

超表面 VR/AR 显示技术研究进展

罗栩豪^{1,2,3,4}, 董思禹^{1,2,3,4*}, 王占山^{1,2,3,4}, 程鑫彬^{1,2,3,4**}¹同济大学物理科学与工程学院精密光学工程技术研究所, 上海 200092;²先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092;³上海市数字光学前沿科学研究基地, 上海 200092;⁴上海市全光谱高性能光学薄膜器件及应用专业技术服务平台, 上海 200092

摘要 虚拟现实(VR)和增强现实(AR)是继计算机、智能手机和互联网之后出现的下一代革新技术,正在改变我们感知和沟通世界的方式。近年来,VR/AR头戴显示器蓬勃发展,对高分辨、高亮度的微型显示设备和小体积、轻质量的近眼显示光学系统的需求也越来越迫切。超表面作为一种在二维平面上排布亚波长纳米结构的新型超薄光学元器件,具有超越传统光学器件的强大电磁波调控能力,正在推进VR和AR设备向着小型化、轻量化方向发展。首先简要介绍VR/AR显示技术的基本原理并回顾发展历程;重点分析超表面和超透镜在VR/AR近眼显示光学系统中的设计原理、性能特点及应用方法,以及超表面在微型显示设备中的作用和应用效果;随后介绍超表面微纳加工技术和大面积批量制备方法;最后对超表面VR/AR显示技术进行总结,并对其发展前景进行展望。

关键词 增强现实; 虚拟现实; 近眼显示; 超表面

中图分类号 TN27 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011002

Research Progress of Metasurface-Based VR/AR Display Technology

Luo Xuhao^{1,2,3,4}, Dong Siyu^{1,2,3,4*}, Wang Zhanshan^{1,2,3,4}, Cheng Xinbin^{1,2,3,4**}¹*Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;*²*Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, Ministry of Education, Shanghai 200092, China;*³*Shanghai Frontiers Science Center of Digital Optics, Shanghai 200092, China;*⁴*Shanghai Professional Technical Service Platform for Full-Spectrum and High-Performance Optical Thin Film Devices and Applications, Shanghai 200092, China*

Abstract As the next-generation innovative technologies emerging after computers, smartphones, and the Internet, virtual reality (VR) and augmented reality (AR) are changing the way we perceive and communicate with the world. VR/AR head-mounted displays have flourished in the recent years, creating an increasingly urgent need for high-resolution and brightness miniature displays and small-volume and lightweight near-eye display opto-systems. As new ultra-thin optical components with subwavelength nanostructures lined up on a two-dimensional plane, metasurfaces with powerful electromagnetic wave modulation capabilities beyond traditional optical devices are accelerating the development of VR and AR devices toward miniaturization and light weightedness. We first briefly introduce herein the basic principle of the VR/AR display technology and review its development history. We focus on the design principles, performance characteristics, and application methods of metasurfaces and metalenses in optical systems for VR/AR near-eye displays. We then introduce the role and the application effects of metasurfaces in micro-display devices. In addition, we present the micro- and nano-fabrication technologies related to metasurfaces and the large-area mass fabrication method. Finally, we provide a summary of the metasurface-based VR/AR display technology and an outlook on its development prospects.

Key words augmented reality; virtual reality; near-eye display; metasurface

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2022-08-18; 录用日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61925504, 6201101335, 62020106009, 61621001)、上海市科委项目(17JC1400800, 20JC1414600, 21JC1406100)、中国博士后科学基金(2020TQ0227, 2021M702471)

通信作者: *dongsy@tongji.edu.cn; **chengxb@tongji.edu.cn

1 引言

虚拟现实(VR)和增强现实(AR)是实现虚拟世界、数字物品和人多模式交互的新兴技术,被广泛认为是未来的黑科技^[1-8]。它们为后现实的“元宇宙(metaverse)”提供了一个融合物理现实和数字虚拟的永恒且持久的多用户交互的环境平台^[9]。VR是一个独立的、虚拟的、替代现实的人工环境,用户沉浸其中,可以感受到一个完全不同的、栩栩如生的数字世界;而AR将数字输入和虚拟元素投射到现实物理环境中,从而在空间上增强了物理世界,并相互融合和补充。得益于先进光学元器件、微型显示技术、移动计算平台的飞速发展,VR/AR头戴显示器(HMD)颠覆性地升级了用户的三维视觉体验。VR/AR-HMD已然成为通向元宇宙的物理入口,并广泛应用于航空^[10]、制造^[11]、教育^[12-13]、医疗^[14]、通讯^[15]和娱乐^[16]等领域。

VR/AR-HMD主要由微型显示设备和近眼显示光学系统两部分组成^[2,4]。微型显示器作为光源输出虚拟画面,再由光学元件将画面成像展示在人眼前,或者将其与现实景象融合后再进行展示。VR/AR-HMD的近眼显示光学系统需要满足人类视觉和人体工程学的要求,包括视场(FOV)、眼动范围(eyebow)、入眼光效率、角度分辨率、元件透射率、畸变、体积和质量等^[1]。当前近眼显示光学系统的主流方案主要有基于传统的光学折射和反射元件、非球面和自由曲面、菲涅耳透镜、几何光波导和衍射光波导等方案。微型显示设备作为近眼显示光学系统的显示信息来源,需要具有广色域、高分辨率、高亮度、足够大的亮度调节范围的特点。目前主流的微型显示设备主要有硅基液晶(LCoS)、有机发光二极管(OLED)、微型发光二极管(micro-LED)及激光束扫描(LBS)等^[17-18]。此外的一些性能参数,比如图像的帧率和HMD的功耗,也主要由微型显示设备决定。总之,VR/AR-HMD整体应该是一个紧凑的系统,理想情况下需要在一个大的FOV内提供一个高分辨率的图像,形状能像眼镜一样,以此来为用户提供良好的佩戴体验,同时匹配人类卓越的视觉性能。然而,上述要求往往相互制衡,高性能、低功耗且轻量化VR/AR-HMD的设计具有挑战性,迫切需要新的光学成像显示技术提供有效的解决方案。

一代器件、一代系统、一代技术,超表面(metasurface)^[19-24]是一种在二维平面上按照人为方式进行排列的亚波长电磁调控单元阵列,具有超薄、平面化、低损耗和易集成等优点,被普遍认为是下一代新型的光学元器件。超表面几乎可以对光波的振幅、相位、偏振和频率参量进行任意调控,表现出超透镜(metalens)成像^[25-28]、色散定制^[29-31]、全息成像^[32-34]和光束发射、整形^[35-38]等强大功能,已经成为研究和提升VR和AR显示技术的强有力平台。本文将阐述VR/AR显示技术中超表面的近期研究进展,首先介绍

VR/AR显示技术的基本结构和发展历程,然后简要介绍超表面和超透镜的发展,接着分别介绍它们在VR/AR-HMD的近眼显示光学系统和微型显示设备中的先进应用,随后对超表面的微纳加工技术和批量化制造方法进行讨论,最后对超表面在VR/AR显示技术中的研究进行总结与展望。

2 VR/AR技术发展

20世纪90年代,VR/AR经历了第一次繁荣,但由于缺乏合格的软硬件条件,这次繁荣迅速消退了^[2]。过去十几年里,随着沉浸式的概念被重新审视,先进的近眼显示光学元件和微型显示设备重塑了VR/AR系统,获得了新一轮的蓬勃发展^[7]。VR和AR有望彻底改变我们感知数字信息和与虚拟世界互动的方式,并成为有前景的下一代显示和计算平台。图1(a)是VR显示系统的基本原理图,它通过非球面透镜、菲涅耳透镜、偏振折叠Pancake、微透镜阵列,或者超表面和超透镜等近眼显示光学元件呈现虚拟的图像,为用户提供了一种完全沉浸式的体验。而图1(b)AR则通过棱镜、反射镜、非球面和自由曲面、光波导、超表面和超透镜等光学元件,对微型显示器发出的光进行反射、折射或衍射,最终将其投射到人眼,在显示虚拟图像的同时保持了对现实场景透视的能力,提供了一个联通用户、数字世界与现实世界的互动平台。VR/AR系统具有相同的微型显示器,现今主流的技术包括数字光处理器(DLP)、液晶显示(LCD)、LCoS、OLED、micro-LED和LBS等。通过对近些年来VR/AR显示系统

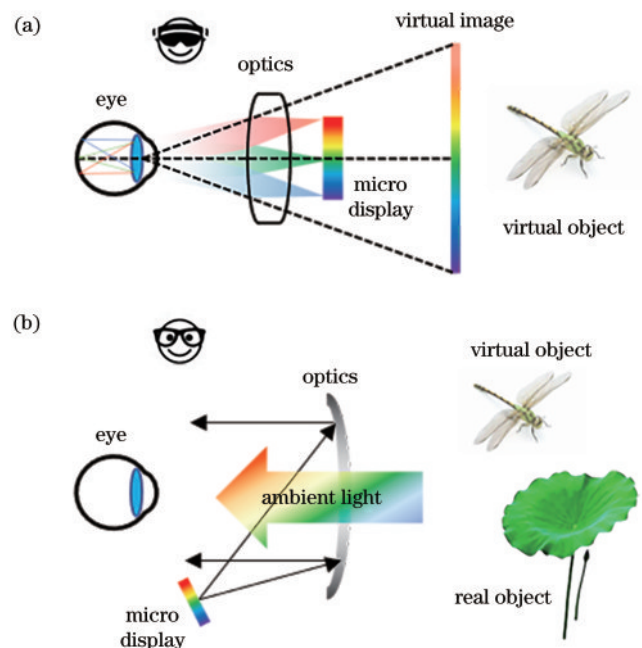


图1 VR/AR显示技术原理。(a)VR显示系统简图;(b)AR显示系统简图

Fig. 1 Schematic of VR/AR display technology. (a) Sketch of VR display system; (b) sketch of AR display system

中的近眼显示光学器件/系统和微型显示器的相关报道进行简单回顾和总结,对其发展历程和研究现状做简要探讨。

2.1 VR/AR-HMD 近眼显示光学元件及成像技术研究进展

最初的 VR-HMD 近眼显示光学元件通常采用单个的非球面透镜^[39],基于 Snell 折射定律,从球面透镜优化而来,如图 2(a)所示。相对于传统的球面透镜,非球面透镜可以使用非恒定曲率,这可以减小球差,具有更优异的边缘成像质量。但是非球面透镜的镜片厚度仍然较大,导致系统笨重。相比非球面透镜,菲涅耳透镜具有厚度更薄的优势,如图 2(b)所示。菲涅耳透镜是一种重要的紧凑型光学元件,它去掉了凸透镜中直线传播的部分而保留折射曲面,因此看起来是由多个同心环组成的^[40-42]。由于菲涅耳透镜需要更少的制作材料和更小的占用体积,市面上很多 VR-HMD 都采用这种方案,比如 Meta Quest 2、MPico neo 3、惠普 Reverb G2 等。但是菲涅耳镜片和显示面板之间距离相对非球面透镜方案没有明显变化,而且由菲涅耳沟槽引起的衍射伪影和杂散光会降低图像质量和导致光学畸变。为了减小 VR-HMD 的体积和质量,提高可穿戴的舒适性,近年来偏振折叠 Pancake 方案^[43-44]引起了

较大的关注,如图 2(c)所示。微显示器提供的图像通过半透半反膜后,光线在镜片、相位延时膜和反射偏振膜之间多次折返,最终透过反射偏振膜到达人眼,正是这种光路的折叠有效地缩短了系统的总光长。Pancake 方案的反射曲面可以补偿正折射透镜的场曲,从而减小像差,与菲涅耳镜片相比,它的表面光滑,并且支持屈光度调节。虽然这种方案具有很多优点,但是它并不完美,主要缺点是光效率低,因为光每次通过半透半反膜都会损失 50%。此外,由于光在折返过程中的双折射现象和偏振泄露,容易产生杂散光和明显的伪影。目前比较前沿的基于 Snell 定律的近眼显示光学方案还包括图 2(d)所示的多叠折返式自由曲面和图 2(e)所示的异构透镜阵列,它们都比非球面透镜和菲涅耳透镜轻薄。前者存在成像畸变大、加工精度要求高、视场角小的缺点;虽然后者通过较小的总光长就可以实现较大的视场角,但是每个微透镜的边缘都存在畸变和伪影,并且加工难度大。

以上讨论只考虑了传统的几何光学,然而,全息光学元件(HOE)^[8]的最新进展为光学元件提供了更广泛的选择。光聚合物全息光学元件(PPHOE)可以为不同的波长和入射角提供不同的相位轮廓,增加了额外的自由度,以获得更好的成像性能^[2]。后来研究人员

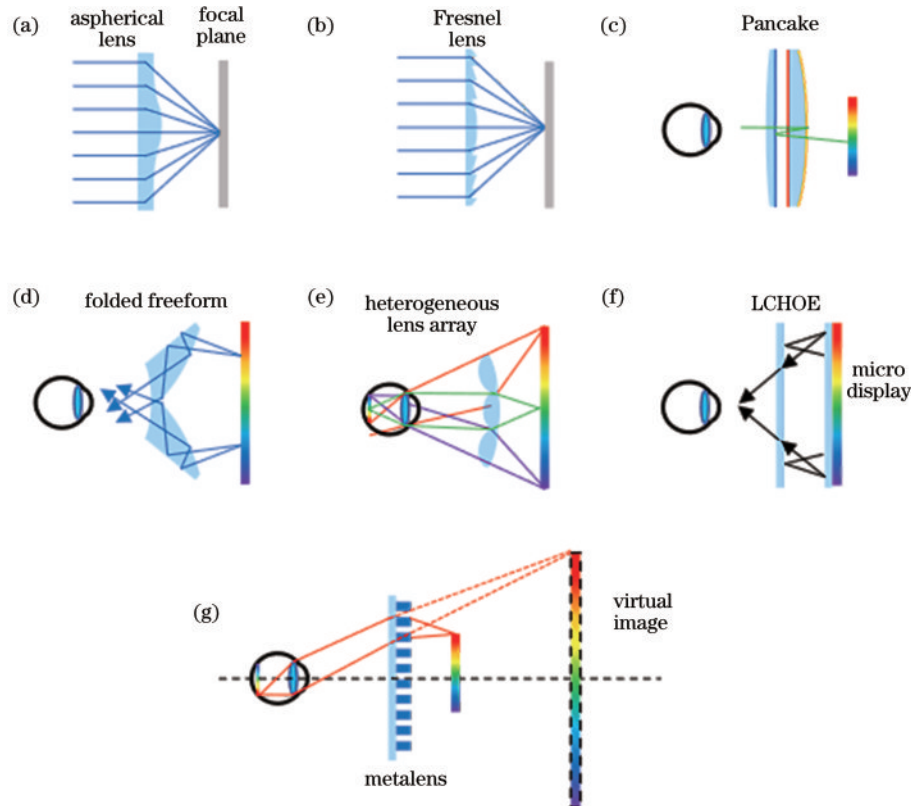


图 2 VR 近眼显示光学元件和成像技术。(a)非球面透镜;(b)菲涅耳透镜;(c)折叠光路 Pancake;(d)多叠折返式自由曲面;

(e)异构透镜阵列;(f)液晶全息光学元件(LCHOE);(g)超表面、超透镜

Fig. 2 VR near-eye display optical elements and imaging techniques. (a) Aspherical lens; (b) Fresnel lens; (c) Pancake with folded optical path; (d) multi-stack folded back freeform surface; (e) heterogeneous lens array; (f) liquid crystal holographic optical element (LCHOE); (g) metasurface, metalens

还开发了如图 2(f) 所示的液晶全息光学元件 (LCHOE)^[45], 由于液晶固有的各向异性特性, LCHOE 对输入光的偏振状态极为敏感, 为近眼显示系统的动态波前调制提供了一种新的可能性。轻薄化一直以来都是 VR 光学的核心目标和进化方向, 超表面和超透镜是新兴的光学和纳米科技结合的元件, 它的厚度一般为亚微米级别, 如图 2(g) 所示, 它能够通过亚波长纳米结构实现异常偏折和消色差成像, 并且它的制造工艺与半导体工艺兼容, 未来有望大规模应用于 VR-HMD 近眼显示。

虽然 AR 和 VR 光学有许多相通的光学元件和显示特性, 但是它们是截然不同的两种技术。谷歌的初代 AR-HMD^[46-47] 中使用的近眼显示光学设计通常被称为 birdbath 光学, 如图 3(a) 所示, 半透半反的分光镜

是该方案的核心元件, 但是这种方案的体积较大、FOV 较小为 50° 左右、光效率低。另一种图 3(b) 所示的简单的离轴非球面半反射镜^[48] 在后来的产品中得到应用, 如 Meta 2 和 Mira Prism, 由于光线只反射一次, 它的效率更高, 并且 FOV 可以达 90°^[49], 同时也使得系统结构更加紧凑。不过该方案体积庞大, 并且很难矫正离轴和边缘视场的像差, 从而引起较大的成像失真。图 3(c) 所示的自由曲面棱镜方案^[50] 巧妙地将 2 个折射面、1 个全内反射面和 1 个部分反射面合并到 1 个元件中, 这种有趣的配置中所有表面都是自由的, 提供了优秀的图像质量^[51], 整个系统在 FOV、eyebox 和体积之间具有良好的平衡。不过为了消除透射环境光在主棱镜的折射, 通常需要增加 1 个补偿器, 这进一步增大了系统的体积。

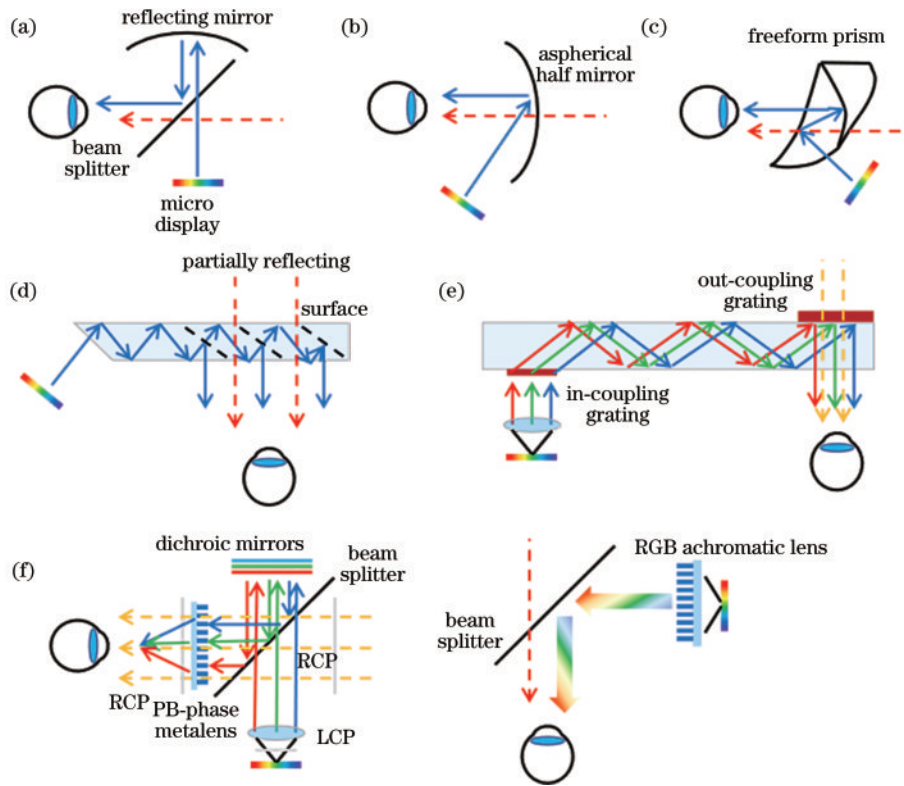


图 3 AR 近眼显示光学元件和成像技术。(a) Birdbath 光学; (b) 离轴非球面半反射镜; (c) 自由曲面棱镜; (d) 几何光波导; (e) 衍射光波导; (f) 超表面、超透镜

Fig. 3 AR near-eye display optical elements and imaging techniques. (a) Birdbath optics; (b) off-axis aspherical half mirror; (c) freeform prism; (d) geometric optical waveguide; (e) diffractive optical waveguide; (f) metasurface, metalens

目前市面上多数 AR-HMD 采用图 3(d) 所示的几何光波导^[52-53] 和图 3(e) 所示的衍射光波导方案, 比如 HoloLens 1、Magic Leap 2、Lumus、珑璟光电的 LCE2105H 和 DWG-1。几何光波导的核心是要精确设计每个透射部分反射的镜面, 因而加工过程复杂、难度较高, 导致产品良率低。衍射光波导方案的核心元件是衍射光栅^[54], 主要有矩形光栅、闪耀光栅和倾斜光栅等表面浮雕光栅 (SRG)^[55], 以及体全息光栅 (VHG)。衍射光栅轻薄、设计灵活, 具有优秀的光学

性能, 不过成像时由于衍射色散, 会存在彩虹效应和光晕。VHG 属于一种 HOE^[8, 56-57], 利用光聚合物记录全息术中的目标波和参考波的干涉条纹, 通过调制透光率、折射率或分子方向, 将干涉条纹转换为物理光栅^[58]。随后, LCHOE 也被提出来应用于 AR 显示^[45, 59], 因其偏振特性, 可以实现多种实用功能的复用。近期, 基于广义折反射定律的超表面元器件, 比如图 3(f) 所示的几何相位超透镜和离散波长消色差超透镜, 随着微纳加工技术、半导体工艺的迅速发展, 也逐

渐登上了 AR 发展的历史舞台。超表面元器件具有更大的设计自由度、更强大的光学调控性能、亚波长的结构厚度、更大的色散调控能力等优点,目前已经具备非常好的发展潜力。

2.2 微型显示设备研究进展

DLP 是一种反射式显示设备,它的核心元件是数字微镜器件(DMD),如图 4(a)所示。DMD 是一种调幅装置,通过控制双稳态微反射镜的倾斜角度来获得灰度级的亮像素。DLP 亮度高、响应速度快且光效率高,但设计复杂、体积大且成本高。图 4(b)为 LCoS 的结构示意图^[60],它是液晶显示(LCD)与硅互补金属氧化物半导体(CMOS)集成电路结合的新型反射式显示技术。LCoS 通过独立控制每个像素内的液晶分子的偏转来调制光的偏振和相位。LCoS 显示技术具有体积小、色域广和成本低等优点,但同时具有响应速度慢、对比度低和功耗高的缺点。DMD 和 LCoS 都无法自发光,依赖以 LED 或激光作为光源的光照明系统,它们的彩色图像生成可以通过滤光片或颜色顺序寻址来实现。为了实现快速响应、大视角、低功耗、高亮度和高分辨率的显示设备,自发光 OLED 显示技术应运

而生。图 4(c)所示为 OLED 器件的结构原理图^[61-62],它的发光机理是施加电压后电子与有机层作用激发产生可见光。因为不需要 LED 等照明系统,它通常比 DMD 和 LCoS 更加紧凑,但是采用有机发光材料导致使用寿命受限。而 micro-LED 利用无机 LED 作为发光光源^[17, 61, 63],它把毫米级的 LED 压缩到了微米级,形成超小间距并阵列化,因此可以达到超高像素和分辨率,它的结构原理如图 4(d)所示。Micro-LED 的体积小、亮度高、寿命长、响应速度快且功耗低,因此被广泛认为是下一代微显示技术,目前在 AR/VR 显示上也有较多应用。另外一种独特的、新型的微显示技术是基于微机电系统(MEMS)的 LBS 系统^[64],如图 4(e)所示,它利用人眼视觉迟钝,以非常高的频率发出脉冲振动,从而使人眼感受到的是静止的画面。该方案具有紧凑结构、大 FOV、高亮度、低功耗、高对比度和高分辨率等优点。近期,谷歌 North 的产品 Focals 和意法半导体的新型 AR 眼镜都采用 LBS 技术。虽然目前微显示技术发展迅速且种类繁多,但是需要对其进行合理选择来搭配近眼显示光学系统,以实现高性能的 VR/AR 显示。

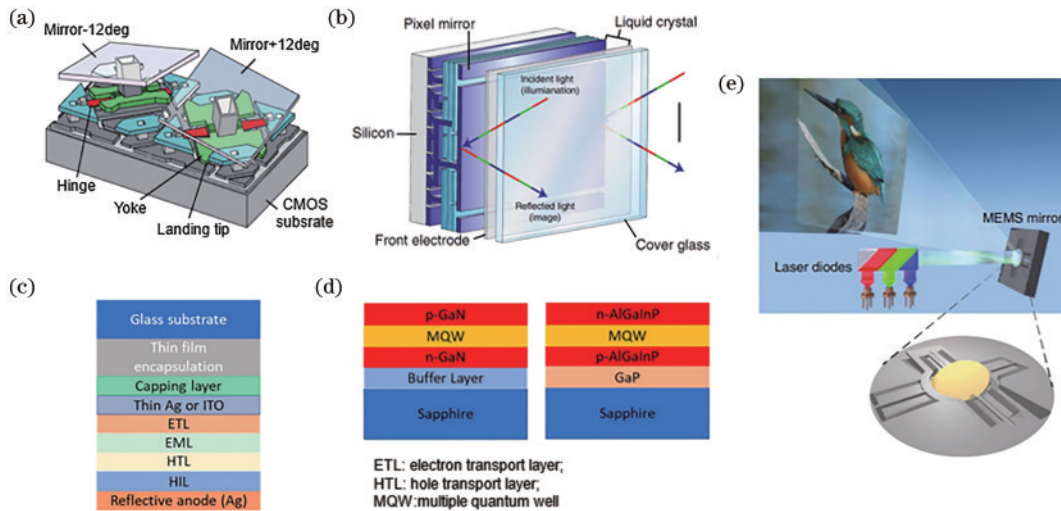


图 4 微型显示设备。(a)DMD;(b)LCoS^[60];(c)OLED 结构原理图^[61-62];(d)micro-LED 结构原理图^[61, 63];(e)LBS^[64]

Fig. 4 Micro-display devices. (a) DMD; (b) LCoS^[60]; (c) OLED structure schematic^[61-62]; (d) micro-LED structure schematic^[61, 63]; (e) LBS^[64]

3 超表面在 VR/AR 技术中的研究进展

超表面 VR/AR 显示技术是近几年才涌现出的前沿研究方向,是结合了先进的 VR/AR 显示系统和超薄、轻量化、可定制的超表面、超透镜光学元件的优势而诞生的新颖技术。它目前还处于初步发展阶段,但已经表现出了非常有前景的应用趋势,并有可能将当前系统的性能等级提升到一个新的高度。超表面在 VR/AR 技术领域的研究主要包括两个方面:一方面是在近眼显示光学系统中,宽带几何相位超透镜、离散消色差超透镜、metaform、超表面光波导、片上超表面

等取代了部分传统光学元件,提供高分辨率、高质量的 VR/AR 显示;另一方面,在微型显示设备中,超表面可以显著增强 LED 和 OLED 的发射光谱,并为 VR/AR 系统带来具有高亮度等特性的图像显示。本节将介绍超表面和超透镜的发展历程和以上几种超表面的原理和性能,在 VR/AR 近眼显示光学元件和微型显示器中的应用,及超表面的微纳制造工艺和大规模批量制备工艺。

3.1 超表面的研究进展

2011 年,哈佛大学 Capasso 研究团队^[19]首先提出广义 Snell 定律,利用 V 形金属纳米天线的等离激元共

振获得了相位突变,构造了界面相位梯度并实验观察到光束异常偏转。图 5(a)为 8 个纳米天线覆盖 0 到 2π 的离散相位调制结果,通过人为定制的排布方式就可以使光线以设计的角度偏转。2013 年,普渡大学的研究团队^[32]利用 V 形金属纳米孔提供的振幅和相位的同时调制,如图 5(b)所示,获得了超薄的超表面全息图,厚度仅为 30 nm,是当时已知的最薄的全息元件。不过金属超表面固有欧姆损耗导致的低效率限制了其在众多实际场景中的应用,因而研究人员提出具有高折射率的全介质超表面,以实现高效率的光学元器件。2016 年,哈佛大学研究团队^[25]利用介质材料 TiO_2 提出了 metalens 的概念,并实验验证了其透镜聚焦效果。通过旋转 TiO_2 纳米柱的空间角度,如图 5(c)所示,就可以调节几何相位[又称 Pancharatnam-Berry (PB) 相位],构造了球面波前,实现聚束,在可见光波段不仅获得高效率还实现了接近衍射极限的分辨率。介质纳米柱的几何相位和传播相位调制特性使得超表面可以生

成特殊光束^[65],图 5(d)为基于 TiO_2 超表面的涡旋光束产生器。此外,亚波长超表面单元的结构色散性质赋予了其强大的色散调控能力。2018 年,南京大学研究团队^[66]提出了一种由 GaN 谐振单元组成的覆盖整个可见光区域的消色差 metalens,如图 5(e)所示,平均效率达 40%,并展示了全彩成像。不过该类型的工作受 PB 相位设计原理的限制,只能工作在圆偏振入射状态。随后,哥伦比亚研究团队^[67]创建了具有复杂几何截面的超表面数据库,以提供不同的相位色散,实现了偏振无关的消色差 metalens,聚焦效率高达 50%。然而,超表面单元由于物理极限的限制,无法满足透镜边缘所需的较大的相位群延迟要求,数值孔径和透镜的半径无法兼顾,因而大面积连续波长消色差超透镜的设计具有瓶颈。近些年,得益于超表面的平面化、超薄性、轻量化、多参量调控的特性以及微纳加工工艺的发展,各种光学应用如 3D 全息^[68-69]、光量子^[70-71]、偏振检测^[72-73]、光谱成像^[74]及光学非线性^[75-77]等也相继被探索。

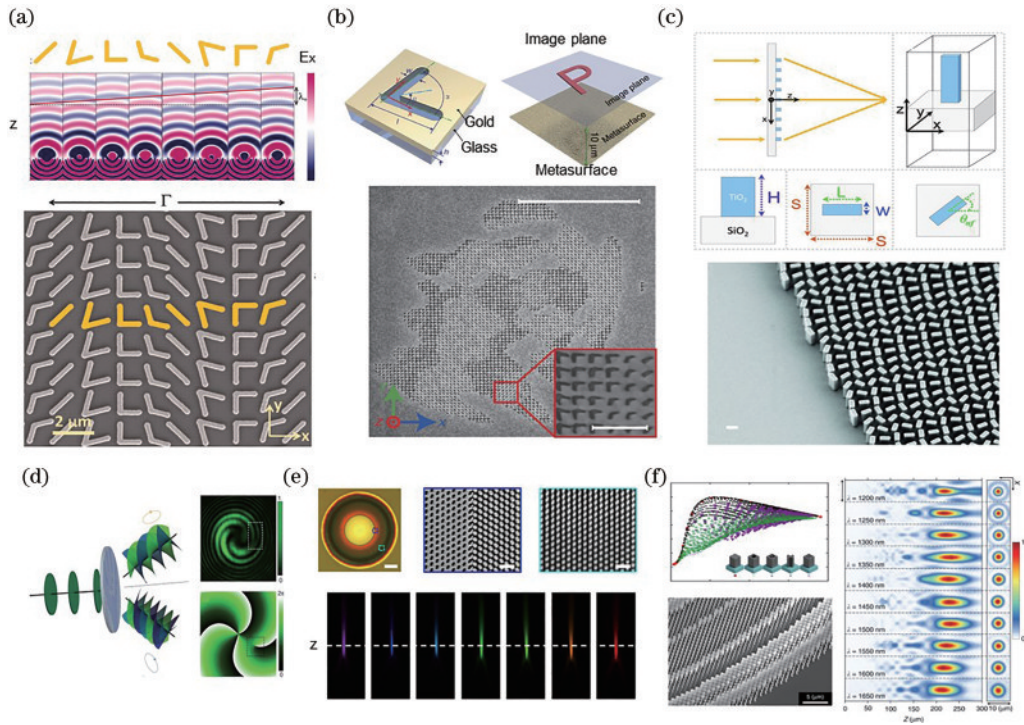


图 5 超表面和超透镜的研究进展。(a)基于 V 形纳米天线的相位调控器件和加工结果^[19]; (b)基于 V 形纳米孔的超表面全息^[32]; (c)介质超透镜和加工结果^[25]; (d)基于介质超表面的涡旋光产生器^[65]; (e)基于几何相位色散补偿的消色差超透镜^[66]; (f)偏振不敏感的消色差超透镜^[67]

Fig. 5 Research progress of metasurface and metalens. (a) V-shaped nanoantenna-based phase-modulated device and fabrication results^[19]; (b) V-shaped nanohole-based metasurface holography^[32]; (c) dielectric metalens and fabrication results^[25]; (d) vortex light generator based on dielectric metasurface^[65]; (e) achromatic metalens based on geometric phase dispersion compensation^[66]; (f) polarization-insensitive achromatic metalens^[67]

3.2 基于超表面的 VR/AR-HMD 近眼显示光学元件

超表面和超透镜以前所未有的操控光的能力为其广泛应用于 AR/VR 先进显示带来了机遇。2018 年,首尔国立大学的研究团队^[78]首先提出了利用各向异性超表面单元,构造高数值孔径 (NA)、大孔径和宽带的

超透镜,实现了一个紧凑的、大 FOV、高分辨率和全彩的 AR 近眼显示器。图 6(a)所示的 SiO_2 衬底上的多晶硅矩形纳米柱可以建模为琼斯矩阵,因此圆偏振光入射时复透射系数可以表达为

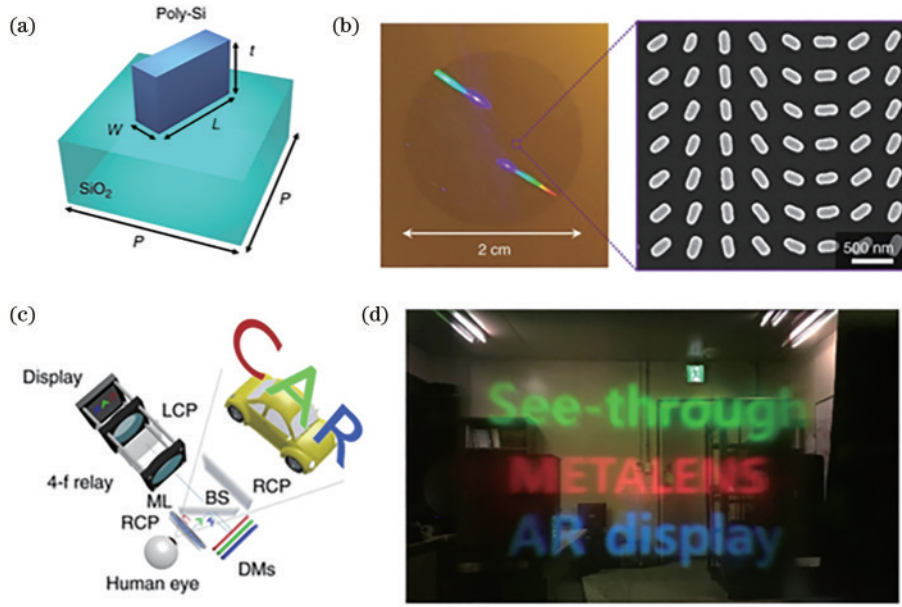


图 6 几何相位超透镜的全彩 AR 近眼显示^[78]。(a)超透镜的结构单元;(b)制造的超透镜的光学图和 SEM 图;(c)超透镜的透视近眼显示;(d)红、绿、蓝三色 AR 成像

Fig. 6 Full-color AR near-eye display of the geometric phase metalens^[78]. (a) Structural unit of the metalens; (b) optical image and SEM image of the fabricated metalens; (c) perspective near-eye display of the metalens; (d) red, green, and blue AR imaging

$$T|\sigma\rangle = \frac{t_1 + t_s}{2}|\sigma\rangle + \frac{t_1 - t_s}{2}e^{-j2\sigma\theta}|\sigma\rangle, \quad (1)$$

式中:右圆偏振和左圆偏振的参数 σ 分别为+1和-1;线偏振光沿纳米柱长轴 L 和短轴 W 的复透射系数分别为 t_1 和 t_s 。透射光由共偏振分量 σ 和具有 $2\sigma\theta$ 相移的交叉分量 $-\sigma$ 组成,这个相位就是PB相位,它是纯粹的几何效应,具有宽带效应。可以看出,基于矩形纳米柱的超表面器件在共偏振传输模式下相当于透明玻璃,在交叉偏振传输模式下可以设计为凸透镜,利用凸透镜的相位分布来实现虚拟信息成像,这种特性在AR显示中起着非常重要的作用。

该团队利用电子束光刻和纳米压印工艺制作了直径为2 cm的超透镜样品,如图6(b)左图所示,右图为该样品的局部放大扫描电子显微(SEM)图像。该器件对波长为660、532和473 nm的红(R)、绿(G)、蓝(B)光的NA分别为0.61、0.53和0.49。基于所制作

的超透镜,他们设计了一个如图6(c)所示的实现全彩AR近眼显示的系统原型,该系统可以认为是birdbath方案的改进,它将单色成像和彩色成像的FOV分别提升到了 90° 和 76° 。图6(d)显示了该系统使用二向色镜组实现的全彩AR显示,其中不同颜色的图像都漂浮在相同的深度。可以发现,超透镜的球差比传统透镜要小,所以尽管视场较宽,图像在边缘区域的畸变并不大。不过,该原型机需要使用3个二向色镜来消除超透镜的色差,这会使系统的体积增大,因而进一步发展消色差超透镜是可行的解决方案。

为了消除超透镜在VR/AR显示系统中色差的影响,2021年,哈佛大学研究团队^[79]将超透镜分为多个区域,通过光的相干干涉和色散工程的协同设计,实现了红绿蓝(RGB)离散波长消色差超透镜,并验证了该透镜的VR/AR成像性能。透镜每个区域内的相位分布可以展开为泰勒级数:

$$\begin{aligned} \phi_i(\omega, r) &= \frac{\omega}{c} \left[F(\omega) - \sqrt{F(\omega)^2 + r^2} \right] + \phi_0(\omega) = \frac{\omega_0}{c} \left[F(\omega_0) - \sqrt{F(\omega_0)^2 + r^2} \right] + \\ & \frac{\partial \phi_i(\omega, r)}{\partial \omega} \Big|_{\omega = \omega_0} (\omega - \omega_0) + \frac{\partial^2 \phi_i(\omega, r)}{2 \partial \omega^2} \Big|_{\omega = \omega_0} (\omega - \omega_0)^2 + \phi_0(\omega), \end{aligned} \quad (2)$$

式中: r 是径向坐标; ω_0 是中心频率; $F(\omega_0)$ 是焦距; $\phi_0(\omega)$ 是超透镜中心的相位。所设计的相位分布是利用空间变化的超表面单元实现的,超表面单元可以独立控制相位、群延迟(GD) $\partial \phi_i / \partial \omega$ 和群延迟色散(GDD) $\partial^2 \phi_i / \partial \omega^2$ 。进一步地,他们利用移动渐近线的方法优化了区域过渡的位置和相位不连续。某一频率

ω 处的相位不连续与中心频率 ω_0 的关系为

$$\begin{aligned} \Delta \phi(\omega, r_i) &= \Delta \phi(\omega_0, r_i) + \\ & \frac{\omega_0}{c} \left[F(\omega_0) - \sqrt{F(\omega_0)^2 + r_i^2} \right] - \\ & \frac{\omega}{c} \left[F(\omega) - \sqrt{F(\omega)^2 + r_i^2} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

式中: r_i 是各区域边界的径向坐标, $r_0 = 0$ 。利用超表

面单元和上述设计准则可以实现离散波长下独立的相位轮廓、每个区域内的色散和区域边界的相位不连续。使用这种方法,他们展示了一种令人印象深刻的直径为 2 mm、NA 为 0.7、几乎衍射极限聚焦的离散消色差超透镜设计结果,图 7(a)为他们制备的超透镜的 SEM 图,由不同几何形状和旋转角度的 TiO₂ 纳米柱组成。图 7(b)为超透镜在 XZ 平面的 RGB 波长聚焦强度分布图,三个焦斑之间的最大焦移约为 1 μm,仅为设计焦距的 0.1%。基于自制光纤扫描微

型显示器,设计了该 RGB 消色差超透镜的 VR 平台,如图 7(c)所示,并实验获得了 RGB 混合而成的彩色 VR 图像,如图 7(d)所示。将该消色差超透镜进一步应用于 AR 显示系统,如图 7(e)所示,现实场景中浮动的三色字母虚拟像如图 7(f)所示。总之,这是离散消色差透镜应用于紧凑 VR/AR 近眼显示的一个很好的起点,而实现大 FOV 的高 NA 消色差透镜、将超透镜的尺寸扩大到厘米尺度和提高成像效率将是下一步的目标。

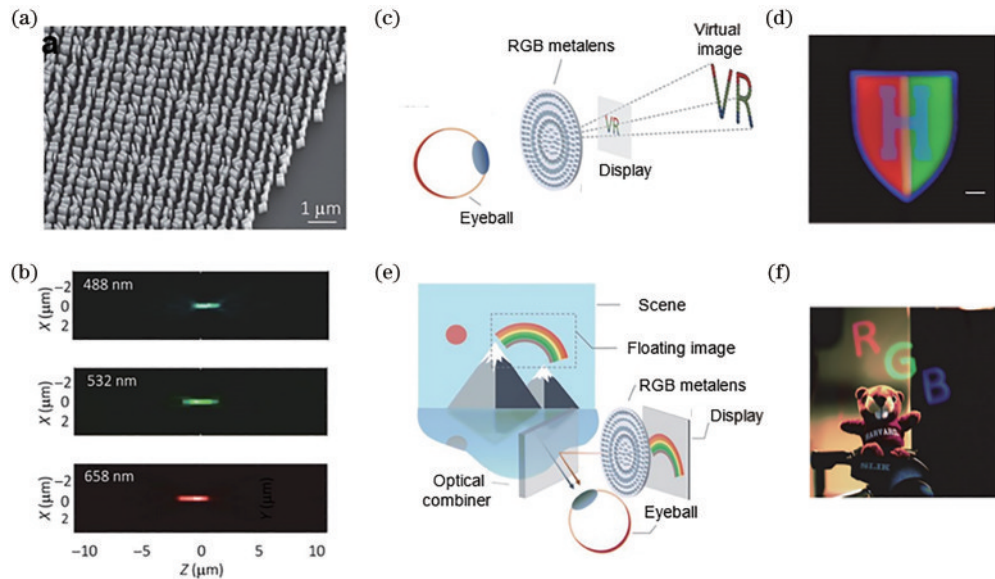


图 7 RGB 消色差超透镜用于 VR/AR 近眼显示^[79]。(a)制造的超透镜的 SEM 图;(b)超透镜在 XZ 平面上的焦强度分布;(c)VR 模式示意图;(d)RGB 混合而成的 7 种颜色的 VR 图像;(e)AR 模式示意图;(f)AR 的 RGB 颜色成像结果

Fig. 7 RGB achromatic metalens for VR/AR near-eye display^[79]. (a) SEM image of the fabricated metalens; (b) focal intensity distribution of the metalens in the XZ plane; (c) schematic of VR mode; (d) VR image with 7 colors made by RGB mixing; (e) schematic of AR mode; (f) RGB color imaging result of AR

为了进一步解决大口径消色差超透镜的设计问题,2022年他们通过逆向设计来优化离散消色差超透镜^[80],在给定约束条件下最大限度地提高了每个独立波长的焦点强度。由于极大地受到计算时间和内存容量的限制,传统的时域有限差分(FDTD)方法或有限元分析方法对直径为厘米级别的非周期三维器件进行建模并正向计算是不现实的。因此,他们提出如图 8(a)所示的基于局部场与格林函数卷积的三维快速近似正向模拟器,格林函数在空间是解析的,不需要傍轴近似,并且可以在后续的优化迭代中重复使用。这种方法在加快计算速度的同时又保证了矢量计算的准确性。逆向设计过程的伴随模拟器如图 8(b)所示,为了解决高维设计空间优化困难的问题,使用保守凸可分逼近的局部梯度优化方法,并且为了快速计算梯度,采用了伴随优化方法,正向模拟器和伴随模拟器循环迭代直至模型收敛。此外,他们还设计了圆偏振具有对称性的超表面单元,因而该透镜可以在任意偏振下都能很好聚焦。基于以上设计,他们提出了图 8(c)所示的 VR 系统,包括 micro-LCD 和图 8(d)所示的直径为 1 cm 的

RGB 消色差超透镜,并混合 RGB 成像结果模拟演示了 VR 全彩成像,如图 8(e)所示。这项工作将 RGB 离散波长消色差超透镜的直径增加到了厘米级别,并与微型显示器集成,比以往任何时候都更接近现实应用,其次偏振不敏感的超表面单元提升了聚焦效率并且更适合半导体工艺大规模和高质量的生产。未来的挑战是高阶像差的修正,如彗差和场曲,以及如何进一步提高聚焦效率以降低 VR 设备的功耗。

2021年,Rochester 大学研究团队^[81]提出 metaform 的概念,如图 9(a)所示,将自由曲面光学器件和超表面的综合优势集成到一个单一的光学组件中,可以解决 VR 系统紧凑外形的需求。光与自由曲面几何相互作用,通过光程差积累相位 ϕ_{freeform} ,并通过与纳米尺度超表面单元的相互作用积累相位 ϕ_{meta} ,因此 metaform 在点 $[x_0, y_0; z(x_0, y_0)]$ 的总相位可以表示为

$$\phi_{\text{metaform}}[x_0, y_0; z(x_0, y_0)] = \phi_{\text{meta}}(x_0, y_0) + \phi_{\text{freeform}}[x_0, y_0; z(x_0, y_0)] = \phi_{\text{meta}}(x_0, y_0) + \int_A^B \mathbf{k} \cdot d\mathbf{r}, \quad (4)$$

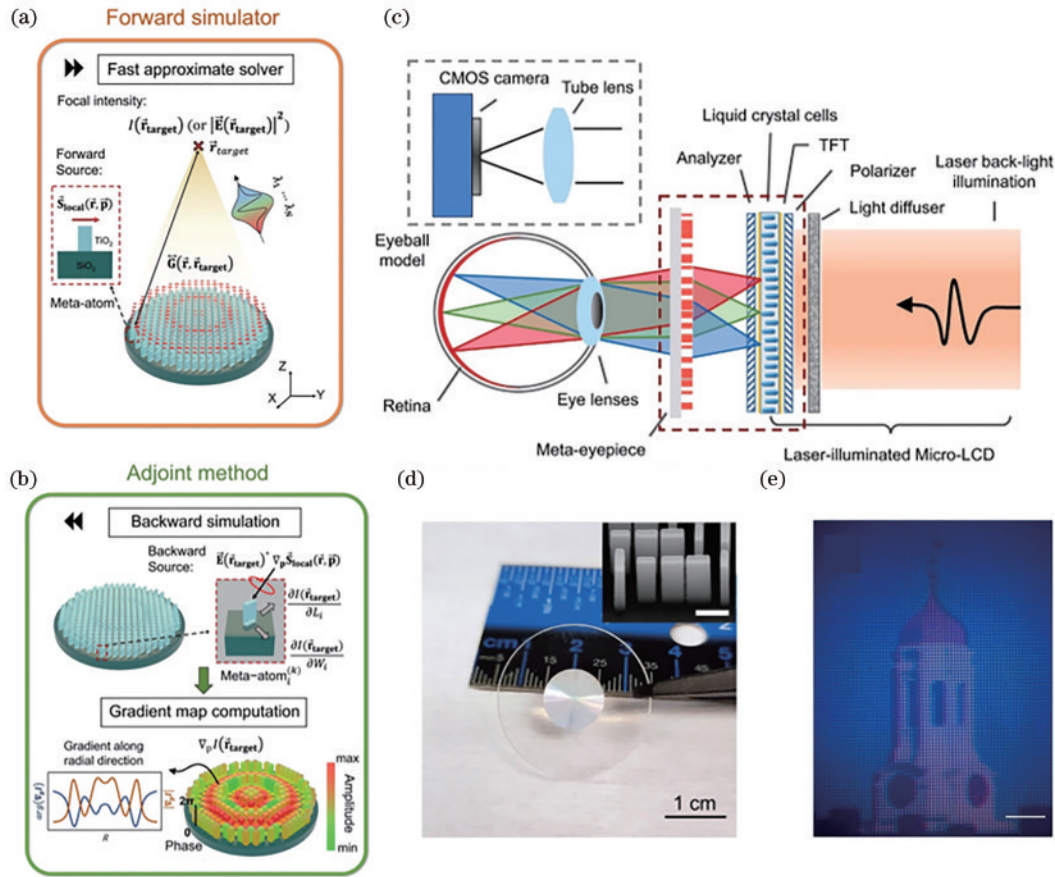


图 8 逆向设计的大口径离散波长消色差超透镜用于 VR 近眼显示^[80]。(a)利用快速近似解算器的前向模拟器;(b)基于伴随优化的逆向设计;(c)由 RGB 消色差超透镜和 micro-LCD 组成的 VR 近眼显示装置示意;(d)制造的超透镜的照片;(e)混合 RGB 图像通道模拟全彩 VR 成像结果

Fig. 8 Inverse design of discrete wavelength achromatic metalens with large aperture for VR near-eye display^[80]. (a) Forward simulator using fast approximate solver; (b) inverse design based on concomitant optimization; (c) schematic of VR near-eye display device consisting of RGB achromatic metalens and micro-LCD; (d) photograph of the fabricated metalens; (e) simulation result of full-color VR imaging obtained by mixing RGB image channels

式中; k 是波矢大小。通过合理设计 ϕ_{metaform} 的期望空间分布,可以生成目标衍射图像,比如图 9(a)中的数字“4”。虽然自由曲面和超表面可以单独设计,但是需要考虑它们的空间特征关系。图 9(b)为制造的 metaform,它整体被设计成符合眼镜的非球面形状。基于此,他们设计了图 9(c)所示的基于 metaform 元件的 AR/VR 显示器原型机。不过,由于上述的反射式 metaform 是不透明的,因此限制了其在 AR 中的应用。但某些限制一方面可以通过比波长大得多的随机直径的 metaform 阵列来克服,但是这样牺牲了来自现实景物的光透过率;另一方面,开发透射式的 metaform 将是非常有必要的。

超表面光波导是一种实现紧凑的高性能 AR 显示非常有前景的光学元件。2021 年,密歇根大学研究团队^[82]提出了如图 10(a)所示的基于 PB 相位的偏振复用超表面光栅波导和两个衍射光栅波导组成的 AR 显示系统。由于作为耦合的超表面光栅对左右圆偏振光有相反的相位调制,因此,承载着两幅立体图像的具有

不同手性的入射光会沿着相反的方向耦合,最终耦出衍射光栅进入人的左右眼,从而产生沉浸式的三维视觉体验。这种偏振复用耦合超表面光栅可以简化波导式三维立体 AR 显示的配置,使系统更紧凑、更轻和更容易集成。虽然他们只演示了单色成像,但是传统的多层波导堆叠方案可以引入该系统实现 RGB 彩色显示。除此之外,2022 年加州大学洛杉矶分校的研究团队^[83]还提出了如图 10(b)所示的基于超表面光学元件(MOE),即超表面光波导的 AR 显示系统。他们通过对激发传播和衍射模式的仔细色散调控,实现了高分辨率全彩 AR 显示原型。同时,通过对超表面每个单元进行精心设计,该原型机实现了 1080 像素分辨率、 40° 以上的 FOV、超过 1% 的整体输入输出效率,相较于 HOE,效率得到提升,有助于更好地将增强的虚拟图像嵌入到真实世界。

此外,片上集成的超表面全息也被用于实现高性能、轻量化和紧凑的 AR 显示。2022 年,武汉大学的研究团队^[84]提出了如图 11(a)所示的一种集成在波导上

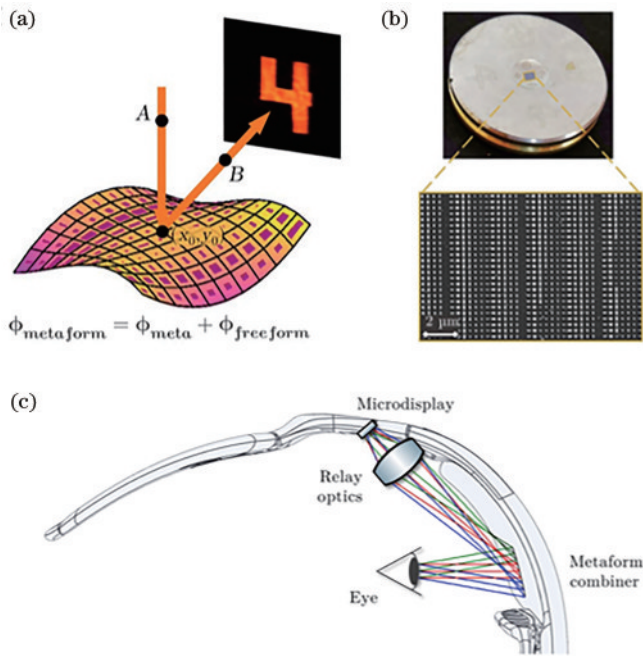


图9 Metaform用于AR近眼显示^[81]。(a)Metaform的示意图；(b)制造出来的metaform的照片和局部放大的SEM图；(c)基于metaform的AR眼镜架构的自上而下的草图
Fig. 9 Metaform for AR near-eye display^[81]. (a) Schematic of metaform; (b) photograph and locally zoomed SEM image of the fabricated metaform; (c) top-down sketch of AR glasses architecture based on metaform

的偏振复用超表面,实现了双通道的AR近眼全息显示和半透明屏幕显示,右边插图是他们制作的超表面器件的SEM图像。沿 x 方向提供光激发时,该器件展示“地球仪”的半透明显示屏图像,同时投影“葡萄”AR全息图像,沿 y 方向切换光激发方向,会触发“房子”屏幕显示和“菠萝”AR投影。不过,该超表面一旦制作完成,用于AR显示是静态的,因此如何进行动态显示是下一步需要研究的课题。此外,他们还提出了基于层折叠超表面集成电驱动液晶平台的AR全息显示系统^[85]和独立编码的三通道超表面用于RGB三原色AR全息显示^[86]。有趣的是佐治亚理工学院的研究团队^[87]曾报道过将超表面全息应用到更加先进的隐形眼镜

AR显示的内容,如图11(b)所示,他们预先设计好超表面的相位分布,然后以全息投影的方式将虚拟信息直接投射到视网膜上。不过与传统的全息技术不同,该方案是以逐像素的方式投射虚拟信息的。总之,这类基于超表面全息AR显示可以结合多通道复用功能,有望广泛应用于紧凑、轻量化和多功能的AR系统。

3.3 基于超表面的微型显示设备

超薄且平面化的光学超表面不仅在控制光波的发射、调制、整形和检测等方面具有强大能力,而且与半导体工艺兼容且易于集成,因此在微型显示设备中引入超表面是实现高效率和高性能VR/AR系统的有效且有趣的途径。为了满足下一代微型显示器对超高像素密度的需求,2020年,韩国三星电子研究团队^[88]报道了一种基于超表面反射镜的法布里-珀罗(FP)腔的新颖OLED器件,称之为meta-OLED。如图12(a)所示,空间变化的纳米柱子被他们精心设计在银反射面上,形成超表面反射镜。不同于传统的OLED中RGB像素具有不同的物理镜像间距,该超表面反射镜的反射相位可调,因而在完全恒定的间距下实现了RGB像素的共振。通过改变纳米柱子的周期、半径以及传输层的厚度,可以调节发光光谱,创造出任意想要的颜色。他们将meta-OLED与传统的具有颜色过滤片的白光OLED进行性能对比,如图12(b)所示,发现前者的发射光强大概是后者的2倍并且谱线更窄。随后他们验证了超表面反射镜在可见波长范围内提供了广泛的反射相位可调谐性,且提供了高反射率,确保了高亮度效率和颜色纯度。他们制造了80 nm高度纳米柱的超表面反射镜,并采用RBBG模式,图12(c)为其SEM图像及对应的1.2 μm像素模式电致发光图像。他们拍摄了随像素尺寸变化的电致发光图像,发现即使将像素尺寸降至2 μm和1.2 μm,也没有观察到明显的颜色失真或亮度降低,这已经完全胜任甚至超越了当前的VR/AR显示对微型显示设备的像素分辨率需求。总之,基于空间变化超表面反射镜的meta-OLED具有超高像素密度、高发光效率、高颜色纯度、大规模制造等优点,可以预见它将成为下一代领先的微型显示器件。

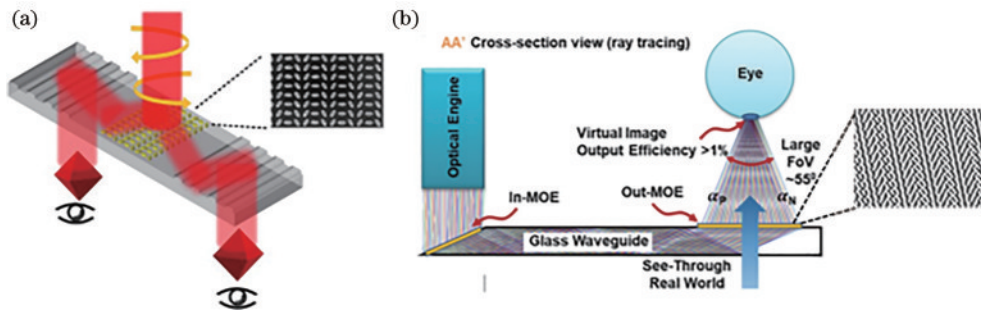


图10 超表面光栅用于AR近眼显示。(a)基于偏振复用超表面光栅波导的立体显示^[82];(b)基于超表面光栅的高性能AR波导眼镜^[83]
Fig. 10 Metasurface grating for AR near-eye display. (a) Stereo display based on polarization multiplexed metasurface grating waveguides^[82]; (b) high-performance AR waveguide glasses based on metasurface gratings^[83]

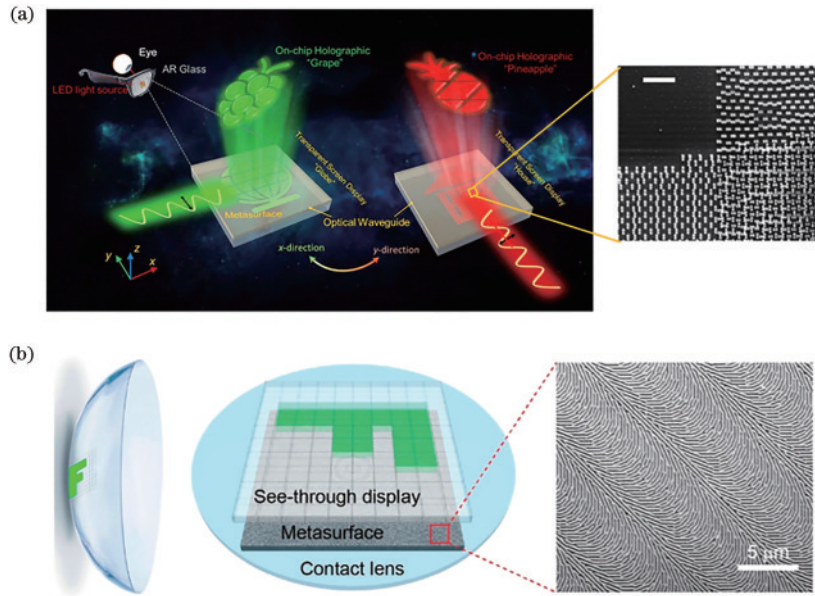


图 11 超表面全息 AR 显示。(a)片上超表面用于复用的 AR 全息显示^[84]；(b)超表面全息隐形眼镜用于 AR 显示^[87]

Fig. 11 Metasurface holographic AR display. (a) On-chip metasurfaces for multiplexed AR holographic display^[84]; (b) metasurface-based holographic contact lens for AR display^[87]

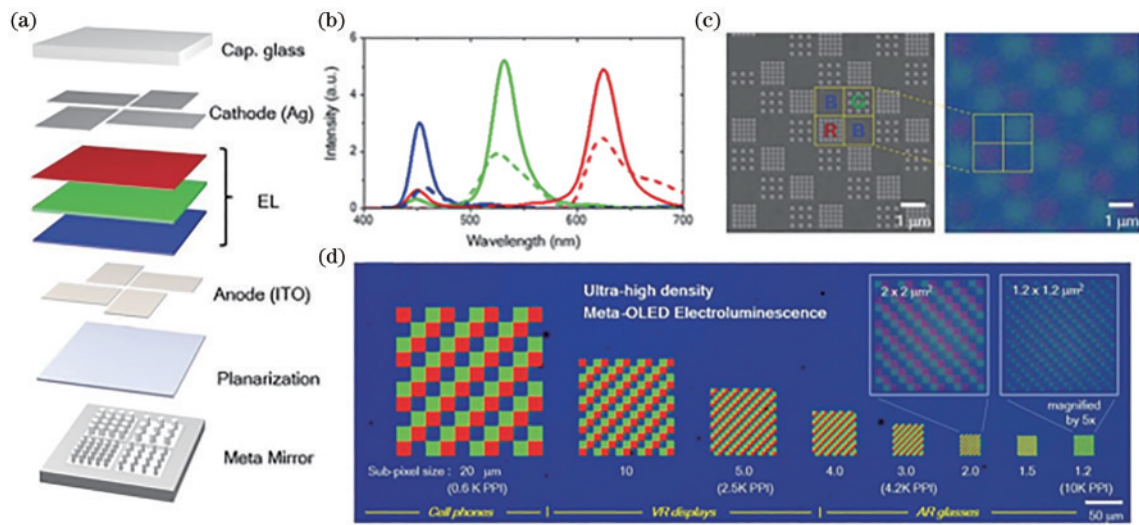


图 12 超表面驱动的 OLED 显示屏^[88]。(a)带有超表面反射镜的 meta-OLED 的设计示意图；(b) meta-OLED 的 RGB 电致发光的光谱，实线为带有超表面反射镜的 OLED；(c)1.2 μm 亚像素模式的 meta-OLED 的 SEM 图像及其电致发光图像；(d)随像素尺寸大小变化的 meta-OLED 电致发光图像

Fig. 12 Metasurface-driven OLED display^[88]. (a) Design schematic of a meta-OLED with a metasurface mirror; (b) spectra of RGB electroluminescence of a meta-OLED, with the solid line being the OLED with a metasurface mirror; (c) SEM image of a 1.2 μm subpixel mode meta-OLED and its electroluminescence image; (d) meta-OLED electroluminescence image with pixel size variation

LED 是众多微型显示设备的重要组成部分和发光光源,比如 DMD、LCoS 和 micro-LED 等,它的发光强度、效率和发射方向直接决定了微型显示设备的性能。超表面可以对波形进行精准调控,为引导 LED 非相干光发射提供了新的有效途径。然而,由于缺乏对入射波的锁定相位调制,很难将超表面用于非相干光来实现单向光致发光,因此 2020 年加州大学圣巴巴拉分校研究团队^[89]报道了一种基于超表面设计的 InGaN/GaN 量子阱结构,如图 13(a)所示。这种量子

阱发射层与超表面的强耦合打破了传统光子晶体固有的对称性条件,从而在任意偏转角度下产生狭窄的、单向的传输和发射光锥。他们的研究还证明了引入超表面后该器件总量子效率提高了约 7 倍,和空气耦合光致发光的外部量子效率提高了约 100 倍。随后,南洋理工大学的研究团队^[90]也提出了一种在 GaP-LED 顶部集成硅超表面的紧密器件,如图 13(b)所示,该器件能够以期望角度定向发光,并且可以实现具有轨道角动量的涡旋光束发射。受自然界中萤火虫发光的启

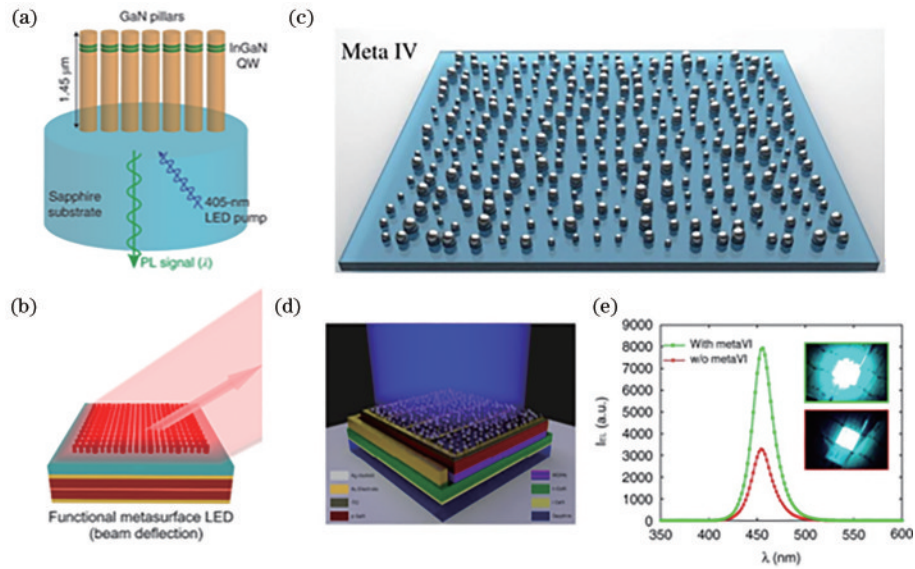


图 13 基于超表面的 LED 光源。(a) 基于 InGaN/GaN 量子阱超表面纳米柱的器件示意图^[89]；(b) LED 顶部集成的超表面^[90]；(c) 用于增强 LED 光提取的无序超表面示意图^[91]；(d) 顶部沉积了无序超表面的氮化镓基 LED 示意图^[91]；(e) 电致发光光谱强度^[91]。Fig. 13 Metasurface-based LED source. (a) Schematic of the device based on InGaN/GaN quantum well metasurface nanopillars^[89]；(b) metasurface integrated on top of the LED^[90]；(c) schematic of disordered metasurface for enhanced LED light extraction^[91]；(d) schematic of GaN-based LED with disordered metasurface deposited on top^[91]；(e) electroluminescence spectral intensity^[91]

发, 2021 年伯明翰大学的研究团队^[91]提出了一种如图 13(c) 所示的无序的超表面, 用于对整个可见光谱的光提取。为了证明这种超表面的耦合增强, 他们将其集成到工厂制造的蓝光 GaN-LED 上, 如图 13(d) 所示。图 13(e) 展示了该器件在是否具有顶层超表面的情况下的电致发光光谱, 可以发现具有超表面的器件的光谱强度是没有超表面的器件的 1.4 倍, 并且没有显著的峰值波长偏移, 也没有拓宽峰值宽度。此外, 他们还测得在光致发光的情况下, 无序超表面具有 1.7 倍的光谱强度增强。类似的单步制造、高效的光提取超表面策略也有可能应用于基于量子点或钙钛矿的下一代 LED。总之, 超表面与 LED 的紧凑集成, 使得非相干散射光源可以实现前所未有的控制, 代表着 VR/AR 微型显示向高效、多用途设备迈进了重要一步并将得到广泛应用。

3.4 超表面的制造技术进展

先进的超表面 VR/AR 显示需要通过可见光范围内的高效率介电材料来实现, 比如 TiO_2 、 Si_3N_4 和 GaN 等, 而要想获得精确的、高深宽比的纳米结构, 又需要先进微纳加工工艺的保证。其中, TiO_2 是一种 CMOS 芯片中的金属氧化物, 与半导体制造工艺兼容, 因此以 TiO_2 为例首先介绍目前超表面的利用电子束光刻的两种主流制造工艺, 即共形填充工艺^[92-93]和硬掩模刻蚀工艺^[94]。

图 14(a) 为基于原子层沉积 (ALD) 的共形填充工艺制备 TiO_2 超表面的工艺流程图。首先在衬底上旋涂一定厚度的光刻胶, 这个厚度也就是决定最终纳米结构的高度; 通过电子束光刻曝光和显影后, 衬底表面

剩下超表面的逆结构光刻胶; 然后将样品放入 ALD 腔内, 沉积 TiO_2 直至完全填满光刻胶上的孔隙; 最后利用反应离子束刻蚀去除光刻胶顶部的残留 TiO_2 膜, 并去除残余的光刻胶, 就获得了 TiO_2 超表面纳米结构。共形填充工艺是一种只需要单步光刻、自下而上的纳米制造工艺, 它适用于任何可以通过 ALD 生长的材料, 可以提供高深宽比、各向异性、表面粗糙度非常小且高保真的介电纳米结构。

图 14(b) 为利用硬掩模刻蚀工艺制备 TiO_2 超表面的流程图。首先利用电子束沉积或离子束沉积在衬底上镀上一层 TiO_2 薄膜; 然后旋涂薄层光刻胶并电子束曝光, 显影之后在光刻胶上获得超表面图案; 之后利用电子束蒸发或热蒸发蒸镀金属铬掩模, 并剥离; 最后通过反应离子束刻蚀将图案转移到 TiO_2 薄膜上, 并用铬去除液去除顶层的铬掩模。硬掩模刻蚀工艺是自上而下的制造工艺, 它对曝光过程中光刻胶的厚度要求相对较低, 因为有效避免倾倒现象, 可以加工很复杂的结构。此外, 这种方案的制备速度较快, 且可以获得高深宽比和高陡直度的纳米结构。

VR/AR 显示系统对体积小、质量轻、成本低的大孔径光学元件的需求越来越大, 大孔径透镜可以在弱光条件下获得更好的成像效果和更大的 FOV, 因而大面积超表面和超透镜的批量制造至关重要。不过, 直接用电子束光刻等扫描制造方法不适合批量生产, 主要受限于加工时间和成本。近年来, 深紫外 (DUV) 光刻技术和纳米压印技术被用来克服这些限制。

DUV 光刻技术制备大面积超表面和超透镜的工艺流程^[95]如图 15 所示。首先在 SiO_2 晶圆上镀上一层

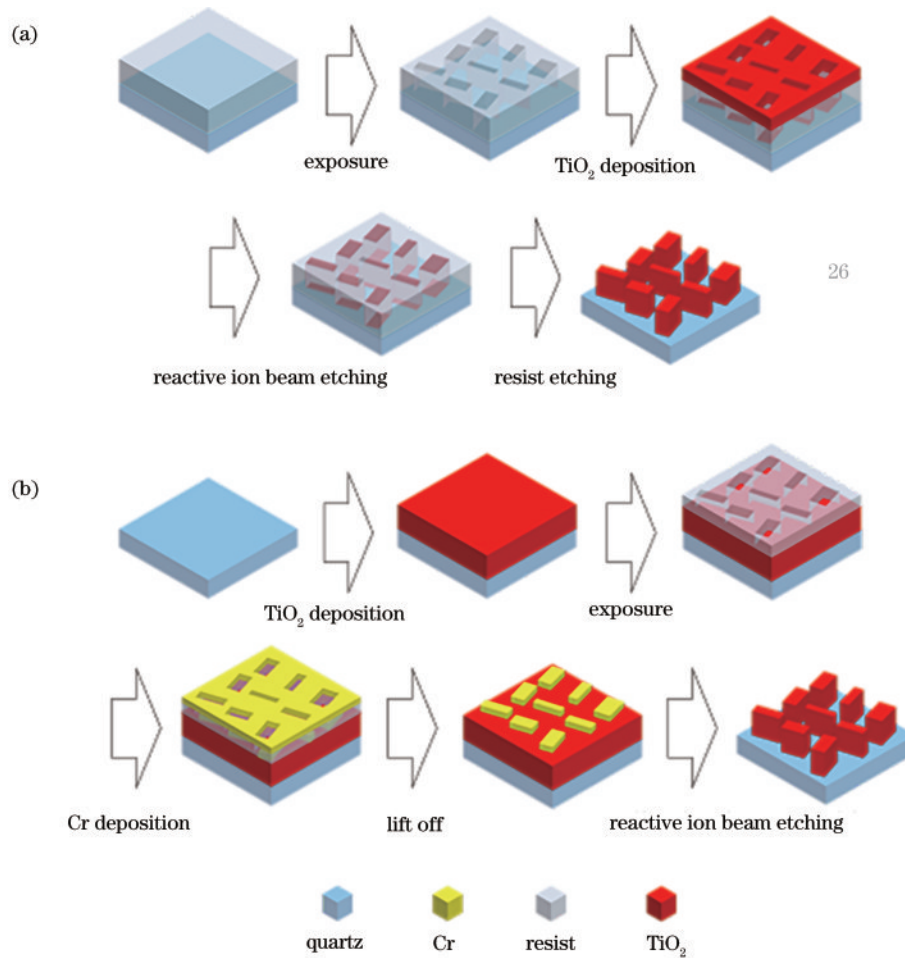


图 14 利用电子束光刻制造介质超表面的工艺。(a)共形填充工艺流程;(b)硬掩模刻蚀工艺流程
Fig. 14 Process for fabricating dielectric metasurface using electron beam lithography. (a) Flowchart of conformal filling process; (b) flowchart of hard mask etching process

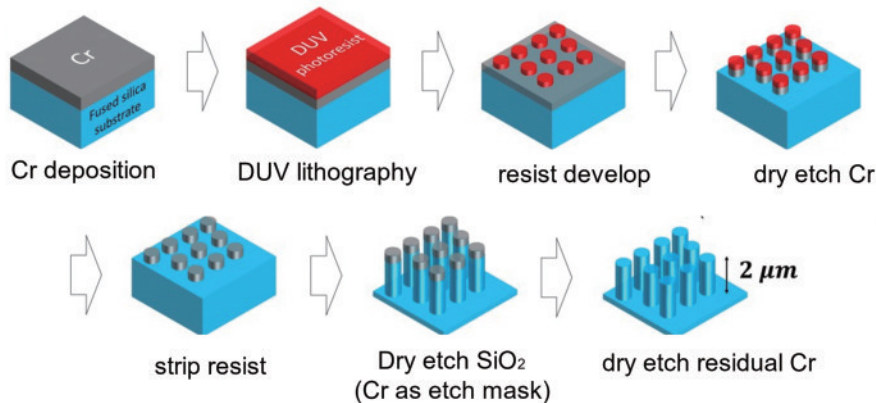


图 15 DUV 光刻技术制备大面积超表面^[95]
Fig. 15 Large-area metasurface fabricated by DUV lithography^[95]

铬,这里晶圆表面材料也可以是高折射率的材料,比如 TiO_2 、 Si_3N_4 、 GaN 和 Si 等;之后旋涂 DUV 光刻胶和减反层,利用 DUV 光刻进行曝光,显影后形成超表面图案;接着通过电感耦合等离子体刻蚀(ICP-RIE)将图案转移到铬层,这个过程允许对铬层进行选择性蚀刻,随后去除顶层光刻胶,只留下铬硬掩模;最后利用这层铬硬掩模,通过 ICP-RIE 刻蚀 SiO_2 到目标深度后,刻蚀去除

剩余的铬,从而留下了 SiO_2 超表面纳米结构。据我们所知,目前报导的采用 DUV 光刻和刻蚀工艺制造的单个超透镜的最大口径为 8 cm ^[96]。此外,通过使用更高分辨率、波长更短的光刻技术,比如极紫外(EUV)光刻,可以获得结构更加复杂、质量更高的大面积超表面。不过该制备工艺成本较高,可以通过该工艺制作母模板,并与纳米压印技术结合实现廉价的大批量生产。

批量制造超表面的纳米压印工艺如图 16 所示。首先在晶圆上旋涂压印光刻胶;接着将电子束光刻或 DUV 光刻等工艺制作完成的母模板通过机械力压印到压印光刻胶上;之后用紫外线照射来固化压印光刻胶,获得与超表面结构互补的逆结构模板;然后将逆结构模板作为母模板,重复 1 次上述制备方法,最终就得

到了压印制得的由压印光刻胶材料组成的大面积超表面纳米结构。不过,该工艺中组成纳米结构的光刻胶材料的折射率一般较低,需要在制造超表面时就考虑到。总之,纳米压印工艺过程简单、分辨率高、成本低,与光刻技术相辅相成,为大面积超表面制造提供了高效复制方案。

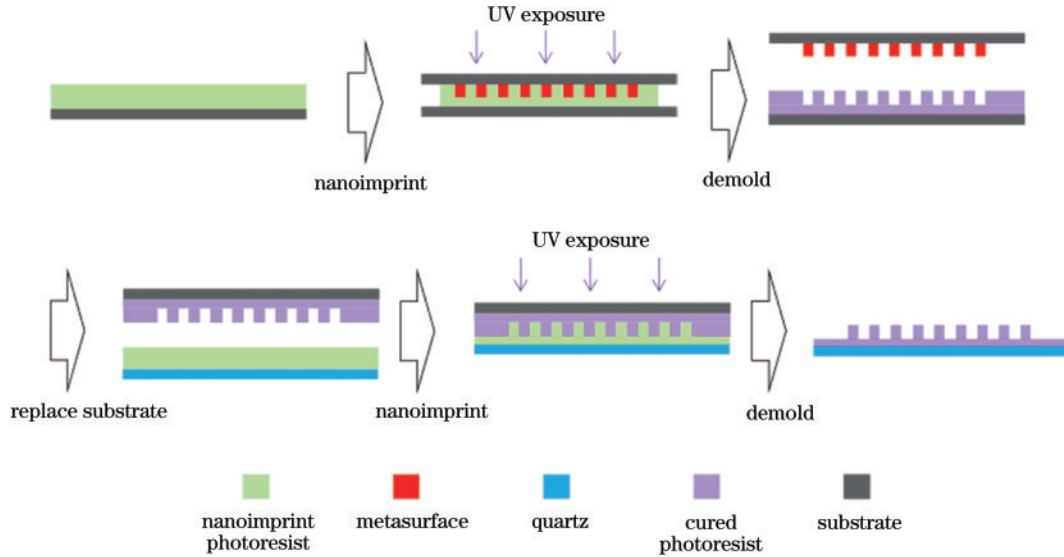


图 16 超表面的批量制造纳米压印工艺

Fig. 16 Batch fabrication nanoimprinting process for metasurface

4 总结与展望

VR/AR 技术被给予了极大的期望,它们将彻底改变用户、虚拟信息和现实世界的互动方式。VR-HMD 的光学元件发展至今已经经历了传统的基于 Snell 折反射定律的非球面透镜、菲涅耳透镜、偏振折叠 Pancake 等,到基于衍射的 PPHOE 和 LCHOE 的体全息型光学元件,最后到纳米光学的超表面。AR-HMD 的光学元件也经历了从传统分光镜、非球面反射镜等,到几何光波导、衍射光波导方案等,到纳米光学超表面的过程。总的来看,VR/AR 技术的光学元件朝着更小、更轻、更薄的趋势在进步。目前超表面和超透镜在 VR/AR 中起到了补充或者替代传统光学元件的作用,并表现出了色差小、FOV 大、分辨率高和结构紧凑等优异性能。其中,几何相位超透镜具有 FOV 大、分辨率高等优势,不过无法直接消除色差,需要借助二向色镜等光学元件,这无疑限制了系统的小型化;离散消色差超透镜的最大优势是消除了 AR/VR 显示中色差的影响,不过该方案的最大缺点是 FOV 较小,并且仍然存在高阶像差和低效率的缺点;metaform 相对传统自由曲面更加轻薄,调控自由度更多,不过设计相对较复杂,制造门槛高;超表面光波导相对于衍射光波导具有更大的设计自由度和更强的调制光波的能力,不过效率和色散是仍然存在的问题;片上超表面具有多通道复用的性能,设计灵活,目前最大的问题是这

种方案是一种被动的系统,也就是说结构一旦制造完成,就只能实现单一的成像。总之,基于超表面的 AR/VR 显示技术还处于初步发展阶段,技术还不成熟,不过随着技术的进步,超表面的优势会进一步在系统中体现出来,在应用时应充分利用各种方案的优势,也可以多种方案协同。此外,目前超表面多参量(偏振、振幅、相位和频率)调控以及复用能力的优势在 VR/AR 的应用中还没完全得以体现,应用于 VR 的大面积、高 NA 的连续波长消色差超透镜也没有得到解决。不过,尽管超表面具有超越传统光学元件的性能,但是目前超表面的制造成本相对传统光学元件没有优势,这是限制其在 VR/AR 技术中广泛应用的主要因素,未来随着大面积制造设备和工艺比如高分辨光刻和纳米压印技术的进一步发展,基于超表面的 VR/AR 显示将得到普及。开发透射式 metaform 应用于高透过率 AR 显示,具有大 eyebox、大 FOV、全彩的二维超表面光栅,动态的超表面 AR 全息显示,这些都是未来需要研究的方向。而对于微型显示器,除了增强光谱、光提取和定向发射外,一些其他的性能仍然有待探索,比如对于 LCD 发出的线偏振光、OLED 发出的非偏振光,偏振调控的超表面或许可以引入其中实现任意偏振出射定制,以及任意光束偏折的超表面在 LBS 中的应用等。随着创新设计和制造工艺的进步,超表面在 VR/AR 显示中将展现出更多超越传统光学元件的新功能和新性能并得到长足发展。

参 考 文 献

- [1] Cheng D W, Wang Q W, Liu Y, et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021(3): 114-133.
- [2] 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.
- [3] 姜玉婷, 张毅, 胡跃强, 等. 增强现实近眼显示设备中光波导元件的研究进展[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 28-44.
- Jiang Y T, Zhang Y, Hu Y Q, et al. Development of optical waveguide elements in augmented reality near-eye displays[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(1): 28-44.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Yin K, He Z Q, Xiong J H, et al. Virtual reality and augmented reality displays: advances and future perspectives[J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2021, 3(2): 022010.
- [8] 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.
- [9] Mystakidis S. Metaverse[J]. *Encyclopedia*, 2022, 2(1): 486-497.
- [10] Li H, Zhang X, Shi G W, et al. Review and analysis of avionic helmet-mounted displays[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(11): 110901.
- [11] Elia V, Gnoni M G, Lanzilotto A. Evaluating the application of augmented reality devices in manufacturing from a process point of view: an AHP based model[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 63: 187-197.
- [12] Wu H K, Lee S W Y, Chang H Y, et al. Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education[J]. *Computers & Education*, 2013, 62: 41-49.
- [13] Lee K. Augmented reality in education and training[J]. *TechTrends*, 2012, 56(2): 13-21.
- [14] Sielhorst T, Feuerstein M, Navab N. Advanced medical displays: a literature review of augmented reality[J]. *Journal of Display Technology*, 2008, 4(4): 451-467.
- [15] Sukhmani S, Sadeghi M, Erol-Kantarci M, et al. Edge caching and computing in 5G for mobile AR/VR and tactile Internet[J]. *IEEE MultiMedia*, 2019, 26(1): 21-30.
- [16] Katzourin M, Ignatoff D, Quirk L, et al. Swordplay: innovating game development through VR[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2006, 26(6): 15-19.
- [17] 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.
- 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.
- [18] Chen H W, Lee J H, Lin B Y, et al. Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(3): 17168.
- [19] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [20] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [21] Luo X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(9): 594201.
- [22] Capasso F. The future and promise of flat optics: a personal perspective[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 953-957.
- [23] He T, Liu T, Xiao S Y, et al. Perfect anomalous reflectors at optical frequencies[J]. *Science Advances*, 2022, 8(9): eabk3381.
- [24] 陈磊, 严金华, 郭焕祥, 等. 基于硅基超表面的高效率大角度光束偏转[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0305001.
- Chen L, Yan J H, Guo H X, et al. Highly efficient large-angle beam deflection based on silicon-based metasurface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0305001.
- [25] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [26] Lin R J, Su V C, Wang S M, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 227-231.
- [27] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 220-226.
- [28] Khorasaninejad M, Capasso F. Metalenses: versatile multifunctional photonic components[J]. *Science*, 2017, 358(6367): eaam8100.
- [29] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [30] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. Controlling the sign of chromatic dispersion in diffractive optics with dielectric metasurfaces[J]. *Optica*, 2017, 4(6): 625-632.
- [31] Chen W T, Zhu A Y, Capasso F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(8): 604-620.
- [32] Ni X J, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2807.

- [33] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [34] Jiang Q, Jin G F, Cao L C. When metasurface meets hologram: principle and advances[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2019, 11(3): 518.
- [35] Gigli C, Li Q T, Chavel P, et al. Fundamental limitations of Huygens' metasurfaces for optical beam shaping[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(8): 2000448.
- [36] Yue F Y, Wen D D, Xin J T, et al. Vector vortex beam generation with a single plasmonic metasurface[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(9): 1558-1563.
- [37] Li H P, Wang G M, Cai T, et al. Wideband transparent beam-forming metadvice with amplitude- and phase-controlled metasurface[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(1): 014043.
- [38] 张希纯, 吕金光, 张崇, 等. 基于超表面光场调控的阵列局域空心光束研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2105001. Zhang X C, Lü J G, Zhang C, et al. Multiple bottle beams based on metasurface light field control[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2105001.
- [39] Wang Y Q, Liu W Q, Meng X X, et al. Development of an immersive virtual reality head-mounted display with high performance[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 6969-6977.
- [40] Miyamoto K. The phase Fresnel lens[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1961, 51(1): 17-20.
- [41] Bang K, Jo Y, Chae M, et al. Lenslet VR: thin, flat and wide-FOV virtual reality display using Fresnel lens and Lenslet array[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2021, 27(5): 2545-2554.
- [42] Zhan T, Yin K, Xiong J H, et al. Augmented reality and virtual reality displays: perspectives and challenges[J]. *iScience*, 2020, 23(8): 101397.
- [43] Narasimhan B A. Ultra-compact pancake optics based on ThinEyes super-resolution technology for virtual reality headsets[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10676: 106761G.
- [44] Holder R, Carey M, Keir P. Virtual reality vs pancake environments: a comparison of interaction on immersive and traditional screens[M]//de Paolis L T, Bourdot P. *Augmented reality, virtual reality, and computer graphics. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2020, 12242: 114-129.
- [45] Tabiryan N V, Roberts D E, Liao Z, et al. Advances in transparent planar optics: enabling large aperture, ultrathin lenses[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(5): 2001692.
- [46] Cado H, Moliton R, Essilor I C G D. Polarization splitter, method of manufacturing same and ophthalmic lens incorporating projection inserts containing it: US2004/0136082A1[P]. 2004-07-15.
- [47] Google I. Head-mounted display including integrated projector: US2014/0320755A1[P]. 2014-10-30.
- [48] Wang J H, Liang Y C, Xu M. Design of a see-through head-mounted display with a freeform surface[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2015, 19(6): 614-618.
- [49] Pulli K. Meta 2: immersive optical-see-through augmented reality[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 132-133.
- [50] 姜洋, 孙强, 谷立山, 等. 折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 508-514. Jiang Y, Sun Q, Gu L S, et al. Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 508-514.
- [51] Cheng D W, Wang Y T, Hua H, et al. Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(14): 2655-2668.
- [52] Cheng D W, Wang Y T, Xu C, et al. Design of an ultra-thin near-eye display with geometrical waveguide and freeform optics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20705-20719.
- [53] Gu L, Cheng D W, Wang Q W, et al. Design of a two-dimensional stray-light-free geometrical waveguide head-up display[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(31): 9246-9256.
- [54] 刘明欢, 付秀华, 王菲, 等. 增强现实显示衍射光波导的设计[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(3): 389-397. Liu M H, Fu X H, Wang F, et al. Design of augmented reality display diffraction optical waveguide[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(3): 389-397.
- [55] Kress B C. Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11062: 110620J.
- [56] 徐越, 范君柳, 孙文卿, 等. 基于全息波导的增强现实头盔显示器研究进展[J]. *激光杂志*, 2019, 40(1): 11-17. Xu Y, Fan J L, Sun W Q, et al. Research progress of augmented reality head-mounted display based on holographic waveguide[J]. *Laser Journal*, 2019, 40(1): 11-17.
- [57] 金闻嘉. 增强现实头戴显示系统中渐变体全息光栅波导器件研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. Jin W J. The research of space variant volume holographic grating waveguide coupler in augmented reality head mounted display system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [58] Weng Y S, Xu D M, Zhang Y N, et al. Polarization volume grating with high efficiency and large diffraction angle[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17746-17759.
- [59] Xiong J H, Li Y N Q, Li K, et al. Aberration-free pupil steerable Maxwellian display for augmented reality with cholesteric liquid crystal holographic lenses[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1760-1763.
- [60] Vettese D. Liquid crystal on silicon[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(11): 752-754.
- [61] 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.
- [62] Kim S, Kwon H J, Lee S, et al. Low-power flexible organic light-emitting diode display device[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(31): 3511-3516.
- [63] Cok R S, Meitl M, Rotzoll R, et al. Inorganic light-emitting diode displays using micro-transfer printing[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2017, 25

- (10): 589-609.
- [64] Hofmann U, Janes J, Quenzer H J. High-Q MEMS resonators for laser beam scanning displays[J]. *Micromachines*, 2012, 3(2): 509-528.
- [65] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light[J]. *Science*, 2017, 358(6365): 896-901.
- [66] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [67] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 85.
- [68] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [69] Li X, Chen L W, Li Y, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601102.
- [70] Zhou J X, Liu S K, Qian H L, et al. Metasurface enabled quantum edge detection[J]. *Science Advances*, 2020, 6(51): eabc4385.
- [71] Solntsev A S, Agarwal G S, Kivshar Y S. Metasurfaces for quantum photonics[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(5): 327-336.
- [72] Yang Z Y, Wang Z K, Wang Y X, et al. Generalized Hartmann-Shack array of dielectric metalens sub-arrays for polarimetric beam profiling[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4607.
- [73] 肖顺元, 颜家豪, 胡铁, 等. 基于超表面透镜的偏振探测重构矩阵校准研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2012006. Xiao S Y, Yan J H, Hu T, et al. Research on calibration of polarization detection reconstruction matrix based on metalens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2012006.
- [74] Xiong J, Cai X S, Cui K Y, et al. Dynamic brain spectrum acquired by a real-time ultraspectral imaging chip with reconfigurable metasurfaces[J]. *Optica*, 2022, 9(5): 461-468.
- [75] Ye W M, Zeuner F, Li X, et al. Spin and wavelength multiplexed nonlinear metasurface holography[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11930.
- [76] Li G X, Zhang S, Zentgraf T. Nonlinear photonic metasurfaces[J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2: 17010.
- [77] 张梦蝶, 王文涛, 孙朋, 等. 一种基于纳米环-柱结构的高效非线性超表面[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1219002. Zhang M D, Wang W T, Sun P, et al. A highly efficient nonlinear metasurface based on nanoring-rod structures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1219002.
- [78] Lee G Y, Hong J Y, Hwang S, et al. Metasurface eyepiece for augmented reality[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4562.
- [79] Li Z Y, Lin P, Huang Y W, et al. Meta-optics achieves RGB-achromatic focusing for virtual reality[J]. *Science Advances*, 2021, 7(5): eabe4458.
- [80] Li Z Y, Pestourie R, Park J S, et al. Inverse design enables large-scale high-performance meta-optics reshaping virtual reality[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2409.
- [81] Nikolov D K, Bauer A, Cheng F, et al. Metaform optics: bridging nanophotonics and freeform optics[J]. *Science Advances*, 2021, 7(18): eabe5112.
- [82] 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.
- [83] Boo H, Lee Y S, Yang H B, et al. Metasurface wavefront control for high-performance user-natural augmented reality waveguide glasses[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 5832.
- [84] Shi Y Y, Wan C W, Dai C J, et al. On-chip meta-optics for semi-transparent screen display in sync with AR projection[J]. *Optica*, 2022, 9(6): 670-676.
- [85] Tang J, Wan S, Shi Y Y, et al. Dynamic augmented reality display by layer-folded metasurface via electrical-driven liquid crystal[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(12): 2200418.
- [86] Shi Y Y, Wan C W, Chenjie D, et al. Augmented reality enabled by on-chip meta-holography multiplexing[J]. *Laser & Photonics Review*, 2022, 16(6): 2100638.
- [87] Lan S F, Zhang X Y, Taghinejad M, et al. Metasurfaces for near-eye augmented reality[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(4): 864-870.
- [88] Joo W J, Kyoung J, Esfandyarpour M, et al. Metasurface-driven OLED displays beyond 10, 000 pixels per inch[J]. *Science*, 2020, 370(6515): 459-463.
- [89] Iyer P P, DeCrescent R A, Mohtashami Y, et al. Unidirectional luminescence from InGaN/GaN quantum-well metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(9): 543-548.
- [90] Khaidarov E, Liu Z T, Paniagua-Domínguez R, et al. Control of LED emission with functional dielectric metasurfaces[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(1): 1900235.
- [91] Mao P, Liu C X, Li X Y, et al. Single-step-fabricated disordered metasurfaces for enhanced light extraction from LEDs[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 180.
- [92] Devlin R C, Khorasaninejad M, Chen W T, et al. Broadband high-efficiency dielectric metasurfaces for the visible spectrum[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(38): 10473-10478.
- [93] Luo X H, Hu Y Q, Ou X N, et al. Metasurface-enabled on-chip multiplexed diffractive neural networks in the visible[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 158.
- [94] Wang Y J, Chen Q M, Yang W H, et al. High-efficiency broadband achromatic metalens for near-IR biological imaging window[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5560.
- [95] Park J S, Zhang S Y, She A L, et al. All-glass, large metalens at visible wavelength using deep-ultraviolet projection lithography[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(12): 8673-8682.
- [96] Zhang L D, Chang S Y, Chen X, et al. High-efficiency, 80-mm aperture metalens telescope[EB/OL]. (2022-05-25)[2022-06-02]. <https://arxiv.org/abs/2205.12739>.