

基于超表面操控的偏振信息探测技术研究进展

郭忠义^{1*}, 康乾龙¹, 彭志勇², 崔月盟², 刘华松², 高 隽¹, 郭 凯¹

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009;
2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300192)

摘 要: 偏振是光的固有属性, 当光与物质发生相互作用后, 通过解构偏振态变化, 可以获取材料组成和结构的重要信息。这一特性使得光的偏振具有很高的研究价值和应用前景。近年来, 偏振成像、偏振信息等研究领域蓬勃发展, 引起国内外学者的广泛关注。高效地获取偏振信息是该领域发展的关键技术, 然而传统的偏振信息探测及获取方案有着各种不足, 制约了偏振信息技术的持续化发展。超表面技术使得人们得以根据需求操控光的相位、振幅、偏振等, 同时具有微型化和集成化的优势。文中以全矢量偏振信息的获取为出发点, 以基于阿基米德螺旋结构的圆偏振探测器为引子, 主要介绍基于超表面结构实现偏振信息探测技术的发展过程及研究现状, 包括金属超表面偏振探测器、介质超表面偏振探测器以及超表面偏振成像等研究内容, 最后展望了基于超表面结构的偏振信息探测技术未来的发展趋势。

关键词: 偏振信息; 超表面; 阿基米德螺旋; 偏振探测; 偏振成像

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201041

Progress of polarization-information detection technology based on manipulations of metasurface

Guo Zhongyi^{1*}, Kang Qianlong¹, Peng Zhiyong², Cui Yuemeng², Liu Huasong², Gao Jun¹, Guo Kai¹

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China)

Abstract: Polarization is an inherent property of light. By deconstructing the relation between the incident and transmitting polarization states, the crucial information about the composition and structure of the interacting materials can be obtained, and thus polarization information shows high research value and application potential. In recent years, research areas, such as polarization imaging and polarization information, are flourishing and attracting wide attention of scholars all over the world. A key of these research fields is the acquisition of polarization information with high efficiency. However, conventional methods for acquisition of polarization information have various shortcomings, restricting the development of polarization information. Metasurface technology provides people with an opportunity to artificially change the phase, amplitude and polarization of light wave, with characteristics of miniaturization and integration. Firstly the polarization-information acquisition and the circular-polarization detector based on Archimedes spiral structure were introduced. Then the progress of polarization-information acquisition based on metasurface in recent years, including metal metasurface

收稿日期: 2020-06-15; 修订日期: 2020-08-18

基金项目: 国家自然科学基金 (61775050); 中央高校基本研究经费 (PA2019GDZC0098)

作者简介: 郭忠义 (1981-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事包括偏振智能信息处理、先进光通信技术、涡旋雷达系统、智能传感系统、纳米光子学等方面的研究。Email: guozhongyi@hfut.edu.cn

polarization detector, all-dielectric metasurface polarization detector, and polarization imagings was summarized. At last, the research status and development trend of the polarization-information acquisition technology based on metasurface were discussed.

Key words: polarization information; metasurface; archimedes spiral structure; polarization detection; polarization imaging

0 引言

偏振类似于光的强度、相位、波长等属性,可以作为信息的载体。光的偏振指的是其电场分量振荡的方向。太阳光通常是非偏振的,或者说其偏振方向是随机变化的。然而,一些光学过程会使光发生起偏。例如:太阳光经过偏振片,会成为沿着特定方向的偏振光;太阳光在路面的反射具有明显的偏振特性,利用偏光镜可以滤除这部分反射偏振光,保证驾驶安全。利用光学偏振成像,可以获得比强度成像、彩色成像等更多的目标信息(材料构成,表面粗糙度等)。

偏振作为光的基本属性,在现代光学应用不同领域内发挥着重要作用。目前,随着偏振信息理论及仪器的不断发展^[1-7],偏振信息已经在遥感^[8-10]、水下成像^[11-13]、生物医学^[14-15]、通信^[16-18]和目标识别^[19-24]等领域的应用越来越受到国内外专家学者的重视。利用光的偏振信息进行探测、成像,可以通过对接收光线的偏振分量进行测量。进一步地分析和计算能够获得更多的偏振参数,如偏振度、偏振角、椭圆率、去偏特性等。传统偏振探测技术主要有分时法^[25-26]、分焦平面法^[27]和分振幅法^[28]。分时法缺乏实时性且不能直接获取偏振信息,一般适合考虑静态场景;分焦平面法改进了分时法不能实时探测的劣势,但不能对圆偏振的直接探测,不能得到全矢量偏振信息;分振幅法在实时探测的前提下也不能进行直接测量,且光学系统体积较大、搭建复杂。随着偏振信息技术的发展,探测器件难以满足不同领域的需求。超材料和超表面的出现为新型光学器件的发展提供了研究思路。

超材料(Metamaterial)指由亚波长共振单元按特定方式组合而成的人工复合材料,具有突破自然材料限制并实现奇异物理特性的能力。在电磁学中,负折射超材料的实现引起了国内外学者的广泛关注,其中里程碑式的工作为 2000 年英国的 Pendry 教授证明了基于负折射材料的完美聚焦透镜^[29]。超表面(Met-

asurface)属于二维超材料的范畴,是由亚波长共振单元按照需求排列形成的亚波长二维平面结构。光学超表面通过调节共振单元的几何形状、尺寸等参数,来设计光与共振单元的相互作用效果,从而实现电磁波特性的调控。“超表面”这个概念于 2011 年由美国哈佛大学 N. Yu 等人提出^[30],并在光学、电磁学、声学等领域被广泛使用。

光学超表面的通用性以及易于在芯片上制造和集成,使其成为一个发展迅速的研究领域^[31-42]。许多基于超表面的超紧凑型平面光学元件得到了证明和实现,如光束转向器^[43-46]、表面波耦合器^[47-52]、聚焦透镜^[53-64]、光学全息图^[65-71]、波片^[72-77]、滤波器^[78-79]等。2012 年, Yu 等人利用由 V 型天线组成的超表面分别实现了具有四分之一波片功能的偏振转换器^[80]和波束偏转器件^[81]。2017 年,哈佛大学 Groever 等人利用基于二氧化钛纳米柱结构的超表面实现了在可见光接近衍射极限的聚焦透镜^[82]。2017 年, Hu 等人利用氧化硅衬底上的硅膜 Z 型手性结构超表面,实现了圆二色性的透射式波片^[83]。2019 年, Hermon 等人提出并实验演示了一种测量光偏振态的全息图方法^[84]。随着等离子体基元、超表面技术的快速发展及实用化,诸多用于偏振信息获取的超表面结构陆续问世^[85-116]。

超表面令偏振探测技术得以克服传统光学偏振探测系统体积庞大、造价昂贵的困难。文中着眼于全矢量偏振信息获取的总体目标,分别介绍了基于阿基米德结构、基于超表面调控实现偏振信息探测的研究进展及应用前景。文中内容安排为:首先,介绍偏振信息的几种表征方案,借此说明全矢量偏振信息直接获取技术的重要性;其次介绍基于阿基米德螺旋线结构的圆偏振探测器件研究进展,说明超表面应用于偏振信息探测的必然性;然后分别介绍基于金属等离子体超表面和全介质超表面的偏振探测器件的研究进展,以及全矢量偏振探测器件在偏振成像方向的应用

成果;总结了该领域的研究现状并对未来发展和应用前景作出展望。

1 偏振信息表征方案

偏振态 (SOP) 是光的固有性质,在电磁波领域有着重要的应用。简单高效的偏振信息表征方案在该领域的发展中起到关键作用。下面介绍表示偏振信息的三种常用方法:琼斯矢量法、斯托克斯矢量法以及邦加球 (庞加莱球) 表示法。

1.1 琼斯矢量法

琼斯矢量法是用包含两个相互正交分量的矩阵表示一个平面矢量,其可以用来描述入射光波的偏振态。假设单色平面光波沿+z 方向传播,可以通过电场矢量 \mathbf{E} 来确定光的偏振,琼斯矢量为 $\mathbf{E} = [E_x, E_y] = [E_{0x}e^{i\delta_x}, E_{0y}e^{i\delta_y}]$ 。此时琼斯矢量表示 x 和 y 方向上电场的振幅和相位。使用时为了简化计算,常见的办法是将这两个分量绝对值的平方和归一化。当光波入射到一个光学系统中,透射/反射特性可以分别用琼斯矩阵 $\mathbf{T} = [t_{xx}, t_{xy}; t_{yx}, t_{yy}]$, $\mathbf{R} = [r_{xx}, r_{xy}; r_{yx}, r_{yy}]$ 研究,其中 t_{sp}/r_{sp} 表示入射光 p 偏振分量转换为透射/反射光 s 偏振分量的复振幅。根据关系式 $\mathbf{E}_t = \mathbf{T} \cdot \mathbf{E}_i$ 和 $\mathbf{E}_r = \mathbf{R} \cdot \mathbf{E}_i$ 可以将透射/反射光 ($\mathbf{E}_t/\mathbf{E}_r$) 与入射光 \mathbf{E}_i 用琼斯矩阵联系起来。琼斯矩阵表征光学系统对偏振光的转换特性,若琼斯矩阵中的元素受到某种调制,则透射/反射光的偏振态相应地受到调制,借此可以获得待测目标的特征信息。例如 $[1, -i; i, 1]/2$ 和 $[1, i; -i, 1]/2$ 分别表示左旋和右旋圆偏振器。

在超表面研究中,琼斯矢量法常用于研究分析结构的相位分布。通过设计单元结构相对光轴的旋转角度、几何尺寸等达到特定的宏观排布,从而获得需要的波前调控。常见的功能有,对圆偏振进行调控的光子自旋霍尔效应超表面、偏振敏感聚焦超透镜、以及将光子自旋角动量转换为轨道角动量的螺旋相位超表面。

1.2 斯托克斯矢量法

对部分偏振光进行描述或者对光的偏振态进行测量时,常选用斯托克斯矢量法。由于斯托克斯参量通过光强表示,直接测量和计算较为简便。

斯托克斯矢量法定义了 4 个物理量^[1-10]: $S_0 = E_x^2 + E_y^2$, $S_1 = E_x^2 - E_y^2$, $S_2 = 2E_x E_y \cos \Delta\varphi$ 和 $S_3 = 2E_x E_y$

$\sin \Delta\varphi$ 。通常斯托克斯矢量写成列向量的形式 $\mathbf{S} = [S_0, S_1, S_2, S_3]^T$, 其中 S_0 表示光场强度, S_1 表示 x 、 y 方向线偏振光的强度差, S_2 表示 45° 、 135° 方向线偏振光的强度差, S_3 表示左旋与右旋圆偏振分量的强度差。光场的任意偏振态均可以用斯托克斯矢量描述,换言之即知道了一束光的斯托克斯矢量就获得了其完整的偏振信息。例如对全偏振光而言斯托克斯参量满足 $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$, 部分偏振光的斯托克斯参量满足 $S_0^2 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$, 自然光的斯托克斯参量满足 $S_1 = S_2 = S_3 = 0$ 。此外,由斯托克斯参量进行分析计算可以获得更多偏振信息包括偏振度、偏振类型、偏振方向、偏振旋向等。偏振度用斯托克斯参数可以表示为 $\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}/S_0$, 即全偏振分量强度与光场总强度的比值; 全偏振分量的偏振椭圆方位角表示为 $\theta = \arctan(S_2/S_1)/2$; 偏振椭圆率角表示为 $\tan(2\varepsilon) = S_3/\sqrt{S_1^2 + S_2^2}$ 。

1.3 邦加 (庞加莱) 球表示法

1892 年,邦加 (庞加莱) 在斯托克斯空间引入 $S_0=1$ 的球,球面上的各点与光的全偏振态一一对应,人们称之为邦加球,如图 1 所示。邦加球的两极分别表征左、右旋圆偏振态;赤道上各点表征振动方向不同的线偏振光;上、下半球分别表征左、右旋椭圆偏振光。邦加球表示法直观形象,它能将每一种可能的偏振态映射到一个单位球的表面来描述,为解决一些复杂的偏振问题提供了一种简便的理论分析思路。

综上,由于偏振与信息技术结合的实际需要,通常选用斯托克斯矢量表征偏振信息,因为斯托克斯矢

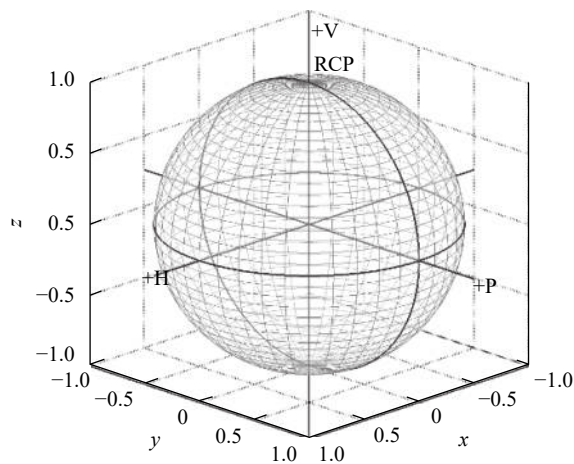


图 1 偏振态的邦加球表示法

Fig.1 Description of polarization states using Poincare sphere

量的各分量具有可探测、可计算的明显特征。相对来说,斯托克斯矢量的前三个分量皆与线偏振分量相对应,传统的光栅结构可以很好地实现线偏振光的探测,从而通过合理的光栅结构分布可以实现斯托克斯矢量前三分量的直接探测,第四分量与左、右旋圆偏振光直接相关,所以要想直接获取全矢量偏振信息,那么直接获取第四分量就是至关重要的一环。下面将从圆偏振光探测技术及全矢量偏振信息获取技术进行探讨。

2 微纳圆偏振探测技术先驱——阿基米德螺旋结构

阿基米德螺旋结构在圆极化雷达系统中有着广泛的应用,所以在最初的圆偏振分量探测研究中,国内外很多的研究团队很自然地把目光投向阿基米德螺旋结构,在微光学领域,实现圆偏振光的空间分离,从而实现圆偏振光的探测,自 2005 年以来,众多的研究人员在这一领域取得了一系列的创新性研究成果。

当圆偏振光照射阿基米德螺旋线型等离子激元(SPPs)结构,光束相对于各处狭缝壁可视为横向磁(TM)极化状态,并在各个方向激发有初始相位的SPPs。图 2(a)是一种单匝阿基米德螺旋线型 SPPs 结构^[85-86]。结构中心位置到狭缝的距离 r 与方位角 ϕ 之间的关系为 $r = r_0 + \Lambda \times \phi / 2\pi$ 其中 r_0 为初始半径, Λ 为表面等离子激元(SPPs)的波长。当与螺旋结构具有相

同旋向的圆偏振光入射时,激发的 SPPs 波以相反相位到达阿基米德螺旋结构的中心产生相干相消,形成拓扑电荷为 2 的贝塞尔光束;当与螺旋结构具有相反旋向的圆偏振光入射时,到达阿基米德螺旋结构中心的 SPPs 波具有相同的相位,发生相长干涉,形成拓扑电荷为 0 的贝塞尔光束。这种偏振敏感特性可以用来获取、分析入射光的圆偏振信息。

图 2(a)中的基于单匝阿基米德螺旋线结构的等离子透镜于 2009 年由詹启文教授团队提出^[85-86]。这种左旋阿基米德螺旋结构中,入射右旋圆偏振(RCP)将聚焦成具有中心峰值的 0 阶倏逝贝塞尔光束,入射左旋圆偏振(LCP)将形成环状的 2 阶倏逝贝塞尔涡旋光束,如图 2(a)所示。在 origin 放置一定大直径的探测器,利用检测到场强可以区分 RCP 和 LCP,分别利用左右旋结构探测相应 RCP 和 LCP 的数量,进而可提取全斯托克斯矢量的第四参数。同时,圆偏振消光比可以通过适当调整螺旋结构参数来进行提高。

2011 年, Miao 等人提出了多匝阿基米德螺旋线型 SPPs 结构,见图 2(b)^[87]。由于多匝结构中 SPPs 耦合较强,入射 RCP 产生的 0 阶倏逝贝塞尔光束质量好,聚焦深度高,入射 LCP 会得到一个暗的中心,圆偏振消光比高。为提高圆偏振探测的距离,他们将阿基米德螺旋线型狭缝与同心环形槽相结合,见图 2(c)^[88]。环形沟槽将 SPPs 分散到辐射电磁场,产生的散射光

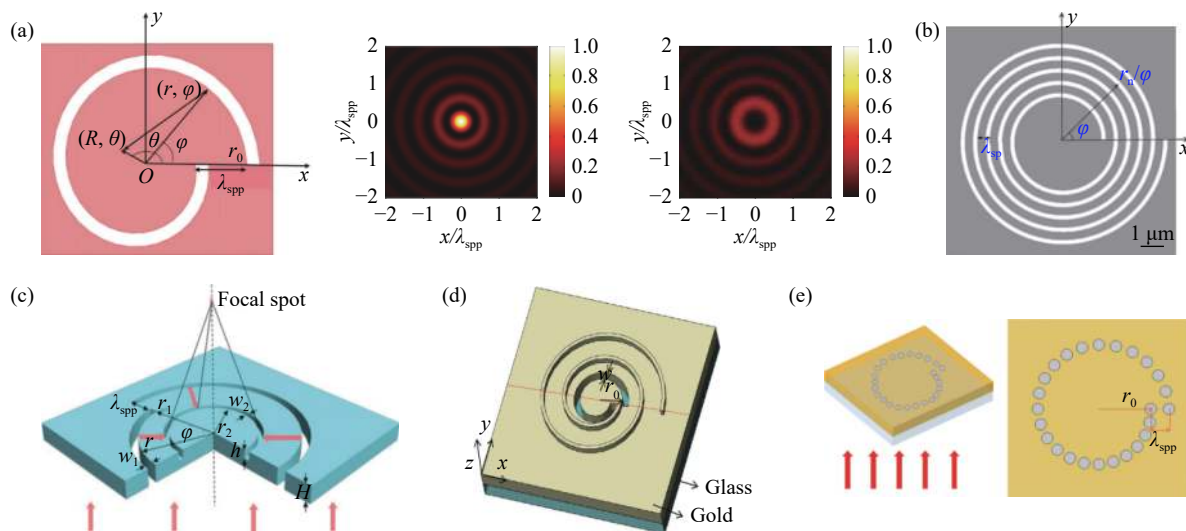


图 2 基于阿基米德螺旋线型等离子激元结构的圆偏振探测器^[85-90]

Fig.2 Devices for detecting circular polarization based on Archimedes spiral plasmonic structures^[85-90]

在远场发生相干相消或相干相长。该结构在远场的实际应用中变得更为方便。

2015 年,合肥工业大学郭忠义团队提出了基于复合阿基米德同轴螺旋结构的圆偏振分析器,见图 2(d)^[89]。该结构中,单匝阿基米德螺旋线型狭缝,被相同旋向的阿基米德螺旋线型光栅包围,对入射光的圆偏振态极为敏感。金属底部的阿基米德螺旋线型光栅,提高入射光与 SPPs 的耦合效率;金属膜上的阿基米德螺旋线型光栅,将 SPPs 解耦为散射光。阿基米德螺旋线型光栅的存在,提高了入射光的圆偏振消光比。仿真结果表明,与阿基米德螺旋线型狭缝相比,与阿基米德螺旋线型光栅的结合使整个结构具有更高的效率和更好的性能。

上述几种结构的工作机制均建立在狭缝处 SPPs 的激发之上,带宽较小,应用场景有限。针对这一问题,郭忠义团队提出了一种基于阿基米德螺旋线型纳米针孔阵列的宽带圆偏振分析器,见图 2(e)^[90]。纳米针孔阵列结构中,各纳米针孔可视为偶极子单元,共振带宽较大。上述几种结构中,仅有与径向分量相关的径向 SPPs 产生,透射场强相对较小。阿基米德螺旋线型纳米针孔阵列中,由偶极子源叠加产生总的透射光场,场强增大,且具有较高的圆偏振消光比。

基于阿基米德螺旋线型等离子激元结构,提供了一种有效的圆偏振信息获取方案。然而,在面向全矢量偏振信息获取的应用场景时,这种结构不能满足需求,只能作为组成部分与其他偏振信息获取器件相结合。这样一来,对加工技术和信息处理方案提出了新的要求,与之前的信息技术集成化、小型化、数字化的大趋势背道而驰。这也使得科研工作者们在偏振信息获取技术的道路上继续探索。

3 金属超表面偏振探测器

超表面技术中,光场的相位、振幅、偏振等物理特性在界面处发生突变,并且可以根据需求进行人工设计,同时实现多种功能。因此,超表面更适合信息技术的发展趋势。近年来,基于超表面的偏振器件被广泛研究,获得了圆偏振探测、四分之一波片、二分之一波片等结果。超表面已经在偏振信息获取技术领域崭露头角,表现出巨大的应用前景。接下来将从金属(等离子激元)结构开始,对基于超表面的偏振探

测器件进行讨论。

光束偏转器件根据偏振态将入射光向不同方向偏转,可有效实现对偏振态的分离与探测。基于此目标,文献^[91]设计了一个由 C 型金属结构组成的透射超表面。该结构有 6 个 C 型金属结构,通过开口方向逐个改变而实现 $0\sim 2\pi$ 相位覆盖。同时,C 型金属结构在 x 和 y 方向上具有各向异性的电磁响应特性,使得该结构具有几何相位,从而实现入射光到透射光的交叉偏振转换。如图 3(a)所示,在左/右旋圆偏振光的垂直入射下,透射光分别实现了 43° 与 -43° 的偏转;在线偏振光垂直入射下,透射光被分为向 43° 与 -43° 方向偏转的左/右旋圆偏振光。光的圆偏振对应光子自旋态,这种由自旋决定的光束偏转现象可解释为光子自旋霍尔效应。这种基于几何相位超表面的偏振偏转器件,应用于反射式的工作场景,工作效率大幅度提高^[71]。同时,几何相位超表面在偏振信息探测方面也展现出了一定的优势^[92-98]。

上述基于光子自旋霍尔效应的偏振器件,将不同偏振态的入射光转换成向不同方向传播的平面波,对探测器的空间分辨率有要求。透镜作为重要的光学器件被广泛应用,光线通过透镜后分别进行聚焦和发散,聚焦透镜将可以很好地提高偏振探测器的空间分辨率,为此笔者在超表面透镜领域做了大量的工作。在前期的工作中,设计了一种结合透镜功能的偏振光探测器件^[93],如图 3(b)所示,该器件由金属矩形开口环谐振器组成。因为开口位置绕光轴旋转,电磁响应具有圆偏振敏感特性,经过设计得到:对左旋圆偏振光而言可看作聚焦透镜,对右旋圆偏振光而言可看作为一个发散透镜。这种基于金属矩形开口环谐振器的超表面,具有宽谱特性,故而该圆偏振旋向敏感的透镜可在宽谱范围内工作,结果显示在 $740\sim 950$ nm 范围内具有双极性特性。光子具有自旋和轨道两种角动量,可以相互转换。

利用同样的金属矩形开口环谐振器,郭忠义团队设计了一种圆偏振依赖的涡旋相位板^[94],如图 3(c)所示。该结构对波长在 $710\sim 900$ nm 波段的圆偏振光有效,自旋态相反的入射光会生成具有相反拓扑电荷数的涡旋光束。可通过生成涡旋光的拓扑电荷数获取入射圆偏振光的旋向信息。

根据光学 Babinet 原理,郭忠义团队利用基于金

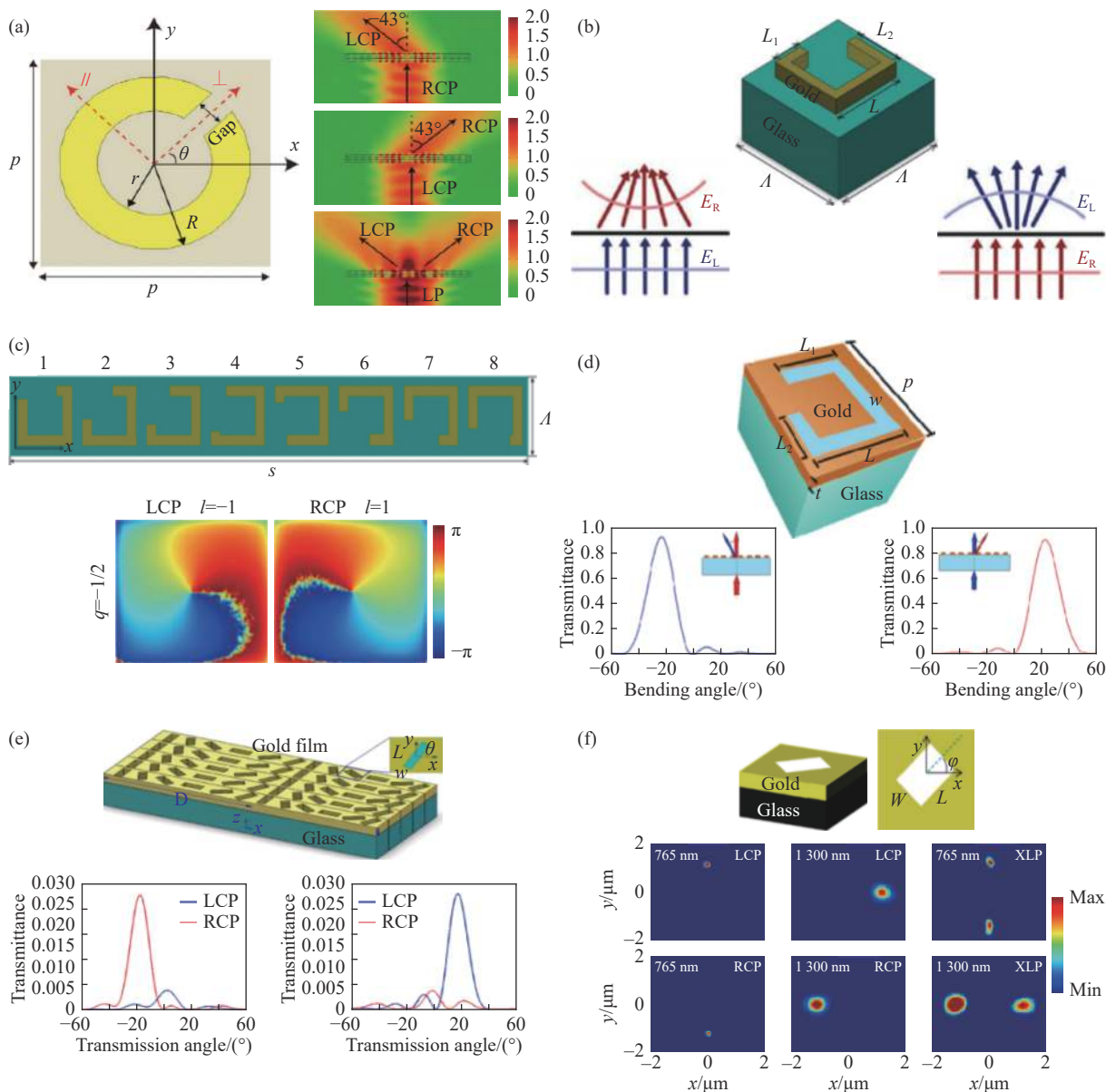


图 3 基于金属(等离子激元)超表面的偏振信息获取器件^[91, 93-96, 62]

Fig.3 Devices for detecting polarization states based on metal (plasmonic) metasurfaces^[91, 93-96, 62]

属薄膜上的矩形开口环形狭缝(金属矩形开口环谐振器反结构)实现了光子自旋霍尔效应,如图 3(d)^[95]所示。结果显示,左/右旋圆偏振光入射,透射光会成为右/左旋圆偏振光,并向 $\pm 23^\circ$ 偏转;线偏振光入射,透射光分解为左、右旋圆偏振光并分别向 $\pm 23^\circ$ 偏转。这种超表面,可以实现左、右旋圆偏振光的空间分离,可以通过对透射光中的左旋圆偏振光的探测,实现对原有光信息中右旋光的探测,反之亦然。通过这种方式,可以通过一个器件同时探测到入射光信息中的左、右旋圆偏振光含量,从而可以直接确定斯托克斯矢量的

第四分量(V分量)。需要注意的是,这种超表面的偏振态交叉转换的效率不高(小于 10%),透射光中含有相当一部分与入射光同向的偏振态光信息。

针对这个问题,文献^[96]提出了一种由金膜矩形孔构成的超表面,可有效抑制同向偏振光,如图 3(e)所示。理论显示,当透射光 x 和 y 方向分量的相位差为 π 时,交叉偏振转换效率可达到 100%。通过在 605 nm 处选取满足相差的矩形孔,实现了在左旋圆与右旋圆偏振光入射时分别有 17° 与 -17° 的偏转角,偏振转换效率达到了 87.5%。该结构在圆偏振入射时可作为半

波片实现偏振转化,在线偏振入射时作为四分之一波片实现线偏振到圆偏振的转化。

以上讨论的结果对圆偏振光的探测比较有效,却不能同时对不同旋性的圆偏振光进行聚焦探测。针对这个问题,郭忠义团队设计了一种双工作波长(765 nm 和 1300 nm)的等离子激元超表面^[62],如图 3(f)所示。该结构具有双波长的光子自旋霍尔效应:分别将左旋圆(1300 nm)、右旋圆(1300 nm)、左旋圆(765 nm)、右旋圆(765 nm)偏振入射光聚焦,相同波长的左/右旋圆偏振光的焦点位置对称分布。

以上介绍的利用金属超表面的等离子激元调控方案实现偏振信息获取的部分手段,还有许多其他技术与等离子激元超表面相结合,也可以达到偏振信息探测的目的,例如基于计算全息技术的金属超表面等。

4 介质超表面偏振探测器

基于等离子激元超表面的主要工作部分为金属结构,材料的固有热损耗较高,导致相关器件工作效率低下。高折射率的介质或半导体(硅、二氧化硅、二氧化钛、氮化镓、砷化镓等)具有较高的极化电荷密度,它们构成的微纳结构以米氏共振的形式与入射光波发生强相互作用;同时,介质相较于金属又具有较低的光吸收及热损耗。这些特性使得全介质超表面成为近年来超材料、超表面领域的研究热点。基于全介质超表面的电磁调控器件层出不穷,比如波束整形、全息成像、非线性信号转换等。为摆脱金属损耗的困境,研究人员利用全介质超表面制作光学偏振探测器件,获取偏振信息的维度逐渐趋近全矢量偏振信息。

图 4(a)是实现光子自旋霍尔效应全介质超表面^[63],其结构单元是玻璃基底上的非晶硅纳米砖。与前面讨论的矩形金属结构相同,这里的结构单元利用几何相位原理实现 x 和 y 方向上各向异性的光学特性,从而达到对圆偏振旋向敏感的目标。Faraon 团队采用琼斯矩阵建模和实验验证的手段,研究了这种介质超表面将左/右旋圆偏振光偏转到不同方向的能力。基于类似的原理,该团队利用圆柱形非晶硅结构研究了对正交偏振光进行独立调控的方案^[99-101]。图 4(b)中展示同时对 x 和 y 偏振光进行偏转和聚焦,实验测量效率最高可达 97%^[99];图 4(c)演示偏振相关的双波

长超表面,可将 780 nm 和 915 nm 的线偏振光聚焦到相同位置,工作效率可达 90%^[100]。

随着研究的深入和实验技术的完善,全矢量偏振信息的探测和获取逐渐成为可能。图 4(d)所示为基于全介质超表面的全斯托克斯成像偏振检测器^[101]。这种设计的基本思路是将超表面划分为 6 个像素区域,分别对应左、右旋圆偏振,45°、135°线偏振, x 、 y 线偏振。各像素区域利用双相位调制原理,分别将 3 对正交偏振光聚焦到图像传感器的 6 个不同的位置。提取 6 个像素区域的聚焦能量,计算可获得全 Stokes 参数,即实现了全矢量偏振信息获取。这种方案突破了基于偏振滤波器的焦平面分离偏振相机 50% 极限工作效率,实验结果也证明了该超表面正确测量入射光偏振状态的能力。

从国内来看,利用全介质超表面进行偏振信息检测的研究一直同步进行。相比而言,国内的学者更重视超表面技术的应用前景。合肥工业大学郭忠义课题组探索了全介质超表面偏振器件在各频段的应用方案,包括通信波段、中红外波段、太赫兹波段等。需要注意的是,该团队主要采取双相位调控原理^[102-107],即通过 x 和 y 方向结构尺寸分别控制 x 、 y 偏振分量的相位,这与 Faraon 团队采用的几何相位法有所不同。

针对通信波段(1500 nm),提出一种基于硅纳米砖阵列的超薄介质超表面,如图 4(e)所示^[102]。通过调整硅纳米砖的长和宽可以分别对入射光 x 和 y 线偏振分量实现 $0\sim 2\pi$ 相位调控。 x 、 y 偏振光的相位调控相互独立且同向偏振光的透射率均超过 90%。基于该介质超表面的光学偏振分束器,可以将两个正交线偏振光偏转到不同方向或聚焦到不同位置,进一步改变超表面的晶格常数和超晶胞内结构单元数量可以实现任意偏转角度。此外,通过硅纳米砖结构位置顺序的调整,可以分别对入射光 x 和 y 线偏振分量实现 $0\sim 6\pi$ 、 $0\sim 10\pi$ 甚至更大范围的相位调控,即利用高阶(3 阶和 5 阶)衍射对正交偏振光实现大角度偏转,更有利于偏振态的检测,如图 4(f)所示^[103]。

偏振探测技术在红外波段能够弥补强度成像的不足,具有重要的军事应用价值。近年来,郭忠义课题组致力于红外偏振探测技术,利用全介质超表面开展了一系列研究。提出一种基于双相位调制原理的

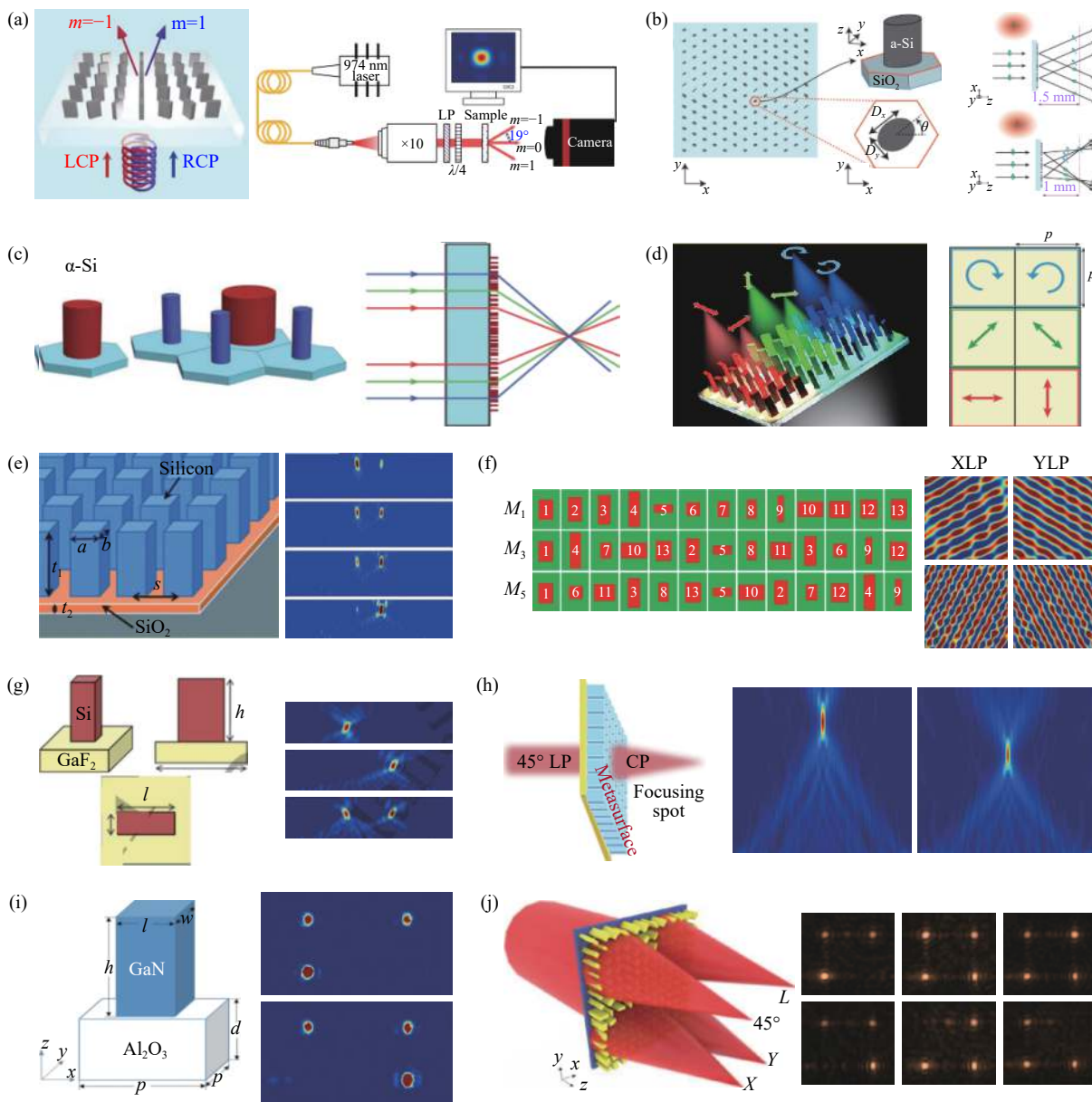


图 4 基于介质超表面的偏振探测器件^[63, 99-107]

Fig.4 Devices for detecting polarization states based on dielectric metasurfaces^[63, 99-107]

介质超表面中红外偏振器件, 见图 4(g)^[104]。通过调整硅纳米砖几何尺寸, 在对波长为 4.5 μm 的入射 x 和 y 线偏振光实现 $0\sim 2\pi$ 相位调控的同时, 透射振幅维持在较高水平。以此为基础, 设计实现了偏振敏感的光束偏转器、分束器和聚焦透镜。

太赫兹 (Terahertz) 波的独特性质使其在现实生活中有着巨大应用前景。为推动太赫兹技术与偏振探测技术融合发展, 该课题组提出了一种基于硅微砖阵列介质超表面双功能太赫兹偏振器件, 见图 4(h)^[105]。结构由不同尺寸的硅晶砖单元组成, 调整

单元结构的长和宽可以分别对入射 x 和 y 线偏振光实现 $0\sim 2\pi$ 的相位调控, 同时在 1.0 THz 电磁波透射率高达 90%。紧跟超表面多功能化的趋势, 该课题组设计了具有波片、偏转器或透镜等双功能的太赫兹偏振器件。

面向全矢量偏振信息探测的目标, 郭忠义课题组同样做出了尝试。基于双相位调制法的氮化镓超表面, 结构分为 4 像素区域, 分别对应 x 、 y 和 45° 、 135° 线偏振光。入射线偏振光会根据其偏振角, 被分别聚焦在 4 个不同位置, 见图 4(i)^[106]。提取 4 个偏振

光焦点位置的能量,从而定量分析入射偏振光的线偏振度。该课题组结合双相位调制法和光学量子霍尔效应,进一步将这种 4 像素区域的氯化镓超表面优化调整,分别对应 x 、 y 和 45° 线偏振光以及左旋圆偏振光,见图 4(j)^[107]。入射光会根据偏振态不同,被聚焦在 4 个不同位置。提取 4 个焦点位置的能量,可以恢复斯托克斯参数及获得全矢量偏振信息。相较于 Faraon 团队 6 像素区域的方案,这种做法对于提高器件效率和集成度更为有利。

5 偏振超表面的应用

文中介绍了面向偏振信息探测的等离子激元超表面和全介质超表面。随着微纳加工工艺的发展进步,电子束曝光、离子束刻蚀、光刻、自组装、化学气相沉积等物理化学方法日益成熟。利用这些工艺技术,超表面的加工已经不再是制约该领域发展的瓶颈。近年来,偏振超表面逐渐走向应用,包括偏振成像、偏振检测、偏振全息等。

偏振成像是一种测量探测光在场景中偏振状态的方法。光谱、高光谱成像技术能够获取场景中物质组成信息,偏振成像则包含表面形状、纹理和各种材料光学性能等有价值的信息。基于超表面的偏振成像器件,便于制作片上器件、集成度高,已经发展成为偏振超表面的重要应用方向。

图 5(a) 为手性成像示意图^[108]。手性是生物化合物的常见特性,从氨基酸、DNA 到葡萄糖包括药物分子等都有固定旋向,不同的手性分子性质往往不同。换言之,绝大多数生物化合物具有手性光学特性,对圆偏振光的旋向敏感。这为利用光学手段检测和量化分析手性分子提供基础。传统手性成像技术需要多个光学组件级联,设备成本高且集成度低。哈佛大学 Capasso 团队设计了一种二氧化钛超表面,用于同时获取可见光范围内偏振与光谱信息。为实现应用目的,该结构包括两种不同的二氧化钛纳米结构阵列,见图 5(a)。蓝色和绿色结构分别用于操控、聚焦右旋/左旋圆偏振光,并在同一视场内同时形成一个物体的两个相反螺旋度的图像。该方案采用几何相位法对左右旋圆偏振光进行相位调制,当每个结构作为半波片将输入光的圆偏振态转换为旋向相反的透射光时,聚焦效率达到最大。文中利用该多光谱手性

透镜对一种甲虫做了成像实验。由于这种甲虫的外骨骼具有手性特征,对左旋圆偏振光具有较高反射率,成像结果具有很好的空间分辨率,左侧的图像能够很清晰地呈现甲虫外壳结构。

Capasso 团队引入矩阵傅里叶光学数学形式,用于处理近轴衍射光学中的偏振问题^[109],并提出在单一衍射光学元件中并联多偏振器件的方案。根据该思想,设计了一种基于介质超表面的衍射光栅,如图 5(b) 所示,其衍射级次可作为偏振态任意选定的偏振器。成像场景的光场入射到光栅上,携带偏振信息的光强被光栅进行“分选”。光学透镜和传感器等结合,在成像传感器上形成 4 个对应于 4 个衍射级次的图像副本。实验显示这些图像副本能有效地通过相应偏振态的偏振器件,对像素进行分析得以重建全斯托克斯矢量。

反射光或透射光的偏振包含了目标丰富的信息,在薄遥感、机器视觉等领域,偏振检测具有重要的应用价值。超表面的偏振调控特性可将传统偏振检测系统变换成一个超紧凑的元件,集多功能于一体。图 5(c) 展示了一种基于超表面的片上偏振检测器件,工作频率在可见光频段^[110]。该超表面结合双相位法和几何相位法,集成了左、右旋圆偏振, 45° 、 135° 线偏振, x 、 y 线偏振信息的探测功能。当一束光入射时,所携带的 6 种偏振信息能够被同时获取。在探测器 (COMS 相机) 前没有其他光学元件的情况下,可以一次性获取全斯托克斯参数。文中该装置测量了手性材料的光学特性,并与商用椭圆仪得到的数据进行比较,证明了该装置的有效性。

来自华中科技大学的研究团队,基于全介质超表面制作了一种广义 Hartmann-Shack 阵列,用于测量光束相位梯度轮廓,同时可以检测光束偏振方向在空间上的分布,见图 5(d)^[111]。为了把入射光波前分割成子波前阵列并分别聚焦,超表面由一系列子结构组成。每个子结构即为一个 6 像素的全矢量偏振分析器。该超表面与记录阵列焦点的摄像机结合形成一个紧凑系统,通过测量焦点振幅达到实时光束诊断的目的。文中实验证明该结构能够很好地诊断出径向和方位角向偏振矢量光束的偏振态。

全息技术自发明以来,已成为塑造波前、记录和重建真实或虚拟物体的重要技术。偏振超表面可以

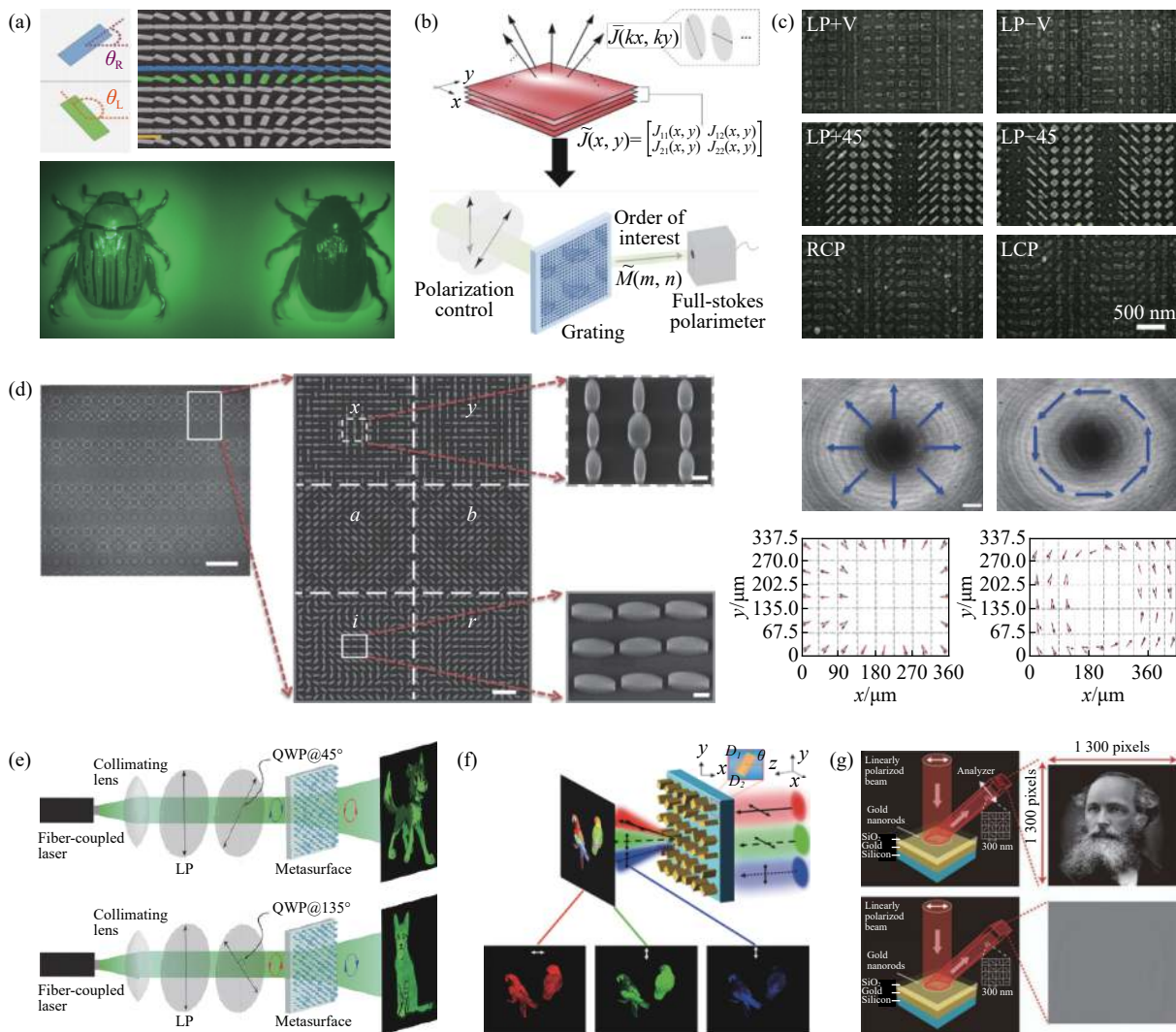


图 5 基于偏振超表面的应用^[108-114]

Fig.5 Polarization-metasurface for application^[108-114]

对偏振和相位联合调控,实现多通道全息显示。基于偏振超表面,学者们提出了不同的偏振全息方案。

Mueller 等人将几何相位和传播相位相结合,设计了一种双折射的 TiO₂ 超表面。人们可以在一对正交偏振态上独立加载任意的相位^[112],如图 5(e)所示。在可见光波段,通过同时改变单元结构的方向角和尺寸,实现了卡通狗和卡通猫在任意两个正交偏振(包括圆形和椭圆形)上的完全独立全息图。然而,这种双通道的偏振超表面中,相邻结构之间的耦合会引起通道之间的串扰,并影响全息技术的效率与质量。针对此问题,Hu 等人设计了非交错排布的 TiO₂ 超表面,这种结构中的三个偏振通道分别对应三原色,实现近乎零串扰的三种远场全息图^[113],如图 5(f)所示。实验结果显示,通过充分利用琼斯矩阵的自由度,将

三个独立相位轮廓编码到三个偏振通道中,再将三原色信息耦合到三通道中,在可见光范围内实现了几乎零串扰地高质量、高效率的全息图。

Yue 等人利用反射式偏振超表面,实现高保真灰度图像隐藏和显示的方案^[114],如图 5(g)所示。实验中将像素大小为 300 nm×300 nm 的图像,编码到偏振态随空间变化的激光束中,并入射到设计的超表面上。产生的两束反射光具有相同的振幅和相反的圆偏振态,均包含隐藏的灰度图像信息。结果显示,反射光只有经过特定的分析器件(线性偏振器)后,图像才可以显示出来。这种隐藏灰度图像和偏振操作的独特技术为加密、成像、光通信、量子科学和基础物理等各种应用提供了新的机会。

6 总结与展望

超表面能够通过控制入射光的振幅、相位和偏振来设计各种偏振器件。笔者概述了基于超表面的偏振信息获取技术的快速发展。通过介绍偏振信息的表征方案和阿基米德螺旋线型等离子激元器件,说明超表面对于全矢量偏振信息获取的优越性和重要性。笔者沿着基于超表面的偏振探测器件发展路线,回顾了基于等离子激元超表面、全介质超表面的圆偏振、线偏振、全矢量偏振探测器,并对探测器的结构、原理、性能等作了详细介绍。笔者最后介绍了偏振超表面在成像领域的应用成果,进一步显示偏振信息在信息产业集成化、智能化大趋势下的卓越特性。

虽然基于超表面的偏振探测技术取得了喜人的进展,但距离超表面偏振探测器件的实用化、产品化、产业化尚有很长的路要走,仍有一些挑战需要克服。同时,笔者认为,该领域未来的研究可以从以下几个方面开展:

(1) 超表面的材料和结构一旦确定,其功能往往也固定下来。因此到目前为止,大多数基于超表面的偏振探测器或功能单一,或工作频率受限。利用光学特性动态可调(如热调控、电调控等)的材料制作偏振超表面,可以获得动态调控的偏振器件,对于偏振信息的发展具有重要意义。

(2) 偏振信息调控器件与电子元器件实现片上高效集成,能够有效提升器件的集成化、高响应度,也将有效降低偏振信息获取装备的制造成本,对于偏振信息功能的应用推广具有重要的价值。

(3) 当前信息技术与数字技术的发展相辅相成,未来在偏振信息器件的设计中需要更多考虑数字化发展的大趋势,一方面要考虑采用数字化技术降低偏振信息器件的设计难度,另一方面也要考虑设计的偏振器件如何应用于数字信息系统。

参考文献:

- [1] Wang Chi, Gao Jun, Yao Tingting, et al. Acquiring reflective polarization from arbitrary multi-layer surface based on Monte Carlo simulation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9397-9411.
- [2] Guo Zhongyi, Wang Xinyang, Li Dekui, et al. Advances on theory and application of polarization information propagation (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20201013. (in Chinese)
- [3] 郭忠义, 汪信洋, 李德奎, 等. 偏振信息传输理论及应用进展(特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 20201013.
- [3] Shen Fei, Zhang Bianmei, Guo Kai, et al. The depolarization performances of the polarized light in different scattering media systems [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 3900212.
- [4] Hu Tianwei, Shen Fei, Wang Kaipeng, et al. Broad-band transmission characteristics of polarizations in foggy environments [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(6): 342.
- [5] Xu Qiang, Guo Zhongyi, Tao Qiangqiang, et al. A novel method of retrieving the polarization qubits after being transmitted in turbid media [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(3): 035606.
- [6] Xu Qiang, Guo Zhongyi, Tao Qiangqiang, et al. Transmitting characteristics of the polarization information under seawater [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(21): 6584-6588.
- [7] Xu Qiang, Guo Zhongyi, Tao Qiangqiang, et al. Multi-spectral characteristics of polarization retrieve in various atmospheric conditions [J]. *Optics Communications*, 2015, 339: 167-170.
- [8] Cheng Feng. Study on the extraction of aerosol information and its spatial-temporal changes based on PARSOL and CALIPSOL remote sensing data in the Yangtze River Delta [J]. *Acta Geodactica et Cartographica Sinica*, 2019(6), 48(6): 803. (in Chinese)
- [8] 程峰. 基于偏振和激光雷达遥感的长三角地区气溶胶信息提取及其时空变化研究[J]. *测绘学报*, 2019(6), 48(6): 803.
- [9] Talmage D A, Curran P J. Remote sensing using partially polarized light [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(1): 47-64.
- [10] Herman M, Deuzé J L, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces including polarization measurements and application to POLDER measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 17039-17049.
- [11] Chang P C Y, Flitton J C, Hopcraft K I, et al. Improving visibility depth in passive underwater imaging by use of polarization [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2794-2803.
- [12] Zhao Yongqiang, Dai Huimin, Shen Linghao, et al. Review of underwater polarization clear imaging methods [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20190574. (in Chinese)
- [12] 赵永强, 戴慧敏, 申凌皓, 等. 水下偏振清晰成像方法综述[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 20190574.
- [13] Dubreuil M, Delrot P, Leonard I, et al. Exploring underwater target detection by imaging polarimetry and correlation techniques [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 997-1005.

- [14] De Boer J F, Milner T E, Van Gemert M J C, et al. Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(12): 934-936.
- [15] Sakhnovskiy M Y, Syvokorovskaya A V, Martseniak V, et al. System of biological crystals fibrillar networks polarization-correlation mapping[C]//Applications of Digital Image Processing XLI. International Society for Optics and Photonics, 2018, 10752: 107522G.
- [16] Gaiarin S, Perego A M, da Silva E P, et al. Dual-polarization nonlinear Fourier transform-based optical communication system [J]. *Optica*, 2018, 5(3): 263-270.
- [17] Tao Qiangqiang, Guo Zhongyi, Xu Qiang, et al. Polarization retrieve for scattering light in the 10 km multilayer atmosphere [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(8): 085701.
- [18] Xu Xiong, Tao Qiangqiang, Shen Fei, et al. Retrieving the polarization information for light communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0922002. (in Chinese)
许雄,陶强强,沈飞,等.基于偏振信息恢复的光通信[J].*红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0922002.
- [19] Chamberlain N E, Walton E K, Garber F D. Radar target identification of aircraft using polarization-diverse features [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(1): 58-67.
- [20] Tao Qiangqiang, Sun Yongxuan, Shen Fei, et al. Active imaging with the aids of polarization retrieve in turbid media system [J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 405-410.
- [21] Wang Feng, Jia Rong, Liu Xiao, et al. Study on UV polarization reflection characteristics of sweat latent fingerprints (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20201011. (in Chinese)
王峰,贾镛,刘晓,等.汗潜指纹紫外偏振反射特性研究(特约)[J].*红外与激光工程*, 2020, 49(6): 20201011.
- [22] Xiong Zhihang, Liao Ran, Zeng Yaguang, et al. Rapid identification of metal debris in complicated scenes by using polarization imaging(Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20201012. (in Chinese)
熊志航,廖然,曾亚光,等.利用偏振成像在复杂现场快速识别金属碎屑(特约)[J].*红外与激光工程*, 2020, 49(6): 20201012.
- [23] Chen Weili, Xu Wenbin, Wang Shuhua, et al. Research on coating materials detection and recognition based on infrared spectral polarization degree contrast [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20190445. (in Chinese)
陈伟力,徐文斌,王淑华,等.基于红外光谱偏振度对比度的涂层材质识别研究[J].*红外与激光工程*, 2020, 49(6): 20190445.
- [24] Shen Fei, Wang Kaipeng, Tao Qiangqiang, et al. Polarization imaging performances based on different retrieving Mueller matrixes [J]. *Optik*, 2018, 153: 50-57.
- [25] Harnett C K, Craighead H G. Liquid-crystal micropolarizer array for polarization difference imaging [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7): 1291-1296.
- [26] Gao Yong, Gao Jun, Fan Zhiguo, et al. Design of multi-spectral target polarization information detection system[J]. *Micro-Computer & its Applications*, 2013, 32(10): 92-94.
- [27] Farlow C A, Chenault D B, Spradley K D, et al. Imaging polarimeter development and applications[C]//Proc of SPIE, 2002, 4481: 118-125.
- [28] Perkins R, Gruev V. Signal-to-noise analysis of Stokes parameters in division of focal plane polarimeters [J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 25815-25824.
- [29] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966.
- [30] Yu Nanfang, 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.
- [31] Pors A, Nielsen M G, Valle G D, et al. Plasmonic metamaterial wave retarders in reflection by orthogonally oriented detuned electrical dipoles [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9): 1626-1628.
- [32] Yu Nanfang, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [33] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(12): 889.
- [34] Koenderink A F, Alù A, Polman A. Nanophotonics: Shrinking light-based technology [J]. *Science*, 2015, 348(6234): 516-521.
- [35] Luo Xiangang, Pu Mingbo, Ma Xiaoliang, et al. Taming the electromagnetic boundaries via metasurfaces: from theory and fabrication to functional devices [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, 2015(16): 204127.
- [36] Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A, et al. Metasurfaces: From microwaves to visible [J]. *Physics Reports*, 2016, 634: 1-72.
- [37] Hsiao H H, Chu Chenghung, Tsai D P. Fundamentals and applications of metasurfaces [J]. *Small Methods*, 2017, 1(4): 1600064.
- [38] Ding Fei, Pors A, Bozhevolnyi S I. Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2017, 81(2): 026401.
- [39] Hum S V, Perruisseau-Carrier J. Reconfigurable reflectarrays

- and array lenses for dynamic antenna beam control: A review [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(1): 183-198.
- [40] Zheludev N I, Kivshar Y S. From metamaterials to metadevices [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 917-924.
- [41] Genevet P, Capasso F. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2015, 78(2): 024401.
- [42] Guo Zhongyi, Chen Xianzhong, Zentgraf Thomas. Editorial for the theories and applications of metasurfaces [J]. *Journal of Physics D*, 2018, 51(15): 150201.
- [43] Ni Xingjie, Emani N K, Kildishev A V, et al. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas [J]. *Science*, 2012, 335(6067): 427-427.
- [44] Sun Shulin, Yang Kuangyu, Wang C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [45] Zhou Jian, Wang Jingjing, Guo Kai, et al. High-efficiency terahertz polarization devices based on the double-phase modulating metasurface [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2018, 114: 75-81.
- [46] Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(19): 197401.
- [47] Sun Shulin, He Qiong, Xiao Shiyi, et al. Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426-431.
- [48] Lin Jiao, Mueller J B, Wang Qian, et al. Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons [J]. *Science*, 2013, 340(6130): 331-334.
- [49] Huang Lingling, Chen Xianzhong, Bai Benfeng, et al. Helicity dependent directional surface plasmon polariton excitation using a metasurface with interfacial phase discontinuity [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(3): e70-e70.
- [50] Pors A, Nielsen M G, Bernardin T, et al. Efficient unidirectional polarization-controlled excitation of surface plasmon polaritons [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(8): e197-e197.
- [51] Sun Wujiong, He Qiong, Sun Shulin, et al. High-efficiency surface plasmon meta-couplers: concept and microwave-regime realizations [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(1): e16003-e16003.
- [52] Ding Fei, Deshpande R, Bozhevolnyi S I. Bifunctional gap-plasmon metasurfaces for visible light: polarization-controlled unidirectional surface plasmon excitation and beam steering at normal incidence [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(4): 17178-17178.
- [53] Li Xin, Xiao Shiyi, Cai Bengeng, et al. Flat metasurfaces to focus electromagnetic waves in reflection geometry [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 4940-4942.
- [54] 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.
- [55] Ni Xingjie, Ishii S, Kildishev A V, et al. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(4): e72-e72.
- [56] Yin Zhiping, Zheng Qun, Wang Kuiyuan, et al. Tunable dual-band terahertz lens based on stacked graphene metasurfaces [J]. *Optical Communications*, 2018, 429: 41-45.
- [57] Zhou Hongping, Chen Lei, Shen Fei, et al. A broadband achromatic metalens in mid-infrared region [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11: 024046.
- [58] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L, et al. Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 829-834.
- [59] Zhou Junxiao, Qian Haoliang, Hu Guangwei, et al. Broadband photonic spin Hall meta-lens [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(1): 82-88.
- [60] Khorasaninejad M, Chen Weiting, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging [J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [61] Arbabi A, Arbabi E, Kamali S M, et al. Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-9.
- [62] Wang Wei, Zhao Zehan, Guo Zhongyi, et al. Spin-selected dual-wavelength plasmonic metalenses [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(5): 761-770.
- [63] Khorasaninejad M, Crozier K B. Silicon nanofin grating as a miniature chirality-distinguishing beam-splitter [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-6.
- [64] Wang Shuming, Wu Pin Chieh, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-9.
- [65] Ni Xingjie, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2807.
- [66] Chen Weiting, Yang Kuangyu, Wang Chih-Ming, et al. High-

- efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(1): 225-230.
- [67] Huang Lingling, Chen Xianzhong, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 1-8.
- [68] Zheng Guoxing, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [69] Wen Dandan, Yue Fuyong, Li Guixin, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-7.
- [70] Khorasaninejad M, Ambrosio A, Kanhaiya P, et al. Broadband and chiral binary dielectric meta-holograms [J]. *Science Advances*, 2016, 2(5): e1501258.
- [71] Li Rongzhen, Shen Fei, Sun Yongxuan, et al. Broadband, high-efficiency, arbitrary focusing lens by a holographic dielectric meta-reflectarray [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(14): 145101-145107.
- [72] Zhao Yang, Andrea Alù. Tailoring the dispersion of plasmonic nanorods to realize broadband optical meta-waveplates [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(3): 1086-1091.
- [73] Pors A, Nielsen M G, Bozhevolnyi S I. Broadband plasmonic half-wave plates in reflection [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 513-515.
- [74] Yang Yuanmu, Wang Wenyi, Moitra P, et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1394-1399.
- [75] Yin Zhiping, Chen Fujia, Zhu Lie, et al. High-efficiency dielectric metasurfaces for simultaneously engineering polarization and wavefront [J]. *Journal of Material Chemistry C*, 2018, 6: 6354-6359.
- [76] Ding Fei, Wang Zhouxian, He Sailing, et al. Broadband high-efficiency half-wave plate: a supercell-based plasmonic metasurface approach [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4111-4119.
- [77] Wu Pin Chieh, Tsai Weiyi, Chen Weiting, et al. Versatile polarization generation with an aluminum plasmonic metasurface [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(1): 445-452.
- [78] Shen Fei, Kang Qianlong, Wang Jingjing, et al. Dielectric metasurface-based high-efficiency mid-infrared optical filter [J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(11): 938.
- [79] Wang Jingjing, Guo Kai, Guo Zhongyi. THz filter based on the Si microdisk array [J]. *AIP Advances*, 2019, 9: 045106.
- [80] Yu Nanfang, 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.
- [81] Blanchard R, Aoust G, Genevet P, et al. Modeling nanoscale V-shaped antennas for the design of optical phased arrays [J]. *Physical Review B*, 2012, 85(15): 155457.
- [82] Groever B, Chen W T, Capasso F. Meta-lens doublet in the visible region [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(8): 4902-4907.
- [83] Hu Jingpei, Zhao Xiaonan, Lin Yu, et al. All-dielectric metasurface circular dichroism waveplate [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41893.
- [84] Hermon S, Ma A, Yue F, et al. Metasurface hologram for polarization measurement [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(18): 4436-4438.
- [85] Chen Weibin, Abeysinghe D C, Nelson R L, et al. Experimental confirmation of miniature spiral plasmonic lens as a circular polarization analyzer [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(6): 2075-2079.
- [86] Yang Shuangyang, Chen Weibin, Nelson R L, et al. Miniature circular polarization analyzer with spiral plasmonic lens [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3047-3049.
- [87] Miao Junjie, Wang Yongsheng, Guo Chuanfei, et al. Plasmonic lens with multiple-turn spiral nano-structures [J]. *Plasmonics*, 2011, 6(2): 235-239.
- [88] Miao Junjie, Wang Yongsheng, Guo Chuanfei, et al. Far-field focusing of spiral plasmonic lens [J]. *Plasmonics*, 2012, 7(2): 377-381.
- [89] Zhang Jingran, Guo Zhongyi, Li Rongzhen, et al. Circular polarization analyzer based on the combined coaxial Archimedes' spiral structure [J]. *Plasmonics*, 2015, 10(6): 1255-1261.
- [90] Zhang Jingran, Guo Zhongyi, Li Rongzhen, et al. Circular polarization analyzer based on an Archimedean nano-pinholes array [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 30523-30531.
- [91] Liu Chuanbao, Bai Yang, Zhao Qian, et al. Fully controllable Pancharatnam-Berry metasurface array with high conversion efficiency and broad bandwidth [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 34819-32825.
- [92] Wang Wei, Guo Zhongyi, Li Rongzhen, et al. L-shaped metasurface for both the linear and circular polarization conversions [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(6): 65103-65109.
- [93] Wang Wei, Guo Zhongyi, Li Rongzhen, et al. Ultra-thin, planar, broadband, dual-polarity plasmonic metalens [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): 68-71.
- [94] Wang Wei, Li Yan, Guo Zhongyi, et al. Ultra-thin optical vortex phase plate based on the metasurface and the angular momentum transformation [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(4):

- 45102-45109.
- [95] Li Rongzhen, Guo Zhongyi, Wang Wei, et al. Ultra-thin circular polarization analyzer based on the metal rectangular split-ring resonators [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 27968-27975.
- [96] Li Rongzhen, Guo Zhongyi, Wang Wei, et al. High-efficiency cross polarization converters by plasmonic metasurface [J]. *Plasmonics*, 2015, 10(5): 1167-1172.
- [97] Kang Ming, Feng Tianhua, Wang Huitian, et al. Wave front engineering from an array of thin aperture antennas [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15882-15890.
- [98] Li Rongzhen, Guo Zhongyi, Wang Wei, et al. Arbitrary focusing lens by holographic metasurface [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(5): 252-255.
- [99] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with sub-wavelength spatial resolution and high transmission [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937.
- [100] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. Multiwavelength polarization-insensitive lenses based on dielectric metasurfaces with meta-molecules [J]. *Optica*, 2016, 3(6): 628-633.
- [101] Arbabi E, Kamali S M, Arbabi A, et al. Full-Stokes imaging polarimetry using dielectric metasurfaces [J]. *Acs Photonics*, 2018, 5(8): 3132-3140.
- [102] Guo Zhongyi, Zhu Lie, Shen Fei, et al. Dielectric metasurface based high-efficiency polarization splitters [J]. *RSC Advances*, 2017, 7(16): 9872-9879.
- [103] Guo Zhongyi, Zhu Lie, Guo Kai, et al. High-order dielectric metasurfaces for high-efficiency polarization beam splitters and optical vortex generators [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12(1): 1-8.
- [104] Guo Zhongyi, Tian Lihua, Shen Fei, et al. Mid-infrared polarization devices based on the double-phase modulating dielectric metasurface [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(25): 254001.
- [105] Wang Jingjing, Zhou Jian, Guo Kai, et al. High-efficiency terahertz dual-function devices based on the dielectric metasurface [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2018, 120: 759-765.
- [106] Guo Zhongyi, Xu Haisheng, Guo Kai, et al. High-efficiency visible transmitting polarizations devices based on the GaN metasurface [J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(5): 333.
- [107] Guo Kai, Xu Haisheng, Peng Zhiyong, et al. High-efficiency full-vector polarization analyzer based on GaN metasurface [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 19(10): 3654-3659.
- [108] Khorasaninejad M, Chen W T, Zhu A Y, et al. Multispectral chiral imaging with a metalens [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4595-4600.
- [109] 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): 1-8.
- [110] Wu P C, Chen J W, Yin C W, et al. Visible metasurfaces for on-chip polarimetry [J]. *Acs Photonics*, 2017, 5(7): 2568-2573.
- [111] Yang Zhenyu, Wang Zhaokun, Wang Yuxi, et al. Generalized Hartmann-Shack array of dielectric metalens sub-arrays for polarimetric beam profiling [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-7.
- [112] Mueller J P, Balthasar, Rubin Noah A, Devlin Robert C, et al. Metasurface polarization optics: Independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(11): 113901.
- [113] Hu Yueqiang, Li Ling, Wang Yujie, et al. Trichromatic and tripolarization-channel holography with noninterleaved dielectric metasurface [J]. *Nano Letters*, 2020, 20: 994-1002.
- [114] Yue Fuyong, Zhang Chunmei, Zang Xiaofei, et al. High-resolution grayscale image hidden in a laser beam [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 17129.
- [115] Intaravanne Yuttanna, Chen Xianzhong. Recent advances in optical metasurfaces for polarization detection and engineered polarization profiles [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(5): 1003-1014.
- [116] Hu Yueqiang, Wang Xudong, Luo Xuhao, et al. All-dielectric metasurfaces for polarization manipulation: principles and emerging applications[J]. *Nanophotonics* 2020, Ahead of Print, DOI: 10.1515/nanoph-2020-0220.