

超表面在增强现实近眼显示中的应用研究进展

李洋洋, 张超, 杨宁, 袁影, 郭金坤, 王晓蕊*

西安电子科技大学光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 增强现实近眼显示器是信息显示技术领域的研究热点之一。针对传统近眼显示系统结构存在的视场与体积不能兼顾的瓶颈技术问题,超表面光学元件凭借其光场多维物理量的调控能力和平面集成化优势,为开发大视场轻薄紧凑化的近眼显示器提供了新思路。首先介绍了超表面光场调控原理,重点分析了基于超表面的多种增强现实近眼显示光学系统设计方案,主要包括基于超表面和自由曲面的光学系统设计方案、基于超表面的视网膜投影显示设计方案、基于超表面的光波导设计方案及全息显示设计方案等,讨论了超表面在增强现实近眼显示领域面临的挑战,并对其未来的前景进行了展望。

关键词 成像系统; 增强现实; 近眼显示; 超表面; 光学设计

中图分类号 TN27;TB133

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011005

Research Progress on Application of Metasurface Concept in Augmented Reality Near-Eye Displays

Li Yangyang, Zhang Chao, Yang Ning, Yuan Ying, Guo Jinkun, Wang Xiaorui*

School of Optical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China

Abstract Augmented reality near-eye display devices have attracted significant attention in the information display technology field. To address the bottleneck in the structure of traditional near-eye display systems, which cannot balance the field of view and volume, metasurface optical elements have provided a new concept for developing a large field of view, thin, and compact near-eye displays due to their ability to modulate the multidimensional physical quantities of the optical field and the benefits of planar integration. This paper introduces the principle of metasurface optical field modulation and then focuses on the design of various optical systems for augmented reality near-eye displays based on the metasurface concept, including the design of optical systems based on the metasurface and a freeform surface, the design of a retinal projection display based on the metasurface concept, the design of an optical waveguide based on the metasurface concept, and the design of a holographic display device. The challenges faced by metasurfaces in terms of augmented reality near-eye displays are discussed, and relevant future prospects are presented.

Key words imaging systems; augmented reality; near-eye display; metasurface; optical design

1 引言

增强现实(AR)^[1-6]是一种借助计算机、光学模组和传感交互等多种技术将虚拟数字信息和真实物理信息“无缝”融合集成的新型交互模式。1968年, Sutherland^[7]研发出第1个增强现实系统模型——光学透视头戴显示器。但是在20世纪,AR因为缺乏合格的硬件和数字内容而发展缓滞^[8-10]。近年来,集成电路微型化^[11]、高性能显示设备的研发进步^[12-15]和丰富多

彩的数字内容等促进了AR设备的发展。AR可通过多种显示设备实现,其中近眼显示器(NED)由于可提供沉浸式交互体验受到了研究者的广泛关注^[16-17]。近眼显示器可以将近距离小影像成像为用户视野前的远距离放大虚拟影像,同时将虚拟影像实时叠加在真实物理场景信息上^[18],并因具有虚实融合、三维沉浸、解放双手和实时交互的特点广泛应用于军事训练^[19]、工业制造^[20]、医疗实践^[21-22]和教育娱乐^[23-25]等领域,有望成为下一代人机交互显示平台。

收稿日期: 2022-07-04; 修回日期: 2022-07-29; 录用日期: 2022-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(62075176, 62005204, 62005206)、教育部中央高校基本科研业务费专项基金

通信作者: *xrwang@mail.xidian.edu.cn

光学系统模组是近眼显示设备的核心组件,其性能是直接影响成像质量和制造成本的关键因素。从技术发展现状看,AR近眼显示技术多采用双目视差立体透视显示模式,通过不同类型光学模组(以自由曲面光学组件^[26-30]/全息波导^[31-35]为主流)将真实场景与虚拟图像融合显示。但面向消费级应用,AR近眼显示光学系统模组仍普遍存在各自的限制问题,比如自由曲面结构设计时视场与尺寸相制衡、光波导结构可实现轻薄系统但是视场角受限。此外还存在显示质量不高、深度范围小、辐辏聚焦矛盾(VAC)^[36]带来的视觉疲劳等问题。因此通过创新光学架构、创新模型设计和采用新原理光学元件克服这些限制将变得非常重要。

近年来,新型光学元件超表面^[37-40]由于具有在亚波长尺度调控光场的相位、振幅、偏振等物理特性的卓越能力而受到广泛关注。超表面是由超薄的纳米单元阵列组成的二维平面结构,在紧凑高效的设备中展现出广阔的应用前景^[41]。目前已有国内外研究人员进行了将超表面应用在AR近眼显示领域的探索研究和有益性尝试。超表面的应用有望突破传统AR近眼显示光学系统模组的瓶颈问题,比如自由曲面结构的体积问题与全息波导结构的视场受限问题等。本文从超表面光场调控原理出发,系统论述了基于超表面的多种AR光学系统结构设计方案,并探讨了超表面近眼显示面临的挑战及未来前景。

2 超表面光场调控原理

超表面是一种通过在基底表面上布设亚波长尺寸的微结构单元来实现光场调控的新型平面光学元件。超表面的光场调控研究工作起源于人们对斯涅耳定律的重新探索。根据斯涅耳定律,即光的折射定律,传统光学元件通过光波在不同几何形状和折射率的介质内传播的过程中积累相位从而改变光波波前,实现光场调控。但是由于天然光学材料的折射率受限,现有的传统光学透镜尺寸通常较大^[42]。哈佛大学Yu等^[37]于2011年提出了广义斯涅耳定律,并基于该定律设计出超表面。广义斯涅耳定律在遵循费马原理的基础上,通过提供相位突变实现光场调控,打破了光学器件对于材料厚度的依赖。

当入射光波经过两种介质的交界面处,且当两种介质的分界面处存在额外的突变相移($d\phi/dx$)时,如图1所示,根据费马原理,光由A点经过两条不同的路径到达B点是等光程的,可推导出广义斯涅耳折射定律^[37]的表达式:

$$n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \times \frac{d\phi}{dx}, \quad (1)$$

式中: θ_i 和 θ_t 分别为光波的入射角度和折射角度; n_i 和 n_t 为两种介质折射率; λ_0 为入射光波波长; $d\phi$ 为两条光路经过界面时产生的相位差; dx 为界面两个交点的距

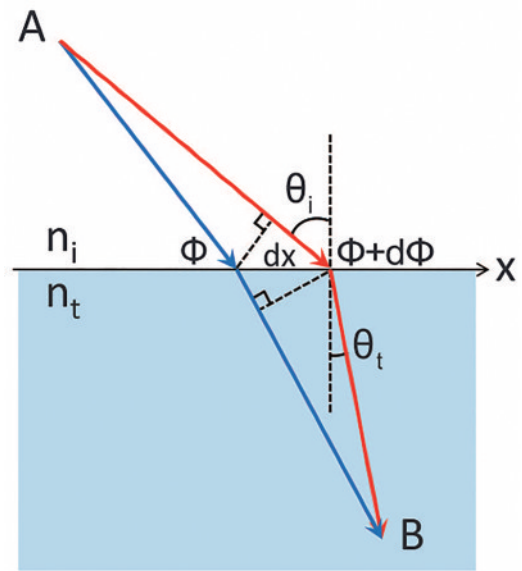


图1 广义斯涅耳折射定律示意图^[37]

Fig. 1 Schematic of generalized Snell's law of refraction^[37]

离。同理广义斯涅耳反射定律表达式为

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \times \frac{d\phi}{dx}, \quad (2)$$

式中: θ_r 为反射角度。由式(1)和式(2)可知,光波的折射反射行为不仅与介质折射率有关,还与界面引入的相位梯度有关。具有梯度的相位突变为光波波前的调控提供了新的自由度,通过控制 $d\phi/dx$ 的数值即可实现光波出射方向的有效操纵,实现反常反射/折射。

因此超表面通过选择能提供所需相位梯度的微结构单元实现光场调控,调控机理类别主要包括传输相位调控、几何相位调控和混合调控等3种:传播相位主要是通过调节结构单元的几何形状参量获得相移^[43-46],如图2(a)所示;几何相位^[47-51]是根据微结构单元在左旋/右旋圆偏振光入射下的旋转角度与相位的关系来实现所需相位,如图2(b)所示;混合调控,即将几何相位与传播相位相结合^[52-54],使光波同时被传输和几何相移所调控,如图2(c)所示。

从超表面研发出来至今,因其具有创新的物理机制、灵活的结构设计等吸引了一大批研究者。超表面可灵活地选择不同调控机理的单元结构实现所需相位分布,从而实现超透镜成像^[55-57]、消色差超透镜阵列集成成像^[58-59]、超表面全息图成像^[60-62]等多种功能,在AR近眼显示领域展现出巨大的应用前景。哈佛大学Li等^[63]于2021年设计和加工出了一种大尺寸厘米级别的消色差超透镜,解决了消色差超透镜尺寸受限问题,促进了超透镜在多种AR近眼显示系统结构的应用。集成成像可以助力AR实现三维显示,四川大学王琼华课题组^[64-66]在集成成像领域开展多项工作,并基于半透半反全息屏技术实现了桌面式AR三维显示系统。西安电子科技大学王晓蕊团队^[18,67-69]在近眼显示及基于超表面的集成成像三维显示方面开展了研究工

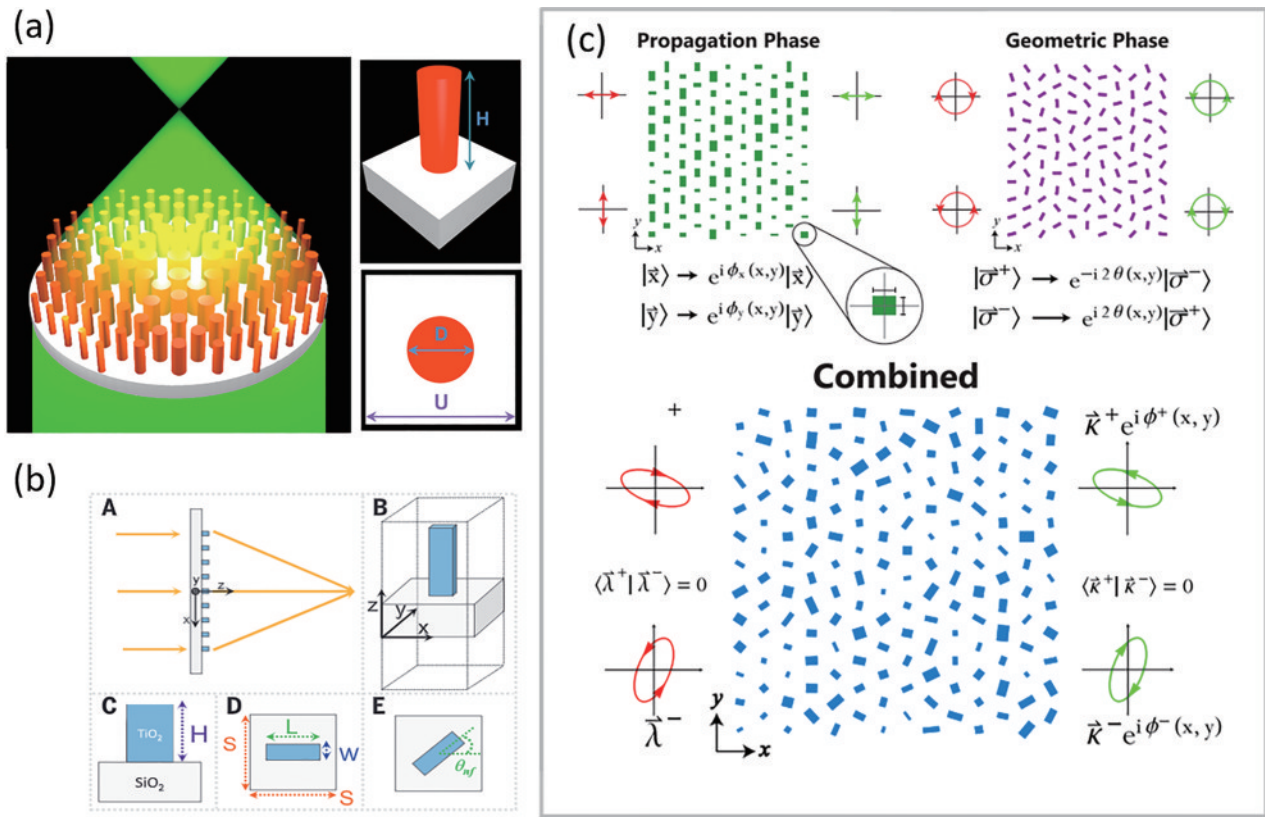


图 2 超表面光场调控原理。(a)传输相位超表面^[45];(b)几何相位超表面^[49];(c)传输相位与几何相位结合^[54]

Fig. 2 Principle of metasurface optical field modulation. (a) Propagation-phase metasurface device^[45]; (b) geometric phase metasurface^[49]; (c) combination of propagation phase and geometric phase^[54]

作,并于2018年设计出多种提升集成成像显示质量的超表面结构。Lin等^[58-59]则使用消色差超透镜阵列实现集成成像光场显示,该显示系统有望与目镜结构相结合搭建基于超表面的集成成像AR系统,解决VAC,提升用户沉浸式体验。韩国Lee等^[70]设计出超表面全息图,轻薄的超表面全息图有望应用于AR近眼显示系统的图像源实现三维显示等。

3 基于超表面的AR近眼显示光学系统设计

为实现低成本、轻薄紧凑、大视场、消色差及用户体验更舒适的AR近眼显示设备,多家研究单位和公司开发研究出多种AR近眼显示光学系统结构,如图3所示。目前常见的光学系统结构有Birdbath结构^[71]、自由曲面棱镜结构^[26-30]、自由曲面反射结构^[72]、光波导结构^[31-35]、全息光学元件(HOE)结构^[73-75]等。图3中实线箭头表示虚拟图像传播路径,虚线箭头表示真实物理光场传播路径。为克服常见光学结构视场与体积无法兼顾的瓶颈技术问题,多家研究单位开始关注超表面技术,探索如何将超表面与AR光学系统进行结合实现瓶颈技术突破。目前超表面应用于AR光学系统的方案主要包括基于超表面与自由曲面的AR光学系统设计、基于超透镜与麦克斯韦观察法的视网膜投影显示设计方案、基于超表面耦合器的光波导设计

方案及基于全息超表面的全息近眼显示设计方案等。本小节主要介绍以上光学系统设计方案的工作原理、光学架构及主要性能。

3.1 基于超表面与自由曲面的AR光学系统设计

面对基于自由曲面的近眼显示光学系统设计时体积与视场互相制约的问题,可通过应用超表面替代自由曲面光学元件或者与自由曲面相结合的方式,使系统在保持自由曲面结构能矫正成像系统像差实现大视场的优势下实现轻薄结构。2017年,Hong等^[76]首次将超表面应用于AR近眼显示,提出了一种基于超表面与自由曲面的AR光学系统设计。该团队使用自由曲面设计中常用的Zernike标准多项式对反射目镜的相位进行建模,并为获得较大的视场,将整个相位分布计算分解为具有不同相位面的几个片段的集合,光线追迹仿真如图4(a)所示,最终通过传输相位原理设计超表面实现所需相位分布,进而实现AR近眼显示。该系统的视场在水平和垂直方向均达到77.3°,调制传递函数值在33 lp/mm时超过30%,畸变小于8.76%。与自由曲面系统相比,该系统在实现大视场的同时具有更紧凑的结构,如图4(b)和图4(c)所示。该团队于2021年在原有的系统结构上进行改进,提出复合超表面设计^[77]。距离人眼近的超表面实现消色差相位分布,用于反射来自显示器的

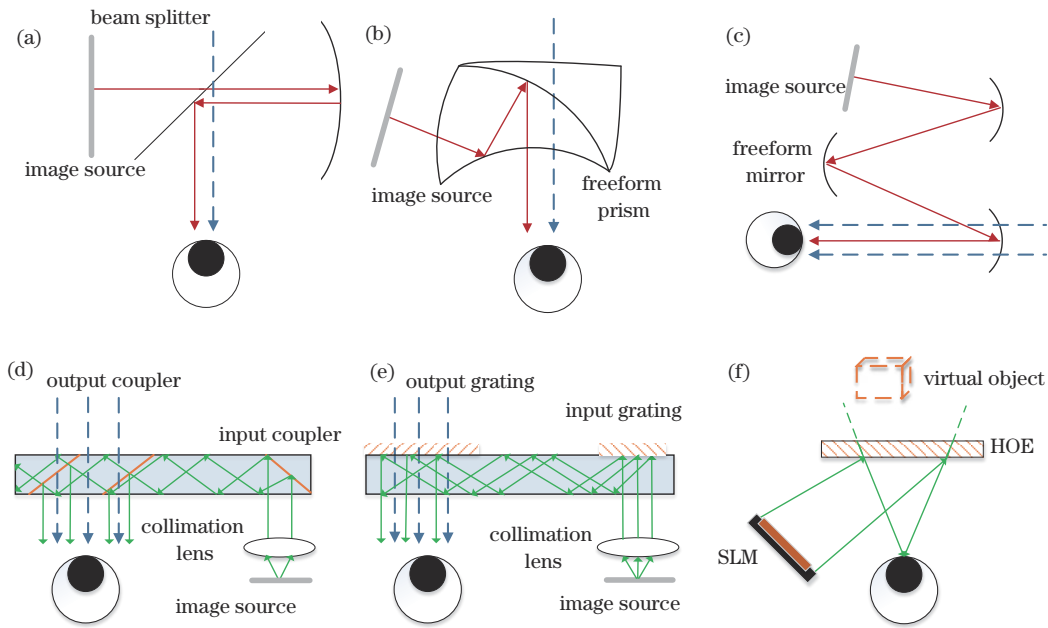


图 3 常见的 AR 近眼显示系统结构示意图。(a) Birdbath 结构示意图; (b) 自由曲面棱镜结构示意图; (c) 自由曲面三反射镜结构示意图; (d) 阵列光波导结构示意图; (e) 全息光栅波导结构示意图; (f) 离轴全息学元件结构示意图

Fig. 3 Several common optical structure diagrams of AR near-eye system. (a) Structure diagram of Birdbath optical system; (b) structure diagram of freeform prism optical system; (c) structure diagram of freeform mirror optical system; (d) structure diagram of cascaded mirror optical system; (e) structure diagram of grating waveguide optical system; (f) structure diagram of off-axis holographic optical element system

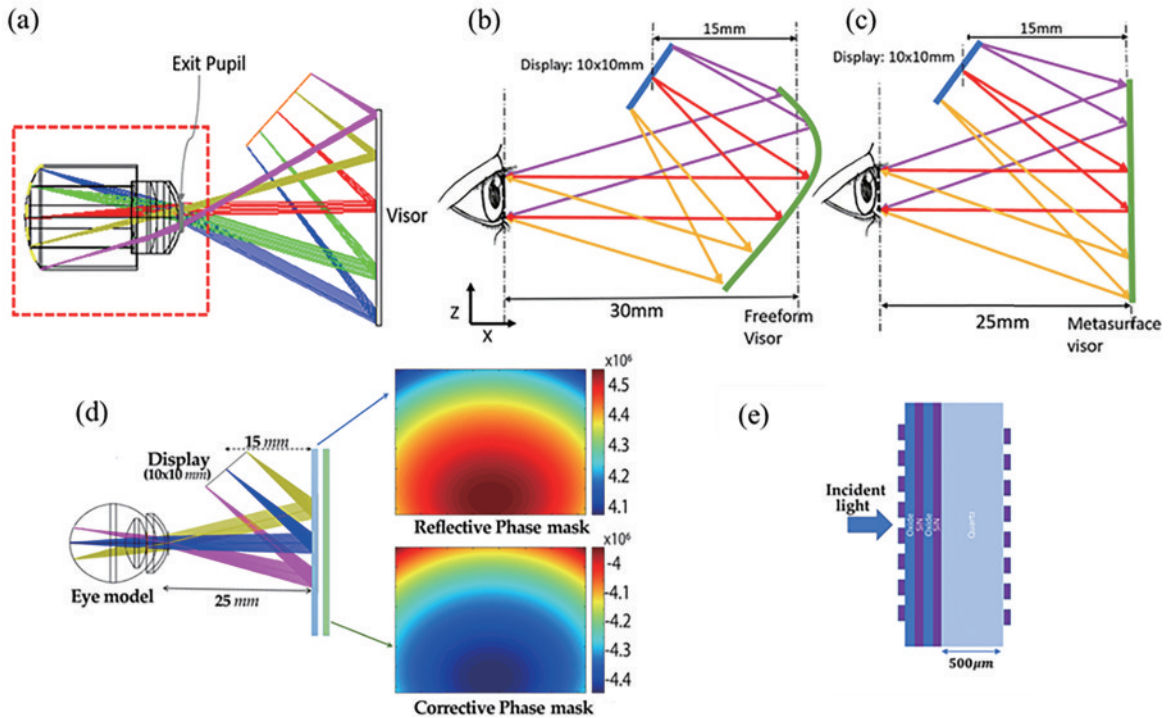


图 4 基于超表面和自由曲面的 AR 光学系统设计。(a) 基于相位掩模的自由曲面近眼显示光学系统的光线追迹仿真^[76]; (b) 基于自由曲面反射结构的 AR 光学系统示意图^[76]; (c) 基于超表面的 AR 光学系统示意图^[76]; (d) 基于复合超表面的 AR 光学系统及其超表面相位分布示意图^[77]; (e) 复合超表面结构示意图^[77]

Fig. 4 Design of AR optical system based on metasurface and free-form surfaces. (a) Ray tracing simulation of freeform surface near-eye display based on phase mask^[76]; (b) schematic diagram of AR optical system based on freeform reflection structure^[76]; (c) schematic diagram of AR optical system based on hypersurface^[76]; (d) schematic diagram of AR optical system based on composite metasurfaces and phase mask^[77]; (e) schematic diagram of composite metasurfaces structure^[77]

光,另一个超表面用于避免由消色差超表面导致的真实光场信息的扭曲,如图 4(d)和图 4(e)所示。系统在水平和垂直方向上的显示视场均大于 77°。超表面具有平坦的几何形状,便于与柔性基板集成,可以将其放在任何眼镜片上,加上微型显示屏可搭建出一个轻巧紧凑的 AR 近眼显示系统。但是该设计仍然存在一些挑战,出瞳直径仅为 2.5 mm,低于目前的 AR 光学设计方案。

除用超表面替代传统光学元件外,美国罗切斯特大学 Nikolov 等^[78]在自由曲面面型衬底上制造超表面,通过超表面与自由曲面协同调控光场实现 AR 功能,并将此组合结构称为超曲面,设计原理如图 5(a)所示。研究人员分解成像系统中不同光学元件的相位

贡献及其在形成最终图像中的作用,使超表面和自由曲面承担不同任务协同工作以校正产生的像差,以紧凑、保形、折叠的几何形状创建高分辨率图像。最后该团队设计和加工出超曲面镜并搭建了基于单色超曲面镜的微型成像仪器。微型成像仪成像过程如图 5(b)所示。图 5(c)为所用超曲面镜的相位分配示意图。图 5(d)为制造出的超曲面器件结构。该系统实现了对物体空间中不同空间频率特征的成功成像。虽然成像仪的尺寸长宽分别为 2 mm 和 1.5 mm,但从理论的角度来看,实现更大尺寸的超曲面没有任何限制。而且该设计中的相位分布所带来的额外自由度使光学设计人员能够在光学性能、系统体积和外形尺寸之间进行关键的设计权衡。

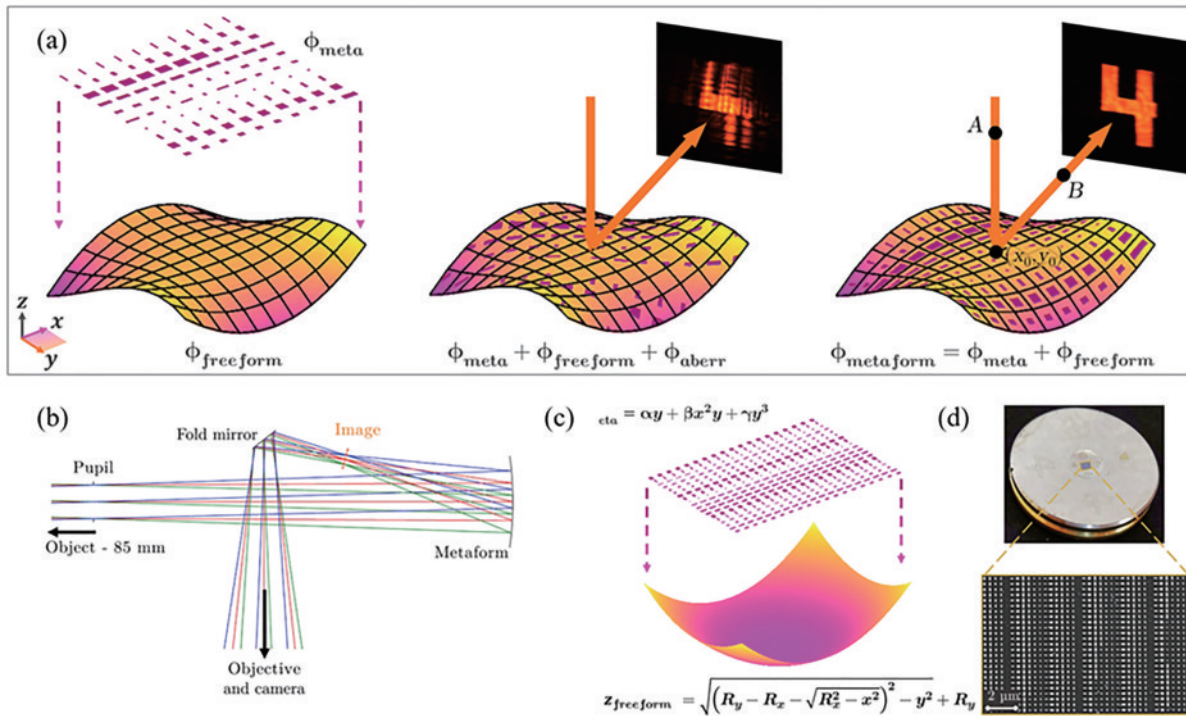


图 5 基于超曲面镜的 AR 近眼显示光学系统设计^[78]。(a)超曲面设计原理示意图;(b)微型成像仪的成像过程示意图;(c)所需超曲面的相位分配示意图;(d)制造成功的超曲面镜及扫描电子显微镜(SEM)的部分放大视图

Fig. 5 Design of AR near-eye display optical system based on metaform mirror^[78]. (a) Schematic diagram of principle of metaform; (b) schematic diagram of miniature imager design using a metaform mirror; (c) schematic diagram of phase distribution of metaform; (d) image of a successful metaform and a scaled-up view of an SEM image of a set of fabricated nano-tokens

3.2 基于超表面和麦克斯韦观察法的视网膜投影显示技术方案

为了解决传统双目立体近眼显示中存在的 VAC 问题,有多家研究单位提出了一种将超表面与视网膜投影显示方案相结合的新型光学系统设计,如图 6 所示。基于麦克斯韦观察法的视网膜投影显示技术^[79]直接在人眼视网膜上投影数字信息来形成图像视觉,由于全部光束汇聚于晶状体中心,晶状体对这些加载了图像信息的光线不发生折射作用,所以观察到的数字图像具有很大的景深,并且不依赖于人眼的调焦,使用户在看清真实物体的同时不影响数字图像的清晰

度,缓解视觉疲劳。

韩国 Lee 等^[80]于 2018 年提出了一种基于超透镜的 AR 视网膜投影显示方案并搭建了原理样机,如图 7(a)、(b)所示。研究人员采用基于几何相位原理的超表面设计方法,利用纳米棒的结构参数和旋转角度独立控制同级极化和交叉极化的透射振幅,如图 7(c)所示。因此当真实世界光通过超透镜时为同极极化无损耗出射,携带虚拟图像信息的光经过超透镜时交叉极化聚焦于人眼瞳孔中心实现视网膜投影显示。此外,该团队通过二色镜等元件改变不同波长的成像位置来实现消色差。最终该团队通过纳米压印技

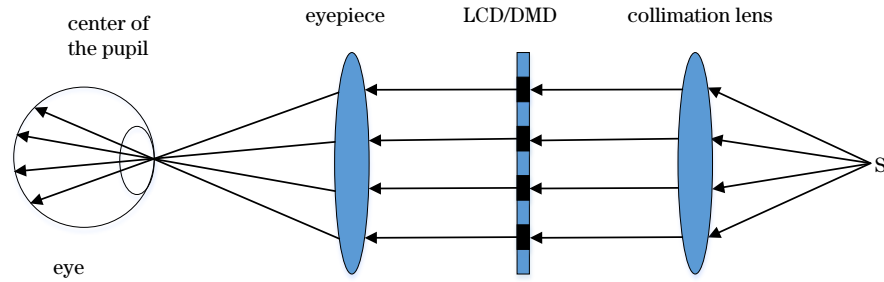


图 6 基于麦克斯韦观察法的视网膜投影显示示意图

Fig. 6 Schematic diagram of retinal projection display based on Maxwell's observation method

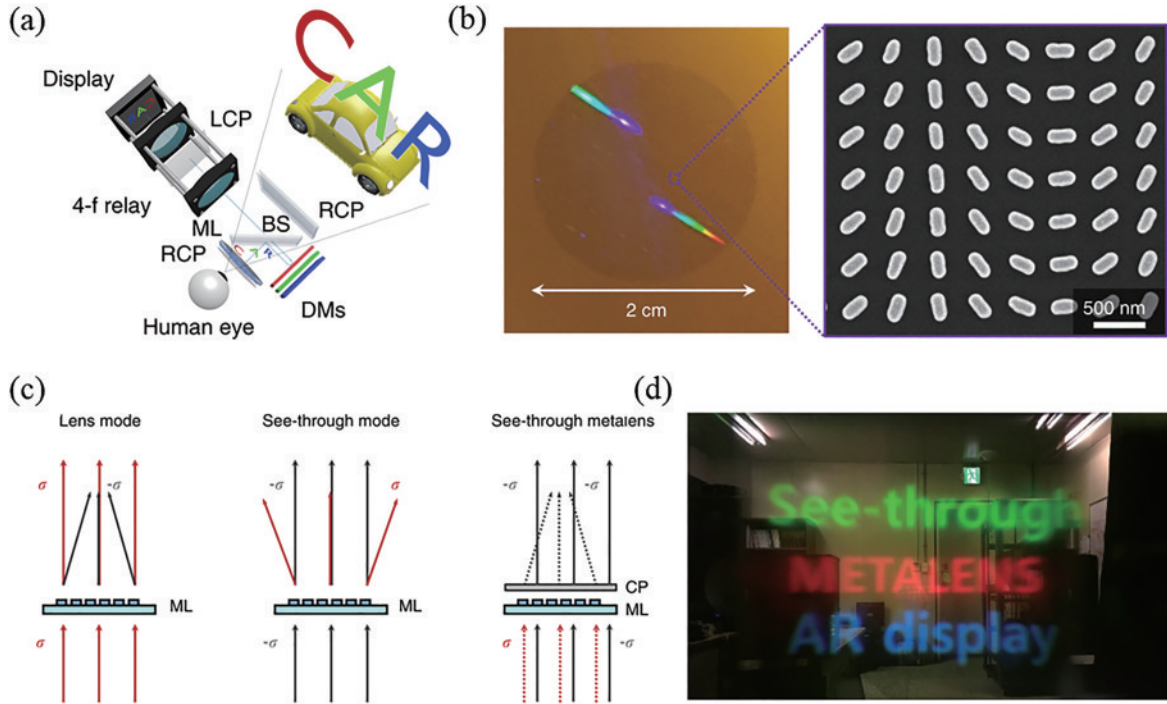


图 7 基于超透镜的视网膜投影显示设计^[80]。(a) AR 原理样机的示意图；(b) 直径为 20 mm 的超透镜的照片及部分器件 SEM 图像；(c) 几种入射光条件下超透镜的不同光学行为示意图；(d) 具有红、绿和蓝真实对象的单色 AR 图像

Fig. 7 Design of hyperlens-based retinal projection display^[80]. (a) Illustration of AR prototype; (b) photograph of fabricated see-through metalens with a diameter of 20 mm and an SEM image of part of device; (c) schematic illustrations of optical behavior of see-through metalens under several incident light conditions; (d) single-color AR images with real objects for red, green, and blue colors

术制造出孔径为 20 mm、数值孔径(NA)为 0.61 的超透镜用于搭建 AR 系统原理样机,实现了 90°的单色视场和 76°的全色成像视场,并且共极化传输效率在红、绿、蓝区域的光谱中达到 79%。图 7(d)展示了红、绿、蓝的单色 AR 图像与真实物体。该系统实现了比常规 AR 显示系统更宽的视场,但是为矫正色差使用 3 个二向色镜,增加了系统结构的复杂性,可通过其他消色差方法进行改进。

在消色差超透镜研究领域,哈佛大学 Chen 等^[81]于 2018 年设计出可见光消色差超透镜。由于所使用的群延迟理论具有一定的尺寸限制,这些透镜的直径只有几十微米,无法用于实际的 AR 系统。2021 年,该团队提出了一种多区域超透镜设计方法^[63],该

方法绕过群延迟限制提高了超透镜的孔径和 NA 值,并采用移动渐近线的方法来优化区域过渡位置的相位不连续性的关键问题。最终该团队设计出直径为 20 mm、NA 为 0.7 的超透镜,实现了主 RGB 颜色在相同焦距下的聚焦,并进一步搭建出基于大尺寸消色差超透镜的 AR 系统装置。图 8(a)为基于大尺寸消色差超透镜的 AR 模式示意图,图 8(b)为超透镜部分区域的 SEM 图,图 8(c)为 AR 装置的成像示意图。虽然该团队只是尝试性地将超表面应用于 AR 系统设计,但该超透镜仅靠单片便可实现多片及多种材料组合的透镜结构方能实现的大视场大尺寸系统的消色差功能,在 AR 近眼显示领域有着巨大的应用潜力。

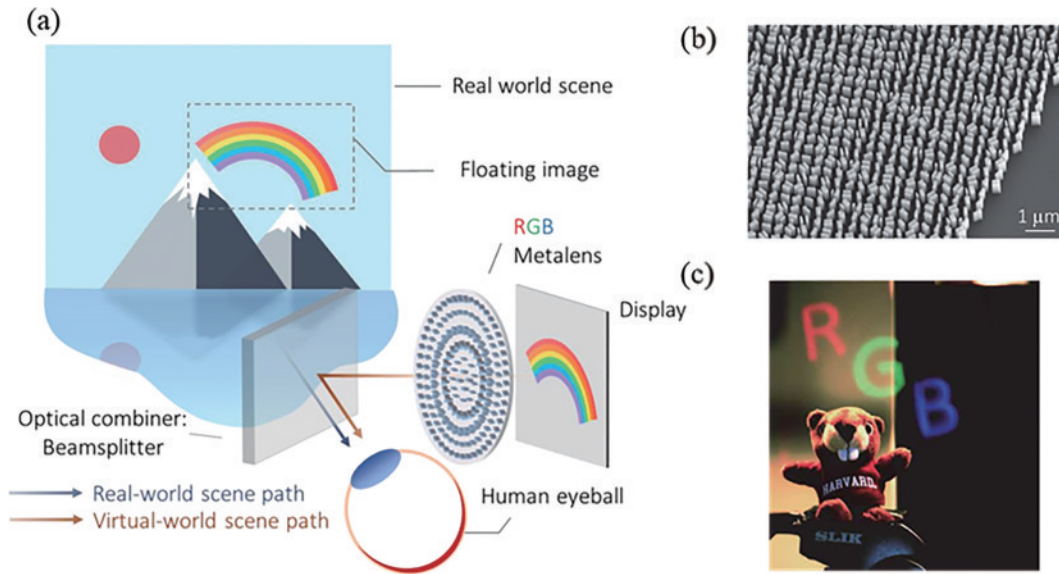


图 8 基于大尺寸消色差超透镜的 AR 显示系统设计^[81]。(a) 基于大尺寸消色差超透镜的 AR 模式示意图；(b) 超透镜部分区域的 SEM 图像；(c) AR 装置实验图像结果示例

Fig. 8 Design of AR display system based on large-size achromatic superlens^[81]. (a) Schematic diagram of AR mode based on a large-size achromatic metalens; (b) an SEM image of part of metalens; (c) example of experimental image results of AR device

3.3 基于超表面耦合器的光波导系统设计方案

为实现轻薄紧凑的 AR 近眼显示系统,光波导型 AR 显示系统结构应运而生。光波导系统一般由 3 部分组成,耦入部分完成视场的折叠,耦出部分实现视场的复原,波导部分用来实现光线传输。全息光学元件和衍射光学元件(DOE)常被用作耦合器。针对波导结构普遍存在的视场受限问题,研究人员尝试采用超表面作为光波导中的耦入或耦出部分实现大视场。2019 年,加利福尼亚理工学院 Faraon 团队^[82]仿真设计出一个 5 层消像差超表面用于 AR 光波导的耦入部分,校正视场为 8 mm 对角线(接近 90°),在整个视场上接近衍射限制。若将其与传统波导系统结合为 AR 近眼显示器,在空中可提供大于 85°×85°的大视场,其中全息体光栅作为耦出部分扩展出瞳,如图 9(a)所示。2021 年,设拉子理工大学 Afra 等^[83]将超表面用作 AR 光波导系统中的耦入和耦出元件,实现单色 80°的大视场,如图 9(b)所示。目前常见的光波导系统的视场最大在 50°~60°之间^[11]。由此可见,虽然两个团队的工作仍处于仿真设计阶段,但是显然超表面元件在解决光波导显示设计中存在的视场受限问题上有相当大的潜力。

3.4 基于超表面与全息光学元件的 AR 近眼显示设计方案

针对用户长时间使用双目立体近眼显示系统会出现眼睛疲劳和不适的问题,研究人员采用多焦平面显示^[84]、变焦平面显示^[85]、微透镜阵列集成成像显示^[64-65]和全息显示^[86-87]等技术缓解视觉疲劳。全息显示可以创造具有完整和连续景深的三维对象。离轴全息透镜和空间光调制器可组成全息激光投影系统,将入射到

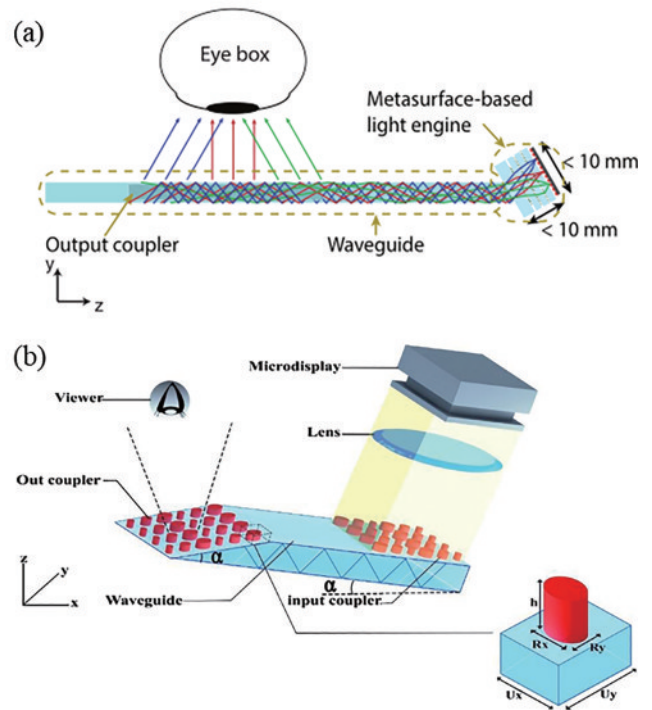


图 9 基于超表面耦合元件的 AR 近眼显示系统设计。(a) 基于多层超表面的 AR 波导系统示意图,超表面结构作为耦入元件^[82]；(b) 基于超表面的 AR 波导系统示意图^[83],耦入和耦出元件均为超表面

Fig. 9 Design of AR near-eye display system based on metasurface coupling elements. (a) Schematic diagram of a multilayer metasurface-based AR waveguide system with metasurface structure as coupling-in element^[82]; (b) schematic diagram of a metasurface-based AR waveguide system^[83], both coupling-in and coupling-out elements are metasurface

全息透镜上的光线重新定向入射到人眼以实现虚拟图像的显示^[87],如图 3(f)所示。该方案采用全息光学元件作为关键元件,其系统结构紧凑,但由于常见的全息透镜具有复杂的像差和色差,成像效果不理想。2019年,韩国首尔国立大学 Moon 等^[88]提出了一种基于 lens-diffuser holographic optical elements(LDHOE)和几何相位原理超透镜的消色差大视场 AR 近眼显示

系统,图 10(a)为 LDHOE 的记录和重建过程。LDHOE 用于系统的消色差并反射入射光波,超透镜则将反射过来的偏振光聚焦成像。现实世界的光经过全息元件和超透镜均不发生相移,最终该系统可实现 80° 的视场。图 10(b)为实验结果,由于采用了三层 LDHOE 元件,系统光学效率有所下降,可进一步改进。

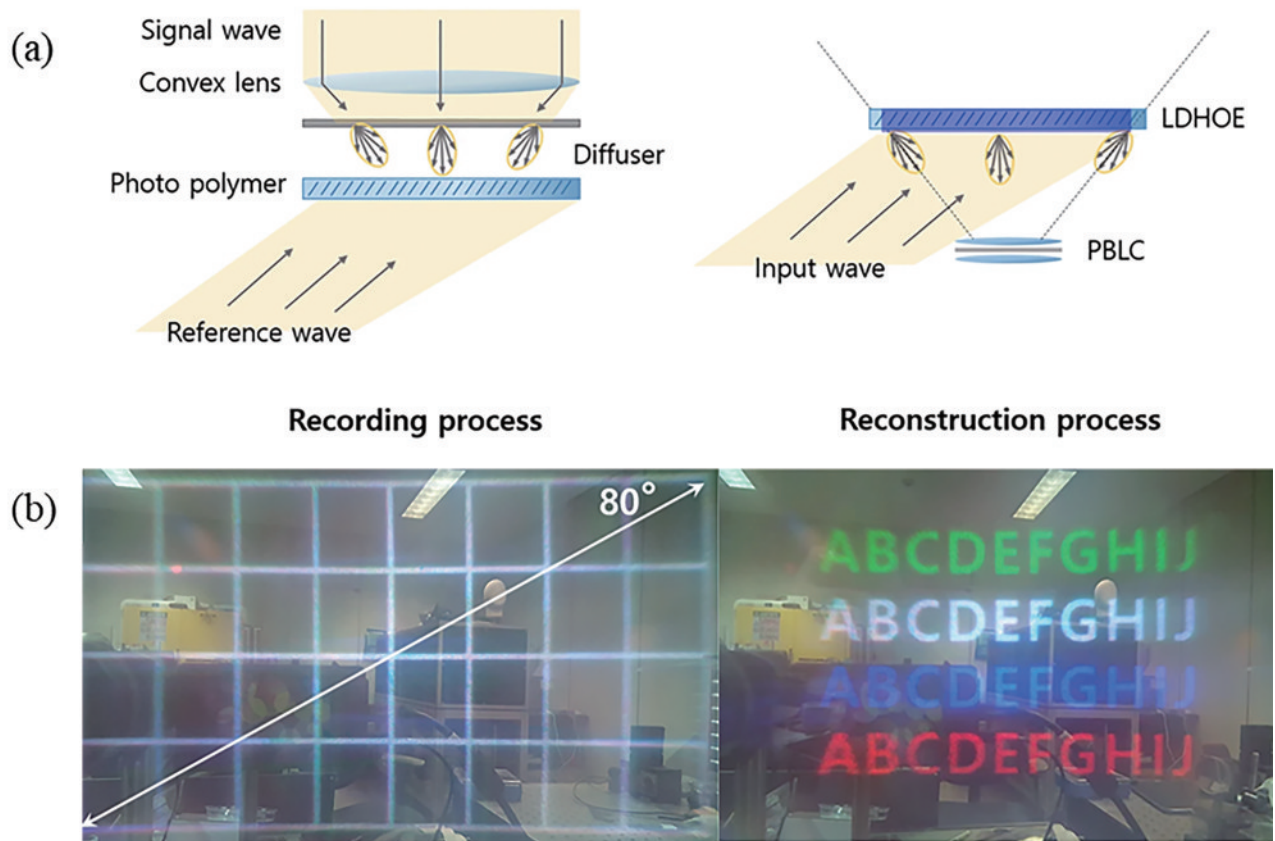


图 10 基于超表面和 LHOE 的 AR 近眼显示系统设计^[88]。(a)LDHOE 的记录和重建过程;
(b)实验结果,虚拟字母漂浮在现实世界中

Fig. 10 Design of an AR near-eye display system based on hypersurface and LHOE^[88]. (a) Recording and reconstruction process of LDHOE; (b) experimental results, virtual letters floating in real world

同时也有研究人员将超表面全息图用于 AR 光学系统的图像源处。2021年,南洋理工大学 Song 等^[89]设计出一种轻薄透明的惠更斯超表面全息图并将其应用于近眼显示系统中。图 11(a)为该系统的结构示意图,当用相干光源照射超表面时,可在超表面全息图前生成三维全息图像。该全息图的优点是具有大($>10^8$)像素数和亚波长尺寸的像素。此外,该系统可以实现 $10\text{ mm} \times 8.66\text{ mm}$ 的大眼动范围。研究人员通过实验演示出高质量的虚拟 3D 场景,活动数据点约为 5×10^4 ,连续深度从 0.5~2 m 不等,图 11(b)为该光学方案的成像效果,虚拟信息可以与真实世界信息融合。该结构实现了大视场也实现了三维显示,但仍存在一定的色差。

此外,2019年 Lan 等^[90]提出了一种基于超表面的

隐形眼镜结构。超表面将透明显示器上输出的图像以逐像素的方式全息投射到视网膜的中央凹区域,使人眼获取虚拟图像信息的同时保持真实世界的可视化,从而实现全新的 AR 显示,如图 12(a)所示。通过计算整个光学系统的光波传播可得出超表面的相位分布。该团队通过纳米柱实现预先设计的相位分布,并进行了实验验证,实验过程中使用光掩模而非透明显示器生成虚拟图像信息,图 12(b)为实验结果图。不同于传统的全息技术,基于超表面的技术能够使用单个无源全息图显示任意图案。虽然当前设计展示了相对较低的分辨率,但使用简单的注释文本和图标来增强导航系统中的警告指示器和视觉提示等各种应用都很有价值。

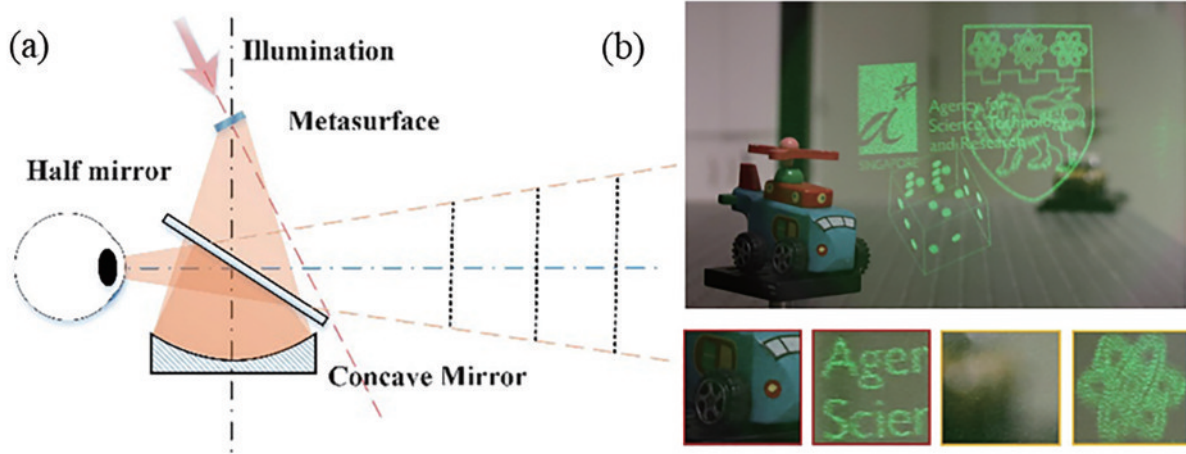


图 11 基于透射超表面全息图的 AR 近眼显示系统设计^[89]。(a) 系统结构示意图。(b) 以 2 屈光度聚焦时, 相机拍摄的光学透视场景
Fig. 11 Design of AR near-eye display system based on transmissive super-surface holograms^[89]. (a) Schematic diagram of system structure; (b) optical perspective scene captured by camera when focusing at 2 diopters

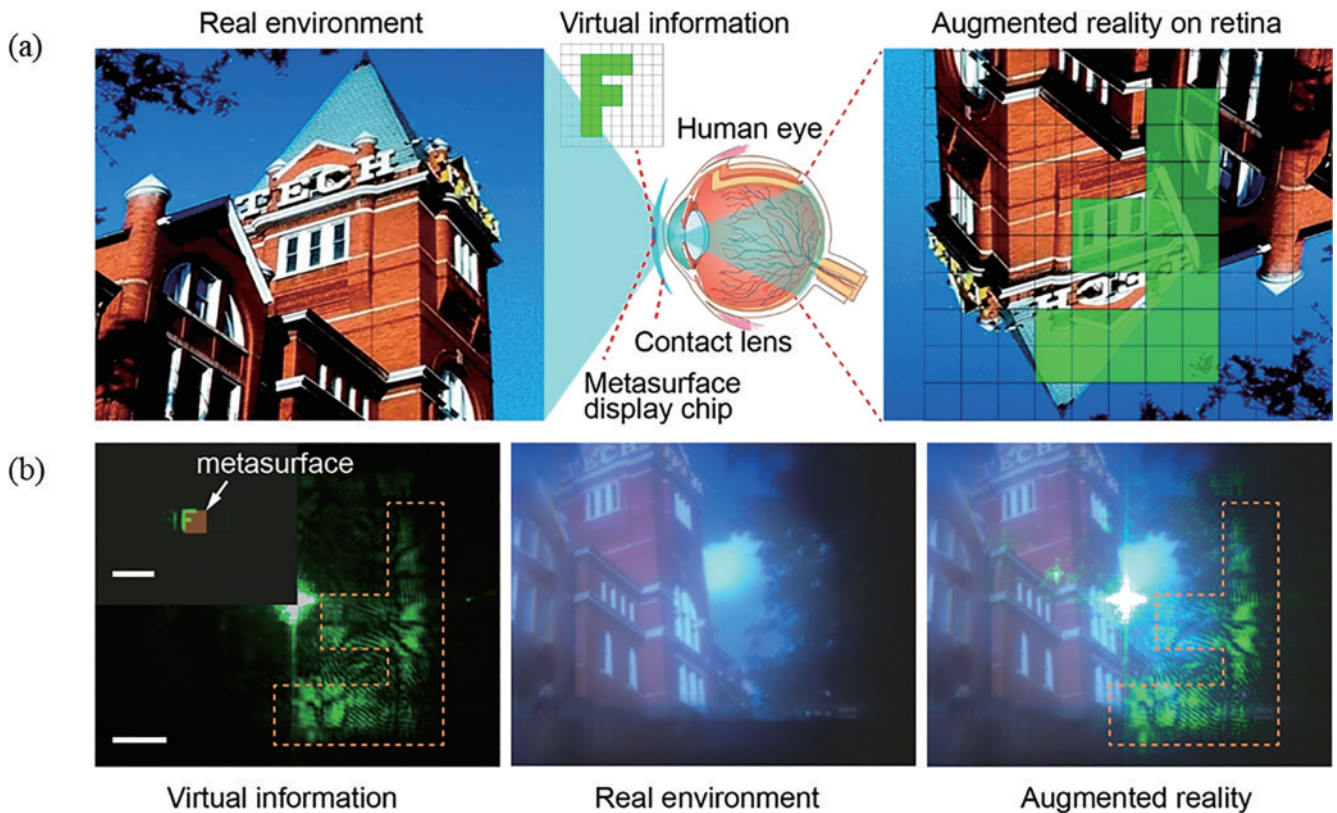


图 12 基于超表面的单色隐形眼镜设计^[90]。(a) 基于超表面的 AR 近眼显示原理图; (b) 实验结果, 人眼看到带有辅助虚拟信息的现实世界
Fig. 12 Metasurface-based monochromatic contact lens design^[90]. (a) Schematic diagram of a metasurface-based AR near-eye display; (b) experimental results with human eye looking at real world with auxiliary virtual information

4 超表面用于 AR 近眼显示的挑战

近几年, 超表面研究在理论建模和纳米制造技术方面都取得了重大进展。由于超表面可在亚波长尺度内实现对相位、振幅和偏振等物理量的灵活调控, 并且兼具传统光学元件无法比拟的平面化和低损耗的优点, 超表面的出现为解决传统 AR 近眼显示系统设计

中的受限问题及实现光学系统集成化和微型化提供了有效的技术途径。但是想要利用超表面实现大视场、消色差、轻薄紧凑结构和高分辨率的 AR 近眼显示系统, 仍需要克服理论和实验方面的多重挑战:

1) 超表面的可见光消色差问题。超透镜因为可以通过改变微结构单元的几何参数自由设计有效折射率, 比传统光学元件具有更高的消色差自由度。目前

已有多家研究团队在消色差超透镜领域实现突破。但是在使用非超透镜的超表面的 AR 近眼显示系统设计中,消色差方法通常会受到工作效率或工作带宽的影响^[42],问题仍难以解决。

2) 超透镜的消像差问题。在消除单色像差超透镜方面,视场范围的增加通常都伴随着剩余球差校正难度的增加。目前的常见解决方案是利用孔径光阑和级联超透镜^[91]进行像差校正。两块功能性超透镜的光轴需要精确对准,而这在工艺上有一定的难度。在将超透镜替代自由曲面反射镜的近眼显示方案中^[76],也是采用多段相位面集合来实现矫正像差的大视场系统。

3) 超表面的建模仿真计算问题。从目前软件设计的角度来看,超表面组件的设计通常涉及一系列不同的程序,包括几何光线追迹、波动光学和全波麦克斯韦方程计算器 and 用于后处理的自定义代码等^[92]。使用不同的软件程序存在数据传输困难和低效的问题,并且会花费大量研究人员的学习掌握时间。因此,建模仿真技术需要进步,其中光线追迹、波动光学和有限元方法应无缝集成。

4) 超表面的制造加工工艺仍需发展。为实现超表面组件与日常电子产品的集成和商业化应用,需要可靠、大规模及低成本的制造工艺。虽然小尺寸超表面(直径小于 1 mm)通常在实验室可通过电子束光刻或聚焦离子束铣削制造,但大规模高质量的生产能力是其消费级应用的关键。基于纳米复合材料的深紫外纳米压印光刻技术^[80]只需一步即可获得大纵横比材料结构,有望成为大批量生产超表面器件的关键技术。

未来超表面在 AR 近眼显示领域的发展仍然要继续深入探索研究超表面多种光场调控原理以解决以上像差问题,需要科研人员及科技公司开发更系统完整的仿真软件来减少学习成本和仿真时间,需要研发可靠低成本的超表面加工工艺。在光学系统的结构设计方面,研究人员可继续大胆创新地尝试将超表面与常见 AR 近眼显示结构相结合的设计,进一步挖掘超表面在 AR 领域的应用潜力,充分发挥超表面光场调控能力与平板化的优势。

5 总结与展望

在众多增强现实显示设备中,近眼显示器可将数字世界与物理世界无缝融合,具有高沉浸感和实时交互的优点,具有广泛的应用市场。超表面光学技术凭借其光场调控能力和平板化优势为突破已有近眼显示系统存在的瓶颈问题提供了新的解决思路。本研究总结了近年来超表面在增强现实近眼显示领域中的应用研究进展,介绍分析了基于超表面的不同光学系统设计方案,最后讨论了超表面在 AR 近眼显示领域的应用研究面临的挑战。随着超表面原理认识的不断深入,新型超表面设计方案的不断探索,建模仿真技术的

不断提升及大规模低成本微纳加工技术的不断研发,基于超表面的 AR 近眼显示方案将得到不断的优化与改进,具有更广泛和光明的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: a review [J]. *Journal of Display Technology*, 2006, 2(3): 199-216.
- [2] Halamkar P, Shah S, Shah H, et al. A review on virtual reality[J]. *International Journal of Computer Science Issues*, 2012, 9(6): 325-330.
- [3] 高源, 刘越, 程德文, 等. 头盔显示器发展综述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(6): 896-904.
Gao Y, Liu Y, Cheng D W, et al. A review on development of head mounted display[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(6): 896-904.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Zhan T, Yin K, Xiong J H, et al. Augmented reality and virtual reality displays: perspectives and challenges[J]. *iScience*, 2020, 23(8): 101397.
- [7] Sutherland I E. A head-mounted three dimensional display[C]//*Proceedings of the {AFIPS} '68 Fall Joint Computer Conference*, December 9-11, 1968, San Francisco, California. New York: ACM Press, 1968: 757-764.
- [8] Keller K, Colucci D. Perception in HMDs: what is it in head-mounted displays (HMDs) that really make them all so terrible? [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3362: 46-53.
- [9] Hoppe M, Melzer J E. Optical tiling for wide-field-of-view head-mounted displays[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3779: 146-153.
- [10] Yoshida A, Rolland J P, Reif J H. Design and applications of a high-resolution insert head-mounted-display[C]//*Proceedings Virtual Reality Annual International Symposium '95*, March 11-15, 1995, Research Triangle Park, NC, USA. New York: IEEE Press, 1995: 84-93.
- [11] 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, 2(3): 350-369.
- [12] Motoyama Y, Sugiyama K, Tanaka H, et al. High-efficiency OLED microdisplay with microlens array[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(6): 354-360.
- [13] Ghosh A, Donoghue E P, Khayrullin I, et al. 18-1: *Invited paper: ultra-high-brightness 2K x 2K full-color OLED microdisplay using direct patterning of OLED emitters*[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 226-229.
- [14] Huang Y G, Hsiang E L, Deng M Y, et al. Mini-LED,

- Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 105.
- [15] 韩洪松, 齐爱想, 刘俊国, 等. Micro-LED 在机载上的应用[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(3): 439-447.
- Han H S, Qi A X, Liu J G, et al. Application of Micro-LED technology in airborne display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(3): 439-447.
- [16] 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.
- [17] He Z H, Sui X M, Jin G F, et al. Progress in virtual reality and augmented reality based on holographic display [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A74-A81.
- [18] 姚璐. 基于自由曲面光学的光场 AR 头戴显示光学系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- Yao L. Design of light-field AR head-mounted display optical system based on free-form optics[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [19] Li H, Zhang X, Shi G W, et al. Review and analysis of avionic helmet-mounted displays[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(11): 110901.
- [20] 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.
- [21] Bichlmeier C, Wimmer F, Heining S M, et al. Contextual anatomic mimesis hybrid *in-situ* visualization method for improving multi-sensory depth perception in medical augmented reality[C]//2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, November 13-16, 2007, Nara, Japan. New York: IEEE Press, 2007: 129-138.
- [22] 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.
- [23] Hua H, Javidi B. Augmented reality: easy on the eyes[J]. *Optics and Photonics News*, 2015, 26(2): 26-33.
- [24] van Krevelen D W F, Poelman R. A survey of augmented reality technologies, applications and limitations [J]. *International Journal of Virtual Reality*, 2010, 9(2): 1-20.
- [25] He J B, Choi W, McCarley J S, et al. Texting while driving using Google Glass™: promising but not distraction-free[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2015, 81: 218-229.
- [26] 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.
- [27] Cheng D W, Wang Y T, Hua H, et al. Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2098-2100.
- [28] Wang Q F, Cheng D W, Wang Y T, et al. Design, tolerance, and fabrication of an optical see-through head-mounted display with free-form surface elements[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(7): C88-C99.
- [29] Hua H, Javidi B. A 3D integral imaging optical see-through head-mounted display[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13484-13491.
- [30] Hu X D, Hua H. High-resolution optical see-through multi-focal-plane head-mounted display using freeform optics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13896-13903.
- [31] Mukawa H, Akutsu K, Matsumura I, et al. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2009, 17(3): 185-193.
- [32] Piao M L, Kim N. Achieving high levels of color uniformity and optical efficiency for a wedge-shaped waveguide head-mounted display using a photopolymer [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): 2180-2186.
- [33] 曾飞, 张新. 全息波导头盔显示技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(5): 731-738.
- Zeng F, Zhang X. Waveguide holographic head-mounted display technology[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 731-738.
- [34] Zhang Y, Fang F Z. Development of planar diffractive waveguides in optical see-through head-mounted displays [J]. *Precision Engineering*, 2019, 60: 482-496.
- [35] Zhang N N, Liu J, Han J, et al. Improved holographic waveguide display system[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(12): 3645-3649.
- [36] 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): 1-30.
- [37] 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.
- [38] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [39] Zhan A L, Colburn S, Dodson C M, et al. Metasurface freeform nanophotonics[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1673.
- [40] 廖琨, 甘天奕, 胡小永, 等. 基于介质超表面的片上集成纳米光子器件[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823001.
- Liao K, Gan T Y, Hu X Y, et al. On-chip nanophotonic devices based on dielectric metasurfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823001.
- [41] Jahani S, Jacob Z. All-dielectric metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(1): 23-36.
- [42] 刘逸天, 陈琦凯, 唐志远, 等. 超表面透镜的像差分析和成像技术研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 831-850.
- Liu Y T, Chen Q K, Tang Z Y, et al. Research progress of aberration analysis and imaging technology based on metalens[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 831-850.
- [43] West P R, Stewart J L, Kildishev A V, et al. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26212-26221.
- [44] Shen Y, Luo X G. Efficient bending and focusing of light beam with all-dielectric subwavelength structures[J]. *Optics Communications*, 2016, 366: 174-178.
- [45] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carmes C, et al.

- Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(11): 7229-7234.
- [46] Li Y, Li X, Pu M B, et al. Achromatic flat optical components via compensation between structure and material dispersions[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19885.
- [47] Lu B R, Deng J N, Li Q, et al. Reconstructing a plasmonic metasurface for a broadband high-efficiency optical vortex in the visible frequency[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(26): 12378-12385.
- [48] Khorasaninejad M, Chen W T, Zhu A Y, et al. Visible wavelength planar metalenses based on titanium dioxide [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(3): 43-58.
- [49] 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.
- [50] Moreno-Peñarrubia A, Teniente J, Kuznetsov S, et al. Ultrathin and high-efficiency Pancharatnam-Berry phase metalens for millimeter waves[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(22): 221105.
- [51] Zhao Z Y, Pu M B, Gao H, et al. Multispectral optical metasurfaces enabled by achromatic phase transition[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15781.
- [52] Yang Y M, Wang W Y, Moitra P, et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1394-1399.
- [53] Guo Y H, Pu M B, Zhao Z Y, et al. Merging geometric phase and plasmon retardation phase in continuously shaped metasurfaces for arbitrary orbital angular momentum generation[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(11): 2022-2029.
- [54] Balthasar M J P, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(11): 113901.
- [55] Chen B H, Wu P C, Su V C, et al. GaN metalens for pixel-level full-color routing at visible light[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6345-6352.
- [56] 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.
- [57] 孙占山, 付云起, 林沂, 等. 基于氧化铟锡的空间光相位调控超表面设计[J]. *中国激光*, 2022, 49(7): 0705001. Sun Z S, Fu Y Q, Lin Y, et al. Phase modulating metasurface based on indium tin oxide[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(7): 0705001.
- [58] 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.
- [59] 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(4): 600-609.
- [60] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [61] Ni X J, Kildishev A V, Shalae V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2807.
- [62] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [63] 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.
- [64] 邓欢, 王琼华. 基于集成成像的增强现实三维显示技术[J]. *科技导报*, 2018, 36(9): 18-24. Deng H, Wang Q H. 3D display technology for augmented reality based on integral imaging-a review[J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(9): 18-24.
- [65] Xing Y, Xia Y P, Li S, et al. Annular sector elemental image array generation method for tabletop integral imaging 3D display with smooth motion parallax[J]. *Optics Express*, 2020, 28(23): 34706-34716.
- [66] Li Y L, Li N N, Wang D, et al. Tunable liquid crystal grating based holographic 3D display system with wide viewing angle and large size[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 188.
- [67] Zhang J L, Wang X R, Wu X X, et al. Wide-viewing integral imaging using fiber-coupled monocentric lens array[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23339-23347.
- [68] Shen X, Wang Y J, Chen H S, et al. Extended depth-of-focus 3D micro integral imaging display using a bifocal liquid crystal lens[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 538-541.
- [69] Zhang J L, Wang X R, Yang Y, et al. Flat dielectric metasurface lens array for three dimensional integral imaging[J]. *Optics Communications*, 2018, 414: 1-4.
- [70] Lee G Y, Yoon G, Lee S Y, et al. Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(9): 4237-4245.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] Lin W K, Matoba O, Lin B S, et al. Astigmatism correction and quality optimization of computer-generated holograms for holographic waveguide displays[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5519-5527.
- [74] Yeom H J, Kim H J, Kim S B, et al. 3D holographic head mounted display using holographic optical elements with astigmatism aberration compensation[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32025-32034.
- [75] Maimone A, Georgiou A, Kollin J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 85.
- [76] Hong C C, Colburn S, Majumdar A. Flat metaform

- near-eye visor[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31): 8822-8827.
- [77] Bayati E, Wolfram A, Colburn S, et al. Design of achromatic augmented reality visors based on composite metasurfaces[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): 844-850.
- [78] Nikolov D K, Bauer A, Cheng F, et al. Metaform optics: bridging nanophotonics and freeform optics[J]. *Science Advances*, 2021, 7(18): eabe5112.
- [79] 张旭, 王梓, 屠科锋, 等. 视网膜投影显示技术研究进展[J]. *液晶与显示*, 2022, 37(5): 639-646.
Zhang X, Wang Z, Tu K F, et al. Research progress of retinal projection displays[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(5): 639-646.
- [80] Lee G Y, Hong J Y, Hwang S, et al. Metasurface eyepiece for augmented reality[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4562.
- [81] Chen W T, Zhu A Y, Sisler J, et al. Broadband achromatic metasurface-refractive optics[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 7801-7808.
- [82] Kamali S M, Arbabi E, Faraon A. Metasurface-based compact light engine for AR headsets[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11040: 1104002.
- [83] Afra T, Salehi M R, Abiri E. Design of two compact waveguide display systems utilizing metasurface gratings as couplers[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(28): 8756-8765.
- [84] Love G D, Hoffman D M, Hands P J W, et al. High-speed switchable lens enables the development of a volumetric stereoscopic display[J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 15716-15725.
- [85] Liu S, Hua H. Time-multiplexed dual-focal plane head-mounted display with a liquid lens[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(11): 1642-1644.
- [86] 杨鑫, 焦述铭, 宋强, 等. 计算机制相位彩虹全息近眼显示[J]. *光学学报*, 2021, 41(22): 2209001.
Yang X, Jiao S M, Song Q, et al. Computer generated phase-only rainbow holographic near-eye display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(22): 2209001.
- [87] Sun P, Chang S Q, Liu S Q, et al. Holographic near-eye display system based on double-convergence light Gerchberg-Saxton algorithm[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10140-10151.
- [88] Moon S, Lee C K, Nam S W, et al. Augmented reality near-eye display using Pancharatnam-Berry phase lenses[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 6616.
- [89] Song W T, Liang X A, Li S Q, et al. Large-scale Huygens' metasurfaces for holographic 3D near-eye displays[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(9): 2000538.
- [90] Lan S F, Zhang X Y, Taghinejad M, et al. Metasurfaces for near-eye augmented reality[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(4): 864-870.
- [91] Arbabi A, Arbabi E, Kamali S M, et al. Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13682.
- [92] Chen W T, Zhu A Y, Capasso F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(8): 604-620.