

硅基微显示芯片综述

陈弈星^{1,2}, 夏军^{1*}

¹东南大学信息显示与可视化国际合作联合实验室, 江苏 南京 210096;

²南京芯视元电子有限公司, 江苏 南京 210032

摘要 增强现实技术是元宇宙重要的人机交互平台, 其中光学成像部件和微显示屏是成像质量的关键。目前有 5 种微显示器件: 硅基液晶、硅基 OLED、硅基 micro LED、digital light processing(DLP)、激光扫描振镜。将着重介绍不同微显示屏的组成结构、工艺流程、硅基驱动方式、发展现状及面临的挑战。在硅基驱动部分, 将从像素驱动的不同电路和不同驱动电路的优缺点入手, 分析不同显示技术在硅基部分的设计和指标挑战。对目前不同技术所能达到的指标进行汇总比较。讨论硅基背板的设计关注点和发展趋势。最后, 对不同微显示芯片的应用场景和发展进行讨论。

关键词 微显示; 硅基液晶; 硅基 OLED; 硅基 micro LED

中图分类号 O453

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011006

Review on Silicon-Based Microdisplay Chips

Chen Yixing^{1,2}, Xia Jun^{1*}

¹Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization,
Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

²Nanjing Smartvision Electronics Co., Ltd., Nanjing 210032, Jiangsu, China

Abstract Augmented reality is an important human-machine interface platform for the metaverse, and optical imaging units and microdisplay screens in a system are the key to the display performance. At present, there are five popular microdisplay devices, namely, the liquid crystal on silicon, organic light-emitting diode (OLED) on silicon, micro light-emitting diode (micro LED) on silicon, digital light processing (DLP), and laser scanning galvanometer, all of which has their own special features. This study introduced the construction, manufacturing process, silicon driving circuit, status quo, and the challenges of different microdisplay screens. For the silicon-driving part, this study analyzed topics such as the pixel-driving circuit and its pros and cons and the challenges related to the design and index of different display technologies. Furthermore, the indicators that can be achieved by different technologies were also summarized and compared. The design focus and development trend of silicon-based backplanes were also discussed. Finally, the application scenarios and development of different microdisplay chips were discussed.

Key words microdisplay; liquid crystal on silicon; OLED on silicon; micro LED on silicon

1 引言

增强现实(AR)概念最早出现在 1968 年, 但受制于显示技术和光学技术, 一直未能普及。1990 年, 美国军方要求提升空军作战效率, 才开始对显示屏的更新换代提出明确要求^[1]。一些公司开始了对基于硅基的液晶屏的研发。2012 年谷歌推出了基于硅基液晶(LCoS)和棱镜光机的轻便式单目 AR 眼镜, 使得更多的机构和消费者对 AR 眼镜产生了浓厚的兴趣^[2]。随

着增强现实的应用场景和需求越来越多, 相应地对 AR 眼镜的要求也就越来越高, 如需要长时间佩戴的 AR 眼镜需要满足体积小、质量轻且待机时间长的需求。而户内或者工业场景应用中则对分辨率、对比度和可视角有更严苛的要求。为了构建更好的 AR 系统, AR 眼镜中的不同模块, 如处理器、光机和微显示屏, 也引起了关注。处理器从前期的直接用的现成通用处理器发展到现在的针对 AR/VR 的专用处理器^[3-4]; 光机从早期的棱镜光学技术发展到现在的光波

收稿日期: 2022-06-30; 修回日期: 2022-07-15; 录用日期: 2022-08-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFF0701100, 2021YFB3600502)、国家自然科学基金(62075040)

通信作者: *xiajun@seu.edu.cn

导技术;微显示屏从 LCoS 一枝独秀(Google glass 1、Hololens 1、Magic leap 1 等)到现在的 LCoS、硅基有机发光二极管(OLED)(INMO AIR)、激光扫描振镜(LBS)(HOLOLENS 2)和微型发光二极管(micro LED)(OPPO Air Glass)等多种微显示技术,都得到了应用和推广。也有厂商通过提高制造精密密度,采用高温多晶硅液晶显示(HTPS LCD)技术来达到 AR 眼镜的要求(EPSON)。

LCoS 脱胎于液晶显示屏(LCD)技术,借助成熟的半导体工艺和液晶产线,发展迅速,具有工艺成熟、成本较低等特点。而后随着工艺和制造逐渐成熟,硅基 OLED 凭借高对比度的优势备受青睐,但是寿命、亮度都是瓶颈,在户外应用场景一直受限。其后, micro LED 凭借高亮度和更长的预期寿命被认为是更适合于 AR 的微显示技术,但是由于制造工艺还未成熟,良率很低,通常认为离量产还有一些时间。另外,由于微软在 HOLOLENS 2 产品里面大胆采用了 LBS 微显示技术,使得这一技术得到一些厂家的青睐。

对于时下流行的光学技术和显示技术, Kress^[5] 对不同微显示技术的发光方式、发光效率和显示效果进行了详尽介绍,也介绍了市场上的主流产品所采用的技术。Hsiang 等^[6] 对不同微显示器件的材料特性和器件结构进行了详细论述。文献^[7] 对不同显示技术的显示原理和整个光学系统的搭配做了介绍。文献^[8] 则对不同技术进行了分类和指标对比。然而,微显示技术,从制造流程或者设计过程来看,又可以分为前道的硅基部分和后道的发光层部分,如:LCoS 可分为硅基背板和液晶盒子^[9]; OLED-on-Silicon 可以分为硅基背板和上层的有机发光层^[10]。本文将从硅基背板的角度对不同的微显示技术进行介绍,即从应用场景出发,针对不同应用对微显示的不同要求,从硅基背板设计的角度对不同技术进行分类阐述。这将对 AR 眼镜的系统性设计提供有效帮助。基于这一思考,本文分别介绍 LCoS 技术、硅基 OLED 技术、硅基 micro LED 技术、DLP 和 LBS 技术的器件结构、硅基电路设计架构和它们的发展趋势。

2 硅基液晶(LCoS)

2.1 LCoS 的器件结构

LCoS 一开始是以小型化的 LCD 为目标的^[4],但是随着技术的进步,还发展出了丰富的应用^[11],如全息、光通讯和光镊等。尽管如此,LCoS 从结构上看,依然是最初的硅基加液晶盒子方式^[12]。与薄膜晶体管(TFT)LCD 的最大区别是,LCoS 用单晶硅晶圆取代了 TFT ARRAY 器件。LCoS 芯片的剖面如图 1 所示,除了硅基背板,还包含由框胶、液晶及 ITO 玻璃所构成的液晶盒子。其简要的生产流程如图 2 所示。

在显示应用中,根据制造工艺,LCoS 可以分为带滤色片的空间彩色 LCoS 和不带滤色片的时序彩色

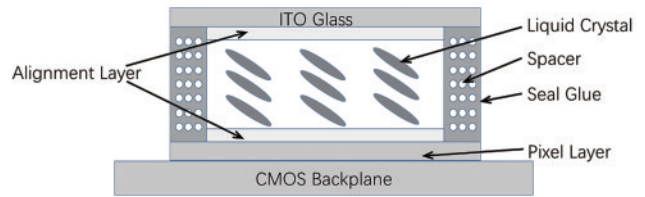


图 1 LCoS 的结构^[12]

Fig. 1 Structure of LCoS^[12]

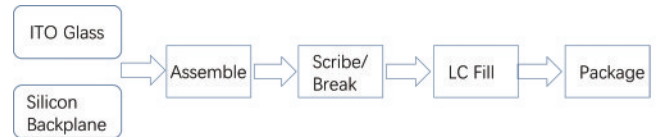


图 2 LCoS 的生产流程^[9]

Fig. 2 Manufacturing process of LCoS^[9]

LCoS。带滤色片的 LCoS 可以直接使用白色光源,数据类似传统 LCD,因此系统架构较为简单^[13]。但由于滤色片对光的损耗可以达 2/3 以上,因此系统光效损失较大。而时序彩色方案由于是通过控制不同颜色光源的时序来实现混色的,不需要滤色片,可以大幅度地提升光效。时序彩色方案的另一个优势是不需要三个不同颜色的子像素来混色,最终的像素密度提高,同样分辨率的屏可以做得更小。因而现在市场上的大部分 LCoS 屏都是时序彩色方案制作的,以满足 AR 眼镜微型化的需求。

LCoS 的成盒方式与 LCD 一样有多种选择。如:对于配向方式,有摩擦配向、无机配向和光配向等^[14];采用的液晶也有多种,有响应迅速的 TN 液晶,也有高对比度的 VA 液晶,还有近年来备受关注的蓝相液晶。从显示的角度看,出于对高对比度的追求,比较常用的是无机配向和 VA 液晶的组合^[15-17]。在后道工艺的支持下,LCoS 也能达到较高的对比度,如南京芯视元公司针对 HMD 的 LCoS 对比度可以达 1500:1^[18],SONY 公司和 JVC 公司针对高端大屏投影的 LCoS 对比度分别达 4000:1^[9]和 5500:1^[19]。

2.2 LCoS 的背板设计

LCoS 的背板设计,按像素驱动方式,可以分为模拟像素驱动和数字像素驱动,如图 3 所示。可以看出:模拟像素驱动比较类似传统 TFT 驱动方式,先将数字视频信号转换为模拟灰阶电压,而后传输到液晶层,通过控制液晶的不同翻转程度来控制光的反射^[20];数字像素驱动则将原视频信号分为不同的数字子帧,利用脉冲宽度调制来控制液晶的灰阶显示^[21]。在一个时间周期内,液晶上的等效灰阶电压^[18]为

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^N V_n t_n}{\sum_{n=0}^N t_n}}, \quad (1)$$

式中: V_{RMS} 为液晶层得到的平均电压; V_n 为 t_n 时间段

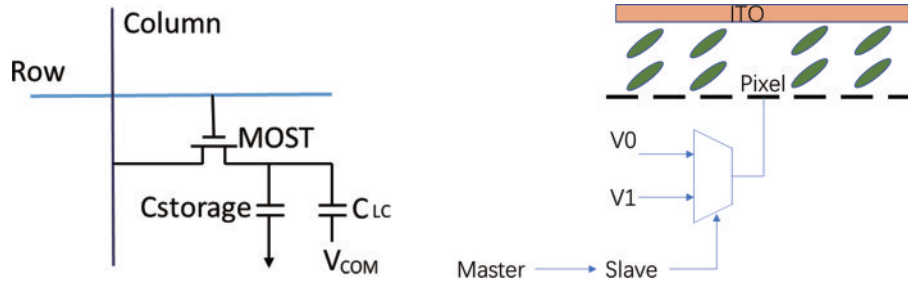


图3 LCoS的模拟像素驱动电路和数字像素驱动电路^[20-21]

Fig. 3 Analog pixel driving circuit and digital pixel driving circuit of LCoS^[20-21]

加载到液晶层的电压值; t_n 为某个液晶层两端电压值不变的时间段。对于时序彩色 LCoS,采用红绿蓝三色光源分时照射到屏幕上。如果数据通过单个晶体管和电容直接写入,那么光源只能在数据完全写入以后照射,有效显示时间短,亮度低。因此为了提高光效,一般采用一个缓存帧来预存数据,显示上一帧图像的同时写入下一帧的图像数据^[22-23],增加光源照射时间和亮度。由于时序彩色的数据流与常见视频源的数据流不太一样,所以一般需要一个驱动集成电路(IC)来对数据进行处理。为了进一步减小智能眼镜的体积,也可以采用更小的工艺节点将驱动 IC 部分集成到显示屏里^[24]。这样能更好地满足可穿戴的要求,只是成本将大幅上升。

对于一些特殊的高分辨率的应用场景,需要 4K 甚至 8K 的分辨率。此时如果依然按原先的方式直接叠加更多的像素,屏的面积会大幅增大,走线长度大幅增加,信号质量和数据带宽将成为挑战。因此也出现了通过抖动来提高视觉分辨率的做法,即屏幕的物理分辨率并没有达到要求的数值,但是通过时序上的抖动,不同子帧的时间叠加效应形成一个视觉上的高分辨率屏^[25];也可以通过两个屏幕的光学错位来提高视觉分辨率^[26]。但是由于抖动算法会增加功耗,在可穿戴的应用中并不一定适合。

总体来说,LCoS的发展主要是根据应用需求不断演进的。早期受限于工艺和应用,一般是低分辨率、大像素的屏(720P以下)。随着 AR 光学的发展,开始对中等分辨率(720P和1080P)、高光效、低功耗的屏产生需求。激光电视的推广使得高分辨率、高对比度、高可靠性成为考虑的焦点(4K和8K)。而 AR 市场的普及又使得极小尺寸、低功耗的显示屏成为一大趋势。在小尺寸方面,有减小分辨率和减小像素尺寸两种方式。目前报道的 LCoS 最小像素尺寸是 3.015 μm ,来自 Compound Photonics 公司。从设计角度,几种产品采用的系统架构和设计关注点都会有区别。

3 硅基 OLED

3.1 硅基 OLED 的器件结构

硅基 OLED 从结构上也可以分为两种:一种是采

用白光发光层加滤色片的结构,制作的公司有 SONY^[27]、京东方^[28]和弗兰霍夫研究所^[29]等,基本结构如图 4 所示;另一种是直接制作 3 种不同发光材料的结构,如文献[30-31]所示。第一种结构主要是为了规避蓝光 OLED 材料的寿命问题^[6]。不管哪一种结构,硅基 OLED 的亮度也是一直被诟病的问题之一。文献[32]的研究发现,对于同样的 OLED 器件结构,可以通过适度地调高工作电压并降低占空比的方式提高显示亮度并延长器件的使用寿命。另外,也有很多基于堆叠发光层提高 OLED 亮度的研究^[33-34]。有研究认为,三层堆叠的 OLED、双层堆叠的 OLED 和单层 OLED 的电流出光比大约为 3:2:1^[33,35]。

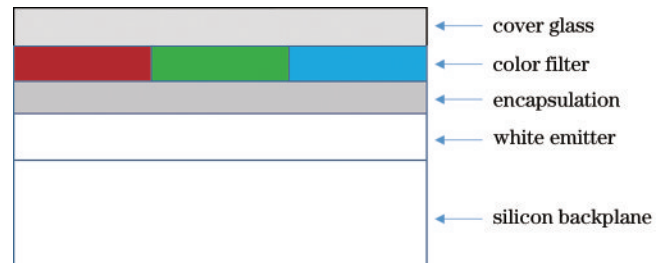


图4 OLED 的结构

Fig. 4 OLED structure

硅基 OLED 的后道工艺也是从硅晶圆开始的,如图 5 所示,先进行发光层的蒸镀,而后进行密封处理和玻璃盖板贴合,最后进行单独芯片的切割和封装^[36]。为了进一步提高发光效率和亮度,SONY 公司于 2019 年还提出了一种使用微透镜增加出光率的工艺^[37]。

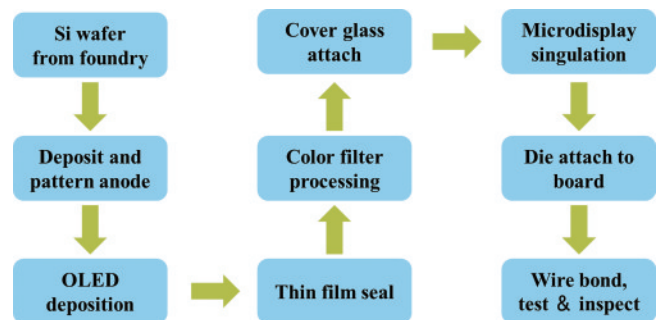


图5 硅基 OLED 的工艺流程^[36]

Fig. 5 Technological process of OLED on silicon^[36]

3.2 硅基 OLED 的背板设计

OLED 是电流驱动器件,对于像素驱动,也可以分为模拟像素驱动和数字像素驱动,如图 6 所示。对于硅基 OLED 背板来说,模拟像素驱动将显示信号转换为模拟电压之后,通过驱动像素的 MOS 管再转换为 OLED 器件所需要的电流^[38]。这种方法需要的 MOS 管少,但是因为屏幕亮度基本和像素电流成正比,而像素和像素之间的驱动 MOS 管的开启电压 V_{th} 在制造过程中会有偏差,屏幕会出现亮度不均匀的问题^[39]。对于大屏,通常会另外使用算法来补偿这一亮度不均匀问题;然而对于微显示屏来说,由于像素和像素之间的

亮度差异是由电流差异造成的,并且这种电流差异十分微小(nA 级别),难以片外补偿^[40],所以通常采用像素内补偿的方式来改善屏幕的亮度不均匀性。此外,由于低灰阶情况的像素电流都在 nA 级别,随环境和工艺变化明显,灰阶精度很难保证,所以也有采用 10 bit 的数模转换(DAC)来完成 8 bit 灰阶的设计^[41]。硅基 OLED 的数字驱动也可以采用脉宽调制(PWM)的方式,但是此时的脉冲宽度需要根据显示亮度来计算^[42]。文献[38,43]都采用了这种方式。PWM 驱动方式在灰阶调节和对比度上表现更好,但是需要的数据带宽要更高。

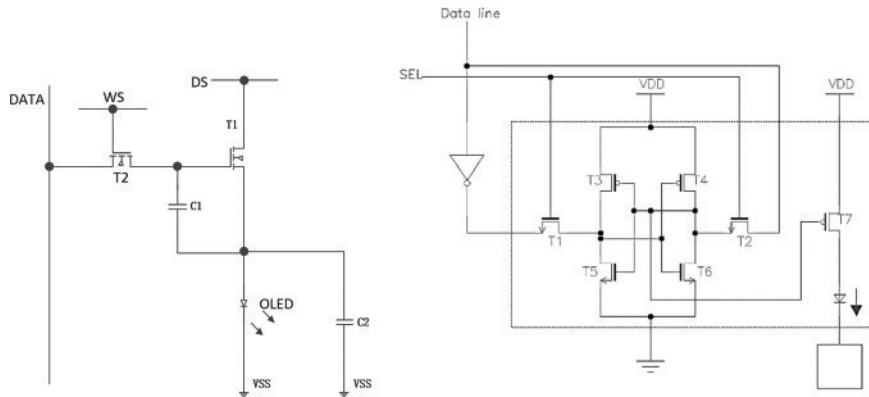


图 6 硅基 OLED 的模拟驱动电路和数字驱动电路^[44-45]

Fig. 6 Analog driving circuit and digital driving circuit of OLED on silicon^[44-45]

硅基 OLED 的背板发展趋势还有一个特点,就是有超高分辨率、高帧率、大尺寸屏和低分辨率、低帧率、低功耗两个截然不同的发展方向^[46]。高分辨率大尺寸屏主要针对一些对显示要求高的 AR 以及最近流行的具有 PANCAKE 光学架构的 VR。而低分辨率低功耗屏主要应用在野外需要电池续航时间长的场景^[46-47]。弗兰霍夫研究所甚至在 2022 年的 Displayweek 会议上提出了点亮功耗只有 1 mW 的双色 OLED 屏^[44]。

4 硅基 micro LED

4.1 硅基 micro LED 的器件结构

由于 micro LED 在发光效率、寿命和工作温度上都有优势^[48],一直备受关注。与 LCoS 和硅基 OLED 不一样的是,目前 micro LED 的制造工艺尚未成熟或者说有比较统一的趋势。虽然 micro LED 的定义目前还没有统一的意见,有认为像素间距在 100 μm 以下就算 micro LED 的,也有认为像素间距在 50 μm 以下才可以算。由于本文专注应用于 AR/VR 的微显示芯片,不包含像素大于 50 μm 的 micro LED^[49]。从 micro LED 发光结构上看,有横向结构^[50-51]也有垂直结构^[52]。横向结构指 LED 的阳极和阴极接触点是横向摆放的,即使不在同一高度,却需要消耗横向的面积。而垂直结构指整个发光结构在垂直方向形成,阳极或阴极的其中一极是公共电极,一极连接像素,从发光面来

看,不消耗额外面积。可知,对于对每英寸的像素个数(PPI)要求较高的 AR 应用来说(>1000 ppi),垂直结构是一个更合理的选择^[49]。从全彩显示的角度看,有几种不同的方案可以键合三种不同颜色 LED,也可以加量子点或量子阱对蓝色 LED 或是 UV LED 进行色转换^[53],也有 3 片不同颜色的 LED 芯片垂直堆叠合成彩色 LED 的工艺^[54]。Micro LED 的器件结构面临的另一个挑战是随着单颗 LED 面积的减小,发光效率也大幅度下降。

从制造工艺上看,有倒装焊工艺^[55]也有晶圆级制程^[56-57]。从硅基 micro LED 的角度看:倒装焊工艺主要通过金属键合或是其他微结构将 LED 芯片和 CMOS 硅基芯片在像素级别一一连接起来;而晶圆级制程则更多地借助半导体制造工艺。一个常见的基于色转换的倒装焊工艺流程^[49,58]如下:首先分别制作 CMOS 驱动晶圆和 LED 晶圆,通过倒装焊键合两种不同的晶圆后剥离 LED 衬底,在 LED 上制作色转换层,而后进行封装。而晶圆级工艺又分为几种:有将外延片转移到硅基晶圆后再刻蚀单个 LED 像素的方式^[56,59],也有在 LED 晶圆基础上进行 TFT 制作的方式^[60],也有先将 LED 晶圆切割并转移到硅晶圆基底而后进行晶圆级键合的方式^[61]。

4.2 硅基 micro LED 的背板设计

Micro LED 也是电流驱动器件,驱动方式^[62]也可

以分为模拟驱动和数字驱动,如图 7 所示。然而和 OLED 不一样的是,对于现有的 micro LED 工艺来说,模拟驱动方式除了有 V_{th} 变化造成的亮度不均问题,还面临发光效率随电流值改变而改变的问题以及电流增加引起的发光波长蓝移问题。所以数字驱动方式通常选择 LED 芯片外部量子效率(EQE)较高的电流区间

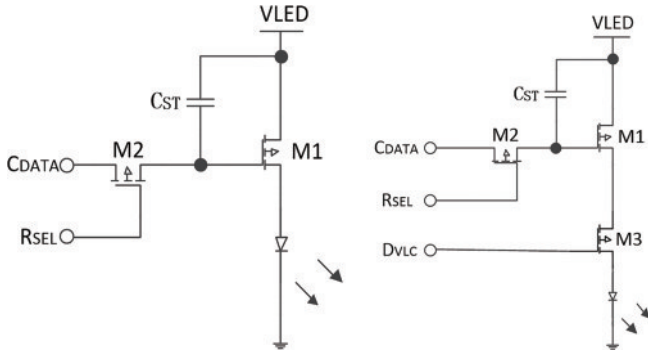


图 7 硅基 micro LED 的模拟驱动电路和数字驱动电路^[62]

Fig. 7 Analog driving circuit and digital driving circuit of micro LED on silicon^[62]

表 1 Micro LED 相关文献中的硅基部分的参数

Table 1 Parameters of silicon-based part in micro LED related literature

Parameter	Ref. [48]	Ref. [68]	Ref. [69]	Ref. [56]	Ref. [51]	Ref. [64]
Current density / ($A \cdot cm^{-2}$)	0.7	6	12	50	0.41	2.7
Pixel pitch	15 μm pitch (12 μm pixel)	5 μm	10 μm pitch (6.5 μm pixel)	20 μm pitch (10 μm pixel)	8 \times 24 μm	30 μm pitch (20 μm pixel)
Resolution	640 \times 480	1280 \times 3 \times 720	873 \times 500	640 \times 480	352 \times 198 \times 3	400 \times 240
PPI	1695	5080	2540	1270	1053	848
Average power consumption	800 mW	138.8 mW			700 mW	1.17 W

对于 AR 应用场景,屏作为可穿戴终端上的芯片,对功耗是希望越低越好,动辄上瓦的功耗并不适用。因此,可能需要在发光亮度、效率和功耗之间做一个平衡。

5 DLP 和激光扫描 MEMS 微镜技术

Digital light processing (DLP) 技术,也称 digital micro-mirror device (DMD) 技术,与 LBS 技术在原理上都属于微机电系统 (MEMS) 技术,但是二者的工作原理完全不同。

DLP 芯片中,CMOS 驱动部分和微镜在一颗芯片上,其工作原理非常类似于数字驱动的时序彩色 LCoS。在 CMOS 工艺之后,经过化学机械抛光 (CMP) 制程,制造了用于反射的众多像素级微小镜面,每个像素下面都是一个 6T SRAM 单元,用高低电平来控制光的开启和关断^[70]。其详细结构和制造工艺流程可参考文献^[71]。这一技术由于专利和生产原因,一直只有 TI 一家供应商。

激光扫描微镜技术在微显示技术中是比较特殊的一类。对于多个图像,通过微镜将被调制的激光有序

进行 PWM 而形成灰阶^[63-65],而亮度不均匀和工艺偏差可以通过算法解决。

但是对于面向 micro LED 的硅基背板来说,有一个设计矛盾。对于 micro LED 像素,发光效率最大的电流密度为 10~1000 A/cm^2 ^[65-67],而单个微显示芯片的显示面积通常也就在 1 cm^2 以内,对于普通 CMOS 工艺来说,如此大的电流密度很难实现。尤其如果考虑金属走线的寄生电阻,对于高像素密度的屏,大电流将引起过大的压降(屏的尺寸一般为 0.5~1 cm^2 ,按最低的 10 A/cm^2 计算,0.1 Ω 的寄生电阻将引起 1 V 的额外压降,而大部分供电电压在 5 V 或以下),反过来影响屏的亮度。所以会看到一个有趣的现象:分辨率高且像素小的微显示芯片,通常功耗反而低;分辨率低且像素大的屏,功耗可能反而大。表 1 是一些文献中的 CMOS 芯片部分的参数汇总。LCoS 和硅基 OLED 的像素间距和像素大小差别不大,所以一般只给一个间距。而对于 micro LED,考虑制造工艺和走线,两者差距有可能较大,因此在表 1 中尽量做了标注。

地发射到某个投影表面不同的位置,让人在视觉上感觉到一幅图像^[72]。也因为显示画面不是由物理像素构成的,微镜技术也被寄予厚望,能不受制造的物理极限而实现更高的像素密度^[73]。这一技术在微显示的显示区通常用一个毫米级别的微镜取代了其他技术的像素显示部分(众多的微米级别的单个像素),屏上通常包含了微镜、制动器和感应器,微镜的驱动信号由另外的混合工艺制造的芯片提供^[74]。虽然基于 MEMS 微镜的微显示技术在之前就有提出^[75-76],但是由于微镜的制造属于特殊工艺,很少受到关注,一直到微软公司在 HOLOLENS 2 设备中大胆采用了 LBS 技术才发生了改变。微镜的制造工艺可以参考文献^[77]。

微镜的控制可分为静电控制 (electrostatic)、电磁控制 (electromagnetic) 和压电控制 (piezoelectric)^[78]。这里根据扫描方式,微镜又可以分为两种:使用光栅扫描加线性扫描两个微镜的方案^[79]、使用单个微镜的方案^[80-81]。不论哪种方案,微镜都用来实现反射光作用。而微镜的控制部分,主要通过算法控制微镜的偏转角度,逐点成像。在扫描算法上,又分为光栅扫描算法和双振算法^[80]。光栅扫描算法快速翻转光栅微镜,形成

图像的行,再通过线性微镜以稍慢的速度完成对不同行图像的扫描。而双振算法则通过单个微镜在两个轴上都快速翻转,并多次写入形成完整图像。两种算法都有丢失像素点的缺点^[80],所以基于 LBS 技术的眼镜的视觉分辨率都会比标称的分辨率要小,优点在于微镜对高低温耐受,且亮度高。

6 结 论

通过以上几个部分的介绍,可以看出每一种微显示技术都有自己的优缺点,也各有需要面对的挑战。LCoS 屏的制造工艺成熟、亮度高、对比度中等、硅基背板设计灵活、功耗中等,但是由于是反射式而非自发光的屏幕,在 AR 应用中会比 OLED 屏和 micro LED 屏的方案需要多一个投影光机,增大了系统的体积,增加了功耗和复杂度。对于不是特别在意体积的如 HMD 等应用场景,LCoS 是一个非常合适的选择。硅基 OLED 屏对比度高、制造成熟度中等、亮度较低,对于硅基背板有针对不同场景的功耗优化方案,在一些对亮度要求不高的室内场景和一些需要对光路进行处理方案上会比较有优势。Micro LED 屏的亮度高、预期寿命长,长期看非常适合 AR 和 VR 的应用,但是目前制造工艺还不是很成熟,材料、良率和功耗等方面都有挑战。在 AR 应用上,目前一些主要做信息提示的不需要高分辨率的场景得到应用,量产能力有待证明。至于 LBS 方案,主要优势在于有完整方案,工作温度相对宽泛,对一些恶劣环境的应用有优势,缺点在于激光容易色偏,需要温控,系统功耗和实际分辨率都没有优势,且供应链薄弱。

如今,国内方面对微显示的研究方兴未艾。之前由于产业链的不完善,硅基微显示的发展一直比较缓慢。2001 年南开大学团队^[82]就发布了分辨率为 640×480 的模拟驱动 LCoS 芯片。中国科学院团队^[83]于 2009 年发布了分辨率为 320×240 的模拟驱动 LCoS 芯片。电科 55 所于 2019 年发布了分辨率为 1400×1050 的单色硅基 OLED 芯片^[84],并于 2022 年对 micro LED 的发光材料和后道工艺做了综述研究^[85]。上海大学团队^[32]在 2021 年发表了关于硅基 OLED 屏寿命的研究。福州大学团队^[86]于 2020 年对 micro LED 微显示技术从驱动到转移技术及发展状况做了综述研究。

本课题组于 2020 年 6 月发布了分辨率为 1920×1080 的模拟像素驱动 LCoS 芯片^[18],2020 年 11 月发布了基于数字像素驱动的 FHD LCoS 芯片^[87],2021 年发布了分辨率为 480×270 的单色 micro LED 芯片,2022 年联合南方科技大学团队共同发布了 FHD 单色 QLED 芯片。可以看出,2020 年后,国内微显示产业进入了高速发展期。

对不同硅基微显示技术的重要参数进行了一个比较,如表 2 所示。如何减小像素特征尺寸对各种微显示技术来说都是非常具有挑战性的一个课题。这里选择了在能够实现全彩显示前提下的最小像素尺寸。对于空间彩色(如 OLED 技术和 micro LED 技术),一个完整显示像素通常需要由 3 到 4 个子像素构成,因此子像素的尺寸可能小于表 2 所标注的尺寸。而对于 LCoS 技术和 DLP 技术,由于单像素就能实现彩色,显示像素和物理像素可以一一对应。在最大分辨率这个指标上,将不考虑通过算法提升显示分辨率,也不考虑功耗,只考虑能够制造出来的实际物理像素数量,如:8K 的 LCoS 屏^[19],由于价格昂贵,目前主要用于大型投影仪;对于 DLP 技术,可以通过抖动算法,用 1920×1080 分辨率的屏实现 3840×2160 分辨率的屏,大于屏的物理像素分辨率;针对 micro LED 技术,有单色分辨率可以达到 1080P 的产品,这里选择的是目前有报道的最大全彩分辨率 960×540 ;对于 LBS 技术,理论上通过足够快的扫描算法,可以实现任何大小的分辨率,然而微镜扫描速度受半导体器件工作速度和微镜翻转速度的限制,目前主要的方案主要还是 720P 和 1080P。成熟度的判断依据主要为生产工艺是否成熟以及产品是否已经得到广泛的使用。LCoS 和 DLP 分别在 AR 眼镜和投影领域应用多年,尽管仍在改进,都算是很成熟的技术。硅基 OLED 也在 EVF 和 VR 领域得到了应用,但是不论是材料还是工艺,都在改善当中。LBS 由于可以借鉴之前的 MEMS 工艺,相对来说制造工艺还比较成熟,主要是针对 AR 应用的改进。而 micro LED 技术不论是材料、制造工艺,还是与硅基背板的配合,都还在百家争论的阶段,并且没有大量应用的产品,因此认为成熟度较低。功耗数据主要来自实测、相关产品手册和综述文献^[49, 73, 88]。硅基 OLED 和 micro LED 的最小功耗分别来自文献^[46]和

表 2 不同微显示技术的参数对比

Table 2 Parameter comparison of different microdisplay technologies

Display	Maturity	Maximum resolution	Power consumption	Form factor	Smallest pixel pitch	Contrast ratio
LCoS	High	8K	0.1–0.5 W	Large	3.015 μm	$\sim 10^3:1$
DLP	High	2716×1528	0.2–1 W	Large	5.4 μm	$\sim 10^3:1$
Micro OLED	Medium	2560×2560	0.001–0.5 W	Small	6.3 μm	$\sim 10^5:1$
Micro LED	Low	960×540	0.01–0.5 W	Small	5 μm	$\sim 10^5:1$
LBS	Medium	1920×1080	>0.1 W	Small	Unavailable	$\sim 10^5:1$

文献[89]。对比度数据主要参考实测数据和文献[7]。

综上所述,可以认为,在AR领域,LCoS是一个比较成熟可用的微显示技术,其次是硅基OLED,micro LED技术有望后来居上。但在一些特殊的成像领域,如全息成像,LCoS依旧是最佳选择。不管哪一种微显示技术,屏侧与硅基背板部分的配合都是很重要的。将来可以通过实验优化,对不同的屏选择更合适的驱动方案和架构,实现更优异的性能。例如通过升级使用的半导体工艺节点,将驱动电路和屏侧集成到一颗芯片上以减小功耗,或通过CPU侧预处理视频信号,针对性地优化屏侧的功率,都可以让现在的微显示技术更加适合可穿戴设备。

参 考 文 献

- [1] Girolamo H J. Decade of progress 1991—2001: HMD technology ready for platform integration[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4361: 43-70.
- [2] 史晓刚, 薛正辉, 李会会, 等. 增强现实显示技术综述[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1146-1161.
Shi X G, Xue Z H, Li H H, et al. Review of augmented reality display technology[J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1146-1161.
- [3] Modrzyk D, Martin S, Crawford A, et al. Mira display processor for AR/VR systems[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 326-329.
- [4] O' Connor P, Meekhof C, McBride C, et al. Custom silicon and sensors developed for a 2nd generation mixed reality user interface[C]//2019 Symposium on VLSI Circuits, June 9-14, 2019, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2019: C186-C187.
- [5] Kress B C. Optical architectures for augmented-, virtual-, and mixed-reality headsets[M]. Bellingham: SPIE, 2020.
- [6] Hsiang E L, Yang Z Y, Yang Q, et al. Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2021, 29(6): 446-465.
- [7] Xiong J H, Hsiang E L, He Z Q, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 216.
- [8] Haas G. Microdisplays for augmented and virtual reality[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 49(1): 506-509.
- [9] Hashimoto S, Akimoto O, Ishikawa H, et al. SXRD (silicon X-Tal reflective display): a new display device for projection displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2005, 36(1): 1362-1365.
- [10] Ghosh A, Donoghue E P, Khayrullin I, et al. Ultra-high-brightness 2K×2K full-color OLED microdisplay using direct patterning of OLED emitters[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 226-229.
- [11] Lazarev G, Chen P J, Strauss J, et al. Beyond the display: phase-only liquid crystal on silicon devices and their applications in photonics[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 16206-16249.
- [12] 张紫辰, 尤政. 纯相位硅基液晶器件的芯片级封装技术[J]. 电子学报, 2015, 43(11): 2322-2330.
Zhang Z C, You Z. Fundamentals of die-level assembly techniques for phase-only liquid crystal on silicon devices[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(11): 2322-2330.
- [13] Huang H C, Zhang B L, Kwok H S, et al. Color filter liquid-crystal-on-silicon microdisplays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2005, 36(1): 880-883.
- [14] 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.
- [15] Duelli M, Shemo D M, Hendrix K D, et al. High performance contrast enhancing films for VAN-mode LCOS panels[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2005, 36(1): 892-895.
- [16] Cuypers D, de Smet H, van Calster A. Electronic compensation for fringe-field effects in VAN LCOS microdisplays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2008, 39(1): 228-231.
- [17] Anderson J E, Chen C, Bos P J. Fast VAN LCOS microdisplay[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2005, 36(1): 1366-1369.
- [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] Furuya M, Sterling R, Bleha W, et al. D-ILA® full resolution 8K projector[C]//SMPTE Annual Tech Conference & Expo, October 27-29, 2009, Hollywood, CA, USA. New York: SMPTE, 2009: 234-242.
- [20] Vermandel M, van den Wouwer D, Coosemans T, et al. A novel 0.82" QXGA analog LCOS micro display for professional applications[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2007, 38(1): 105-108.
- [21] Shimizu S, Ochi Y, Nakano A, et al. Fully digital D-ILA™ device for consumer applications[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2004, 35(1): 72-75.
- [22] Fan-Chiang K H, Yen C C, Wu C H, et al. LCOS panel using novel color sequential technology[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2007, 38(1): 150-153.
- [23] Lee J H, Kim E, Lee S, et al. A high definition LCOS backplane with HV CMOS switches and dual storages pixel array[C]//2015 International SoC Design Conference (ISODC), November 2-5, 2015, Gyeongju, Korea (South). New York: IEEE Press, 2015: 179-180.
- [24] Abeeluck A K, Iverson A, Goetz H, et al. High-performance displays for wearable and HUD applications[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 49(1): 768-771.
- [25] 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.
- [26] Kanazawa M, Kusakabe Y. Ultrahigh-definition LCOS projectors[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(1): 89-98.
- [27] Asaki R, Yokoyama S, Kitagawa H, et al. High-resolution OLED microdisplay for wearable displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2014, 45(1): 219-222.
- [28] Lu P C, Huang G D, Yang S J, et al. Highest PPI micro-OLED display sustain for near-eye application[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 725-726.
- [29] Vogel U, Wartenberg P, Richter B, et al. OLED-on-silicon microdisplays: technology, devices, applications [C]//2018 48th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC), September 3-6, 2018, Dresden, Germany. New York: IEEE Press, 2018: 90-93.
- [30] Ghosh A, Khayrullin I, Wang Q, et al. OLED microdisplays for VR/AR applications[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(S1): 26-27.
- [31] Kim C, Jung J H, Sung D Y, et al. Development of 3, 000 ppi RGB direct patterning OLED micro-display [J]. Proceedings of the International Display Workshops, 2021, 28: 209-212.
- [32] 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.
- [33] Fung M K, Li Y Q, Liao L S. Tandem organic light-emitting diodes[J]. Advanced Materials, 2016, 28(47): 10381-10408.
- [34] Hamer J, Kondakova M, Spindler J, et al. High-performance OLED microdisplays made with multi-stack OLED formulations on CMOS backplanes[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11473: 114730F.
- [35] Chiba T, Pu Y J, Miyazaki R, et al. Ultra-high efficiency by multiple emission from stacked organic light-emitting devices[J]. Organic Electronics, 2011, 12(4): 710-715.
- [36] Ghosh A P, Ali T A, Khayrullin I, et al. Recent advances in small molecule OLED-on-silicon microdisplays [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7415: 74150Q.
- [37] 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.
- [38] Vogel U, Richter B, Wartenberg P, et al. OLED microdisplays in near-to-eye applications: challenges and solutions[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10335: 103350.
- [39] Prache O. Full color SVGA+ OLED on silicon microdisplay[J]. Journal of the Society for Information Display, 2002, 10(2): 133-138.
- [40] Kimura K, Onoyama Y, Tanaka T, et al. New pixel driving circuit using self-discharging compensation method for high-resolution OLED microdisplays on a silicon backplane[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 398-402.
- [41] Wacyk I, Ghosh A, Prache O, et al. Ultra-high resolution and high-brightness AMOLED[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8383: 83830Q.
- [42] Usui T, Nakajima Y, Shiga T. A digital driving method using pulse-density modulation with a random dither matrix for higher motion image quality[J]. Journal of the Society for Information Display, 2022, 30(3): 198-208.
- [43] Kimura M, Nishinohara D, Nishiyori T, et al. Pulse-width modulation with current uniformization for AMOLED micro-displays on Si LSI chips[J]. Journal of the Society for Information Display, 2019, 27(7): 402-408.
- [44] Onoyama Y, Yamashita J, Kitagawa H, et al. 0.5-inch XGA micro-OLED display on a silicon backplane with high-definition technologies[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2012, 43(1): 950-953.
- [45] 冉峰, 储楚, 季渊, 等. 针对 OLED 衰退补偿的电流 PWM 像素驱动电路研究[J]. 液晶与显示, 2013, 28(4): 534-538.
- Ran F, Chu C, Ji Y, et al. Current PWM pixel driving circuit for OLED recession compensation[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2013, 28(4): 534-538.
- [46] Wartenberg P, Richter B, Brenner S, et al. A new 0.64" 720 p OLED microdisplay for application in industrial see-through AR HMD[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 717-720.
- [47] Vogel U, Beyer B, Schober M, et al. Ultra-low power OLED microdisplay for extended battery life in NTE displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 1125-1128.
- [48] 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.
- [49] Chen Z, Yan S K, Danesh C. MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(12): 123001.
- [50] Tsuchiyama K, Yamane K, Utsunomiya S, et al. Monolithic integration of Si-MOSFET and GaN-LED using Si/SiO₂/GaN-LED wafer[J]. Applied Physics Express, 2016, 9(10): 104101.
- [51] Kawanishi H, Onuma H, Maegawa M, et al. High-resolution and high-brightness full-colour "Silicon Display" for augmented and mixed reality[J]. Journal of the Society for Information Display, 2021, 29(1): 57-67.
- [52] Chen C J, Chen H C, Liao J H, et al. Fabrication and characterization of active-matrix 960×540 blue GaN-based micro-LED display[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019, 55(2): 3300106.
- [53] Wu Y, Ma J, Su P, et al. Full-color realization of micro-LED displays[J]. Nanomaterials, 2020, 10(12): E2482.
- [54] Yadavalli K, Chuang C L, El-Ghoroury H S. Monolithic and heterogeneous integration of RGB micro-LED arrays with pixel-level optics array and CMOS image processor to

- enable small form-factor display applications[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11310: 113100Z.
- [55] Templier F. High-resolution GaN microdisplays and solution for full-color devices for AR/MR applications[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2021, 52 (S1): 305-307.
- [56] 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]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 49(1): 786-789.
- [57] Liang K L, Kuo W H, Shen H T, et al. Advances in color-converted micro-LED arrays[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2021, 60(SA): SA0802.
- [58] Onuma H, Maegawa M, Kurisu T, et al. 1,053 ppi full-color “Silicon display” based on Micro-LED technology [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 353-355.
- [59] Templier F, Benaïssa L, Aventurier B, et al. A novel process for fabricating high-resolution and very small pixel-pitch GaN LED microdisplays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 268-271.
- [60] Lee V W, Twu N, Kymissis I. Micro-LED technologies and applications[J]. Information Display, 2016, 32(6): 16-23.
- [61] Steudel S, Vertommen J, Le Boulbar E, et al. MicroLED display integration on 300 mm advanced CMOS platform[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2022, 53(1): 748-751.
- [62] Li X B, Wu L, Liu Z J, et al. Design and characterization of active matrix LED microdisplays with embedded visible light communication transmitter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(14): 3449-3457.
- [63] Dupré, L, Marra M, Verney V, et al. Processing and characterization of high resolution GaN/InGaN LED arrays at 10 micron pitch for micro display applications[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10104: 1010422.
- [64] 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.
- [65] Huang Y G, Hsiang E L, Deng M Y, et al. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 105.
- [66] Park J, Baek W, Geum D M, et al. Understanding the sidewall passivation effects in AlGaInP/GaInP micro-LED[J]. Nanoscale Research Letters, 2022, 17(1): 29.
- [67] Gandrothula S, Kamikawa T, Shapturenka P, et al. Optical and electrical characterizations of micro-LEDs grown on lower defect density epitaxial layers[J]. Applied Physics Letters, 2021, 119(14): 142103.
- [68] Seong J, Jang J, Lee J, et al. CMOS backplane pixel circuit with leakage and voltage drop compensation for an micro-LED display achieving 5000 PPI or higher[J]. IEEE Access, 2020, 8: 49467-49476.
- [69] Templier F. GaN-based emissive microdisplays: a very promising technology for compact, ultra-high brightness display systems[J]. Journal of the Society for Information Display, 2016, 24(11): 669-675.
- [70] Hornbeck L J. Digital Light Processing for high-brightness high-resolution applications[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3013: 27-40.
- [71] Hornbeck L. Digital light processing: a new MEMS-based display technology (keynote address) [C]// Technical Digest of the IEEJ 14th Sensor Symposium, June 4-5, 1996, Kawasaki, Japan. [S.l.: s.n.], 1996: 297-304.
- [72] Templier F. OLED Microdisplays: Technology and Applications [M]. Weinheim: Wiley-ISTE, 2014.
- [73] Fidler F, Balbekova A, Noui L, et al. Laser beam scanning in XR: benefits and challenges[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11765: 1176502.
- [74] Amor G, Roth E, Sharon D, et al. Multiple MEMS mirrors synchronization techniques, modeling, and applications[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11697: 116970C.
- [75] Hofmann U, Janes J, Quenzer H J. High-Q MEMS resonators for laser beam scanning displays[J]. Micromachines, 2012, 3(2): 509-528.
- [76] Akutsu K, Seino S, Ogawa Y, et al. A compact retinal scan near-eye display[C]//ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies, July 28-August 1, 2019, Los Angeles, CA, USA. New York: ACM Press, 2019.
- [77] Boni N, Carminati R, Mendicino G, et al. Quasi-static PZT actuated MEMS mirror with $4 \times 3 \text{ mm}^2$ reflective area and high robustness[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11697: 1169708.
- [78] Rajagopalan B. STMicroelectronics: laser beam scanning: the ideal solution for AR wearable applications[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11764: 1176416.
- [79] Rajagopalan B. Laser Beam Scanning (LBS) technologies to solve AR challenges[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 11932: 1193203.
- [80] Reitterer J, Chen Z, Balbekova A, et al. Ultra-compact micro-electro-mechanical laser beam scanner for augmented reality applications[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11765: 1176504.
- [81] Petrak O, Schwarz F, Pohl L, et al. Laser beam scanning based AR-display applying resonant 2D MEMS mirrors[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11765: 1176503.
- [82] 代永平, 耿卫东, 孙钟林. 硅基液晶显示器(LCoS)核心: 显示系统芯片的设计分析[J]. 光电子技术, 2001, 21(2): 79-88.
- Dai Y P, Geng W D, Sun Z L. The core of the LCoS: design analysis for display SOC[J]. Optoelectronic Technology, 2001, 21(2): 79-88.
- [83] 黄苒, 王文博, 王晓慧, 等. QVGA 硅基液晶微显示[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 131-134.
- Huang R, Wang W B, Wang X H, et al. QVGA liquid crystal on silicon microdisplay[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(1): 131-134.
- [84] 杨建兵, 秦昌兵, 张白雪, 等. 大尺寸高分辨率硅基 OLED 微显示技术研究[J]. 光电子技术, 2019, 39(3): 181-185.

- Yang J B, Qin C B, Zhang B X, et al. Organic light emitting diodes on silicon micro-display with high resolution and large size[J]. *Optoelectronic Technology*, 2019, 39(3): 181-185.
- [85] 宋德宇, 方颖璐, 王璐, 等. 微缩化 LED 显示技术的发展及应用[J]. *光电子技术*, 2022, 42(1): 64-71.
- Song D Y, Fang Y L, Wang L, et al. Development and application of micromation LED display technologies[J]. *Optoelectronic Technology*, 2022, 42(1): 64-71.
- [86] 严子雯, 严群, 李典伦, 等. 高度集成的 μ LED 显示技术研究进展[J]. *发光学报*, 2020, 41(10): 1309-1317.
- Yan Z W, Yan Q, Li D L, et al. Research progress of high integration density μ LED display technology[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(10): 1309-1317.
- [87] Chen Y X, Xia J. A high contrast digital driving 0.39 inch LCoS panel optimized for waveguide AR glass [J]. *Proceedings of the International Display Workshops*, 2020, 27: 727.
- [88] 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.
- [89] Seong J, Jang J, Lee J, et al. Multi-bit MIP(Memory-in-Pixel)-based pixel circuit of CMOS backplane for micro-LED display[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2020, 51(1): 359-362.