

电控可重构极化调控超表面研究进展

周洪澄* 余潇然* 王豫 严仲明

(西南交通大学电气工程学院 成都 611756)

摘要: 作为一种由众多亚波长单元周期性或非周期性排列构成的二维人工结构, 超表面展示了其在电磁波极化调控领域的卓越能力, 开辟了电磁波调控的新途径。电控可重构极化调控超表面, 可通过电信号实时调整其结构或材料特性进而动态地调控电磁波的极化状态, 因而受到广泛研究关注。该文全面综述了电控可重构极化调控超表面的发展历程, 详细探讨了微波段具备不同传输特性的电控可重构极化调控超表面的技术进展, 并对电控可重构极化调控超表面技术的未来发展进行了深入的探讨和展望。

关键词: 超表面; 电磁波; 极化调控; 电控; 可重构

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2024)03-0696-18

DOI: [10.12000/JR23230](https://doi.org/10.12000/JR23230)

引用格式: 周洪澄, 余潇然, 王豫, 等. 电控可重构极化调控超表面研究进展[J]. 雷达学报(中英文), 2024, 13(3): 696-713. doi: 10.12000/JR23230.

Reference format: ZHOU Hongcheng, YU Xiaoran, WANG Yu, *et al.* Research progress of electrically controlled reconfigurable polarization manipulation using metasurface[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(3): 696-713. doi: 10.12000/JR23230.

Research Progress of Electrically Controlled Reconfigurable Polarization Manipulation Using Metasurface

ZHOU Hongcheng* YU Xiaoran* WANG Yu YAN Zhongming

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Metasurfaces are two-dimensional artificial structures with numerous subwavelength elements arranged periodically or aperiodically. They have demonstrated their exceptional capabilities in electromagnetic wave polarization manipulation, opening new avenues for manipulating electromagnetic waves. Metasurfaces exhibiting electrically controlled reconfigurable polarization manipulation have garnered widespread research interest. These unique metasurfaces can dynamically adjust the polarization state of electromagnetic waves through real-time modification of their structure or material properties via electrical signals. This article provides a comprehensive overview of the development of metasurfaces exhibiting electrically controlled reconfigurable polarization manipulation and explores the technological advancements of metasurfaces with different transmission characteristics in the microwave region in detail. Furthermore, it delves into and anticipates the future development of this technology.

Key words: Metasurface; Electromagnetic wave; Polarization manipulation; Electrically controlled; Reconfigurable

收稿日期: 2023-11-28; 改回日期: 2024-01-22; 网络出版: 2024-02-23

*通信作者: 周洪澄 zhouhc@home.swjtu.edu.cn; 余潇然 yuxr0002@163.com

*Corresponding Authors: ZHOU Hongcheng, zhouhc@home.swjtu.edu.cn; YU Xiaoran, yuxr0002@163.com

基金项目: 四川省自然科学基金(2022NSFSC1801, 2023NSFSC0463)

Foundation Items: Sichuan Provincial Natural Science Foundation (2022NSFSC1801, 2023NSFSC0463)

责任主编: 蒋卫祥 Corresponding Editor: JIANG Weixiang

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

1 引言

极化作为电磁波的基本参量，在雷达和无线通信系统中具有极其重要的应用价值。在雷达应用中，目标被电磁波照射后，其反射波的极化状态会因目标的形状、结构、材料和姿态等因素而变化，同时也受入射波极化的影响。因此，利用极化调控技术可以获得关于目标更丰富的信息。在无线通信领域，不同极化的电磁波具有不同的传播特性。通过匹配收发天线的极化特性，可以优化信号的发送和接收。由于极化的重要性，如何高效地调控电磁波极化特性是当前相关领域学者争相研究的焦点。传统的变极化器一般是利用双折射晶体制作而成的波片或基于铁氧体的变极化器件，这类器件有着体积大、集成难、损耗高的缺陷^[1,2]，部分类型还需要高功率电源和绕组线圈来提供足够大的场强，能耗非常高^[3]。

超材料，作为人工设计的亚波长结构，因其在电磁波相位和极化等参量调控方面的独特能力而广受关注^[4-7]。早期的超材料主要是基于复杂的三维电磁谐振结构，通常由金属和介质层堆叠而成，实际加工制作难度较大。此外，三维超材料还存在材料损耗高、工作带宽窄等不足之处。相比之下，超表面作为超材料的二维版本，因其较小的体积、较轻的重量、较低的损耗以及与射频器件的易集成性，已成为近年研究的焦点^[8-13]。通过精巧的结构设计，超表面能够实现电磁波的精细调控，包括极化、相位和振幅等。截至目前，研究者已利用这些结构实现了各种极化调控功能，如线-圆极化转换^[14-20]、线-交叉线极化转换^[21-26]、圆-圆极化转换^[27-29]、圆-线极化转换^[30]等。然而，早期的超表面大多为无源结构，即一旦制造完成，其功能便固定不变。这种静态特性限制了超表面在需要动态调控的应用场景中的应用范围。因此，研究者开始寻求开发可重构极化调控超表面，以便实现对电磁波特性的实时动态调控。

从无源到可重构的关键转变在于引入了能够响应外部刺激的材料和结构。通过集成这些材料，研究者设计出了能够在外部控制下改变其电磁响应的可重构超表面。这些可重构超表面不仅继承了原有超表面的优势，还增添了动态调节电磁波极化状态的能力，大大拓展了其在通信、传感、成像等领域的应用潜力。目前已报道的可重构方式主要包括温控、机械控制以及电控方式。温控方式是通过改变温度来调节材料的电磁特性，从而改变超表面的工作状态^[31]。这种方法通常响应较慢，适用于不需要快速调节的场合。机械控制是通过物理手段来改变

超表面的结构，从而调节其电磁特性^[32,33]。这种方式虽然较为直接，但可能需要更复杂的机械装置，且响应速度也比较慢。电控方式主要是指通过在超表面中引入能够响应电场变化的材料，从而实现超表面功能的动态调控。电控方式中常用的材料有半导体元件、液晶等。其中半导体元件，如PIN二极管和变容二极管，通常用于微波段的电磁波极化调控^[34,35]。通过改变材料两端的偏置电压，即可实现对超表面的动态控制。液晶材料实现可重构是通过改变施加在液晶层上的电压来调整液晶分子的取向，影响液晶层的介电常数，从而改变传播通过该层的电磁波的相位和极化状态。这一特性使得液晶成为实现电磁波极化调控的理想材料，特别是在太赫兹波段^[36,37]。与前两种方式相比，电控方式具有响应速度快、调控精度高、可编程性强等优点。由于其电控特性，这种方法还可以与现有的电子技术和微电子设备无缝集成，大大提升了系统的集成度和灵活性。综上所述，电控方式因其出色的性能和灵活性，在可重构超表面的研究和应用中占据了重要地位，并有望在未来的电磁波控制技术中发挥更大的作用。本文旨在针对微波段的电控可重构极化调控超表面展开综述。根据电磁波的传播特性，可将电控可重构极化调控超表面分为3种类型：透射型、反射型和透/反射一体型。本文将主要从这3类工作于微波段的电控可重构极化调控超表面展开介绍，并对其发展做出总结和展望。

2 透射型电控可重构极化调控超表面

透射型电控可重构极化调控超表面是指允许入射电磁波高效率透过该超表面，并能将透射波转换为不同极化形式的一类结构。透射型电控可重构极化调控超表面因其不存在馈源遮挡效应且易与天线共形，被广泛用于多极化通信、雷达探测、极化抗干扰等应用场景。透射型电控可重构极化调控超表面的结构可分为手性结构、各向异性结构、谐振腔型结构，本文将对以上3种透射型超表面结构分类展开介绍。

2.1 基于手性结构的透射型电控可重构极化调控超表面

手性结构是指自身不能通过旋转或平移等操作与其镜像结构完全重合的一类结构。当入射的电磁波作用于手性结构单元时，电磁波与结构存在耦合效应，导致左旋和右旋圆极化波具有不同的透过率，这种差异导致入射波的极化状态发生变化。例如，当左旋圆极化波的透射率较低时，透射波的极化态则表现为右旋圆极化，反之亦然。因此，手性

结构通常被用于设计线-圆极化转换超表面。2014年,中国科学院光电技术研究所罗先刚院士团队Ma等人^[38]将PIN二极管和金属缝隙结构融合设计了一种透射型电控可重构极化调控超表面,如图1(a)所示。通过调整两个正交缝隙内PIN二极管的状态,该超表面单元能在各向同性和两种手性间切换。在各向同性状态下,入射波透过且保持其极化,传输系数如图1(b)所示;而在手性状态下,入射线极化波转换为左旋或右旋圆极化波,圆极化传输系数见图1(c)。英国肯特大学Li等人^[39]提出了一种用于可重构天线设计的透射型电控可重构极化调控超表面,如图1(d)所示。该结构由介质基板及其正反两面的金属开口环和对角线构成。如图1(e)所示,通过对角线缝隙中嵌入PIN二极管并控制其工作状态,该超表面在2.5 GHz频点处实现线极化波到左旋圆极化波和右旋圆极化波的转换。

基于手性结构的透射型电控可重构极化调控超表面虽实现了多功能集成化,但通常仅在谐振点附近能够高效调控电磁波极化,而在非谐振区效果较弱。为实现宽带化,可采用不同尺寸或多层堆叠手

性结构,引入多个近频谐振点以增强带宽。然而,上述方法仍存在一定的缺陷和挑战:(1)多谐振点的手性结构可能会引入更多的能量损耗。每个谐振点都可能伴随着吸收、散射和辐射等损耗过程,从而导致总体的效率降低;(2)设计具有多个谐振点的手性结构通常比单一谐振点的结构更加复杂。需要考虑多个结构参数、尺寸的优化,增加设计和加工的复杂性和难度。此外,结构复杂性的增加也会导致更大的加工误差,导致实际的超表面调控功能与理想设计存在偏差。

2.2 基于各向异性结构的透射型电控可重构极化调控超表面

各向异性结构是指具有不同方向上的特性或性质不同的结构。透射型电控超表面一般设计为在特定方向结构中嵌入PIN二极管。通过控制二极管的状态,可调节该方向的电磁响应。两正交分量的相位差发生变化时,可实现多样的极化调控。

2016年,西安交通大学的张安学团队Li等人^[40]将传统各向异性曲折线结构弯曲为半椭圆结构,并

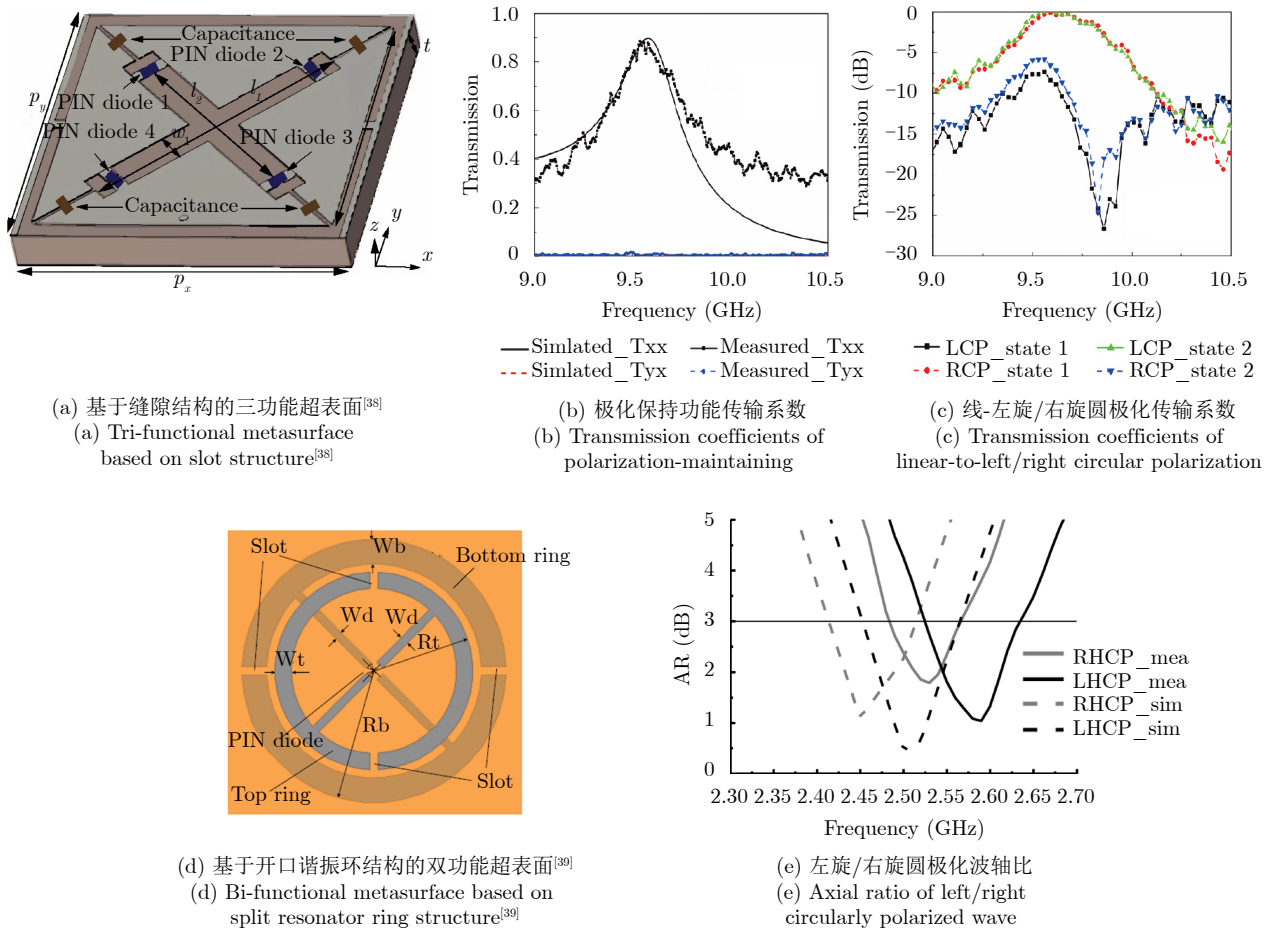


图1 手性结构透射型电控可重构极化调控超表面

Fig. 1 Chiral structure transmission-type electrically controlled reconfigurable polarization modulation metasurface

在两个半椭圆间的缝隙中嵌入PIN二极管，如图2(a)所示。这一改进使得超表面能动态调控两正交极化分量间的相位差，从而实现透射波极化状态的实时切换。结果表明，通过控制PIN二极管的通断状态，该超表面可在14.1~15.0 GHz频段内实现线极化保持和线-圆极化转换两种功能，透射波轴比如图2(b)、图2(c)所示。此外，该团队将该超表面作为线极化喇叭天线的覆层，实现了线极化波和圆极化波两种辐射状态，有效验证了超表面在近场条件下的极化调控特性。基于类似的原理，印度理工学院Sofi等人^[41]提出一款基于半六边形结构的透射型超表面并将其与线极化贴片天线结合，实现了线极化波和圆极化波的辐射。西南交通大学王豫团队Zhu等人^[42]提出一种用于喇叭天线极化可重构的宽带透射型电控可重构极化调控超表面，如图2(d)所示。该超表面的设计理念是在传统有限长和无限长金属条正交组合结构的基础上融入PIN二极管，实现对两线极化分量相位的动态控制，从而实现线极化保持和线-圆极化转换两种功能。结果表明，该超表面能够在2.50~3.64 GHz频段内动态调控透射波的极化状态。当与天线结合使用时，工作频段为3.1~4.5 GHz。随后，为有效地增强超表面的多极化调控能力，该团队将多层各向异性有源超表面级

联，设计了一种4功能透射型电控可重构极化调控超表面^[43]。超表面单元如图2(e)所示，前两层结构的正反两侧均为嵌有PIN二极管的十字型结构，后两层结构包括嵌入PIN二极管的金属细线以及金属贴片。通过调控PIN二极管的工作状态，每层结构在保证高透射率的同时都能够独立、动态地调控 x, y 极化分量间的相位差。将多层结构级联并独立调控每层结构的二极管偏置电压，最终实现多种工作状态。结果表明，该结构在2.58~3.74 GHz内实现线极化保持、线-左旋圆极化转换、线-右旋圆极化转换以及线-交叉线极化转换4种功能。东南大学崔铁军院士团队Huang等人^[44]基于多功能极化调控超表面的研究，进一步将其应用于无线通信。超表面结构如图3(a)所示，采用双层开槽缝隙贴片级联设计，并在缝隙中嵌入变容二极管。如图3(b)所示，在7.5~9.5 GHz内随着反向偏置电压从0~12 V的变化，透射波的椭圆度从-1(代表左旋圆极化波)演变至1(代表右旋圆极化波)，该结果展现了超表面的多极化调控特性。基于此，团队进一步构建了图3(c)所示的系统，利用超表面单元的极化调控特性对不同极化状态进行编码，并在接收端对信号进行处理以实现信息的有效传递。

以上超表面研究主要针对不同极化形式之间的

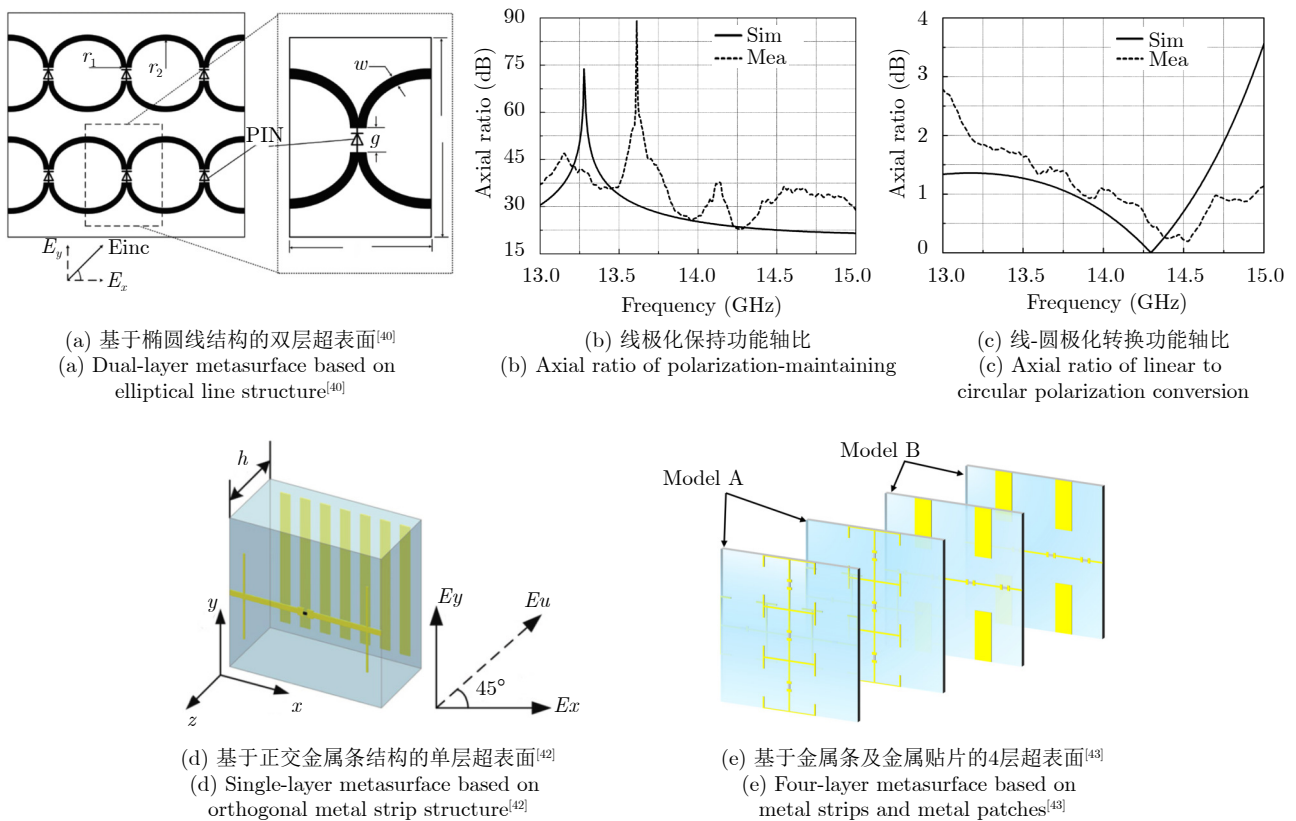


图2 各向异性结构透射型电控可重构极化调控超表面

Fig. 2 Anisotropic structure transmission-type electrically controlled reconfigurable polarization modulation metasurface

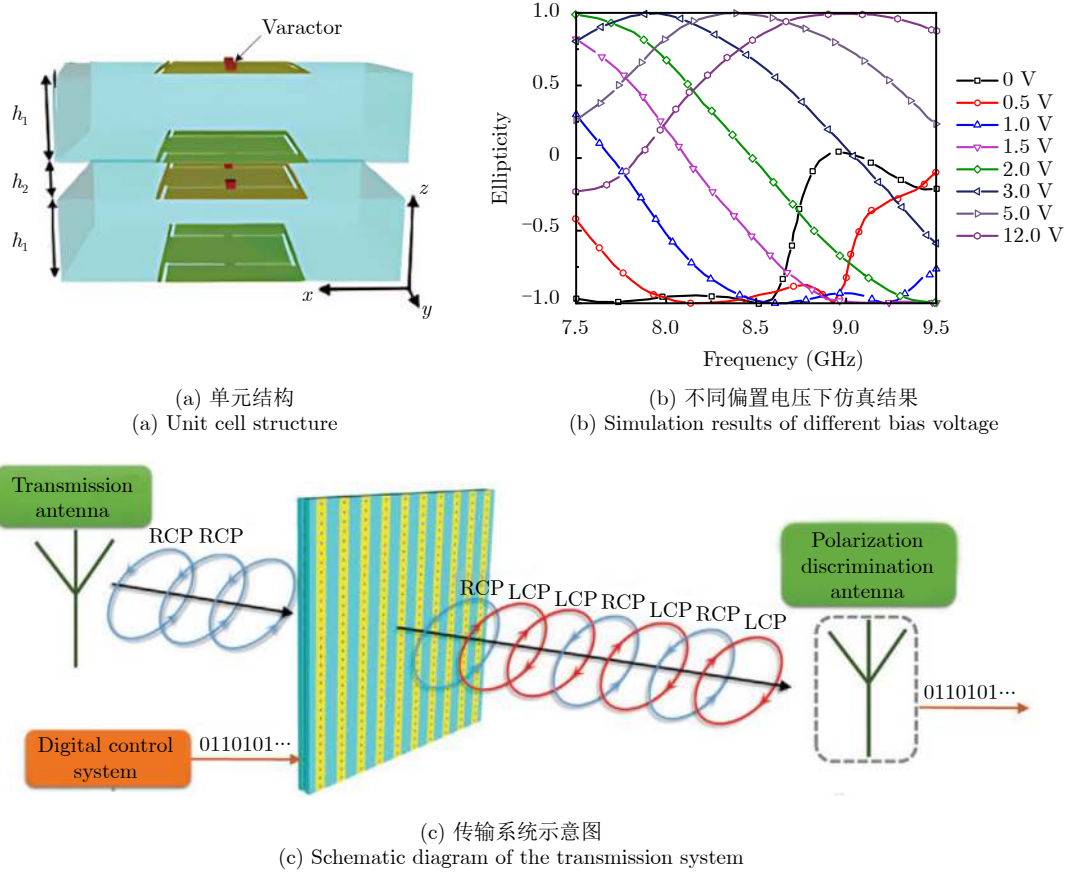


图 3 用于无线通信的电控可重构极化调控超表面^[44]

Fig. 3 Electronically reconfigurable polarization modulation metasurface for wireless communication^[44]

转换,事实上,还有学者针对线极化方位角调控开展研究工作。2019年,美国密西根大学Wu等人^[45]基于变容二极管设计了一种可重构极化旋转超表面。如图4所示,该超表面结构由两层双折射结构组成,它们分别置于两个四分之一波片之间。双折射结构为有源结构,内嵌变容二极管,通过调整二极管的偏置电压,可以精确控制与二极管排列方向平行的极化分量的相位。该设计能够在保持电磁波轴比不变的同时,动态调控任意极化电磁波的极化方位角,极化方位角随偏置电压的变化情况如表1所示。

综上,通过适当设计各向异性结构并与有源器件结合可实现不同形式的极化调控。然而,进一步

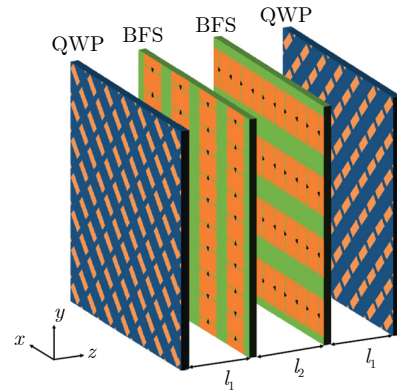


图 4 各向异性结构透射型极化旋转超表面^[45]

Fig. 4 Transmission-type polarization rotating metasurface of anisotropic structure^[45]

表 1 y 极化入射时极化方位角随偏置电压变化情况($^{\circ}$)^[45]

Tab. 1 Variation of polarization angle with bias voltage under y -polarized wave incidence ($^{\circ}$)^[45]

C_y (pF)	C_x (pF)					
	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.30
0.18	-0.007	11.82	24.69	35.77	45.23	59.23
0.20	-12.58	0.008	14.09	26.24	35.33	50.67
0.22	-28.89	-15.33	0	13.12	22.69	38.08
0.24	-43.90	-29.94	-13.82	0.004	9.937	25.38
0.26	-54.39	-40.57	-24.23	-10.13	-0.001	15.64
0.30	-69.27	-56.03	-40.10	-26.13	-15.97	-0.006

拓展带宽和功能形式通常需要利用多层结构级联，导致超表面的剖面较高，不利于小型集成化，同时也增加了超表面设计和制造的复杂度。此外，由于各向异性结构在正交方向上不同的响应特性会导致交叉极化分量的产生，其极化隔离度通常比较有限(10~15 dB)。

2.3 基于谐振腔型结构的透射型电控可重构极化调控超表面

谐振腔型结构通常由顶部和底部的极化选择结构以及中间层的各向异性或手性结构级联而成。基于谐振腔型结构的透射型超表面设计中，一般是在极化选择结构(通常为光栅)中加载PIN二极管使其

具有可调节的极化选择特性，再结合手性结构或各向异性结构，实现极化调控。例如，南京航空航天大学曹群生团队^[46]在传统无源谐振腔型结构的基础上，将顶部和底部的方形贴片结构与PIN二极管结合设计了一种有源极化选择结构，并在中间加入方形开口环各向异性结构，实现宽带多极化调控，单元结构如图5(a)所示。通过调控PIN二极管的工作状态，顶部和底部光栅可以实现对 x 极化和 y 极化的选择，再结合方形开口环各向异性结构，电磁波在谐振腔内与各层相互作用并发生多次反射和透射，直至转换为期望的极化状态并从底部极化选择结构透过。结果表明，该单元分别在5.2~16.7 GHz和8.0~14.3 GHz频段内实现线-交叉线极化转换和线极化

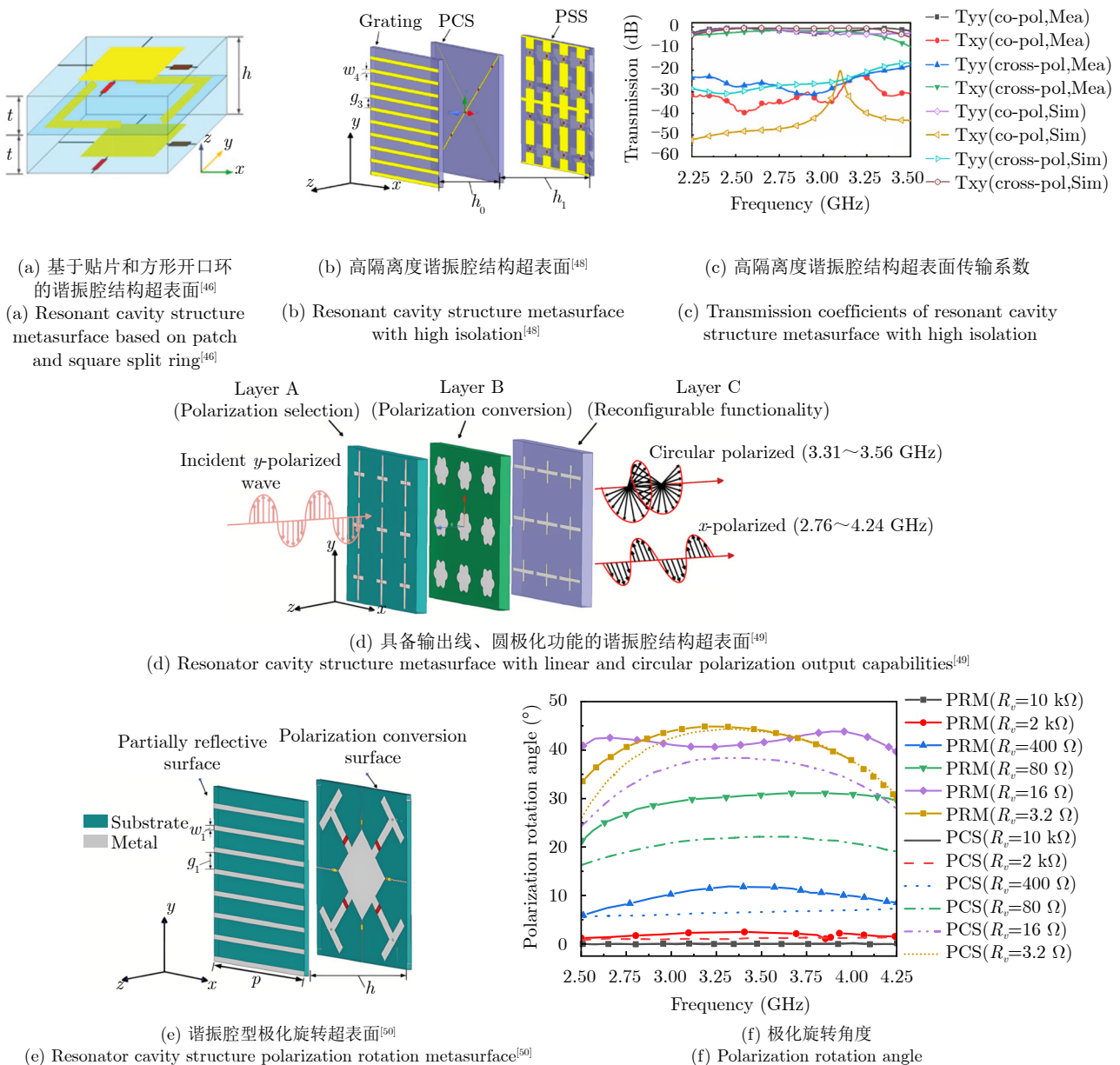


图 5 谐振腔结构电控可重构极化调控超表面

Fig. 5 Resonant cavity structure electronically reconfigurable polarization modulation metasurface

保持功能。同济大学Wei等人^[47]设计了一种由3层开口谐振环的互补结构级联形成的超表面。通过在顶部缝隙中加载PIN二极管并控制其外部电压实现了线极化保持以及线-交叉线极化转换两种功能,工作频段分别为7.8~10.8 GHz和8.3~11.2 GHz。文献^[46,47]结合PIN二极管的电可调特性与谐振腔型结构的宽带特性实现了宽带可重构极化调控。然而,在其所涵盖的工作频段内,极化隔离度仅10~15 dB。低极化隔离度会导致无线通信中交叉极化信号对通信造成干扰,降低通信质量;在雷达系统中还会导致探测能力下降、探测分辨率受限。因此,确保足够的极化隔离度对无线通信系统和雷达系统至关重要。为了提高极化隔离度,西南交通大学王豫团队^[48]提出如图5(b)所示的可重构谐振腔型极化调控超表面。该团队将中间层的金属细线结构与PIN二极管结合以实现各向异性和各向同性两种状态,分别用于极化转换和极化保持。此外,通过在底部有源极化选择结构中加入金属细线,该结构在通带内的极化选择效果被显著增强。如图5(c)所示,该超表面结构在2.39~3.21 GHz内以高于20 dB的隔离度实现了线极化保持和线-交叉线极化转换。随后,该团队将该超表面与喇叭天线结合,验证了超表面在近场条件下的极化调控功能。当超表面作为天线覆层时,天线能够在2.49~2.97 GHz内以高于20 dB的隔离度辐射主极化和交叉极化,并且天线方向图主瓣与未加载超表面时一致性较高。同年,针对传统谐振腔型极化调控超表面只能实现线极化波透射的问题,该团队在分析谐振腔型结构工作机理的同时进一步推导出该结构实现线-圆极化转换的条件,并设计了如图5(d)所示的可重构超表面^[49]。结果表明,通过调控PIN二极管的状态,该单元可分别在2.76~4.24 GHz和3.31~3.56 GHz内将入射线极化波转换为交叉线极化波和圆极化波。

近期,为解决当前已报道的透射型极化旋转超表面工作带宽窄、部分功能插损超过3 dB的问题,西南交通大学王豫团队^[50]将PIN二极管导通电阻可调特性与谐振腔结构结合,提出首个具有宽带低损耗特性的可重构极化旋转超表面。如图5(e)所示,该超表面顶部为极化选择结构,底部是在斜45°正交方向上嵌入PIN二极管的有源结构。通过调节两正交方向上PIN二极管的导通电阻可在宽频带内调节该方向上透射波两正交分量幅值,从而改变透射波的极化方向。如图5(f)所示,该超表面单元可在3.03~3.60 GHz内动态调节透射线极化方位角,调节范围为-45°~+45°,损耗低于2 dB。

谐振腔结构极化调控超表面借助于其内部的极化选择结构,在谐振腔的尺寸、间距和耦合方式的合理设计下,能够实现宽工作频段和更高的极化隔离度,然而这种优势的获取往往也需要增加超表面的剖面高度以达到预期的性能要求。此外,由于光栅结构的限制,谐振腔结构极化调控超表面对入射波的极化方向比较敏感,仅能在特定线极化入射时实现调控功能,对其使用灵活性和调控自由度造成了一定程度的限制。

2.4 小结

本节探讨了不同结构类型的透射型电控可重构极化调控超表面研究现状。迄今为止,学者根据不同构型的超表面、不同的设计理念在透射型超表面的研究工作上取得了大量进展。表2总结了已报道透射型电控可重构极化调控超表面的工作性能。从表2及第2节可以看出,当前关于透射型电控可重构极化调控超表面的研究仍存在一些亟待解决的问题:(1)目前透射型电控可重构极化调控超表面能够集成的功能数量较少,多为2~3个,导致其能承载的信道容量比较有限,调控自由度较低,较难满足现代多功能无线通信系统和雷达系统等对器件高度集成化、功能多样化的迫切需求,未来应着眼于提升超表面的功能集成能力,以增加其能够承载的信道容量和提高调控自由度,为实现更高性能、更灵活多样的无线通信和射频系统打开新的可能性。(2)大部分透射型电控可重构极化调控超表面在设计时仅考虑远场条件下对电磁波极化的调控,未考虑将其加载在天线近场时的调控效果及其与天线间的互耦作用,导致超表面与天线的适配性有限。未来的研究应致力于提高超表面与天线的适配性,充分发挥其在近场条件下的调控能力,推动超表面进一步迈向工程化应用。

3 反射型电控可重构极化调控超表面

反射型电控可重构极化调控超表面是指只允许电磁波反射并能将反射波转换为不同形式极化波的一类结构,通常用于反射阵天线、微波成像等领域。反射型超表面通常采用金属背板作为其底部结构,该结构的存在有效地阻隔了电磁波的透射,从而使得单元的反射率在宽频带内接近100%,因此反射型超表面通常具有宽带、高效、低损耗的工作特性。与透射型电控可重构极化调控超表面的结构类型多样性相比,反射型电控可重构极化调控超表面的结构类型较为相似。然而,研究人员在设计反射型电控可重构极化调控超表面时引入了更多类型

表 2 透射型电控可重构极化调控超表面总结

Tab. 2 Summary of transmission-type electronically controlled reconfigurable polarization modulation metasurface

文献	结构类型	电控器件	工作频段(GHz)	极化调控能力	极化隔离度	插入损耗	剖面	入射角稳定性
[38]	手性	PIN二极管	9.70	线-左旋圆极化转换	≥ 20 dB	1.32 dB	$0.05\lambda_0$	—
				线-右旋圆极化转换	≥ 20 dB	1.32 dB		
				线极化保持	—	1 dB		
[39]	手性	PIN二极管	2.50	线-左旋圆极化转换 线-右旋圆极化转换	—	—	$0.07\lambda_0$	—
[40]	各向异性	PIN二极管	14.10~15.00	线极化保持 线-左旋圆极化转换	≥ 10 dB	≤ 2 dB	$0.15\lambda_0$	—
[41]	各向异性	PIN二极管	14.00~16.00	线极化保持 线-左旋圆极化转换	—	—	$0.15\lambda_0$	—
[42]	各向异性	PIN二极管	2.50~3.64	线极化保持 线-右旋圆极化转换	≥ 15 dB	≤ 3 dB	$0.07\lambda_0$	—
[43]	各向异性	PIN二极管	1.00~3.74	线极化保持	≥ 10 dB	≤ 3 dB	$0.37\lambda_0$	—
			2.41~3.76	线-左旋圆极化转换				
			2.48~3.79	线-右旋圆极化转换				
			2.58~3.89	线-交叉线极化转换				
[44]	各向异性	变容二极管	7.50~9.50	极化椭圆度-1至1	—	—	$0.25\lambda_0$	—
[45]	各向异性	变容二极管	10.00	极化方位角旋转	—	—	$0.52\lambda_0$	—
[46]	谐振腔型	PIN二极管	5.20~16.70	线极化保持	≥ 15 dB	≤ 3 dB	$0.05\lambda_0$	60°
			8.00~14.30	线-交叉线极化转换				
[47]	谐振腔型	PIN二极管	7.80~10.80	线极化保持	≥ 10 dB	≤ 2 dB	$0.08\lambda_0$	—
			8.30~11.20	线-交叉线极化转换				
[48]	谐振腔型	PIN二极管	2.39~3.21	线极化保持 线-交叉线极化转换	≥ 20 dB	≤ 3 dB	$0.44\lambda_0$	—
[49]	谐振腔型	PIN二极管	2.76~4.24	线-左旋圆极化转换	≥ 20 dB	—	$0.16\lambda_0$	—
			3.31~3.56	线-交叉线极化转换				
[50]	谐振腔型	PIN二极管	3.03~3.60	线极化方位角旋转	—	≤ 2 dB	$0.21\lambda_0$	—

的有源器件。因此，本节主要从加载的有源器件类型对反射型电控可重构极化调控超表面进行分类并展开介绍。

3.1 基于PIN二极管的反射型电控可重构极化调控超表面

PIN二极管因具备快速响应、可调性、高集成度等特点，受到众多研究者的青睐。2016年，印度理工学院坎普尔分校Saikia等人^[51]基于PIN二极管和开口谐振环提出如图6(a)所示反射型电控可重构极化调控超表面。通过控制PIN二极管的工作状态，该单元在2.42~3.52 GHz内以小于2 dB的损耗实现线极化保持和线-交叉线极化转换。西北大学Wang等人^[52]提出了一种用于降低八木天线的雷达散射截面(Radar Cross-Section, RCS)的棋盘式构造可重构极化调控表面，如图6(b)所示。该超表面能够在低RCS与类金属板反射模式之间灵活切换。当二极管导通时，其反射特性与金属板相仿。当二极管关断时，超表面能有效降低天线的RCS。2018年，西安电子科技大学姜文团队^[53]在方形开口环结构中加载PIN二极管设计了一种超表面，在超过20%的相对带宽内实现将入射线极化波保持原极化反射或转换为交叉线极化波两种功能。为了进一步拓展带宽，空军工程大学曹祥玉团队^[54]在嵌有

PIN二极管的各向异性金属贴片的基本结构中加入“L”形贴片以及上层介质基板，设计了如图6(c)所示的超宽带反射型电控可重构极化调控超表面。结果表明，该单元可在近90%的相对带宽内将入射的线极化波转换为交叉线极化波或圆极化波。苏州大学Yang等人^[55]提出如图6(d)所示的对称“L”形贴片超表面单元。该超表面通过激活结构中多种模态实现超宽带极化调控。当PIN二极管导通时，入射线极化波在5.96~15.34 GHz频段内被转换为圆极化波；当PIN二极管关断时，入射线极化波在6.05~14.76 GHz频段内被转换为交叉线极化波。除了宽带可重构极化调控的研究之外，也有学者将目光投向了多频段极化调控。2021年，贵州大学Yang等人^[56]设计了如图6(e)所示的反射型电控可重构极化调控超表面。超表面单元结构由连接至贴片结构的方形开口环构成，通过在贴片中蚀刻“z”形缝隙并加载PIN二极管实现可重构设计。结果表明，当PIN二极管导通时，超表面在双频段内实现线-交叉线极化转换。反之，当PIN二极管关断时，入射波在宽带内被转换为圆极化反射波。为了拓展超表面对入射电磁波的多极化适应能力，东南大学崔铁军院士团队Liu等人^[57]同时针对线极化和圆极化入射的情况提出了一种超表面，其工作频段在C波段和X波段。超表面单元结构如图6(f)所示，通

过控制每个单元上PIN二极管的状态，超表面在7.4~12.0 GHz频段内能够将入射线极化或圆极化保持原极化状态反射或将其转换为交叉极化波。

上述工作利用不同构型的超表面与有源器件结合设计了具有不同工作特性的反射型电控可重构极化调控超表面，但在同一极化入射时都只能实现两种功能。为了拓展超表面的功能，印度理工学院Bhattacharjee等人^[58]在十字形结构和正方形贴片结

构的各个缝隙中加载PIN二极管，设计了一种各向异性超表面，并将其与单极子天线结合验证了超表面的极化可重构特性，超表面结构如图6(g)所示。通过调控二极管工作状态，该超表面可将单极子天线辐射的线极化波转换为左旋圆极化波、右旋圆极化波或保持原极化状态不变。2023年，印度米佐拉姆国立理工学院Pramanik等人^[59]结合方形开口环结构、短金属条结构和PIN二极管，进一步提升了

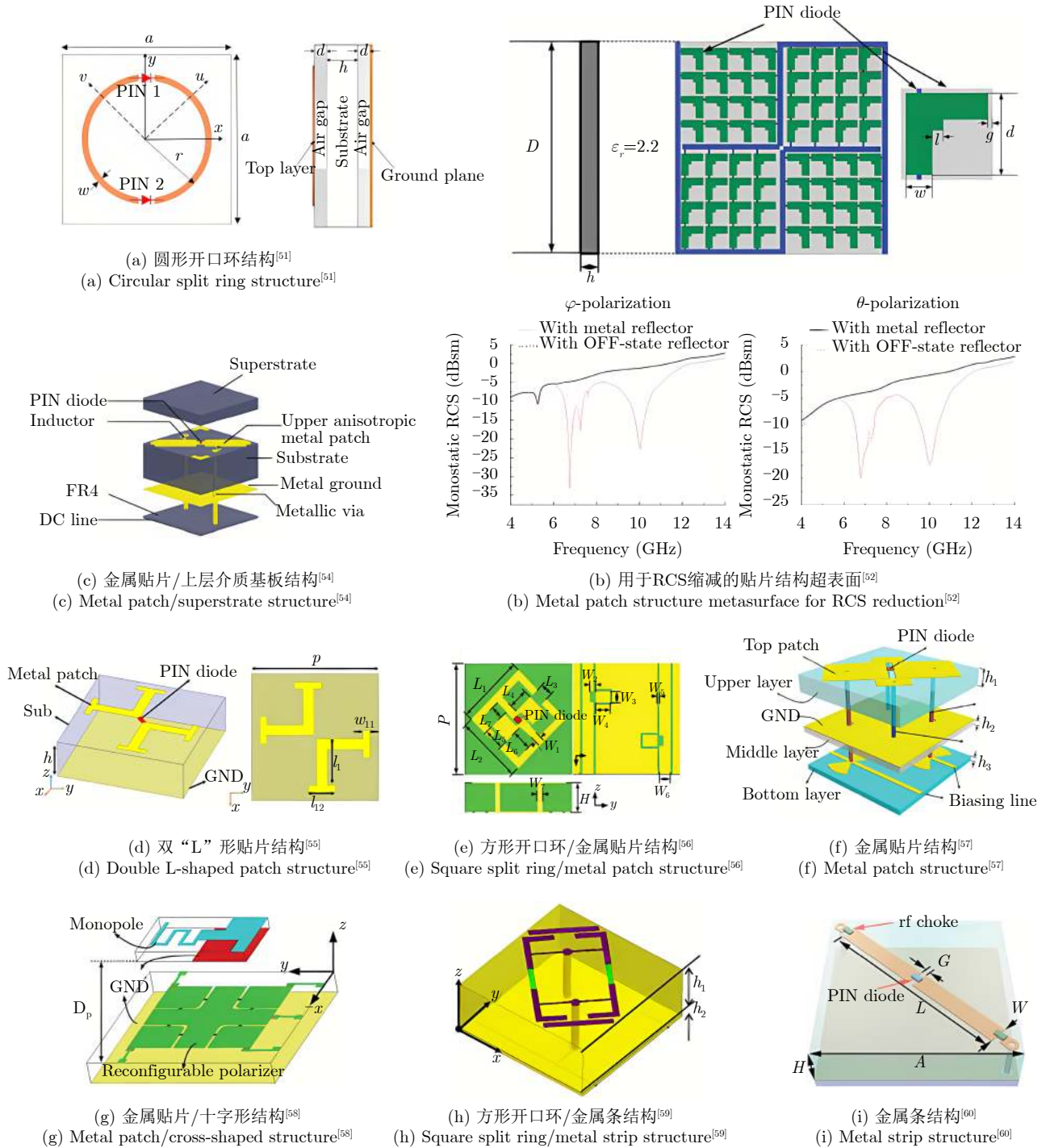


图6 基于PIN二极管的反射型电控可重构极化调控超表面

Fig. 6 PIN diode based reflection-type electronically reconfigurable polarization modulation metasurface

超表面的极化调控形式。该超表面结构如图6(h)所示，由顶部嵌有PIN二极管的方形开口环、短金属条、介质基板、金属背板以及金属通孔构成。当二极管关断时，入射线极化波在5.2~6.1 GHz内被转换为右旋圆极化反射波，在2.00~3.66 GHz以及8.46~9.52 GHz内保持极化状态不变被反射；当二极管导通时，入射线极化波在3.77~6.20 GHz内被转换为交叉线极化反射波，在7.75~8.60 GHz内则被转换为左旋圆极化反射波。线极化旋转方面，东南大学崔铁军院士团队Ma等人^[60]基于各向异性金属条结构和PIN二极管提出一种超表面单元，如图6(i)所示。当PIN二极管处于导通和关断状态时，该单元分别实现线-交叉线极化转换和线极化保持，且两种状态反射波相位相同。因此，利用该单元组成编码阵列，单独控制每个单元的PIN二极管工作状态，可实现对反射波中两正交极化分量幅度的动态调控，使其合成不同角度的线极化波。结果表明，该单元可在9.8 GHz处实现0°~90°范围内的极化旋转。

从研究现状中可以看出，PIN二极管得益于其技术成熟、响应速度快和高集成度，被广泛应用于电控可重构超表面设计中。然而，在高频范围内，PIN二极管存在较大的损耗并且价格昂贵，因此它们主要用于S波段、C波段和X波段的可重构超表面设计，较难实现高频化。

3.2 基于变容二极管的反射型电控可重构极化调控超表面

变容二极管是一种具有电容值可调节特性的半导体器件。它通过调整偏置电压来实现电容值的调节。相对于PIN二极管在导通和关断状态下的离散特性，变容二极管的优势在于其连续可调节性。将变容二极管应用于超表面中，能够实现连续可调谐

的功能，为超表面的应用提供更大的灵活性。2018年，桂林电子科技大学高喜与东南大学崔铁军院士团队Yang等人^[61]共同提出了一种基于变容二极管和蝶形结构的宽带可重构超表面，如图7(a)所示。当变容二极管两端偏置电压分别为0 V和-19 V时，该超表面分别在3.9~7.9 GHz和4.9~8.2 GHz频段内实现线-交叉线极化转换以及线-圆极化转换。此外，当偏置电压从0 V连续变化至-19 V时，反射波的极化状态先从线极化变为椭圆极化，最后变为右旋圆极化，如图7(b)所示。类似于PIN二极管，变容二极管在高频范围内也存在着损耗增大和高成本等局限性，这些限制对超表面实现高频化和低损耗提出了挑战，从而在某些特定应用场景中限制了超表面的有效应用。

3.3 基于MEMS开关的反射型电控可重构极化调控超表面

MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)开关是一种微机电系统技术制造的电子开关。它通过利用微机械结构的运动来控制电路中的信号流动，具备小型化、低功耗和高可靠性等特点，并且能够在高频范围内工作。2018年，空军工程大学曹祥玉团队^[62]基于正方形金属贴片结构和MEMS开关设计了如图8(a)所示的可重构超表面，在7~14 GHz频段内实现线极化保持与线-交叉线极化转换功能，相对带宽达到66.7%。此后，该团队还基于类似原理设计了如图8(b)所示的双功能超表面，分别在7.93~12.42 GHz和8.07~10.77 GHz内实现了线-交叉线极化转换和线-圆极化转换^[63]。2019年，该团队又利用金属贴片以及顶部附加的介质基板实现超宽带极化调控^[64]，超表面单元如图8(c)所示。通过调节单元中心嵌入的MEMS开关，可在5.7~23.8 GHz

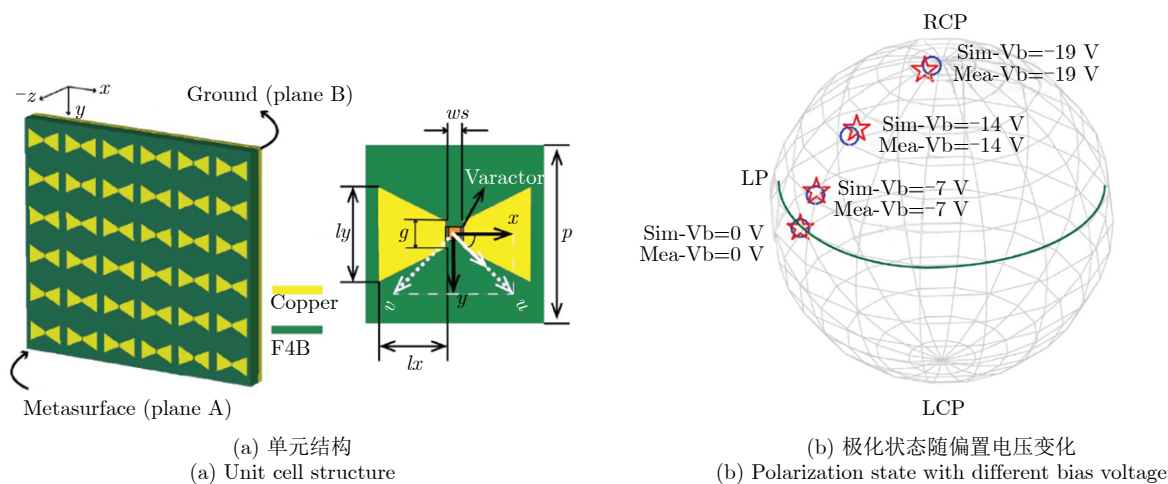


图7 基于变容二极管的反射型电控可重构极化调控超表面^[61]

Fig. 7 Reflection-type electronically reconfigurable polarization modulation metasurface based on varactor diode^[61]

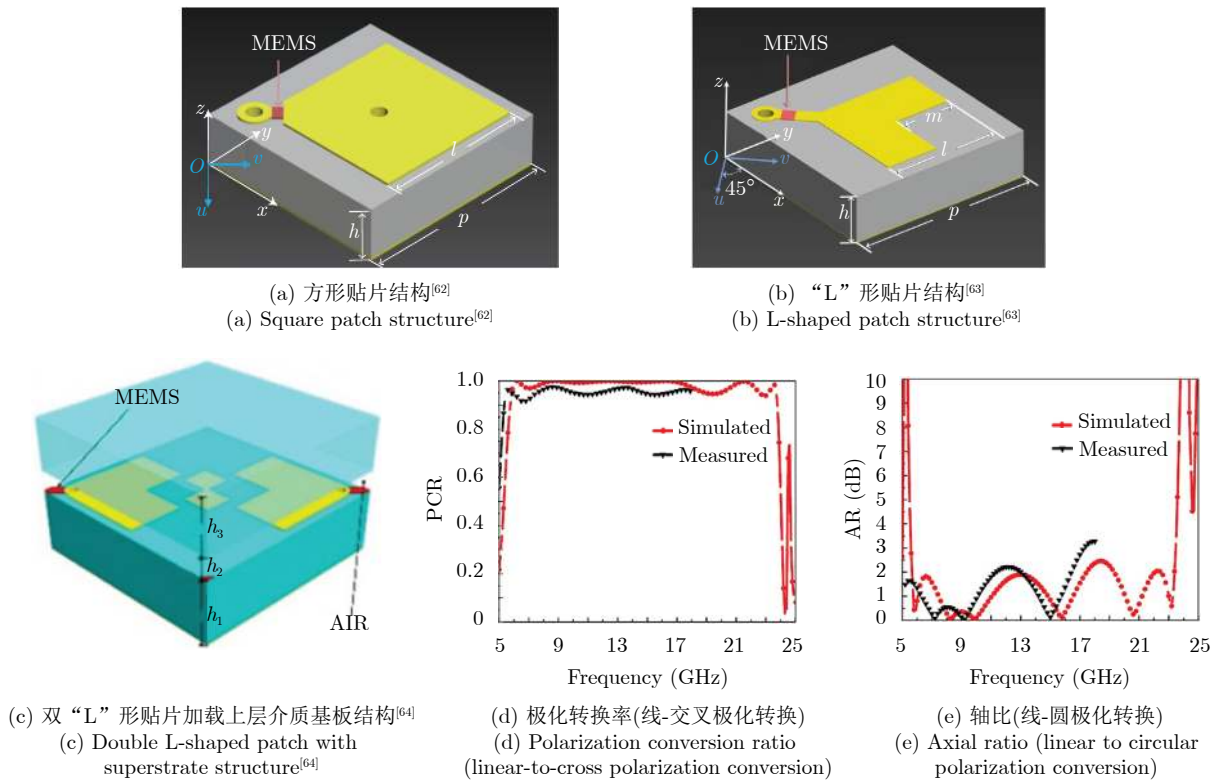


图 8 基于MEMS开关的反射型电控可重构极化调控超表面

Fig. 8 Reflection-type electronically controlled reconfigurable polarization modulation metasurface based on MEMS switch

以及5.6~23.5 GHz内实现线-交叉线极化转换以及线-圆极化转换(重叠带宽达到122%),如图8(d)、图8(e)所示。目前,由于MEMS开关制造成本较高且技术成熟度有待提高,因此在可重构超表面研究中尚未被大规模使用。

3.4 小结

本节按照加载有源器件的不同对反射型电控可重构极化调控超表面进行分类并介绍了最新研究现状。表3总结对比了此类超表面的工作频段、电控器件等。尽管关于反射型电控可重构极化调控超表面的研究已取得显著进展,但其中仍存在一些不足:(1)已报道的反射型电控可重构极化调控超表面极化调控形式较少(多为两个)。文献[59]实现了4个功能,但部分功能之间带宽不重叠导致其频谱利用率较低。此外,反射型电控可重构极化调控超表面中嵌入的有源器件通常由通孔连接至背部馈线馈电,很难借鉴透射型电控可重构极化调控超表面中多层结构层叠的方式提升其功能数量,导致调控自由度受限。面对这一挑战,未来的研究应该专注于如何拓展反射型电控可重构极化调控超表面的设计自由度,实现更多的功能。(2)极化隔离度低。现有反射型电控可重构极化调控超表面的最低极化隔离度通常仅为10 dB,低极化隔离度使得不同极

化方向上的信号相互干扰,从而导致系统性能和通信质量的降低,如何提高极化隔离度是未来的一个重要研究方向。

4 透/反射一体型电控可重构极化调控超表面

透/反射一体型可重构极化调控超表面是指在部分工作模式下允许电磁波透过,另一部分工作模式下只允许电磁波反射并且能够对透射波和反射波进行极化调控的一类结构,可用于设计可控空间滤波器以及天线罩等方面。透/反射一体型电控可重构极化调控超表面的设计方法一般是在极化选择结构(如光栅)中加载PIN二极管,通过控制PIN二极管的导通和关断控制电磁波的传播路径,再将其与各向异性结构或手性结构级联,实现极化调控功能。2017年,东南大学崔铁军院士团队Tao等人^[65]在金属栅中嵌入PIN二极管并与金属贴片结合,设计了如图9(a)所示的透/反射一体型电控可重构极化调控超表面。当金属栅之间的二极管导通时,该部分结构等效为金属板,入射波保持原极化状态被反射;反之,当二极管关断时,在金属栅和各向异性金属贴片的共同作用下,入射波被转换为交叉极化波并透过超表面。2019年,南京航空航天大学曹群生团队^[66]设计了一种正交有源金属栅结构,并将

表3 反射型电控可重构极化调控超表面总结

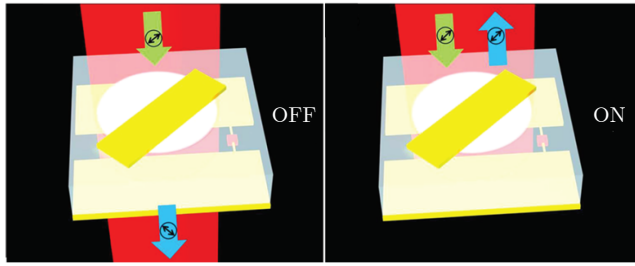
Tab. 3 Summary of reflection-type electronically controlled reconfigurable polarization modulation metasurface

文献	电控器件	工作频段(GHz)	极化调控能力	极化隔离度	插入损耗	剖面	入射角稳定性
[51]	PIN二极管	2.45~3.52	线极化保持 线-交叉线极化转换	—	≤2 dB	0.07λ ₀	—
[52]	PIN二极管	4.00~14.00 6.40~10.30	线极化保持 线-交叉线极化转换	—	≤0.1 dB —	0.03λ ₀	— 15°
[53]	PIN二极管	3.83~4.74 3.39~5.01	线极化保持 线-交叉线极化转换	≥10 dB	≤1 dB —	0.06λ ₀	85° 30°
[54]	PIN二极管	7.60~23.60 6.50~19.90	线-左旋圆极化转换 线-交叉线极化转换	≥10 dB	— ≤1 dB	0.12λ ₀	—
[55]	PIN二极管	5.96~15.34 6.05~14.76	线-左旋圆极化转换 线-交叉线极化转换	≥10 dB	— ≤1 dB	0.09λ ₀	20° 20°
[56]	PIN二极管	11.80~24.10 10.50~13.90/17.70~27.20	线-左旋圆极化转换 线-交叉线极化转换	≥10 dB	— ≤3 dB	0.07λ ₀	10° 30°
[57]	PIN二极管	7.40~12.00	线/圆极化保持 线/圆-交叉线/圆极化转换	≥10 dB	≤1 dB	0.07λ ₀	30°
[58]	PIN二极管	3.05~3.70	线极化保持 线-左旋圆极化转换 线-右旋圆极化转换	—	— ≤1.5 dB ≤1.5 dB	0.03λ ₀	—
[59]	PIN二极管	2.00~3.66/8.46~9.52 3.77~6.20 7.75~8.60 5.20~6.10	极化保持 线-交叉线极化转换 线-左旋圆极化转换 线-右旋圆极化转换	≥10 dB	≤1 dB ≤1 dB — —	0.04λ ₀	15°
[60]	PIN二极管	9.80	线极化旋转	—	—	0.07λ ₀	—
[61]	变容二极管	4.90~8.20 3.90~7.90	线-左旋圆极化转换 线-交叉线极化转换	≥10 dB	≤2 dB	0.08λ ₀	20° 30°
[62]	MEMS	7.00~14.00	线极化保持 线-交叉线极化转换	—	≤1 dB	0.05λ ₀	30°
[63]	MEMS	8.07~10.77 7.93~12.42	线-左旋圆极化转换 线-交叉线极化转换	—	— ≤1 dB	0.08λ ₀	—
[64]	MEMS	5.7~23.8 GHz 5.6~23.5 GHz	线-左旋圆极化转换 线-交叉线极化转换	—	— ≤1 dB	0.12λ ₀	—

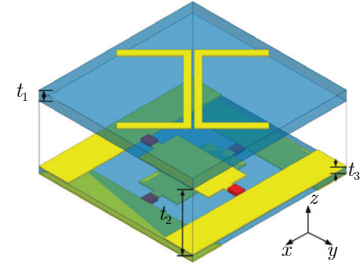
其与工字形各向异性结构级联，提出如图9(b)所示的透/反射一体型电控可重构极化调控超表面。当两正交金属栅上的二极管全部导通时，该结构等效为金属板，入射线极化波被完全反射；当两正交金属栅中二极管全部关断时，该结构表现出带通特性，入射波保持原极化状态透过超表面。若两正交方向排列的二极管工作状态不同， x 和 y 极化波的其中一种被转换为正交极化透射波，另一种将保持原极化状态透过超表面，通过控制两正交方向上二极管的状态可选择对何种极化的入射波实现极化转换。为了进一步拓展反射波或透射波的极化形式，西南交通大学王豫团队设计了如图9(c)所示的谐振腔型透/反射一体型电控可重构极化调控超表面^[67]。通过改变PIN二极管的偏置电压，该单元能以30%的相对带宽分别实现透射型的线极化保持、线-交叉线极化转换、线-圆极化转换以及全反射4种功能。重庆大学Yang等人^[68]基于正交金属栅与开口金属圆环结构，提出如图9(d)所示的透/反射一体型电控可重构极化调控超表面。作者将PIN二极管嵌入在开口金属环的缝隙中，通过控制PIN二极管的工作状态使其对入射波的正交分量表现出各向同

性或各向异性，并结合光栅来控制入射波的传播路径和极化状态^[68]。当PIN二极管导通时，开口金属环对入射波的两正交极化分量表现为各向同性，因此入射波的极化状态不发生改变并被底部与其极化方向平行的光栅反射回来。当PIN二极管关断时，开口金属环对两正交分量表现为各向异性，再结合前后的光栅形成谐振腔结构，最终实现对入射波的高效线-交叉线极化转换。两种状态下的传输系数如图9(e)、图9(f)所示。此外，该设计还能在0°~40°入射角范围内保持工作性能稳定性。

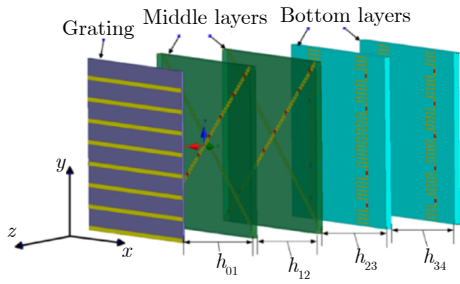
表4总结了上述透/反射一体型电控可重构超表面的特性。由于此类超表面的设计中，研究者主要关注工作功能形式，对极化隔离度的关注相对较少，因此在表4的对比中未包含极化隔离度指标。目前的透/反射一体型电控可重构极化调控超表面大多只能实现对透射波和反射波的单一功能或简单组合功能的调控，而不能实现对透射波和反射波的多种功能或复杂组合功能的的同时调控，限制了其在多功能电磁波处理方面的潜力和创新性。此外，已报道透/反射一体型电控可重构极化调控超表面的构型和设计方法比较单一，未来的



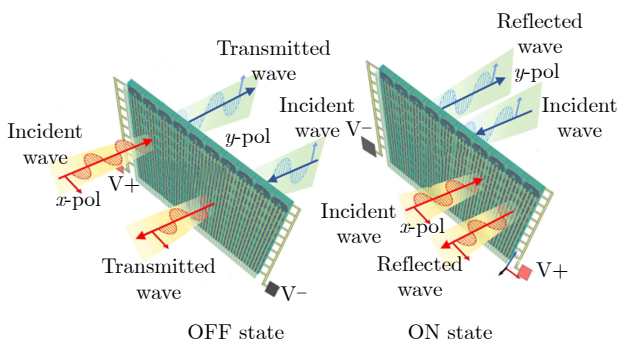
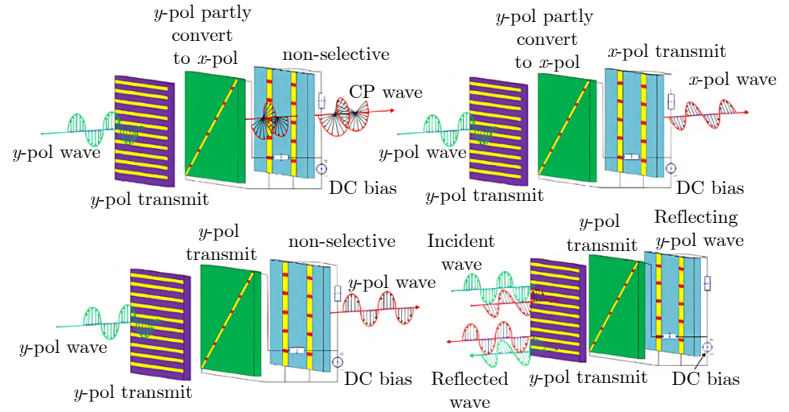
(a) 有源金属栅-方形贴片级联结构^[65]
 (a) Active metal grating-square patch cascading structure^[65]



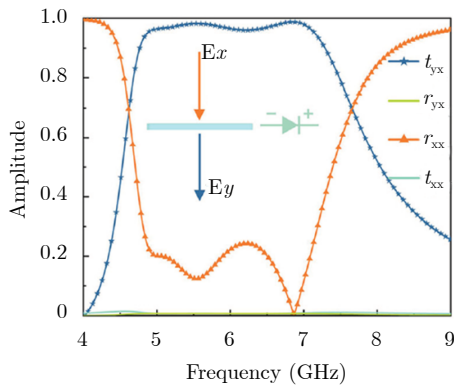
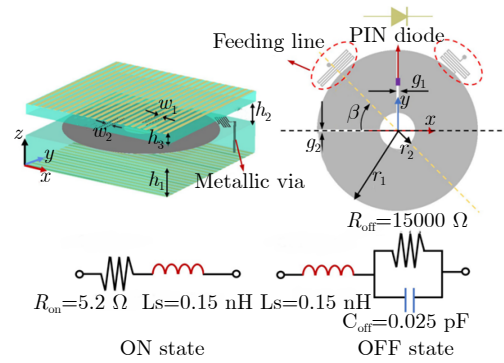
(b) 有源金属栅-工字形贴片级联结构^[66]
 (b) Active metal grating-I-shaped patch cascading structure^[66]



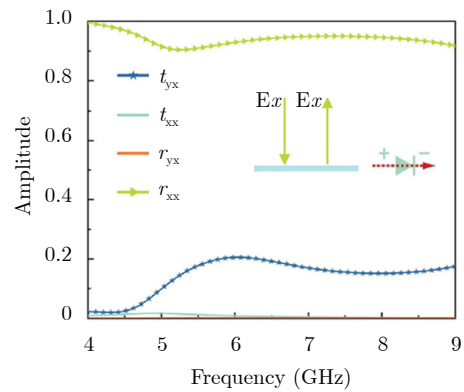
(c) 光栅/曲折线级联结构^[67]
 (c) Grating/zigzag line cascading structure^[67]



(d) 光栅/开口环级联结构^[68]
 (d) Grating/split ring cascading structure^[68]



(e) 二极管关断时传输系数
 (e) Transmission coefficients when PIN diode is OFF



(f) 二极管导通时传输系数
 (f) Transmission coefficients when PIN diode is ON

图9 透/反射一体型电控可重构极化调控超表面

Fig. 9 Integrated transmission/reflection electrically controlled reconfigurable polarization modulation metasurfaces

表4 透/反射一体型电控可重构极化调控超表面总结

Tab. 4 Summary of integrated transmission/reflection electrically controlled reconfigurable polarization modulation metasurfaces

文献	电控器件	工作频段(GHz)	极化调控能力	插入损耗	剖面	入射角稳定性
[65]	PIN二极管	2.10	透射：线-交叉线极化转换 反射：线极化保持	≤ 1 dB	$0.02\lambda_0$	—
		9.70	透射：线极化保持	≤ 0.5 dB		
[66]	PIN二极管	9.70	透射：线-交叉线极化转换	≤ 0.5 dB	$0.13\lambda_0$	—
		4.62~13.56	反射：线极化保持	≤ 1 dB		
[67]	PIN二极管	2.09~5.00	透射：线极化保持			
		2.29~3.16	透射：线-左旋圆极化转换	≤ 2 dB	$0.46\lambda_0$	—
		1.85~2.69	透射：线-交叉线极化转换			
		1.72~2.53	反射：线极化保持			
[68]	PIN二极管	4.90~7.00	透射：线-交叉线极化转换 反射：线极化保持	≤ 2 dB	$0.10\lambda_0$	40°

研究应致力于发展多样化的设计策略，提升其功能多样性。

5 总结与展望

本文首先对电控可重构极化调控超表面的研究背景和发展历程做了介绍，随后根据电控可重构极化调控超表面的工作形式将其分为透射型、反射型以及透/反射一体型3种类型，并分别介绍了各类型的最新研究进展。透射型超表面的主要优势在于其馈源和接收端处于不同侧，能够明显减少系统的背景干扰并提高信号的清晰度，但它在带宽和能量利用效率方面通常不如反射型；反射型超表面在宽带和低损耗设计方面表现出色，但反射波通常会对馈源产生干扰，可能导致系统整体性能下降；透/反射一体型超表面结合了前两者的特点，提供了极大的灵活性和多功能性，但这种复合功能往往以增加设计和制造的复杂性为代价。

未来，电控可重构极化调控超表面的研究将集中在以下几个方面：

(1) 电控可重构极化调控超表面性能的提升。目前，电控可重构极化调控超表面的研究已经取得显著进展，但仍面临一些迫切的挑战。极化调控方面，目前报道的超表面大多只能实现有限的调控形式，迫切需要开展研究以实现更加灵活和全面的极化态控制。未来的研究应致力于开发能够实现全极化状态调控的超表面。全极化调控不仅能提供更为丰富的电磁波操控手段，增强系统的灵活性和适应性，而且还能在多种应用中展现更大的潜力，如通信系统、雷达以及成像技术等。因此，研究和开发具有高度集成性的全极化调控超表面成为未来的发展趋势之一，对推动整个领域的进步具有重要意义。此外，从空间维度考虑，目前大多数研究集中在单一的透射型或反射型超表面上，而集成透射/反射功能的一体型超表面的研究相对较少。未来研

究应致力于设计和实现透/反射一体型超表面，以实现电磁波的全空间调控，从而推动超表面技术向更广泛的应用领域迈进。

(2) 引入新的可调谐材料。可重构极化调控超表面作为一种前沿的电磁波极化调控手段，广泛应用于通信、雷达、无线能量传输等领域。然而，现有的可重构极化调控超表面主要依赖于传统的电子器件，如PIN二极管和变容二极管等。此类器件在高频处损耗较大，并且工作频率较高的器件往往价格昂贵，这在一定程度上限制了可重构极化调控超表面的频率范围、调控范围和性能优势。未来的研究中可更多尝试引入新的可调谐材料，解决传统电控可重构极化调控超表面在高频段存在的损耗和性能限制问题，从而提升超表面的整体性能，为可重构极化调控超表面的发展提供更多可能性。

(3) 将可重构超表面与机器学习或人工智能算法相结合，实现智能化、自适应化。其一，传统的超表面设计通常需要大量的试错和参数调整，耗费大量时间和资源，而结合机器学习或人工智能算法可以利用算法对参数空间进行智能搜索和优化，快速找到最优设计方案，从而显著提高设计效率^[69,70]。此外，机器学习的方法可以帮助研究者发现更多的设计可能性，超出传统经验的范围。通过算法的数据驱动学习和模式识别能力，挖掘出更多潜在的设计方案，从而拓宽超表面设计的自由度和创新空间。其二，目前可重构极化调控超表面在特定时刻需要表现何种极化调控功能依旧需要通过人为判断后再调控其外部激励(如偏置电压)。结合机器学习的超表面设计可实现自适应和智能化的能力。通过与传感器和反馈环路的结合，超表面可以实时感知和响应外部电磁环境变化，从而自动调整参数以适应不同的工作条件和通信需求，提供更灵活和智能的功能。

未来，随着无线通信、雷达系统等领域的不断

发展以及5G、毫米波通信等技术和应用的兴起,其对电磁波极化调控的需求也将呈现日益增长趋势。因此,电磁波的极化调控在未来将扮演至关重要的角色。电控可重构超表面凭借其灵活、强大的电磁调控特性,在近年来取得了显著进展,为极化调控领域提供了创新性解决方案。展望未来,随着技术的不断发展和创新,电控可重构极化调控超表面将整合更多技术手段,进一步提升其性能和智能化程度,在无线通信、雷达系统、传感技术等领域发挥重要作用,为科学研究和工程应用开辟新的可能性,推动通信技术的创新和发展。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参考文献

- [1] BORN M and WOLF E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light[M]. 6th ed. New York: Pergamon Press, 1980: 36–67.
- [2] WAKAKI M, KOMACHI Y, MACHIDA H, *et al.* Fiber-optic polarizer using birefringent crystal as a cladding[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(15): 2591–2594. doi: [10.1364/AO.35.002591](https://doi.org/10.1364/AO.35.002591).
- [3] 魏克珠, 潘健, 刘博, 等. 微波铁氧体器件与变极化应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 113–120.
WEI Kezhu, PAN Jian, LIU Bo, *et al.* Microwave Ferrite Device and Variable Polarization Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 113–120.
- [4] SMITH D R, PENDRY J B, and WILTSHIRE M C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788–792. doi: [10.1126/science.1096796](https://doi.org/10.1126/science.1096796).
- [5] SMITH D R and KROLL N. Negative refractive index in left-handed materials[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(14): 2933–2936. doi: [10.1103/PhysRevLett.85.2933](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.2933).
- [6] PENDRY J B. A chiral route to negative refraction[J]. *Science*, 2004, 306(5700): 1353–1355. doi: [10.1126/science.1104467](https://doi.org/10.1126/science.1104467).
- [7] LAROUCHE S, TSAI Y J, TYLER T, *et al.* Infrared metamaterial phase holograms[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 450–454. doi: [10.1038/nmat3278](https://doi.org/10.1038/nmat3278).
- [8] ZHENG Guoxing, MÜHLENBERND H, KENNEY M, *et al.* Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308–312. doi: [10.1038/nnano.2015.2](https://doi.org/10.1038/nnano.2015.2).
- [9] JOHN-HERPIN A, TITTL A, KÜHNER L, *et al.* Metasurface-enhanced infrared spectroscopy: An abundance of materials and functionalities[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(34): 2110163. doi: [10.1002/adma.202110163](https://doi.org/10.1002/adma.202110163).
- [10] LI Lianlin, CUI Tiejun, JI Wei, *et al.* Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 197. doi: [10.1038/s41467-017-00164-9](https://doi.org/10.1038/s41467-017-00164-9).
- [11] ALAEE R, ALBOOYEH M, and ROCKSTUHL C. Theory of metasurface based perfect absorbers[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(50): 503002. doi: [10.1088/1361-6463/aa94a8](https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa94a8).
- [12] WEN Dandan, YUE Fuyong, KUMAR S, *et al.* Metasurface for characterization of the polarization state of light[J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10272–10281. doi: [10.1364/OE.23.010272](https://doi.org/10.1364/OE.23.010272).
- [13] LIN Dianmin, FAN Pengyu, HASMAN E, *et al.* Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298–302. doi: [10.1126/science.1253213](https://doi.org/10.1126/science.1253213).
- [14] LIU Xiaoming, ZHOU Yixin, WANG Chen, *et al.* Dual-band dual-rotational-direction angular stable linear-to-circular polarization converter[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(7): 6054–6059. doi: [10.1109/tap.2021.3138533](https://doi.org/10.1109/tap.2021.3138533).
- [15] MAJEEED A, ZHANG Jinling, ASHRAF M A, *et al.* An ultra-wideband linear-to-circular polarization converter based on a circular, pie-shaped reflective metasurface[J]. *Electronics*, 2022, 11(11): 1681. doi: [10.3390/electronics11111681](https://doi.org/10.3390/electronics11111681).
- [16] VU T L and SEO C. A high angular stability, single-layer transmission linear-to-circular polarization converter for dual ISM-band operation[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 30188–30196. doi: [10.1109/access.2023.3261563](https://doi.org/10.1109/access.2023.3261563).
- [17] DICANDIA F A and GENOVESI S. Linear-to-circular polarization transmission converter exploiting meandered metallic slots[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(11): 2191–2195. doi: [10.1109/lawp.2022.3188063](https://doi.org/10.1109/lawp.2022.3188063).
- [18] YANG Pei, DANG Ruirong, and LI Lipin. Dual-linear-to-circular polarization converter based polarization-twisting metasurface antenna for generating dual band dual circularly polarized radiation in Ku-band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(10): 9877–9881. doi: [10.1109/TAP.2022.3178803](https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3178803).
- [19] WANG Hongbin and CHENG Yujian. Single-layer dual-band linear-to-circular polarization converter with wide axial ratio bandwidth and different polarization modes[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(6): 4296–4301. doi: [10.1109/tap.2019.2905962](https://doi.org/10.1109/tap.2019.2905962).
- [20] SOFI M A, SAURAV K, and KOUL S K. Linear-to-circular polarization converter with wide angular stability and near unity ellipticity—application to linearly polarized antenna

- array[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(12): 4779–4783. doi: [10.1109/tcsii.2022.3196385](https://doi.org/10.1109/tcsii.2022.3196385).
- [21] XU Peng, JIANG Weixiang, WANG Shenyun, *et al.* An ultrathin cross-polarization converter with near unity efficiency for transmitted waves[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(8): 4370–4373. doi: [10.1109/TAP.2018.2839972](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2839972).
- [22] LIU Chuan, GAO Renjing, WANG Qi, *et al.* A design of ultra-wideband linear cross-polarization conversion metasurface with high efficiency and ultra-thin thickness[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(15): 153103. doi: [10.1063/1.5143831](https://doi.org/10.1063/1.5143831).
- [23] DEY S, DEY S, and KOUL S K. Miniaturized dual stop band frequency selective surface with broadband linear co to cross polarization conversion ability[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer - Aided Engineering*, 2021, 31(9): e22779. doi: [10.1002/mmce.22779](https://doi.org/10.1002/mmce.22779).
- [24] SONG Kun, LIU Yahong, LUO Chunrong, *et al.* High-efficiency broadband and multiband cross-polarization conversion using chiral metamaterial[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(50): 505104. doi: [10.1088/0022-3727/47/50/505104](https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/50/505104).
- [25] LIU Chuan, GAO Renjing, LIU Shutian, *et al.* Meander-line based high-efficiency ultrawideband linear cross-polarization conversion metasurface[J]. *Applied Physics Express*, 2021, 14(7): 074001. doi: [10.35848/1882-0786/ac0b06](https://doi.org/10.35848/1882-0786/ac0b06).
- [26] BAGHEL A K, KULKARNI S S, and NAYAK S K. Linear-to-cross-polarization transmission converter using ultrathin and smaller periodicity metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(7): 1433–1437. doi: [10.1109/lawp.2019.2919423](https://doi.org/10.1109/lawp.2019.2919423).
- [27] FEI Peng, VANDENBOSCH G A E, GUO Weihua, *et al.* Versatile cross-polarization conversion chiral metasurface for linear and circular polarizations[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(13): 2000194. doi: [10.1002/adom.202000194](https://doi.org/10.1002/adom.202000194).
- [28] LIN Baoqin, GUO Jianxin, LV Lintao, *et al.* Ultra-wideband and high-efficiency reflective polarization converter for both linear and circular polarized waves[J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(2): 76. doi: [10.1007/S00339-018-2368-9](https://doi.org/10.1007/S00339-018-2368-9).
- [29] PENG Lin, LI Xiaofeng, JIANG Xing, *et al.* A novel THz half-wave polarization converter for cross-polarization conversions of both linear and circular polarizations and polarization conversion ratio regulating by Graphene[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4250–4258. doi: [10.1109/JLT.2018.2836904](https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2836904).
- [30] LIN Baoqin, HUANG Wenzhun, GUO Jianxin, *et al.* A high efficiency ultra-wideband circular-to-linear polarization conversion metasurface[J]. *Optics Communications*, 2023, 529: 129102. doi: [10.1016/j.optcom.2022.129102](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.129102).
- [31] SUN Xiaoning, QU Zhaoming, YUAN Jianghang, *et al.* Reconfigurable broadband polarisation conversion metasurface based on VO₂[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2022, 50: 101012. doi: [10.1016/j.photonics.2022.101012](https://doi.org/10.1016/j.photonics.2022.101012).
- [32] ZHU H L, CHEUNG S W, LIU X H, *et al.* Design of polarization reconfigurable antenna using metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(6): 2891–2898. doi: [10.1109/tap.2014.2310209](https://doi.org/10.1109/tap.2014.2310209).
- [33] LI Long, LI Yongjiu, WU Zhao, *et al.* Novel polarization-reconfigurable converter based on multilayer frequency-selective surfaces[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 103(7): 1057–1070. doi: [10.1109/jproc.2015.2437611](https://doi.org/10.1109/jproc.2015.2437611).
- [34] CERVENY M, FORD K L, and TENNANT A. Reflective switchable polarization rotator based on metasurface with PIN diodes[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(3): 1483–1492. doi: [10.1109/tap.2020.3026883](https://doi.org/10.1109/tap.2020.3026883).
- [35] DE LUSTRAC A, RATNI B, PIAU G P, *et al.* Tri-state metasurface-based electromagnetic screen with switchable reflection, transmission, and absorption functionalities[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3(3): 1184–1190. doi: [10.1021/acsaelm.0c01038](https://doi.org/10.1021/acsaelm.0c01038).
- [36] XU Shitong, FAN Fei, CAO Hongzhong, *et al.* Liquid crystal integrated metamaterial for multi-band terahertz linear polarization conversion[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(9): 093701. doi: [10.3788/COL202119.093701](https://doi.org/10.3788/COL202119.093701).
- [37] VASIĆ B, ZOGRAFOPOULOS D C, ISIĆ G, *et al.* Electrically tunable terahertz polarization converter based on overcoupled metal-isolator-metal metamaterials infiltrated with liquid crystals[J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(12): 124002. doi: [10.1088/1361-6528/aa5bbd](https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5bbd).
- [38] MA Xiaoliang, PAN Wenbo, HUANG Cheng, *et al.* An active metamaterial for polarization manipulating[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(10): 945–949. doi: [10.1002/adom.201400212](https://doi.org/10.1002/adom.201400212).
- [39] LI Wenting, GAO S, CAI Yuanming, *et al.* Polarization-reconfigurable circularly polarized planar antenna using switchable polarizer[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(9): 4470–4477. doi: [10.1109/tap.2017.2730240](https://doi.org/10.1109/tap.2017.2730240).
- [40] LI Wei, XIA Song, HE Bin, *et al.* A reconfigurable polarization converter using active metasurface and its application in horn antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(12): 5281–5290. doi: [10.1109/tap.2016.2620484](https://doi.org/10.1109/tap.2016.2620484).
- [41] SOFI M A, SAURAV K, and KOUL S K. A linear to circular polarization reconfigurable converter based on

- frequency selective surface[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(5): 1425–1433. doi: [10.1002/mop.32779](https://doi.org/10.1002/mop.32779).
- [42] ZHU Shuangshuang, WANG Ping, ZHANG Yong, *et al.* A reconfigurable polarization converter and related application as horn antenna cladding[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(2): 023102. doi: [10.1063/5.0130212](https://doi.org/10.1063/5.0130212).
- [43] ZHOU Hongcheng, YU Xiaoran, WANG Ping, *et al.* Wideband linear-to-multi-polarization converter based on active metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(6): 5246–5255. doi: [10.1109/tap.2023.3256581](https://doi.org/10.1109/tap.2023.3256581).
- [44] HUANG Chenxi, ZHANG Jingjing, CHENG Qiang, *et al.* Polarization modulation for wireless communications based on metasurfaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(36): 2103379. doi: [10.1002/adfm.202103379](https://doi.org/10.1002/adfm.202103379).
- [45] WU Zhanni, RA'DI Y, and GRBIC A. Tunable metasurfaces: A polarization rotator design[J]. *Physical Review X*, 2019, 9(1): 011036. doi: [10.1103/PhysRevX.9.011036](https://doi.org/10.1103/PhysRevX.9.011036).
- [46] LI You, CAO Qunsheng, and WANG Yi. A wideband multifunctional multilayer switchable linear polarization metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(7): 1314–1318. doi: [10.1109/lawp.2018.2843816](https://doi.org/10.1109/lawp.2018.2843816).
- [47] WEI Zeyong, ZHAO Yunlong, ZHANG Yujing, *et al.* High-efficiency modulation of broadband polarization conversion with a reconfigurable chiral metasurface[J]. *Nanoscale Advances*, 2022, 4(20): 4344–4350. doi: [10.1039/d2na00382a](https://doi.org/10.1039/d2na00382a).
- [48] WANG Ping, LIN Feihong, WANG Yu, *et al.* Tunable polarization converter with high polarization isolation based on metasurface and its application on horn antenna[J]. *Applied Physics A*, 2022, 128(10): 863. doi: [10.1007/s00339-022-05930-1](https://doi.org/10.1007/s00339-022-05930-1).
- [49] WANG Ping, WANG Yu, YAN Zhongming, *et al.* Transmission-type reconfigurable metasurface for linear-to-circular and linear-to-linear polarization conversions[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(12): 124201. doi: [10.1088/1674-1056/acSce0](https://doi.org/10.1088/1674-1056/acSce0).
- [50] WANG Ping, QIN Yifei, WANG Yu, *et al.* Wideband switchable linear polarization rotator based on metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 123(1): 011701. doi: [10.1063/5.0155015](https://doi.org/10.1063/5.0155015).
- [51] SAIKIA M, GHOSH S, and SRIVASTAVA K V. Switchable reflective metamaterial polarisation rotator[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(12): 1030–1032. doi: [10.1049/el.2016.0742](https://doi.org/10.1049/el.2016.0742).
- [52] WANG Fuwei, LI Ke, and REN Yuhui. Reconfigurable polarization rotation surfaces applied to the wideband antenna radar cross section reduction[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer - Aided Engineering*, 2018, 28(5): e21262. doi: [10.1002/mmce.21262](https://doi.org/10.1002/mmce.21262).
- [53] SUN Shangyi, JIANG Wen, GONG Shuxi, *et al.* Reconfigurable linear-to-linear polarization conversion metasurface based on PIN diodes[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(9): 1722–1726. doi: [10.1109/LAWP.2018.2864797](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2864797).
- [54] TIAN Jianghao, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* A reconfigurable ultra-wideband polarization converter based on metasurface incorporated with PIN diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(13): 135105. doi: [10.1063/1.5067383](https://doi.org/10.1063/1.5067383).
- [55] YANG Heng, WANG Shicong, LI Peng, *et al.* A broadband multifunctional reconfigurable polarization conversion metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(7): 5759–5767. doi: [10.1109/TAP.2023.3266498](https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3266498).
- [56] YANG Zhengyi, KOU Na, YU Shixing, *et al.* Reconfigurable multifunction polarization converter integrated with PIN diode[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2021, 31(6): 557–560. doi: [10.1109/LMWC.2021.3064039](https://doi.org/10.1109/LMWC.2021.3064039).
- [57] LIU Wei, KE Junchen, XIAO Cong, *et al.* Broadband polarization-reconfigurable converter using active metasurfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(4): 3725–3730. doi: [10.1109/TAP.2023.3240861](https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3240861).
- [58] BHATTACHARJEE A and DWARI S. Design of an anisotropic reconfigurable reflective polarization converter for realizing circular polarization-reconfigurable antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(12): 2392–2396. doi: [10.1109/LAWP.2022.3194347](https://doi.org/10.1109/LAWP.2022.3194347).
- [59] PRAMANIK S, BAKSHI S C, KOLEY C, *et al.* Active metasurface-based reconfigurable polarization converter with multiple and simultaneous functionalities[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 22(3): 522–526. doi: [10.1109/lawp.2022.3217130](https://doi.org/10.1109/lawp.2022.3217130).
- [60] MA Qian, HONG Qiaoru, BAI Guodong, *et al.* Editing arbitrarily linear polarizations using programmable metasurface[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(2): 021003. doi: [10.1103/PhysRevApplied.13.021003](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.021003).
- [61] GAO Xi, YANG Wanli, MA Huifeng, *et al.* A reconfigurable broadband polarization converter based on an active metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(11): 6086–6095. doi: [10.1109/TAP.2018.2866636](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2866636).
- [62] 于惠存, 曹祥玉, 高军, 等. 一种宽带可重构反射型极化旋转表面[J]. *物理学报*, 2018, 67(22): 224101. doi: [10.7498/aps.67.20181041](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181041).
- YU Huicun, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Broadband

- reconfigurable reflective polarization convertor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(22): 224101. doi: [10.7498/aps.67.20181041](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181041).
- [63] YU Huicun, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Design of a wideband and reconfigurable polarization converter using a manipulable metasurface[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(11): 3373–3381. doi: [10.1364/OME.8.003373](https://doi.org/10.1364/OME.8.003373).
- [64] GUO Zexu, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* A novel reconfigurable metasurface with coincident and ultra-wideband LTL and LTC polarization conversion functions[J]. *Radioengineering*, 2019, 28(4): 696–702. doi: [10.13164/re.2019.0696](https://doi.org/10.13164/re.2019.0696).
- [65] TAO Zui, WAN Xiang, PAN Baicao, *et al.* Reconfigurable conversions of reflection, transmission, and polarization states using active metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(12): 121901. doi: [10.1063/1.4979033](https://doi.org/10.1063/1.4979033).
- [66] LI You, WANG Yi, and CAO Qunsheng. Design of a multifunctional reconfigurable metasurface for polarization and propagation manipulation[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 129183–129191. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2939200](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939200).
- [67] WANG Ping, ZHANG Yong, WANG Yu, *et al.* Multifunctional polarization converter based on multilayer reconfigurable metasurface[J]. *Defence Technology*, 2023, 28: 136–145. doi: [10.1016/j.dt.2022.12.008](https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.12.008).
- [68] YANG Jianing, ZHANG Yanting, TANG Mingchun, *et al.* A reconfigurable asymmetric-transmission metasurface for dynamic manipulation of transmission, reflection, and polarization[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(8): 083101. doi: [10.1063/5.0134540](https://doi.org/10.1063/5.0134540).
- [69] SHI Xin, QIU Tianshuo, WANG Jiafu, *et al.* Metasurface inverse design using machine learning approaches[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(27): 275105. doi: [10.1088/1361-6463/ab8036](https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab8036).
- [70] HU Yanwen, MA Yaodong, ZHANG Tingrong, *et al.* Inverse design of transmission-type linear-to-circular polarization control metasurface based on deep learning[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2023, 56(47): 475001. doi: [10.1088/1361-6463/acefd6](https://doi.org/10.1088/1361-6463/acefd6).

作者简介

周洪澄，博士，讲师，主要研究方向为电磁场调控及其应用技术(电磁超材料、目标感知与成像)、天线理论与技术、时间反演电磁学。

余潇然，硕士生，主要研究方向为电磁场调控技术、天线理论与设计。

王 豫，博士，教授，主要研究方向为基于新材料物理效应的电磁场调控技术与应用、超导电工与电子技术、电磁能储存/转换与传输技术、新型电磁推进技术、复杂电磁场分析与调控技术、新型电磁材料与器件。

严仲明，博士，研究员，主要研究方向为能量存储及变换(脉冲功率、无线传能)、电磁场调控及其应用技术(电磁超材料、磁电功能器件、目标感知与识别)、电磁发射技术(直线驱动、同步控制)。

(责任编辑：高山流水)