

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于超构表面的光谱成像及应用研究进展

万源庆, 刘威骏, 林若雨, 余浩祥, 王湫明

引用本文:

万源庆, 刘威骏, 林若雨, 等. 基于超构表面的光谱成像及应用研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230139.

Wan Y Q, Liu W J, Lin R Y, et al. Research progress and applications of spectral imaging based on metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230139.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230139>

收稿日期: 2023-06-19; 修改日期: 2023-08-19; 录用日期: 2023-08-22

相关论文

基于相关性选择的微型计算光谱探测技术

杨港, 郭迎辉, 蒲明博, 李雄, 罗先刚

光电工程 2022, **49**(10): 220130 doi: [10.12086/oe.2022.220130](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220130)

Ultrahigh-resolution on-chip spectrometer with silicon photonic resonators

Long Zhang, Ming Zhang, Tangnan Chen, Dajian Liu, Shihan Hong, Daoxin Dai

Opto-Electronic Advances 2022, **5**(7): 210100 doi: [10.29026/oea.2022.210100](https://doi.org/10.29026/oea.2022.210100)

Towards integrated mode-division demultiplexing spectrometer by deep learning

Ze-huan Zheng, Sheng-ke Zhu, Ying Chen, Huanyang Chen, Jin-hui Chen

Opto-Electronic Science 2022, **1**(11): 220012 doi: [10.29026/oes.2022.220012](https://doi.org/10.29026/oes.2022.220012)

Multi-foci metalens for spectra and polarization ellipticity recognition and reconstruction

Hui Gao, Xuhao Fan, Yuxi Wang, Yuncheng Liu, Xinger Wang, Ke Xu, Leimin Deng, Cheng Zeng, Tingan Li, Jinsong Xia, Wei Xiong

Opto-Electronic Science 2023, **2**(3): 220026 doi: [10.29026/oes.2023.220026](https://doi.org/10.29026/oes.2023.220026)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



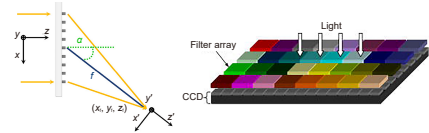
 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230139

基于超构表面的光谱成像及应用研究进展



万源庆, 刘威骏, 林若雨, 余浩祥, 王濂明*

南京大学物理学院, 固体微结构物理国家重点实验室, 江苏 南京 210093

摘要: 作为一种将光谱信息和空间信息相结合的技术, 光谱成像在科学研究和工程应用中受到了广泛的关注。设计优化具有亚波长尺度特征的超构表面可以对光场进行高效地调制。本文综述了近年来基于超构表面的光谱成像研究进展, 与传统光谱仪相比, 基于超构表面的紧凑型光谱仪具有体积小和光路较为简单的优点, 在小型器件中具有较大的应用潜力。根据不同的成像机理, 基于超构表面的光谱成像可以分为超色散型、窄带滤波型和宽带滤波型, 本文详细介绍了每种成像机理的研究进展, 并随后总结了在实际场景中的应用情况, 最后展望了超构表面光谱成像的发展方向和应用前景。

关键词: 光谱成像; 超构表面; 滤波器**中图分类号:** O436; O431.2**文献标志码:** A

万源庆, 刘威骏, 林若雨, 等. 基于超构表面的光谱成像及应用研究进展 [J]. 光电工程, 2023, 50(8): 230139

Wan Y Q, Liu W J, Lin R Y, et al. Research progress and applications of spectral imaging based on metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230139

Research progress and applications of spectral imaging based on metasurfaces

Wan Yuanqing, Liu Weijun, Lin Ruoyu, Yu Haoxiang, Wang Shuming*

National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Physics, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract: As a technology that combines spectral information with spatial information, spectral imaging has been widely concerned in scientific research and engineering applications. The optical field can be modulated efficiently by designing and optimizing the metasurfaces with subwavelength scale features. This article reviews the research progress of spectral imaging based on metasurfaces in recent years. Compared with traditional spectrometers, the compact spectrometers based on metasurfaces have the advantages of smaller volume and simpler optical path, and have greater application potential in small devices. According to different imaging mechanisms, spectral imaging based on metasurfaces can be divided into superdispersion, narrowband filter and broadband filter. The research progress of each imaging mechanism is introduced in detail, and then the application in practical scenarios is summarized. Finally, the development direction and application prospect of spectral imaging of metasurfaces are prospected.

Keywords: spectral imaging; metasurface; filter

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-08-19; 录用日期: 2023-08-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11834007)

*通信作者: 王濂明, wangshuming@nju.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

1 引言

光不仅是人类观察客观世界的重要媒介, 还具有传播信息和能量的作用。光束携带的信息包括在时域、频域以及空间的分布特征, 人眼能直观感知的颜色和强度只是其中的一部分, 其他隐含信息往往需要借助仪器来进行观测。光谱是物质的固有特征, 通过分析光谱可以揭示物质的化学组成成分, 在材料分析、食品安全、医学诊断和生物成像等领域有广泛的应用^[1-5]。传统的光谱仪通常由棱镜、光栅等^[6-7]分光器件通过复杂的光路实现光谱成像, 受衍射效应限制, 其光谱分辨率与光程存在反比关系, 因此普遍存在体积大、集成度低、成本昂贵的缺点, 严重限制了在内窥镜、水下探测等特殊场景的应用。随着市场上对集成化器件的需求增多, 紧凑型光谱仪的研究成为了一个重要的课题。近几十年来, 傅里叶变换光谱仪^[8-9]、微环谐振腔^[10-11]和光波导耦合^[12]已被用于缩小光谱器件的体积。傅里叶变换光谱仪具有高光谱分辨率和高信噪比, 但是无法处理非常不规则的光谱信号, 并且处理数据的速度较慢, 难以应对随时间强烈变化的动态光谱信号。微环谐振腔和光波导耦合光谱仪因其较小的尺寸可以集成到微型光学系统中, 但是光谱分辨率受到制造工艺的限制, 对微纳技术的要求较高。

21 世纪初出现了关于超构表面的研究^[13], 作为由亚波长小单元组成的大面积纳米结构, 超构表面具有可塑性强、灵活度高、易集成的特点。2011 年, Capasso 小组提出了广义斯涅尔定律^[14], 由此拉开了超构表面研究热潮的序幕。通过设计优化共振相位、传输相位和几何相位, 超构表面可以有效调制入射光的光学参数, 如振幅、相位和偏振^[15-16]。由于超构表面在光场调控方面表现出的优异性质, 因此可以实现传统折射或衍射光学难以实现的复杂功能, 如全息显示^[17]、消色差透镜^[18-19]、光加密通信技术^[20]和隐形斗篷^[21]。超构表面作为一种二维材料, 与三维超构材料相比的优势是可以最大限度地减小损耗并增加集成度, 此外, 还可以通过如光刻或电子束刻蚀的纳米材料制造方法相对容易地获得^[22]。光学材料中普遍存在色散的现象, 得益于超构表面对相位的有效调控, 利用超构表面可以进行更高分光, 这对实现紧凑型光谱仪和光谱成像具有重要的意义。滤波是另外一种达到光谱成像这一目标的思路, 通过设计后的超构表面具有频率选择的功能, 可以用于轻薄高效的集成式光

谱滤光器。本文首先基于不同原理从超色散、窄带滤波和宽带滤波这三个方面重点介绍了多种机理的超构表面光谱成像, 然后回顾了基于超构表面光谱成像的应用。最后, 对目前超构表面光谱成像工作进行了总结并对未来发展方向进行了展望。

2 多种机理的超构表面光谱成像

2.1 基于超色散机理的超构表面光谱成像

对于一般的具有固有折射率色散的光学介质材料, 不同波长的光对应有不同的光学响应。在超色散材料中, 光的传播速度和折射率会随着频率发生更加急剧的变化, 这种特性使光的散射得到增强, 一方面这会极大降低如通信、检测、成像等全彩光学应用的性能, 对此有很多科研人员进行了消色差的研究^[18,23]; 另一方面利用这种超色散机制并加以调控, 可以使超构表面在彩色成像或光谱层析分析等领域展现出优良的应用潜力^[24-25]。

传统的彩色图像传感器通常用彩色滤光片获得不同的颜色, 然而随着图像传感器的尺寸变得更小, 每个像素接收到的光也变得更少, 导致光的利用率降低。Nishiwaki 等^[26]提出采用一种折射率比周围材料更高的透明介质微型板状结构来诱导光的偏转, 以达到分光的目的。如图 1(a) 所示, 这种结构包含对称偏转器和非对称偏转器, 当光进入结构时, 通过偏转器传播的光和没有通过偏转器传播的光之间会产生相位差 δ , δ 与波长之间存在依赖关系, 因此偏转光的传播方向随波长的变化而变化。2015 年, Li 等^[27]基于广义斯涅尔定律用一种由梯形纳米柱组成的平面超构表面演示了在可见光范围内把不同波长的光分开的过程。当光入射并沿短宽度激发时, 30 ~ 150 nm 宽的梯形纳米柱显示出接近统一的反射振幅和剧烈的界面相移。梯形纳米柱的高度约为波长的 1/20, 因此可以忽略这种非均匀介质中光传播路径上的相位积累, 即总相位不连续只是由超薄的超构表面引起的。他们在实验上表征了这种异常反射, 如图 1(b) 所示, 有三种反射光束模式, $m=-1$ 时是一阶衍射模式, $m=0$ 时是正常反射模式, $m=1$ 时是异常反射模式, 异常反射的光强最强, 有利于增大光的利用率。

除了上述基于异常反射的分光外, Capasso 小组提出的离轴超构透镜也被证明可以在高光谱分辨率的情况下同时聚焦或分散不同波长的光。如图 2(a) 所示, 以超构透镜中心 ($x=0, y=0$) 为参考, 纳米柱所在的

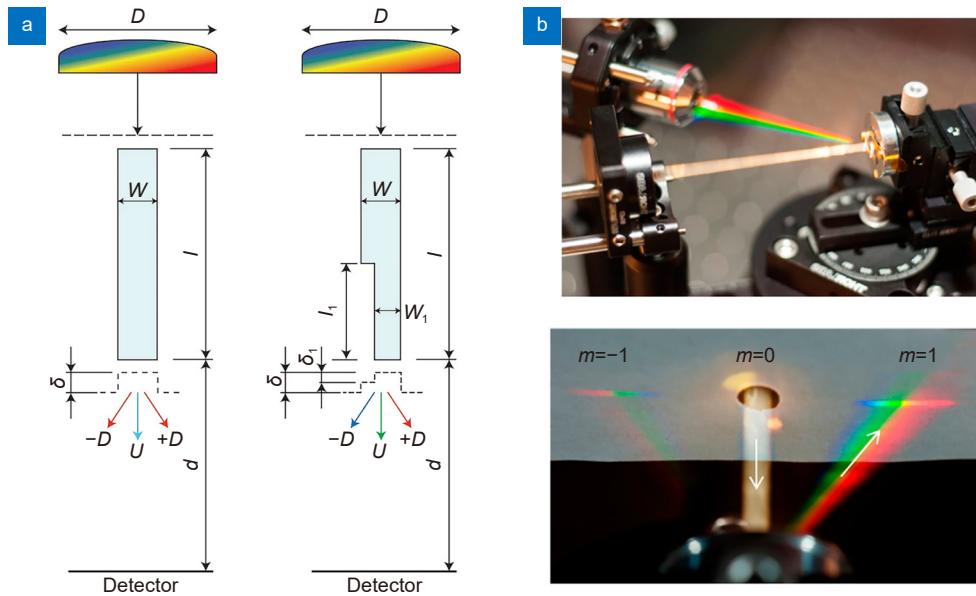


图 1 (a) 对称偏转器和非对称偏转器的结构示意图^[26]; (b) 异常反射的实验表征设置和实际拍摄图片^[27]
 Fig. 1 (a) Structural schematic diagram of symmetric and asymmetric deflectors^[26]; (b) Experimental characterization setup and actual photography of anomalous reflection^[27]

位置 (x, y) 之间的光程差引起的相位延迟可以写为

$$\varphi_d(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_d} \left(\sqrt{(x-x_f)^2 + (y-y_f)^2 + z_f^2} - f \right), \quad (1)$$

其中, λ_d 为设计波长, 点 (x_f, y_f, z_f) 为焦点, f 是焦距。相位差需要纳米柱来补偿, 根据几何相位的概念, 每个纳米柱在 (x, y) 处应该旋转角度 $-\frac{1}{2}\varphi_d(x, y)$ 。

根据上述原理他们先设计了一个可以将光以 80° 角聚焦的超构透镜^[28], 由于大角度聚焦, 超构透镜具有超色散特性 (0.27 nm/mrad), 在电信区域的波长差异分辨率高至 200 pm, 图 2(b) 是演示的一个较为集成的方案^[29], 将多个离轴超构透镜集成在一个平面基板上, 通过与 CMOS 相机相结合可以实现一个同时具有聚焦和超色散特性的紧凑型光谱仪, 光谱分辨率最优为 0.3 nm, 总工作波长范围超过 170 nm, 光束传播长度只有几厘米, 并且还具有在一次测量中分辨不同螺旋度光的能力。然后他们提出了一种由亚波长 TiO_2 纳米柱组成的经过像差矫正后的离轴超构透镜^[30], 通过设计相位及其相对于频率的高阶导数, 在宽波段上保持焦点轮廓, 焦点沿平面分布并且位置与频率呈线性关系。最后他们演示了在近 200 nm 的可见光谱范围内的最小焦点展宽, 图 2(c) 是经过像差矫正和没有经过像差矫正的最小焦点展宽对比图。这一系列的工作都明确地显示了基于该技术制作的超构

透镜具有替代传统光谱仪成为新一代小型光谱仪的潜力。

然而, 对这种离轴超构透镜还没有进行更为详细的参数分析。周毅等^[31]研究了基于超构透镜的光谱仪的结构参数对有效光谱范围和光谱分辨率的影响。如图 2(d) 所示, 通过优化检测平面的方向角, 有效光谱探测范围可以比垂直于光轴的普通检测面探测范围提高约 3 倍。结合数值衍射计算和解析几何分析, 发现设计高分辨率光谱仪时, 应尽可能提高超构透镜的孔径直径和离轴角。采用相反的思路, 减小透镜孔径和离轴角或者增加焦距牺牲一定的光谱分辨率可以设计宽带光谱仪。基于这些特点, 他们针对不同的用途设计了两种光谱仪, 一种是宽带光谱仪, 工作范围为 800 ~ 1800 nm, 光谱分辨率为 2 ~ 5 nm, 另一种是具有更高光谱分辨率的窄带光谱仪, 在 780 ~ 920 nm 范围内分辨率为 0.15 ~ 0.6 nm。

值得注意的是, 离轴超构透镜虽然具有较高的光利用率和较强的光谱分辨能力, 但是却难以在采集光谱信息的同时兼顾三维空间分辨率, 因此距离 4D 成像^[32-33]的目标还有一段距离。2018 年, Faraji-Dana 等^[34-35]介绍了折叠超构表面的概念并制作了一个总体积仅有 8.5 mm^3 的超紧凑线扫描微型高光谱成像仪 (hyperspectral imager, 简称为 HSI)。如图 3(a) 所示,

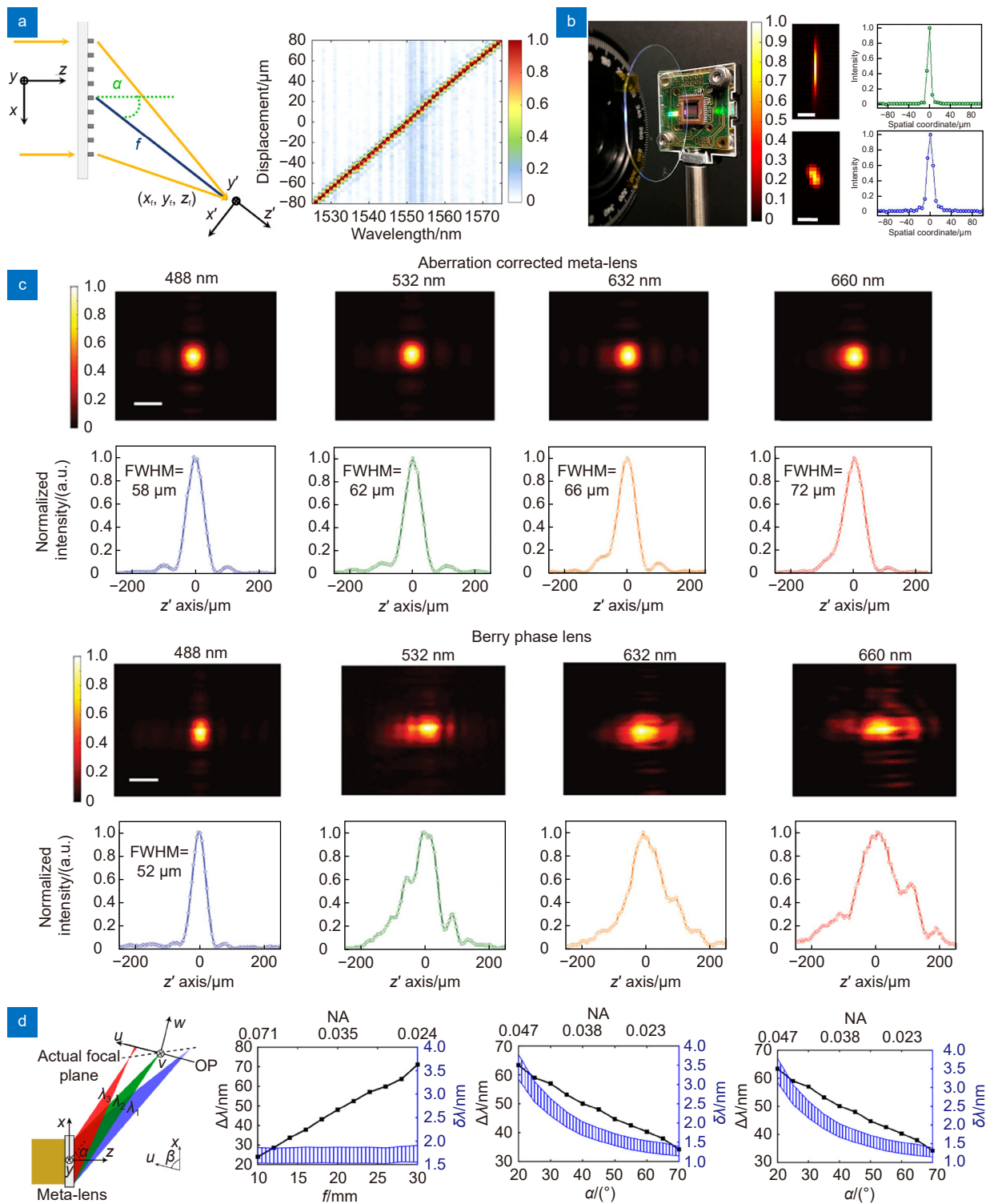


图 2 离轴超构透镜。(a) 显示坐标的超构透镜示意图, 聚焦线沿 x' 轴 (垂直于聚焦轴) 的位移作为波长的函数^[28]; (b) 由超构透镜和 CMOS 相机组成的紧凑光谱仪^[29]; (c) 像差校正超构透镜和贝里相位透镜的实验表征^[30]; (d) 光谱范围和光谱分辨率与结构参数之间的关系示意图^[31]

Fig. 2 Off-axis meta-lens. (a) Schematic diagram showing the coordinates of the meta-lens, and the displacement of the focal line along the x' -axis (normal to the focal axis) as a function of wavelength^[28]; (b) Compact spectrometer composed of meta-lens and CMOS camera^[29]; (c) Experimental characterization of the aberration corrected meta-lens and the Berry phase lens^[30]; (d) Schematic diagram of the relationship between spectral range, Spectral resolution and structural parameters^[31]

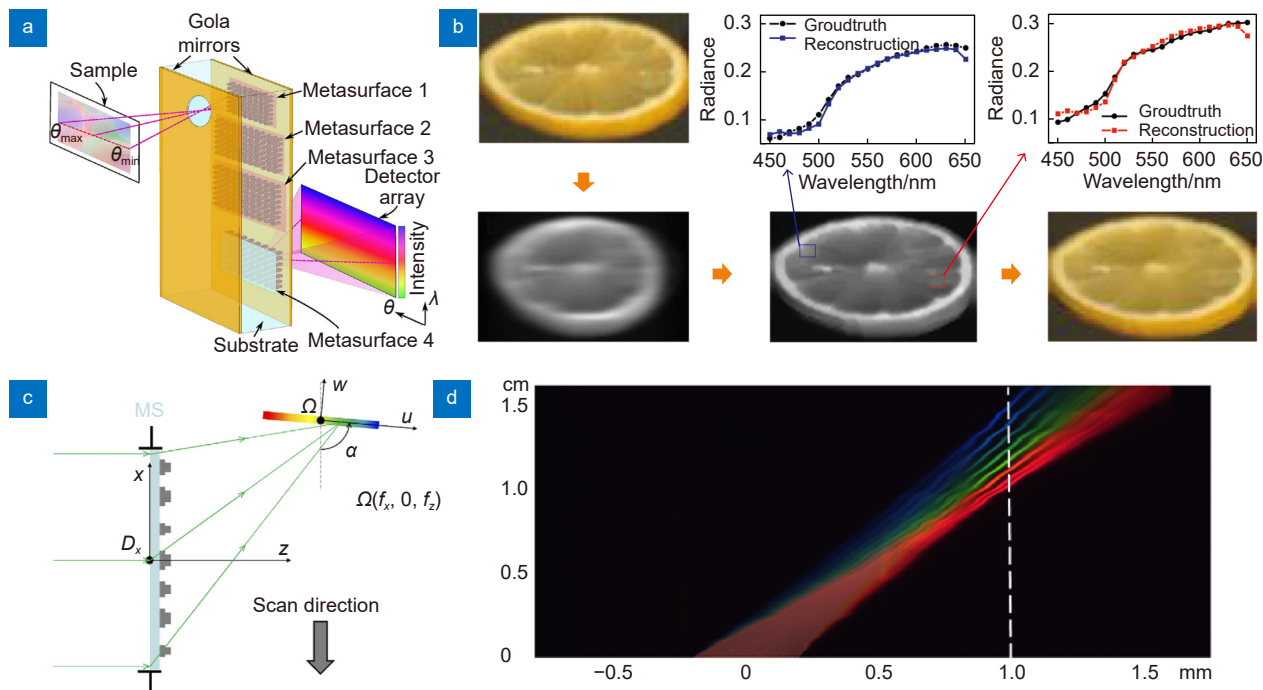


图 3 (a) 折叠超构表面示意图^[35]; (b) SLIM 系统中光谱重建算法的数值模拟结果^[36]; (c) 高光谱成像系统的光学架构示意图^[37]; (d) 色散实验的装置和实验结果的拼接图^[38]

Fig. 3 (a) Schematic diagram of folded metasurface^[35]; (b) Numerical simulation results of spectral reconstruction algorithm in SLIM system^[36]; (c) Schematic of an optical architecture for hyperspectral imaging system^[37]; (d) Set up of the dispersion experiment and the splice diagram of experimental results^[38]

HSI 沿 θ 方向捕获一维空间图像的同时独立测量直线上每个点的光谱, 通过空间扫描 HSI 前面的对象, 可以组成完整的三维数据立方体, 所有的色散和聚焦功能可以通过三个反射超构表面、一个透射超构表面和一组衬底完成。尽管这种线扫描的方式在足够的时间累积下能获得物体的空间信息和光谱信息, 但是它的应用大多局限在共聚焦显微镜下, 难以实时对空间物体进行光谱成像。

2022 年华夏等^[36] 利用横向色散的超构透镜阵列和一个单色成像传感器演示了超紧凑光谱光场成像 (spectral light-field imaging, 简称为 SLIM), 仅需使用一次快照就可以同时获得光谱信息和空间信息。在 SLIM 系统中, 为了同时获得高光通量、高空间分辨率和高光谱分辨率, 不可避免地会捕获带有光谱和空间混叠的图像。光谱信息和空间信息耦合在一起, 故将探测问题转化为解决一个欠定的优化问题, 通过引入光谱重建算法可以对其进行求解从而获取场景中每个位置的光谱信息。图 3(b) 是光谱重建算法的数值模拟结果, 重建结果展示了该算法的有效性。此外, 通过 SLIM 快照, 还可以记录彩色物体的空间分布在

内的场景视觉信息并最终获得 4 nm 的光谱分辨率和近衍射极限的空间分辨率。

区别于上述的几何相位原理, 由于超构透镜的功能是实现在给定光谱带宽 $\Delta\lambda$ 上的连续波长光的色散和沿焦点线的聚焦, 并且所有入射角 θ 由仪器入口狭缝的有效高度定义, 因此 Billuart 等^[37] 提出可以用一个函数 $F(x, y, \lambda, \theta)$ 来描述超构透镜的性质。如图 3(c) 所示, 位于 $z=0$ 的超构表面必须确保 yo z 平面上衍射到 θ 方向角的光经过像点 $F_{\theta,\lambda}$, 参考坐标轴 v 与 y 轴平行, 像点的 u 坐标是波长 λ 的线性函数, 这意味着描述超构表面的函数需要满足公式:

$$-y \sin \theta + F(x, y, \lambda, \theta) + [MF_{\theta,\lambda}] = C_{\theta,\lambda}, \quad (2)$$

其中, M 是由坐标 x 和 y 定义的超构表面上的点, $[MF_{\theta,\lambda}]$ 是 M 和 $F_{\theta,\lambda}$ 之间的光程, $C_{\theta,\lambda}$ 是一个只依赖于 θ 和 λ 的数值因子。将超构表面设计的优化限制为唯一的入射角 ($\theta=0^\circ$), 根据上面的公式他们推出了超构表面引起的相变 $\Phi_F(x, y, \lambda)$, 并以此作为设计超构透镜的依据。为了证明该方法的可行性, 他们设计了一个直径为 175 nm 的超构表面, 在 (650 ± 50) nm 的光谱范围内可以实现光谱分辨率为 8.5 nm 的光谱成

像, 视场为 8° (角分辨率为 0.2°)。

当光正入射到一个平面反光镜上时, 反射光线与入射光线重合, 如果把平面反光镜换成垂直截面为抛物线的反光镜, 反射光总是会聚焦到特定的聚焦线上。根据这个光学性质, Chen 等^[38]设计了一个具有抛物线相位轮廓的光谱调制超构表面。抛物线的公式可以写为 $Z = (x - x_0)^2 / 2p$, 焦点为 $(x_0, p/2)$, 利用超构表面实现抛物线型相位轮廓, 超构表面需要提供的相位为

$$\varphi_p(\lambda) = -\frac{2\pi}{\lambda} \times 2z = -\frac{\pi(x - x_0)^2}{\lambda f_p}, \quad (3)$$

其中, $f_p = p/2$ 为抛物线的焦距。相位 $\varphi_p(\lambda)$ 是波长 λ 的函数, 当超构表面根据特定的波长 λ_0 设计相位后, 波长为 λ_0 的入射光总是会聚焦到抛物线的焦点处, 与此对应的是, 随着波长的变化, 相位也会产生变化, 因此对其他波长的入射光, 超构表面会将它们聚焦到不同的焦点, 从而起到分光的作用, 如图 3(d) 所示。

除了光谱信息外, 对偏振信息的检测也是受到广泛关注的研究方向, 而基于相位调控的超构表面往往对光的偏振也有所响应^[39]。利用这一特性, 可以设计出能同时检测光谱和偏振的超构透镜^[5], 然而在只需要探测光谱信息的情况时, 超构表面对偏振的响应会极大地影响光谱信息的采集, 因此需要设计偏振不灵敏的超构表面。由两个正交方向的多个子周期单元组成超构表面的方案可以使超构表面具有偏振独立衍射的性质^[40]。因为每个子周期在两个正交方向上的占空比是独立的, 因此可以同时操纵 TE 和 TM 偏振的有效指数, 模拟结果表明, 对于正常入射光, TE 和 TM 在 $0.7 \mu\text{m}$ 参考波长下的衍射效率分别为 79.2% 和 79.3%。

综上所述, 相比起传统光栅光谱仪, 基于超色散的超构表面光谱成像可以在一定程度上减小光学元件和光学系统的体积, 并且成像系统相比起传统基于多个透镜的成像系统具有更轻巧、更便捷的优点, 通过不断改进设计方案, 光谱分辨率可以得到进一步提升。需要注意的是, 基于超色散的光谱仪都有一个共同的特点, 即入射光需要保持正入射才能实现有效分光, 因此在使用光谱仪之前还需要在光路中加入额外的准直光路。

2.2 基于窄带滤波机理的超构表面光谱成像

通过滤波进行光谱探测是实现光谱成像的另一种方案^[41], 然而传统滤波器一般需要经过多个介电层的沉积, 制造过程相对复杂, 阻碍了滤波光谱成像的发

展道路。近十几年来, 随着制作滤波器的材料范围扩大和工艺技术提升, 基于窄带滤波的光谱仪展现出了巨大的光谱成像潜力。根据滤波的方式, 窄带滤波器可分为透射型滤波、吸收型滤波和反射型滤波; 根据滤波波长的可调谐性质, 可以分为可调谐型滤波和阵列性滤波。下面分三种滤波方式介绍了不同类型的窄带滤波超构表面光谱成像的研究进展。

2.2.1 透射型超构表面滤波器

透射型窄带滤波器对透射光具有宽带吸收或宽带反射的作用, 只允许特定波长窄带光透过, 虽然高分辨率的微型集成滤光片是高分辨率光谱仪的重要组成部分, 但是传统的工艺水平很难制造出高透光率的集成滤光片。王少伟等^[42-44]开发了两种高效的制造集成滤波器阵列的方法, 一种是组合蚀刻技术, 另一种是没有任何蚀刻工艺的组合沉积技术。利用后一种技术, 他们制作并演示了基于 128 个通道的集成光栅滤波器阵列的高分辨率微型光谱仪, 如图 4(a) 所示。在波长范围 $722 \sim 880 \text{ nm}$ 内的光谱分辨率为 $1.7 \sim 3.8 \text{ nm}$ 。然而, 在具有高光谱分辨率这一优点的同时, 它还存在着对光的利用率较低这一缺陷, 通道的峰值透过率在 $21\% \sim 65\%$ 之间。

为了获得高透射率的尖锐透射峰, 科研人员研究了不同结构和材料的滤波性质。等离子体纳米结构能够在亚波长范围内实现对光场的调制, 其中金属-绝缘体-金属 (metal-insulator-metal, 简称为 MIM) 波导结构已被证实可以在可见波段将白光转换成特定颜色的光^[45], 并且波导的上下两层金属结构决定了其在电光系统中能很容易被集成, 有利于压缩器件尺寸。

为了增强倏逝光场以增加透射, 等离子体滤波片需要结合金属-介电界面中的表面等离子体激发。已有研究表明, 由于表面等离子体激发的存在, 在可见光和近红外波段区域中, 光与金属和介电材料之间的界面具有电子振荡相互作用, 从而导致了纳米孔阵列中特殊的光传输或共振^[49-50], 这使其表现出滤波片的特征, 孔间距和孔尺寸对透射共振的峰值位置和带宽有调制作用。然而, 传统纳米孔阵列的透射共振由于低带外阻塞和宽共振光带宽而不能有效地分离颜色。受益于表面等离子体-能量匹配特性, 具有空腔的纳米孔阵列可以提供更高的共振传输效率和更窄的共振带宽。甘雪涛等^[51]演示了一种基于高品质因子 (Q) 半导体平面光子晶体纳米腔的紧凑光谱仪, 通过平面二维波导的耦合, 在 840 nm 波长处分辨率高达 0.3 nm 。

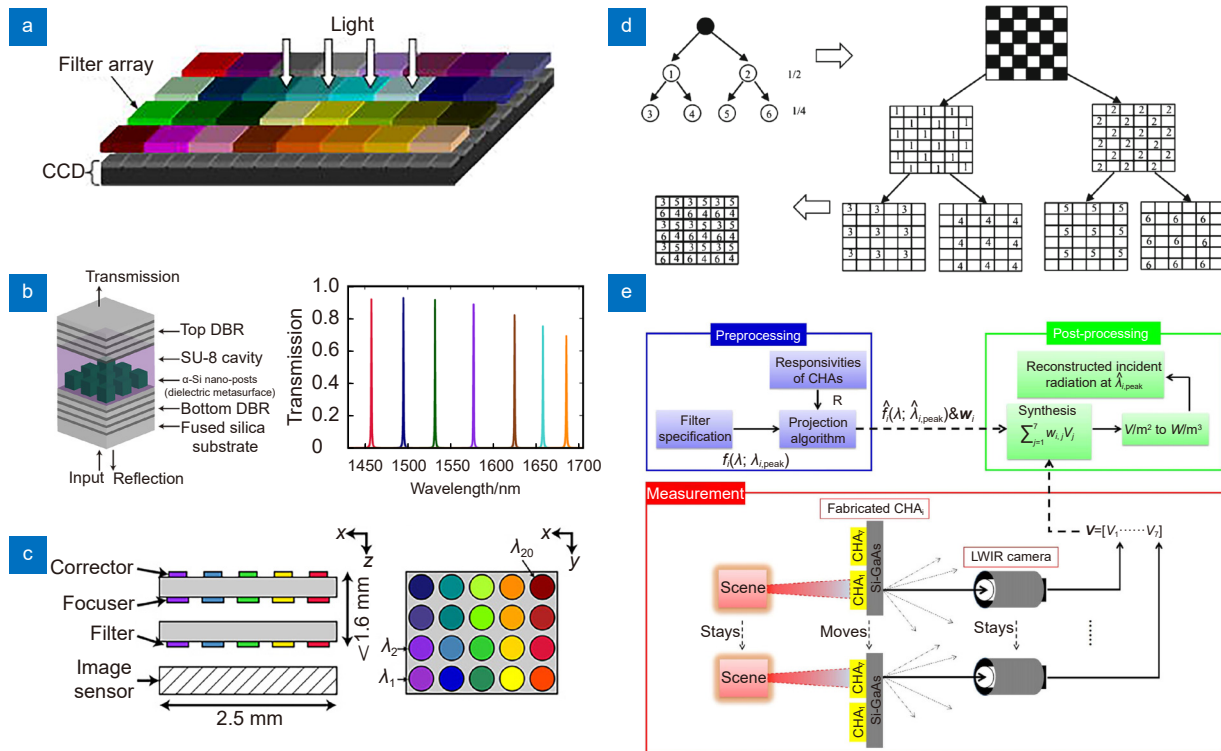


图 4 基于透射型超构表面的光谱成像。(a) 集成滤波阵列组成的紧凑型光谱仪^[44]；(b) 具有不同纳米柱宽度的一组滤波器模拟透射光谱^[46]；(c) 超构表面快照光谱成像仪的示意图^[47]；(d) 多光谱拼接滤波器生成过程示意图^[4]；(e) 未知源入射功率的目标检测策略框图^[48]

Fig. 4 Spectral imaging based on transmission-type metasurface. (a) Compact spectrometer composed of integrated filter array^[44]; (b) Simulated transmission spectra of a group of filters with different nanopillar widths^[46]; (c) Schematic diagram of a hypersurface snapshot spectral imager^[47]; (d) Schematic diagram of generating process of the multispectral filter mosaic^[4]; (e) Block diagram of target detection strategy for unknown source incident power^[48]

Najiminaini 等^[52] 开发了一种二维快照多光谱成像仪，在透射光谱中，观察到与 (1, 0) 和 (1, 1) 表面等离子体激发相关的两个主要共振峰，其中 (1, 0) 共振传输效率在 55% 到 62% 之间。

除了上述的滤波方法外，设计高分辨率滤波片最常见的方法是使用一对宽带高反射率反射镜形成一个法布里-珀罗 (FP) 谐振腔，超构表面的引入会进一步增强对光的调制。Horie 等^[46] 将介电超构表面层放在具有较高 Q 的垂直 FP 谐振腔中，腔内的往返相位通过独立地调整纳米柱的宽度得到了极大的改变，最终在波长范围为 1550±250 nm 内获得了 7 个尖锐的透射峰，如图 4(b) 所示。

此外，利用光栅的色散性质，Kaplan 等^[53] 提出了一种基于 Ag 光栅的金属谐振纳米结构滤色器，选择合适的光栅周期即可将入射光纳入特定共振波长的波导模式。利用这种原理获得的透射光透射率相对较高 (约 75%)，然而滤波片的尺寸较大，约为 1.25

cm×1.25 cm，而且还存在半峰全宽 (FWHM) 较宽、透射峰较少等缺点。2020 年，McClung 等^[47] 提出了一种透射率较高 (77%~98%) 且 FWHM 很小的滤波方案，他们结合超色散和滤波片的原理，演示了一种并行光学处理范式的快照光谱成像器。图 4(c) 是成像系统示意图，两个超构表面位于玻璃基板的两侧，形成阵列，每一对超构表面作为单色相差校正的透镜，将不同波长的光引导到对应的阵列，然后经过超构表面滤波器去除掉杂散光，最终得到了高分辨率光谱图像。

上述研究的滤波片工作波长都没有超过可见到近红外范围，Lee 等^[54] 证明在太赫兹波段，也能通过网格滤波器阵列进行光谱编码，中心频率与滤波器在超构表面中的位置成正比，滤波范围为 0.2 THz~2.0 THz。同年，科研人员还报道了一种具有更宽波长范围的多光谱材料^[55]，通过将可见和红外等离子体滤波器与太赫兹超材料吸收器杂交，它可以在 RGB 三原

色波长、单个近红外波长、单个短波红外波长和两个中红外波长处实现滤波, 此外它还可以吸收单个太赫兹频率。

基于窄带滤波器阵列的高光谱成像具有易与其他光电探测器集成的优点, 2022年, Lee等^[56]在CMOS图像传感器上制造了电介质多层滤波器, 每个光谱通道的传输波长通过在相应的像素上嵌入相应尺寸的硅纳米孔阵列进行选择, 最终在700~950 nm区域内获得了2 nm的高光谱分辨率, 所有工作波长的透光率均超过60%。

直接把窄带滤波器镶嵌覆盖在CMOS/CCD上, 是实现集成多光谱成像的一个想法, 但同时也存在滤波片与像素之间易错位的问题^[4,57], 难以从低分辨输入中重建高分辨率光谱图像。使用智能算法可以纠正这种错位问题。缪立丹等^[4,58-59]基于二进制树形网络解码估计了错位造成的缺失光谱分量, 他们先生成了多光谱拼接滤波器, 如图4(d)所示, 通过递归地分离类似棋盘排列的滤波片, 获得了各种模式, 其中每一种数字表示一种波长, 然后通过波段选择、像素选择和插值三个步骤重建了原光谱域, 在实验上针对四个波长的光谱通道实现了图像重建。线性最小二乘法是常用的参数估计方法, 利用该方法解混频, 在可见到近红外波段可以成功地恢复混合输入照明中的光谱波段^[52]。在中红外波段, Jang等^[48,60]提出了红外视网膜的概念, 将表面等离子体滤波器对像素级信号响应进行加权线性组合, 可以识别出特定波长下来自未知物体的单位面积入射功率。图4(e)是未知源入射功率的目标检测策略框图, 识别过程分为三个部分: 预处理、测量和后端处理, 预处理包括指定所需光谱滤波器(形状、中心波长和带宽)和对投影权值的计算, 其中权值 w_i 的计算公式为 $w_i = [R^T R]^{-1} R^T f_i$, R 是光谱响应度 R_i 的向量, f_i 对应光谱滤波器阵列。通过测量以及后端数据处理, 他们在实验上实现了未知黑体和金属物体的辐射谱重建。

2.2.2 吸收型超构表面滤波器

吸收型滤波器对透射光具有特定窄带波长光的吸收, 根据这一特性, 基于吸收型窄带滤波的光谱成像系统通常将光电探测器集成在滤波片的后面, 探测到的光强在吸收峰值处会骤然下降, 另外一种方法是直接把滤波片作为电极, 通过产生的光电效应的强度判断波长的位置^[61]。

液晶分子会随着施加场的大小变化而改变转向,

这会导致液晶折射率发生改变, 因此液晶与亚波长光栅结合的器件可以看做一个可调谐滤波器^[62], 随着有效折射率的减小, 滤波片的共振波长将发生小范围的蓝移。为了拓宽滤波范围, Grant等^[61]将一个红外超构材料吸收层嵌入到一个标准的太赫兹超构材料吸收层中, 在除了109 μm (2.75 THz)共振吸收峰外获得了中心波长为4.3 μm 的窄带共振。如图5(a)所示, 他们采用的金属十字型结构是一种电环形谐振器(electric ring resonator), 在实际应用中, 十字型结构的臂长度决定了共振波长峰值位置, 而绝缘层厚度和折射率特性决定了吸收幅度。尽管对于单个滤波器来说, 仅仅通过两个峰实现光谱分析显然不够, 但是这种结合两个结构材料的方法可以为增大滤波范围提供新思路, 并且共振波长可调谐的性质也使其有潜力应用到阵列型滤波器中。

除了利用光电响应检测吸收光外, 结合了纳米光子学和热电学的谐振热电等离子体吸收器也可以用于光谱探测。2016年, Dao等^[63]展示了一种具有窄带光谱选择性的混合等离子体-焦电装置, 如图5(b)所示, 该装置由一个等离子体完美吸收器和一个内置热释电ZnO层组成, 通过改变等离子体吸收器的圆孔直径, 实现了波长范围为3.88~5.5 μm 的共振吸收峰调控(图5(c))。在可见光波段, Mauser等^[64]设计了一种具有共振光谱选择性的亚波长热电纳米结构, 即使在未聚焦的空间光场均匀照射下, 也能利用高光约束来控制纳米体积内的温度梯度, 从而产生热电电压, 通过改变亚波长热电纳米结构的周期、厚度等参数, 即可进行特定波长的检测。

高分辨率光谱成像决定了吸收波的高吸收幅值和窄FWHM, 然而前面提到的吸收型滤波器虽然能在特定波长范围内进行吸收滤波, 但是还需要在获得尖锐的吸收峰方面做出进一步研究。2022年, 一种惠更斯超构表面因为其特定光的良好吸收属性而被用于多光谱成像^[65], 与只能支持如电偶极子(electric dipole, 简称为ED)或磁偶极子(magnetic dipole, 简称为MD)单一共振的普通介电超构表面不同的是, 它可以同时激发统一波长的两种共振模式, 这使得单层吸收器获得了超过70%的吸收, 如图5(d)所示。除此之外, 还有一种由连续体中的束缚态(bound states in the continuum, 简称为BIC)所引起的共振现象也可以产生与吸收型超构表面滤波器相同的效果, 在现实中, 品质因子(Q)和共振宽度往往达不到理想

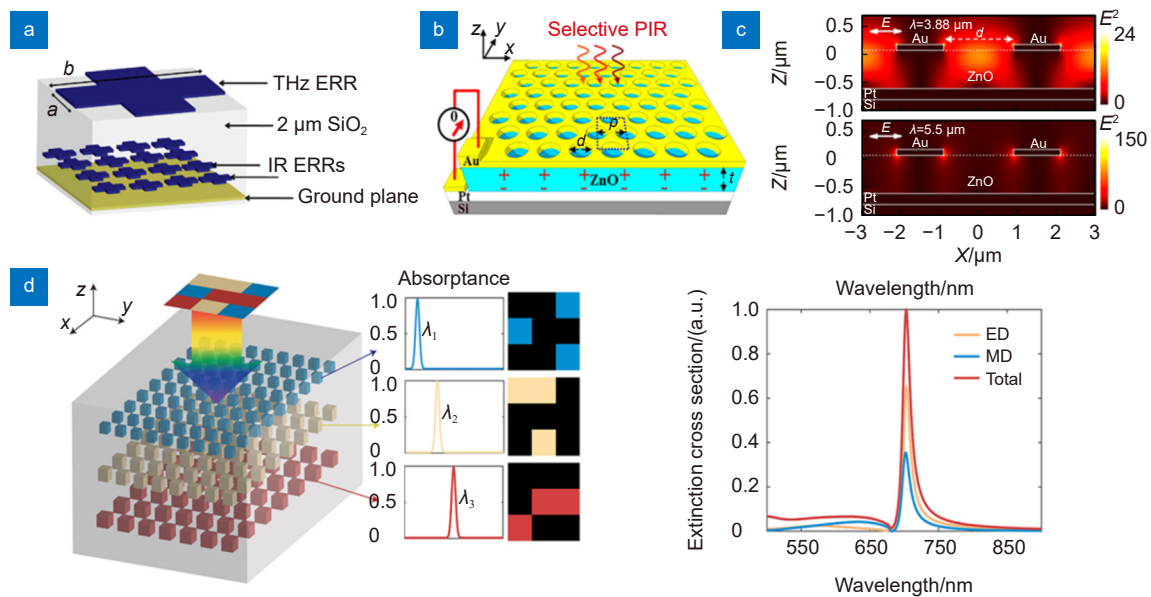


图 5 基于吸收型超构表面的光谱成像。(a) 多光谱超构材料的三维原理图^[61]；(b) 混合等离子体-焦电装置示意图^[63]；(c) 在共振峰处激发的电场分布^[63]；(d) 多层超构表面吸收器示意图^[65]

Fig. 5 Spectral imaging based on absorption-type metasurface. (a) 3D schematic of the multispectral metamaterial absorber^[61]；(b) Schematic diagram of the hybrid plasmonic-pyroelectric detectors^[63]；(c) Electric field distributions excited at resonant peaks^[63]；(d) Schematic illustration of the multilayer metasurface absorber^[65]

条件，此时 BIC 可以看做准 BIC。Yesilkoy 等^[66] 利用由准 BIC 激发的高 Q 近红外共振全介电传感器阵列，演示了一种可以在一次测量中进行多路分析物检测的新型平台。在 BIC 中，特定频率的波由于一种或多种散射途径的干涉而被束缚在结构内部，与吸收型超构表面滤波器不同的是，BIC 涉及的共振现象不属于共振吸收而是一种光约束现象。

2.2.3 反射型超构表面滤波器

反射型窄带滤波一般通过测量透射波的突变来观察反射峰值。平面介电波导光栅中的共振现象已经得到了证明^[67]，特定的入射光波长和角度会耦合成一种被引导进入自由空间的模式，因此对应的模式不能经过结构传输到下一层。根据这种特性，Lin 等^[7] 制造了一个波长范围为 506 ~ 915 nm 的基于梯度光栅周期的导模共振滤波器，如图 6(a) 所示，宽带光正入射时，激发结构并引起共振的特定波长光被反射到自由空间中，其余光通过滤波片正常传输。一般地，超构表面中的高 Q 共振是通过超辐射和次辐射模式的干涉而产生的，除此之外，利用 Mie 共振的集体行为，也能设计出没有额外光谱背景的高 Q 共振^[68]。由图 6(b) 可见，分子振动和介电谐振器周围增强的电场之间的耦合会引起单个元像素反射光谱的显著调制，每一个

尖锐共振峰反应了近似统一的反射强度 (平均 $Q > 200$)。

本小节主要分析总结了基于透射型、吸收型和反射型超构表面的窄带滤波，与前两者相比，基于反射型超构表面的窄带滤波需要一定的空间收集光，因此体积相对较大。由于大部分的窄带滤波是通过共振而非衍射来选择波长的，所以对入射光的入射角度要求不高。需要注意的是，尽管窄带滤波器的峰值透射率可以通过一些方案提高，但是整个波段的平均透射率仍然很低，导致整个器件的效率较低，而且对于阵列型窄带滤波光谱仪，由于滤波片之间的距离较小，容易发生串扰，因此对滤波光的 FWHM 要求较高。

2.3 基于宽带滤波机理的超构表面光谱成像

综合利用超色散和窄带滤波的超构表面光谱成像来看，较强的光谱分辨能力和较高的光利用率很难兼顾，这是因为前者的分辨率与光程成反比，在原理上不利于小型化，而后者会过滤掉大部分光。近年来，得益于计算光谱^[69-71] 和算法^[72-73] 的发展，基于宽带滤波的超构表面^[74-75] 尽管不能像窄带滤波那样直接分辨光谱，但是可以通过复杂的后端算法重建光谱信息，高分辨率和易于集成化的微型成像系统使其在光谱成像领域中占领着重要的位置。

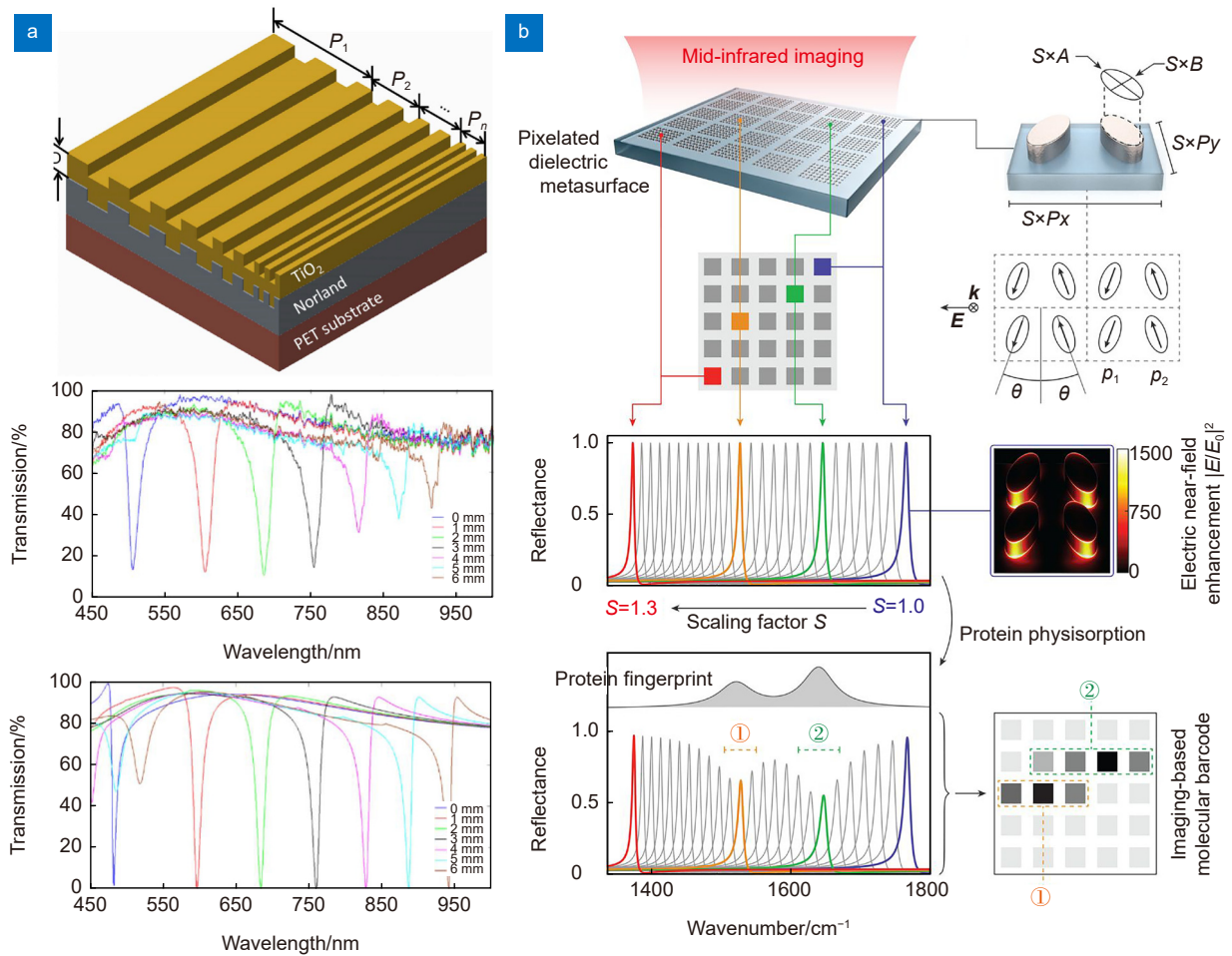


图 6 基于反射型超构表面的光谱成像。(a) 导模谐振滤波器的原理图和透射光谱^[7];
(b) 像素化介电超构表面的分子指纹检测^[68]

Fig. 6 Spectral imaging based on reflection-type metasurface. (a) Schematic of the guided-mode resonance filter with gradient grating periods^[7]; (b) Molecular fingerprint detection with pixelated dielectric metasurfaces^[68]

图 7(a) 是经典的基于宽带滤波的超构表面高光谱成像系统^[76]，它由超构表面层、微透镜层和 CMOS 图像传感器组成，其中超构表面层包含 N 个自由形状结构阵列，每一种结构对应不同的宽光谱响应。入射光经过超构表面滤波和微透镜阵列聚焦后，通过图像传感器转换为电信号。假设入射光的光谱为 $F(\lambda)$ ，每一个超构表面的光谱响应为 $X_i(\lambda)$ ， $i=1, 2, 3, \dots, N$ 。CMOS 图像传感器的吸收响应为 $A(\lambda)$ ，则最终探测到的信号强度 Y_i 可以描述为^[77-81]

$$Y_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) X_i(\lambda) A(\lambda) d\lambda + e_i, \quad (4)$$

其中， e_i 表示噪声信号。对 $F(\lambda)$ 、 $X_i(\lambda)$ 和 $A(\lambda)$ 分别进行离散采样，得到 $f(\lambda)$ 、 $x_i(\lambda)$ 和 $a(\lambda)$ ，则 Y_i 的离散形

式为

$$Y_i = \sum_{\lambda} f(\lambda) x_i(\lambda) a(\lambda) + e_i. \quad (5)$$

令 $r_i(\lambda) = x_i(\lambda) a(\lambda)$ ， $r_i(\lambda)$ 是可以通过测量预先确定的透射光谱曲线，将 Y 通过线性方程组表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{R}\mathbf{F}(\lambda) + \mathbf{e}, \quad (6)$$

其中： $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ ， $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{N \times M}$ ， $\mathbf{F}(\lambda) \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ ， M 表示波长采样的个数。通过解这个线性方程组，可以得到原入射光的光谱信息，然而实际上， M 往往大于 N ，因此这是一个欠定的方程，需要通过正则化^[82]、压缩感知^[78,80-81] 或深度学习^[83] 等算法来求解。

通过宽带滤波实现光谱成像有两个重要的步骤，第一步是获得随机分布的宽光谱曲线，第二步是利用

算法重建光谱, 由于欠定方程求解的特殊性, 一般来说光谱响应曲线特征越明显, 光谱重建能力越高。下面分这两个步骤来总结近年来出现的宽带滤波超构表面光谱成像。

2.3.1 随机分布的光谱响应曲线

由等离子体滤波器^[84-85]为代表的共振滤波器是一种常见的滤波方法, 但是这些滤波曲线的形状比较单一, 不是理想的宽带滤波器。将超构表面嵌入一个光学腔, 可以在多个波段支持共振^[86], 结合超构表面的传播相位和法布里-珀罗干涉原理, 理论上该方法能将纳米腔厚度降低到传统的最小值 $\lambda/(2n)$ 以下, 极大地缩小滤波器的尺寸, 然而在实践中制作过程比较复杂。近年来, 由多个孔阵列构成的光子晶体板被用来获得宽带光谱响应^[76,81,87-88], 由于入射光束中的每一个波长分量在每个孔径处都有位移的衍射角, 因此光束中的所有波长分量的总衍射信号是唯一的, 即不同的孔径阵列对应了特定的光谱响应。Liu 等^[88]通过在光子晶体板上添加金 (Au) 纳米柱, 引入了表面等离子体共振效应, 使光子晶体板的透射曲线表现出窄带响

应, 从而进一步增强了滤波器的光谱重建能力, 图 7(b) 是有窄带引入和无窄带引入的重建光谱对比图。与孔径阵列对应的纳米柱阵列也能通过合理的设计表现出优异的光谱响应^[89-91], Xiao 等^[91]还研究了纳米柱的周期和高度对透射光谱的有效调制, 如图 7(c) 所示, 不同的 p 值和 h 值分别影响透射峰的波长偏移和透射率的变化。

此外, 通过合理设计激发表面等离子体波的元原子, 可以使超构表面具备同时检测入射光的偏振和光谱信息的能力^[92-93]。图 7(d) 是一个由不同晶格常数和方向的亚波长矩形孔形成的 4×4 阵列, 当入射偏振光的特定极化角垂直于孔径的长轴时, 表面等离子体波在一个光谱带内被激发, 并通过光隧穿增强传输。激发效率由晶格常数和元原子相对于入射光的特定极化角的相对取向决定, 因此不同晶格常数的透射光谱峰值位置不同^[92]。采取相反的思路, 如果期望超构表面对偏振不敏感, 通常可以采用圆形孔径、圆形纳米柱等元原子以 C_4 对称排列的方案^[81]。

目前超构表面的随机光谱响应曲线绝大部分都采

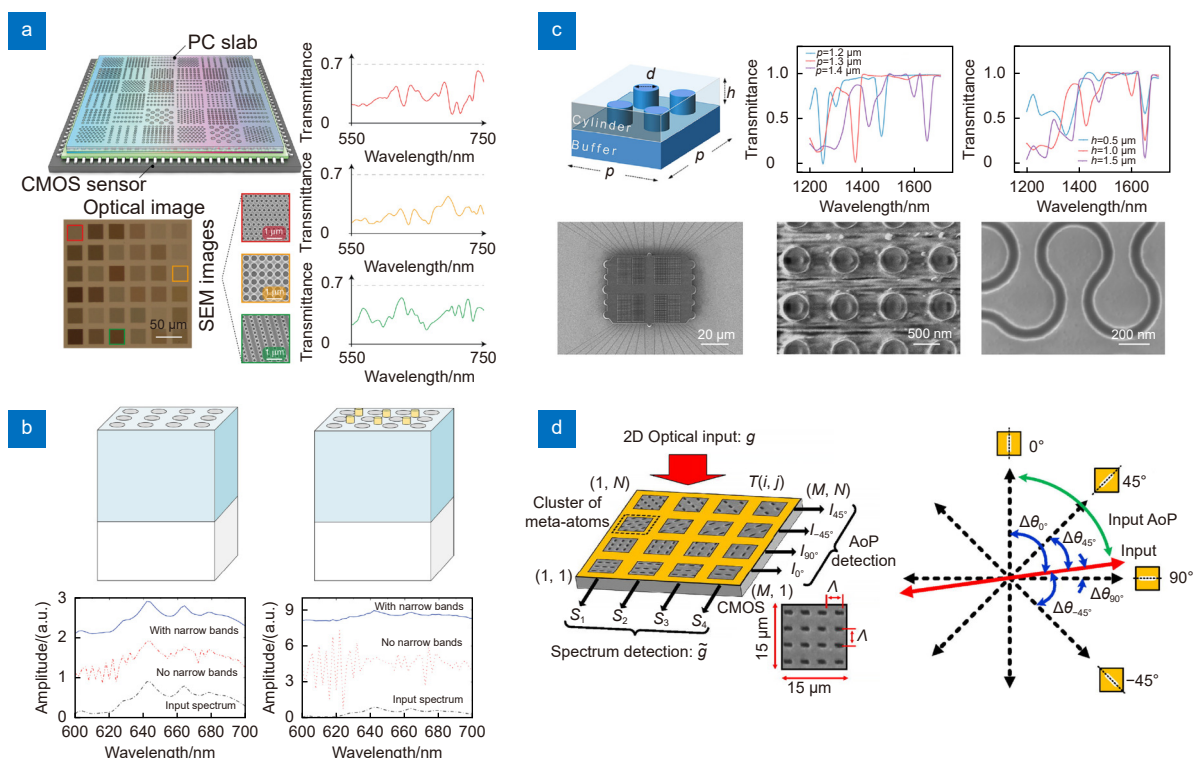


图 7 (a) 基于光子晶体 (PC) 板的微型光谱仪^[76]; (b) 光子晶体滤波器和新型滤波器的重建光谱对比图^[88]; (c) 纳米柱的设计和制造图^[91]; (d) 基于超构表面的多光谱和偏振检测原理图^[92]

Fig. 7 (a) Micro-spectrometer based on photonic-crystal (PC) slabs^[76]; (b) Comparison of reconstructed spectra of photonic crystal filters and novel filters^[88]; (c) Design and fabrication diagram of nanocolumn^[91]; (d) Schematic drawing of the metasurface-based multispectral and polarimetric detection^[92]

用正向设计的方法, 这是一种较为直观简单的方法, 但是操作效率较低, 而且极有可能错失最优结果。以结果为导向的拓扑优化、遗传算法、基于伴随的梯度下降法和深度学习等逆向设计方法^[94-96]可以较好地规避这一缺陷, 能从众多不同排列和不同形状的结构中筛选得到目标光谱曲线, 并且在优化的过程中还可以设置条件以获得角度不敏感、鲁棒性更好的光谱曲线。理论上来说, 光谱响应曲线的特征越明显, 曲线之间的差异性越大, 越有利于进行光谱重建。Redding 等^[84]在演示一个基于硅芯片的多重光散射光谱仪时, 提出通过光谱相关函数来量化在探测器上产生不相关强度分布所需的波长变化, 然而对于利用宽带滤波机理的超构表面光谱成像, 往往关注的是重建光谱的精度, 对随机宽光谱曲线的优异程度并无量化的标准。

虽然已经有大量的结构材料可以获得高透射率的光谱响应, 但是他们无一例外的都是属于被动超构表面, 即每一种结构对应着固定的光谱曲线。因此研究能调谐光谱响应的主动超构表面对光谱光场调控具有重要的意义。目前, 液晶^[62,97]、石墨烯^[98]、多量子阱结构^[99]和相变材料^[100-103]是实现主动超构表面的方法。其中, 考虑到高透射和稳定性等因素, 基于过渡金属硫族化合物如 GeSbTe(GST) 的相变材料成为了光谱

滤波主动超构表面的理想候选材料。与其他材料不同的是, GST 可以在电或热的作用下从非晶相 (a-GST) 转换为晶相 (c-GST), 并在结晶时表现出显著的可逆折射率调制, 如图 8(a) 所示, 因此基于 GST 的超构表面的光谱响应对电、热具有强烈的依赖性。图 8(b) 是结合了双层金属材料 and 相变材料 Ge₂Sb₂Te₅ 的 MIM 结构, 这种结构已经被证明在中红外区域具有良好的宽带滤波效应, 图 8(c) 展示了分别以 a-GST 和 c-GST 作为介质层时的反射光谱和电场分布, 对于同一个相, 波峰之间的波长差异是由结构中的欧姆损耗引起的^[101]。在实际调控中, GST 的状态通过改变结晶度 m 来调控, 部分结晶 GST 的介电常数可以通过有效介质理论获得^[104], 不同的结晶度对应着不同的光谱响应。

除了在材料上选用可调谐的相变材料实现主动超构表面这种方法外, 通过电来调谐液晶^[62,97]、石墨烯^[106]超构表面也是一种实现主动超构表面的有效手段, 如图 8(d) 所示, Lee 等^[105]通过结合非对称晶格纳米孔阵列和扭曲向列相液晶, 提出了一种具有电开关偏振旋转器功能的超构表面, 波长调谐位移大于 120 nm。图 8(e) 是由金属纳米结构和石墨烯集成的介电腔, 这可以作为一种石墨烯超构表面调制器, 反射

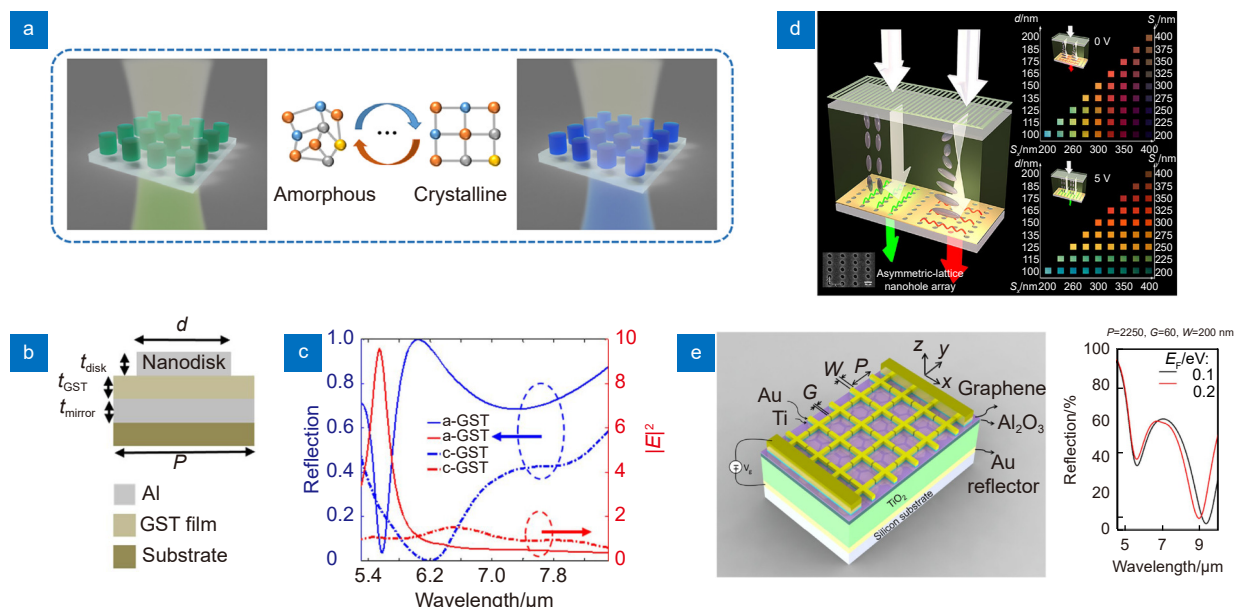


图 8 调谐型超构表面。(a) 基于 GSST 的相变超构表面光谱调制器^[103]; (b) MIM 结构的横切面图^[101]; (c) a-GST 和 c-GST 作为介质层时的反射光谱和电场分布^[101]; (d) 电可调谐滤色器示意图^[105]; (e) 石墨烯超构表面调制器原理图^[106]

Fig. 8 Tuned metasurface. (a) Phase-change metasurface spectral modulator based on GSST^[103]; (b) Cross-sectional view of the MIM structure^[101]; (c) Reflection spectrum and electric field distribution of a-GST and c-GST as dielectric layers^[101]; (d) Schematic representation of the electrically tunable color filter^[105]; (e) Schematic of graphene metasurface modulator^[106]

光谱通过电压 V_G 来调整, 特征波长能在 $8.31 \mu\text{m} \sim 9.477 \mu\text{m}$ 范围内进行调谐^[106]。

2.3.2 光谱重建算法

基于宽带滤波的超构表面经过快照捕获的目标光谱是一种重叠的光谱, 因此有必要通过光谱重建算法提取原始光谱信息。目前使用较多的算法有最小二乘法^[90,107]、Tikhonov 正则化^[82,87]、压缩感知^[78,80-81]以及基于神经网络的深度学习^[71,108]方法。

对于如图 9(a) 所示的系统, 其中的欠定线性方程组在理论上可以用最小二乘法求解, 然而建模误差、实验测量误差以及系统噪声等不可避免的干扰可能会导致求解结果与真实值相差较大。为了获得更准确的重建结果, Kurokawa 等^[82]将正则化技术、约束优化方法和非负最小二乘法结合, 开发出了一种自适应选择正则化参数的线性方程组求解法。对一个用矩阵形式表示的欠定线性方程组 $y = Mx + n$, 可以采用变换

矩阵 S 来减少方程组中的未知数, 令 $x = S\tilde{x}$, 则 $y = \tilde{M}\tilde{x} + n$, 其中 $\tilde{M} = MS$ 。采用 Tikhonov 正则化技术, 将正则化问题视为阻尼最小二乘问题:

$$\min_{\tilde{x}} \|\tilde{M}\tilde{x} - y\|_2 - \alpha^2 \|\tilde{L}\tilde{x}\|_2, \quad (7)$$

其中, α 是一个正则化参数, 考虑到频谱不能是负数, 因此需要对求解施加非负的约束, 则上式可以写为

$$\min_{\tilde{x}} \left\| \begin{bmatrix} \tilde{M} \\ \alpha L \end{bmatrix} \tilde{x} - \begin{bmatrix} y \\ 0 \end{bmatrix} \right\|_2, \quad \tilde{x} \geq 0. \quad (8)$$

通过 L-曲线法^[109] 或者广义交叉验证 (GCV) 法^[110] 可以自适应地选择正则化参数 α , matlab 中的正则化工具能具体地实现上述求解过程, 宽带重建光谱如图 9(b) 所示。对于窄带光谱, 可以分辨 443.50 nm 和 446.50 nm 的窄间距峰, 光谱分辨率小于 3 nm ^[87]。

基于稀疏采样的压缩感知 (compressive sensing, 简称为 CS) 也是一种被广泛应用的技术^[111], 与最小

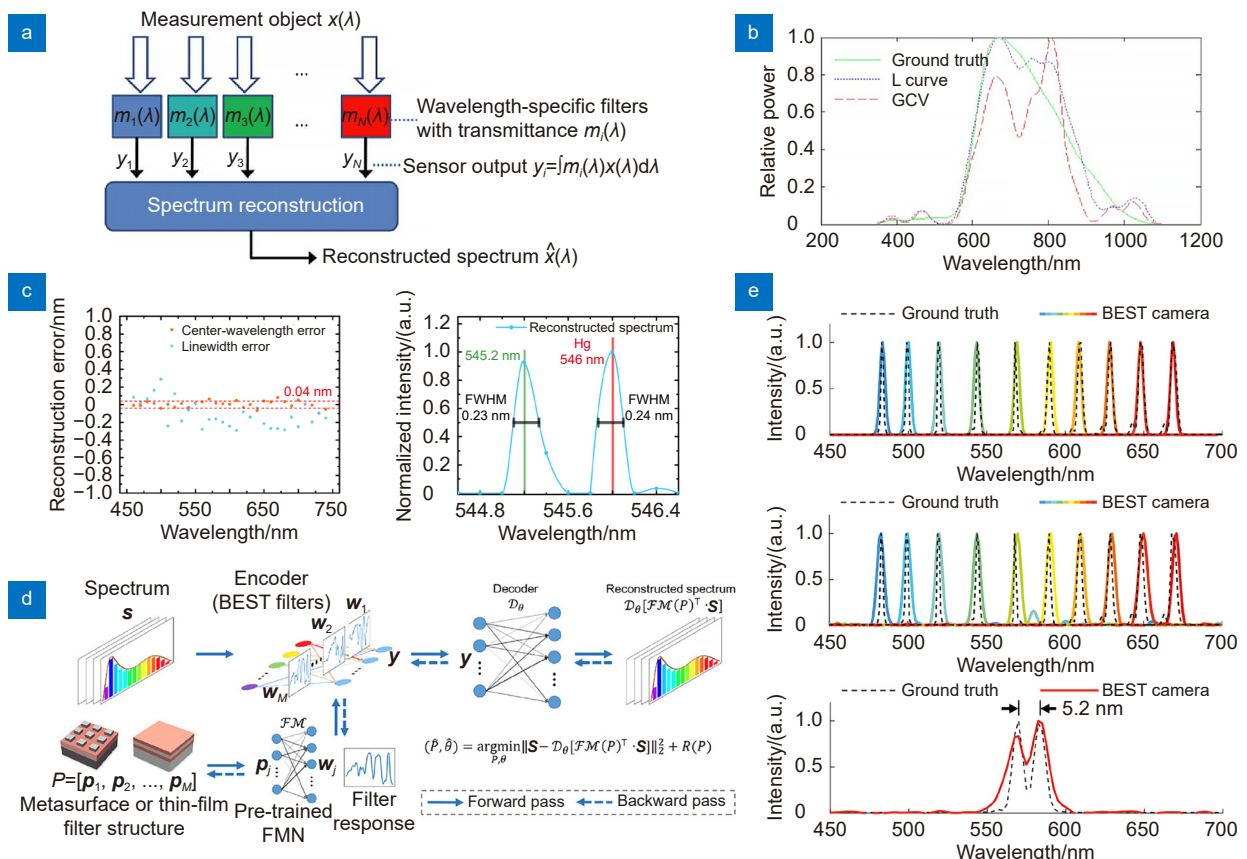


图 9 光谱重建算法。(a) 光谱重建系统示意图^[82]; (b) 宽带光谱的重建结果^[82]; (c) 基于 CS 理论的窄带光谱重建结果^[81]; (d) 参数约束光谱编码器和解码器的设计框架^[83]; (e) 基于深度学习的重建结果^[113]

Fig. 9 Spectral reconstruction algorithm. (a) Schematic diagram of spectral reconstruction system^[82]; (b) Reconstruction results of broadband spectra^[82]; (c) Narrow band spectral reconstruction results based on CS theory^[81]; (d) Design framework for parametric constrained spectral encoders and decoders^[83]; (e) Reconstruction results based on deep learning^[113]

二乘法和正则化技术不同的是, CS 理论只需要较少的随机稀疏采样信号即可反演出原始光谱图像, 在有效地减小算法复杂程度的同时还具备较强的光谱重建能力。2022 年, Xiong 等^[81]提出了一种基于可重构超构表面的硅实时超光谱成像芯片, 他们利用 CS 理论重建了光谱, 如图 9(c) 所示, 超高中心波长精度高达 0.04 nm, 光谱分辨率为 0.8 nm。CS 理论的框架主要包括三方面^[12]: 稀疏表示、观察矩阵和重建算法。首先对任何一个可压缩信号 \mathbf{x} , 用一组稀疏基 Ψ 表示, 即 $\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N \Psi_i \alpha_i = \Psi \boldsymbol{\alpha}$, 然后通过观察矩阵从原始信号中尽量去除作用不大的冗余信息, 同时在降维过程中保留尽可能多的有用信息, 最后利用重建算法从压缩的低维测量数据中精确重建原始信号。

近年来, 随着深度学习在各个方面的应用越来越广泛, 利用深度学习进行光谱反演也成为了高光谱图像的一种重建方法。此外, 传统的滤波器设计方式大多是启发式的, 可能没有充分发挥滤波器的编码能力, 而利用深度学习可以设计出最佳目标频谱对应的结构, 图 9(d) 是一种参数约束光谱编码器和解码器的设计框架^[83], 其中宽带编码随机滤波器 (broadband encoding stochastic, 简称为 BEST) 作为编码器, 光谱响应通过预训练的网络受到滤波器结构参数的约束, 如果在每个训练阶段将一批频谱输入到编码器中, 则解码器会给出相应的输出, 即重构的频谱, 对重构频谱的损失函数如均方误差 (MSE) 进行评估, 并将误差反向传播到结构参数 (周期、高度、宽度等), 从而可以设计出最优编码器和解码器。基于深度学习重建的频谱峰值分辨率为 5.2 nm^[113], 如图 9(e) 所示。与 CS 相比, 深度神经网络有两个优势, 一是频谱重建的速度可以快几个数量级, 二是训练良好的深度神经网络具有更好的去噪能力, 因为在训练的过程中可以添加更多的不同水平噪声样本来训练去噪能力^[113], 需要注意的是, 深度学习需要大量的数据集进行训练, 并且训练数据和参数选择对重建结果有极大的影响, 因此采用合理的数据集训练神经网络是关键的一个步骤。

3 光谱成像的应用

与传统光谱仪相比, 基于超构表面的光谱成像系统因为超高光谱分辨率、空间占用体积小和易与 CMOS 传感器直接集成等优点, 在生物传感、遥感、医学诊断和人脸识别等领域都有着广泛的应用前景。

在分子层面上, 探测蛋白质、DNA 等大分子结

构的状态可以使用化学荧光团对目标结构进行标记、然后通过探测器探测荧光团发出的光进行分析的研究方法, 基于超构表面的光谱成像因为具有快照的优势而可以被用于快速荧光测量^[114]。然而对于一些特殊情况, 荧光标记可能会损坏分子或细胞的结构, 因此需要采用无标记的技术。中红外光谱是一种强大的无损和无标记的技术, 被广泛用于识别生物化学组成部分, 但是由于中红外波长与分子尺寸不匹配, 光谱灵敏度往往会受到限制。Tittl 等^[68]提出利用亚波长谐振器的强近场增强可以克服这一限制, 当由亚波长谐振器组成的滤波片的共振与吸收分子的光谱重叠时, 增强的分子-谐振器的耦合会导致共振频率或强度的变化, 如图 10(a) 所示, 在分子被吸附前, 所有的峰值反射率都被归一化为 1, 当单层分子被吸附在谐振器上时, 光谱发生变化, 用多个组合的光谱通道可以检测重组蛋白 A/G 是否被吸收。基于类似的原理, 他们还提出并演示了一个超灵敏的大面积无标记生物传感分析平台, 在数百万个图像像素中能获取空间分辨的光谱, 这可以用于大面积分析生物实体和原子层厚的二维材料^[66]。图 10(b) 展示了如何通过这种方法探测石墨烯的光学特性, 由于石墨烯在近红外 (NIR) ($n=2.69$, $k=1.52$) 中的光学响应, 所以存在约为 3 nm 的红移和线宽展宽, 在超构表面平台上覆盖一张石墨烯, 边缘用白色虚线标记, 通过条形码传感技术检测了由于超构表面与石墨烯的局部相互作用增强而出现的光谱变化, 光谱位移和线宽展宽信息与石墨烯的光学特性一致。值得注意的是, 对于由多个分析物混合得到的样本, 通过简单的线性分解能获得原分析物的光谱, 然而对于涉及了多个分析物和生物分子的动力学相互作用, 即非线性过程, 该分析方法就不再适用了。通过借助更复杂的基于神经网络的图像重构或机器学习等算法可以提高对分析物的分辨能力, 孟佳军等^[115]实验演示了一个用于化学鉴定的紧凑微光谱仪平台, 他们通过机器学习算法对微光谱仪的输出光谱进行了分析和分类, 实现了对液体化合物的高精度鉴定, 该方法也可以用于食品和药物的分类。

与分子层面上的静态光谱探测相比, 基于实时光谱成像的动态光谱探测在生物医学研究中有着更为巨大的潜力。一种基于压缩感知算法的超光谱成像芯片可以用于脑血流动力学成像^[81], 如图 10(c) 所示, 该芯片包括 158400 个可重构的超构表面单元, 在物体的光谱重建过程中, 超构表面中相邻的单元可以动态

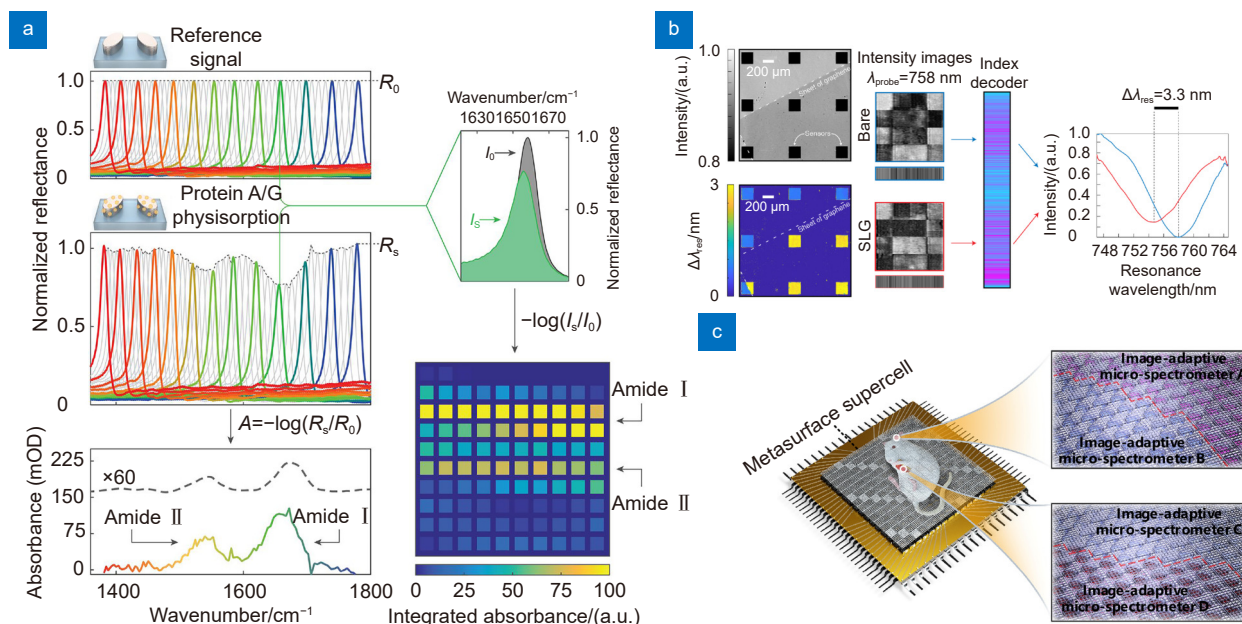


图 10 (a) 分子指纹检索和空间吸收绘图^[66]; (b) 利用介电超构表面对石墨烯进行光学表征^[66];

(c) 用于小鼠脑血流动力学成像的超构表面装置图^[81]

Fig. 10 (a) Molecular fingerprint retrieval and spatial absorption mapping^[66]; (b) Optical characterization of graphene using dielectric metasurface^[66]; (c) Metasurface device diagram for mouse cerebral hemodynamic imaging^[81]

地被组合成可重构、自适应的微光谱仪。

人脸识别是一种生物识别的身份认证方法, 与传统密码不同的是, 人脸这一生物特征特性不易被盗窃或改变, 因此提供了更好的安全性能, 在安防系统、日常生活中有着广泛的应用场景。然而在一些场景中可以通过打印的照片或面具来攻击人脸识别系统, 尽管利用三维人脸识别或视频分析能检测出假脸, 但是随着 3D 打印技术的兴起和仿生硅胶技术的发展, 面具做得越来越逼真, 难以识别。Kim 等^[116] 基于结构光提出了一种全空间衍射超构表面, 这可以为人脸识别和汽车机器人视觉应用提供超紧凑的深度感知平台。此外, 光谱分析一直是鉴别不同材料的有效工具, Rao 等^[79] 开发了一种能获得面部高精度光谱信息的快照图像传感器, 只需要 50 ms 即可高精度地测量面部的反射光谱并得到血红蛋白的吸收峰。图 11(a) 是传感器分别对真脸、纸质面罩、硅胶面具和硅胶原料的光谱测量结果, 通过光谱的特征能有效地区分出真脸和假脸, 这种检测系统在真实世界的测试场景中准确率高达 97.98%。

除了通过光谱来研究探测物外, 利用超构表面的光谱响应还能实现一种加密显示, Yoon 等^[117] 提出了

一种双模超构表面的概念, 它可以同时控制透射和反射两种操作模式的相位和光谱响应。在透射模式下, 超构表面通过调整入射光的相位分布, 使其显示出“3.141592...”, 在反射模式下, 通过白光照明会产生一幅反射的“π”彩色图像, 如图 11(b) 所示。彩色图像经过超构表面光谱成像系统后被分解成光谱的形式, 同样地, 利用光谱也能通过一些方法(如 CIE 1931 色彩空间)进行颜色重建^[117-118]。与传统相机仅在可见光下成像相比, 超构表面光谱成像系统还能实现对可见波长不透明的物体近红外成像^[119], 如图 11(c) 所示, 涂有黑色墨水的玻璃遮挡了放置在其后的环状物体, 在传统相机下很难看到的图像通过多光谱成像系统能被观察到, 超构表面光谱成像系统在特殊场景成像方面有很大的潜力。

4 总结与展望

本文首先分析总结了多种机理的超构表面光谱成像, 工作原理主要分为超色散、窄带滤波和宽带滤波三种, 其中窄带滤波包含透射型、吸收型和反射型三种滤波方式, 宽带滤波包含获得随机分布的光谱曲线和利用光谱重建算法重建光谱这两个关键的步骤。然

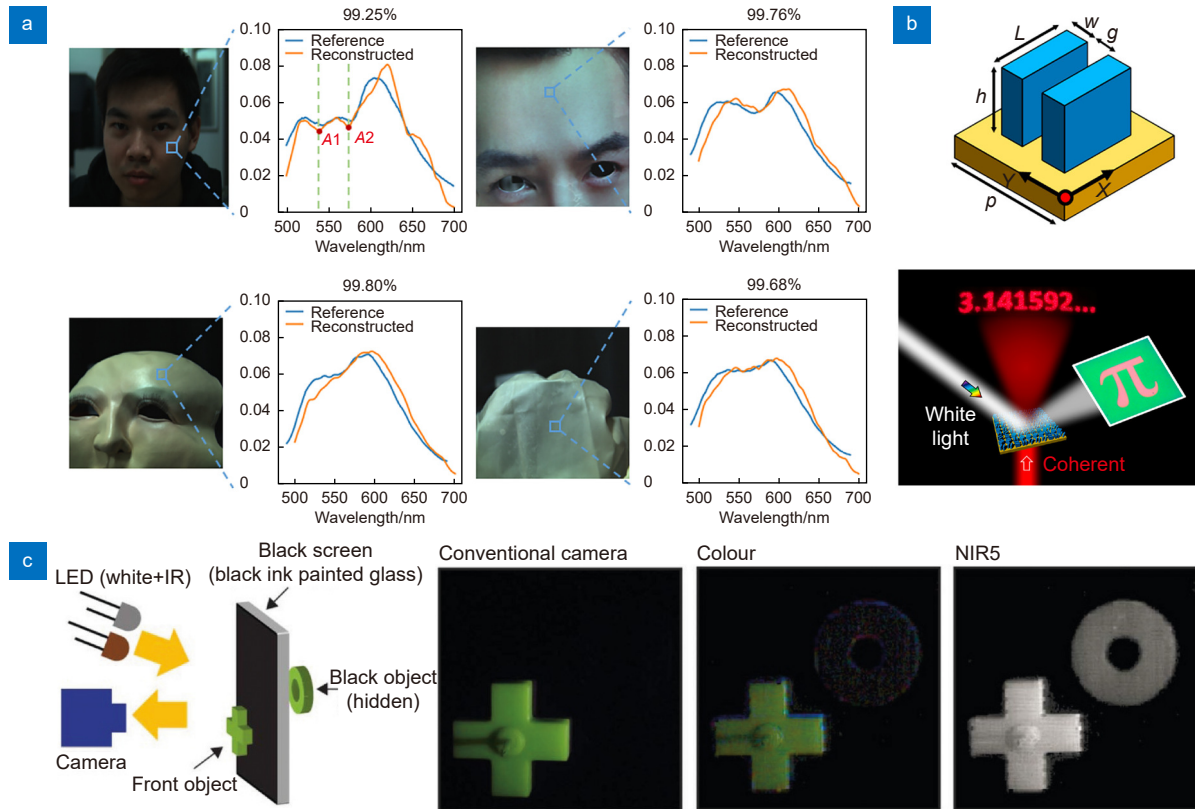


图 11 (a) 对真脸和其他面具的光谱测量结果^[79]; (b) 密码显示的工作原理图^[117]; (c) 通过可见光波段不透明物体的近红外成像演示^[119]

Fig. 11 (a) Spectral measurement results of a real face and other masks^[79]; (b) Operation schematic of the crypto-display^[117]; (c) Demonstration of NIR imaging through the object that is opaque at visible wavelengths^[119]

后回顾了近年来超构表面光谱成像在实际中的应用研究。由于超构表面可以很容易地集成到二维平面中，因此基于超构表面的光谱成像对实现紧凑型光谱仪有重要的意义。

通过我们的分析还可以客观地看到，基于超构表面的光谱成像目前还存在一些瓶颈，主要包括：1) 超色散的原理限制了集成化。利用超构表面本身存在的色散，并通过相位调控使波长在空间中依次排列实现的光谱成像具有较高的光利用率和较强的光谱分辨能力，然而对于集成度和分辨率难以兼顾。2) 窄带滤波对工艺技术的要求较高。窄带滤波利用频率的主动选择进行光谱成像，通过牺牲光利用率达到了非常高的集成度，但是普通的微纳制造技术难以达到对精确度的要求，光谱分辨率受限于制造工艺的发展。3) 宽带滤波需要复杂的重建算法。宽带滤波将对硬件的重心转移到后端光谱重建算法上，在具有较高的光利用率的同时保持了高集成度，分辨率与算法的精确度息息

相关，因此需要大量的数据集和时间训练算法。虽然基于超构表面的光谱成像还存在上述的一些不足，但随着技术的发展和研究的进一步深入，光谱重建算法的效率将得到进一步优化，制造工艺的精度也将得到提升，我们相信未来能突破现存的瓶颈，实现真正意义上的高分辨紧凑型光谱仪。

参考文献

- [1] Gowen A A, O'Donnell C P, Cullen P J, et al. Hyperspectral imaging - an emerging process analytical tool for food quality and safety control[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2007, 18(12): 590-598.
- [2] Delalieux S, Auwerkerken A, Verstraeten W W, et al. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging to detect scab induced stress in apple leaves[J]. *Remote Sens*, 2009, 1(4): 858-874.
- [3] Kong L H, Yi D R, Sprigle S H, et al. Single sensor that outputs narrowband multispectral images[J]. *J Biomed Opt*, 2010, 15(1): 010502.
- [4] Qi H R, Kong L H, Wang C, et al. A hand-held mosaicked multispectral imaging device for early stage pressure ulcer

- detection[J]. *J Med Syst*, 2011, **35**(5): 895–904.
- [5] Khorasaninejad M, Chen W T, Zhu A Y, et al. Multispectral chiral imaging with a metalens[J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(7): 4595–4600.
- [6] Avrutsky I, Chaganti K, Salakhutdinov I, et al. Concept of a miniature optical spectrometer using integrated optical and micro-optical components[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(30): 7811–7817.
- [7] Lin H A, Huang C S. Linear variable filter based on a gradient grating period guided-mode resonance filter[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2016, **28**(9): 1042–1045.
- [8] Le Coarer E, Blaize S, Benech P, et al. Wavelength-scale stationary-wave integrated Fourier-transform spectrometry[J]. *Nat Photonics*, 2007, **1**(8): 473–478.
- [9] Kita D M, Miranda B, Favela D, et al. High-performance and scalable on-chip digital Fourier transform spectroscopy[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 4405.
- [10] Vasiliev A, Malik A, Muneeb M, et al. On-chip mid-infrared photothermal spectroscopy using suspended silicon-on-insulator microring resonators[J]. *ACS Sens*, 2016, **1**(11): 1301–1307.
- [11] Nitkowski A, Chen L, Lipson M. Cavity-enhanced on-chip absorption spectroscopy using microring resonators[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(16): 11930–11936.
- [12] Hartmann W, Varytis P, Gehring H, et al. Waveguide-integrated broadband spectrometer based on tailored disorder[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(6): 1901602.
- [13] Falcone F, Lopetegi T, Laso M A G, et al. Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **93**(19): 197401.
- [14] 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.
- [15] Dai J Y, Zhao J, Cheng Q, et al. Independent control of harmonic amplitudes and phases via a time-domain digital coding metasurface[J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**: 90.
- [16] Yuan Q, Ge Q, Chen L S, et al. Recent advanced applications of metasurfaces in multi-dimensions[J]. *Nanophotonics*, 2023, **12**(13): 2295–2315.
- [17] Yang R, Yu Q Q, Pan Y W, et al. Directional-multiplexing holography by on-chip metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220177.
杨睿, 于千茜, 潘一苇, 等. 基于片上超表面的多路方向复用全息术[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220177.
- [18] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**(1): 187.
- [19] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nat Nanotechnol*, 2018, **13**(3): 227–232.
- [20] Liu H C, Yang B, Guo Q H, et al. Single-pixel computational ghost imaging with helicity-dependent metasurface hologram[J]. *Sci Adv*, 2017, **3**(9): e1701477.
- [21] Yang Y H, Jing L Q, Zheng B, et al. Full-polarization 3D metasurface cloak with preserved amplitude and phase[J]. *Adv Mater*, 2016, **28**(32): 6866–6871.
- [22] Su V C, Chu C H, Sun G, et al. Advances in optical metasurfaces: fabrication and applications [invited][J]. *Opt Express*, 2018, **26**(10): 13148–13182.
- [23] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nat Nanotechnol*, 2018, **13**(3): 220–226.
- [24] Li K, Guo Y H, Pu M B, et al. Dispersion controlling meta-lens at visible frequency[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(18): 21419–21427.
- [25] Xie T, Zhang F, Pu M B, et al. Integrated multispectral real-time imaging system based on metasurfaces[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(24): 36445–36454.
- [26] Nishiwaki S, Nakamura T, Hiramoto M, et al. Efficient colour splitters for high-pixel-density image sensors[J]. *Nat Photonics*, 2013, **7**(3): 240–246.
- [27] Li Z Y, Palacios E, Butun S, et al. Visible-frequency metasurfaces for broadband anomalous reflection and high-efficiency spectrum splitting[J]. *Nano Lett*, 2015, **15**(3): 1615–1621.
- [28] Khorasaninejad M, Chen W T, Oh J, et al. Super-dispersive off-axis meta-lenses for compact high resolution spectroscopy[J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(6): 3732–3737.
- [29] Zhu A Y, Chen W T, Khorasaninejad M, et al. Ultra-compact visible chiral spectrometer with meta-lenses[J]. *APL Photonics*, 2017, **2**(3): 036103.
- [30] Zhu A Y, Chen W T, Sisler J, et al. Compact aberration - corrected spectrometers in the visible using dispersion - tailored metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2019, **7**(14): 1801144.
- [31] Zhou Y, Chen R, Ma Y G. Characteristic analysis of compact spectrometer based on off-axis meta-lens[J]. *Appl Sci*, 2018, **8**(3): 321.
- [32] Mohan A, Oberoi D. 4D data cubes from radio-interferometric spectroscopic snapshot imaging[J]. *Sol Phys*, 2017, **292**(11): 168.
- [33] Gómez-Sánchez A, Marro M, Marsal M, et al. 3D and 4D image fusion: coping with differences in spectroscopic modes among hyperspectral images[J]. *Anal Chem*, 2020, **92**(14): 9591–9602.
- [34] Faraji-Dana M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Compact folded metasurface spectrometer[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 4196.
- [35] Faraji-Dana M, Arbabi E, Kwon H, et al. Hyperspectral imager with folded metasurface optics[J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(8): 2161–2167.
- [36] Hua X, Wang Y J, Wang S M, et al. Ultra-compact snapshot spectral light-field imaging[J]. *Nat Commun*, 2022, **13**(1): 2732.
- [37] Billuart J, Héron S, Loiseaux B, et al. Towards a metasurface adapted to hyperspectral imaging applications: from subwavelength design to definition of optical properties[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(21): 32764–32777.
- [38] Chen Y F, Zhao R Z, He H Y, et al. Spectrum dispersion element based on the metasurface with parabolic phase[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(18): 32670–32679.
- [39] Gao H, Fan X H, Wang Y X, et al. Multi-foci metalens for spectra and polarization ellipticity recognition and reconstruction[J]. *Opto-Electron Sci*, 2023, **2**(3): 220026.
- [40] Zhu J C, Zhou J K, Shen W M. Polarisation - independent diffraction grating based on dielectric metasurface[J]. *Electron Lett*, 2019, **55**(13): 756–759.
- [41] Eichenholz J M, Barnett N, Juang Y, et al. Real-time megapixel multispectral bioimaging[J]. *Proc SPIE*, 2010, **7568**:

- 75681L.
- [42] Wang S W, Chen X S, Lu W, et al. Integrated optical filter arrays fabricated by using the combinatorial etching technique[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(3): 332–334.
- [43] Wang S W, Li M, Xia C S, et al. 128 channels of integrated filter array rapidly fabricated by using the combinatorial deposition technique[J]. *Appl Phys B*, 2007, **88**(2): 281–284.
- [44] Wang S W, Xia C S, Chen X S, et al. Concept of a high-resolution miniature spectrometer using an integrated filter array[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(6): 632–634.
- [45] Xu T, Wu Y K, Luo X G, et al. Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging[J]. *Nat Commun*, 2010, **1**: 59.
- [46] Horie Y, Arbabi A, Arbabi E, et al. Wide bandwidth and high resolution planar filter array based on DBR-metasurface-DBR structures[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(11): 11677–11682.
- [47] McClung A, Samudrala S, Torfeh M, et al. Snapshot spectral imaging with parallel metasystems[J]. *Sci Adv*, 2020, **6**(38): eabc7646.
- [48] Jang W Y, Ku Z, Jeon J, et al. Experimental demonstration of adaptive infrared multispectral imaging using plasmonic filter array[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 34876.
- [49] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667–669.
- [50] Najiminaini M, Vasefi F, Kaminska B, et al. Experimental and numerical analysis on the optical resonance transmission properties of nano-hole arrays[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(21): 22255–22270.
- [51] Gan X T, Pervez N, Kyymissis I, et al. A high-resolution spectrometer based on a compact planar two dimensional photonic crystal cavity array[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, **100**(23): 231104.
- [52] Najiminaini M, Vasefi F, Kaminska B, et al. Nanohole-array-based device for 2D snapshot multispectral imaging[J]. *Sci Rep*, 2013, **3**: 2589.
- [53] Kaplan A F, Xu T, Jay Guo L. High efficiency resonance-based spectrum filters with tunable transmission bandwidth fabricated using nanoimprint lithography[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, **99**(14): 143111.
- [54] Lee K, Choi H J, Son J, et al. THz near-field spectral encoding imaging using a rainbow metasurface[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**: 14403.
- [55] McCrindle I J H, Grant J P, Gouveia L C P, et al. Infrared plasmonic filters integrated with an optical and terahertz multispectral material[J]. *Phys Status Solidi (A)*, 2015, **212**(8): 1625–1633.
- [56] Lee J, Park Y, Kim H, et al. Compact meta-spectral image sensor for mobile applications[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(11): 2563–2569.
- [57] Chen Q, Das D, Chitnis D, et al. A CMOS image sensor integrated with plasmonic colour filters[J]. *Plasmonics*, 2012, **7**(4): 695–699.
- [58] Miao L D, Qi H R. The design and evaluation of a generic method for generating mosaicked multispectral filter arrays[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2006, **15**(9): 2780–2791.
- [59] Miao L D, Qi H R, Ramanath R, et al. Binary tree-based generic demosaicking algorithm for multispectral filter arrays[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2006, **15**(11): 3550–3558.
- [60] Jang W Y, Hayat M M, Tyo J S, et al. Demonstration of bias-controlled algorithmic tuning of quantum dots in a well (DWELL) MidIR detectors[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2009, **45**(6): 674–683.
- [61] Grant J, McCrindle I J H, Li C, et al. Multispectral metamaterial absorber[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(5): 1227–1230.
- [62] Chang A S P, Morton K J, Tan H, et al. Tunable liquid crystal-resonant grating filter fabricated by nanoimprint lithography[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2007, **19**(19): 1457–1459.
- [63] Dao T D, Ishii S, Yokoyama T, et al. Hole array perfect absorbers for spectrally selective midwavelength infrared pyroelectric detectors[J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(7): 1271–1278.
- [64] Mauer K W, Kim S, Mitrovic S, et al. Resonant thermoelectric nanophotonics[J]. *Nat Nanotechnol*, 2017, **12**(8): 770–775.
- [65] Wen S, Jin C Q, Yang Y M. Multilayer Huygens' metasurface absorber toward snapshot multispectral imaging[J]. *J Opt*, 2021, **23**(4): 044001.
- [66] Yesilkoy F, Arvelo E R, Jahani Y, et al. Ultrasensitive hyperspectral imaging and biodetection enabled by dielectric metasurfaces[J]. *Nat Photonics*, 2019, **13**(6): 390–396.
- [67] Wang S S, Magnusson R. Theory and applications of guided-mode resonance filters[J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(14): 2606–2613.
- [68] Tittl A, Leitis A, Liu M K, et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces[J]. *Science*, 2018, **360**(6393): 1105–1109.
- [69] Yao M D, Xiong Z W, Wang L Z, et al. Spectral-depth imaging with deep learning based reconstruction[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(26): 38312–38325.
- [70] Wang Z J, Chen B, Lu R Y, et al. FusionNet: an unsupervised convolutional variational network for hyperspectral and multispectral image fusion[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2020, **29**: 7565–7577.
- [71] Chen Y Y, Zhu Y L, Britton W A, et al. Inverse design of ultracompact multi-focal optical devices by diffractive neural networks[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(11): 2842–2845.
- [72] Chang C C, Lee H N. On the estimation of target spectrum for filter-array based spectrometers[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(2): 1056–1061.
- [73] Morawski R Z, Miekina A. Improving absorbance spectrum reconstruction via spectral data decomposition and pseudo-baseline optimization[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2009, **58**(3): 691–697.
- [74] Chen Q, Chitnis D, Walls K, et al. CMOS photodetectors integrated with plasmonic color filters[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2012, **24**(3): 197–199.
- [75] Yoon Y T, Lee S S, Lee B S. Nano-patterned visible wavelength filter integrated with an image sensor exploiting a 90-nm CMOS process[J]. *Photonics Nanostruct - Fundam Appl*, 2012, **10**(1): 54–59.
- [76] Wang Z, Yi S, Chen A, et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 1020.

- [77] Yang J W, Cui K Y, Cai X S, et al. Ultraspectral imaging based on metasurfaces with freeform shaped meta - atoms[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(7): 2100663.
- [78] Wu X L, Gao D H, Chen Q, et al. Multispectral imaging via nanostructured random broadband filtering[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(4): 4859–4875.
- [79] Rao S J, Huang Y D, Cui K Y, et al. Anti-spoofing face recognition using a metasurface-based snapshot hyperspectral image sensor[J]. *Optica*, 2022, **9**(11): 1253–1259.
- [80] Wu Z P, Zhang Z Q, Xu Y J, et al. Random color filters based on an all-dielectric metasurface for compact hyperspectral imaging[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(17): 4548–4551.
- [81] 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.
- [82] Kurokawa U, Choi B I, Chang C C. Filter-based miniature spectrometers: spectrum reconstruction using adaptive regularization[J]. *IEEE Sens J*, 2011, **11**(7): 1556–1563.
- [83] Song H Y, Ma Y G, Han Y B, et al. Deep - learned broadband encoding stochastic filters for computational spectroscopic instruments[J]. *Adv Theory Simul*, 2021, **4**(3): 2000299.
- [84] Redding B, Liew S F, Sarma R, et al. Compact spectrometer based on a disordered photonic chip[J]. *Nat Photonics*, 2013, **7**(9): 746–751.
- [85] Wang Z, Yu Z F. Spectral analysis based on compressive sensing in nanophotonic structures[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(21): 25608–25614.
- [86] Shaltout A M, Kim J, Boltasseva A, et al. Ultrathin and multicolour optical cavities with embedded metasurfaces[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 2673.
- [87] Yang T, Xu C, Ho H P, et al. Miniature spectrometer based on diffraction in a dispersive hole array[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(13): 3217–3220.
- [88] Liu D L, Li Z H. New nano-structure spectrometer by introducing gold nano-pillars for spectral reconstruction ability improvement[J]. *Opt Commun*, 2022, **502**: 127419.
- [89] Stewart J W, Akselrod G M, Smith D R, et al. Toward multispectral imaging with colloidal metasurface pixels[J]. *Adv Mater*, 2017, **29**(6): 1602971.
- [90] Craig B, Shrestha V R, Meng J J, et al. Experimental demonstration of infrared spectral reconstruction using plasmonic metasurfaces[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(18): 4481–4484.
- [91] Xiao Y, Wei S, Xu J J, et al. Superconducting single-photon spectrometer with 3D-printed photonic-crystal filters[J]. *ACS Photonics*, 2022, **9**(10): 3450–3456.
- [92] Pelzman C, Cho S Y. Multispectral and polarimetric photodetection using a plasmonic metasurface[J]. *J Appl Phys*, 2018, **123**(4): 043107.
- [93] Pelzman C, Cho S Y. Plasmonic metasurface for simultaneous detection of polarization and spectrum[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(6): 1213–1216.
- [94] Yang J W, Cui K Y, Huang Y D, et al. Angle-insensitive spectral imaging based on topology-optimized plasmonic metasurfaces[Z]. arXiv: 2212.07813, 2022. <https://arxiv.org/abs/2212.07813>.
- [95] Liu T R, Fiore A. Designing open channels in random scattering media for on-chip spectrometers[J]. *Optica*, 2020, **7**(8): 934–939.
- [96] Ma T G, Tobah M, Wang H Z, et al. Benchmarking deep learning-based models on nanophotonic inverse design problems[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, **1**(1): 210012.
- [97] Zhao Q, Kang L, Du B, et al. Electrically tunable negative permeability metamaterials based on nematic liquid crystals[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**(1): 011112.
- [98] Song S C, Chen Q, Jin L, et al. Great light absorption enhancement in a graphene photodetector integrated with a metamaterial perfect absorber[J]. *Nanoscale*, 2013, **5**(20): 9615–9619.
- [99] Ebermann M, Neumann N, Hiller K, et al. Tunable MEMS Fabry-Pérot filters for infrared microspectrometers: a review[J]. *Proc SPIE*, 2016, **9760**: 97600H.
- [100] Cao T, Wei C W, Simpson R E, et al. Broadband polarization-independent perfect absorber using a phase-change metamaterial at visible frequencies[J]. *Sci Rep*, 2014, **4**: 3955.
- [101] Guo Z Y, Yang X, Shen F, et al. Active-tuning and polarization-independent absorber and sensor in the infrared region based on the phase change material of Ge₂Sb₂Te₅ (GST)[J]. *Sci Rep*, 2018, **8**(1): 12433.
- [102] Julian M N, Williams C, Borg S, et al. Reversible optical tuning of GeSbTe phase-change metasurface spectral filters for mid-wave infrared imaging[J]. *Optica*, 2020, **7**(7): 746–754.
- [103] Tao C N, Zhu H Z, Zhang Y S, et al. Shortwave infrared single-pixel spectral imaging based on a GSST phase-change metasurface[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(19): 33697–33707.
- [104] Aspnes D E. Local-field effects and effective-medium theory: a microscopic perspective[J]. *Am J Phys*, 1982, **50**(8): 704–709.
- [105] Lee Y, Park M K, Kim S, et al. Electrical broad tuning of plasmonic color filter employing an asymmetric-lattice nanohole array of metasurface controlled by polarization rotator[J]. *ACS Photonics*, 2017, **4**(8): 1954–1966.
- [106] Shrestha V R, Craig B, Meng J J, et al. Mid- to long-wave infrared computational spectroscopy with a graphene metasurface modulator[J]. *Sci Rep*, 2020, **10**(1): 5377.
- [107] Duempelmann L, Gallinet B, Novotny L. Multispectral imaging with tunable plasmonic filters[J]. *ACS Photonics*, 2017, **4**(2): 236–241.
- [108] Huang L Q, Luo R C, Liu X, et al. Spectral imaging with deep learning[J]. *Light Sci Appl*, 2022, **11**(1): 61.
- [109] Hansen P C. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve[J]. *SIAM Rev*, 1992, **34**(4): 561–580.
- [110] Golub G H, Heath M, Wahba G. Generalized cross-validation as a method for choosing a good ridge parameter[J]. *Technometrics*, 1979, **21**(2): 215–223.
- [111] August Y, Stern A. Compressive sensing spectrometry based on liquid crystal devices[J]. *Opt Lett*, 2013, **38**(23): 4996–4999.
- [112] Jiang Y Y, Li G M, Ge H Y, et al. Adaptive compressed sensing algorithm for terahertz spectral image reconstruction based on residual learning[J]. *Spectrochim Acta Part A Mol Biomol Spectrosc*, 2022, **281**: 121586.
- [113] Zhang W Y, Song H Y, He X, et al. Deeply learned broadband encoding stochastic hyperspectral imaging[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 108.

- [114] Connolly P W R, Valli J, Shah Y D, et al. Simultaneous multi-spectral, single-photon fluorescence imaging using a plasmonic colour filter array[J]. *J Biophotonics*, 2021, **14**(7): e202000505.
- [115] Meng J J, Weston L, Balendhran S, et al. Compact chemical identifier based on plasmonic metasurface integrated with microbolometer array[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(4): 2100436.
- [116] Kim G, Kim Y, Yun J, et al. Metasurface-driven full-space structured light for three-dimensional imaging[J]. *Nat Commun*, 2022, **13**(1): 5920.
- [117] Yoon G, Lee D, Nam K T, et al. "Crypto-display" in dual-mode metasurfaces by simultaneous control of phase and spectral responses[J]. *ACS Nano*, 2018, **12**(7): 6421-6428.
- [118] Xu Z J, Li N X, Dong Y, et al. Metasurface-based subtractive color filter fabricated on a 12-inch glass wafer using a CMOS platform[J]. *Photonics Res*, 2021, **9**(1): 13-20.
- [119] Park H, Crozier K B. Multispectral imaging with vertical silicon nanowires[J]. *Sci Rep*, 2013, **3**: 2460.

作者简介



万源庆 (2000-), 女, 南京大学物理学院 2022 级硕士研究生, 主要从事微纳光学以及超构表面等方面的研究。

E-mail: 502022220142@smail.nju.edu.cn



【通信作者】王漱明 (1981-), 男, 2009 年于南京大学获得博士学位, 教授, 主要从事微纳光学、量子光学、超构表面设计和成像技术等方面的研究。

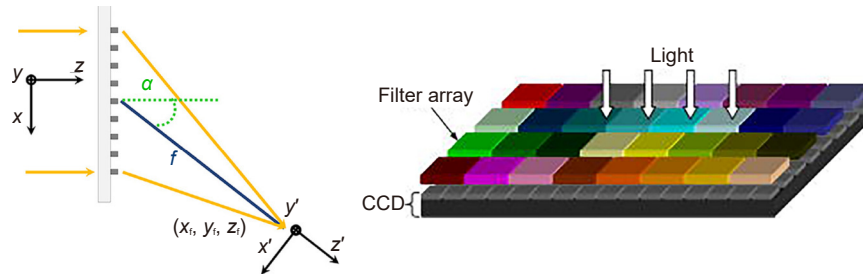
E-mail: wangshuming@nju.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Research progress and applications of spectral imaging based on metasurfaces

Wan Yuanqing, Liu Weijun, Lin Ruoyu, Yu Haoxiang, Wang Shuming*



Schematic diagram of spectral imaging based on metasurface

Overview: As the inherent characteristics of substances, spectra can be well used to identify the chemical composition of substances. Spectral imaging is a technology that combines spectral information with spatial information, having a wide range of applications in the fields of material analysis, food safety, medical diagnosis and biological imaging. However, traditional spectrometers are usually composed of prisms, gratings and other splitter devices. Limited by the diffraction effect, their spectral resolution is inversely proportional to the optical path. Therefore, they generally have the disadvantages of large size, high cost and complex optical path, and their application in compact devices is limited. Although there have been Fourier transform spectrometer, micro ring resonator and other research related to reducing spectrometer volume, they still have some problems, such as not being able to deal with very irregular spectral signals, spectral resolution is limited by manufacturing technology, which cannot solve the problem that the spectrometer is difficult to compact.

The metasurface is a kind of large area nano-structured surface composed of subwavelength small units, characterized by strong plasticity, high flexibility, and easy integration. The optical properties of the metasurface are determined by its micro - nano structure. By designing and optimizing the resonance phase, transmission phase, and geometric phase, metasurfaces can be used to effectively modulate the optical parameters of light on the plane, such as amplitude, phase, and polarization. Due to the excellent electromagnetic properties exhibited by metasurfaces, they can achieve complex functions that are difficult to achieve in conventional refraction and diffraction optics. The spectral imaging technology based on metasurfaces is an emerging optical imaging technology, which can perform high resolution and high sensitivity spectral imaging within micro imaging systems, providing an opportunity for achieving compact spectrometers. In this paper, we firstly discuss the spectral imaging of metasurfaces based on superdispersion, narrowband filtering and broadband filtering. Narrowband filtering includes three filtering methods: transmission type, absorption type and reflection type filtering, while broadband filtering includes two key steps: obtaining randomly distributed spectral curves and using spectral reconstruction algorithm to reconstruct spectrum. Compared with traditional spectrometers, the spectral imaging of metasurfaces based on superdispersion can reduce the volume of optical components to a certain extent, but it is difficult to balance integration and resolution. Narrowband filtering can be used for snapshot spectral cameras, but it has low light utilization and high technological requirements. Broadband filtering has high light utilization and strong spectral resolution, but it relies on spectral reconstruction algorithms, so it requires high algorithm requirements. Then, the recent applications of the spectral imaging based on metasurfaces are introduced, such as biosensing, medical diagnostics, and face recognition. Finally, the development direction and application prospects of the spectral imaging based on metasurfaces are prospected.

Wan Y Q, Liu W J, Lin R Y, et al. Research progress and applications of spectral imaging based on metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230139; DOI: [10.12086/oe.2023.230139](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230139)

Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation of China (11834007)

National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Physics, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

* E-mail: wangshuming@nju.edu.cn