制电压随像素点灰度值及仿真时间变化的特性曲线。当  $X_0 \sim X_3$  的值为 1 时, DAC 的电压值为最大值 1.8 V,当像素扫描权重  $X_0 \sim X_3$  的值为 0 时, DAC 的电压值为最小值 0 V。DAC 输出的电压经过 3 倍放大后,形成最终的像素电压驱动像素发光。

低位模拟部分  $X_A$  的电压值为 DAC 调制机制根据低四位权值产生,在  $pix\_b$  中,低四位权值为 7, DAC 调制最大电压值对应 0.84 V,同时由于低位模拟调制所占时间权重为 15/16,余下 1/16 时间权重需要进行消隐操作,故电压值在经过权重  $X_A$  后一段时间降为 0。数模融合扫描提高了每个像素单元的刷新率,降低了对电压保持时间的要求。本实验中扫描权值  $X_3$  的电压衰减最大,其衰减量为 6%。随着像素灰度级数的增加,每个像素单元的刷新率随之增加,电压衰减相应减小。

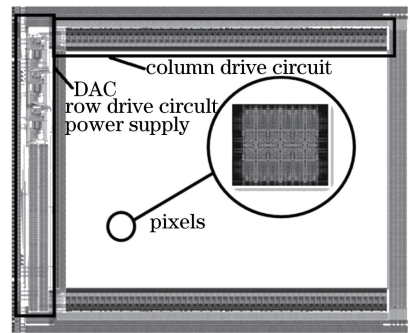


图 2 芯片图

Fig. 2 IC layout

## 4 结 论

提出一种数模融合扫描驱动策略,采用微显示器自带的 DAC 方式实现灰度调制,通过划分子空间的位权值扫描算法来减小操作等待和时间冗余,提高扫描效率。数模融合算法融合数字驱动和模拟调制的优点,降低了对显示器设备的硬件设计要求,更容易实现高清显示。该数模融合扫描驱动策略可适用于发光二极管(LED)、OLED 等硅基微显示。所述的数模融合扫描策略还能应用到大屏幕的平板显示中。此外,高清微显示器在较低硬件成本实现的情况下对于虚拟现实、增强现实等穿戴式应用领域也具有广泛意义。

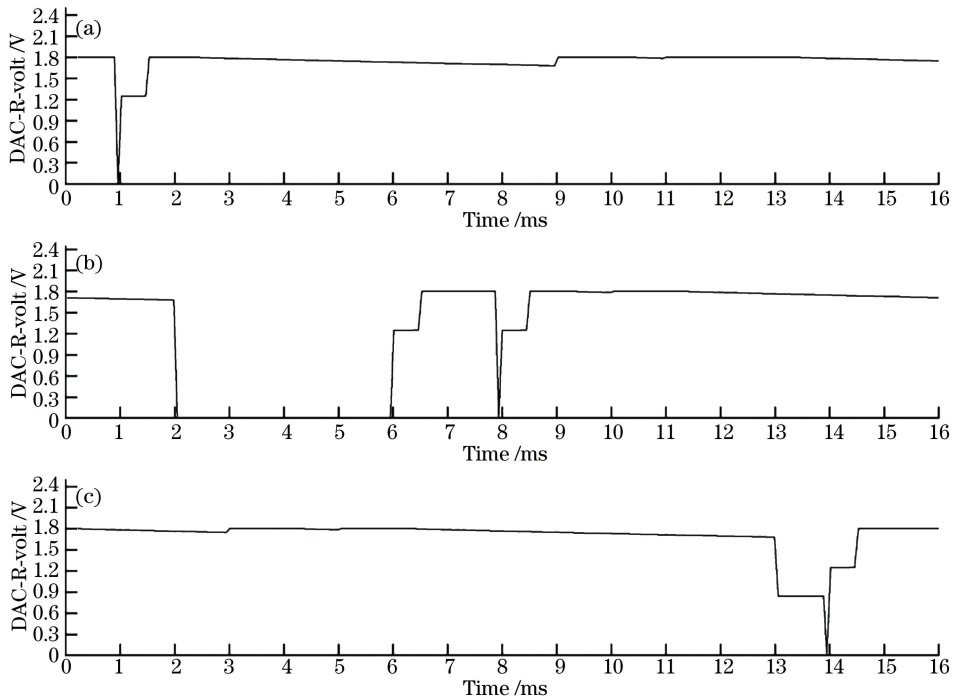


图 3 三个子空间像素单元 DAC 调制特性曲线。(a)  $\text{pix}_r:8'b1111\_1111$ ; (b)  $\text{pix}_g:8'b1011\_1111$ ; (c)  $\text{pix}_b:8'b1111\_0111$

Fig. 3 DAC modulation characteristic curve of three subspace pixel units.

(a)  $\text{pix}_r:8'b1111\_1111$ ; (b)  $\text{pix}_g:8'b1011\_1111$ ; (c)  $\text{pix}_b:8'b1111\_0111$

## 参 考 文 献

- [1] Ji Yuan, Wang Cheng, Ran Feng, *et al.* Current PWM pixel driving circuit with OLED luminance compensation[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2016, 31(6): 563-568.  
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.
- [2] Lee K Y, Hsu Y P, Chao P C P, *et al.* A new compensation method for emission degradation in an AMOLED display via an external algorithm, new pixel circuit, and models of prior measurements[J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(3): 189-197.
- [3] Feng Jun, Yan Limin, Xia Mingzhi. Sub-pixel rendering algorithm of improving image brightness [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091101.  
冯俊, 严利民, 夏明治. 提高图像亮度的子像素着色算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091101.
- [4] Wang Yu, Piao Yan. Computational reconstruction for integral imaging with sampled elemental images [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0511003.  
王宇, 朴燕. 基于元素图像阵列采样的集成成像重构方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0511003.
- [5] Wang Canjin, Sun Tao, Chen Juan. Hybrid filter based on pixel classification for laser active imaging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 34(5): 0309001.  
王灿进, 孙涛, 陈娟. 基于像素点分类的激光主动成像混合滤波 [J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0309001.
- [6] Huan Xuan, Hui Guixing, Xu Meihua. Controlling system design for OLED video display with high gray-level [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2012, 27(5): 622-627.  
环翮, 惠贵兴, 徐美华. 高灰度视频 OLED 显示控制系统设计与应用 [J]. 液晶与显示, 2012, 27(5): 622-627.
- [7] 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.
- [8] Kimura M, Suzuki D, Koike M, *et al.* Pulsewidth modulation with current uniformization for AMOLEDs [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57(10): 2624-2630.
- [9] Cho H H, Choi C H, Kwon B H, *et al.* A design of contrast controller for image improvement of multi-gray scale image [C]. IEEE Asia Pacific Conference on Asics, 2000: 131-133.

- [10] Svilainis L. LED brightness control for video display application [J]. *Displays*, 2008, 29(5): 506-511.
- [11] Liu Wanlin, Ji Yuan, Ran Feng, *et al.* Nonlinear correction of optimal scan strategy on the OLED-on-silicon microdisplay [ J ]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(12): 200-205.  
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.
- [12] Chen Zhangjin, Xu Meihua, Ran Feng. 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] Wu W J, Xia X H, Li G M, *et al.* High-speed voltage-programmed pixel circuit for AMOLED displays employing threshold voltage one-time detection method[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, 34(9): 1148-1150.
- [14] Bernd R, Vogel U, Wartenberg P, *et al.* OLED-on-CMOS based bidirectional microdisplay for near-to-eye and sensor applications [C]. *Semiconductor Conference Dresden IEEE*, 2011:1-3.