

激光与光电子学进展

新型超构表面成像光谱芯片研究进展

王婷婷^{1,2*}, 蔡红星^{1,2**}, 李霜^{1,2}, 任玉^{1,2}, 石晶^{1,2}, 周建伟^{1,2}, 李栋梁^{1,2}, 丁双双^{1,2}, 花扬扬^{1,2}, 曲冠男^{1,2}¹长春理工大学物理学院, 吉林 长春 130022;²长春理工大学吉林省光谱探测科学与技术重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 光谱成像具有良好的多维信息获取能力, 广泛应用于食品安全、医学诊断、环境监测、伪装识别及军事遥感等领域。传统光谱成像系统受到分光器件的限制, 其存在体积大、成本高和集成度低等问题。基于新型超构表面的成像光谱芯片可为传感器小型化、低成本提供有效解决方案。随着光谱分析需求的持续攀升, 加速了超构表面成像光谱芯片的快速发展。本文综述了近年来超构表面成像光谱芯片研究进展。在此基础上, 介绍了本团队最新研究成果, 通过创新设计成像光谱芯片体系架构, 可同时实现高能量利用率、高空间分辨率、高光谱分辨率, 为芯片级光谱成像系统的应用打下良好的基础。最后论述了成像光谱芯片的发展趋势及应用前景, 为实现光谱成像系统小型化提供参考。

关键词 集成光学器件; 成像光谱芯片; 超构表面; 分光器件

中图分类号 O433; TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231244

Research Progress of Novel Metasurface Spectral Imaging Chips

Wang Tingting^{1,2*}, Cai Hongxing^{1,2**}, Li Shuang^{1,2}, Ren Yu^{1,2}, Shi Jing^{1,2}, Zhou Jianwei^{1,2},
Li Dongliang^{1,2}, Ding Shuangshuang^{1,2}, Hua Yangyang^{1,2}, Qu Guannan^{1,2}¹School of physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;²Key laboratory of Jilin Province for Spectral Detection Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract Spectral imaging has been widely used in food safety, medical diagnosis, environmental monitoring, camouflage identification, and military remote sensing because of its excellent multidimensional information acquisition capability. Traditional spectral imaging systems are limited by spectroscopic components, suffering from problems such as large sizes, high costs, and low integration. Novel metasurface-based spectral imaging chips can provide an effective solution for obtaining miniaturized and low-cost sensors. With the continuous increase in demand for spectral analysis, the development of metasurface spectral imaging chips has accelerated. We review the recent research progress of metasurface spectral imaging chips. On this basis, we present the latest research results of our team. Through the innovative design of the imaging spectral chip system architecture, a high energy utilization rate, spatial resolution, and spectral resolution can be achieved simultaneously, providing a solid foundation for the application of chip-level spectral imaging systems. Finally, we discuss the development trend and application prospects of spectral imaging chips, providing a reference for the miniaturization of the spectral imaging system.

Key words integrated optical device; spectral imaging chip; metasurface; spectroscopic device

1 引言

光谱成像技术, 是近些年发展迅速的一种多维信息获取技术。该技术将先进的光谱技术与高速的成像技术相结合, 可同时获取探测目标区域的二维空间信息和一维光谱信息, 具有图谱合一的特点。与传统的

光电成像技术相比, 该技术能够提供更加丰富的目标场景信息, 极大地提高了对目标的探测概率。目前, 基于光谱成像技术的光电探测识别系统已充分发挥了其在民用和军用领域中的重要应用价值。在民用领域, 借助观测卫星、气象卫星、无人机和智能手机等搭载平台, 光谱成像系统可助力于环境监测^[1-2]、精准农业^[3-4]、

收稿日期: 2023-04-08; 修回日期: 2023-04-21; 录用日期: 2023-05-11; 网络首发日期: 2023-05-21

基金项目: 吉林省教育厅项目(JJKH20230795KJ, 2023)

通信作者: *ttwang@cust.edu.cn; **caihx@cust.edu.cn

资源勘探^[5-7]、医学诊断^[8-11]等领域,实现光谱视觉感知和信息分类识别。在军用领域,现代战争依赖于光谱成像技术获取军事情报和夺取信息优势,因此光谱成像技术主要用于星载^[12-13]、机载^[14-15]和舰载^[16]的光电侦察系统,实现侦察感知、伪装识别和效果评估等作战效能。顺应搭载平台小型化和智能化的发展趋势,光谱成像系统逐渐朝向小型化、智能化、集成化和低成本方向发展。

传统的光谱成像系统通常由分立的光学元件和机械部件组成,结构复杂、体积庞大、成本高昂,阻碍了其在更广泛领域的普及。其中,分光元件是限制光谱成像系统小型化发展的主要因素。作为光谱成像系统的核心部件,分光元件决定了系统的整体架构、体积和质量等技术指标^[17]。目前,降低光谱成像系统尺寸的主要方法,通常是利用先进的微纳加工技术实现分光元件的小型化和轻量化^[18]。该技术的进步驱动了科学仪器的变革,在过去 30 年的发展历程中,已经报道了基于各类工作原理和结构设计的小型化光谱成像系统^[19-22]。与其他小型化的光谱成像系统相比,成像光谱芯片具有体积小、重量轻、功耗低、成本低、集成度高和灵活性好等特点。可集成在全球范围内的电子消费产品中,如智能手机、智慧家电和汽车电子等,其具有巨大的应用潜力。因此,实现光谱成像系统的芯片级片上集成已成为顺应信息化和智能化发展的必经之路。

在现有的片上集成解决方案中,新型电磁超构表面为成像光谱系统中分光元件的小型化、轻量化、芯片化和低成本提供有效的技术方案。电磁超构超表面是由亚波长结构单元组成,是一种对光场有高效调控能力的二维人工结构材料^[23-25]。通过材料的选择和微纳结构的设计可以实现光场的多维度调控,从而实现全新的物理现象,并在民用和军用领域中体现其重大的应用价值^[26-27]。近年来,人们不断深入探究其物理机理、设计方案、制备工艺和光学元件的研发,凭借强大的电磁参量分辨能力、光场调制能力以及灵活的定制性,其已经在芯片级光谱成像领域中展现诸多实用化功能^[28]。

然而,分光元件承载了系统采集目标区域光谱特征信息的主要功能,决定了成像系统的探测方式、光谱范围及分辨率等光学性能^[17]。降低分光元件的尺寸,实现片上集成芯片级,需要权衡各类光学性能指标参数以满足特定应用需求。因此,在基于超构表面的成像光谱芯片发展的道路上依然面临诸多挑战,这已成为当前国内外研究机构迫切需要解决的难题。

本文依据不同的工作原理,对基于新型超构表面的成像光谱芯片的研究进展进行综述,并对其发展脉络及应用现状进行归纳。从实用化的角度出发,介绍本研究团队的最新研究成果。最后,总结成像光谱芯片目前存在的关键技术问题和未来的发展趋势。

2 基于超构表面的相位调控机理

基于广义斯涅耳定律的超构表面是哈佛大学 Capasso 等^[29]于 2011 年提出的,作为超材料的二维形式,可在二维平面内周期性的排列亚波长单元结构来实现复杂的光场调控,从而形成平面光学元件,为先进光子器件的集成化与芯片化发展提供新思路。在基于超构表面的成像光谱芯片设计过程中,需要通过调控光学自由度实现光谱响应。结构设计的复杂多样性导致了丰富的光学特性。其中,金属超构表面中等离激元激发需要满足特定的波矢匹配条件,因此通过合理设计单元结构的结构参数可以改变其相位分布,从而实现光谱曲线的按需调控。在超构表面近 12 年的发展历程中,逐渐形成了不同的相位调控机理,包括传输相位和几何相位^[30]。对这两种类型的相位调控机理进行阐述。

2.1 传输相位

传输相位型超构表面,通过调节入射光波在传输过程中产生的光程差以实现相位调制。依据电磁波传输理论,当波长为 λ 的电磁波在等效折射率为 n 的介质中传输一定距离 d 后,其累积的传输相位^[31]可表示为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} nd. \quad (1)$$

由式(1)可知,为了得到入射光波经过光学器件后的按需相位变化,可以通过改变光学元件的厚度 d 或介质材料的折射率 n 来调节电磁波的波前。传统光学元件通常采用具有厚度差的曲面型设计来引入相位差。而多数光学元件的折射率 n 值并不高,需要利用较大的厚度 d 实现足够的相位差。因此,传统光学元件不利于实现成像光谱系统的小型化和轻量化设计。为了确保成像光谱系统能够实现芯片级,传输相位型超构表面可以通过利用高折射率介质或调节局域光场,达到调节材料的等效折射率 n 的目的,进而保证足够小的器件厚度。目前,用于调制传输相位的主要方法有两种:基于介质的等效折射率理论和基于表面等离激元波导理论。基于介质的等效折射率理论主要是采用较高折射率的介质,调节不同介质的比例及单元结构的占空比,从而实现等效折射率的定量设计,进而对电磁波在整个传输过程中产生的相位进行调制^[32-33]。基于表面等离激元波导理论主要是针对金属-介质-金属波导模型,其基本原理为利用表面等离激元波导中传播常数随夹层中介质层厚度的变化特性,来实现等效折射率的控制^[34-36]。

2.2 几何相位

几何相位现象最早可追溯至 1956 年,印度 Pancharatnam^[37]研究了两束不同极化态光的相位差。1984 年,经英国 Berry^[38]进一步地深入探索和研究推导,首次提出几何相位的概念,成为量子力学的基础性重大突破。Berry 研究发现,量子系统的某些参量在经

过一个周期的演变后,最终态与初始态并不等效,需要增加一个附加的相位因子。该相位因子与系统变化路程无关,只与系统变化的几何路径有关,因此定义其为几何相位,又称之为 Pancharatnam-Berry 相位。

当电磁波在超构表面中传输时,可利用琼斯矩阵来描述几何相位的产生,其基本表达式^[31,39]为

$$\begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} = J_{\epsilon} \begin{bmatrix} E_{xin} \\ E_{yin} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: E_{xin} 和 E_{yin} 为入射电磁波的 x 偏振分量和 y 偏振分量; E_{xout} 和 E_{yout} 为出射电磁波的 x 偏振分量和 y 偏振分量; J_{ϵ} 为一个 2×2 的琼斯矩阵, J_{ϵ} 可表示为

$$J_{\epsilon} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: ϵ 为单元结构的旋向角。对各向异性的超构表面而言,为便于计算,假定一个新的局域坐标系,其主轴方向分别为 u 和 v 。其中, u 轴和 x 轴的夹角为 ϵ , v 轴和 y 轴的夹角为 ϵ 。单元结构的局域坐标系如图 1 所示。

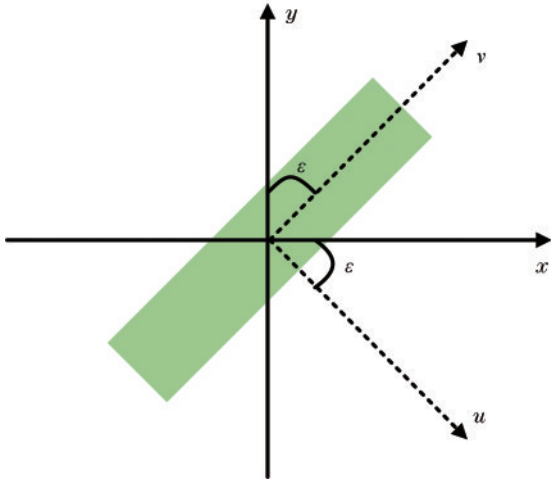


图 1 单元结构的局域坐标系

Fig. 1 Localized coordinate system for unit structure

假设局域坐标系的两个主轴方向的透射复振幅分别为 t_u 和 t_v , 利用琼斯矩阵理论可以将几何相位型超构表面^[31,40]表示为

$$J_{\epsilon} = \begin{bmatrix} t_u \cos^2 \epsilon + t_v \sin^2 \epsilon & (t_u - t_v) \sin \epsilon \cos \epsilon \\ (t_u - t_v) \sin \epsilon \cos \epsilon & t_u \sin^2 \epsilon + t_v \cos^2 \epsilon \end{bmatrix}. \quad (4)$$

当入射电磁波的偏振态为线性偏振时, x 偏振和 y 偏振对应的输出电磁波表达式分别为

$$\begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} = J_{\epsilon} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_u \cos^2 \epsilon + t_v \sin^2 \epsilon \\ (t_u - t_v) \sin \epsilon \cos \epsilon \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} = J_{\epsilon} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (t_u - t_v) \sin \epsilon \cos \epsilon \\ t_u \sin^2 \epsilon + t_v \cos^2 \epsilon \end{bmatrix}, \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可知,无论 x 偏振或 y 偏振,经过几何相位型超构表面后,输出的电磁波包含共极化分量,还包括交叉极化分量,对应的振幅为 $(t_u - t_v) \sin \epsilon \cos \epsilon$ 。

当入射电磁波的偏振态为圆偏振时,输出的电磁波表达式为

$$\begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} = \frac{J_{\epsilon}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left((t_u + t_v) \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} + (t_u - t_v) \exp(2i\sigma\epsilon) \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix} \right), \quad (7)$$

式中: $\sigma = \pm 1, 1, -1$ 分别为右旋圆偏振态和左旋圆偏振态; i 为虚数。输出电磁波包含复振幅为 $(t_u + t_v)/2\sqrt{2}$ 的共极化分量,还产生了复振幅为 $[(t_u - t_v) \exp(2i\sigma\epsilon)]/2\sqrt{2}$ 的交叉极化分量。并且交叉极化分量携带了 $2\sigma\epsilon$ 的附加几何相位,其几何相位值为主轴夹角 ϵ 的 2 倍。可见,对几何相位型超构表面而言,通过改变单元结构的旋向角,可以实现 $0 \sim 2\pi$ 的相位值分布。

3 基于超构表面的成像光谱芯片

超构表面以其平面化和集成化的巨大优势,克服了传统分光技术中常用分立元件的尺寸限制,在成像光谱系统中极具吸引力。然而,要想更好地挖掘出基于超构表面成像光谱芯片的更大潜力,需要结合多种不同功能的超构表面,发挥出超构表面平面化和集成化的优势,还能实现高质量的成像性能和成像效果^[41-42]。下面将以分光原理为主线,对基于超构表面成像光谱芯片的研究进行综述。

3.1 色散型成像光谱芯片

色散型成像光谱系统,以棱镜和光栅最为常见^[43-44]。但在芯片化的设计方案中,波导光栅结构成为大体积棱镜的完美替代品。随着微纳制造加工技术的快速发展,形成了一系列的色散解决方案,其中包括阵列波导光栅^[45]、刻蚀衍射光栅^[46]以及超构表面^[47]等。2018年,美国加州理工学院 Kavli 纳米科学研究所 Faraon 教授,通过引入折叠超构表面光学的概念,设计了一款芯片级的近红外光谱仪,并发表于《Nat. Commun.》期刊^[48]。在系统中,色散和聚焦光学元件被放置于一侧玻璃基板上的超构表面代替,在两侧反射镜的作用下,使光线在基板内部传输,缩小了系统的尺寸,实现了 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 的小体积设计。该光谱仪的分辨率约为 1.2 nm ,工作谱段覆盖 $760 \sim 860 \text{ nm}$ 。基于图 2(a)的结构设计,通过改进器件的角响应,于 2019 年设计出一台线扫式高光谱成像仪^[49],光谱范围为 $750 \sim 850 \text{ nm}$,光谱分辨率和角分辨率分别约为 1.5 nm 和 0.075° ,如图 2(b)所示。系统总体积为 8.5 mm^3 ,该系统具备了片上集成芯片级的分光能力。然而,基于波导光栅的成像光谱芯片,其分辨率依赖于系统所提供的允许光线传输的光程长度如图 2(c)所示。因此,高分辨能力与系统的小型化设计依然存在着相互制约的关系,限制了其在极端小型化的应用。

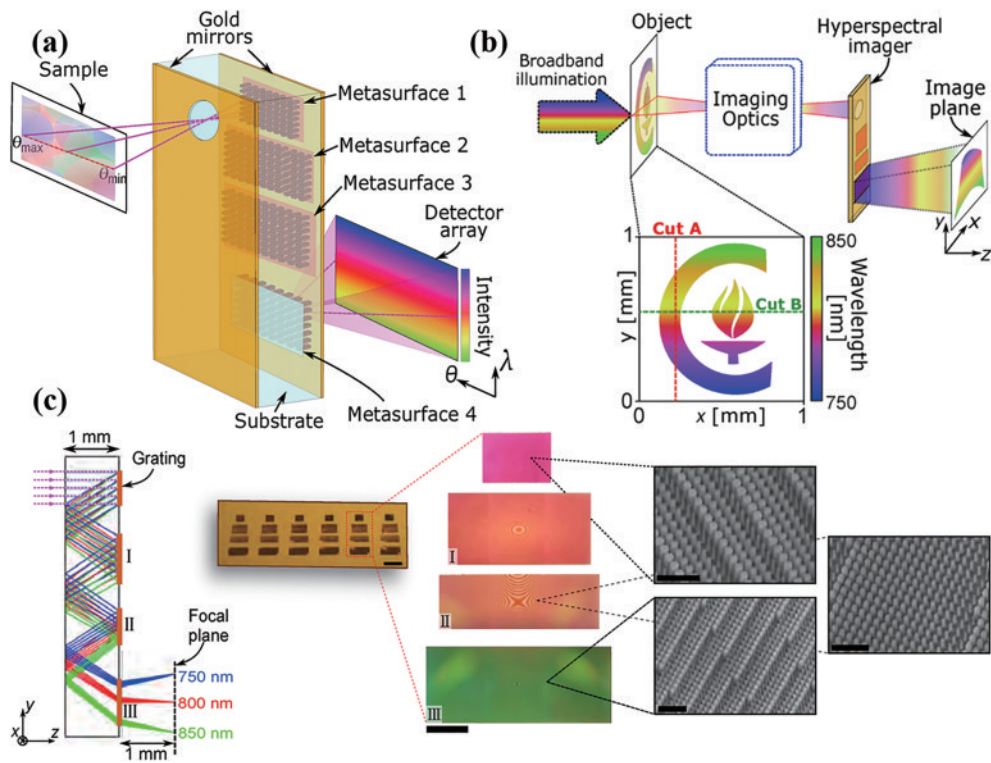


图 2 基于折叠超构表面的高光谱成像仪^[49]。(a)设计方案;(b)光谱成像系统;(c)光线传输及器件制备

Fig. 2 Folded metasurface-based imager^[49]. (a) Design scheme; (b) spectral imaging system; (c) light transmission and device fabrication

3.2 窄带滤波型成像光谱芯片

基于超构表面的窄带滤波型成像光谱芯片,可以选择性地传输特定波长的光,其光谱分辨率受到光谱通道数量的限制。其与色散型成像光谱芯片在结构设计和系统集成方面相比更具有优势,规避了光程长度对分辨率的限制,实现了滤波结构与探测器的集成。2018年,美国普渡大学 Kildishev^[50]设计了一种基于超构表面的纳米腔结构,如图 3(a)所示。该结构借助了法布里-珀罗(FP)干涉原理,如图 3(b)所示。该结构由两个厚度为 15 nm 的银镜组成 FP 光学腔,并在腔内嵌入了厚度为 22 nm,周期为 150 nm 的银超构表面光栅,且超构表面与下表面银镜被厚度为 40 nm 的氧化

铝间隔层分开。由 FP 干涉原理可知,通过改变腔的厚度和腔内介质的折射率,可以实现不同波段中心波长的可控调谐。而在此基础上,超构表面提供了更多的可调制自由度,从而能够实现多波段滤波和彩色成像,如图 3(c)所示。同年,瑞士联邦理工学院 Altug^[51]开发了基于超构表面纳米光子的中红外成像系统,并将其应用于物质的化学鉴定和成分分析,如图 4 所示。片上设计的电介质超构表面结构的每个共振都被调谐到离散的频率上,使分子吸收特征可以在多个光谱点被读出。实现了对生物、聚合物以及杀虫剂分子的精准监测,展示了超构表面在生物传感和环境监测等领域中的应用潜力。

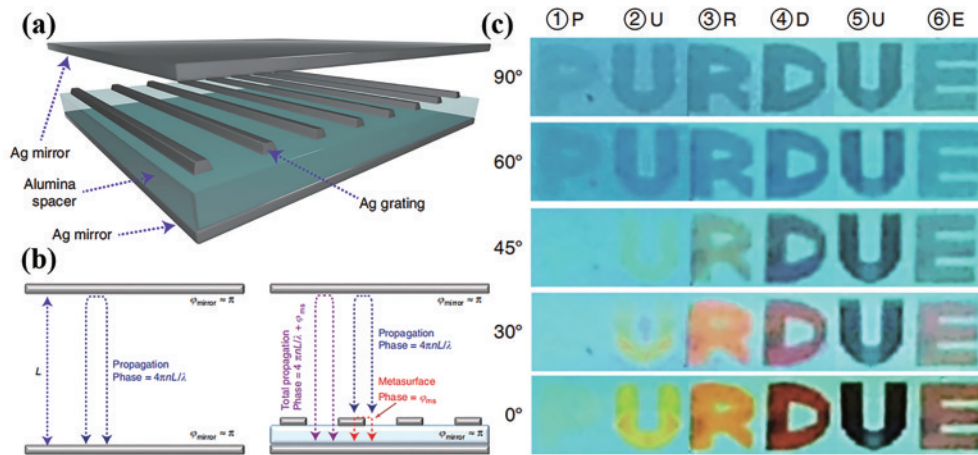


图 3 基于嵌入式超构表面的纳米腔^[50]。(a)结构设计;(b)原理对比;(c)成像效果

Fig. 3 Metasurface-based nanocavity^[50]. (a) Structural design; (b) principle comparison; (c) imaging effect

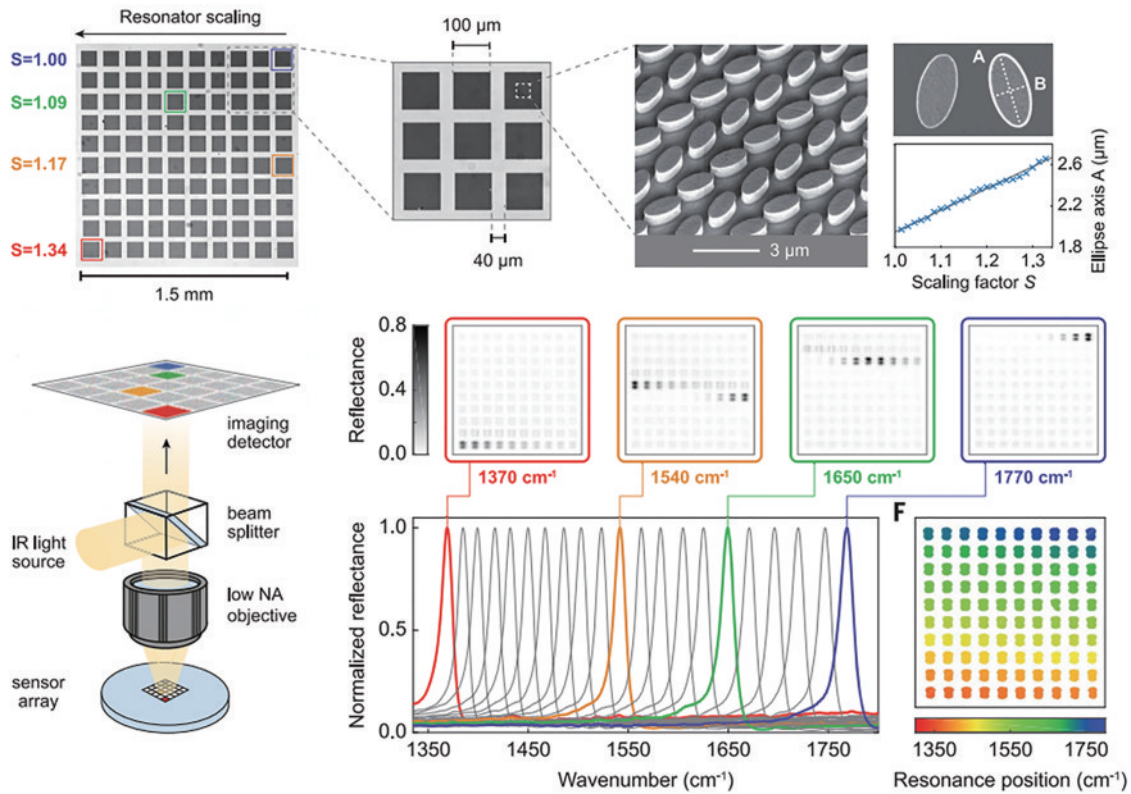


图 4 像素化超构表面^[51]

Fig. 4 Pixelated metasurfaces^[51]

3.3 计算重构型成像光谱芯片

计算重构型成像光谱芯片,利用高速的计算技术部分替代物理分光元件的工作负荷,进一步缩小成像系统的体积和重量,这已成为未来片上集成芯片级成像光谱系统发展的主要趋势。

2019年,美国威斯康星大学麦迪逊分校 Yu 等^[52]提出了一种基于光子晶体平板的随机光谱仪。将不同周期、晶格常数和孔尺寸的光子晶体平板集成在 CMOS

成像传感器表面,实现了光谱的探测和成像光谱系统的构建。所设计的 6×6 光子晶体结构的光学图像,以及 3 张选定的光子晶体平板结构的电镜图像,如图 5(a) 所示。该滤波结构的工作光谱范围为 $550 \sim 750 \text{ nm}$,光谱分辨率为 1 nm 。整个滤波器尺寸为 $210 \mu\text{m} \times 210 \mu\text{m}$,体积较小,实现了片上集成芯片化的设计。构建的简易光谱成像系统成功获取目标的光谱信息,验证了光子晶体平板滤波器的光谱成像能力,如图 5(b) 所示。

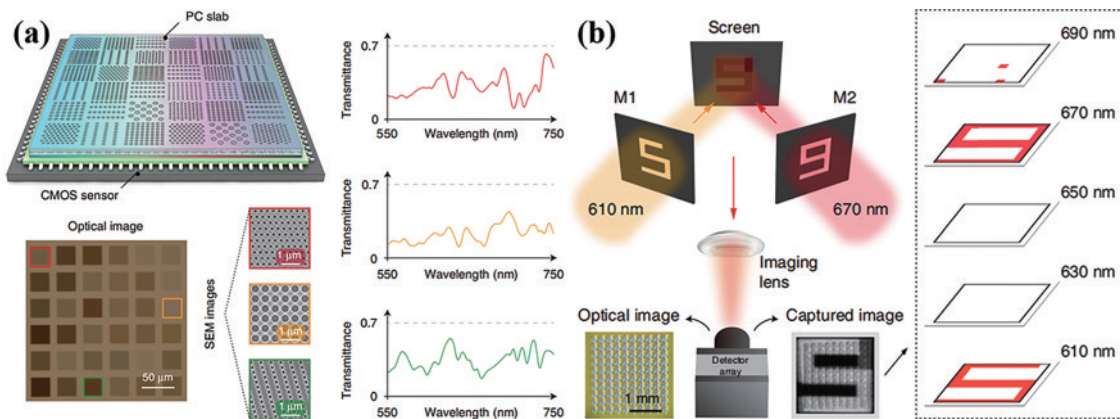


图 5 基于光子晶体平板的计算重构型成像光谱芯片^[52]。(a) 芯片级光谱仪的示意图和光学图像以及滤波结构的透射光谱; (b) 高光谱成像的验证结果及重构数据立方体的空间图

Fig. 5 Photonic crystal slab-based computationally reconstructive imaging spectroscopy chip^[52]. (a) Schematic and optical images of the chip-scale spectrometer and transmission spectra of the filtered structures; (b) verification results of hyperspectral imaging and spatial maps of the reconstructed data cubes

2022年,清华大学 Cui 等^[53]采用超构表面研制出国际上首款实时超光谱成像芯片,相关研究成果发表在《Optica》上。通过超构表面实现对入射光在频谱域的调制,利用 CMOS 图像传感器完成从频谱域到电域的映射测量,再利用压缩感知算法进行光谱的计算重构,并通过超构表面的大规模阵列集成,最终实现实时光谱成像,如图 6 所示。该款实时超光谱成像芯片将单点光谱仪的尺寸缩小到百微米以下,空间分辨率超过 15 万光谱像素,可快速获得每个像素点的光谱,工作波段为 450~750 nm,光谱分辨率为 0.8 nm。该团

队进一步研制出基于自由形状超原子的超构表面光谱成像芯片,突破了传统规则形状的超构表面设计限制,取得了更优异的光谱成像性能,如图 7 所示^[54]。对窄带光谱和宽带光谱分别进行重构,结果表明,该超光谱成像芯片能够实现保真度 99% 以上的宽谱光计算重构以及 0.5 nm 的波长分辨率。该项研究进一步提升了超构表面光谱成像芯片的性能,研究成果发表于《Laser & Photonics Reviews》,推动了未来光谱成像芯片的发展及其在实时传感领域的应用。

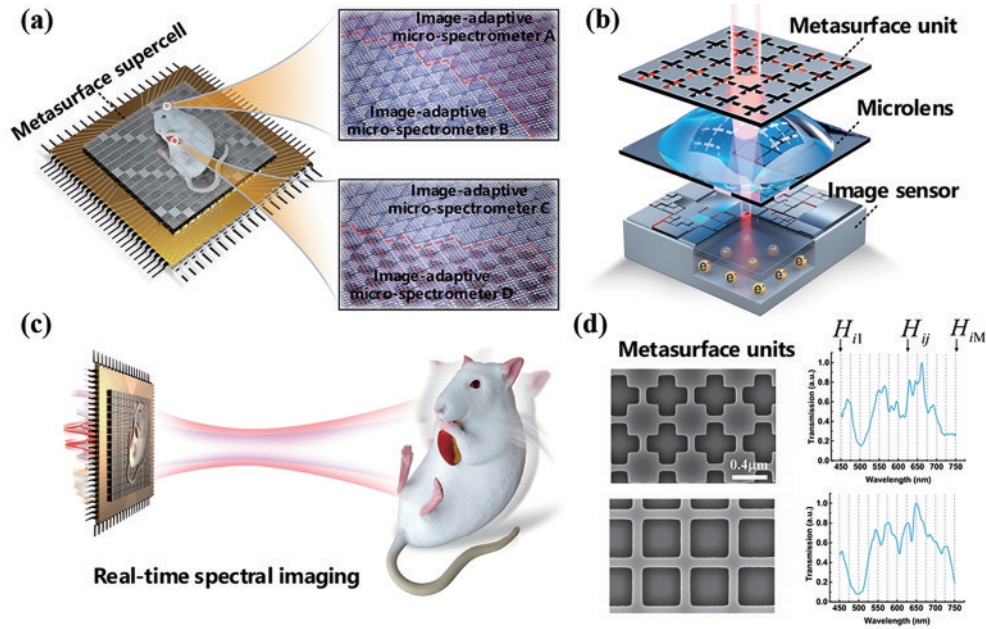


图 6 基于超构表面的超光谱成像芯片^[53]
Fig. 6 Metasurface-based hyperspectral imaging chip^[53]

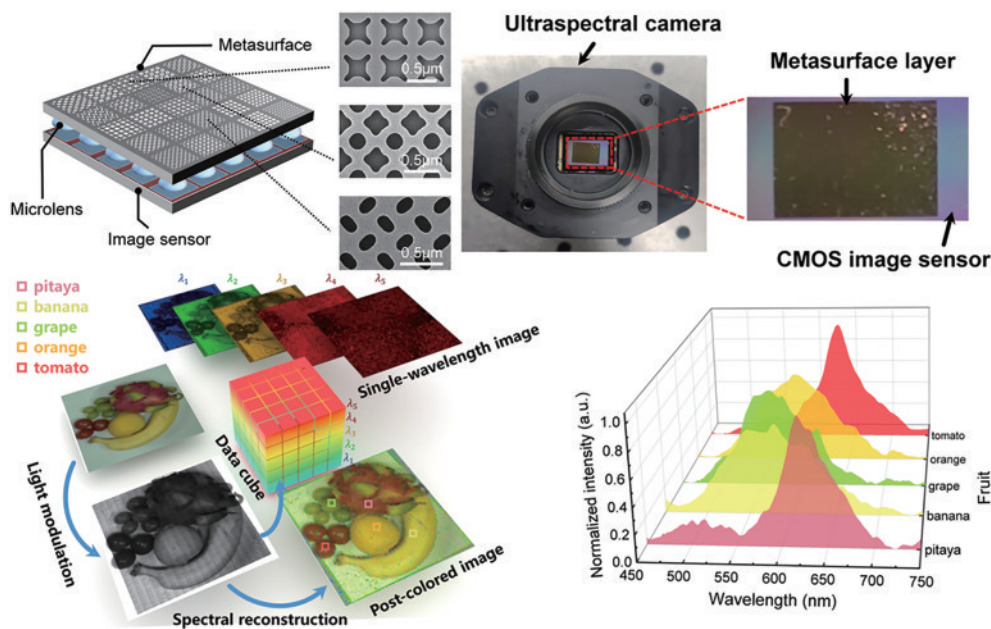


图 7 基于自由形状超原子的超表面光谱成像芯片^[54]
Fig. 7 Freeform shaped meta-atoms-based metasurface spectroscopy imaging chip^[54]

近年来,本团队针对目前成像光谱芯片存在能量利用率低、空间分辨率下降大、成本高、工艺复杂等问题。设计新型的超构表面,基于计算重构光谱学原理,成功研制了成像光谱芯片。将超构表面微纳结构与 CMOS 图像传感器相结合,研制了与现有 CMOS 的光刻生产相兼容的生产工艺,实现了成像光谱芯片的量产。在结构设计阶段,通过选取微纳结构材料、优化微纳结构、选择探测器类型以及设计像素分布方式等研究工作,实现可定制的成像光谱芯片性能参数。本团

队优化设计了 I 型金属超构表面结构,如图 8(a)所示,整体具有能量利用率高、空间分辨率高、光谱分辨率高的优点,其芯片结构如图 8(b)所示。在工艺制备阶段,采用聚焦离子束刻蚀工艺,并引入多层套刻技术,针对每层光谱调制材料不同的特性,对其掩模特性、刻蚀特性以及玻璃基片表面的附着特性进行工艺设计。最后,在显微镜下通过人工操作的方式实现该结构与探测器焦平面的像素级对准贴合,尺寸 $< 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$,该结构具有体积小、成本低的优点。

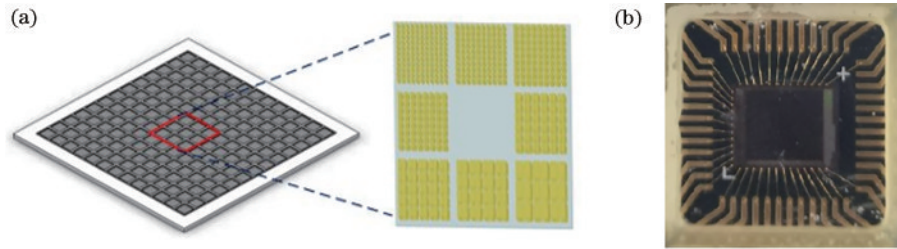


图 8 基于超构表面计算重构技术的成像光谱芯片。(a) I 型金属超构表面结构;(b) 芯片结构

Fig. 8 Imaging spectral chip based on metasurface computational reconstruction technology. (a) Structure of I-type metal metasurface; (b) chip structure

本团队研制了多光谱相机,波段范围为 $350 \sim 950 \text{ nm}$,像素尺寸为 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$,空间分辨率为

640×480 ,其在暗光条件下的成像效果与相同衬底的 RGB 芯片比较如图 9 所示。

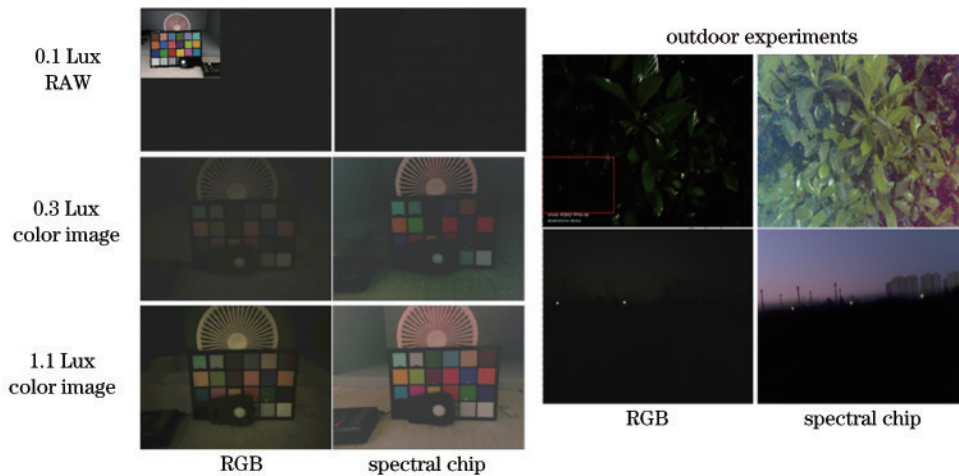


图 9 暗光成像效果比较

Fig. 9 Comparison of low-light imaging effects

4 总结和展望

以分光技术为主线,介绍了基于不同分光原理的超构表面成像光谱芯片的研究进展。近几年,超构表面的研究在理论建模和微纳制造方面都取得了重大进展。超构表面可在亚波长尺度内实现对光场的灵活调控,且兼具传统光学元件无法比拟的平面化和低损耗的优点,超构表面为解决成像光谱系统的集成化、芯片化设计提供了有效的技术途径。尽管现有基于超构表面的成像光谱芯片已在多个领域中发挥巨大作用,但在芯片级的成像光谱系统中,同时实现系统的高能量

利用率、高空间分辨率、高光谱分辨率依然存在着巨大的挑战。

综上所述,色散型和窄带滤波型,实质上是按比例缩小传统的光谱系统,各自存在着局限性。色散型超构表面光谱成像系统具有复杂的光路设计和庞大的元件体积,在片上集成芯片级的结构设计中,可靠性并不高。色散型成像光谱系统的光谱分辨率严重依赖光程长度,阻碍其进一步实现小型化。在众多的芯片化解决方案中,应用较多的是窄带滤波型技术。窄带滤波型的光谱分辨率可通过工作带宽下滤波通道的数量来衡量。在一定工作带宽下,滤波通道数量越多,光谱分

分辨率越高。然而,滤波型超构表面光谱成像技术更适用于低光谱分辨率的成像探测系统。获取单一光谱信息需要一个窄带滤波结构以形成光谱滤波通道。然而应对高分辨率需求时,成像系统必须使用带宽更窄和数量更多的滤波结构,这使得系统难以实现小型化,因此同时获取高空间分辨率和高光谱分辨率是存在矛盾的。此外,窄带滤波结构仅能够接收中心波长的光,增加滤波结构的数量也会极大地降低系统的光能量利用率,从而导致信噪比降低,成像效果难以满足实际需求。

随着计算机科学技术的飞速发展,计算机算法和光学领域的交叉融合得到了深入的探索,光学算法的发展降低了光谱成像系统对硬件的需求,并使其成像性能得到了极大的提升。近年来,将超构表面与压缩感知算法相结合的计算重构型光谱成像探测系统被广泛研究,该系统利用超构表面的宽带滤波特性可对光谱信号进行采集。具有不同的宽带光谱响应特性的滤波结构,可以接收更宽范围的光谱信号,从而提升光能量利用率,有效提高系统的信噪比。在现有基于超构表面的光谱成像系统中,超构表面的透射光谱响应被用作压缩感知过程的测量矩阵。然而,测量矩阵一般为随机矩阵,因此对超构表面的设计通常采用“大量生产—随机挑选”的方法,该方法无法保证光谱重构的保真度。此外,宽带滤波的设计会加宽透射光谱,极易导致波段之间彼此混叠,产生严重的图像串扰,成像色差大,无法满足实际的应用需求。

因此,在未来超构表面成像光谱芯片的发展上,将面临新的考验,要实现光谱成像系统的小型化、芯片化、集成化、低成本,还要综合评估芯片级成像光谱系统的性能,使其达到高能量利用率、高空间分辨、高光谱分辨率的性能指标要求,向标准化和通用化方向迈进。未来,超构表面成像光谱芯片将有望真正进入掌上时代,深度融入日常生活,在食品安全、移动健康等方面展现出其独特的魅力。更有望为尖端装备装上“中国芯”,实现装备的小型化和轻量化。

参 考 文 献

- [1] Kacic P, Kuenzer C. Forest biodiversity monitoring based on remotely sensed spectral diversity: a review[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5363.
- [2] Flynn C, Stoian R I, Weers B D, et al. Ruggedized, field-ready snapshot light-guide-based imaging spectrometer for environmental and remote sensing applications[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 10614-10632.
- [3] Lu B, Dao P D, Liu J G, et al. Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(16): 2659.
- [4] Wei L F, Wang K, Lu Q K, et al. Crops fine classification in airborne hyperspectral imagery based on multi-feature fusion and deep learning[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(15): 2917.
- [5] Huang S A, Chen S B, Wang D M, et al. Hydrocarbon micro-seepage detection from airborne hyper-spectral images by plant stress spectra based on the PROSPECT model[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 74: 180-190.
- [6] Zhong Y F, Wang X Y, Wang S Y, et al. Advances in spaceborne hyperspectral remote sensing in China[J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2021, 24(1): 95-120.
- [7] Koerting F, Koellner N, Kuras A, et al. A solar optical hyperspectral library of rare-earth-bearing minerals, rare-earth oxide powders, copper-bearing minerals and Apliki mine surface samples[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3): 923-942.
- [8] Clancy N T, Jones G, Maier-Hein L, et al. Surgical spectral imaging[J]. *Medical Image Analysis*, 2020, 63: 101699.
- [9] Ding H, Chen C, Zhao H C, et al. Smartphone based multispectral imager and its potential for point-of-care testing[J]. *The Analyst*, 2019, 144(14): 4380-4385.
- [10] Kim S, Kim J, Hwang M, et al. Smartphone-based multispectral imaging and machine-learning based analysis for discrimination between seborrheic dermatitis and psoriasis on the scalp[J]. *Biomedical Optics Express*, 2019, 10(2): 879-891.
- [11] 陈健伟, 龚辉, 袁菁. 多光谱成像技术及其在生物医学中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(4): 0400001.
- [12] 谢东津, 吕呈龙, 祖梅, 等. 绿色植被可见-近红外反射光谱模拟材料研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(4): 1032-1038.
- [13] 王建宇, 李春来, 姬弘楨, 等. 热红外高光谱成像技术的研究现状与展望[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(1): 51-59.
- [14] Wang J Y, Li C L, Ji H Z, et al. Status and prospect of thermal infrared hyperspectral imaging technology[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(1): 51-59.
- [15] Sun H B, Wang Z, Chen Y W, et al. Preliminary verification of hyperspectral LiDAR covering VIS-NIR-SWIR used for objects classification[J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2022, 55(1): 291-303.
- [16] 龚威, 史硕, 陈博文, 等. 机载高光谱激光雷达成像技术发展与应用[J]. *光学学报*, 2022, 42(12): 1200002.
- [17] Gong W, Shi S, Chen B W, et al. Development and application of airborne hyperspectral LiDAR imaging technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(12): 1200002.
- [18] Huot M, Dalglish F, Rehm E, et al. Underwater multispectral laser serial imager for spectral differentiation of macroalgal and coral substrates[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3105.

- [17] 周奎, 单政, 张倩, 等. MEMS 法布里-珀罗滤波芯片及其光谱探测应用研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0800001.
Zhou K, Shan Z, Zhang Q, et al. Research progresses of MEMS Fabry-Perot filtering chips and their applications for spectral detection[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0800001.
- [18] Lee K J, Ko Y H, Gupta N, et al. Unpolarized resonant Notch filters for the 8 - 12 μm spectral region[J]. Optics Letters, 2020, 45(16): 4452-4455.
- [19] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cai W W, et al. Miniaturization of optical spectrometers[J]. Science, 2021, 371(6528): eabe0722.
- [20] 赵永强, 刘芯羽, 汤超龙. 光谱滤光片阵列进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 190004.
Zhao Y Q, Liu X Y, Tang C L. Progress in spectral filter arrays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 190004.
- [21] 王伟平, 金里. 芯片级硅基光谱仪研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 333-342.
Wang W P, Jin L. Research progress of on-chip spectrometer based on the silicon photonics platform[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(2): 333-342.
- [22] 王飞, 余晓畅, 罗青伶, 等. 片上光谱成像系统研究进展及应用综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 2000002.
Wang F, Yu X C, Luo Q L, et al. Research progress and applications of spectral imaging system on chip[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 2000002.
- [23] Kim J, Rana A S, Kim Y, et al. Chiroptical metasurfaces: principles, classification, and applications [J]. Sensors, 2021, 21(13): 4381.
- [24] Akram M R, Ding G W, Chen K, et al. Ultrathin single layer metasurfaces with ultra-wideband operation for both transmission and reflection[J]. Advanced Materials, 2020, 32(12): 1907308.
- [25] Tsilipakos O, Tasolamprou A C, Ptilakis A, et al. Toward intelligent metasurfaces: the progress from globally tunable metasurfaces to software-defined metasurfaces with an embedded network of controllers [J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(17): 2000783.
- [26] 周毅, 梁高峰, 温中泉, 等. 光学超分辨平面超构透镜研究进展[J]. 光电工程, 2021, 48(12): 210399.
Zhou Y, Liang G F, Wen Z Q, et al. Recent research progress in optical super-resolution planar meta-lenses[J]. Opto-Electronic Engineering, 2021, 48(12): 210399.
- [27] 朱效舒, 刘俊, 贺涓子, 等. 超构表面在量子光学中的研究与应用[J]. 光学学报, 2022, 42(3): 0327006.
Zhu X S, Liu J, He J Z, et al. Research and application of metasurfaces in quantum optics[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(3): 0327006.
- [28] 倪一博, 闻顺, 沈子程, 等. 基于超构表面的多维光场感知[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1918003.
Ni Y B, Wen S, Shen Z C, et al. Multidimensional light field sensing based on metasurfaces[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1918003.
- [29] 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.
- [30] 刘梦蛟, 李添悦, 戈钦, 等. 多功能超构表面的相位调控机制及研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(21): 2126004.
Liu M J, Li T Y, Ge Q, et al. Phase control mechanism and research progress of multifunctional superstructure surface[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(21): 2126004.
- [31] 李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. 光电工程, 2017, 44(3): 255-275, 376.
Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(3): 255-275, 376.
- [32] Li X T, Li Y, Li C, et al. High color saturation and angle-insensitive ultrathin color filter based on effective medium theory[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(3): 033602.
- [33] Zhang R Z, Zhang R, Wang Z B, et al. Liquid refractive index sensor based on terahertz metamaterials[J]. Plasmonics, 2022, 17(2): 457-465.
- [34] Zhao L M, Zhou Y S. Tunable multichannel photonic spin hall effect in metal-dielectric-metal waveguide[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 14138.
- [35] Bauer C, Giessen H. Tailoring the plasmonic Fano resonance in metallic photonic crystals[J]. Nanophotonics, 2020, 9(2): 523-531.
- [36] Dong Y L, Bandaru P R. Interaction and hybridization of orthogonal Fabry-Pérot like surface plasmon modes in metal-dielectric grating structures[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 3541-3551.
- [37] Pancharatnam S. Generalized theory of interference and its applications[J]. Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A, 1956, 44(6): 398-417.
- [38] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 1984, 392: 45-57.
- [39] Rubin N A, Zaidi A, Dorrah A H, et al. Jones matrix holography with metasurfaces[J]. Science Advances, 2021, 7(33): eabg7488.
- [40] Wang H J, Wang Z, Tian A L, et al. Modeling and analysis of commonpath phase shifting shear system based on birefringent optical devices[J]. Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 2008, 17(4): 503-510.
- [41] Chen W T, Zhu A Y, Capasso F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces[J]. Nature Reviews Materials, 2020, 5(8): 604-620.
- [42] Wang Z, Zhang H R, Zhao H T, et al. Intelligent electromagnetic metasurface camera: system design and experimental results[J]. Nanophotonics, 2022, 11(9): 2011-2024.
- [43] Ouyang R, Wang D, Jin L X, et al. Dual-gratings imaging spectrometer[J]. Applied Sciences, 2021, 11(22): 11048.
- [44] Lin R R, Hu H, Ding Y S, et al. Improving the image quality of high-angle interfaces and subsalt sediments

- using high-order scattered seismic waves[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2021, 178(5): 1661-1675.
- [45] Zou J, Ma X, Xia X, et al. High resolution and ultra-compact on-chip spectrometer using bidirectional edge-input arrayed waveguide grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(16): 4447-4453.
- [46] Ma X, Li M Y, He J J. CMOS-compatible integrated spectrometer based on echelle diffraction grating and MSM photodetector array[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 6600807.
- [47] Ruan Z L, Hao Z L, Zhang H, et al. Topological-defect-induced superstructures on graphite surface[J]. *Chinese Physics Letters*, 2021, 38(2): 027201.
- [48] Faraji-Dana M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Compact folded metasurface spectrometer[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4196.
- [49] Faraji-Dana M, Arbabi E, Kwon H, et al. Hyperspectral imager with folded metasurface optics[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(8): 2161-2167.
- [50] Shaltout A M, Kim J, Boltasseva A, et al. Ultrathin and multicolour optical cavities with embedded metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2673.
- [51] Tittl A, Leitis A, Liu M K, et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1105-1109.
- [52] Wang Z, Yi S, Chen A, et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1020.
- [53] Xiong J, Cai X S, Cui K Y, et al. Dynamic brain spectrum acquired by a real-time ultraspectral imaging chip with reconfigurable metasurfaces[J]. *Optica*, 2022, 9(5): 461-468.
- [54] Yang J W, Cui K Y, Cai X S, et al. Ultraspectral imaging based on metasurfaces with freeform shaped meta-atoms[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(7): 2100663.