

# 电磁超表面全息成像技术研究进展

杨欢欢, 张芷昀, 李桐, 田江浩, 曹祥玉

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

**摘要** 超表面全息术的出现极大地促进了全息成像技术的发展,同时也拓展了电磁超表面的应用范围。为进一步梳理超表面全息成像的发展脉络,以技术发展的时间轴为主线,系统地回顾了超表面技术的发展历程,以及受益于超表面技术的全息成像模式的进步。随着技术的进步,超表面全息术逐渐从可见光频段向微波频段发展,从静态重现向动态全息演变,因此,着重介绍了超表面全息术的未来方向——可重构超表面及其动态全息技术,并且从超表面单元高性能创新技术、超表面阵列全息模式以及超表面全息系统研究3个方面对可重构超表面全息术的发展做了展望。

**关键词** 电磁超表面;超材料;可重构技术;全息成像技术;振幅相位

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.02.001

**中图分类号** TN929.5;O441.4 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)02-0001-13

## Research on Electromagnetic Meta-Surface Holography

YANG Huanhuan, ZHANG Zhiyun, LI Tong, TIAN Jianghao, CAO Xiangyu

(Information and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract** The emergence of meta-surface holography is greatly promoted to the development of holographic imaging technology and the application range of electromagnetic meta-surfaces. In order to further clarify the development trajectory of meta-surface holography, this paper systematically reviews the development process of meta-surface technology and the progress of holographic imaging modes benefited from meta-surface technology. With the advancement of technology, the meta-surface holography gradually evolves as the microwave frequency band from the visible light frequency band, and as dynamic holography from static reproduction. Therefore, the discussion of this paper centers on the introduction of meta-surface holography - reconfigurable meta-surfaces and their dynamic holographic technology to the future direction. For the above-mentioned reasons, this paper prospectively discusses the development of reconfigurable meta-surface holography, high-performance innovation technology of meta-surface element, holographic modes of meta-surface, and meta-surface holographic system research.

**Key words** electromagnetic meta-surfaces; meta-materials; reconfigurable technology; holographic imaging technology; amplitude and phase

**收稿日期**: 2023-08-30

**基金项目**: 国家自然科学基金(62171460, 62371466);陕西省自然科学基金(2022JM-319, 2022JQ-685, 20200108, 20210110, 202210104);空间微波技术国家级重点实验室稳定支持基金(HTKJ2022KL504004)

**作者简介**: 杨欢欢(1989-),男,河南汝南人,副教授,博士,研究方向为电磁超表面、阵列天线和电磁频谱管控。E-mail: jianye8901@126.com

**通信作者**: 李桐(1988-),女,陕西西安人,副教授,博士后,研究方向为电磁超表面、阵列天线和电磁隐身技术。E-mail: tongli8811@sina.com

**引用格式**: 杨欢欢,张芷昀,李桐,等.电磁超表面全息成像技术研究进展[J].空军工程大学学报,2024,25(2):1-13. YANG Huanhuan, ZHANG Zhiyun, LI Tong, et al. Research on Electromagnetic Meta-Surface Holography[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(2): 1-13.

自 1964 年“左手材料”概念被提出开始<sup>[1]</sup>,近半个世纪的电磁材料探索之路从未停歇。进入 21 世纪以后,“电磁超材料”的概念逐渐被大众接受,并得到持续丰富的发展。科学家们巧妙设计了亚波长尺度结构的,并将其周期排列,既充分利用了传统材料,又得到了突破自然材料限制的等效介电常数和磁导率,实现了负折射、隐身斗篷等一系列超出以往认知的奇特电磁现象<sup>[2-5]</sup>。经过数十年的研究发展,超表面(meta-surface, MS)逐渐发展成为超材料研究的一个重要分支<sup>[6]</sup>。与超材料典型的三维结构不同,超表面往往具有超薄的二维结构特点,且其能量损耗低、加工制作相对简单,应用前景非常广阔。从三维超材料结构到二维超表面结构,从对电磁波单一振幅<sup>[7]</sup>、相位<sup>[8]</sup>调控到基于振幅相位的极化调控<sup>[9]</sup>、远场方向图调控<sup>[10]</sup>和近场能量分布调控<sup>[11]</sup>,从微波、毫米波<sup>[12]</sup>到太赫兹<sup>[13]</sup>、近红外和可见光频段的研究<sup>[14]</sup>,从固定式超表面模式<sup>[6]</sup>到可重构超表面(reconfigurable meta-surface, RMS)模式<sup>[15]</sup>,多层次、全方位的电磁超表面研究正全面展开。作为电磁超表面发展的最新形式,可重构超表面独特的性质对实现电磁波精确、灵活操纵具有深远的意义。

近年来,电磁超表面与全息成像的融合发展也取得了显著进步<sup>[16]</sup>,基于超表面灵活多样的能力,全息成像技术得到了进一步发展。同理,全息成像技术为超表面的应用提供了新的空间<sup>[17]</sup>。

为进一步梳理超表面全息技术的发展趋势,本文对超表面的发展历程和全息技术的发展历程做了系统的回顾,重点介绍可重构超表面技术及其全息成像应用的研究现状,最后对电磁超表面全息成像技术的未来方向做了展望。

## 1 电磁超表面发展历程

从发展历程看,电磁超表面是电磁超材料研究的最新分支之一;从结构形态看,电磁超表面可以视为电磁超材料的二维形式。电磁超材料(electromagnetic metamaterials)是一类具有超出自然材料电磁响应特性的人工电磁材料,其奇特的电磁特性是通过在传统材料在亚波长尺度上进行结构设计,并按照一定空间序构进行排列得到的。

电磁超材料,最早可以追溯到 20 世纪 60 年代,其发展大致经历的阶段如图 1 所示。

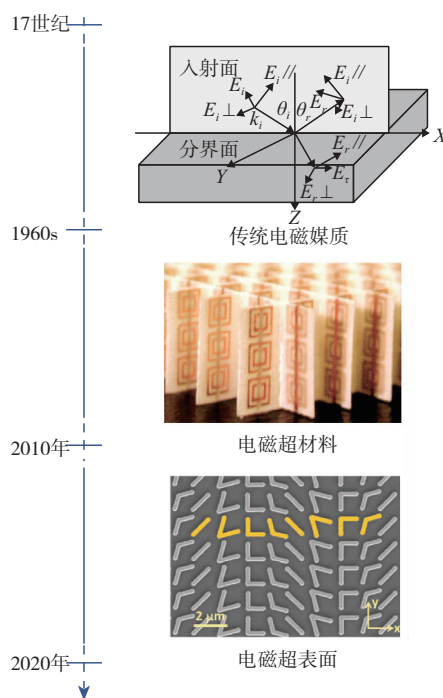


图 1 电磁媒质发展历程

### 1.1 电磁超材料阶段

1964 年,苏联物理学家 Veselago 教授从麦克斯韦方程组出发,通过一系列公式推导证明了电磁媒质的介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  存在负值的可能,并将此种材料命名为“左手材料”<sup>[1]</sup>。

1996 年,英国 Pendry 教授团队通过周期排列一定直径的金属线单元,在实验中获得了负介电常数电磁媒质<sup>[2]</sup>。1999 年, Pendry 教授团队将开口相反的不同尺寸金属环内外嵌套,形成开口谐振环结构<sup>[3]</sup>,在谐振频率附近得到负磁导率特性。同年, Rodger Walser 团队将此类结构电磁媒质正式命名为电磁超材料。翌年, Pendry 教授发表了基于“双负媒质”负折射特性设计完美透镜的经典论著<sup>[4]</sup>。

2001 年,美国加州大学 Smith 教授团队提出将金属线阵列和开口谐振环结构结合,通过优化单元结构和排列方式,使“双负”特性工作在同一频段,最终实验证实了 Veselago 教授提出的左手材料<sup>[5]</sup>。2005 年, Smith 教授团队进一步通过提出的网络参数反演法<sup>[18]</sup>获得了左手材料的  $\epsilon$  和  $\mu$  的数值解。至此,左手材料的出现极大地激发了研究人员的热情,也加快了电磁超材料的研究进程,并为诸如电磁隐身技术等前沿技术的发展等提供了良好的借鉴意义。2006 年,德国 Leonhardt 教授和英国 Pendry 教授在《Science》同期发表的论文<sup>[19-20]</sup>,揭示利用电磁超材料设计隐身斗篷的理论基础——光学变换理论。随后由该理论最终诞生了 4 种典型的设计——电磁隐身衣<sup>[21]</sup>、宽带隐身地毯<sup>[22]</sup>、电磁黑洞<sup>[23]</sup>和三维隐身衣<sup>[24]</sup>。光学变换理论的提出使得电磁超材

料不限于左手材料,还包括介电常数和磁导率的任意组合,自此,电磁超材料的研究进入可按照研究者意愿控制电磁波特征的时代。

从 20 世纪 60 年代 Veselago 教授关于左手材料的存在性猜想,到 Pendry 教授关于左手材料的存在性证明,再到 Smith 教授、崔铁军教授关于电磁

超材料应用的研究,电磁超材料的发展,如图 2 所示。描述电磁超材料的理论亦从左手传输线理论发展到光学变换理论,基于等效媒质参数的超材料表征方法很好地指导了完美透镜、隐身斗篷的设计。随着电磁超材料研究的深入,电磁超表面应运而生,并引发了学者们的高度关注。

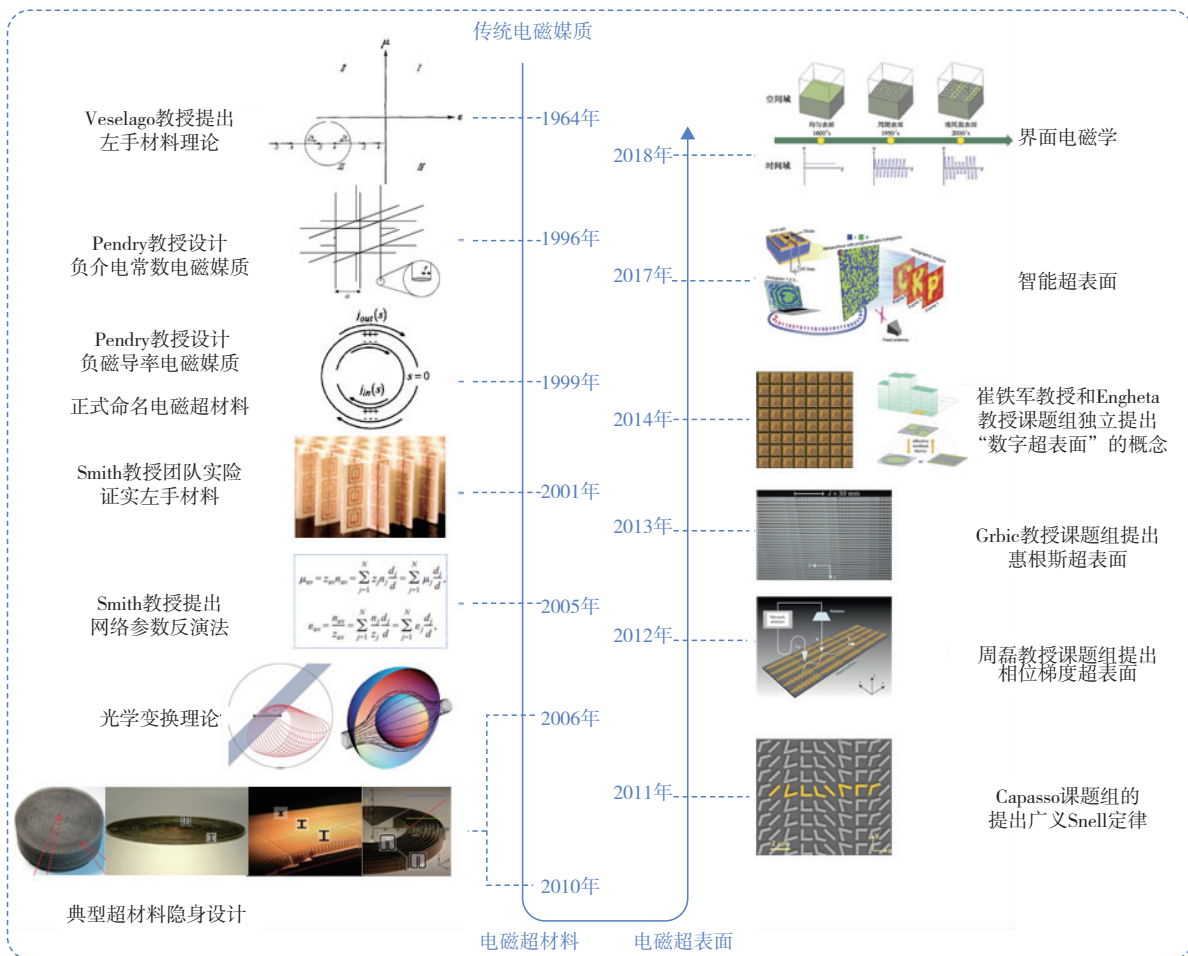


图 2 电磁超表面发展历程

### 1.2 电磁超表面阶段

电磁表面理论可追溯至经典的 Snell 定律<sup>[25]</sup>、惠更斯等效原理<sup>[26]</sup>等。2011 年,美国哈佛大学 Capasso 课题组设计了一种准周期超表面结构,其特性拓展了经典的 Snell 定律<sup>[6]</sup>。该超表面虽然宏观序上仍为周期性排布,但整个表面上的单元不再具有完全相同的结构,使得整个超表面对电磁波的反射、折射表现突破了经典 Snell 定律的限制, Capasso 课题组将这种新奇的电磁现象定义为广义 Snell 定律。

2012 年,复旦大学周磊教授课题组将具有不同相位的超表面单元按照梯度排列,从而改变了电磁波的偏转方向,最终引导空间电磁波以 99% 的效率转化为表面波,此类超表面被称为相位梯度超表面<sup>[27]</sup>。2013 年,密歇根大学 Grbic 教授课题组基于惠更斯等效原理设计出可以产生等效电流源和磁流

源的超表面单元,将此类单元按照周期性原则排布则可以有效控制电磁波前,实现波束赋形、偏转和聚焦等功能,此类超表面被称为惠更斯超表面<sup>[28]</sup>。除此之外,电磁波的振幅、相位均可以通过超表面设计来调控<sup>[29]</sup>。当超表面的反射相位为 0° 时,即构建了自然界中不存在的人工磁导体<sup>[30]</sup>。随着研究的深入,具备不同功能的电磁超表面被不断提出,如完美吸波体<sup>[7]</sup>、极化旋转表面<sup>[9]</sup>、表面等离子激元<sup>[31]</sup>等。

随着上述模拟超表面研究的深入,数字超表面也被提出。2014 年,东南大学崔铁军教授课题组和美国宾夕法尼亚大学 Engheta 教授课题组独立提出“数字超表面”的概念<sup>[12, 32]</sup>。电磁波的相位响应可以用数字 0 或 1 表征,“0”表示 0° 相位,“1”表示 180° 相位,将 0~1 进行数字化编码可以实现更加丰富的电磁调控功能。数字化编码意味着超表面功能进入了可编程时代,这为超表面的优化设计和功能拓展提供了有



力工具。为了能够实时改变超表面数字化编码状态,可重构技术也被引入超表面的设计之中。编码理论和可重构超表面设计相结合,催生了大量前沿技术<sup>[17, 33-34]</sup>,并推动其向工程化、智能化方向发展。

随着深度学习理论研究的不断深入,2017年,北京大学李廉林教授课题组和崔铁军教授课题组合作,将可重构编码超表面与深度学习理论结合<sup>[11]</sup>,开启了基于可重构编码超表面的智能电磁感知、电磁成像新篇章。2019年,空军工程大学屈绍波教授课题组将编码超表面设计与深度学习理论结合,经过训练,可以自主生成特定功能的编码超表面<sup>[35]</sup>。随着深度学习理论、通信技术和可重构超表面技术的不断融合发展,智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)<sup>[36]</sup>技术凭借极具前景的发展优势脱颖而出,并已成为超表面的研究特点方向之一。2018年,清华大学杨帆教授课题组在系统总结传统电磁理论和电磁超表面发展的基础上,提出了“界面电磁学”的概念<sup>[37]</sup>,促进了超表面的理论发展。

### 1.3 可重构电磁超表面

可重构技术和超表面的结合使得超表面的功能不再受限于固定结构,极大地增强了超表面的电磁调控能力。将固定式超表面与可调材料或器件结合,如电控器件或材料(PIN二极管<sup>[15]</sup>、变容管<sup>[38]</sup>、石墨烯<sup>[39]</sup>和金属微流体<sup>[40]</sup>等)、机械控制材料<sup>[41]</sup>、光控材料<sup>[42]</sup>和温控材料<sup>[43]</sup>等,可以使超表面实现对电磁波相位、振幅、极化和频率等特征量的可重构控制,基于此,可重构超表面可以进一步实现远场方向图、近场能量分布等电磁波动态调控功能。由于不同频段电磁波的传输性质略有差异,上述4种控制方式的应用各侧重于不同电磁波频段。在微波波段,电控和机械控制方式由于其高可靠性、易维护和低成本等特点而被广泛采用。光敏材料和超导体通常被应用于设计从太赫兹到可见光频段的可重构超表面。

#### 1.3.1 微波、毫米波频段

电可调技术是微波频段超表面可重构设计最常用的方法之一。将电控PIN二极管、变容管、电敏感材料等用于超表面单元设计,通过外部偏置电压/电流的变化控制电子器件的状态以达到超表面功能可重构的目的。

文献[38]给出了一种基于变容管的频率可调电磁吸波体结构,如图3(a)所示,当变容管的偏置电压在 $-19\sim 0$  V范围内变化时,电磁吸波体的吸波率在 $4.35\sim 5.85$  GHz范围内大于90%。为了解决电磁波透射/吸收功能动态切换等问题,文献[44]基于耦合模理论,设计了一种加载PIN二极管的透射型超表面,如图3(b)所示。

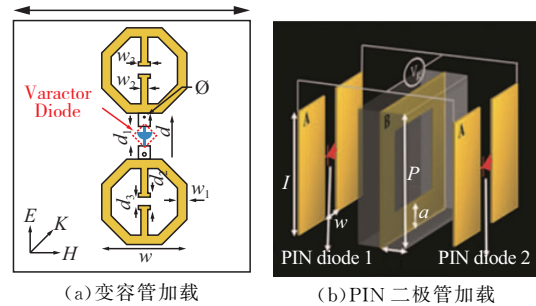


图3 振幅可重构超表面

对于相位可重构超表面,2014年崔铁军教授课题组<sup>[12]</sup>和2016年曹祥玉教授课题组<sup>[10]</sup>分别设计并验证了1-bit相位可重构超表面。如图4(a)所示,前者通过改变PIN二极管导通和截止状态,在8.50 GHz处设计了具有“0”和“1”数字相位状态的超表面单元,并通过改变整个超表面的相位排布,实现了远场波束的可变调控。后者采用简单的矩形金属贴片作为主谐振结构,产生了良好的单元辐射效果,如图4(b)所示,在 $12.25\sim 12.75$  GHz范围内,PIN二极管导通和截止状态下的超表面相位差在 $180^\circ\pm 20^\circ$ 范围内,且其振幅损耗均小于0.4 dB。

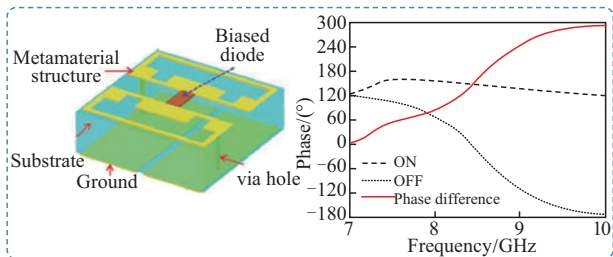
相位可重构超表面的设计易存在带宽窄、损耗高、精度低等限制。文献[45]将超表面结构与PIN二极管、电容贴片相结合,设计出一款工作在 $8.50\sim 12.60$  GHz范围内的低损耗宽带相位可重构超表面单元,得益于非对称的结构设计和电容贴片的加载,超表面的最大损耗减小至0.75 dB,如图4(c)所示。此外,一些研究以牺牲工作带宽为代价获得低损耗效果。文献[46]给出了一款相对带宽为23.8%的1-bit相位可重构超表面,其最大损耗为0.6 dB。如图4(d)所示,文献[47]利用2-bit相位可重构超表面来实现自适应无线功率传输系统设计,在工作频带内其损耗接近2 dB。文献[48]使用2-bit相位可重构超表面实现了任意波束编程控制,工作频带内最大损耗为2.05 dB。如何解决单元的高损耗问题,对设计2-bit甚至更高相位量化精度的可重构超表面仍然是一个挑战。

远场方向图精准调控、近场全息成像等电磁散射场控制往往要求超表面能够在 $360^\circ$ 范围内进行相位编码。单层谐振式透射型超表面最大可以实现 $90^\circ$ 相移,要在 $360^\circ$ 范围内进行相位量化操作,则需要设计多层谐振结构,但多层结构又会带来较高的能量损耗,因此收发式结构成为设计透射型超表面的最佳选择之一<sup>[49]</sup>。文献[49]提出收发式超表面结构的原型,如图4(e)所示,通过激励不同的PIN二极管,形成反向电流,从而实现1-bit相位调控,其3 dB传输带宽为14.7%。基于此结构,大量文献报

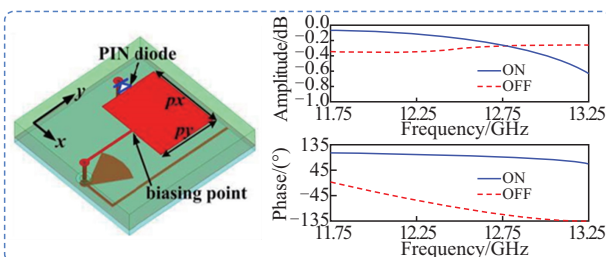
道了收发式相位可重构超表面的研究, 其中, 文献 [50] 和文献 [51] 分别提出了 2-bit 收发式和圆极化收发式相位可重构超表面的设计方法。

2017 年, 崔铁军教授课题组利用相位可重构技术提出“时空编码超表面”的概念 [52], 当超表面相位

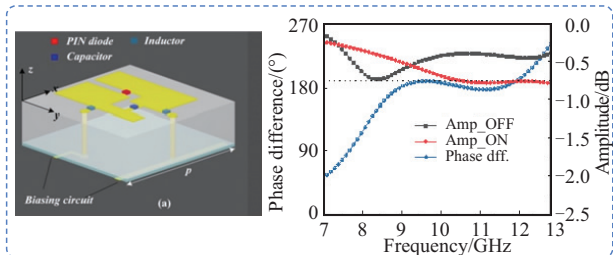
编码分布处于纳秒级别快速变化时, 可以产生非线性谐波, 从而实现伴随频率变化的异常反射, 如图 4 (f) 所示。时空调制编码技术的出现使超表面获得在空域和频域同时处理电磁波的能力, 即同时控制电磁波的传播方向和谐波功率分布。



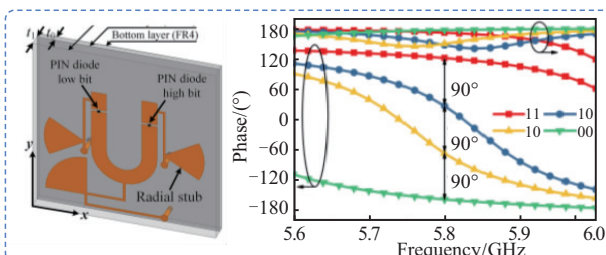
(a) 崔铁军教授课题组超表面结构 [12]



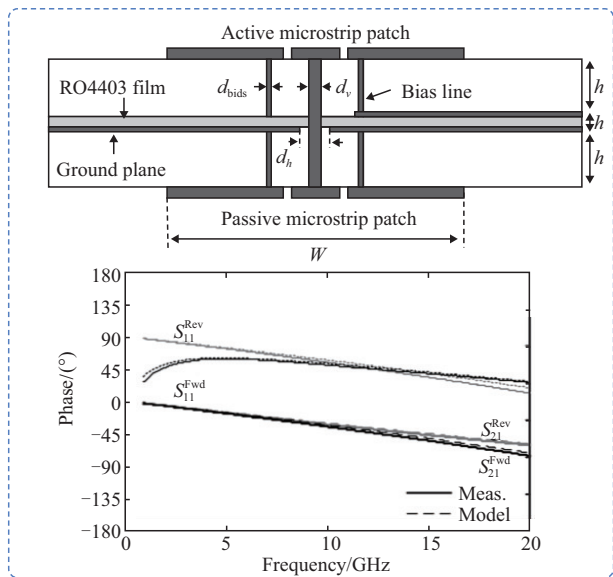
(b) 曹祥玉教授课题组超表面结构 [10]



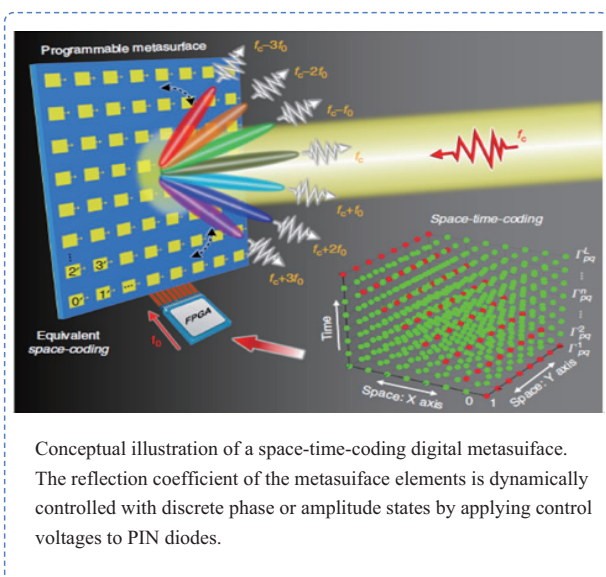
(c) 非对称结构超表面设计 [46]



(d) 2-bit 相位可重构超表面 [47]



(e) 收发式透射型相位可重构超表面 [49]



(f) 谐波生成时空编码超表面 [52]

图 4 相位可重构超表面

文献 [53] 在优化超表面结构参数和 PIN 二极管加载位置的基础上, 通过独立改变不同位置 PIN 二极管的激励电流或电压, 在同一频段内实现了超表面复振幅可重构设计, 如图 5(a) 所示。超表面相位和振幅的独立调制为高质量近场全息成像打下了良好的基础。但在设计过程中, 减小振幅和相位之间的耦合需要巧妙的设计方法, 因此, 复振幅可重构超表面的设计仍然具有挑战性。另外, 利用超表面相位和振幅的耦合也可以实现电磁波极化的可重构设计。文献 [54] 通过改变 PIN 二极管的状态, 可以实现不同的相位和振幅组合, 如图 5(b) 所示, 在

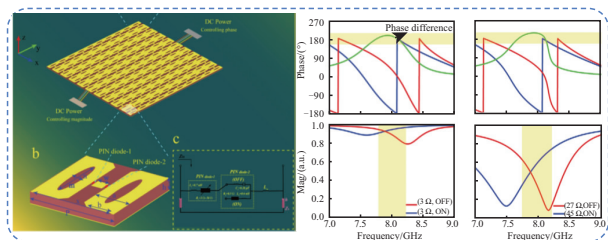
PIN 二极管截止状态下, 超表面将线极化入射波转化为圆极化反射波; 在 PIN 二极管导通状态下, 在 6.50~19.90 GHz 范围内, 超表面将线极化入射波转化为其正交线极化反射波。此外, 研究者还将多种电磁调控能力集成化设计, 实现了多功能可重构超表面 [55-56]。

Pancharatnam-Berry (PB) 相位调控方法可以带来近乎线性的相位变化。一般情况下, 机械旋转控制是实现 PB 相位可重构超表面的有效方式之一。文献 [41] 设计了一款 756 单元机械控制超表面相控阵, 通过现场可编程门阵列 (field programmable

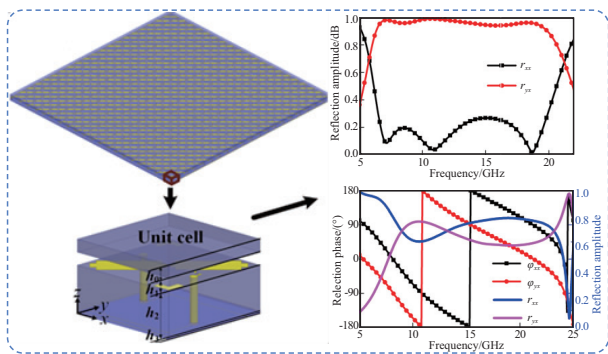


gate array, FPGA)控制微马达驱动器旋转相应的双开口圆环辐射结构,实现了波束扫描功能。

在微波频段,光控方法<sup>[57-59]</sup>因其可远程操作、响应快速等特点被广泛应用。文献[57]将光控技术应用到可重构超表面设计中,以激励光强度代替直流电压控制变容管状态变化,实现了电磁波振幅动态调控。2020年,非接触式光控可重构超表面技术被提出<sup>[58]</sup>。同年,文献[59]基于红外远程光控技术设计了一款可实现远场方向图调控的可重构超表面。



(a)复振幅可重构超表面



(b)极化可重构超表面

图5 幅相可重构超表面

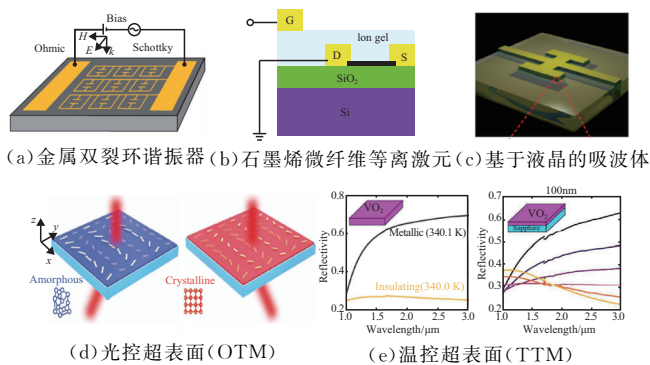
### 1.3.2 太赫兹、可见光频段

在太赫兹、可见光频段,PIN二极管由于频率和尺寸的限制不再适用于可重构超表面设计。而掺杂半导体可作为太赫兹、远红外及可见光频段可调超表面的可选材料<sup>[13, 60]</sup>。文献[13]基于N型砷化镓(GaAs)薄层设计了一种电控金属双裂环谐振器,通过控制金属-半导体界面上的电压,在0.72 THz频段实现了超过50%的可控透射率,如图6(a)所示。此外,金属微流体(microfluidics)也是实现太赫兹超表面可重构的有效方式之一<sup>[40]</sup>。

石墨烯(graphene)的低载流子浓度特性和独特线性带结构使其具有优良的栅极可调能力,这使石墨烯成为实现太赫兹、中红外区等频段可重构功能的重要材料<sup>[39, 61-63]</sup>。2011年,Ju等证明可以通过施加不同电压调整石墨烯微纤维阵列中等离激元的谐振频带<sup>[61]</sup>,如图6(b)所示。此后,从纳米棒到纳米圆盘,再到反孔阵列,许多经典的石墨烯结构<sup>[62-63]</sup>都显现出良好的电可调效应。将液晶(liquid crystals)引入超表面设计中,通过施加外部电场,液

晶可以在太赫兹到可见光<sup>[64-67]</sup>频段范围内实现超表面功能的可调设计,如色彩调谐<sup>[65]</sup>、可调波片<sup>[66]</sup>和空间光调制器<sup>[67]</sup>等。2013年,Padilla团队设计了一种可调吸波体<sup>[64]</sup>,它由带有介质隔离层液晶的电磁超材料组成,如图6(c)所示,在接地平面和谐振器之间施加偏置电压改变液晶层的折射率,从而在2.62 THz处产生30%的振幅调控。

随着半导体技术的进步,越来越多的光敏材料被应用于从太赫兹到可见光频率范围内的光可调超表面(OTM)设计<sup>[42]</sup>,如图6(d)所示。将超表面与热敏材料结合,可以实现热(温度)可调超表面(TTM)设计<sup>[43]</sup>,如图6(e)所示。此外,微机电系统(MEMS)<sup>[68]</sup>和纳米机电系统(NEMS)<sup>[69]</sup>也是一些应用领域实现可重构超表面的方式之一。



(a)金属双裂环谐振器(b)石墨烯微纤维等离激元(c)基于液晶的吸波体

(d)光控超表面(OTM)

(e)温控超表面(TTM)

图6 太赫兹、可见光频段可重构超表面设计

## 2 全息成像技术

全息术(holography)源于希腊语 Holos(整体)和 Grama(信息),原意指记录了光的全部信息。自从1947年英国物理学家 Dennis Gabor 为了提高显微镜分辨率提出全息术以来,学术界对于全息的定义始终没有明确的表述。2021年,美国 MetroLaser 公司的联合创始人 Trolinger 发表了综述文章,从全息术的起源和发展方面,解释了全息术的定义,认为全息术主要分为记录和重建两个过程,利用干涉原理记录并存储任何复波信息,并能够利用衍射原理准确复制和重建原始波的传播过程<sup>[70]</sup>,如图7所示。实际上,全息术最早可以追溯到20世纪40年代,Gabor教授为减少电子显微镜像差提出了X射线全息术<sup>[71]</sup>,如图8所示。1962年,Denisjuk教授首次独立完成了在可见光频段下的全息像<sup>[72]</sup>。之后,Leith和Upatnieks教授利用激光实现了光学全息像<sup>[73]</sup>。受记录媒质的影响,全息像模糊、暗淡的缺点限制了全息术的进一步发展。随着计算机技术的普及和空间光调制器的发展,全息术的干涉记录和衍射重现过程可以用数值计算来代替,即为计算

全息术(computer-generated holograms, CGH)。

计算全息术最早由 Kozma 和 Kelly 教授在 1965 年提出<sup>[74]</sup>。具有代表性的研究是 Lessem 等于 1969 年提出利用胶片上的浮雕图像记录由计算机生成的复杂波前相位<sup>[75]</sup>。1991 年, Fukushima 教授首次利用空间光调制器实现了实时三维全息<sup>[76]</sup>。

《Optical Engineering》于 2001 年报道了利用片上液晶(LCoS)和数字微镜器(DMD)编码计算全息像的研究<sup>[77]</sup>,这些研究拓展了实现全息像的媒质材料。2012 年, Smith 教授课题组最早提出了超材料全息术<sup>[78]</sup>,至此,超材料正式成为实现计算全息像的媒质。

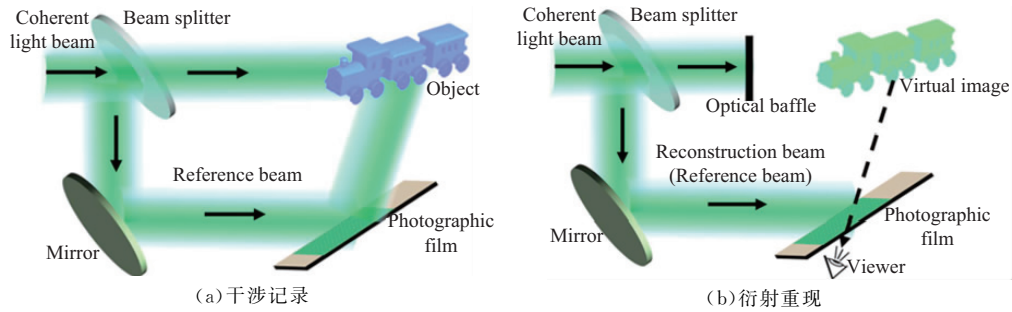


图 7 全息术过程

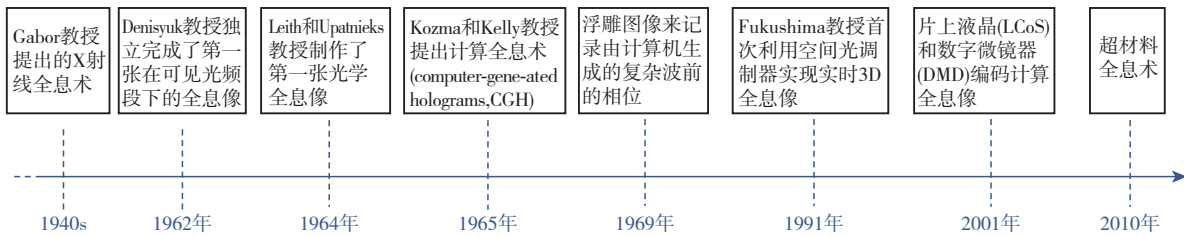


图 8 全息术发展历程

### 2.1 太赫兹、可见光频段超表面全息术

由于高频电磁波具有高分辨率成像的优势,超表面全息术最先的研究集中在可见光、近红外以及太赫兹等频段。根据调制方式的不同,超表面全息术可以分为非复用全息术(纯相位全息术、纯振幅全息术、复振幅全息术等)和复用全息术。

近年来,基于传输或几何相位原理,研究人员提出了大量超表面全息设计方法<sup>[79-81]</sup>。Huang 等基于几何相位原理,提出了一种如图 9(a)所示的超表面全息像设计方法<sup>[79]</sup>,可以在电磁波的反手性极化态下进行相位编码,实现高分辨率、无多级衍射、无孪生像的三维全息重现,但由于材料的欧姆损耗,全息像的衍射效率较低。为了解决这个问题, Zheng 等在 630~1 050 nm 波长范围内,基于几何相位和 Fabry-Pérot 腔结构,设计了一种衍射效率高达 80% 的圆极化超表面全息像<sup>[80]</sup>,如图 9(b)所示,该设计在不依赖复杂制作工艺的条件下显著提高了超表面的衍射效率。此外,文献[81]提出了将传输相位和几何相位结合设计超表面全息像的方法,如图 9(c)所示。

在超表面相位信息不易或不能获取的情况下,作为另一个设计自由度——超表面振幅,也可以用于目标像的重建。如图 10(a)所示,利用垂直排列多壁碳纳米管阵列组成的 1-bit 振幅调制超表面,可以获得低噪声、高分辨率振幅全息像<sup>[82]</sup>。然而,在

振幅全息重建过程中不可避免地会出现孪生图像。为了解决这一问题, Huang 等通过对大量超波长光子衍射场进行分析并使用遗传算法优化,实现了均匀、无伪影、高效率的振幅全息像<sup>[83]</sup>,如图 10(b)所示。

理想情况下,全息像的完全重现需要同时记录目标像的全部信息——相位和振幅,即复振幅全息术<sup>[84-85]</sup>。文献[84]通过设计 V 形纳米天线和 C 形裂环谐振器的对称与反对称谐振模式,实现了具有 2 级振幅和 8 级相位调制的复振幅超表面,可以在可见光范围内生成高分辨率、低噪声全息像,如图 11(a)所示。如图 11(b)所示, X 型超表面单元 2 个臂的独立 PB 相位模式赋予超表面控制可见光振幅和相位的能力,这种独立、连续、宽带的复振幅调制提供了比纯相位全息更高信噪比、更高分辨率的全息像<sup>[85]</sup>。复振幅超表面实现了一些特性,如产生无伪影全息像、控制三维全息表面纹理等。

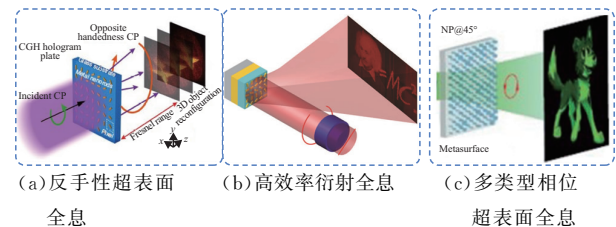
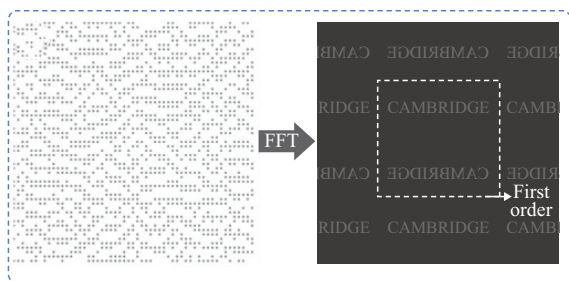
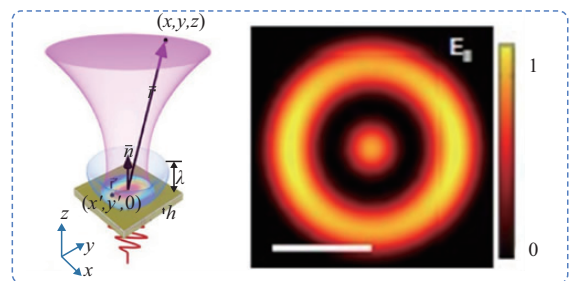


图 9 纯相位全息成像



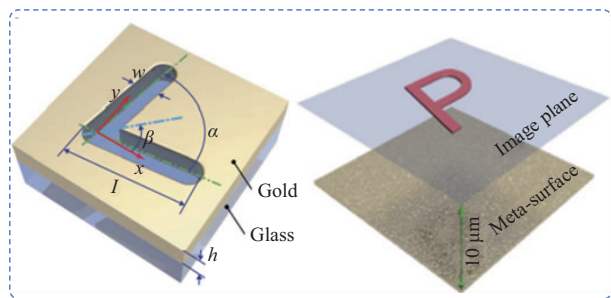


(a) 多壁碳纳米超表面振幅全息

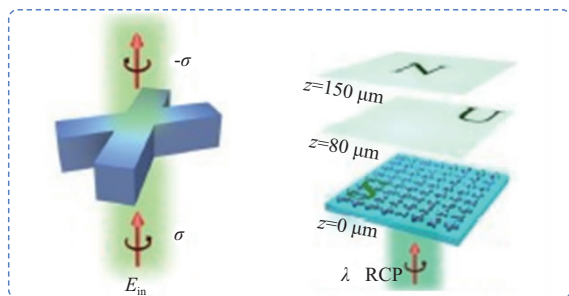


(b) 无伪影超表面振幅全息

图 10 纯振幅全息成像



(a) CSRR 超表面全息



(b) X 形原子超表面全息

图 11 复振幅全息成像

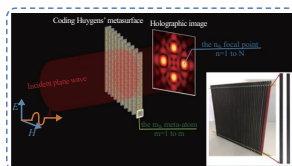
电磁波频率、极化、轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 等特性的多路复用可以明显增加超表面信息容量,提升超表面全息像的空间带宽积。超表面调控电磁波极化状态的灵活性使其在实现极化复用全息术<sup>[86]</sup>上具有较大的优势。在可见光频段,利用同一超表面对不同波长电磁波相位或振幅的调控可以实现频率复用全息<sup>[14]</sup>。用于实现全息成像或波束调控的超表面通常对不同角度入射波具有不同的响应,如果对入射角度加以利用就可以将这一限制作为全息成像多路复用的设计自由度<sup>[87]</sup>。携带轨道角动量 OAM 的涡旋波具有  $e^{jl\varphi}$  螺旋波前分布,其中,  $l$  为拓扑数,  $\varphi$  为方位角。由于

无限拓扑数  $l$  表征的 OAM 模式之间存在正交性, OAM 模式被认为是拥有无限自由度的多路复用方法<sup>[88]</sup>。近年来,为了提高信息容量和安全性,研究者提出了许多在亚波长尺度上同时调控光谱和空间响应的方法,以便在同一种超表面上实现空间多路复用全息<sup>[89]</sup>。此外,基于超表面强大的电磁调控能力,非线性全息<sup>[90]</sup>、数字全息<sup>[91]</sup>等技术也是研究的热点。

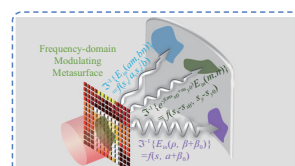
## 2.2 微波段超表面全息术

由于超表面技术的快速发展和低损耗、远距离微波通信技术的日益成熟,微波超表面全息术<sup>[91-97]</sup>越来越受到人们的关注。

文献[91]提出了一种在 10 GHz 处对惠更斯超表面进行编码并实现全息像的方法,通过调整电偶极子和磁偶极子的几何参数,基于加权全息算法得出的超表面全息像如图 12(a)所示。文献[92]基于界面相位分布算法优化超表面的相位分布,超表面的电磁波透过率在 10 GHz 处达到 89%,全息像的成像效率为 59%。此外,文献[93]借助傅里叶变换对超表面进行相位分布调控,在可观测的仰角和方位角范围内进行自旋全息成像,如图 12(b)所示。极化不敏感超表面不仅克服了正交圆极化态之间的反对称响应,避免极化转换损耗,还能在控制手性极化态方面提供更多的自由度。文献[94]设计了一种极化不敏感的多比特编码超表面,在任意极化波激励下,全息成像效率高达 76%,如图 12(c)所示。文献[95]将 Fabry-Pérot 腔与 2-bit 编码超表面相结合,通过使用加权 Gerchberg-Saxton 算法,在 27.7 GHz 处生成了具有多焦点能量分布的全息像,如图 12(d)所示。文献[96]提出了一种可实现任意聚焦模式的超表面,通过设计单元的旋转角,超表面可在 10 GHz 处提供  $360^\circ$  范围的 PB 相位变化,利用全息算法对超表面进行相位编码。此方法拓宽了圆极化波前的操纵方式,适用于整个电磁频谱。文献[97]通过同时控制相位编码超表面的 2 个正交分量场,在 20 GHz 处,利用 L-BFGS-B 算法生成了任意极化模式的空间波,最终实现了具有任意极化态的全息像,如图 12(e)所示。



(a) 惠更斯超表面全息



(b) 傅里叶变换微波超表面全息



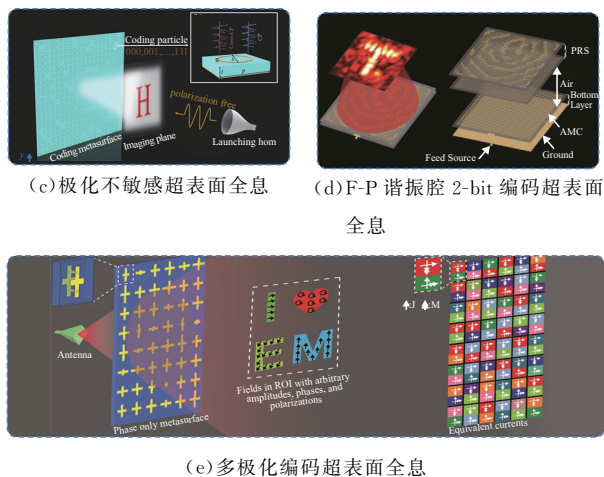


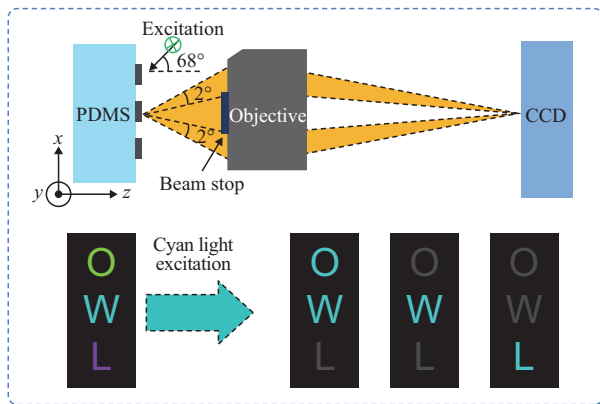
图 12 微波段超表面全息术

### 2.3 可重构超表面全息术

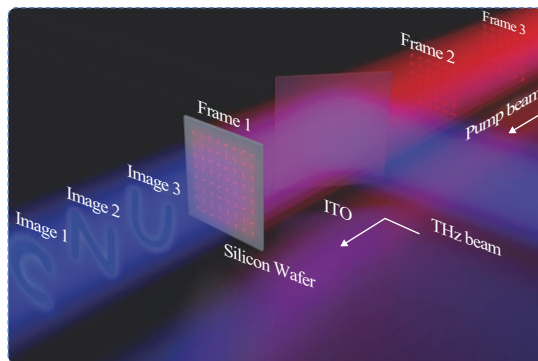
可重构超表面技术在全息成像领域的应用, 加快了动态全息术的发展。如图 13(a)所示, 温控可重构超表面可以实现自旋霍尔效应、涡旋波产生以及动态全息成像等<sup>[98]</sup>。2016 年, Malek 等提出了一种在可拉伸聚二甲基硅氧烷上设计可重构超表面动态全息像的方法<sup>[99]</sup>。此外, 通过化学反应控制镁的流体过程, 镁纳米棒的等离子响应可在开启和关闭之间不断切换, 为动态全息像的生成奠定了技术基础<sup>[100]</sup>。文献[16]通过使用空间光调制器的飞秒激光照射硅薄片形成可调超表面, 通过控制谐振腔中 PB 相位分布调控太赫兹波前, 产生了如图 13(b)所示的字母“C”、“N”和“U”的全息像。

在微波频段, 文献[11]利用全息算法对超表面相位编码排布, 实现了超表面近场全息像的动态切换, 如图 14(a)所示。基于 2.4 GHz Wi-Fi 频谱资源, 文献[17]将加载 PIN 二极管的可重构超表面嵌入到智能电磁感知系统中, 利用集成在同一架构中的 3 种神经网络自适应控制数据流, 将接收到的微波数据转换成了人体全息像, 如图 14(b)所示。实验结果表明: 此系统可以实现对多个不合作源手势特征和生命体征的即时原位全息重现和自适应识别。

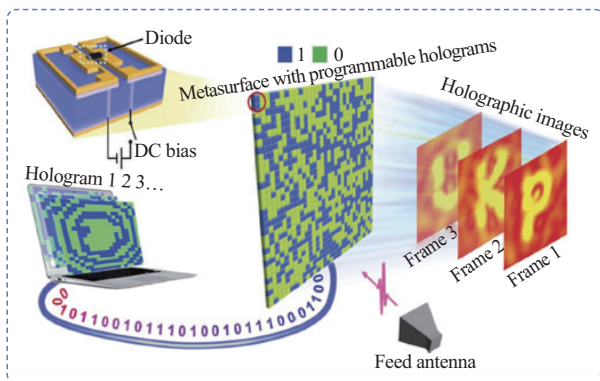
尽管可重构超表面全息术取得了显著的进展, 并展现出广阔的应用前景, 但该领域的研究仍然面临一些挑战。在单元层面, 当前的可重构超表面单元主要集中在单一极化模式下的单一特征量的调控。如果能实现多特征量的同时调控, 将极大提高全息成像性能。在系统层面上, 当前的研究还面临着多通道串扰大、设计复杂度高、成像质量不够理想以及成像系统搭建尚不成熟等问题。



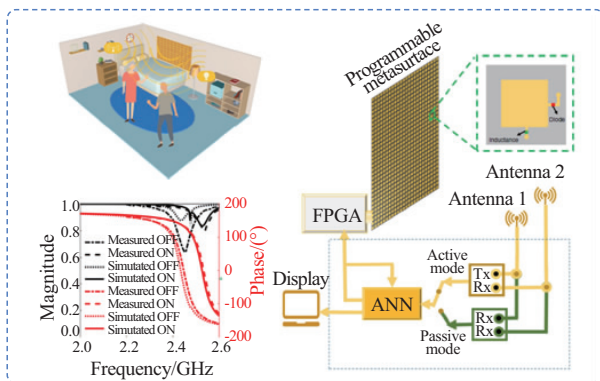
(a) 温控超表面动态全息



(b) 飞秒激光激励超表面动态全息  
图 13 太赫兹可重构超表面全息术



(a) 1-bit 相位可重构超表面全息



(b) 神经网络辅助超表面全息

图 14 微波频段超表面动态全息术

## 3 未来展望

综述电磁超表面发展历程和全息成像应用技术

研究进展可以看出,超表面全息技术正处于向可重构动态全息发展的重要阶段,其未来研究内容主要涉及以下 3 个层次:

1)高性能可重构超表面单元设计。目前,超表面的可重构功能已经可以实现,但如何获取宽带、低损耗、高精度、多维度独立调控等高性能仍然较为困难。从相位可重构单元来看,超表面振幅损耗成为制约其效率提升的关键因素之一。因此,如何在宽带范围内降低超表面的振幅损耗、提升相位线性度和稳定性是目前亟需解决的问题之一。从超表面性能的拓展角度看,目前可重构超表面技术仍然集中在单一极化模式下的单一特征量调控,双极化独立相位调控、复振幅可重构调控等的研究势在必行,如何减小多特征量之间的耦合、实现不同特征量的独立控制则成为可重构超表面设计的关键。从超表面的应用角度看,相较于反射型超表面,透射型可重构超表面易与作战平台结合,将大幅度提升作战装备的性能。透射型超表面与可调电子器件的结合方式、偏置线路的布置方式、以及超表面的剖面高度都是制约透射型可重构超表面发展的限制因素。

2)超表面阵列全息模式研究。全息模式可以实现对目标像的精确重构,其原理是通过超表面的幅相综合调控控制超表面近场电磁能量分布和远场方向图。超表面复用全息术的发展虽然使得信息容量不断增大,但复用技术实现的信息通道数量是有限的,随之而来的问题是通道间串扰大、超表面设计难度大。以超表面设计为例,其难度主要在于超表面结构的高度复杂性和对设计精度的要求,除了可以使用目前已经采用的传统全局优化算法,机器学习等智能优化算法也可以用来实现超表面更高效的设计和 optimization。此外,未来的研究方向还包括开发新的复用技术、采用高维信号处理以及利用新的信息编码方式等,以增加信息容量。

3)基于可重构超表面全息技术的多学科系统交叉应用。如今,电磁超表面已经展现出在系统级应用中的巨大潜力。就微波频段超表面成像技术的发展而言,目前大多数研究仅停留在样件功能性效果的验证层面,成像系统搭建尚不成熟、获得的成像指标距离实际应用还有一定差距,需要进一步研究和开发适用于实际应用的全息系统。这样的系统不仅需要具备先进的电磁感知能力,还需要能够进行高效的无线通信,同时需能够与各种不同的技术和系统进行无缝集成。另外,探索更多可重构超表面全息技术的应用场景,并开发对应的系统架构也将是下一步努力的方向。总之,未来的研究需要将微波技术与 6G 通信技术、半导体物理、射频工程、材料

技术等结合,构建智能电磁感知、RIS 通信等更多、应用领域更广泛的先进系统。

#### 参考文献

- [1] VESELAGO V G. Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [J]. *Physics-Uspekhi*, 1968, 10(4):509-514.
- [2] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, et al. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures [J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(25): 4773-4776.
- [3] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [4] PENDRY J B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [5] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [6] 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.
- [7] LANDY N I, SAJUJIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect Metamaterial Absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [8] SARRAZIN J, LEPAGE A C, BEGAUD X. Dual-Band Artificial Magnetic Conductor [J]. *Applied Physics A*, 2012, 109(4): 1075-1080.
- [9] JIA Y T, LIU Y, ZHANG W B, et al. Ultra-Wideband and High-Efficiency Polarization Rotator Based on Metasurface [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(5): 051901.
- [10] YANG H H, YANG F, XU S H, et al. A 1-Bit  $10 \times 10$  Reconfigurable Reflectarray Antenna: Design, Optimization, and Experiment [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(6): 2246-2254.
- [11] LI L L, TIE J C, JI W, et al. Electromagnetic Re-programmable Coding-Metasurface Holograms [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 197.
- [12] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding Metamaterials, Digital Metamaterials and Programmable Metamaterials [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.
- [13] CHEN H T, PADILLA W J, ZIDE J M O, et al. Active Terahertz Metamaterial Devices [J]. *Nature*, 2006, 444: 597-600.
- [14] HUANG Y W, CHEN W T, TSAI W Y, et al. Aluminum Plasmonic Multicolor Meta-Hologram [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5): 3122-3127.
- [15] YANG H H, YANG F, CAO X Y, et al. A 1600-

- Element Dual-Frequency Electronically Reconfigurable Reflectarray at X/Ku-Band [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(6): 3024-3032.
- [16] GUO J Y, WANG T, ZHAO H, et al. Reconfigurable Terahertz Metasurface Pure Phase Holograms [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(10): 1801696.
- [17] LI L L, SHUANG Y, MA Q, et al. Intelligent Metasurface Imager and Recognizer [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 97.
- [18] SMITH D R, VIER D C, KOSCHNY T, et al. Electromagnetic Parameter Retrieval from Inhomogeneous Metamaterials [J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, 71(3): 036617.
- [19] LEONHARDT U. Optical Conformal Mapping [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1777-1780.
- [20] PENDRY J B, SCHURIG D, SMITH D R. Controlling Electromagnetic Fields [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [21] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [22] LIU R, JI C, MOCK J J, et al. Broadband Ground-Plane Cloak [J]. *Science*, 2009, 323(5912): 366-369.
- [23] CHENG Q, CUI T J, JIANG W X, et al. An Omnidirectional Electromagnetic Absorber Made of Metamaterials [J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(6): 063006.
- [24] MA H F, CUI T J. Three-Dimensional Broadband Ground-Plane Cloak Made of Metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 21.
- [25] KWAN A, DUDLEY J, LANTZ E. Who Really Discovered Snell's Law? [J]. *Physics World*, 2002, 15(4): 64.
- [26] HUYGENS C. *Traité de la Lumière* [M]. Leipzig: Gressner & Schramm, 1885.
- [27] SUN S L, HE Q, XIAO S Y, et al. Gradient-Index Meta-Surfaces as a Bridge Linking Propagating Waves and Surface Waves [J]. *Nature Materials*, 2012, 11: 426-431.
- [28] PFEIFFER C, GRBIC A. Metamaterial Huygens' Surfaces: Tailoring Wave Fronts with Reflectionless Sheets [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(19): 197401.
- [29] SIEVENPIPER D, ZHANG L J, BROAS R F J, et al. High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2059-2074.
- [30] FERESIDIS A P, GOUSSETIS G, WANG S H, et al. Artificial Magnetic Conductor Surfaces and Their Application to Low-Profile High-Gain Planar Antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(1): 209-215.
- [31] HUANG L L, CHEN X Z, BAI B F, et al. Helicity Dependent Directional Surface Plasmon Polariton Excitation Using a Metasurface with Interfacial Phase Discontinuity [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(3): e70.
- [32] DELLA GIOVAMPAOLA C, ENGHETA N. Digital Metamaterials [J]. *Nature Materials*, 2014, 13: 1115-1121.
- [33] TANG W K, CHEN M Z, CHEN X Y, et al. Wireless Communications with Reconfigurable Intelligent Surface: Path Loss Modeling and Experimental Measurement [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(1): 421-439.
- [34] LI H, LI Y B, SHEN J L, et al. Low-Profile Electromagnetic Holography by Using Coding Fabry-Perot Type Metasurface with In-Plane Feeding [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(9): 1902057.
- [35] QIU T S, SHI X, WANG J F, et al. Deep Learning: A Rapid and Efficient Route to Automatic Metasurface Design [J]. *Advanced Science*, 2019, 6(12): 1900128.
- [36] YUAN X J, ZHANG Y J A, SHI Y M, et al. Reconfigurable-Intelligent-Surface Empowered Wireless Communications: Challenges and Opportunities [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(2): 136-143.
- [37] 杨帆, 许慎恒, 刘骁, 等. 基于界面电磁学的新型相控阵天线 [J]. *电波科学学报*, 2018, 33(3): 256-265.
- [38] ZHAO J, CHENG Q, CHEN J, et al. A Tunable Metamaterial Absorber Using Varactor Diodes [J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(4): 043049.
- [39] BONACCORSO F, SUN Z, HASAN T, et al. Graphene Photonics and Optoelectronics [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4: 611-622.
- [40] SUN S, YANG W H, ZHANG C, et al. Real-Time Tunable Colors from Microfluidic Reconfigurable All-Dielectric Metasurfaces [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(3): 2151-2159.
- [41] BODEHOU M, MARTINI E, MACI S, et al. Multibeam and Beam Scanning with Modulated Metasurfaces [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1273-1281.
- [42] 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.
- [43] BUTAKOV N A, VALMIANSKI I, LEWIS T, et al. Switchable Plasmonic-Dielectric Resonators with Metal-Insulator Transitions [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(2): 371-377.
- [44] LI Y, LIN J, GUO H J, et al. A Tunable Metasurface with Switchable Functionalities: From Perfect Transparency to Perfect Absorption [J]. *Advanced*



- Optical Materials, 2020, 8(6): 1901548.
- [45] TIAN J, CAO X Y, GAO J, et al. Design of a Low Loss and Broadband Active Element of Reconfigurable Reflectarray Antennas [J]. Optical Materials Express, 2019, 9(10): 4104.
- [46] ZHOU S G, ZHAO G, XU H, et al. A Wideband 1-Bit Reconfigurable Reflectarray Antenna at Ku-Band [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(3): 566-570.
- [47] HAN J Q, LI L, MA X J, et al. Adaptively Smart Wireless Power Transfer Using 2-Bit Programmable Metasurface [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(8): 8524-8534.
- [48] ZHANG L, WANG Z X, SHAO R W, et al. Dynamically Realizing Arbitrary Multi-Bit Programmable Phases Using a 2-Bit Time-Domain Coding Metasurface [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(4): 2984-2992.
- [49] CLEMENTE A, DUSSOPT L, SAULEAU R, et al. 1-Bit Reconfigurable Unit Cell Based on PIN Diodes for Transmit-Array Applications in X-Band [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(5): 2260-2269.
- [50] CLEMENTE A, DIABY F, DI PALMA L, et al. Experimental Validation of a 2-Bit Reconfigurable Unit-Cell for Transmitarrays at Ka-Band [J]. IEEE Access, 2020, 8: 114991-114997.
- [51] HUANG C, PAN W B, MA X L, et al. 1-Bit Reconfigurable Circularly Polarized Transmitarray in X-Band [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 1809, 15: 448-451.
- [52] ZHANG L, CHEN X Q, LIU S, et al. Space-Time-Coding Digital Metasurfaces [J]. Nature Communications, 2018, 9: 4334.
- [53] LIAO J M, GUO S J, YUAN L M, et al. Independent Manipulation of Reflection Amplitude and Phase by a Single-Layer Reconfigurable Metasurface [J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(4): 2101551.
- [54] TIAN J H, CAO X Y, GAO J, et al. A Reconfigurable Ultra-Wideband Polarization Converter Based on Metasurface Incorporated with PIN Diodes [J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(13): 135105.
- [55] LI H Y, CAO Q S, LIU L L, et al. An Improved Multifunctional Active Frequency Selective Surface [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(4): 1854-1862.
- [56] LIU G Y, LIU H X, HAN J Q, et al. Reconfigurable Metasurface with Polarization-Independent Manipulation for Reflection and Transmission Wavefronts [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2020, 53(4): 045107.
- [57] ZHANG X G, JIANG W X, CUI T J. Frequency-Dependent Transmission-Type Digital Coding Metasurface Controlled by Light Intensity [J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(9): 091601.
- [58] ZHANG X G, JIANG W X, JIANG H L, et al. An Optically Driven Digital Metasurface for Programming Electromagnetic Functions [J]. Nature Electronics, 2020, 3: 165-171.
- [59] SUN Y L, ZHANG X G, YU Q, et al. Infrared-Controlled Programmable Metasurface [J]. Science Bulletin, 2020, 65(11): 883-888.
- [60] CHEN H T, PADILLA W J, CICH M J, et al. A Metamaterial Solid-State Terahertz Phase Modulator [J]. Nature Photonics, 2009, 3: 148-151.
- [61] JU L, GENG B S, HORNG J, et al. Graphene Plasmonics for Tunable Terahertz Metamaterials [J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6: 630-634.
- [62] BRAR V W, JANG M S, SHERROTT M, et al. Highly Confined Tunable Mid-Infrared Plasmonics in Graphene Nanoresonators [J]. Nano Letters, 2013, 13(6): 2541-2547.
- [63] FANG Z Y, WANG Y M, SCHLATHER A E, et al. Active Tunable Absorption Enhancement with Graphene Nanodisk Arrays [J]. Nano Letters, 2014, 14(1): 299-304.
- [64] SHREKENHAMER D, CHEN W C, PADILLA W J. Liquid Crystal Tunable Metamaterial Absorber [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(17): 177403.
- [65] FRANKLIN D, CHEN Y, VAZQUEZ-GUARDADO A, et al. Polarization-Independent Actively Tunable Colour Generation on Imprinted Plasmonic Surfaces [J]. Nature Communications, 2015, 6: 7337.
- [66] HSIEH C F, PAN R P, TANG T T, et al. Voltage-Controlled Liquid-Crystal Terahertz Phase Shifter and Quarter-Wave Plate [J]. Optics Letters, 2006, 31(8): 1112-1114.
- [67] SAVO S, SHREKENHAMER D, PADILLA W J. Liquid Crystal Metamaterial Absorber Spatial Light Modulator for THz Applications [J]. Advanced Optical Materials, 2014, 2(3): 275-279.
- [68] CONG L Q, PITCHAPPA P, LEE C K, et al. Active Phase Transition via Loss Engineering in a Terahertz MEMS Metamaterial [J]. Advanced Materials, 2017, 29(26): 1700733.
- [69] ZHU W M, LIU A Q, ZHANG X M, et al. Switchable Magnetic Metamaterials Using Micromachining Processes [J]. Advanced Materials, 2011, 23(15): 1792-1796.
- [70] TROLINGER J D. The Language of Holography [J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(4): 1.
- [71] GABOR D. A New Microscopic Principle [J]. Nature, 1948, 161: 777-778.
- [72] DENISYUK Y N. On the Reflection of Optical Properties of an Object in a Wave Field of Light Scattered by It [J]. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1962, 144(6): 1275-1282.
- [73] LEITH E N, UPATNIEKS J. Wavefront Recon-

- struction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1964, 54(11): 1295.
- [74] KOZMA A, KELLY D L. Spatial Filtering for Detection of Signals Submerged in Noise [J]. *Applied Optics*, 1965, 4(4): 387-392.
- [75] LESEM L B, HIRSCH P M, JORDAN J A. The Kinoform: A New Wavefront Reconstruction Device [J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1969, 13(2): 150-155.
- [76] FUKUSHIMA S, KUROKAWA T, OHNO M. Real-Time Hologram Construction and Reconstruction Using a High-Resolution Spatial Light Modulator [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 58(8): 787-789.
- [77] KREIS T M, ASWENDT P, HOEFLING R. Hologram Reconstruction Using a Digital Micromirror Device [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(6): 926-933.
- [78] LAROUCHE S, TSAI Y J, TYLER T, et al. Infrared Metamaterial Phase Holograms [J]. *Nature Materials*, 2012, 11: 450-454.
- [79] HUANG L L, CHEN X Z, MÜHLENBERND H, et al. Three-Dimensional Optical Holography Using a Plasmonic Metasurface [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [80] ZHENG G X, MÜHLENBERND H, KENNEY M, et al. Metasurface Holograms Reaching 80% Efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10: 308-312.
- [81] MUELLER J P B, RUBIN N A, DEVLIN R C, et al. Metasurface Polarization Optics: Independent Phase Control of Arbitrary Orthogonal States of Polarization [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(11): 113901.
- [82] BUTT H, MONTELONGO Y, BUTLER T, et al. Carbon Nanotube Based High Resolution Holograms [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(44): 331-336.
- [83] HUANG K, LIU H, GARCIA-VIDAL F J, et al. Ultrahigh-Capacity Non-Periodic Photon Sieves Operating in Visible Light [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7059.
- [84] NI X J, KILDISHEV A V, SHALAEV V M. Metasurface Holograms for Visible Light [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2807.
- [85] LEE G Y, YOON G, LEE S Y, et al. Complete Amplitude and Phase Control of Light Using Broadband Holographic Metasurfaces [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(9): 4237-4245.
- [86] ZHAO R Z, SAIN B, WEI Q S, et al. Multichannel Vectorial Holographic Display and Encryption [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 95.
- [87] KAMALI S M, ARBABI E, ARBABI A, et al. Angle-Multiplexed Metasurfaces: Encoding Independent Wavefronts in a Single Metasurface under Different Illumination Angles [J]. *Physical Review X*, 2017, 7(4): 041056.
- [88] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, et al. Terabit Free-Space Data Transmission Employing Orbital Angular Momentum Multiplexing [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 488-496.
- [89] BAO Y J, YU Y, XU H F, et al. Full-Colour Nano-print-Hologram Synchronous Metasurface with Arbitrary Hue-Saturation-Brightness Control [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 95.
- [90] SCHLICKRIEDE C, KRUK S S, WANG L, et al. Nonlinear Imaging with All-Dielectric Metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(6): 4370-4376.
- [91] GUAN C S, WANG Z C, DING X M, et al. Coding Huygens' Metasurface for Enhanced Quality Holographic Imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7108-7119.
- [92] WANG Z C, DING X M, ZHANG K, et al. Huygens Metasurface Holograms with the Modulation of Focal Energy Distribution [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(12): 1800121.
- [93] DING X M, WANG Z C, HU G W, et al. Metasurface Holographic Image Projection Based on Mathematical Properties of Fourier Transform [J]. *Photonix*, 2020, 1(1): 16.
- [94] GUAN C S, DING X M, WANG Z C, et al. Helicity-Switched Hologram Utilizing a Polarization-Free Multi-Bit Coding Metasurface [J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 22669-22678.
- [95] LI H, LI Y B, SHEN J L, et al. Low-Profile Electromagnetic Holography by Using Coding Fabry-Perot Type Metasurface with In-Plane Feeding [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(9): 1902057.
- [96] WANG Y, GUAN C S, DING X M, et al. Multifocus Hologram Utilizing Pancharatnam-Berry Phase Elements Based Metamirror [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(9): 2189-2192.
- [97] WU J W, WANG Z X, FANG Z Q, et al. Full-State Synthesis of Electromagnetic Fields Using High Efficiency Phase-Only Metasurfaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(39): 2004144.
- [98] TSENG M L, YANG J, SEMMLINGER M, et al. Two-Dimensional Active Tuning of an Aluminum Plasmonic Array for Full-Spectrum Response [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6034-6039.
- [99] KAMALI S M, ARBABI E, ARBABI A, et al. Highly Tunable Elastic Dielectric Metasurface Lenses [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 1062.
- [100] EE H S, AGARWAL R. Tunable Metasurface and Flat Optical Zoom Lens on a Stretchable Substrate [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2818-2823.

(编辑:徐楠楠)