

基于超构表面的三维成像技术

景晓丽, 王涌天, 黄玲玲*

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 三维成像技术具有强大的精细化空间数据描述能力,在消费电子、自动驾驶、机器视觉和虚拟现实等领域已成为最关键的传感技术之一。现有的三维成像技术受到传统折射元件和衍射元件的物理机制限制,难以满足设备小型化、集成化、多功能、大视场、大数值孔径、高分辨等性能要求。超构表面作为由亚波长纳米天线阵列构成的智能表面,能够实现对光场的振幅、相位、偏振等参量的人为调控,具有体积小、高空间带宽积、高效率、多功能、大视场等优势,有望成为新一代光学元件服务于三维成像技术。本文综述了基于超构表面的三维成像技术进展,在超构表面的物理机制和应用优势的分析基础上,详细介绍了超构表面在三维成像技术例如结构光技术、飞行时间法、光场成像和点扩散函数工程中的应用和表现,总结和展望了基于超构表面的三维成像技术面临的挑战和未来发展方向。

关键词 超构表面; 三维成像; 光场调控; 小型化

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/LOP223453

Metasurface-Based Three-Dimensional Imaging Technique

Jing Xiaoli, Wang Yongtian, Huang Lingling*

School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Three-dimensional (3D) imaging enables the elaborate numerical description of the physical space, leading to one of the most critical technologies in consumer electronics, automatic drive, machine vision, and virtual reality. The existing 3D imaging is limited by the physical mechanism of the traditional refraction element and diffraction optical element, so it is difficult to meet the performance requirements of miniaturization, integration, multi-function, large field of view, large numerical aperture, high spatial resolution, and so on. Metasurface, an intelligent surface composed of subwavelength nano-antenna arrays, can realize the artificial control of the amplitude, phase, polarization, and other parameters of the light field. Therefore, it has the advantages of small size, high spatial bandwidth product, high efficiency, multi-function, large field of view, and so on, showing the potential as a new generation of optical elements for 3D imaging. In this paper, the progress of metasurface-based 3D imaging technology is reviewed. Based on the analysis of the physical mechanism and application advantages of the metasurface, the application and performance of the metasurface-based 3D imaging technology such as structured light technology, time-flight method, optical field imaging, and point spread function engineering are introduced in detail. The challenges and future development directions of metasurface-based 3D imaging technology are summarized and prospected.

Key words metasurface; three-dimensional imaging; light field modulation; miniaturization

1 引言

我们生活在三维(3D)物理世界中,传统成像将场景中不同深度的图像耦合到一幅二维平面图像中,丢失了物体距离观测面的距离即深度信息,因此对三维信息的获取和处理技术不但体现了人类对客观物理世界的数字描述能力,而且作为感知世界的重要信息获

取手段,成为制造自动化、工业设计、虚拟现实、医学整形、文物保护、机器视觉等技术发展的重要基础。以光信号为载体的光学三维成像技术具有非接触、高精度、效率高等优点,已成为光学计量和智能工业 4.0 最重要的研究领域和方向之一。近年来,结构光三维成像技术得益于 Face ID 人脸识别模块得到广泛关注,开启二维人脸识别向三维人脸识别的转变,但仍存在低分辨、

收稿日期: 2022-12-31; 修回日期: 2023-03-07; 录用日期: 2023-03-13; 网络首发日期: 2023-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(62105024)、中国博士后科学基金(2021M690389)

通信作者: *huanglingling@bit.edu.cn

安全性低、模组组装复杂等问题^[1]。基于微透镜阵列的光场相机受限于微透镜性能缺陷、空间分辨率和深度分辨率的折中等问题,渐渐退出消费电子市场^[2]。基于标准点扩散函数(PSF)的离焦成像法因为效率低、模组复杂、集成度低、可靠性差等原因未得到广泛应用^[3]。

超构表面通常由特征尺寸接近或小于波长的亚波长纳米天线阵列组成,具有在亚波长尺度上调制入射电磁波的相位、振幅、偏振、角动量的能力^[4],能够通过近场和远场调控实现强大的功能性,受到研究人员的广泛关注。超构表面提供了光学元件的极度小型化,以及超出传统光学所能实现的智能功能^[5]。然而,超构光学领域的最大驱动力来自于将超构器件集成到光学系统中,以提供新型消费类光电子应用。重要的是,超构光学系统实现了以前无法想象的新应用,这些应用包括物联网、自动驾驶视觉、可穿戴设备、AR和遥感。例如,自动驾驶汽车需要通过红外光探测和测距设备实现三维视觉。近年来,苹果(Apple)、谷歌、三星(Samsung)、Meta(Facebook)、华为(Huawei)、索尼(Sony)和意法半导体(STMicroelectronics)等大型行业参与者已经探索了超构光学应用,因此可以得出这样的结论:目前强大的行

业驱动力决定了该领域的发展。也就是说,新的工业应用诸如三维成像技术定义了该领域需要解决的研究问题。本文主要综述基于超构表面的三维成像技术进展,首先对超构表面的物理机制和在应用中的基本优势进行讨论,然后介绍了基于超构表面的三维成像技术,包括结构光技术、飞行时间(TOF)法、光场成像和PSF工程。最后,对超构表面在三维成像技术中面临的挑战和未来发展方向进行了展望。

2 超构表面的物理机制与应用优势

2.1 超构表面的物理机制

目前已报道的超构表面大致基于三类设计思想:共振相位超构表面、传播相位超构表面、几何相位超构表面。

共振相位超构表面于2011年由哈佛大学的Capasso课题组首次提出,利用局部表面等离子体共振响应调控天线辐射场的相位,从而在亚波长尺度实现对光场的调控^[6]。如图1(a)所示,使用V型天线实现对表面相位的不连续调控,该结构的相位调控自由度为臂长 h 和夹角 Δ ,扫描得到高效率、涵盖 $0\sim 2\pi$ 相位

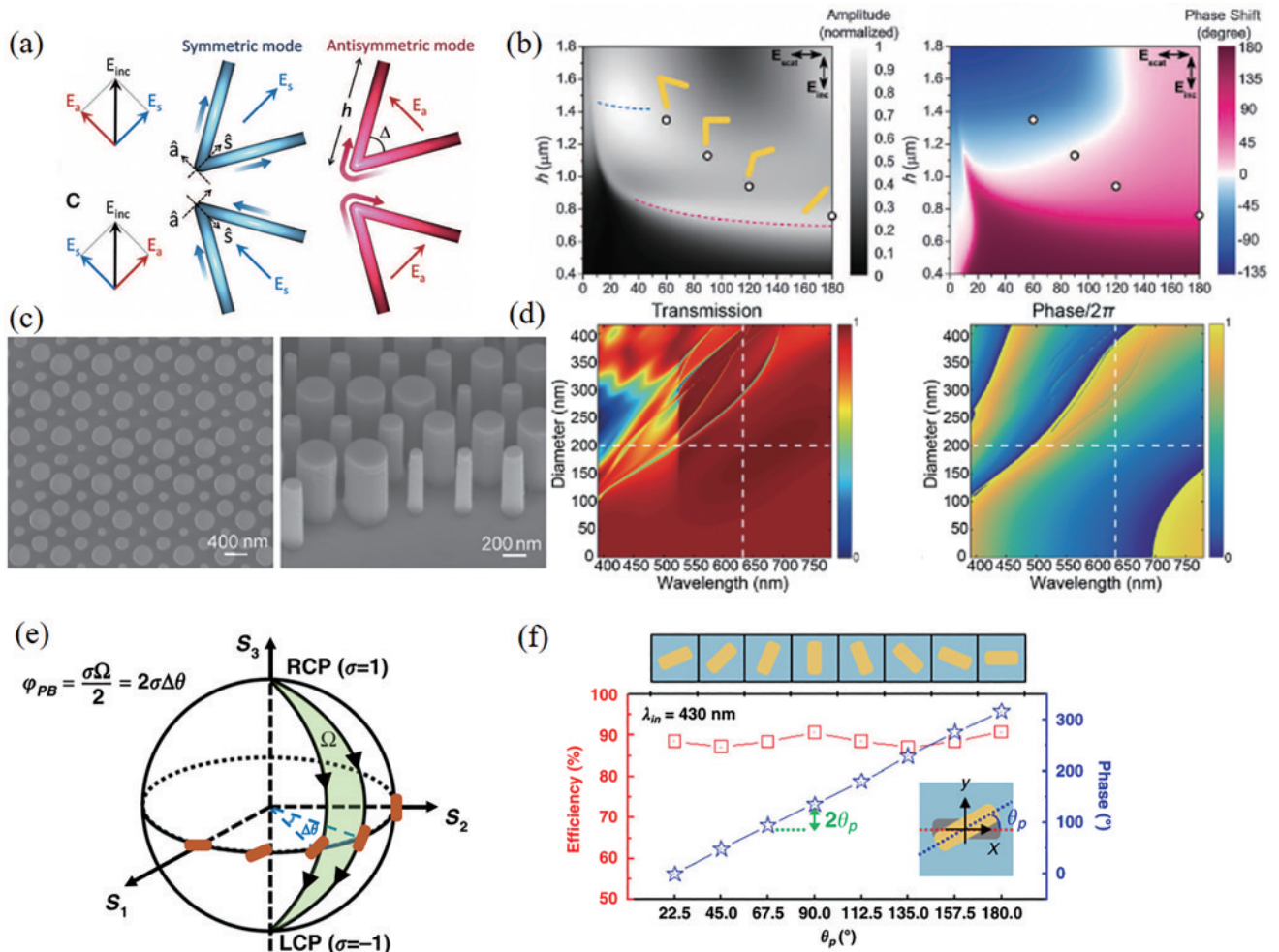


图1 超构表面的物理机制和相位调控。(a)(b)共振超构表面^[6];(c)(d)传播超构表面^[16];(e)(f)几何超构表面^[17]
 Fig. 1 Physical mechanism and phase modulation of passive metasurface. (a) (b) Resonance metasurface^[6]; (c) (d) propagation metasurface^[16]; (e) (f) geometric metasurface^[17]

调制的结构参数,如图 1(b)所示。金属共振超表面通常采用 V 型、Y 型和 C 型^[7]来构建更复杂的超原子。由于金属超表面的效率和工作波段非常局限,研究人员提出基于米共振(Mie resonance)^[9-11]和法珀共振(Fabry-Perot resonance)^[12-14]的全介质超表面,也称为惠更斯超表面,该超表面的厚度远远小于工作波长,具有较高的工作效率和较低的损耗。

厚度接近波长量级的全介质超原子构成的超表面为传播相位超构表面,其相位调制基于传播至整个超原子的相位,

$$\varphi(x, y, \lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}(x, y, \lambda) H, \quad (1)$$

式中: n_{eff} 是超原子的局部有效折射率; H 是超原子的厚度,因此传播相位可通过调制每个超原子单元的周期和物理参数来实现^[15]。2018 年, Fan 等^[16]根据传播相位的设计方法设计一个基于 SiN 材料的大数值孔径可见光超透镜,其结构参数电镜图、扫描振幅和相位图如图 1(c)、(d)所示。

几何相位起源于 1956 年,印度拉曼研究所 Pancharatnam^[17]首先提出当平面结构相对于 z 轴逆时针旋转一个角度 $\Delta\theta$ 时,交叉偏振散射会产生一个额外的相位因子 $\exp(i2\Delta\theta)\exp(i2\varphi)$ 。随后 1984 年,英国布里斯托尔大学的 Berry^[18]阐释该相位的产生源于光子态在高纬度空间中发生绝热演化,称为几何相位,也称

作 Pancharatnam-Berry(PB)相位。如图 1(e)所示, PB 相位对应于在庞加莱球上两点之间路径引入的额外相位差值,等于各项微结构旋转角的 2 倍。因此,几何相位超构表面的相位调控自由度为微结构的取向角,可通过扫描长宽参数得到高效率的微结构参数,同时旋转整体微结构获得需要的相位调控,如图 1(f)所示。由此可见,几何相位仅由入射光的偏振状态和微结构的旋转角度决定,因此几何超构表面具有宽带效应的特点。

2.2 超构表面的应用优势

超构表面利用亚波长尺度下光与物质相互作用的物理机制,通过合理选择和优化纳米结构的形状、大小和工程排布,对局部电磁场的振幅、相位、偏振、波长和轨道角动量等特性进行操纵,为实现光场调控提供了丰富的设计自由度。总体而言,在基于超构表面的应用技术中,超构表面具有系统紧凑、多物理量调控、大视场高效率等显著特点,有望成为下一代被广泛应用的新型光学器件。

基于超构表面的光学元件能够满足仪器的小型化,降低光学系统的尺寸、重量和功率等要求,在现代消费类光电子设备、无人机和空间应用中至关重要^[19]。超构元件的紧凑性主要基于超构表面的平面特性实现器件、系统的小型化和集成化,如图 2(a)所示,单片惠更斯超透镜组成视场角 30° 的紧凑型近红外成像系

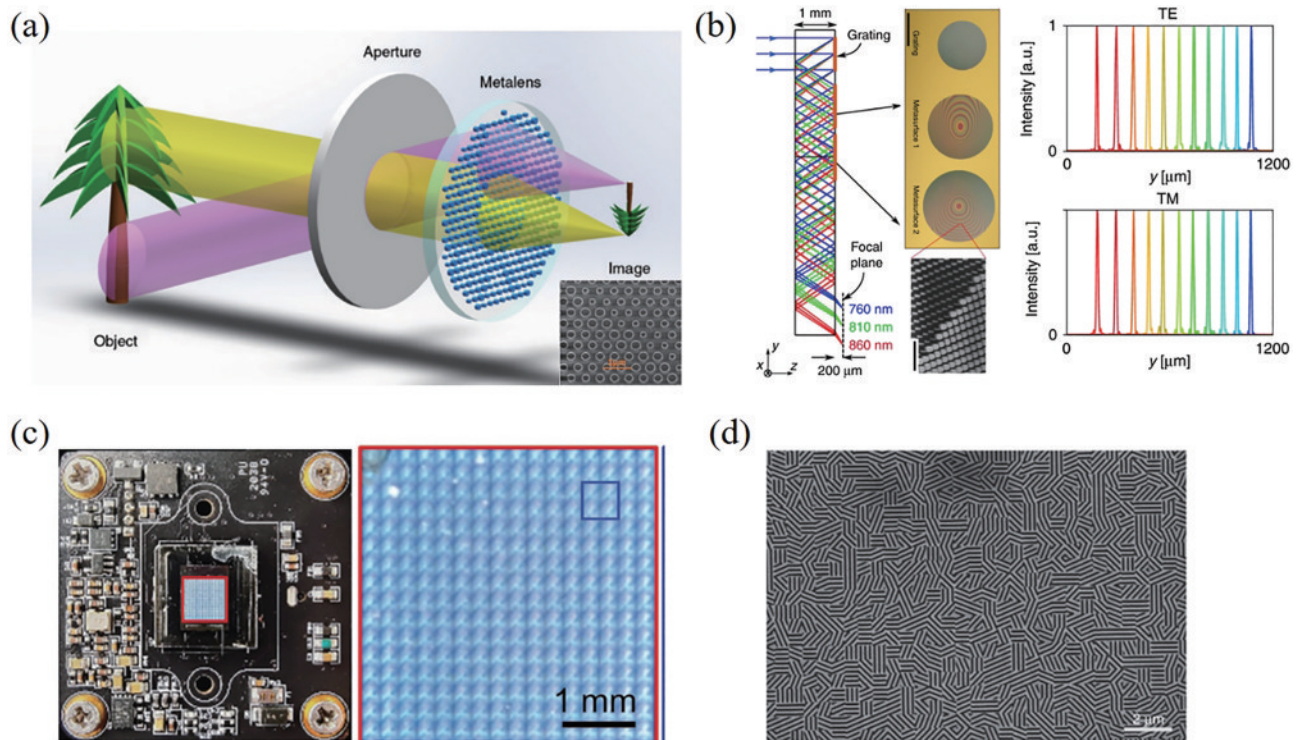


图 2 超构元件的紧凑型系统。(a)单片式超透镜的红外成像系统^[20]; (b)多片集成式微型光谱仪^[21]; (c)CMOS 集成式微型显微镜^[22]; (d)共孔径交错式多功能超构表面^[23]

Fig. 2 Meta-based compact system. (a) Infrared imaging system based on single-layer metalens^[20]; (b) compact folded spectrometer^[21]; (c) compact microscope based on metasurface integrated CMOS^[22]; (d) shared-aperture multifunctional interleaved geometric-phase metasurfaces^[23]

统^[20]。多片平面式超构表面可以实现传统光学系统的折叠,充分利用设计空间,如图 2(b)所示,由多片超构表面组成的小型化平面光谱仪尺寸仅为 $1.6\text{ mm} \times 1.6\text{ mm} \times 1.7\text{ mm}$ ^[21]。超构表面不仅可以实现光学系统的空间折叠,还可以与光源、探测器集成进一步提高其系统的紧凑性,如图 2(c)所示,单片超表面集成互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器构成掌上显微镜^[22]。基于超构元件的紧凑性另一方面体现在单层超构表面能够设计多种光学功能。超构表面是由纳米结构阵列组成的离散光学元件,可以在单层中交织多种功能,如图 2(d)所示,共孔径交错式超构表面实现多功能相位剖面的叠加^[23],这在传统光学中是不可能实现的^[24]。

超构表面的另一个优势是多维度物理量复用,基于亚波长单元结构,超构表面能够实现偏振^[25-26]、相位^[27]、角度^[28]和轨道角动量^[29-30]这些光隐藏信息的可视化,结合前述单个超构元件集成多种功能^[31-32],实现了传统光学不易实现的功能和信息容量。因此,超构元件得以在全息显示^[33-36]、多功能超透镜^[37-38]等领域展示出惊人的应用优势。

超构表面的光束控制是基于亚波长空间尺寸上裁剪反射光或透射光波前,因此多级衍射被抑制,波前操纵在理论上具有接近 1 的效率^[19]和数值孔径(NA)^[36],这为大视场、大 NA 和高效率^[39-41]的工业设计提供了诱人的理论支撑。随着微纳加工技术的不断进步,超构元件的效率进一步提升,会进一步推进超构元件在工业界、消费电子界的应用。

3 基于超构表面的三维成像技术

三维成像技术通过设计主动(如结构光照明、飞行时间法等)或被动(如双目视觉、光场技术、点扩散函数工程)的编码方式,使得位于不同深度的物体具有不同的强度响应,从而实现深度信息的获取。这些三维成像技术在成像场景、成像视场、深度成像范围、空间分辨率、深度分辨率和速度上表现各异。首先,成像场景与三维成像的主动或被动模式有关。相较于被动模式,主动成像由于可以额外投射可编码图案,在暗光、低纹理目标物体的环境中更有优势,但对于高反光物体和高透过率物体,主动成像则常常因为相机局部过曝和反射图案信噪比过低等原因,无法获得全视场三维点云和精确点云数据。成像视场和空间分辨率是描述三维成像中二维空间的性能指标。成像视场是指能够实现三维成像的场景大小,一般用视场角表示,主要取决于各种三维成像技术中获取信息量的空间大小,例如主动式技术中依赖于投射端的视场,被动式技术中依赖于拍摄端的视场大小。空间分辨率是指成像场景中可被区分的最小空间尺寸,一般用不同深度处的尺寸单位例如毫米或者角度分辨率表示,空间分辨率决定了三维重建数据的密度,是描述测量空间的重要

参数。在散斑型结构光三维成像和 TOF 法技术中,空间分辨率依赖于投射点云数量,在光场技术中,空间分辨率依赖于拍摄相机的分辨率和微透镜个数,在 PSF 技术中,空间分辨率依赖于 PSF 的空间特性。深度成像范围和深度分辨率是描述三维成像在深度方向上的性能指标。深度成像范围是在成像视场内能够获取深度的距离最小值和最大值构成的深度空间,在结构光三维成像中一般依赖于投射端和拍摄端共同作用下能够清晰成像的范围,在 TOF 技术中依赖于光源能量和调制模式,光场技术中依赖于光场恢复算法中能够被解算出的深度范围,与三维重建算法和微透镜参数有关,PSF 技术中依赖于 PSF 整形的深度区域和算法解算区间。深度分辨率是指成像视场内深度方向可被区分的最小距离,一般用不同深度处的距离单位(例如毫米)表示,深度分辨率是深度成像的重要性能参数。结构光三维成像中深度分辨率依赖于拍摄端焦距和系统基线,TOF 技术依赖于光源调制模式和调制参数,光场技术依赖于微透镜在系统的位置以及微透镜的大小,PSF 技术依赖于 PSF 随深度的响应和深度解算算法。三维成像的速度主要有两方面因素,一方面是光机硬件设备对速度的影响,例如结构光和 TOF 技术在多次拍摄模式下,需要考虑投射图案的帧速问题,一方面是硬件平台和算法逻辑的影响,结构光需要大量的图像匹配运算,而 TOF 一次运算可以直接获得点对应的深度,在单点运算上要优于结构光技术,光场技术的深度解算分为视觉类匹配算法和凸优化算法,在速度表现上各异,PSF 工程大多依赖于正则化的凸优化算法,本文重点讨论超构表面器件在 TOF 技术中扫描帧速的表现,算法对深度解算的影响不过多探讨。最近,纳米光子学的最新进展被认为是传统激光雷达系统的支持甚至替代技术。特别是,一些小型化的光束转向平台,如芯片规模的光学相控阵和基于超表面的平面光学设备,可以切实缩小设备占用空间。除此之外,纳米光子器件还可以在信息容量方面提供成像能力进而提升成像视场、空间分辨率等。本文回顾了基于超构表面的结构光技术、TOF 法技术、光场技术和 PSF 技术。

3.1 结构光三维成像技术

结构光三维成像技术是一种非常流行的非接触式三维形貌测量技术,其具有硬件配置简单、测量精度高、空间分辨率高、速度快、成本低等优点^[1],在工业和消费电子领域得到广泛应用。结构光技术本质上是基于三角测量原理,由光源向被测物体投影一定规则和模式编码的图像,编码图案受到物体表面形状的调制而产生形变。带有形变的结构光被另外一个位置的相机拍摄,通过预先标定好的相机与投影光源之间的位置关系和结构光图案形变信息推演出待测物体的三维信息。散斑编码是结构光技术中常见的编码图案,一般要求局部图案具有全局唯一性,而且散斑的数量决

定了可解码的信息量,影响待测数据的空间分辨率。超构表面具有亚波长的特征尺寸,多物理量光场调控的特点,因此用做结构光投射器具有大视场、高密度信息的优势。

Ni 等^[42]提出使用偏振无关的超构表面衍射元件,实现了具有 $120^\circ \times 120^\circ$ 视场角,强度均匀且高效率的点云阵列投影,如图 3(a)所示。超构表面的达曼光栅具有衍射光学元件(DOE)无法达到的视场角,有望成为下一代分束器元件。基于几何相位超构表面全息再现的共轭特性,Li 等^[43]提出基于非晶硅几何相位超构表面的全空间点云投射器,如图 3(b)所示,利用偏振复用的特点同时实现透射和反射空间的随机点云, $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的超构表面产生点云数量为 4404 个。高密度的图案与超构表面的面积有关,随着光刻技术的发展,Li 等^[44]通过浸没式光刻技术在 12 英寸玻璃晶圆上制备了尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的像素化超构表面光束偏转器,如图 3(c)所示,像素化超构表面的每

个像素由一组合有特定梯度相位的超构表面组成,具有特定出射角度,结合大面积光刻制造技术,随机化的光束偏折形成了随机点云用于结构光三维成像。基于超构表面的平面性、易集成等优点,Xie 等^[45]提出集成超构表面的垂直腔面发射激光器(VCSEL),如图 3(d)所示,超构表面集成在激光出光口处,通过精心设计的单元结构实现激光光束整形。通过 VCSEL 阵列集成不同功能的超构表面实现功能切换,使其成为一个主动器件,有望成为下一代点云投射器。随后,Wang 等^[46]提出使用超构表面形成不同偏折方向的分束器,如图 3(e)所示,扩展 VCSEL 集成超构表面的功能。超构表面的高空间带宽积使其具有大信息容量的应用潜力,如图 3(f)所示, Kim 等^[47]实现了 180° 全视场约 10K 的点列投影,结合双目相机和立体匹配算法实现三维成像,同时 Kim 证明了结合纳米压印技术实现该技术量产的可行性。

基于超构表面的结构光三维成像技术目前多数采

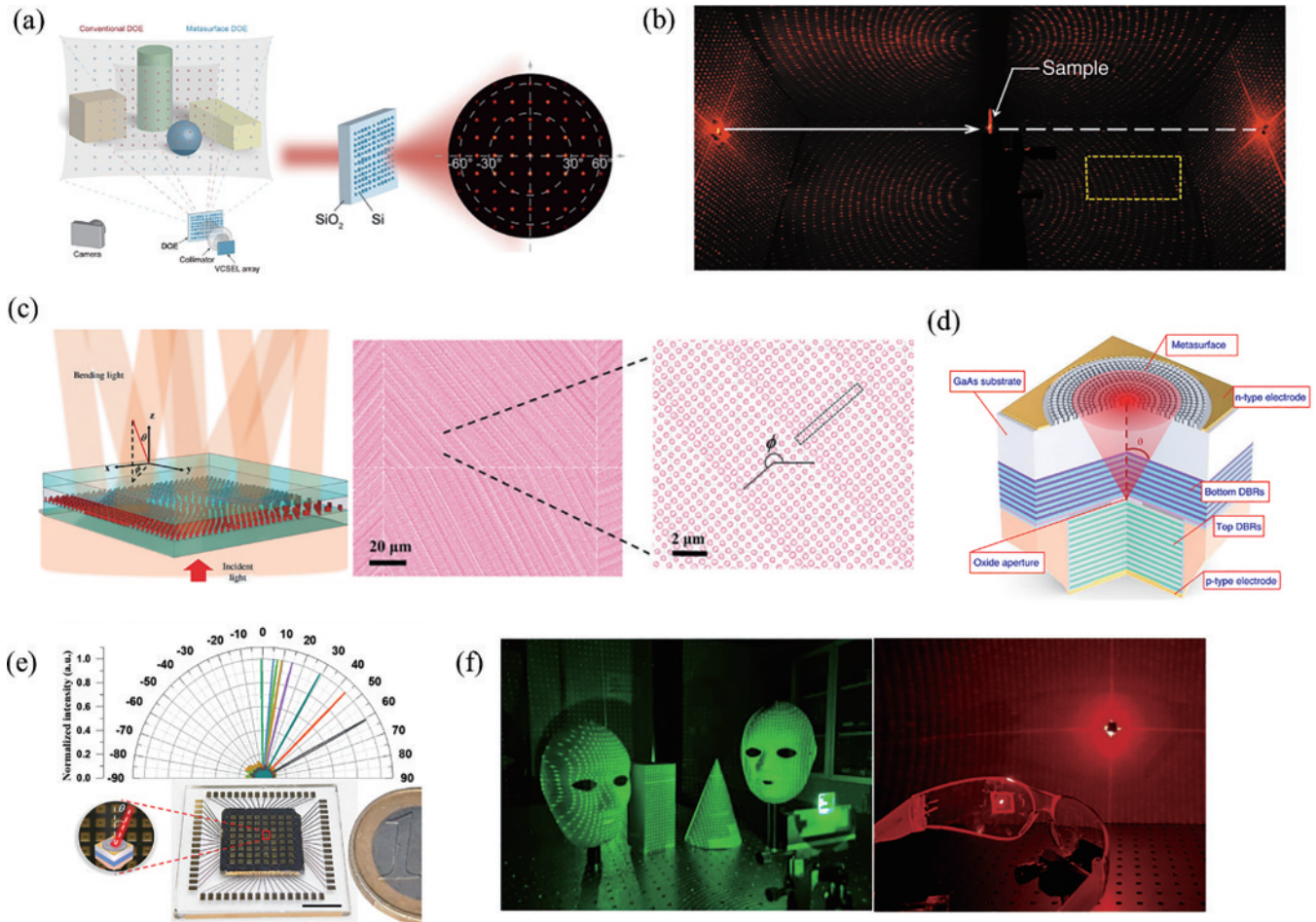


图 3 基于超构表面的结构光点云投射器。(a)基于超构表面的大视场达曼光栅分束器^[42];(b)基于超构表面的全空间随机点云投射器^[43];(c)大面积晶圆级像素化超构表面生成随机点云^[44];(d)VCSEL阵列集成超构表面实现不同角度的光束偏折^[45];(e)VCSEL阵列集成超构表面实现不同偏折角度的分束^[46];(f)基于超构表面的大视场高密度规则点云投射实现三维成像^[47]

Fig. 3 Metasurface-based point cloud projector. (a) Metasurface-based Damann grating with large field of view^[42]; (b) full-space random point cloud projector with metasurface^[43]; (c) large area pixelated random point generation^[44]; (d) light deflection controlled by VCSEL-integrated metasurface^[45]; (e) beam splitter based on VCSEL-integrated metasurface^[46]; (f) metasurface-based full-space dot array for three-dimensional imaging with large field of view^[47]

用超构表面作为点云投射器,亚波长单元尺寸的衍射效应使投影视场可达到整个空间,这是传统光学元件无法比拟的优势。同时超构表面投射的点云数量依赖于微结构的个数,相比于 DOE,在相同尺寸下超构表面具有更大的点云密度,这为高空间分辨率的结构光三维成像提供了基础支持。除此之外,超构表面作为纳米光子平面器件,其高度集成性打破了传统点云投射装置的结构复杂性,使整个投影模组达到芯片级,具有更好的结构稳定性,降低对准误差等精密工艺引入的制造成本。由于结构光三维成像技术属于面投射技术,投射点云数量的增多同时会带来单个点云能量的降低,因此基于超构表面的三维成像技术适用于较短工作距离(300 mm)成像例如人脸识别等。相较于传统三维成像技术,基于超构表面的三维成像技术具有不虚焦的特点,增加光源能量可以扩展工作距离,这为结构光技术在工作距离方面提供了应用拓展,未来可以应用在飞行器测绘等领域。

3.2 飞行时间法

在学术界和工业界,高效、可靠、快速的激光雷达系统的研究正在蓬勃发展。激光雷达技术应用于各种行业,包括自动驾驶汽车、人工智能机器人、全自动和无人工厂,以及大气或降雨观测等。激光雷达基于 TOF 技术,最重要的性能参数包括测量范围、水平和垂直视场、帧速、点数和功耗等。目前大多数采用宏观机械扫描或微机电系统(MEMS)方法的产品,宏观机械扫描仪的测量范围通常在 100~250 m^[48],水平视场是完整的 360°,而垂直视场取决于通道的数量,通常为 30°~40°,获得的最佳空间角分辨率为 0.2°×0.1°。数据速率,定义为每秒可识别点的数量,范围为每秒 1.3×10⁶~2.4×10⁶点。目前传统的 TOF 产品存在视场受限、功耗大、易损耗、笨重等问题。基于超构表面的激光雷达系统其工作原理依赖于亚波长相位控制与纳米结构元件,允许较高的精度控制和较大的调制波前的方向角。光束扫描的主动超构表面器件通常将超构表面与活性介质结合,如透明导电氧化物(TCO)材料、多量子阱(MQW)、微机电系统(MEMS)、液晶(LC)或相变材料等。主动可调超构表面设备有望替代点扫描或线扫描激光雷达组件,解决传统机械组件中的机械损耗大、振动敏感等问题。作为全固态激光雷达的一个有前途的候选方案,基于超表面的激光雷达原则上可以为特定应用量身定制,以满足多波长操作、测距、分辨率、偏振、深度精度、视场、生产可扩展性和低成本的片上集成的要求^[48]。

3.2.1 基于 TCO 材料的主动可调超构表面

基于 TCO 材料的主动可调超构表面,通过控制活性层中的电荷浓度实现有效折射率的调节,从而引起超构表面的相位变化完成光束的动态转向。此类型超构表面使用金属氧化物半导体(MOS)调制器,具有低电压偏置(几伏)的高速调制(约为 10 MHz)的优势。

氧化铟锡(ITO)是最常用的 TCO 材料之一,在近零区域(通常为近红外波段)时,它的介电常数在 -1~1 之间,在电荷积累层附近电场约束进一步增强^[49],这十分有利于构建电调谐纳米光子器件。

Huang 等^[50]提出并验证一种工作在 1550 nm 波长下的栅极可调超构表面,可实现对反射场的相位和振幅动态电控可调。如图 4(a)所示,MOS 调制器由顶部 Au 天线的栅极、Al₂O₃ 间隔层和 ITO-Au 背电极组成,当对 MOS 电容器施加 1 V 或更高的电压时,ITO 层发生电荷积聚,从而改变其有效折射率。ITO 载流子浓度随外加电压的变化而变化,给定 ITO 层中的电荷浓度,可以计算出积聚层的厚度,从而预测器件的近场和远场特性。实验验证,通过施加 2.5 V 门偏压,调制速度可高达 10 MHz,产生 184°的相移和约 30% 的反射率变化,开关功耗低至 2.5 fJ。基于相移调控规律和低功耗的优势,通过对多组不同周期的纳米光栅结构施加电门控,可以调整±1 衍射阶的偏转角度,实现有效的不同角度扫描。如图 4(a)所示,针对 2~4 μm 的周期性纳米天线,在仅施加 3.0 V 电压的情况下获得 -40°~40°的扫描区域。Park 等^[51]在前述工作的基础上,建立 MIM 间隙等离子共振模型,分析欠耦合,临界耦合和过耦合状态下的反射场,如图 4(b)所示,使满足 180°相位偏移、低损耗的微纳结构设计更加高效,同时实现偏振照明的主动可调。除了采用不同的纳米天线材料和对应优化的结构参数,采用双门控方法,也可以进一步扩大天线的调谐范围。Shirmanesh 等^[52]提出了双门控场效应可调谐超构表面天线阵列,如图 4(c)所示,该双门控超构表面结构由铝背反射器、栅极电介质、ITO、栅极电介质异质结构和具有“鱼骨”图案的周期性铝纳米天线阵列组成。该结构提供了两个门,一个在顶部天线和 ITO 层之间,另一个在背板反射器与 ITO 层之间。双门控超构表面等价于两个电压独立控制的串联 MOS 场效应结构,因此与单门控超构表面相比可以产生更宽的相位调谐范围。介电层由氧化铝/氧化铪纳米层结构制成,具有高击穿场和高介电常数的优势。顶部和底部的 ITO/栅极-电介质界面在施加的外部偏置电压下表现出电荷积累或耗尽,从而促使 ITO 层的复折射率发生大幅变化。在工作波长 1550 nm 下的实验表明,约 6.5 V 的电压足以实现 89% 的反射率调制和约 300°的相移,在偏转角度和损耗方面具有良好的优越性。Kim 等^[53]使用基于双门控等离子共振阵列结构的主动超构表面,独立控制反射振幅和相位,相位范围可实现 0°~360°的角度偏转,如图 4(d)所示,并首次成功实现 10 m 处的 3D 深度成像,扫描角度、角度步长和空间点数分别为 6°×4°,0.2°×0.2°和 31×21=651 个。随后,三星公司的 Park 等^[54]在该研究工作的基础上,使用相同结构开发空间光调制器实现光束扫描功能,如图 4(e)所示,以 5.4 MHz 的速度实现振幅独立控制的 360°空间连续扫描,在

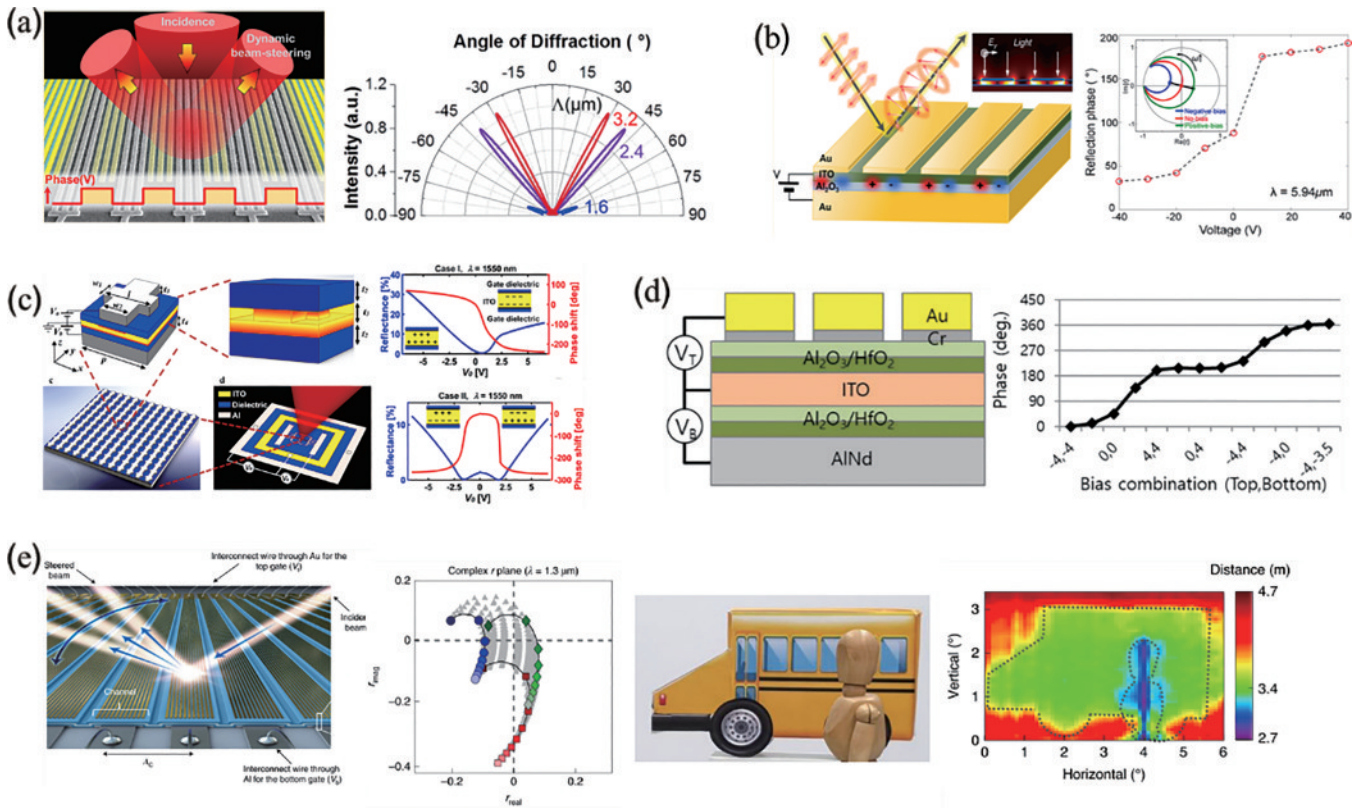


图 4 基于 TCO 材料的主动可调超构表面实现光束扫描。(a) 基于 ITO 的电门控衍射光栅超构表面及偏折角度与偏压关系图^[50]；(b) 基于 ITO 的间隙等离子元超构表面实现反射相位和偏振的主动调控^[51]；(c) 基于 ITO 的双门控超构表面及偏折角度与偏压关系图^[52]；(d) 基于 ITO 的等离子体谐振器阵列及偏折角度与偏压关系图^[53]；(e) 基于 ITO 超构表面的固态 SLM 实现三维成像^[54]

Fig. 4 Actively tunable metasurface based on TCO material for beam steering. (a) Electric gated diffraction gratings with ITO and the relationship between the steering angle and the gate bias^[50]; (b) ITO-based gap-plasmon metasurfaces for reflection phase and polarization control^[51]; (c) dual-gated metasurfaces with ITO and the relationship between the steering angle and the gate bias^[52]; (d) ITO-based plasmonic resonator array and the relationship between the steering angle and the gate bias^[53]; (e) all-solid-state SLM with ITO-based metasurface for 3D imaging^[54]

250 μm × 250 μm 的面积上集成 550 个独立可寻址的微纳共振结构,并开展工作距离 4.7 m 处的街道实景扫描实验,其中车模型和人体图的三维成像结果如图 4(e) 所示。

3.2.2 基于 MQW 半导体架构的主动可调超构表面

MQW 架构广泛应用于各种高端光电器件,并有可能在可见光和较短的近红外波段实现高达千兆赫兹速度的高速光电调制。目前基于 MQW 架构的主动可调超构表面的物理机制是:通过对 MQW 施加电压偏置,利用量子约束斯塔克效应^[55]调制折射率,结合超构表面的光场特性实现主动可调。半导体超表面最显著的优势是可以直接在 III-V 族晶圆上单片生长,同时与基于 MQW 架构的 LED、边发射器和 VCSEL 等现有光源集成。

Wu 等^[56]开发了一种实现有源超构表面的技术,超构表面的外延 III-V 异质结构由 1.2 μm 厚的未掺杂 MQW 层和具有分布式布拉格反射器结构的 GaAs 衬底组成,如图 5(a) 所示。MQW 在 915~920 nm 附近的近带隙区域中其可调折射率实部范围在 0.01~0.05

内,通过将具有 Mie 谐振和导模谐振的混合超表面与可调谐 MQW 结构结合,可以进一步扩大调制范围。具体来说,部分蚀刻的双缝 MQW 光栅结构在 916 nm 和 963 nm 附近出现了反射率下降。这种混合谐振模式增强了 917 nm 附近的电光调制,并产生了约 270% 的反射率调制和 70° 的相移。利用 MQW 折射率实部的电光调制和可调光栅结构,将其应用于光束转向。实验证明使用约 3 V 的偏压可实现全视场 20° 的光束扫描。在此研究工作的基础上,Khaidarov 等^[57]在混合金属布拉格腔的 GaP LED 光源上集成超构表面,如图 5(b) 所示,布拉格腔用来减小光束的发散角,超构表面通过光栅结构调整光束偏折角度,从而实现了 30° 视场范围的动态光束扫描,但效率仅为 3%。

3.2.3 基于 MEMS 集成的主动可调超构表面

MEMS 集成超构表面一般通过 MEMS 实现动态可调,超构表面以亚波长优势实现光场调控。Holsteen 等^[58]设计了一种驱动悬浮硅超构表面器件,能够实现瞬态颜色控制、动态光束控制和光聚焦等多项功能,如图 6(a) 所示,器件由 SOI 基底和硅超构表

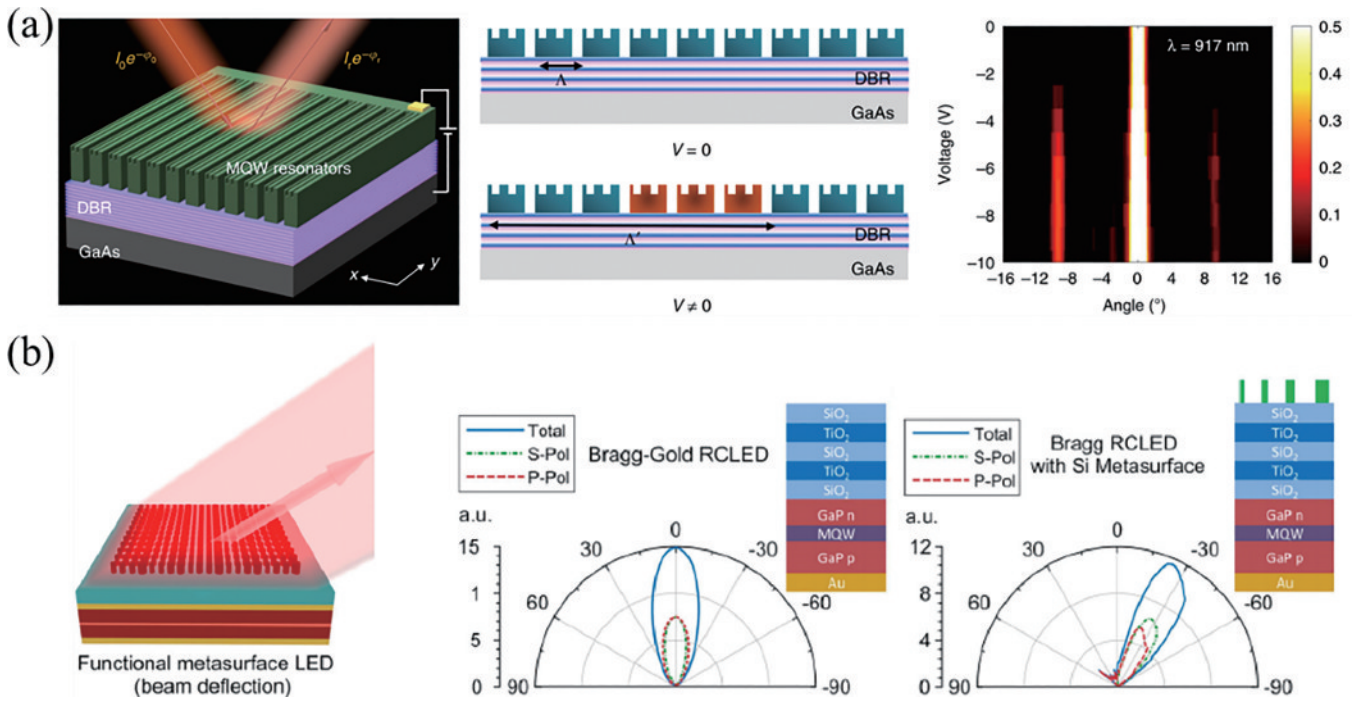


图5 基于MQW架构的介电主动可调超表面。(a)双缝微结构的MQW介电超构表面^[56];(b)LED集成超构表面以及偏转角度示意图^[57]
 Fig. 5 Actively tunable dielectric MQW metasurface. (a) MQW metasurface with double slit patterns^[56]; (b) LED-integrated metasurface for beam steering^[57]

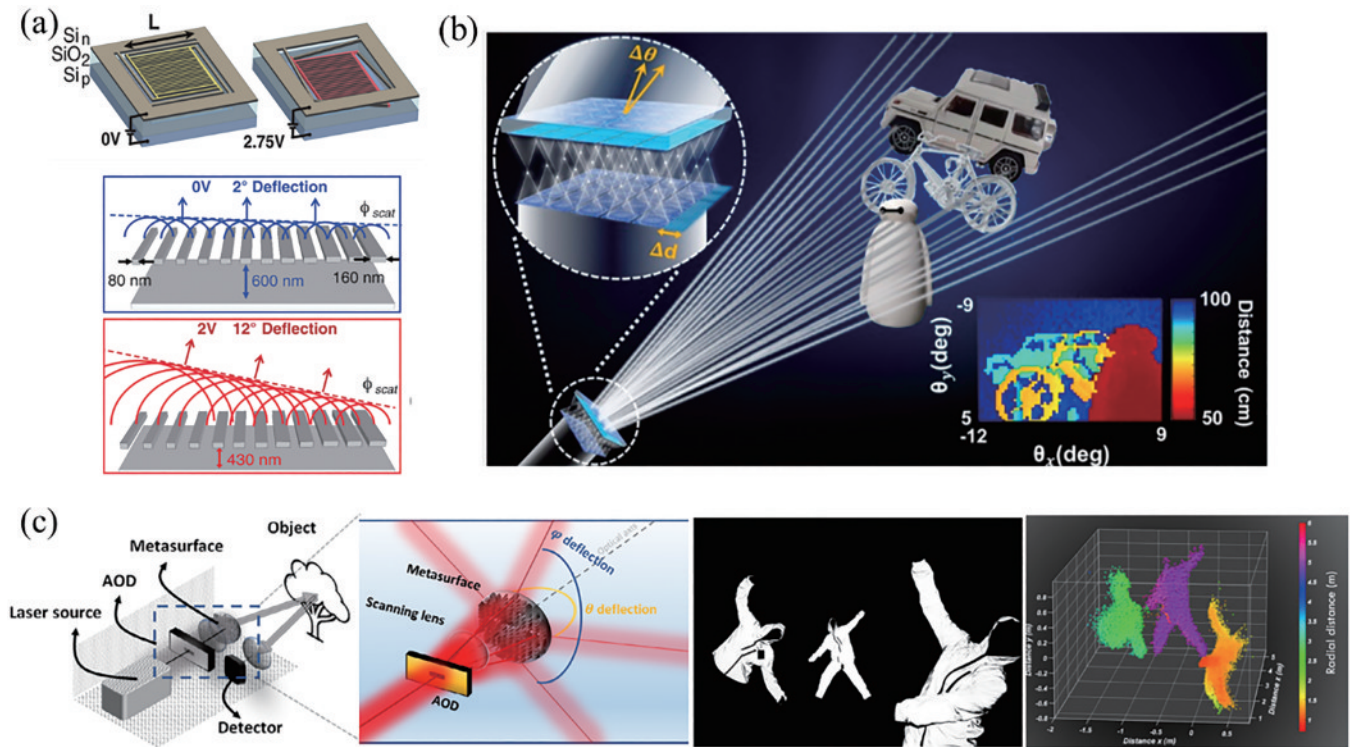


图6 MEMS集成超构表面实现光束扫描。(a)悬浮硅超构表面器件^[58];(b)基于超构表面透镜阵列的半固体微机械光束扫描系统^[59];(c)结合AOD的超构透镜光束扫描系统^[60]
 Fig. 6 MEMS-integrated metasurfaces for beam steering. (a) Suspended silicon metasurfaces^[58]; (b) semisolid micromechanical beam steering system based on MMLA^[59]; (c) metasurface-enhanced beam steering system combined with AOD^[60]

面组成法珀共振模式,该器件的调制速度为 1 MHz,偏置电压为 2~3 V,其中在 2 V 偏置电压下覆盖 12° 的扫描视场。除了上述将 MEMS 用作动态控制超构表面

模式器件外,利用超构表面的亚波长调制特性,也可将其应用于传统光束扫描方案中替代已有光学器件。偏心微透镜阵列(DMLA)是一种 MEMS 光束扫描方案,

它作为机械和全固态方法的过渡技术,具有速度快等优势,但受限于传统微透镜的 F 数限制在角度分辨率性能上难以提升。Chen 等^[59]提出使用超构透镜构成两组偏心透镜阵列,开发基于超构表面透镜阵列的半固体微机械光束扫描系统(MMLA)。两组透镜阵列构成共焦系统,前组透镜相对于后组透镜的微小横向位移可实现出射光束的角度偏转控制。因为超构透镜阵列具有极小的 F 数,可获得接近衍射极限的角度分辨能力。实验中实现了 $30^\circ \times 30^\circ$ 的视场角和 0.14° 的角分辨率,可以清楚地识别三维物体,扫描速度可优化至 10 kHz 左右,如图 6(b) 所示。在大角度扫描方面, Martins 等^[60]提出使用超构凹透镜扩大出射角度的方法,结合具有 MHz 扫描速度的声光偏转器(AOD)将入射光束定向至超构透镜的不同径向位置处,从而实现大角度 150° 的动态光束扫描,如图 6(c) 所示,成功实现人体不同位姿的三维重建和识别。

3.2.4 基于液晶与相变材料的主动可调超构表面

液晶分子在外加电压下能够实现动态折射率控

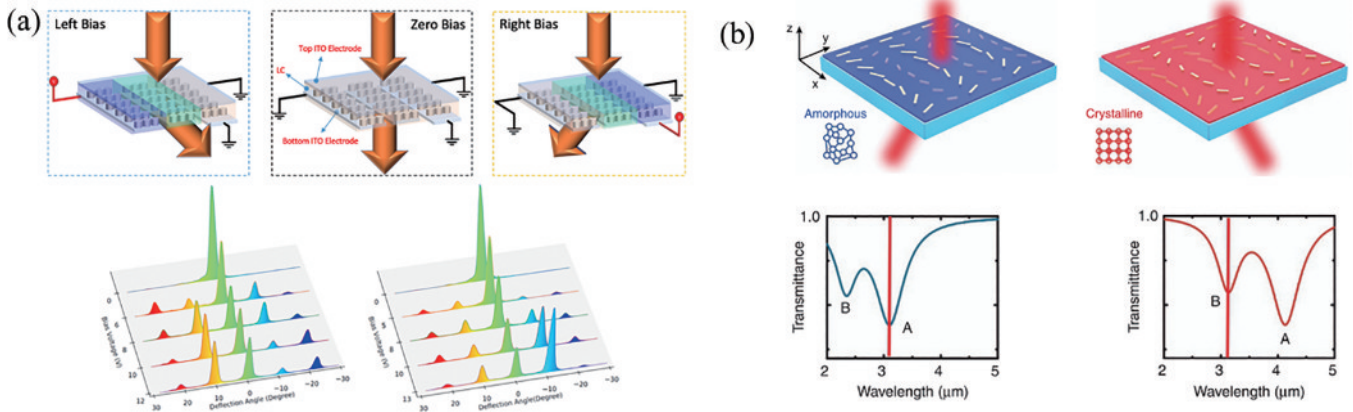


图 7 (a) 基于液晶的主动可调超构表面^[61]; (b) 基于相变材料的有源超构表面^[62]。

Fig. 7 (a) Actively tunable metasurfaces with liquid crystal approach^[61]; (b) phase-change material^[62]

以上几种调控方式实现的动态可调谐超构表面光束扫描方案,具有不同的特性。TCO 适用于近红外和中红外波段,调制速度达到几十 MHz,其中双门控结构具有高载流子密度,成像视场可达到 180° ,相较于结构光技术,其点云密度较少,但计算速度快,因此在自动驾驶等领域拥有巨大的应用潜力。MQW 适用于可见光和近红外波段,调制速度比 TCO 更快,最快能够达到几千 MHz,并且和光源直接集成,有望实现平面化高集成度光电器件,但 MQW 目前效率较低,且基于可调光栅结构导致扫描角度有限,后续有望采用阵列电控模式拓宽其扫描角度。MEMS 系统通过形变实现连续的光束扫描,但调谐范围有限,只有 $\pm 12^\circ$ 的成像视场,基于透镜相位组合的 MEMS 超构表面器件扩大了成像视场,相较于传统 MEMS 器件在成像视场和空间分辨率上有极大的优势,但是离散元件结构同样会面临机械结构惯性引入的技术问题。基于液晶的主动可调超构表面可以在太赫兹到可见光的宽波段内工

制,因此基于 LC 的空间光调制器(SLM)常用于激光雷达三维成像中。但 LC 层的厚度和小像素尺寸存在本质约束,严重限制了小像素尺寸 SLM 的发展应用。Li 等^[61]提出集成 TiO_2 超构表面和 LC,实现亚波长像素尺寸的 SLM,如图 7(a) 所示。超构表面结构集成在液晶夹层中,根据液晶分子的取向 0° 、 45° 、 90° 实现三级相位延迟,通过施加 0、3.5、8 V 的偏置电压实现角度 11° 的偏转,但液晶集成超构表面的结构调制速度只有 kHz,切换时间为 ms 级。除此之外,相变材料是一种制备有源可调超构表面的材料,通常在外部热、光和电的激励下,在非晶态和晶态之间快速和重复切换,如图 7(b) 所示。Yin 等^[62]提出一种基于相变材料高度集成的等离子体有源超构表面实现光束转向。有源超构表面由 50 nm 厚的相变材料有源层($\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$)、15 nm 厚的防氧化层和 40 nm 厚的 Au 天线组成,当温度加热到 160° 时切换至非晶态。该结构有两组不同等离子体共振的纳米天线,在非晶态和晶态下分别具有不同的共振模式,从而改变衍射光束的衍射角,实现光束偏折可调功能。

作,切换时间为 ms 级,速度较慢,相变材料 GST 通过改变温度可在非晶相和晶相之间实现 ns 级切换,其高折射率可应用于红外波段,且在实际工程应用中快速温控调节会使整机体积变大,离真正的集成器件仍有一定的距离。

3.3 光场技术

光场成像的理论背景源自全光函数,全光函数是对空间中光分布的非物理、无模型、纯现象学的描述。为了在不参考底层成像机制的情况下适应于光的所有可能变化,全光函数采用高维函数 $L(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ 描述任意空间位置 (x, y, z) 、任意入射角度 (θ, φ) 、任意波长 λ 、任意时刻 t 的亮度值。考虑到实际成像装置是宏观的,同时假设测量函数是带限的,我们可以使用四维(4D)函数 (u, v, s, t) 描述光场,对应于物理空间中的一条光线,该函数也被称为相空间函数。传统的光场成像通常使用小孔阵列^[63]、微透镜阵列^[64]和编码孔径^[65]阵列等对光场函数进行采样,结合后期计算机视

算算法获取光场信息,将投影移动到不同的焦距,这使用户能够在采集后自由地重新聚焦图像从而得到真实场景的三维信息,已逐渐应用于工业、虚拟现实、生命科学和三维流动测试等领域。其中微透镜阵列相对于针孔阵列具有更高的能量利用率和信噪比,相对于编码孔径阵列更易于制造,因此被广泛应用于光场相机中。光场相机的性能分为空间和深度两部分,其中空间分辨率和深度分辨率取决于相机传感器的像素数,是一对相互约束的性能指标,同时光场相机要求具有更宽的视场和更大的景深。随着相机传感器像素的尺寸越来越小,尺寸更小的微透镜阵列设计和加工制造同样面临着挑战。基于超构表面的超透镜研究目前已

趋于成熟,在消球差消色差等方面有显著进步,由于传统折射球面透镜很难通过一片式透镜实现消色差和球差,超透镜阵列的引入为光场成像的性能提升带来新的希望。

2019年,Holsteen等^[66]提出多功能光场超构表面实现高分辨率的三维单粒子追踪。超构表面阵列采用共孔径相互交叠的三个透镜相位,如图8(a)所示,共孔径透镜相位相比相同口径内分离的三个透镜相位具有较大的NA,从而实现衍射受限的横向分辨能力,结合三个透镜阵列组成的光场模式,在 $0.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$ 测量体积内进行多个荧光粒子的同时跟踪,且具有亚微米水平和微米水平轴向分辨率。

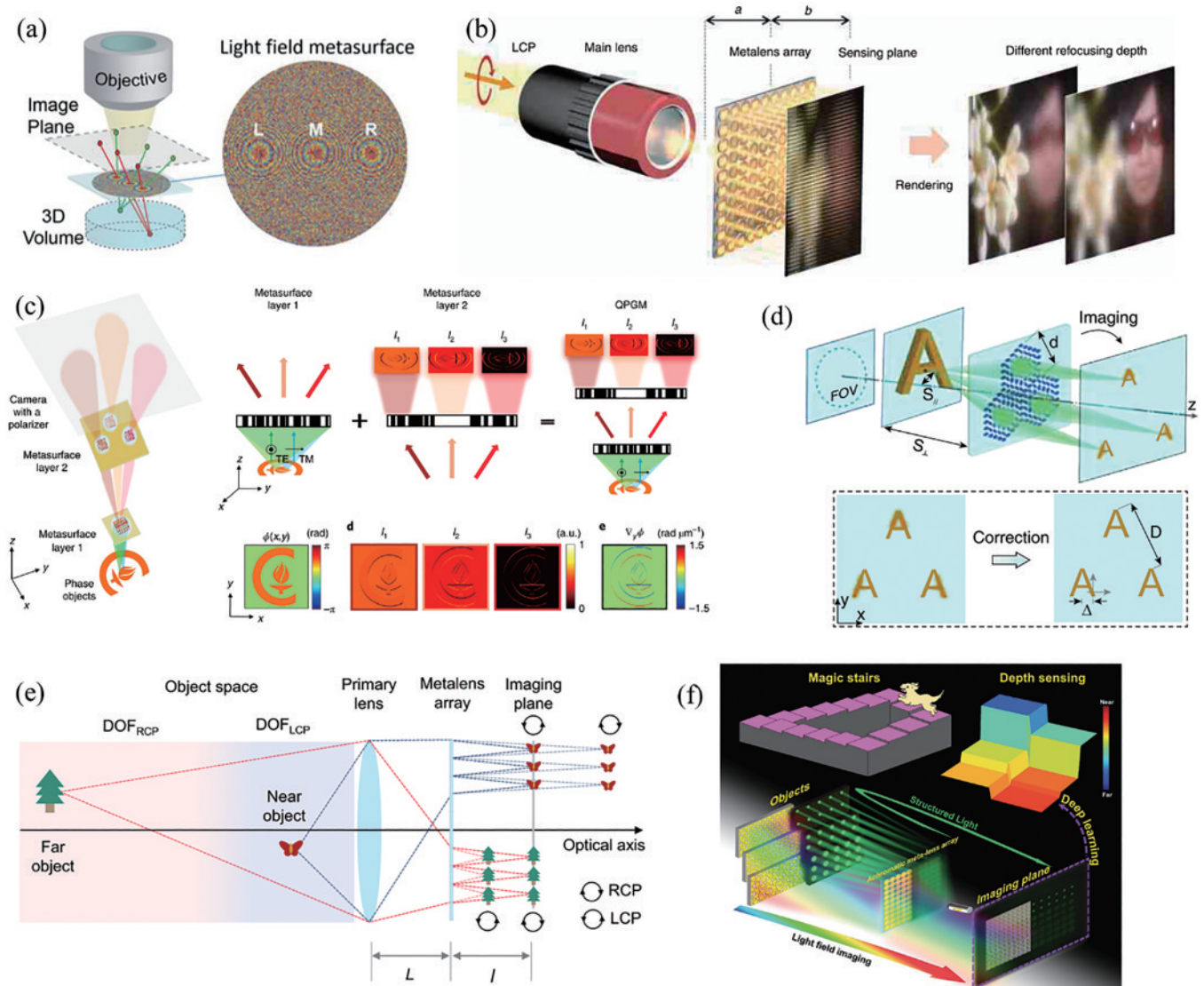


图 8 基于超构透镜阵列的光场三维成像技术。(a)基于多功能超构表面阵列的三维单粒子追踪^[66];(b)全彩消色差超构透镜阵列的光场相机^[67];(c)双层超构表面的定量相位显微系统^[68];(d)超构表面阵列实现像差校正的三维定位技术^[69];(e)基于偏振复用双焦超构透镜阵列的大景深光场成像技术^[70];(f)集成结构光技术和光场技术的超构透镜阵列实现复杂环境的深度感知^[71]

Fig. 8 Light-field 3D imaging with metalens array. (a) 3D single-particle tracking based on multifunctional metalens array^[66]; (b) achromatic metalens array for full-colour light-field imaging^[67]; (c) double-layers metasurfaces for quantitative phase gradient microscopy^[68]; (d) aberration-corrected 3D positioning with metalens array^[69]; (e) large depth of field light-field imaging system enabled by double focus metalens array based on spin multiplexing^[70]; (f) metalens array combined the structured light and light-field technique for depth perception in complex environment^[71]

该方法基于超构表面的相位复用技术实现多功能透镜阵列,解决了三维单粒子追踪横向分辨率不足的问题,且超构表面的小型化和平面化使其可以适配未经改装的显微镜,相对传统光学元件具有广阔的应用前景。针对传统单片透镜难以实现消色差的问题,Lin 等^[67]通过纳米柱和纳米孔的结构参数设计满足群延迟和群延迟色散的补偿,实现单个超透镜消色差功能,将 60×60 的消色差超透镜阵列应用于光场相机中,获得不同焦深的动态实时全彩成像,如图 8(b) 所示。2020 年,Kwon 等^[68]通过偏振复用和空间复用的方法充分利用超构表面的紧凑性和多功能性,设计双层超构表面(垂直级联)组成的小型化定量相位梯度显微镜,如图 8(c) 所示,第一层超表面形成剪切的 two 幅正交偏振态图像,经过第二层的三个离轴超透镜后分别叠加上不同的相位,最终在像面上得到三幅干涉图,结合三步相移算法和差分干涉对比提取定量的相位梯度信息,获得了亚微米尺度的轴向分辨率。超透镜阵列不仅可以同时获得待测物体的位置信息和角度信息,在不同视差情况下的像差表现也具有差异性,基于超透镜阵列的成像像差特性,Liu 等^[69]提出使用超透镜阵列实现像差校正的三维定位技术,如图 8(d) 所示,该方法利用 3 个超构透镜形成的有视差的 3 幅图像,设计基于互相关的梯度下降算法对图像进行单色像差校正以提高成像质量,利用校正后的图像计算视差值得到其深度信息,实现亚微米级别的三维定位。2022 年,在前述超透镜阵列光场相机的研究基础上,Fan 等^[70]提出基于偏振复用的双焦超透镜阵列用于扩展景深的光场成像,如图 8(e) 所示,该技术通过对场景中的自然光进行正交偏振态的不同光场调制,在拍摄场景的近端和远端均可自发实现光场信息的获取。双焦超透镜引入的像差可构建为调制矩阵,由后期的深度学习算法去除像差后结合传统的基于视差几何的光场恢复算法,实现 $3 \text{ cm} \sim 1.7 \text{ km}$ 的超大景深光场成像。为了解决光场成像被动成像对暗光等环境适应性差的问题,Chen 等^[71]提出集成结构光技术和光场技术的超透镜阵列设备实现复杂环境的深度感知,如图 8(f) 所示,该方法利用超透镜阵列的逆向光路,由激光光源和探测器组成共轭光路,当环境变暗时,打开激光光源经过超透镜阵列投射阵列光点形成结构光投影,结合三角测量原理恢复 300 mm 测量范围的深度信息。

基于超构表面的光场技术本质是利用尺寸小、无球差可复用的超透镜阵列替代传统微透镜阵列实现更高分辨率、更大工作范围的三维成像技术,因此可根据不同距离处不同视场大小的测量场景选择主镜配合超透镜阵列实现三维成像,在显微成像、自动驾驶、人脸识别等领域均具有广阔的应用前景。在空间分辨率和深度分辨率方面,超透镜阵列可通过设计实现对应测量场景的折中,随着未来探测器的像素尺寸越来越小,

像素数越来越大,超透镜阵列的光场成像技术方案将发挥不可替代的作用,致力于新一代光场成像应用。

3.4 点扩散函数工程技术

线性不变光学系统可以通过 PSF 来完全表征。通过设计具有特定性能的 PSF 可以得到具有所需性能的成像系统。例如,具有抛物形相位剖面加上立方相位项的扩展焦深超构表面,在整个可见光区域具有不变的 PSF,可以使用白光进行聚焦,全可见光谱直接成像。因此,基于 PSF 工程的三维成像技术需要设计一个随深度变化的 PSF,其中双螺旋 PSF (DH-PSF) 随着待成像物体沿轴移动而旋转,可以唯一地编码物体距离,常被应用于快照式深度信息获取中。除此之外,离焦恢复深度技术本质上是使用随深度变化的离焦函数作为系统的三维 PSF,结合计算机视觉算法恢复深度信息。超构表面具有多功能性和多物理量调控的特征,在基于 PSF 工程的三维成像技术中得到初步应用,促进该技术在小型化、大景深、多物理量获取等方面的发展。

2019 年,Guo 等^[72]提出基于共孔径双焦超透镜的离焦深度恢复方法,在单个探测器的不同区域上同时形成 2 幅不同的离焦图像,实现快照式被动三维成像,如图 9(a) 所示。口径为 3 mm 的超透镜实现在 10 cm 深度测量范围内测量误差低于 5% (置信度为 0.5),经预校准后的深度恢复算法使用少于 700 个的浮点运算,可实现实时深度计算。由于超构表面的高频相位不连续,因此超构透镜具备比衍射元件更大的色散。色散在传统成像设计中会影响成像质量难以消除,但在计算成像体系中,色散设计引入了波长编码 PSF 的另一个物理维度。2021 年,Tan 等^[73]提出基于超透镜极端色散实现三维彩色图像重建,如图 9(b) 所示。超透镜 R、G、B 三个通道具有不同的深度依赖 PSF,利用两个卷积神经网络 U-Net 恢复出深度图和 RGB 纹理信息,数值模拟展示了口径 1 mm 的超透镜能够实现 $0.12 \sim 0.6 \text{ m}$ 的深度信息和彩色纹理信息重建。DH-PSF 是常用的深度依赖 PSF 工程技术,Jin 等^[74]提出 DH-PSF 和透镜相位叠加的紧凑型深度定位系统,如图 9(c) 所示,该技术使用等离子超构表面实现相位叠加功能,相对于传统光学系统减小了元件个数和体积,充分利用超构表面的多功能性实现仪器的小型化,该项研究工作证明了轴上单个物点和轴外双物点的旋转角度和深度的线性关系,在可见光和多种入射偏振状态下实现 73.9% 的效率。基于该项研究工作,Jin 等^[75]提出使用介质超表面实现上述功能,并通过计算相机测量图像的功率谱,生成具有深度信息的场景图像,如图 9(d) 所示。为扩大 DH-PSF 技术的成像景深,Colburn 等^[76]提出三次方相位和 DH-PSF 相位以超构表面空间复用的方式物理实现,如图 9(e) 所示,能在可见光波段对场景中的深度信息编码为两个互补的 PSF,通过三次方相位扩展景深,对捕获数据进行反卷

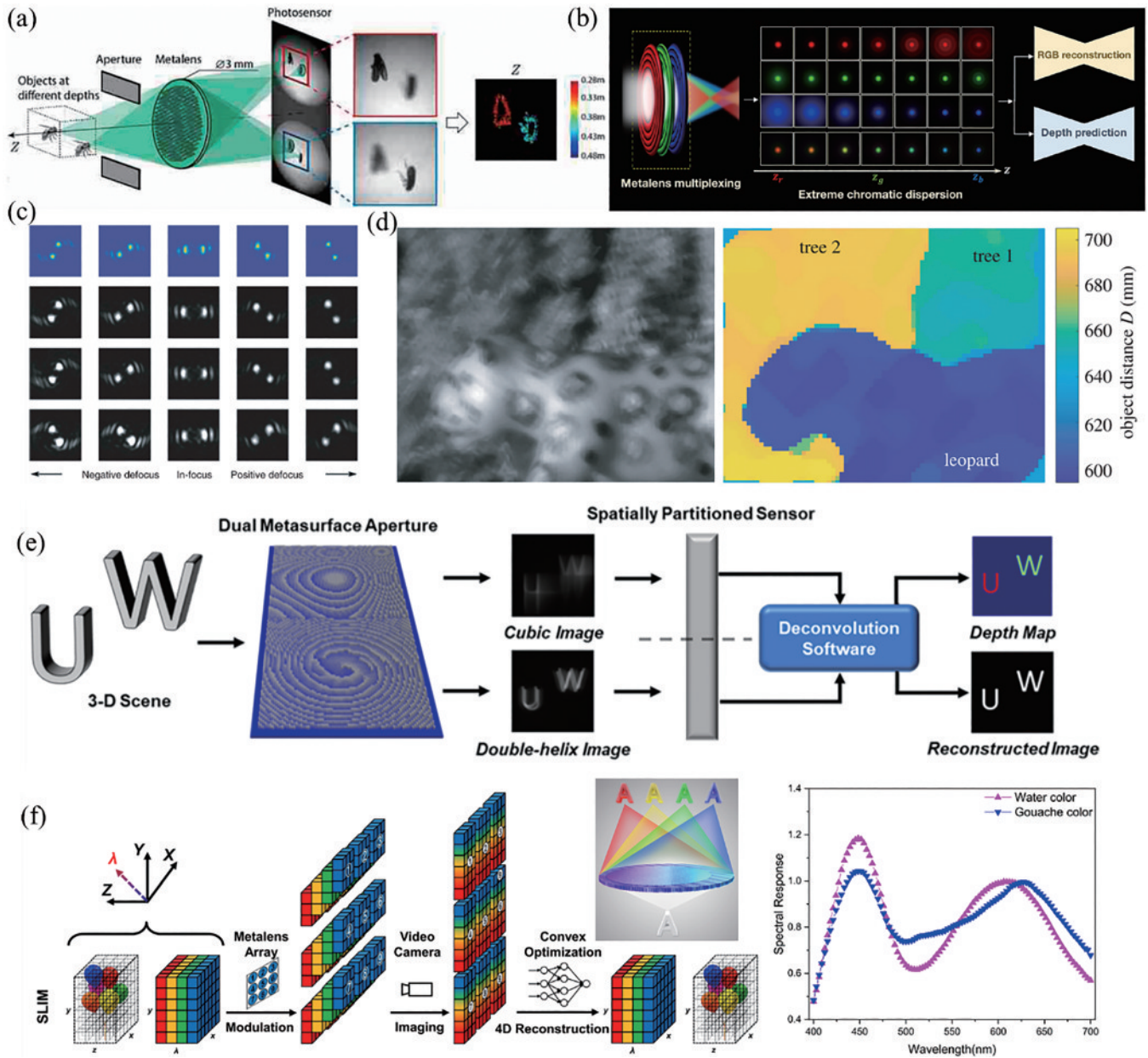


图 9 基于超构表面的 PSF 工程技术用于三维成像。(a) 基于双焦超透镜的离焦恢复深度技术^[72]；(b) 基于超透镜的极端色散实现三维重建^[73]；(c) 等离子体双螺旋 PSF 超构表面实现三维定位^[74]；(d) 基于介质超表面的双螺旋 PSF 超构表面实现三维成像^[75]；(e) 基于空间复用的双螺旋 PSF 超构表面实现大景深三维成像^[76]；(f) 基于超透镜阵列的光谱三维单次成像^[77]

Fig. 9 Metasurface-based PSF engineering technique for 3D imaging. (a) Depth from defocus based on bifocal metalens^[72]; (b) extreme dispersion of metalens for 3D reconstruction^[73]; (c) DH-PSF plasmonic metasurfaces for 3D positioning^[74]; (d) DH-PSF dielectric metasurfaces for 3D imaging^[75]; (e) DH-PSF metasurfaces based on spatial multiplexing for large depth imaging^[76]; (f) single-shot 3D spectral imaging based on metalens array^[77]

积处理恢复其二维强度图和深度图，测距误差为 1.7%。结合超透镜的强大横向色散能力和光场技术，Hua 等^[77]提出超紧凑快照式光谱光场成像技术，如图 9(f)所示，该技术通过光场和色散联合编码不同深度和波长通道的 PSF，构建正向成像模型并设计相应的凸优化算法，以 48×48 个口径 $30 \mu\text{m}$ 的超透镜阵列实现 4 nm 的光谱分辨能力和 30 cm 范围的深度成像。

由于超构表面的多物理量调控特性，基于超构表

面的 PSF 工程技术拓宽了传统 PSF 工程技术的成像维度。超构表面打破了原有相位调控的单一维度，利用偏振、光谱等维度实现多功能选通、调控物理量获取等功能。该技术在在不配合主镜的情况下受限于超透镜的设计瓶颈，只能在较小范围内（实验中大致为 mm）实现三维成像，配合主镜，可实现成像范围自由配置，能够实现对传统相位元件的完全替代和超越，广泛应用于具有丰富纹理的测量场景中。

4 结束语

4.1 三维成像技术中超构表面的共性限制

超构表面采用平面加工技术,有效地融合了光学和芯片制造技术,为工业应用提供了巨大的优势。相比之下,体三维材料的纳米结构仍然是一个相当大的挑战。尽管 3D 激光直写等技术正越来越接近 100 nm 以下的分辨率^[78],但在可见光和近红外环境下工作的体积超材料仍然遥不可及。因此平面超表面主导着研究和应用,但平面化超构元件在三维成像技术中的工程应用依然存在着挑战。实验室用于超构表面制造的许多材料与半导体制造代工厂的行业标准不兼容。因此,将技术转化为可扩展的制造和行业标准通常具有挑战性。例如,金和银等普通等离子体金属与 CMOS 制造不兼容。介电超表面(通常由硅制成)弥补了这一差距,然而,传统的 CMOS 芯片制造使用绝缘体上的硅晶圆,但光学超表面需要透明衬底上的硅。最近, Metalenz 与意法半导体合作使用极紫外光刻技术。然而,这种制造技术在 a -Si 层沉积的可重复性、对环境变化的鲁棒性,以及使用玻璃晶圆时的工艺方面仍然存在挑战。另外在可见光和紫外光谱范围内实现其他材料的操作将进一步挑战制造工艺。

三维技术目前大多数应用于可见光和红外波段,在相应波段的微纳结构设计和先进材料等方面也不断取得进步。在设计方面,超构表面近年来取得了巨大的进步,最初的纳米圆柱体微纳结构已经被高性能的逆向设计结构所取代。随着微纳光学应用的扩展,学界正在积极探索不同高折射率介电材料的制备。电介质材料如 TiO_2 ^[41]、 GaN ^[79]、 SiN ^[80] 和 SiC ^[81] 等已经得到研究证明。

最后,可以取代现有光学元件的大面积超构表面的制造并非没有挑战。大多数实验室使用的电子束光刻工具不能大面积制模,深紫外光光刻需要先进的掩模。基于超构表面的结构光技术和 TOF 技术中均存在零级效应,实验效率低于理论效率,这是加工不完善导致的,因此先进材料、复杂结构、大口径、高精度的超构表面加工技术面临的挑战急需解决。

4.2 超构表面在三维成像应用中的性能瓶颈

在基于超构表面的结构光三维成像技术中,受限于超构表面的微纳加工工艺,现有基于超构表面的投影器件具有很大的零级效应,造成能量损耗,不利于人眼安全,为了超构表面投影器件能够快速走向实际应用,这些都是迫切需要解决的问题。另外,超构表面的引入并没有打破基线约束,结构光模块的整体体积还有待压缩,深度方向依赖的编码投影器件有助于打破基线,使整体系统小型化、平面化和高度集成。

TOF 技术中:基于 TCO 的三维成像技术瓶颈在于角度扫描个数较低,需要设计自由度更高的超构表面实现更多的相位模式调制;基于 MQW 的三维成像

技术走向应用需要解决大阵列单独电控元件的加工问题;基于 MEMS 超构表面的三维成像技术需要解决 MEMS 和超构表面元件分离带来的机械惯性问题,需从加工方面解决集成问题;基于液晶和相变材料的三维成像技术需要解决帧速的问题。

光场技术中,超构表面作为超透镜阵列展现出优于微透镜阵列的良好性能,在大视场消色差方面仍表现不足,目前在算法上可使用标定解决此问题,但通过逆设计选择合适的结构实现大视场消色差超透镜阵列,将实现超构表面光场技术在三维成像精度上的大幅提升。

PSF 工程技术中,超构表面作为相位编码元件和透镜元件的多功能复合元件,展现了其集成系统的优秀能力。但是超构表面仍然面临着口径小导致的工作距离短等问题,在大的成像范围内需解决超构表面口径的加工和设计问题,大口径加工属于上述讨论的共性限制,设计层面来讲,和超透镜阵列类似,超构表面需解决大视场消色差(非光谱调制的系统)设计的基础问题。

4.3 基于超构表面的新型三维成像技术挑战

目前基于超构表面的三维成像技术大多依赖于超构器件的小型化和多功能性,成像原理依然停留在传统成像的物理机制中。传统的三维成像系统如结构光和 TOF 技术,空间分辨率取决于点云投射数量和点云最小尺寸,这些基本的性能限制由于超构元件的引入而有所提升。针对微透镜阵列的光场技术而言,像差的基本限制来源于 Snell 定律,超透镜的引入可以有效去除球差和部分色差。但是超构表面的物理机制例如超材料的耦合、共振和非线性效应能否打破现有成像机制带来的性能瓶颈^[82],是一个值得研究的课题。

超构表面具有丰富的光场调控自由度,但目前应用于三维成像技术大多是基于相位、偏振、色散调控,每个额外的信息通道都赋予了超构表面从高维数据编码的机会^[82-83],因此其他通道例如角动量或者角度敏感性等方面存在相当大的潜力。

对于应用于工业 4.0、自动驾驶等领域的新型三维技术需要适应复杂的环境例如强光干扰、厚云雾等情境,对于应用于航天观测的三维技术要求系统稳定^[84]来解决湍流扰动等工程难题,除此之外还有水下成像等。因此开展超构表面的复杂环境中的成像稳定性研究,能够提高超构表面相对于其他传统元件的核心竞争优势。

参 考 文 献

- [1] 左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D 真的来了吗?——三维结构光传感器漫谈[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303001.
Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age? An introduction to 3D structured-light sensor[J].

- Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303001.
- [2] Levin A, Freeman W T, Durand F. Understanding camera trade-offs through a Bayesian analysis of light field projections[M]//Forsyth D, Torr P, Zisserman Z. Computer vision-ECCV 2008. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 2008, 5305: 88-101.
- [3] 池汉彬, 段辉高, 胡跃强. 超构表面在三维成像与显示技术中的应用[J]. 光学精密工程, 2022, 30(15): 1775-1801.
- Chi H B, Duan H G, Hu Y Q. Application of metasurfaces in three-dimensional imaging and display[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(15): 1775-1801.
- [4] 黄玲玲, 魏群烁, 王涌天. 新型功能超颖表面波前调制技术的发展与应用(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(10): 1002001.
- Huang L L, Wei Q S, Wang Y T. Development and applications of wavefront modulation technology based on new functional metasurfaces(Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(10): 1002001.
- [5] Neshev D N, Miroschnichenko A E. Enabling smart vision with metasurfaces[J]. Nature Photonics, 2023, 17(1): 26-35.
- [6] 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.
- [7] Kats M, Genevet P, Aoust G, et al. Giant birefringence in optical antenna arrays with widely tailorable optical anisotropy[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(31): 12364-12368.
- [8] Liu L X, Zhang X Q, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude[J]. Advanced Materials, 2014, 26(29): 5031-5036.
- [9] Decker M, Staude I, Falkner M, et al. High-efficiency dielectric Huygens' surfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2015, 3(6): 813-820.
- [10] Shalaev M I, Sun J B, Tsukernik A, et al. High-efficiency all-dielectric metasurfaces for ultracompact beam manipulation in transmission mode[J]. Nano Letters, 2015, 15(9): 6261-6266.
- [11] Zhang L, Ding J, Zheng H Y, et al. Ultra-thin, high-efficiency mid-infrared transmissive Huygens meta-optics [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 1481.
- [12] Arbabi A, Briggs R M, Horie Y, et al. Efficient dielectric metasurface collimating lenses for mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33310-33317.
- [13] Li J, Wu T S, Xu W B, et al. Mechanisms of 2π phase control in dielectric metasurface and transmission enhancement effect[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 23186-23196.
- [14] Anzan-Uz-Zaman M, Song K, Lee D G, et al. A novel approach to Fabry-Pérot-resonance-based lens and demonstrating deep-subwavelength imaging[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 10769.
- [15] Khorasaninejad M, Capasso F. Broadband multifunctional efficient meta-gratings based on dielectric waveguide phase shifters[J]. Nano Letters, 2015, 15(10): 6709-6715.
- [16] 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.
- [17] Pancharatnam S. Generalized theory of interference and its applications[J]. Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A, 1956, 44(6): 398-417.
- [18] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences, 1984, 392(1802): 45-57.
- [19] Zhao X G, Sun Z C, Zhang L Y, et al. Review on metasurfaces: an alternative approach to advanced devices and instruments[J]. Advanced Devices & Instrumentation, 2022, 2022: 1-19.
- [20] Engelberg J, Zhou C, Mazurski N, et al. Near-IR wide field-of-view Huygens metalens for outdoor imaging applications[J]. Nanophotonics, 2020, 9(2): 361-370.
- [21] Faraji-Dana M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Compact folded metasurface spectrometer[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 1-8.
- [22] Ye X, Qian X, Chen Y X, et al. Chip-scale metalens microscope for wide-field and depth-of-field imaging[J]. Advanced Photonics, 2022, 4(4): 046006.
- [23] Maguid E, Yulevich I, Yannai M, et al. Multifunctional interleaved geometric-phase dielectric metasurfaces[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(8): e17027.
- [24] Neshev D, Aharonovich I. Optical metasurfaces: new generation building blocks for multi-functional optics[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 1-5.
- [25] Rubin N A, D' Aversa G, Chevalier P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera[J]. Science, 2019, 365(6448): eaax1839.
- [26] Arbabi E, Kamali S M, Arbabi A, et al. Full-stokes imaging polarimetry using dielectric metasurfaces[J]. ACS Photonics, 2018, 5(8): 3132-3140.
- [27] Wu C, Li Q, Zhang Z H, et al. Control of phase, polarization, and amplitude based on geometric phase in a racemic helix array[J]. Photonics Research, 2021, 9(11): 2265-2276.
- [28] Tang J, Li Z, Wan S, et al. Angular multiplexing nanoprinting with independent amplitude encryption based on visible-frequency metasurfaces[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(32): 38623-38628.
- [29] Shen Y J, Wang X J, Xie Z W, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 1-29.
- [30] Chen R, Zhou H, Moretti M, et al. Orbital angular momentum waves: generation, detection, and emerging applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(2): 840-868.
- [31] Zhou H Q, Sain B, Wang Y T, et al. Polarization-encrypted orbital angular momentum multiplexed metasurface holography[J]. ACS Nano, 2020, 14(5): 5553-5559.

- [32] Ma D N, Li Z, Cheng H, et al. Multi-dimensional manipulation of optical field with metasurfaces and its optimization based on machine learning[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(18): 1824-1844.
- [33] Yang W H, Qu G Y, Lai F X, et al. Dynamic bifunctional metasurfaces for holography and color display [J]. Advanced Materials, 2021, 33(36): 2101258.
- [34] Schmidt S, Thiele S, Toulouse A, et al. Tailored micro-optical freeform holograms for integrated complex beam shaping[J]. Optica, 2020, 7(10): 1279-1286.
- [35] Bao Y J, Yan J H, Yang X G, et al. Point-source geometric metasurface holography[J]. Nano Letters, 2021, 21(5): 2332-2338.
- [36] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 1-8.
- [37] Chen M K, Wu Y F, Feng L, et al. Principles, functions, and applications of optical meta-lens[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(4): 2001414.
- [38] Pan M Y, Fu Y F, Zheng M J, et al. Dielectric metalens for miniaturized imaging systems: progress and challenges [J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 1-32.
- [39] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308-312.
- [40] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(11): 937-943.
- [41] 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.
- [42] Ni Y B, Chen S, Wang Y J, et al. Metasurface for structured light projection over 120° field of view[J]. Nano Letters, 2020, 20(9): 6719-6724.
- [43] Li Z L, Dai Q, Mehmood M Q, et al. Full-space cloud of random points with a scrambling metasurface[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 1-8.
- [44] Li N X, Fu Y H, Dong Y, et al. Large-area pixelated metasurface beam deflector on a 12-inch glass wafer for random point generation[J]. Nanophotonics, 2019, 8(10): 1855-1861.
- [45] Xie Y Y, Ni P N, Wang Q H, et al. Metasurface-integrated vertical cavity surface-emitting lasers for programmable directional lasing emissions[J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(2): 125-130.
- [46] Wang Q H, Ni P N, Xie Y Y, et al. On-chip generation of structured light based on metasurface optoelectronic integration[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(3): 2000385.
- [47] Kim G, Kim Y, Yun J, et al. Metasurface-driven full-space structured light for three-dimensional imaging[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1-10.
- [48] Kim I, Martins R J, Jang J, et al. Nanophotonics for light detection and ranging technology[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(5): 508-524.
- [49] Kinsey N, DeVault C, Boltasseva A, et al. Near-zero-index materials for photonics[J]. Nature Reviews Materials, 2019, 4(12): 742-760.
- [50] Huang Y W, Lee H W H, Sokhoyan R, et al. Gate-tunable conducting oxide metasurfaces[J]. Nano Letters, 2016, 16(9): 5319-5325.
- [51] Park J, Kang J H, Kim S J, et al. Dynamic reflection phase and polarization control in metasurfaces[J]. Nano Letters, 2017, 17(1): 407-413.
- [52] Shirmanesh G K, Sokhoyan R, Pala R A, et al. Dual-gated active metasurface at 1550 nm with wide (>300°) phase tunability[J]. Nano Letters, 2018, 18(5): 2957-2963.
- [53] Kim S I, Park J, Jeong B G, et al. Electrically reconfigurable active metasurface for 3D distance ranging [C]//2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), December 12-18, 2020, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [54] Park J, Jeong B G, Kim S I, et al. All-solid-state spatial light modulator with independent phase and amplitude control for three-dimensional LiDAR applications[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(1): 69-76.
- [55] Lee J, Jung S, Chen P Y, et al. Ultrafast electrically tunable polaritonic metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2014, 2(11): 1057-1063.
- [56] Wu P C, Pala R A, Kafaie Shirmanesh G, et al. Dynamic beam steering with all-dielectric electro-optic III-V multiple-quantum-well metasurfaces[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1-9.
- [57] Khaidarov E, Liu Z T, Paniagua-Dominguez R, et al. Control of LED emission with functional dielectric metasurfaces[J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(1): 1900235.
- [58] Holsteen A L, Cihan A F, Brongersma M L. Temporal color mixing and dynamic beam shaping with silicon metasurfaces[J]. Science, 2019, 365(6450): 257-260.
- [59] Chen R, Shao Y F, Zhou Y, et al. A semisolid micromechanical beam steering system based on micrometa-lens arrays[J]. Nano Letters, 2022, 22(4): 1595-1603.
- [60] Martins R J, Marinov E, Youssef M AB, et al. Metasurface-enhanced light detection and ranging technology[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1-8.
- [61] Li S Q, Xu X W, Veetil RM, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface[J]. Science, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [62] Yin X H, Steinle T, Huang L L, et al. Beam switching and bifocal zoom lensing using active plasmonic metasurfaces[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(7): e17016.
- [63] Ihrke I, Restrepo J, Mignard-Debise L. Principles of Light Field Imaging: briefly revisiting 25 years of research [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2016, 33(5): 59-69.

- [64] Favaro P. A split-sensor light field camera for extended depth of field and superresolution[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8436: 843602.
- [65] Zhou C Y, Nayar S. What are good apertures for defocus deblurring? [C]//2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), April 16-17, 2009, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010.
- [66] Holsteen A L, Lin D M, Kauvar I, et al. A light-field metasurface for high-resolution single-particle tracking[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(4): 2267-2271.
- [67] 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.
- [68] Kwon H, Arbabi E, Kamali S M, et al. Single-shot quantitative phase gradient microscopy using a system of multifunctional metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(2): 109-114.
- [69] Liu W W, Ma D N, Li Z C, et al. Aberration-corrected three-dimensional positioning with a single-shot metalens array[J]. *Optica*, 2020, 7(12): 1706-1713.
- [70] Fan Q B, Xu W Z, Hu X M, et al. Trilobite-inspired neural nanophotonic light-field camera with extreme depth-of-field[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1-10.
- [71] Chen M K, Liu X Y, Wu Y F, et al. A meta-device for intelligent depth perception[J]. *Advanced Materials*, 2022: 2107465.
- [72] Guo Q, Shi Z J, Huang Y W, et al. Compact single-shot metalens depth sensors inspired by eyes of jumping spiders[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(46): 22959-22965.
- [73] Tan S, Yang F, Boominathan V, et al. 3D imaging using extreme dispersion in optical metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(5): 1421-1429.
- [74] Jin C Q, Zhang J H, Guo C L. Metasurface integrated with double-helix point spread function and metalens for three-dimensional imaging[J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(3): 451-458.
- [75] Jin C Q, Afshar M, Berlich R, et al. Dielectric metasurfaces for distance measurements and three-dimensional imaging[J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(3): 036001.
- [76] Colburn S, Majumdar A. Metasurface generation of paired accelerating and rotating optical beams for passive ranging and scene reconstruction[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(6): 1529-1536.
- [77] Hua X, Wang Y J, Wang S M, et al. Ultra-compact snapshot spectral light-field imaging[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1-9.
- [78] Ren H R, Fang X Y, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(11): 948-955.
- [79] Ren H R, Briere G, Fang X Y, et al. Metasurface orbital angular momentum holography[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-8.
- [80] Colburn S, Zhan A L, Bayati E, et al. Broadband transparent and CMOS-compatible flat optics with silicon nitride metasurfaces[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(8): 2330-2344.
- [81] Schaeper O, Yang Z W, Kianinia M, et al. Monolithic silicon carbide metalenses[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(4): 1409-1414.
- [82] Engelberg J, Levy U. The advantages of metalenses over diffractive lenses[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-4.
- [83] Mait J N, Athale R A, van der Gracht J, et al. Potential applications of metamaterials to computational imaging [C]//Frontiers in Optics/Laser Science, September 14-17, 2020, Washington, D.C., USA. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2020: FTu8B.1.
- [84] Chen M K, Chu C H, Liu X Y, et al. Meta-lens in the sky[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 46552-46557.