

基于超表面的增强现实三维光场显示研究(特邀)

饶至简^{1,2}, 杨哲文^{1,2}, 冯欣然^{1,2}, 李锦洋^{1,2}, 陈遵艺^{1,2}, 秦宇豪^{1,2}, 陈晓东^{1,2}, 董建文^{1,2*}¹中山大学物理学院, 广东 广州 510275;²中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275

摘要 随着增强现实(AR)技术对虚实融合体验感的高质量追求,近眼三维(3D)显示系统面临轻量化、高分辨率与大视场角等诸多挑战。传统几何光学组件受限于体积、色差与波前调控能力,已难以满足未来设备需求。作为新一代光信息元件,超表面凭借其亚波长调控能力和高集成度,为 AR 显示系统提供新的解决思路。梳理近期的超表面设计原理及其在微显示器与光学组合器中的前沿进展。进一步,结合光场显示的基础原理,分析基于超表面的 AR 3D 光场显示方案。最后,对 AR 3D 技术的未来发展趋势和面临的关键挑战进行展望。

关键词 增强现实; 超表面; 近眼显示; 三维成像; 光学设计

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS251284

1 引言

1.1 增强现实显示系统

虚拟现实(VR)和增强现实(AR)作为连接虚拟和现实世界的桥梁、人机交互的新兴科技,在教育、工业、医疗、安防等日常生活场景中展现出强大的适应性和潜力^[1-3]。VR系统的用户视觉感知主要依赖计算机生成的数字化虚拟空间,并结合多传感器融合的空间定位系统,实现实时动态适配。自1968年Sutherland在实验室中开发出“达摩克利斯之剑”以来,VR设备从早期原型逐步发展到当前具备高分辨率、低延迟数据传输与大视场角(FOV)等特性的产品^[4-6],已成为支撑元宇宙数字生态系统的核心基础技术之一。与之不同的是,AR系统更强调虚实融合,借助图像识别、移动计算等技术的进步^[7-9],逐步从特定场景用途扩展至消费电子领域^[10-13]。AR设备的功能也从最初仅支持简单信息投影,逐步发展为具备空间感知、人工智能(AI)实时交互与三维(3D)图像重构等能力^[14-18]。

随着VR和AR技术不断向高集成化、小型化与沉浸式体验方向发展,其光学显示模块的设计也面临更高性能、更低功耗与更轻量化的挑战。其中,AR显示作为连接数字世界与人眼视觉感知的关键接口,其成像质量、系统体积与人机交互性能,成为研发与工程实现中的核心问题。人们对FOV、响应带宽、分辨率、设备体积等性能参数提出更高要求^[19],传统几何光学元件已难以满足AR显示的需求。研究者们逐渐把目光

转向微纳光学元件,如超表面。超表面具备对光波相位、偏振、振幅等参数进行亚波长级调控的能力,且单片可以进行多自由度设计操作。近年来,超表面在AR显示系统中大放异彩,尤其是在3D光场显示方面^[20-21],并在高分辨、全彩显示、大FOV等多方面展现出巨大的发展潜力,被视为新一代AR显示系统的解决方案。

AR显示系统主要由两个部分组成:微显示器和光学组合器。微显示器投射内容通过光学组合器到达人眼,两者共同决定设备的体积、成像质量等重要参数。现有的微显示器方案面临着亮度效率、像素密度、响应时间等多方面的挑战,因此研究人员探索了多种基于超表面的改进路径。2020年,美韩科学家^[22]在基于具有可调谐性质超表面法布里-珀罗腔的新型OLED(Organic Light-Emitting Diode)器件上实现了显示像素密度大于10000 pixel/inch(1 inch=2.54 cm)的重大突破,为高分辨率的AR微显示器带来技术革新。Khaidarov等^[23]通过在GaP发光二极管(LED)上引入硅基超表面,实现30°的定向发射,有希望在未来减少成像中的串扰。不同偏振状态光在3D显示中具有重要作用。Zhou等^[24]结合顶部纳米光栅和底部全息超表面相互作用的思路,实现将反射的TE(Transverse Electric)光回收转换为TM(Transverse Magnetic)光,解决了OLED低效率、低偏振比问题。2021年,Xu等^[25]通过设计超表面结构实现显著的电磁场操控,其法向发光强度提升到原来的4.8倍,有

收稿日期: 2025-06-14; 修回日期: 2025-08-04; 录用日期: 2025-08-14; 网络首发日期: 2025-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(62035016)、广东省基础与应用基础研究基金(2023B1515040023)

通信作者: *dongjwen@mail.sysu.edu.cn

效提高光提取效率。

光学组合器的主要功能是将微显示屏所显示的图像传导至人眼处,其几种主流技术路线如图1(a)~(c)所示,其中LCP与RCP分别代表左右旋圆偏振器。传统方案如半反半透镜、曲面反射镜、Birdbath^[26-27]方案虽然结构简单,但是难以避免像差大、色差大、设备体积质量大等问题。自由曲面棱镜结构^[28-29]提供了矫正大角度畸变和大FOV方案(如120°),不过曲率和FOV存在平衡关系,整体质量和体积依旧很大。几何光波导^[30-31]集较高集成度、高分辨率、全彩、薄厚度等优势于一体,但受到高折射率材料种类、加工难度等限制,最终成像质量不佳^[32-33]。衍射光波导,如表面浮雕光栅(SRG)、体全息光栅(VHG)、偏振体全息光栅(PVG),是目前市场上主流方案^[34-37],可是FOV、衍射效率、响应带宽、色散重影问题等仍然不满足人眼需

求。近年来,研究人员积极探索超表面和光波导结合的思路。2018年,Capasso等^[38]提出如图1(d)所示的偏振选择性超表面光栅(metagrating)的波导显示方案,通过两个正交偏振通道选择性提取TE或TM光,再通过TE-pass和TM-pass交替排列的耦出光栅将TE和TM光分别衍射到两个独立的观察区域,FOV达到67°。2023年,Goodsell等^[39]利用超表面光栅和SRG作为耦合器,验证超表面光栅的衍射效率(28%)高于传统SRG(20%),体现出超表面在耦合效率提升方面的帮助,其光学架构如图1(e)所示。Guo等^[40]、Tian等^[41]和Moon等^[42]将微纳光栅结构和单层波导结合,利用RGB(红绿蓝)的高阶衍射效应,使得出射的RGB三色光具有一致的偏转角度和耦合效率,实现无色差光耦合,从而有效消除AR显示设备中的色差效应,其原理如图1(f)所示。

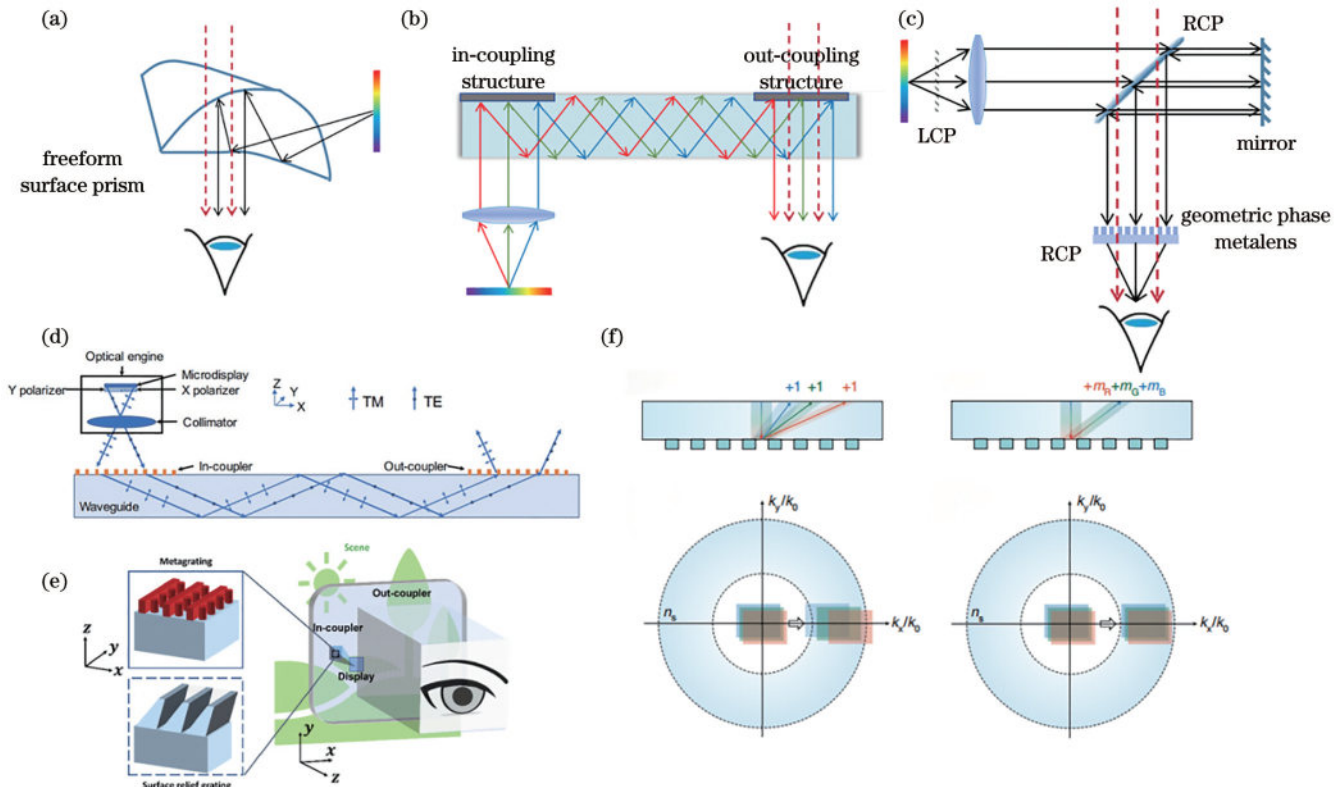


图1 典型AR显示系统光学组合器解决方案。(a)自由曲面棱镜;(b)光波导;(c)半反半透镜;(d)基于偏振依赖性超表面设计的光波导原理图^[38];(e)利用超表面光栅和SRG耦合器作为出瞳拓展示意图^[39];(f)消色差全彩AR光波导原理示意图^[41]

Fig. 1 Representative optical combiner solutions for AR display systems. (a) Freeform prism; (b) optical waveguide; (c) semi-reflective semi-transmissive lens; (d) schematic of an optical waveguide based on polarization-dependent metasurface design^[38]; (e) conceptual diagram of an exit pupil expander utilizing metasurface gratings and SRG couplers^[39]; (f) schematic illustration of achromatic full-color AR optical waveguide^[41]

1.2 3D显示技术

更真实地还原所见世界,一直以来都是人们追求的目标,而3D显示技术的历史发展揭示了人类对视觉体验的不懈追求和技术探索进程。早在1838年,Wheatstone提出利用人眼立体视觉原理实现3D显示的概念,并由此发明立体镜,标志着3D显示技术正式

开始发展^[43]。1891年,Duhaumon获得了红蓝立体成像法的专利,该方法通过将图像分离到红色和蓝色通道,并使用相应的眼镜观看,实现了早期的3D视觉效果。尽管这种方法存在色彩失真的问题,但它却是3D技术发展中的一个重要里程碑。1929年,Land发明了利用偏振镜片实现立体视觉的技术,这在很大程

度上改善了观看体验。1936 年,米高梅电影公司推出了采用红蓝眼镜的商业电影 Audioscopiks 系列^[44]。随着技术的不断发展,3D 显示巨大的商业应用价值逐步显现。

3D 显示有很多分类,根据是否存在显示机理和人眼视觉生理之间的矛盾,即辐辏-调节冲突(VAC),可将 3D 显示分为视差 3D 显示和真 3D 显示。其中,视差 3D 显示包括助视 3D 显示和光栅型 3D 显示。助视 3D 显示需利用眼镜或头盔等设备,例如,大部分电影院就是利用偏振式眼镜来实现 3D 效果的。助视 3D 设备包括分色式眼镜、偏振式眼镜、快门式眼镜、立体显示头盔等,如图 2(a)所示。分色式眼镜和偏振式眼镜利用空间分割,让使用者佩戴时观看具有不同视差的合成图像,通过眼镜对不同光的选择性透过,人的双眼会分别看到对应视差的画面。这两种眼镜制作简单且成本低廉,但分色眼镜会带来严重的色彩失真,偏振式眼镜会使图像的分辨率和亮度降低。快门式眼镜则是使显示屏快速交替显示不同视差的图像,该交替速度与眼镜的快门速度相同,最终使用者的双眼分别接收到不同视差的画面。该技术成本昂贵,且易出现重影问题。立体显示头盔通过直接在左右眼前的屏幕上显示对应视差的图像以达到 3D 效果。这种技术的分辨率高,且能做到沉浸式体验,但佩戴舒适性欠佳。相比助视 3D 显示,光栅型 3D 显示无需佩戴设备,属于裸眼 3D 技术。光栅型 3D 显示在屏幕上交替排列视差图像,然后由分光元件如狭缝光栅和柱透镜光栅将图像分别传递

至观察者的左右眼中^[45]。

视差 3D 显示技术的图像通常无法为人眼提供正确的深度线索,长时间观看会导致视觉疲劳、头晕等问题。为此,研究者提出真 3D 显示技术,包括全息显示、集成成像光场显示和体 3D 显示。真 3D 显示利用光学器件和调制光源的搭配,重构图像真实的 3D 光场信息,可以完全避免 VAC。1908 年,Lippmann^[46]提出基于微透镜阵列的集成成像光场显示技术,通过微透镜阵列分别记录和再现不同角度的光场信息以实现 3D 效果。全息显示技术通过记录和再现物体光波波前信息,从而实现 3D 图像显示,其可以给人眼提供各种立体视觉的深度暗示,原理如图 2(b)所示。1948 年,Gabor^[43]提出全息显示技术和同轴记录方案,但由于缺乏高相干性光源,且重建图像时会产生无法分离的共轭图像,该技术发展缓慢。1960 年,激光的发明为全息技术提供了相干光源,使其得以快速发展。20 世纪 70 年代至今,全息技术发展多样化,出现了动态光学全息^[47]、计算全息^[48]等多个分支,其应用领域也不仅限于显示领域,在数据存储、安全防伪、干涉测量和光场调控等方面也有巨大作用^[49-50]。体 3D 显示技术利用 LED 阵列等介质创造空间中可控的体素^[51],但体素是通过特定介质离散或在特定方向上周期性排布的,无法完全模拟真实物体表面连续的光场分布,因此在分辨率、观看位置和色彩范围等多个方面受到限制^[51]。图 2(c)展示了一种体 3D 显示光路原理。

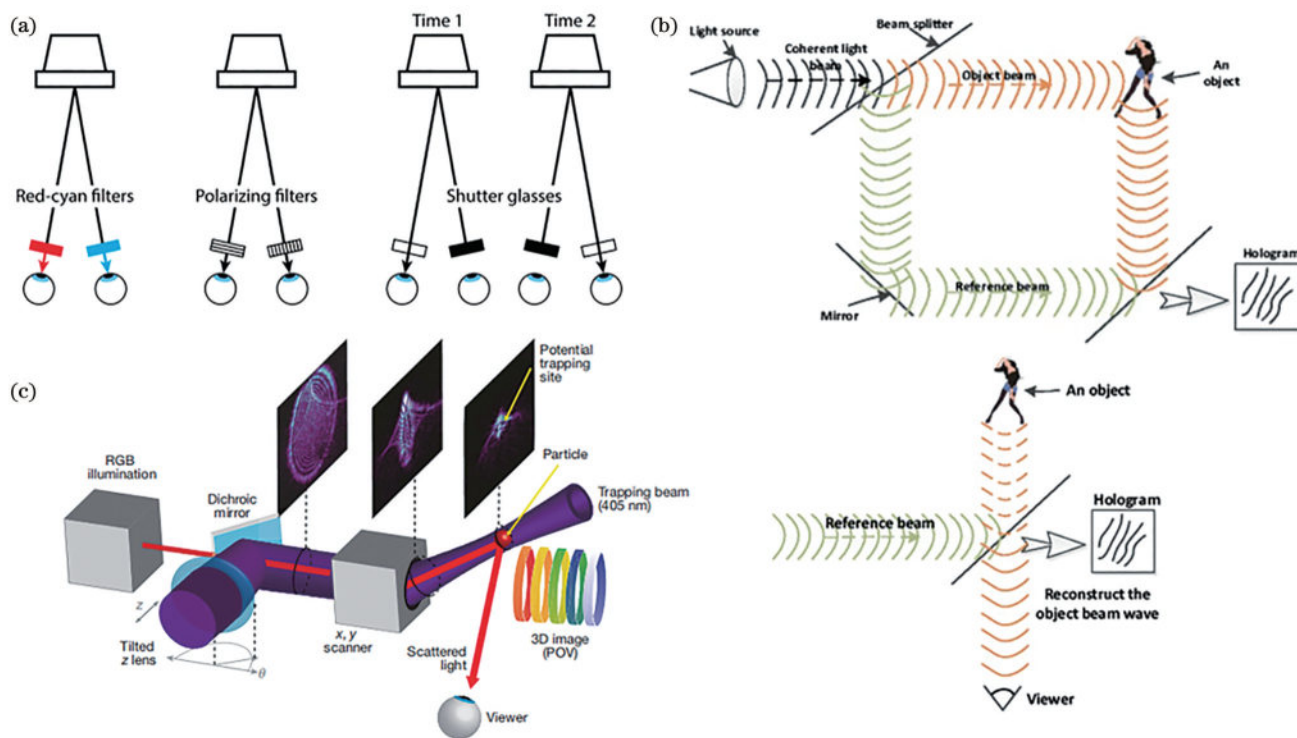


图 2 部分 3D 显示技术原理图。(a)三种助视眼镜示意图^[52];(b)全息技术的记录与重现过程^[53];(c)体 3D 显示系统^[51]

Fig. 2 Schematic diagrams of selected 3D display technologies. (a) Illustrations of three types of visual aid glasses^[52]; (b) recording and reconstruction process in holographic technology^[53]; (c) volumetric 3D display system^[51]

随着 VR 和 AR 等技术的快速发展,将 3D 光场显示技术与 AR 系统融合的需求日益凸显,如 AR 的 3D 导航系统等应用场景需长时间显示 3D 图像。本文首先分析超表面设计原理,接着简要讲述集成成像光场显示技术,然后介绍并讨论两种基于超表面的 3D 光场显示技术,最后对 AR 3D 光场显示技术发展和超表面发挥的作用进行总结和展望。

2 超表面设计原理

超表面是一类通过亚波长尺度结构单元实现光场调控的新型光学元件,可以设计独特的微纳结构,对光的相位、偏振、振幅等性质进行精细调控。在过去十年里已经涌现出许多基于超表面的器件,例如超透镜^[54-57]、超材料吸收体^[58-59]、涡旋光束发生器^[60-61]、隐身斗篷^[62]等等。近年来,AR 显示系统得到快速发展,但仍然在高分辨率、大 FOV、全彩显示、真 3D 显示、轻量化等方面存在诸多挑战。超表面凭借其超薄的外形、

亚波长的调制尺度和高调制自由度等优点,或许可以在平衡显示性能和系统紧凑性的前提下,为解决 AR 显示技术问题提供一个强有力的技术支撑。

对超表面的研究始于广义斯涅耳定律。2011 年, Yu 等^[60]基于费马原理,提出广义斯涅耳定律,其表达式为

$$\begin{cases} n_i \sin \theta_i - n_t \sin \theta_t = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\phi(x)}{dx} \\ n_i \sin \theta_r - n_i \sin \theta_r = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\phi(x)}{dx} \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ_i 为入射角; θ_t 和 θ_r 分别为光波的折射角度和反射角度; n_i 和 n_t 为两种介质折射率; λ_0 为入射光波波长; $\frac{d\phi(x)}{dx}$ 为相位梯度。从式(1)可以得出,光波经过超表面后的折射角和反射角与相位梯度变化有关。图 3 展示了通过调整 V 型天线旋转和开角来控制相位梯度变化,以实现光束反常折射现象的过程。

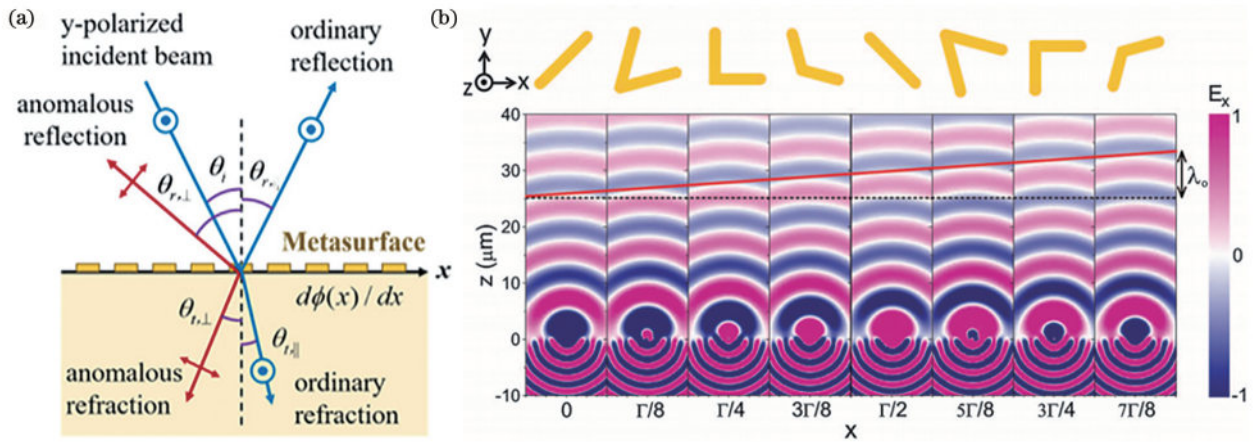


图 3 基于广义斯涅耳定律的异常折反射现象^[60]。(a)广义斯涅耳定律示意图;(b)相位不连续引发的反常折射现象

Fig. 3 Anomalous refraction and reflection phenomena based on generalized Snell's law^[60]. (a) Schematic illustration of generalized Snell's law; (b) anomalous refraction induced by phase discontinuities

早期设计的超表面一般是局域响应的,主要依靠调控相位来进行光场调控。相位调控机制包括传播相位调控、几何相位调控、混合相位调控和共振相位调控。传播相位是指电磁波在介质或结构内部传播过程中,由于路径长度或有效折射率差而引入的相位变化,主要通过调整超原子的几何形状来改变其等效折射率,进而控制传播相位变化^[54]。图 4(a)给出了一种基于传播相位设计的超透镜,不同直径的纳米柱产生的相移不同,按照透镜相位分布来分别安置对应的纳米柱,即可在平面上实现透镜的聚焦效果。传播相位一般是偏振不敏感的,而几何相位则与偏振相关。几何相位又称 PB 相位(Pancharatnam-Berry phase)^[63],是指当光的偏振态在参数空间中沿闭合路径变化时,光的波前会累积一个仅由偏振态轨迹的几何属性决定的相位。该相位独立于传播路径的几何长度和介质折射率,完全由偏振态变化过程所决定。可以用琼斯矩阵

进行简单的推导^[64]:考虑入射左旋圆偏振光 $\mathbf{E}_{\text{LCP}}$ =

$$\begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}, \text{各向异性结构单元取向角为 } \alpha, \text{出射光可表示为}$$

$$\mathbf{E}_s = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_o & 0 \\ 0 & t_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \times \mathbf{E}_i =$$

$$\frac{t_o + t_e}{2} \mathbf{E}_{\text{LCP}} + \frac{t_o - t_e}{2} e^{\pm i2\alpha} \mathbf{E}_{\text{RCP}} \quad (2)$$

式中: t_o 和 t_e 分别为入射光沿着超原子两个轴的正交线性偏振分量的散射系数; $\mathbf{E}_i$ 为入射光; $\mathbf{E}_{\text{RCP}}$ 为右旋圆偏振光。由式(2)可得,散射光由两个圆偏振态组成,一个分量具有与入射圆偏振光相同的旋向,另一个分量是具有 $\pm 2\alpha$ 相位延迟的正交偏振,如图 4(b)所示。通过调控各向异性结构单元的取向角,可以实现入射手性光的相位调控。液晶因其分子天然具有各向异性和电光响应特性,广泛应用于可控超表面的相位调制。

通过外加电场可改变液晶分子的取向,从而调节透射或反射光的传播相位。近年来,研究人员通过将液晶层与金属或介电纳米结构结合^[64],构成可调谐超构单元,在动态全息^[65]、可调集成光学^[66]等方面展现出广阔应用前景。混合相位调控同时结合两种或多种相位调控机制,以实现提升带宽、降低色散、增强偏振独立性等性能提升。共振相位则基于局部谐振效应,如米氏共振、法诺共振等,在共振波长附近引发电磁波散射相位的快速变化。该调控机制依赖结构单元的共振频率、品质因子及几何参数,具有高灵敏度和强色

散特性。振幅调制是超表面调控能力的重要补充。与相位调控不同,振幅调制并不改变波前方向,而是控制电磁波的强度分布,主要通过提高透射或反射率来达到调节振幅的目的。此外,基于干涉原理的调控方式也逐渐受到关注。例如,Huygens面超表面设计通过引入等幅、等相位的电偶极子与磁偶极子,使得反射波完全抵消,仅保留透射波,从而达到振幅增强甚至完全透射的目标^[67],也可以通过引入等幅、反相位的电偶极子与磁偶极子,实现增强反射光振幅甚至完全反射。

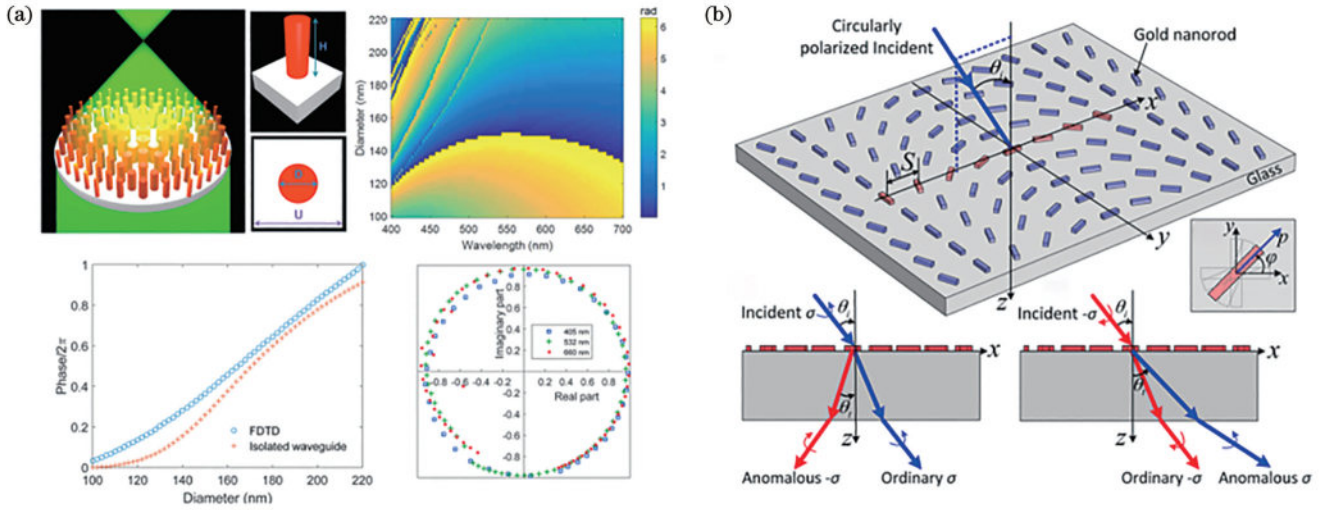


图 4 超表面的相位调控原理。(a)传播相位超表面^[54];(b)几何相位超表面^[68]

Fig. 4 Phase modulation mechanisms of metasurfaces. (a) Propagation phase metasurface^[54]; (b) geometric phase metasurface^[68]

近年来,随着平面光学器件在成像、显示、光计算等领域的快速发展,传统以局域响应为基础的超表面设计逐渐显露其在功能复杂性与调控精度上的局限性。局域性超表面依赖“点对点”的散射相位调控,本质上仍延续了自几何透镜时代以来“空间位置决定输出”的设计思想,虽然在透镜体积和调制尺度上有突破,但在光谱和能流控制方面依然受制于自身的局域特性,其光场响应特性如图 5(a)和(c)所示。这类局域超表面的共振品质因数(Q 值)通常较低,从个位数量级到几十量级,很难在窄带范围内实现显著的光谱响应变化,因此容易受色散影响导致性能下降,在实际应用中往往需要搭配额外的滤波器件,导致系统的复杂性增加。近年来,研究人员开始探索高 Q 值超表面,试图将高 Q 值光学共振模式引入超表面设计中,以提高超表面的功能复杂性^[69]。在这一背景下,研究者提出非局域超表面(nonlocal metasurface)的设计理念,并迅速发展为当前光学超表面领域的重要前沿方向。

在电磁学中,“非局域”是指材料或系统在空间某一点的响应/输出取决于空间扩展区域输入场的现象^[70]。非局域超表面通过引入结构单元之间的强耦合效应,使得器件输出不再依赖局部入射场,而是与更大范围内的入射波前空间分布紧密相关。实现机制主要

依托布洛赫模态的耦合调控与高 Q 值共振模式的空间色散特性,基于导模共振光子晶体以及连续域束缚态超表面等结构,实现不同空间频率成分之间的能量耦合放大。特别是通过构建非对角散射矩阵,非局域响应在实空间中体现为入射波与出射波之间特殊的全局映射关系,从而实现对光的动量直接调控。非局域超表面光场响应如图 5(b)和(d)所示,其传输函数并不固定,波前可随横向动量改变。随着研究的不断深入,非局域超表面已在空间频率滤波^[71]、边缘检测^[72]、理想反射器^[73]、热辐射调控^[74]等方面展现出独特优势。通过设计特定的波矢依赖传递函数,非局域超表面能够实现高效的一阶或二阶空间微分运算,成为模拟傅里叶光学操作的超薄算子器件^[71]。非局域超表面还能应用于自由空间板(spaceplate)领域^[75],打破了自由空间传播长度与器件厚度之间的固有关系,有望为成像系统的极致小型化提供新的技术。图 5(e)展示了非局域超表面在模拟光计算、全息成像与自由空间板等领域的应用。此外,结合高 Q 值共振模式与对称性破缺设计,非局域超表面在实现多功能态选择性调控、非对称传输与拓扑边界态激发等方面也取得了显著成果,被视为能突破新一代光学系统发展瓶颈的技术之一。

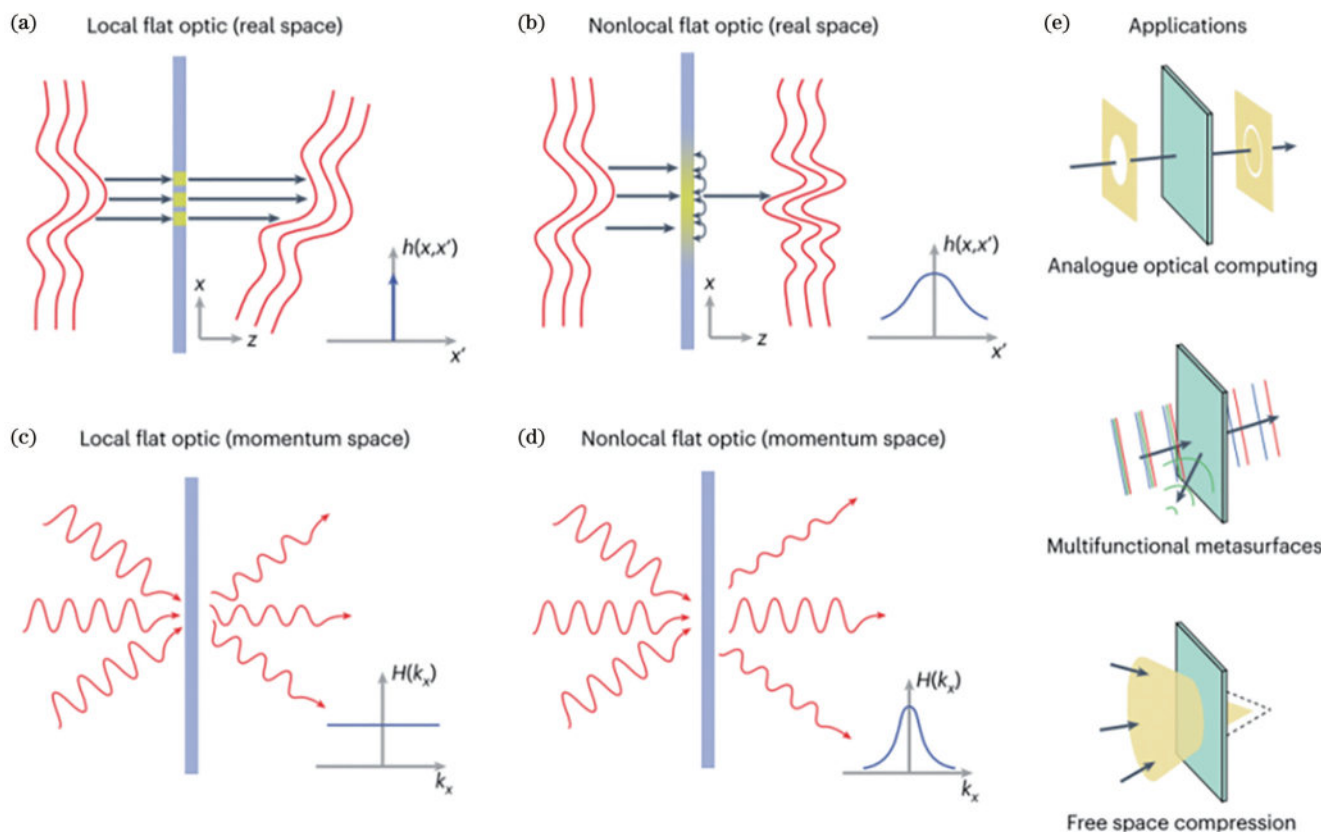


图5 局域超表面和非局域超表面的不同光场响应示意图^[70]。(a)(c)真实空间和动量空间中理想局域超表面的光学响应；(b)(d)真实空间和动量空间中非局域超表面的光学响应；(e)非局域超表面的应用

Fig. 5 Schematic illustration of different optical field responses of local and nonlocal metasurfaces^[70]. (a)(c) Optical responses of ideal local metasurface in real space and momentum space; (b)(d) optical responses of nonlocal metasurface in real space and momentum space; (e) applications of nonlocal metasurfaces

然而,随着超表面在各领域的发展逐渐深入,其设计复杂度与应用需求呈指数级增长,传统“经验模型+数值仿真”的设计范式逐渐面临瓶颈。AI如深度学习神经网络或能突破传统设计局限^[76]。AI不仅能通过数据驱动的方法加速超表面从结构到性能的“正向预测”^[77],还可利用其强大的非线性拟合能力^[78],替代传统低效、耗时且易受经验限制的优化流程,同时应对逆向设计中固有的解不唯一性问题,从而显著提高设计效率与物理相关性提取能力。

在正向预测方面,深度学习被视为电磁仿真的高效替代,通过构建从结构参数空间(g-space)到电磁响应空间(s-space)的映射,能够以远超传统方法的速度预测反射、透射、散射等电磁特性。相比有限时域差分法(FDTD)、有限元法(FEM)等数值模拟,基于神经网络的代理模型只需一次前向推理即可完成复杂的非线性预测,大幅减少计算资源与时间消耗^[79]。而在逆向设计中,AI通过神经网络建立从目标电磁响应到结构参数的反向映射,突破传统优化算法在高维非凸空间中易陷入局部最优、收敛速度慢等局限,尤其在应对一对多、多对多映射等逆问题时,生成对抗网络(GAN)、变分自编码器(VAE)等深度生成模型展现出

独特优势^[77,80-81]。

除了正逆向设计,AI还在挖掘超表面背后潜藏的物理规律方面发挥重要作用^[82-83]。对于复杂的非线性效应与多尺度耦合机制,往往难以建立解析模型,而数据驱动的物理知晓型神经网络(PINN)则通过嵌入麦克斯韦方程与先验物理约束,实现小样本、高精度的模型训练,有助于科研人员揭示超表面设计中的隐性物理机制。

值得一提的是,近年来如知识继承神经网络(knowledge-inherited learning neural network)^[84]与生成-筛选网络(generation-elimination framework)^[85]等新兴神经网络的陆续提出,为超表面设计开辟了全新路径。知识继承范式通过将已知“父代”超表面的设计经验迁移至“子代”新结构,实现了数据量显著降低与多目标设计的高效性,而生成-筛选网络则以VAE为核心,通过多样性候选生成与层级筛选,突破了频谱相关性设计中的多对多映射瓶颈。这些方法不仅提高了设计效率,也提升了AI辅助超表面设计的物理可解释性。

3 集成成像光场显示技术

集成成像最早由Lippmann于1908年提出^[86],当

时被称为“集成摄影”。这一技术融合了成像与图像处理的特点,随后被正式命名为“集成成像”(integral imaging)。1931 年, Ives^[86] 在研究中发现,集成成像在重建 3D 物体的过程中会产生孪像及深度反转等问题。为克服这些缺陷,他提出“两步拍摄法”,通过分别进行两次拍摄和重建,有效实现具有正确深度关系的 3D 图像重构。而后在 1936 年, Winnek^[87] 使用大孔径透镜避免了集成成像图像重叠的问题。然而, 受限于当时图像记录与显示手段的局限性,以及微透镜阵列加工技术的不成熟,集成成像技术的研究在随后数十年间基本处于停滞状态。1997 年, 日本学者 Okano 等^[88] 利用高清摄像机和液晶显示面板,实现了基于现代电子技术平台的集成成像记录与再现。随着计算机图像处理能力的迅速提升,以及微透镜阵列制造工艺的不断进步,集成成像的图像生成与显示过程变得愈发高效和便捷。这项技术重新获得研究关注,并迅速成为 3D 显示领域的重要研究方向之一,被广泛认为是当前最具应用前景的 3D 显示方案之一。值得一提的是,集成成像系统的一个显著优势在于其属于被动式成像方案,能够在非相干光源或自然环境光条件下正常工作,这一特性使其在如 AR 等需在户外环境运行的显示系统中,展现出尤为突出的应用潜力。

与其他 3D 显示技术相比,集成成像具有多项独特优势:无需佩戴专用观看设备,避免因穿戴引发的不适;支持水平与垂直方向的视差呈现,可实现连续的视点运动视差;能够在非相干光源下工作,无需使用激光等特殊光源;具备全彩显示能力^[89]。此外,集成成像能够实现真正的 3D 成像效果,有效克服传统 3D 显示系统中常见的视觉 VAC,从而显著降低用户在长时间观看过程中的视觉疲劳。

集成成像光场显示的原理是利用微透镜阵列或针孔阵列进行 3D 场景的记录和再现^[90],如图 6 所示。当用透镜阵列对 3D 物体成像时,微透镜阵列中每个

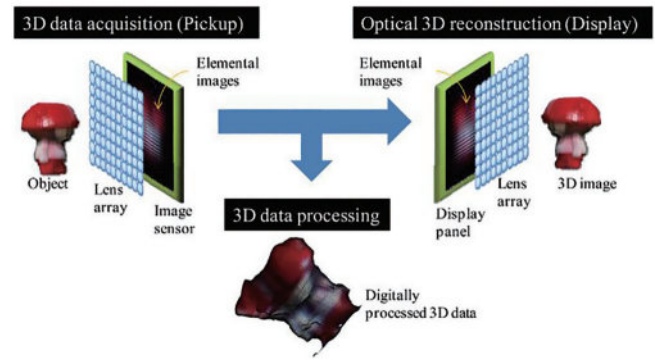


图 6 集成成像 3D 显示原理示意图^[90]

Fig. 6 Schematic illustration of principle of integral imaging 3D display^[90]

微透镜会显示物体的不同视角,利用传感器能得到不同微透镜所成的图像,即图像元阵列。当计算并生成相同的图像元阵列到片源上,并利用相同的透镜阵列对片源进行成像时,即可还原出 3D 物体。透镜阵列和聚焦的中心深度平面之间的距离 l 、透镜阵列和显示片源的距离 g 、透镜的焦距 f 三者之间满足高斯公式:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

如图 7 所示,基于间距 g 和焦距 f 之间的大小关系,集成成像可以被分成三种显示模式^[44]:当 $g > f$ 时,集成成像的显示模式称为实模式,其中心深度面和 3D 图像位于观察者和透镜阵列之间,观察者可以看到在屏外的 3D 实像;当 $g < f$ 时,集成成像的显示模式称为虚模式,其中心深度面和 3D 图像位于显示屏后,观察者可以看到位于屏内的 3D 虚像;当 $g = f$ 时,集成成像的显示模式称为聚焦模式,其中心深度面位于无穷远处,显示屏所发出的光会被微透镜准直成平行光,可以在透镜阵列前后同时显示出 3D 图像,该 3D 图像由一个尺寸与透镜单元相等的像点组成。

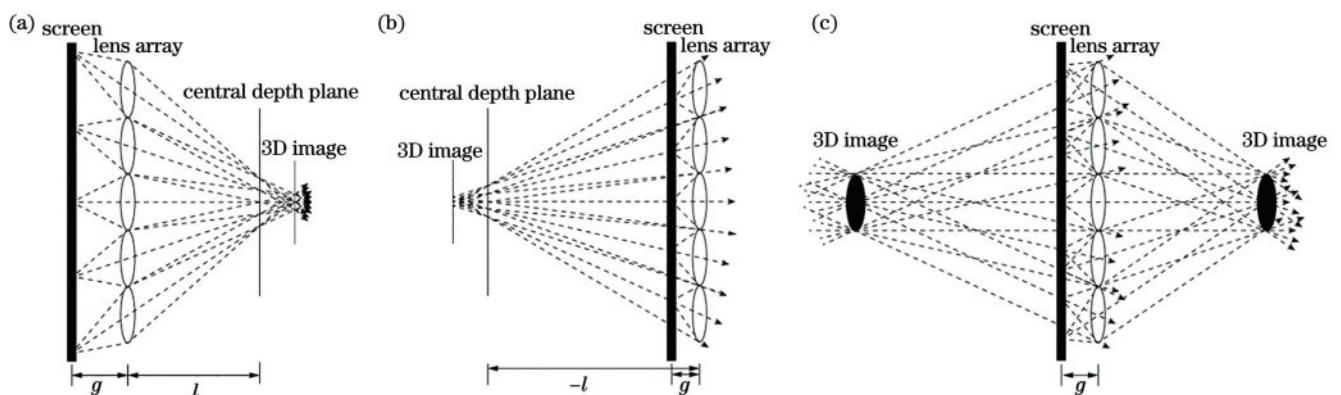


图 7 集成成像三种聚焦模式原理图。(a)实像模式;(b)虚像模式;(c)聚焦模式

Fig. 7 Schematic illustration of three focusing modes in integral imaging. (a) Real image mode; (b) virtual image mode; (c) focused image mode

集成成像本质上是光场显示技术,其核心在于对场景光场的离散化与再现,因此,如何用数学语言描述光场就变得尤为重要。光场的概念最早在 1936 年由 Gershun^[91] 提出,用来描述光在空间中的辐射传输特性。1991 年,Adelson 等^[92] 在前人的基础上提出七维全光函数(plenoptic function)这一概念,用来表示场景中物体表面发出或反射的光线,其示意图如图 8(a)所示。其函数定义如下:

$$L = L(V_x, V_y, V_z, \theta, \phi, \lambda, t) \quad (4)$$

式中: (V_x, V_y, V_z) 表示光线所在的 3D 空间位置坐标; (θ, ϕ) 分别对应光线在球坐标系中的方位角与俯仰

角; λ 描述光线所携带的波长信息; t 记录光线出现的时间点。由此可知,七维全光函数不仅涵盖了光场中的空间位置与传播方向,还能表达光线的颜色属性以及其随时间变化的动态特征。1996 年,Levoy 等^[93] 利用光场双平面模型,将全光函数降至四维:

$$L = L(u, v, s, t) \quad (5)$$

式中: (u, v) 和 (s, t) 分别为该描述光线依次穿过两个相互平行平面的交点。这两个相互平行的平面是由成像系统抽象简化而来的,如图 8(b)所示。双平面模型能够完整地描述人眼接收到的光线,因此这一模型不仅能够表示集成成像的采集过程,还能够表示集成成像的显示过程,如图 9 所示。

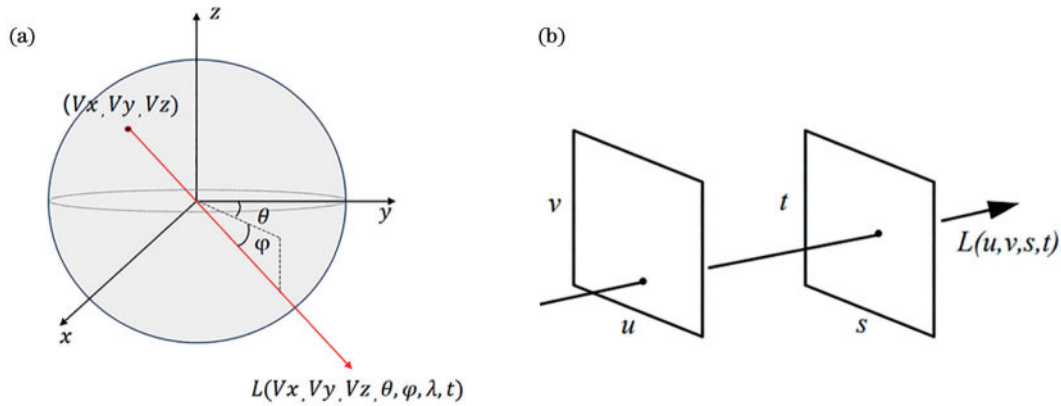


图 8 全光函数示意图。(a)七维全光函数^[92]; (b)基于光学双平面模型的四维全光函数^[93]

Fig. 8 Schematic illustration of plenoptic function. (a) Seven-dimensional plenoptic function^[92]; (b) four-dimensional plenoptic function based on optical two-plane model^[93]

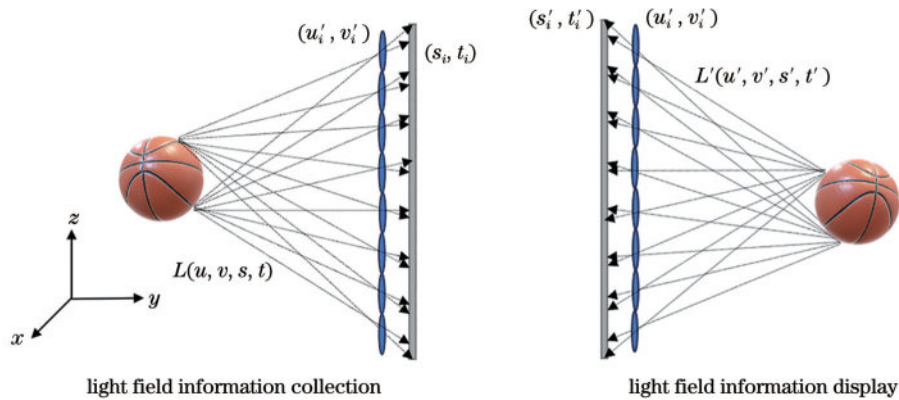


图 9 基于四维全光函数的集成成像收集和显示过程

Fig. 9 Collection and display process of integral imaging based on four-dimensional plenoptic function

4 基于超表面的 AR 3D 光场显示

如前文所述,超表面在 VR 和 AR 等近眼显示器中具有巨大的应用潜力,可以提高系统成像性能,扩大 FOV 或使系统更加轻便紧凑。已有不少光学超表面在 AR 2D 显示系统的微型化^[94]、消色差^[95]、增大 FOV^[96]和增大数值孔径^[55]等方面获得许多可喜的成果。Lee 等^[97] 利用超透镜作为目镜,实现了 90°宽视场

和高分辨的全彩 AR 显示系统。该超透镜既能够作为虚拟信息的成像透镜,又能作为透明玻璃供使用者观察现实场景。因此这种超透镜能直接放在人眼前方,这极大优化了传统光学的臃肿光学组件。Song 等^[98] 引入非局部超表面设计,通过设计不同结构单元的长距离相干耦合来实现高 Q 值,该结构可以把近红外波段的光定向反射至探测器,而在可见光波段是完全透过的。基于这一原理,他们展示了用于 AR 的眼动追

踪模组,在完成眼动追踪效果上还突破了传统眼动追踪模组不透明的难题,实现了透视(see-through)效果。虽然 AR 2D 显示技术发展迅速,但如何在 AR 上实现 3D 光场显示依然极具挑战。本章将介绍基于超表面的两种 AR 3D 光场显示技术路线。

4.1 基于超表面集成成像的 AR 3D 光场显示

早在 2013 年, Lanman 等^[99]将微显示屏和透镜阵列直接放置在眼睛前方,展示了将集成成像应用于 VR 3D 显示的原型机,但微透镜这种几何光学元件的固有色差会极大地影响成像质量,并限制系统的全彩显示能力。传统几何光学往往使用几片不同焦距的透镜级联来消除色差,然而这种级联多个透镜的操作会增大成像系统的体积和质量,这与 AR 显示所要求的轻量化和系统紧凑性背道而驰。超表面所具有的高调控自由度和高集成度可以解决这一问题。在 2019 年,中山大学的 Fan 等^[56]展示了基于可见光波段宽带消色差超透镜阵列的集成成像 3D 显示,图 10(a)为该项工作的示意图。研究人员制作了一个 60×60 的超透镜阵列,透镜直径为 $14 \mu\text{m}$,平均焦距为 $81.5 \mu\text{m}$ (波长为 $430 \sim 780 \text{ nm}$)。其中超透镜利用电子束光刻技术制

造,由二氧化硅衬底上的六方氮化硅纳米结构组成,厚度为 400 nm ,可以兼容互补金属氧化物半导体(CMOS)制造工艺。由于需要调控非偏振光,所筛选纳米柱具有 90° 空间旋转对称性。基于传播相位,不同形状纳米柱的等效折射率不同,研究人员通过筛选不同尺寸的方孔或圆孔纳米柱,使空间相位分布函数与入射光频率呈线性关系,在波长为 $430 \sim 780 \text{ nm}$ 范围内实现宽带透射消色差,其微纳结构如图 10(b)所示。为进一步验证集成成像的 3D 全彩显示效果,研究者搭建如图 10(c)所示的光路。采用消色差超透镜阵列的集成成像显示系统,能够在不同的深度处生成虚像“3”和“D”。调整相机焦距时,焦面上的图像清晰可见,而不在焦面上的图像呈离焦效果,表明该系统能提供正确的调节深度线索。此外,由于超透镜阵列的消色差特性,不同波长的深度信息保持一致,可以由白光形成清晰的像。该工作在提高系统紧凑性的情况下,为全彩 AR 3D 光场显示提供了极具潜力的平台。然而想要集成成像在 AR 系统中集成,还面临大面积超表面的制备加工精细度低^[100]、制造困难和图像元阵列的实时渲染计算复杂度高等问题。

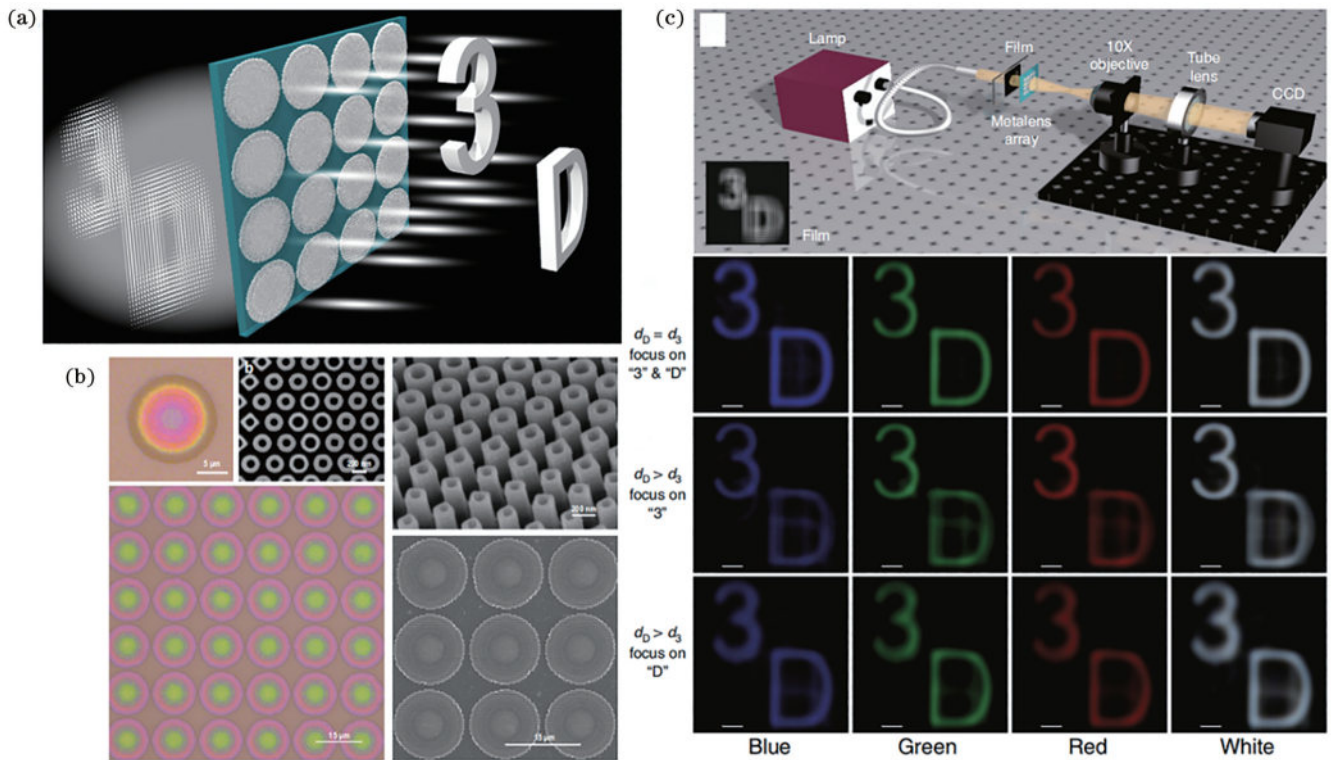


图 10 基于消色差超透镜阵列的集成成像 3D 显示^[56]。(a)超透镜集成成像示意图;(b)透镜样品的 SEM 图;(c)实验光路及 3D 显示效果

Fig. 10 Integral imaging 3D display based on achromatic metalens array^[56]. (a) Schematic illustration of metalens-based integral imaging; (b) SEM images of fabricated metalens sample; (c) experimental optical setup and 3D display results

为了进一步将集成成像和 AR 显示系统融合, 2024 年,该研究团队展示了一种结合商业微显示器和超透镜阵列的集成成像 AR 3D 显示系统^[20],其光学架构如图 11(a)所示。该显示系统的 FOV 为 2.29° ,景深

为 $100 \sim 375 \text{ mm}$,角分辨率为 $14.4 \text{ pixel}/(^{\circ})$ 。该超透镜阵列基于传播相位原理,通过控制圆柱形纳米柱的直径来调控其单元相位响应,经过优化设计,选择晶格常数为 416 nm 的矩形点阵纳米柱光栅。样品由纳米

压印技术制成,该技术被视为超表面实现大面积、低成本、高效率制备的希望之一^[101-102]。与电子束光刻技术相比,纳米压印技术可以快速复制许多超表面阵列样品,在大面积制造方面优势尤为明显。纳米压印黏合剂的折射率一般低于 2.0,因此需要高的纳米柱来实现 2π 相间隔覆盖,导致纳米柱的高径比大,增加压印的难度。为平衡制造难度和相位覆盖,研究人员选择折射率为 1.9 的压印胶作为超透镜材料,纳米柱的厚度设置为 500 nm。图 11(b)中展示了 AR 3D 光场显示模组,该模组仅有 7.23 g,很好地满足了 AR 的轻量化需求。显示系统通过分束器将 3D 图像反射至人眼处,以实现透视效果。超透镜阵列尺寸为 $1840\ \mu\text{m} \times 1840\ \mu\text{m}$,包含 4×4 个超透镜,单个超透镜的孔径为 $460\ \mu\text{m} \times 460\ \mu\text{m}$,一个超透镜对应微显示器中的 100×100 像素,该显示系统的有效分辨率为 400×400 。为了解决图像元阵列计算速度慢的问题,研究者提出一种新的图像元阵列渲染方法,在不牺牲精确性的前提下满足

实时显示的需要。其原理如图 11(c)所示,深度平面上的体素由系统参数(透镜间距、物距等)恒定地确定,并且静态地映射到像素,因此可以在渲染之前获取体素-像素映射查找表(LUT),而在图像元阵列渲染期间仅执行查找操作,从而实现超快速图像元阵列生成,渲染速度达到平均 67 frame/s,超过视频级 60 frame/s 的要求。

最终该 AR 系统的 3D 显示效果如图 11(d)所示。在模拟和实验中,当相机聚焦在“3”的深度平面上时,数字“3”清晰,而字母“D”相对模糊,反之亦然。这表明实验成功创建了两个光学深度平面,并成功为单目聚焦提供深度线索(focus cue)。实验在红绿蓝三个波段分别验证了其显示效果的一致性。该工作验证了超透镜阵列的设计灵活性、低成本的纳米压印制造与大规模生产的可行性,并提出可用于视频级显示的实时渲染方法,为下一代 AR 3D 显示的商业化打下基础。

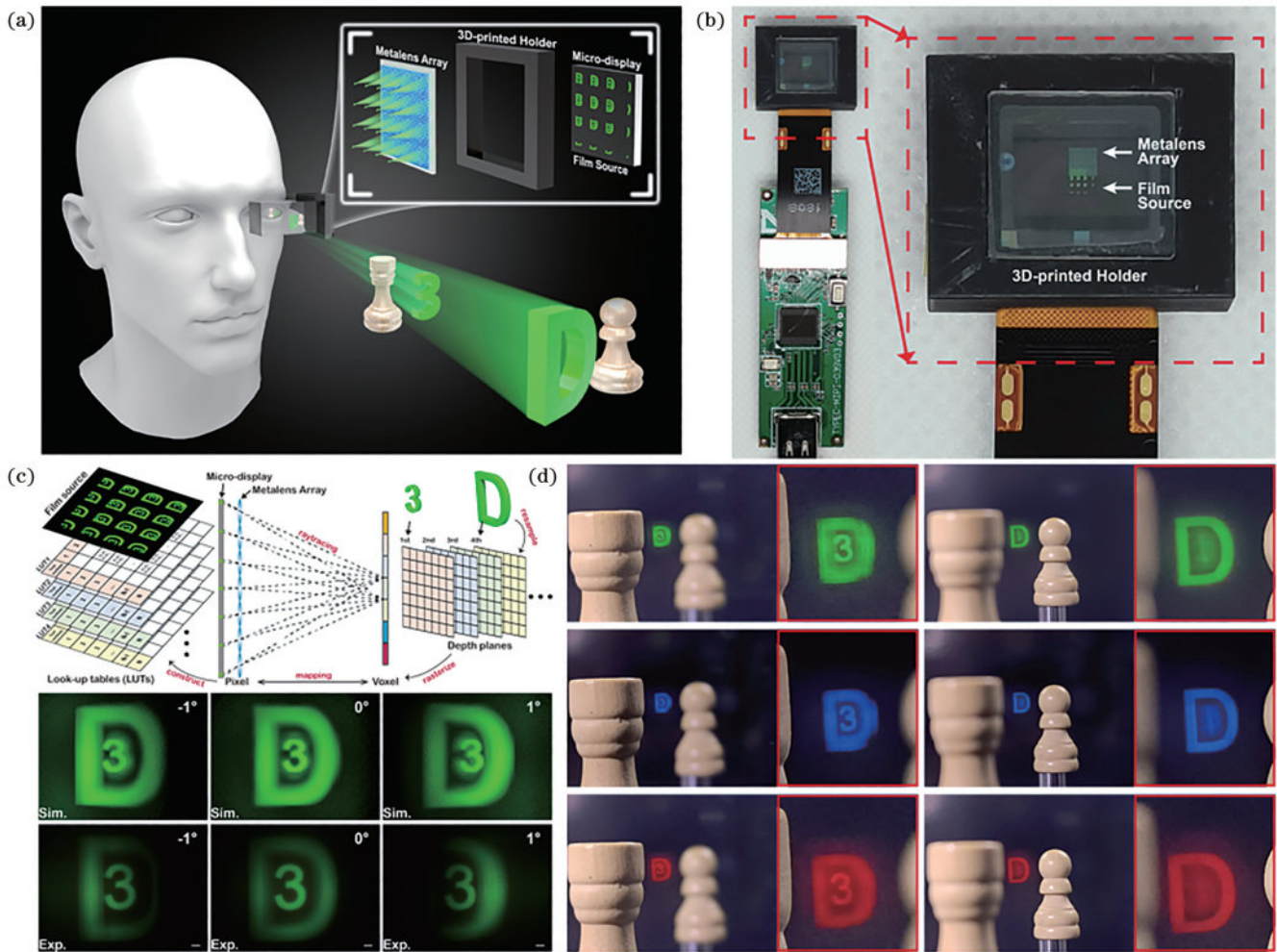


图 11 基于 Meta II 的 AR 真 3D 显示^[20]。(a)显示原理示意;(b)显示模组样机;(c)图像元阵列渲染方法示意图;(d) 3D 成像结果
Fig. 11 AR true 3D display based on Meta II^[20]. (a) Schematic illustration of display principle; (b) prototype of display module; (c) schematic diagram of microlens array rendering method; (d) 3D imaging results

4.2 基于超表面的全息 AR 3D 光场显示

全息显示是一种通过记录光波的振幅和相位来捕

获和重建 3D 图像的技术,包含记录和重建两个过程。记录时,激光被分为物体光和参考光,物体光携带物体

信息,与参考光在感光介质上形成干涉图案;重建时,用相同参考光照射该图案,生成与原物体光波相同的衍射波,从而重现3D图像。如今,人们已经无需通过真实物体或光束来产生干涉条纹,而是通过计算机生成全息(CGH)对3D场景光波进行数值计算,直接合成全息图^[103]。CGH的主要挑战在于生成高分辨率全息图所需的计算量巨大,限制其实时应用。2010年,Liu等^[48]利用三角网格分割3D空间,提出3D空间散射场的解析算法,其原理如图12(a)所示。由于未使用快速傅里叶变换,该算法突破了惠特克-香农采样定理带来的景深限制,其全息3D显示效果在深度线索、表面纹理、明暗处理和遮挡关系等多方面均表现出色。2013年,他们提出将计算全息技术与AR相结合,使用等效曲面SLM(Spatial Light Modulator)阵列并利用时间分割和空间拼接(TDST)技术设计构建一个4f系

统,使单个SLM的视角扩大3.6倍,实现浮现在空间中的全息3D图像,并实现了正确的视差显示和调节效果^[104],其系统架构和显示效果如图12(b)所示。该工作作为AR 3D光场显示提供可行的解决方法,展示了全息显示技术在扩展FOV和提升视觉体验方面的巨大潜力。此外,他们利用全息加针孔阵列实现了具有单目深度线索的3D显示效果^[105],提出空域夫琅禾费计算全息方法进一步解决面编码全息图中明暗、遮挡、纹理等问题^[106]。他们还结合商用Kinect设备获取3D深度信息,并最终获得动态全息视频结果,光学重构实验证实了有效的深度线索信息^[107],其工作原理如图12(c)所示。上述系列工作将3D显示技术与AR技术的发展线索交织在一起,为虚实融合的未来显示技术研究和应用在早期发展阶段提供了新视角和新思路。

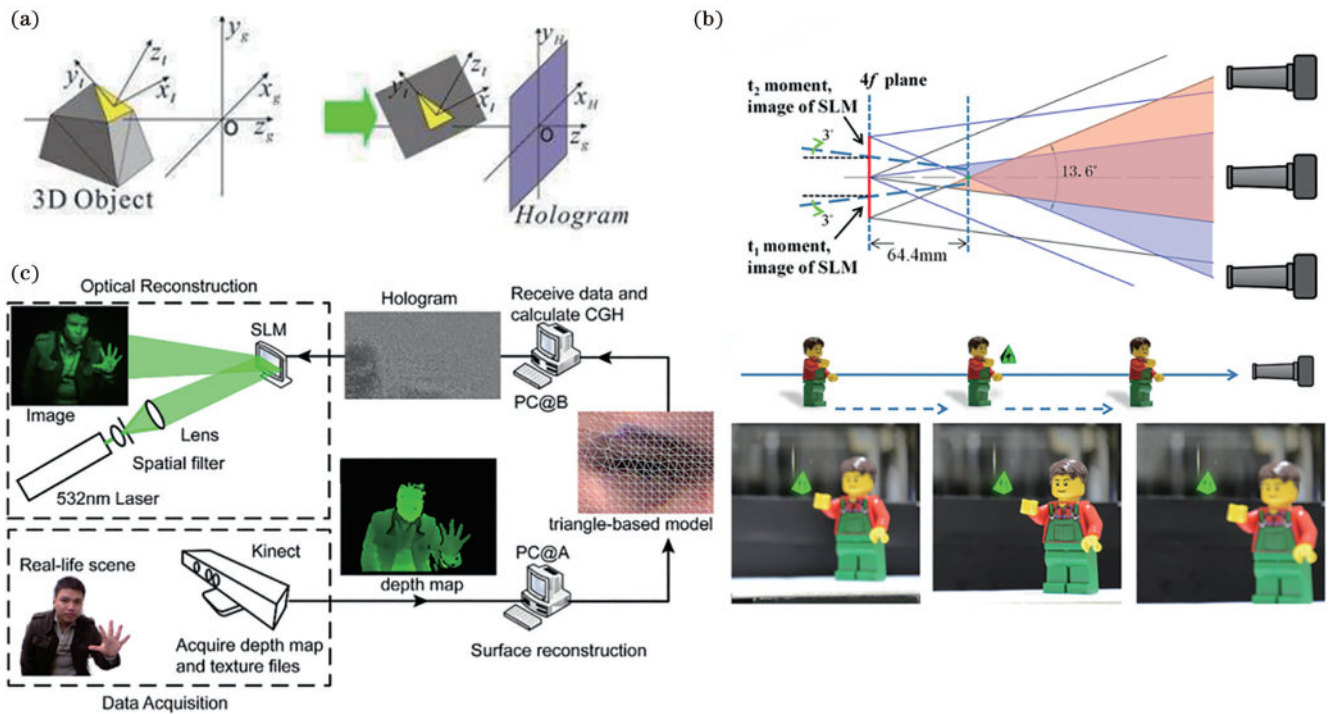


图12 计算全息光场显示。(a)基于三角网格的衍射^[48];(b)TDST系统与可用于AR的全息显示^[104];(c)基于Kinect的动态3D现实场景全息成像流程示意图^[107]

Fig. 12 Computer-generated holography. (a) Diffraction based on triangular mesh modeling^[48]; (b) TDST system and holographic display suitable for AR^[104]; (c) schematic diagram of dynamic 3D scene holography using Kinect-based acquisition^[107]

上述工作在全息显示的FOV、遮挡、全息图生成速度和成像分辨率等方面均有提升,使全息显示与AR系统融合成为可能。2024年,Gopakumar等^[21]提出一种新的全息AR 3D全彩显示系统,图13(a)展示了其光学架构。传统衍射光栅在效率、角度均匀性和器件厚度方面常存在瓶颈,难以满足AR全息显示的需求。该系统采用逆向设计全彩超表面光栅,该光栅由高折射率玻璃($n > 1.8$)制成,能够在可见光范围内对红(638 nm)、绿(521 nm)和蓝(445 nm)三色实现高效、角度均匀的耦合与衍射。在设计耦合光栅和耦出

光栅时进行 k 矢量(k 为入射信号光波矢)匹配以避免色散,在运用逆向设计优化后,最终光栅周期为384 nm,高度为220 nm,其制备过程为先在高折射率玻璃基板上沉积Cr膜并通过电子束光刻定义图案,随后采用电感耦合等离子体-反应离子刻蚀(ICP-RIE)等干法蚀刻工艺将结构转移至玻璃基底,并通过蚀刻-冷却循环以减少对掩模的热损伤,最后移除残余Cr层,其结构如图13(b)所示。其在 $\pm 5^\circ$ 视角范围内展现出优异的衍射效率和色彩均匀性,其中,绿光和蓝光的衍射效率相比传统单线条光栅的优势尤为显

著,同时为了兼顾AR的透视需要,该超表面光栅在可见光波段具有超过78%的透视效率。为保证3D全息图在波导中的高保真传播,在设计波导时特别考虑了色散补偿问题。研究人员通过控制波导厚度(5 mm)以及输入输出光栅之间的几何关系,实现了RGB三色的光程匹配,从而在结构层面补偿色散效应。具体而言,RGB三色光束在波导中分别经历1、3、5次全内反射后同时到达输出端,实现了色散等效对齐,如图13(c)所示。这种基于结构设计的色散控制方式,避免了传统色散工程中自由度不足的问题,使得图像在多深度平面上均保持清晰锐利。进一步,该研究引

入神经网络全息生成方法,将波导传播模型中的部分物理参数与耦合效率建模为神经网络模块。该方法提升了图像重建质量,将峰值信噪比(PSNR)提升3 dB~5 dB,并有效抑制噪声与伪影,增加图像真实感。更重要的是,该神经网络模型可用于近实时生成动态全息图,实现高刷新率的3D内容展示,这对提升AR体验的流畅性和沉浸感至关重要。总体而言,该工作通过从光学硬件到计算算法的系统级联合优化,展示了全彩、动态、紧凑的全息AR 3D光场显示方案,为未来轻量化、沉浸式空间计算平台的实现提供潜在可行路径。

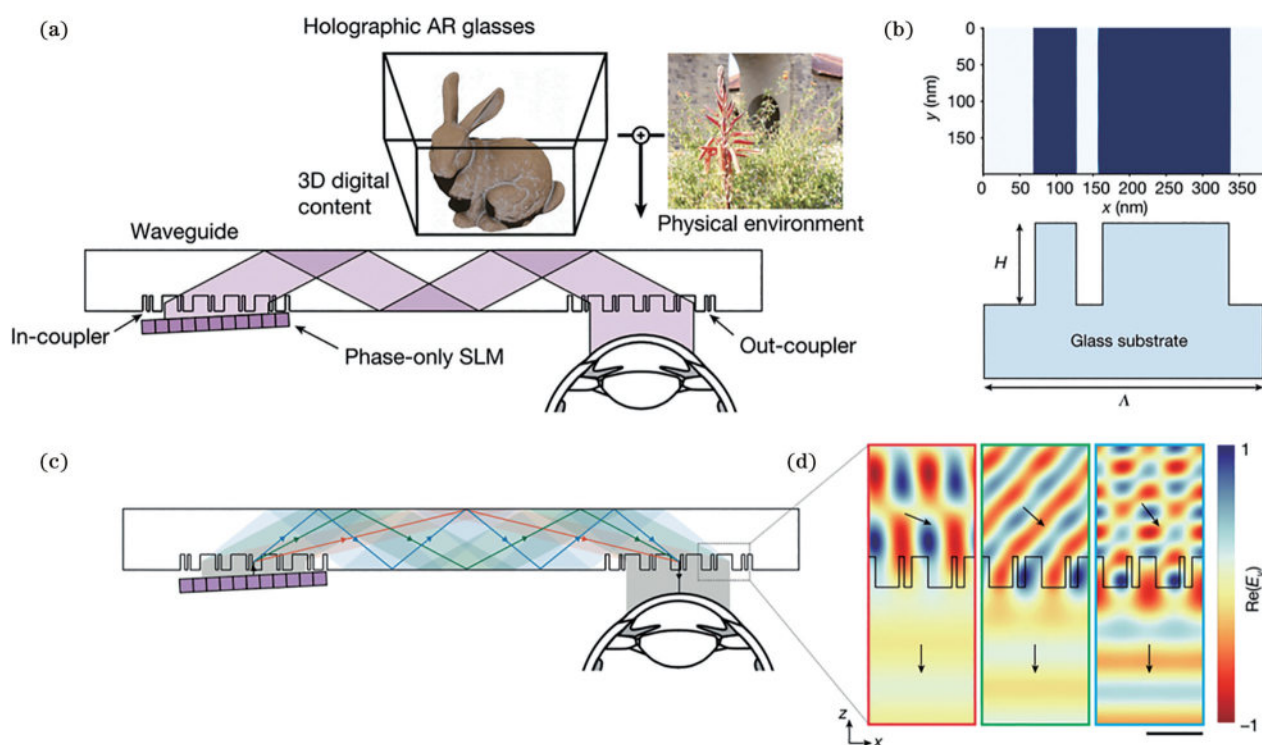


图13 基于超表面光栅光波导的全息AR 3D光场显示^[21]。(a)显示光路示意;(b)超表面光栅结构;(c)利用波导中光程匹配进行消色差;(d)红色(638 nm)、绿色(521 nm)和蓝色(445 nm)波长处的电场图,其中入射光和衍射光的波矢量由箭头表示

Fig. 13 Holographic AR 3D light field display based on metasurface grating waveguide^[21]. (a) Schematic of display optical path; (b) structure of metasurface grating; (c) achromatic correction by optical path matching within waveguide; (d) electric field distributions at red (638 nm), green (521 nm), and blue (445 nm) wavelengths, with incident and diffracted wave vectors indicated by arrows

5 总结与展望

作为新一代的移动显示终端,AR被视为是AI技术落地的最佳途径之一,将重新塑造人们与信息世界的交互模式,目前已广泛应用于消费电子、医疗、教育、工业制造等多个领域。在消费电子领域,AR眼镜和头显设备不断推动沉浸式交互体验的发展;在医疗领域,AR辅助系统被用于手术导航与医学培训,提高操作精度与效率;在教育 and 培训场景中,AR通过可视化手段增强知识传递效果;同时,在工业制造与维护中,AR实现了远程协作与设备可视化操作,提升工作效

率与安全性。本文简要讲述AR显示系统的发展历程,并从微显示器和光学组合器两个方面介绍超表面在AR领域的应用;总结超表面设计的基本原理,并且介绍近年来新兴的非局域超表面设计理念和神经网络在超表面设计中的应用。其中,非局域超表面基于动量空间的设计方法,预期能给高性能超表面提供新的解决方案,尽管其独特的物理机制在实际运用中往往会受到一些限制,例如,基于法诺共振的自由空间板可以实现空间压缩,但其对入射角度极其敏感。通过深度学习神经网络进行正向预测和逆向设计,可以提高超表面设计的效率,但有时未必准确,其预测结果的正

确与否需要研究者进一步评估。

随着 AR 显示向沉浸式、高互动性的方向发展,2D 显示已难以满足人们的需要,下一代 AR 3D 显示系统呼之欲出。从 3D 显示技术历史出发,介绍多种 3D 显示技术的异同,其中集成成像和全息显示能为人眼提供真实的光场深度信息,避免产生 VAC 问题。分析和探讨这两种技术的原理,并探讨其在 AR 中的应用。在 AR 系统中实现 3D 光场显示有两方面难题:一是传统光场显示系统所需光学元件较多,系统体积较大,而 AR 系统的光学架构出于轻量化的考虑,系统光学元件数量和整体体积都极其有限;二是人眼对 AR 显示系统的分辨率、FOV、显示帧率等性能参数要求极高,需要研究者平衡各性能指标,而非只追求某个指标的极限参数。既要敢于引入新技术突破传统架构限制,又要在新技术的优缺点中做取舍,找到核心痛点问题。例如,超表面虽然具有高自由度等多个优点,但这些优点往往无法集成在一片超表面上,因为消色差超透镜的数值孔径往往无法做大、上文提到的消色差光波导难以进行出瞳扩展等。

尽管超表面在 AR 显示领域已经取得了重大进展,想要充分利用超表面的光场调控自由度集成大 FOV、消色差、高分辨等特性,在理论仿真和实验制备上还有诸多挑战。首先,在理论仿真方面,跨尺度的仿真计算一直是领域难题。传统超表面仿真主要依靠 FDTD 等波动光学仿真算法,其软件一般无法和几何光学仿真直接衔接,不同算法间的协同低效且准确性低。其次,超表面的制造工艺依然面临诸多问题,大面积超表面技术制备精度较低,复杂的超表面加工依赖电子束光刻,因此制备面积始终受限,多片级联超透镜需要在纳米尺度上精确对准,这对工艺的要求也极高。另外,消色差超表面在可见光波段的带宽和工作效率常常无法兼容,这是需要突破的难点之一。不过,超表面的高调控自由度还没被发挥出来,而随着材料科学和智能制造的交叉融合,以及自组装、纳米压印等技术的不断发展,超表面的制备问题终会被解决。在显示技术与人机交互需求日趋紧密耦合的背景下,超表面所赋能的新一代 AR 3D 显示系统有望在智能可穿戴设备、医学影像、工业辅助和空间感知等多个前沿应用场景中发挥核心作用。可以相信,随着技术的不断完善与产业生态的逐步成熟,基于超表面的 AR 3D 光场显示将为沉浸式视觉体验打开新的篇章。

参 考 文 献

- [1] Huang T K, Yang C H, Hsieh Y H, et al. *Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) applied in dentistry*[J]. The Kaohsiung Journal of Medical Sciences, 2018, 34(4): 243-248.
- [2] Yuen S C, Yaoyuneyong G, Johnson E. *Augmented reality: an overview and five directions for AR in education*[J]. Journal of Educational Technology Development and Exchange, 2011, 4(1): 119-140.
- [3] Feiner S, MacIntyre B, Höllerer T, et al. *A touring machine: Prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment*[J]. Personal Technologies, 1997, 1(4): 208-217.
- [4] Hillmann C. *Comparing the gear VR, oculus go, and oculus quest*[M]//Hillmann C. Unreal for mobile and standalone VR: create professional VR apps without coding. Berkeley: Apress, 2019: 141-167.
- [5] Mumbai D V W, Rajesh Desai P, Nikhil Desai P, et al. *A review paper on oculus rift-a virtual reality headset*[J]. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2014, 13(4): 175-179.
- [6] Borrego A, Latorre J, Alcaniz M, et al. *Comparison of oculus rift and HTC vive: feasibility for virtual reality-based exploration, navigation, exergaming, and rehabilitation*[J]. Games for Health Journal, 2018, 7(3): 151-156.
- [7] Nafea M M, Tan S Y, Jubair M A, et al. *A review of lightweight object detection algorithms for mobile augmented reality*[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2022, 13(11): 536-546.
- [8] Zhang Z X, Wen F, Sun Z D, et al. *Artificial intelligence-enabled sensing technologies in the 5G/Internet of Things era: from virtual reality/augmented reality to the digital twin*[J]. Advanced Intelligent Systems, 2022, 4(7): 2100228.
- [9] Chen Y Q, Wang Q, Chen H, et al. *An overview of augmented reality technology*[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1237(2): 022082.
- [10] Devagiri J S, Paheding S, Niyaz Q, et al. *Augmented reality and artificial intelligence in industry: trends, tools, and future challenges*[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 207: 118002.
- [11] Furht B. *Handbook of augmented reality*[M]. New York: Springer, 2011.
- [12] Rejeb A, Rejeb K, Treiblmaier H. *How augmented reality impacts retail marketing: a state-of-the-art review from a consumer perspective*[J]. Journal of Strategic Marketing, 2023, 31(3): 718-748.
- [13] Vertucci R, D'Onofrio S, Ricciardi S, et al. *History of augmented reality*[M]//Nee A Y C, Ong S K. Springer handbook of augmented reality. Springer handbooks. Cham: Springer International Publishing, 2023: 35-50.
- [14] Holey P N, Gaikwad V T. *Google glass technology*[J]. International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies, 2014, 2(3): 278-281.
- [15] Arena F, Collotta M, Pau G, et al. *An overview of augmented reality*[J]. Computers, 2022, 11(2): 28.
- [16] Park S, Bokijonov S, Choi Y. *Review of microsoft HoloLens applications over the past five years*[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7259.
- [17] Solomashenko A B, Afanaseva O L, Shishova M V, et al. *Industrial applications of AR headsets: a review of the devices and experience*[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2025, 6(2): 358.
- [18] Zhao S D, Oakley I, Huang Y, et al. *Heads-up computing: opportunities and challenges of the next interaction paradigm with wearable intelligent assistants*[C]//Companion of the 2024 on ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, October 5, 2024, Melbourne, VIC, Australia. New York: ACM Press, 2024: 960-963.
- [19] Ha J, Kim S, Song D, et al. *Advanced VR and AR displays: improving the user experience*[J]. Information Display, 2023, 39(2): 15-19.
- [20] Fan Z B, Cheng Y F, Chen Z M, et al. *Integral imaging near-eye 3D display using a nanoimprint metalens array*[J]. eLight, 2024, 4(1): 3.
- [21] Gopakumar M, Lee G Y, Choi S, et al. *Full-colour 3D holographic augmented-reality displays with metasurface waveguides*[J]. Nature, 2024, 629(8013): 791-797.

- [22] 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.
- [23] Khaidarov E, Liu Z T, Paniagua-Dominguez R, et al. [Control of LED emission with functional dielectric metasurfaces](#)[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14: 1900235.
- [24] Zhou L, Zhou Y, Fan B L, et al. [Tailored polarization conversion and light-energy recycling for highly linearly polarized white organic light-emitting diodes](#)[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(7): 1900341.
- [25] Xu X, Kwon H, Finch S, et al. [Reflecting metagrating-enhanced thin-film organic light emitting devices](#)[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(5): 053302.
- [26] Wu C C, Shih K T, Huang J W, et al. [A novel birdbath eyepiece for light field AR glasses](#)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12449: 124490N.
- [27] Droessler J G, Rotier D J. [Tilted cat helmet-mounted display](#)[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(8): 849-854.
- [28] 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.
- [29] Xu H M, Yang T, Cheng D W, et al. [Compact freeform near-eye display system design enabled by optical-digital joint optimization](#)[J]. *Frontiers in Physics*, 2024, 12: 1440129.
- [30] 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.
- [31] Ruan N Y, Shi F, Tian Y, et al. [Design method of an ultra-thin two-dimensional geometrical waveguide near-eye display based on forward-ray-tracing and maximum FOV analysis](#)[J]. *Optics Express*, 2023, 31(21): 33799-33814.
- [32] Hou Q C, Wang Q W, Cheng D W, et al. [Geometrical waveguide in see-through head-mounted display: a review](#)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10021: 100210C.
- [33] Chen S L, Fu L W, Huang J W, et al. [Geometric waveguide optimization for ghost reduction in near-eye light field display](#)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2024, 12913: 129130H.
- [34] Ding Y Q, Yang Q, Li Y, et al. [Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges](#)[J]. *eLight*, 2023, 3(1): 24.
- [35] 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): 336.
- [36] Gu Y C, Weng Y S, Wei R, et al. [Holographic waveguide display with large field of view and high light efficiency based on polarized volume holographic grating](#)[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 7003707.
- [37] Bai Z Y, Cai W F, Cheng M, et al. [Liquid crystal polarization volume gratings and their applications in augmented reality waveguide displays](#)[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 629-645.
- [38] Capasso F, Shi Z J, Chen W T. [Wide field-of-view waveguide displays enabled by polarization-dependent metagratings](#)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10676: 1067615.
- [39] Goodsell J, Xiong P, Nikolov D K, et al. [Metagrating meets the geometry-based efficiency limit for AR waveguide in-couplers](#)[J]. *Optics Express*, 2023, 31(3): 4599-4614.
- [40] Guo Q H, Zhang S W, Zhang J, et al. [Design of single-layer color echelle grating optical waveguide for augmented-reality display](#)[J]. *Optics Express*, 2023, 31(3): 3954-3969.
- [41] Tian Z T, Zhu X L, Surman P A, et al. [An achromatic metasurface waveguide for augmented reality displays](#)[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 94.
- [42] Moon S, Kim S, Kim J, et al. [Single-layer waveguide displays using achromatic metagratings for full-colour augmented reality](#)[J]. *Nature Nanotechnology*, 2025, 20(6): 747-754.
- [43] Gabor D. [A new microscopic principle](#)[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [44] 马凤华. [集成成像三维显示及其双视技术研究](#)[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
Ma F H. [Studies on integral imaging 3D display and its dual-view technologies](#)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [45] 王琼华. [3D 显示技术与器件](#)[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Wang Q H. [3D display technology and devices](#)[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [46] Lippmann G. [La photographie integrale](#)[J]. *Comptes-Rendus*, 1908, 146: 446-451.
- [47] Tay S, Blanche P A, Voorakaranam R, et al. [An updatable holographic three-dimensional display](#)[J]. *Nature*, 2008, 451(7179): 694-698.
- [48] Liu Y Z, Dong J W, Pu Y Y, et al. [High-speed full analytical holographic computations for true-life scenes](#)[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3345-3351.
- [49] Pi D P, Liu J, Wang Y T. [Review of computer-generated hologram algorithms for color dynamic holographic three-dimensional display](#)[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 231.
- [50] Blinder D, Birnbaum T, Ito T, et al. [The state-of-the-art in computer generated holography for 3D display](#)[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(3): 35.
- [51] Smalley D E, Nygaard E, Squire K, et al. [A photophoretic-trap volumetric display](#)[J]. *Nature*, 2018, 553(7689): 486-490.
- [52] Banks M S, Hoffman D M, Kim J, et al. [3D displays](#)[J]. *Annual Review of Vision Science*, 2016, 2: 397-435.
- [53] Yang L, Dong H W, Alelaiwi A, et al. [See in 3D: state of the art of 3D display technologies](#)[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, 75(24): 17121-17155.
- [54] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carmes C, et al. [Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths](#)[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(11): 7229-7234.
- [55] Fan Z B, Shao Z K, Xie M Y, et al. [Silicon nitride metalenses for close-to-one numerical aperture and wide-angle visible imaging](#)[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(1): 014005.
- [56] 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: 67.
- [57] Yoon G, Kim K, Huh D, et al. [Single-step manufacturing of hierarchical dielectric metalens in the visible](#)[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2268.
- [58] Yang F, Li R H, Tan S L, et al. [Visible-mid infrared ultra-broadband and wide-angle metamaterial perfect absorber based on cermet films with nano-cone structure](#)[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(13): 2451-2460.
- [59] Hou W J, Yang F, Chen Z M, et al. [Wide-angle and broadband solar absorber made using highly efficient large-area fabrication strategy](#)[J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 4424-4433.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] Gharghi M, Gladden C, Zentgraf T, et al. [A carpet cloak for visible light](#)[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(7): 2825-2828.
- [63] Hu J, Bandyopadhyay S, Liu Y-H, et al. [A review on metasurface: from principle to smart metadevices](#)[J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 8: 586087.
- [64] 冯超, 何涛, 施宇智, 等. [超表面调控琼斯矩阵技术研究进展\(特邀\)](#)[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(1): 0123001.
Feng C, He T, Shi Y Z, et al. [Research progress of metasurface-based Jones matrix modulation \(invited\)](#)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(1): 0123001.

- [65] Moitra P, Xu X W, Maruthiyodan Veetil R, et al. **Electrically tunable reflective metasurfaces with continuous and full-phase modulation for high-efficiency wavefront control at visible frequencies**[J]. ACS Nano, 2023, 17(17): 16952-16959.
- [66] Dong C K, Gu X W, He Y Y, et al. **An ultra-compact integrated phase shifter via electrically tunable meta-waveguides**[J]. Nanoscale Horizons, 2025, 10(5): 933-943.
- [67] Pfeiffer C, Grbic A. **Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets**[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(19): 197401.
- [68] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. **Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation**[J]. Nano Letters, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [69] Overvig A, Alù A. **Diffraction nonlocal metasurfaces**[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(8): 2100633.
- [70] Shastri K, Monticone F. **Nonlocal flat optics**[J]. Nature Photonics, 2023, 17(1): 36-47.
- [71] Silva A, Monticone F, Castaldi G, et al. **Performing mathematical operations with metamaterials**[J]. Science, 2014, 343(6167): 160-163.
- [72] Zhou Y, Zheng H Y, Kravchenko I I, et al. **Flat optics for image differentiation**[J]. Nature Photonics, 2020, 14(5): 316-323.
- [73] Diaz-Rubio A, Asadchy V S, Elsakka A, et al. **From the generalized reflection law to the realization of perfect anomalous reflectors**[J]. Science Advances, 2017, 3(8): e1602714.
- [74] Overvig A C, Mann S A, Alù A. **Thermal metasurfaces: complete emission control by combining local and nonlocal light-matter interactions**[J]. Physical Review X, 2021, 11(2): 021050.
- [75] Guo C, Wang H W, Fan S H. **Squeeze free space with nonlocal flat optics**[J]. Optica, 2020, 7(9): 1133-1138.
- [76] 金欣, 龙振威, 曾云辉. **超表面光场成像研究现状及展望(特邀)**[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(16): 1611007.
- Jin X, Long Z W, Zeng Y H. **Progress and prospect of metasurface light field imaging (invited)**[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(16): 1611007.
- [77] Liu Z C, Zhu D Y, Rodrigues S P, et al. **Generative model for the inverse design of metasurfaces**[J]. Nano Letters, 2018, 18(10): 6570-6576.
- [78] Qian C, Kaminer I, Chen H S. **A guidance to intelligent metamaterials and metamaterials intelligence**[J]. Nature Communications, 2025, 16: 1154.
- [79] Zhang J, Qian C, Fan Z X, et al. **Heterogeneous transfer-learning-enabled diverse metasurface design**[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(17): 2200748.
- [80] Ma W, Cheng F, Xu Y H, et al. **Probabilistic representation and inverse design of metamaterials based on a deep generative model with semi-supervised learning strategy**[J]. Advanced Materials, 2019, 31(35): e1901111.
- [81] Peurifoy J, Shen Y C, Jing L, et al. **Nanophotonic particle simulation and inverse design using artificial neural networks**[J]. Science Advances, 2018, 4(6): eaar4206.
- [82] Iten R, Metger T, Wilming H, et al. **Discovering physical concepts with neural networks**[J]. Physical Review Letters, 2020, 124(1): 010508.
- [83] Chen Z, Liu Y, Sun H. **Physics-informed learning of governing equations from scarce data**[J]. Nature Communications, 2021, 12: 6136.
- [84] Jia Y T, Qian C, Fan Z X, et al. **A knowledge-inherited learning for intelligent metasurface design and assembly**[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12: 82.
- [85] Chen J T, Qian C, Zhang J, et al. **Correlating metasurface spectra with a generation-elimination framework**[J]. Nature Communications, 2023, 14: 4872.
- [86] Ives H E. **Optical properties of a Lippmann lenticulated sheet**[J]. Journal of the Optical Society of America, 1931, 21(3): 171.
- [87] Winnek C D F. **Apparatus for making a composite stereograph: US2063985**[P]. 1936-12-15.
- [88] Okano F, Hoshino H, Arai J, et al. **Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography**[J]. Applied Optics, 1997, 36(7): 1598-1603.
- [89] Javidi B, Carnicer A, Arai J, et al. **Roadmap on 3D integral imaging: sensing, processing, and display**[J]. Optics Express, 2020, 28(22): 32266-32293.
- [90] Park J H, Hong K, Lee B. **Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging**[J]. Applied Optics, 2009, 48(34): H77-H94.
- [91] Gershun A. **The light field**[J]. Journal of Mathematics and Physics, 1939, 18(1/2/3/4): 51-151.
- [92] Adelson E H, Bergen J R. **The plenoptic function and the elements of early vision**[M]//Landy M, Movshon J A. Computational models of visual processing. Cambridge: The MIT Press, 1991.
- [93] Levoy M, Hanrahan P. **Light field rendering**[M]//Seminal graphics papers: pushing the boundaries. New York: ACM Press, 2023: 441-452.
- [94] 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.
- [95] Khorasaninejad M, Shi Z, Zhu A Y, et al. **Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion**[J]. Nano Letters, 2017, 17(3): 1819-1824.
- [96] Liu Y, Li W D, Xin K Y, et al. **Ultra-wide FOV meta-camera with transformer-neural-network color imaging methodology**[J]. Advanced Photonics, 2024, 6(5): 056001.
- [97] Lee G Y, Hong J Y, Hwang S, et al. **Metasurface eyepiece for augmented reality**[J]. Nature Communications, 2018, 9: 4562.
- [98] Song J H, van de Groep J, Kim S J, et al. **Non-local metasurfaces for spectrally decoupled wavefront manipulation and eye tracking**[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(11): 1224-1230.
- [99] Lanman D, Luebke D. **Near-eye light field displays**[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(6): 220.
- [100] Yang S M, Cheng B Y. **Micro-nano-fabrication technology**[M]//Zhang G G. Precision machining process and technology. Precision manufacturing. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025: 1-43.
- [101] He S K, Tian Y, Zhou H M, et al. **Review for micro-nano processing technology of microstructures and metadevices**[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(24): 2420369.
- [102] 胡跃强, 李鑫, 王旭东, 等. **光学超构表面的微纳加工技术研究进展**[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(9): 20201035.
- Hu Y Q, Li X, Wang X D, et al. **Progress of micro-nano fabrication technologies for optical metasurfaces**[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(9): 20201035.
- [103] Blanche P A. **Holography, and the future of 3D display**[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(4): 28.
- [104] Liu Y Z, Pang X N, Jiang S J, et al. **Viewing-angle enlargement in holographic augmented reality using time division and spatial tiling**[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12068-12076.
- [105] Pu Y Y, Dong J W, Chen B C, et al. **Three-dimensional imaging with monocular cues using holographic stereography**[J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3279-3281.
- [106] 董建文, 陈定尘, 庞晓宁, 等. **空域计算全息三维成像技术**[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0701001.
- Dong J W, Chen D C, Pang X N, et al. **Spatial-domain computer generated holographic three-dimensional display**[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 0701001.
- [107] Pang X N, Jiang S J, Dong J W. **Dynamic holographic imaging of real-life scene**[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105590.

Augmented Reality Three-Dimensional Light Field Display with Metasurface (Invited)

Rao Zhijian^{1,2}, Yang Zhewen^{1,2}, Feng Xinran^{1,2}, Li Jinyang^{1,2}, Chen Zunyi^{1,2}, Qin Yuhao^{1,2},
Chen Xiaodong^{1,2}, Dong Jianwen^{1,2*}

¹*School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;*

²*State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China*

Abstract

Significance Augmented reality (AR), as an emerging technology bridging the virtual and real worlds, has demonstrated significant potential and adaptability in various fields such as education, industry, healthcare, and security. In contrast, AR places more emphasis on blending virtual and real environments. With advancements in image recognition and mobile computing, AR has expanded from specialized industrial applications into the consumer electronics domain. Modern AR devices have progressed beyond basic information overlay, now supporting spatial awareness, real-time artificial intelligence (AI) interaction, and three-dimensional (3D) image reconstruction. With the pursuit of high-quality fusion experiences in AR technology, near-eye 3D display systems face numerous challenges, including lightweight design, high resolution, and wide field of view.

Limited by volume, chromatic aberration, and wavefront modulation capability, traditional geometric optical components fail to on-demand needs. As a representative of optical and photonic elements, metasurfaces offer a novel approach for AR display systems due to their subwavelength modulation capability and high integration. With the ability to manipulate light's phase, polarization, and amplitude at subwavelength scales, metasurfaces offer multi-degree-of-freedom control within a single layer. In recent years, they have shown great promise in AR display applications, particularly in 3D light field generation, offering significant advantages in high resolution, full-color imaging, and wide field of view. These features position metasurfaces as a compelling solution for next-generation AR display technologies.

Progress Recent advances in AR 3D light field displays based on metasurfaces are summarized. First, two main technical routes—metasurface-integrated integral imaging and holographic display—are introduced. In the metasurface-integrated integral imaging pathway, a compact full-color 3D display system is first demonstrated using a visible broadband achromatic metalens array, which achieves accurate depth cues and consistent color reproduction. Subsequently, the system is further developed by integrating commercial microdisplays with nanoimprinted metalens arrays, resulting in a lightweight AR module with 400×400 effective resolution and real-time elemental image rendering at 67 frame/s through a precomputed lookup table (LUT) method. In the holographic display route, high-quality computer-generated holography (CGH) is realized using analytical diffraction algorithms based on triangular mesh modeling. This is combined with tiled and time-division spatial light modulator (SLM) configurations to expand the field of view and provide accurate monocular depth cues. More recently, a full-color holographic AR system is demonstrated using inverse-designed full colour metasurface gratings and waveguide-based dispersion compensation. This system achieves high diffraction efficiency, color uniformity, and over 78% see-through capability, while incorporating neural-network-based CGH optimization to enhance image fidelity and enable near real-time hologram generation. Finally, current limitations and future directions are discussed, including challenges in large-area fabrication, chromatic aberration correction, resolution enhancement, and the integration of high frame rate 3D content for immersive AR applications.

Conclusions and Prospects Metasurfaces are emerging as a promising solution for next-generation AR 3D light field display systems. In summary, although significant progress has been made in integrating metasurfaces into microdisplays and optical combiners, challenges remain in balancing system compactness with high performance. Further efforts are required in multi-scale simulation, large-area fabrication, and dispersion management to fully unlock the potential of metasurfaces in achieving wide field of view, high resolution, and true 3D imaging. With advances in materials science, intelligent manufacturing, and cross-disciplinary integration, metasurface-enabled AR 3D display technology is expected to play a vital role in future immersive visual experiences across various application scenarios.

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