

硅基微显示器发展现状与研究进展

季渊^{1,2*}, 许怡晴¹, 陈宝良¹, 张引², 穆廷洲²

¹上海大学微电子研究与开发中心, 上海 200444;

²上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444

摘要 硅基微显示器以单晶硅为衬底, 背板中集成 CMOS 驱动电路, 具有体积小、像素密度高、开关速度快、功耗低等特性, 在近眼显示、投影、增强现实/虚拟现实 (AR/VR) 等领域具有广泛应用。综述数字微镜器件 (DMD)、硅基液晶 (LCoS)、硅基有机发光 (OLED on silicon)、硅基二极管发光 (硅基 micro-LED) 4 种硅基微显示器, 重点论述硅基 OLED 和硅基 micro-LED 的关键技术和研究进展。这些硅基微显示器具有主动发光、高分辨率、高刷新率、高对比度、低功耗等突出特点, 在近眼显示领域拥有巨大的应用潜力。

关键词 硅基微显示器; 近眼显示; 硅基 OLED; 硅基 micro-LED

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011007

Development and Research Progress of Silicon-Based Microdisplays

Ji Yuan^{1,2*}, Xu Yiqing¹, Chen Baoliang¹, Zhang Yin², Mu Tingzhou²

¹Microelectronic R&D Center, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

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

Abstract Silicon-based microdisplays are based on single crystalline Si molecules, with a CMOS drive circuit integrated into their backplanes. Recently, these microdisplays have been widely used in near-to-eye display, projection, and augmented reality/virtual reality (AR/VR) fields due to their small size, high pixel density, fast switching speed, and low power consumption. Therefore, because of their emerging importance, this study reviewed four silicon-based microdisplays: digital mirror device (DMD), liquid crystal on silicon (LCoS), organic light emitting diode on silicon (OLED on silicon), and silicon-based micro-light-emitting diode (micro-LED on silicon). Then, we discussed the key technologies and research progresses of the OLED on silicon and micro-LED on silicon in detail. Consequently, our study proposed that their outstanding active luminescence, high resolution, high refresh ability, high contrast, and low power consumption characteristics show great application potential in near-to-eye display fields.

Key words silicon-based micro-display; near-to-eye display; OLED on silicon; micro-LED on silicon

1 引言

近年来, 无线技术、便携式设备、沉浸式应用的拓展升级推动了近眼显示技术的发展。尤其在虚拟现实 (VR) 和增强现实 (AR) 领域, 用户希望拥有尺寸更小、清晰度更高、刷新速度更快、功耗更低的设备来实现海量信息的传达, 得到身临其境的体验。传统显示器通常是基于非晶硅、多晶硅薄膜场效应晶体管 (TFT) 工艺的^[1-2], 像素密度一般不高于 1000 PPI (PPI 表示每英寸上的像素, 1 inch=2.54 cm)。随着互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺技术的精进, 出现了以单晶硅为

衬底的硅基微显示器, 在单晶硅 CMOS 工艺条件下, 单像素点距可达 10 μm 以下, 像素密度提升至 5000 PPI 以上, 可以制造出尺寸更小的显示器, 制造良率也大幅提升。许多研究机构和商业公司在硅基微显示技术上进行了深度研发, 部分产品已投入市场。

硅基微显示器区别于其他显示器的特征主要表现在: 硅基微显示器以单晶硅为基底, 背板中集成了 CMOS 工艺制作的驱动电路, 集成度更高, 以顶发射为主。由于其自身尺寸很小, 一般需要光学系统产生大视场显示效果^[3], 形成近眼显示器。目前硅基微显示器主要包括数字微镜器件 (DMD)、硅基液晶

收稿日期: 2022-08-19; 修回日期: 2022-09-02; 录用日期: 2022-09-14

通信作者: jiyuan@shu.edu.cn

(LCoS)、硅基有机发光(OLED on silicon)、硅基二极管发光(硅基 micro-LED)4 种形态。本文简单回顾了 DMD 和 LCoS 的发展,重点阐述硅基 OLED 和硅基 micro-LED 微显示器的特点和技术。

2 DMD 技术原理和发展现状

2.1 DMD 光开关

1987 年, TI 公司的 Hornbeck 发明了 DMD, 并且在 1993 年提出了基于静态存储器(SRAM)的电视投影系统^[4]。DMD 是一种 MEMS 组件, 通过 CMOS 工艺制作于像素电路上。像素电路的上方包含了微镜阵列, 通常是铝镜, 如图 1 所示。每个微镜可以转动两个方向, 一个方向, 光线反射到吸收平面, 另一个方向, 光线经透镜投射出去。当光开关所连接的存储器单元处于“1”状态时, 微镜转到投射角度; 当光开关所连接的存储器单元处于“0”状态时, 微镜转到吸收角度^[5]。目前 DMD 已经进入成熟稳定量产状态, 分辨率达 4K, 主要应用于商业投影机、3D 打印等。

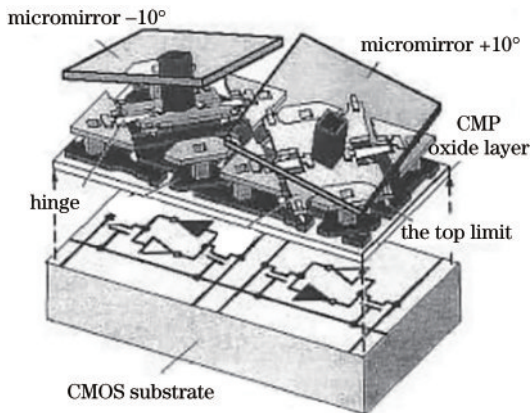


图 1 DMD 光开关结构

Fig. 1 DMD optical switch structure

2.2 DMD 灰度技术

DMD 像素的灰度通过二进制数字脉宽调制 (B-PWM) 生成, 如图 2 所示, 通过不同的开关时间延迟, 形成不同灰度。然而, 传统 B-PWM 方法形成的像素亮度在一帧扫描期间不固定, 因此观察者目光在同一图像中移动时会有闪烁感觉或者观察到类似于等高线的伪轮廓线现象。TI 公司对此进行了改进, 通过比特

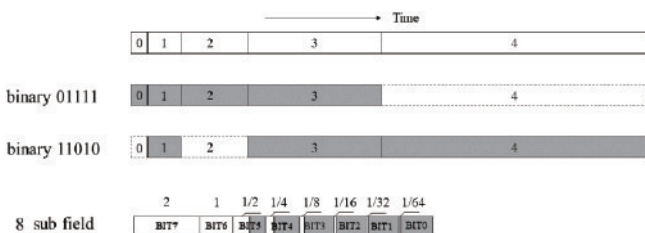


图 2 B-PWM 原理图及子场扫描方式

Fig. 2 B-PWM principal and subfield scanning method

分割技术减弱了这种效应, 将权值较大的比特扫描时间分割成小的子场后交错显示。

2.3 DMD 全彩技术

DMD 全彩技术分为单片 DMD 和三片 DMD 方案。单片 DMD 方案需要有一个色轮, 以一定频率转动色轮, 同时 RGB 数据被转换为二进制数值输入, 依次投射出红、绿、蓝光, 当 DMD 设备高速翻转时, 三色叠加, 人眼将看到彩色图像^[6]。在三片 DMD 方案中, 三片 DMD 反射三种颜色的光, 融合后生成彩色图像。单片式 DMD 体积较小, 适合家庭的数字光处理 (DLP) 技术投影仪等小型显示场景, 而三片式 DMD 拥有更高的亮度, 适合影院 DLP 投影仪或者大型高亮度的场景。TI 公司曾推出尺寸为 0.2 inch 的单片式小型 DMD 芯片, 用于汽车四周警告显示; 也推出了分辨率为 4K 的高亮度 DMD, 采用三片式设计, 用于激光电视和投影仪。

3 LCoS 技术原理和发展现状

3.1 结构和驱动方式

LCoS 是液晶显示器 (LCD) 与 CMOS 集成电路结合的反射型显示技术, 具有结构紧凑、稳定可靠、分辨率高等特点, 被广泛应用于 VR/AR 近眼显示系统中。LCoS 器件结构如图 3 所示, 液晶器件制作于单晶硅基底上, 通过反射光形成图像。硅基底中集成 CMOS 驱动电路, 表面通过化学机械抛光 (CMP) 等工艺形成像素电极, 在电极上制作定向层, 盖上覆有 ITO 电极的玻璃, 灌入液晶形成 LCoS^[7]。LCoS 主要有单片式和三片式 2 种: 单片式 LCoS 通过彩色过滤层或者场序彩色方式得到彩色图像, 成本相对较低, 但要求更快的响应速度; 三片式 LCoS 利用不同颜色的光源叠加形成彩色图像, 优点在于光学效率比较高, 图像质量更高。

LCoS 驱动有模拟方式和数字方式。模拟驱动利

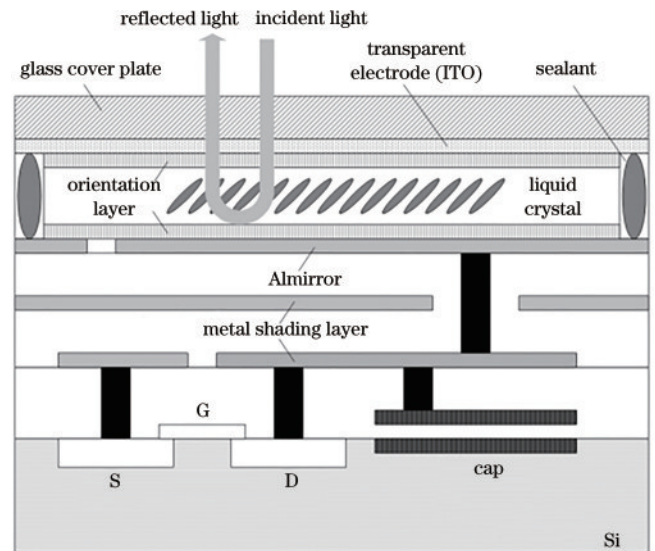


图 3 LCoS 器件结构

Fig. 3 LCoS device structure

用调制像素上的电压幅度来实现像素灰阶显示^[8]。数字驱动一般采用具有 SRAM 结构的像素电路,通过调制像素的开关时间来实现灰阶控制,也称为脉宽调制(PWM)方法。同时 LCoS 也有多种工作方式,其中垂直配向(VA)在对比度、亮度、驱动电压、响应速度方面拥有综合优势,是 LCoS 的主要工作模式^[9]。而铁电液晶(FLC)的响应速度较快(时间通常为 100 μs 以下),更适用于数字信号驱动,通过 PWM 来决定像素灰度^[10]。

3.2 国内外发展现状

对 LCoS 微显示器的研究起步于 1973 年,美国 Hughes Aircraft 公司^[11]开发出世界上第一款 LCoS 器件。为便于评估 LCoS 器件的优劣,2001 年, Wilson^[12]提出以反射率、对比度、均匀性评估 LCoS 性能的测试标准。经过多年发展, LCoS 技术已经较为成熟。美国 Syndiant 公司^[13-14]发布尺寸为 0.55 inch 的数字驱动 4K LCoS,采用图像压缩技术,在提升分辨率的同时减少了数据传输量。OmniVision 公司^[15]利用白光数字成像技术制造尺寸为 0.39 inch 的 1080P LCoS 产品,其集成了驱动和存储器功能。2019 年,美国 KOPIN 公司推出一款尺寸为 0.94 inch、分辨率为 2K \times 2K 的 LCoS,其应用于微显示器和空间光调制器。

小尺寸、高像素、低延迟及低成本一直是 LCoS 微显示器研究的方向。韩国 RAONTECH 公司^[16]提出一种用于高分辨率场序驱动彩色 LCoS 微显示器的像素驱动电路,像素密度达 5900 PPI。美国 Compound Photonics 公司发布了数字寻址 LCoS 微显示器,基于 NOVA DRIVE 技术^[17]实现了 1 ms 的超低延迟,满足 AR/混合现实(MR)应用需要。

国内对 LCoS 微显示器的研究始于 1998 年,南开大学^[8]研制出国内首枚 LCoS 显示芯片。之后随着研究的不断深入, LCoS 各方面性能有了极大提升。东南大学夏军团队^[18]提出一种 LCoS 显示芯片设计方法,采用 0.18 μm 尺寸模拟像素驱动、高速数据接口及彩色时序显示,分辨率达 1080P,刷新帧率为 360 Hz。Huang 等^[19]提出一种液晶分布不均匀的结构,该结构能够抑制 LCoS 分辨率提高、像素间距减小带来的边缘场效应。台湾 Himax 公司^[20]提出 Frontlit LCoS 面板,减小了光学引擎尺寸,能实现单眼 4K 的图像质量。Yang 等^[21]制作的像素密度为 4000 PPI 的 1.2 inch LCoS 微显示器和像素密度为 7000 PPI 的 0.7 inch LCoS-SLM 在降低延迟、放大视场和抑制图像斑点效应方面发挥了关键作用。2020 年, Fan-Chiang 团队^[22]提出用于 AR 显示的模拟 LCoS 空间光调制器,通过一种新的 multiconstraints angular spectrum algorithm (MASA) 加快计算速度,从而改善图像质量。

3.3 技术比较

LCoS 和 DMD 都采用了反射方式,开口率很高(90% 以上)、像素面积小、驱动电路简单,更容易实现

高分辨率。DMD 采用数字调光方式,比模拟幅值调光方式拥有更低的信号噪声和更高的灰度精度,更易于实现全数字系统,翻转次数达 10^9 以上,可连续工作 20 年。但是 DMD 需要平行光源来反射图像,导致系统尺寸较大,较难应用于近眼显示系统,主要用于 DLP 投影机。LCoS 在强光照射下容易产生形变,造成画面不均匀,同时强光在 LCoS 芯片内来回 2 次,相当于将 LCoS 的液晶层厚度减半,强光作用也会降低液晶的寿命。对于光学系统而言,反射式工作方式使分色合色及偏振系统较为复杂,不利于减小系统体积。此外, LCoS 和 DMD 色彩还原能力不足,色轮还会带来彩虹效应。

相比之下,主动发光的硅基 OLED 和硅基 LED 拥有更加优秀的显示特性,例如: OLED 色彩丰富、对比度高、驱动电压低、响应速度快、功耗低,具有非常优秀的用户体验; LED 发光效率高、器件稳定,适合于对亮度要求更高的场合;两者都是全固态型器件,抗震性能好,工作温度范围宽,适合于军事和特殊应用,都属于自发光器件,不需要背光源,有利于减小系统体积,尤其适用于近眼显示系统,目前受到行业极大关注,是近眼显示系统中非常有前景的技术。

4 OLED 技术原理和发展现状

4.1 顶发射器件结构

与传统基于 TFT 背板的 AMOLED 电路不同,硅基 OLED 微显示器采用顶发射方式,光线通过顶部透明电极层射出,增加了发光效率,基本结构^[23]如图 4 所示。单晶硅衬底集成了驱动电路,硅基背板表面是像素图案导电层、隔离层和修饰层(下电极),其材料属性和抛光程度极大影响了 OLED 发光效率,一般采用半导体工艺兼容的 Al、TiN 或 Mo 等材料。在下电极上方制作多层有机材料和透明电极,透明电极将各像素

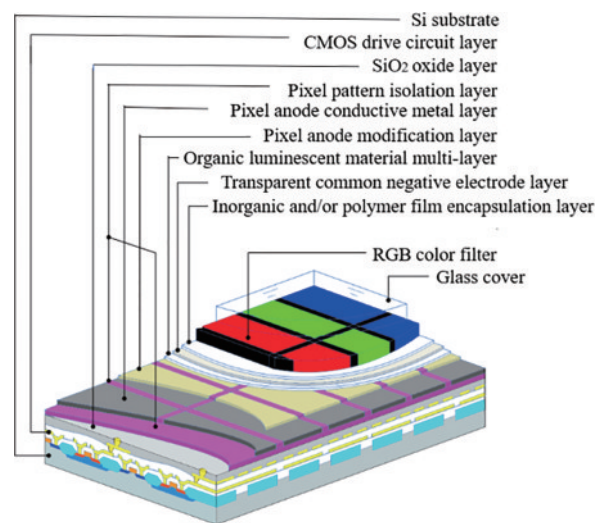


图 4 顶发射硅基 OLED 器件结构^[23]

Fig. 4 Structure of a top-emitting OLED on silicon device^[23]

的阴极连接,形成透明共阴电极。为避免 OLED 器件与空气中的水氧接触而变质,一般采用薄膜封装(例如通过 PECVD 或 ALD 工艺),使 OLED 器件与空气隔绝。利用 RGB 彩色滤光膜,实现 OLED 器件全彩显示。最后,盖上玻璃封盖,构成完整的顶发射 OLED 微显示器^[24]。

4.2 全彩化方案

4.2.1 白色 OLED 器件

白光器件加彩色滤光膜是如今大多数硅基 OLED 微显示器采用的全彩方案。白光 OLED 器件结构有单层结构、多层结构和串联叠层结构(tandem)。单层结构将三色发光材料掺杂到同一主体材料中,成本较低,但发光效率也低。多层结构将不同颜色的发光层隔开,通过互补色层实现白光,但由于不同发光层的驱动电流和寿命不同,器件容易出现稳定性问题。串联叠层结构则是将两个或两个以上的发光层用中间层串联起来,从而达到两倍或两倍以上电流效率^[25]。例如,在蓝光和红/绿发光层之间插入电子产生层(CGL),可显著提高器件性能,且由于叠层结构电流密度小,更容易延长器件寿命,典型结构如图 5 所示。KOPIN 公司近年采用双叠层白光 OLED 加彩色滤光片的方案,在 100 A/cm² 电流密度下亮度达 7000 cd/m²。

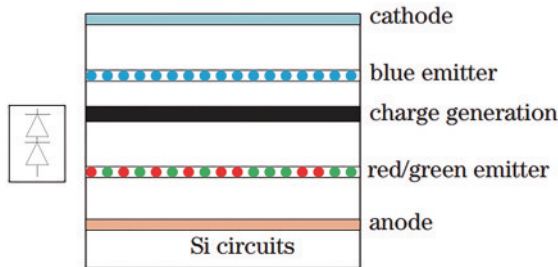


图 5 串联叠层白色 OLED 结构

Fig. 5 Tandem structure for white OLED

4.2.2 彩色滤光膜

对硅基 OLED 微显示器添加彩色滤光膜主要有两种方式^[26],即先在玻璃上制造滤光膜,然后将其贴合覆盖到 OLED 器件上,或者将彩色滤光膜直接沉积和蚀刻在 OLED 器件上。第一种方案中,对于滤光膜材料和工艺的选择更为广泛,但需要考虑对位精度和贴合良率,有晶圆级贴合和芯片级贴合两种方案。对于晶圆级贴合方案,在制有滤光膜的玻璃基板上涂上胶水,将其对准并压在硅基 OLED 背板上;芯片级贴合方案采用拾起定位的方式,将彩色玻璃膜分离并定位粘连,这种方法必须注意玻璃切割带来的污染。为避免像素色偏,玻璃盖需要以一定压力贴合至微显示器上,使得滤光膜尽量贴近 OLED 器件,挤压过程也必须避免颗粒与气泡进入 OLED 器件。对于第二种方案,则是将彩色滤光膜直接制作于 OLED 器件表面,不同于在玻璃上制作,由于 OLED 器件不能承受高

温,需要额外的紫外线(UV)固化来弥补热固化的不足,但随着滤光膜厚度增加,UV 固化效率降低,出现了专用于 OLED 微显示器的低温彩色光刻胶,目前已经商用。

4.2.3 微腔结构

微腔结构通过不同厚度电极,使不同像素发出不同波长的光,例如红、绿、蓝光,组合后形成白光,同时,在电极下方制作额外的填充层,利用光刻技术调节填充层厚度,得到不同长度的微腔,基本结构^[27]如图 6 所示。在现有工艺技术中,一般先在绝缘层挖出沟槽,然后在沟槽内制作反射电极来形成微腔。但仅依靠曝光强度和曝光时间很难实现理想沟槽,微腔效果较弱。如果不通过沟槽,直接在绝缘层上制作不同高度的反射电极,容易出现电极高度落差大而导致阴极断裂的现象。因此,曾章和等^[28]提出一种新型强微腔结构,通过化学机械抛光工艺精准控制反射电极和绝缘填充层厚度,通过多次沉积成膜形成不同厚度的透明导电膜(TCL),形成强微腔效应,参考结构如图 7 所示。

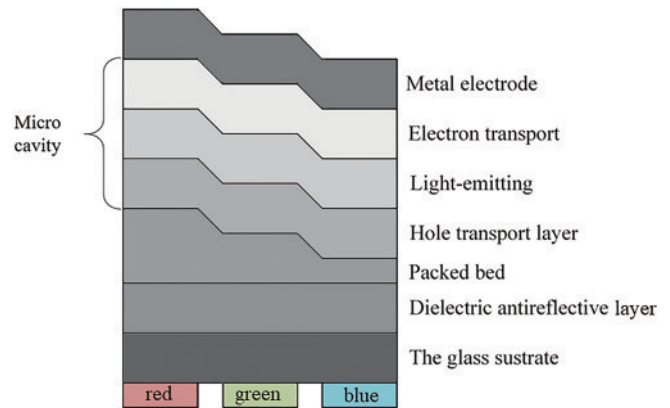


图 6 基本微腔结构示意图^[27]

Fig. 6 General microcavity structure^[27]

4.2.4 微透镜结构

除了在材料和结构上提升 OLED 发光亮度,还可以采用微透镜阵列(microlens array)提升 OLED 光输出效率。2019 年,SONY 公司^[29]提出了结合微透镜阵列的高效率 OLED 结构,对每个亚像素都配备一个透镜,将光高效率地从正面射出,透镜与 OLED 钝化层间使用低折射率树脂填充,结构如图 8 所示。微透镜通过光刻和热回流方法制备在彩色滤光膜上,再与 OLED 器件组装,避免 OLED 高温加工后性能下降。实验结果表明,在相同的电流密度下,配备微透镜的 OLED 微显示器的亮度相比没有配备微透镜的 OLED 微显示器提升 2.9 倍,达 5000 cd/m² 以上。此外,微透镜对控制观察角度的颜色偏移也有较好效果。

4.2.5 直接图案化技术

传统 AMOLED 的彩色像素可以通过 fine metal mask(FMM)蒸镀技术形成,对于像素点距小于 10 μm 的硅基微显示器,不论制作工艺还是对位精度,FMM

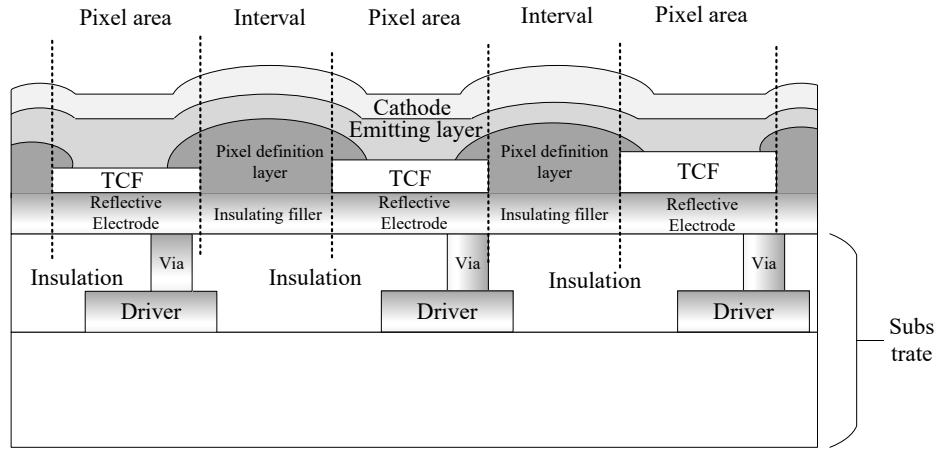


图 7 强微腔结构示意图^[28]

Fig. 7 Enhanced microcavity structure^[28]

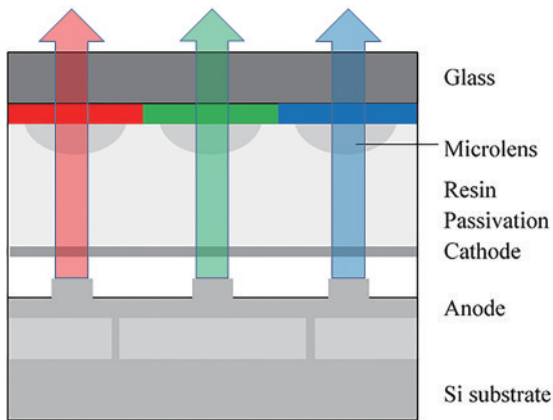


图 8 微透镜硅基 OLED 器件结构图^[29]

Fig. 8 Structure of microlens OLED on silicon device^[29]

都难以满足要求。美国 eMagin 公司^[30]提出了直接图案化技术(dPd),利用开口掩模板(open mask)制作空穴注入层和空穴传输层,然后分别制作红、绿、蓝的发光层,最后利用开口掩模板制作电子传输层和阴极,从而不再需要彩色滤光膜,亮度大幅提高。基于此技术,eMagin 公司开发了尺寸为 0.87 inch 的 2K 全彩微显示器,并于 2022 年公开了亮度超过 10000 cd/m² 的彩色 OLED 微显示屏,如图 9 所示。



图 9 eMagin WUXGA OLED 微显示器

Fig. 9 eMagin WUXGA OLED microdisplay

4.3 驱动技术

4.3.1 被动寻址和主动寻址

OLED 寻址方式可分为 PM(被动)和 AM(主动),PM 方式仅用于单色或分辨率较低的显示器,AM 更适用于分辨率更高的显示器。在 AM 驱动中,每个像素都配备独立的驱动电路,可以产生更高的显示分辨率和更高的灰度等级。

4.3.2 电流驱动和电压驱动

AMOLED 像素驱动原理分为电压控制和电流控制两种。与以 TFT 为背板的 AMOLED 显示器件相比,硅基 OLED 像素面积要小得多,流过像素的电流也很小,大约在几百 pA 到几十 nA 之间。由于 OLED 是电流驱动器件,发光亮度和电流大小成线性关系,早期 OLED 像素电路中普遍采用电流控制像素电路,其典型代表是电流镜^[31],电路结构如图 10(a)所示。由于电流控制电路中的电容充电速度较慢,当显示分辨率增高后,采用充电速度更快的电压控制,电路结构如图 10(b)所示,由 2 个晶体管和 1 个电容构成(2T1C),M₂ 为开关管,M₁ 为驱动管。写数据期间,扫描信号使 M₂ 打开,数据线对电容充电;发光期间,M₂ 关闭,电容上存储的电压使 M₁ 保持导通,电流通过 OLED 像素^[26]。电压控制电路的特点是控制简单,电容充电速度快,但电流不容易保持线性。如今在硅基 OLED 微显示器中,像素驱动电路方案多以电压驱动为主,采用多种方法调整非线性,实现多级灰度显示。

4.3.3 模拟驱动和数字驱动

传统 TFT 驱动电路的问题在于驱动晶体管的阈值电压(V_{th})不一致,造成相同电路结构的 OLED 像素亮度并不一致,因此大多驱动电路研究工作都把重点放在对阈值电压的补偿上。SONY 公司^[32]提出了一种用于高分辨率、高亮度均匀性 OLED 微显示器的电压编程像素电路,该电路采用 4 个 N 管和 1 个电容的结构,通过 C_s 对 N₁ 的 V_{th} 进行存储,以应对体效应引起

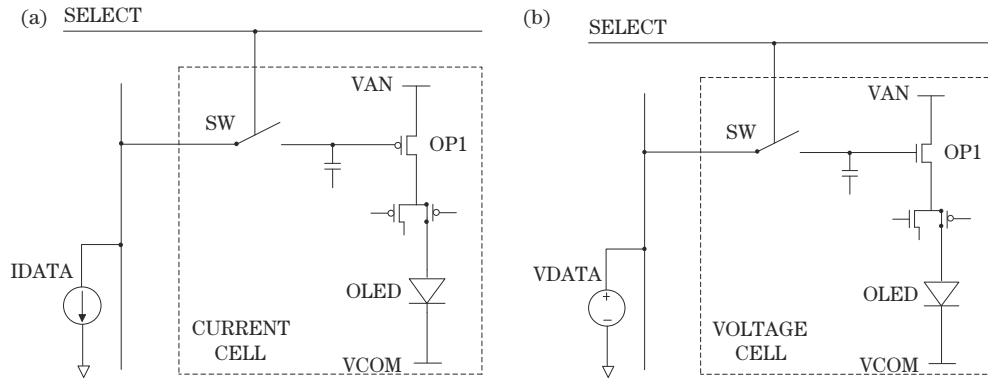


图 10 像素电路。(a)电流镜像素电路;(b)电压驱动像素电路

Fig. 10 Pixel circuit. (a) Current mirror pixel circuit; (b) voltage driven pixel circuit

的 V_{th} 变化,从而减小发射电流偏差,亮度均匀性高。北京大学^[23]提出了串联 4 个 N 型 MOS 管的结构来扩展输入数据电压范围,所提出的电路可以补偿阈值电压偏差。

尽管如此,模拟像素电路由于工作在亚阈值区或线性区,晶体管的输出电流受阈值电压影响大,加入补偿电路的同时也增加了复杂的时序、更多的功耗和像素电路的面积。因此针对要求更高的微显示器,可采用数字驱动,通过控制给定时间内发光时间的占空比来调制亮度。对于理想的数字 PWM 驱动,在任何一个时间节点上,OLED 像素都只有亮或暗两种状态,可

利用存储器来设计像素驱动电路,常用的存储器为 SRAM 和 DRAM。后者类似于 2T1C 像素电路,通过对电容充放电来打开或关闭开关管。而 SRAM 不包括电容,速度更快、功耗更低。图 11(a)采用了传统模拟方式,电流一致性稍差。图 11(b)采用了 7T0C 像素驱动电路,T1~T6 构成 SRAM 数据锁存单元,T7 作为开关管控制 OLED 电流打开或关断,驱动管工作在饱和区,其一致性对输出电流影响较小,可驱动较高分辨率的微显示器^[33]。在 7T0C 基础上,提出 5T0C^[34]和 3T1C^[35]等像素电路,对像素电路进行进一步优化,减小面积。

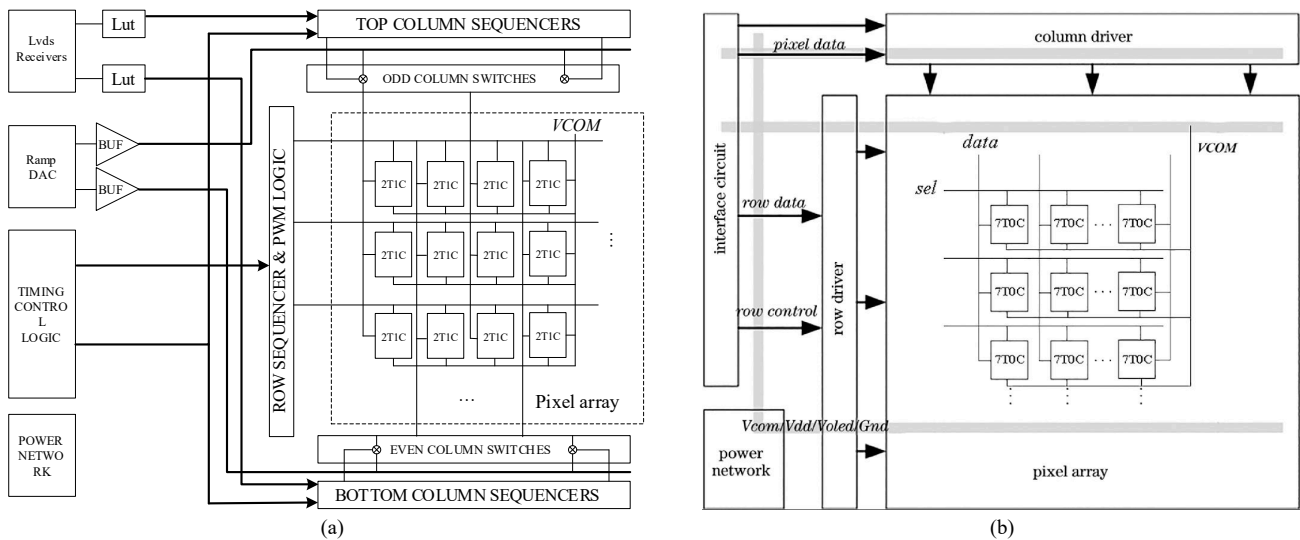


图 11 像素驱动电路。(a)基于 2T1C 的模拟驱动像素电路框图;(b)基于 SRAM 的数字驱动像素电路框图

Fig. 11 Pixel drive circuit. (a) Block diagram of analog driving pixel circuit based on 2T1C; (b) block diagram of digital driving pixel circuit based on SRAM

数字型驱动 OLED 在显示运动画面时会出现动态假轮廓(DFC)。本课题组^[36]提出最小可察觉失真积分法来量化不同扫描策略产生的动态假轮廓,并通过实验论证了该评估方法的可靠性,该方案结合了线性脉宽调制法和分形扫描法。PWM 驱动下,在 12.5%~87.5% 的占空比下,硅基 OLED 微显示器寿命可延长 1.6~20.9 倍^[37]。

4.4 人眼凝视点渲染技术

高端 VR/AR 应用对分辨率、刷新率提出更高要求,需要更大数据传输带宽。研究人员发现,人眼在视网膜中心处的空间频率和视觉敏感度最高,视觉边缘相对模糊。针对这一特性,可以对图像边缘的数据进行压缩,从而降低数据传输带宽。本课题组^[38]提出了一种基于人眼凝视点自适应的中心凹图像传输算法,建

立了包含压缩比和像素距离的压缩比金字塔,其过程如图 12 所示,在高分辨率的硅基 OLED 显示器上验证了所提出的算法。优化后,凝视点在图像坐标中心和原点的待传输像素总数只有原始图像像素总数的

8.16% 和 2.33%,为实现更高分辨率的近眼显示器提供了新思路。进一步地,动态调整凝视点的位置以优化近眼显示系统,综合压缩率可以超过 40:1^[39]。图 13 展示了自适应微显示器在不同凝视点时的显示图像。

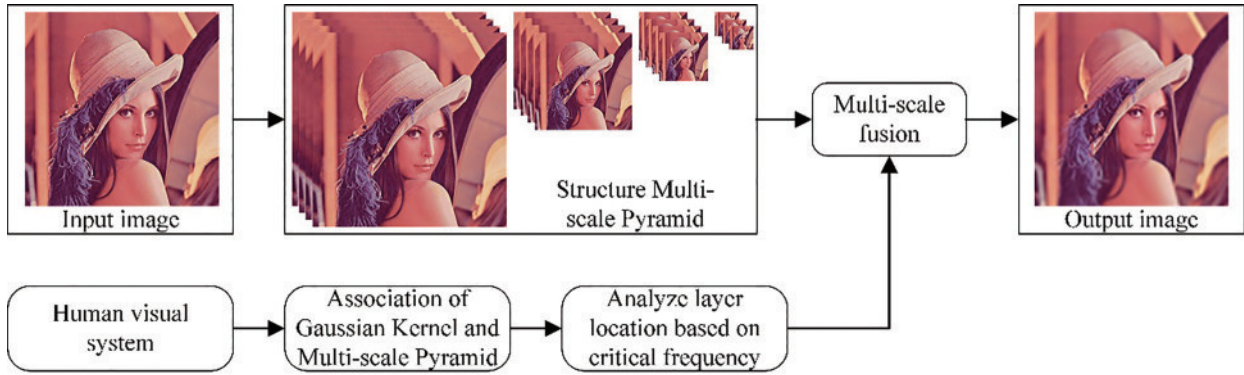


图 12 多尺度金字塔凸显混合输出结构^[38]

Fig. 12 Multi-scale pyramid highlighting mixed output structure^[38]

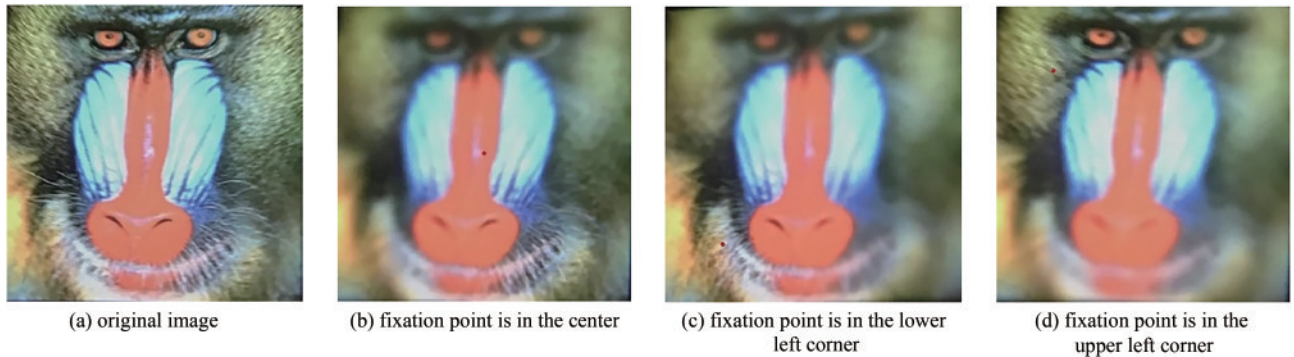


图 13 基于人眼凝视点的自适应微显示器的拍摄图^[39]

Fig. 13 Photos obtained by adaptive micro-display based on human eye condensation point^[39]

5 Micro-LED 技术原理和发展现状

5.1 器件结构和工艺技术

5.1.1 Micro-LED 器件结构

Micro-LED 是高度集成的自发光器件,基本结构如图 14 所示。在 CMOS 驱动芯片上集成微小尺寸的 LED 阵列,形成 micro-LED 微显示器,每个 LED 像素点单独寻址点亮形成图像。Micro-LED 的发光效率高、色彩丰富、器件稳定、响应速度极快,能在近眼显示领域得到较好应用。

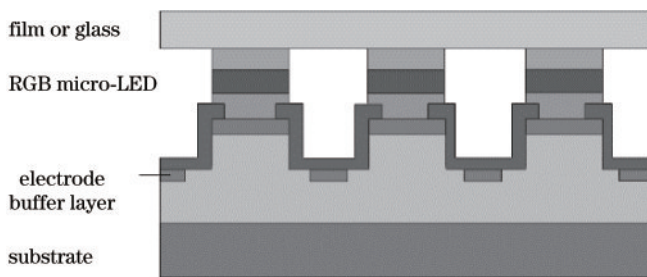


图 14 Micro-LED 器件结构

Fig. 14 Micro-LED device structure

5.1.2 外延技术

目前 micro-LED 外延技术使用的衬底材料主要有蓝宝石和硅两种。蓝宝石衬底价格便宜。硅衬底芯片由研磨腐蚀技术得到,该技术对外延层损伤相对较小,更方便控制外延均匀性。日本夏普公司^[40]使用的外延片就是蓝宝石衬底,在 micro-LED 阵列上进行量子点-PR 图案化之前,需要通过激光剥离工艺去除蓝宝石衬底。苏州晶湛公司^[41]利用 GaN-on-Si 外延片制造的产品,通过优化 AlGaIn/GaN 肖特基势垒二极管,拥有极高的击穿电压和较高的良率。2021 年,香港科技大学^[42]利用 GaN-on-Si 外延片制作高亮度 micro-LED,通过湿法刻蚀去除硅衬底,最终像素密度能够达 848 PPI,为微显示器大规模生产提供了解决思路。

除材料外,外延片的波长均匀性也较大影响 micro-LED 的生产良率。相对于传统 LED, micro-LED 微显示器对外延的要求更高,尤其针对 VR/AR 等应用场景,要求外延均匀性在 3 nm 以内,必须严控整个晶圆表面的缺陷。目前主要采用金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)工艺来获得外延片,外延生

长过程中, MOCVD 设备的温度、压力、气流等参数均对外延片的均匀性造成影响。提高 MOCVD 设备的调控性能是提高波长均匀性的可行方案。其次, 外延生长过程中出现的缺陷和表面颗粒会在 micro-LED 中对应形成芯片坏点, 因此还要进一步提高加工过程的环境洁净程度。

5.1.3 芯片封装结构

LED 芯片包括正装结构、倒装结构和垂直结构 3 种。正装芯片结构的电极在上方, 从上至下材料依次为 P-GaN、发光层、N-GaN、衬底。随着 micro-LED 芯片尺寸越来越小, 留给正装芯片的引线布线空间不足。倒装芯片结构与之相反, PN 结产生的热量不经过衬底直接传导到热沉, 因而散热性能好, 芯片发光效率和可靠性较高。Day 等^[43]将 InGaN micro-LED 阵列与 CMOS 芯片倒装键合, 制作的混合集成芯片大小仅 $6\ \mu\text{m}$ 。同时研究表明, 倒装芯片制成的蓝光、白光器

件工作在大电流时具有良好的发光均匀性^[44]。垂直芯片结构采用高热导率的衬底取代蓝宝石, 更易于散热, 正负电极分别位于 LED 芯片上下两侧, 电流均匀分布, 避免了局部高温, 进一步提升芯片可靠性。2019 年, 韩国科学技术院^[45]通过堆叠不同颜色的 micro-LED 实现超高分辨率微显示器。虽然目前垂直结构芯片的成本较高, 尚未进入生产化过程, 但随着技术改良, 垂直结构也将具有竞争力。

5.1.4 Wafer bonding

JBD 公司^[46]采用独特的晶圆级单片混合材料集成技术, 先将 micro-LED 晶圆与 IC 晶圆结合, 然后移除 micro-LED 生长基板, 实现了单晶层的转移, 如图 15 所示, 制备了红、绿、蓝三色有源矩阵 micro-LED 微显示器, 由于避免了巨量转移, 可提高芯片良率。2021 年, 美国 KOPIN 公司与 JBD 公司共同开发了 2K 单色 micro-LED 微显示器, 亮度高达 $4 \times 10^6\ \text{cd}/\text{m}^2$ 。

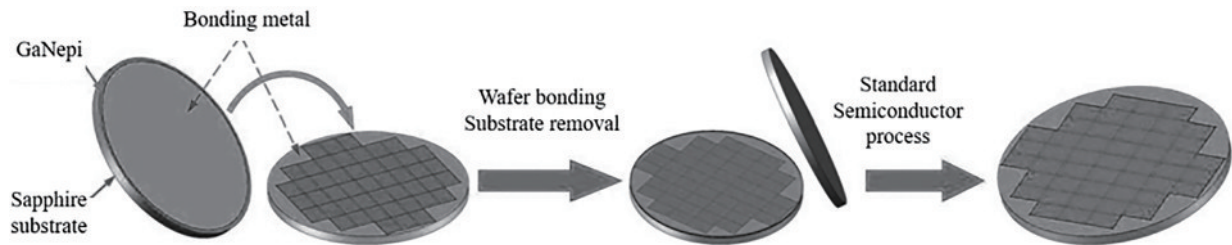


图 15 晶圆级单片混合集成技术^[46]

Fig. 15 Wafer-level monolithic hybrid integration technology^[46]

5.2 全彩化技术

5.2.1 直接 RGB 分色

直接分色法是最基础的全彩化方案, 三种颜色子像素通过横向或垂直结构连接到衬底上, 形成一个全彩像素。2018 年, Stover^[47]在 SID display week 上展示了一款尺寸为 0.7 inch 的彩色 micro-LED 微显示器, 其分辨率达 960×540 , 峰值电流密度仅为传统 LED 的 $1/100$, 成为早期 RGB 分色 micro-LED 全彩微显示器的领先者。但是这一方法制作良率并不高, 不同子像素材料不同, 会使制作过程变得复杂, 并且由于驱动电路输出电流与理论电流存在误差, 图像产生色差。而且 RGB 分色 micro-LED 全彩微显示器要实现批量生产还存在巨量转移问题。

除此之外, 红光效率低也一直是 RGB 分色 micro-LED 面临的一大关键问题。GaN 材料可以实现蓝色、绿色的高效率发光, 但 GaN 无法实现红光。目前较为普遍的方法是通过加入铟制成 InGaN 材料实现红光 micro-LED, 然而随着铟含量的增加和芯片尺寸的缩小, 红光效率会显著下降。针对这一情况, AlGaInP 基红光的 micro-LED 由于良好的电稳定性和光学输出, 成为研究热点之一。2022 年, JBD 公司推出尺寸为 0.13 inch 的 AlGaInP 基红光 micro-LED 芯片, 亮度达 $5 \times 10^5\ \text{cd}/\text{m}^2$ 。

5.2.2 光学透镜合成技术

通过光学棱镜 (trichroic prism), 将 RGB 三色 micro-LED 合成全彩色显示, 比较典型的是 JBD 公司^[48]提出的显示引擎, 其由 3 个单色 micro-LED 微显示面板与 1 个合色棱镜 (X-cube) 组成, 通过合色棱镜将附于其三个不同面的红、绿、蓝单色微显示面板进行光学合色, 实现了全彩化。三色 micro-LED 阵列的亮度可以单独调整。刘召军团队^[49]利用三色棱镜, 将 3 个自发射的 micro-LED 微显示器产生的图像组合成彩色图像。

5.2.3 色彩转换技术

全彩化方案在实现过程中会存在技术成本和可靠性问题。近年来, 提出了利用色彩转换材料在 UV 或蓝色 micro-LED 基础上实现彩色显示的方案, 例如紫外自对准固化技术利用紫外 micro-LED 激发掺入不同颜色纳米晶体的纳米复合材料, 实现多色转换。目前蓝光 LED 已发展较为成熟, 而紫外 LED 的光提取效率和电流注入效率较低, 仍处于发展阶段^[50]。

色彩转换技术使用较多的转换介质有两种: 荧光粉和量子点 (QD)。荧光粉技术较为成熟, 但由于其颗粒较大, 且本身会吸收光, 效率有限。量子点是近些年的研究热点, 用于 micro-LED 的量子点尺寸一般为 $1 \sim 10\ \text{nm}$, 量子点越小, 发光越接近蓝色, 越大越接近红

色。Chen 等^[51]使用基于 GaN 的蓝色 micro-LED 和量子点制造了单片 RGB micro-LED, 成功提高了对比度和光输出强度。制造 micro-LED 量子点转换层过程中, 抑制量子点的重吸收是提高颜色转换效率的关键^[52]。卢子元团队^[53]研究了不同厚度和混合比例的量子点膜层的吸收/发射光谱, 在量子点膜层中加入了 TiO₂ 散射粒子, 优化了光转换效率。

由于 micro-LED 各子像素间距离很小, 相邻颜色量子点容易相互干扰, 因此涂层工艺也非常关键。2021 年, 厦门大学 Wu 等^[54]基于 Aerosol Jet 喷涂技术并利用光学微影蚀刻出模具来分隔三种颜色的量子点, 制作全彩 micro-LED 显示阵列, 用于直视型超广视角 AR 眼镜。郭浩中团队^[55]通过紫外/蓝色 micro-LED 来激发红色和绿色量子点, 实现红光和绿光的发射。虽然量子点在稳定性、散热能力等方面还存在不足, 但它的高发光效率、宽吸收光谱等优点使其在微显示领域具备极大的潜力。

5.2.4 光场叠层技术

美国 Hu^[56]提出一种光场叠层技术, 在 3 块水平的芯片上分别制作红绿蓝三色光, 通过棱镜折射, 在垂直方向合成实现全彩化显示。进一步地, 可在同一块 CMOS 基板上制造红绿蓝三色显示区域, 像素点之间相对位置固定, 从而降低光学合色系统的要求, 提高显示模块的精度, 由于电路是一次性制作, 可降低生产成本, 提高良率^[57]。

综合以上几种全彩化方案, 相较于 RGB 分色方案和光学透镜合成方案, 量子点转换方案的效率更高、可靠性更强, 也是目前研究的热点。虽然当前量子点技术仍存在工艺要求高、材料稳定性差等不足, 限制了应用范围, 但由于量产化可行性高, 且不需要额外的光学棱镜, 在微显示领域, 尤其是在 AR/VR 等对体积、成本要求更高的应用场景中的发展前景值得期待。

5.3 驱动技术

5.3.1 CMOS 被动驱动

硅基 LED 的驱动方式较硅基 OLED 类似, 都是通过电流来驱动器件发光, 也分为被动驱动 (PM) 和主动驱动 (AM)。PM 以行列扫描方式点亮, 但在实现全彩化时, 由于 RGB 三色的驱动电压存在差异, 亮度也存在差异。邓鹏团队^[58]通过 FPGA 器件驱动了全彩 LED 微显示器。

5.3.2 CMOS 主动驱动

AM 方式通过共电极倒装驱动, 驱动能力强, 能实现高亮度和高对比度的效果, 控制能力强而且速度快。为了精准控制色彩变化, 调整亮度和色阶, 可以采用占空比调制的方式, 香港科技大学选择 PMOS 作驱动器, 将像素阳极连接到晶体管漏极。驱动电路结构^[59]如图 16 所示, 这一结构的优点是 micro-LED 像素的均匀性和退化不会影响驱动晶体管的输出电流。其后采

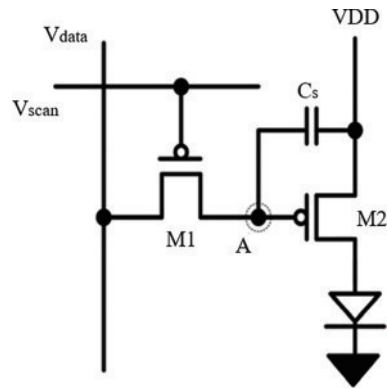


图 16 驱动电路结构图^[59]

Fig. 16 Diagram of a driving circuit structure^[59]

用 2T1C 结构陆续驱动多种 micro-LED 微显示器。法国 CES-leti 的研究人员^[60]开发了一种生产高性能 GaN micro-LED 显示器的新工艺, 将 micro-LED 芯片直接转移到 CMOS 晶圆的顶部, 由 CMOS 驱动电路和 micro-LED 芯片制成的每个完整的“像素”被转移到显示器基板上。这一技术由 Aledia 公司投入商用。

在微显示的 AR/VR 应用中, 功耗成为关键问题。台湾 JDC 公司^[61]使用数字驱动, 为 micro-LED 微显示器降低了功耗。基于此, 本课题组研发了数字驱动 micro-LED 微显示器背板, 制作了尺寸为 0.28 inch 的 micro-LED 微显示器, 分辨率为 1280×720, 单元像素尺寸间距为 5 μm, 使用 4 个 LVDS 差分对进行数据传输, 点亮样品, 如图 17 所示。相比被动驱动, CMOS 主动驱动的反应速度更快, 电极数更少, 且可以实现独立控制, 更具有发展潜力。

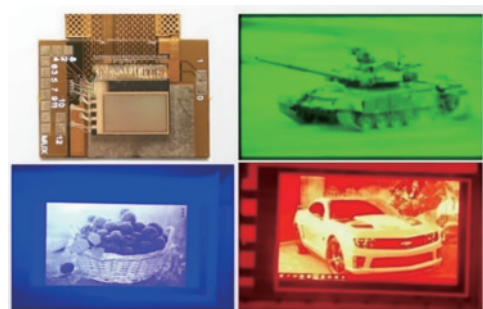


图 17 Micro-LED 微型显示器结构与 RGB 单色显示

Fig. 17 Micro-LED miniature display structure and RGB monochrome display

5.3.3 TFT 驱动

美国的 Lumide 公司^[62]展示了一种独特技术: 在 micro-LED 阵列顶部制造 TFT 背板, 形成集成了多晶硅 TFT 的 III-V micro-LED, 利用该技术制作了像素密度为 1400 PPI 的 0.13 inch 单绿色微型显示器, 其截面如图 18 所示。通过传统的半导体工艺处理蓝宝石上生长的 III-V LED 外延, 这样就无需转移或粘合, 增强了扩展性, 可降低制造成本。

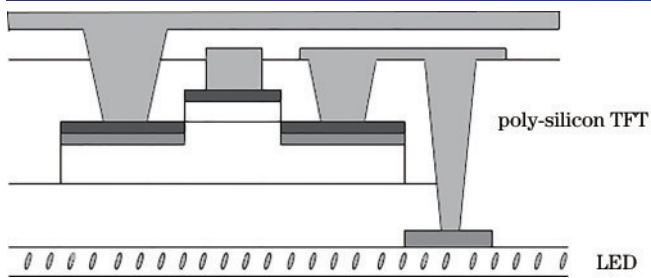


图 18 集成多晶硅 TFT 的 III-V LED 截面图

Fig. 18 Cross-sectional diagram of III-V LED integrated with a poly-crystalline thin-film silicon transistor

6 总 结

VR/AR 技术目前还在探索和初级应用阶段,随着各项技术的迅速发展,在军事、工业、医疗、教学及游戏商业等领域都有广泛的应用前景。例如,VR/AR 技术为海陆空作战设备提供环境位置及协同信息^[63];结合传统的骑行眼镜,增加可视化速度、心率、导航等信息^[64];结合自由曲面(FFS)实现大视场的头盔显示器,减轻军事装备重量^[65]等。硅基微显示器作为一种微型的图像显示设备,成为 AR/VR 近眼显示系统的优选方案。基于 VR/AR 设备的使用特性,近眼显示屏幕需要具备低功耗、高分辨率、高刷新率、高亮度等特点。目前 LCoS 以高亮度、高分辨率、量产成熟等特点成为 AR 头戴式显示器的主要解决方案,被最先应用于谷歌眼镜等头戴式显示器中。主动发光的硅基 OLED 和 micro-LED 由于更好的显示特性,将成为未来近眼显示的主流器件。硅基 OLED 具有更广的色域和极佳的对比度,能实现自发光、低功耗,包括美国 eMagin、日本 SONY 在内的多家公司进行了深入研究,国内也有较多公司已展开量产。Micro-LED 整体优势在于超高的亮度、较广的温度适应性和器件稳定性,非常具有竞争力,但由于是一项新兴技术,整体方案还不是很成熟,相比其他微显示技术成本较高。总体而言,硅基 OLED 已开始进入量产阶段,而 micro-LED 微显示的技术研究还处于初步阶段,与此同时,各大厂商并未停下对其他主流微显示技术的深入探索。随着微显示技术的进一步发展,未来 VR/AR 头戴显示器将会变得更加舒适、小巧,能更好地满足大众消费者的需求。

参 考 文 献

- [1] 梁静秋. 微显示器件的研究进展[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 21-27.
Liang J Q. Research advances in micro-LED display devices[J]. OME Information, 2010, 27(12): 21-27.
- [2] Armitage D, Underwood I, Wu S T. Introduction to microdisplays[M]. Chichester: John Wiley & Society for Information Display, 2006.
- [3] 代永平, 耿卫东, 孙钟林. 硅基微显示技术[J]. 光电子

技术, 2002, 22(4): 192-197.

Dai Y P, Geng W D, Sun Z L. Technology of microdisplay on silicon[J]. Optoelectronic Technology, 2002, 22(4): 192-197.

- [4] Hornbeck L J. Current status of the digital micromirror device (DMD) for projection television applications[C]// Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting, December 5-8, 1993, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 1993: 381-384.
- [5] Hornbeck L J. Combining digital optical MEMS, CMOS and algorithms for unique display solutions[C]// 2007 IEEE International Electron Devices Meeting, December 10-12, 2007, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2007: 17-24.
- [6] 邝健. 基于 DLP 应用的光刻物镜设计与微型投影机光学系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
Kuang J. Design of lithography lens and study of micro-projector optical system based on DLP application[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [7] Zhang Z C, You Z, Chu D P. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e213.
- [8] 梁宇华, 朱樟明. 硅基液晶(LCoS)微显示技术[J]. 微纳电子与智能制造, 2020, 2(2): 73-79.
Liang Y H, Zhu Z M. Micro-display technique of liquid crystal on silicon(LCoS)[J]. Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing, 2020, 2(2): 73-79.
- [9] Cuypers D, De Smet H, Van Calster A. VAN LCOS microdisplays: a decade of technological evolution[J]. Journal of Display Technology, 2011, 7(3): 127-134.
- [10] Wilkinson T D, Crossland W A, Davey A B. Applications of ferroelectric liquid crystal LCOS devices [J]. Ferroelectrics, 2002, 278(1): 227-232.
- [11] Ernstoff M N, Leupp A M, Little M J, et al. Liquid crystal pictorial display[C]//1973 International Electron Devices Meeting, December 3-5, 1973, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 1973: 548-551.
- [12] Wilson M D. Methods for measuring performance of LCoS microdisplays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2001, 9(3): 213-216.
- [13] Russell A I. Image compression for color-sequential LCOS, with decompression at the retina[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2013, 44(1): 1103-1106.
- [14] Fung K, Waller C, Eisenbrandt E, et al. Q-view: a compression technology for UHD resolution, low power, and low cost LCOS panels[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(s1): 342-344.
- [15] Skaife J J, Flynn M, Bone M. Optimization of an MTN mode for all digital LCoS imager for projection application [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2004, 35(1): 986-989.
- [16] Jeong M, Kim E, Hong O, et al. A 0.37-in. 5900 PPI liquid crystal on silicon CMOS SoC using low voltage high dynamic voltage range novel pixel circuit for augmented reality micro-displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2021, 29(10): 785-792.
- [17] Abeeluck A K, Iverson A, Goetz H, et al. High-

- performance displays for wearable and HUD applications [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 49(1): 768-771.
- [18] 陈弈星, 夏军, 孙伟锋, 等. 高分辨率高帧率硅基液晶 (LCoS) 显示芯片与驱动 [J]. *微纳电子与智能制造*, 2020, 2(2): 88-95.
Chen Y X, Xia J, Sun W F, et al. High resolution and high framerate LCoS display and driver [J]. *Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing*, 2020, 2(2): 88-95.
- [19] Huang Y G, Liao E L, Chen R, et al. Liquid-crystal-on-silicon for augmented reality displays [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2366.
- [20] Li P. LCoS and AR/VR [J]. *Information Display*, 2018, 34(2): 12-15.
- [21] Yang J P, Chen H M P, Huang Y G, et al. Sub-kHz 4000-PPI LCoS phase modulator for holographic displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 772-775.
- [22] Fan-Chiang K, Huang S H, Shen C Y, et al. Analog LCoS SLM devices for AR display applications [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(7): 581-590.
- [23] 季渊. 超还原硅基有机发光微显示器研究 [D]. 上海: 上海大学, 2012.
Ji Y. Research on the super restoring OLED-on-silicon microdisplay [D]. Shanghai: Shanghai University, 2012.
- [24] Kang C M, Lee H. Recent progress of organic light-emitting diode microdisplays for augmented reality/virtual reality applications [J]. *Journal of Information Display*, 2022, 23(1): 19-32.
- [25] Fung M K, Li Y Q, Liao L S. Tandem organic light-emitting diodes [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28: 10381-10408.
- [26] Wacyk I, Prache O, Ali T, et al. OLED microdisplay design and materials [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7690: 76901I.
- [27] Cho H, Joo C W, Choi S, et al. Organic light-emitting diode structure for high color gamut in high-resolution microdisplay: over 90% color gamut based on BT.2020 [J]. *Organic Electronics*, 2021, 101(3): 106419.
- [28] 曾章和, 钱栋, 李启, 等. 一种强微腔硅基有机发光显示装置及其形成方法: CN110164930A [P]. 2019-08-23.
Zeng Z H, Qian D, Li Q, et al. Strong microcavity silicon-based organic light-emitting display device and forming method thereof: CN110164930A [P]. 2019-08-23.
- [29] Motoyama Y, Sugiyama K, Tanaka H, et al. High-efficiency OLED microdisplay with microlens array [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(6): 354-360.
- [30] Ghosh A, Donoghue E P, Khayrullin I, et al. Directly patterned 2645 PPI full color OLED microdisplay for head mounted wearables [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 837-840.
- [31] Levy G B, Evans W, Ebner J, et al. An 852×600 pixel OLED-on-silicon color microdisplay using CMOS subthreshold-voltage-scaling current drivers [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2002, 37(12): 1879-1889.
- [32] Fujii T, Kon C, Motoyama Y, et al. 4032 ppi high-resolution OLED microdisplay [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(3): 178-186.
- [33] Chen W D, Ji Y, Mu T Z, et al. Atomized scan method for high-definition silicon-based OLED microdisplays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(10): 4293-4299.
- [34] 徐勇, 祁鹏赫, 黄苒, 等. 硅基 OLED 数字型像素驱动电路 MOS 管尺寸对数据写入的影响 [J]. *液晶与显示*, 2021, 36(5): 680-686.
Xu Y, Qi P H, Huang R, et al. Influence of MOS transistor size on data writing in digital driving pixel circuit of OLED-on-silicon [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(5): 680-686.
- [35] Ji Y, Ran F, Xu H G, et al. A digitally driven pixel circuit with current compensation for AMOLED microdisplays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2014, 22(9): 465-472.
- [36] 季渊, 张凯文, 陈文栋, 等. 数字驱动型 OLED 的动态假轮廓量化及改善策略 [J]. *光子学报*, 2021, 50(9): 0911002.
Ji Y, Zhang K W, Chen W D, et al. Dynamic false contour quantification and improvement strategy of digital driven OLED [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 0911002.
- [37] 季渊, 龚淑萍, 穆廷洲, 等. 基于亮度衰减模型的硅基 OLED 微显示器寿命研究 [J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1923003.
Ji Y, Gong S P, Mu T Z, et al. Lifetime of OLED-on-silicon microdisplay based on luminance decay model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1923003.
- [38] 季渊, 高钦, 余云森, 等. 基于多尺度金字塔的硅基 OLED 微显示控制器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1223001.
Ji Y, Gao Q, Yu Y S, et al. OLED-on-silicon microdisplay controller based on multi-scale pyramid [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1223001.
- [39] 季渊, 陈远生, 宋远胜, 等. 人眼凝视点自适应的近眼显示控制器 [J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 191-200.
Ji Y, Chen Y S, Song Y S, et al. Human eye gaze point adaptive near-eye display controller design [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(1): 191-200.
- [40] Liu Y T, Lai Y H, Li Y L. Heading to ultimate display with MicroLED [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(s1): 220.
- [41] Xu R, Chen P, Liu M H, et al. 3.4-kV AlGaIn/GaN Schottky barrier diode on silicon substrate with engineered anode structure [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(2): 208-211.
- [42] Qi L H, Zhang X, Chong W C, et al. 848 ppi high-brightness active-matrix micro-LED micro-display using GaN-on-Si epi-wafers towards mass production [J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 10580-10591.
- [43] Day J, Li J, Lie D Y C, et al. III-Nitride full-scale high-resolution microdisplays [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(3): 031116.
- [44] 李晓珍, 熊传兵, 汤英文, 等. 大功率倒装 LED 芯片陶

- 瓷封装器件顶面微区发光均匀性[J]. 发光学报, 2021, 42(9): 1436-1445.
- Li X Z, Xiong C B, Tang Y W, et al. Uniformity of light emission in micro-area on mesa of high-power flip-chip LED devices with ceramic packaging[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(9): 1436-1445.
- [45] Geum D M, Kim S K, Kang C M, et al. Strategy toward the fabrication of ultrahigh-resolution micro-LED displays by bonding-interface-engineered vertical stacking and surface passivation[J]. Nanoscale, 2019, 11(48): 23139-23148.
- [46] Zhang L, Ou F, Chong W C, et al. Wafer scale hybrid monolithic integration of Si-based IC and III-V epilayers—a mass manufacturable approach for active matrix Micro-LED Displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2018, 26(3): 137-145.
- [47] Stover M. Q &. A with jasper display Corp[J]. Information Display, 2018, 34(2): 35-36.
- [48] 据晶, 李起鸣, 徐晨超, 等. 自发光投影显示系统及微显示全彩光机: CN210109545U[P]. 2020-02-21.
- Ju J, Li Q M, Xu C C, et al. Self-luminous projection display system and micro-display full-color light machine: CN210109545U[P]. 2020-02-21.
- [49] Chong W C, Wong K M, Liu Z J, et al. A novel full-color 3LED projection system using R-G-B light emitting diodes on silicon (LEDoS) micro-displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2013, 44(1): 838-841.
- [50] 李晋闽, 刘志强, 魏同波, 等. 中国半导体照明发展综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0116002.
- Li J M, Liu Z Q, Wei T B, et al. Development summary of semiconductor lighting in China[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0116002.
- [51] Chen G S, Wei B Y, Lee C T, et al. Monolithic red/green/blue micro-LEDs with HBR and DBR structures [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(3): 262-265.
- [52] Liu Z J, Lin C H, Hyun B R, et al. Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 83.
- [53] 卢子元, 庄永漳, 仇旭, 等. Micro-LED 全彩显示中量子点膜层制备及光转换效率优化[J]. 发光学报, 2022, 43(3): 421-429.
- Lu Z Y, Zhuang Y Z, Zhang X, et al. Synthesis and conversion efficiency optimization of quantum dots layer for full-color micro-LED display[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2022, 43(3): 421-429.
- [54] Wu T Z, Lin Y, Huang Y M, et al. A highly stable full-color display device with VLC application potential using semipolar micro-LEDs and all-inorganic encapsulated perovskite nanocrystal[J]. Photonics Research, 2021, 9(11): 2132-2143.
- [55] Lin H Y, Sher C W, Hsieh D H, et al. Optical crosstalk reduction in a quantumdot-based full-color micro-light-emitting-diode display by a lithographic-fabricated photoresist mold[J]. Photonics Research, 2017, 5(5): 411-416.
- [56] Hu D. Ultra light-weight see-through display glasses: US10969586[P]. 2021-04-06.
- [57] 冉峰. 微显示器件、投影显示系统、增强现实眼镜: CN202120919283.5[P]. 2021-04-29.
- Ran F. Micro display device, projection display system, augmented reality glasses: CN202120919283.5[P]. 2021-04-29.
- [58] Deng P, Ke Z, Chao V S D, et al. Full-color pixelated-addressable light emitting diode on transparent substrate (LEDoTS) micro-displays by CoB[J]. Journal of Display Technology, 2016, 12(7): 742-746.
- [59] Zhang X, Qi L H, Chong W C, et al. Active matrix monolithic micro-LED full-color micro-display[J]. Journal of the Society for Information Display, 2020, 29(1): 47-56.
- [60] Glen D. Aledia touts MicroLED chip progress[J]. Information Display, 2021, 37(2): E2.
- [61] Chu C H, Wu F, Sun S. High PPI Micro-LED display based on PWM technology[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 49: 337-338.
- [62] Tull B R, Twu N, Hsu Y J, et al. Micro-LED microdisplays by integration of III-V LEDs with silicon thin film transistors[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 246-248.
- [63] 黄天智, 刘越, 王涌天, 等. 增强现实技术的军事应用与前景展望[J]. 兵工学报, 2006, 27(6): 1043-1046.
- Huang T Z, Liu Y, Wang Y T, et al. Military applications and prospect of augmented reality[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(6): 1043-1046.
- [64] Haas G. Microdisplays for augmented and virtual reality [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 49(1): 506-509.
- [65] 程德文, 王涌天, 常军, 等. 轻型大视场自由曲面棱镜头盔显示器的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 309-311.
- Cheng D W, Wang Y T, Chang J, et al. Design of a lightweight and wide field-of-view HMD system with free-form-surface prism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 309-311.