

中国光学十大进展:超构表面异常偏折光学应用研究进展(特邀)[‡]

李程峰^{1,2,3}, 何涛^{1,2,3*}, 施宇智^{1,2,3}, 魏泽勇^{1,2,3}, 王占山^{1,2,3}, 程鑫彬^{1,2,3**}

¹同济大学物理科学与工程学院精密光学工程技术研究所, 上海 200092;

²同济大学物理科学与工程学院先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092;

³上海市数字光学前沿科学研究基地, 上海 200092

摘要 光束偏折是光场操控的一项重要能力,也是众多光学应用的基础。随着光学技术的蓬勃发展,越来越多的应用场景迫切需要能够兼顾小型化和高效率的光束偏折光学器件。超构表面是人工原子按特定宏观排列方式构建而成的平面器件,具有强大的电磁场调控能力,能够在亚波长尺度下将光束偏折到任意非镜面方向,有望在实际应用中发挥巨大作用。从超构表面实现高效率异常偏折的物理机制出发,对超构表面异常偏折的应用研究进行回顾和讨论,同时也对面临的挑战进行总结,对异常偏折超构表面及其应用的未来发展进行展望。

关键词 超构表面; 亚波长结构; 异常偏折; 应用研究

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232217

China's Top Ten Advances in Optics: Research Progress on Optical Applications of Anomalous Deflection Metasurfaces (Invited)

Li Chengfeng^{1,2,3}, He Tao^{1,2,3*}, Shi Yuzhi^{1,2,3}, Wei Zeyong^{1,2,3},
Wang Zhanshan^{1,2,3}, Cheng Xinbin^{1,2,3**}

¹*Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering,
Tongji University, Shanghai 200092, China;*

²*MOE Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, School of Physics Science and Engineering,
Tongji University, Shanghai 200092, China;*

³*Shanghai Frontiers Science Center of Digital Optics, Shanghai 200092, China*

Abstract Deflecting light waves is an important capability in the manipulation of optical fields and serves as a fundamental aspect in numerous optical applications. With the vigorous development of optical technology, there is an urgent need for optical devices that balance miniaturization and beam deflection ability. Metasurfaces, which are planar devices constructed by arranging sub-wavelength nano-structures with specific order, can redirect light waves towards non-specular directions due to the ability to modulate electromagnetic waves with arbitrary customization, offering the potential to play a significant role in practical applications. In this paper, we first introduce the physical mechanisms underlying the high-efficiency anomalous deflection metasurfaces, then provide a review and discussion of the applications of anomalous deflection metasurfaces and finally summarize potential challenges, offer a glimpse into the future development of anomalous deflection metasurfaces and their applications.

Key words metasurfaces; subwavelength structure; anomalous deflection; application research

收稿日期: 2023-09-28; 修回日期: 2023-10-26; 录用日期: 2023-11-20; 网络首发日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(62305252, 61925504, 62192770, 61621001, 62205246, 62020106009, 6201101335, 62192772, 62192771)、上海市科学技术委员会科技计划项目(17JC1400800, 20JC1414600, 21JC1406100)、上海市教育委员会“曙光”计划项目(17SG22)、上海市级科技重大专项(2021SHZDZX0100)、上海市张江国家自主创新示范区专项发展资金重大项目(ZJ2021-ZD-008)、中央高校基本科研业务费专项资金、中国博士后科学基金资助项目(2022M712401)

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

[‡]本文为中国光学十大进展特邀综述。同济大学王占山和程鑫彬联合复旦大学周磊, 提出了一维多层膜结合二维超表面的准三维亚波长新结构, 首次实现了效率优于99%的光频异常反射, 相关成果入选了2022中国光学十大进展。详情请见“中国光学十大进展”官网。

1 引言

实现光束的自由操控是人们长期以来的追求,具有重要的意义。传统光学元件依赖于自然材料本身的性质,通过光在原子或分子结构中传播的相位延迟积累实现对电磁波的操控,其功能较为单一,且光学系统的集成负担大。超构材料^[1]的出现打破了这一限制,通过将三维亚波长人工原子按特定方式组合排列,可以对材料的介电常数和磁导率进行定向设计^[2],进而实现传统光学元件难以实现的奇特电磁响应,例如负折射^[3]和电磁隐身^[4]等。尽管超构材料在微波波段取得了巨大的成功,但由于三维超构材料在光频的材料吸收损耗大、实验制备难度高,光频超构材料的实际应用受到了限制。

超构表面作为三维超构材料的二维平面化,能够很好地解决上述问题。超构表面是一种平面型人工原子按特定宏观排列方式构建而成的二维平面器件^[5-6],具有平面化、易集成、电磁场调控能力强等优势,一经提出便迅速得到了研究人员的广泛关注^[7-15],并广泛应用于光束异常偏折^[16-21]、色散补偿^[22-24]、光束聚焦^[25-27]、全息成像^[28-30]、微粒操控^[31-35]、激光发射^[36-37]等前沿领域。其中,光束异常偏折是超构表面调控光波最基本的方式之一,也是许多实际应用^[38-44]的基础和前提,因此超构表面的异常偏折及其应用成为了近年来光子学领域的研究热点^[39, 45-49]。

本文首先简单回顾了光频异常偏折超构表面的发展概况,包括梯度相位超构表面^[50-51]和振幅相位协同调控超构表面^[52-55],阐述了光束异常偏折的基本物理机制。特别地,重点介绍了基于超构表面异常偏折的光子学应用。最后,对超构表面异常偏折及其应用进行了概括总结与前景展望。

2 异常偏折超构表面

光束异常偏折是许多实际应用的重要基础,受限于传统光学元件的电磁场调控能力,传统光束偏折系统及其应用往往体积庞大、功能单一。利用超构表面实现异常偏折,可以在保证效率的同时实现光学系统的小型化,并推进相关应用的集成化、多功能化,因此对异常偏折超构表面进行研究具有重要意义。描述光束异常偏折的广义斯内尔定律^[56-57]一经提出,便引起了学术界和工业界的广泛关注。研究人员发现利用超构表面结构在两种介质之间的界面处引入突变的梯度相位,可以将入射光束偏折到任意指定的方向,也就是所谓的异常偏折。但随着研究的深入,人们发现想要实现效率接近 100% 的完美异常偏折,仅仅设计超构表面的梯度相位是不够的,只有同时考虑振幅和相位的协同调控^[58],才有望实现完美异常偏折。

2.1 梯度相位超构表面的异常偏折

利用超构表面实现异常偏折最早于 2011 年被总

结并报道^[56-57]:利用人工微结构在二维平面内引入相位突变,并将微结构按照特定的方式排列组合成梯度相位,可以实现光束的定向偏折,且折/反射角满足广义斯内尔定律。如图 1 所示,通过在两种介质之间的界面设计超构表面并引入突变相位,且该相位是一个与界面位置相关的函数,那么当光在经过超构表面相邻两个位置点时,会分别产生 φ 和 $\varphi + d\varphi$ 的相移。假设 A 和 B 两点之间有两条与实际光路无限靠近的光路,由费马原理可知两条光路的光程近似相等,则有

$$[k_0 n_i \sin(\theta_i) dx + \varphi + d\varphi] - [k_0 n_t \sin(\theta_t) dx + \varphi] = 0, \quad (1)$$

式中: θ_i 和 θ_t 是入射角和出射角; dx 是两条光路与界面的交点之间的距离; n_i 和 n_t 分别是入射介质和出射介质的折射率。对式(1)进行化简,可得广义斯内尔定律:

$$\begin{cases} \sin(\theta_i) n_i - \sin(\theta_t) n_t = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx}, \\ \sin \theta_i - \sin \theta_t = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\varphi}{dx} \end{cases}, \quad (2)$$

前者是异常折射定律,后者是异常反射定律。由广义斯内尔定律可知,通过设计适当的梯度相位 $\frac{d\varphi}{dx}$,可以调控入射光波的出射角,从而实现光束的异常偏折。不难看出,当梯度相位 $\frac{d\varphi}{dx} = 0$ 时,它就表现为熟知的传统斯内尔定律的形式。广义斯内尔定律用简明易懂的方式解释了超构表面异常偏折的原理机制,奠定了超构表面相关领域的研究基础。

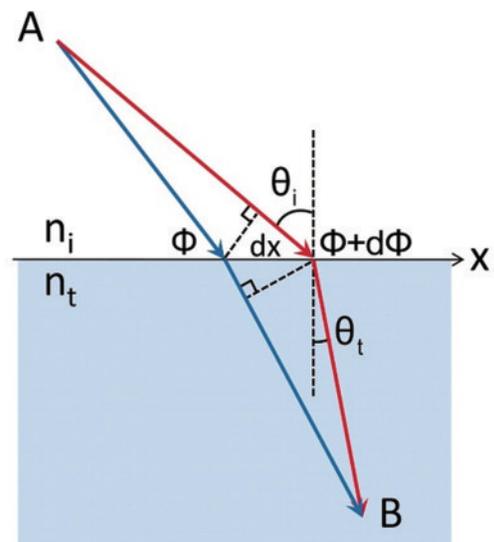


图 1 广义斯内尔定律示意图^[56]

Fig. 1 Diagram of generalized Snell's law^[56]

为了验证这一理论的正确性,哈佛大学团队提出了一种由 V 形金属天线阵列组成的超构表面,如图 2(a) 所示。V 形天线支持“对称”和“反对称”两种工

作模式,通过改变金属纳米棒的长度和张角,可以在硅衬底上构建 $0\sim 2\pi$ 的完整相位,并通过实验观察到了异常偏折的现象,尽管异常偏折的效率并不高,但是很好地验证了广义斯内尔定律。

基于对梯度相位的认识,相关科研人员展开了大量研究^[50-51, 59-65]。2012年,复旦大学研究团队^[50]采用金属-介质-金属的单元结构,如图 2(b)所示,在可见光波段 850 nm 附近获得反射效率达 80% 的高效异常反射器件,但是当入射波长偏离工作波长时,各个单元结构的相位响应逐渐偏离设计值,且偏离程度也各不相同,导致该结构的工作带宽仅为 150 nm。为了实现宽带

高效异常偏折,2015年,美国西北大学研究团队^[66]提出了一种梯形金属超构表面,如图 2(c)所示,其单元结构中的梯形宽度逐渐变化,可以在可见光和近红外波段上调控入射光的梯度相位,最终可以实现的高效异常反射带宽为 400 nm。尽管金属超构表面单元结构的相位调控能力较强,但是由于金属材料在可见光波段的欧姆损耗,金属超构表面存在天然劣势。2014年,斯坦福大学研究团队^[61]率先使用高折射率介质材料硅纳米柱来构建梯度相位超构表面,但是受限于介质单元结构的相位调控能力,其在可见光波段的异常偏折效率仅为 70%。

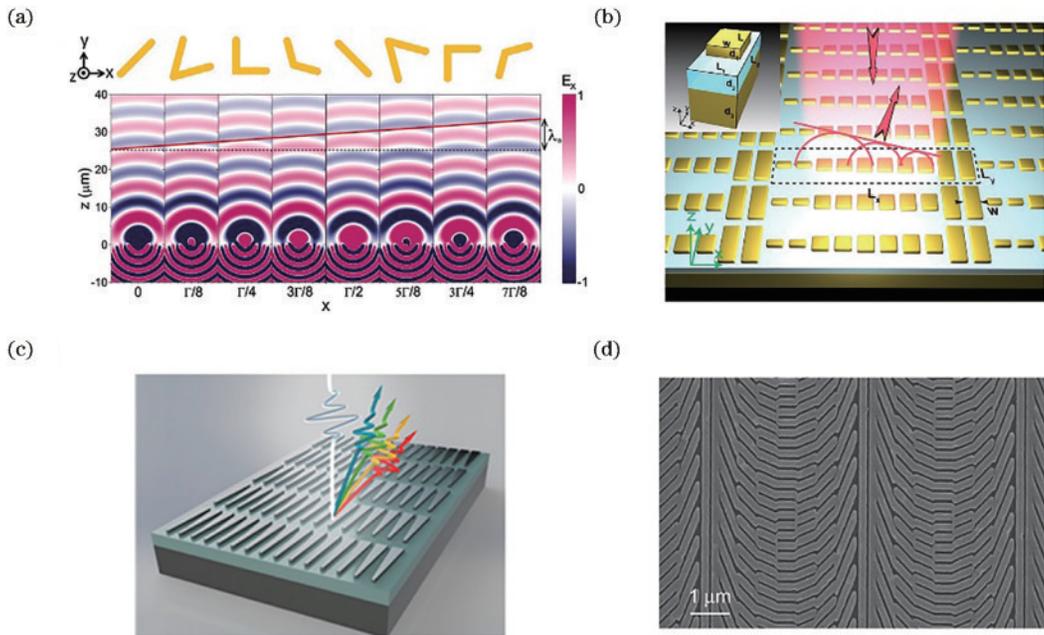


图 2 梯度相位超构表面。(a)基于 V 形金属天线的梯度相位超构表面^[56]; (b)金属-介质-金属构型的高效梯度相位超构表面^[50]; (c)基于梯形金属结构的宽带高效梯度相位超构表面^[66]; (d)基于介质材料的梯度相位超构表面^[61]

Fig. 2 Gradient phase metasurfaces. (a) Gradient phase metasurfaces based on V-shaped metal antennas^[56]; (b) high-efficiency gradient phase metasurfaces with metal-dielectric-metal configuration^[50]; (c) broadband high-efficiency gradient phase metasurfaces based on trapezoidal metal structures^[66]; (d) gradient phase metasurfaces based on dielectric materials^[61]

2.2 振幅相位协同调控超构表面的异常偏折

随着研究的进一步深入,人们发现基于梯度相位的超构表面无法实现 100% 效率的完美异常偏折,且效率随着异常偏折角度的增大而急剧下降^[50]。一方面,这是由于在设计过程中通常只考虑了单元结构的局域响应,忽略不同单元结构之间的耦合,因此梯度相位超构表面的设计响应和实际响应会存在偏离;另一方面,广义斯内尔定律只考虑了相位因素,忽略了振幅的影响,导致人们难以实现效率接近 100% 的完美异常偏折。针对这一问题,2016年,德克萨斯大学奥斯汀分校的研究人员^[58]通过严格的推导指出:完美效率的异常偏折依赖于振幅和相位的协同调控,并需要考虑超构表面单元结构之间的非局域效应,即在超构表面的设计过程中需要考虑不同单元结构之间的相位和振幅的影响。基于这一理念,该研究团队给出了实现

完美异常反射的物理需求,如图 3 所示。可见,完美异常反射并不是简单依赖界面处的梯度相位实现的,而是需要振幅和相位的协同调控。具体来说:反射相位随异常反射角度的增大而逐渐偏离线性梯度;而反射振幅则在 1 上下振荡且随着异常反射角度的增大而变剧烈。即超构表面需要在不同空间位置分别实现增益和损耗才能满足完美异常反射的物理需求。然而引入增益介质会增加系统的不稳定性,如何在无源系统中实现增益和损耗成为了人们当前的主要探索方向。

为了能够在无源超构表面系统中实现完美异常偏折的物理需求,科研人员展开了大量研究^[51-54, 67-69]。2017年,阿尔托大学研究团队^[67]提出了矩形金属贴片的设计,如图 4(a)所示,利用表面波的能流转移实现了非局域的物理响应。该方案在微波波段取得了巨大成功,但受限于金属材料在光频波段的吸收损耗,其可

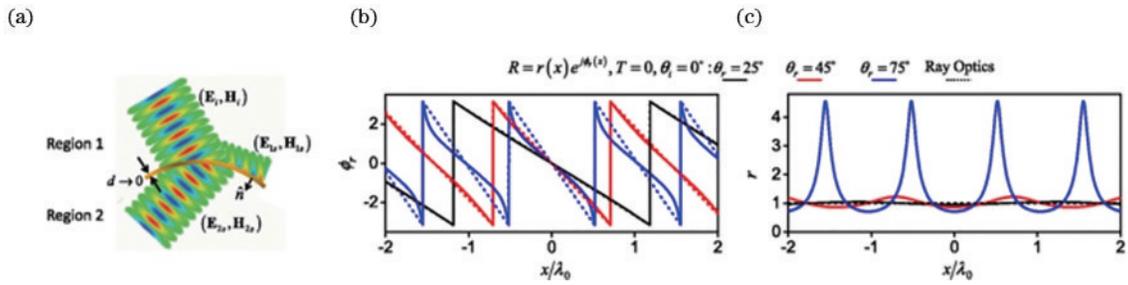


图3 完美异常反射的物理需求^[58]。(a)完美异常偏折示意图,通过超构表面的调控,实现任意方向光束偏折;(b)实现不同角度完美异常偏折时,超构表面不同空间位置处的相位需求;(c)实现不同角度完美异常偏折时,超构表面不同空间位置处的振幅需求
Fig. 3 Physics requirement for perfect anomalous reflection^[58]. (a) Schematic of perfect anomalous deflection, arbitrary beam steering can be achieved by the modulation of metasurface; (b) phase requirement of metasurface at different spatial positions under the condition of different deflection angles; (c) amplitude requirement of metasurface at different spatial positions under the condition of different deflection angles

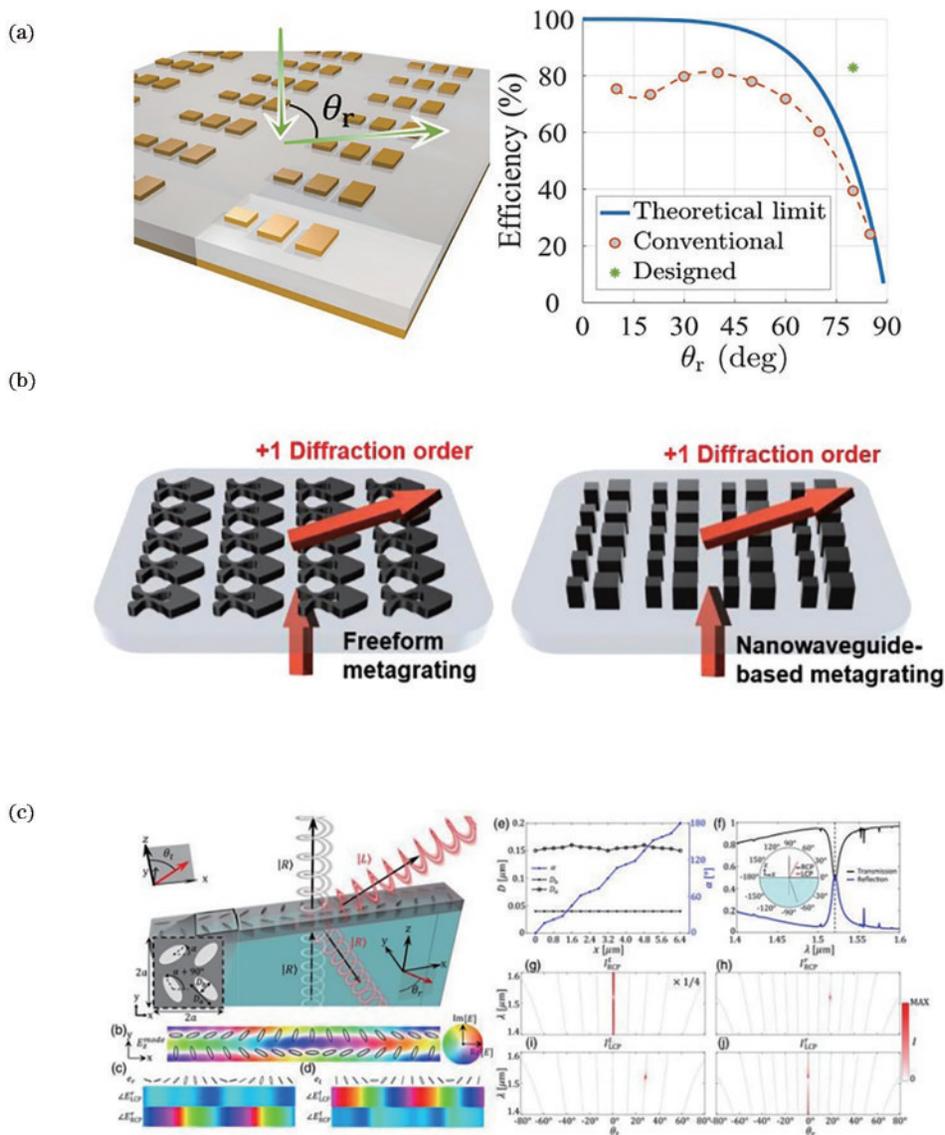


图4 振幅相位协同调控异常偏折超构表面。(a)基于矩形金属贴片的非局域超构表面^[67]; (b)基于拓扑优化的非局域介质超构表面^[70]; (c)基于准BIC的多功能非局域超构表面^[75]
Fig. 4 Phase-amplitude coordinated anomalous reflection metasurfaces. (a) Non-local metasurfaces based on rectangular metal patches^[67]; (b) dielectric non-local metasurfaces based on topology optimization^[70]; (c) multi-functional non-local metasurfaces based on q-BIC^[75]

见光频段内的效率仅为 82.9%^[68], 即便如此, 该结果仍然突破了梯度相位超构表面的效率限制。同年, 斯坦福大学研究团队^[51, 70]利用低损耗的介质材料结合拓扑优化算法^[71-74], 采用逆向设计的思路, 获得了具有自由几何形状的拓扑超构表面, 如图 4(b) 所示, 该超构表面通过布洛赫波的耦合提高了大角度下的异常折射效率, 但最高效率也仅为 80% 左右。2020 年, 纽约大学研究团队^[75]利用连续域中的准束缚态(准 BIC)来设计多功能非局域超构表面, 如图 4(c) 所示, 并同时输出频谱和波前进行调制。通过设计光子晶体平板上的椭圆孔洞, 可在多个波长下定制窄带波前, 但是该超构表面的异常反射效率仅为 50%。可见, 实现光频段内的完美异常偏折是十分困难的。

2022 年, 同济大学研究团队^[55]提出了一种由二维超构表面和一维多层膜组成的准三维亚波长结构(Q3D-SWS), 并实现了效率高达 99% 的光频完美异常反射, 如图 5 所示。通过在系统中引入多层膜, 可以利用其反射振幅和反射相位对系统内部的布洛赫波和传输波进行高效耦合, 增强对系统内横向能流的调控

能力, 最终实现完美异常反射的物理需求。基于以上设计理念, 该研究团队最终首次实现了光频段内的完美异常反射器件。文中以正入射情况下的 40° 完美异常反射为例, 介绍了准三维亚波长结构实现完美异常反射的设计理念和方法: 考虑到实现 40° 完美异常反射时, 相位要求仍然接近线性, 且需要抑制透射损耗, 采用梯度相位超构表面和高反射介质薄膜作为初始结构, 在此基础上通过改变多层膜的相位响应 φ_0 和 φ_1 来实现完美异常反射所需的能流分布。研究人员设计并制备了符合反射振幅和相位需求的多层膜并将其和超构表面组合构成准三维亚波长结构, 该结构实现了理论上效率优于 99%、实验上效率达到 98% 的光频完美异常反射。基于以上设计理念, 该研究团队最终首次实现了光频段内的完美异常反射器件。在此研究基础上, 2023 年, 该课题组还进一步地提出了基于准三维亚波长结构的带宽可调的高效反射器件^[20], 只需设计宽带下多层膜的相位响应 $\varphi_0(\lambda)$ 和 $\varphi_1(\lambda)$, 即可实现超构表面高反射率带宽的任意定制, 展现了准三维亚波长结构对电磁波的高效调控能力。

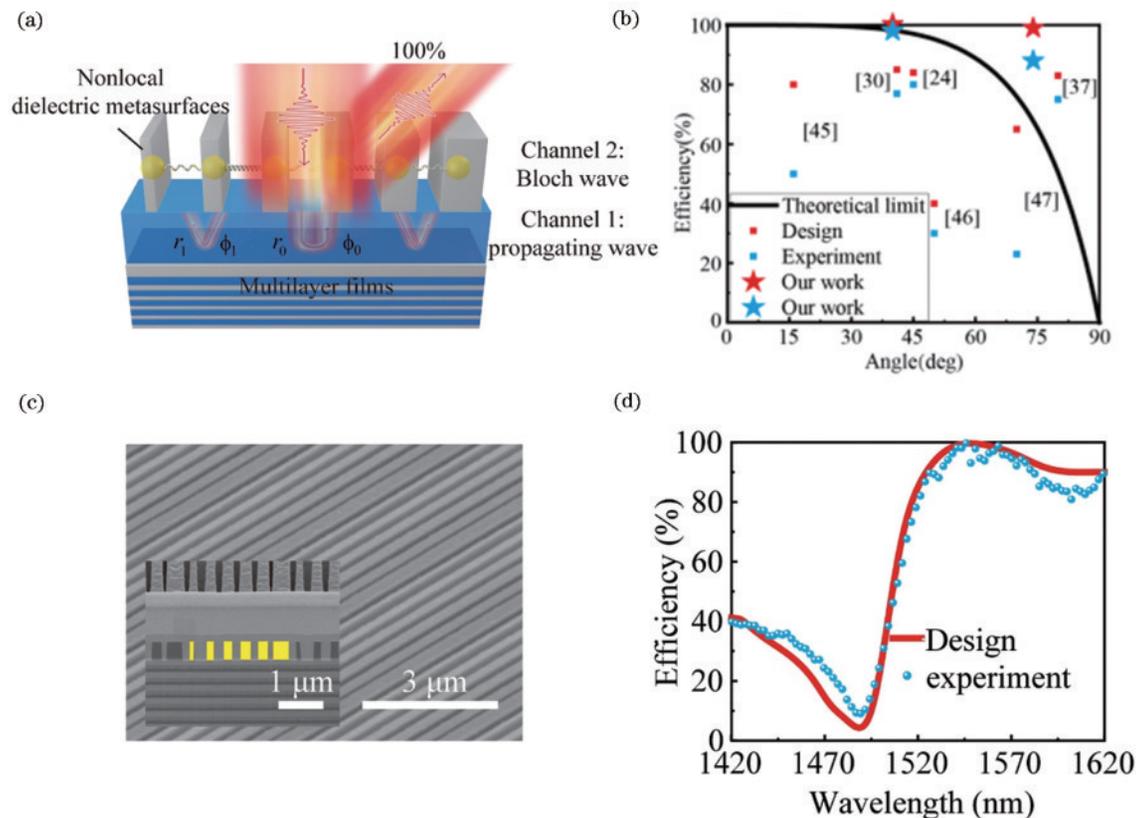


图 5 基于准三维亚波长结构的完美异常反射器^[55]。(a)准三维亚波长结构示意图;(b)现有已发表工作对比;(c)样品扫描电子显微镜表征结果;(d)样品光学性能表征结果

Fig. 5 Perfect anomalous reflector based on the Q3D-SWS^[55]. (a) Schematic of Q3D-SWS; (b) comparison with published works; (c) SEM side-view image and cross-section image of the sample; (d) broadband spectra measured in the experiment and calculated in the design

综上, 梯度相位超构表面从广义斯内尔定律出发, 为我们提供了设计异常偏折超构表面简单却十分有效

的思路, 即只需要考虑单元结构本身的相位和振幅响应, 因此在设计上往往更为直接, 但是忽略了非局域效

应,导致异常偏折的效率偏低,难以实现完美的异常偏折;而振幅相位协同调控超构表面从实现完美异常偏折的物理需求出发,为完美异常偏折提供了理论支持,但是由于在设计时需要考虑单元结构间振幅和相位的影响,因此在设计上更具挑战性。

3 异常偏折超构表面的应用

随着人们对异常偏折超构表面的认识不断加深,相关的应用也逐渐应运而生。异常偏折超构表面能够在保证系统小型化的同时,实现对光束的高效调控,因此,将超构表面引入光束扫描^[76-82]、光束聚焦^[40, 42]、智能穿戴^[83-87]、光谱仪^[88-89]等光学系统中替代传统光学元件,可以实现系统的小型化和轻量化。此外,通过设计异常偏折超构表面对光束偏振、波长、入射角等条件的特殊响应,还可以实现诸如多功能光束分束^[90-92]、光力操控^[93-94]、探测增强^[44, 95]等复杂功能。

3.1 光束扫描系统

光束扫描系统在各种无人系统和平台具有重大应用需求,是探测装备激光雷达的核心硬件。传统光束扫描系统依赖多种光学器件级联,体积较大且调制扫

描频率慢,异常偏折超构表面凭借高效率 and 易集成的特点,可以与各类主动可调谐材料直接结合,从而实现光束扫描系统的小型化。常见的主动可调谐材料^[96]主要包括:透明导电氧化物材料(TCO)、液晶材料、多量子阱(MQW)、微型电子机械系统(MEMS)、相变材料等。

透明导电氧化物具有调制速度快、偏置电压低的优势,通过外加偏置电压改变材料中的电荷浓度,可以改变折射率,从而实现光束偏折角的改变。2016年,加州理工学院研究团队^[76]提出了基于透明导电氧化物钢锡(ITO)的异常偏折超构表面,如图 6(a)所示,通过施加偏压,使 ITO 层发生电荷累积,从而改变其有效折射率,最终实现了 184° 的相移和 30% 的反射率变化,并演示了超过 10 MHz 频率的调制,实现了一 $40^\circ \sim 40^\circ$ 的光束扫描范围。2021年,韩国三星电子公司研究团队^[77]同样利用电调 ITO 的方式,通过调控单元结构中的顶栅电压和底栅电压,如图 6(b)所示,进而独立调控单元结构的反射系数,最终实现了扫描频率为 5.4 MHz、偏转角度为 4° 、效率为 1% 的连续激光扫描,并成功对模拟街景进行了三维深度扫描。

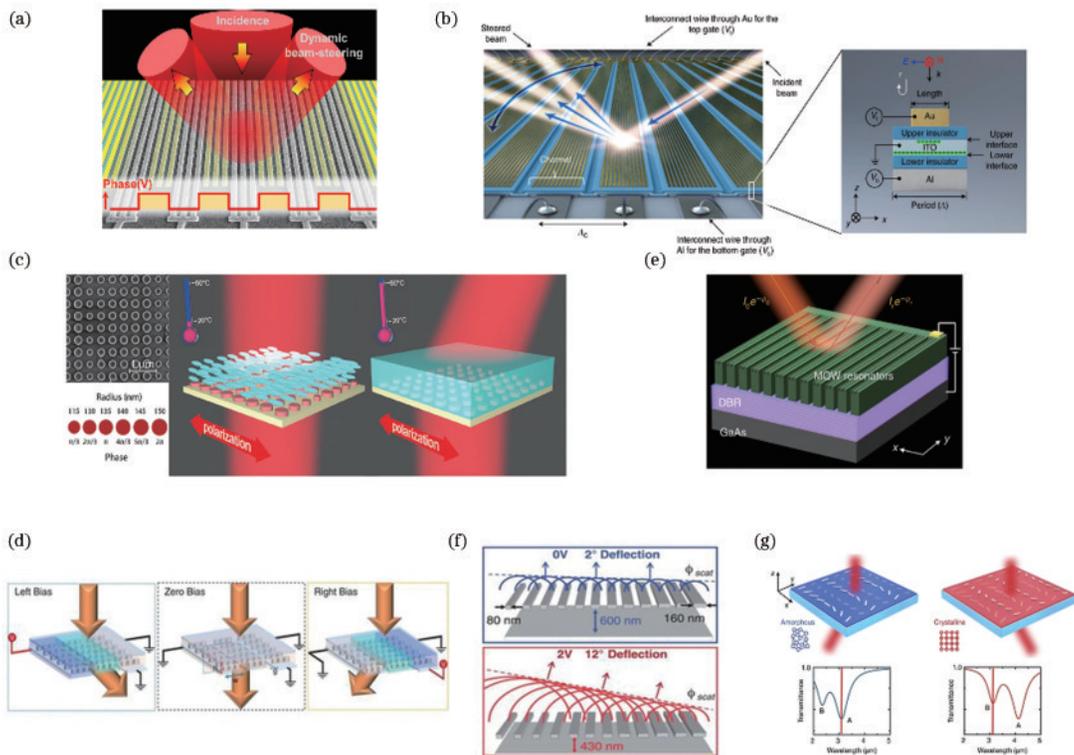


图 6 基于异常偏折超构表面的光束扫描系统。(a)(b)基于透明导电氧化物的异常偏折超构表面光束扫描系统^[76-77]; (c)(d)基于液晶材料的异常偏折超构表面光束扫描系统^[78-79]; (e)基于多量子阱的异常偏折超构表面光束扫描系统^[80]; (f)基于 MEMS 的异常偏折超构表面光束扫描系统^[81]; (g)基于相变材料的异常偏折超构表面光束扫描系统^[82]

Fig. 6 Schematic of beam steering systems based on anomalous deflection metasurfaces. (a)(b) Anomalous deflection metasurfaces beam steering systems based on TCO materials^[76-77]; (c)(d) anomalous deflection metasurfaces beam steering systems based on liquid crystals^[78-79]; (e) anomalous deflection metasurfaces beam steering system based on MQWs^[80]; (f) anomalous deflection metasurfaces beam steering systems based on MEMS^[81]; (g) anomalous deflection metasurfaces beam steering systems based on phase-change materials^[82]

液晶是一种介于晶体和液体之间的中间状态,在电场、温度、压力等外部条件作用下,液晶分子的排列方式会发生改变,从而实现对光学性质的调节。基于液晶材料的空间光调制器(SLM)可以对入射光的波前进行相位和强度的调制,因此广泛用于视频投影、全息成像和激光雷达等领域,但是大像素尺寸降低了投影图像的分辨率。2018年,澳大利亚国立大学研究团队^[78]将液晶引入超构表面,如图6(c)所示,通过加热改变液晶分子的排列方式,最终实现了最大偏折角度为 12° 、偏折效率为50%的光束偏转扫描。2019年,新加坡科技研究局团队^[79]提出了电调液晶超构表面的方案,如图6(d)所示,通过施加不同的偏压,最终实现了最大偏折角度为 11° 、偏折效率为35%的光束偏转扫描。

多量子阱是一种半导体结构,通常由多个薄层的半导体材料交替堆叠而成,形成一系列的量子阱,从而实现特定波长范围内的光子能带结构调控。2019年,加州理工学院研究团队^[80]提出了基于布拉格反射器和多量子阱的动态可调异常偏折超构表面,如图6(e)所示,通过施加不同的电压,量子受限斯塔克效应会导致多量子阱的折射率发生改变,从而改变对入射光的调制,其相对反射调制可以达270%,实现了 $0^\circ\sim 70^\circ$ 的连续相位移动,最终展示了 ± 1 级次的动态开关调控。

MEMS是指集成了机械、电子、光学和无线通信等多种技术的微型系统,根据不同的要求和指令,通过电子控制微小的机械部件进行调整和变化。2019年,斯坦福大学研究团队^[81]提出了与MEMS器件集成的超构表面平台,如图6(f)所示,通过将硅纳米天线阵列制备在绝缘硅材料上,可以利用MEMS实现超构表面的空间位置改变,从而改变衬底和硅天线之间的法布里-珀罗共振模式,实现不同的衍射角度出射,当偏压达到2V时,光束偏折角可达 12° 左右。

相变材料是指在温度或压力等外部刺激下能够发生物理状态变化的材料。2017年,斯图加特大学研究团队^[82]提出了结合相变材料 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 的等离子体共振超构表面,如图6(g)所示。通过设计两组具有相反相位的单元结构,当相变材料 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 由于温度变化发生相变时,两组单元结构分别被选择性激发,从而实现了偏折角为 $\pm 13^\circ$ 的光束动态调控,并由此设计制备了焦距可调的超构透镜。

3.2 超构透镜

透镜在现代光电应用中扮演着关键的角色,其数值孔径和聚焦效率往往决定了光学系统的性能。传统的折射透镜和衍射透镜由于物理机制和材料限制,通常需要将多个透镜组合级联,以校正系统中的色差和像差。该方案导致系统体积增大,不利于光学系统小型化的同时,增加了制造成本。基于超构表面技术的超构透镜为克服传统透镜所面临的挑战提供了新的解决途径。

2012年,哈佛大学研究团队^[97]提出了理想聚焦的相位分布需求,并以此设计了基于V形金属天线的超构透镜。以超构表面中心位置($x=0, y=0$)为参考,若想要实现理想的聚焦效果,则超构透镜需满足抛物线相位分布:

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} (f - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}), \quad (3)$$

式中:(x, y)为超构表面上的坐标; λ 为目标波长; f 为设计焦距。进一步地,为了克服金属损耗,提高超构透镜聚焦效率,2016年,该研究团队利用介质材料 TiO_2 开发了工作在可见光波段、 $\text{NA}=0.8$ 的超构透镜^[26],通过旋转单元结构,可以调节其几何相位响应,最终实现了86%效率的聚焦和亚波长空间分辨成像。自此,超构透镜得以迅速发展^[98-100],并朝着高效率^[101-102]、大数值孔径^[42, 103]、多波长^[104-105]、消色差^[24, 106-107]、可调谐^[108-109]等方向不断突破。

尽管超构透镜在高效率和大数值孔径的道路上不断发展,但是由于二者的制约关系,聚焦效率与数值孔径往往难以同时保证。简单来说,对于超构透镜,数值孔径越大,对远离中心位置处单元结构的光束偏折要求越高,因此往往由于边缘区域相位的失配,大数值孔径超构透镜效率下降。2018年,南洋理工大学的研究团队^[42]提出了基于异常偏折超构光栅的超构透镜,如图7(a)所示,该超构透镜满足菲涅耳波带片相位分布设计,不同区域内的单元结构实现不同角度的异常偏折,其理论/实验的数值孔径分别达到了0.99/0.93,突破了传统抛物线相位分布超构透镜的局限。在此基础上,2020年,美国德克萨斯大学奥斯汀分校的研究团队^[40]采用分区机制,提出了混合超构透镜,如

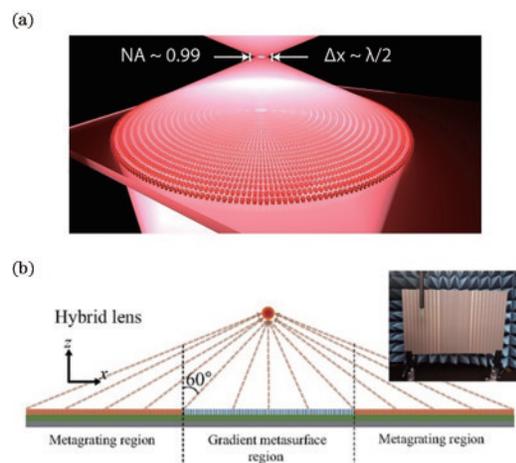


图7 基于异常偏折超构表面的超构透镜。(a)基于异常偏折的大数值孔径超构透镜^[42]; (b)基于异常偏折的混合超构透镜^[40]

Fig. 7 Schematic of metalens based on anomalous deflection metasurfaces. (a) Large numerical aperture metalens based on anomalous deflection^[42]; (b) hybrid metalens based on anomalous deflection^[40]

图 7(b)所示。在中心区域(光束偏折角度小于 60° 的范围内)使用相位梯度型超构表面,而在透镜边缘区域(光束偏折角度大于 60° 的范围内)使用异常偏折超构光栅结构,以此来同时满足高效率和大数值孔径,最终在实验上实现了 48% 的聚焦效率和 0.98 的数值孔径,该混合超构透镜为高效率大数值孔径超构透镜设计提供了新的思路。

3.3 光束分束器

分束指通过折射或反射将入射光分成两束或多束,是许多复杂操作和功能的基础,在干涉仪、光谱仪和通信系统中有着广泛的应用。传统的分束器主要是基于棱镜或波片来实现的,具有体积庞大、分光比固定、功能单一等不足。通过将异常偏折超构表面应用于分束器系统,可以进行特殊设计,使得单元结构给入射光束的波长、偏振、振幅等参量提供完全不同的调制,从而实现功能更复杂、系统更紧凑的分束器件。根据超构表面功能的不同,超构表面分束器可以分为波长分束器、偏振分束器和功率分束器 3 种不同的类型^[110]。

波长分束器指根据入射光的波长不同,将入射光分成沿不同路径传播的两束或多束光束的分束器。2016 年,美国西北大学的研究团队^[90]设计了一种波长选择的超构表面,如图 8(a)所示,其单元结构由梯形谐振器沿不同方向两两组合而成,可以根据入射波长的不同,将可见光分离到完全不同的方向。对于波长为 460 nm、560 nm 和 780 nm 的入射光束,超构表面可

以为 3 个波长的入射光依次提供基本保持不变、呈线性上升趋势和线性下降趋势的相位梯度,从而分别产生 0° 、 -35° 和 55° 的异常偏折,最终实现了有效的波长分束。

偏振分束器指能够根据光的偏振态差异将入射光分成沿不同路径传播的两个独立的正交偏振光束的分束器。2017 年,来自合肥工业大学的研究团队^[91]提出了一种由硅纳米柱阵列组成的介质型超构表面,如图 8(b)所示,实现了对线偏振光的偏振分束。在工作波长 1500 nm 处,精心设计的 8 个纳米柱可以为 x 偏振和 y 偏振的入射光提供两个相反的透射相位梯度,从而将两个正交偏振的入射光分别偏折至两个相反的方向,其总透射效率可达 90%。

功率分束器指根据特定的功率比将入射光分成多个光束的分束器,其中等功率分束器是最常见的一种情况,如果分束器的分光比可以灵活调制,这将极大地拓展分束器在干涉仪、光谱仪等各种仪器中的应用。2018 年,南开大学的研究团队^[92]提出了一种基于铌酸锂(LN)圆柱阵列的、分光比可调的分束器,如图 8(c)所示。该分束器由两行相反排列的圆柱阵列组成,通过调节圆柱的尺寸,超构表面可以为入射光提供两种相反的相位梯度,从而实现等功率分束的效果,进一步地,通过只调节其中一行铌酸锂材料的损耗,便可改变其对应透射光束的效率,最终实现不同分光比的定制。

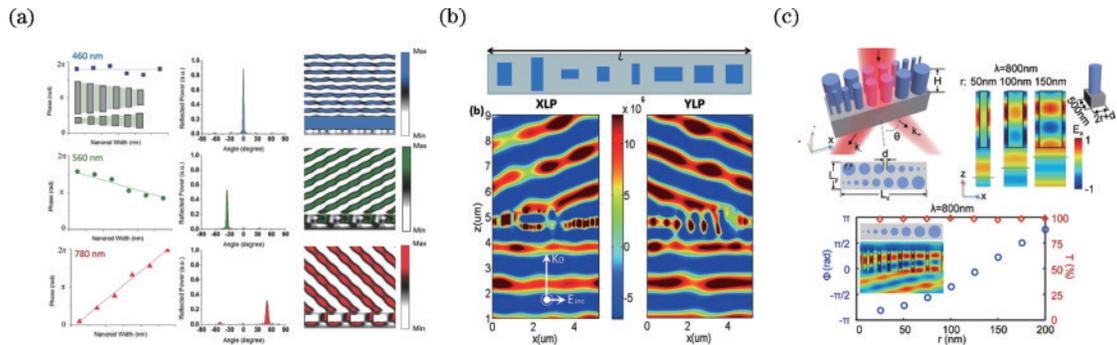


图 8 基于异常偏折超构表面的分束器件。(a)基于异常偏折超构表面的波长分束器^[90]; (b)基于异常偏折超构表面的偏振分束器^[91]; (c)基于异常偏折超构表面的功率分束器^[92]

Fig. 8 Schematic of splitters based on anomalous deflection metasurfaces. (a) Wavelength-dependent beam splitter based on anomalous deflection metasurfaces^[90]; (b) polarization-dependent beam splitter based on anomalous deflection metasurfaces^[91]; (c) power-dependent beam splitter based on anomalous deflection metasurfaces^[92]

3.4 光力操控

光镊技术是一种通过光和颗粒之间的动量交换在颗粒上施加光力并对其进行操控的技术。自 Ashkin 团队的开创性工作^[111]以来,光镊技术被广泛用于物理、化学、生物等多个研究领域。随着近年来纳米光学和微纳加工技术的进步,“超构机器人”受到了广泛的关注^[31]。当超构表面发生异常偏折时,光子在水平方向的动量发生改变,根据动量守恒定律,此时超构表面会受到一个直接作用于超构表面的光力,由于超构表

面小型化和轻量化的特点,会产生可控的运动轨迹。通过进一步地增加超构表面的复杂度,甚至可以实现例如自稳定、旋转等二维甚至三维复杂运动。

2019 年,加州理工学院研究团队^[93]提出了一种基于超构表面的自稳定器件,如图 9(a)所示,通过在衬底上设计具有异常偏折功能的硅谐振器,即使超构表面相对于光轴发生旋转或平移,超构表面仍然可以实现自校正,恢复初始位置,该项技术也有望用于太阳帆的姿态控制。2021 年,查尔莫斯理工大学研究团队^[94]

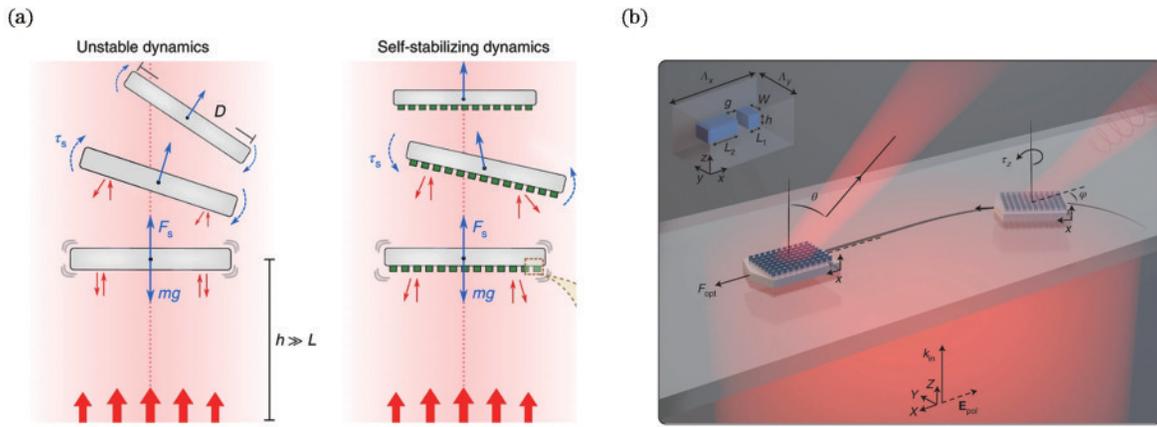


图9 基于异常偏折超构表面的超构机器人。(a)基于异常偏折超构表面的自稳定光学悬浮器件^[93];(b)基于异常偏折超构表面的光驱动微纳小车^[94]

Fig.9 Schematic of meta-robots based on anomalous deflection metasurfaces. (a) Self-stabilizing optical levitation device based on anomalous deflection metasurfaces^[93]; (b) microscopic meta-vehicle powered and steered by embedded anomalous deflection metasurfaces^[94]

提出了基于超构表面的光驱动微纳小车,如图9(b)所示,通过与光之间的动量交换,微纳小车受到光力和光扭矩的作用从而产生位移。通过改变入射光的偏振状态,作者展示了微纳小车在光力作用下实现长距离复杂运动、自校正运动以及小尺寸货物运输的能力,进一步扩展了异常偏折超构表面的功能。然而,这种设计理念下的微纳小车只具备单向移动的能力。为了解决这一问题,2023年,南京大学研究团队^[112]设计了具备反向移动功能的微纳小车,通过选取特殊的单元结构,超构表面对 x 偏振和 y 偏振的入射光产生相反的相位梯度,从而实现相反的运动轨迹,进一步完善了微纳小车的功能。

3.5 微型光谱仪

光谱反映了光波与物质相互作用的丰富信息。每种物质都有其特征吸收、发射或散射光谱。光谱仪将光信号分解成不同波长/频率的成分,利用记录的光强信息可以鉴别物质并确定其化学组成,因此光谱也称为物质“指纹”,在疾病诊断、食品安全等多个领域有着重要的应用前景。在光谱仪系统中引入超构表面替代传统光学元件,有望实现光谱仪的微型化。

2018年,加州理工学院的研究团队^[88-89]介绍了一种新型的光谱成像技术,如图10所示。该光谱仪由4个超构表面组成,利用异常偏折超构表面替代传统光谱仪的色散光栅,由于异常偏折超构表面的偏折角度更大,可以提供更高的光谱分辨率和角度分辨率,最终在近红外波段100 nm带宽内提供1.5 nm的光谱分辨率和 0.075° 的角度分辨率,实现了紧凑、高效、高光谱和高角度分辨率的微型光谱仪。

3.6 VR/AR技术

虚拟现实(VR)和增强现实(AR)是实现虚拟世界、数字物品和人多模式交互的新型技术,被广泛认为

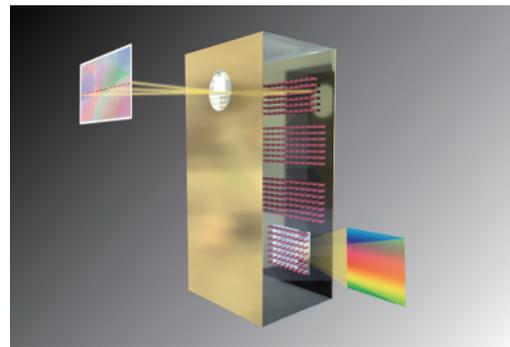


图10 基于异常偏折超构表面的微型光谱仪^[88-89]

Fig.10 Schematic of a spectrometer based on anomalous deflection metasurfaces^[88-89]

是未来的黑科技。近年来,随着VR/AR头戴式显示器市场的迅速崛起,越来越多的应用场景迫切需要能够兼顾高分辨、高亮度和小体积、轻质量的近眼显示光学系统。超构表面凭借强大的电磁波调控能力,正在推进VR/AR设备向着小型化、轻型化的方向发展^[113],利用异常偏折超构表面代替传统光栅元件,能够在保证系统小型化的同时,对光束的振幅、偏振、波长等信息进行更好的调控,提供更好的用户体验。

2021年,美国密歇根大学研究团队^[83]提出了一种由基于Pancharatnam-Berry(PB)相位的偏振复用超构表面光栅波导组成的单色AR显示系统,如图11(a)所示。由于超构表面对左右圆偏振光有相反的相位调制,因此,包含不同图像信息的入射光会沿着相反的方向耦合进波导,最终通过衍射光栅耦出进入人的左右眼,从而产生沉浸式的三维视觉体验。在此基础之上,2022年,加州大学洛杉矶分校的研究团队^[84]提出了基于超构表面光学元件的彩色AR显示系统,如图11(b)所示,通过对不同模式的色散调控,实现了高分辨率全彩AR显示,大大丰富了人们的视觉体验。

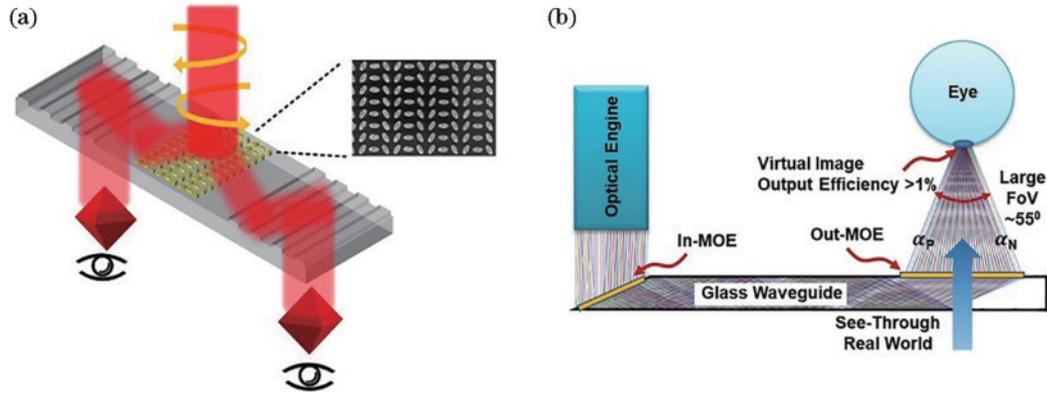


图 11 基于异常偏折超构表面的 AR 系统。(a) 基于偏振复用超构表面光栅波导的立体显示^[83]; (b) 基于超构表面光栅的全彩 AR 波导眼镜^[84]

Fig. 11 Schematic of AR systems based on anomalous deflection metasurfaces. (a) Stereo display based on polarization multiplexed metasurface grating waveguides^[83]; (b) full-color augmented reality waveguide glasses based on metasurface grating^[84]

3.7 集成化光源

随着 3D 感知、自动驾驶、AR/VR、可穿戴设备等人工智能产物逐渐走进我们的生活,高集成、低功耗、高稳定性的光源也变得更加重要。将超构表面与光源器件相结合不仅可以减小系统的集成负担,而且利用超构表面直接对波前进行调控,实现例如光束定向发射、特殊光束等传统光源难以实现的新应用^[114-116]。

2019 年,哈佛大学研究团队^[85]展示了一种紧凑的波长可调的外腔激光器,如图 12(a)所示,超构表面被倾斜放置在激光器的前方,可以将来自激光器的光束分成两束,其中一束光聚焦回到激光器光源上,用于提供腔反馈,而另一束光束则被反射到外腔中,形成激光输出。通过调整超构表面的位置,可以实现出射

波长的选择。2020 年,北京工业大学研究团队^[86]提出了将超构表面与垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 集成的方案,如图 12(b)所示,用于改善激光束的质量和方向性。研究人员设计了具有不同异常偏折角度的超构表面阵列,通过编码选择出射通道,从而控制最终出射激光的偏折角度,实现了 $0^\circ \sim 12^\circ$ 的激光定向发射。除激光光源外,LED 光源是众多微型显示设备的重要组成部分,它的发光强度、效率和发射方向直接决定了微型显示设备的性能。2020 年,南洋理工大学的研究团队^[87]提出了一种将 LED 光源与异常偏折超构表面集成的方案,如图 12(c)所示,该紧凑器件不仅能够以期望角度定向发光,并且可以实现涡旋光束的发射。

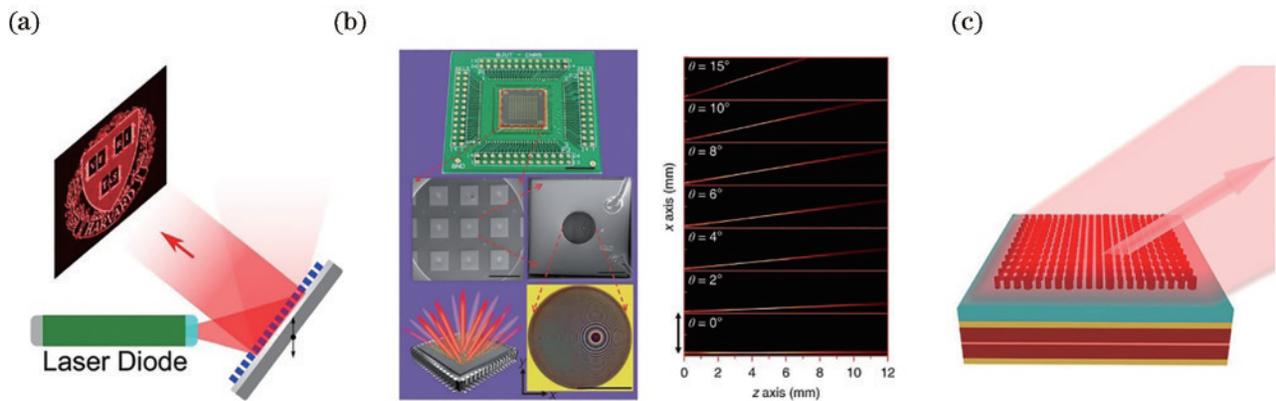


图 12 基于异常偏折超构表面的集成化光源示意图。(a) 基于异常偏折超构表面的外腔激光器^[85]; (b) 基于异常偏折超构表面的 VCSEL 定向发射^[86]; (c) 基于异常偏折超构表面的 LED 定向发射^[87]

Fig. 12 Schematic of integrated light sources based on anomalous deflection metasurfaces. (a) External cavity laser based on anomalous deflection metasurfaces^[85]; (b) VCSEL directional emission based on anomalous deflection metasurfaces^[86]; (c) LED directional emission based on anomalous deflection metasurfaces^[87]

3.8 探测增强

异常偏折超构表面还可以与各类探测器件或系统相结合,提高探测精度。2018 年,德克萨斯大学奥斯汀分校研究团队^[95]将异常反射超构表面与有机光探测器相结合,如图 13(a)所示,通过使光束发生异常偏折,拓

展了光束在有机物内的有效传播路径,从而增加光电探测效率,最终实现了约 2 倍的光电流响应度增强。2019 年,中国科学技术大学研究团队^[44]还将异常偏折超构表面集成到原子力显微镜的探针上,利用异常偏折超构表面代替原本的镜面反射镜,可以将入射角与反射角

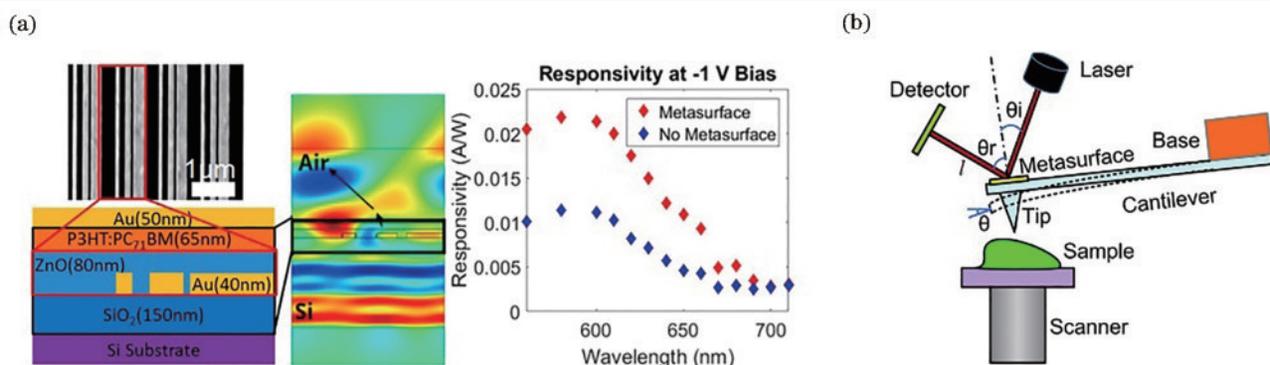


图 13 基于异常偏折超构表面的探测装置。(a)基于异常偏折超构表面的光电探测增强^[95];(b)基于异常偏折超构表面的原子力显微镜探测灵敏度增强^[44]

Fig. 13 Schematic of sensors based on anomalous deflection metasurfaces. (a) Optoelectronic detection enhancement based on anomalous deflection metasurfaces^[95]; (b) enhancement of AFM detection sensitivity based on anomalous deflection metasurfaces^[44]

之间的线性关系变为更敏感的非线性关系,从而放大反射光束的角度变化,最终将探针的灵敏度提高了约 1 倍。

4 总结与展望

超构表面的出现极大地增强了人们对光场的调控能力,迅速成为了近年来光子学研究领域的热点。其中,异常偏折作为众多光场调控手段中最基本的方式之一,受到了广泛的关注。随着人们对光束异常偏折的认识不断加深,梯度相位超构表面、振幅相位协同超构表面被先后提出,最终在光频成功实现了效率高达 99% 的完美异常反射。在异常偏折超构表面发展的同时,诸多基于超构表面异常偏折功能的应用也相继被提出,例如光束扫描系统、超构透镜、光束分束器、超构机器人、微型光谱仪、智能穿戴等,这些应用极有可能在未来对我们的生活产生重要影响。然而,对于基于异常偏折超构表面的应用器件来说,还存在诸多瓶颈问题。

1) 异常偏折超构表面的适用性有待进一步提升。由于异常偏折超构表面器件往往工作于特定的波长范围或特定的角度范围,波长和角度的偏移会导致异常偏折效率急剧下降,影响光学器件的性能,这严重制约了异常偏折超构表面器件的使用场景,因此,如何实现宽带、宽角的异常偏折超构表面是一个重要的研究方向。

2) 异常偏折超构表面的制备工艺有待进一步探索。光频超构表面往往采用电子束曝光工艺得到,单元结构一般只有百纳米的特征尺寸,而实际系统往往需要光学器件的面积达到厘米量级,因此跨尺度精确制造是微纳结构制备的一项重要课题。此外,电子束曝光工艺成本高,时间慢,尽管大面积制造工艺例如高分辨光刻和纳米压印技术的提出为批量制备提供了可能,但是它们的工艺稳定性有待探索,如何实现大批量的生产制造,使超构表面走出实验室还有待解决。

3) 异常偏折超构表面与片上技术的结合有待进一步开发。尽管超构表面具有平面化、易集成的天然优势,但是由于目前片上工艺仍然不成熟,例如对准、低温工艺、电路保护等问题有待解决,超构表面的优势并未完全得以体现。相信未来随着制造工艺的进步,异常偏折超构表面与片上技术的结合将会展现出更多的可能,带来例如片上激光雷达、片上磁光阱、片上光谱仪等前沿应用。

参 考 文 献

- [1] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. Science, 2004, 305(5685): 788-792.
- [2] Menzel C, Rockstuhl C, Paul T, et al. Retrieving effective parameters for metamaterials at oblique incidence[J]. Physical Review B, 2008, 77(19): 195328.
- [3] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index[J]. Nature, 2008, 455(7211): 376-379.
- [4] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801): 977-980.
- [5] Tseng M L, Hsiao H H, Chu C H, et al. Metalenses: advances and applications[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(18): 1800554.
- [6] Genevet P, Capasso F, Aieta F, et al. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces [J]. Optica, 2017, 4(1): 139-152.
- [7] Chen S Q, Li Z C, Liu W W, et al. From single-dimensional to multidimensional manipulation of optical waves with metasurfaces[J]. Advanced Materials, 2019, 31(16): e1802458.
- [8] Chen W T, Capasso F. Will flat optics appear in everyday life anytime soon?[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(10): 100503.
- [9] Luo X G, Pu M B, Guo Y H, et al. Catenary functions meet electromagnetic waves: opportunities and promises

- [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(23): 2001194.
- [10] Wu Y K, Yang W H, Fan Y B, et al. TiO₂ metasurfaces: from visible planar photonics to photochemistry[J]. *Science Advances*, 2019, 5(11): eaax0939.
- [11] Ou K, Wan H Y, Wang G F, et al. Advances in meta-optics and metasurfaces: fundamentals and applications [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(7): 1235.
- [12] Qin J, Jiang S B, Wang Z S, et al. Metasurface micro/nano-optical sensors: principles and applications[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(8): 11598-11618.
- [13] He T, Zhang Z Y, Zhu J Y, et al. Scattering exceptional point in the visible[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 229.
- [14] Feng Z W, Shi T, Geng G Z, et al. Dual-band polarized upconversion photoluminescence enhanced by resonant dielectric metasurfaces[J]. *eLight*, 2023, 3(1): 21.
- [15] Li L L, Zhao H T, Liu C, et al. Intelligent metasurfaces: control, communication and computing[J]. *eLight*, 2022, 2(1): 7.
- [16] Shi T, Wang Y J, Deng Z L, et al. All-dielectric kissing-dimer metagratings for asymmetric high diffraction[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(24): 1901389.
- [17] Chalabi H, Ra'di Y, Sounas D L, et al. Efficient anomalous reflection through near-field interactions in metasurfaces[J]. *Physical Review B*, 2017, 96(7): 075432.
- [18] Nemilentsau A, Low T. Broadband achromatic anomalous mirror in near-IR and visible frequency ranges [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(7): 1646-1652.
- [19] Patri A, Kéna-Cohen S, Caloz C. Large-angle, broadband, and multifunctional directive waveguide scatterer gratings[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(12): 3298-3305.
- [20] Dai Y H, He T, Wei Z, et al. Anomalous reflection with customized high-efficiency bandwidth[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(4): 956-959.
- [21] Zhang Z Y, Liang H G, He T, et al. Photonic spin Hall effect based on broadband high-efficiency reflective metasurfaces[J]. *Applied Optics*, 2019, 59(5): A63-A68.
- [22] 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.
- [23] Li K, Guo Y H, Pu M B, et al. Dispersion controlling meta-lens at visible frequency[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21419-21427.
- [24] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 187.
- [25] Wang Y J, Chen Q M, Yang W H, et al. High-efficiency broadband achromatic metalens for near-IR biological imaging window[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5560.
- [26] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [27] Shen Y, Luo X G. Efficient bending and focusing of light beam with all-dielectric subwavelength structures[J]. *Optics Communications*, 2016, 366: 174-178.
- [28] Xiong B, Xu Y H, Wang J N, et al. Realizing colorful holographic mimicry by metasurfaces[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(21): 2005864.
- [29] 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.
- [30] Feng C, He T, Shi Y Z, et al. Diatomic metasurface for efficient six-channel modulation of Jones matrix[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(8): 2200955.
- [31] Shi Y Z, Song Q H, Toftul I, et al. Optical manipulation with metamaterial structures[J]. *Applied Physics Reviews*, 2022, 9(3): 031303.
- [32] Shi Y Z, Zhu T T, Zhang T H, et al. Chirality-assisted lateral momentum transfer for bidirectional enantioselective separation[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 62.
- [33] Shi Y Z, Xiong S, Zhang Y, et al. Sculpting nanoparticle dynamics for single-bacteria-level screening and direct binding-efficiency measurement[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 815.
- [34] Luo H, Fang X, Li C F, et al. 1 nm-resolution sorting of sub-10 nm nanoparticles using a dielectric metasurface with toroidal responses[J]. *Small Science*, 2023, 3(9): 2300100.
- [35] Zhu Y C, You M M, Shi Y Z, et al. Optofluidic tweezers: efficient and versatile micro/nano-manipulation tools[J]. *Micromachines*, 2023, 14(7): 1326.
- [36] Shen Y, Kim A D, Shahili M, et al. THz time-domain characterization of amplifying quantum-cascade metasurface [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(18): 181108.
- [37] Wu Y, Shen Y, Addamane S, et al. Tunable quantum-cascade VECSEL operating at 1.9 THz[J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 34695-34706.
- [38] Wang Y M, Zhou G Y, Zhang X S, et al. 2D broadband beamsteering with large-scale MEMS optical phased array [J]. *Optica*, 2019, 6(5): 557-562.
- [39] Li Z Y, Kim M H, Wang C, et al. Controlling propagation and coupling of waveguide modes using phase-gradient metasurfaces[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(7): 675-683.
- [40] Kang M, Ra'di Y, Farfan D, et al. Efficient focusing with large numerical aperture using a hybrid metalens[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(4): 044016.
- [41] de Galarreta C R, Alexeev A M, Au Y Y, et al. Nonvolatile reconfigurable phase-change metadevices for beam steering in the near infrared[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(10): 1704993.
- [42] Paniagua-Domínguez R, Yu Y F, Khaidarov E, et al. A metalens with a near-unity numerical aperture[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(3): 2124-2132.
- [43] Ding F, Deshpande R, Meng C, et al. Metasurface-enabled broadband beam splitters integrated with quarter-wave plate functionality[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(26): 14106-14111.

- [44] Yao Z, Xia X C, Hou Y P, et al. Metasurface-enhanced optical lever sensitivity for atomic force microscopy[J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(36): 365501.
- [45] Pors A, Albrektsen O, Radko I P, et al. Gap plasmon-based metasurfaces for total control of reflected light[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2155.
- [46] Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(19): 197401.
- [47] Li Z W, Huang L R, Lu K, et al. Continuous metasurface for high-performance anomalous reflection [J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(11): 112001.
- [48] Ho Y Z, Cheng B H, Hsu W L, et al. Anomalous reflection from metasurfaces with gradient phase distribution below 2π [J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(7): 072502.
- [49] He T, Wei Z Y, Wang Z S, et al. Research progress on anomalous deflection of optical metasurfaces[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(21): 2626-2638.
- [50] Sun S L, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [51] Sell D, Yang J J, Doshay S, et al. Large-angle, multifunctional metagratings based on freeform multimode geometries[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(6): 3752-3757.
- [52] Epstein A, Eleftheriades G V. Synthesis of passive lossless metasurfaces using auxiliary fields for reflectionless beam splitting and perfect reflection[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(25): 256103.
- [53] Wong A M, Eleftheriades G V. Perfect anomalous reflection with a bipartite Huygens' metasurface[J]. *Physical Review X*, 2018, 8(1): 011036.
- [54] Kwon D H, Tretyakov S A. Perfect reflection control for impenetrable surfaces using surface waves of orthogonal polarization[J]. *Physical Review B*, 2017, 96(8): 085438.
- [55] He T, Liu T, Xiao S Y, et al. Perfect anomalous reflectors at optical frequencies[J]. *Science Advances*, 2022, 8(9): eabk3381.
- [56] 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.
- [57] Sun S L, He Q, Xiao S Y, et al. Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426-431.
- [58] Mohammadi Estakhri N, Alù A. Wave-front transformation with gradient metasurfaces[J]. *Physical Review X*, 2016, 6(4): 041008.
- [59] Qin F, Ding L, Zhang L, et al. Hybrid bilayer plasmonic metasurface efficiently manipulates visible light[J]. *Science Advances*, 2016, 2(1): e1501168.
- [60] Gao S, Lee S S, Kim E S, et al. Vertically integrated visible and near-infrared metasurfaces enabling an ultra-broadband and highly angle-resolved anomalous reflection [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(26): 12453-12460.
- [61] Lin D, Fan P, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [62] 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.
- [63] Zhou Z P, Li J T, Su R B, et al. Efficient silicon metasurfaces for visible light[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(3): 544-551.
- [64] 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.
- [65] Sun S, Zhou Z X, Zhang C, et al. All-dielectric meta-reflectarray for efficient control of visible light[J]. *Annalen Der Physik*, 2018, 530(3): 1700418.
- [66] Li Z Y, Palacios E, Butun S, et al. Visible-frequency metasurfaces for broadband anomalous reflection and high-efficiency spectrum splitting[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(3): 1615-1621.
- [67] 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.
- [68] Asadchy V S, Wickberg A, Diaz-Rubio A, et al. Eliminating scattering loss in anomalously reflecting optical metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(5): 1264-1270.
- [69] Fan Z Y, Shcherbakov M R, Allen M, et al. Perfect diffraction with multiresonant bianisotropic metagratings [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(11): 4303-4311.
- [70] Yang J J, Sell D, Fan J A. Freeform metagratings based on complex light scattering dynamics for extreme, high efficiency beam steering[J]. *Annalen Der Physik*, 2018, 530(1): 1700302.
- [71] Sell D, Yang J J, Wang E W, et al. Ultra-high-efficiency anomalous refraction with dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(6): 2402-2407.
- [72] Fan J A. Freeform metasurface design based on topology optimization[J]. *MRS Bulletin*, 2020, 45(3): 196-201.
- [73] Wen F F, Jiang J Q, Fan J A. Robust freeform metasurface design based on progressively growing generative networks[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(8): 2098-2104.
- [74] Yang J J, Fan J A. Topology-optimized metasurfaces: impact of initial geometric layout[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3161-3164.
- [75] Overvig A C, Malek S C, Yu N F. Multifunctional nonlocal metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(1): 017402.
- [76] Huang Y W, Lee H W H, Sokhoyan R, et al. Gate-tunable conducting oxide metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(9): 5319-5325.
- [77] 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.
- [78] Komar A, Paniagua-Domínguez R, Miroshnichenko A, et al. Dynamic beam switching by liquid crystal tunable

- dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1742-1748.
- [79] Li S Q, Xu X W, Veetil R M, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface[J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [80] 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: 3654.
- [81] Holsteen A L, Fatih C A, Brongersma M L. Temporal color mixing and dynamic beam shaping with silicon metasurfaces[J]. *Science*, 2019, 365(6450): 257-260.
- [82] 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.
- [83] Liu Z Y, Zhang C, Zhu W Q, et al. Compact stereo waveguide display based on a unidirectional polarization-multiplexed metagrating In-coupler[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(4): 1112-1119.
- [84] Boo H, Lee Y S, Yang H B, et al. Metasurface wavefront control for high-performance user-natural augmented reality waveguide glasses[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 5832.
- [85] Spägle C, Tamagnone M, Kazakov D, et al. Multifunctional wide-angle optics and lasing based on supercell metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 3787.
- [86] 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.
- [87] Khaidarov E, Liu Z T, Paniagua-Domínguez R, et al. Control of LED emission with functional dielectric metasurfaces[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(1): 1900235.
- [88] Faraji-Dana M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Compact folded metasurface spectrometer[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4196.
- [89] Faraji-Dana M, Arbabi E, Kwon H, et al. Hyperspectral imager with folded metasurface optics[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(8): 2161-2167.
- [90] Li Z Y, Palacios E, Butun S, et al. Ultrawide angle, directional spectrum splitting with visible-frequency versatile metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(6): 953-958.
- [91] Guo Z Y, Zhu L, Shen F, et al. Dielectric metasurface based high-efficiency polarization splitters[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(16): 9872-9879.
- [92] Zhang D, Ren M X, Wu W, et al. Nanoscale beam splitters based on gradient metasurfaces[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 267-270.
- [93] Ilic O, Atwater H A. Self-stabilizing photonic levitation and propulsion of nanostructured macroscopic objects[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(4): 289-295.
- [94] Andrén D, Baranov D G, Jones S, et al. Microscopic metavehicles powered and steered by embedded optical metasurfaces[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(9): 970-974.
- [95] Xu X, Kwon H, Gawlik B, et al. Enhanced photoresponse in metasurface-integrated organic photodetectors[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(6): 3362-3367.
- [96] Kim I, Martins R J, Jang J, et al. Nanophotonics for light detection and ranging technology[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(5): 508-524.
- [97] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [98] Li T, Chen C, Xiao X J, et al. Revolutionary meta-imaging: from superlens to metalens[J]. *Photonics Insights*, 2023, 2(1): R01.
- [99] Arbabi A, Faraon A. Advances in optical metalenses[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(1): 16-25.
- [100] 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.
- [101] Arbabi A, Horie Y, Ball A J, et al. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7069.
- [102] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carmes C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(11): 7229-7234.
- [103] Zhang J, Dun X, Zhu J Y, et al. Large numerical aperture metalens with high modulation transfer function [J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(5): 1389-1396.
- [104] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation [J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [105] Avayu O, Almeida E, Prior Y, et al. Composite functional metasurfaces for multispectral achromatic optics[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14992.
- [106] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 85.
- [107] Chen W T, Zhu A Y, Sisler J, et al. A broadband achromatic polarization-insensitive metalens consisting of anisotropic nanostructures[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 355.
- [108] Ee H S, Agarwal R. Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2818-2823.
- [109] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 812.
- [110] Li J, Ye H, Wu T S, et al. Ultra-broadband large-angle beam splitter based on a homogeneous metasurface at visible wavelengths[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 32226-32238.
- [111] Chu S, Bjorkholm J E, Ashkin A, et al. Experimental observation of optically trapped atoms[J]. *Physical Review Letters*, 1986, 57(3): 314-317.

- [112] Li T Y, Kingsley-Smith J J, Hu Y H, et al. Reversible lateral optical force on phase-gradient metasurfaces for full control of metavehicles[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(2): 255-258.
- [113] 罗栩豪, 董思禹, 王占山, 等. 超表面 VR/AR 显示技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(20): 2011002.
Luo X H, Dong S Y, Wang Z S, et al. Research progress of metasurface-based VR/AR display technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(20): 2011002.
- [114] Ren Y H, Li P S, Liu Z J, et al. Low-threshold nanolasers based on miniaturized bound states in the continuum[J]. *Science Advances*, 2022, 8(51): eade8817.
- [115] Chen B, Wei Y M, Zhao T M, et al. Bright solid-state sources for single photons with orbital angular momentum [J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(3): 302-307.
- [116] Liu S F, Srinivasan K, Liu J. Nanoscale positioning approaches for integrating single solid-state quantum emitters with photonic nanostructures[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(10): 2100223.