中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

面向偏振成像的超构表面研究进展

周俊焯 郝佳 余晓畅 周健 邓宸伟 虞益挺

Recent advances in metasurfaces for polarization imaging

ZHOU Jun-zhuo, HAO Jia, YU Xiao-chang, ZHOU Jian, DENG Chen-wei, YU Yi-ting

引用本文:
周俊焯, 郝佳, 余晓畅, 周健, 邓宸伟, 虞益挺. 面向偏振成像的超构表面研究进展[J]. 中国光学, 2023, 16(5): 973–995. doi: 10.37188/CO.2022–0234
ZHOU Jun-zhuo, HAO Jia, YU Xiao-chang, ZHOU Jian, DENG Chen-wei, YU Yi-ting. Recent advances in metasurfaces for polarization imaging[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 973-995. doi: 10.37188/CO.2022-0234

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2022–0234

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超颖表面原理与研究进展
The principle and research progress of metasurfaces
中国光学（中英文）. 2017, 10(5): 523 https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0523

分孔径红外偏振成像仪光学系统设计
Design of decentered aperture–divided optical system of infrared polarization imager
中国光学（中英文）. 2018, 11(1): 92 https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0092

基于智能手机的眼底成像系统
Smartphone–based fundus imaging system
中国光学（中英文）. 2019, 12(1): 97 https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0097

超快激光制备生物医用材料表面功能微结构的现状及研究进展
Surface functional microstructure of biomedical materials prepared by ultrafast laser: a review
中国光学（中英文）. 2019, 12(2): 199 https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0199

3种主动合成孔径成像技术极限探测能力的分析与比较
Analysis and comparison of limit detection capabilities of three active synthetic aperture imaging techniques
中国光学（中英文）. 2019, 12(1): 138 https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0138

LED微阵列投影系统设计
Design of projection system for a micro–LED array
中国光学（中英文）. 2019, 12(1): 88 https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0088

文章编号　2097-1842(2023)05-0973-23

面向偏振成像的超构表面研究进展

周俊焯[1,2,3], 郝　佳[1,2,3], 余晓畅[1,2,3], 周　健[4], 邓宸伟[5], 虞益挺[1,2,3]*
（1. 西北工业大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315103；
2. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072；
3. 空天微纳系统教育部重点实验室 陕西省微纳机电系统重点实验室,
陕西 西安 710072；
4. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065；
5. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081）

摘要: 作为一种新型光电探测技术, 偏振成像可同时获取场景的空间分布和偏振特征, 针对特定应用场景具有优异的材质区分及轮廓辨识能力, 广泛应用于目标探测、生命科学、环境监测、三维成像等领域。偏振分光或滤光器件是偏振成像系统的核心元件, 然而该类传统器件受限于体积庞大、性能不佳、易受干扰等问题, 难以满足高集成、高性能、高可靠性偏振成像系统的要求。超构表面是一种结构单元以亚波长间隔准周期排列而成的二维平面器件, 可在不同偏振方向对光场的振幅、相位进行精细操纵。基于超构表面的偏振器件具有体积小、重量轻、维度高等特点, 为集成化偏振成像系统提供了新的解决方案。本文针对偏振成像, 综述相关超构表面的功能原理、发展脉络和未来趋势, 讨论并展望其在成像应用和系统集成方面所面临的挑战与机遇。

关　键　词: 光学器件; 微纳结构; 超构表面; 偏振成像; 成像系统
中图分类号: O436.1;O436.3　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2022-0234

收稿日期: 2022-11-16; **修订日期:** 2022-12-23
基金项目: 国家自然科学基金(No. 51975483); 陕西省重点研发计划(No. 2020ZDLGY01-03); 宁波市自然科学基金(No. 202003N4033); 深圳市虚大自由探索项目(No. 2021Szvup112); 深圳市虚拟实验室建设项目(No. YFJGJS1.0)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51975483); Key Research and Development Projects of Shaanxi Province (No. 2020ZDLGY01-03); Natural Science Foundation of Ningbo (No. 202003N4033); Science and Development Program of Local Lead by Central Government, Shenzhen Science and Technology Innovation Committee (No. 2021Szvup112); Science, Technology and Innovation Commission of Shenzhen Municipality (No. YFJGJS1.0)

Recent advances in metasurfaces for polarization imaging

ZHOU Jun-zhuo[1,2,3], HAO Jia[1,2,3], YU Xiao-chang[1,2,3], ZHOU Jian[4], DENG Chen-wei[5], YU Yi-ting[1,2,3 *]

（1. *Ningbo Institute of Northwestern Polytechnical University*, *Ningbo* 315103, *China*;
2. *School of Mechatronic Engineering*, *Northwestern Polytechnical University*, *Xi'an* 710072, *China*;
3. *Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace (Ministry of Education)*, *Key Laboratory of Micro and Nano-Electro-Mechanical Systems of Shaanxi Province*, *Northwestern Polytechnical University*, *Xi'an* 710072, *China*;
4. *Xi'an Modern Control Technology Research Institute*, *Xi'an* 710065, *China*;
5. *School of Information and Electronics*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*）
∗ *Corresponding author*, *E-mail*: *yyt@nwpu.edu.cn*

Abstract: Polarization imaging, a novel photoelectric detection technology, can simultaneously acquire the contour information and polarization features of a scene. For specific application scenarios, polarization imaging has the excellent ability to distinguish different objects and highlight their outlines. Therefore, polarization imaging has been widely applied in the fields of object detection, underwater imaging, life science, environmental monitoring, 3D imaging, etc. Polarization splitting or the filtering device is the core element in a polarization imaging system. The traditional counterpart suffers from a bulky size, poor optical performance, and being sensitive to external disturbances, and can hardly meet the requirements of a highly integrated, highly functional, and highly stable polarization imaging system. A metasurface is a two-dimensional planar photonic device whose comprising units are arranged quasi-periodically at subwavelength intervals, and can finely regulate the amplitude and phase of the light field in different polarization directions. Polarization devices based on metasurface are featured with compactness, lightweight and multi-degree freedom, offering an original solution to ultracompact polarization imaging systems. Targeted at the field of polarization imaging, this paper illustrates the functional theory, developmental process and future tendency of related metasurfaces. We discuss the challenges and prospect on the future of imaging applications and systematic integrations with metasurfaces.

Key words: optical device; micro-nano structure; metasurface; polarization imaging; imaging system

1 引 言

偏振成像在信息获取维度上不同于光强或光谱等传统成像技术，不仅能采集场景的二维空间分布信息，还可获取偏振度、偏振角和椭圆度等偏振特性参量。偏振双向反射分布函数[1-5]表明：散射光的偏振特性与物体表面的形貌特征和理化性质密切相关。通过分析散射光的偏振信息，可以定性地区分形貌特征和理化性质不同的物体，或定量地解算物体表面诸如粗糙度、表面法向、光学常数等本征属性[6-9]。因此，偏振成像技术在目标探测[10-11]、水下成像[12-15]、生命科学[16-17]、环境监测[18-19]、三维成像[20-21]等领域具有广阔的应用前景。在民用领域，偏振成像技术能够用于消除反光[22-24]、穿云透雾[25-26]、道路检测[27-28]、细胞鉴定[29]等，从而助力智慧工业、智慧交通和智慧医疗的发展。在军事领域，偏振成像技术可应用于机载或星载光电探测系统[30-31]、制导武器的导引系统[32]和可穿戴式红外成像仪[33]，从而提升战场态势分析、战术战略预警和目标精确打击等作战效能。随着搭载平台小型化、工作环境极端

化、应用需求多样化的发展趋势，亟需研制高集成、高性能和高可靠性的偏振成像系统。

为解算场景的偏振态信息，偏振成像系统需要采集多幅偏振态互异的强度影像，其中偏振分光或滤光器件起到关键作用。它不仅决定偏振成像系统的探测模式、谱段范围和分辨率等光学性能，也在很大程度上影响了系统整机的架构、体积、质量等指标[34-35]。传统的偏振分光或滤光器件有偏振分光棱镜、染料系偏振片等。偏振分光棱镜将水平偏振和垂直偏振的光分别送入不同偏振成像通道，可构成分振幅型偏振成像系统[36-37]。然而，偏振分光棱镜自身体积较大，且不同偏振通道需要有独立的光学元件和探测器，使得该类系统体积庞大、难以集成。染料系偏振片采用定向排列的二色性染料分子实现偏振滤光[38]，可作为单向偏振滤光器集成于分时型偏振成像系统中[39]，也可利用染料分子和液晶分子的宾主效应构成微偏振阵列集成于分焦平面型偏振成像系统中[40-42]。然而染料分子消光比不高，其二色性吸收性能对光波波长较为敏感[43]，且在电场、磁场、热场和应力的刺激下容易失效[44]。因此，基于染料分子的偏振滤光器件具有消光比低、工作带宽窄、性能不稳定等缺点，难以满足在极端工作环境下宽波段、高对比度的偏振成像需求。

随着微纳加工技术的发展，利用微纳加工工艺在半导体衬底上制备微纳结构以调控光场偏振特性的光功能器件，因其轻量化、集成度高、结构稳定性好等优点受到了研究人员的青睐[45]。早期的微纳结构偏振器件主要为亚波长金属线栅。亚波长金属线栅是由亚波长间距的平行金属线条周期性排列构成的通过亚波长周期保证仅存在强偏振特性的零级衍射波[46-47]。根据等效介质理论[48-49]，亚波长金属线栅对 TM 偏振光和 TE 偏振光分别体现出介质膜和金属膜的特性，从而实现偏振滤波的功能。研究表明[50-53]：亚波长金属线栅具有入射角范围大、消光比高、耐热性好和工作带宽大等优点。目前，亚波长金属线栅的发展较为成熟，已实现从可见光波段到红外波段的产品系列化。例如，Thorlabs 的可见光线栅偏振片，在 420~700 nm 的波段内，可实现 800 的消光比和大于 83% 的 TM 偏振透过率；长波红外线栅偏振片，在 7~15 μm 的波段内，可实现 10 000 的消光比和大于 75% 的 TM 偏振透过率。此外，将像素尺寸大小的亚波长金属线栅进行多方向组合，并进行周期性排列，可得到微偏振阵列[54-57]，实现分焦平面偏振成像[58]。2018 年，Sony 公司推出用于工业相机的偏振图像传感器 IMX250MZR，其单个超像素包含 0°, 45°, 90°, 135°方向的亚波长金属线栅子像元，分辨率为 2 448×2 048，消光比达到 300。然而，由于仅允许 TM 偏振光透过、TE 偏振光反射的工作机理，该类器件的能量利用效率极限仅为 50%，使得基于亚波长金属线栅或微偏振阵列的偏振成像系统在低环境照度场景的应用受到限制。突破亚波长金属线栅能量利用效率极限的关键在于同时利用 TM 偏振光和 TE 偏振光，这势必会增加偏振器件的结构维度，而超构材料（Metamaterials）的出现为解决这一难题提供了新的范式。

超构材料是通过对天然材料进行加工，在其表面或内部形成周期性排列的亚波长结构阵列获得的[59]。由于其性质源于内部的微观结构，而非化学组成，通过调整亚波长单元的几何参数和组合方式，可以获得自然界中不存在的电磁响应性质。2001 年，加州大学的 Smith 等[60] 采用印刷电路板工艺，以铜线和开口谐振环的组合图形为结构单元，制造出具有负介电常数和负磁导率的结构，实验验证了 1968 年 Veselago[61] 对左手材料的预测。另一方面，超构材料具有多维结构自由度，允许在不同偏振方向和波段范围对光场的振幅及相位参量进行独立调控，其作为微纳光场调控器件表现出巨大潜力。然而，目前三维超构材料的加工[62] 主要通过印刷电路板工艺、机械加工及组装、3D 打印技术和微纳加工技术。其中，前 3 种制造技术能获得的结构单元特征尺寸在毫米量级，主要用于微波波段超构材料的制造。微纳加工技术利用多层掩模版套刻的方法，逐层制造特征尺寸为微米量级甚至百纳米量级的复杂三维结构，但制造难度大、工艺成本高、加工周期长。因此，超构表面作为超构材料的二维平面形式，兼具工艺可实施性和光场多维调控能力，成为研究人员新的追逐方向。基于超构表面的偏振器件可同时调控光场的 TM 偏振和 TE 偏振分量，从而

理论上使器件的能量利用效率突破 50%。本文面向偏振成像领域，以能量利用效率为主线，阐述相关超构表面器件的功能原理、发展脉络和未来趋势，讨论并展望其在成像应用和系统集成方面所面临的挑战与未来发展趋势。

2 面向偏振成像的超构表面器件

超构表面是结构单元以亚波长间隔按准周期方式排列而成的二维平面器件，通过对入射光波施加离散的相位突变和振幅分布，以实现超常的光场调控功能[63-64]。其中间隔选定（$\lambda/10$）亚波长避免因间距过大而导致的散射效率不足，以及因间距过小而导致的相邻单元发生电场耦合，进而实现对光场相位、振幅等参量在亚波长量级的精细操纵。超构表面调控光场的研究热潮兴起于 2011 年哈佛大学 Capasso 课题组的一项研究工作[65]。该工作基于费马原理提出广义斯涅尔定律，指出在两介质的交界面上对光波施加离散的相位突变即可调控波前，并基于 V 型等离激元天线结构设计了波束偏转器和涡旋相位板。超构表面体现出对光场精细调控的能力，引起科研人员对于微纳光子学器件浓厚的研究兴趣，由此基于超构表面的波片[66-69]、偏振调控全息[70-71]、特殊光场生成器[72-74] 等器件被陆续提出。

在偏振成像领域，基于超构表面的偏振器件可分为光栅型和透镜型两类[75]。光栅型偏振成像超构表面将不同偏振态的光映射到光栅的不同衍射级次，通过搭配后置透镜会聚光束到探测器焦平面，从而实现分孔径型偏振成像；透镜型偏振成像超构表面则将入射光按照预设的偏振态分束，并分别会聚到指定焦点位置处，可实现分焦平面型或分孔径型偏振成像。两者均有望代替亚波长金属线栅集成到偏振成像系统中，并突破后者的能量利用效率极限。尽管超构表面能对 TM 偏振光和 TE 偏振光进行空间复用，但其能量利用效率的提升并非一蹴而就。构成超构表面的基本单元经历了从等离激元结构，到间隙表面等离激元结构，最后到全电介质结构的演变过程。

2.1 基于等离激元结构

早期的超构表面采用金或银等金属材料作为其结构材料，这是因为它们具有高的电子密度和电导率，使其在红外或微波波段具有良好的性能表现[76]。但在可见光波段，电磁波频率接近自由电子共振频率，电磁波入射金属结构会引起金属内部自由电子的集体振荡，即等离激元现象[77]，导致入射波能量转化为自由电子振动能量，从而使基于等离激元结构的超构表面体现出很强的金属损耗，通常其能量利用效率不会超过 10%[78-79]。为提高超构表面的能量利用效率，研究人员采用间隙表面等离激元结构设计超构表面[80]。间隙表面等离激元（Gap-Surface Plasmon, GSP）结构是在金属纳米谐振器和金属膜层之间插入亚波长厚度的电介质隔层[81]，通过电介质隔层上下两侧的表面等离激元耦合实现光场增强[82-83]，从而提高器件的光能利用效率。2015 年，南丹麦大学的 Pors 等[84] 基于 GSP 结构研制了近红外波段全斯托克斯光栅型偏振分光超构表面，如图 1（彩图见期刊电子版）所示。由图 1（a）可知，该光栅由 3 组相互交织的微纳结构阵列构成。如图 1（b）所示，每组阵列的相位梯度不同，可分别调控 (x, y)、(a, b)、(l, r) 正交偏振态，从而实现各组正交偏振态的分光反射。通过测定不同衍射方向的光强度，可以解构入射光的全斯托克斯偏振参量。遗憾的是，未被分光的零级衍射光大约占据光能量的 40%，导致器件的能量利用效率较低。同年，普渡大学的 Shaltout 等[85] 基于 Au(30 nm) - Al_2O_3(50 nm) - Au(50 nm) 的 GSP 结构制备了光栅型圆偏振分光超构表面。该超构表面利用光子自旋霍尔效应实现左旋偏振光和右旋偏振光的反射分光，并具有角度色散的功能，如图 1（c）所示，可在 1 500 mm处实现 40% 的能量利用效率。2017 年，南丹麦大学的 Boroviks 等[86] 基于 Au(50 nm) - SiO_2(50 nm) - Au(150 nm) 的 GSP 结构构造了透镜型偏振分光超构表面，其能够反射分离正交偏振态并聚焦于不同焦点位置，如图 1（d）所示。器件的工作波段为 750~950 nm，偏振消光比达到 30 dB，能量利用效率为 65%。然而，基于等离激元结构或间隙表面等离激元结构的超构表面，为实现较高的能量利用效率，需要工作于反射模式下[87-88]，这增加了器件与光学系统集成的难度[89]。

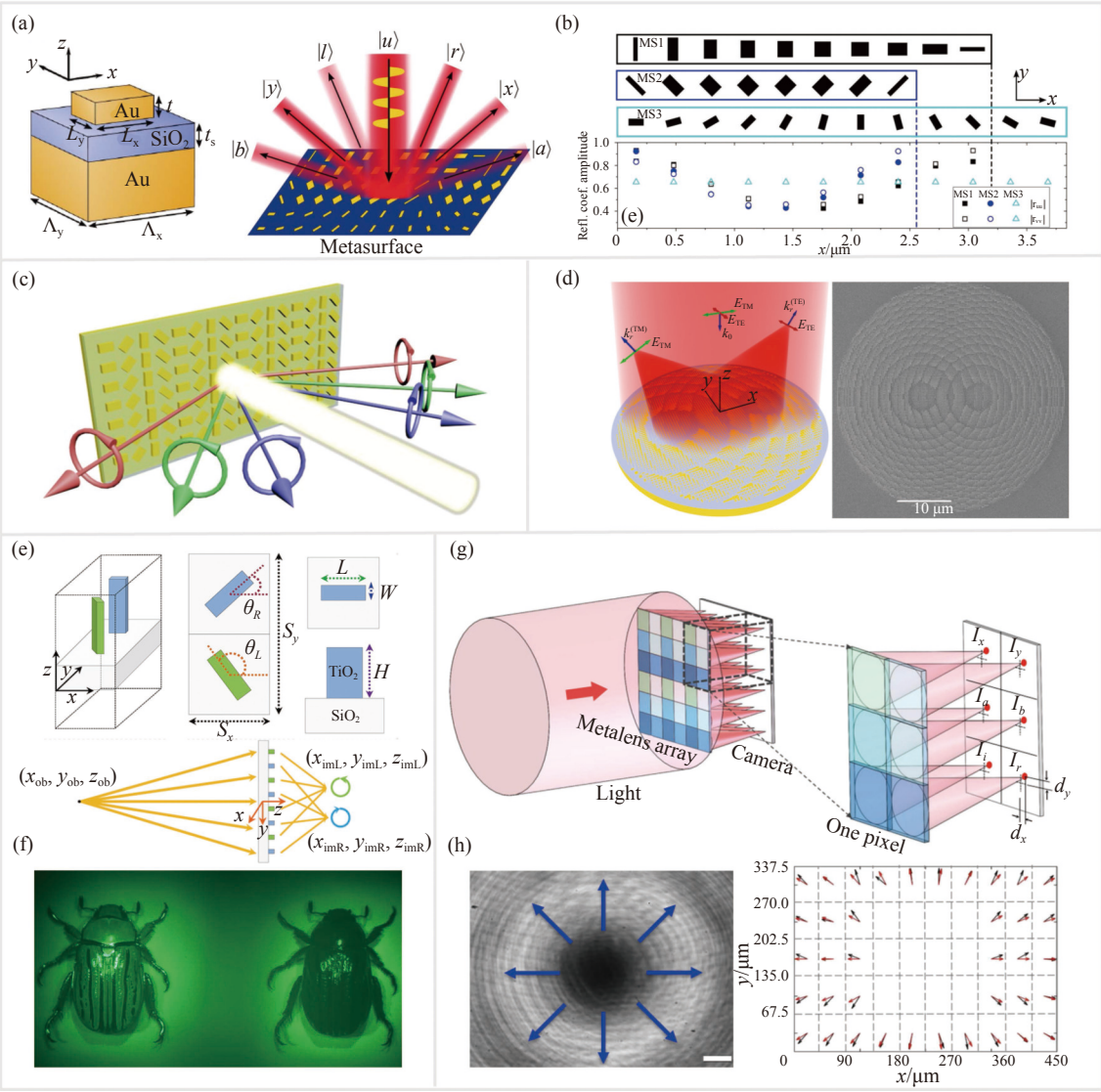

图 1　基于等离激元结构和全电介质结构的超构表面。(a)基于 GSP 结构的全斯托克斯偏振测定光栅型超构表面[84]; (b)该光栅型超构表面由 3 组相位梯度不同的微纳结构阵列组成, 可调控 (x, y)、(a, b)、(l, r) 正交偏振态[84]; (c)基于 GSP 结构的光栅型圆偏振分光超构表面[85]; (d)基于 GSP 的透镜型偏振分光超构表面[86]; (e)超构单元包含 2 种 TiO_2 微纳结构, 分别调控左旋和右旋偏振光[92]; (f)圆二色性甲虫外骨骼成像实验[92]; (g)超像元由分别会聚 x, y, a, b, l, r 偏振态的超构透镜组成[93]; (h)该超构表面可作为 Hartmann-Shack 波前传感器, 径向偏振光的强度分布(左), 解析得到的偏振轮廓图(右)[93]

Fig. 1　Metasurfaces based on plasmonic and all dielectric structures. (a) Metagrating based on a GSP structure for the determination of full Stokes parameters[84]; (b) the metagrating consists three kinds of micro-nano structure arrays with different phase gradients, which can manipulate orthogonal polarization states (x, y), (a, b), (l, r)[84]; (c) circular polarization splitting GSP-based metagrating[85]; (d) polarization splitting and focusing metasurface GSP-based metalens[86]; (e) meta-atom includes two kinds of TiO_2 nano-micro structures manipulating left-handed and right-handed circular polarization light, respectively; (f) polarization image of the exoskeleton of a chiral beetle[92]; (g) meta-pixel is composed of metalenses focusing x, y, a, b, l, r polarization states, respectively[93]; (h) the metasurface can be served as Hartmann-Shack wavefront sensor, intensity distribution of radially polarized beam (left), and calculated polarization profile (right)[93]

2.2　基于全电介质结构

为进一步提高能量利用效率, 并获得可工作于透射模式的偏振分光超构表面, 研究人员考虑使用低损耗的电介质材料作为超构表面的结构材料[90-91]。由于避免导体电子与光波作用产生的等离激元现象, 电介质结构单元对光场的振幅和相

位调制量随结构尺寸的变化较为平滑，不存在振幅相位突变点，这有助于结构单元排列。2016 年，哈佛大学的 Khorasaninejad 等[92] 基于几何相位原理设计了单透镜型偏振分光超构表面，通过间隔排列两种不同的 TiO_2 纳米结构阵列，实现左旋、右旋圆偏振光的分束聚焦功能，如图 1(e)所示。在线偏振光入射条件下，该器件的能量利用效率达到 45%。为了得到合适的视场范围以对甲虫整体进行成像，器件的设计焦距为 3 cm，导致较小的数值孔径（NA=0.05），因而图像分辨率较低。从图 1(f)的甲虫外骨骼成像图中可见：该透镜型偏振分束超构表面将探测器焦平面分为左右两个部分，每个部分呈现偏振态不同的场景图像，类似分孔径型偏振成像系统得到的图像。另一种工作模式是使超构表面同时集成微偏振阵列和微透镜阵列的功能，从而实现分焦平面型偏振成像。2018 年，华中科技大学的杨振宇课题组[93] 研制了一款硅基透镜阵列型偏振滤光超构表面，超构表面的超像元由 6 个分别聚焦 x, y, a, b, l, r 偏振态的超构透镜组成，如图 1(g)所示，通过获取超像素焦点处的强度信息解算全斯托克斯偏振参量。由于光束的相位梯度会引起焦点位移，通过测量焦点偏移量 (d_x, d_y) 可还原入射光束的波前信息，因此该超构表面也可作为 Hartmann-Shack 波前传感器，图 1(h)展示了径向偏振光入射时，解析得到的偏振轮廓图案。仿真结果表明：该器件在 1 550 nm 偏振光入射下能达到 60% 的能量利用效率，但实测值仅为 28%。仿真结果与测试结果不一致的原因在于：1. 加工制造上存在误差，若器件设计对形貌公差较为敏感，则会出现仿真结果和实测结果差异较大的情况；2. 仿真过程利用了局部周期性假设，但实际上相邻单元之间形状各异，并非完全周期。

2.3 基于几何相位和传输相位

由于电介质材料具有较大的折射率和较小的衰减系数，因此电介质超构表面可以避免欧姆损耗和材料色散等问题[94]。此外，电介质超构表面的制造工艺与半导体金属氧化物制造工艺兼容，有望实现光功能芯片和电子电路芯片的一体化集成[95-97]。然而，上述超构表面设计通过交织排列对不同偏振态光进行调控的微纳结构阵列，从而实现多种偏振态的分束聚焦，这种分割孔径的设计方法或对单偏振模态进行滤光的工作机理使其能量利用效率极限仅为 50%，未能充分展现超构表面多维光场联合调控的优势。利用几何相位和传输相位相结合的光场调控方法可实现对正交偏振态的同时调制，进而突破传统方法的能量利用效率极限。对于几何相位，电磁波在偏振态转换过程中，各向异性结构的几何旋转会使之产生一个额外的相位，由印度科学家 Pancharatnam[98] 于 1956 年和英国理论物理学家 Berry[99] 于 1984 年分别独立研究发现，故也称为 Pancharatnam-Berry 相位。具体推导如下[100]：假定偏振光沿主轴方向入射时不存在正交偏振转换，即初始琼斯矩阵副对角线上的元素为零。那么旋转亚波长谐振单元的琼斯矩阵 $\mathbf{J}(\theta)$ 为：

$$\begin{aligned}&\mathbf{J}(\theta)=\\&\mathbf{R}(-\theta)\begin{pmatrix}t_{\mathrm{o}} & 0\\ 0 & t_{\mathrm{e}}\end{pmatrix}\mathbf{R}(\theta)=\\&\begin{pmatrix}\cos\theta & -\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta\end{pmatrix}\begin{pmatrix}t_{\mathrm{o}} & 0\\ 0 & t_{\mathrm{e}}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta\end{pmatrix}=\\&\begin{pmatrix}t_{\mathrm{o}}\cos^2\theta+t_{\mathrm{e}}\sin^2\theta & (t_{\mathrm{o}}-t_{\mathrm{e}})\sin\theta\cos\theta\\ (t_{\mathrm{o}}-t_{\mathrm{e}})\sin\theta\cos\theta & t_{\mathrm{o}}\sin^2\theta+t_{\mathrm{e}}\cos^2\theta\end{pmatrix},\end{aligned}\tag{1}$$

式中：θ 为亚波长单元的主轴转角；t_{o} 和 t_{e} 为偏振光沿亚波长结构两个主轴的复透射系数；$\mathbf{R}(\theta)$ 为旋转矩阵。当左/右旋单位圆偏振光 $\hat{\mathbf{e}}_{\mathrm{L/R}}$ 入射时，透射电场的琼斯矢量 $\mathbf{E}^{\mathrm{t}}_{\mathrm{L/R}}$ 为：

$$\begin{aligned}\mathbf{E}^{\mathrm{t}}_{\mathrm{L/R}}=&\mathbf{J}(\theta)\cdot\hat{\mathbf{e}}_{\mathrm{L/R}}=\\&\frac{t_{\mathrm{o}}+t_{\mathrm{e}}}{2}\cdot\hat{\mathbf{e}}_{\mathrm{L/R}}+\frac{t_{\mathrm{o}}-t_{\mathrm{e}}}{2}\cdot e^{\pm i2\theta}\cdot\hat{\mathbf{e}}_{\mathrm{R/L}}\quad.\end{aligned}\tag{2}$$

因此，透射电场包含原偏振项（$\hat{\mathbf{e}}_{\mathrm{L/R}}$）和正交偏振项（$\hat{\mathbf{e}}_{\mathrm{R/L}}$），且旋转单元对正交偏振项施加几何相位 2θ，从而实现入射光的自旋解耦相位调控。为使正交偏振项的转换效率达到最大，通常要求结构单元两主轴复透射系数的模值相等且相位差为 π，即令 $(t_{\mathrm{o}}+t_{\mathrm{e}})$ 等于零。传输相位是电磁波在结构中传播时所产生的相位，即 $(t_{\mathrm{o}}-t_{\mathrm{e}})$ 所携带的相位量，根据等效介质理论，改变结构占空比和单元高度可以控制传输相位。综上所述，几何相位和传输相位均为独立的可调量，故可实现两正交偏振态的同时调制。

2015 年，加州理工学院的 Faraon 课题组[101] 基于传输相位和几何相位相结合的光场调控方

法, 利用非晶硅纳米椭圆柱构建超构表面(图 2, 彩图见期刊电子版)。非晶硅纳米椭圆柱具有 2 个结构自由度和 1 个面内旋转自由度, 能独立对两正交偏振态进行振幅和相位调控, 如图 2(a)所示。该课题组分别设计了光栅型偏振分光超构表面、透镜型偏振分光超构表面、偏振调控全息超构表面和偏振调控特殊光场生成超构表面, 如图 2(b)所示。实验结果表明: 基于几何相位和传输相位原理的非晶硅超构表面, 其能量利用效率在 72%~97%, 相较于此前的超构表面有极大提升。此外, 该文章的补充文档详细推导了电介质超构表面多维光场参量调控机理, 指出: 1. 两正交

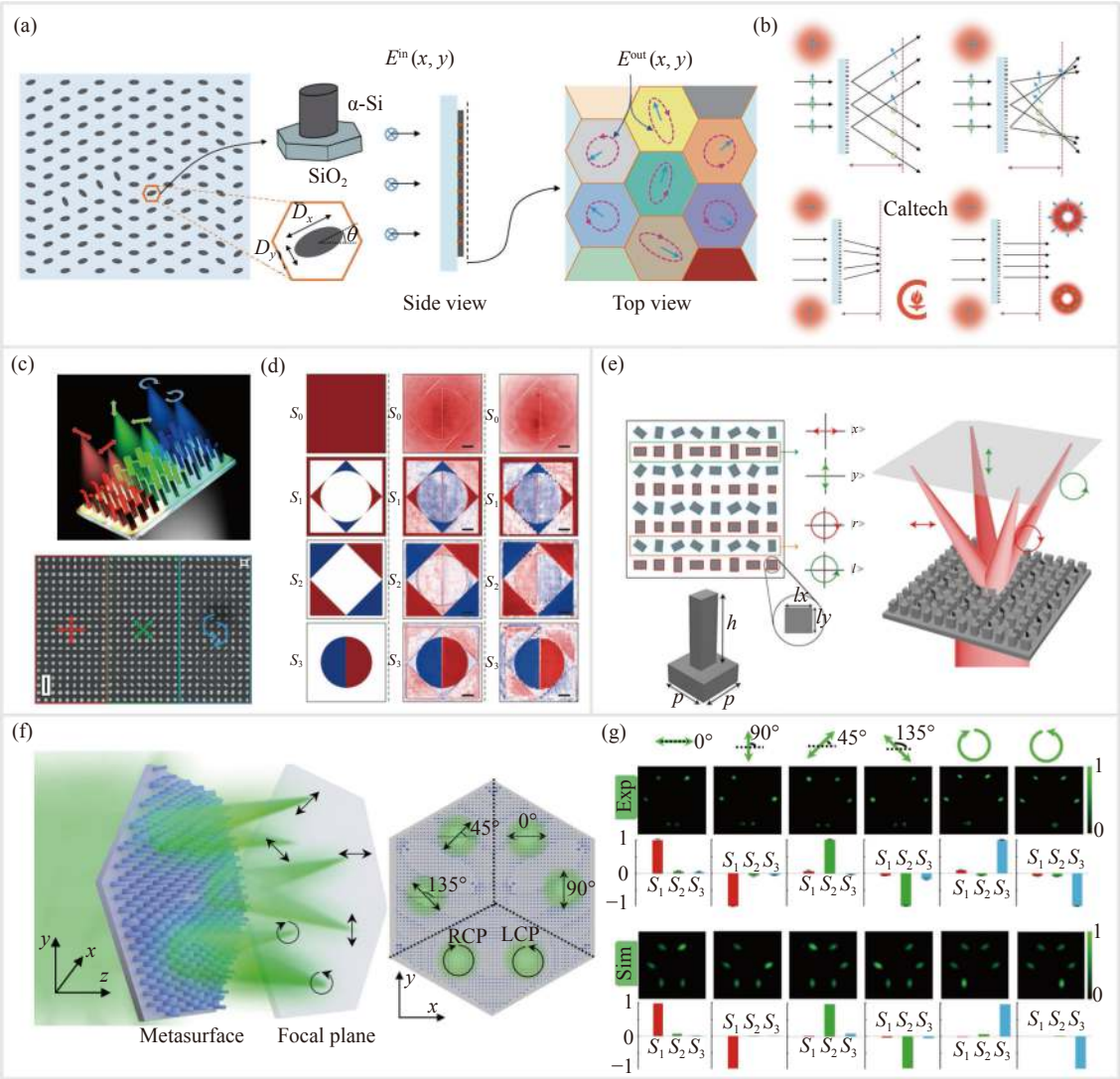

图 2　基于几何相位和传输相位原理的全电介质超构表面。(a)由非晶硅纳米椭圆柱构建的超构表面[101]; (b)光栅型偏振分光超构表面、透镜型偏振分光超构表面、偏振调控全息超构表面和偏振调控特殊光场生成超构表面[101]; (c)透镜阵列型偏振分光超构表面[102]; (d)目标偏振图案(左)、基于常规偏振成像方法得到的偏振图案(中)、基于超构表面得到的偏振图案(右)[102]; (e)单透镜型偏振分光超构表面[103]; (f)3 块偏振分光超构透镜拼成的超构表面[104]; (g)6 种基本偏振态入射, 超构表面的偏振分束聚焦效果实验与仿真的比较[104]

Fig. 2　All dielectric metasurface based on geometric phase and propagation phase theory. (a) The metasurface is composed of elliptical amorphous silicon posts[101]; (b) polarization splitting metagrating, polarization splitting metalens, polarization-dependent holographic metasurface and polarization-dependent special optical field metasurface[101]; (c) polarization splitting metalens array[102]; (d) targeted polarization mask (left), the fabricated mask imaged using conventional polarimetry (middle), the same mask imaged using the metasurface (right)[102]; (e) polarization splitting metalens[103]; (f) planar metasurface consisting of three polarization splitting metalenses[104]; (g) the comparison of measured and simulated results of the metasurface focusing effect with the incidence of six basic polarization states[104]

偏振方向任意的相位变换可用对称且幺正的琼斯矩阵进行表示；2. 若可自由选择单元对正交主轴方向偏振光施加的相位角 (ϕ_x, ϕ_y) 以及单元的面内旋转角 θ，那么由此构成的超构表面，其琼斯矩阵是对称且幺正的。2018 年，该课题组[102] 制备了全斯托克斯偏振测定的透镜阵列型偏振分光超构表面，其每个超像元对应 6 个探测器像元，包含 3 个分别对 (x, y)、(a, b)、(l, r)进行偏振分光的超构透镜，每个偏振分光超构透镜能对正交偏振态分束并聚焦到不同焦点位置，如图 2(c)所示。超像元周期性排列组合构成整块超构表面，其与探测器集成后可用于偏振成像，如图 2(d)所示。但由于大尺寸超构表面加工难度大，基于超构表面偏振成像的图像像素数远小于常规偏振成像方法，前者图像相较于后者略显模糊。值得注意的是，实验测定表明该超构表面在可见光波段的能量利用效率为 60%~65%，突破了亚波长金属线栅的能量利用效率极限。

传输相位和几何相位相结合用于调控光场的方法，也可用于构造单透镜型偏振分光超构表面，实现分孔径偏振成像。2019 年，中国科学院光电技术研究所的罗先刚课题组[103] 研制了工作于长波红外波段的单透镜型偏振分光超构表面。其通过交织排列对线偏振光调控和对圆偏振光调控的微纳结构阵列，将 x, y, l, r 偏振态的光会聚到焦平面的 4 个象限处，如图 2(e)所示。实验结果表明其在 10.6 μm 波长的能量利用率为 53%。遗憾的是，上述 4 种偏振态仅可测定部分斯托克斯偏振参量。2022 年，南京大学的 Ren 等[104] 将超构表面分为 3 块区域，分别为 (x, y)、(a, b)、(l, r) 用于对正交偏振态进行偏振分光，如图 2(f)所示。结合探测器焦平面，该超构表面能实现全斯托克斯偏振测定的功能，各偏振通道之间没有明显的串扰，如图 2(g)所示，实验结果表明其在 530 nm 工作波段下的能量利用效率为 54%。

2.4 超构表面系统集成研究

器件研究的最终目的是其系统集成。2019 年，哈佛大学的 Rubin 等[105] 基于矩阵傅立叶光学设计光栅型偏振分光超构表面，并将其集成于相机系统，实现偏振成像。不同于传输相位和几何相位相结合的超构表面设计方法，基于矩阵傅立叶光学的光栅型偏振分光超构表面可定制分光任意偏振态，如图 3(a)所示，通过搭配后置透镜可实现分孔径型偏振成像，如图 3(b)所示。该课题组研制的偏振相机能对 4 种非常规偏振态进行成像，4 种非常规偏振态如图 3(c)所示，相机系统及其成像效果如图 3(d–f)所示。2022 年，该课题组[106] 基于同样原理研制了全斯托克斯偏振测定功能模块，可直接装配到手机镜头前，如图 3(g)所示，使偏振成像超构表面向产业化应用更迈进一步。

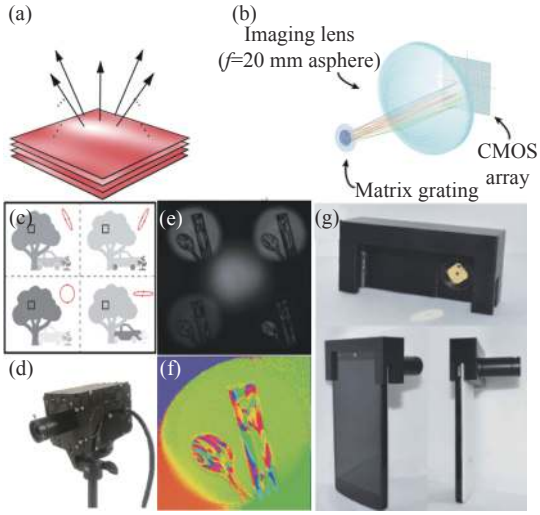

图 3 基于矩阵傅立叶光学的光栅型偏振分光超构表面的原理、成像及系统。(a)光栅型偏振分光超构表面原理图[105]；(b)搭配后置透镜和探测器可实现偏振成像[105]；(c)4 种非常规偏振态[105]；(d)集成该超构表面的全斯托克斯偏振成像系统[105]；(e)偏振测定图像[105]；(f)偏振角图像[105]；(g)全斯托克斯偏振测定模块[106]

Fig. 3 Theory, imaging and system of a polarimetric metagrating based on matrix Fourier optics. (a) Theoretical model of a polarimetric metagrating[105]; (b) combination with a rear lens and a detector can achieve polarization imaging[105]; (c) four kinds of unconventional polarization states[105]; (d) full Stokes polarization imaging system integrated with the metagrating[105]; (e) polarimetric measurement image[105]; (f) angle of polarization image[105]; (g) full Stokes polarimetric module[106]

本节以能量利用效率为主线，介绍基于等离激元结构和全电介质结构的偏振成像超构表面。两种超构表面按照其功能形式，可分为光栅型和透镜型，透镜型偏振成像超构表面根据其结构形式又可分为单透镜型和透镜阵列型；按照其工作机制，可分为滤光型和分光型。表 1 列出了本节详细阐述的超构表面的工作波段、能量效率、工作模式、制备材料、加工工艺及其功能形式。

表 1　本节详细阐述的超构表面特性比较

Tab. 1　Features comparison of elaborated metasurfaces in this section

Work by	Operation Bandwidth	Energy Efficiency	Working Mode	Materials Involved	Fabrication Method	Functional Type
Pors et al. (2015)[84]	700-1000 nm	≈50%	reflection	Au,SiO_2	EBL + lift-off + EBD	PSMG
Shaltout et al. (2015)[85]	1.2-1.7 μm	<40%	reflection	Au,Al_2O_3	EBL + lift-off +EBD	PSMG
Boroviks et al. (2017)[86]	750-950 nm	≈65%	reflection	Au,SiO_2	EBL + lift-off + EBD	PSML
Khorasaninejad et al. (2016)[92]	visible	<45%	transmission	TiO_2,SiO_2	EBL + lift-off + ALD	PSML
Yang et al. (2018)[93]	1550 nm	≈28%	transmission	Si,SiO_2	EBL + ICP etching	PFMLA
Arbabi et al. (2018)[101]	850 nm	60%-65%	transmission	α-Si,SiO_2	EBL + lift-off + RIE	PSMLA
Yan et al. (2019)[103]	10.6 μm	≈53%	transmission	Si	LDW + ICP etching	PSML
Rubin et al. (2019)[105]	visible	>50%	transmission	TiO_2,SiO_2	EBL + lift-off + ALD	PSMG
Ren et al. (2022)[104]	530 nm	≈54%	transmission	TiO_2,SiO_2	EBL + lift-off + ALD	PSML

Abbreviations: Electron Beam Lithography, EBL; Electron Beam Deposition, EBD; Atomic Layer Deposition, ALD; Inductively Coupling Plasma, ICP; Reactive Ion etching, RIE; Laser Direct Writing, LDW; Polarization splitting metagrating, PSMG; Polarization splitting metalens, PSML; Polarization filtering metalens array, PFMLA; Polarization splitting metalens array, PSMLA.

3　未来发展方向

不论何种功能类型的超构表面器件，其底层机理都是微纳结构单元在该点处对光场两正交偏振方向的振幅和相位调制，最终使得整块超构表面的光学响应等于各离散点光学响应在空间上的线性叠加，因此超构表面的设计可以归结于超构单元及其排列方式的设计。超构表面的未来发展就是以超构单元为切入点，对其材料、性态、结构、排列等属性进行优化，例如耦合波导超构单元设计、机器学习辅助超构单元排列、基于活性材料的超构单元设计等。面向偏振成像的超构表面在上述发展趋势的共性中体现出个性，表现为对工作波段、偏振性能、设计效率和可调特性的紧密关切。目前，超构透镜是超构表面产业化的主流方向，许多宽带消色差、机器学习辅助设计和动态可调研究是针对超构透镜的，但是“千举万变，其道一也”，面向超构透镜的优化设计方法对偏振成像超构表面也极具参考价值，尤其是透镜型偏振成像超构表面。本节将介绍超构透镜在宽带消色差、机器学习辅助设计和动态可调方面的研究工作，并着重阐述这些研究方法对偏振成像超构表面所具备的可迁移性。

3.1　大带宽消色差偏振成像超构表面

超构表面器件具有色散效应，一方面是由于电磁波传播过程中的累积相位与波长相关，另一方面是超构单元的电磁响应特性受波长影响[107-108]。不同于传统折射光学元件，超构表面对电磁波的偏折角随波长增大而增大，呈现反常色散现象。对于超构透镜，其波长依赖的焦距导致像平面产生色差，严重影响成像质量。目前已有许多针对超构透镜的宽带消色差方法，主要思路是使各个位置处超构单元的色散特性满足超构透镜随波长变化的聚焦相位需求[109]。2015 年，哈佛大学的 Aieta 等[110] 利用耦合矩形电介质谐振器调控单元的近场耦合模式(图 4，彩图见期刊电子版)，如图 4(a)所示，从而操纵透射场的振幅和相位特性，通过空间排布不同结构参数的耦合单元满足相位补偿条件 $C(\omega)$，实现了在 1 200 nm、1 550 nm 和 1 800 nm 波长处的消色差超构透镜。2017 年，南京大学的祝世宁团队[111] 将超构透镜的聚焦相位拆分为频率无关的基础相位和频率相关的色散相位，如图 4(b)所示。基础相位由几何相位实现，色散相位由微纳金属结构单元的耦合共振相位进行补偿[112]。这些特殊设计的微纳金属结构单元存在多个共振峰，可实现一系列不同斜率的线性相位补偿，如图 4(c)所示。基于此范式，该团队实现了 1 200~1 600 nm 波段的宽带消色差反射式超构透镜，器件直径为 55.5 μm，焦距为 100 μm。

透镜型偏振成像超构表面的设计原理与超构透镜类似，不同之处在于前者的焦点位置与入射光波偏振特性相关。这是通过各向异性超构单元的双折射效应实现的，由此单元排列而成的超构

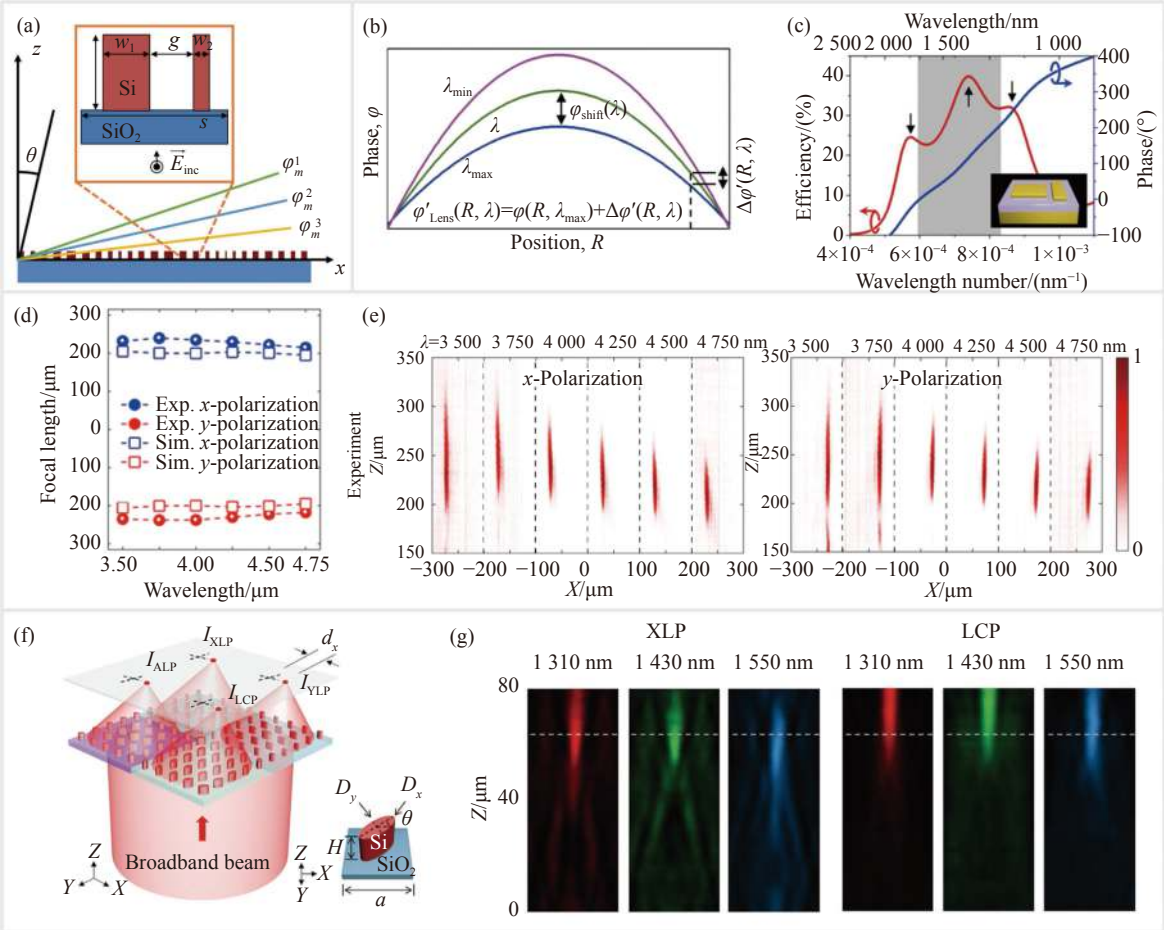

图 4 宽带消色差偏振分光超构表面。(a)耦合矩形电介质波导结构[110]; (b)聚焦相位可分为基础相位和色散相位[111]; (c)特殊设计的微纳金属结构单元存在数个谐振峰[111]; (d)实验和仿真得到的 2 种偏振态下超构透镜焦长随波长的变化情况[113]; (e)2 种线偏振光入射时测得的散射场强度分布图[113]; (f)近红外波段消色差多维探测超构透镜阵列[115]; (g)XLP 和 LCP 入射时测得的散射场强度分布图[115]

Fig. 4 Broadband achromatic polarization splitting metasurfaces. (a) Coupled rectangular dielectric resonators[110]; (b) the focusing phase can be divided into the basic phase and the chromatic phase[111]; (c) there are several resonant peaks in the specially designed micro-nano metallic structure element[111]; (d) measured and simulated focal lengths as a function of wavelength for both polarizations[113]; (e) measured intensity profiles along with longitudinal directions at various incident wavelengths. The left panel is for *x*-polarized incidence and the right panel is for *y*-polarization incidence[113]; (f) near-infrared achromatic metalens array for multiparameter detection[115]; (g) measured intensity profiles under incidence of XLP and LCP light[115]

表面对正交偏振态呈现出两种独立的相位分布和振幅调制。因此参考超构透镜的宽带消色差方法，透镜型偏振分光超构表面宽带消色差的关键在于引入偏振相关的相位补偿。2020 年，中国科学院上海技术物理研究所的欧凯等[113-114] 创新性地提出了用于中波红外偏振探测的宽带消色差透镜型偏振分光超构表面设计方法，引入参考相位 $C^{\parallel,\perp}(\omega)$ 以提供一个额外的优化自由度。其中$C^{\parallel,\perp}(\omega)$ 的取值取决于超构单元的色散曲线，通过定义最小误差因数以在超构单元数据库中挑拣最优单元，并在设计波段内密集采样以近似大带宽连续。由此研制的透镜型偏振分光超构表面可在 3.5~5 μm 波段范围内实现恒定 200 μm 焦距，如图 4(d)所示，器件直径为 100 μm，实验得到的聚焦效果如图 4(e)所示。2021 年，华中科技大学的杨振宇课题组[115] 利用线性方程拟合超构单元的相位-频率曲线，挑选拟合误差小于 1% 的超构单元构建结构单元数据库，从而实现在 1310~1550 nm 波段范围内同时监测偏振轮廓和相位梯度的多维探测消色差超构透镜阵列(Achromatic Metalens Array, AMLA)，如图 4(f)所示。实验聚焦效果如图 4(g)所示，其中会聚线偏振光的超构

透镜采用消色差设计方法, 会聚左旋圆偏振的超构透镜采用几何相位设计方法, 这是因为几何相位原理上具有一定的消色差特性。

上述研究提出的宽带消色差透镜型偏振分光超构表面设计已初见成效, 然而超构表面的尺寸与其消色差范围存在内禀的制约关系[116], 致使该类器件尺寸十分有限。为突破参量间的制约关系进而提升超构表面的综合性能, 还需要对超构单元调制方式进行机理性研究。

3.2　机器学习辅助超构表面设计

尽管已有一些经典的物理模型对超构表面的工作原理作出解释, 并指导超构单元的结构设计及其排列方式, 然而随着人们对超构表面要求的不断提高, 结构单元更加复杂、结构数量指数上升、结构分布更加任意, 这些都使得严格从物理模型推导超构表面的设计方法已经不能满足人们的需求, 必须借助算法来优化和设计超构表面[117]。机器学习是一种人工智能实现方法, 近年来被广泛应用于工业生产、科学研究、医药诊断、经济分析等领域。其通过数据驱动的思想建模, 不直接引入人为设定的规则, 而是从大量数据中学习得到研究目标的规律和特征, 为微纳光子学器件的结构设计提供了崭新的方向[118]。

机器学习方法可通过优化微纳光子学器件的结构排布实现器件性能的优化。2016 年, 犹他大学的 Menon 团队[119] 基于标量衍射光学理论设计了类超构表面的可见光波段消色差多阶衍射透镜, 如图 5(a)(彩图见期刊电子版)所示。通过修正的二分搜索方法[120] 迭代透镜的台阶深度分布, 从而在权衡聚焦效率和误差的同时优化结构排布, 器件在 450~690 nm 范围内的横向和轴向离焦分别为 1.65 μm 和 73.6 μm, 优化算法流程如图 5(b)所示。2019 年, 该团队[121] 通过该算法进一步实现了长波红外波段的消色差高空间分辨率多阶衍射透镜[122]。偏振成像超构表面作为一种新兴的微纳光子学器件, 为提高其光学性能并实现高效设计和快速迭代更新, 研究人员将机器学习方法引入偏振成像超构表面设计中。

基于物理模型的超构表面设计方法首先根据器件功能的需要, 计算出超构表面各点所需的振幅调制和相位突变量, 通过数值仿真软件扫描超构单元结构参数, 得到不同形状超构单元及其光学响应的数据库, 从数据库中挑选最符合预期的结构单元。但当超构单元结构参数较多、步长划分较细时, 基于全模数值仿真方法的超构表面设计周期很长[123]。2021 年, 浙江大学的 Gu 等[124] 使用少量由数值仿真得到的结构单元-电磁响应数据集训练深度学习网络, 利用训练好的网络细化参数扫描结果, 输入期望的光学响应即可检索得到相应的结构单元, 深度学习网络模型架构如图 5(c)所示。该团队在 88 分钟内获取 441 组仿真数据, 10 秒完成深度学习网络的训练, 并即刻生成 360^2 的结构单元-电磁响应数据集, 设计效率远高于传统全模仿真方法, 并基于该数据集设计了透镜型偏振分光超构表面, 如图 5(d)所示, 其工作波长为 532 nm, TE 偏振光焦距为 30 μm, TM 偏振光焦距为 40 μm, 器件直径为 20 μm。

上述逆向设计网络将电磁响应作为输入, 超构单元结构参数作为输出。但由期望的相位响应找到超构单元的最优结构参数并非是一个简单的反问题, 特别是在考虑多频率点和偏振的情况下。例如, 对于给定的相位要求是否存在物理上可行的超构单元结构, 或者如何充分利用参数空间以最优近似这样的相位要求, 均是逆向设计网络需要克服的难题[125]。2022 年, 浙江大学的 Ma 等[126] 通过基于端到端的统计机器学习模型框架将超构表面的多功能复合性能推至其物理极限。该统计机器学习模型即是由前向设计网络和逆向设计网络级联而成, 先由逆向设计网络根据给定电磁响应提取超构单元结构参数, 再利用前向设计网络由得到的结构参数预测其电磁响应, 这种级联架构相比单一的逆网络在收敛性上具有更好的表现[127], 其工作流程如图 5(e)所示。基于此架构, 该团队利用由 3 个耦合矩形谐振器构成的超构单元实现了能在近红外波段 4 个波长处进行正交偏振分束聚焦的超构表面器件, 其仿真和实验效果如图 5(f)所示。

尽管机器学习模型可以在海量数据的支持下不断迭代优化性能, 但传统的机器学习仅适用于特定的特征空间和数据分布, 针对不同任务缺乏泛化能力[128], 在物理本质相近但应用场景稍有不同的情境下即面临失效的风险。目前, 超构表面设计领域的机器学习模型通常用于结构单元的尺寸优化, 而难以实现其形状优化, 但不同形状超构单元因具有不同的电磁耦合模式而在大带宽消色差、大入射角范围、高偏振消光比超构表面设计

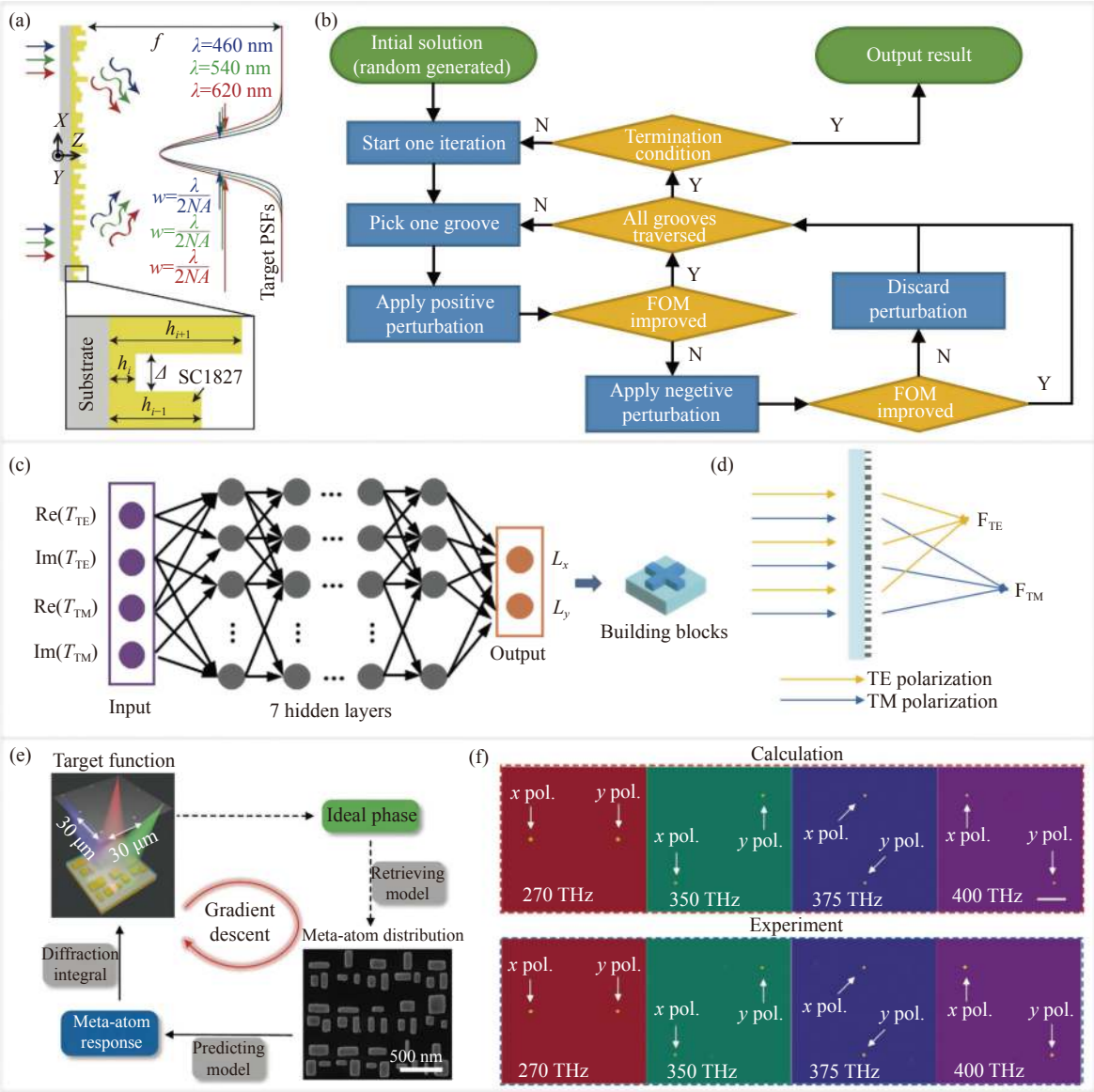

图 5 基于机器学习的微纳光子学器件设计。(a)可见光波段消色差多阶衍射透镜[119]; (b)二分搜索算法流程[119];(c)逆向设计神经网络[124]; (d)透镜型偏振分光超构表面[124]; (e)端到端的统计机器学习框架[126]; (f)多频率点透镜型偏振分光超构表面的仿真和实验效果[126]

Fig. 5 Metasurface design based on machine learning. (a) Visible chromatic multilevel diffractive lens[119]; (b) flow chart of the direct binary search algorithm[119]; (c) inverse design network[124]; (d) polarization splitting metalens[124]; (e) end-to-end statistical machine learning framework[126]; (f) simulated and measured results of four-frequency polarization splitting metalenses[126]

中起到关键作用。因此，增强机器学习模型在不同超构单元形状间的迁移能力，并使其实现多耦合结构超构单元的电磁响应预测是该领域未来需要探究的方向之一。此外，目前机器学习方法优化得到的模型参数不具备可解释性[129]，其设计结果难以帮助研究者参透器件设计的真正奥义，如果没有底层地对器件机理的深入了解，超构表面性能提升终将迎来瓶颈。因此，如何从机器学习模型中提取其物理含义或增强机器学习模型的可解释性是该领域至关重要的命题。

3.3 动态可调偏振成像超构表面

大多数超构表面的材料和结构一旦固定下来，其功能往往也是确定的。但某些应用场合要求超构表面具有焦距动态可调的能力[130]，例如：在显微成像、目标探测等领域，需要成像系统具有可调的视场范围和成像放大率[131]；在极端工作温度环境中，需要成像系统能补偿因环境温度偏离预设工作温度而导致的光学离焦[132-133]。目前，

商业变焦镜头是在镜头中加入一组活动透镜实现变焦[134-135], 但其驱动机构体积庞大, 致使成像系统集成困难。焦距动态可调超构透镜为集成式变焦成像系统提供了一种解决方案。

焦距动态可调超构透镜主要基于结构重组和活性材料两种方法[59]。基于结构重组的焦距动态可调超构透镜通过改变结构单元的排列、形状和方向, 使得局部场态或整个系统的光学响应随之变化。结构重组通常利用柔性拉伸材料或微机电系统(MEMS)。2016 年, 宾夕法尼亚大学的 Ee 等[136] 在可拉伸聚二甲基硅烷(PDMS)基底上制备金纳米柱阵列, 通过拉伸柔性基底改变金纳米单元之间的间隔, 从而实现超构透镜焦距的调节。当拉伸应变为 0.3 时, 超构透镜的焦距从 150 μm 延伸到 250 μm, 如图 6(a)(彩图见期刊电子版)所示。由于拉伸过程中, 纳米单元的间距始终保持在亚波长量级(400~520 nm), 因此器件的能量透过率不会受到显著的影响。但对柔性基底拉伸实现动态可调器件的研究往往面临这样的困难: 器件在长时间应力作用下发生蠕变, 导致其重复性和稳定性不佳[137]。2018 年, 加州理工学院 Faraon 课题组[138]基于 MEMS 静电驱动技术, 制备了纵向间距可调的超构透镜组, 如图 6(b)(彩图见期刊电子版)所示。超构透镜组包含会聚透镜和发散透镜, 实验测定其焦距变化范围为 565~629 μm, 变焦频率可达到 4 kHz。

基于活性材料(Active Materials, AMs)的超构透镜, 将活性材料作为超构透镜的功能单元或周围环境介质的一部分, 利用活性材料的光学参数可随电、磁、热等外部激励而变化的特性, 实现动态调焦。典型的活性材料有液晶、半导体、相变材料、石墨烯等[139-140]。2020 年, 美国凯斯西储大学的 Lininger 等[141] 将超构表面与液晶技术相结合, 利用纳米力使液晶在这些微柱之间浸润, 如图 6(c)(彩图见期刊电子版)所示, 从而改变超构表面的局部折射率, 实现焦点位置的动态调制, 但液晶浸润的方式会导致焦点半峰全宽的增大和斯特列尔比的降低。2021 年, 华南师范大学的韦中超课题组[142] 利用钛酸钡($BaTiO_3$, BTO)的光电效应, 使用电压调控 BTO 纳米柱的复折射率, 从而改变超构透镜的相位分布, 实现 10~50 μm 焦距变化。同年, 该课题组[143] 提出一种基于超低损耗相变材料 Sb_2S_3的近红外热调控变焦超构透镜, 通过对导电层施加电流脉冲加热 Sb_2S_3, 实现其在非晶态和晶态间的可逆切换。由于 Sb_2S_3 实部折射率在晶态和非晶态之间的差异为 0.6, 因此可用于调控超构透镜的聚焦特性, 如图 6(d)(彩图见期刊电子版)所示。然而, 基于活性材料的超构透镜动态调焦技术, 普遍面临光学效率较低、成像质量下降、可调元素驱动条件苛刻等难题[144]。

为验证焦距动态可调超构透镜设计方法对偏振成像超构表面具有可迁移性, 本文基于传输相位原理设计将正交线偏振态分束聚焦的全硅超构表面, 利用有限时域差分方法(FDTD)仿真研究拉伸基底时透镜型偏振分光超构表面的聚焦特性。边界条件在轴向方向设置为理想匹配层(PML), 以模拟电磁波经超构器件调控后向无穷远传输的情况, 在周向方向设置为周期性边界条件, 以模拟超构透镜阵列式排布, PML 轮廓设置为‘steep angle’以增强 PML 边界对电磁波的吸收; 光源为波长 10.6 μm 沿轴向传输的平面波; 监视器设置在器件近场位置, 以便根据近场电磁响应推算远场电磁分布; 单元周期为 4.8 μm, 硅柱高度为 8.4 μm, 设计焦距为 41.2 μm, 数值孔径为 0.8。仿真过程中假设器件周向拉伸时硅柱应变量等同于基底应变量。水平偏振光入射该超构表面的仿真结果如图 6(f)(彩图见期刊电子版)所示, 当单元周期 Λ 因环向拉伸从 4.6 μm 变化到 5.2 μm 时, 其焦距从 38.4 μm 增长至 52.2 μm, 透过率从 44.2% 下降至 40.3%; 当单元周期处于 4.8 μm±0.2 μm 的工作波段内, 超构表面能保持较高的聚焦效率; 当单元周期大于 5 μm 时, 超构表面聚焦效率明显下降, 如图 6(g)(彩图见期刊电子版)所示。对于竖直偏振光入射也能得到如上结论, 且其焦点始终与水平偏振光入射对应的焦点保持在同一焦平面上。由此可知, 该透镜型偏振分光超构表面在设计周期的±5% 范围内变化时, 两正交线偏振态的焦距与器件应变量大致保持线性变化关系, 故可利用机械拉伸实现偏振成像超构表面结构重组, 从而达到焦距动态可调的目的。然而, 这种直接基底拉伸的方法存在焦距动态可调范围小, 拉伸过程中容易造成器件损伤等缺点, 因此未来还需探究多偏振成像超构表面组或基于活性材料的偏振成像超构表面等无损调焦方法。

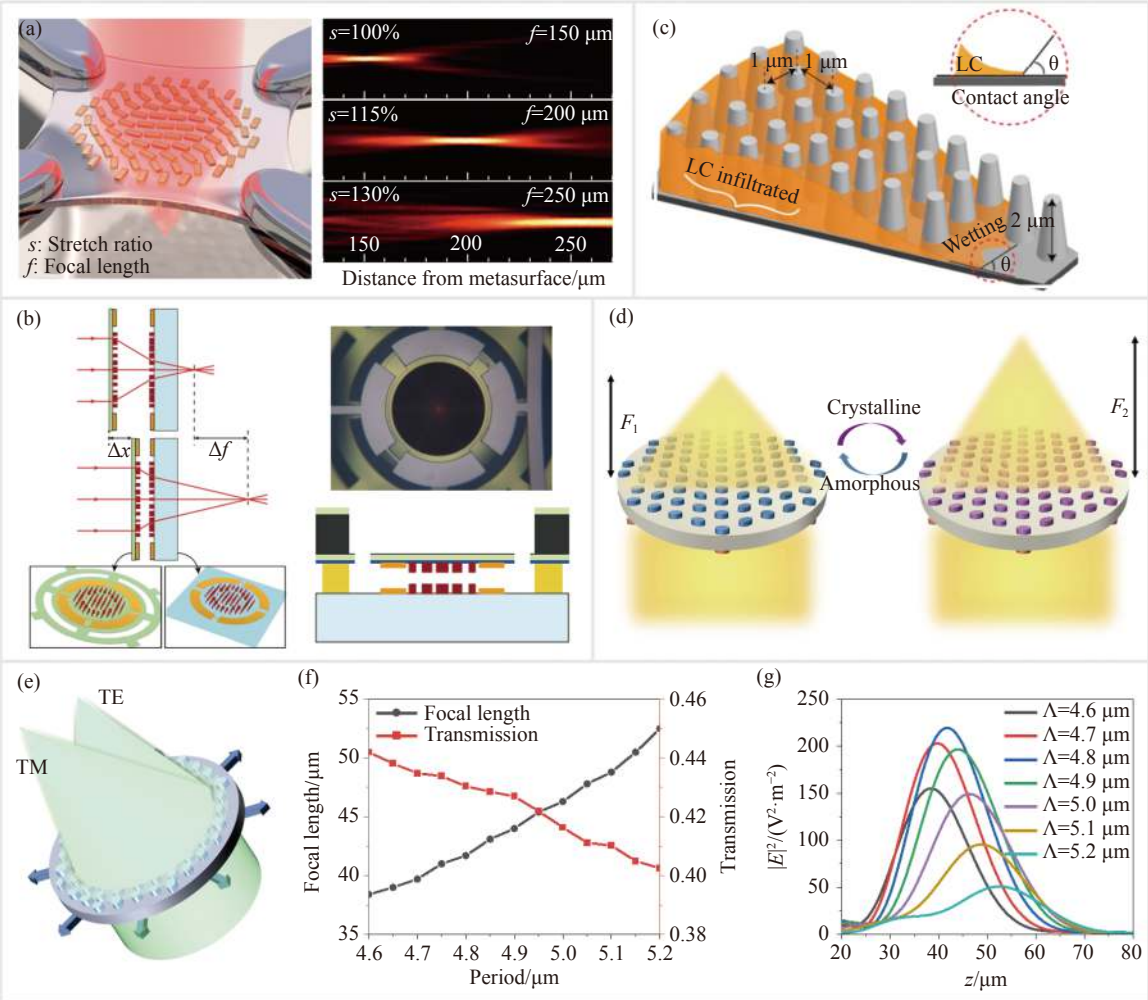

图 6 焦距动态可调超构透镜。(a)基于柔性基底的动态可调超构透镜[136]；(b)纵向间距可调的超构透镜组，原理示意图(左)、器件的光学显微镜图像(右上)、两超构透镜键合示意图(右下)[138]；(c)液晶浸润实现焦点动态调制[141]；(d)基于超低损耗相变材料 Sb_2S_3 的近红外热调控变焦超构透镜[143]；(e)环向拉伸实现焦距动态可调偏振分光超构透镜；(f)器件焦距和能量透射率随单元周期的变化曲线；(g)不同单元周期下电场能量随纵轴方向的变化曲线

Fig. 6 Metalens with dynamically tunable focal length. (a) Dynamically tunable metasurface based on a flexible substrate[136]; (b) a group of metasurfaces with adjustable longitudinal spacing, schematic diagram (left), optical microscopy image of device (top right), illustration of the bonding of two metasurfaces (bottom right)[138]; (c) dynamically tuning the focal length through liquid crystal infiltration[141]; (d) near-infrared thermally modulated varifocal metalens based on a low-losses phase change material Sb_2S_3[143]; (e) polarization splitting metalens with a dynamically tunable focal length by circumferential stretching; (f) the variation curves of focal length and transmission with unit period; (g) the variation curves of the electric field intensity with the longitudinal direction at different unit periods

4 总结与展望

4.1 总 结

物体表面散射光的偏振态蕴含其形貌特征及理化特性等信息，使得偏振成像技术在目标探测、水下成像、生命科学、环境监测、三维成像等领域具有重要的应用价值。偏振分光棱镜、染料系偏振片等传统偏振器件难以满足高集成、高性能、高可靠性偏振成像系统的需求。随着微纳制造技术的发展，微纳结构偏振器件因其良好的光学性能和可靠的结构稳定性，得到科研人员的青睐。亚波长金属线栅被证实具有较宽的工作波段，能在较大的入射角范围和温度范围内具有优异的偏振性能。利用等效介质理论可以较准确解释其光学性能。较少的可调参数允许有限时域差分(FDTD)或严格耦合波分析(RCWA)方法可快速寻找到最优结构参数解，使得该类器件的设计

和优化过程较为简单。纳米压印技术使得该类器件可进行批量生产[145-146], 双光束干涉曝光方法支持该类器件的快速制样[147], 因此亚波长金属线栅的产品化、系列化已较为成熟。然而, 亚波长金属线栅仅利用了入射光中的 TM 偏振模式, 原理上存在 50% 的能量利用效率极限。基于亚波长金属线栅的偏振成像系统在低光能量的杂乱场景中难以达到预期的成像效果。二维超构材料, 即超构表面, 兼具工艺易施性和多维光场参量调控能力, 可以独立调控入射光中的 TM 偏振和 TE 偏振分量, 从而突破亚波长金属线栅的能量利用效率极限。

面向偏振成像应用的超构表面, 可分为光栅型和透镜型两类, 两者均可集成于偏振成像系统。为实现高能量利用效率偏振器件, 超构表面单元结构从最初的等离激元结构, 发展到间隙表面等离激元结构和全电介质结构。等离激元结构超构表面因其本征的欧姆损耗导致其能量利用效率不超过 10%; 间隙表面等离激元结构利用电介质隔层两面的表面等离激元耦合实现光场增强, 但仅工作于反射模式下, 且此类谐振式超构表面的工作带宽较窄[148]; 全电介质结构基于几何相位和传输相位结合的光场调控原理, 可实现高能量利用效率的透射式偏振器件。未来为实现偏振成像超构表面器件的产品化, 还需探究宽带消色差、机器学习辅助设计、功能动态可调的偏振成像超构表面设计方法。

4.2　集成超构表面的分焦平面型偏振成像系统

2019 年, Capasso 课题组[105] 搭建集成全电介质光栅型超构表面的分孔径型偏振成像系统, 实现超构表面在系统集成领域的里程碑式突破。然而, 分孔径型偏振成像系统将不同偏振态的图像映射到焦平面的不同区域, 存在焦平面分辨率损失的缺点。此外, 为解析场景偏振态, 通常要求几幅图像的配准误差小于 1/10 个像素[149], 这与分孔径成像系统固有的视场误差相矛盾, 需要后期对图像进行配准处理。分焦平面偏振成像系统可以克服分孔径型偏振成像系统的缺点, 焦平面上分像素级的互异偏振态成像, 不仅允许使用插值算法恢复其图像分辨率[150-151], 而且其视场误差满足偏振态重构的需求。透镜阵列型偏振成像超构表面因具有像素级的分偏振态会聚能力, 有望构建分焦平面偏振成像系统, 且其能提供数倍于波长的焦距, 可避免传统亚波长金属线栅与探测器复杂的对准贴装工艺。然而, 器件的焦点和探测器的感光像元存在一一对应关系, 对器件的位置精度提出极高要求。此外, 设计焦距可能达到超构表面本身尺寸数倍, 从而导致较小的数值孔径值, 这减弱了器件对光的收集能力, 这是另一个需要克服的难点。

4.3　高效率、大孔径超构表面加工方法

超构表面为实现产业化, 通常需要根据场景定制功能, 因此对其进行快速制样的加工技术必不可少。然而不同于亚波长金属线栅, 超构表面的功能依赖于空间变化的结构单元形貌, 这意味着需要大范围且精细的微纳特征结构加工。目前利用激光束直写、电子束光刻等逐像素的加工方式效率低下[152-153], 在整片晶圆范围内写满所需纳米尺度结构耗时较长, 甚至数以天计, 成本极高。那些高效率的纳米光刻方法, 例如纳米压印和干涉光刻, 又往往缺乏灵活性, 前者是一种依赖模板图案的复制技术[146], 要求高分辨率的模板制造设备, 后者通常只适用于制作大面积周期性的纳米结构[147]。因此, 超构表面的产业化还需革新性的微纳加工技术支持。2022 年, 香港大学的李文迪课题组[154] 基于干涉光刻光强分布和光刻胶的非线性响应特点, 首先通过干涉曝光得到大范围且较为均匀的纳米结构, 再由灰度图案二次曝光方法分区剪裁纳米结构的特征尺寸, 极大提高了空间变化纳米结构的制备效率。另一方面, 由于电子束光刻或极紫外光刻等传统工艺曝光范围有限, 大孔径超构表面的加工存在困难。2022 年, 华中科技大学的易飞课题组[155] 开发了一种“多版图拼接式投影曝光”技术, 其将 5cm 孔径超构透镜的图案划分成 9 个部分, 每个部分使用一块掩模版实现, 最后拼接组合成完整的大口径超构透镜。这些加工方法可借鉴偏振成像超构表面的制造过程。

现代人生活在信息时代, 信息本身是生产力的重要代表, 是智能化的必要前提。偏振信息作为光波信息的另一种维度, 其蕴含的无与伦比的信息量有望为军事和民生领域带来天翻地覆的变革, 为第四次工业革命提供重要发力点。超构表面作为新型微纳结构光场调控器件, 具有灵活可控的光场调控优势, 有望实现功能性更强、适应性更广、集成度更高的微小型偏振成像系统, 从而助力城市及工业的信息化发展。

参考文献:

[1] TORRANCE K E, SPARROW E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(9): 1105-1114.

[2] PRIEST R G, MEIER S R. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(5): 988-993.

[3] GURTON K P, DAHMANI R. Effect of surface roughness and complex indices of refraction on polarized thermal emission[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(26): 5361-5367.

[4] HYDE IV M W, SCHMIDT J D, HAVRILLA M J. A geometrical optics polarimetric bidirectional reflectance distribution function for dielectric and metallic surfaces[J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 22138-22153.

[5] 杨志勇, 陆高翔, 张志伟, 等. 热辐射环境下目标红外偏振特性分析[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0220001.
YANG ZH Y, LU G X, ZHANG ZH W, *et al*.. Analysis of infrared polarization characteristics of target in thermal radiation environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0220001. (in Chinese)

[6] YANG B, YAN CH X, ZHANG J Q, *et al*.. Refractive index and surface roughness estimation using passive multispectral and multiangular polarimetric measurements[J]. *Optics Communications*, 2016, 381: 336-345.

[7] ZHANG Y, ZHANG Y, ZHAO H J, *et al*.. Improved atmospheric effects elimination method for pBRDF models of painted surfaces[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16458-16475.

[8] ZHANG Y, XUAN J B, ZHAO H J, *et al*.. Roughness estimation of inhomogeneous paint based on polarization imaging detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10849: 1084910.

[9] ZHAN H Y, VOELZ D G, KUPINSKI M. Parameter-based imaging from passive multispectral polarimetric measurements[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28832-28843.

[10] GURTON K, FELTON M, MACK R, *et al*.. MidIR and LWIR polarimetric sensor comparison study[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7672: 767205.

[11] GURTON K P, FELTON M. Remote detection of buried land-mines and IEDs using LWIR polarimetric imaging[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22344-22359.

[12] ROWE M P, PUGH E N, TYO J S, *et al*.. Polarization-difference imaging: a biologically inspired technique for observation through scattering media[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(6): 608-610.

[13] SCHECHNER Y Y, KARPEL N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 570-587.

[14] TREIBITZ T, SCHECHNER Y Y. Active polarization descattering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(3): 385-399.

[15] HAN P L, LIU F, WEI Y, *et al*.. Optical correlation assists to enhance underwater polarization imaging performance[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106256.

[16] LIU Y, YORK T, AKERS W J, *et al*.. Complementary fluorescence-polarization microscopy using division-of-focal-plane polarization imaging sensor[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2012, 17(11): 116001.

[17] HE CH, HE H H, CHANG J T, *et al*.. Polarisation optics for biomedical and clinical applications: a review[J]. *Light:Science & Applications*, 2021, 10(1): 194.

[18] ANDRE Y, LAHERRERE J M, BRET-DIBAT T, *et al*.. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2572: 79-90.

[19] CHENAULT D B, VADEN J P, MITCHELL D A, *et al*.. Infrared polarimetric sensing of oil on water[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9999: 99990D.

[20] YUFFA A J, GURTON K P, VIDEEN G. Three-dimensional facial recognition using passive long-wavelength infrared polarimetric imaging[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(36): 8514-8521.

[21] RIGGAN B S, SHORT N J, HU SH W, *et al*. . Estimation of visible spectrum faces from polarimetric thermal faces[C]. *2016 IEEE 8th International Conference on Biometrics Theory, Applications and Systems (BTAS)*, IEEE, 2016: 1-7.

[22] 张景华, 张焱, 石志广, 等. 基于法向量估计的透明物体表面反射光分离[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1526001.
ZHANG J H, ZHANG Y, SHI ZH G, *et al*.. Reflected light separation on transparent object surface based on normal vector estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1526001. (in Chinese)

[23] LI N, ZHAO Y Q, PAN Q, *et al*.. Removal of reflections in LWIR image with polarization characteristics[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16488-16504.

[24] KONG N, TAI Y W, SHIN J S. A physically-based approach to reflection separation: from physical modeling to constrained optimization[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014, 36(2): 209-221.

[25] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 48(3): 233-254.

[26] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.

[27] LI N, ZHAO Y Q, PAN Q, *et al*.. Illumination-invariant road detection and tracking using LWIR polarization characteristics[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 180: 357-369.

[28] LI N, ZHAO Y Q, WU R Y, *et al*.. Polarization-guided road detection network for LWIR division-of-focal-plane camera[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(22): 5679-5682.

[29] YAROSLAVSKY A N, FENG X, YU S H, *et al*.. Dual-wavelength optical polarization imaging for detecting skin cancer margins[J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 2020, 140(10): 1994-2000.e1.

[30] MAIGNAN F, BRÉON F M, FÉDÈLE E, *et al*.. Polarized reflectances of natural surfaces: spaceborne measurements and analytical modeling[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2642-2650.

[31] RIZKI AKBAR P, TETUKO S S J, KUZE H. A novel circularly polarized synthetic aperture radar (CP-SAR) system onboard a spaceborne platform[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(4): 1053-1060.

[32] CHUN C S L, FLEMING D L, HARVEY W A, *et al*.. Polarization-sensitive thermal imaging sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2552: 438-444.

[33] PEZZANITI J L, CHENAULT D, GURTON K, *et al*.. Detection of obscured targets with IR polarimetric imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9072: 90721D.

[34] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, *et al*.. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.

[35] 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 ZH, 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. (in Chinese)

[36] GARLICK G F J, STEIGMANN G A, LAMB W E. Differential optical polarization detectors: US, 3992571[P]. 1976-11-16.

[37] FARLOW C A, CHENAULT D B, PEZZANITI J L, *et al*.. Imaging polarimeter development and applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4481: 118-125.

[38] DIRIX Y, TERVOORT T A, BASTIAANSEN C. Optical properties of oriented polymer/dye polarizers[J]. *Macromolecules*, 1995, 28(2): 486-491.

[39] WOLFF L B, MANCINI T A, POULIQUEN P, *et al*.. Liquid crystal polarization camera[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1997, 13(2): 195-203.

[40] BROER D J, VAN DER V J. Method of manufacturing a polarization filter and a polarization filter so obtained: US, 5024850[P]. 1991-06-18.

[41] ZHAO X J, BERMAK A, BOUSSAID F, *et al*.. Liquid-crystal micropolarimeter array for full Stokes polarization imaging in visible spectrum[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17776-17787.

[42] MYHRE G, HSU W L, PEINADO A, *et al*.. Liquid crystal polymer full-stokes division of focal plane polarimeter[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27393-27409.

[43] 张士元, 孙子珺, 穆全全, 等. 用于偏振成像的液晶微偏振阵列研究进展[J]. 液晶与显示, 2022, 37(3): 292-309.
ZHANG SH Y, SUN Z J, MU Q Q, *et al*.. Review on liquid crystal micropolarizer array for polarization imaging[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(3): 292-309. (in Chinese)

[44] 王骁乾, 沈冬, 郑致刚, 等. 液晶光控取向技术进展[J]. 液晶与显示, 2015, 30(5): 737-751.
WANG X Q, SHEN D, ZHENG ZH G, *et al*.. Review on liquid crystal photoalignment technologies[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 737-751. (in Chinese)

[45] ZHAO J C, QIU M, YU X CH, *et al*.. Defining deep-subwavelength-resolution, wide-color-gamut, and large-viewing-

angle flexible subtractive colors with an ultrathin asymmetric Fabry-Perot lossy cavity[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(23): 1900646.

[46] BOKOR N, SHECHTER R, DAVIDSON N, *et al*.. Achromatic phase retarder by slanted illumination of a dielectric grating with period comparable with the wavelength[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(13): 2076-2080.

[47] 付秀华, 林晓敏, 张功, 等. 红外宽波段亚波长金属线栅偏振元件的研制[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0903002.
FU X H, LIN X M, ZHANG G, *et al*.. Development of infrared wide band polarizing elements with subwavelength metal wire grids[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0903002. (in Chinese)

[48] YEH P. A new optical model for wire grid polarizers[J]. *Optics Communications*, 1978, 26(3): 289-292.

[49] LALANNE P, LEMERCIER-LALANNE D. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures[J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(10): 2063-2085.

[50] TYAN R C, SALVEKAR A A, CHOU H P, *et al*.. Design, fabrication, and characterization of form-birefringent multilayer polarizing beam splitter[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(7): 1627-1636.

[51] AHN S W, LEE K D, KIM J S, *et al*.. Fabrication of a 50 nm half-pitch wire grid polarizer using nanoimprint lithography[J]. *Nanotechnology*, 2005, 16(9): 1874-1877.

[52] YAMADA I, NISHII J, SAITO M. Incident angle and temperature dependence of WSi wire-grid polarizer[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 63: 92-96.

[53] XIA J, YUAN ZH H, WANG CH, *et al*.. Design and fabrication of a linear polarizer in the 8-12μm infrared region with multilayer nanogratings[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(5): 1683-1692.

[54] ZHANG ZH G, DONG F L, CHENG T, *et al*.. Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(10): 105002.

[55] SUN D, FENG B, YANG B, *et al*.. Design and fabrication of an InGaAs focal plane array integrated with linear-array polarization grating[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1559-1562.

[56] GRUEV V, PERKINS R, YORK T. CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters[J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 19087-19094.

[57] GRUEV V. Fabrication of a dual-layer aluminum nanowires polarization filter array[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 24361-24369.

[58] MA X, DONG F L, ZHANG ZH G, *et al*.. Pixelated-polarization-camera-based polarimetry system for wide real-time optical rotation measurement[J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 2019, 283: 857-864.

[59] 曹暾, 刘宽, 李阳, 等. 可调谐光学超构材料及其应用[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 968-985.
CAO T, LIU K, LI Y, *et al*.. Tunable optical metamaterials and their applications[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 968-985. (in Chinese)

[60] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.

[61] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ[J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10(4): 509-514.

[62] 田小永, 尹丽仙, 李涤尘. 三维超材料制造技术现状与趋势[J]. 光电工程, 2017, 44(1): 69-76.
TIAN X Y, YIN L X, LI D CH. Current situation and trend of fabrication technologies for three-dimensional metamaterials[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(1): 69-76. (in Chinese)

[63] 余晓畅, 许雅晴, 蔡佳辰, 等. 可调微纳滤波结构的研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1069-1088.
YU X CH, XU Y Q, CAI J CH, *et al*.. Progress of tunable micro-nano filtering structures[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1069-1088. (in Chinese)

[64] 付娆, 李子乐, 郑国兴. 超构表面的振幅调控及其功能器件研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 886-899.
FU R, LI Z L, ZHENG G X. Research development of amplitude-modulated metasurfaces and their functional devices[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 886-899. (in Chinese)

[65] 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.

[66] YU N F, AIETA F, GENEVET P, *et al*.. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6328-6333.

[67] DENG Y D, CAI Z R, DING Y T, *et al*.. Recent progress in metasurface-enabled optical waveplates[J].

Nanophotonics, 2022, 11(10): 2219-2244.

[68] JIANG ZH H, LIN L, MA D, *et al*.. Broadband and wide field-of-view plasmonic metasurface-enabled waveplates[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7511.

[69] 刘东明, 吕婷婷, 刘强, 等. 可开关的多功能超构表面波片特性研究[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 1029-1037.
LIU D M, LV T T, LIU Q, *et al*.. Performance study on switchable and multifunctional metasurface wave plate[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 1029-1037. (in Chinese)

[70] LI J X, WANG Y Q, CHEN CH, *et al*.. From lingering to rift: metasurface decoupling for near- and far-field functionalization[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(16): 2007507.

[71] WU T, ZHANG X Q, XU Q, *et al*.. Dielectric metasurfaces for complete control of phase, amplitude, and polarization[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(1): 2101223.

[72] KARIMI E, SCHULZ S A, DE LEON I, *et al*.. Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface[J]. *Light:Science & Applications*, 2014, 3(5): e167.

[73] AHMED H, KIM H, ZHANG Y B, *et al*.. Optical metasurfaces for generating and manipulating optical vortex beams[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(5): 941-956.

[74] 于洋, 仲帆, 江西, 等. 基于旋转超表面的相干自旋霍尔效应的可调光束[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 927-934.
YU Y, ZHONG F, JIANG X, *et al*.. Dynamical optical beam produced in rotational metasurface based on coherent spin hall effect[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 927-934. (in Chinese)

[75] 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 SH, SHEN Z CH, *et al*.. Multidimensional light field sensing based on metasurfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1918003. (in Chinese)

[76] KILDISHEV A V, BOLTASSEVA A, SHALAEV V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.

[77] 麦尔·斯蒂芬. 等离激元学: 基础与应用[M]. 张彤, 王琦龙, 张晓阳, 等, 译. 南京: 东南大学出版社, 2014: 3-13.
MAIER S A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*[M]. ZHANG T, WANG Q L, ZHANG X Y, *et al*. , trans. Nanjing: Southeast University Press, 2014: 3-13. (in Chinese)

[78] 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.

[79] NI X J, ISHII S, KILDISHEV A V, *et al*.. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses[J]. *Light:Science & Applications*, 2013, 2(4): e72.

[80] SUN SH L, YANG K Y, WANG C M, *et al*.. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6223-6229.

[81] DING F, YANG Y Q, DESHPANDE R A, *et al*.. A review of gap-surface plasmon metasurfaces: fundamentals and applications[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 1129-1156.

[82] KIM H C, CHENG X. SERS-active substrate based on gap surface plasmon polaritons[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17234-17241.

[83] 郭绮琪, 陈溢杭. 基于介电常数近零模式与间隙表面等离激元强耦合的增强非线性光学效应[J]. 物理学报, 2021, 70(18): 187303.
GUO Q Q, CHEN Y H. Enhanced nonlinear optical effects based on strong coupling between epsilon-near-zero mode and gap surface plasmons[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(18): 187303. (in Chinese)

[84] PORS A, NIELSEN M G, BOZHEVOLNYI S I. Plasmonic metagratings for simultaneous determination of Stokes parameters[J]. *Optica*, 2015, 2(8): 716-723.

[85] SHALTOUT A, LIU J J, KILDISHEV A, *et al*.. Photonic spin hall effect in gap–plasmon metasurfaces for on-chip chiroptical spectroscopy[J]. *Optica*, 2015, 2(10): 860-863.

[86] BOROVIKS S, DESHPANDE R A, MORTENSEN N A, *et al*.. Multifunctional metamirror: polarization splitting and focusing[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1648-1653.

[87] DING F, CHEN Y T, BOZHEVOLNYI S I. Gap-surface plasmon metasurfaces for linear-polarization conversion, focusing, and beam splitting[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(5): 707-714.

[88] ZHANG J, ELKABBASHIM, WEIR, *et al*.. Plasmon metasurfaces with 42.39% transmission efficiency in visible[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 53.

[89] WEI SH W, YANG ZH Y, ZHAO M. Design of ultracompact polarimeters based on dielectric metasurfaces[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(8): 1580-1583.

[90] LIN D M, FAN P Y, HASMAN E, *et al*.. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.

[91] HU Y Q, WANG X D, LUO X H, *et al*.. All-dielectric metasurfaces for polarization manipulation: principles and emerging applications[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(12): 3755-3780.

[92] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, ZHU A Y, *et al*.. Multispectral chiral imaging with a metalens[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4595-4600.

[93] YANG ZH Y, WANG ZH K, WANG Y X, *et al*.. Generalized Hartmann-Shack array of dielectric metalens sub-arrays for polarimetric beam profiling[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4607.

[94] 刘永健, 张飞, 谢婷, 等. 基于伴随仿真的偏振复用超构透镜[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 754-763.
LIU Y J, ZHANG F, XIE T, *et al*.. Polarization-multiplexed metalens enabled by adjoint optimization[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 754-763. (in Chinese)

[95] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, *et al*.. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.

[96] ZHAO J C, YU X CH, ZHOU K, *et al*.. Polarization-sensitive subtractive structural color used for information encoding and dynamic display[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 138: 106421.

[97] 范智斌, 陈泽茗, 周鑫, 等. 氮化硅光子器件与应用研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(4): 998-1018.
FAN ZH B, CHEN Z M, ZHOU X, *et al*.. Recent advances in silicon nitride-based photonic devices and applications[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 998-1018. (in Chinese)

[98] PANCHARATNAM S. Generalized theory of interference and its applications[J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A*, 1956, 44(6): 398-417.

[99] BERRY M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proceedings of the Royal Society A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1984, 392(1802): 45-57.

[100] HSIAO H H, CHU C H, TSAI D P. Fundamentals and applications of metasurfaces[J]. *Small Methods*, 2017, 1(4): 1600064.

[101] ARBABI A, HORIE Y, BAGHERI M, *et al*.. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937-943.

[102] ARBABI E, KAMALI S M, ARBABI A, *et al*.. Full-Stokes imaging polarimetry using dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3132-3140.

[103] YAN CH, LI X, PU M B, *et al*.. Midinfrared real-time polarization imaging with all-dielectric metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(16): 161904.

[104] REN Y Z, GUO SH H, ZHU W Q, *et al*.. Full-Stokes polarimetry for visible light enabled by an all-dielectric metasurface[J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, 3(7): 2100373.

[105] RUBIN N A, D'AVERSA G, CHEVALIER P, *et al*.. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera[J]. *Science*, 2019, 365(6448): eaax1839.

[106] RUBIN N A, CHEVALIER P, JUHL M, *et al*.. Imaging polarimetry through metasurface polarization gratings[J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 9389-9412.

[107] CHEN W T, ZHU A Y, SANJEEV V, *et al*.. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 220-226.

[108] 李效欣. 基于超表面的宽带消色差偏振成像研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 7-10.
LI X X. Broadband achromatic polarization imaging based on metasurface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 7-10. (in Chinese)

[109] KHORASANINEJAD M, SHI Z, ZHU A Y, *et al*.. Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(3): 1819-1824.

[110] AIETA F, KATS M A, GENEVET P, *et al*.. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.

[111] WANG SH M, WU P C, SU V C, *et al*.. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 187.

[112] CHENG Q Q, MA M L, YU D, *et al*.. Broadband achromatic metalens in terahertz regime[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(20): 1525-1531.

[113] OU K, YU F L, LI G H, *et al*.. Mid-infrared polarization-controlled broadband achromatic metadevice[J]. *Science Advances*, 2020, 6(37): eabc0711.

[114] 欧凯. 人工微结构超表面的光场调控物理及其应用[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2021: 47-60.
OU K. Manipulation the light based on artificial microstructure metasurfaces and its applications[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021: 47-60. (in Chinese)

[115] FENG X, WANG Y X, WEI Y X, *et al*.. Optical multiparameter detection system based on a broadband achromatic metalens array[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(19): 2100772.

[116] 肖行健, 祝世宁, 李涛. 宽带消色差平面透镜的设计与参量分析[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(9): 20201032.
XIAO X J, ZHU SH N, LI T. Design and parametric analysis of the broadband achromatic flat lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20201032. (in Chinese)

[117] CHEN J, HU SH SH, ZHU SH N, *et al*.. Metamaterials: from fundamental physics to intelligent design[J]. *Interdisciplinary Materials*, 2023, 3(1): 5-29.

[118] WIECHA P R, ARBOUET A, GIRARD C, *et al*.. Deep learning in nano-photonics: inverse design and beyond[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): B182-B200.

[119] WANG P, MOHAMMAD N, MENON R. Chromatic-aberration-corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21545.

[120] 盛小航, 周韶东, 席科磊, 等. 基于相变材料的多阶折射率薄膜平板透镜[J]. 光学学报, 2022, 42(19): 1916002.
SHENG X H, ZHOU SH D, XI K L, *et al*.. Multi-order refractive index thin-film flat lens based on phase change materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1916002. (in Chinese)

[121] MEEM M, BANERJI S, MAJUMDER A, *et al*.. Broadband lightweight flat lenses for long-wave infrared imaging[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(43): 21375-21378.

[122] BANERJI S, MEEM M, MAJUMDER A, *et al*.. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses?[J]. *Optica*, 2019, 6(6): 805-810.

[123] WANG F L, GENG G ZH, WANG X Q, *et al*.. Visible achromatic metalens design based on artificial neural network[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(3): 2101842.

[124] GU Y J, HAO R, LI E P. Independent bifocal metalens design based on deep learning algebra[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(8): 403-406.

[125] 徐东. 基于深度学习的相位调控型超构表面器件设计[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2021: 5-9.
XU D. Design of phase-modulating metasurface device based on deep learning[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences), 2021: 5-9. (in Chinese)

[126] MA W, XU Y H, XIONG B, *et al*.. Pushing the limits of functionality-multiplexing capability in metasurface design based on statistical machine learning[J]. *Advanced Material*, 2022, 34(16): 2110022.

[127] AN X P, CAO Y, WEI Y X, *et al*.. Broadband achromatic metalens design based on deep neural networks[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(16): 3881-3884.

[128] ZHU R CH, QIU T SH, WANG J F, *et al*.. Phase-to-pattern inverse design paradigm for fast realization of functional metasurfaces via transfer learning[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2974.

[129] LIPTON Z C. The mythos of model interpretability: In machine learning, the concept of interpretability is both important and slippery[J]. *Queue*, 2018, 16(3): 31-57.

[130] SHE A L, ZHANG SH Y, SHIAN S, *et al*.. Adaptive metalenses with simultaneous electrical control of focal length, astigmatism, and shift[J]. *Science Advances*, 2018, 4(2): eaap9957.

[131] SHAPIRA C, YARIV I, ANKRI R, *et al*.. Effect of optical magnification on the detection of the reduced scattering coefficient in the blue regime: theory and experiments[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 22228-22239.

[132] LIM T Y, PARK S C. Achromatic and athermal lens design by redistributing the element powers on an athermal glass

map[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18049-18058.

[133] 解娜, 崔庆丰. 基于权重分组的可见光光学系统无热化设计[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1222001.
XIE N, CUI Q F. Athermalization design of visible light optical system based on grouping by weight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1222001. (in Chinese)

[134] ASHTON A. Zoom lens systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 1979, 163: 92-98.

[135] PARR-BURMAN P, GARDAM A. The development of a compact I. R. zoom telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 1986, 590: 11-17.

[136] EE H S, AGARWAL R. Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2818-2823.

[137] SONG SH CH, MA X L, PU M B, *et al*.. Actively tunable structural color rendering with tensile substrate[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(9): 1600829.

[138] ARBABI E, ARBABI A, KAMALI S M, *et al*.. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 812.

[139] CUI T, BAI B F, SUN H B. Tunable metasurfaces based on active materials[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(10): 1806692.

[140] KIM J, SEONG J, YANG Y, *et al*.. Tunable metasurfaces towards versatile metalenses and metaholograms: a review[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(2): 024001.

[141] LININGER A, ZHU A Y, PARK J S, *et al*.. Optical properties of metasurfaces infiltrated with liquid crystals[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(34): 20390-20396.

[142] XU N, HAO Y, JIE K Q, *et al*.. Electrically-driven zoom metalens based on dynamically controlling the phase of barium titanate (BTO) column antennas[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(3): 729.

[143] QIN SH, XU N, HUANG H, *et al*.. Near-infrared thermally modulated varifocal metalens based on the phase change material Sb_2S_3[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7925-7934.

[144] 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.

[145] YU ZH N, DESHPANDE P, WU W, *et al*.. Reflective polarizer based on a stacked double-layer subwavelength metal grating structure fabricated using nanoimprint lithography[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(7): 927-929.

[146] KANG W D, CHU J K, ZENG X W, *et al*.. Large-area flexible infrared nanowire grid polarizer fabricated using nanoimprint lithography[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(18): 5230-5234.

[147] YAMADA I, FUKUMI K, NISHII J, *et al*.. Infrared wire-grid polarizer with Y_2O_3 ceramic substrate[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(18): 3111-3113.

[148] 李奥凌, 段辉高, 贾红辉, 等. 中红外波段超构透镜研究进展[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(19): 2313-2331.
LI A L, DUAN H G, JIA H H, *et al*.. Research progress of metalenses in mid-infrared band[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(19): 2313-2331. (in Chinese)

[149] PEZZANITI J L, CHENAULT D B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5888: 239-250.

[150] HAO J, WANG Y, ZHOU K, *et al*.. New diagonal micropolarizer arrays designed by an improved model in Fourier domain[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 5778.

[151] 郝佳, 王燕, 周奎, 等. 基于改进模型的新型对角微偏振阵列设计[J]. 光学 精密工程, 2021, 29(10): 2363-2374.
HAO J, WANG Y, ZHOU K, *et al*.. Optimized design model of novel diagonal micropolarizer arrays[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(10): 2363-2374. (in Chinese)

[152] 余晓畅, 赵建村, 虞益挺. 像素级光学滤波-探测集成器件的研究进展[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(5): 999-1012.
YU X CH, ZHAO J C, YU Y T. Research progress of pixel-level integrated devices for spectral imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 999-1012. (in Chinese)

[153] YU X CH, SU Y, SONG X K, *et al*.. Batch fabrication and compact integration of customized multispectral filter arrays towards snapshot imaging[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30655-30665.

[154] GAN ZH F, FENG H T, CHEN L Y, *et al*.. Spatial modulation of nanopattern dimensions by combining interference lithography and grayscale-patterned secondary exposure[J]. *Light:Science & Applications*, 2022, 11(1): 89.

[155] HOU M M, CHEN Y, YI F. Lightweight long-wave infrared camera via a single 5-centimeter-aperture metalens[C]. *2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, IEEE, 2022: 1-2.

作者简介：

周俊焯(1999—), 男, 浙江温州人, 西北工业大学博士研究生, 2021 年于南京理工大学获得学士学位, 主要从事微纳偏振器件、偏振成像系统及其应用方面的研究。E-mail: junzh@mail.nwpu.edu.cn

虞益挺(1980—), 男, 浙江宁波人, 博士, 教授, 博士生导师, 2003 年、2006 年、2010 年于西北工业大学分别获得学士、硕士和博士学位, 主要从事微纳光学成像与传感技术研究。E-mail: yyt@nwpu.edu.cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

《液晶与显示》是由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会液晶分会联合主办的液晶学科和显示技术领域的专业性学术期刊。

《液晶与显示》被美国ESCI、荷兰Scopus、英国《科学文摘》（INSPEC）、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》（AJ）、美国《剑桥科学文摘》（CSA）、美国《史蒂芬斯数据库》（EBSCO）、北大《中文核心期刊要目总览》、中国科技论文与引文数据库、中国科学引文数据库、《中国学术期刊（光盘版）》等国内外数据库收录。

《液晶与显示》以创新性、综合性、实用性为办刊特色，主要刊载液晶与显示前沿及交叉领域的创新成果及综合评述，刊载范围包括：液晶物理、液晶光学、液晶化学、液晶非线性光学、液晶自适应光学、液晶光子学、液晶材料与器件、LCD/OLED/QLED/Micro-LED显示、激光显示、3D显示、柔性显示、印刷显示、成像与显示、显示材料与器件、图像处理、计算机视觉、模式识别、嵌入式系统、驱动与控制等。

《液晶与显示》入选2022中科院JCR分区，入选RCCSE中国核心学术期刊，入选《科技期刊世界影响力指数（WJCI）报告》和《光学工程和光学领域高质量科技期刊分级目录，被评为科学出版社期刊出版质量优秀奖，多次获得中国科学院科学出版基金科技期刊排行榜三等奖。

《液晶与显示》编辑部热忱欢迎广大朋友踊跃投稿订阅。

地　址：长春市东南湖大路3888号
《液晶与显示》编辑部
邮　编：130033
电　话：(0431) 86176059
E-mail：yjxs@ciomp.ac.cn

国内统一刊号：CN 22-1259/O4
国际标准刊号：ISSN 1007-2780
国内邮发代号：12-203
国内定价：100元/期
网　址：www.yjyxs.com