

申请上海交通大学博士学位论文

低功耗 AMOLED 像素电路与驱动方法的研究

博 士 生：刘 文 江

学 号：0070349002

导 师：戎蒙恬教授

专 业：电路与系统

上海交通大学电子信息与电气工程学院

2014 年 8 月

**A Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University for the
Degree of Philosophy Doctor**

**Research on Low Power AMOLED Pixel Circles and
Driving Method**

Author: Wenjiang Liu

Student ID:0070349002

Supervisor : Prof. Mentian Rong

Specialty: Circuit and System

School of Electronics and Electric Engineering

Shanghai Jiao Tong University

October , 2014

低功耗 AMOLED 像素电路与驱动方法的研究

摘 要

有源矩阵有机发光二极管 (active-matrix OLED, AMOLED) 显示具有对比度高、响应超度快, 色彩展现逼真、易于薄形化和柔性化等优势, 已逐渐进入智能手机、大屏幕电视等应用市场。如何降低 AMOLED 显示的功耗成为 AMOLED 显示技术进一步发展需要研究的一个重要课题。目前, 针对低功耗 AMOLED 显示的研究主要在高效率、低电压的 OLED 器件方面, 以及一些行为级低功耗策略。虽然也有一些电路层和驱动方法的研究, 但缺乏系统性。而且, AMOLED 的像素电路与驱动方法需要补偿薄膜晶体管 (thin-film transistor, TFT) 特性变化、面板 IR-drop 以及 OLED 退化等问题。针对此, 本论文着重在在像素电路和驱动方法层面系统研究相关的低功耗策略, 以能在不影响整体显示效果的情况下, 降低功耗, 并且能够更好的结合高效 OLED 器件技术和行为级的低功耗策略。本文的主要研究内容和创新点如下:

第一、系统分析了 AMOLED 显示面板的功耗组成, 分为静态功耗和动态功耗两部分, 为各种低功耗技术的研究提供了理论依据。

第二、提出了一种基于外部驱动电路反馈补偿的, 由 3 个 TFT 和 1 个电容(3T-1C) 组成的 AMOLED 像素电路。仿真结果表明该电路能够有效地补偿 TFT 电学特性变化、翘曲效应(kink effect)等非理想特性, 以及面板的 IR-drop。该像素电路结构简单, 含有的 TFT 数目少, 将有利于提高大面积生产的良率以及显示屏的分辨率。

第三、基于所提出的 3T-1C 像素电路, 提出了将驱动 TFT 工作于非饱和区, 降低压降以所需的供电电压及直流静态功耗的方法。由于该像素电路通过外部驱动集成电路反馈补偿的方式, 使 OLED 两端的电压不受驱动 TFT 电学性能变化的影响。因此, 驱动 TFT 上的源漏电压可以偏置到饱和电压以下, 而不影响 OLED 的驱动电流, 从而不影响显示效果。

最后, 本论文还提出了一维动态电压调整 (dynamic voltage scaling, DVS) 技术, 根据显示内容分区域的调整供电电压, 从而降低直流功耗。该 DVS 技术进一步结合驱动 TFT 工作于非饱和区的 3T-1C 像素电路的低功耗方案, 能够更为显著的降低 AMOLED 显示功耗。

关键词: 像素电路, 有源矩阵有机发光二极管, TFT 驱动电路, 低功耗

Research on Low Power AMOLED Pixel Circles and Driving Method

ABSTRACT

Attributed to the attractive features including high contrast ratio, fast response, vivid color and being thin and flexible, active matrix organic light emitting diode (AMOLED) displays have entered the market for smartphone and TV applications. Reducing the power consumption becomes a very important topic to be addressed for further technology development. Currently, low power AMOLED display technologies are mainly on high efficiency and low voltage OLED devices, and some behavior-level power reduction methods. There is lack of systematic study on the pixel circuit and driving scheme for low power AMOLED displays. Moreover, AMOLED pixel circuit design needs to compensate the non-ideal effects of thin-film transistors (TFTs), IR-drop on the display panel and OLED aging. Therefore, this thesis focuses on low power strategies on the pixel circuit design and driving methods, to reduce the power consumption without sacrifice of the display performance, and also make it easier to combine high efficiency OLED device technologies and behavior-level power reduction methods. The following work will be covered in this thesis:

- 1) The power consumption in AMOLED display panels is systematically analyzed, composed of dynamic power and static power, which can provide the theoretical basis for research on low power technologies for AMOLED displays.
- 2) A pixel circuit composed of three TFTs and one capacitor (3T-1C) with external feedback compensation is proposed. Simulation results show the circuit and driving scheme can effectively suppress all the non-ideal

effects of TFTs including threshold voltage and mobility changes, kink effect, and IR-drop. This pixel circuit of fewer TFTs will be useful for high resolution displays and manufacturing with high yield.

- 3) Based on the developed 3T-1C pixel circuit, a driving scheme by biasing the driving TFT in non-saturation regime is proposed for reducing the power consumption. It is shown that, with external compensation, the OLED current is not influenced by the electrical property of the driving TFT. Therefore, the driving TFT can be biased in the non-saturation regime without affecting the display performance.
- 4) A one-dimensional (1D) dynamic voltage scaling (DVS) driving scheme is proposed to adaptively scale down the power supply voltage of different regions in the panel according to the displayed content for power reduction. By combining the DVS and the 3T-1C pixel circuit with the driving TFT biased in the non-saturation regime, it is shown the power consumption can be significantly decreased.

Keywords: Pixel circuit, AMOLED, TFT Driver, Low Power

目 录

低功耗 AMOLED 像素电路与驱动方法的研究	1
摘 要	I
ABSTRACT	II
第一章 绪论	7
1.1 课题研究的背景	7
1.2 国内外研究现状	9
1.3 本论文的研究内容和创新点	12
1.4 本论文结构安排	13
第二章 AMOLED 像素电路与驱动方法	14
2.1 OLED 技术	14
2.1.2 OLED 电学特性	14
2.1.3 OLED 稳定性	17
2.1.4 像素电路中 OLED 设计	17
2.2 薄膜晶体管技术	20
2.2.1 非晶硅	21
2.2.2 低温多晶硅	21
2.2.3 金属氧化物半导体	22
2.2.4 有机半导体	22
2.3 AMOLED 基本像素电路	23
2.3.1 基本像素电路结构 2T-1C	23
2.3.2 基本像素电路的直流分析	24
2.3.3 基本像素电路的瞬态分析	26
2.4 本章小结	27
第三章 仿真与分析方法	28
3.1 SPICE 电路仿真	28
3.2 MATLAB 系统仿真	29
3.3 TFT 仿真模型	31
3.4 OLED 仿真模型	31

3.5 本章小结	37
第四章 AMOLED 显示的功耗分析与降低功耗的方法	38
4.1 AMOLED 面板的功耗构成	38
4.2 静态功耗分析和优化方法	40
4.3 动态功耗分析和优化方法	43
4.4 其他层次的功耗优化方案	48
4.5 小结	50
第五章 低功耗像素电路和驱动电路	51
5.1 像素电路结构复杂的原因	51
5.2 像素电路补偿技术	54
5.2.1 电压补偿技术	54
5.2.2 电流补偿技术	58
5.2.3 驱动电路补偿技术	61
5.3 低功耗像素电路和驱动电路	66
5.3.1 低功耗像素及驱动电路原理	66
5.3.2 低功耗像素及驱动电路仿真	69
5.4 本章小结	75
第六章 驱动 TFT 非饱和区工作的低功耗设计	76
6.1 进行功耗比较的像素电路结构	76
6.2 饱和区驱动 TFT 的功耗仿真	78
6.3 非饱和区驱动 TFT 的功耗仿真与比较	83
6.4 非饱和区驱动 TFT 的电源电压最优解	86
6.5 对比电路的静态功耗效率的比较	89
6.6 本章小结	91
第七章 显示面板供电电压动态调整的低功耗方法	92
7.1 DVS 技术原理	92
7.2 已有的 DVS 技术方案的不足	94
7.3 显示面板供电电压的 DVS 设计与仿真	96
7.4 低功耗像素电路及驱动方法结合 DVS 技术的原理	96
7.5 低功耗像素电路及驱动方法结合 DVS 技术的仿真	100
7.6 低功耗像素电路及驱动方法与其他电路及方法结合 DVS 技术的比较	102
7.7 本章小结	104
第八章 总结和展望	105
8.1 主要结论	105

8.2 研究展望	106
参 考 文 献.....	107
附录（OLED 原始测试数据）	119
致 谢.....	122
攻读博士学位期间已发表或录用的论文	123
博士期间的专利和获奖	124

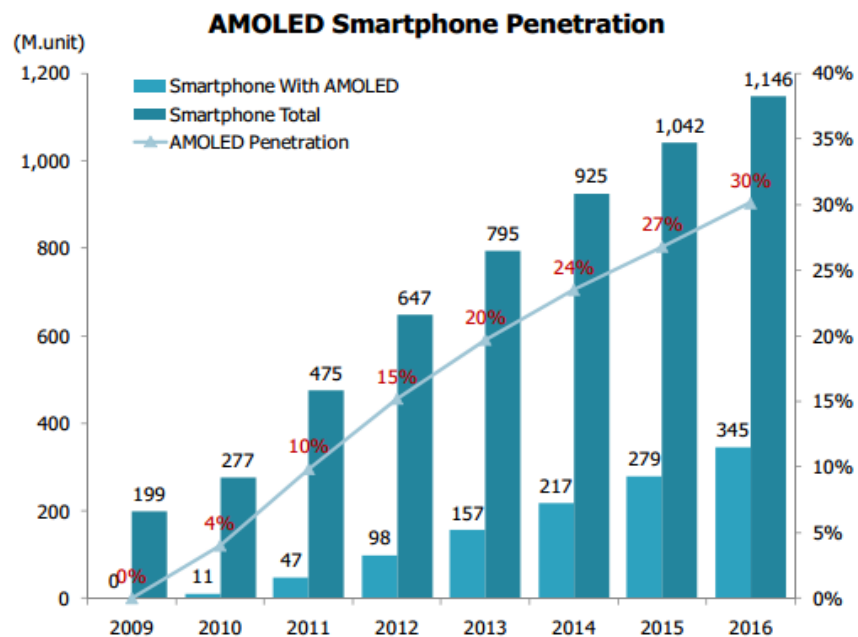
第一章 绪论

1.1 课题研究的背景

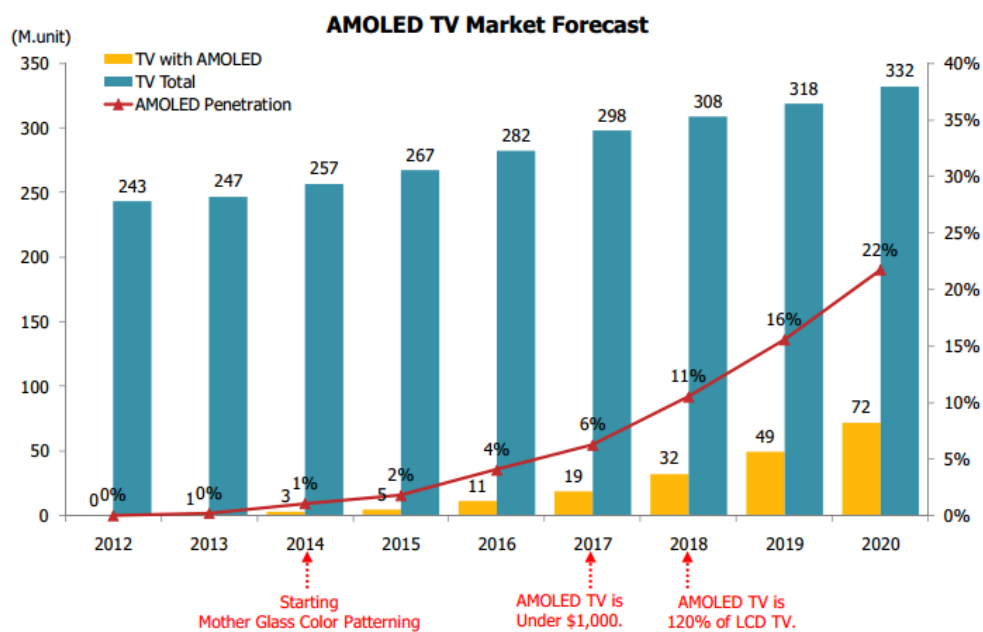
随着互联网的普及以及无线通信和数字多媒体时代的到来,高品质的显示屏已成为众多消费电子产品(电视,电脑,平板电脑和智能手机等)的重要特征。目前,发展迅速的液晶显示(liquid crystal display, LCD)表现出其它显示技术难以匹敌的市场竞争力,在显示产业占据主要地位。而另一方面,随着高效稳定的有机发光二极管(organic light emitting diode, OLED)材料与器件技术的发展,有源矩阵 OLED(active-matrix OLED, AMOLED)显示的商业化正在加速。与 LCD 相比,AMOLED 显示具有对比度高、响应快、色彩展现更为逼真、更易于薄形化和柔性化等优势,逐渐进入智能手机、大屏幕电视等应用市场,如图 1-1 所示。

针对智能手机等移动终端以及可穿戴电子系统的应用,显示屏尺寸、分辨率、以及使用时间的增加令显示屏的功耗成为产品设计需要考虑的重要因素。降低显示屏的功耗,将有助于减小所需电池的容量,提高整体系统的续航时间。对于大尺寸电视的应用,降低显示屏功耗也有助于节能环保,同时对于 AMOLED 显示可以减少热的产生,有助于提高显示屏的可靠性和寿命。因此,功耗已经成为决定显示屏应用的一个关键的指标,如何降低 AMOLED 显示的功耗也成为 AMOLED 显示技术发展的一个极为重要的研究课题。

如图 1-2 所示,不同于 LCD 中液晶作为“光阀”的功能, OLED 是自发光电流驱动型显示器件,所以两者在像素电路、驱动方法以及整体系统架构上具有很大的差别。因此,虽然 LCD 在包括材料、器件、电路、系统等方面的低功耗技术已经有了很好的研究基础,并可部分借鉴,但是这些显著的差异,令 AMOLED 显示的低功耗技术需要专门的研究,以获得最为合适的策略。



(a)



(b)

图 1-1 AMOLED 显示屏市场预测：(a) 智能手机 (b) 电视 (来自显示网)

Fig.1-1 Market Forecast of AMOLED Displays: (a) Smartphone and (b) TV (from DisplayBank)

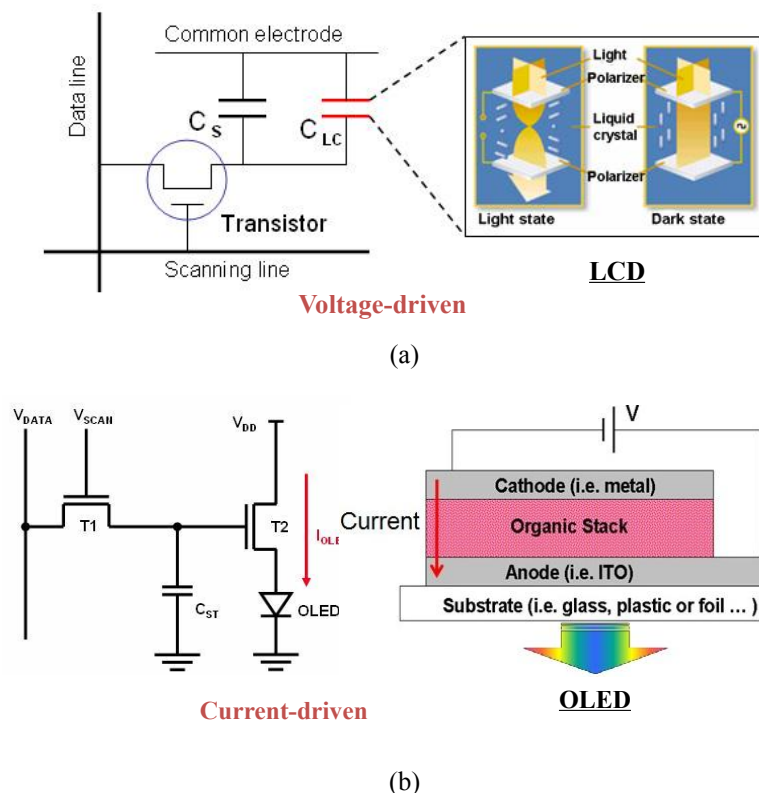


图 1-2 LCD 与 OLED 的像素驱动电路和原理的比较: (a) LCD; (b) OLED。

Fig.1-2 Comparisons of the pixel circuits and driving mechanisms for: (a) LCD and (b) OLED

1.2 国内外研究现状

AMOLED 作为自发光型显示技术, 其功耗取决于 OLED 器件的效率、所显示的内容以及驱动的方法。为降低 AMOLED 显示的功耗, 相关研究主要集中在以下几个方向:

1) OLED 材料与器件:

低电压、高效率的 OLED 器件是降低 AMOLED 显示功耗的关键。为了提高 OLED 的发光效率、降低工作电压, 学术界和产业界在材料和器件结构方面开展了大量的研究工作[1-2]。通过采用高效率的三线态磷光材料(如图 1-3)以及利用多层结构提高载流子的注入、激子的产生和复合的效率(如图 1-4), OLED 的内量子效率已经接近 100% [3-4]。通过对电子和空穴传输层进行参杂, 获得 PIN 结构的 OLED 器件, 能够显著的降低工作电压[5-6]。为进一步提高外量子效率, 设计低成本、易于大面积加工的结构、提高出光效率成为研究的热点[7-8]。在集成结构方面, 通过发展顶发光 OLED

器件技术，如图 1-5 所示，避免了 TFT 像素电路所占面积对像素发光开口率的影响，从而能有效的降低功耗。

Idemitsu與UDC紅綠藍螢光與磷光材料效能比較						
	Idemitsu			UDC		
名色	紅	綠	藍	紅	綠	藍
效率(cd/A)	11.4	21.8	8.4和8.9	18	68	29
使用壽命(小時)	160,000	280,000	· 8.4 : 50,000 · 8.9 : 22,000	126,000	176,000	8,000

图 1-3 美国 UDC 公司的磷光 OLED 材料与日本 Idemitsu 公司的荧光 OLED 材料的发光效率和寿命的比较(来自 InTech)

Fig.1-3 Comparison of the efficiency and life time of the phosphorescence OLED material from UDC and the fluorescence OLED material from Idemitsu. (from InTech)

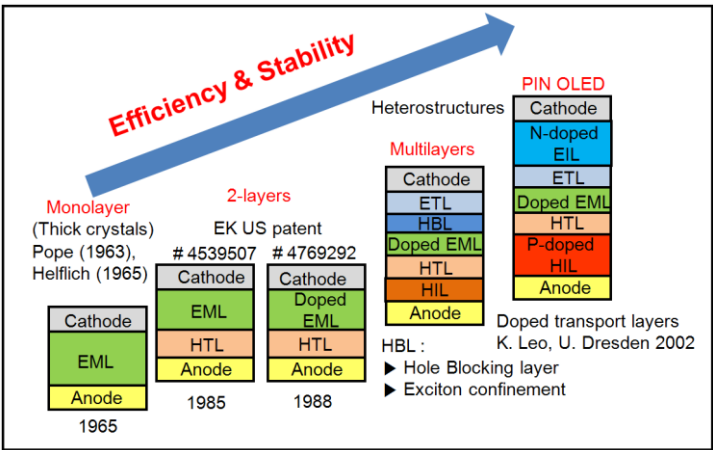


图 1-4 OLED 从单层向多层结构的转变提高了效率和稳定性。(空穴注入层 (HIL) /空穴传输层 (HTL) /电子激子阻挡层 (EBL) /发光层 (EML) /空穴激子阻挡层 (HBL) /电子传输层 (ETL) /电子注入层 (EIL)) (来自新电子)

Fig.1-4Evolution of OLED structures from single-layer to multi-layer for improved efficiency and stability. (HIL: hole injection layer, HTL: hole transporting layer, EBL: electron blocking layer, EML: electroluminescence layer, HBL: hole blocking layer, ETL: electron transporting layer, EIL: electron injection layer) (from Micro-Electronics)

2) 降低 TFT 像素电路以及驱动电路的功耗

AMOLED 显示的另一部分功耗消耗在 TFT 像素电路以及外围驱动电路上。为了降低这部分的功耗，主要通过提高 TFT 性能来实现[9-13]，或在驱动方法方面采用一

些策略，比如亮度饱和压缩技术[14-16]，动态电压调整技术 [17-18]，以及驱动电路结构的优化[19]等。亮度饱和压缩是发现图像 Y 分量过饱和以后，压缩亮度的方法来降低功耗，图像效果有损，电路实现上比较困难。驱动电路结构优化不是针对像素电路本身，而是针对 Source Driver 的 ASIC 芯片设计，和本文研究点不同。动态电压调整技术是本文在后面重点讨论的。

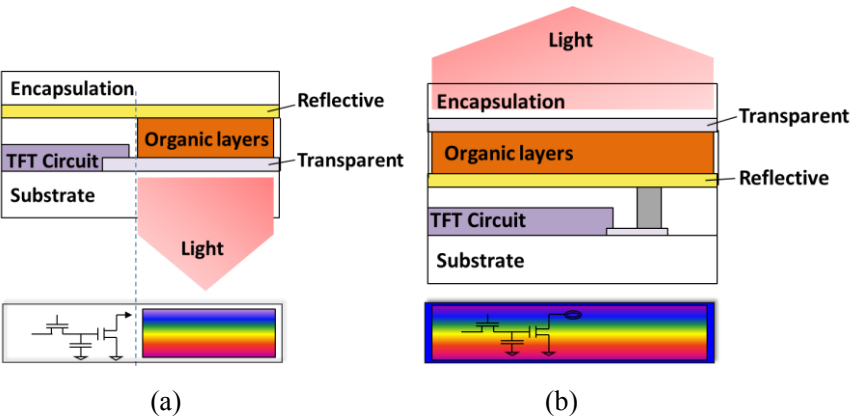


图 1-5 基于(a)底发光 OLED 和(b)顶发光 OLED 的 AMOLED 集成结构的对比

Fig. 1-5 Comparison of the AMOLED integration structure based on (a) bottom-emitting OLED and (b) top-emitting OLED.

3) 使用模式和用户界面的设计

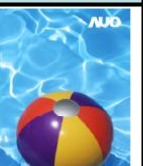
				
OLED	87 mw	36 mw	107 mw	57 mw
LCD	190 mW	190 mW	190 mW	190 mW
				
OLED	86 mw	229 mw	65 mw	172 mw
LCD	190 mW	190 mW	190 mW	190 mW

图 1-6 OLED 显示与 LCD 显示 (2.4'', 200 nits) 在不同显示画面下的功耗对比. (来自友达光电)

Fig. 1-6. Comparison of power consumption of the AMOLED display and the LCD (2.4'', 200 nits).(from AUO)

AMOLED 作为自发光型显示技术,其功耗与显示内容密切相关。因此可以结合应用模式和用户界面的设计[20-22],在不影响显示效果的前提下,让显示屏尽可能的减少高亮的显示区域,已达到降低功耗的目的。图 1-6 展示了 OLED 采用这种方法在不同显示画面下比 LCD 的功耗都要低。

总结来看,针对低功耗 AMOLED 显示的研究主要在高效率、低电压的 OLED 器件方面,以及一些行为级低功耗策略。虽然也有一些电路层和驱动方法的研究,但缺乏系统性。AMOLED 的像素电路与驱动方法目前主要考虑要补偿 TFT 的特性变化[23-28]、面板 IR-drop 以及 OLED 退化等问题。如果能在此前提下,研究基于像素电路和驱动方法层面的低功耗设计方法,将能够结合高效 OLED 器件技术和行为级的低功耗策略,有效地将低 AMOLED 显示的功耗,而不影响显示的效果。而且,对 AMOLED 显示整体的功耗也缺乏整体性的分析。除了理论分析,本文也通过合作的公司做了一些实验,这些实验数据用于了本文的分析。

1.3 本论文的研究内容和创新点

针对发展低功耗 AMOLED 显示的需求,本论文着重在在像素电路和驱动方法层面系统研究相关的低功耗策略,以能在不影响整体显示效果的情况下,降低功耗。本文的主要研究内容和创新点如下:

第一、系统分析了 AMOLED 显示面板的功耗组成,分为静态功耗和动态功耗两部分,为各种低功耗技术的研究提供了理论依据。

第二、提出了一种基于外部驱动电路反馈补偿的,由 3 个 TFT 和 1 个电容(3T-1C)组成的 AMOLED 像素电路。仿真结果表明该电路能够有效地补偿 TFT 的 V_{TH} 变化、翘曲效应(kink effect)等非理想特性,以及面板的 IR Drop。该像素电路结构简单,含有的 TFT 数目少,将有利于提高大面积生产的良率以及显示屏的分辨率。

第三、基于所提出的 3T-1C 像素电路,提出了将驱动 TFT 工作于非饱和区,降低所需的供电电压及直流静态功耗的方法。由于该像素电路通过外部驱动集成电路反馈补偿的方式,使 OLED 两端的电压不受驱动 TFT 电学性能变化的影响。因此,驱动 TFT 上的源漏电压可以偏置到饱和电压以下,而不影响 OLED 的驱动电流,从而不影响显示效果。

最后,结合驱动 TFT 工作于非饱和区的 3T-1C 像素电路的低功耗方案,本论文提出了一维动态电压调整(dynamic voltage scaling, DVS)技术,根据显示内容分区域的调整供电电压,该技术能够进一步降低 AMOLED 显示功耗。

1.4 本论文结构安排

第一章介绍了本课题研究的背景和意义，主要研究内容和创新点，以及本论文的结构安排。

第二章介绍了 AMOLED 的像素电路和驱动方法，介绍了 OLED 的电学特性、不同的 TFT 背板技术、以及 AMOLED 的驱动原理，为后面的研究工作提供理论基础。

第三章介绍了本论文研究工作所采用的仿真分析方法，包含基于 Smart-SPICE 的电路仿真和基于 Matlab 的系统仿真，介绍了本论文 AMOLED 像素电路设计仿真所采用的 OLED 和低温多晶硅 TFT 的模型及参数。

第四章介绍了 AMOLED 的功耗分析和降低功耗的方法，对 AMOLED 的功耗进行了静态和动态分类，介绍了 AMOLED 设计参数和动态功耗以及静态功耗的关系。介绍了一些如何优化功耗的方法。

第五章介绍了所提出的外部反馈补偿的 3T-1C 像素电路，通过仿真结果表明其能很好地补偿 TFT 电学特性（阈值电压、迁移率）变化、翘曲效应(kink effect)等非理想特性，以及面板的 IR Drop。

第六章基于所提出的 3T-1C 像素电路，提出了将驱动 TFT 工作于非饱和区，降低电压降以所需的供电电压及直流静态功耗的方法。仿真结果表明，驱动 TFT 上的源漏电压可以偏置到饱和电压以下，而不影响 OLED 的驱动电流。

第七章介绍了所提出的 DVS 低功耗技术，根据显示内容分区域的调整供电电压，从而降低直流功耗。该 DVS 技术结合驱动 TFT 工作于非饱和区的 3T-1C 像素电路的低功耗方案，能够显著的降低 AMOLED 显示功耗。

第八章为本论文的总结和对进一步研究工作的展望。

本文的研究工作得到了国家自然科学基金《全溶液法制备低压有机薄膜晶体管集成电路的研究》（编号 61274083）和国家自然科学基金《基于溶液低压有机薄膜晶体管的高灵敏度 microRNA 传感器》（编号 61334008）的支持。

第二章 AMOLED 像素电路与驱动方法

2.1 OLED 技术

OLED 的结构种类很多, 结构的不同发光方式和效率是不同的, OLED 的发光方向制约了 OLED 的发光效率, 另外 OLED 的光源、堆叠的方式、材料种类等都会影响了 OLED 的效率甚至寿命。此外 OLED 由于长期偏置在正向电压下, 其发光强度会在一段时间后退化, 这就需要像素电路能够提供检查或者补偿这种 OLED 的退化的途径。另外, 由于 RGB 的 OLED 的发光效率不同, 以及人眼对不同光的敏感程度不同, 像素电路面积也不同, 这就需要在像素电路设计中考虑这些问题。本节先介绍 OLED 的电学特性, 以此讨论像素电路设计需要考虑那些 OLED 参数。

2.1.2 OLED 电学特性

AMOLED 厂家都有 OLED 的各种交流/直流 (AC/DC) 参数, RGB 三色的 OLED 参数不同, 如果是白光+偏光片方式, 还有白色 OLED 的参数。厂家通过测试电流密度和 OLED 发光强度的曲线以及电压和 OLED 发光强度的曲线来测试 OLED 的 DC 参数。有了这个参数就可以根据像素面积来设计 AMOLED 中需要的 I-V 曲线。通过 I-V 曲线就可以得到该 OLED 的最大电流 I_{OLED} 和最大电压 V_{OLED} 。

图 2-1 描述了 RGB 的 OLED 在不同电压下的发光强度的曲线, 该数据是从 OLED 厂家获得的 OLED 产品中通过测试得到的, 原始数据见附录。从图中可以看出, 发光强度和电压是高阶函数, OLED 两端的电压和发光强度是非线性关系。通过控制 OLED 的电压来控制 OLED 的每个灰度级的亮度需要一张大的电压和亮度的对应表, 这个表格可以以 ROM 形式存储在 AMOLED 的 Source Driver 的 IC 中。每家公司的这个表可能是不同的, 这也导致了 AMOLED 的驱动芯片兼容性没有 LCD 好。

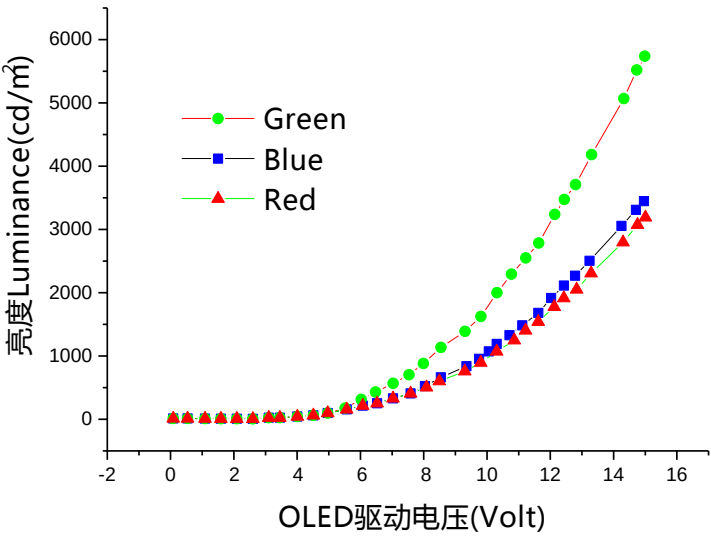


图 2-1 红绿蓝 OLED 的电压与亮度曲线
Fig.2-1 RGB OLED Voltage and Luminance Curve

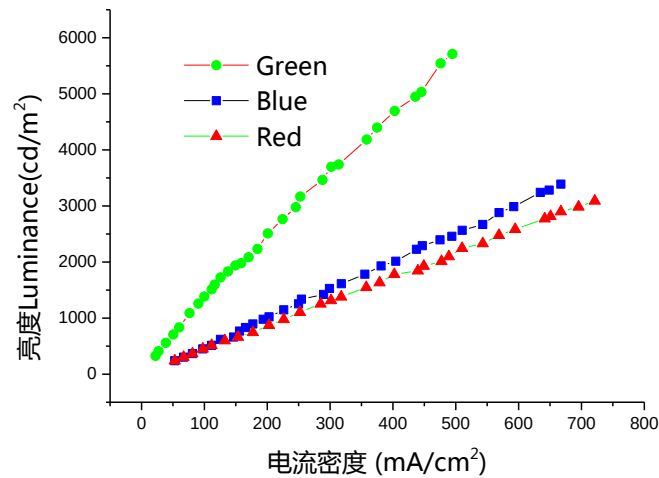


图 2-2 红绿蓝 OLED 的电流密度与亮度曲线
Fig.2-2 RGB OLED Current Density and Luminance Curve

图 2-2 描述了 RGB 的 OLED 在不同电流密度下的发光强度曲线，从图中可以看出，发光强度和电流密度几乎是线性关系。因此 AMOLED 设计的时候基本上是以电流大小来确定发光强度，而驱动 OLED 的 TFT 也一般以电流源的方式工作。但是实际显示系统中，还需要考虑人的眼睛对各个灰度级的敏感层度，人眼对低光的敏感和

高光不同,因此发光亮度和像素数值不是完全线性的。另外 OLED 在 AMOLED 像素电路中位置,发光方向对像素电路设计有影响。比如设计需要 100nit (cd/m^2) 的发光强度,像素电路开口率会影响显示屏的亮度,而且 OLED 的亮度经过各个功能层以后有所下降。如果总共的发光效率按照 33% 计算,这就需要 OLED 能够提供 300nit 的亮度。在 300nit 发光强度下,从图 2-2 中可以得到 RGB 的电流效率分别为红 $18.3\text{cd}/\text{m}^2$,蓝 $16.2\text{cd}/\text{m}^2$,绿 $5.5\text{cd}/\text{m}^2$ 。如果每个像素面积为 $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$,而且 RGB 分别为 $100\mu\text{m}\times 33\mu\text{m}$ 。根据 $100\mu\text{m}\times 33\mu\text{m}$ 的面积,可以得到图 2-3 的 OLED 的 I-V 曲线。注意的是,实际产品中三个像素面积的大小不是平均的,Pentile 的 RGB 发光面积不等,红和蓝的面积是绿的二倍,本文这里先按照三个像素相同面积来分析。根据像素面积大小,RGB 的最大电流分别为红 $2.21\mu\text{A}$,蓝 $2.12\mu\text{A}$,绿 $0.33\mu\text{A}$ 。通过最大电流和图 2-2 的曲线,可以得到 RGB 的 OLED 的最大工作电压分别为红 14.253V ,蓝 13.998V ,绿 8.724V 。这样 I_{OLED} 和 V_{OLED} 的大小就确定了。蓝色的 OLED 在两端电压为 1V 的时候,电流在 200pA 以下,在最大设计亮度的时候有 $2\mu\text{A}$ 。OLED 电流比与显示的对比度等效,由此可见 OLED 的对比度很容易就达到了 10000:1,通常用 8 比特表示的像素是不够的,对比度高这也是 AMOLED 的特点之一。

通过图 2-1 的 V-L 曲线和图 2-2 的 I-L 曲线,就可以得到设计需要的 OLED 的 I-V 曲线,如图 2-3。根据这个曲线可以得到 OLED 的最大功耗,同时也可以得到在每个灰度级下 OLED 驱动电压。

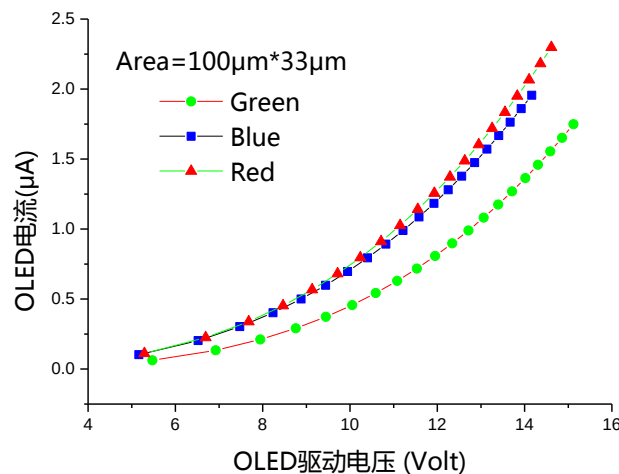


图 2-3 红绿蓝 OLED 的电压与电流曲线

Fig.2-3 RGB OLED Volatage and Current Curve

2.1.3 OLED 稳定性

OLED 使用了一段时间以后,在同样驱动电压下,OLED 的电流会减少,这就影响了 OLED 的发光强度,这种现象称为 Aging。图 2-4 描述了时间和 OLED 退化的曲线,从曲线看出,使用了一段时间以后,OLED 的功耗会越来越大,显示亮度会越来越小,对于电压驱动型的 AMOLED 来说,同样的驱动电压已经达不到同样的显示效果。这就需要电路设计者能否补偿这种退化或者消除这种退化。

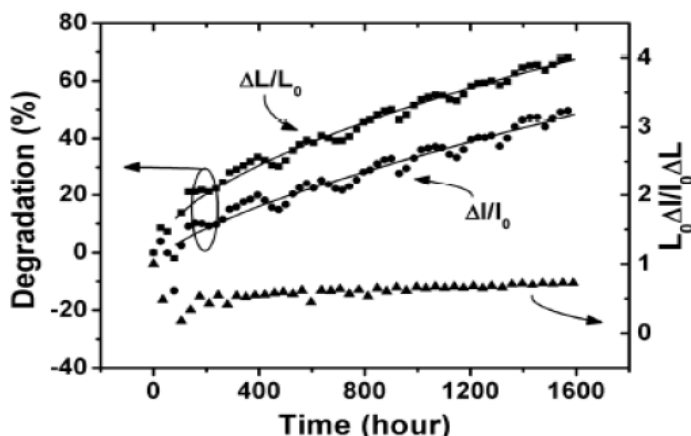


Fig.2-4, OLED 亮度退化[29]

图 2-4, Interdependence Between Current and Luminance Degradation of the OLED

消除 OLED Aging 的方法之一就是[30]提出的在电路设计中增加一个 TFT 管,在每次编程前,先让 OLED 处于反相偏置一段时间,OLED 能够较大地恢复原来的发光能力。就补偿方式来说,有光学补偿和电学补充两种方式。光学补偿的基本原理就是通过检查 OLED 的发光强度来控制驱动电流的大小。电学补偿就是通过测试获得 OLED 退化后的 I-V 曲线,然后把补偿电压或者电流加入到编程电压或者电流中。由此可见 OLED 的这些特性使得像素电路和驱动电路的设计变得复杂。

2.1.4 像素电路中 OLED 设计

对于像素电路中的 OLED 来说,设计者需要考虑几个问题,一是白光中每种颜色光的组成比例,二是每个 OLED 的面积,三是像素电路的开口率,这三个因素决定了 OLED 的驱动电压和电流,这里面最重要的参数是 I_{OLED} ,这个参数确定了,OLED 的驱动电压也就确定了,首先本文分析 I_{OLED} 是如何确定的。

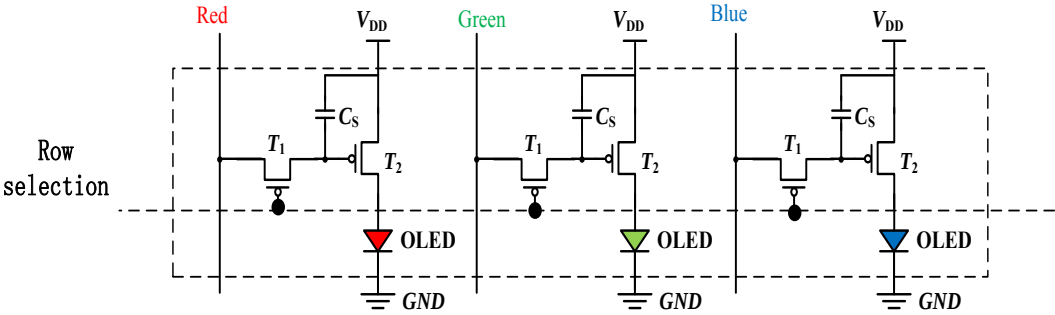


图 2-5 AMOLED 面板中 RGB 电流构成
Fig.2-5 RGB current in AMOLED Panels

如图 2-5 中所示，AMOLED 中的基本像素是 RGB 构成的，这三者的最大发光亮度要能够构成需要的最大亮度的白光。这也是 AMOLED 为什么白光耗电最大，越黑越省电的原因。根据选取的 RGB 的 OLED 的材料，可以先画出类似于图 2-6 左边的 D65 的白光图[31]。当然还有其他形式的白光，这里以 D65 白光为例子。

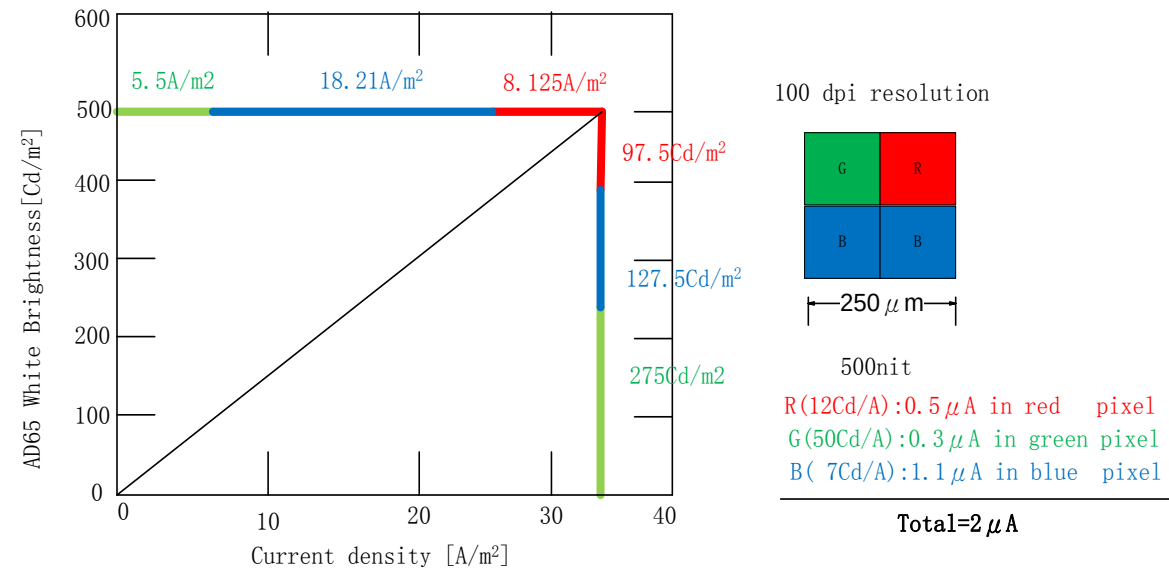


图 2-6 D65 白光和 OLED 电流设计
Fig.2-6 D65 White and IOLED design

OLED 的电流大小和需要的发光强度有关。比如要得到 500nit 的白光，那么需要蓝光达到 127.5Cd/ m²，红光要达到 97.5 Cd/ m²，绿光要达到 275 Cd/ m²，三者之和是 500Cd/ m²，白光对每个分量的比例要求是一致的。如果需要 2000nit 的白光，这

三个分量分别乘以 4, 如果需要 200nit 的白光, 这三个分量分别乘以 0.4。要达到 500nit 亮度的白光, 绿光的电流密度要达到 $5.5\text{A}/\text{m}^2$, 蓝光的电流密度要达到 $18.21\text{A}/\text{m}^2$, 红光的密度要达到 $8.125\text{A}/\text{m}^2$, 加起来是 $32\text{A}/\text{m}^2$ 。如果这个电流密度乘以面板 OLED 的面积, 面板的整体电流就可以得到。如果是 100nit 的 D65 白光, 总的电流密度就是 $6.4\text{A}/\text{m}^2$ 。由此可见电流的大小决定于最大显示白光的需求。

OLED 的电流大小和每个颜色的面积有关。设计 OLED 电流的时候希望 RGB 的最大电流相差不大最好, TFT 的最大电压也差不多, 这便于像素电路和面板设计。但是从图 2-6 可以看到蓝光的电流密度 $18.21\text{A}/\text{m}^2$ 是其他颜色的两倍多, 这就使得如果采用一个供电电压, 相同面积的像素下, 蓝光的供电电压要高很多, 而红光和绿色的电压会浪费很多功耗。如果采用多个电压那么版图设计难度增加, 电源线的宽度减少, IR DROP 增加。因此业界通常采用增加蓝光的发光面积来解决这个问题, 这项技术叫 PenTile, 是根据电流密度的比例关系来安排 OLED 管的发光面积。图 2-7 是 PenTile 技术的 AMOLED 屏幕。

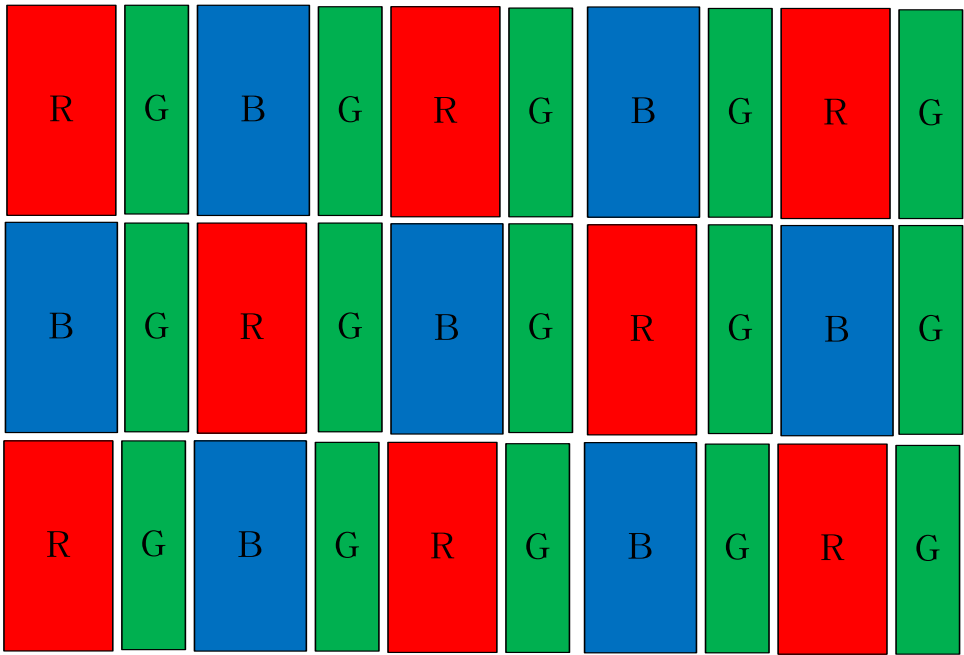


图 2-7 PenTile 排列 RGB
Fig.2-7 RGB PenTile

OLED 的电流大小和开口率 Aperture 的大小有关, 顶发光几乎是 100%的开口率, 底发光相对来说就很低了, 一般小于 0.3, 下面用 0.25 的开口率来举例说明 OLED 电流是如何设计的。

根据上面这些参数本文设计一个像素电路中的 OLED，比如要实现 100dpi 的分辨率大小的 OLED，每个像素面积大概是 250um*250um，该面积分成四块，蓝色用两块，绿色和红色各用一块面积。在开口率为 0.25 的情况下要达到 600nit 的现实效果，表 2-1 为需要的电流的计算表格。

表 2-1 OLED 电流计算表格
Table 2-1 Current calculation form

	红色 (R)	绿色 (G)	蓝色 (B)
亮度密度(A/m ²)	8.125	5.5	18.21
电流密度(Cd/m ²)	97.5	275	127.5
电流效率(Cd/A)	12	50	7
像素面积(um ²)	15625	15625	31250
显示亮度(nit)	600	600	600
开口率	0.25	0.25	0.25
需要亮度(nit)	2400	2400	2400
电流(μA)	0.608	0.412	1.36

实际中蓝色是由两块驱动拼接的，每块的驱动电流只要 0.66 μA 左右。这样就可以得到驱动 OLED 的最大像素电流 $I_{OLED}=0.66 \mu A$ ，产生一个像素白光的最大电流总和为 2.38 μA 左右。从上面的分析可以看到绿色 OLED 的电流密度是最低的，其次是红光，电流密度最大是蓝光。因此从材料这方面来看，如何降低蓝光的电流密度，提高蓝光的发光效率是功耗优化的重要工作之一。[32]研究了如何采用图案化的表面来提高 OLED 的发光效率，前面的介绍中也有通过结构优化，材料变化等来提高 OLED 发光效率的方法。

2.2 薄膜晶体管技术

AMOLED 背板采用薄膜晶体管 (TFT) 用于驱动 OLED。薄膜晶体管的作用是负责打开和关闭各个像素以及决定每个像素的发光强度。显示的分辨率、刷新率、功耗等问题都受到背板技术的影响。在 AMOLED 中驱动 TFT 和 OLED 是串联在一起的，TFT 提供给 OLED 必要的发光电流。TFT 管子的迁移率，域值电压都影响了 TFT 能够提供的电流大小。TFT 技术主要可分为非晶硅(amorphous silicon, a-Si)、多晶硅(low temperature polycrystalline silicon, LTPS)、氧化物 (metal oxide semiconductor)、有机半导体(organic thin film transistors,OTFT) 四种，下面分别介绍各自的特点。

2.2.1 非晶硅

非晶硅(a-Si)作为背板材料已经很多年了,并且有多种不同的制造方法。如今,非晶硅主要应用在小屏和低分辨率的面板中。在移动电话显示领域,像素密度低于每英寸 300 的应用中非晶硅市场比较大,这种技术生产成本低,制造工艺相对简单。然而,当涉及到更高分辨率的显示器,非晶硅就没有优势了。非晶硅材料由于电子迁移率低,需要较大面积才能提供 OLED 需要的驱动电流,因此晶体管占用更多的像素空间,阻挡光线穿透 AMOLED 显示屏,这使得非晶硅不合适做分辨率高的 AMOLED。这就需要新的技术和制造工艺以满足显示面板的需求,现在比较适合的材料就是多晶硅,而且以低温多晶硅(LTPS)为代表。

2.2.2 低温多晶硅

传统的非晶硅材料的电子迁移率只有 $0.5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{S}$,而低温多晶硅材料的电子迁移率可达 $50 \sim 200 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{S}$,因此与传统的非晶硅薄膜电晶体液晶显示器相比,低温多晶硅 TFT 具有更高解析度、反应速度快、开口率(aperture ratio)高等优点,同时可以将周边驱动电路同时制作在玻璃基板上,达到在玻璃上集成系统(SOG)的目标,所以能够节省空间和成本此外,因此 LTPS 技术的发展受到了广泛的重视。

多晶硅是一种约为 0.1 至数个 μm 大小、以硅为基底的材料,由许多硅粒子组合而成。在半导体制造产业中,多晶硅通常经由 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)处理后,再以高于 900°C 的退火程序。然而此种方法却不适合用于平面显示器制造产业,因为玻璃的最高承受温度只有 650°C 。因此, LTPS 技术特别适合在平面显示器的上使用。LTPS 利用准分子镭射作为热源,镭射之光经过投射系统后,会产生能量均匀分布的镭射光束,投射于非晶硅结构的玻璃基板上,当非晶硅结构玻璃基板吸收准分子镭射的能量后,会转变成为多晶硅结构,整个处理过程都是在 600°C 以下完成,故一般玻璃基板皆可适用。

由于 LTPS 凭借其高电路整合特性与低成本的优势,在中小尺寸显示面板的应用上有着绝对的优势。但是 LTPS TFT 存在几个问题,一是 TFT 的漏电流较大;二是高迁移率 LTPS 材料低温大面积制备较困难,工艺上存在一定的难度,三是 LTPS 的 TFT 存在空间阈值电压不均一的问题。

2.2.3 金属氧化物半导体

该技术现阶段主要代表是铟镓锌氧化物 IGZO。当前，由于 a-Si 被证明不适合作为 OLED 显示屏背板技术，LTPS 具有良好的性能，但是随着面板尺寸的增加和像素密度的增加，LTPS 面板的费用也增加很快。AMOLED 产业是在寻找结合了 a-Si 成本和可扩展，而且有高性能如 LTPS 和高稳定性的材料，这就是 IGZO 出现的基础。

尽管迁移率不如 LTPS 高，但是 IGZO 可以缩小到更小的晶体管尺寸，其开关比更大，这使得像素驱动电路中的存储电容的漏电时间延长，从而可以减少存储电容，减少 TFT 面积，增加了开口率，降低驱动电路功耗。

IGZO 另外一个好处是，它是高度可扩展的，允许以增加像素密度的分辨率显示。夏普已经宣布计划用每英寸 600 像素的面板。这可以比 a-Si TFT 的类型更容易由更小的晶体管尺寸来实现。另外更高的电子迁移率也适合于改善性能，得到更好的刷新率和开关像素。夏普开发了暂停像素，使他们能够保持自己的电荷时间更长，这样可以建立一个稳定的高品质图像，同时降低了功耗，提高电池寿命。

2.2.4 有机半导体

有机薄膜半导体器件(Organic TFT)可以通过真空蒸镀、溶液旋涂、喷墨打印、图案压印等多种方法制备，具有加工工艺简单、成本低廉、易封装、可与柔性衬底兼容以及可在室温条件下处理和可大面积批量生产等优点。在要求大覆盖面积、机械弹性(柔性)、低温处理尤其是低成本方面，有机电子器件将完全能够满足低端电子产品实用化的需求，因此成为特色电子学的研究热点之一。但是，该器件载流子迁移率低，只有 $5\text{-}10\text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，远低于非晶硅材料，从而导致器件工作速度慢而且极易在空气中退化。在过去近几十年的研究过程中，各国科学家在材料、器件、系统集成以及制备工艺方面取得了一定进展，但仍面临诸多困难和挑战。与成熟的硅器件相比，目前 OTFT 的大规模应用存在两大障碍，一是电流驱动能力不够、迁移率低下，二是可靠性差、寿命短，因此在 AMOLED 产品中还没有采用该材料。

从上面四种材料的基本介绍可以看到，不同的背板技术可以适用于不同的显示类型，比如 IGZO 可以与任一 LCD 或 OLED 显示器中使用，但是有些情况下一种背板不适用于某种显示类型。多晶硅的分子结构在一颗晶粒(Grain)中的排列状态是整齐而有方向性的，因此电子移动率比排列杂乱的非晶硅快了 200-300 倍，一般所称的 TFT LCD 是指非晶硅，这项技术成熟，产能大，生产的时间短，成本也比较低，为

TFT LCD 的主流产品，现在仍然有相当多的厂家，尤其是日系和中小尺寸，低分辨率的面板。而多晶硅品则主要包含高温多晶硅(HTPS)与低温多晶硅(LTPS)二种产品，以低温多晶硅(LTPS)最为流行。金属氧化物 TFT 的迁移率没有多晶硅高，但是一致性（uniformity）比 LTPS 要高，是 TV 这种大面板显示青睐的技术。如表 2-2 比较了不同材料的各项特性。

表 2-2 不同 TFT 材料的属性
Table 2-2 Characters of Different TFT Materials

AMOLED	Poly-Si TFT	a-Si:H TFT	Oxide TFT	OTFT
Semiconductor	Poly-crystalline Si	Amorphous Si	Amorphous IGZO	Organic Semiconductor
TFT uniformaty	Poor	Good	Good	Poor
Pixel circuit	Complex (5T-2C)	Complex (4T-2C,5T-2C)	Simple/Complex (2T-1C,6T-2C)	No data
Channel mobility	$\sim 100\text{cm}^2/\text{V.s}$	$1\text{cm}^2/\text{V.s}$	$>10\text{cm}^2/\text{V.s}$	$<10\text{cm}^2/\text{V.s}$
TFT type	PMOS,NMOS	NMOS	NMOS	NA
TFT mask step	5-11	4-5	5-7	NO
Cost/Yield	High/Medium	Low/No data	Low/Medium	Low/No data

2.3 AMOLED 基本像素电路

2.3.1 基本像素电路结构 2T-1C

AMOLED 像素电路的基本结构是两个晶体管加一个电容（2T-1C）再加上一个 OLED，如图 2-8，2T 是指驱动管 TFT(T_D)和开关管 TFT(T_P)，1C 是指存储电容是 C_s 。该结构是 OLED 最简单的结构， V_{DATA} 上输入一个合适的电压，开关管控制这个电压何时输入到驱动管 TFT 的栅极，驱动管控制 TFT 驱动 OLED 的电流，电流流过 OLED 就可以发光了。OLED 的亮度和驱动电流成正比，因此，像素电路的目的就是在每次刷新的时候提供稳定的驱动电流来控制 OLED 发光，根据 TFT 材料的不同，TFT 分为 N 型的和 P 型的。图中(a)是 PMOS 加 OLED 构成的像素电路，图(b)是 NMOS 加 OLED 构成的像素电路，在常用的电路结构中，PMOS 是放在靠近高电压一侧的，NMOS 是靠近低电压一侧的，现在通用的 AMOLED 驱动中，驱动管 TFT 是一个理想电流源结构，因此(a)中的数据线 V_{DATA} 和 V_{DD} 的压差，(b)中的数据线 V_{DATA} 和 GDN

的压差就构成了压控电流源，存储电容是 C_s 保证驱动管 TFT 的 Gate 电压稳定。AMOLED 实际加工的时候，最先用 ITO 做 TFT 的阳极，然后是 TFT，再是加工 OLED。对于上面的图，加工的顺序是从上往下进行的，和示意图的上下顺序相反。OLED 加工的时候往往是先加工阳极，因此(a)这种结构是最普遍采用的 AMOLED 结构，(b)这种是反相结构的像素电路。(c)这种结构驱动管 TFT 不是一个理想电流源结构，其电流大小不是 V_{DATA} 和 V_{DD} 的压差的函数关系，因此在一般的饱和驱动 TFT 中不采用。本文后面提出的像素电路驱动方法可以使得驱动 TFT 工作在非饱和区，电流大小不依赖于 V_{DATA} 和 V_{DD} 的压差，因此可以采用(c)这种结构来设计像素电路，这样本文提出的像素电路结构就能兼容 N 型和 P 型的 TFT 材料，也就是说图中的(a)(c)都可以用同样的工艺流程加工。

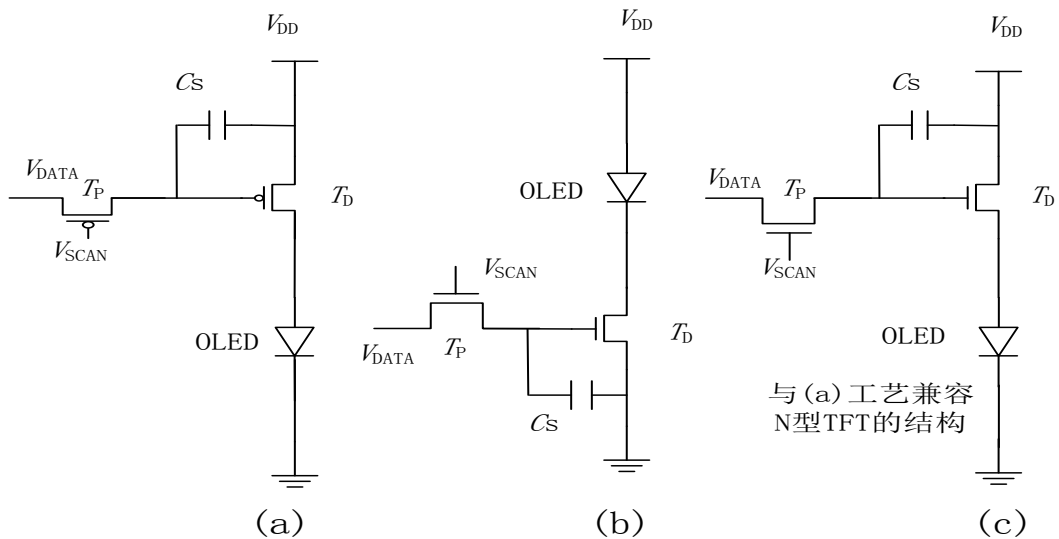


图 2-8 三种典型像素结构
Fig.2-8 Three Classic Pixel Circles

2.3.2 基本像素电路的直流分析

以图 2-8 (a)像素为基本结构，根据该电路的直流工作点的分析来讨论像素电路的电源电压如何确认。像素电路的电源电压确定，像素电路的静态功耗就确定了。

该电路工作分两个阶段，第一个是数据输入阶段，第二个是发光阶段。数据输入阶段时， V_{SCAN} 输入一个比较低的电平，让 T_P 导通， V_{DATA} 电压对电容 C_s 充电，当 T_D 的 Gate 电压等于 V_{DATA} ，充电停止。然后进入发光阶段，发光阶段 V_{SCAN} 输入一个比较高的电平，让 T_P 关闭，这样 T_D 的 Gate 电压一直就维持在 V_{DATA} ， T_D 是工作在饱

和区的 PMOS, V_{DATA} 决定了通过 OLED 的电流, 这样 OLED 就按照这个饱和电流发光, 一直到下一次刷新又开始这个循环, 新的 V_{DATA} 又到达 T_D 的 Gate。本文先介绍 T_D , C_s , V_{DD} , V_{SCAN} , T_p 设计。

V_{SCAN} 关闭期间, C_s 有漏电流, 只要在下一帧开始前, 电压下降的幅度不至于让电流减少一个灰度级, 可以认为显示图像没有损失。 C_s 越大, 电荷保持时间越长, 图像损失越小, 但是 C_s 越大, 占用面积大, 像素电路的开口率变小。

第一步是要先确定 OLED 工作电压、工作电流和亮度的关系, 由此确定最大电流 I_{OLED} 和最大 V_{OLED} 。这个可以根据 OLED 的 I-V 曲线, 得到电压和亮度流明的函数关系, 然后根据面板需要的亮度要求和预估的开口率就可以获得 OLED 需要发出的亮度, 从而得到 I_{OLED} 和 V_{OLED} 。然后根据得到 I_{OLED} 确定驱动 TFT 的宽长比。根据公式 2-1、器件迁移率、 C_{ox} 大小及 OLED 器件最大电流 I_{OLED} 可以确定驱动 TFT 的宽长比。其中 C_{ox} 大小可以由公式 2-2 确定。

$$I_{OLED} = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (2-1)$$

$$C_{OX} = \frac{\epsilon_o \epsilon_r}{T_{OX}} \quad (2-2)$$

其中的 V_{TH} , T_{ox} , μ , ϵ_o , ϵ_r , 都可以从 TFT 的模型中获得, 将这些数据一起带入公式 2-3 就可以求出宽长比, 再根据工艺长度、宽度的最小值来确定实际的长度和宽度即可。

$$\frac{W}{L} = \frac{\mu C_{OX} (V_{GS} - V_{TH})^2}{2 I_{OLED}} \quad (2-3)$$

实际面板设计中, 由于像素大小和面板的尺寸以及面板的分辨率有关系, 因此面板的像素面积是固定的, 比如一个像素面积大小是 $100\mu m \times 100\mu m$, 采用 RGB 方式显示, 每个颜色的像素面积平均只有 $100\mu m \times 33\mu m$ 。TFT 越大, 开口率越小, 发光效率就差, 因此缩小 TFT 的面积是 TFT 设计的关键技术。2-3 公式可以看到, 减少 OLED 的电流, 增加 TFT 的迁移率都有助于 TFT 面积的降低。这两点也是 AMOLED 材料发展的方向和动力。只有发光效率提高, TFT 驱动管的面积减少, 才有可能在小的面板上集成更多的像素。当给定了 TFT 材料和 OLED 材料以后, 对于电路设计人员来说, 只有通过提高 V_{GS} 来增加驱动电压, 这样可以通过比较小的 TFT 面积得到需要

的 I_{OLED} 。但是 V_{GS} 的增加会导致驱动电压 V_{DD} 的增加，这样面板的功耗会增加。另外面板的温度会随着增加，温度高会影响 TFT 的驱动电流，减少面板的寿命。

另外一个考虑因素就是面板 V_{DD} 电压的大小，由于 TFT 驱动管都工作在饱和区，因此电源电压可以通过下面的 2-4 获得。

$$V_{DD} > V_{OLED} + V_{DS}$$

$$V_{DS} = \sqrt{\frac{2I_{OLED}}{\mu C_{OX}(W/L)}} \quad (2-4)$$

根据这一情况，在实际设计 AMOLED 面板的时候，像素驱动电路的电源电压设计流程不是一个 bottom-up 的过程，而是一个 top-down 的过程，如图 2-9。

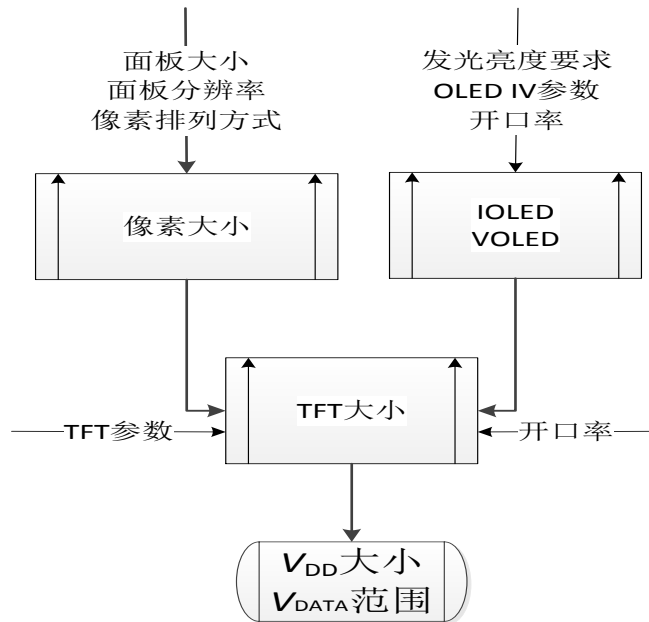


图 2-9 像素电路的电源电压设计流程

Fig.2-9 Pixel Power Supply Design Flow

2.3.3 基本像素电路的瞬态分析

像素设计的时候除了上面的驱动电压的设计，还包括了电路的瞬态特性的研究。假设面板的刷新频率为 f_F ，面板行数是 N ，可以得到最大每行的选择时间 T_R 。

$$f_F = \frac{1}{T_F}, T_R = \frac{T_F}{N} \quad (2-5)$$

当开关被选中时，驱动管 TFT 相当于一个等效电阻，OLED 相当于一个电容并联一个二极管，TFT 的开启电阻 R_{ON} 应该保证充电的速度足够快。当 OLED 上的实

际电压和理想电压相差 1% 可以认为稳定, 达到这个电压所用的时间常数应该在 $0.5T_R$ 之内。那么, 通过下面的计算可以得到最小的 TFT 的宽长比。

$$U(C) = U(0^+) + U_s(1 - e^{-\frac{1}{RC}t}) \quad (2-6)$$

公式中的 RC 参数的中的电阻是 TFT 在 ON 状态下的等效电阻 R_{ON} , 可以由公式 2-7 获得, 电容就是 OLED 寄生的等效电容和 TFT 管的寄生电容, 用 C_{LT} 表示, C_{LT} 可以由器件的测试数据获得, 在仿真模型里面一般包含这个电容。

$$R_{ON} = \frac{1}{\mu C_G \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})} \quad (2-7)$$

公式 2-6 中, 最差情况下 $U(0^+)$ 为 0, 在 $0.5T_R$ 时间内达到 99% 的理想电压。那么

$$\frac{1}{C_{LT} \times R_{ON}} \times \frac{T_R}{2} = \ln(100) \quad (2-8)$$

再结合公式 2-8 可以得到驱动 TFT 的宽长比最小值:

$$\frac{W}{L} \geq \frac{2C_{LT} \times \ln(100)}{T_R} \times \frac{1}{\mu C_G (V_{GS} - V_{TH})} \quad (2-9)$$

根据 2-9 这个方程同样可以决定开关管 T_P 的 TFT 的宽长比, 只是 C_{LT} 变为了 C_S 。 V_{GS} , V_{TH} , C_G 都是开关管 T_P 的 TFT 的参数。

2.4 本章小结

本章首先介绍了组成 AMOLED 像素电路的两项关键技术, 即 OLED 的技术和 TFT 技术。本章首先介绍了 OLED 的电学特性, 介绍了 OLED 电流电压和亮度的关系, 介绍了 OLED 材料的 Aging 问题, 通过电学特性的介绍为后面的电路设计做铺垫。对于 TFT 技术, 介绍了 4 种常用的材料, 分析了每种材料的优缺点, 通过这个介绍, 为后面像素电路设计和驱动方法弥补材料的缺陷提供了依据。接着介绍了常见的 N 型和 P 型 TFT 材料的 2T-1C 像素电路, 从工艺加工流程上说明了两者不兼容, 提出了一种 N 型的 TFT 材料的 2T-1C 像素电路, 保持和 P 型材料 TFT 材料加工流程的兼容, 这是本文提出的低功耗像素电路的特点之一, 为本文后面讨论做铺垫。最后分析了像素电路直流特性和瞬态特性, 介绍了像素电路中的物理参数和电学参数是如何设计的。

第三章 仿真与分析方法

3.1 SPICE 电路仿真

AMOLED 像素电路和驱动方法的仿真分为电路级仿真和系统级仿真，常规的电路级仿真一般采用 Hspice，但是 Hspice 不提供新型材料 TFT 的仿真模型，现在工业界和学术界普遍采用 SmartSpice 来做电路级仿真，其仿真流程和环境与 Hspice 保持兼容。SmartSpice 是 Silvaco 公司开发的一款多用途的电路仿真软件，它可以在 Unix 和 Windows 两种操作系统下运行，还具有多种输入形式和输出形式。SmartSpice 用于设计复杂的高精度模拟电路、模拟混合信号电路，单元库特性表征等。SmartSpice 与 HSPICE 和 SPECTRE 兼容，包括网表、模型、分析功能和结果观察。该工具支持各种 SPICE 模型集合，包括传统技术比如双极型，CMOS 和其他新技术，比如 TFT，SOI，HBT，FRAM，FINET 等。该工具还结合 Verilog-A 的使用，提供开放的模型开发环境和广泛的模拟信号行为级仿真能力，本文后面仿真需要采用 TFT 模型和 Verilog-A 描述 OLED 行为，因此选用 SmartSpice 作为本文的电路级仿真工具。现在 SmartSpice 提供的 TFT 仿真模型包括 LEVEL=35 非晶硅(amorphous silicon) TFT 模型和 LEVEL=36 多晶硅(polycrystalline silicon) TFT 模型。多晶硅 TFT 模型对应的等效电路见图 3-1。对于金属氧化物半导体模型(metal oxide semiconductor)和有机半导体模型(organic thin film transistors)还没有适合的模型提供，学术界现在用简单的模型来替代，比如 SPICE LEVEL=3 来模拟 a-IGZO(金属氧化物半导体) TFT 模型[33]，为了快速分析，也有用 SPICE LEVEL=1 来替代各种 TFT 模拟的，只要在工作区域内 fitting 的比较好，对于一些结论的确定是完全可行的方法。

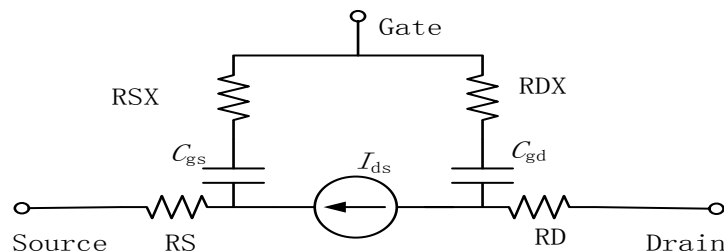


图 3-1 多晶硅 TFT 等效电路

Fig.3-1 Equivalent Circuit for Polycrystalline Silicon TFT

在每种模型中都有两个主要的参数，一个是迁移率（Mobility），还有阈值电压（Threshold Voltage），论文一般讨论问题都涉及到这两个参数。在 LEVEL=36 模型中，MU0 表示迁移率，VTO 表示阈值电压，多晶硅 TFT 模型的常见参数介绍见表 3-1。

表 3-1 多晶硅 TFT 模型常用参数

Table 3-1 Paramters of TFT Model for Polycrystalline Silicon

Name	Unit	Description
ASAT		饱和电压 Vsat 比例常数
CGDO	F/m	栅漏的覆盖电容
CGSO	F/m	栅源的覆盖电容
DASAT	1/°C	ASAT 温度系数
DVT	V	开启电压和域值电压差
DVTO	V/°C	VTO 的温度系数
LASAT	M	ASAT 的沟道长度系数
LKINK	M	曲翘效应常数
MU0	cm ² /Vs	高电场电子迁移率
MU1	cm ² /Vs	低电场电子迁移率
RD	μ	漏极电阻
RDX	Ω	和 CGD 串联的电阻
RS	μ	源极电阻
RSX	Ω	和 CGS 串联的电阻
TNOM	℃	参数测量温度
TOX	m	薄氧化层厚度
VKINK	V	曲翘效应电压
VON	V	开启电压
VTO	V	零偏压的阈值电压

3.2 Matlab 系统仿真

对于电路的系统级仿真，本文采用 MATLAB 工具进行，MATLAB 是 Matrix 和 Laboratory 两个词的组合，是由美国mathworks公司发布的主要面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境，它将数值分析、矩阵计算、科学数据可视

化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中,为科学研究、工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案。

本文仿真中需要使用 MATBLIB 的几个重要功能,其中包括 BMP, JPEG 等各种格式的图像数据的读取和写入。MATLAB 提供了 `imread` 函数和 `imwrite` 函数来实现,比如下面这段代码,就可以把一副图像在程序中生产 R, G, B 三个图像的矩阵。

```
im_data=imread(filename);  
R=im_data(:,:,1);  
G=im_data(:,:,2);  
B=im_data(:,:,3);
```

通过这个函数可以得到图像的灰度级,然后通过这个灰度级可以和 OLED 的驱动电流对应起来,也就可以和 OLED 的其他电学参数建立联系。

另外,为了获得 OLED 的电学参数,需要测试很多实验数据。当需要研究两个变量之间的关系时,经常要用到曲线拟合, MATLAB 提供了 `cftool` 工具。曲线拟合不仅能给出拟合后的关系式,还能用图形直观的展现出变量之间的关系。本章后面就要用 MATLAB 拟合 OLEDd 的 IV 曲线。

此外,本文主要采用 MATLAB 完成了几项系统仿真,后面第五章到第七章的系统仿真都是在 MATLAB 中进行得。比如第五章经常在 MATLAB 中修改电源电压、阈值电压或者曲翘电压等参数,然后输出一个网表,再调用 SmartSpice 仿真, MATLAB 再读入仿真结果数据,取出需要的数据结果。然后再修改参数,再输出一个网表,再仿真,通过这个方法可以获得一系列的电路参数变化后的仿真结果。下面这段代码就是修改曲翘电压仿真系统电流的一段主要代码,这部分代码介绍了 MATLAB 工具是如何进行系统仿真的。这段代码描述了 MATLAB 如何修改仿真网表的参数,如何输出仿真文件,如何调用 SmartSpice 仿真,如何读入仿真结果。

```
netlist=['Pixel circuit(2T1C)\n'...  
        ['+vkink      =', num2str(Kink), '\n']... //修改仿网表的曲翘效应电压  
        '.END\n'];  
fid = fopen('D:\matlab\TFT_COMP\Kink_Shift_2T1C\freq_comp.in','w');  
fprintf(fid, netlist);  
fclose(fid); //输出仿真网表  
cd D:\matlab\TFT_COMP\Kink_Shift_2T1C  
!smartSpice.lnk -b freq_comp.in -o freq_comp.out-//调用 smartSpice 仿真
```



```
file = 'D:\matlab\TFT_COMP\Kink_Shift_2T1C\freq_comp.out';
I = read_output(file); // 读入仿真后的数据
```

3.3 TFT 仿真模型

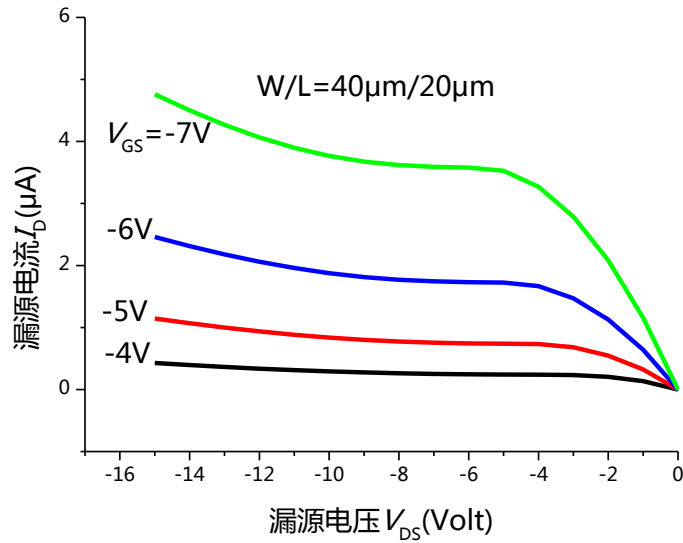


图 3-2 P 型低温多晶硅电流电压曲线
Fig. 3-2 Current and Voltage Curve of P Type LTPS

图 3-2 是本文仿真采用的 P 型低温多晶硅 TFT 的电流电压曲线,这是 LEVEL=36 的 TFT 模型。图中最上面是 V_{GS} 固定为 -7V 的时候电流与 V_{DS} 电压关系,当 V_{DS} 绝对值大于 6V,电流出现饱和,输出电流几乎维持不变,一直到 V_{DS} 绝对值等于 10V,这段电压期间的电流上升是沟道区饱和调制效应。当 V_{DS} 绝对值电压大于 10V 以后,开始出现曲翘效应[27-28],电流开始急剧上升。曲翘效应的位置和模型中 VKINK 等参数有关,设置不同数值可以得到不同曲线。本章后面仿真采用的 LTPS 就是这个模型。

3.4 OLED 仿真模型

1) 基于 OLED 物理结构的模型

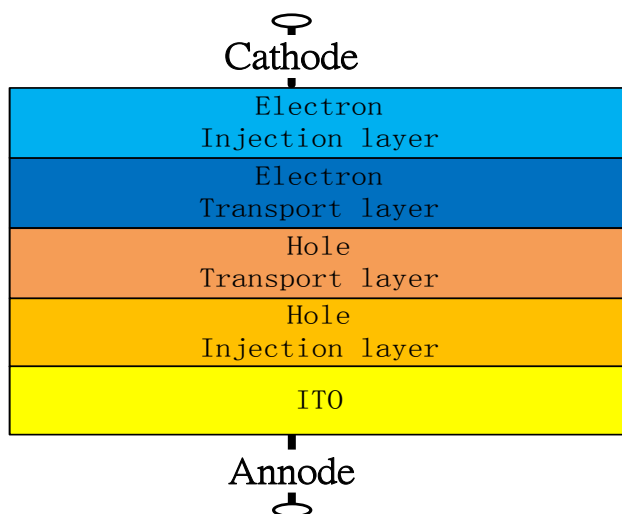


图 3-3 OLED 的横切面
Fig.3-3 Cross Section of OLED

图 3-3 是 OLED 的基本结构, 在制造的时候首先在玻璃或者塑料上面覆盖一层透明的 ITO 作为阳极, 再在这个基础上覆盖空穴注入层, 然后是空穴传输层, 接着是电子传输层, 最后是电子注入层。这些层总共加起来也就是 $0.1\mu\text{m}$ 左右。当电压加在 OLED 的正负两级的时候, 电流穿过这些层, 就可以发光。该结构中的每一层在物理上可以等效为电容并一个电阻, 然后并上一个串联了电阻的二极管方式, 如图 3-4(a), 电容 C 代表了不同层间的电容, $R1$ 是比较大的串联电阻, 表明了电子和空穴在 OLED 中的每种材料中的迁移率。二极管 D 代表了不同层的材料形成的二极管性质的物理特性, $R2$ 表示层和层间接触面的电阻。最上面的 R 表示 ITO 阳极和外部的电阻。这个物理结构的并不是实际使用的 spice 模型, 这里的 $R1$, C , $R2$, D 的参数比较难以准确的测量或者推导, 而且这样的结构在 SPICE 仿真中会遇到 DC 和 TRAN 分析的时候不收敛的问题。因此有人提出了 2 个二极管并联结构的模型[34], 如图 3-4(b), 两路二极管分别表示了低 V_{OLED} 和高 V_{OLED} 下的 I-V 曲线, 但是该模型在大 V_{OLED} 下的电流仍然有 8% 的误差, 于是又有人提出了基于物理结构的模型[35], 如图 3-4(c)。后面又有人修改了这些模型。这里就不一一列出。

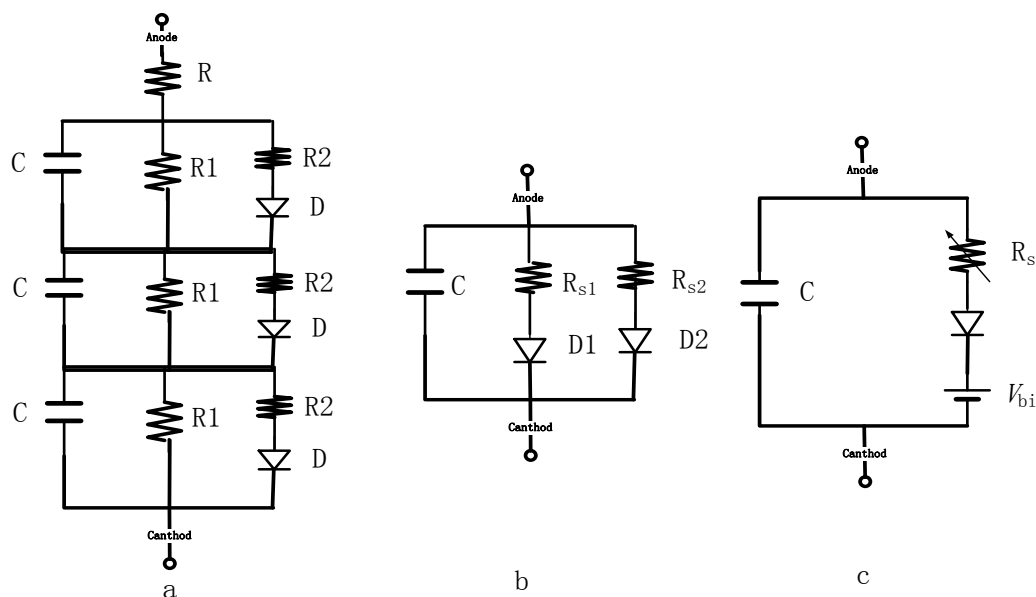


图 3-4 二极管结构的 OLED SPICE 模型
Fig.3-4 Diode Based SPICE Model of OLED

2) MATLAB 拟合的 OLED 模型

OLED 模型的建立一般是基于物理结构，从理论的角度来建立一个准确模型。实际做 OLED 的电路仿真的时候，尤其是做功耗这种初步估计的时候，只要模型和实际的 I-V 曲线 fitting 的比较，可以不采用基于物理理论的模型，完全可以用数学的方法来建立模型。根据实际的 I-V 的散点图，采用一个函数来模拟曲线，就可以模拟出来一个 VerilogA 的模型，在定性分析系统性能和快速分析方面很有帮助。只要 fitting 效果好，完全能够反映实际 OLED 的效果。比如根据前一章的蓝色 OLED 的散点图，本文可以通过函数模拟这条曲线。如下两个向量是蓝色的 OLED 对应的离散点的电压电流数据。

```
Current_Blue=[0.102813 0.203266 0.302847 0.401866 0.500468 0.598741 0.696740
0.794505 0.892066 0.989446 1.08666 1.18373 1.28067 1.37748 1.47418 1.57077 1.66726
1.76365 1.85995 1.95617]
```

```
Voltage_Blue=[5.164455752 6.522363737 7.476679746 8.237311105 8.880198732
9.442548681 9.945702794 10.40317544 10.82412992 11.21509971 11.58092659
11.92531025 12.25114892 12.56076039 12.85603076 13.13851788 13.40952515
13.67015536 13.9213509 14.16392417]
```

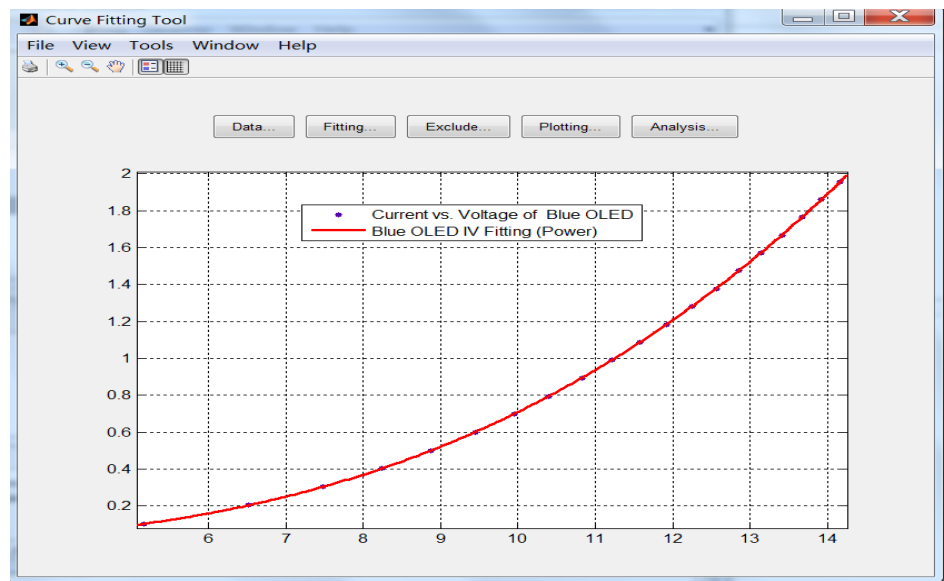


图 3-5 蓝色 OLED 的拟合曲线
Fig.3-5 Blue OLED Fitting Curve

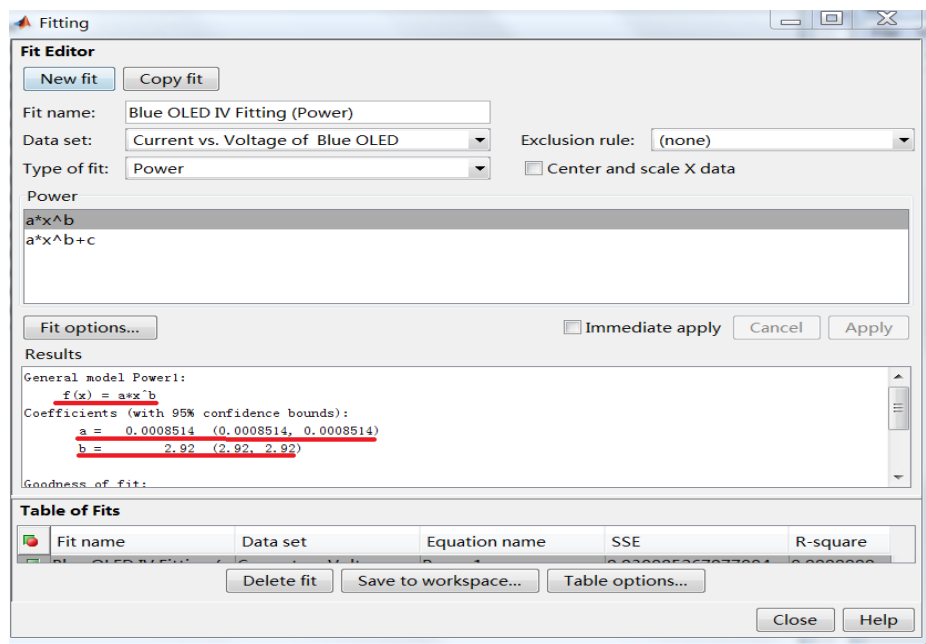


图 3-6 蓝色 OLED 的拟合参数
Fig.3-6 Blue OLED Fitting Parameter

把数据存入工作空间后，在命令窗口中输入 `cftool`，回车运行。选择拟合的曲线类型，一般是线性拟合，指数曲线，高斯曲线，平滑曲线等，根据需要选择。选择完

后会自动完成拟合，并且给出拟合函数表达式。图 3-5 MATLAB 拟合出来的曲线数据，图中的点是离散数据，红色的曲线是 fitting 出来的指数曲线。

除了采用指数形式来做的拟合，本文也用其他数学函数来拟合，比如用二次函数，二次函数的形式可以把 OLED 的电流电压曲线用饱和区 MOS 管的电流方程的形式表达，图 3-7 显示了两种方式拟合的效果图。

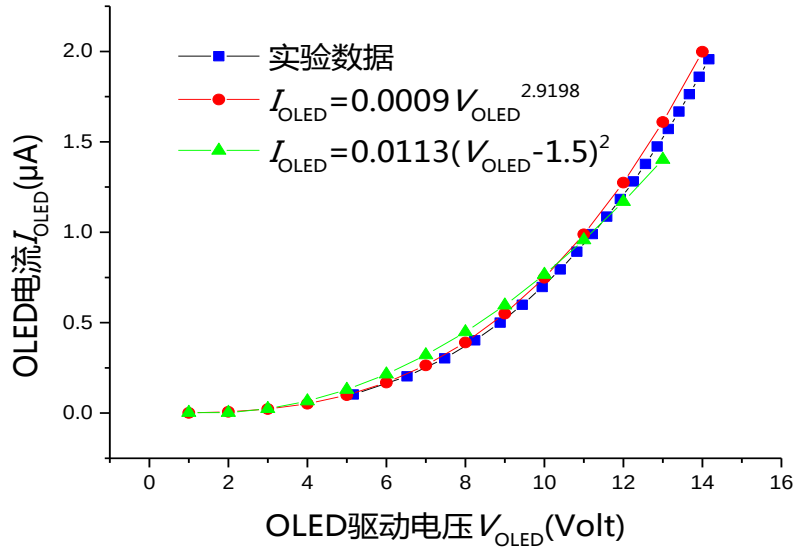


图 3-7 基于不同数学函数拟合的 OLED 模型的电压电流曲线

Fig.3-7 Volatage and Current Curve of Different Math Equition Model of OLED

3) 基于驱动管 TFT 的等效二极管模型

根据二次函数形式的模型可以进行仿真，公式中的平方内减去的常数等同于晶体管的 V_{TH} ，OLED 在 V_{TH} 以下的时候，电流为 0，和实际的 OLED 略有误差，但是通常 OLED 在某个低电压下的时候，人眼是无法识别这个微弱亮光的，在这个电压以下默认为不发光，该电压就可以设定为模型中的 V_{TH} ，该模型的二次项系数可以等效到驱动管的 TFT 的宽长比，这样像素电路仿真中就全部是 TFT，通过宽长比的简单比较，就可以比较简单的获得 TFT 驱动电路需要的参数。

本文把这种改进的 OLED 模型称为基于 TFT 的等效二极管模型，该模型的数学形式是：

$$I_{OLED} = A(V_{OLED} - V_{TH})^2 \quad (3-1)$$

该模型是很多研究人员采用的结构形式，本文要突出的特点是：

- 以驱动管 TFT 作为模型基础， A 和 V_{TH} 随驱动管变化而变化
- V_{TH} 决定于 OLED 的最低驱动电压，随 OLED 模型变化而变化
- 参数 A 反映了驱动管 TFT 的宽长比，随驱动管的模型变化而变化

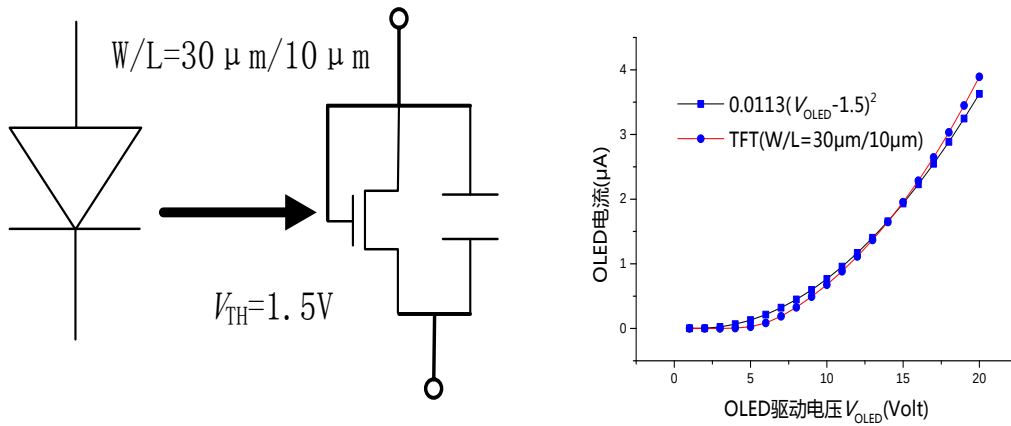


图 3-8 基于 TFT 的等效二极管模型的电压电流曲线

Fig.3-8 Volatage and Current Curve of Equivalent TFT Diode OLED Model

根据该方法，本文把 OLED 等效到 TFT 宽长比上。结合 TFT 曲线，可以得到该 OLED 在这种 TFT 下的等效宽长比，如图 3-8。蓝色方块是使用二次函数的曲线，蓝色圆圈是宽长比为 $30\mu\text{m}/10\mu\text{m}$ 的 TFT 的曲线，通过这个曲线，可以大概了解到使用的 OLED 的等效电学特性大概就是 $W/L=30\mu\text{m}/10\mu\text{m}$ 的 TFT。如果换了一种 TFT 材料，或者 TFT 材料的特性发生了变化，该模型也就根据新的 TFT 材料发生变化。

针对不同的 OLED，本文可以得到每种 OLED 的等效 TFT 管，如图 3-9，描述了 RGB 的 OLED 的等效 TFT。

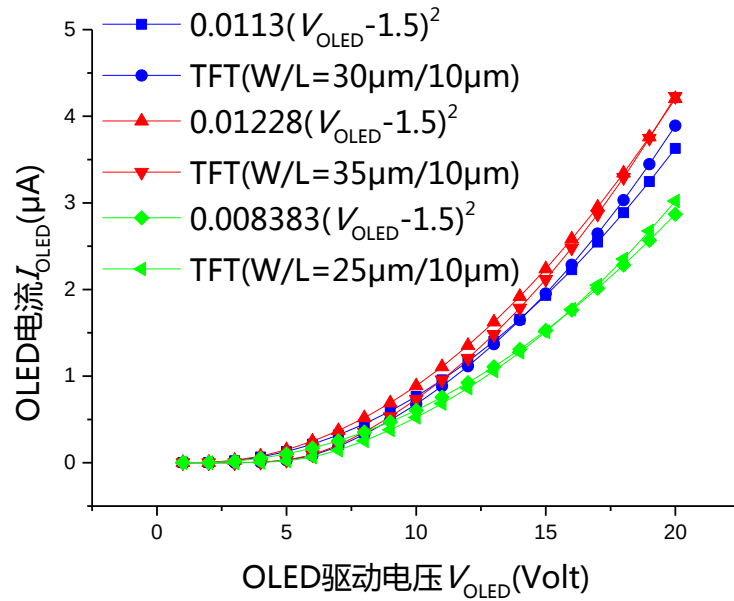


图 3-9 RGB TFT 等效二极管模型的电压电流曲线

Fig.3-9 Volatage and Current Curve of RGB TFT Diode OLED Model

3.5 本章小结

本章首先介绍了本文电路仿真和系统仿真采用的工具，根据本文仿真需要，介绍了这些工具的相关功能和函数。接着介绍了常用的 TFT 模型的等效电路和模型中一些重要参数的含义。接着提出了产生 OLED 模型的方法，利用 MATLAB 程序拟合了不同数学形式的 OLED 模型，同时提出了一个把 OLED 等效为驱动 TFT 的模型，这些仿真工具和模型后面几章会使用到，后面不再详细介绍。

第四章 AMOLED 显示的功耗分析与降低功耗的方法

4.1 AMOLED 面板的功耗构成

前一章介绍了 2T-1C 像素电路的基本工作原理,本章针对这个结构讨论 AMOLED 像素电路的功耗组成部分和降低功耗的方法,本章根据像素电路结构把功耗分成两类,分别列出了这两类功耗的优化方法。

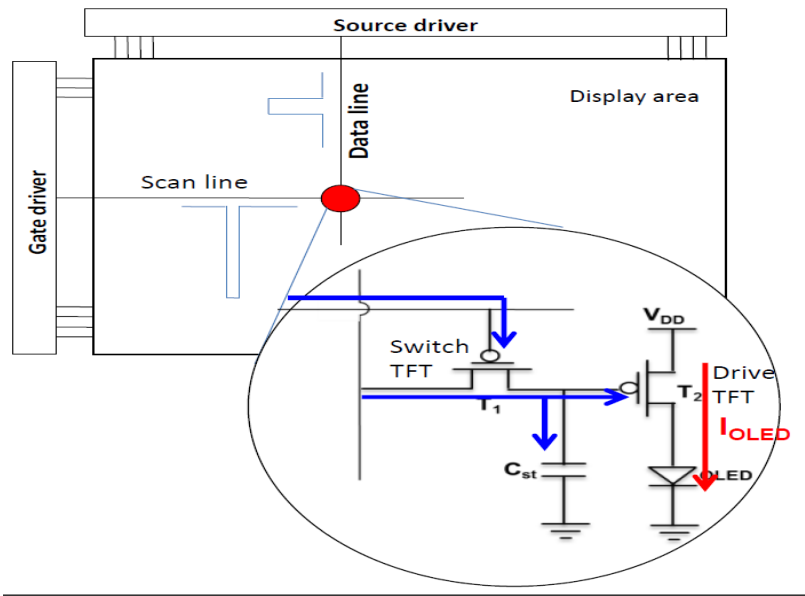


图 4-1 AMOLED 面板功耗组成
Fig.4-1 Power Constitution in AMOLED Panels

如图 4-1 所示, AMOLED 面板的功耗包含了两个部分。第一部分是动态功耗,就是小图中左边两条蓝色电流方向的部分,包括了图中的 Source Driver 驱动的数据线寄生电容, C_{ST} 存储电容, 驱动管的 TFT 的 Gate 电容。动态功耗还包括了由 Gate Driver 驱动的开管 TFT 的 Gate 电容和开关线上的寄生电容。面板的动态功耗的描述是公式 4-1, 该公式中的 f 是图像刷新的帧率, C 是面板每个节点的寄生电容, V 是每个节点的电压波动范围。数据线和开关线在面板中都比较细, 同时存在一定的阻抗。对每个像素编程的过程就是对这些电容充放电的过程, 动态功耗是和频率相关的,

频率越高功耗越大。为了提高显示效果，现在面板的刷新频率越来越高，比起传统的 LCD，AMOLED 的刷新频率一般在 100HZ 以上，这也是 AMOLED 的技术特色之一。因此动态功耗的降低主要依赖于信号电压和开关电压的降低或者各种电容的减少来实现。电容包括了连线的寄生电容，晶体管的 Gate 电容和存储电容 C_{ST} ，这就需要在版图设计上减少各种走线的寄生电容，电路设计上减少开关线或者数据线以及反馈数据线的数目，另外降低数据线和反馈数据线的电压幅度也可以降低动态功耗。如果可以提高开关管的开关比，可以有助于降低开关线上的电压范围，降低动态功耗。

$$\text{动态功耗: } P_{dynamic} = \sum CV^2 f \quad (4-1)$$

$$\text{静态功耗: } P_{static} = \sum V_{DD} \times I_{OLED} \quad (4-2)$$

静态功耗是小图中右边红色电流方向部分，每个像素发光时候该电流从电源经过驱动 TFT 管，再经过 OLED 到地，该功耗在发光阶段一直存在，静态功耗的大小和刷新频率没有关系，静态功耗的描述是公式 4-2。

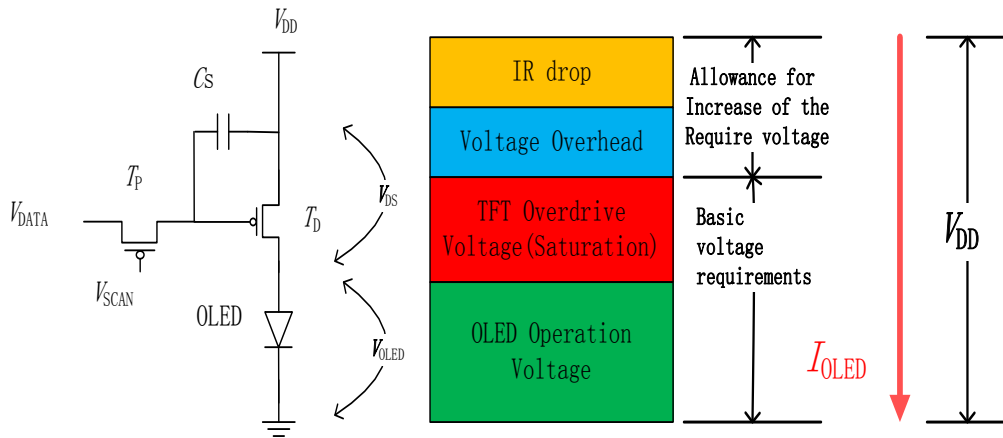


图 4-2 像素电路的驱动管电源电压组成

Fig. 4-2 Components of the Driving TFT Power Supply

每个像素的静态功耗就是通过 OLED 的电流乘以电源电压，OLED 的电流和显示的亮度直接相关，但是电源电压和显示亮度没有直接关系，因此在电源电压上考虑优化是可以降低每个像素电路的静态功耗的。图 4-2 介绍了电源电压 V_{DD} 的构成。本文把电源电压 V_{DD} 分为四个部分。第一部分是驱动 OLED 需要的电压 V_{OLED} ，该电压是 OLED 最大亮度时候的驱动电压，不同颜色的 OLED 的驱动电压是不同的，该电压值和 OLED 材料，需要的发光强度和 OLED 面积有关系。第二部分是驱动管 TFT 的 V_{DS}

电压，像素电路设计的时候通常把驱动管 TFT 设计成一个理想的压控电流源，这样需要驱动 TFT 工作在饱和区，其电流由 Gate 电压决定，通过设置不同的 Gate 电压获得不同的 I_{OLED} 电流，如果驱动 TFT 处于线性区域，电流不仅决定于 Gate 电压，还会受到电源电压的影响，这样靠控制 Gate 电压是无法获得理想的压控电流源，因此为了获得理想的压控电流源，电源电压普遍设计的比较高。第三部分是过驱动电压 V_{overhead} ，该电压的目的是补偿驱动管 TFT 阈值电压漂移以后 TFT 任然工作在饱和区， V_{overhead} 补偿了这部分电压要求。第四部分是补偿电源电压的 IR Drop，面板的 V_{DD} 直接接触的材料是 ITO，ITO 的导电面电阻在 $300 \sim 500 \Omega/\text{square}$ ，由于像素电路的电源位置离面板边界上的电源位置有一定距离，对于尺寸越大的面板，中心像素的 V_{DD} 和边缘像素的 V_{DD} 有差别，为了防止 IR Drop 引起的 TFT 由饱和区到线性区的退化，要求电源电压需要补偿这个压降，公式 4-3 描述了像素电路的电源 V_{DD} 的构成。

$$V_{\text{DD}} = V_{\text{OLED_Max}} + V_{\text{DSat_Max}} + V_{\text{overhead}} + V_{\text{IR_Drop}} \quad (4-3)$$

该公式中的 $V_{\text{DSat_Max}}$ 和 V_{overhead} 和 $V_{\text{IR_Drop}}$ 对 OLED 发光没有贡献，只有 $V_{\text{OLED_Max}}$ 是施加到 OLED 上用于发光的电压，因此，本文定义了一个表示 AMOLED 电源效率的参数 η 。该参数的计算方法见公式 4-4，这个比例关系也是像素电路发光功耗占整体静态功耗的比例，该比例越高说明功耗利用率越高。像素电路的电源电压固定以后，OLED 发光亮度的大小决定了这个效率，当 OLED 处于最大发光强度下的时候，效率最高。当 OLED 的发光强度低的时候，电源效率最低。

$$\eta = \frac{V_{\text{OLED}}}{V_{\text{DD}}} \quad (4-4)$$

最简单的像素电路图是第二章提到的 2T-1C 电路，像素电路设计包括了 T_{D} ， T_{P} ， C_{S} 三个部件的设计和电源电压 V_{DD} 的设计，功耗和这些参数都是相关的。而这些参数设计之间是有相互约束关系的。下面通过第三章介绍的 TFT 和 OLED 模型进行仿真，得到功耗和这些相关信息的关系。

4.2 静态功耗分析和优化方法

像素电路的静态功耗决定于驱动管 T_{D} 的电源电压的大小，如图 4-3。最大 OLED 的电流是由 OLED 的发光效率决定的，不能靠电路来优化电流，静态功耗的优化主

要就是考虑降低驱动管 T_D 的 V_{DSat_Max} 和 $V_{overhead}$ ，以及降低电源线的 IR_Drop。

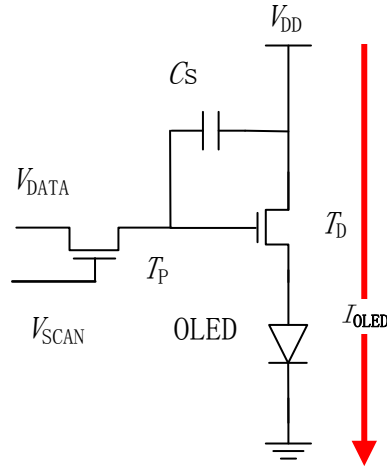


图 4-3, 静态态功耗构成
Fig.4-3, Static Power Constitution

本文采用前一章蓝色 OLED 的模型来设计驱动 TFT，根据前章的模型简化，分析电源电压和 OLED 驱动电压以及驱动管 TFT 宽长比的关系的时候，模型就可以简化为图 4-4。

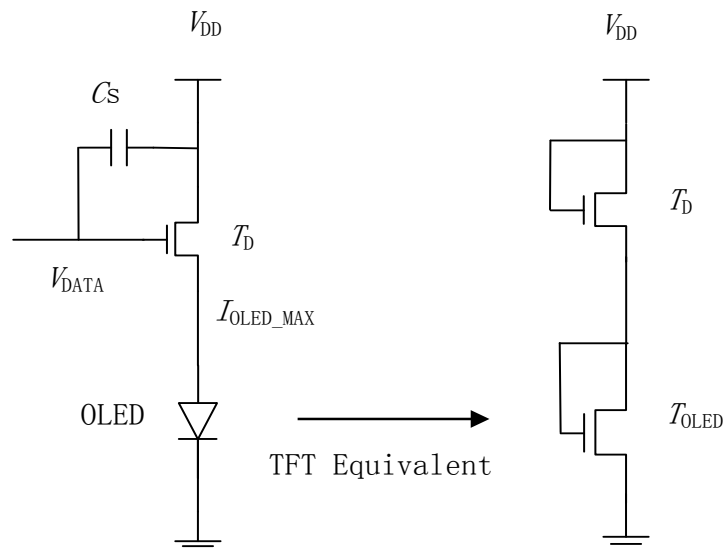


图 4-4, 电源电压分析的简化像素电路结构
Fig.4-4, Reduce Pixel Circuits for Power Supply Analysis

根据图 4-4 的简化的像素电路结构，驱动管 TFT 和 OLED 的电流是一样的，可

以获得公式 4-5，从这个公式可以看出 V_{DD} 和驱动管的宽长比相关的。当驱动管 T_D 的宽长比增大的时候， V_{DD} 电压可以降低，这二者之间关系可以做一个仿真测试。

$$(V_{OLED} - V_{TH})^2 / (V_{DD} - V_{OLED} - V_{TH})^2 = (W/L)_{TD} / (W/L)_{OLED} \quad (4-5)$$

仿真先设置驱动 TFT 的宽长比，由此来确认电源电压和驱动 TFT 的 Gate 电压范围，因此设计驱动管 T_D 宽长比实际上包括了 V_{DD} 和驱动管 T_D 的 Gate 电压范围这三个参数的设计，这三个参数是不能独立分开设计的。TFT 的宽长比越大，电源电压越小，面板的功耗也越小。驱动管 TFT 速度越快，电源电压会减小，这也就是产业界最求 TFT 的迁移率的动力。

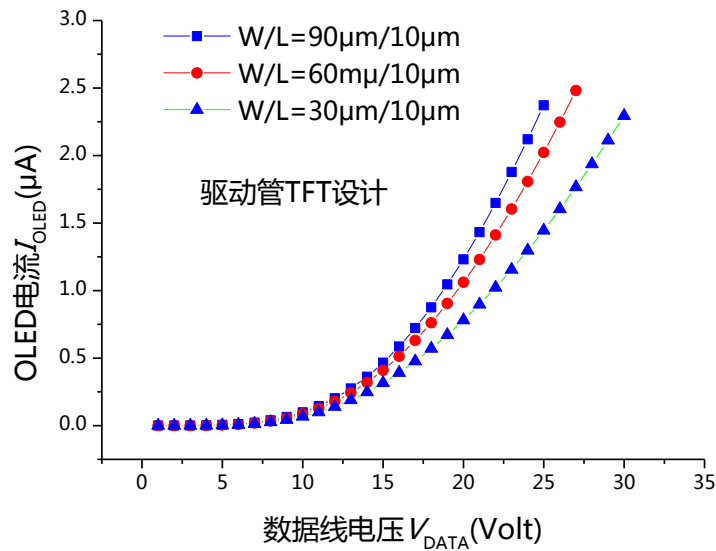


图 4-5，不同尺寸驱动管的驱动电压和 OLED 电流曲线
Fig.4-5, Driving Volatage and Current Curve for Different TFT Size

从图 4-5 的仿真可以看到，增加驱动管 TFT 的大小可以降低电源电压。驱动管 TFT 的大小和 OLED 的关系可以从 OLED 的等效 TFT 二极管的宽长比反映出来，同样的 OLED 在速度快的 TFT 下等效宽长比小，在速度慢 TFT 下的等效宽长比大，这可以比较快速的判断该 TFT 和 OLED 是否适合设计的面板。比如一个 OLED 的等效 TFT 的面积大于或者等于了像素的面积，这个 TFT 材料就不适合驱动这个 OLED 了，需要提高 TFT 的迁移率或者提高 OLED 本身的在同样电流密度下的发光效率。

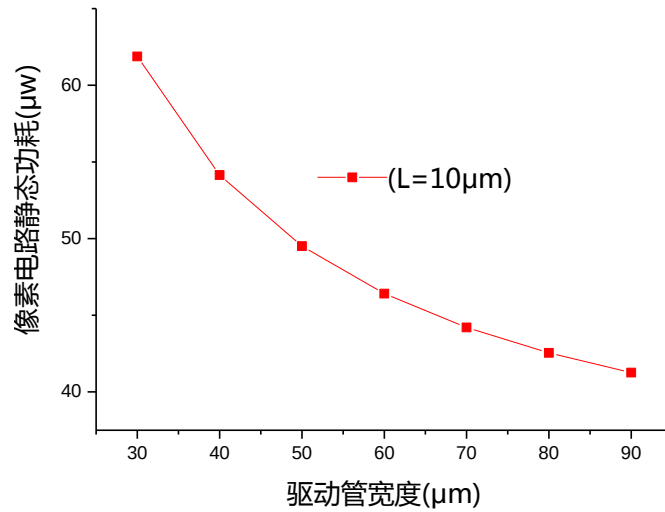


图 4-6, 像素电路静态功耗和驱动管尺寸的曲线

Fig.4-6, Pixel Circuits Static Power and TFT Size Curve

通常像素电路设计需要知道电源电压和驱动管尺寸的关系图,这同样可以用仿真工具完成这个工作。仿真的时候设置不同宽度的 TFT,然后仿真这个电路下饱和电流的出现在什么电压下,就可以获得宽长比与像素电路的功耗关系。图 4-6 给出了仿真结果,该图列出了驱动管 T_D 的不同宽度和功耗的关系。从该曲线可以比较容易看出斜率为-1 的位置是宽度 W 为 60 的点。通过这个曲线可以发现,驱动管 TFT 的宽长比如果大于了 $60\mu\text{m}/10\mu\text{m}$,电压降低比较慢,功耗降低也比较小。驱动管 TFT 面积影响了开口率,根据这个曲线,设计者就可以在功耗和开口率之间做权衡。在开口率满足显示亮度的情况下,通过增加驱动管面积来降低像素电路的静态功耗。

4.3 动态功耗分析和优化方法

如图 4-7,动态功耗包括了存储电容 C_S 和开关管 T_P 的 Gate 电容两个部分的充放电过程。 C_S 在开关管 T_P 打开期间充电到 V_{DATA} ,在开关管 T_P 关闭期间需要保持 V_{DATA} ,维持 OLED 的发光需要的电压。 C_S 的电容大小一般比驱动管 T_D 的 Gate 电容大很多,在计算这个节点的动态功耗时,有时候忽略驱动管 T_D 的 Gate 电容,根据前面的动态功耗的公式, C_S 的大小决定了该点动态功耗的大小。开关管 T_P 的 Gate 上的电容也

包含在动态功耗中，Gate 上的连线是字线，由于字线的寄生电阻、电容比较大，而且开关电压在每个周期波动范围都是满幅度的，这部分动态功耗也需要分析。

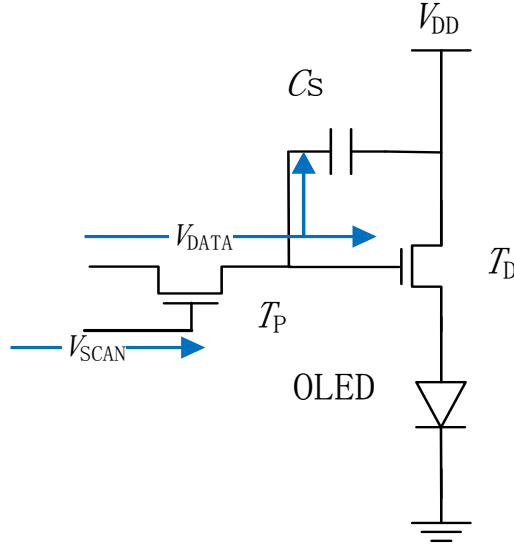


图 4-7，动态功耗构成
Fig.4-7, Dynamic Power Constitution

AMOLED 产品在使用的时候 T_P 打开时间很短，对于高清幅面，一般是 μS 数量级，这就要求 T_P 在打开时间电阻尽可能小，而 C_S 也尽可能小，这样就有可能在较短的时间内对 C_S 完成充放电，减少动态功耗。开关管 T_P 关闭时间比较长， V_{DATA} 会通过 T_P 开关管放电，如果 V_{DATA} 变化导致显示变化了一个灰度级，就认为图像有损了。这就要求的 T_P 关闭电阻大， C_S 也尽可能大，这样就能减少漏电了。从上面可以看出这两个的设计应该是一个折中的选择。根据这样的要求，可以得到式 4-6 和式 4-7。

$$V_{DATA} \times C_S < I_{on} \times T_{on} \quad (4-6)$$

$$\Delta V_g \times C_S > I_{off} \times T_{off} \quad (4-7)$$

ΔV_g 是为 OLED 实现每个灰度所需要的驱动管 T_D 的最小的 Gate 上的电压差。这个数据可以通过仿真 I-V 曲线获得每个灰度需要的 Gate 电压来获得。 V_{DATA} 这里是最值 Gate 电压和最小 Gate 电压的差值，这里用 V_{DATA} 来表示而已。这样可以得到下面这个参数：

$$I_{on}/I_{off} > V_{DATA} \times T_{off} / \Delta V_g \times T_{on} \quad (4-8)$$

公式 4-8 的这个参数决定了开关管 T_P 的最小开关比，从公式可以看出，面板的

像素电路的灰度级越大，开关管的开关比就越大，面板的尺寸越大，刷新频率越大，开关比也越大。这也是各个厂商设计驱动管和开关管的时候采用不同的材料和结构的原因，开关比大是 IGZO 这种背板技术的显著优势。提高开关比的最简单的电路实现方式就是增加开关管的开与关之间的压差。由于开关管的 Gate 本身也有电容，增加了开关电压也增加了这部分的动态功耗。

对于减少动态功耗，本文先讨论存储电容 C_s 节点上的功耗，该节点的动态功耗等于公式 4-9， V_{data} 是由后面驱动管的需求确定的，这不能依靠电路优化来降低， C_s 的大小由公式 4-7 确定，设计的时候一般采用满足公式 4-7 的最小的 C_s 。电压是由驱动管需要的电路决定的，因此这个节点的动态功耗无法独立优化。

$$P_{dynamic_storage} = C_s V_{data}^2 f \quad (4-9)$$

另外，开关管 T_p 的 Gate 电压也包含在动态功耗中，如公式 4-10，开关管 T_p 的 Gate 的打开时间比较短，屏幕的行数和刷新率越高，打开时间越短。要在短的时间把 V_{DATA} 传输过去，要么增加开关管 T_p 的 Gate 电压 V_{scan} ，这样可以减小开关管的面积，降低开关管电容 C_{switch} 。要么增加开关管 T_p 的宽长比，这样可以降低开关电压 V_{scan} ，但是增加了开关管电容 C_{switch} ，这两者之间需要权衡一下。

$$P_{dynamic_switch} = C_{switch} V_{scan}^2 f \quad (4-10)$$

开关管 T_p 的 Gate 上的这个动态功耗也可以进行如下的分析，公式 4-11 是开关管的等效开关电阻。为了满足开关管在短时间内能够对存储电容完成从放电，这个等效电阻需要足够小。减小这个电阻要么增加开关管的宽度 W ，要么增加开关电压 V_{GS} ，由于电阻和这两者都是线性关系，等比例增加宽度和电压是一样的效果，但是功耗和面积是线性关系，和电压是平方关系。因此降低电压，增加面积比升高电压，降低面积的功耗要小，虽然这两侧的等效电阻一致。

$$R_{ON} = \frac{1}{\mu C_G \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})} \quad (4-11)$$

如何考虑这个关系，本文做一个动态功耗的仿真。比如面板是 500 行像素，100HZ 刷新频率，打开时间占一个周期的 50% 的时间， V_{data} 的大小是 5V，最小灰度级对应的驱动管 T_D 的 Gate 电压为 50mV，可以得到电流的开关比最小要求是 100000: 1，这些参数见表 4-1。

表 4-1 像素电路参数
Table 4-1 Values of Parameter for Pixel Cuirts

V_{DATA}	ΔV_g	T_{on}	T_{off}	I_{on}/I_{off}
5V	50mV	10 μ s	10ms	100000

有了这个比值,就可以设计开关管的开关电压了,只要能够达到开关比就可以了,当然开关电压的选择还和驱动管 Gate 电压的范围有关系。关闭时候的电压和驱动管的 Gate 电压差距越大,关闭的越好。通常情况下公式 4-6 和公式 4-7 一般只有一个比较难以满足,当开关管 T_p 速度快的时候,公式 4-6 比较容易满足,也就是说充电时间会很快完成。这个时候主要考虑公式 4-7 的关闭电流较大的问题,这个时候仿真找到最小的 Cs 就一般能够满足充电时候的要求了。开关管的实际比例大小决定了公式 4-6 和公式 4-7 的设计难度,开关管的开关比越大越容易满足条件。公式 4-8 实际上是最小的开关管的电流开关比。

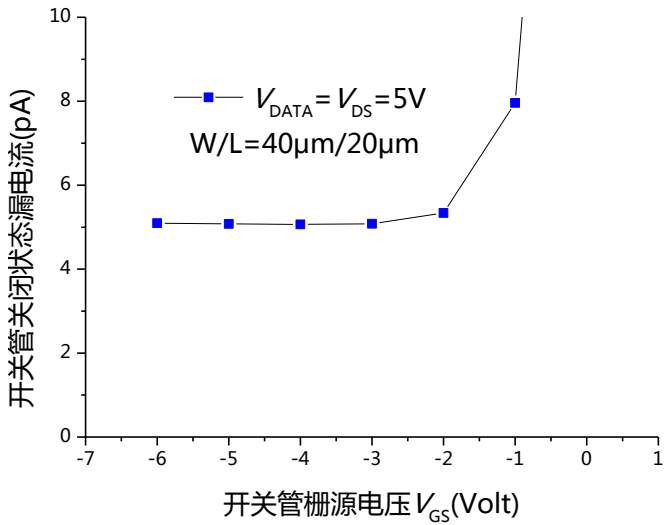


图 4-8, 不同关闭状态电压下的开关管漏电流
Fig.4-8, Leakage Current with Different Off Volatage

本文对不同关闭状态电压下的开关管漏电流进行了仿真,仿真结果如图 4-8。该图反映了一个现象,当 Gate 电压降低到-2V 以后,泄漏电流不再随 Gate 电压的减少而减小。当关闭电压降低到一定数值的时候,没有必要再降低了,这个例子中关闭电压取值-2V。

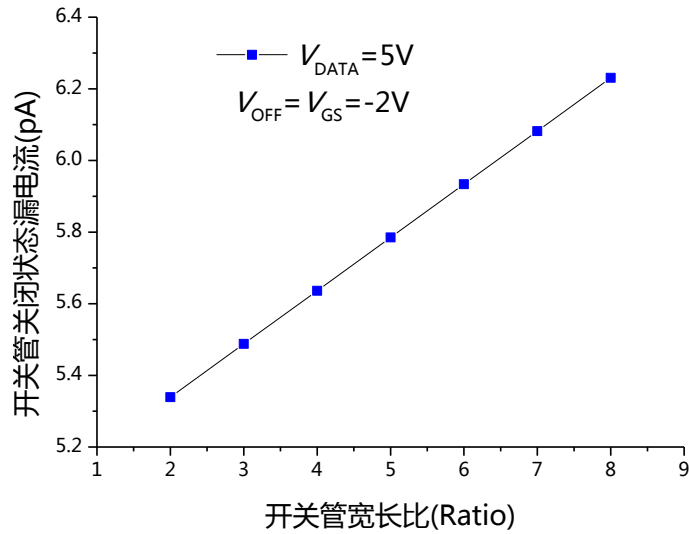


图 4-9, 不同宽长比下的开关管漏电流

Fig.4-9, Leakage Current with Different Width and Length ratio

图 4-9 仿真了不同宽长比下的开关管漏电流, 仿真结果反映了一个现象, 当宽长比由 2 到 8 增加了 4 倍的情况下, 泄漏电流只增加了 20%左右, 这样可以知道开关管的面积增加, 不会导致漏电流的等比例增加, 泄漏电流相对来说变化不大。

根据这两个图的结论, 本文搭建如下仿真环境, 开关管的关闭电压设为-2V, 开关管的开电压从 29V 开始下降到 19V, 修改开关管的宽长比, 测试宽长比在什么时候达到了 100000: 1 的开关比。根据图 4-9, 修改开关管的宽长比的时候, 关闭电压下的泄漏电流几乎不变, 这样获得的满足 100000: 1 的最小开态电流是能够满足公式 4-6 和公式 4-7, 测试结果如图 4-10。由图可以知道, 可以通过增加开关管的宽长比来降低开关管开启状态下的电压。

根据图 4-10 不同尺寸的开关管的开启状态的电压不同, 可以计算出不同尺寸的开关管 T_p 的 Gate 的动态功耗, 仿真结果如图 4-11。该图以 19V 下的开关电压作为基准动态功耗, 其他电压的功耗和这个基准功耗的比值作为纵坐标, 从这个图可以看出, 开关管的开启状态电压越高, 开关管的动态功耗越大。在开关管的面积可以满足开口率要求的情况下, 通过增加开关管的面积来降低开关管的开态电压, 这样可以降低像素电路的动态功耗。

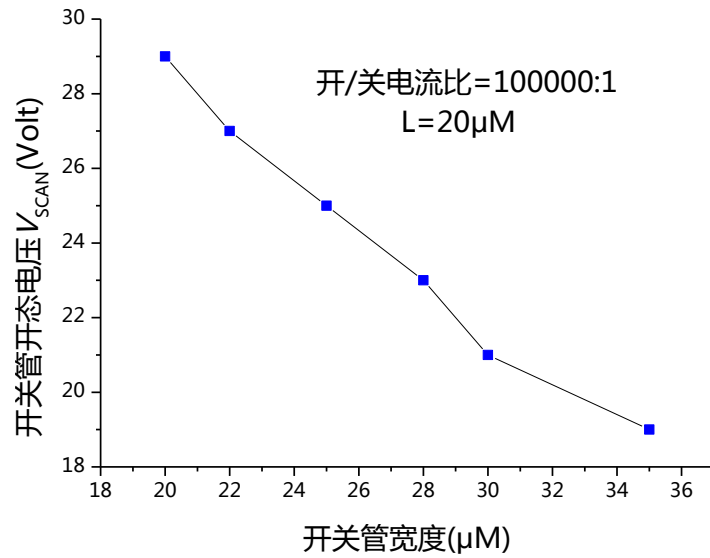


图 4-10, 不同开关管宽度下的开启状态电压
Fig.4-10, On Voltage of Switching TFT at Different Width

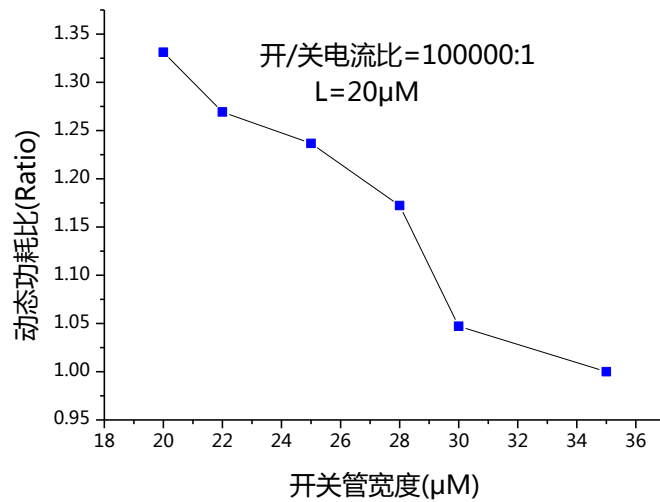


图 4-11, 不同开关管宽度下的动态功耗
Fig.4-11, Dynamic Power of Switching TFT at Different Width

4.4 其他层次的功耗优化方案

除了上面介绍的电路级的功耗优化方法, 还有很多其他层面上的功耗优化方法,

比如在材料级，系统级，软件级上都有有一些优化策略，本文后面几章内容会在不同层面介绍功耗优化方案，在此先简单介绍已有的一些优化策略。

第一是材料层面上采用低功耗策略，比如研究 OLED 材料的各种特性和物理结构以及加工工艺等策略来降低功耗[36-41]，第一章提到的研究 TFT 性能来降低功耗等[9-13]。第二是电路层面上的低功耗策略，比如亮度饱和压缩技术[14-16]，动态电压调整技术等[17-18]，还有驱动电路结构优化等[19]。第三是系统软件应用层上的低功耗策略，主要研究普通人使用软件的习惯，通过软件来降低显示功耗[42-50]，这个方向上的研究热点很多。

在材料层面上研究低功耗策略的方法方向相对集中，主要围绕着提高发光效率的研究贯穿了材料，结构的各种改进方法。这些研究其目的一方面是为了 AMOLED 的可靠性和良率，同时也带来了功耗的改善。比如底发光的 AMOLED，通过对增加开口率的研究来提高发光效率，对于顶发光的 AMOLED，如何减少光线通过的层次来提高发光效率。对于三星提出的最新的 Super AMOLED，触摸屏采用 In Cell 的方式，提高光线的穿透效率等等。这些研究都不仅仅是材料的改进，同时也配合电路和结构的改进，有了这些材料才能提出对应的电路和结构，效率提高了，需要的电流减少了，功耗也就降低了。单纯在 AMOLED 材料上的提高也是惊人的，[40]提出了在 OLED 模块和增强膜间加入硅油，以及 OLED 的硅油中加入银离子可以提高 45%到 51%之间不等的发光效率在。[41]报道 Ason 公司花了 8 年时间开发多层的 OLED，他们研制的 12 层发光层的 OLED 的亮度可以达到 $50,000 \text{ Cd/m}^2$ 这已经比商用的一些 OLED 还高几个数量级。

在电路层面上研究低功耗策略的方法也有一些。[16]提出了在 OLED 的驱动芯片中，自动检查一帧视频中的最大亮度，如果该亮度超过 OLED 屏的饱和亮度，就自动降低这帧视频的平均亮度的方法来降低显示的功耗。该方法可以直接集成到 OLED 的驱动芯片中自动完成。[17-18]介绍了当一帧的亮度不高的时候，可以通过降低电源电压的方法降低功耗，对于电压下降引起的图像质量的下降，文章提出了数据线补偿的方法，本文后面就针对这个方法提出了更加优化策略。[19]的方法本身不是为了节约功耗的，该文提出了一个优化的 DAC 方案，在降低驱动芯片面积的时候降低了芯片的功耗。

系统软件应用层上的低功耗策略研究热点很多。三星显示器引入由 AMOLED 技术启用了三个新的特殊显示模式，超省电模式(an ultra power saving mode)，该技术已经在他们的 NOTE4, S5 等智能手机上应用了，色弱模式(color weakness mode)和超调光(super local dim)模式[50]。在超省电模式下，AMOLED 屏显示变成弱黑白，显示消

耗很少的功率，三星显示器介绍说该模式可以用于例如在紧急情况下，使一个常规的智能手机在电池仅具有 63% 的情况下将持续长达 8 天的时间。除了三星显示以外，[20] 该文通过分析通常手机使用中音乐，运动，游戏，新闻等应用下手机屏幕的功耗。通过软件分析得知 AMOLED 屏的功耗最大的是运动显示，占到整体功耗的 29%（60 帧）和 32%（32%）。音乐显示的功耗最低，只占整体功耗的 15% 和 17%。通过分析发现可以通过降低分辨率的方法大大降低显示屏的功耗。并通过对几百个视频的测试，该方法可以使得视频的功耗比例可以降低到 7% 和 15%。这就使得应用软件可以根据网络视频源的分辨率来决定如何节约功耗，现在的手机屏幕很多都是高清，如果视频源没有这么高的情况下，可以不需要提高显示的分辨率来降低 AMOLED 屏的功耗。这个技术是 LCD 无法采用的，因为 LCD 背光的功耗不会随分辨率的降低而降低。正是这样，Android Power Manager 非常热衷于这项 AMOLED 功耗管理技术，这项技术提高了电池使用寿命，大大增加了人们使用 AMOLED 屏的愿望。另外，[21] 该文提出一个分析手机应用软件在显示的时候显示屏功耗的热点的方法，这个方法可以协助手机软件开发者对功耗的优化，比如某个显示场景的高亮区域大于较暗区域的时候，如果不影响显示效果，可以通过把暗和亮区域交换的方法，减少高亮的显示，设计者就可以大大降低软件设计造成的 AMOLED 屏功耗的增加。其次，微软的研究者提出了一个新的 OLED 功耗技术，称之为指影(Finger Shadow) [22]，该方法使用本地调光技术(local dim)覆盖用户手指屏幕区域。由于暗的时候 OLED 像素仅消耗非常低的功率。据微软称，他们做了一个简短 10 用户的研究，在屏幕平均 11.14% 的区域被手指遮住，这意味着 Finger Shadow 可以达到省电的 5-22%（平均 12.96%）几乎没有额外开销。

4.5 小结

本章基于驱动管 TFT 工作在饱和区的 2T-1C 的像素电路，分析了像素电路中静态功耗和动态功耗的构成，讨论和仿真了驱动管尺寸和静态功耗的关系，讨论和仿真了开关管尺寸和动态功耗的关系。通过比较得出一个结论，在满足像素电路开口率的情况下，增加驱动管的面积可以降低像素电路的静态功耗，增加开关管的大小可以降低像素电路的动态功耗，面板的功耗和像素电路的设计有直接关系。

第五章 低功耗像素电路和驱动电路

5.1 像素电路结构复杂的原因

前面介绍的 2T-1C 结构是最简单的 AMOLED 像素电路。但是在实际的 AMOLED 产品中没有采用这种最简单结构，实际的产品有各种结构的像素电路[51-55]，如图 5-1 中的简单的 3T-1C 电路到 4T-1C 电路[56]再到 5T-2C 电路[57]。本文第二章介绍了 TFT 材料的各种缺陷，这就使得像素电路或者驱动电路需要采用相应的补偿方法来弥补这些缺陷。因此图中出现的复杂的像素电路增加的晶体管数目是为了改善材料本身的缺陷引入的，但是 AMOLED 像素电路中每增加一个晶体管和电容都会带来功耗的增加。作者研究低功耗 AMOLED 像素电路与驱动方法的时候，同时也需要结合像素电路的补偿技术，提出既能补偿材料缺陷同时又能低功耗的像素电路和驱动方法。

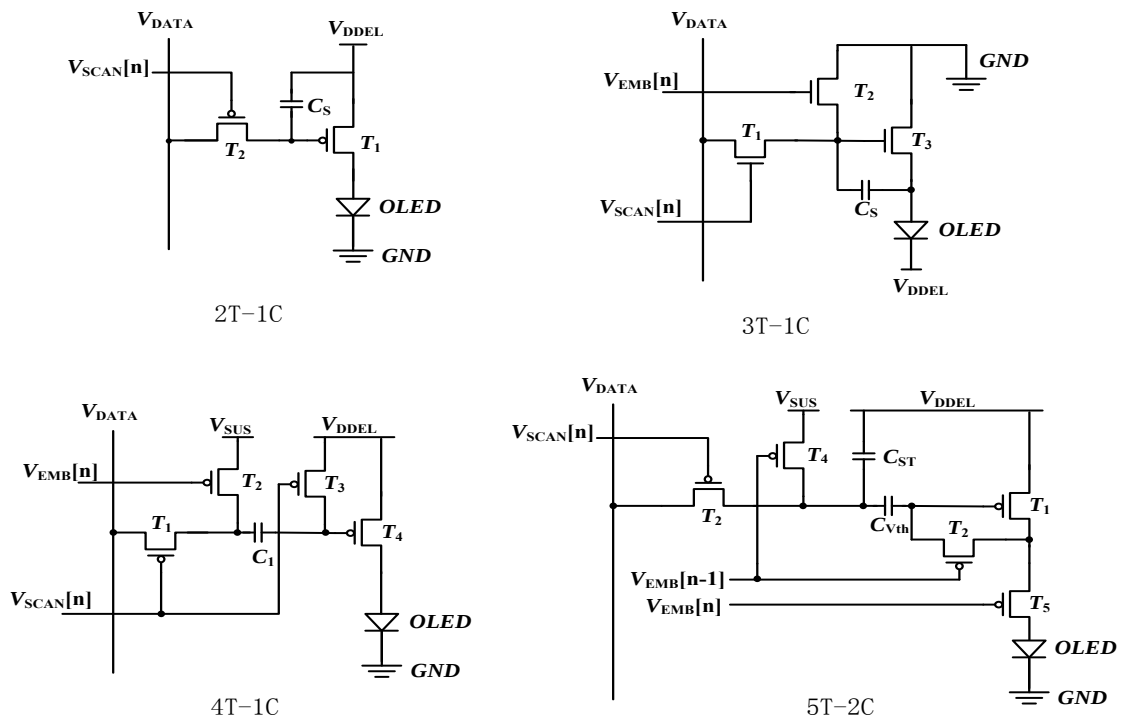


图 5-1, 不同结构的像素电路
Fig.5-1, Different AMOLED Pixel Circuits

造成像素电路设计中电路结构负责的具体原因在于下面几点：

第一，TFT 材料的特性存在空间上的不一致性和时间上退化的现象。无论是非晶硅 a-Si，多晶硅的 LTPS，还是现在流行的金属氧化物半导体，都存在不同形式的 V_{TH} 偏移。这种 V_{TH} 偏移有主要有两种情况，第一种情况是面板比较大，整个面板的均匀性不是很好，不同位置的 TFT 的 V_{TH} 不同。第二种情况是 TFT 使用了一段时间以后，由于 Gate 一直偏置在某种电压下面，导致 TFT 的 V_{TH} 出现偏移[58-59]。无论是哪种情况，最后都会导致驱动电流出现漂移。很小的 V_{TH} 偏移将会导致很大的 OLED 像素灰度的变化，而整个 OLED 显示器的不同像素的驱动管 TFT 退化情况不同， V_{TH} 偏移程度也不同，不均匀化会导致显示器亮度不均匀。除此以外，低温多晶硅有曲翘效应(KINK)，对于饱和区工作的驱动 TFT 来说，会带来电流异常增加。这些异常会影响显示效果。有些 AMOLED 的手机使用了比较长的时间以后会出现前一帧画面的图像保留到这一帧的图像中，这是图像残留（image sticking）现象，有些在同一帧中出现某些列的 TFT 出现了暗斑，图像显示不均一了（mura）。因此要解决这些问题，一是提高 TFT 的均匀性和稳定性，二是靠像素电路或者驱动电路来补偿。

第二，OLED 本身也会出现退化现象。OLED 的退化的现象是，使用一段时间以后，OLED 屏的发光亮度会降低，色彩对比度降低。其本质是同样的电流密度下，发光强度降低了。当然有研究表明，如果 OLED 经过一段时间的反向偏置以后，能够比较好的恢复[60-62]，因此有比较多的文献研究了如何设计电路来使得 OLED 通过反偏来改善退化现象。

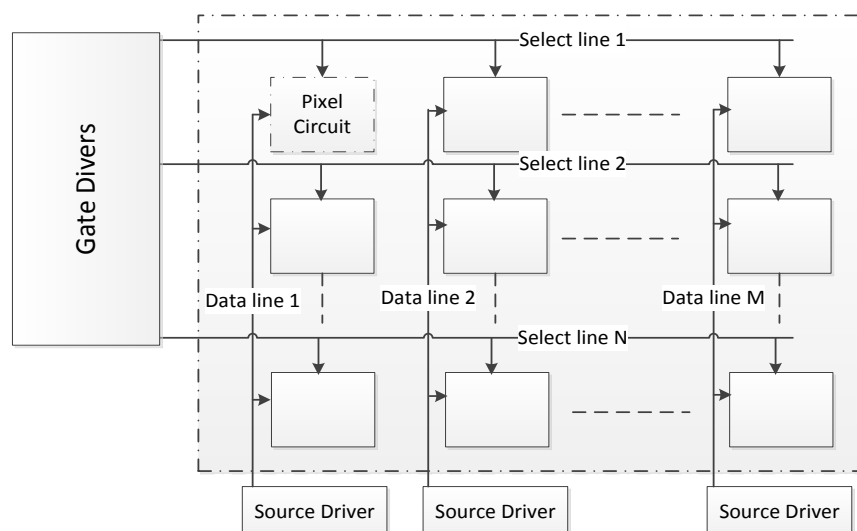


图 5-2 AMOLED 面板结构
Fig.5-2 AMOLED Panel structure

第三, 对于大尺寸的 AMOLED, 还存在电源线 IR-DROP 问题。图 5-2 是整个面板的结构图, 其中左边的 Gate Driver 控制像素电路里面的开关, 按照行扫描方式逐渐打开每行的开关, 下面的 Source Driver 是控制像素电路里面的数据。由于金属走线的距离, 电源线或者地线还会出现电压下降 IR Drop 现象, 该现象使得远离电源起点的 OLED 上的电压低, 影响了 OLED 发光。图 5-1 中的 5T-2C 结构就是提出来解决 IR Drop 的像素电路。[63]也提出了一种不需要电源线 VDD 的补偿 IR Drop 的方法。

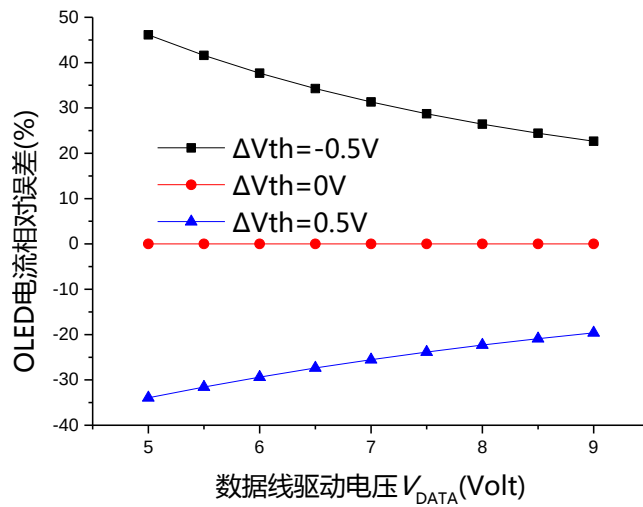


图 5-3 阈值电压漂移后的 OLED 电流的相对误差
Fig.5-3 Current Relative Error in OLED when V_{TH} Shift

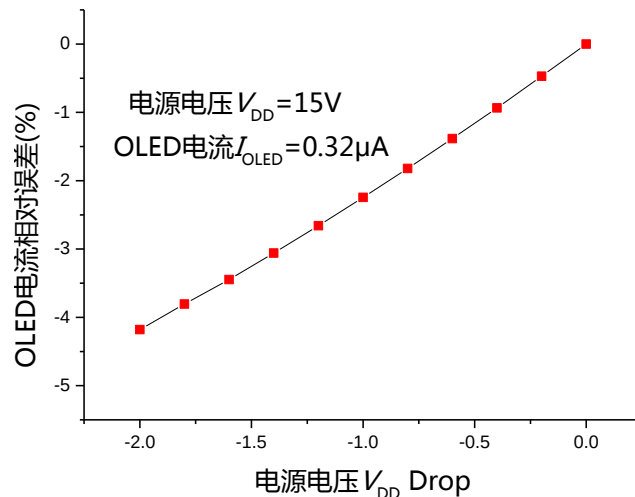


图 5-4 电源电压下降后的 OLED 电流的相对误差
Fig.5-4 Current Relative Error in OLED when VDD Drop

本文基于 2T-1C 电路仿真了驱动管 TFT 的 V_{TH} 偏移以后, OLED 电流变化的相对误差, 同时也对电源的 IR Drop 对 OLED 的电流的影响做了仿真。

V_{TH} 偏移对 OLED 电流的影响见图 5-3, 该图模拟了 V_{TH} 偏移正负 0.5V 以后, 不同的 OLED 电流偏差的程度。该图可以看出, I_{OLED} 的电流越大的时候误差越小。 I_{OLED} 的电流越小的时候误差越大, 当 I_{OLED} 电流在 0.2uA 的时候, 误差超过了 30%。同时本文仿真了该电路在电源电压发生 Drop 后 I_{OLED} 的相对误差, 如图 5-4, 虽然该误差没有 V_{TH} 偏移那么大, 这主要是驱动 TFT 管都是工作在饱和区, 沟道长度调制效应不明显, 但是如果电源电压超过了驱动管 TFT 的 KINK 电压, 电流误差就明显了。

由此可见采用前面介绍的 2T-1C 电路在实际产品中是无法使用的, 虽然 2T-1C 电路结构简单, 功耗低, 但是因为这些问题, 产业界不得不采用较为复杂的像素电路结构来补偿这些缺陷, 即使这会带来功耗的增加。下面先介绍一些现在常用的补偿技术, 再结合这些技术提出既能补偿上面几个问题的同时又能低功耗的像素电路和驱动方法。

5.2 像素电路补偿技术

现在流行的补偿方式按照工作方式可以分为电流补偿和电压补偿。按照物理位置分, 分为像素内补偿和外围驱动芯片补偿两种。按照电路结构又分前向补偿和反馈补偿。这些技术交叉组合, 补偿的方式就多种多样了。补偿电路有几个限制, 如果是在像素电路内的补偿方法, 晶体管数目和 TFT 的数目不能太多, 否则影响开口率和动态功耗, 从而影响了发光效率。如果补偿电路是在 Source Driver 里面完成的, 那么要 Source Driver 到 TFT 像素的连线数目不能太多增加, 否则布线问题带来了额外的寄生电阻电容, 增加了系统功耗, 影响像素电路的开口率。下面分别对每种补偿技术选择一两个经典电路来分析。这里先简单介绍每种电路的工作模式, 能够补偿的参数和各自的缺点, 方便和本文提出的电路做比较。

5.2.1 电压补偿技术

电压补偿方法是现在最广泛的技术, 几乎每家公司都有几个专利的补偿结构, 其基本原理如图 5-5, 该方法分为预冲, 补偿和驱动三个阶段。

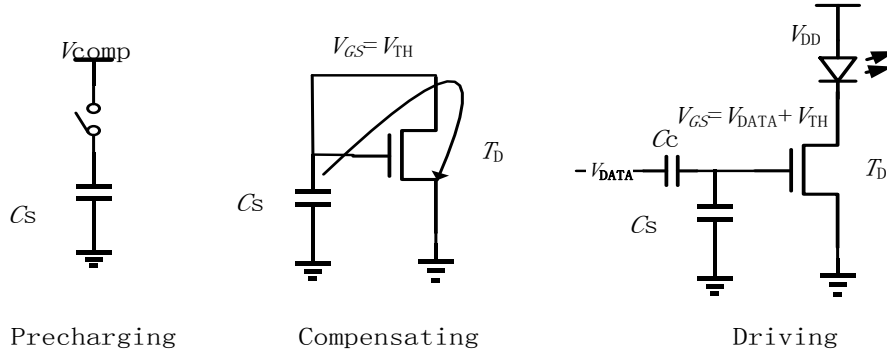


图 5-5 电压驱动补偿

Fig.5-5 Compensation for Voltage Programming

第一步是电压预冲，存储电容 C_s 通过 V_{comp} 充电到某个略大于 V_{TH} 的电压 V_C ，然后进入第二阶段进行 V_{TH} 补偿，这个时候存储电容 C_s 的电荷通过驱动 TFT 管 T_D 放电，当 T_D 由饱和区进入截止区以后，存储电容 C_s 不再放电，这个时候 T_D 的 V_{GS} 电压就等于 V_{TH} ，因此补偿结束后存储电容 C_s 的电压就是 V_{TH} 。第三个阶段是发光阶段，驱动电压 V_{DATA} 通过电容 C_C ，耦合到 T_D 的栅极。这个时候 T_D 的 $V_{GS} = V_{DATA} + V_{TH}$ ，通过 TFT 的电流就等于通过 OLED 的电流，公式 5-1 可以看到电流大小和 V_{TH} 没有关系，完成了补偿。

$$I_{OLED} = \frac{1}{2} K (V_{REF} - V_{DATA} + V_{TH} - V_{TH})^2 \quad (5-1)$$

$$\Rightarrow I_{OLED} = \frac{1}{2} K (V_{REF} - V_{DATA})^2$$

利用该技术最经典的例子莫过于三星公司的 5T-2C 电路，图 5-6 左边就是该电路，该电路采用 5 个 TFT 和 2 个电容组成了 5T-2C 补偿驱动电路[61]，右边是驱动信号波形。

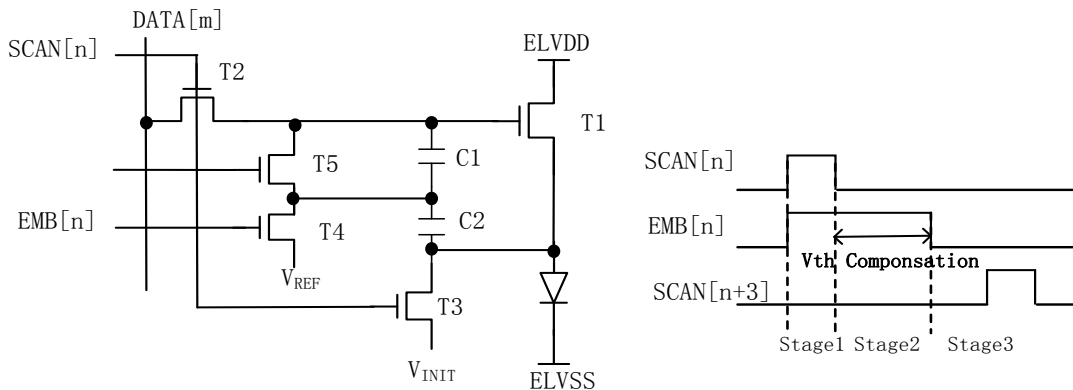


图 5-6 5T-2C 电压驱动补偿

Fig.5-6 5T-2C Compensation for Voltage Programming

右边驱动信号波形分为三个阶段。第一阶段为初始化和数据写入，驱动管 T1 的 Gate 电压为 V_{DATA} ，C1 的下端电压为 V_{REF} ，C2 的下端电压为 V_{INIT} ，C1 两端的压是 $V_{DATA}-V_{REF}$ ，C2 两端的电压是 $V_{REF}-V_{INIT}$ 。第一阶段的 $V_{DATA}-V_{INIT}$ 是 T1 管的过驱动电压，通过 T1 管的电流大部分通过 T3，另外一部分通过 OLED。第二阶段为 V_{TH} 补偿，此时驱动管 T1 的 Gate 悬空，T3 没有电流通过，这样会导致 T1 管的源端电压升高，当升高到 $V_{DATA}-V_{TH}$ 时候电流截止，驱动管 T1 的源端电压变为 $V_{DATA}-V_{TH}$ ，通过调整 EMB[n] 信号的占空比，可以控制 V_{TH} 补偿的时间，最终 C2 两端电压达到 $V_{REF}-V_{DATA}+V_{TH}$ ；第三阶段为 OLED 发光，这一步会将 C1 短路，驱动管 T1 的 V_{GS} 就为 $V_{REF}-V_{DATA}+V_{TH}$ ，并在这一阶段一直保持，从而达到补偿 V_{TH} 偏移的效果，这个时候的 OLED 的电流为：

$$I_{OLED} = \frac{1}{2} K (V_{REF} - V_{DATA} + V_{TH} - V_{TH})^2 \quad (5-2)$$

$$\Rightarrow I_{OLED} = \frac{1}{2} K (V_{REF} - V_{DATA})^2$$

该电路还有两个关键点，第一是补偿到发光阶段，EMB[n] 是一个下降沿，SCAN[n+3] 是一个上升沿，这样电容耦合在 C2 上端是电压相互抵消，寄生电容的影响比较小，第二是第一阶段输入的 V_{INIT} ，该电压可以比 ELVSS 还低，这样可以消除 OLED 长期正向偏置引起的性能下降。后面还会比较其他一些同样功能的电路，但是在这两点的考虑上，三星的这个结构是迄今为止笔者认为最好的方案，这也是三星重要的专利，图 5-7 体现了该电路的补偿效果。

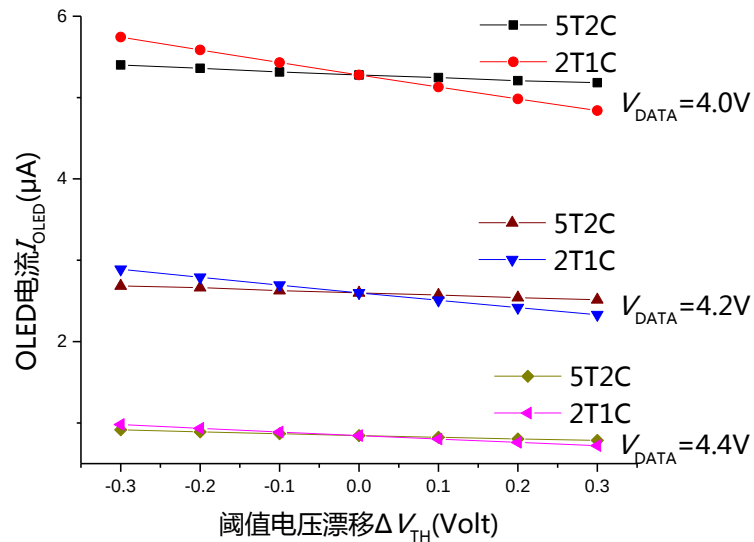


图 5-7 三星 5T-2C 电压驱动补偿仿真结果

Fig.5-7 Simulation Result of Samsung's 5T-2C Compensation for Voltage Programming

仿真的设置情况如下，驱动管 T1 的尺寸 $W/L=40\mu\text{m}/10\mu\text{m}$ ，其他开关管尺寸大小 $W/L=20\mu\text{m}/10\mu\text{m}$ ， $V_{\text{REF}}=4.6\text{V}$ ， $V_{\text{INIT}}=3.3\text{V}$ 。 $V_{\text{TH}}=2\text{V}$ ， $\Delta V_{\text{TH}}=\pm 0.1\text{V}/\pm 0.2\text{V}/\pm 0.3\text{V}$ ，首先默认 $V_{\text{DATA}}=4.2\text{V}$ ，验证 V_{TH} 的补偿效果，之后再选取 $V_{\text{DATA}}=4.0\text{V}$ 和 4.4V 进行对比。

图 5-7 中的 2T-1C 的是没有补偿的结构，用来和三星公司的专利对比。仿真结果可以看到，带有补偿电路的 TFT 驱动电路能够比较好的补偿了由于 V_{TH} 的漂移带来的电流的变化。除了三星的补偿结构外，LGD、京东方、天马等企业都有自己提出的专利结构，其结构差别不大。

除了补偿 V_{TH} 的漂移以外，前面还提到电源电压的下降也是需要补偿的。由于电源电压是驱动整个面板的，因此功耗比较大，电流也就比较大，电源线的寄生电阻引起的压降就不能忽略了，尤其是针对几十英寸面板的，水平和垂直线都比较长，这就限制了显示的灰度级，同时造成了面板的不均匀性。因此对电源电压的补偿也需要在像素电路里面考虑。图 5-8 是前面提到的一个同时补偿了 V_{TH} 和电源 IR-drop 的电路 [77]，该电路在发光阶段的电流为公式 5-3。

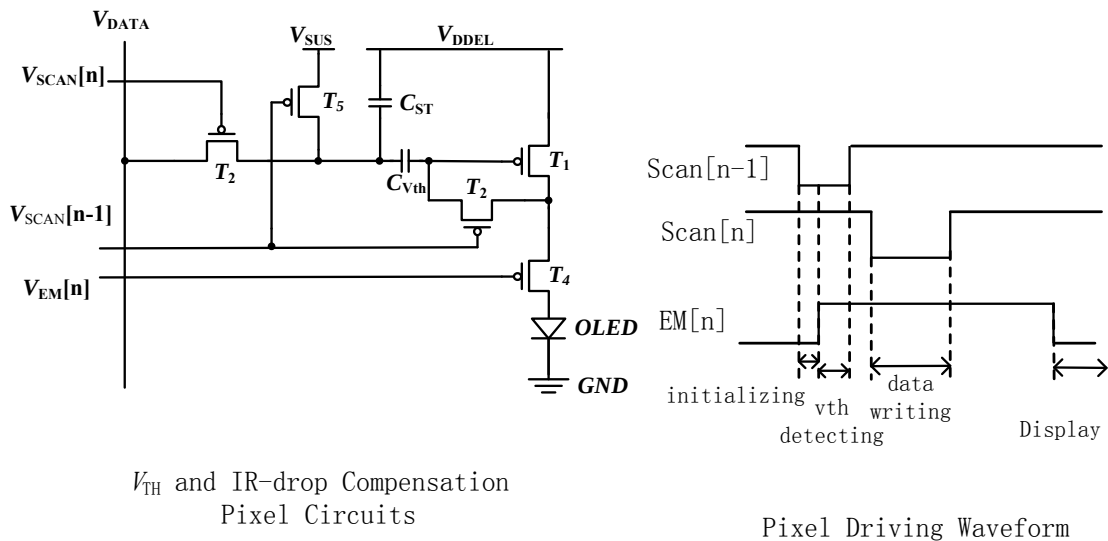


图 5-8 阈值电压和电源电压补偿
Fig.5-8 V_{TH} IR-drop Compensation

$$\begin{aligned}
I_{OLED} &= \frac{1}{2} K (|V_{GS1}| - |V_{TH1}|)^2 \\
&= \frac{1}{2} K \{V_{DDEL} - (V_{DATA} - |V_{TH1}| + V_{DDEL} - V_{SUS}) - |V_{TH1}|\}^2 \quad (5-3) \\
&= \frac{1}{2} K (V_{SUS} - V_{DATA})^2
\end{aligned}$$

从上面的公式可以看出 OLED 的电流和已经把电源电压抵消了, 电流大小和 V_{SUS} 有关, 从电路结构来看 V_{SUS} 如果有 IR DROP 同样会引起 OLED 的电流漂移, 但是 V_{SUS} 不同于 V_{DDEL} 在于该电源只驱动了电容, 只有动态功耗, 直流功耗为零, 负载相比轻很多, V_{SUS} 的功耗只有在扫描到这行的时候才对电容充电, 工作电流小, IR DROP 就很小。同时从公式中可以看出, V_{TH} 部分相互抵消, 在补偿 IR DROP 的同时做了阈值电压的补偿。

从上面这两个电路来看, 这两个 5T-2C 电路比前面提到的 2T-1C 电路的晶体管数目要多, 图 5-6 的动态功耗的节点有 7 个, 图 5-8 的动态功耗的节点也有 7 个, 比 2T-1C 电路的 2 个要高 3 倍以上。简单比较一下, 这种电路的动态功耗有 2T-1C 电路的 3 倍。图 5-8 在 OLED 上串联了 T1 和 T4, 同样的 OLED 电流情况下, 该电路的静态功耗也要高于 2T-1C 电路的。

5.2.2 电流补偿技术

电压补偿方法中, 阈值电压和电源电压的 IR DROP 能够补偿, 但是 KINK 效应一般是电压补偿电路不具备的功能。于是又有人提出了电流补偿的方法。电流补偿方式有个特点, Source Driver 给出的不再是 V_{OLED} , 而是 I_{OLED} , 该电流直接或者通过镜像方式驱动 OLED, 这样可以避免阈值电压和电源电压等带来的问题, 图 5-9 是电流源方式的基本工作原理, 二极管等效为一个饱和区的 TFT 管子, 电流源一开始对电容充电, 电容电压小的时候, 流过 OLED 的电流也小, 这个时候大部分电流用于对电容充电, 当电容充电后, 电压逐渐升高, 导致通过 OLED 的电流也增加。只要通过 OLED 的电流小于电流源的电流, 电容就能一直充电, 直到二者相同, 电容电压也不变了。如果一开始的时候电容电压比较高, 通过 OLED 的电流大于电流源电流, 这个时候 OLED 会从电容上抽走一些电荷, 这样电容两端的电压下降, 直到通过 OLED 的电流等于电流源电流的时候停止。

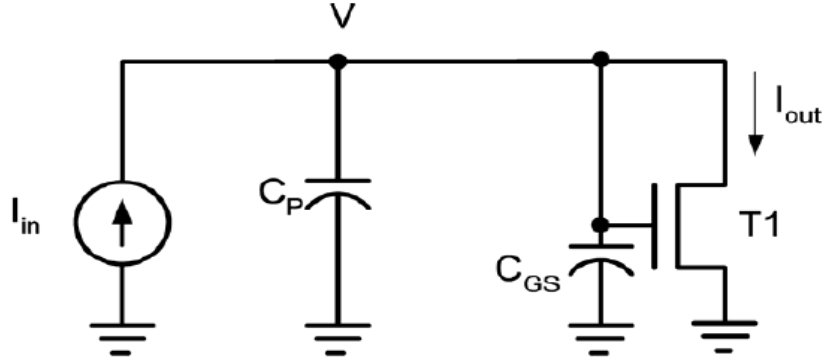


图 5-9, 电流驱动补偿

Fig.5-9, Compensation for Current Programming

从定量的角度来分析, 可以获得下面几个公式, 从公式可以看出, 电流的建立时间和 τ 密切相关。当电流越大, 寄生电容越小的时候, 建立时间越快。但是这是电流驱动最大的一个问题, 当显示亮度低, 电流比较小的时候, 寄生电容的充放电时间会非常大。

$$I_{in} = (C_P + C_{GS}) \frac{dV}{dt} + I_{out}, V > V_{TH} \quad (5-4)$$

$$I_{out} = \frac{1}{2} K (V - V_{TH})^2, V > V_{TH}$$

$$I_{out} = I_{in} \left[\frac{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \right]^2 \quad \tau = \frac{C_P + C_{GS}}{\sqrt{2\mu C_i \frac{W}{L} I_{in}}} \quad (5-5)$$

现在流行的电流补偿结构分为非镜像方式和镜像电流源方式[64]。非镜像电流源的方式的经典结构[65]如图 5-10。该电路工作原理如下, 开始的时候, Select 信号有效, T3, T4 都导通, T2 管的漏和源短路, T2 管电流为 0, 此时 I_{DATA} 来源有两个地方, 一个是电容 C_S , 另外一个就是 T1, 当 T1 提供不了 I_{DATA} 这么大的电流的时候, 就从电容 C_S 抽走电荷, 电容 C_S 的电压降低, 这样能够使得 T1 提供更大的电流, 当 T1 的电流等于 I_{DATA} 的时候电容 C_S 不再充放电。如果一开始 T1 提供的电流大于 I_{DATA} 的时候, 一部分电流通过 T4, T3 对电容 C_S 充电, 导致 T1 的电流降低, 当降低到 I_{DATA} 的时候, 电容 C_S 也不再冲放电了。当显示阶段, Select 信号无效, 电流通过 T2 到达 OLED, 此时的 OLED 电流为 $(K_2/K_1 + K_2) I_{DATA}$ 。

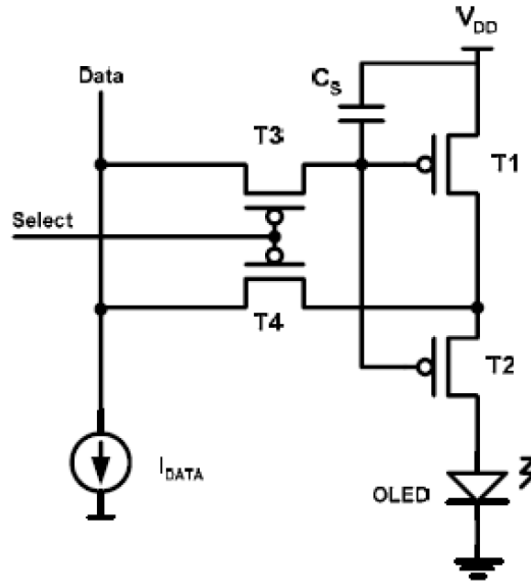


图 5-10 非镜像电流源

Fig.5-10 Non-mirrored current scaling

另外还有比较多的类似结构出现[66-67]，结构都大同小异，都在提高电流的建立时间上做了不少改进。镜像电流源的方式现在也很流行，图 5-11 (b) 是采用镜像电流源方式的原理图，该电路是最初是为了做 Memory 提出的[68]，左边这个图的工作原理是这样，当 SEL 有效的时候，S3 是不导通的，通过 T1 的电流由 I_{DATA} 提供， I_{DATA} 先完成 C_S 的充电，当 C_S 的电容电压达到某个数值的时候， I_{DATA} 全部通过 T1， C_S 的电压也不再增加，T1 工作在饱和区。当 SEL 无效以后，S3 导通， C_S 的电容电压不会改变，饱和区电流还是 I_{DATA} ，这就完成了电流的拷贝。

图右边这个电路工作原理也类似，当 SEL 有效地时候， I_{DATA} 先完成 C_S 的充电，当 C_S 的电容电压达到某个数值的时候， I_{DATA} 全部通过 T1， C_S 的电压也不再增加，T1 工作在饱和区。由于 T1 和 T2 都工作在饱和区，Gate 电压一样，这样通过 T2 的电流就是 I_{DATA} 镜像，电流比例大小取决于 T2 和 T1 的宽长比的大小。当 SEL 关闭以后，该电流仍然存在。该电路中通过 T1 的电流没有发光，效率低，因此 T1 一般做的比较小，T2 的面积大一些，但是工艺在确保 T2 的电流就是 T1 电流的宽长比的倍数的时候还是比较有难度的。从前面的分析看出，这两个电路都能够补偿电源的 IR DROP 和 V_{TH} 的漂移，同时解决了 KINK 效应。如果 T1 管的 V_{TH} 漂移，但是最后的电流都是由 I_{DATA} 决定的，电源电压只要保证管子在饱和区就可以了。

电流源补偿方法虽然解决了 IR DROP、 V_{TH} 的漂移和 KINK 效应的问题，但是在

低灰度情况下的建立时间（Settling Time）一直是这种方法的局限，也有人提出了一些解决方法，比如混合方式[69]，该方法把电流转换为电压来驱动，用一个 ADC 来读取 V_{TH} 的漂移，然后存储起来，驱动的时候把这个 V_{TH} 加入到编程电压中就完成了 V_{TH} 的补偿。

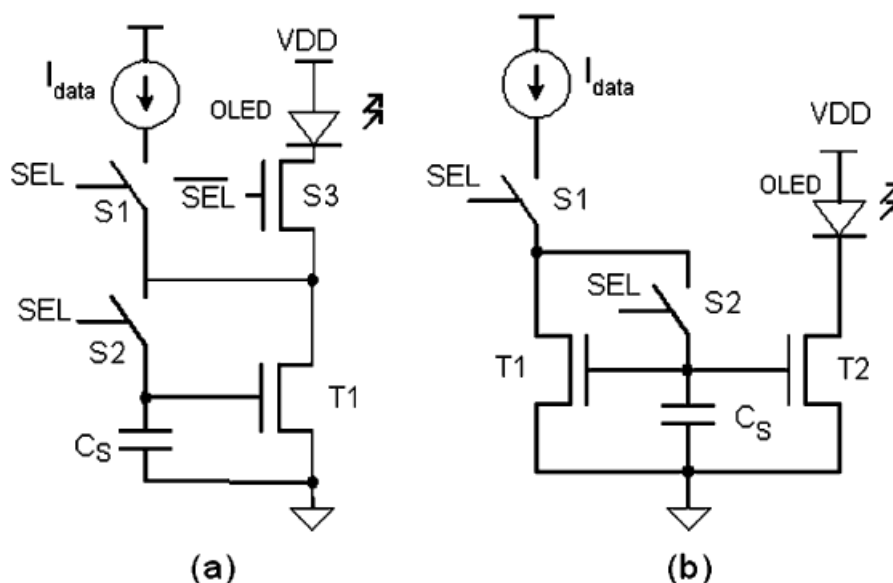


图 5-11 镜像电流源像素电路

Fig.5-11 Mirror Current programmed pixel circuits

由此可见，由于电流源最大的问题就是 OLED 数据线的建立时间（Settling Time）比较慢，这是影响电流补偿技术推广的重要原因之一，现在的 AMOLED 屏的刷新频率要求越来越高，100HZ 以上的刷新频率是常见的要求。从功耗的角度来看，电流补偿方式的开关管也不少，图 5-11 也有 4 个动态功耗的节点，OLED 路径上有 T1 和 S3，因此，其动态功耗和静态功耗都比简单的 2T-1C 电路要大。

5.2.3 驱动电路补偿技术

前面介绍的这些补偿技术都是在像素电路里面来做的。这些都会增加像素电路的复杂程度，电路增加带来功耗增加，功耗影响面板的温度和寿命。本文认为增加像素电路里面的晶体管数目不是像素电路发展方向，产业界希望像素电路越简单越好，这就需要把问题从像素电路中移到 Source Driver 和 Gate Driver 中来。Source Driver 和 Gate Driver 可以用成熟的 CMOS 或者 BiCMOS 等工艺来设计，对于在 TFT 中的任何

复杂电路在 MOS 工艺来看都不复杂。因此近年来通过外围芯片来补偿的方法日渐增加，尤其是大屏的 AMOLED。从工作原理来看主要分为两类，一种是前向（Feed Forward）驱动，一种是反馈(Feed Back)驱动。由于驱动电路是硅芯片，驱动电路就可以比较复杂，即使用电流驱动方式，也可以靠外围电路设计来提高 Settling Time 的问题。每种方式又可能是电压驱动，也可能是电流驱动。电流驱动方式有一个特点，可以降低像素电路里面的晶体管数目，减少像素电路的功耗。

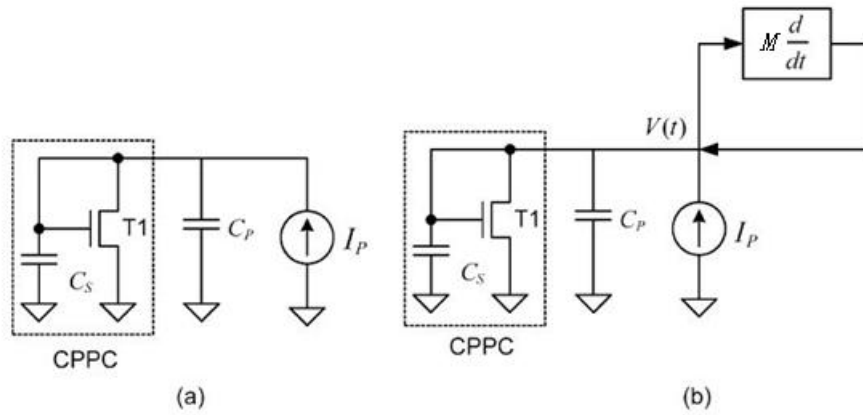


图 5-12 驱动电路补偿像素电路

Fig.5-12 Source Driver compensation pixel circuits

前向驱动最突出的电路是 Current Conveyor II(CCII)，该电路的基本结构如图 5-12(b)，图 5-12(a)和前面的图 5-9 是同样的原理，图 5-12(b)比图 5-12(a)多了一个微分形式的电流源。因为数据线的寄生电容在 programming 阶段需要充放电的，该微分器电路就是来抵消寄生电容的。

根据前面的公式 5-4，可以知道图 5-12(a)的电流方程是：

$$I_P = (C_P + C_{GS}) \frac{dV}{dt} + \frac{1}{2} K (V - V_{TH})^2, V > V_{TH} \quad (5-6)$$

这个等式的前面部分反映出电流源一部分用于对电容充电，后面部分才是通过 OLED 的电流，如果有个和电容充放电相反的电路结构，就能补偿寄生电容的影响，图 5-12(b)刚好反应出需要的电路形式，根据该电路可以得到电流公式 5-7，只要 M 等于 $C_P + C_{GS}$ ，那么就能消除寄生电容的影响。

$$I_P = (C_P + C_{GS} - M) \frac{dV}{dt} + \frac{1}{2} K (V - V_{TH})^2, V > V_{TH} \quad (5-7)$$

当然要确切获得每个像素的 C_P+C_{GS} 是比较困难的，寄生参数随着像素电路在面板中的位置，温度变化比较大。但是尽可能的接近 C_P+C_{GS} 还是可以比较容易获得的。

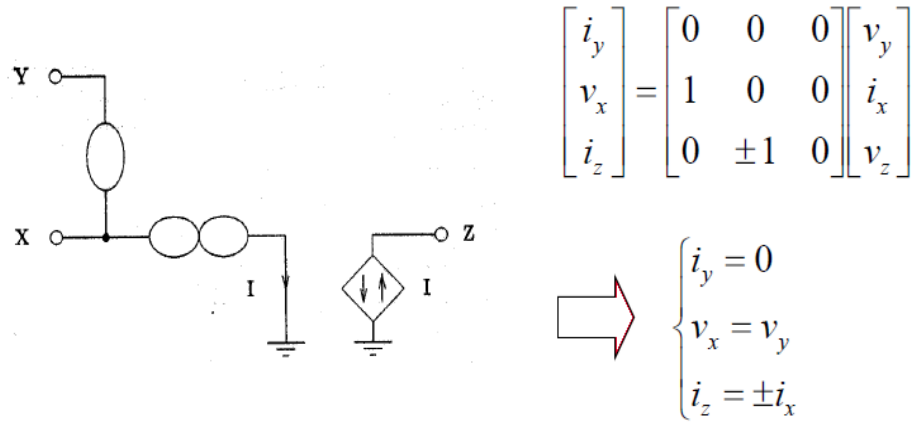


图 5-13 电流变换器 II

Fig.5-13 Current Conveyor II

Current Conveyor II 是一个三端器件，如图 5-13，可以实现这种电路需求。该结构有几个特点：

- 如果 Y 输入一个电压，该电压同样会出现在 X 端口
- Y 点的电流为 0
- 输入 X 点的电流会转移到节点 Z，出节点 Z 的电阻无穷大
- X 点的电压为 Y，不依赖于输入 X 点的电流
- Y 的输入电阻无穷大

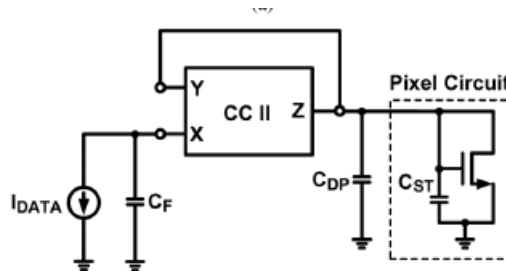


图 5-14 CCII 像素电路

Fig.5-14 CCII pixel circuits

利用该结构，有人提出了比较好的解决方案[70-71]，该电路结构如图 5-14，当 C_F 和 $C_{DP}+C_{ST}$ 相等的时候， I_{DATA} 电流等于通过 pixel circuit 的电流。这样调节 I_{DATA} 的电流大小可以快速对寄生电容充放电，稳定的时候 Z 点电压等于 Y 电压等于 X 电

压, C_F 和 C_{DP} 上的电压相等, 当不再对电容充放电以后, I_{DATA} 电流等于通过 pixel circuit 的电流。

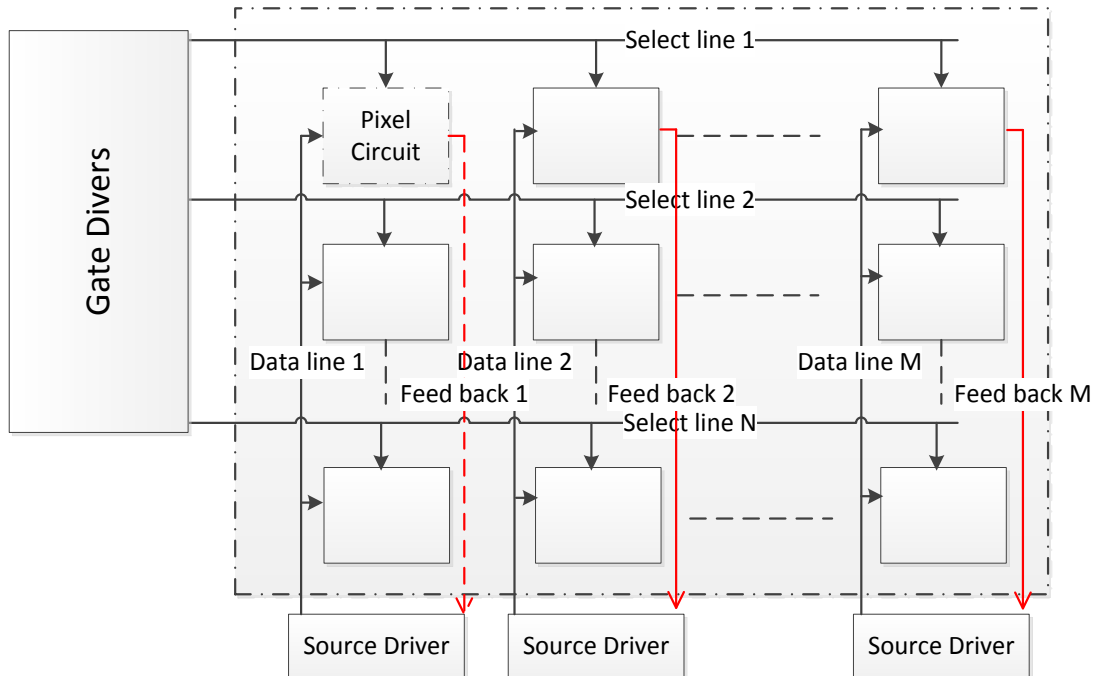


图 5-15 带反馈的 AMOLED 面板结构

Fig.5-15 Feed back AMOLED Panel structure

带反馈的驱动（Feed Back）电路的目的都是为了给 OLED 提供一个稳定的电流，同时编程时间需要满足显示屏刷新频率的要求。由于是反馈系统，就需要考虑带宽，增益等问题，如何让环路稳定是首要考虑的内容。需要设计对各种寄生参数不敏感的稳定电路系统。反馈方式一般在提高屏的寿命和可靠性方面有比较大的优势。反馈方式的面板结构如图 5-15，和图 5-2 相比，多了一条反馈线，图中用红色表示。这条反馈线对面板设计以及像素电路的开口率有一定影响，对此本文不详细讨论。

根据反馈方式的不同，分为电压反馈和电流反馈两种方式，图 5-16 是一种电压反馈方式的电路结构图[72]，通过该图可以看到，采样电阻 R_F 上的电压和通过 OLED 的电流成线性关系，外围驱动电路比较该电压是否准确，电压高了，说明电流大，这样外围驱动电路会降低驱动管 T1 的电压，电流降低。如果电压低了，说明电流小了，这样外围驱动电路会增加驱动管 T1 的电压，电流增加。当系统稳定的时候反馈电压就等于编程电压 V_{IN} 。

$$I_{OLED} \approx \frac{V_{IN}}{R_F} \quad (5-8)$$

这个结构要求 R_F 电阻比较准确,加工的误差比较小,同时要求制备技术要和 TFT 工艺兼容,而且不能有额外的 MASK,否则成本上就比较难接受。因此在考虑到可生产性问题上该结构还有待改进。

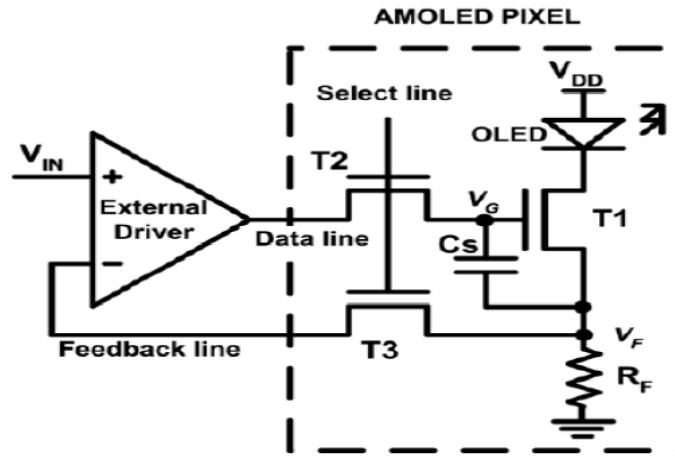


图 5-16 电压反馈的驱动电路

Fig.5-16 Voltage Feed back driver circle

另外比较通用的结构就是电流反馈,如图 5-17,该电路的基本工作原理就是通过反馈把编程电流最后镜像到像素电路中[73]。在左边的 Column Driver 中包含一个跨导放大器 Operational Transresistance Amplifier(OTRA)驱动电路。该电路包含了编程和保持两个阶段,编程阶段,Select1 有效,Select2 无效, T2,T3 两个管子导通, T4 管子关闭,这样通过驱动管 T1 的电流通过 T3 和反馈到地,稳定的时候通过驱动管 T1 的电流就等于 I_{DATA} 。在数据保持阶段,Select2 有效,Select1 无效, T2,T3 两个管子关闭, T4 管子导通。 C_S 上的存储电容保持关闭前的状态, V_{DD} 电压使得 T1 管在饱和区,因此此时的电流保持关闭前的电流。

如果 R_M 是跨阻放大器的跨阻,那么编程电流的大小是公式(5-9),如果 R_M 足够大,第二部分的电流足够小,就可以忽略。比如最小编程电流是 100nA, V_{TH1} 最大偏移 5V,那么 R_M 需要达到 5 G Ω 就能够达到小于 1% 的误差。

$$I_{PROG} \approx I_{DATA} - \frac{V_{TH1}}{R_M} \quad (5-9)$$

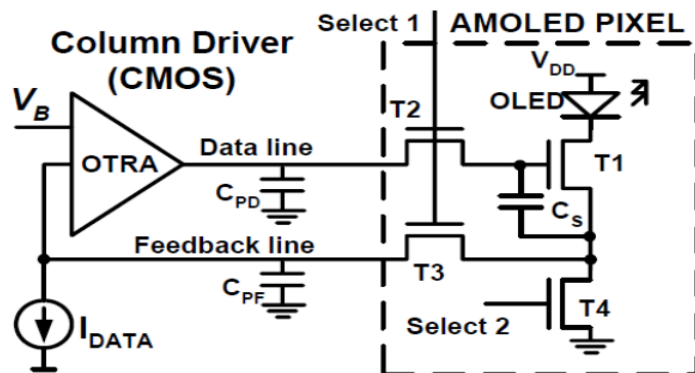


图 5-17 电流反馈的驱动电路

Fig.5-17 Current Feed back driver circle

从上面介绍的前向驱动和带反馈的驱动电路来看,这种通过外围驱动电路的方式能够补偿像素电路的各种问题,这些结构中,像素电路里面的晶体管数目都比较少。开关管控制的动态功耗都比前面的电压和电流补偿技术要少。从图 5-16 和图 5-17 来看像素电路的静态电流也不小,这两种电路要么串联了电阻,要么多一个开关管,都会增加像素电路的静态功耗。

因此,前面介绍的这些电路在功耗或补偿方面都有一些缺陷,因此本文提出了一个低功耗 AMOLED 像素电路与驱动方法,该技术提出既能补偿上面提出的几个问题同时又能降低像素电路的功耗。

5.3 低功耗像素电路和驱动电路

5.3.1 低功耗像素及驱动电路原理

本文提出一种元件少的低功耗像素及其驱动电路,结构如图 5-18,其特点在于以下几点,其中的功耗问题在下一章阐述,其他特点在本章描述。

- 补偿 V_{TH} 漂移
- 补偿 IR DROP
- 补偿 KINK 效应
- 解决了电流补偿电路建立时间长的问题
- 像素电路适合 N 型和 P 型的 TFT 材料
- 功耗低于现在流行的其他补偿电路

下面分别对 V_{TH} 漂移, IR DROP, KINK 效应, 电路建立时间等进行仿真分析。低温多晶硅的 TFT 优良电子迁移率使得该面板应用广泛, 但是像素间的 V_{TH} 偏差和 KINK 效应的影响, 使得补偿电路的结构比较复杂, 除了前面介绍的 V_{TH} 和 IR DROP 补偿的电路结构外, 还有其他人也发表过很多类似的结构[74-77], 这些都属于像素内补偿方法, 这样就导致像素电路内 TFT 管子比较多, 这对中大型面板的良率提高是个不利因素。本章中采用 P 型低温多晶硅的 TFT 来分析电路, 这些分析同样适合 N 型材料。

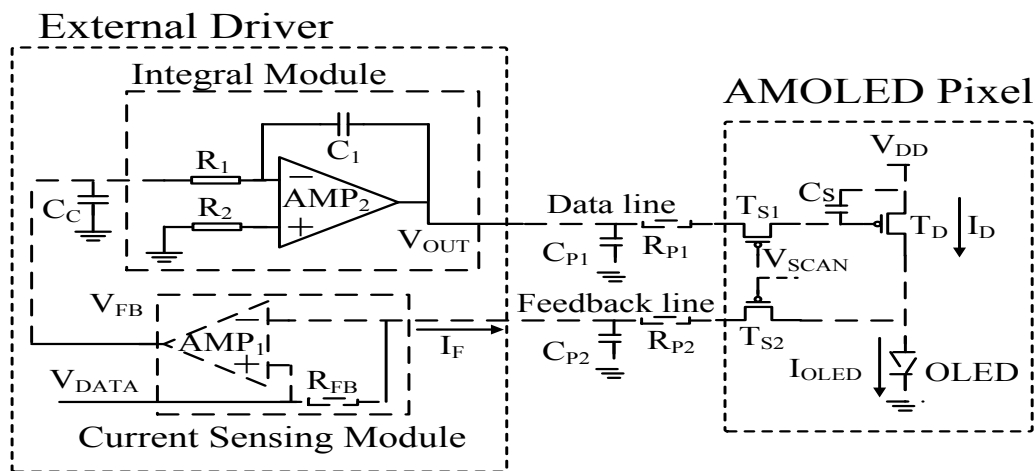


图 5-18 本文提出的低功耗像素和驱动电路

Fig.5-18 Proposed Lower Power Pixel and Driving Scheme

本文提出的驱动电路采用的是像素外补偿, 也就是靠驱动芯片设计来补偿, 像素电路内部的晶体管数目就可以减少。本文提出的驱动电路是反馈方式的电路结构, 反馈方式的电路结构的好处就是可以把要解决的电路问题从像素电路中移到外部驱动电路中。论文[78-82]中的这些反馈方式的反馈数据线都是接到驱动芯片的 Gate 上的, 反馈数据线本身的充电放电依赖像素电路里面的器件来进行, 通常充电是依靠驱动 TFT 管, 放电是依靠 OLED 本身漏电。由于连线本身寄生电阻电容比较大, 这使得冲放电时间变得比较大[83-86]。本文提出的结构和图 5-16 很接近, 该结构直接用 OLED 来完成电压到电流的转化, 本文的设计和该电路不同的是不需要外接电阻, 这样可以不需要额外的制备技术和步骤, 有利于制造。通过本文后面的仿真, 可以知道像素电路的驱动电压的建立时间可以到 $3\mu\text{s}$ 以内, 这可以满足大部分面板建立时间的需要, 同时该电路补偿了 V_{TH} 漂移, IR DROP 和 KINK 效应。

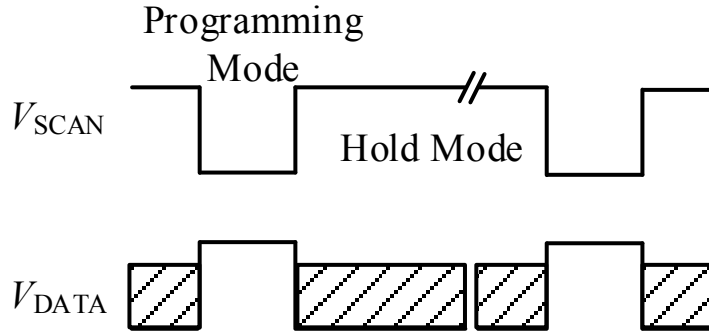


图 5-19 电路工作波形

Fig.5-19 Timing diagrams during operation

整个电路系统包含了像素电路，反馈线，外围驱动电路三部分，像素电路包含了一个 TFT 驱动管 (T_D)，两个传输管 (T_{S1} , T_{S2})，还有一个存储电容 (C_S)。外围驱动电路集成在 Source Driver 中，包含了一个积分器和一个误差检测器。反馈数据线连接了像素电路和外部驱动模块。

该电路的驱动波形和 2T-1C 结构比较相似，如图 5-19，工作阶段分两步，第一步是编程阶段，这个时候， V_{SCAN} 是低电平，两个传输管 (T_{S1} , T_{S2}) 同时导通。通过驱动管 (T_D) 的电流 I_D 一部分通过 OLED 形成 I_{OLED} ，一部分通过反馈数据线 I_F ，反馈数据线 I_F 的电流表示输入电压 V_{DATA} 和 OLED 上的电压 V_{OLED} 相差多少。这个误差电流通过采样电阻 R_{FB} 形成误差电压，通过误差放大器 AMP1 放大产生反馈电压 V_{FB} ，该电压按照公式 5-10 获得。

$$V_{FB} = I_F \times R_{FB} \times G_1 \quad (5-10)$$

反馈电压 V_{FB} 通过公式 5-11，送入到积分器 AMP2 形成最后的控制驱动管 TFT 的 GATE 电压 V_{OUT} 。 $V_{OUT}(t_1)$ 是 t_1 时刻的 V_{OUT} 电压， $V_{OUT}(t_2)$ 是 t_2 时刻的 V_{OUT} 电压。 R_1, C_1 是积分器的电阻电容，积分器使得驱动管的控制电压连续变化。通过 TFT 管子的电流不会突然变化。

$$V_{OUT}(t_2) = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_{t_1}^{t_2} V_{FB} dt + V_{OUT}(t_1) \quad (5-11)$$

总的来说，该反馈系统通过对反馈数据线上的反馈电流 I_F 的放大反馈，调整 TFT 驱动管的 Gate 电压，从而再影响反馈数据线上的反馈电流 I_F ，只有当 V_{OLED} 和电压 V_{DATA} 相等的时候， $I_F=0$ ， $I_{OLED}=I_D$ 。由于 I_{OLED} 是由 V_{OLED} 决定的，所以该电流和驱动管 T_D 的各种属性都没有关系，这样该电路可以补偿 TFT 的不均匀性问题。在保持阶

段, T_{S1} , T_{S2} 都关闭了, 像素电路和外围驱动电路断开, 存储电容 C_S 的电压使得驱动管 TFT 的 Gate 电压保持不变, 电流 I_{OLED} 也就保持不变。

5.3.2 低功耗像素及驱动电路仿真

仿真模型中的 OLED 模型采用 Verilog-A 的形式, 在本仿真设计中, 该 OLED 的特性参数是 7V 电压的时候能够有 600 cd/m^2 的发光效率, 这个时候的电流密度是 100 mA/cm^2 , 该曲线图见图 5-20。

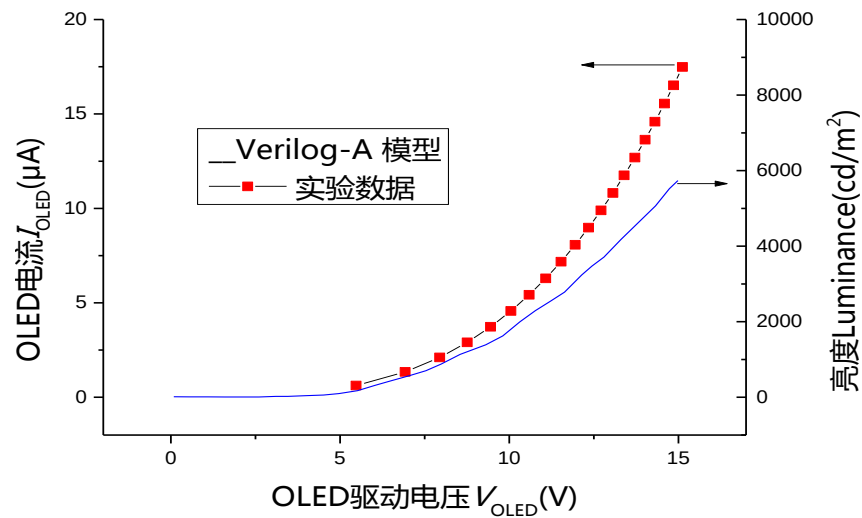


图 5-20 OLED 设备的 V-L 和 V-I 曲线图

Fig.5-20 Current-voltage and luminance-voltage characteristics of the OLED device

对于多晶硅模型 TFT, 本文采用的是广泛使用的 RPI poly-Si TFT model (Level 36 in Smart-SPICE)。本仿真采用 P-type 类型的 TFT, 这对于通常的 OLED 工艺都比较适合。仿真中该模型的阈值电压 (V_{TH}) 为 0V, 有效电子迁移率 (μ_{eff}) 为 $50 \text{ cm}^2/\text{V.s.}$ 。PMOS 类型的 TFT 的 KINK 效应一般没有 NMOS 严重, 为了验证 KINK 效应对电路的影响, 在模型中降低了 KINK 效应的电压, 该 LTPS 模型采用第三章的 P 型低温多晶硅。仿真中, 各个 TFT 管的参数如下, $(W/L)T_D = 40 \mu\text{m}/20 \mu\text{m}$, $(W/L)T_{S1}, T_{S2} = 20 \mu\text{m}/20 \mu\text{m}$, 设计中的运放 AMP1 和 AMP2 的增益分别为 20dB 和 80dB, 这些运放的参数可以用硅芯片容易的实现, 其他参数的设计见表 5-1。

表 5-1 本文提出的像素电路基本参数

Table 5-1 Parameters of Our Proposed Pixel Circuits

Capacitor	Value	Resistor	Value
C1	10 pF	R1	10 kΩ
CC	5 pF	R2	1 kΩ
CS	5 pF	RFB	10 Ω
CP1/ CP2	100 pF	RP1/ RP2	1.5 kΩ

前面提到的4T-1C和5T-2C的相关论文是和传统2T-1C电路补偿效果进行的比较。本文下面的仿真目的是研究本文的像素电路和2T-1C电路对TFT电学特性变化的不同反应结果，这些电学特性包括阈值电压 (V_{TH})、有效电子迁移率 (μ_{eff})、KINK效应等，同时仿真像素电路驱动电压的建立时间。图5-3和图5-4已经介绍了2T-1C电路会导致的OLED电流的误差，在后面的工作中不再进行对2T-1C电路的误差仿真。

本仿真环境使用的工具包括了matlab和SmartSpice，流程图如5-21。流程图中变化的参数就对应到后面仿真的 V_{TH} 、电子迁移率 μ_{eff} 、曲翘效应电压VKINK，电源电压 V_{DD} 。

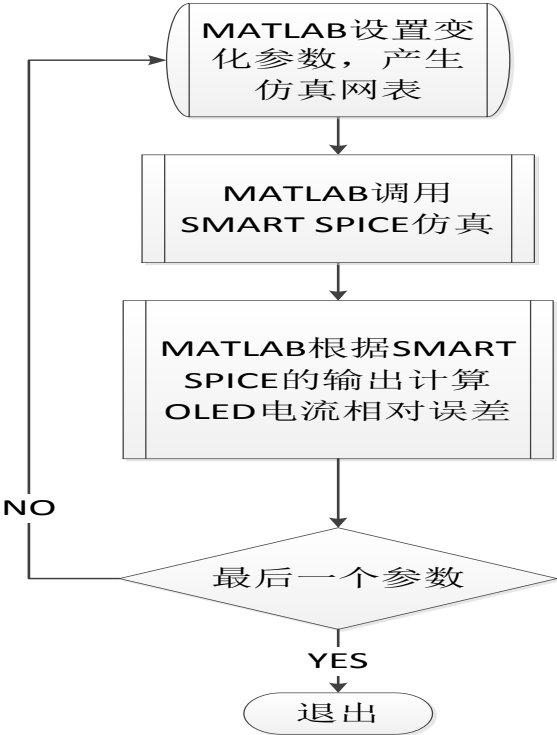


图 5-21 仿真流程图
Fig.5-21 Simulation Flow Chat

2T-1C 的电路结构中, OLED 的电流对于 V_{TH} 的变化是很敏感的。几乎所有的电压驱动结构都主要补偿 V_{TH} 漂移。由于本文提出的结构是直接驱动 OLED 的阳极电压, V_{DATA} 通过反馈系统最后加到了 OLED 阳极, 因此 V_{TH} 是可以补偿的。多晶硅材料加工 TFT 的时候 V_{TH} 的漂移通常是一个方向的, 比如 PMOS 往往只向负方向偏移, 尽管工业界在不断缩小这个偏差, 但是仿真的时候还是考虑了正负漂移两种情况。该仿真中 V_{TH} 初始值是 0V, 最大漂移是 2V, 仿真结果见图 5-22。从图中可以看到, 电流的 V_{TH} 漂移 1V 的时候, 误差超过了 40%, 2V 的时候达到了 80%。实际的 AMOLED 产品的 V_{TH} 漂移会导致 OLED 电流偏小, 显示的亮度偏暗, 尤其是使用了几年后, 屏幕的亮度大大降低了。本文提出的电路在 V_{TH} 漂移 2V 以后的相对误差在 1%以内, 可见本电路对 V_{TH} 漂移不敏感。

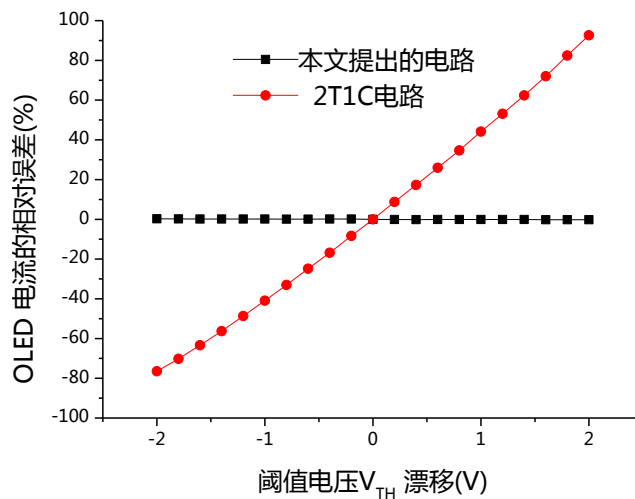


图 5-22 2T-1C 电路和本电路阈值电压漂移仿真结果比较

Fig.5-22 Comparison between the 2T-1C Circuit and the Proposed Scheme with Presence of V_{TH} Shift

2T-1C 的电路结构中, OLED 的电流对电子迁移率 μ_{eff} 也是很敏感的。电子迁移率在 RPI poly-Si TFT model 模型中是用 MU0 表示, 图 5-23 模拟了电子迁移率变化对 OLED 电流的影响。该仿真中电子迁移率初始值是 $10\text{cm}^2/\text{V.s}$, 最大漂移是 $5\text{cm}^2/\text{V.s}$, 当然实际的 TFT 电子迁移率会随时间下降, 不回出现迁移率变快的情况, 但是在仿真中还是把两个方向的变化都做了。从图中看出, 电子迁移率变化 50%, 对 2T-1C 电路来说, OLED 的电流变化超过了 50%。而本文提出的电路, OLED 的电流变化没

有超过 2%。

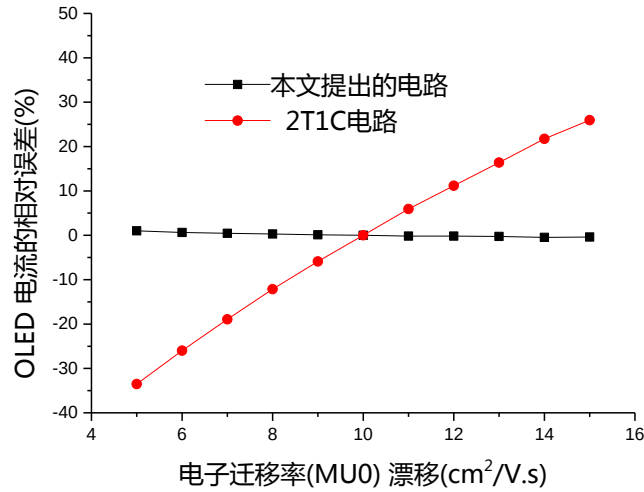


图 5-23 2T-1C 电路和本电路电子迁移率压仿真结果比较

Fig.5-23 Comparison between the 2T-1C Circuit and the Proposed Scheme with Presence of Mobility Shift

低温多晶硅 TFT 在不同 V_{DS} 情况下 KINK 效应不同, 当要显示灰度级低的场景的时候, V_{DS} 增大, KINK 引起的电流偏大, 这样会大大降低 OLED 显示的对比度, 同时引起图像失真。像素电路设计的时候要保证在最大 OLED 电流情况下工作在饱和区, 这就使得电源的 Overhead 电压比较大。这样 OLED 电流越低的时候 TFT 管子的 V_{DS} 越大, V_{GS} 越小, 这就导致 KINK 效应越来越严重。前面提到的复杂像素电路中, 三星公司的 5T-2C 尽管可以补偿 V_{TH} , 但是 KINK 效应是无法消除的, 三星公司是依靠工艺的先进来降低 KINK 效应。图 5-24 是 TFT 管的 KINK 效应的仿真图。仿真设置 VKINK 电压为 10V, AMOLED 的 VKINK 电压随时间的推移逐步降低, TFT 越来越容易发生 KINK 效应, 直观的感觉就是面板开始发烫了。当 KINK 电压下降到 6 V 的时候, 电流误差接近 30%, 而采用本文提出的驱动电路结构, 电流误差小于 1 %。

本文同时对 2T-1C 的 IR Drop 做了仿真, 为了突出电源电压对 OLED 的影响, 仿真的时候设置标准的电源电压是 20V, VKINK 电压设置为 9V, 这样电源电压的波动对电路的影响就能比较容易从波形上仿真出来, 当然实际设计 AMOLED 的时候是要抑制 VDD 电压, 让 TFT 管子尽可能不超过 VKINK, 从下面图 5-25 的仿真结果来看, 2T-1C 电路在 VDD 电压从 20V 降低到 18V 的 10% 的压降的情况下, 电流误差达到了

80%，而本文提出的电路在这种情况下电流误差不到 1 %。由此可见本文提出的像素电路结构在电源电压下降严重的情况下效果也比较不错。

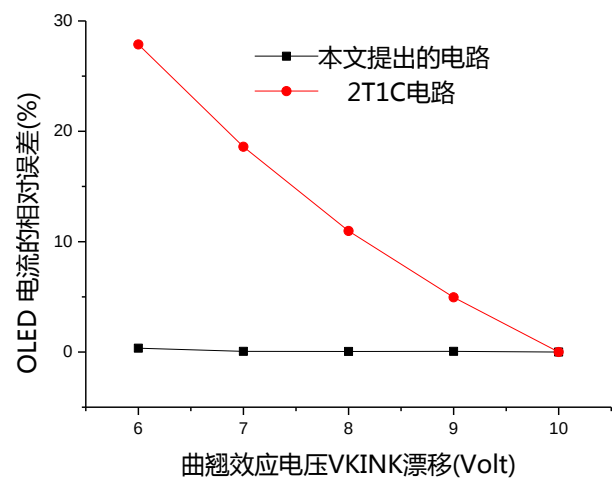


图 5-24 2T-1C 电路和本电路 KINK 效应仿真结果比较
Fig.5-24 Comparison between the 2T-1C Circuit and proposed scheme with Presence of KINK Effect.

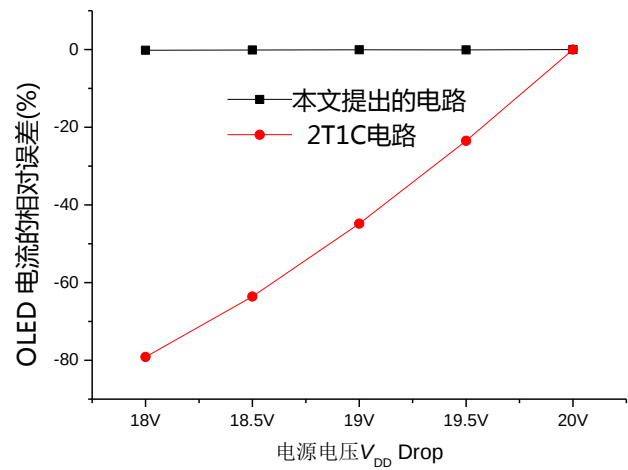


图 5-25 2T-1C 电路和本电路 IR-Drop 仿真结果比较
Fig.5-25 Comparison between the 2T-1C Circuit and proposed scheme with Presence of IR-Drop.

另外, 电流驱动的像素电路普遍存在建立时间偏长的问题, 本文提出的这个结构是直接驱动反馈数据线的, 图 5-26 仿真了在不同 OLED 电流下, 驱动电流的建立时间, 在这个仿真中, 反馈数据线和数据线的寄生电容和电阻分别为 C_p 为 100 pF 和 R_p 为 1.5 k Ω 。从仿真结果来看, 建立时间都小于 3 μ s。这是其他电流驱动的 AMOLED 电路不具备的。

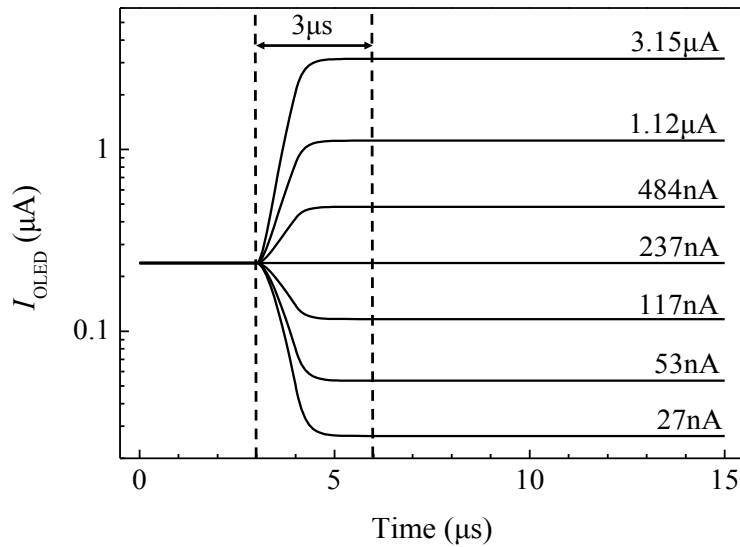


图 5-26 本电路在 OLED 不同电流下的建立时间

Fig.5-26 Transient Response of OLED for Proposed Driving Scheme

从上面的功能仿真结果可以看出基于多晶硅 TFT 的 AMOLED 显示屏需要解决的问题比较多, V_{TH} , 电子迁移率 μ_{eff} , IR DROP, KINK 效应是其中主要的影响因素, 直接关系到屏的一致性, 功耗和寿命等。本文提出的结构都比较好的解决了这些问题, 从仿真结果来看, 效果较好, 本电路结构降低了像素电路的 TFT 数目, 从而降低了像素电路的功耗。

此外该电路还可以对 OLED 的退化(Aging)进行补偿, 通过反馈线对 OLED 输入一个恒流源, 同时测试出该 OLED 这个时候的反馈电压, 就可以获得 OLED 在同样的驱动电流下, 电压的变化情况, 重新获得 OLED 的 V-I 曲线。还可以通过反馈数据线输入一个负向电压, 让 OLED 反向偏置工作一段时间, 这样也可以减少 OLED 本身的 Aging 问题, 这个讨论在本文中就不再展开描述了。

5.4 本章小结

本章分析了实际产品中像素电路复杂的原因。针对这个原因介绍了 TFT 现有的补偿技术，无论是电压型，电流型，外围驱动电路型，都分析了各自的缺陷，有些电路补偿了 V_{TH} ，有些补偿了 V_{DD} 的 IR DROP，有些补偿了 KINK 效应，有些还有像素电路建立时间不够的问题。本文提出了 3T-1C 的像素电路结构，并设计了相关的外围驱动电路，该电路能够补偿这些技术不足的地方。通过仿真验证了本文提出的电路能够补偿 V_{TH} 漂移，能够补偿驱动 TFT 管子的电子迁移率的降低，能够补偿 KINK 效应，还能够补偿 V_{DD} 的 IR DROP，该像素电路的信号建立时间短，适合刷新频率快的面板。该像素电路和外围驱动电路配合，可以使得驱动 TFT 既可以是 N 型材料，也可以是 P 型材料，保持工业兼容性。该像素电路 TFT 管子数目很少，能提高面板良率，适合各种尺寸的面板。

第六章 驱动 TFT 非饱和区工作的低功耗设计

6.1 进行功耗比较的像素电路结构

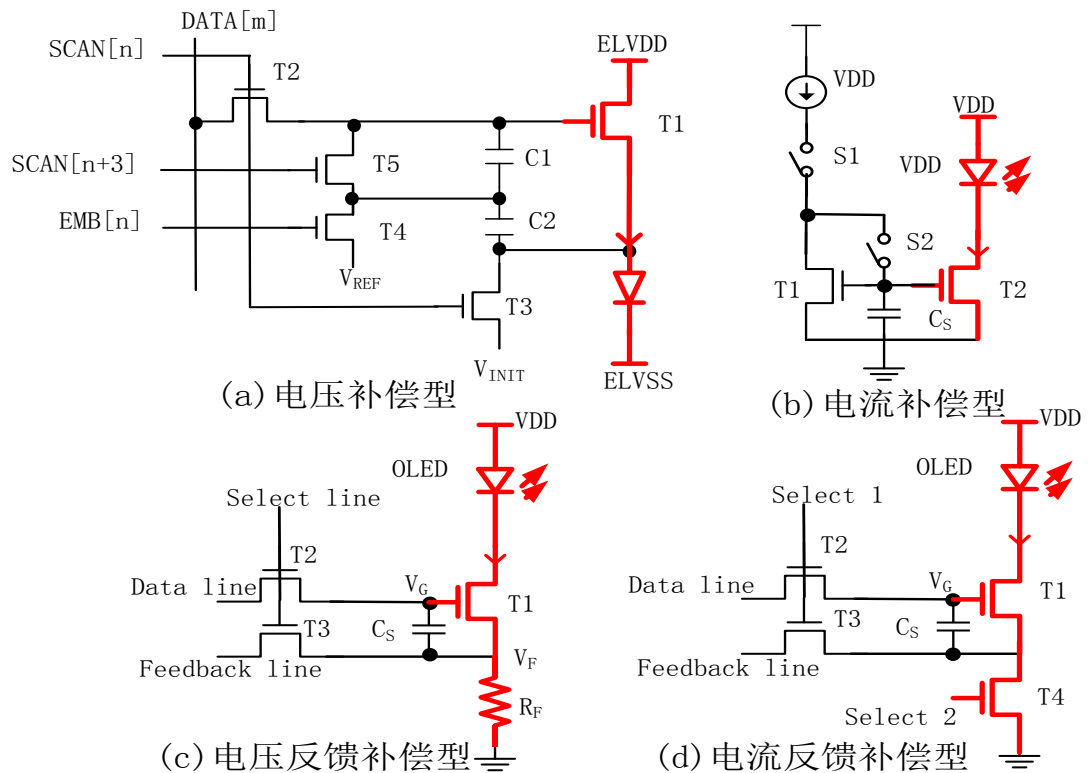


图 6-1 功耗分析中用来对比的像素电路

Fig.6-1 Compared Pixel Circuits in Power Analysis

前一章介绍了本文提出的像素电路的几个优点，并且通过仿真验证了这些优点，本文提出的像素电路配合本文的驱动电路还有一个很大的优点就是功耗方面。本章选取了四个有代表性的电路结构进行功耗对比，这四个电路见图 6-1，这四个电路的一个共同特点是驱动 TFT 都是工作在饱和区的。本文提出的 3T-1C 像素电路的驱动 TFT 可以工作在线性区，这为功耗优化带来了较大的帮助。该图中(a)是 5T-2C 的电压补偿型的像素电路，(b)是 4T-1C 的电流补偿型像素电路，(c)是 3T1C1R 电压反馈补偿型像素电路，(d)是 4T-1C 电流反馈补偿型像素电路。图中把这些电路的功耗分为两

个部分画出来了，用红色加粗有电流方向的部分是静态功耗部分，其他 TFT 开关管和存储节点电容（图中的黑色点）是动态功耗部分，这四种像素电路的共同特征就是驱动管 TFT 工作在饱和区。本章将用这四种电路和作者自己提出的像素电路的进行功耗比较，除了比较饱和区和线性区 TFT 对静态功耗的影响，同时也讨论了动态功耗的差异。该图中(a)和(b)的有电流方向的红色箭头部分和 2T-1C 像素电路结构是一样的，因此静态功耗基本是一致的，分析(a)和(b)的静态功耗和分析 2T-1C 的像素电路的静态功耗是一样的，后面讨论静态功耗的时候就不分(a)和(b)了，统一用 2T-1C 来替代静态功耗的分析。

根据图 6-1 可以看出，和本文比较的电路图都是采用 NMOS 像素电路，为了方便比较，笔者把前一章的像素电路中的 PMOS 换成了 NMOS。这样本文自己提出的电路结构就是图 6-2。比较一下这个图和前一章的结构，可以发现针对 TFT 由 P 型改成 N 型，只需要把驱动电路中第一级运放输入端交换一下位置就可以了。驱动 IC 在反馈信号的输入端增加一个选择器来区分是 N 型还是 P 型的 TFT 材料，这样同一个驱动 IC 可以同时支持两种 TFT 材料。

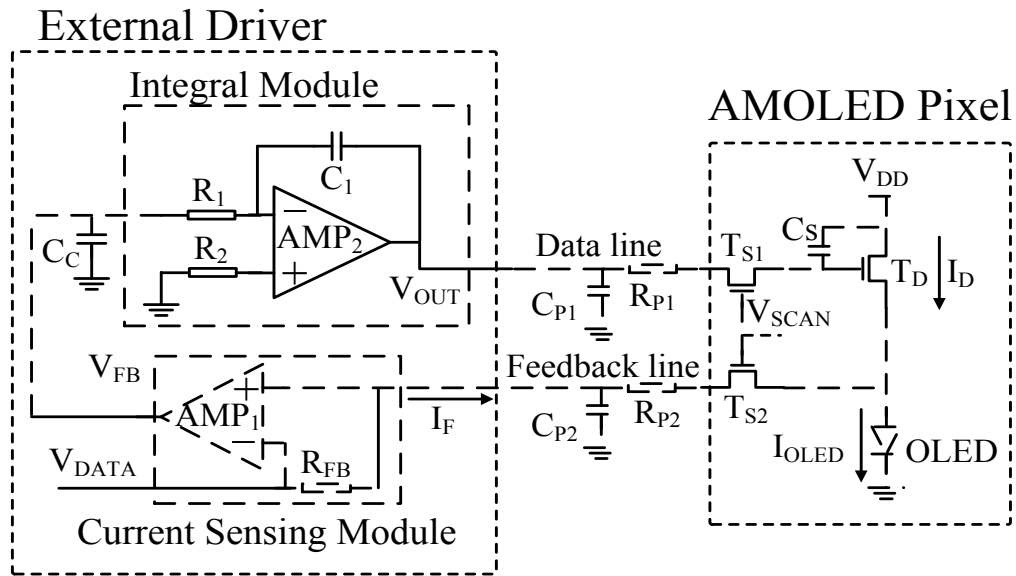


图 6-2 本文提出的低功耗像素和驱动电路(N 型)

Fig.6-2 Proposed Lower Power Pixel and Driving Scheme (N-type)

一般情况下，面板数据线和开关线的寄生电容远远大于像素电路里面 TFT 管的 Gate 电容和存储电容 C_S ，因此，对动态功耗影响比较大的就是这些数据线的条数和数据线的寄生电容。表 6-1 列出了每种像素电路结构中面板连线数目，每条线在面板

中的距离都比较长，寄生电容大，本章后面计算动态功耗的时候需要这些参数。

表 6-1 面板全局连线数目比较
Table 6-1 Panel Global Net Number

像素电路	电压补偿	电流补偿	电压反馈	电流反馈	本文
数据线	1	1	2	3	2
开关线	3	1	1	1	1

5T-2C 电压补偿型电路中 V_{REF} 和 V_{INT} 虽然也是数据线，但是该电压是恒定不变的，而像素电路中的 C1, C2 比较小，每次开关虽然会对这两个电容充放电，但是动态功耗很低，分析该像素电路动态功耗的时候，忽略这部分的动态功耗。电流补偿型电路的两个开关是同时打开和关闭的，面板上是实际是一条开关线。实际面板中开关线的电压幅度在每次开关的时候都是满幅度变化，而数据线的电压波动范围比较窄，因此开关线的功耗是动态功耗的主要贡献者，对于这个结论，本章后面有仿真数据说明。

本章仿真需要采用 OLED 和 LTPS 仿真模型，OLED 的曲线参考上一章的图，该 OLED 的模型在第三章可以见到详细建立过程。本章假设 OLED 需要的最大电流为 700nA。本仿真中 TFT 模型即作为驱动管，也作为开关管，本章仿真中没有再区分开。实际的 AMOLED 产品中，驱动管 TFT 和开关管 TFT 参数有可能不同。

6.2 饱和区驱动 TFT 的功耗仿真

首先仿真的是饱和区 TFT 的像素电路的静态功耗。驱动 TFT 工作在饱和区的电路最有代表性的就是前面图 6-1(a)的电压补偿型的 5T-2C 电路。根据前面章节介绍的驱动管设计原则，先确定驱动管 T1 的参数，本文设计要求 OLED 最大电流需要 700nA，先需要确定 5T-2C 的 V_{DD} 和驱动管子的宽长比。在 AMOLED 像素电路设计中，驱动管尺寸大了会影响像素电路开口率的大小，从而影响发光效率，小了不能提供足够的 OLED 驱动电流，导致电源电压的增加。考虑了这些因数后，本章仿真中驱动管 TFT 的宽长比设计为 $40\mu\text{m}/10\mu\text{m}$ 。仿真首先通过 V_{DATA} 和电源电压 V_{DD} 的 DC 扫描获得电源电压最终数值。在 MATLAB 中先逐步增加 V_{DATA} 电压，然后输出仿真文件，再调用 SmartSpice 工具仿真电源电压逐渐升高时候的 OLED 电流，检查饱和电流出现在什么电源电压下。如果饱和电流偏小，再修改 V_{DATA} ，然后产生仿真文

件，继续仿真过程。最后得到了如图 6-3 的电压电流曲线，该曲线数据线电压 V_{DATA} 电压是 10V。从这个图可以看出， V_{DD} 电压达到 10V 的时候，OLED 的电流就饱和了，电源电压超过 12V，KINK 效应就明显了。考虑到 IR Drop 的影响，电源电压通常提高 10%，这样 5T-2C 像素电路中的 ELVDD 设计为 11V，DATA[m]最大电压是 10V，可以得到该 5T-2C 像素电路的最大静态功耗为 7.7uW，平均显示功耗为最大功耗一半的情况下，平均静态功耗为 3.75uW。

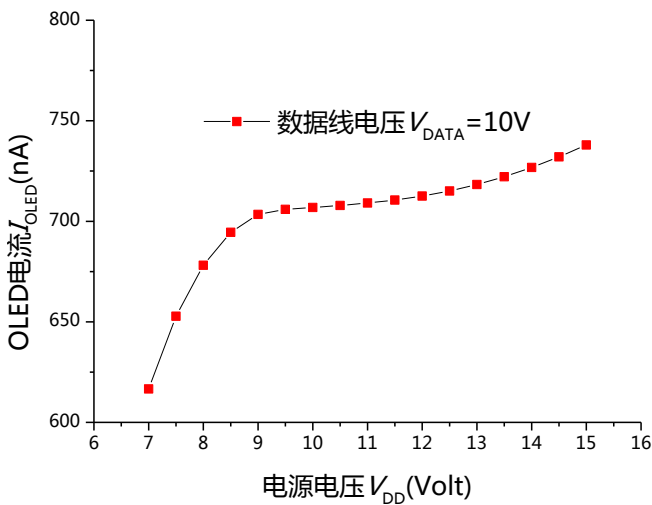


图 6-3 5T-2C 电路最大输出亮度下的过驱动电源电压和 OLED 电流曲线
Fig.6-3 Override Drive Voltage and OLED Current of 5T-2C at Max OLED Lumilance

接下来，仿真饱和区 TFT 的像素电路的动态功耗。5T-2C 的存储电容是 C1，假设面板的刷新率是 100HZ，屏幕有 1000 行，开关管开启时间是 10μs，关闭时间是 10ms。前面得到 DATA[m]最大电压是 10V，那么假设 C1 上的电荷在 T2 关闭情况下的电压在两个刷新周期之间不得下降 50mV。该 5T-2C 电路的开关管有 4 个，开关管的面积大会影响开口率，太小影响刷新频率的提高。考虑了这些情况以后，本章仿真的时候选取的开关管的大小为 10 μ m /10 μ m，所有参数见表 6-2。

表 6-2 5T-2C 像素电路参数
Table 6-2 Values of parameter for 5T-2C pixel cuirts

V_{DATA}	ΔV_{DATA}	V_{DD}	T_{on}	T_{off}	$T1$	$T2-T5$
10V	50mV	11V	10μs	10ms	40 μ m /10 μ m	10 μ m /10 μ m

电容 C1 的大小和开关管关闭状态下的漏电流有关系，漏电流越大，需要的电容

越大, 图 6-4 是开关管在关闭情况下的电流。该漏电流应该是漏源两端最大压差下的漏电流, C1 存储电容在最大显示亮度下是 10V, V_{DATA} 数据线的电压降低到了 0V 时候漏电流最大。由该表可看出, V_{SCAN} 电压降低到 -3V 以后, 电流下降的比例就小了。开关管关闭状态下的电压距离临界点要有一定距离, 根据这个 V-I 曲线, 可以设定 V_{SCAN} 的关闭电压为 -4V。

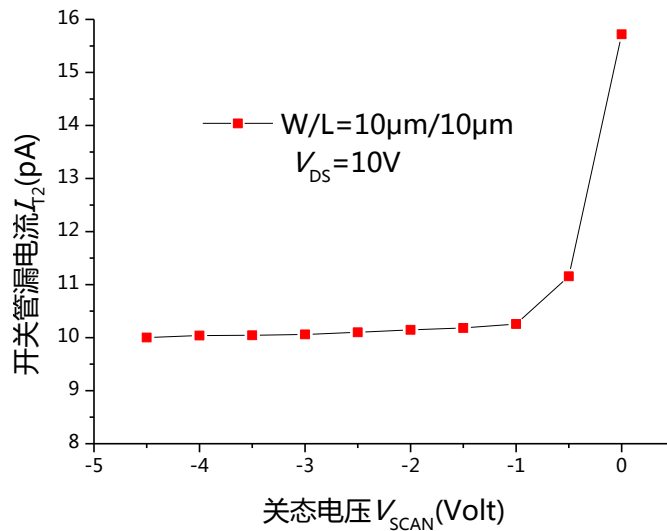


图 6-4 5T-2C 的开关管关闭状态栅极电压与漏电流的曲线

Fig.6-4 5T-2C Circuits's Leakage Current with Different OFF Switching Voltage

根据表格 6-2 和图 6-4 的最小漏电流, 可以确认存储电容 C1 的大小, 根据公式前面章节的介绍, 可以根据公式 6-1 计算出存储电容大小, 本文在后面的仿真中取 C1 大小为 2pF。

$$C_1 > (I_{off} \times T_{off}) / \Delta V_{DATA} = 2 pF \quad (6-1)$$

同样, 可以仿真得出开关管开启时候的电压大小如图 6-5, 该仿真设定存储电容 C1 上的最大电压摆幅是 OLED 最大亮度时候需要的 10V 电压, 要求在 50% 的开启时间内完成充电。这就要求在时间轴 5 μs 的时候完成充电。从仿真图来看, 20V 的开启电压没有能在 5 μs 内完成全部充电, 24V 的开启电压能够满足在 5 μs 的时候充电完成。根据上面的结果, 本文总结了 5T-2C 电路的其他设计参数, 见表 6-3, 根据这个参数, 可以计算出像素电路的动态功耗和静态功耗。

表 6-3 推导出的 5T-2C 像素电路参数

Table 6-3 Derived Values of parameter for 5T-2C pixel circuits

$V_{\text{SCAN_OFF}}$	$V_{\text{SCAN_ON}}$	C_1
-4V	24V	2pf

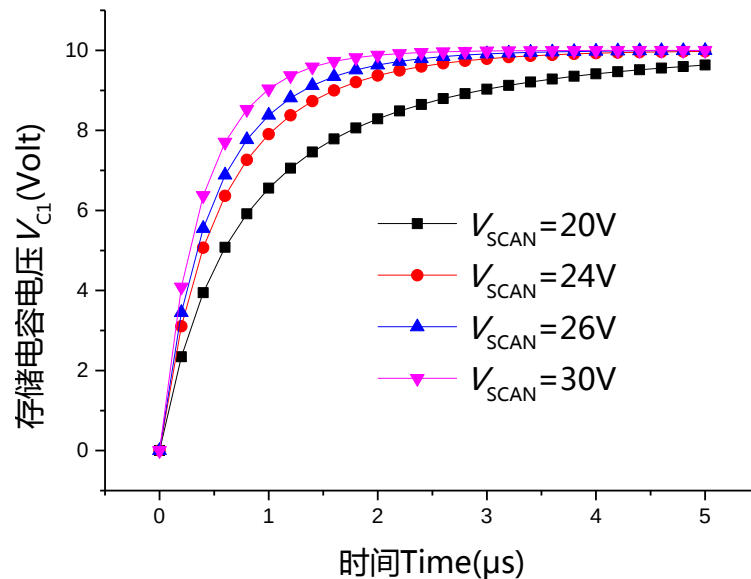


图 6-5 5T-2C 的开关管不同开启电压与存储电容充电时间的曲线

Fig.6-5 5T-2C Circuits's Storage Capactance Voltage and Charge Time with Different On Voltage

在 AMOLED 的产品中, 数据线和控制线的距离很长, 因此数据线和控制线的寄生电容也是很大的[87-88]。如手机这种小面板下, 寄生电容可以达到 10pf, 中型尺寸的面板的寄生电容达到 50pF, 大型面板的寄生电容达到 100pF。对于 5T-2C 电路来说, 可以认为 V_{INIT} 和 V_{REF} 这两条数据线上的电压保持不变, 每次选中 T3, T4 的时候只有 C1, C2 电容被充电, V_{INIT} 和 V_{REF} 这两条数据不需要再充电, 动态功耗忽略这两部分。 V_{DATA} 这条数据线的电容是存储电容加上线的寄生电容。T2-T5 四个开关管的电压摆幅是 28V, 开关管的 Gate 电容和寄生电容相比忽略不计, 面板的刷新频率都是 100HZ, 存储电容都是 2pF, 静态功耗为最大显示亮度下的静态功耗的一半, 那么不同尺寸的面板像素电路的功耗计算如表 6-4。

如果面板尺寸大, 一般显示行数会增加, 开关管的打开时间更加短, 关闭时间变

化不大,这就要求开关管的开启电压大,但是大尺寸的面板的开关管可以做的大一些,不需要增加开启电压来达到快速充电的目的。开关管增加的尺寸对关闭情况下的漏电流有增加,这就需要增加一点存储电容的大小,从前面章节的仿真结果来看,开关管的宽长比的增加对开启电流的影响远远大于关闭情况下的漏电流,因此存储电容增加不会太大。况且在动态功耗中,数据线和开关线的寄生电容比像素电路内的存储电容大,因此存储电容节点上的动态功耗比例太小,可以忽略不计。因此表中除了寄生电容随面板大小不同变化比较大以外,其他几个参数不变。

表 6-4 5T-2C 在不同尺寸面板下的像素电路的功耗
Table 6-4 5T-2C Pixel Power at Differeant Panel Size

面 板 尺 寸	寄 生 电 容 (pF)	开 关 电 压 幅 度 (Volt)	信 号 电 压 幅 度 (Volt)	开 关 线 功 耗 μW	数 据 线 功 耗 μW	动 态 功 耗 μW	静 态 功 耗 μW	总 功 耗 μW
小	10	28	10	2.352	0.16	2.512	3.85	6.362
中	50	28	10	11.76	0.56	12.32	3.85	16.17
大	100	28	10	23.52	1.06	24.58	3.85	28.43

根据表格 6-4,可以绘出了图 6-6,该表列出了各种功耗在像素电路的相对关系,从该图可以看出,在小屏幕尺寸下,像素电路的静态功耗比动态功耗要大一些,随着面板尺寸的增加,动态功耗增加得越来越大,比例越来越高,静态功耗没有变化。对于大尺寸的面板,主要的功耗都集中在了像素电路的动态功耗上了,动态功耗中,开关管的功耗比例最大,无论是小尺寸还是大尺寸,开关管的功耗都占据了绝大部分的动态功耗,原因第一是开关控制线的电压摆幅大,第二个是开关控制线多。数据线的动态功耗不大,原因第一个摆幅不如开关管大,第二是驱动的像素电路里面的数据线少。

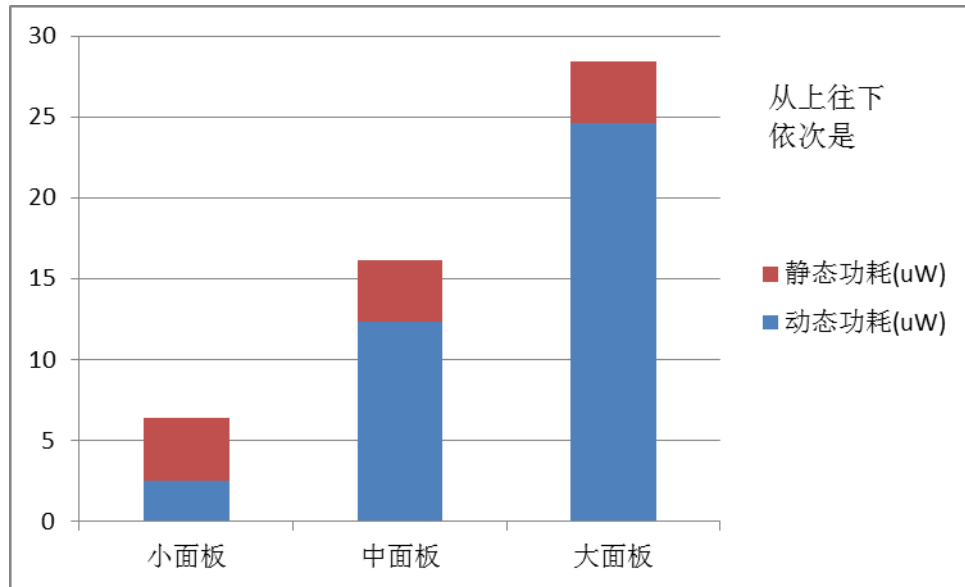


图 6-6 5T-2C 像素电路在不同面板大小下的功耗
Fig.6-6 5T-2C Pixel Power at Different Size of Panel

从上面的表来看，连线上的寄生电容对 AMOLED 的功耗影响非常大，因此对于大尺寸面板来说，增加开关管的面积，降低开关电压，是功耗优化的主要途径。另外降低开关管开启和关闭之间的压差，对 AMOLED 的功耗优化非常有利，这就需要在开关管 TFT 设计上尽可能的提高开关比。

6.3 非饱和区驱动 TFT 的功耗仿真与比较

对于本文提出的 3T-1C 电路，开关管只有两个，数据线 (V_{DATA}) 和反馈线 (V_{FB}) 各一条。首先要确定像素电路的电源电压 (V_{DD}) 和数据线的电压 V_{DATA} ，按照本文的电路结构图，可以让驱动管 TFT 工作在线性区，这样需要通过增加 Gate 上的电压来达到降低 V_{DD} 电压的目的。Gate 上电压 V_{DATA} 的增加会导致动态功耗的增加，但是 V_{DD} 的降低会使得静态功耗降低，整体的功耗是增加还是减少通过下面的仿真来分析。根据前面 5T-2C 电路的仿真结果，电源电压为 11V，本文的低功耗像素的电源电压从 10V 开始往下降低，同时测试每个电压下驱动管 TFT 上的电压 (V_{DATA}) 大小。如图 6-7，700nA 是最大的 OLED 电流，每条 V-I 曲线都是不同电源电压下， V_{DATA} 和 OLED 电流的关系图。Stand Current 和每条曲线交点的横坐标就是该电源电压下输出 700nA 的电流需要的 V_{DATA} 电压。当电源电压是 10V 的时候， V_{DATA} 也是 10V，随

着电源电压下降到 6V， V_{DATA} 电压增加到了 11.2V。由此可见，静态功耗的降低伴随动态功耗的增加。

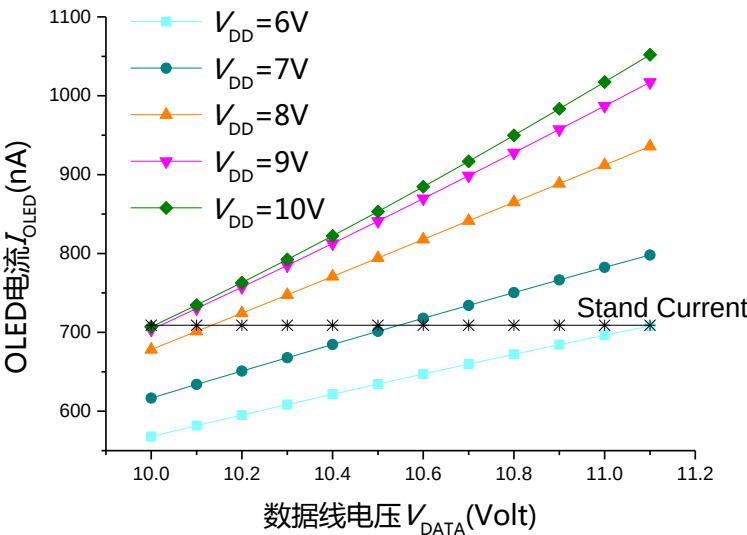


图 6-7 3T-1C 像素电路在不同电源电压下的数据线电压和 OLED 电流曲线
Fig.6-7 OLED Current and Data Voltage at Different Power Supply for 3T-1C Circuits

虽然静态功耗的降低伴随动态功耗的增加，但是可以列出每个电压下的 3T-1C 电路的功耗的变化，根据本文的 3T-1C 结构，增加的动态功耗只有数据线 V_{DATA} ，反馈数据线 V_{FB} 是不会随着电源电压降低而增加的，面板的刷新频率都是 100HZ，存储电容都是 2pF，表 6-5 列出了不同电压下，小尺寸面板的功耗构成。

表 6-5 3T-1C 在不同电源电压下的像素电路的功耗
Table 6-5 3T-1C Pixel Power at Differeant Power Supply

电 源 电压	寄 生 电 容 (pF)	开关电 压幅度 (Volt)	信号电 压幅度 (Volt)	开 关 线 功 耗 μW	数 据 线 功 耗 μW	动 态 功 耗 μW	静 态 功 耗 μW	总 体 功 耗 μW
6.5V	10	28	11.2	0.784	0.271	1.055	2.275	3.330
7V	10	28	10.54	0.784	0.253	1.037	2.45	3.487
8V	10	28	10.15	0.784	0.244	1.028	2.8	3.828
9V	10	28	10.05	0.784	0.241	1.025	3.15	4.175
10V	10	28	10.0	0.784	0.240	1.024	3.5	4.524

在图 6-8 中，本文列出了电源电压不断下降的情况下，3T-1C 电路动态功耗和静

态功耗的变化,从图中可以看出,随着电源电压的降低,动态功耗的绝对值增加不大,但是静态功耗降低非常明显。因此整体功耗会随着电源电压的降低而降低。因此采用本文提出这种低功耗 3T-1C 像素电路,电源电压可以由 5T-2C 的 11V 下降到 6.5V。

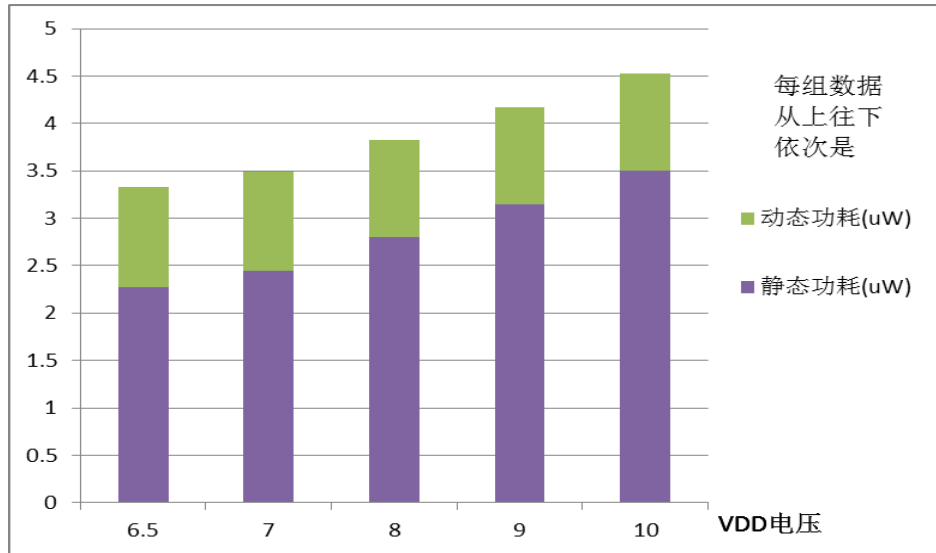


图 6-8 小面板下 3T-1C 像素电路不同电压下功耗的变化

Fig.6-8 3T-1C Pixel Power at Different Power Supply for Small Pannel

采用本文提出的 3T-1C 像素电路,可以继续对不同尺寸面板的功耗做进一步仿真。设置的电源电压 6.5V,数据线和开关线上的寄生电容和 5T-2C 电路一致。仿真功耗数据见图 6-9。从该图中同样可以看出小面板的像素电路中静态功耗比动态功耗大,大面板下动态功耗大于了静态功耗。

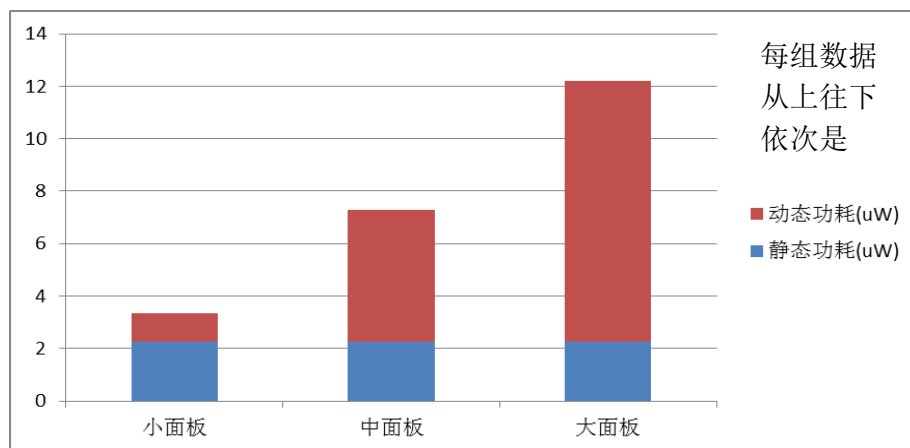


图 6-9 3T-1C 像素电路在不同面板大小下的功耗

Fig.6-9 3T-1C Pixel Power at Different Size of Panel

综合前面的数据可以对比本文的 3T-1C 像素电路和 5T-2C 电路在不同尺寸下的功耗比较结果，如图 6-10。

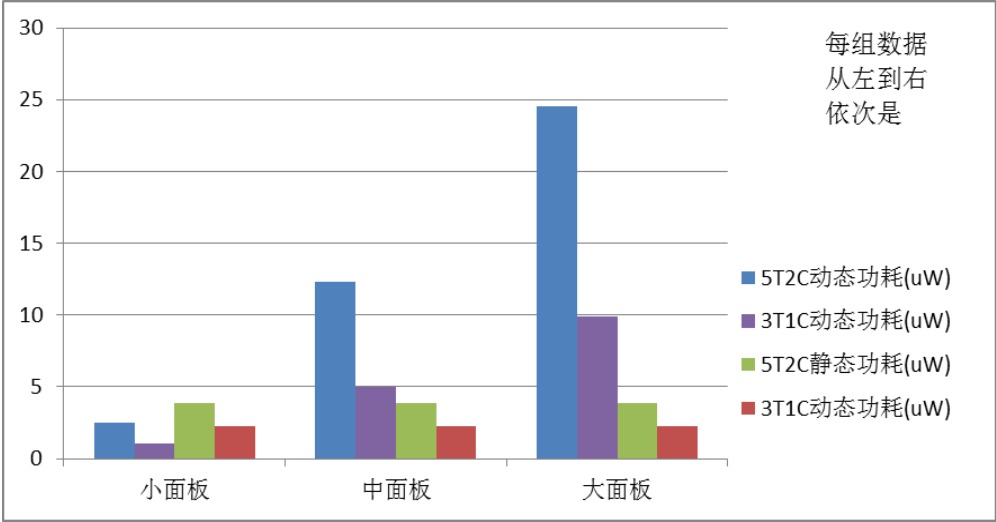


图 6-10 3T-1C 和 5T-2C 像素电路在不同面板大小下的功耗比较
Fig.6-10 3T-1C and 5T-2C Pixel Power Campare at Different Size of Panel

从图中可以看出，本文提出的 3T-1C 像素电路无论是动态功耗还是静态功耗都优于电压补偿型的 5T-2C 电路。无论是在小面板还是大面板 AMOLED 面板下，本文的电路都有较大优势。本文的电路能够获得这些功耗的优势的原因在于：本文提出的电路的驱动 TFT 管可以工作在线性区，电源电压可以降低比较大，这就带来了静态功耗的优势。另外，本文提出的 3T-1C 像素电路的开关管数目少，这样就带来了动态功耗的优势。因此笔者认为降低像素电路里面的晶体管数目，同时降低驱动 OLED 的驱动 TFT 的电源电压是低功耗像素电路设计的关键。

6.4 非饱和区驱动 TFT 的电源电压最优解

本文提出的 3T-1C 像素电路的电源可以不断降低，由于本文提出的像素电路的数据线的动态功耗是随电源电压降低而增加的，静态功耗是随电源电压降低而降低的。从前面的仿真可以看出，数据线的动态功耗增加不多，但是，可以假设当电源电压降低到 V_{OLED} 的时候，数据线再高的电压也不能驱动 OLED 了，动态功耗可能增加到无穷大。因此本文提出的像素电路存在一个电源电压，这个电源电压是本文提出的 3T-1C 电路功耗最优的位置。电源电压降低到该数值以后，再降低电源电压会导致动

态功耗的增加超过静态功耗的下降。数据线上的动态功耗和数据线的电压以及数据线的寄生电容有密切相关,因此下面仿真分析数据线的寄生电容对电源电压最优解的影响。

首先,本文先分析数据线电压和电源电压大小的关系,由于本文提出的 3T-1C 电路工作在线性区,根据线性区电流方程公式 6-2 可以推导出最大 OLED 电流下 V_{DATA} 和 V_{DD} 的关系,见公式 6-3。

$$I_{OLED} = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) [2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (6-2)$$

$$V_{GS} = a \frac{1}{V_{DS}} + \frac{1}{2} V_{DS} + V_{TH} \quad (6-3)$$

$$\text{其中 } a = \left(\frac{L}{W} \right) \left(\frac{I_{OLED}}{2\mu C_{OX}} \right) \quad (6-4)$$

公式 6-3 中的 V_{GS} 的变化反映的就是 V_{DATA} 的变化, V_{DS} 的变化反映的就是 V_{DD} 的变化,这个公式可以反映出数据线电压随电源电压变化的曲线。根据前面的 3T-1C 电路给出的参数,仿真得出了 3T-1C 电路 V_{DATA} 和 V_{DD} 的变化曲线,见图 6-11。

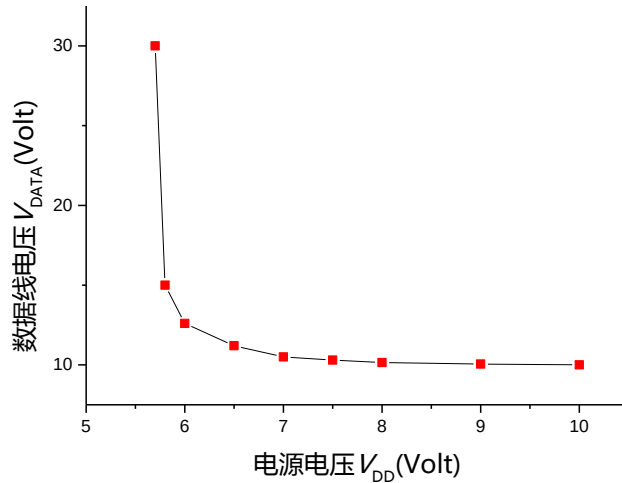


图 6-11 3T-1C 像素电路在不同电源电压下的数据线电压

Fig.6-11 Data Voltage with Different Power Supply for 3T-1C Pixel Circuits

从这个图可以看出,电源电压和数据线电压的关系是符合公式 6-3 的。当电源开始从饱和区 TFT 需要的 10V 电压开始下降的时候,数据线上的电压只增加很小部分,

这样静态功耗的降低是大于动态功耗的增加的。但是当电压降低到 6V 以后，数据线上的电压会急剧增加，由于数据线的电容较大，就会导致动态功耗的增加大于静态功耗的降低。根据动态功耗和静态功耗的计算公式，当电源电压降低 ΔV_{DD} 的时候，数据线电压会增加 ΔV_{DATA} ，那么静态功耗减少的部分和动态功耗增加的部分见公式 6-5 和公式 6-6，这样就能得出整体功耗的变化公式 6-7。

$$\Delta P_{Static} = \Delta V_{DD} * I_{OLED} \quad (6-5)$$

$$\Delta P_{Dynamic} = C_{DATA} f (2V_{DATA} * \Delta V_{DATA} + \Delta V_{DATA}^2) \quad (6-6)$$

$$\Delta P_{Total} = \Delta P_{Dynamic} + \Delta P_{Static} \quad (6-7)$$

根据公式 6-7，可以计算每次降低电源电压后的功耗变化，公式中 C_{DATA} 是数据线的寄生电容和存储电容的和，面板尺寸不同，电容大小不同。本文仿真了小型和中大型面板下的动态功耗和静态功耗的变化关系，该仿真的频率和数据线上的电容大小和表 6-4 上的一致。该仿真采用的是最大显示亮度下的动态功耗和静态功耗的变化关系。通过计算，该像素电路的电源电压最优的位置是 6V。虽然仿真结果的最优解是 6V，但这个电压是临界点，仿真数据显示，当电源电压下降到了 5.7V 以后，数据线的电压将由原来的 10V 增加到 30V，电路实现已经相当困难。因此本文后续仿真中提出的 3T-1C 像素电路的功耗的时候，最低电源电压为 6.5V。

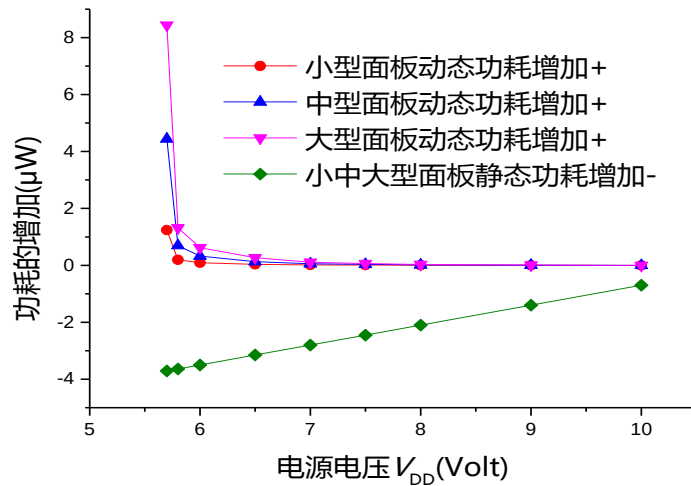


图 6-12 3T-1C 像素电路在不同电源电压下的功耗

Fig.6-12 Power with Different Power Supply for 3T-1C Pixel Circuits

图 6-12 显示电源电压下降到了 5.7V 以后, 显示了大型面板和中型面板的动态功耗的增加已经超过了静态功耗的下降, 只有小面板的静态功耗的下降仍然超过动态功耗的增加。根据仿真数据可以得到一个结论, 小面板的 AMOLED, 由于寄生电容不大的原因, 动态功耗增加不大, 静态功耗下降非常显著, 因此文章后面讨论小面板的功耗的时候, 可以只考虑静态功耗部分。

6.5 对比电路的静态功耗效率的比较

前面的仿真显示了小面板的 AMOLED 静态功耗的比例高于动态功耗, 本文提出的 3T-1C 像素电路降低电源电压的时候, 由于寄生电容不大的原因, 动态功耗增加不明显, 静态功耗下降非常显著, 因此本章后面比较不同电路结构的静态功耗的优化效果的时候引入公式 4-4 的静态功耗效率来讨论功耗问题。

第一个比较是本文提出的 3T-1C 电路和电流补偿型电路的效率, 本文仿真测试了 OLED 的电流在 $0.2\ \mu\text{A}$ - $0.7\ \mu\text{A}$ 下的 OLED 上的驱动电压 V_{OLED} , 这样可以得到图 6-13 的曲线。从这个曲线可以看出, 当 OLED 的显示亮度越高的时候, 两者的电源效率都在提高, 但是电流补偿型电路的效率在低显示亮度下的效率只有 35%, 最高亮度下也只有 51%, 而本文提出的 3T-1C 电路即使在低显示亮度下也有 65% 的效率, 比电流补偿型电路的最高效率还高, 在最大显示亮度下的电源效率可以达到 95%。由此可见将驱动 TFT 由饱和区转移到线性区的方法大大地提高了电源效率, 也就是大大地减少了像素电路的静态功耗。

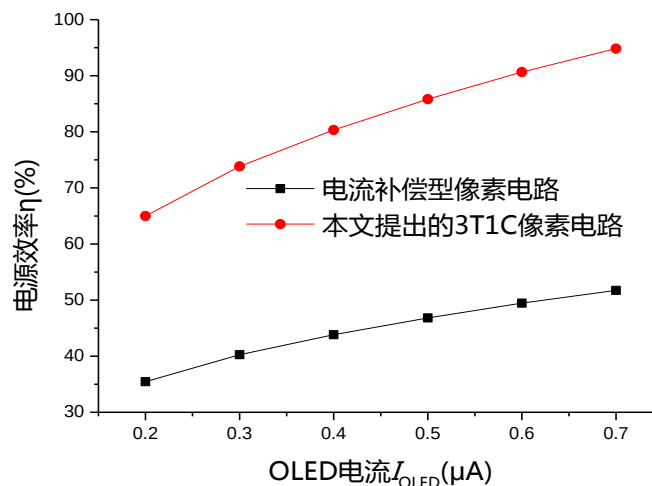


图 6-13 3T-1C 像素电路与电流补偿型静态功耗的效率比较

Fig.6-13 Power Efficiency Campare for 3T-1C Pixel Circuits and Current Composent Pixel Circuits

图 6-1 中的(c)和(d)在静态功耗的这条路径上一个增加了电阻，一个增加了开关管。本仿真选取电阻大小为 2M，这样当 OLED 电流为最大的 700nA 时候，电阻上的压降为 1.4V，这样电压反馈型像素电路的电源电压就为 11.4V。开关管的为 20 μ m /10 μ m，当 OLED 电流为最大的 700nA 时候，开关管两端的电压为 100mV 左右，这样电流反馈型像素电路的电源电压为 11.1V。本文仿真了每个比较电路的电流电压曲线，见图 6-14，这四个电路在电源电压达到大约 11V 以后，都出现了 700nA 的饱和电流。

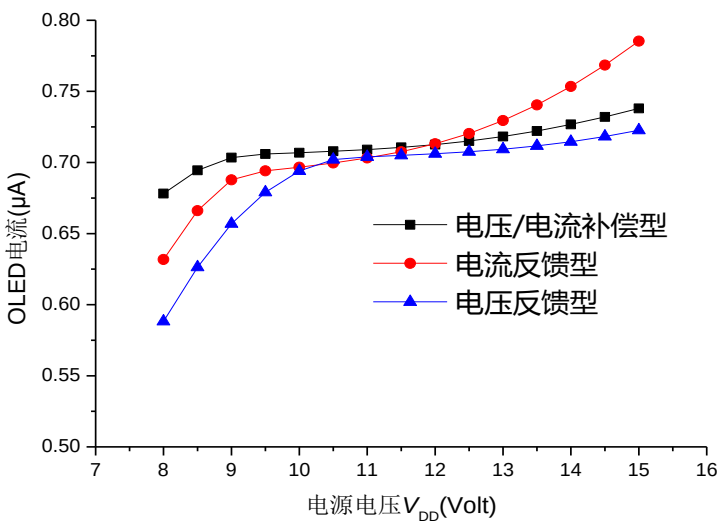


图 6-14 电源电压与各种像素电路 OLED 电流的曲线
Fig.6-14 Power Supply Volatage and OLED Current with Different Pixel Circuits

由此可见，比较的这几种电路的功耗都不如本文提出低功耗像素电路，表 6-6 列出了仿真中的参数设置，没有特别指明的和前面描述一致。

表 6-6 不同像素电路的参数
Table 6-6 Parameters of Different Pixel Circuits

像素电路类型	特性参数	电源电压(Volt)	VDATA (Volt)
电压补偿		11	10
电流补偿		11	4.31
电压反馈	RF=2M	11.4	5.71
电流反馈	T4=20 μ m /10 μ m	11.1	4.15
本文 3T1C		6.5	11.2

最后，本文比较了所有对比电路的电源效率，见图 6-15，该图列出了图 6-1 的这四种电路与本文提出的像素电路的电源效率对比图。从该图可以看出本文提出的低功耗像素电路在静态功耗上有很好的优势。

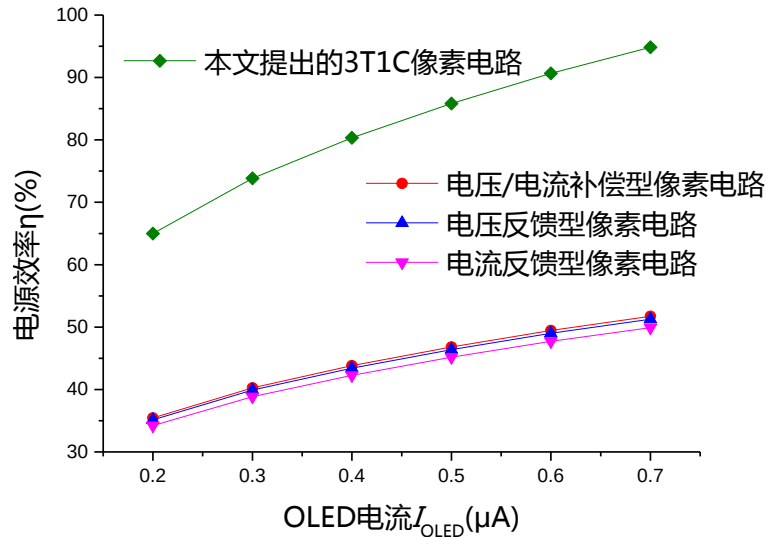


图 6-15 3T-1C 像素电路与其他像素电路的效率比较

Fig.6-15 Power Efficiency Campare for 3T-1C Pixel Circuits and other Circuits

6.6 本章小结

本章讨论了驱动 TFT 管非饱和区工作的低功耗设计方法，仿真比较了两种工作区下的动态功耗和静态功耗的差异，仿真了本文提出的 3T-1C 电路结构的最低工作电压的最优解。通过像素电路在小型面板，中型面板，大型面板功耗的比较。通过电压补偿型像素电路，电流补偿型像素电路，电压反馈型像素电路，电流反馈型像素电路这四种典型的像素电路的功耗问题和本文提出的低功耗 3T-1C 像素电路进行了比较。说明本文提出的工作在非饱和区的 3T-1C 电路功耗都具有很大的优势。

第七章 显示面板供电电压动态调整的低功耗方法

7.1 DVS 技术原理

动态电压调整技术（DVS）是一种基于电路的系统级的功耗优化方案。在 CMOS 电路设计中非常成熟，其原理是当系统不需要工作在高性能模式的时候，可以降低工作频率和电压来达到降低功耗的目的，由于频率和功耗是线性关系，但是电压的平方和功耗是线性关系，因此降低电源电压会更加节约功耗。因此该技术被 CMOS 电路设计尤其是 SOC 设计普遍采用，已经集成到 EDA 工具中了。显示面板也有同样的需求，当显示屏内容不需要以最大亮度显示的时候，需要的 OLED 电流会下降，维持这个较低的 OLED 电流的时候不需要高的电源电压，即使电源电压降低一些，也不会影响显示的效果[89-90]。因此，可以通过降低电源电压的方式来降低系统功耗。已有的一些 DVS 技术讨论是基于驱动管 TFT 是一个理想电流源，TFT 驱动管处于饱和区，一旦像素电路工作在线性区，就需要对像素电路进行补偿，图像也开始失真了，这就限制了 DVS 技术的发挥。而本文提出的像素电路可以工作在线性区，在配合 DVS 技术上有较大优势，本章在原理和仿真上阐述了该技术配合本文提出的低功耗像素电路的优势。

DVS 技术只是系统级功耗优化技术之一，还有其它一些系统级的方法已经在传统显示系统中采用了。有些方法根据用户的行为来控制显示的技术[91-92]，这种技术可以适合 CRT，LCD，OLED。还有些方法采用局部关闭显示或者局部变暗(local dimm)[93-94]，这种技术可以适合 LCD 和 OLED。此外还有采用色彩重排技术(color remapping)来降低系统的功耗，该技术也可以适合于 LCD 和 OLED 显示，但是该技术会改变本身的显示内容，影响客观感觉，因此一般认为该技术只可以用在用户图像接口中（GUI）应用中，不适合自然景观，相片和视频等领域[95-97]。研究本文发现单独适合于 OLED 技术的不多，本文基于这个前提，提出了针对 OLED 的低功耗像素电路的 DVS 技术。

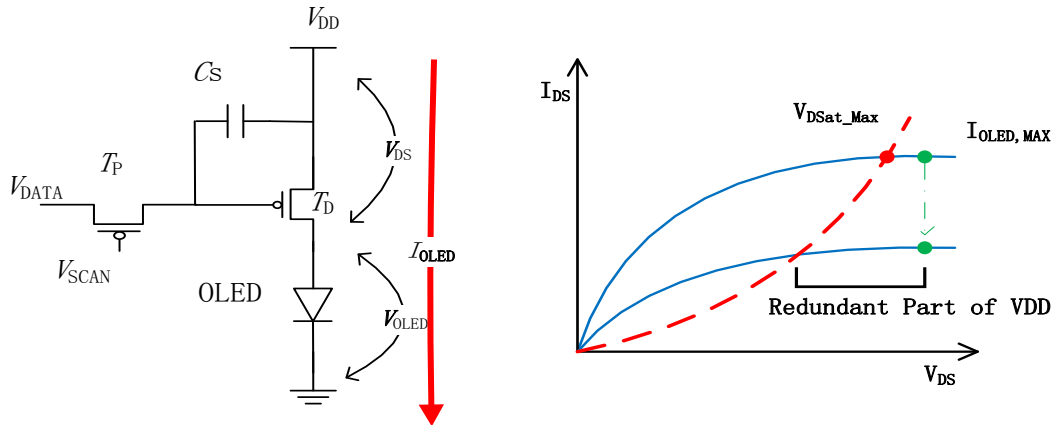


图 7-1 过饱和驱动电压

Fig.7-1 Redundant Saturation V_{DS} of TFT

如图 7-1 所示, 这是常见的电压驱动型像素电路结构。由于设计尽可能的使驱动管 T_D 是一个理想恒流源, 驱动管 TFT 的 V_{DD} 要比较高, 才能使驱动管 T_D 工作在饱和区。该电路最主要是保证能够给 OLED 提供需要的电流, TFT 和 OLED 可以近似等效为两个电阻串联在一起。本文前面已经提到像素电路的电源电压 V_{DD} 由四部分构成, V_{OLED_Max} 是 OLED 最亮时候的 OLED 两端的电压, 较高的漏源电压 V_{DSat_Max} 使得驱动管工作在饱和区, 这样可以使得 OLED 电流不受漏端电压的波动而变化。考虑到 TFT 以及 OLED 器件退化的可能, 这就需要预留一个过驱动电压 $V_{overhead}$ 来保证饱和区电流, 另外还要考虑电源电压的 IR Drop。但是当显示在低灰度级的时候, 需要的 V_{DSat} 电压和 V_{OLED} 电压都会降低, 实际加在驱动管 TFT 漏源极的电压更加过剩了, 这导致了电源效率的降低。因此在系统上考虑当显示亮度下降的时候, 降低电源电压, 这样可以减少像素电路的静态功耗, 本章主要讨论的内容就是显示灰度级和电源电压的关系。

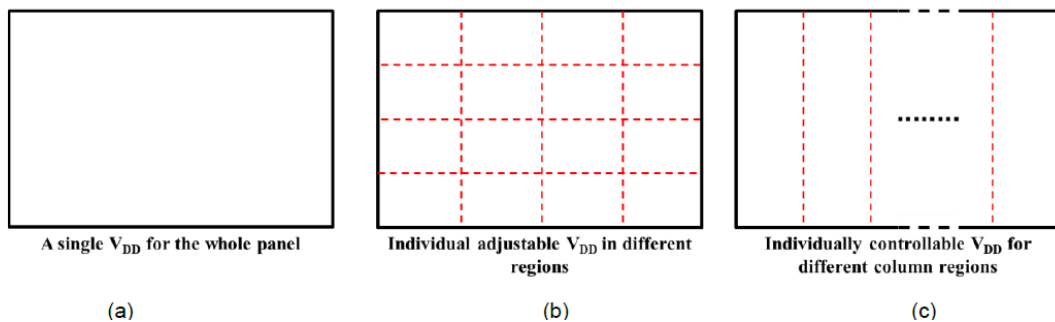


图 7-2 AMOLED 不同策略的 DVS 技术

Fig.7-2 Different DVS schemes for AMOLEDs

图 7-2 显示了常用的三种 DVS 策略来降低功耗，最左边的图是整个面板都采用一个 V_{DD} ，称之为零维动态电压调整技术(0-D DVS)。该方法要根据整个面板的每个像素都不需要很高显示亮度的时候降低电源电压，因此功耗降低比较少，尤其是浏览照片，播放视频的时候[98-99]。第二个图是把面板分成若干个区域，每个区域都是单独的电源电压 V_{DD} 。称之为二维动态电压调整技术(2-D DVS)，但是这个在面板的实现上很有难度。最右边的是本文提出的一维动态电压调整技术(1-D DVS) [100]，1-D DVS 技术是把面板按照列分成 N 个区域， N 的数目可以是 Source Driver 的数目。每个块的供电电压都相互独立，电压大小只和该块的显示内容有关。 N 为 1 的时候就是 0-D DVS，这种方法在物理上相对容易实现，因为面板的驱动电路一边都是在两条垂直边上，这样就容易集成到 Source Driver 中。在论文[101-103]中说明了显示内容和功耗关系，下面就基于显示内容设计系统策略。

7.2 已有的 DVS 技术方案的不足

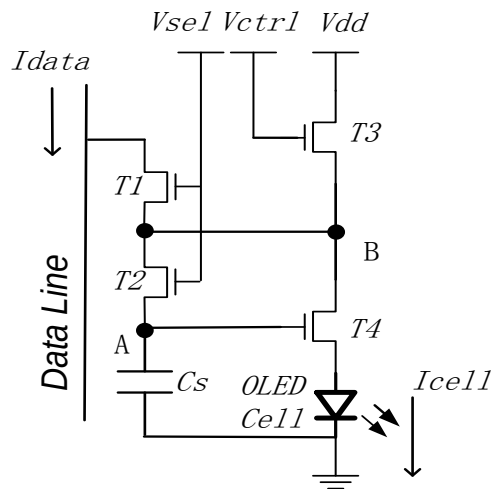


图 7-3 典型动态电压调整的 AMOLED 驱动原理图

Fig.7-3 Schematic of Classic DVS-friendly AMOLED Driver

OLED 技术的系统级的功耗优化方案比较有代表的是[90]提出的动态电压调整技术(Dynamic Voltage Scaling, DVS)技术，其对应的像素电路结构如图 7-3。该电路采用 4T-1C 结构，其工作原理如下，开始对这个像素编程的时候， V_{sel} 有效， V_{ctrl} 无效，这样数据线的电流源 I_{data} 对存储电容 C_s 充电，当电容电压升高到一定程度， I_{Cell} 电流等于 I_{data} 的时候，充电稳定，像素电路编程完毕。然后 V_{sel} 无效， V_{ctrl} 有效，

T3 导通, T4 处于饱和区, 维持编程电流 I_{data} 。由于该电路的 V_{ctrl} 信号可以升高, 这样可以降低驱动管 T3 的等效电阻, 达到降低电源电压的目的, 通过该技术手段可以实现 DVS 功能。

该像素电路作者在论文中提到采用像素补偿技术, DVS 可以节约 52.5% 的功耗, 图像的相似度 SSIM 大于 98% 的时候功耗平均节约 19.05% - 49.05%, 但是该电路有一些不足之处如下。

第一, 该像素电路作者讨论的时候使用的策略是本文提到的 2-D DVS 技术, 现实生活中的图片和视频有一个特点, 水平方向的灰度级变化比垂直方向小, 该电路如果采用本文提出 1-D DVS 策略, 就会导致在垂直方向上少量高亮区域限制了 DVS 技术的发挥, 该电路作者也意识到该情况, 提出降低电源电压同时, 对显示效果有损的局部像素点采用像素补偿技术来尽量降低电源电压下降带来的影响。所以该方法在不导致 SSIM 下降的情况下的功耗节约程度是有限的。由于该方法采用的像素电路的 TFT 驱动管工作在饱和区, 当电源电压降低的时候, 依靠 TFT 驱动管工作在饱和区能保证电流基本不变, 如果电源电压再低, 驱动管 TFT 就工作在线性区了。因此图像或者视频等亮度比较高的情况下, 该技术对功耗的优化无法发挥。

第二, Color Remapping 技术是根据预先的灰度级和电源电压以及驱动电流之间的关系来补偿电流的。关系表需要预先储存在驱动 IC 中, 然后配合一套算法, 计算每个图像块最低工作电压和由此带来的 SSIM 的降低, 最后选择合适的方案来驱动 AMOLED, 算法本身比较复杂, 实现起来会增加驱动芯片的面积和复杂程度。

第三, 电流源驱动方式在驱动电流比较小的情况下, 建立时间很长, 不适合刷新率要求比较高的面板。

本文基于前面介绍的低功耗 AMOLED 像素电路结构, 可以实现 SSIM=1 的 DVS 方法。利用本文提出的电路直接驱动 OLED 电压的特点, 电路会自动通过反馈回路调整驱动管的 Gate 电压, 无须参与补偿值的计算过程。而且本文的前面已经证明了本文提出的像素电路的建立时间短。由于本文提出的 3T-1C 是工作在线性区, 即使是白色高亮的画面, 也能降低比较大的功耗。

本文作者已经在发表的论文[100]中介绍了 1-D DVS 策略的优势, 该论文仿真采用的像素电路中驱动 TFT 还是工作在饱和区, 本文研究发现采用线性区工作模式还可以更加节约功耗, 本文在原来研究的基础上更进一步讨论功耗节约效果。

7.3 显示面板供电电压的 DVS 设计与仿真

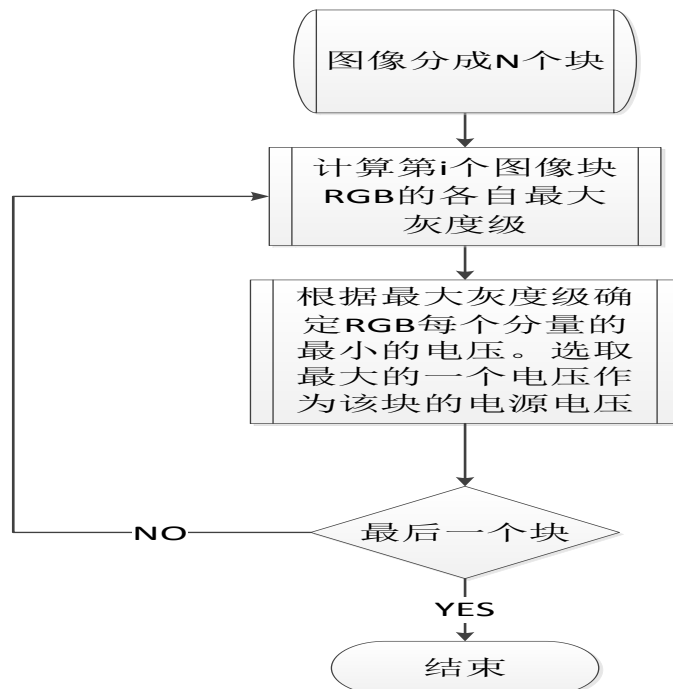


图 7-4 典型动态电压调整的 AMOLED 驱动原理图

Fig.7-4 Schematic of Classic DVS-friendly AMOLED Driver

仿真的时候把整个面部按照图 7-2 (c)的方法分成 N 个块。每个块的电压可以根据这个块的显示内容调整，每个块的像素按照 RGB 三个分量统计出各自需要的最大灰度级，根据最大灰度级要求算出 RGB 分别需要的最大电源电压，选取最大的电压作为这个块的驱动电压，再根据块中像素的灰度级得出每个像素的静态电流，这样就能统计整个面板的功耗。流程图见 7-4，下面就基于这个流程来做仿真测试。

7.4 低功耗像素电路及驱动方法结合 DVS 技术的原理

根据前面一章的介绍，采用 DVS 技术的时候，电源电压 V_{DD} 下降， V_{DS} 电压降低，当 V_{DS} 电压低于饱和区的时候，需要增加 V_{DATA} 的电压来提高 V_{GS} ，由于这个过程对本文提出的低功耗像素电路和驱动方法是靠环路的稳定性自动保证的，所以不需要预先建立二者的对应关系的表格，但是本文也在上一章也提到当数据线的寄生电容很大的时候，增加 V_{DATA} 电压会带来动态功耗的增加， V_{DS} 下降过低的时候，动态功耗的

增加会超过静态功耗的下降,因此在确定每个灰度级下的电源电压最低可以下降到什么的时候,需要考虑这个问题,不同大小的面板寄生电容的还是沿用前一章的数据。

功耗仿真前需要预先根据像素电路的结构,确认每个灰度级下的电源电压的最小值,提取的思路是先仿真一些离散点的灰度级和电源电压的关系,仿真方法见前一章内容。再用 MATLAB 根据这些点拟合整个灰度级下和电源电压的函数关系。这样方便在 MATLAB 中根据函数计算每个灰度级需要的最低电源电压和电流。

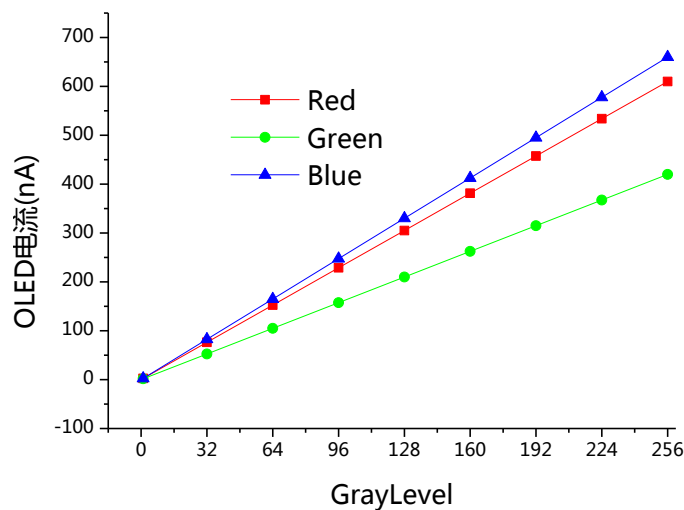


图 7-5 红绿蓝 OLED 不同灰度级对应的电流
Fig.7-5 RGB OLED Current of Different GrayLevel

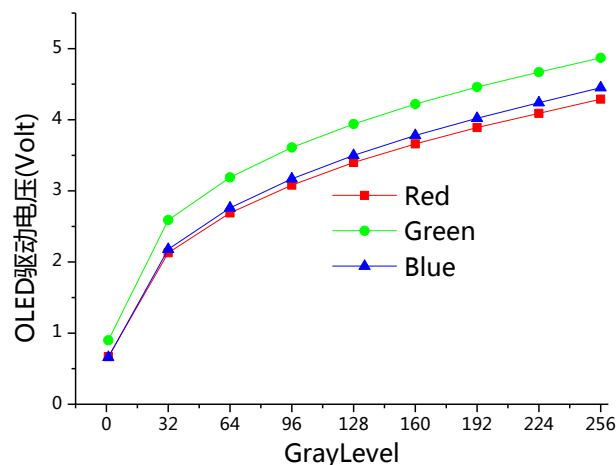


图 7-6 红绿蓝 OLED 不同灰度级对应的电压
Fig.7-6 RGB OLED Volatage of Different GrayLevel

本章采用前面提出的 D65 白光，由于蓝色光的比例在 D65 白光定义中比例较大，因此像素中 RGB OLED 的面积按照 1:1:2 设计。这样红色 OLED 的最大电流是 $0.61\mu\text{A}$ ，绿色 OLED 最大电流是 $0.42\mu\text{A}$ ，单块蓝色 OLED 的最大电流是 $0.66\mu\text{A}$ 。通过前面的 RGB 的电流电压曲线仿真得到每个灰度级对应的电压和电流。图 7-5 和图 7-6 是仿真得到的 OLED 在不同灰度级下的电流电压曲线，通过该曲线，可以知道满足 RGB 最大显示亮度下的 OLED 的驱动电压分别为 4.29V，4.87V 和 4.45V。通常 AMOLED 设计的时候这三个电压差别不大，如果差别比较大的时候可以调整各自的显示面积，这样可以在满足最大亮度下标准白光的时候，不同颜色的 OLED 驱动电压差别不大，这会方便电源电压的设计。比如从上面的数据来看，绿色光的 OLED 电压偏高，实际 AMOLED 产品中在面积允许的情况下可以增加一点绿光的面积来降低工作电压，让三者保持差不多的驱动电压。

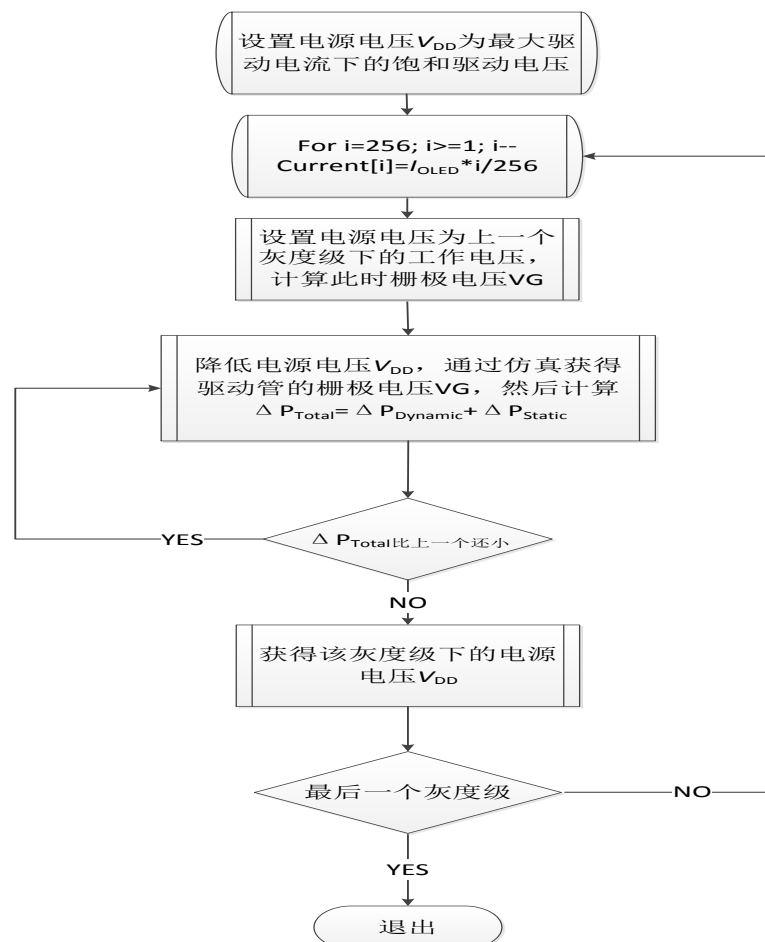


图 7-7 确定每个灰度级下的最低工作电压仿真流程图

Fig.7-7 Simulation Flow of Lowest Power Supply at Every GrayLevel

假设每个灰度级和电流是线性关系，不考虑伽马矫正带来的灰度级和显示亮度的非线性关系。采用 24bit 表示每个像素，每种颜色 8bit，每个颜色的最大灰度级是 255，那么每个灰度级对应的电流大小就能够确定了。通过前一章介绍的仿真方法，计算每个灰度级对应的最低电源电压的时候，先降低电源电压 V_{DD} ，用 SmartSpice 仿真获得驱动管 TFT 的栅极电压 V_{DATA} 是多少，然后分析静态功耗降低了多少，动态功耗增加了多少，总的功耗节约多少，然后再降低电源电压 V_{DD} ，再计算功耗节约多少，当节约的功耗的绝对值开始减小的时候，这个时候的电压就是该灰度级的最低工作电压，该工作流程如图 7-7。根据该流程图，仿真采用 MATLAB 和 SmartSPICE 混合仿真来完成，电路结构采用的是本文提出的低功耗 AMOLED 像素电路。

$$V_{DD} = A * GrayLevel^B + C \quad (7-1)$$

根据这个仿真流程，采用间隔 32 个灰度级仿真出需要的电源电压。这样 RGB 各有 8 个点的灰度级和电源电压的对应关系，根据这 8 个点数据，采用 MATLAB 来拟合，这样可以获得每个灰度级的电源电压的数据，测试数据和拟合数据得到的结果见图 7-8。

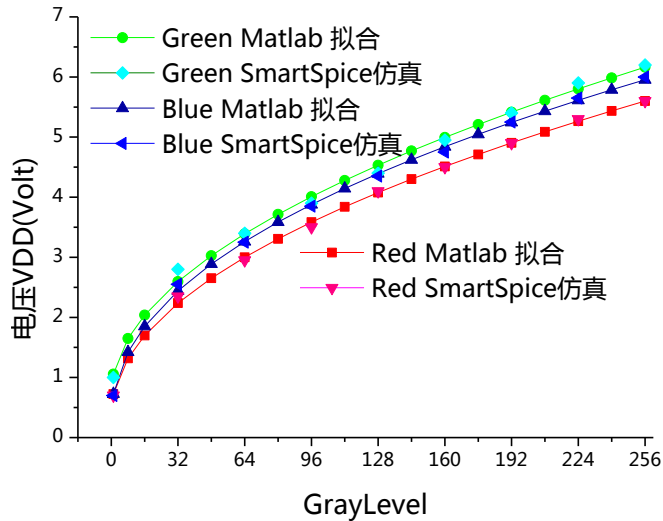


图 7-8 RGB 每个灰度级下的最低工作电压

Fig.7-8 Lowest Power Supply at Every RGB GrayLevel

数学拟合公式见公式 7-1，该拟合采用指数函数，RGB 每条曲线拟合出来的参数见表 7-1。从拟合的曲线和实际测试的数据来看，曲线拟合的函数和实际仿真测试数

据的误差非常小，而且本文设计的像素电路显示的电流对电源电压不敏感。电源电压高一点或者低一点，都有反馈回路保证驱动 OLED 的电流不变。根据这个拟合公式，可以对视频或者图片的 RGB 分量进行分析，得出每个块的最低工作电压，取三个最低工作电压中最大的一个就是该块的工作电压。这样可以保证电源电压对 RGB 三个分量都满足。

表 7-1 不同颜色对应的拟合参数
Table 7-1 Parameters of Different Coler

参数/颜色	红色	绿色	蓝色
A	0. 3263	0. 3073	0. 4236
B	0. 4994	0. 5174	0. 4672
C	0. 396	0. 7488	0. 3039

7.5 低功耗像素电路及驱动方法结合 DVS 技术的仿真

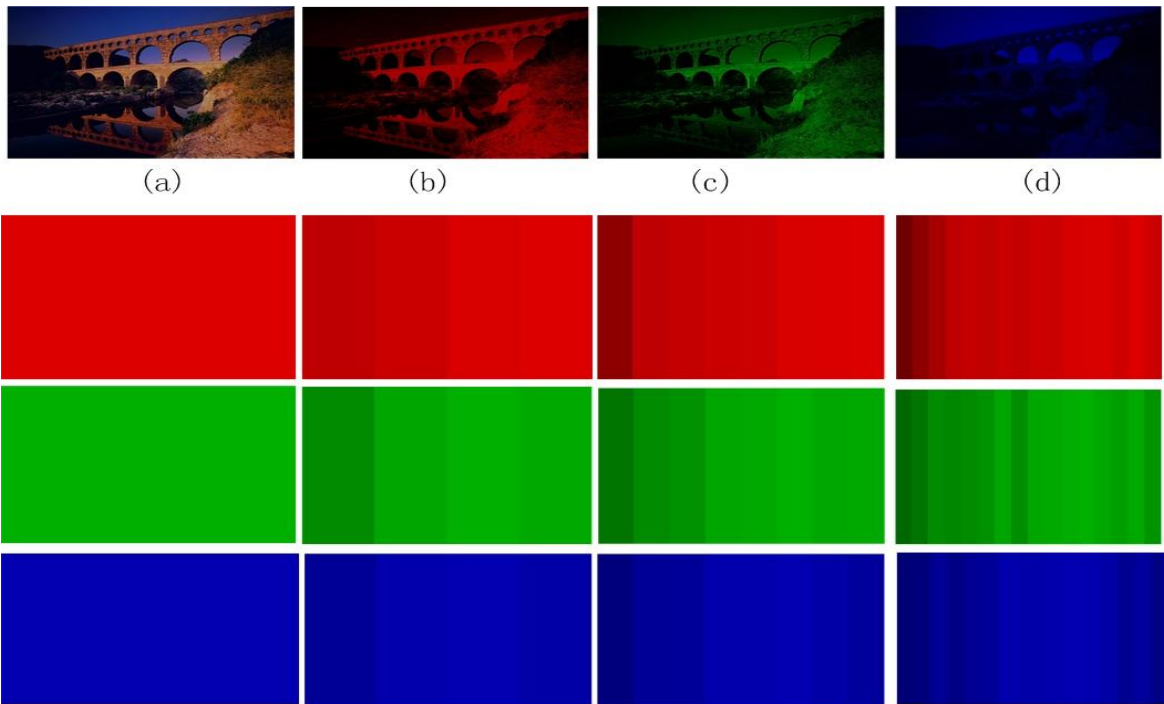


图 7-9 (a-d) 原始测试图像和 RGB 分量，
(e)在不同分块 (N=1，4，8，16) 下 RGB 最大的灰度分布
Fig.7-9 (a-d) An Original Corlor Image and Its RGB Components
(e) Maximal Grey Level Distribution of RGB Compents with Different Divisions
(N=1,4,8，16)

仿真采用 MATLAB 和 SmartSpice 混合仿真来完成，电路结构采用的是本文提出的低功耗 AMOLED 像素电路。仿真选取了 1280*800 幅面的图片，如图 7-9(a)所示，MATLAB 程序首先把原始图像(a)的 RGB 三个分量的图片都提取出来，如图中(b-d)。然后把每个分量的图像分成 N 个块，仿真测试 N=1，4，8，16 情况下每个块的最大灰度级。如图(e)最左边是 N=1 的最大灰度级，最右边是 N=16 块下每个块的最大灰度级，本文最先分析 N=16 的情况，通过 MATLAB 程序，把图像按照列分成了 16 个块，比较每个块的 RGB 分量的最大值，可以得到了 N=16 情况下的每个块的最大灰度级，如表 7-2。根据此表，同样可以获得把图像分成 1，4，8 块下的每个块的最大灰度级。

表 7-2 每个图像块的最大灰度级

Table 7-2 Max Gray Level of Every Block

颜色/灰度级	块 1	块 2	块 3	块 4	块 5	块 6	块 7	块 8
红色	110	142	167	190	197	193	202	196
绿色	104	117	140	135	139	146	166	143
蓝色	116	125	151	133	148	152	172	168
颜色/灰度级	块 9	块 10	块 11	块 12	块 13	块 14	块 15	块 16
红色	205	203	214	217	218	208	220	205
绿色	167	169	173	176	167	159	169	148
蓝色	169	172	176	175	166	146	157	135

表 7-3 每个图像块需要的最低工作电压

Table 7-3 Necessary Lowest Power Supply of Every Block

颜色/电压	块 1	块 2	块 3	块 4	块 5	块 6	块 7	块 8
红色	3.8086	4.2728	4.5998	4.8796	4.9613	4.9148	5.0188	4.9498
绿色	4.1464	4.3599	4.7113	4.6374	4.6966	4.7983	5.0764	4.7550
蓝色	4.2075	4.3462	4.7193	4.4651	4.6781	4.7330	4.9963	4.9450
块总电压	4.2075	4.3599	4.7193	4.8796	4.9613	4.9148	5.0764	4.9498
颜色/电压	块 9	块 10	块 11	块 12	块 13	块 14	块 15	块 16
红色	5.0530	5.0303	5.1540	5.1872	5.1982	5.0869	5.2202	5.0530
绿色	5.0899	5.1167	5.1699	5.2094	5.0899	4.9810	5.1167	4.8269
蓝色	4.9579	4.9963	5.0470	5.0344	4.9191	4.6504	4.8005	4.4942
块总电压	5.0899	5.1167	5.1699	5.2094	5.1982	5.0869	5.2202	5.0530

根据每个块的最大灰度级，可以通过公式 7-1，计算每个块的 RGB 三色各自需要的最低电源电压。通常来说每个像素电路内部的 RGB 三色 OLED 接的是同一个电源电压，因此，仿真取三色中最大的电压作为该块的电源电压。通过 MATLAB 程序，

得到如表 7-3 的电源电压值。表中的黑体倾斜数字是这个块的最大电压，从选取情况来看，任何一种颜色的最大电压都有可能是该块的最大电压。

根据图 7-5 的电流和灰度级的曲线就得到每个像素的 RGB 的电流，这样就获得了整个面板的平均静态功耗。本文仿真了多种分块方式下的功耗，得到了图 7-10 的数据。该图中 $N=1$ 方式的图像功耗为单位 1，其他分块模式下的功耗比例都会小于 1。从仿真结果来看， N 越大越节约功耗。

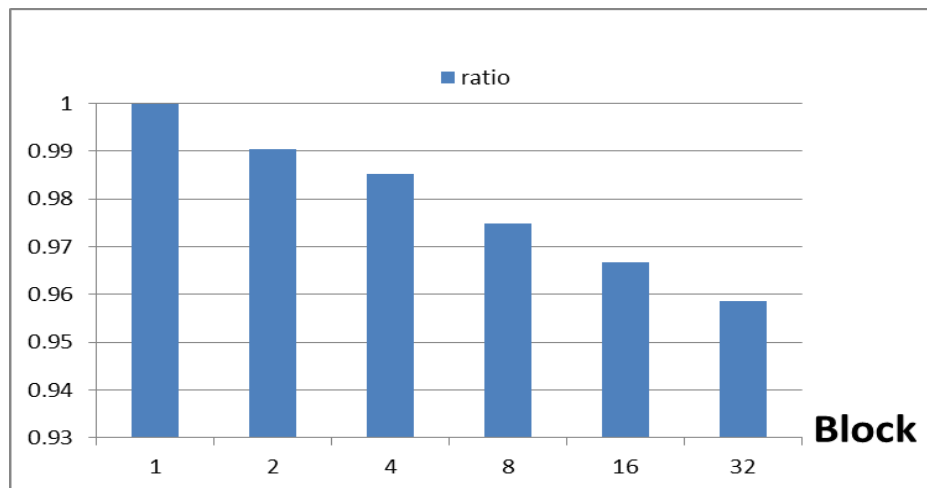


图 7-10 不同分块数目下的功耗比例关系

Fig.7-10 Power Ratio of Different Block Number

7.6 低功耗像素电路及驱动方法与其他电路及方法结合 DVS 技术的比较

采用了本文的 DVS 技术对不同的图像进行了测试，如图 7-11。该图下一排的每个块的数字代表了该块的最低工作电压。从列出的数据来看，左边两个图的由于红色分量的比重较大，最低工作电压都比较高，右边的企鹅白色亮度较高，RGB 三个分量都比较大，所以每个块的工作电压也比较高。

本文仿真了这三个图片显示需要的功耗，列在了图 7-12 中，该图最右边是整个 1280×800 的幅面是全白色（RGB 三个分量都是 255）时候的功耗，2T-1C 由于驱动 TFT 工作在饱和区，所以比本文提出的 3T-1C 功耗大了 70%左右。企鹅这个图的白色成分比较多，亮度也大，所以功耗高。维多利亚夜景是晚上的图片，亮度不高，整体的功耗最小，这也符合 AMOLED 显示越暗功耗越低的特点。从这三个图的比较结果来看，采用本文提出的像素电路配合 DVS 技术，整个图片功耗可以节约 50%左右。

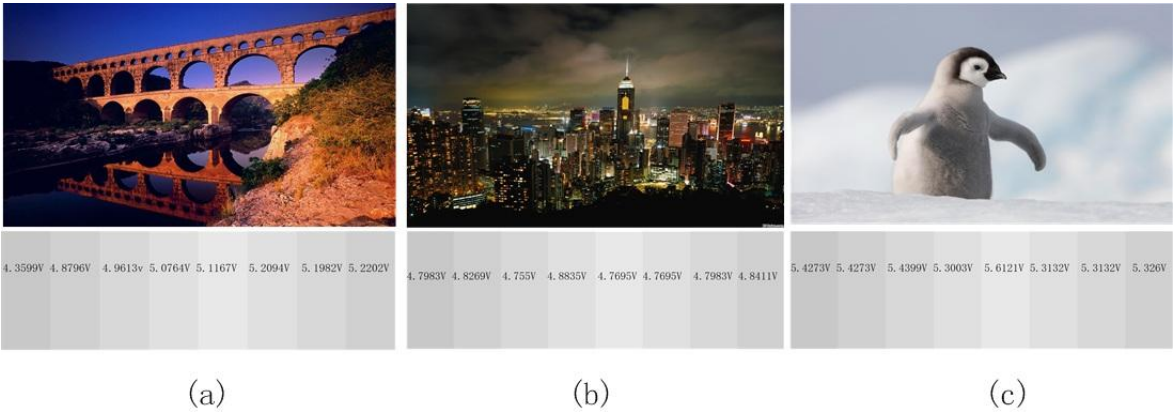


图 7-11 不同图像下的块的最小工作电压
(a)桥, (b)维多利亚夜景, (c) 企鹅
Fig.7-11 Min Block Voltage of Different Picture
(a) bridge, (b) night victory, (c) penguin

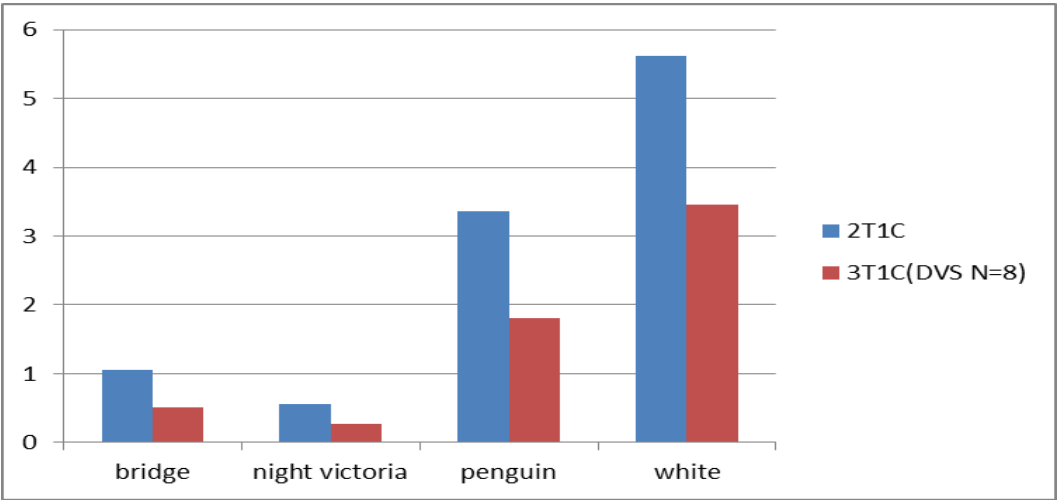


图 7-12 不同图像下的每个像素的平均静态功耗。
Fig.7-12 Average Pixel Static Power of Different Picture

最后，作者比较了不同技术对静态功耗下降比例的影响，如图 7-13，2T-1C 是传统的没有 DVS，驱动管工作在饱和区情况下的功耗，图中设置为单位 1。第二个是本文提出的 TFT 工作在线性区，但是没有采用 DVS 技术的功耗，由图可以看出可以使得功耗下降 40%左右，第三个是采用图 7-3 这种经典的 DVS 技术，但是驱动管 TFT 工作在饱和区，SSIM 为 1，不采用像素补偿方法时候的功耗结果。最后一个是本文提出的工作在线性区，同时采用 DVS 技术的功耗。由此可见，采用本文的 DVS 技术

功耗普遍可以提高 50%。驱动管 TFT 工作在饱和区的 DVS 技术在亮度比较高的时候没有太大优势了,从企鹅这个图的数据可以看出,即使采用了 DVS 技术,其驱动 TFT 还是在饱和区,电源电压也不低,功耗比本文提出的 TFT 工作在线性区不采用 DVS 技术的 3T-1C 电路还要高。

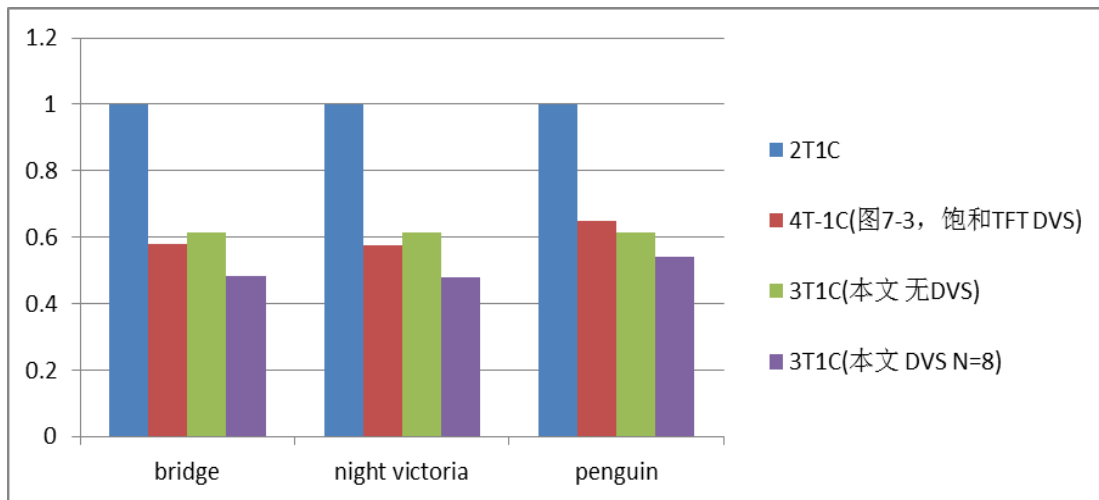


图 7-13 不同技术下像素电路平均静态功耗比例。

Fig.7-13 Average Pixel Static Power Ratio of Different Picture

7.7 本章小结

本章提出了基于显示内容的 DVS 功耗优化技术,指出了传统的 DVS 技术的不足之处,提出了基于自己设计的低功耗像素电路和驱动方法的 DVS 方案。提出了根据物理位置的 0-D, 1-D, 2-D 的 DVS 策略。仿真验证了 1-D 策略的 DVS 对静态功耗效率的提高。本章还比较了不同技术下静态功耗的高低,从仿真结果来看,采用本文提出的驱动管 TFT 工作在线性区的 3T-1C 电路配合 DVS 技术,静态功耗节约非常明显,从测试的几个数据来看都有 50%的功耗下降。

第八章 总结和展望

8.1 主要结论

本论文对新一代显示技术 AMOLED 的电路设计, 功耗设计等方面提出一些新的思路 and 想法, 同时在一些仿真方法学上提出了自己的模型。主要创新和结论展开总结如下:

第一, 本文提出了像素电路的功耗组成, 把像素电路里面的功耗分为静态功耗和动态功耗两部分。针对像素电路里面的驱动管和开关管等参数设计, 提出了这些参数设计是如何影响功耗的。本文提出了一个像素电路的设计流程, 把静态功耗和动态功耗与相关的参数设计协同考虑。通过对像素电路内动态功耗和静态功耗的仿真, 分析了驱动管 TFT 和静态功耗的关系, 分析了开关管 TFT 和动态功耗的关系, 总结了 TFT 面积和功耗之间存在权衡关系。

第二, 本文提出了低功耗的 AMOLED 像素电路和驱动方法。该像素电路结构简单, 功耗小。针对现有的技术有些只补偿了 V_{TH} , 有些补偿了电源电压 V_{DD} 的 IR DROP, 有些补偿了 KINK 效应。本文提出了 3T-1C 低功耗像素电路结构, 并设计了相关的外围驱动电路。通过仿真验证了本文提出的电路能够补偿 V_{TH} 漂移, 能够补偿驱动 TFT 管子的电子迁移率的降低, 能够补偿 KINK 效应, 还能够补偿电源电压 V_{DD} 的 IR Drop。该像素电路的信号建立时间短, 适合刷新频率快的面板。该像素电路 TFT 管子数目很少, 在 AMOLED 面板的良率, 开口率, 功耗都有很大的优势。同时该电路适合 N 型和 P 型 TFT 材料, 减少了显示面板针对不同 TFT 材料不同加工工艺的依赖。

第三, 本文针对电压补偿型像素电路, 电流补偿型像素电路, 电压反馈型像素电路, 电流反馈型像素电路这四种典型的像素电路的功耗问题和本文提出的 3T-1C 低功耗像素电路进行了比较。建立了一套功耗比较的方法和流程。并且通过和 5T-2C 的电压补偿型像素电路在小型面板, 中型面板, 大型面板功耗的比较, 说明本电路的静态功耗, 动态功耗都具有很大的优势。由于本文的像素电路的驱动管 TFT 工作在非饱和区, 而传统的 TFT 驱动管工作在饱和区, 因此这一根本的改变对功耗影响很大。仿真结果显示饱和驱动管的电源效率在 35%-50%, 本文的非饱和驱动管的电源效率达到了 60%-95%。

最后，本文还提出了基于显示内容的一维 DVS 技术，可以在显示亮度低的情况下降低显示的功耗。因此本文提出了基于显示内容的一维 DVS 调整技术，可以在显示亮度低的情况下降低显示的功耗。该技术用在本文提出的低功耗像素电路上，效果明显。仿真结果显示，采用本文的低功耗像素电路，功耗可以降低到 60% 左右，配合本文提出的 DVS 技术，功耗可以再降低 10%。不同于其他论文的两维 DVS 技术，本文提出的一维 DVS 还有方便实施的优点。

8.2 研究展望

本文研究的低功耗像素电路和驱动方法是在电路级和系统级层面上的仿真测试。我们计划进行实验工作。对于本文提出的像素电路我们计划委托国内的 AMOLED 的设计团队提供实验用的屏幕，我们开发外围驱动电路的原理图并且设计测试平台，通过仿真和测试确定的参数对实际的 AMOLED 屏测试。确认驱动电路的稳定性，了解实施过程中遇到的问题和难点。解决这些问题以后，设计驱动 AMOLED 的专用 ASIC 芯片，然后测试驱动效果。本文的一些内容已经申请了国家发明专利，一些章节的内容正在或者已经发表了 SCI 论文。

此外，本文提出的 3T-1C 的像素电路比普通的像素电路多了一根反馈线，和非反馈类型的像素电路相比，会影响像素电路的开率，这会增加像素电路的功耗。本文所采用的 OLED 模型不是最新的可以工作在低于 3V 电压下的新型 OLED，这可能对前面的一些结论有影响。另外 3T-1C 像素电路和驱动电路构成的反馈系统还缺乏系统稳定性分析，这些问题的研究在后续工作中会继续展开。

参 考 文 献

- [1] Ji Y, Ran F, Xu H, et al. "Improved performance and low cost OLED microdisplay with titanium nitride anode". *Organic Electronics*, 2014, 15(11): 3137-3143.
- [2] Fukagawa H, Morii K, Hasegawa M, et al. "Highly efficient and air-stable inverted organic light-emitting diode composed of inert materials". *Applied Physics Express*, 2014, 7(8): 082104.
- [3] Xiao L, Chen Z, Qu B, et al. "Recent Progresses on Materials for Electrophosphorescent Organic Light - Emitting Devices". *Advanced Materials*, 2011, 23(8): 926-952.
- [4] Xu F, Kim H U, Kim J H, et al. "Progress and perspective of iridium-containing phosphorescent polymers for light-emitting diodes". *Progress in Polymer Science*, 2015.
- [5] Yook K S, Jeon S O, Min S Y, et al. "Highly Efficient p-i-n and Tandem Organic Light Emitting Devices Using an Air Stable and Low Temperature Evaporable Metal Azide as an n - Dopant". *Advanced Functional Materials*, 2010, 20(11): 1797-1802.
- [6] Thomschke M, Hofmann S, Olthof S, et al. "Improvement of voltage and charge balance in inverted top-emitting organic electroluminescent diodes comprising doped transport layers by thermal annealing". *Applied Physics Letters*, 2011, 98(8): 083304.
- [7] Kim J B, Lee J H, Moon C K, et al. "Highly Enhanced Light Extraction from Surface Plasmonic Loss Minimized Organic Light Emitting Diodes". *Advanced Materials*, 2013, 25(26): 3571-3577.
- [8] Ou Q D, Zhou L, Li Y Q, et al. "Extremely Efficient White Organic Light Emitting Diodes for General Lighting". *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(46): 7249-7256.
- [9] Kumar A, Nathan A, Jabbour G E. "Does TFT mobility impact pixel size in AMOLED

backplanes”. Electron Devices, IEEE Transactions on, 2005, 52(11): 2386-2394.

[10]Stewart M, Howell R S, Pires L, et al. “Polysilicon TFT technology for active matrix OLED displays”. Electron Devices, IEEE Transactions on, 2001, 48(5): 845-851.

[11]Tang C W. “An overview of organic electroluminescent materials and devices”. Journal of the Society for Information Display, 1997, 5(1): 11-14.

[12]Dawson R M A, Kane M G, Shen Z, et al. "Active matrix organic light emitting diode pixel design using polysilicon thin film transistors". Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1998. LEOS'98. IEEE. IEEE, 1998, 1: 128-129.

[13]Stewart M, Howell R S, Pires L, et al. "Polysilicon VGA active matrix OLED displays-technology and performance". Electron Devices Meeting, 1998. IEDM'98. Technical Digest., International. IEEE, 1998: 871-874.

[14]Kaneko H, Kagawa S, Someya J, et al. "Wide color gamut and high brightness WUXGA LCD monitor with color calibrators". IEICE transactions on electronics, 2005, 88(11): 2118-2123.

[15]Naoaki Komiya, "Organic Electro luminescent Display Device of performing selectively Auto Current Limit". KOREA Patent 10-0086753.

[16]Seo H J, Heo Y S, Han S H, et al. "A design of automatic current limit block for OLED display driver IC". Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 547-548.

[17]Shin D, Kim Y, Chang N, et al. "Dynamic voltage scaling of OLED displays". Design Automation Conference (DAC), 2011 48th ACM/EDAC/IEEE. IEEE, 2011: 53-58.

[18]Chen X, Zheng J, Chen Y, et al. "Quality-retaining OLED dynamic voltage scaling for video streaming applications on mobile devices". Design Automation Conference (DAC),

2012 49th ACM/EDAC/IEEE. IEEE, 2012: 1000-1005.

[19]Choi B D, Byun C W. "Data driving methods and circuits for compact and high-image-quality AMOLED mobile displays". Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 2010, 56(2): 1102-1107.

[20] Chen X, Chen Y, Ma Z, et al. "How is energy consumed in smartphone display applications?", Proceedings of the 14th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. ACM, 2013: 3.

[21] Wan M, Jin Y, Li D, et al. "Detecting Display Energy Hotspots in Android Apps" 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering.

[22] http://www.oled-info.com/tags/power_consumption

[23] Ryu M W, Kim S H, Kim K R. "Effects of amorphous silicon atomic density variation on series and contact resistances in nanoscale thin-film structures". Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW), 2012 IEEE. IEEE, 2012: 1-2.

[24]Han M K, Anderson W A, Lahri R, et al. "Characterization and optimization of amorphous silicon solar cells by variation of device geometry". Electron Devices Meeting, 1982 International. IEEE, 1982, 28: 518-520.

[25] Kim J, Rim T, Lee J, et al. "Threshold Voltage Variations Due to Oblique Single Grain Boundary in Sub-50-nm Polysilicon Channel". IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61: 2705-2710.

[26] Chih-Hsiang Ho, Panagopoulos G and Roy K."A Physical Model for Grain-Boundary-Induced Threshold Voltage Variation in Polysilicon Thin-Film Transistors". Electron Devices, IEEE Transactions on Volume-59 Issue-9,2012

[27] M. Hack, and A. G. Lewis, "Avalanche induced effects in polysilicon thin film

transistors”. IEEE Electron Device Letters, Vol. 12, no. 5, pp. 203–205, 1991.

[28] S. Chopra, A. Sehgal and R. S. Gupta, “Analytical modelling of the kink regime of a short channel polycrystalline silicon thin film transistor”. International Journal of Electronics, vol. 93, no. 5, pp. 279–289, May 2006.

[29] Chaji G R, Ng C, Nathan A, et al. “Electrical compensation of OLED luminance degradation”. Electron Device Letters, IEEE, 2007, 28(12): 1108-1110.

[30] Chen X, Liu B, Chen Y, et al. “Active compensation technique for the thin-film transistor variations and OLED aging of mobile device displays”. Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design. ACM, 2012: 516-522.

[31]<http://www.holstcentre.com>

[32] Kateri E. Paul, Mara Prentiss, and George M. Whitesides “Patterning Spherical Surfaces at the Two-Hundred-Nanometer Scale Using Soft Lithography”. Adv. Funct. Mater. 2003, 13, No. 4, April

[33] Charles Perumal, Koichi Ishida, et, al. “A Compact a-IGZO TFT Model Based on MOSFET SPICE Level = 3 Template for Analog/RF Circuit Designs”. IEEE Electron Device Letters, VOL. 34, NO. 11, November 2013

[34] Jung S H, Lee H K, Kim C Y, et al. “15-inch AMOLED Display with SPC TFTs and a Symmetric Driving Method”. SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd, 2008, 39(1): 101-104.

[35] Kim Y W, Kwak W K, Lee J Y, et al. “40 Inch FHD AMOLED Display with IR Drop Compensation Pixel Circuit”. SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd, 2009, 40(1): 85-87.

[36] I. Tsutsui, M. Yahiro, H. Yokogawa, K. Kawano and M. Yokoyama. "Doubling coupling-out efficiency in organic light-emitting devices using a thin silica aerogel layer".

Adv. Mater., Vol. 13, No. 15, pp.1149-1152, 2001

[37]C.-F. Madigan, M.-H. Lu and I.-C. Sturm. "Improvement of output coupling efficiency of organic light-emitting diodes by backside substrate modification". Appl. Phys. Lett., Vol. 76, No. 13, pp. 1650-1652, 2000.

[38]Shan-Shan Hsu, Tung-Yu Chang, Hsiharng Yang, Jen-Sung Hsu. "Brightness Enhancement of OLEDs by Using Microlens Array Film with Silicon Oil and Ag Particles" Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2011 Symposium on

[39]Vivek Purohit, Tasneem Banu, Komal Daiya. "AMOLED An Emerging Trends in LED". International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3, Issue 10, October-2012

[40] Ray-Lee Lin, Jhong-Yan Tsai, Buso, D. Zissis, G. "OLED Equivalent Circuit Model with Temperature Coefficient and Intrinsic Capacitor". Industry Applications Society Annual Meeting, 2014 IEEE

[41]http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20131105/313903

[42]Huang J, Xu Q, Tiwana B, et al. "Anatomizing application performance differences on smartphone". Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services. ACM, 2010: 165-178.

[43] Dong M, Choi Y S K, Zhong L. "Power modeling of graphical user interfaces on OLED displays". Proceedings of the 46th Annual Design Automation Conference. ACM, 2009: 652-657.

[44]Mittal R, Kansal A, Chandra R. "Empowering developers to estimate app energy consumption". Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2012: 317-328.

- [45] Chen X, Zheng J, Chen Y, et al. "Quality-retaining OLED dynamic voltage scaling for video streaming applications on mobile devices". Design Automation Conference (DAC), 2012 49th ACM/EDAC/IEEE. IEEE, 2012: 1000-1005.
- [46] Dong M, Zhong L. "Chameleon: a color-adaptive web browser for mobile OLED displays". Mobile Computing, IEEE Transactions on, 2012, 11(5): 724-738.
- [47] Dong M, Choi Y S K, Zhong L. "Power-saving color transformation of mobile graphical user interfaces on OLED-based displays". Proceedings of the 2009 ACM/IEEE international symposium on Low power electronics and design. ACM, 2009: 339-342.
- [48] Anand B, Thirugnanam K, Sebastian J, et al. "Adaptive display power management for mobile games". Proceedings of the 9th international conference on Mobile systems, applications, and services. ACM, 2011: 57-70.
- [49] Anand B, Ananda A L, Chan M C, et al. "Game action based power management for multiplayer online game". Proceedings of the 1st ACM workshop on Networking, systems, and applications for mobile handhelds. ACM, 2009: 55-60.
- [50]<http://www.oled-info.com/sdc-shows-how-oleds-emissive-nature-can-enable-new-innovative-display-modes>
- [51] A. Nathan, A. Kumar, K. Sakariya, P. Servati, S. Sambandan, and D. Striakhilev. "Amorphous silicon thin film transistor circuit integration for organic LED displays on glass and plastic". IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 39, no. 9, pp. 1477-1486, Sep. 2004.
- [52] A. Nathan, G. R. Chaji, and S. J. Ashtiani. "Driving schemes for a-Si and LTPS AMOLED displays". J. Display Technology, vol. 1, no. 2, pp. 267-277, Dec. 2005.
- [53] J. C. Goh, J. Jang, K. S. Cho, and C. K. Kim. "A new a-Si: H thin-film transistor pixel circuit for active-matrix organic light-emitting diodes". IEEE Electron Device Lett, vol. 24, no. 9, pp. 583-585, Sept. 2003.

- [54]Sanford J L, Libsch F R. “TFT AMOLED Pixel Circuits and Driving Methods”. SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd, 2003, 34(1): 10-13.
- [55] Park D W, Kang C K, Park Y, et al. “High-Speed AMOLED Pixel Circuit and Driving Scheme”. SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd, 2010, 41(1): 806-809.
- [56] Jung S H, Lee H K, Kim C Y, et al. “15-inch AMOLED Display with SPC TFTs and a Symmetric Driving Method”. SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd, 2008, 39(1): 101-104.
- [57] Kim Y W, Kwak W K, Lee J Y, et al. “40 Inch FHD AM - OLED Display with IR Drop Compensation Pixel Circuit”. SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd, 2009, 40(1): 85-87.
- [58] Nichols J A, Jackson T N, Lu M H, et al. “a-Si: H TFT Active - Matrix Phosphorescent OLED Pixel”. SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd, 2002, 33(1): 1368-1371.
- [59]M. Stewart, R. S. Howell, L. Pires, and M. K. Hatalis, “Polysilicon TFT technology for active matrix OLED displays”. IEEE Trans. Electron Devices, vol. 48, no. 5, pp. 845–851, May 2001.
- [60]K. Lee and P. C. Chao, “A new AMOLED pixel circuit with pulsed drive and reverse bias to alleviate OLED degradation”. IEEE Trans. Electron Devices, vol. 59, no. 4, pp. 1123-1130, Apr. 2012.
- [61] Mo Y G, Kim M, Kang C K, et al. “Amorphous oxide TFT backplane for large sized AMOLED TVs”. Journal of the Society for Information Display, 2011, 19(1): 16-20.
- [62] Si Y, Lang L, Zhao Y, et al. “Improvement of pixel electrode circuit for active-matrix

OLED by application of reversed-biased voltage”. *Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on*, 2005, 52(12): 856-859.

[63]Lee J P, Jeon H S, Moon D S, et al. “Threshold Voltage and IR Drop Compensation of an AMOLED Pixel Circuit Without a VDD Line”. *Electron Device Letters, IEEE*, 2014, 35(1): 72-74.

[64]A. Nathan, G.R. Chaji, and S.J. Ashtiani. “Driving schemes for a-Si and LTPS AMOLED displays”. *IEEE J. of Display Technology*, vol. 1, no.2, pp. 267-277, Dec. 2005.

[65]J. Lee, W. Nam, S. Jung, and M. Han. “A new current-scaling pixel circuit for AMOLED”. *IEEE Electron Device. Letts.* vol. 25, no. 5, pp. 280-282, 2003.

[66]Y. He, R. Hattori, and J. Kanicki. “Current-source a-Si:H thin-film transistor circuit for active-matrix organic light-emitting displays”. *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 21, pp.590-592, Nov. 2000.

[67]Y. He, R. Hattori, and J. Kanicki. “Improved a-Si:H TFT circuits for active-matrix organic light emitting displays”. *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 48, no.7 pp. 1322-1325, July 2001.

[68]Y. Lin and H.-P. D. Shieh. “A novel current memory circuit for AMOLEDs”. *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 51, no. 6, pp. 1037–1040, Jun. 2004.

[69] G. R. Chaji, S. Ashtiani, S. Alexander, R.Huang, D. Striakhilev, P. Ser-vati, K. Sakariya, A. Kumar, and A. Nathan. “Pixel circuits and drive schemes for large-area a-Si AMOLED”. presented at the IDMC 2005, Taiwan, R. O. C. ,2005.

[70]Yong-Joon Jeon, Jin-Yong Jeon, Young-Suk Son, Jin Huh, and Gyu-Hyeong Chao. “A High-Speed Current-Mode Data Driver With Push-Pull Transient Current Feedforward for Full-HD AMOLED Displays”. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* ,Vol. 45, NO. 9

- [71]Yong-Joon Jeon, Young-Suk Son, Jin-Yong Jeon, Jin Huh, and Gyu-Hyeong Chao. “Improved Transient Current Feedforward Output Buffer for Fast and Compact Active-Matrix OLED Column Drivers” IEEE Transactions on circuits and system, Vol. 56, NO. 7
- [72]S. J. Ashtiani and A. Nathan. “A driving scheme for active-matrix organic light-emitting diode displays based on feedback”. IEEE J. Display Tech., vol. 2, pp. 258-264, 2006.
- [73]Shahin J. Ashtiani and Arokia Natham, “A Driving Scheme for Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode Displays Based on Current Feedback” Journal of Display Technology, Vol. 5, No.7
- [74]A. Nathan, A. Kumar, K. Sakariya, P. Servati, S. Sambandan, and D. Striakhilev. “Amorphous silicon thin film transistor circuit integration for organic LED displays on glass and plastic.” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 39, no. 9, pp. 1477-1486, Sep. 2004.
- [75]J.C.Goh, J.Jang, K.S.Cho, and C.K.Kim. “A new a-Si: H thin-film transistor pixel circuit for active-matrix organic light-emitting diodes.” IEEE Electron Device Lett, vol. 24, no. 9, pp. 583-585, Sept. 2003.
- [76]J.L.Sanford and F.R.Libsch. “TFT AMOLED Pixel Circuits and Driving Methods.” in Dig. Tech. Papers, SID Int. Symp., Baltimore, MD, pp.10-13.
- [77]D. W. Park, C. K. Kang, Y. Park, B. Chung, K. H. Chung, B. H. Kim, and S. S. Kim, “High-speed AMOLED pixel circuit and driving scheme”. in Dig. Tech. Papers, SID Int. Symp., 2010, pp. 806–809.
- [78]Jafarabadiashtiani S, Chaji G, Sambandan S, et al. “A New Driving Method for a-Si AMOLED Displays Based on Voltage Feedback”. SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd, 2005, 36(1): 316-319.

- [79]Sambandan S, Nathan A. “Single-technology-based statistical calibration for high-performance active-matrix organic LED displays”. *Journal of Display Technology*, 2007, 3(3): 284-294.
- [80]Son Y S, Jeon Y J, Jeon J Y, et al. “Transient charge feedforward driver for high-speed current-mode data driving in active-matrix OLED displays”. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, 2010, 57(3): 539-547.
- [81]S. Jafarabadiashtiani, P. Servati, and A. Nathan, “A high-speed driver for current-programmed active-matrix OLED displays,” in *NEWCAS Dig. Tech. Papers*, 2005, pp. 247–250.
- [82]S. J. Ashtiani and A. Nathan, “A fast driving scheme for a-Si:H AMOLED displays based on voltage feedback,” in *Proc. Annu. Meeting LEOS 2005*, Oct. 2005, pp. 925–926
- [83]Reiji Hattori, Chang-Hoon Shim. “Full HD AMOLED Current-Programmed Driving with Negative Capacitance Circuit Technology”. *ASIA DISPLAY ‘08 DIGEST* 1093
- [84]Reza Chaji, Arokia Nathan. “A Sub- μ A Fast-Settling Current-Programmed Pixel Circuit for AMOLED Display”. *Solid State Circuits Conference, 2007. ESSCIRC 2007. 33rd European. IEEE*, 2007:344 - 347
- [85]Shim C H, Hattori R. “Fast current programming method for OLEDs using negative capacitor circuit”. *Journal of the Society for Information Display*, 2009, 17(7): 573-579.
- [86]Huang J J, Chen Y P, Huang Y S, et al. “4.1-Inch Flexible QVGA AMOLED Using a Microcrystalline-Si:H TFT on a Polyimide Substrate”. *SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd*, 2009, 40(1): 866-869.
- [87]Chaji G R, Nathan A. “A fast settling current driver based on the CCII for AMOLED displays”. *Journal of Display Technology*, 2005, 1(2): 283.

- [88] Jeon J Y, Jeon Y J, Son Y S, et al. "A double zeros compensated direct fast feedback current driver for medium to large AMOLED displays". *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, 2012, 59(10): 2197-2209.
- [89] Shin D, Kim Y, Chang N, et al. "Dynamic Driver Supply Voltage Scaling for Organic Light Emitting Diode Displays". *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, 2013, 32(7): 1017-1030.
- [90] Chen X, Zeng J, Chen Y, et al. "Fine-grained dynamic voltage scaling on oled display". *Design Automation Conference (ASP-DAC), 2012 17th Asia and South Pacific. IEEE*, 2012: 807-812.
- [91] Han S M, Lee B, Ji I, et al. "Smart Power-Saving Driving Scheme for AMOLEDs Using Dynamic Power Rail Control". *SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd*, 2011, 42(1): 183-185.
- [92] Lee B, Han S M, Sung S, et al. "120 Hz 3D Driving for AMOLED with Interleaved Scan and Emission Operation". *SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd*, 2011, 42(1): 264-267.
- [93] Chu D, Lane N D, Lai T T T, et al. "Balancing energy, latency and accuracy for mobile sensor data classification". *Proceedings of the 9th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM*, 2011: 54-67.
- [94] Flinn J, Satyanarayanan M. "Energy-aware adaptation for mobile applications". *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2000, 34(2): 13-14.
- [95] Betts-LaCroix J. "Selective Dimming of OLED displays". *U.S. Patent Application 12/538,846[P]*. 2009-8-10.
- [96] Choi I, Kim H S, Shin H, et al. "LPBP: Low-power basis profile of the Java 2 micro edition". *Proceedings of the 2003 international symposium on Low power electronics and*

design. ACM, 2003: 36-39.

[97]Ranganathan P, Geelhoed E, Manahan M, et al. “Energy-aware user interfaces and energy-adaptive displays”. Computer, 2006, 39(3): 31-38.

[98]Cheng W C, Chao C F. “Perception-guided power minimization for color sequential displays”. Proceedings of the 16th ACM Great Lakes symposium on VLSI. ACM, 2006: 290-295.

[99]Dong M, Choi Y S K, Zhong L. “Power-saving color transformation of mobile graphical user interfaces on OLED-based displays”. Proceedings of the 2009 ACM/IEEE international symposium on Low power electronics and design. ACM, 2009: 339-342.

[100]Qingyu Cui, Chen Jiang, Guangyu Yao, Xiaoli Xu, Wenjian Liu, Xiaojun Guo. “Dynamic Supply Voltage Scaling of Pixel Circuits for Static Power Reduciton in AMOLEDs”. SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd, 2013, 44(1): 1040-1043.

[101] Chen X, Zheng J, Chen Y, et al. “Quality-retaining OLED dynamic voltage scaling for video streaming applications on mobile devices”. Design Automation Conference (DAC), 2012 49th ACM/EDAC/IEEE. IEEE, 2012: 1000-1005.

[102]Chen X, Chen Y, Ma Z, et al. “How is energy consumed in smartphone display applications?”. Proceedings of the 14th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. ACM, 2013: 3.

[103]Kim D, Jung W, Cha H. “Runtime power estimation of mobile AMOLED displays”. Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe. EDA Consortium, 2013: 61-64.

附录（OLED 原始测试数据）

1，红色 OLED 测试原始数据（Luminance vs Voltage）

8.39800204670436e-002	1.29368946829815e+001
5.36734560935684e-001	1.17454353659587e+001
1.09010122150847e+000	1.02892073118198e+001
1.59316182202918e+000	8.96536362623900e+000
2.09622242254989e+000	7.64151994065818e+000
2.59928302307060e+000	6.31767625507736e+000
3.10254850416170e+000	2.47301355153639e+001
3.45469092452620e+000	2.38034449354574e+001
4.00826246566937e+000	4.20835198271859e+001
4.51152794676047e+000	6.04959790874724e+001
4.96469224836989e+000	9.87771256621845e+001
5.56897961070590e+000	1.56397422077090e+002
6.07265485293778e+000	2.14282487229111e+002
6.52581915454719e+000	2.52563633803823e+002
7.02969927734945e+000	3.30185001901712e+002
7.58388546020379e+000	4.07673985631043e+002
8.08797046357644e+000	5.05031656674799e+002
8.49144334684494e+000	6.02654096455671e+002
9.29797935224118e+000	7.58426370125681e+002
9.80247411675461e+000	8.95256647061172e+002
1.03073786424088e+001	1.07155952988840e+003
1.08625892281151e+001	1.24773002834707e+003
1.12163706930427e+001	1.40469376133410e+003
1.16202533374520e+001	1.54178880700671e+003
1.21257725048173e+001	1.77730059867153e+003
1.24290430291225e+001	1.91466041308126e+003
1.28329256735317e+001	2.05175545875386e+003
1.32883436614154e+001	2.30713593773312e+003
1.42995868767165e+001	2.79789582400864e+003
1.47552097451706e+001	3.07301260593376e+003
1.50079693288533e+001	3.19076850176618e+003

2，蓝色 OLED 测试原始数据（Luminance vs Voltage）

8.39800204670436e-002	1.29368946829815e+001
5.36734560935684e-001	1.17454353659587e+001

1.09010122150847e+000	1.02892073118198e+001
1.59316182202918e+000	8.96536362623900e+000
2.09622242254989e+000	7.64151994065818e+000
2.59928302307060e+000	6.31767625507736e+000
3.10254850416170e+000	2.47301355153639e+001
3.45469092452620e+000	2.38034449354574e+001
4.00826246566937e+000	4.20835198271859e+001
4.51152794676047e+000	6.04959790874724e+001
4.96469224836989e+000	9.87771256621845e+001
5.56897961070590e+000	1.56397422077090e+002
6.07265485293778e+000	2.14282487229111e+002
6.52581915454719e+000	2.52563633803823e+002
7.02969927734945e+000	3.30185001901712e+002
7.58388546020379e+000	4.07673985631043e+002
8.03786928409475e+000	5.24900343989224e+002
8.54236404860818e+000	6.61730620924715e+002
9.34910493457480e+000	8.37239197540593e+002
9.75278269841370e+000	9.54597940267332e+002
1.00558483421485e+001	1.07222145173119e+003
1.03086079258311e+001	1.18997734756360e+003
1.07124905702404e+001	1.32707239323621e+003
1.11165780952201e+001	1.48390374185468e+003
1.16216875014447e+001	1.67994292762778e+003
1.20265945487059e+001	1.91571948802972e+003
1.24310918348263e+001	2.11202344253993e+003
1.27848732997539e+001	2.26898717552696e+003
1.32400864070672e+001	2.50463135156035e+003
1.42519442640795e+001	3.05460014667347e+003
1.47073622519632e+001	3.30998062565273e+003
1.49603267162162e+001	3.44747282443101e+003

3, 绿色 OLED 测试原始数据 (Luminance vs Voltage)

8.39800204670436e-002	1.29368946829815e+001
5.36734560935684e-001	1.17454353659587e+001
1.09010122150847e+000	1.02892073118198e+001
1.59316182202918e+000	8.96536362623900e+000
2.09622242254989e+000	7.64151994065818e+000
2.59928302307060e+000	6.31767625507736e+000
3.10254850416170e+000	2.47301355153639e+001
3.45469092452620e+000	2.38034449354574e+001
4.00826246566937e+000	4.20835198271859e+001

4.51152794676047e+000	6.04959790874724e+001
4.96469224836989e+000	9.87771256621845e+001
5.51887843122422e+000	1.76266109391515e+002
6.02337319573764e+000	3.13096386327006e+002
6.47735701962861e+000	4.30322744685188e+002
7.03215784419410e+000	5.67020637252121e+002
7.53665260870753e+000	7.03850914187612e+002
7.99125107430966e+000	8.80286181383396e+002
8.54728118229748e+000	1.13540189162553e+003
9.30453553049358e+000	1.38998806439344e+003
9.81005469785894e+000	1.62549985605827e+003
1.03170080292170e+001	1.99916576834417e+003
1.07728357782415e+001	2.29401885321515e+003
1.12282537661252e+001	2.54939933219441e+003
1.16331608133864e+001	2.78517589259635e+003
1.21409336670260e+001	3.23778701666572e+003
1.24452285941831e+001	3.47382834580478e+003
1.27998295813922e+001	3.70973729057528e+003
1.33078073156022e+001	4.18208471759052e+003
1.43231481423111e+001	5.06757066278339e+003
1.47303088758466e+001	5.52044655558988e+003
1.49840928623812e+001	5.73688396615163e+003

致 谢

本文需要感谢在本次课题的进行过程中，我得到了各位老师和同学朋友们的大力帮助和支持，在这里我非常感谢他们。首先要感谢导师戎蒙恬教授一直以来的指导和帮助。在整个博士生期间，无论是工作上，学习上，还是生活上，他都给予我无微不至的关心和严格的要求。感谢他在本文的研究工作中给予的指导和鼓励。其次要感谢郭小军特别研究员，他在本课题的研究过程中对前沿技术的了解非常深刻，对我课题的选择有很大的帮助。没有这两位导师的指导，本课题很难完成。

另外感谢崔晴宇、姚广宇、陈苏杰、王若琳等同学，从试验数据和资料整理等方面给予帮助。最后衷心感谢我的家人，你们是我精神的支柱，生命的意义，愿你们健康、快乐！

最后感谢评阅我的论文和参加我论文答辩的专家教授们。

谨以此文献给我的亲人们以及所有祝福、帮助我的人们！

攻读博士学位期间已发表或录用的论文

[1]Wenjiang Liu, Guangyu Yao, Chen Jiang, Qingyu Cui, and Xiaojun Guo. “A New Voltage Driving Scheme to Suppress Non-Idealities of Polycrystalline Thin-Film Transistors for AMOLED”. Journal of Display Technology, Vol.10, Issue.12, Dec 2014, 2014-2015 影响因子 2.241

[2]Wenjiang Liu, Ru Liu, Pengfei Yu, Linrun Feng, and Xiaojun Guo. “Device/Circuit Mixed-Mode Simulations for Analysis and Design of Projected-Capacitive Touch Sensors”. Journal of Display Technology, Vol.11, Issue.2, Feb 2015. 2014-2015 影响因子 2.241

[3]Wenjiang Liu, Tao Liu, et al, “A fast noise variance estimation algorithm”, 2011 Asic Pacific Conference on Postgraduate Research In Microelectronics & Electronics

[4]Wenjiang Liu, Yue Zhu, Tao Liu, et al, “Analysis and Architecture Design of Aggregation in BM3D”, ASICON '11. IEEE 9th International Conference on ASIC, 2011.

[5]Xiaojun Guo, Guangyu Yao, Xiaoli Xu, Wenjiang Liu, Tao Liu, “Transistor technologies and pixel circuit design for efficient active-matrix organic light-emitting diode displays” Computer-Aided Design (ICCAD) , 2012 IEEE/ACM International Conference on,

[6]Qingyu Cui, Sporea R.A., Wenjiang Liu, Xiaojun Guo, “Analytical Models for Delay and Power Analysis of Zero-VGS Load Unipolar Thin-Film Transistor Logic Circuits” Electron Devices, IEEE Transactions on Volume: 61 , Issue: 11 DOI: 10.1109/TED. 2014. 2353651 Publication Year: 2014 , Page(s): 3838 – 3844.

[7]Qingyu Cui, Chen Jiang, Guangyu Yao, Xiaoli Xu, Wenjian Liu, Xiaojun Guo, “Dynamic Supply Voltage Scaling of Pixel Circuits for Static Power Reduciton in AMOLEDs”. SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd, 2013, 44(1): 1040-1043.

博士期间的专利和获奖

发明专利：印刷电子与集成电路混合结构的通用传感器系统，CN103487070A

发明专利：AMOLED 直接电信号混合反馈电路及其驱动方法，CN103400547A

获奖：新一代智能安全控制 SOC 芯片技术及应用，上海市科学技术三等奖。

国家自然科学基金《全溶液法制备低压有机薄膜晶体管集成电路的研究》，申请人之一

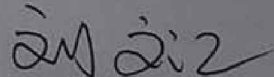
国家自然科学基金《基于溶液低压有机薄膜晶体管的高灵敏度 microRNA 传感器》，申请人之一

上海交通大学

毕业设计（论文）学术诚信声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：刘文江



日期：2015 年 6 月 19 日

上海交通大学

学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

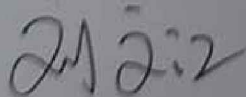
保密☐，在__年解密后适用本授权书。

本论文属于

不保密☒.

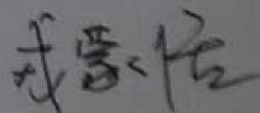
(请在以上方框内打“v”)

学位论文作者签名：刘文江



日期：2015年6月19日

指导教师签名：戎蒙恬



日期：2015年6月19日