

文章编号:1007-2780(2022)06-0661-19

Micro-LED 应用于近眼显示的现状与趋势

周自平¹, 黎 焱¹, 严银菓¹, 江昊男¹, 陈恩果^{1,2*}, 徐 胜^{1,2},
叶 芸^{1,2}, 孙 捷^{1,2}, 严 群^{1,2}, 郭太良^{1,2}

(1. 福州大学 物理与信息工程学院 平板显示技术国家地方联合工程实验室, 福建 福州 350108;
2. 中国福建光电信息科学与技术创新实验室(闽都创新实验室), 福建 福州 350108)

摘要:作为目前信息显示技术领域的热点,近眼显示设备的发展承载着人们对未来信息交互方式的美好愿景,同时,人们对于增强现实显示的需求也在不断提升,近眼显示中的 AR 显示无疑成为近年来研究的热点。伴随着显示技术的不断发展,高度微型化和集成化成为近眼显示中重要的发展趋势,微发光二极管(Micro Light-Emitting Diode, Micro-LED)显示技术在亮度、分辨率、对比度、能耗、使用寿命、响应速度和稳定性等方面相比于其他技术均有巨大的优势,是近眼显示设备较为理想的光源和图像显示源。本文从结构、制备工艺及挑战方面分析了 Micro-LED 显示技术的研究进展,从人眼的视觉特性出发综述了近眼显示的发展现状,总结了 Micro-LED 应用于近眼显示的优势,对比了各项技术的先进性和可实现性,最后对其发展进行了展望。

关键词:近眼显示;微型发光二极管;微显示;增强现实

中图分类号:TN27;TN761 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0068

Current situation and trend of Micro-LED application in near-eye display

ZHOU Zi-ping¹, LI Yao¹, YAN Yin-guo¹, JIANG Hao-nan¹, CHEN En-guo^{1,2*}, XU Sheng^{1,2},
YE Yun^{1,2}, SUN Jie^{1,2}, YAN Qun^{1,2}, GUO Tai-liang^{1,2}

(1. *National & Local United Engineering Laboratory of Flat Panel Display Technology, College of
Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;*
2. *Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China
(Mindu Innovation Laboratory), Fuzhou 350108, China*)

Abstract: As a hot issues in the field of information display technology, the current development of near-eye display equipment bears people's good vision for future information interaction. Meanwhile, people's

收稿日期:2022-03-02;**修订日期:**2022-04-25.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62175032);福建省自然科学基金(No. 2021J01579);福建省科技重大专项(No. 2021HZ021001);闽都创新实验室自主部署项目(No. 2020ZZ111)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62175032); Fujian Provincial Natural Science Foundation Project (No. 2021J01579); Fujian Provincial Key Science and Technology Project (No. 2021HZ021001); Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China (No. 2020ZZ111)

*通信联系人, E-mail: ceg@fzu.edu.cn

demand for augmented reality display is also constantly improving, and augmented reality display in near-eye display has undoubtedly become a research hotspot in recent years. And with the continuous development of display technology, highly miniaturization and integration have become an important development trend in near-eye display. Micro Light-Emitting Diode (Micro-LED) display technology has great advantages over other technologies in brightness, resolution, contrast, energy consumption, service life, response speed, and stability, which is considered as an ideal light source in near-eye display equipment. This paper analyzes the research progress of Micro-LED from the aspects of structure, fabrication process, and challenges. The development of near-eye display is reviewed based on the visual characteristics of human eyes. Then, the advantages of Micro-LED in near-eye display are summarized, and the advancement and realizability of various technologies are illustrated. Finally, the future development of Micro-LED is prospected.

Key words: near-eye display; Micro-LED; micro display; augmented reality

1 引言

近年来,显示器件作为最关键的信息获取媒介,在第三次革命之后得到了迅速的发展,从笨重的阴极射线管发展到现在紧凑的平板显示技术,例如液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)、有机发光二极管(Organic Light Emitting Diode, OLED)、量子点发光二极管(Quantum Dot Light Emitting Diodes, QLED)、微发光二极管(Micro-LED)等。随着显示技术与通信技术的飞速发展,对高质量的视频和图片的要求越来越高,因此对于沉浸式的视觉体验的需要也逐步提升。

头戴式显示器(Head Mounted Displays, HMDs)也称为近眼显示器,是实现沉浸式增强现实(Augmented Reality, AR)、虚拟现实(Virtual Reality, VR)的重要设备。早在 20 世纪 50 年代,AR 和 VR 就已经应用在国防领域^[1],而随着 2021 年“元宇宙”概念的提出,近眼显示设备被认为是元宇宙的门户而成为了研究热点。

近眼显示系统中可作为光学引擎的微显示屏有硅基液晶(Liquid-Crystal-on-Silicon, LCoS)显示器、数字光处理(Digital Light Processor, DLP)显示器、Micro-OLED、Micro-LED 等。Micro-LED 技术由 S. X. Jin 等人于 2000 年首次提出^[2],此后世界上各大公司和研究院所对 Micro-LED 显示展开了大量的研究。对比于传统显示技术, Micro-LED 拥有出色的亮度、高发光效率、低能耗、高反应速度、高对比度、超高解析度与色彩饱和

度等,被认为是理想的显示技术。Micro-LED 具有 LED 所拥有的大部分优点,还具有体积小、易拆解、灵活度高的特征,可以覆盖绝大多数的显示应用场景^[3]。在 2021 年 CES 展会上三星 The Wall 系列产品再次升级,其拥有大约 2 400 万个可单独、主动式发光 Micro-LED 光源,BOE 也展示了采用玻璃基板主动驱动方式的 Micro-LED 显示产品,无不凸显着 Micro-LED 显示产业的关注度。

相对于大面积 Micro-LED 显示产品,近眼显示中 Micro-LED 的应用也已经开始出现原型产品,并且在 AR 显示中崭露头角。Vuzix 公司发布了以 Micro-LED 为光学引擎的 AR 眼镜,所采用的是光波导加 Micro-LED 光源的形式,其外观更接近于传统的普通眼镜。光波导是极佳的近眼 3D 显示载体,可通过光学元件形成双目视差来实现近眼的 3D 显示。2021 年,Snapchat 的母公司 Snap 推出了 AR 智能眼镜,可以将 3D 效果映射到佩戴者的周围环境。同年雷鸟创新、小米科技、OPPO 等科技公司均发布了自己的 AR 智能眼镜,其方案都是 Micro-LED 与衍射光波导结合来实现 AR 显示。

在 Micro-LED 和近眼显示技术迅猛发展的背景下,本文旨在梳理 Micro-LED 的研究进展,并总结其在近眼 AR 显示中的发展现状,对比分析 Micro-LED 应用于近眼显示的优劣势,最后,对 Micro-LED 应用于近眼显示的未来发展进行展望。

2 Micro-LED 研究进展

2.1 Micro-LED 技术的发展

Micro-LED 技术源于美国贝尔实验室微盘激光器技术^[4],2000 年 Jin 等^[2]人首次制备了 III 族氮化物的 Micro-LED;2004 年 Jeon 等^[5]人则提出了 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 64×64 阵列的紫外 Micro-LED;2009 年刘召军等^[6]人报道了使用倒扣焊集成技术制备了 8×8 的 Micro-LED 的有源驱动阵列,并且在 2011 年使用了三色荧光粉实现了 Micro-LED 的全彩化显示^[7]。在显示应用方面,索尼公司于 2012 年首次推出了 139.7 cm (55 in) 的 Micro-LED 显示屏;2015 年 Han 等^[8]人报道了采用 UV 光激发量子点实现全彩化的 Micro-LED;2020 年 Kim 等人^[9]提出了一种有效的技术,通过传统的光刻技术,使用光固化丙烯酸和纳米有机变色材料的混合物,在蓝色 Micro-LED 上沉积颜色转换层。同年 Liang 等^[10]人综述了全彩化的 Micro-LED 研究进展,并且采用量子点

色转换层制备了高色域的全彩化 Micro-LED。2022 年南方科技大学与香港科技大学及中国科学院苏州纳米所组成的团队制备了不同规格的深紫外 Micro-LED 器件,其中 $10\text{ }\mu\text{m}\times 10\text{ }\mu\text{m}$ 的深紫外 Micro-LED 在连续波发光情况下,最高亮度达到了 $185\text{ W}/\text{cm}^2$,最高的外量子效率达到了 3.43% ^[11]。

通过 Google 学术的搜索分析, Micro-LED 相关文章的搜索数量从 2000 年开始逐渐增长。从 2006 年开始,该领域更是呈指数级增长,2021 年共计出版文章 7 000 多篇。目前,几乎所有科技企业都将 Micro-LED 技术视为下一代的显示技术。图 1 为近几年 Micro-LED 的关键性研究进展节点。虽然 Micro-LED 在显示方面有着显著的优势,但随着 Micro-LED 芯片尺寸的减小, Micro-LED 的制备在外延生长、全彩化、巨量转移、检测技术等方面仍然存在着一些瓶颈。并且 Micro-LED 的良率问题、发光效率、波长一致性还没有达到全彩化显示的要求^[12]。

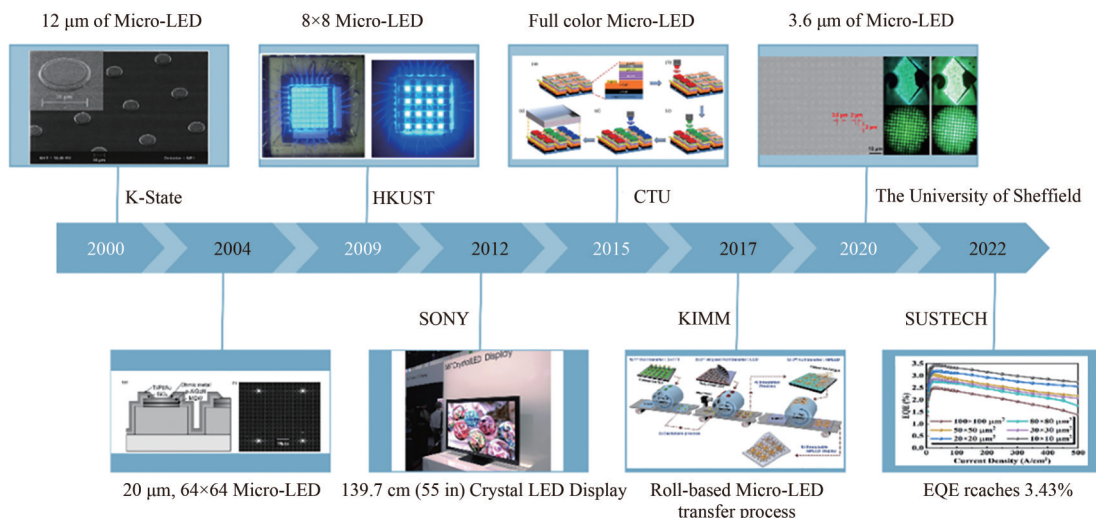


图1 Micro-LED 发展历程图

Fig. 1 Development history of Micro-LED

2.2 Micro-LED 的结构与工艺

Micro-LED 的制备工艺与传统的 LED 制备工艺有一定的相关性^[13-14]。Micro-LED 的衬底可以是硅(Si)衬底、碳化硅(SiC)衬底、蓝宝石衬底等,以基于蓝宝石衬底生长的 GaN 基顶发射的 Micro-LED 为例,图 2(a)展示了一种制备单个 Micro-LED 的方法^[15-17]。首先,通过金属有机

化学气相沉积(Metal-Organic Chemical Vapour Deposition, MOCVD)在蓝宝石衬底上进行了 Micro-LED 的外延生长。该外延结构包括非故意掺杂的 GaN 缓冲层、n-GaN 层、InGa_{0.25}N/GaN 多量子阱(Multiple Quantum Well, MQW)区和 p-GaN 层,之后通过电子束蒸发或磁控溅射在 p-GaN 层表面制备出铟锡氧化物(Indium Tin

Oxide, ITO) 薄膜, ITO 起着电流扩散层的作用, 具有低电阻率和高透光率的特点。其次, 通过电感耦合等离子体 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 刻蚀外延晶片, 并对其进行热退火, 形成 p-GaN 的 p 型欧姆接触。通过等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 沉积 SiO_2 钝化层以分离 p 型电极和 n 型电极。最后, 通过溅射在 n-GaN 层的表面上沉积 Ti/Au 层作为 n-pad。与制备 n 型电极类似, Ti/Au 沉积在 ITO 层上以形成

p-pad。

Micro-LED 阵列可通过不同的制备方法获得, 根据寻址方式可分为被动寻址和主动寻址。图 2(b) 给出了一个典型的无源寻址 Micro-LED 阵列的示意图。每个像素分别连接 p 型金属线和 n 型金属线, 由扫描行电极和柱电极驱动^[18]。此外, 简单的有源寻址 Micro-LED 阵列的原理图如图 2(c) 所示。每个 Micro-LED 都有一个公共的 n 触点和一个独立的 p 触点用于单独寻址^[19]。

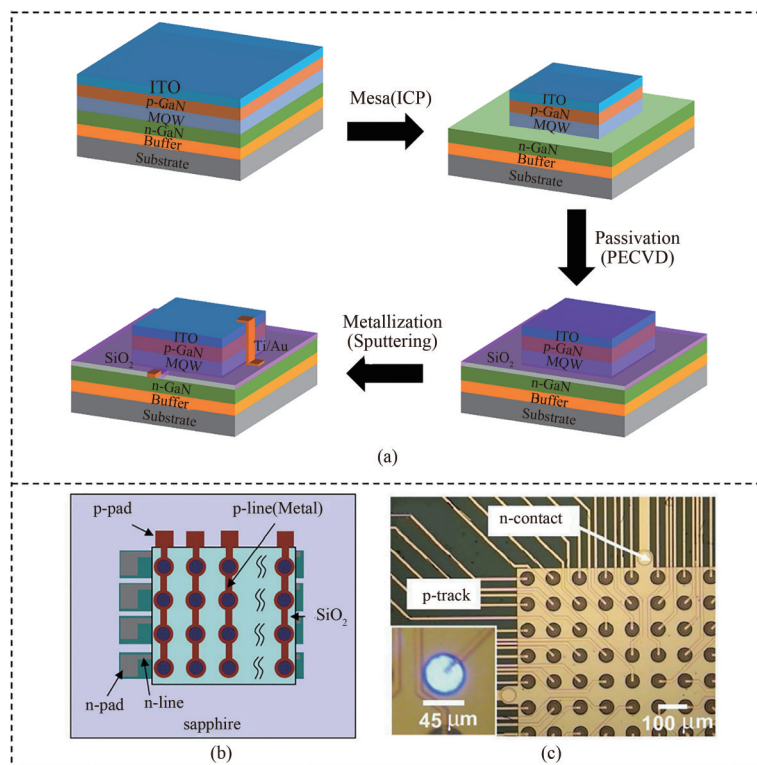


图 2 (a) 单氮化镓基顶发射 Micro-LED 的工艺示意图; (b) 无源寻址微型 LED 阵列示意图; (c) 有源寻址 Micro-LED 阵列示意图。

Fig. 2 (a) Schematic illustration of the process of a single GaN-based top-emission Micro-LED; (b) Schematic illustration of the passive addressing Micro-LED array; (c) Schematic illustration of the active addressing Micro-LED array.

2.3 Micro-LED 面临的挑战

2.3.1 显示屏的制备

Micro-LED 显示屏的制备是实现近眼显示设备的基础, 其制备工艺首先要将大量 Micro-LED 晶粒组装成 Micro-LED 阵列, 然后将这些单元阵列转移到接收基板上, 再通过单片异质技术集成到光电系统中^[20]。根据屏幕尺寸的不同, Micro-LED 可以单独、分组或作为整个阵列进行组装和转移^[21]。基于大尺寸屏幕组装的巨量转

移技术是将衬底上的 Micro-LED 磊晶单独或分组地拾取并转移到带有驱动电路的基板上。用作近眼显示设备的 Micro-LED 屏幕尺寸较小且应具备较高的像素密度, 通常选择适合小型显示的单片集成技术来制造此类小间距 Micro-LED 显示屏, 如图 3 所示, 直接将数十万个 Micro-LED 的完整单片阵列与背板混合集成来实现^[22]。

单片集成技术的原理是将衬底上小间距磊晶与兼容该间距的有源矩阵驱动电路通过焊接

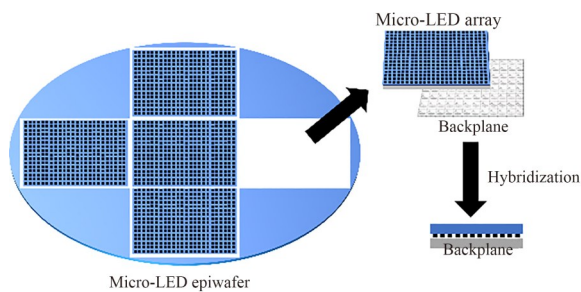


图3 单片集成制造流程图

Fig. 3 Monolithic integration manufacture

集成在一起^[21]。在这个过程中需要将每个单独的LED磊晶焊接到有源矩阵的相应焊盘上,对齐和键合是这两个独立元件集成的重要因素。目前已有的单片集成技术包括金属布线、微管粘接和粘合剂粘接等^[23]。金属布线是比较常规的集成技术,主要采用共晶的方式对倒装芯片进行焊接^[24],该技术的关键是共晶材料的选择和焊接温度的控制,但键合时较高的温度可能会对Micro-LED芯片造成损伤,且工艺成本较高。Jiang^[25]等人使用共晶技术将倒装芯片键合到15 μm 以下间距的驱动上进行显示应用。倒装芯片可靠的集成性对于提高成品良率是有利的,但与10 μm 及以下间距的电路不兼容限制了其发展,在接线与倒装芯片键合时需要加热,衬底的热膨胀系数不同可导致热失配造成器件损坏。微管粘接是由Leti

公司提出技术方案^[26],适用于10 μm 左右间距的器件进行焊接,微管可以生长在Micro-LED上作为焊接的媒介,也可以生长在背板上减少背板的制作难度。针对近眼显示对高亮度、高像素密度微显示器件的需求^[27],Templier等人于2016年实现了使用微管粘接技术集成像素间距为10 μm 的Micro-LED器件^[28],并进一步在2017年成功将像素间距缩小为3 μm ^[29]。近年来,Micro-LED器件的像素间距朝着更小的趋势发展,并且出现了发光像素在1 μm 以内的LED器件,即Nano-LED,这为高像素密度的近眼显示提供了技术储备^[30-32]。粘合剂粘接技术是使用各向异性导电膜(ACF)通过热压工艺进行集成^[33]。ACF可以在Micro-LED和底部电极之间产生牢固的附着力和相互连接,但由于ACF自身结构的限制,无法满足小尺寸的Micro-LED键合需求,呈现出一定的局限性。尽管Micro-LED在微显示的集成技术已经取得了重大进展,但是集成技术的可扩展性仍然是其商业化道路上的挑战。图4(a)所示为利用铜凸点将硅CMOS IC与Micro-LED阵列进行倒装键合的横截面示意图,图4(b)展示了胶粘剂键合技术,图4(c)为显示微管键合流程图^[34-35]。

Micro-LED的转移技术也是显示屏幕制备的关键,巨量转移技术已经取得一些研究进展,

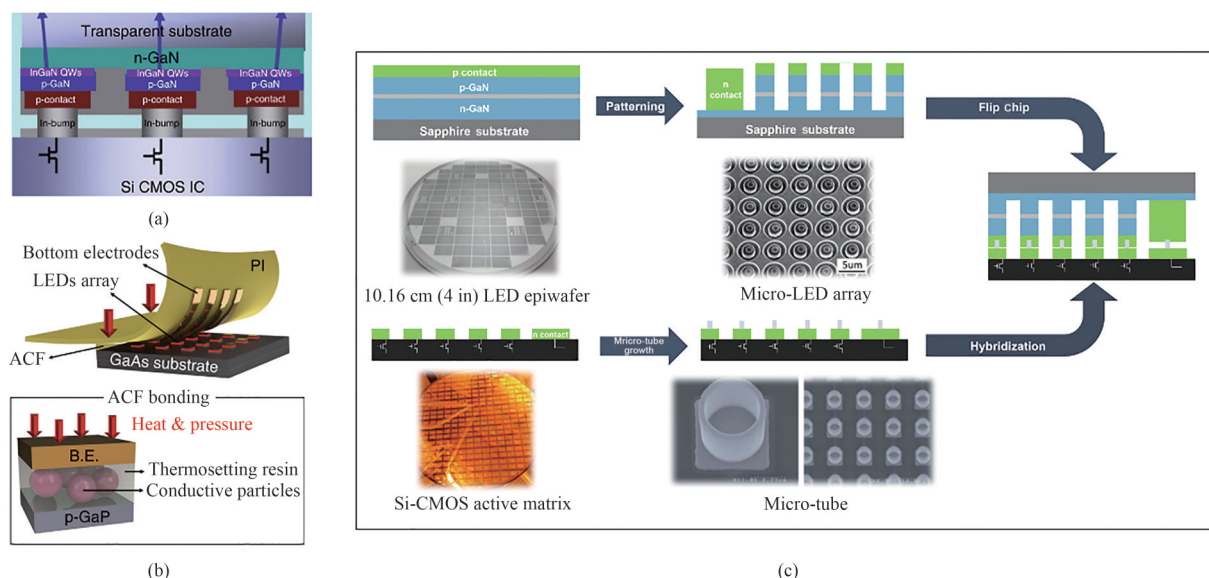


图4 (a)利用铜凸点将硅CMOS IC与Micro-LED阵列进行倒装键合的横截面示意图;(b)胶粘剂键合;(c)显示微管键合。
Fig. 4 (a) Cross-sectional schematic of flip-flop bonding of a Si CMOS IC to a Micro-LED array using indium bumps; (b) Adhesive bonding; (c) Display micro-tube bonding.

包括抓取释放法、自组装法、激光转移法等^[36-37]。对于小尺寸 Micro-LED 显示,需要将组装好的显示阵列的蓝宝石衬底进行剥离转移,目前大多采用激光技术对衬底进行剥离。Optovate 公司提出一种图案化激光剥离技术^[38],如图 5 所示,使用激光束照射在蓝宝石晶圆的生长界面处,导致界面处发生光与物质相互作用,氮化镓层被烧蚀分解成液态镓和氮气,从而释放芯片与衬底脱离,集成到目标基板上,实现精准的显示阵列。采用激光剥离的方式避免了对芯片的抓取,能有效提高转移的精度和效率,但这种方法缺点也很明显,在激光剥离过程中可能会使 Micro-LED 芯片表面出现凹陷和裂纹等损伤,影响工艺良率。现有的转移技术要在保证成本效益的条件下实现高精度、高良率的转移还比较困难,是制约 Micro-LED 商业化进程的瓶颈技术。

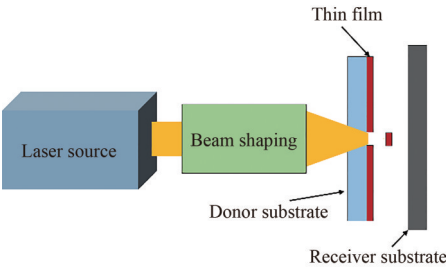


图 5 激光剥离转移过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser-induced forward transfer

2. 3. 2 全彩化

近眼显示设备需要 Micro-LED 提供高分辨率、高像素密度图像的同时,还需要全彩化的视觉效果来满足沉浸性的体验。Micro-LED 阵列实现单色显示是通过倒装结构封装和驱动基板贴合实现,但要实现全彩显示就相对复杂,大尺寸的屏幕可以分 3 次巨量转移 RGB 三色 Micro-LED 晶粒来实现全彩显示^[39],而小尺寸屏幕也可以采用 UV/蓝光 LED 加上发光介质的方法实现色彩转换^[40]。该方法通过紫外或蓝色等短波长的 LED 发光激发量子点或荧光粉材料的方式,可以在单一的 InGa₂N/GaN 材料上实现 RGB 发光,从而实现色彩转换。发光材料的涂覆一般在 Micro-LED 阵列与驱动电路集成之后。

目前使用的发光介质一般分为荧光粉和量子点,由于荧光粉粒径较大,限制了其在小尺寸

Micro-LED 上的应用。量子点是一种纳米材料^[40],在蓝光/UV 照射下会进行光致发光,且发光颜色与粒径的大小有关。与普通的 InGa₂N 蓝光激发荧光粉合成白光的 LED 不同,量子点被激发后易于调控出射光的发射波长,可以提供所需的色彩输出。使用该方法获得全彩显示的主要挑战是如何将发光介质精确地放置到子像素上,目前常采用旋转涂布、雾状喷涂技术来开发量子点技术,即使用喷墨打印技术喷涂出均匀且尺寸可控的量子点,装置与原理示意图如图 6 所示。将其涂覆在 UV/蓝光 LED 上,其受激发出 RGB 三色光,再通过色彩配比实现全彩色化^[41]。由于量子点具有较窄的半峰宽和较宽的吸收光谱,并且很高的发光效率,应用在 Micro-LED 显示上会得到色彩纯度与饱和度较高的画面,因此小尺寸的 Micro-LED 通过量子点技术进行色彩转换是一种可行的方案^[42-45]。

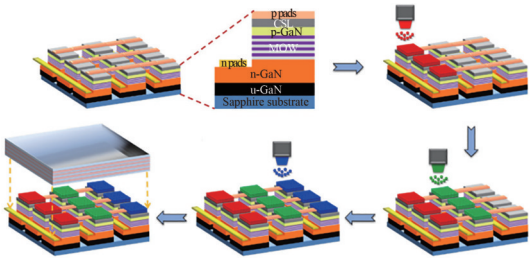


图 6 基于量子点的 Micro-LED 显示全色发光的工艺流程

Fig. 6 Micro-LED display panchromatic luminescence based on quantum dots

目前,量子点技术存在着材料稳定性差、散热要求高、寿命短且需要密封、颜色均匀性不佳、重吸收等问题^[46],限制了其应用于 Micro-LED 色彩转换,是目前 Micro-LED 应用在近眼显示设备进程中面临的巨大挑战。

除了制备工艺与全彩化的挑战, Micro-LED 应用于近眼显示还需要关注其芯片发光效率随着尺寸减小而急速下降的问题,以及潜在的环境光干扰与色差等问题^[47-49],并且其现阶段的制造良率和所带来的高成本问题也有待解决。

3 近眼显示的发展现状

3.1 人眼的视觉特性

舒适性和沉浸性是近眼显示设备的评价指

标,舒适性可以从穿戴舒适度上体现,比如近眼显示器的重量、散热、尺寸等方面都能影响穿戴的舒适度。视觉舒适度也是评价近眼显示器舒适感的一部分,在大视场、高分辨率和自然的画面情况下能有效提高视觉的舒适度,近眼显示设备的沉浸性可使使用者身临其境。为了应对舒适性和沉浸性的挑战,需要对人类的视觉特性与局限性有深入的了解,围绕以人类视觉系统为核心的光学设计过程则显得尤为重要。

人眼是一个优秀的高动态感光系统,能实时处理5个数量级以上的照度,并且具有长时间适应能力,最多可以感受到 $10^{-3} \sim 10^4$ lx的宽域照度^[50]。因此为了再现真实的场景,近眼显示设备需要满足高动态范围(High Dynamic Range, HDR)^[51]。为了实现HDR,显示器需要有高峰值的亮度($L_p > 1\,000$ cd/m²)和较暗的状态($L_p < 0.01$ cd/m²),因此对比度是一个非常关键的参数^[52]。VR眼镜要求没有环境光的干扰,且抑制VR设备内部的杂散光,使得对比度达到1 000:1以上。但是对于AR系统来说,要考虑环境光的影响,在室外环境光比较强的情况下,则需要AR系统能够提高更高的亮度。

3D显示技术利用了人眼存在的双目视差,由于两个瞳孔存在着距离,使得左右视网膜上所成的像稍有差异,经过大脑的处理,可以感受到立体的图像^[53-55]。3D显示技术可以通过控制显示设备使不同视角的图像进入两眼,获得深度信息。然而大多数的VR系统通过平板显示的方式生成图像信息,这将产生辐辏调节冲突(Vergence-

Acommodation Conflict, VAC),如图7所示。VAC指人眼在观察3D显示屏时,单眼所获得的焦点距离与双眼会聚过程所产生的距离不相同,从而导致感知上的混乱与视觉上的疲劳和不适应^[56]。

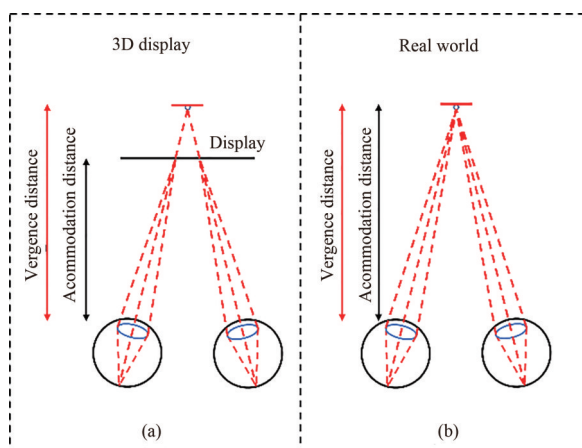


图7 (a)辐辏调节冲突原理图;(b)正常情况下的会聚距离与焦点距离示意图。

Fig. 7 (a) Vergence-accommodation conflict schematic; (b) Schematic diagram of vergence distance and accommodation under normal conditions.

如图8所示,人眼的单眼视场(Field of View, FOV)大约为水平 160° 和垂直 130° ,两眼相结合的水平视场角大约有 200° ,水平相重叠的区域大约有 120° ^[57]。对于AR系统来说,现有的AR显示器的视场大小尚不能满足人眼视觉系统的需求,换句话说小视场的近眼显示器对沉浸感的影响很大,其所面临的主要问题还是如何扩大视

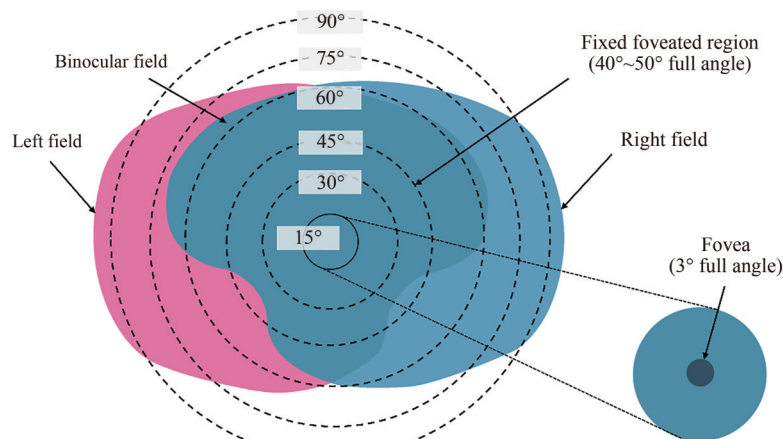


图8 人眼的视场范围

Fig. 8 Field of view of the human eye

场。但是对于VR近眼显示器来说,目镜的 $f/\#$ 值决定了其孔径,而焦距的缩放则可以改变FOV。假定显示屏的总像素是固定的,则像素密度和视场之间将有一个权衡,更大的视场将导致像素密度下降,导致纱窗效应(Screen-door Effect)或者看到明显像素点边界,降低了沉浸式体验^[58]。全息光学元件(Holographic Optical Elements, HOEs)等新型的光学元件为该问题提供了可能的解决方案。例如,2018年Tan等人^[58]基于HOEs设计了一种高分辨率区域可移动的近眼显示器,其关键的Pancharatnam-Berry光学元件可追踪眼球并切换相应的显示区域,从而有效解决了纱窗效应^[59-66]。正常人眼视觉的分辨率能达到60 PPD,在这个分辨率下当需要 110° 的视场时,其显示器需要超过 $6K \times 6K$ 的像素^[67]。2022年福州大学团队利用有序分子自组装技术结合转移印刷技术制备了像素密度高达25 400 PPI的超高分辨率的QLED,为近眼显示提供了高密度显示屏的解决方案^[68]。由于人眼的高分辨率仅存在于中央凹区域,脱离这个区域视力急剧下降^[69]。因此只有在中央的区域才需要高分辨率,这就提出了中央凹显示(Foveated Display)技术的概念^[70]。在中央凹显示技术中,整个观察区域的显示分辨率是不同的,可以通过两个不同的面板相组合来实现,但是却增大了近眼显示设备的大小,而Micro-LED显示技术有高的分辨率和小体积,并且寿命长的优势,应用于近眼显示设备更有利于实现这种技术。

3.2 近眼显示的光学架构

随着智能手机的发展,形成了AR和VR的热潮,并且得益于芯片的发展,近眼显示的功能也越加完善和丰富,将AR/VR相结合,既可以在真实的世界叠加虚拟的信息,又可以完全地展示虚拟的画面,称为混合现实(Mixed Reality, MR),或称之为扩展现实(XR)^[71],图9展现了虚拟现实的图谱关系,从完全的现实到纯粹的虚拟^[72]。

与VR显示器不同的是,AR显示器由光学引擎与光学组合器组合而成,光学引擎作为显示图像的来源,而光学组合器将显示的图像传送到人眼,并传输环境光。FOV、动眼框(Eyebow)、传输效率及MTF等参数主要取决于光学组合

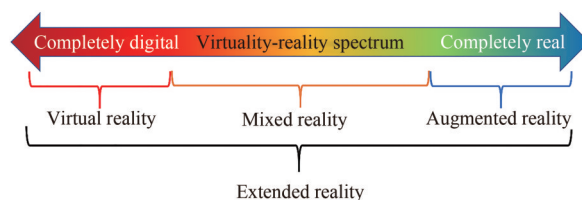


图9 虚拟现实图谱

Fig. 9 Reality-virtuality spectrum

器,图像亮度、整体效率和形状大小等属性受到了整体结构的影响。北京航空航天大学、天津大学、上海交通大学、中山大学、北京理工大学、浙江大学等国内高校均开展了这方面的研究^[73-80]。图10所示为几种AR显示设备的光学组合器。

在AR显示设备中,光学架构一般可分为自由曲面型(Freeform)和光波导型(Waveguide)。自由曲面AR显示具有较好的光效率和均匀性,但通常体积较大,在保证观看效果时,需要在FOV和Eyebow大小之间保持平衡。相反,光波导型的AR设备形状较小,可以通过出瞳扩展(Exit Pupil Expansion, EPE)过程放大系统的视野范围,对于光波导AR显示器通常使用立体显示器或变焦/多平面显示器来实现3D显示。光波导因其外观更接近于眼镜,相比于其他光学组合器兼顾了灵活性与性能,近几年受到了大量科研院校与机构的研究,并成为AR显示设备的主流光学元件。2021年,Darkhanbaatar等人^[81]通过使用光聚合物微反射镜阵列取代表面浮雕光栅(Surface Relief Gratings, SRGs)与体全息光栅(Volume Holographic Gratings, VHGs),利用全息微镜阵列作为耦入元件,从显示的元素图像集重建三维图像,并保留了现有全息波导型AR系统的主要优点,该系统结构如图11所示。基于集成成像生成的元素图像由微显示器显示,元素图像经过全息微镜阵列重构3D图像,重构后的3D图像的非相干光束在波导内经过反射后,到达耦出元件,最后反射至人眼。

当光在波导内传播时,波导的折射率决定全内反射(Total Internal Reflection, TIR)角,并且耦合元件会影响视场角与色彩均匀性。几何阵列波导由多个部分反射面组成,通过多层部分反射面将波导内部传输的光反射入人眼,每一层的部分反射面形成一个出瞳可以实现

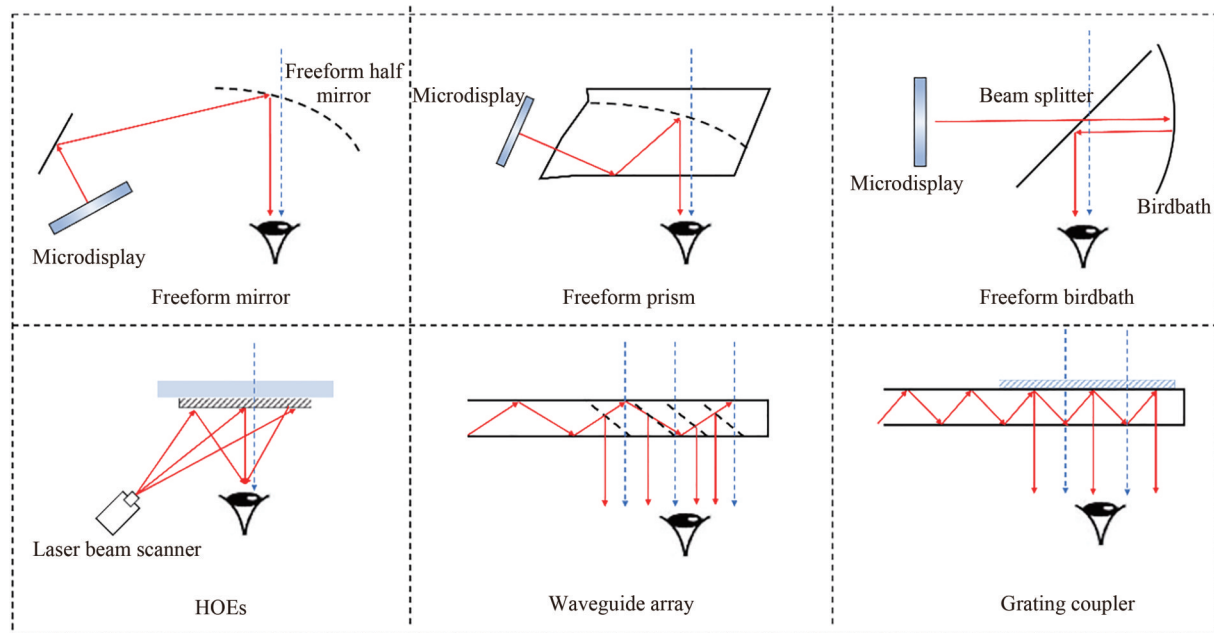


图10 不同类型的AR光学组合器

Fig. 10 Different types of AR optical combiners

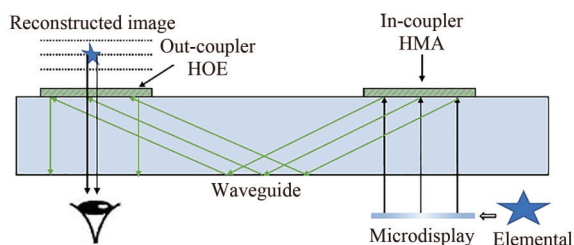


图11 3D透明AR显示系统原理图

Fig. 11 3D see-through AR display system

EPE,但几何阵列光波的TIR角限制了其FOV,且噪声问题难以改善,使得出光分布不均,并且制备工艺相对复杂,良品率较低。表面浮雕光栅波导利用SRGs作为耦合元件,将光耦入或耦出光波导。而不同波长的光线易被其他波长对应的光栅结构所衍射,形成串扰。可通过设计多层光栅结构来解决此问题,如微软Hololens 2使用了两层光栅结构实现全彩化。波导中最关键的部分是耦入/耦出光学元件,体全息光栅波导中的HOEs可在任意波前记录和重建中表现出独特的特性^[82-83],可作为光栅、扩散器、透镜被广泛应用于近眼显示系统,并且成为AR设备光波导耦合元件中的最佳候选者^[84-88]。3种近眼显示平面光波导的光学架构如图12所示,分别为几何阵列光波导、表面浮雕光栅波导及体全息光栅波导。

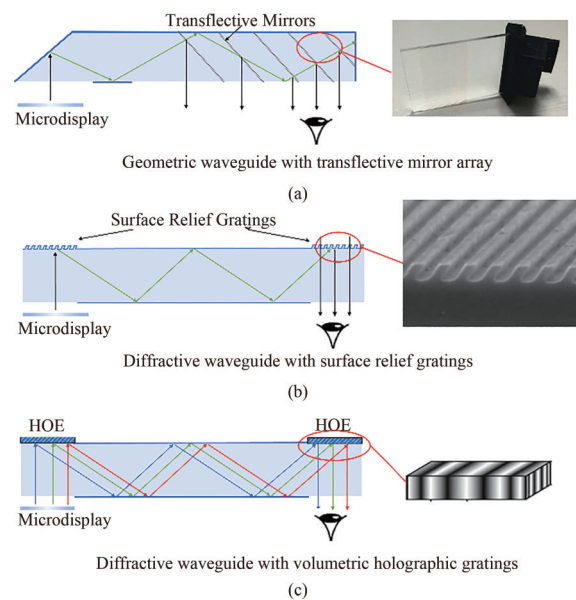


图12 (a)几何阵列光波导结构图;(b)表面浮雕光栅光波导结构图;(c)体全息光栅光波导结构图。

Fig. 12 Schematic of (a) the geometric waveguide with transfective mirror array, (b) the diffractive waveguide with surface relief gratings, (c) the diffractive waveguide with volumetric holographic gratings.

3.3 近眼3D显示

人们对于逼真视觉体验的需求推动了当前二维图像从平面屏幕向三维场景的转变。第一

个 3D 技术可追溯到 1838 年,由 Charles Wheatstone 提出,这项技术被称为立体视觉。最初双目深度感知是通过两片反射镜向观察者的左眼和右眼反射两个偏移图像来实现的。之后在 20 世纪初,通过利用视差屏障、集成摄影以及透镜的方式实现了可容纳更多深度信息的 3D 显示方法^[89-91]。1948 年,Dennis Gabor 发现了全息显示技术的原理^[92],这项技术最初被用于提高电子显微镜的分辨率。直到 1960 年,激光的发明标志着光学全息技术的开始。在过去的 30 年里,LCD、OLED、LCoS 等平板显示器的发展,加速了 3D 技术的发展,并逐渐将光学架构转变为可穿戴设备^[93-96]。

得益于 VR 技术的迅速发展,Oculus、Hua-wei VR Glass、Pico 等部分 VR 设备价格也比较低廉,但 AR 设备的生产成本却较高。目前大多数的 AR/VR 设备都是通过立体视觉来实现 3D 显示,这种方式存在 VAC 的问题。自 21 世纪初以来,人们提出了许多方法来解决这一关键问题,包括多焦/变焦显示、全息显示、集成成像(Integral Imaging)显示或麦克斯韦视图显示^[97-102]。多焦显示器以不同深度呈现多幅图像,以模拟原始 3D 场景。可变焦距显示器则在每个时间帧仅显示一幅图像,图像深度与观察者的聚集深度相匹配。

基于平面成像的近眼 3D 显示系统一般是指通过利用一个或多个平面形成近眼 3D 显示的光学系统。通过一个固定平面形成 3D 显示存在 VAC 的问题,而变焦显示器虽然一次只生成一个焦平面,但是聚焦深度随辐辏距离而变化,并可通过眼动仪检测到^[103]。多焦平面显示是 AR 应用中较为常用的显示技术,多焦平面解决方案可以分为两类:深度生成方法和信息复用通道。通过改变物体距离或系统的光功率来实现多焦平面,可以区分为基于距离的系统和基于功率的系统,并且可以通过同时调节光学距离与系统光功率实现多焦平面显示设计^[104-105]。在信息复用通道的方法中,通常需要高信息流率才能通过添加另一个空间维度将 2D 显示器扩展到 3D 显示,这通常通过多路复用过程来实现^[106]。用于叠加虚像平面的信息通道有 4 种,包括空间、时间、偏振和波长。

空间复用允许直接构建多焦平面的显示器。在 20 世纪末,Rolland 等人提出了一种通过将 14 个平面间距离均匀的透明显示器叠加,形成一种多焦平面的显示,其原理如图 13(a)所示^[107]。虽然这种设计在非球面显示器件中难以实际应用,但它指出了一般多焦显示器件的设计原则,如焦平面数、焦平面间距和分辨率要求等。光学组合器叠加可以通过叠加分束器、棱镜和光波导等光学组合器,而不是直接叠加显示器或投影屏幕来实现 3D 显示。最初由 Akeley 等人^[108]提出并设计了具有 3 个焦平面的多焦显示器模型。如图 13(b)所示,利用堆叠的分束器将 LCD 面板分成 3 个子面板,形成 3 个焦平面,也可通过叠加更多的自由曲面棱镜来实现空间复用^[109]。但这些模型的体积都较大,并不适合真实的应用场景。

对二维图像偏振复用的概念最早由 Lee 等人在 2016 年提出,通过对液晶面板像素级的偏振调制,为二维图像创造深度信息^[110]。2018 年 Zhu 等人提出了空间复用与偏振复用同时进行的多焦平面显示器,将两个 LCD 面板级联,创建两个独立的深度^[111]。如图 13(c)所示,通常偏振复用的多焦平面显示由显示面板、偏振器和一个偏振相关光学元件组成。

波长复用的多焦平面系统概念由 Zhan 等人提出^[112]。其原理如图 13(d)所示,通过将两个具有不同波长的激光投影机在屏幕上投射出两幅图像,并被滤波器分为两个深度,形成 3D 效果。虽然这个简单的设计验证了通过波长多路复用提供多个焦平面的可行性,但在实际应用中仍然存在许多挑战。如在每个颜色通道中混合波长会直接影响色彩表现,并且滤波器的角度要求较高。

集成成像利用透镜或针孔阵列等周期性光学结构,将光的空间信息从二维元素图像转换为具有空间和角度信息的三维光场^[113-114]。在这个过程中,空间分辨率被用来提供角度信息的多视图通道。可以通过采用快速扫描镜或高帧率空间光调制器(Spatial Light Modulator,SLM)来临时创建多视图,其中高速显示和视点转换设备是多视图结构的关键^[115-116]。近年来,大量基于 HOEs 的集成成像系统被报道^[117-119]。具有光学透明度的 HOEs 可以实现透视功能,同时显示 3D 图像。

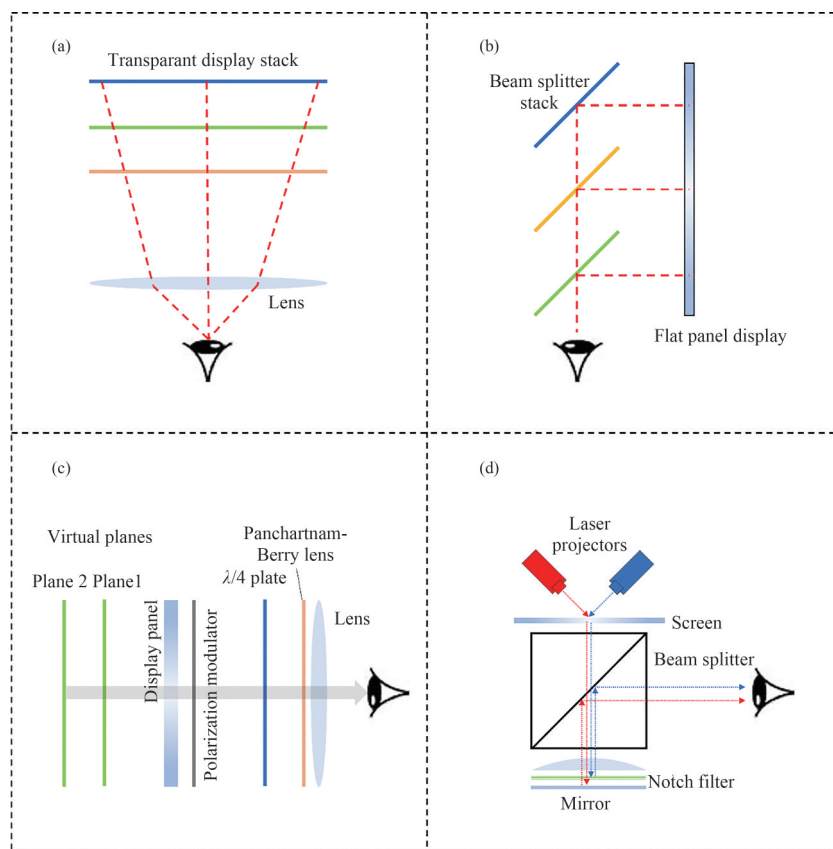


图 13 (a)透明显示器叠加;(b)光学组合器的叠加中分束器的堆叠;(c)偏振复用多焦平面显示;(d)波长复用的多焦平面显示。

Fig. 13 (a) Transparent display stack; (b) Stacking of beam splitters in stacking of optical combiners; (c) Polarization-multiplexed multi-focal-plane display; (d) Wavelength-multiplexed multi-focal-plane display.

全息显示被认为是一种真正的 3D 技术,其可以通过再现三维物体发出的光的振幅和相位信息实现 3D 显示^[120-123]。传统的光学全息术利用光干涉将真实物体的波前记录在胶片上,然后投射参考光束来再现三维虚拟物体。与光学全息相比,计算机生成全息具有灵活的波前控制和实时图像更新功能,因此在近眼显示中得到了广泛关注^[124]。

尽管全息技术被冠以终极 3D 显示的名号,但在商业 AR/VR 产品的实际应用方面仍有很长的路要走。当前其主要的技术障碍包括激光散斑导致的图像分辨率下降,SLM 有限的空间带宽积 (Space-bandwidth Product, SBP) 造成的 FOV 和 Eyebow 大小之间的权衡,以及对计算全息方法 (Computer-generated Holography, CGH) 快速实时计算的高要求^[125-127]。目前可以通过高级衍射光等多种方法增大视场,并且已有有效的方法抑制散斑效应^[128-130]。此外,激光也可以被部

分相干光源替代,如 Micro-LED^[131]。

4 Micro-LED 用于近眼显示的优势

VR 系统中没有环境光的干扰,所以仅需考虑对比度,而在 AR 系统中,有外界的环境光干扰,因此需要考虑的是 AR 系统的环境对比度 (Ambient Contrast Ratio, ACR)。ACR 的定义如下^[132-133]:

$$ACR = \frac{L_{on} + \frac{L_{ambient}}{\pi} * T}{L_{off} + \frac{L_{ambient}}{\pi} * T}, \quad (1)$$

其中, T 是显示透射率, L_{on} (L_{off}) 表示在开(关)状态下的显示亮度 (cd/m^2), $L_{ambient}$ 表示环境光明亮程度,通常是以照度 (lx) 为单位,但是为了方便计算,这里将照度除以 π 转换为亮度单位^[134]。通过式(1)可知,如果在较亮的环境中,比如室外环境

下,要使人眼接收到清晰的图像,对光学引擎的亮度要求比较高。即使对于对比度相对较高的显示器($CR>100$),在环境光较强的状态下也容易导致内容无法识别。一般要求可识别图像的最小 ACR 为 5:1^[134]。要改善近眼显示设备的 ACR,最直接的方法就是提高显示屏的亮度。

目前,近眼显示中常用的光学引擎有硅基液晶(LCoS)、DLP、Micro-OLED 及 Micro-LED。其中 LCoS 显示器通过反射进行光控制,由于结构相对简单,使用半导体制造工艺来实现,分辨率密度可达 4 000 像素/英寸,亮度可达 30 000 cd/m^2 ,并且有产生全息图像的潜力,近年来 LCoS 技术已经在众多的 AR、VR 设备中使用,如 Google Glass、HoloLens 等^[132]。但是由于 LCoS 需要偏振分束器,使得其体积不能再进一步降低,并且由于驱动的复杂性进一步限制了其广泛的应用^[135]。与 LCoS 相似,德州仪器公司的 DLP 也是一种反射式显示,能达到 LCoS 的亮度,DLP 技术基于 DMD 数字微镜结构,通过精确控制每个微镜的偏转角度来实现成像^[136]。相比之下 DLP 体积比 LCoS 小,但是也需要较大的反射光路。

在 LCoS 被应用于近眼显示之后, Micro-OLED 微显示器应用于近眼显示设备也受到了极大的关注^[137]。Micro-OLED 结构包括了硅基 CMOS 背板、OLED 器件,阳极金属、阴极和薄膜封装、彩色滤光片和盖玻片等^[138]。近眼显示设备要求有更高的分辨率实现逼真的图像,因此这样

的实现方式比通过阴影掩模对蒸发的发射器进行直接彩色图案化更为有利^[139]。Micro-OLED 与 LCoS/DLP 相比,有着较小的尺寸,并且亮度水平能达到 $10^3\sim10^4\text{ cd}/\text{m}^2$,但是随着亮度的提高,相对应的是其寿命的减少^[140]。OLED 是由薄膜晶体管(Thin Film Transistor, TFT)控制的直流电流驱动,因此 TFT 的退化会也会降低亮度,缩短 Micro-OLED 的寿命^[141]。由于 Micro-OLED 的有机发光材料的特性,快速老化、寿命短、色纯度低等缺陷也逐渐暴露出来。因此,不论是 LCD、LCoS、DLP、Micro-OLED 都有其固定的技术局限性。

相比于其他几种显示技术, Micro-LED 技术因在较低的功耗下能达到高的亮度、具有高对比度、响应时间较短、色域宽等优点,其应用于近眼显示有着一定的优势。经典的 Micro-LED 结构是由直接带隙半导体材料制成的 PN 结二极管,当 Micro-LED 处于正向偏置状态时,来自半导体导带的电子与价带中的空穴重新结合,从而发出单色光的光子,通常 Micro-LED 的最大半峰全宽线宽为 20 nm,并能够提供超过 140% NTSC 的高度色彩饱和度^[142]。在最近的 Micro-LED 研究中, Micro-LED 尺寸为 63.5 cm (25 in)、300 A/cm^2 时的亮度可以达到 $2.89\times10^6\text{ cd}/\text{m}^2$ 的峰值亮度,并且有真正的黑色状态,分辨率可以达到 5 000 PPI^[143]。Micro-LED 相比于其他光学引擎的参数对比如表 1。

表 1 近眼显示设备中几种光学引擎性能对比

Table 1 Comparison of the performance of several optical engines in near-eye display devices

	DLP	LCoS	Micro-OLED	Micro-LED
Luminous mode	Backlight module	Backlight module	Self-luminous	Self-luminous
Luminance (cd/m^2)	$10^4\sim10^5$ ^[135]	$10^4\sim10^5$ ^[144]	$10^3\sim10^4$ ^[139]	$>10^6$ ^[142]
Contrast ratio	$10^3:1$	$10^3:1$	$10^4:1$	$>10^6:1$
Form factor	Medium	Large	Small	Small
Luminous efficiency	Medium	Low	High	High
Response time	Millisecond level	Millisecond level	Microsecond level	Nanosecond level
Lifetime	Medium	Medium	Short	Long
Optical combiner adaptation	Waveguide	Prism, Waveguide	Birdbath, Freeform surface	Almost

5 总结与展望

近眼显示光机和光学组合器的尺寸对于使

用体验不可忽视,就当前的研究进展来看, Micro-LED 与光波导所组合成的 AR 显示设备最接近眼镜形态,舒适度较高。Micro-LED 高对比度、

响应时间较短、色域宽等优点为未来近眼显示提供了无限的可能,但是Micro-LED的屏幕制备、全彩化等问题是目前面临挑战。人眼的视觉需求也为近眼显示提供了定量的标准,同时也指出了当前需要解决的主要问题,如FOV、分辨率、VAC、显示亮度和效率等。近眼显示中的AR显示也面临诸多挑战,所要解决的不仅是满足人眼视觉性能,还有如何更高效率、小体积地提高显示效果等问题。通过对比各类型微显示器件的相关参数, Micro-LED都有着一定的优势。此外, Micro-LED不仅可以在柔性、可弯曲、可伸缩

的基板上制备^[134],而且已被验证可以实现透明显示^[145],这有望结合多平面显示应用在近眼显示中解决VAC问题。鉴于未来近眼显示需要复杂的硬件以及庞大的数据量以支持多维交互, Micro-LED以其高密度、高亮度、高效率的特征,有望结合三维图像采集、触觉感知和输入、光学技术、信号集成技术等,实现一种具有真三维空间显示的高度集成半导体显示系统^[146]。随着显示技术、Micro-LED微显示技术和光学技术的发展,未来的近眼显示设备必然会更加小巧和舒适,有望随着“元宇宙”的概念在大众消费者中普及开来。

参 考 文 献:

- [1] COLBURN W S, CHANG B J. Holographic combiners for head-up displays [R]. Ann Arbor: Environmental Research Inst. of Michigan Ann Arbor Radar and Optics Div, 1977.
- [2] JIN S X, LI J, LI J Z, *et al.* GaN microdisk light emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(5): 631-633.
- [3] 季洪雷,张萍萍,陈乃军,等. Micro-LED显示的发展现状与技术挑战[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(8): 1101-1112.
- [4] JI H L, ZHANG P P, CHEN N J, *et al.* Micro-LED display: recent progress and future challenges [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1101-1112. (in Chinese)
- [5] MCCALL S L, LEVI A F J, SLUSHER R E, *et al.* Whispering-gallery mode microdisk lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 60(3): 289-291.
- [6] JEON C W, CHOI H W, GU E, *et al.* High-density matrix-addressable AlInGaIn-based 368-nm microarray light-emitting diodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(11): 2421-2423.
- [7] LIU Z J, WONG K M, KEUNG C W, *et al.* Monolithic LED microdisplay on active matrix substrate using flip-chip technology [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(4): 1298-1302.
- [8] LIU Z J, WONG K M, CHONG W C, *et al.* Active matrix programmable monolithic light emitting diodes on silicon (LEDOS) displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 1215-1218.
- [9] HAN H V, LIN H Y, LIN C C, *et al.* Resonant-enhanced full-color emission of quantum-dot-based micro LED display technology [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32504-32515.
- [10] KIM W H, JANG Y J, KIM J Y, *et al.* High-performance color-converted full-color micro-led arrays [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(6): 2112.
- [11] 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.
- [12] FENG F, ZHANG K, LIU Y B, *et al.* AlGaIn-based deep-UV micro-LED array for quantum dots converted display with ultra-wide color gamut [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43(1): 60-63.
- [13] 李继军,聂晓梦,李根生,等. 平板显示技术比较及研究进展[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 695-710.
- [14] LI J J, NIE X M, LI G S, *et al.* Comparison and research progress of flat panel display technology [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 695-710. (in Chinese)
- [15] WANG H, WANG L, SUN J, *et al.* Role of surface microstructure and shape on light extraction efficiency enhancement of GaN Micro-LEDs: a numerical simulation study [J]. *Displays*, 2022, 73: 102172.
- [16] YANG W, ZHANG S L, MCKENDRY J J D, *et al.* Size-dependent capacitance study on InGaIn-based micro-light-emitting diodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(4): 044512.
- [17] ZHOU X J, TIAN P F, SHER C W, *et al.* Growth, transfer printing and colour conversion techniques towards full-colour Micro-LED display [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 71: 100263.
- [18] WANG L, SUN J, YAN Q, *et al.* Issue of spatial coherence in MQW based Micro-LED simulation [J]. *Optics*

- Express*, 2021, 29(20): 31520-31526.
- [17] TIAN P F, EDWARDS P R, WALLACE M J, *et al.* Characteristics of GaN-based light emitting diodes with different thicknesses of buffer layer grown by HVPE and MOCVD [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(7): 075101.
 - [18] FAN Z Y, LIN J Y, JIANG H X. III-nitride micro-emitter arrays: development and applications [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(9): 094001.
 - [19] TIAN P F, MCKENDRY J J D, GONG Z, *et al.* Characteristics and applications of micro-pixelated GaN-based light emitting diodes on Si substrates [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(3): 033112.
 - [20] 田鹏飞, 顾而丹, 刘冉, 等. 氮化镓基 Micro-LED 的研究现状[J]. 光源与照明, 2018(1): 1-4.
TIAN P F, GU E D, LIU R, *et al.* Research status of GaN-based Micro-LED [J]. *Lamps & Lighting*, 2018(1): 1-4. (in Chinese)
 - [21] 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(1): 83.
 - [22] VIREY E H, BARON N. Status and prospects of MicroLED displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 593-596.
 - [23] CHEN Z, YAN S, DANESH C. MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(12): 123001.
 - [24] LIOU J C, LIN W D. Micro-device array LED processes on CMOS/MEMS substrate [C]//*Proceedings of 2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. Los Angeles: IEEE, 2017: 776-779.
 - [25] LETI. Challenges for high-performance GaN MicroLED displays [C]//*Proceedings of the 2nd International Micro LED Summit*. Shenzhen: MicroLED Display, 2018.
 - [26] MARION F, BISOTTO S, BERGER F, *et al.* A room temperature flip-chip technology for high pixel count micro-displays and imaging arrays [C]//*Proceedings of the IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference*. Las Vegas: IEEE, 2016.
 - [27] LIU Z J, ZHANG K, LIU Y B, *et al.* Fully multi-functional GaN-based Micro-LEDs for 2500 PPI micro-displays, temperature sensing, light energy harvesting, and light detection [C]//*Proceedings of 2018 IEEE International Electron Devices Meeting*. San Francisco: IEEE, 2018: 38.
 - [28] 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.
 - [29] 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.
 - [30] LI W H, WANG K, LI J L, *et al.* Working mechanisms of nanoscale light-emitting diodes operating in non-electrical contact and non-carrier injection mode: modeling and simulation [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(6): 912.
 - [31] KLUCZYK-KORCH K, MORENO S, CANALS J, *et al.* Individually switchable InGaN/GaN Nano-LED arrays as highly resolved illumination engines [J]. *Electronics*, 2021, 10(15): 1829.
 - [32] WANG K, LIU Y, CHEN R, *et al.* Light-pulse splitting from nano-light-emitting diodes operating in noncarrier injection mode [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(7): 1033-1036.
 - [33] KANG C M, KANG S J, MUN S H, *et al.* Monolithic integration of AlGaInP-based red and InGaInP-based green LEDs via adhesive bonding for multicolor emission [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10333.
 - [34] 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.
 - [35] KIM H H, CHOI S H, SHIN S H, *et al.* Thermal transient characteristics of die attach in high power LED PKG [J]. *Microelectronics Reliability*, 2008, 48(3): 445-454.
 - [36] MENARD E, LEE K J, KHANG D Y, *et al.* A printable form of silicon for high performance thin film transistors on plastic substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(26): 5398-5400.
 - [37] BOWER C A, MEITL M A, BONAFEDE S, *et al.* Heterogeneous integration of microscale compound semicon-

- ductor devices by micro-transfer-printing [C]//*Proceedings of the IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference*. San Diego: IEEE, 2015: 963-967.
- [38] MARINOV V R. Laser-enabled extremely-high rate technology for μ LED assembly [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 692-695.
- [39] 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.
- [40] XIE B, HU R, LUO X B. Quantum dots-converted light-emitting diodes packaging for lighting and display: status and perspectives [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2016, 138(2): 020803.
- [41] CHEN E G, LIN J Y, YANG T, *et al.* Asymmetric quantum-dot pixelation for color-converted white balance [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(7): 2158-2165.
- [42] CAI J H, WANG C H, HU X P, *et al.* Water-driven photoluminescence reversibility in CsPbBr₃/PDMS-PUa composite [J]. *Nano Research*, 2022, doi: org/10.1007/s12274-022-4202-0.
- [43] WANG C H, CAI J H, YE Y Y, *et al.* Full-visible-spectrum perovskite quantum dots by anion exchange resin assisted synthesis [J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(7): 1355-1366.
- [44] CHEN Y, CAI J H, LIN J Y, *et al.* Quantum-dot array with a random rough interface encapsulated by atomic layer deposition [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(1): 166-169.
- [45] XIE H X, CHEN E G, YE Y, *et al.* Interfacial optimization of quantum dot and silica hybrid nanocomposite for simultaneous enhancement of fluorescence retention and stability [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(17): 171101.
- [46] LIN C H, LEE C F, LIN C C, *et al.* Quantum dots based full-color display on micro-light-emitting-diode technology [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(S1): 267-270.
- [47] CHEN P H, SHIH Y C, CHEN Y C. Micro LED display panel and manufacturing method: US, 10748880 [P]. 2020-08-18.
- [48] ZHANG K, HAN T T, CHO W K, *et al.* Investigation of enhanced ambient contrast ratio in novel micro/mini-LED displays [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(12): 3304.
- [49] DAY J, LI J, LIE D Y C, *et al.* Full-scale self-emissive blue and green microdisplays based on GaN Micro-LED arrays [C]//*Proceedings of SPIE 8268, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX*. San Francisco: SPIE, 2012: 428-435.
- [50] HOFFFLINGER B. *High-Dynamic-Range (HDR) Vision: Microelectronics, Image Processing, Computer Graphics* [M]. New York: Springer, 2007.
- [51] DALY S, KUNKEL T, XING S, *et al.* Viewer preferences for shadow, diffuse, specular, and emissive luminance limits of high dynamic range displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 563-566.
- [52] HUANG Y G, TAN G J, GOU F W, *et al.* Prospects and challenges of Mini-LED and Micro-LED displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(7): 387-401.
- [53] CHU F, GUO Y Q, ZHANG Y X, *et al.* Four-mode 2D/3D switchable display with a 1D/2D convertible liquid crystal lens array [J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 37464-37475.
- [54] FAN Z B, QIU H Y, ZHANG H L, *et al.* A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 67.
- [55] DUAN W, MA L L, CHEN P, *et al.* Patterned optical anisotropic film for generation of non-diffracting vortex beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(3): 031101.
- [56] HOFFMAN D M, GIRSHICK A R, AKELEY K, *et al.* Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue [J]. *Journal of Vision*, 2008, 8(3): 33.
- [57] ZHAN T, YIN K, XIONG J H, *et al.* Augmented reality and virtual reality displays: perspectives and challenges [J]. *iScience*, 2020, 23(8): 101397.
- [58] TAN G J, LEE Y H, ZHAN T, *et al.* Foveated imaging for near-eye displays [J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25076-25085.
- [59] LEE G Y, HONG J Y, HWANG S H, *et al.* Metasurface eyepiece for augmented reality [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4562.

- [60] LEE Y H, ZHAN T, WU S T. Enhancing the resolution of a near-eye display with a Pancharatnam-Berry phase deflector [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4732-4735.
- [61] LIU Z Y, ZHANG C, ZHU W Q, *et al.* Compact stereo waveguide display based on a unidirectional polarization-multiplexed metagrating in-coupler [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(4): 1112-1119.
- [62] WANG C, YU Z Q, ZHANG Q B, *et al.* Metalens eyepiece for 3D holographic near-eye display [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(8): 1920.
- [63] YANG X, SONG P, ZHANG H B, *et al.* Full-color computer-generated holographic near-eye display based on white light illumination [J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38236-38249.
- [64] LI X W, XIAO D, WANG Q H. Error-free holographic frames encryption with CA pixel-permutation encoding algorithm [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 100: 200-207.
- [65] WANG L, LI Y, LIU S X, *et al.* Large depth of range Maxwellian-viewing SMV near-eye display based on a Pancharatnam-Berry optical element [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 7001607.
- [66] 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(1): 216.
- [67] BASTANI B, TURNER E, VIERI C, *et al.* Foveated pipeline for AR/VR head-mounted displays [J]. *Information Display*, 2017, 33(6): 14-35.
- [68] MENG T T, ZHENG Y T, ZHAO D L, *et al.* Ultrahigh-resolution quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(4): 297-303.
- [69] ROSSI E A, ROORDA A. The relationship between visual resolution and cone spacing in the human fovea [J]. *Nature Neuroscience*, 2010, 13(2): 156-157.
- [70] KIM J, JEONG Y, STENGEL M, *et al.* Foveated AR: dynamically-foveated augmented reality display [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(4): 99.
- [71] KRESS B C, CHATTERJEE I. Waveguide combiners for mixed reality headsets: a nanophotonics design perspective [J]. *Nanophotonics*, 2020, 10(1): 41-74.
- [72] KRESS B C. *Optical Architectures for Augmented-, Virtual-, and Mixed-Reality Headsets* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2020.
- [73] PAN C, LIU Z Y, PANG Y J, *et al.* Design of a high-performance in-coupling grating using differential evolution algorithm for waveguide display [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26646-26662.
- [74] LIU Z Y, PANG Y J, PAN C, *et al.* Design of a uniform-illumination binocular waveguide display with diffraction gratings and freeform optics [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30720-30731.
- [75] LIU Z Y, PAN C, PANG Y J, *et al.* A full-color near-eye augmented reality display using a tilted waveguide and diffraction gratings [J]. *Optics Communications*, 2019, 431: 45-50.
- [76] CHEN C P, CUI Y P, YE Y N, *et al.* Wide-field-of-view near-eye display with dual-channel waveguide [J]. *Photonics*, 2021, 8(12): 557.
- [77] CHEN C P, MI L T, ZHANG W B, *et al.* Waveguide-based near-eye display with dual-channel exit pupil expander [J]. *Displays*, 2021, 67: 101998.
- [78] MARTINS A, LI K Z, LI J T, *et al.* On metalenses with arbitrarily wide field of view [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(8): 2073-2079.
- [79] GU L, CHENG D W, LIU Y, *et al.* Design and fabrication of an off-axis four-mirror system for head-up displays [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(16): 4893-4900.
- [80] SHEN F Q, YANG L, HU G Y, *et al.* Freeform and precise irradiance tailoring in arbitrarily oriented planes [J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 42844-42854.
- [81] DARKHANBAATAR N, ERDENEBAAT M U, SHIN C W, *et al.* Three-dimensional see-through augmented-reality display system using a holographic micromirror array [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(25): 7545-7551.
- [82] CLOSE D H. Holographic optical elements [J]. *Optical Engineering*, 1975, 14(5): 145408.
- [83] XIONG J H, YIN K, LI K, *et al.* Holographic optical elements for augmented reality: principles, present status, and future perspectives [J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(1): 2000049.

- [84] 蔡文锋,李怡霏,蒋浩东,等. 液晶微透镜阵列研究进展[J]. 液晶与显示,2020,35(7):749-761.
CAI W F, LI Y F, JIANG H D, *et al.* Research progress of liquid crystal microlens arrays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 749-761. (in Chinese)
- [85] LEE Y H, YIN K, WU S T. Reflective polarization volume gratings for high efficiency waveguide-coupling augmented reality displays [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27008-27014.
- [86] BLANCHE P A. Holography, and the future of 3D display [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 28.
- [87] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1: 3.
- [88] YAN Z Q, YAN X P, JIANG X Y, *et al.* Integral imaging based light field display with enhanced viewing resolution using holographic diffuser [J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 437-441.
- [89] IVES F E. Parallax stereogram and process of making same: US, 0725567 [P]. 1903-04-14.
- [90] LIPPMANN G. La photographie intégrale [J]. *Comptes—Rendus*, Académie des Sciences, 1908, 146: 446-551.
- [91] WALTER H. Stereoscopic picture: US, 1128979 [P]. 1915-02-16.
- [92] GABOR D. A new microscopic principle [J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [93] CHEN E G, CAI J, ZENG X Y, *et al.* Ultra-large moiré-less autostereoscopic three-dimensional light-emitting-diode displays [J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 10355-10369.
- [94] CHEN E G, ZHAO Y, LIN S Y, *et al.* Design of improved prototype of two-in-one polarization-interlaced stereoscopic projection display [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4060-4076.
- [95] QIN Z, WU J Y, CHOU P Y, *et al.* Revelation and addressing of accommodation shifts in microlens array-based 3D near-eye light field displays [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(1): 228-231.
- [96] SHI J C, HUA J Y, ZHOU F F, *et al.* Augmented reality vector light field display with large viewing distance based on pixelated multilevel blazed gratings [J]. *Photonics*, 2021, 8(8): 337.
- [97] ZHAN T, XIONG J H, ZOU J Y, *et al.* Multifocal displays: review and prospect [J]. *Photonix*, 2020, 1(1): 10.
- [98] SHIMOBABA T, KAKUE T, ITO T. Review of fast algorithms and hardware implementations on computer holography [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(4): 1611-1622.
- [99] WANG W W, CHEN G X, WENG Y L, *et al.* Large-scale microlens arrays on flexible substrate with improved numerical aperture for curved integral imaging 3D display [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 11741.
- [100] KRAMIDA G. Resolving the vergence-accommodation conflict in head-mounted displays [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2016, 22(7): 1912-1931.
- [101] WANG Q H, JI C C, LI L, *et al.* Dual-view integral imaging 3D display by using orthogonal polarizer array and polarization switcher [J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 9-16.
- [102] LI L, WANG J H, WANG Q H, *et al.* Displaceable and focus-tunable electrowetting optofluidic lens [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 25839-25848.
- [103] AKŞIT K, LOPES W, KIM J, *et al.* Near-eye varifocal augmented reality display using see-through screens [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 189.
- [104] CHENG D W, WANG Q F, WANG Y T, *et al.* Lightweight spatial-multiplexed dual focal-plane head-mounted display using two freeform prisms [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(3): 031201.
- [105] XIONG J H, TAN G J, ZHAN T, *et al.* Four-plane near-eye display without sacrificing the frame rate [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 620-623.
- [106] WINZER P J. Modulation and multiplexing in optical communications [C]//*Proceedings of 2009 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference*. Baltimore: IEEE, 2009: 1-2.
- [107] ROLLAND J P, KRUEGER M W, GOON A. Multifocal planes head-mounted displays [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(19): 3209-3215.
- [108] AKELEY K, WATT S J, GIRSHICK A R, *et al.* A stereo display prototype with multiple focal distances [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 804-813.
- [109] LIU S X, LI Y, ZHOU P C, *et al.* Full-color multi-plane optical see-through head-mounted display for augmented

- reality applications [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(12): 687-693.
- [110] LEE Y H, PENG F L, WU S T. Fast-response switchable lens for 3D and wearable displays [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1668-1675.
- [111] ZHU S S, JIN P, QIAO W, *et al.* High-resolution head mounted display using stacked LCDs and birefringent lens [C]//*Proceedings of SPIE 10676, Digital Optics for Immersive Displays*. Strasbourg: SPIE, 2018: 106761B.
- [112] ZHAN T, ZOU J Y, LU M, *et al.* Wavelength-multiplexed multi-focal-plane seethrough near-eye displays [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27507-27513.
- [113] ZHOU X T, PENG Y Y, PENG R, *et al.* Fabrication of large-scale microlens arrays based on screen printing for integral imaging 3D display [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(36): 24248-24255.
- [114] WANG W W, LI S Y, LIU P H, *et al.* Improved depth of field of the composite micro-lens arrays by electrically tunable focal lengths in the light field imaging system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107748.
- [115] MATSUDA N, FIX A, LABNAB D. Focal surface displays [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 1-14.
- [116] SHIBATA T, KAWAI T, OHTA K, *et al.* Stereoscopic 3-D display with optical correction for the reduction of the discrepancy between accommodation and convergence [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2005, 13(8): 665-671.
- [117] XIAO X, JAVIDI B, MARTINEZ-CORRAL M, *et al.* Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 546-560.
- [118] HUA H, JAVIDI B. A 3D integral imaging optical see-through head-mounted display [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13484-13491.
- [119] HUANG H, HUA H. High-performance integral-imaging-based light field augmented reality display using free-form optics [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17578-17590.
- [120] FRAUEL Y, NAUGHTON T J, MATOBA O, *et al.* Three-dimensional imaging and processing using computational holographic imaging [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, 94(3): 636-653.
- [121] TAY S, BLANCHE P A, VOORAKARANAM R, *et al.* An updatable holographic three-dimensional display [J]. *Nature*, 2008, 451(7179): 694-698.
- [122] BLANCHE P A, BABLUMIAN A, VOORAKARANAM R, *et al.* Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer [J]. *Nature*, 2010, 468(7320): 80-83.
- [123] XIONG Z L, WANG Q H, XING Y, *et al.* Active integral imaging system based on multiple structured light method [J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27094-27104.
- [124] CHANG C L, BANG K, WETZSTEIN G, *et al.* Toward the next-generation VR/AR optics: a review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective [J]. *Optica*, 2020, 7(11): 1563-1578.
- [125] LIU S X, LI Y, SU Y K. Multiplane displays based on liquid crystals for AR applications [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(3): 224-240.
- [126] DUAN X H, LIU J, SHI X L, *et al.* Full-color see-through near-eye holographic display with 80° field of view and an expanded eye-box [J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31316-31329.
- [127] SHI L, LI B C, KIM C, *et al.* Towards real-time photorealistic 3D holography with deep neural networks [J]. *Nature*, 2021, 591(7849): 234-239.
- [128] YANG S Y, TAKAJO H. Speckle reduction of kinoform reconstruction utilizing the 2π ambiguity of image phase differences [J]. *Optical Review*, 2005, 12(2): 93-96.
- [129] MAKOWSKI M. Minimized speckle noise in lens-less holographic projection by pixel separation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29205-29216.
- [130] 郑义微,王迪,李穆隆,等. 基于液晶空间光调制器的大视角全息显示技术[J]. 液晶与显示, 2021, 36(6): 789-796.
ZHENG Y W, WANG D, LI Y L, *et al.* Holographic display technology with large viewing angle based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 789-796. (in Chinese)
- [131] KOZACKI T, CHLIPALA M. Color holographic display with white light LED source and single phase only SLM

- [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2189-2199.
- [132] DOBROWOLSKI J A, SULLIVAN B T, BAJCAR R C. Optical interference, contrast-enhanced electroluminescent device [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(28): 5988-5996.
- [133] CHEN H W, TAN G J, WU S T. Ambient contrast ratio of LCDs and OLED displays [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33643-33656.
- [134] LEE Y H, ZHAN T, WU S T. Prospects and challenges in augmented reality displays [J]. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2019, 1(1): 10-20.
- [135] HAN Y S, KIM D, KIM Y. A novel ReRAM-based architecture of field sequential color driver for high-resolution LCoS displays [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 223385-223395.
- [136] PETTITT G, FERRI J, THOMPSON J. Practical application of TI DLP® technology in the next generation head-up display system [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 700-703.
- [137] 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.
- [138] 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.
- [139] CHO H, BYUN C W, KANG C M, *et al.* White organic light-emitting diode (OLED) microdisplay with a tandem structure [J]. *Journal of Information Display*, 2019, 20(4): 249-255.
- [140] SWAYAMPRAKASH S S, DUBEY D K, SHAHNAWAZ, *et al.* Approaches for long lifetime organic light emitting diodes [J]. *Advanced Science*, 2021, 8(1): 202254.
- [141] FAN R, ZHANG X N, TU Z T. Luminance compensation and optimization to delay OLED degradation based on equivalent lifetime detection [J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2020, 8: 626-634.
- [142] WU T Z, SHER C W, LIN Y, *et al.* Mini-LED and Micro-LED: promising candidates for the next generation display technology [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1557.
- [143] LIU Y B, ZHANG K, HYUN B R, *et al.* High-brightness InGaN/GaN Micro-LEDs with secondary peak effect for displays [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, 41(9): 1380-1383.
- [144] HUANG Y G, LIAO E, CHEN R, *et al.* Liquid-crystal-on-silicon for augmented reality displays [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2366.
- [145] EL-GHOURY H S, CHUANG C L, ALPASLAN Z Y. Quantum photonic imager (QPI): a novel display technology that enables more than 3D applications [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 371-374.
- [146] 严群,周雄图,张永爱,等. 一种高度集成半导体显示系统:中国,107895543A[P]. 2018-04-10.
YAN Q, ZHOU X T, ZHANG Y A, *et al.* A highly integrated semiconductor display system: CN, 107895543A [P]. 2018-04-10. (in Chinese)

作者简介:



周自平(1997—),男,福建南平人,硕士研究生,2020年于青岛科技大学获得学士学位,主要从事近眼显示方面的研究。E-mail: 398959731@qq.com



陈恩果(1984—),男,福建福州人,博士,副教授,2013年于浙江大学获得博士学位,主要从事新型显示技术方面的研究。E-mail: ceg@fzu.edu.cn