

激光与光电子学进展

动态超构表面设计及功能器件

汪国崔^{1,2}, 胡滨², 张岩^{1*}

¹首都师范大学物理系, 北京市超材料与器件重点实验室, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京市成像理论与技术创新中心, 北京 100048;

²北京理工大学光电学院, 混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081

摘要 动态超构表面是将可调元素集成到静态超构原子中,且功能受不同外部激励手段控制的超构表面。基于动态超构表面已经实现了各种可调器件,包括变频滤波器、吸收器、变焦透镜、动态光束控制器、动态全息元件等。首先对动态超构表面的调制方法进行系统的总结,然后对相关的研究工作进行综述。动态超构表面可以分为两类:一类是对所有超构原子进行统一控制的均匀调控动态超构表面,用于实现光谱、偏振和波前的动态转换;另一类是通过对超构原子进行独立控制的动态可重构/可编程超构表面,用于实现对波前的灵活调控。功能灵活可控的动态器件是超构表面未来研究的主要方向,对已有的动态器件进行了总结,并进一步讨论和展望了动态超构表面发展的方向及面临的挑战。

关键词 材料; 动态超构表面; 编码; 可重构; 全息; 实时成像; 光通信

中图分类号 0436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0900001

Dynamic Metasurface Design and Functional Devices

Wang Guocui^{1,2}, Hu Bin², Zhang Yan^{1*}

¹Department of Physics, Beijing Key Laboratory for Metamaterials and Devices, Key Laboratory for Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

²School of Optics and Photonics, Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract A dynamic metasurface is a metasurface in which adjustable elements are integrated into static metaatoms and whose functions are controlled by different external excitation methods. Various adjustable devices have been realized based on dynamic metasurfaces, including frequency conversion filters or absorbers, zoom lenses, dynamic beam controllers, dynamic holographic elements, etc. In this review, first, the modulation method of dynamic metasurfaces is summarized systematically, and then the related research work is reviewed. Dynamic metasurfaces can be divided into two categories: one is a uniformly regulated dynamic metasurface that controls all metaatoms uniformly, and is used to achieve dynamic conversion of spectrum, polarization, and wavefront; the other is a dynamically reconfigurable/programmable metasurface with individually controlled metaatoms, and is used to realize flexible control of the wavefront. Dynamic devices with flexible and controllable functions are the main direction of future research on metasurfaces. The existing dynamic devices are summarized, and the development direction and challenges of dynamic metasurfaces are further discussed and prospected.

Key words materials; dynamic metasurfaces; coding; re-configuration; hologram; real-time imaging; optical communication

OCIS codes 160.3918; 090.2890; 110.6915

收稿日期: 2020-07-16; 修回日期: 2020-09-14; 录用日期: 2020-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(11474206, 11404224, 1174243, 11774246)、北京市百千万人才计划(2018A19)

*E-mail: yzhang@cnu.edu.cn

1 引言

超构表面是超构材料的二维形式。超构材料 (metamaterial) 是由人工微结构制成的三维阵列, 通过对特定结构的几何形状设计和排序, 能够实现任意的介电常数和磁导率值, 从而可以对电磁波进行全方位操控。Pendry 等^[1]在 1996 年提出了金属棒状结构阵列以实现负介电常数, 超构材料由此被提出。2000 年, Walser^[2]进一步扩展了超构材料的定义, 基于超构材料实现了很多新奇的物理现象和功能, 例如负折射^[3-5]、隐身斗篷^[6-8]、完美吸收^[9-11]等。然而, 超构材料器件的结构复杂, 体积大, 不方便加工, 不利于器件集成和系统微型化。此外, 超构材料还具有工作带宽窄、效率低的缺点。在此背景下, 超构表面被提出^[12]。超构表面是由亚波长天线按特定顺序排列构成的超薄平面, 可以实现对电磁波波前的振幅、相位以及偏振态的调控。超构表面采用天线与电磁波相互作用时在界面处发生等离子体共振伴随的相位突变进行调制。相比于超构材料, 超构表面的优势在于器件厚度不依赖于工作波长而能被减小至几百纳米。由于器件厚度的减小, 电磁波在结构内的时间显著缩短, 器件损耗随之减小。超构表面一提出, 就得到了多个研究领域的关注。一系列基于超构表面的电磁波调控器件被相继提出, 例如光的异常折反射器件^[13-14]、表面波耦合器^[15-17]、光束聚焦透镜^[18-20]、特殊光束生成器^[21-23]及超构表面全息元件^[24-26]等。但是, 以上所有器件均为静态器件, 即器件一经制备, 其功能就被固化了。而实际应用中, 更多情况下需要对电磁波进行动态调控, 例如雷达探测中需要实时改变辐射波的方向、光通信中对信号的动态调制, 以及成像显示中画面的实时切换等。考虑到器件灵活多变的应用需求, 动态超构表面的概念被提出。动态超构表面是将半导体、相变材料、二维材料等可调元素集成到超构原子中, 并借助电、光、热、机械等外部激励对器件功能进行动态控制的超构表面。截至目前, 已经有很多关于动态超构表面的研究工作和进展报道^[27-34]。

设计动态超构表面器件的两个关键问题是如何实现动态调制以及实现什么样的功能, 本文对实现动态超构表面的外激励方式进行分类并阐述相应的调制机理, 特别是对太赫兹波段的动态超构表面器件进行总结。本文内容分为四部分, 引言部分对超构表面的研究发展历史和相关概念进行介绍; 第二

部分介绍了动态超构表面的调控机理, 根据调控手段的不同, 依次介绍电调控、光调控、温度调控、机械调控、磁调控和化学调控对应的调制机理; 第三部分介绍了动态超构表面功能器件, 首先介绍均匀调控 (包括光谱调控、偏振调控和波前调控) 的动态超构表面, 其次介绍超构原子能够被独立控制的动态可重构/可编码超构表面; 第四部分为总结和展望部分, 即对本论文内容进行概括总结, 并对动态超构表面在未来的发展及面临的挑战进行展望。

2 动态超构表面的调制机理

将性质受外部激励影响的材料集成到静态的超构表面中, 通过合适的外部激励, 即可实现动态超构表面。根据采用的外激励的不同, 本节中将通过电调控、光调控、温度调控、机械调控、磁调控和化学调控几个方面分类介绍动态超构表面的设计及调制机理。

2.1 电调控法

电调控是将电灵敏材料集成到超构原子中, 采用外加电压的方式对超构表面的性能进行动态控制。常用的电灵敏材料有二极管、液晶、二维材料、半导体以及氧化锡铟 (ITO) 透明导电材料。基于不同材料的动态超构表面的调制机理不尽相同, 下面将对基于每一类材料的动态超构表面的实现方法及调制机理进行介绍。

1) 二极管作为可调元素。二极管是由半导体材料制成的电子器件, 在动态超构表面制备中一般被集成到相邻超构原子之间或超构原子开口处。根据等效电路模型, 每个超构原子是一个 LC 谐振器, 其中 L 为电感, C 是由超构原子结构开口或者相邻原子间隙引入的等效电容。在超构原子间或开口处集成二极管, 通过电压调控二极管的电容, 以改变超构表面的电磁响应特性, 从而实现各种动态调控器件。例如, Zhao 等^[35]将变容二极管集成到相邻的金属谐振环之间, 在外加电压调控下实现了一个频率可调吸收器, 如图 1(a) 所示, 二极管两端通过两根金属线连接到结构背面的可寻址模块, 该模块为二极管提供偏置电压, 当偏置电压从 0 V 变化至 19 V 时, 器件吸收光谱中的吸收峰从 5.85 GHz 附近移动到了 4.35 GHz 附近, 实现了一个频率可调吸收器。2016 年, Xu 等^[36]将 PN 结二极管集成到超构原子中, 利用电压调控实现了偏振转换器件。在外部电压作用下, 二极管在“开”与“关”两种状态下切换, 超构原子的电磁共振响应也在两种不同状态间切换, 实现对圆偏振光旋向的

调控。基于相似的原理, Mao 等^[37]提出了一个功能及调节维度更丰富的偏振调控器件, 利用该器件不仅实现了圆偏振手性操控, 还实现了不同偏振态的转化及工作模式在透射和反射之间的切换。

2) 液晶作为可调元素。由于二极管的尺寸较大, 上面的调控方法适用于微波。而在高频波段, 一般采用半导体、二维材料、液晶和透明导电薄膜作为可调元素。液晶由细长的液晶分子构成, 其分子方向受外加电压控制。在液晶分子方向被外加电压调控的过程中, 给定方向上的折射率会发生改变。在动态超构表面器件制备中, 液晶一般覆盖到超构原子阵列上, 使超构原子被包裹在液晶中, 在电压作用下, 随着液晶折射率的变化, 超构原子周围的光学环境被改变, 从而实现对超构表面电磁响应特性的动态调控。2019年, Li 等^[38]制备了基于液晶的动态超构表面, 实现了像素小至 1 mm、视场角为 22° 的空间光调制器。

3) 半导体材料作为可调元素。基于半导体材料的电控动态超构表面的调制核心是通过外加电压控制载流子浓度、实现动态调控。下面介绍三类基于半导体的动态超构表面构型, 即肖特基二极管^[39]、量子阱结构^[40-41]和场效应管中的二维电子气(2DEG)结构^[42-44]。2006年, Chen 等^[39]提出了一个基于肖特基二极管的太赫兹动态超构表面, 如图 1(b)所示, 金属开口环制备在 n 掺杂的砷化镓(n-GaAs)基底上, 金属和 n-GaAs 界面处就构成了肖特基二极管结构。在没有外加反向偏置电压时, 基底中因高掺杂引入的自由载流子具有导电特性, 会影响金属环开口处的电容响应, 从而关闭结构的共振特性, 因此器件没有呈现出与电谐振相关的共振特性。而给器件施加一个反向偏置电压后, 在静电场作用下基底中位于谐振器开口处的载流子被驱散, 从而在 0.72 THz 和 1.65 THz 处出现了明显的共振峰。从等效电路模型的角度出发, 由于 GaAs 基底被高掺杂, 基底中载流子对入射波有损耗, 如图 1(b)所示, 这相当于在电容的两端又并联了一个可变电阻器。通过反向偏置电压控制该电阻的阻值, 进而控制整个谐振结构的电磁共振特性。基于半导体实现动态超构表面的方法是在超构表面中集成量子阱结构。量子阱结构是两种半导体材料按三明治样式生长成的结构, 通过电压可以控制量子阱结构中的子带间跃迁。将量子阱结构集成到超构表面中, 通过控制量子阱子带间跃迁, 实现对超构表面电磁共振响应的动态调控。

2018年, Sarma 等^[41]基于该结构类型实现了对超构表面光学性质的动态调制, 如图 1(c)所示, 在掺杂半导体基底与超构表面之间插入量子阱结构, 并在超构表面和基底之间施加电压。当外加电压为 0 V 时, 量子阱结构中缺乏自由电子, 其子带跃迁被关闭, 整个器件的共振特性仅由超构表面决定, 施加一定的电压之后, 大量的电子被注入到量子阱中, 其子带跃迁被开启并与超构表面发生耦合, 此时整个器件的光学响应由量子阱子带间跃迁及超构表面共同决定, 从而控制整个器件的光学特性。二维电子气(2DEG)是用量子限制等物理方法使电子群在一个方向上的运动被局限而在另外两个方向上可以自由运动, 并具有高载流子迁移率的结构, 常被用于实现器件的高速率调制。2018年, Zhang 等^[42]提出了基于 2DEG 构型的动态超构表面, 实现了对太赫兹波大范围的相位调制。如图 1(d)所示, 将一个基于 GaN 的高电子迁移率场效应管集成到超构原子开口处, 场效应管异质结由 AlGaIn 壁垒层、未掺杂 GaN 层和 GaN 缓冲层三部分构成, 其中在 AlGaIn 壁垒层和未掺杂 GaN 层之间形成了具有高载流子浓度和高迁移率的 2DEG, 通过电调控 2DEG 的载流子分布调制超构表面的共振特性, 最终得到了约 138° 的相位调制。以上是基于半导体实现动态超构表面的三种方法, 其调制本质都是通过外置电压对半导体中的载流子进行控制, 从而实现超构表面共振特性的动态调控, 但具体的实现过程却不同。肖特基二极管结构由外置反向电压提供的静电场对超构原子开口的载流子进行驱散, 而在量子阱结构中是通过电压控制其子带间的电子跃迁, 进而实现载流子浓度的控制, 在 2DEG 中则主要通过电压控制其中的载流子分布, 使超构原子的共振在不同的模式之间进行转化。三种方法各具优点, 肖特基二极管构型和量子阱构型的结构简单、容易制备, 而场效应管具有高载流子迁移率的特性, 可用于实现超快调制。

4) 石墨烯作为可调元素。石墨烯是一种仅有单原子厚度的二维材料, 其具有费米能级受电压调控的特性, 也是一种常用于制备电控超构表面器件的材料。基于石墨烯的动态超构表面有两种形式, 一种为直接由石墨烯制备的超构原子, 通过外加电压进行动态调控^[45-47]。2014年, Fang 等^[46]设计了一个基于石墨烯纳米盘的超构表面, 通过外加电压调制石墨烯的费米能级, 实现对器件共

振频率及吸收强度的动态调控。但电磁波与单层石墨烯之间的相互作用很弱,该类器件的效率一般很低。因此研究人员更多采用第二种结构类型,即将石墨烯耦合到静态超构原子中。超构原子可对入射光进行局域化,加强光与石墨烯的相互作用,采用外加电压调控石墨烯的费米能级,以

实现高效率的动态调控器件^[48-50]。2015年,Liu等^[50]将石墨烯和静态超构表面相耦合,实现了高调制效率的复合超构材料。如图1(e)所示,将石墨烯的纳米带集成到C型狭缝结构开口处,通过电调控实现了深度为60%的调制,且调制速率达到了40 MHz。

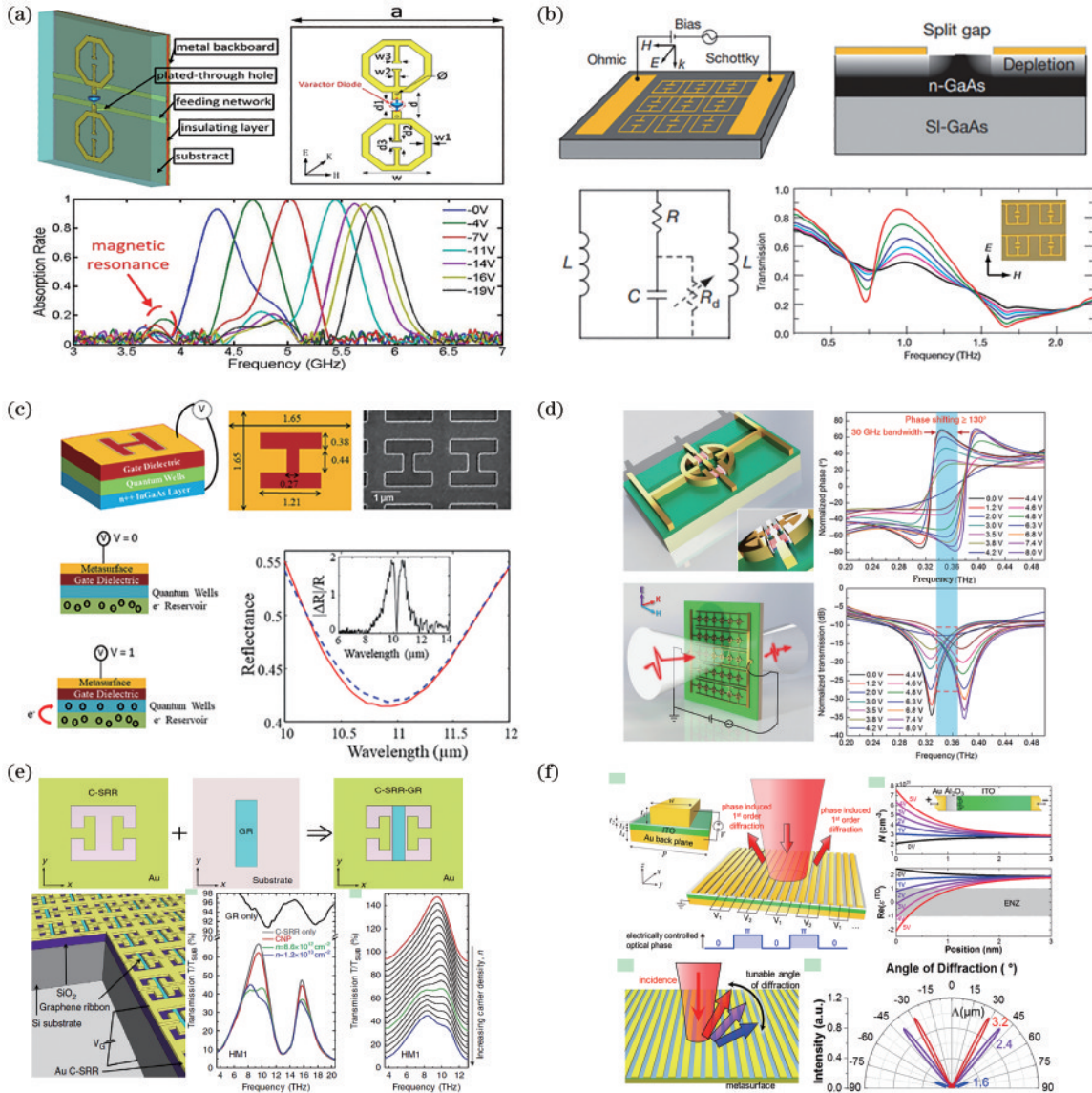


图1 基于不同电灵敏材料的电调控超构表面设计。(a)将变容二极管嵌入到超构原子之间^[35]; (b)基于超构原子制备在砷化镓基底上构成肖特基二极管结构^[39]; (c)将半导体量子阱结构嵌入到超构原子底层^[41]; (d)将二维电子气集成到超构原子开口处^[42]; (e)将石墨烯材料集成到超构原子开口处^[50]; (f)将ITO透明导电薄膜嵌入到超构原子底层^[51]

Fig. 1 Designs of electrically controlled metasurfaces based on different electrically sensitive materials. (a) Varactors are integrated into metaatoms^[35]; (b) Schottky diode structure is formed by fabricating metaatom arrays on gallium arsenide substrate^[39]; (c) semiconductor quantum well structure is inserted into bottom of metaatom arrays^[41]; (d) two-dimensional electron gas is integrated into gap of metaatoms^[42]; (e) graphene is inserted into gap of metaatoms^[50]; (f) ITO transparent conductive film is embedded in bottom of metaatom arrays^[51]

5) ITO作为可调元素。ITO是一类广泛用于制作光伏器件和显示器中透明电极的导电氧化物

材料,随着动态超构表面概念的提出,ITO也常被集成到超构表面中,实现电调控。场效应调制具有

高调制速率和低损耗特性,在载流子浓度调制中广受关注,将ITO集成到超构表面中就是利用了场效应调制的机理。2016年Huang等^[51]基于ITO设计了一个近红外波段的动态超构表面,如图1(f)所示,器件为金膜/ITO/Al₂O₃/金属叉指光栅的多层结构,施加电压到叉指光栅和金属背板上,ITO/Al₂O₃界面处的载流子浓度在场效应调制的作用下较大的变化,这导致ITO的复介电常数发生变化。ITO介电常数的变化使器件反射波的振幅和相位被改变,最终实现了正负一阶衍射光束的动态控制。基于半导体和ITO材料并通过电压调控载流子浓度的方式均可以实现动态超构表面,相比之下,ITO的优势在于其介电常数的实部在电压作用下可以从正值变化到负值,在近红外波段,ITO的介电常数在近零条件下时,载流子积累层中发生电场增加,这为高速率低损耗器件的电调控提供一种更有效的手段。

2.2 光调控法

光调控是将光敏材料集成到超构原子中,并由飞秒激光泵浦控制超构表面的电磁响应特性。光控动态超构表面中一般采用半导体材料作为可调元素。半导体是一种光敏材料,用飞秒激光泵浦时,材料内会激发出大量的光生载流子,利用光调控载流子浓度,从而实现动态调控。半导体材料集成到超构表面中的形式一般可以分成两类。第一类是将半导体作为基底材料,将超构原子阵列制备在半导体基底上^[52-53]。飞秒激光泵浦样品时,会在基底中激发光生载流子,载流子浓度的变化会影响超构原子开口处的电容,从而使超构原

子的电磁共振特性发生变化。2006年,Padilla等^[52]将开口环阵列制备在砷化镓基底上,首次从实验上证明通过光激发基底中光生载流子,可以实现对开口谐振环的电响应的动态控制。在基底中激发的载流子浓度足够高时会将金属环开口短路,关闭金属开口环的共振特性。他们基于该调制方式制备了一个太赫兹开关,然而该类结构在基底被泵浦光激发时,随着基底中载流子浓度的增加,在调制共振特性的同时,整个器件的透过率会降低,如图2(a)所示,在光功率从0 mW增加到10 mW时,器件透过率从最初的接近100%降低到了60%左右。因此,在第二类结构中,将半导体直接镶嵌在金属环开口处,该类结构在调制共振频率时,对其他特性的影响较小^[54-57]。2011年,Shen等^[55]首次从实验上证明了光控太赫兹频率可调超构器件。如图2(b)所示,金属开口环制备在蓝宝石基底上,将光敏硅嵌入到金属环开口处。当用一束外激励光泵浦样品,根据图右侧中的结果可以看出,改变泵浦光功率,结构共振峰发生了蓝移。分析两个特征峰对应的表面电流分布,发现在没有泵浦光时,器件工作在模式1(对应0.76 THz频率)下,此时结构开口为两个等效电容,而当一束外部激光泵浦样品时,环开口处载流子浓度增大,使得环开口被短路,此时器件工作在模式2(对应频率0.96 THz)下,实现了频率开关的功能。相比于将超构原子直接制备在半导体材料基底上的器件,将半导体材料直接填充到金属谐振环开口处的方式在实现共振频率的移动的过程中,对器件其他特性的影响较小。

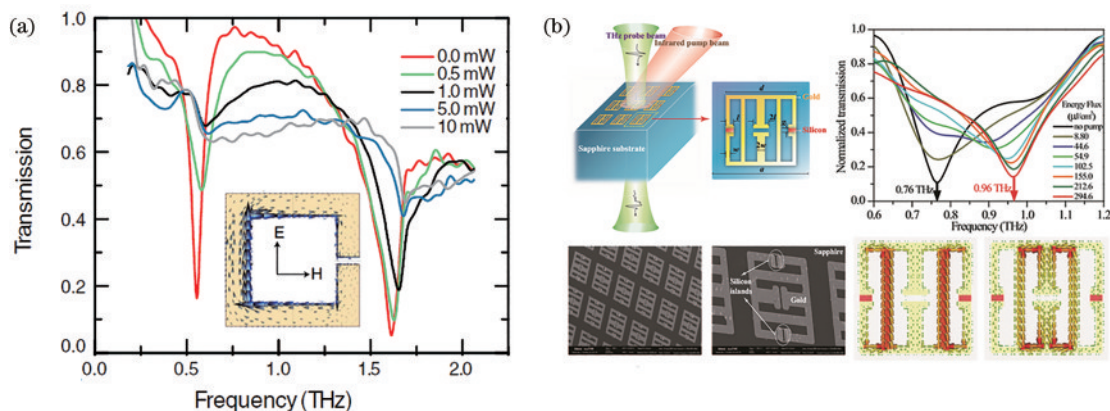


图2 基于半导体的光调控超构表面设计。(a)半导体作为基底^[52];(b)半导体被填充到超构原子开口处^[55]

Fig. 2 Designs of optically controlled metasurfaces based on semiconductor. (a) Semiconductor is used as substrate^[52]; (b) semiconductor is filled in gap of metaatom^[55]

2.3 温度调控法

通过将温度灵敏材料集成到超构表面中,就可以实现功能受温度调控的动态超构表面。常见的温度灵敏材料有相变材料。相变材料是硫族化合物,在特定温度激励下会发生绝缘体金属相变,且不同相变材料适用于不同波段。例如,在太赫兹波段,经常采用二氧化钒(VO_2)作为相变材料。当样品温度高于 68°C 时, VO_2 的晶格结构会从不导电的单斜结构(绝缘相)变成四方晶格结构(金属相),发生绝缘体金属相变^[58]。在太赫兹波段, VO_2 处于绝缘相时,太赫兹波可以透过; VO_2 处于金属相时,太赫兹波则无法透过。因此将 VO_2 集成到超构表面中,在其发生绝缘体金属相变时,器件功能可以在两种不同状态之间切换。将 VO_2 集成到超构表面得到的形式一般有三种,分别是作为连续膜覆盖在超构原子阵列下面^[59-61]、镶嵌在超构原子开口处^[62]或者直接用于制备超构原子^[63-65]。这三种形式均利用 VO_2 的温控相变特性实现动态调控。He 等^[61]将 V 型金属狭缝天线制备在 VO_2 薄膜上面,通过温控

实现了一个具有开、关功能的动态超构表面透镜。如图 3(a)所示,在样品温度低于相变临界温度 340K 时,超构表面器件可将太赫兹光场很好地聚焦,而当温度达到 353K 时,焦点消失,从而实现了开关的功能。2019 年, Liu 等^[62]将 VO_2 镶嵌在 C 型环天线开口中,如图 3(b)所示,将天线按特定顺序排布以实现字符全息成像,在 VO_2 相变前后对成像字符进行了动态切换,温度从 25°C 增加到 100°C ,成像字符从“H”变成了“G”。Wen 等^[63]直接制备棒状的 VO_2 超构原子,实现了基于温控可重构的动态超构表面,从而实现对透射谱的动态调控。如图 3(c)所示,温度在 300K 时,样品对太赫兹波是高透的,且无明显的共振特性,而当温度达到 340K 时, VO_2 变为金属相,透射谱中出现了相应的共振吸收峰。Wang 等^[64]也基于 VO_2 制备了一个可重构超构表面,实现了聚焦性能可开关的太赫兹多焦点透镜。如图 3(d)所示,在室温状态下, VO_2 在绝缘相,此时器件为一层介质膜,对太赫兹波高透,并无调制特性,当样品温度大于 68°C 时, VO_2 在金属相,相当于

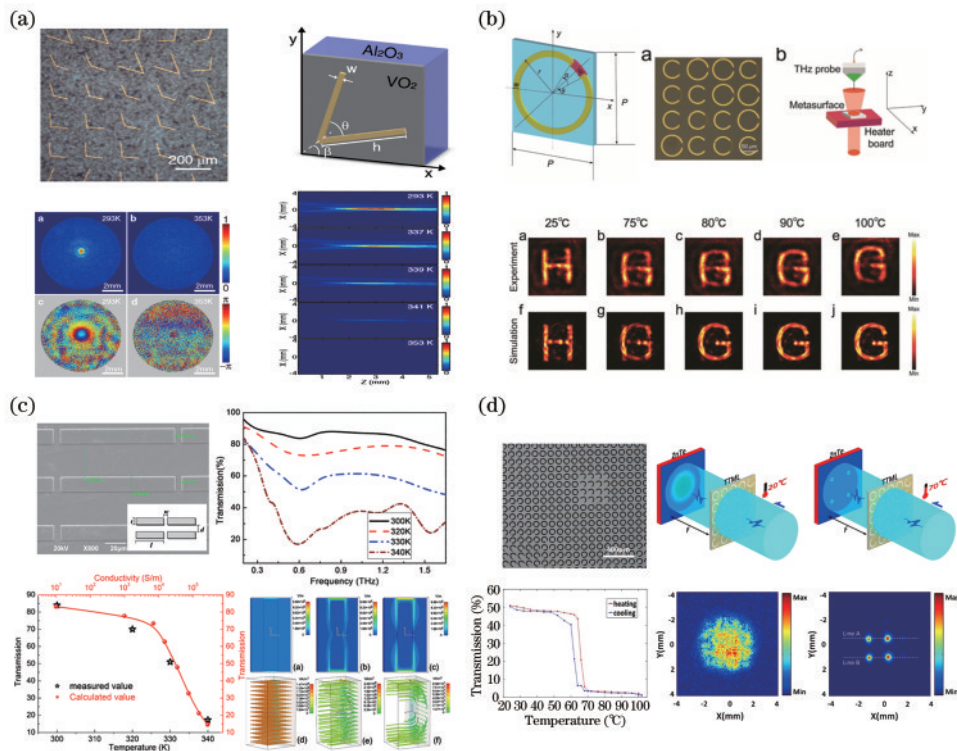


图 3 基于不同温度灵敏材料的温控超构表面设计。(a)将超构原子底层插入二氧化钒薄膜^[61]; (b)将二氧化钒集成到超构原子开口处^[62]; (c)由二氧化钒材料制备棒状超构原子阵列^[63]; (d)由二氧化钒材料制备 C 型开口环超构原子阵列^[64]

Fig. 3 Designs of metasurfaces controlled by temperature based on different thermal sensitive materials. (a) Vanadium dioxide film is inserted into bottom of metaatom arrays^[61]; (b) vanadium dioxide film is integrated into gap of metaatom^[62]; (c) rod-shaped metaatom is fabricated with vanadium dioxide materials^[63]; (d) C-shaped metaatom is fabricated with vanadium dioxide materials^[64]

结构表面重构了一层超构原子阵列,从而可实现对太赫兹波的调制,并实现多焦点聚焦和艾里光束生成。此外,还有一些工作中用光去激发 VO_2 ^[66-68],其本质也是热相变,即利用光加热样品导致 VO_2 发生绝缘体金属相变。2011年,Choi等^[66]将金属狭缝结构制备在 VO_2 薄膜上,在光激励下实现了对超构材料特定共振峰的调控。

2.4 机械调控法

机械调控,顾名思义就是用机械力作为外部激励去修改超构表面中超构原子的几何形状和相邻原子间距,进而改变超构表面电磁响应特性。常用于施加外部机械力的技术包括微机电系统(MEMS)^[69-70]和纳米机电系统(NEMS)^[71-72],此外,微流控技术也广泛应用于实现对动态超构表面的机械调控^[73-74]。机械调控超构表面的方式可以归类为4种,分别为超构原子制备在可拉伸柔性基底上^[75-77]、采用可形变材料制备超构原子^[69-70, 72]、制备微流控超构原子^[73-74, 78]和空间位置可相对变化的双层超构表面^[79-81]。在超构原子制备在可拉伸基底的结构中,在基底被拉伸过程中,超构原子晶格及相

邻原子间距被改变,使得原子间的近场相互作用发生变化,从而使整个器件的电磁响应发生变化。2016年,Ee等^[76]将金棒状天线制备在一个可拉伸聚二甲基硅氧烷(PDMS)基底上,实现了一个受拉力控制的变焦透镜。如图4(a)所示,拉伸比例从100%增加到130%时,透镜的焦距从150 mm增大到250 mm。超构原子制备在可形变的悬臂上,在外力驱动下,超构原子的结构形状被改变,其共振特性发生相应的改变。Han等^[70]采用类似的结构实现了频率可切换的太赫兹滤波,如图4(b)所示,在石英基底上制备开口环阵列,环的中间臂为一个受外力可弯曲的悬臂,不加电压时,整个器件在0.96 THz处有一个明显的共振吸收峰,在开口两侧臂上施加电压,悬臂在静电力的作用下向下弯曲使开口闭合,器件共振峰被移动到0.46 THz,实现了共振频率可切换的滤波。基于微流控技术的可重构超构表面,通过控制通入微流腔中溶液的量 and 速度,控制超构原子的几何尺寸或其周围光学环境,实现电磁共振特性的动态调控。Chosh等^[74]采用基于微流控技术的动态超构表面,实现了频率可切换的吸收

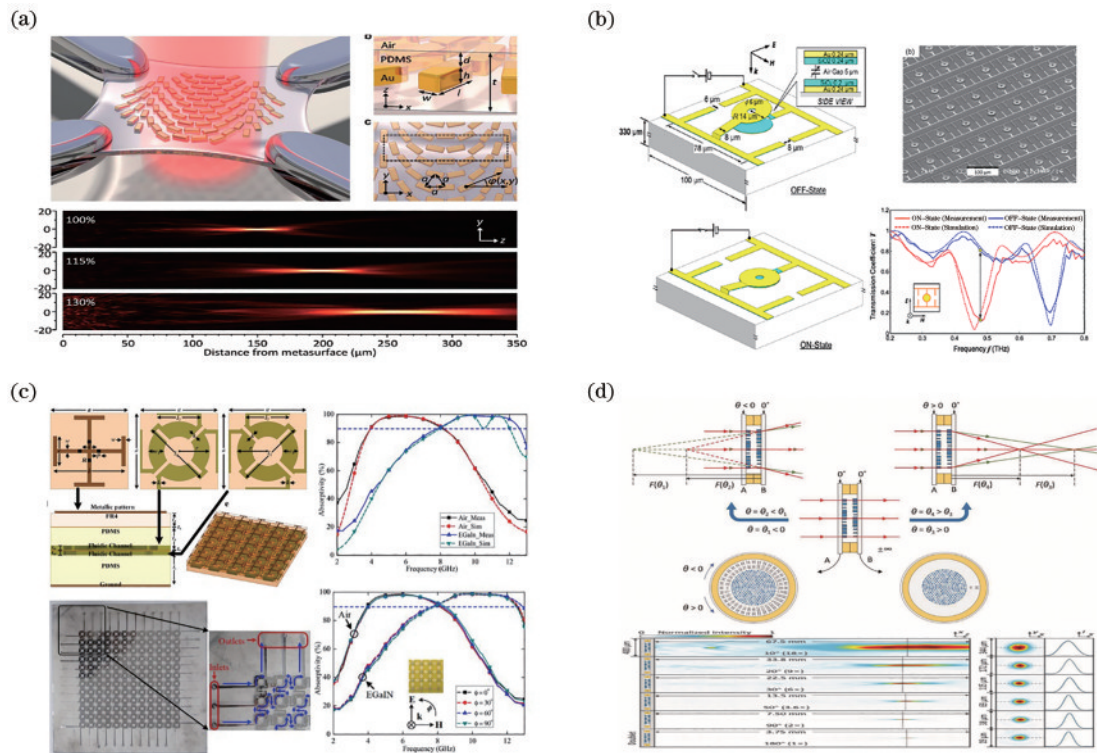


图4 机械调控超构表面的设计。(a)将超构原子制备在可拉伸基底上^[76];(b)将超构原子一部分制备在可形变的悬臂上^[70];

(c)在超构原子阵列中嵌入微流腔通道^[74];(d)空间相对移动的双层超构表面^[81]

Fig. 4 Designs of mechanically controlled metasurfaces. (a) Metaatoms are fabricated on stretchable substrate^[76]; (b) part of metaatoms is fabricated on deformable cantilever^[70]; (c) microfluidic channel is integrated into metaatom arrays^[74];

(d) double layer metasurfaces with relative space movement^[81]

器,如图 4(c)所示,他们在反射型超构表面顶层天线阵列和底层金属板之间插入微流腔,在通入液态金属前后,超构原子周围的光学环境被改变,从而使透射谱被显著改变,实现吸收频率的动态调控。最后一种方法中采用双层超构表面控制两层超构表面相对移动或相对旋转,从而实现超构表面功能的动态调控。2020年,Wei等^[81]基于 moiré 原理^[82]实现了一个焦距大范围连续可调的超构表面透镜,如图 4(d)所示,当两层超构表面之间的相对旋转角度从 10° 增加到 180° 时,透镜焦距从 67.5 mm 减小到 3.75 mm。

2.5 磁场、化学掺杂等其他调控法

除以上常用的几种调控手段外,采用磁调控或化学的手段也能实现动态超构表面。磁调控是将磁性材料集成到超构原子中,再通过外界磁场去改变磁性材料的折射率等光学性质,从而改变整个超构表面的电磁响应特性^[83-87]。Zanotto等^[86]基于掺杂石墨烯的超构表面实现了太赫兹磁光透射调制。石墨烯是一种磁光材料,磁场引起其中的狄拉克费米子类德鲁德

响应修正,从而实现超构表面共振传输的调制。Qin等^[87]将磁性材料 $Ce_1Y_2Fe_3O_{12}$ (Ce: YIG) 集成到超构表面中,如图 5(a)所示,施加垂直于样品表面方向的磁场,通过磁场调制磁性材料的折射率,进而改变金属孔的共振特性,实现了圆二色性调制,并成功将其应用到了成像中。化学调控是通过化学掺杂的手段改变构成超构原子基本材料的化学成分,从而实现可重构的超构表面^[88-90]。当超构原子的构成材料发生变化时,整个器件的电磁响应也会被改变。2019年,Liu等设计了一个双层超构表面,如图 5(b)所示,其中第一层超构表面为镁(Mg)纳米天线和金(Au)纳米天线的复合超构表面。Mg在氢气(H_2)环境下可以被氢化为 MgH_2 ,发生金属-介质相变,而 MgH_2 在氧气(O_2)环境中可被还原成金属 Mg,通过交替通入 H_2 和 O_2 ,可以动态控制 Mg 天线的消失与复现,改变超晶格中超构原子的分布,实现不同全息图案的动态切换^[89]。基于相似的调控手段,他们还实现了彩色显示和全息成像两种功能之间的动态切换^[90]。

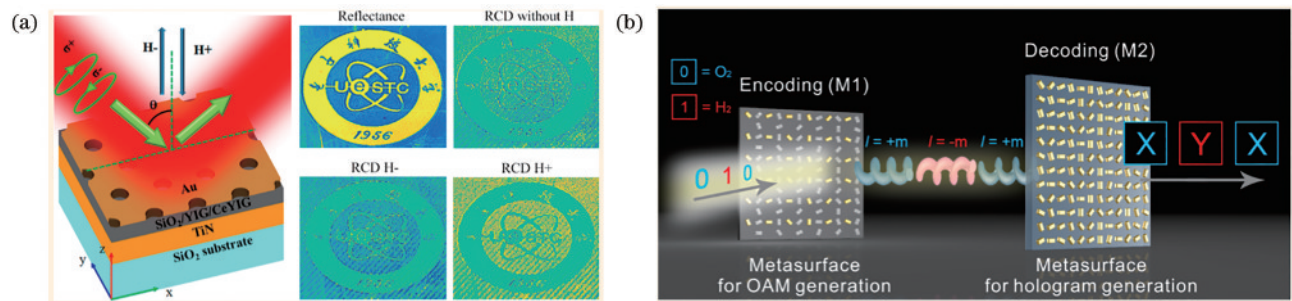


图 5 磁控或化学掺杂的动态超构表面设计。(a)将磁性材料 $Ce_1Y_2Fe_3O_{12}$ (Ce: YIG) 集成到超构表面中,实现磁调控的动态超构表面^[87]; (b)利用镁制备的棒状超构原子在氢气中发生金属-介质相变的特性实现化学可调的编码超构表面^[89]

Fig. 5 Designs of magnetically controlled metasurface or chemically doped dynamic metasurface. (a) Magnetically controlled active metasurfaces by embedding magnetic material $Ce_1Y_2Fe_3O_{12}$ (Ce: YIG) into metasurfaces^[87]; (b) chemically controlled programmable metasurfaces based on metal-dielectric phase transition of rod shaped metaatom made from magnesium (Mg) in hydrogen environment^[89]

3 基于动态超构表面实现的功能器件

第 2 节介绍了动态超构表面的调制机理,本节将对近几年实现的,尤其是太赫兹波段的动态超构表面器件进行介绍。根据调控方式,动态超构表面分为超构原子统一控制和超构原子单独控制两类。

3.1 超构原子统一控制的超构表面

所谓统一控制,是对所有的超构原子施加完全一样的外部激励进行调控,实现功能在两种状态之间可切换的超构表面。根据实现功能的不同,统一控制可分为光谱调控、偏振调控和波前调控。

3.1.1 超构表面动态调控光谱

超构表面动态调控光谱是指利用外部激励改变超构原子的共振特性,从而对器件透射谱或反射谱进行动态调控。基于动态超构表面实现的光谱调控器件分为滤波器^[54-55, 70, 91-92],调制器^[38, 41, 43, 49, 93-96]和吸收器^[35, 46, 74, 97-99]。太赫兹通信技术具有大容量、高保密性等优势,已被列为 6G 通信研究计划中,而滤波器和调制器是应用于通信系统中的关键器件。基于动态超构表面实现的滤波器,在外激励调控下可以实时选择不同的频率进行滤波,这大大提升了滤波器功能的灵活性。2008年,Chen等^[54]将半导体硅集成到超构材料中,制备了用于太赫兹波段的非

接触式频率可调滤波器。如图 6(a) 所示, 在外激励光功率达到 500 mW 时, 滤波器的工作频率从最初的 1.06 THz 被调节到 0.85 THz, 最终实现了约 20% 的调制。在此之后, Shen 等^[55]基于类似的结构, 将硅填充到超构原子开口处, 制备了更大调制范围的可调谐太赫兹滤波器, 调制范围达到了 40%。以上工作中尽管实现了大范围的调制, 但是调频过程中滤波效果会变差。具有优异功能的可调谐滤波器应该是在保持滤波效果不变的前提下实现连续且宽范围的调制。2018 年, Jiang 等^[92]基于石墨烯等离子全介质超构表面, 理论上设计了一个具有此功能的太赫兹可调滤波器。如图 6(b) 所示, 随着施加到基底与石墨烯之间电压的增大, 透射光谱中的共振峰红移可以得到实时连续控制, 从而实现 2300 nm (约 11.7%) 的调制, 且随着电压增大, 滤波效果基本不变。调制器也是通信系统中的关键器件, 利用动态超构表面对某一频率下的光信号强度进行调制, 从而可将不同的信息加载到光信号中。在实际应用中, 调制器不仅需要较大的调制深度, 同时还应具有较高的调制速率。2013 年, Hu 等^[95]将亚波长金属环形天线阵列制备在硅基底上, 并用飞秒激光泵浦样品, 实现了透射式多模共振超快太赫兹波调制。如图 6(c) 所示, 激光功率为 60 mW 时, 最终实现了约 90%

的强度调制。通过器件超快特性测试发现, 器件的关闭时间在几个皮秒之内。2015 年, Zhang 等^[43]采用另外一种方式, 即联合等效偶极阵列和双通道异质结的方式, 实现了有效且超快的太赫兹波调制。通过电压控制该复合结构, 实现了深度为 85% 的调制, 同时在实时动态测试中得到了 1 GHz 的调制速率。此外, 通过对此器件在自由空间通信系统中进行眼图测试, 得到了 0.2 Gbit/s 的结果。吸收器是利用超构表面进行光谱调制的另一重要器件。类似于滤波器, 具备优异性能的可调吸收器应该在保证高吸收率不变的前提下实现对工作频率的连续且大范围的调制。2013 年, Zhao 等^[35]将变容二极管集成到超构材料中, 实现了共振频率处的连续可调微波吸收, 得到了 1.5 GHz 的调节范围, 并且在共振频率移动过程中, 器件的吸收率一直保持在 90% 以上。由于二极管尺寸相对较大, 将二极管和超构材料相结合的调控方法只适用于微波波段。Seren 等^[99]采用半导体硅与超构材料集成的方法, 实现了太赫兹波段的光调控多波段完美吸收。图 6(d) 所示的器件为一个典型的反射式结构, 金属膜、介质层和金属环天线阵列依次制备在蓝宝石基底上, 基于该结构实现了多波段宽带吸收。为了实现光泵浦的动态调控, 他们在金属环开口处镶嵌了半导体硅,

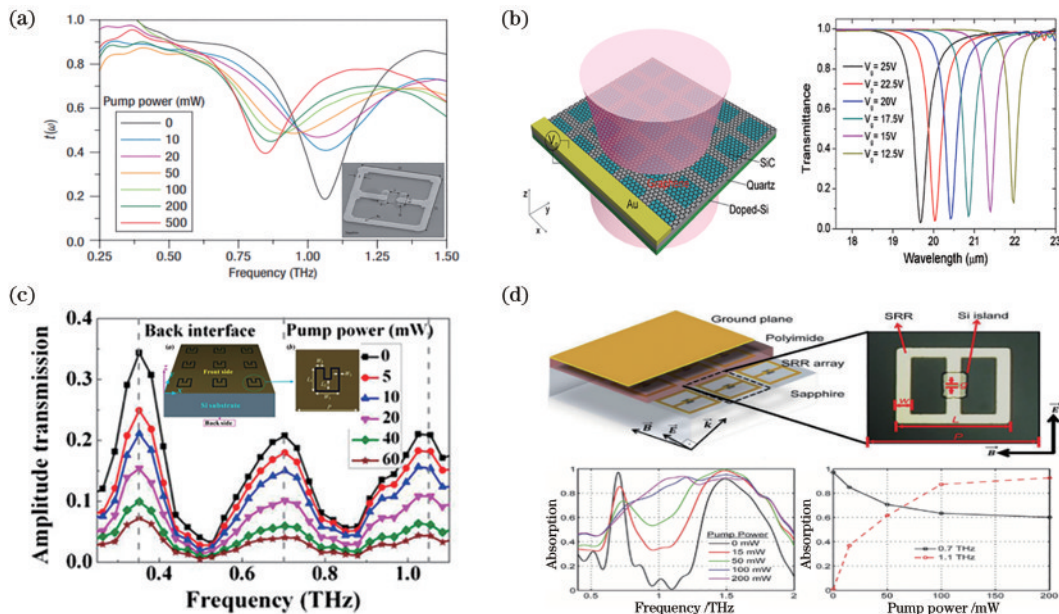


图 6 基于均匀调控的动态超构表面实现光谱调制器件。(a) 基于光调控的太赫兹可调滤波器^[54]; (b) 基于电调控的可调滤波器^[92]; (c) 基于光调控的多波长太赫兹调制器^[95]; (d) 基于光调控的可调多波段太赫兹完美吸收器^[99]

Fig. 6 Spectrum modulation devices based on uniformly controlled dynamic metasurfaces. (a) Optically controlled terahertz tunable filter^[54]; (b) electrically controlled tunable filter^[92]; (c) multi-wavelength terahertz modulator based on optical control^[95]; (d) multi-wavelength terahertz perfect tunable absorber based on optical control^[99]

利用飞秒激光泵浦样品实现了双波段动态可调完美吸收,分别在 0.7 THz 和 1.1 THz 处得到了 97% 和 92% 的高吸收率,调制深度分别是 38% 和 91%。综上所述,利用动态超构表面调控光谱的思路有两个:第一是在保证原有共振强度不变的前提

下实现对共振频率连续且大范围的调制,例如调频滤波和调频吸收;第二是对某一特定频率下的共振强度进行调制,例如利用调制器实现不同调制深度或通过调制实现完美吸收。上面介绍的几个工作的调制性能参数如表 1 所示。

表 1 基于动态超构表面的光谱调制参数

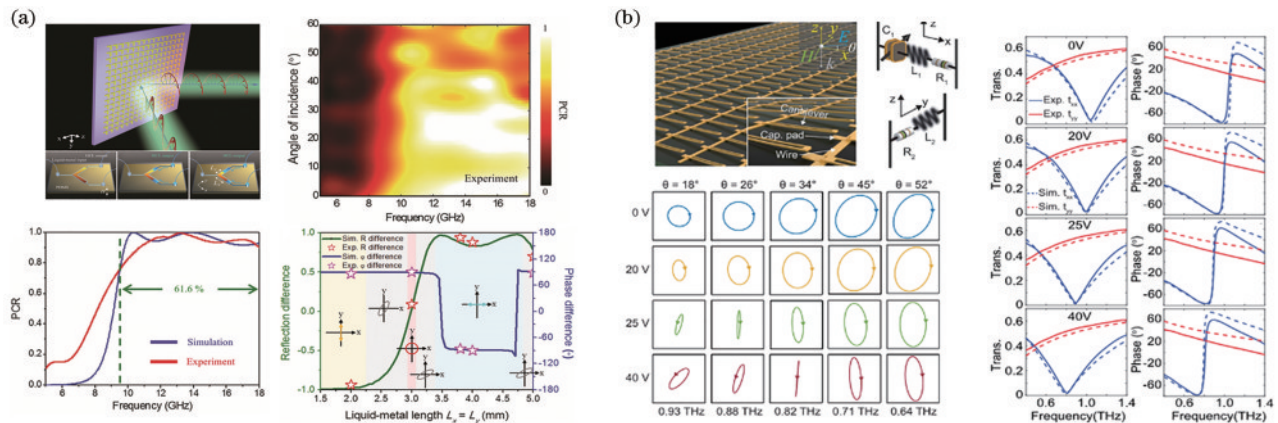
Table 1 Spectrum modulation parameters based on dynamic metasurface

Device	Method	Modulation range / %	Modulation depth / %
Filter	Optical modulation ^[54]	20	
	Optical modulation ^[55]	40	
Modulator	Electrical modulation ^[92]	11 (continuous modulation)	
	Optical modulation ^[95]		92
Absorber	Electrical modulation ^[43]		85
	Electrical modulation ^[35]	30	
	Optical modulation ^[99]		38, 91 (double frequency)

3.1.2 超构表面动态调控偏振

偏振作为描述电磁波的一个重要物理量,对其进行动态控制也是调制电磁波不可或缺的一部分,偏振调制在成像、量子通信和材料表征等方面具有重要的应用,目前已有不少相关的研究报道^[36, 78, 100-105]。2017年,Wu等^[78]基于液态金属构成的超构表面实现了一个反射式多功能偏振转换器。如图 7(a)所示,超构表面由 L 型微流腔超构原子阵列构成。通过向微流腔中注入液态金属(镓锡合金),并采用微流控技术精确控制天线臂长,可精确调控反射光束中两个正交分量的振幅和相位,实现线偏振向其正交偏振、线偏振到圆偏振以及线偏振到椭圆偏振的转换,并通过实验

证明所提出的结构具有宽带大角度入射的性能。2018年,Zhao等^[102]通过电驱动的悬梁臂阵列,从实验上实现了可重构太赫兹波的 1/4 波片。如图 7(b)所示,超构表面由单层微悬臂梁阵列构成,在悬臂与其正下方垫片之间施加电压,在电压作用下悬臂发生弯曲,导致悬臂与垫片之间的电容发生变化,结构的电磁共振响应被改变。提出的超构表面具有各向异性,在电压驱动下,偏振方向与悬臂一致的分量(x 分量)的共振峰发生了约 230 GHz 的频率移动,而偏振方向与臂垂直的分量(y 分量)的电磁共振特性不受影响,因此两分量之间产生了 90° 的相位差,从而使透射光从圆偏振变化到线偏振光。

图 7 基于均匀调控的动态超构表面实现的偏振调控器件。(a)基于微流控技术的具有大角度入射的偏振转化器件^[78];(b)基于悬臂可弯曲的超构原子构成的超构表面偏振转换器^[102]Fig. 7 Polarization control devices based on uniformly controlled dynamic metasurfaces. (a) Polarization conversion device with large angle incidence based on microfluidic technology^[78]; (b) metasurface polarization converter device consists of

3.1.3 超构表面动态调控波前

以上两种调制属于光波的整体调控,而超构表面在微型化实时光学成像、显示系统中具有很大的应用潜力,在这些应用中需要对光的波前进行调控。用于波前调控的动态超构表面器件,按功能可以归类为焦距可调节透镜^[61,64,76,79,81,106-113]、光束偏折器^[96,114-119]、动态全息器件^[62,90,120]和特殊光束生成器^[89,121]4类。2016年,Xu等^[106]基于可调超构表面提出了一个无像差变焦透镜。图8(a)中所示器件由集成了变容二极管的超构原子阵列构成,通过改变施加到二极管上的外部电压精确控制透镜相位轮廓,从而修正工作频率下由色散引起的相位畸变。

基于该思想,他们设计并从实验上证明了一个无相差超构表面透镜,实现了同一频率下变焦的功能。2018年,Afridi等^[110]设计了一个电调控的超构表面透镜,如图8(b)所示,器件分别由顶层非晶硅柱阵列构成的超构表面透镜和底层的电热模块两部分组成。其中,电热模块由PDMS膜和金属螺旋形电阻器构成,金属螺旋形电阻器在外加电压作用下加热PDMS并在其中诱导形成抛物面型折射率变化,这相当于在介质超构表面透镜的相位分布中外加一个透镜的相位,从而改变透镜焦点,最终从实验上证明了一个变焦透镜。关于光束偏折方向控制器件的研究,2018年,Cong等^[117]提出了一个全光控

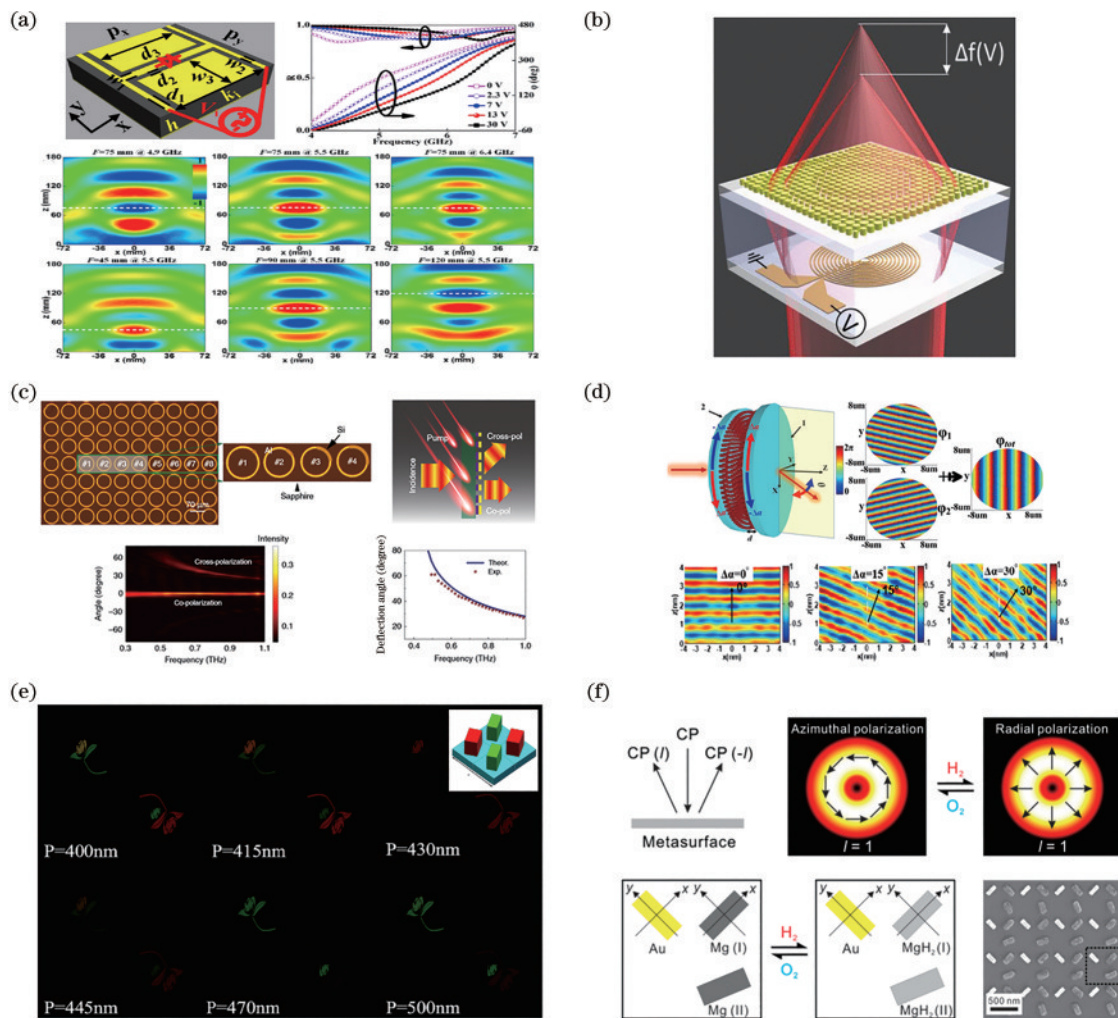


图8 基于均匀调控的动态超构表面实现光场调控。(a)电调控的微波无像差超构表面透镜^[106];(b)温度调控的可见光变焦超构表面透镜^[110];(c)光调控的快速偏振转换器和动态分光器^[117];(d)机械调控的光束偏折角度动态控制器^[118];(e)机械调控的双色可调超构表面全息^[120];(f)化学调控的特殊光束转换器^[89]

Fig. 8 Light field modulation by dynamic metasurfaces based on uniform control. (a) Electrically controlled microwave aberration-free metalens^[106]; (b) temperature-controlled visible light zoom metalens^[110]; (c) light-controlled fast polarization converter and dynamic beam splitter^[117]; (d) mechanically controlled dynamic controller for beam deflection angle^[118]; (e) mechanically controlled two-color tunable metasurfaces hologram^[120]; (f) chemically controlled special beam converter^[89]

动态太赫兹超构表面,实现了快速偏振转换和动态分光的功能。如图 8(c)所示,他们在蓝宝石基底上制备了按特定序列排列且具有不同开口的金属 C 形天线阵列,在每个天线底层预先制备了环形半导体硅。用一束外激励光泵浦样品,环开口处的硅在激光的作用下产生光生载流子,不同光功率下载流子浓度的变化使天线开口处的电容发生变化,从而使天线的电磁共振发生变化,并且不同开口的天线的电磁共振变化不同。基于该调制机理,实现了超快偏振转换,包括线偏振正交转换、线偏振向圆偏振的转换,此外还实现了对正交偏振光异常偏折角度的动态调控。2019年,Du等^[118]基于机械调控实现对正交偏振光异常偏折角度的动态调控,如图 8(d)所示,器件由两层相对放置的介质超构表面构成,该器件中正交偏折光的偏折仅由两层超构表面的相对旋转角度决定,将两层超构表面相对旋转 30° 时,实现了 30° 的光束偏折。除此之外,基于动态超构表面还实现了全息成像、特殊光束的动态切换。Guo等^[120]基于机械控制 PDMS 的形变程度,实现了一个灵活可调的介质彩色超构表面全息。如图 8(e)所示,超构表面由两套不同尺寸的天线构成,不同尺寸对应着不同的共振波长。拉伸基底会改变天线的晶格常数,天线的透射共振特性也随之改变。从图中可以看出,在基底不同的拉伸形变程度下,利用超构表面实现了不同图案的全息成像。Yu等^[89]基于化学调控的手段,实现了可见光波段矢量光束不同偏振之间的切换。如图 8(f)所示,超构表面每个晶格单元由两种材质的纳米棒天线构成,一种为 Au 纳米棒,另一种为 Mg 纳米棒。其中 Mg 在 H_2 环境下被氢化为透明介质材料 MgH_2 ,而在 O_2 环境下被还原到金属态 Mg,在这个过程中特定顺序排布的超晶格结构发生变化,实现了矢量光束径向偏振与角向偏振之间的切换。基于超构原子的统一调控,实现了各种功能的微型化动态调控器件,尤其在太赫兹波,这些器件的出现将进一步推进太赫兹技术在成像及通信领域中的应用。

3.2 超构原子独立控制的超构表面

3.1 节描述的所有器件中均采用均匀调控的手段,实现的器件只在两种功能或状态之间切换。而如果对每个超构原子实现单独调控,则可以使超构表面反/透射电磁波的振幅、相位实现任意分布,从而实现真正意义上的动态可重构超构表面,进一步将超构表面进行编码,还可以实现更加新奇的物理

现象及功能器件。目前,从实验上实现对超构原子的单独调控还面临着巨大的挑战,尤其是在器件制备及外激励施加方面,截至目前相关的研究报道相对较少。

动态可重构/可编程超构表面与均匀调控的动态超构表面的设计方法基本一致,二者可将可调材料集成到静态的超构原子中,通过外激励对器件的电磁响应进行动态控制,二者唯一的区别在于动态可重构/可编程超构表面中需实现对超构原子的独立控制。微波波段由于波长较长,对应的器件尺寸相对较大,加上电路印刷技术较成熟,因此人们可以相对容易地将变容二极管等可调元件集成到超构原子中,并对超构原子进行单独控制。2014年,Cui等^[122]将偏压二极管集成到超构原子中,并对超构原子进行单独控制,如图 9(a)所示,通过将不同序列的电压变化施加到超构原子上,实现了编码调控的超构表面。但对于高频波段,例如太赫兹波段,因缺乏合适尺寸的二极管,且器件尺寸较小(一般在微纳米量级)、加工难度大,因此很难用同样的方式去独立调控超构原子。因此,需要提出其他的方式实现对超构原子的独立调控。2019年,Guo等^[123]采用数字微反射镜(DMD)将携带超构原子特定分布图案的飞秒激光投影到硅片上,硅是一种典型的光敏材料,在飞秒激光泵浦下,硅中会产生大量的光生载流子,如图 9(b)所示,此时硅中激发了相应图案的载流子分布,从而可将超构表面转移到硅片上,实现对透射太赫兹波的调制,从实验上实现了一个太赫兹波动态可重构超构表面。此方法中,超构原子的几何结构及分布由输入图案决定,通过独立控制输入图案中的超构原子,就可以在泵浦光投影时实现对超构原子的独立动态调控。在实验中,他们将不同字符的全息图加载到外激励光中,实现了字符全息成像,并通过改变加载的图案实现了字符图像的动态切换。该方法将有望成为实现高频波段动态可重构/可编程超构表面的有力手段。

对超构原子进行独立控制、实现动态可重构/可编程超构表面在实时成像及光通信领域中有巨大的应用价值,是未来超构表面进一步发展的主要方向之一。动态可重构/可编程超构表面器件按其最终的应用不同可以分为两类:1)基于动态可重构超构表面实现的功能动态可调的基础器件;2)动态

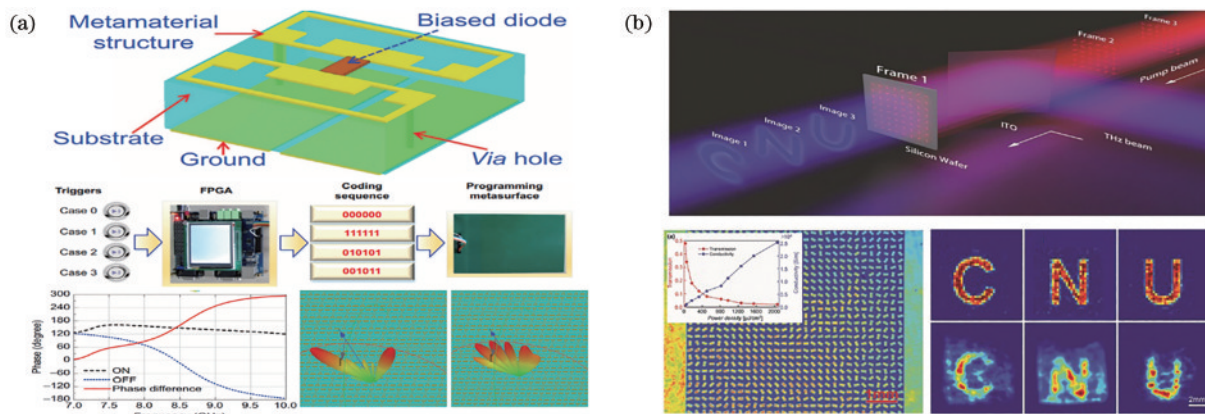


图9 基于超构原子独立调控的动态可重构/可编程超构表面的设计。(a)在超构原子中集成偏压二极管,并通过现场可编程门阵列对超构原子进行独立调控^[122]; (b)通过DMD将预先设计的具有不同排列顺序的超构原子阵列加载在泵浦激光中,在激光泵浦硅片时将相应图案转移到硅片上以重构具有不同功能的超构表面器件^[123]

Fig. 9 Designs of dynamic reconfigurable/programmable metasurfaces by individually controlling metaatoms. (a) Biased diode is integrated in metaatoms, and metaatoms are individually controlled by field-programmable gate array^[122]; (b) predesigned metaatom arrays with different order of arrangement are loaded into pump laser by DMD, and the corresponding pattern is transferred on silicon wafer to reconfigure metasurface devices with different functions when silicon wafer is pumped by laser^[123]

可重构/可编程超构表面作为有效动态调制器应用于实时成像和光通信中。下面总结动态可重构/可编程超构表面在这两方面的相关工作。首先将动态可重构/可编程超构表面作为基础功能器件,通过将独立可控的超构原子进行集成并施加不同的外激励,可以实现任意的波前调控,从而实现各种功能的动态调控^[38, 124-128]。2020年,Zhang等^[128]设计了一个光驱动数字化超构表面,实现对电磁波的编码。如图10(a)所示,器件由 36×36 个亚像素组成,每个亚像素模块由 4×4 个超构原子组成。超构原子中集成了可变电容器,并在每个亚像素模块后面集成由光电二极管串联而成的光学可寻址模块。光电二极管将光强转换成相对应的电压值,通过光学可寻址模块给正面的超构表面中的二极管提供电压。采用不同功率的光照射样品背面不同区域,实现超构原子独立调控。通过采用不同的调控方案,基于同一超构表面分别实现了超构表面外部目标的隐身、雷达探测中的光学幻觉和涡旋光束产生三种不同的功能。基于同一超构表面实现不同功能的切换,不仅节省了器件制备成本,而且在雷达探测及成像显示中具有很大的应用潜力。通过将不同图案的振幅、相位等信息编码到超构表面中,还可以实现编码超构表面^[129-131]。编码超构表面的实现面临着巨大的挑战,2019年,Li等^[131]引入基于1 bit编码的可编程超构表面全息的概念来应对这一挑战。如图10(b)所示,在相邻的金属环之间架构

一个PN型偏压二极管,通过外加电压控制二极管在“开”与“关”状态之间的切换,编码超构表面中每个单元的状态可以在“1”和“0”之间切换,因此可以将不同的二元相位信息编码到超构表面中,实现不同图案的实时动态成像。此外,实际应用中还有一些用于无线通信中的动态编码超构表面^[132-134]。2019年Cui等^[134]利用一个编码超构表面直接传输数字信号。在一般的通信系统中,数字信号先通过数字模拟转换器,被转化成模拟信号,然后将模拟信号加载到一个载波频段中传输,最后通过终端接收信号并解调出传输的信息,整个过程需要一系列的技术和器件去完成。Cui等则通过可编程的超构表面直接发射数字信号,从而简化了信息传输的过程。如图10(c)所示,他们在超构原子中集成了二极管,利用二极管“开”和“关”两个状态的切换,将有特定顺序编码的数字信号直接编码到超构表面中,在载波频段电磁波照射下直接将编码信号加载并发送到空间中,编码信号由分布在空间中不同方向的终端接收,利用这样的方案最终从实验上实现了一幅人像图案的传输。将超构原子进行单独调控,从真正意义上实现了可以直接应用到实时成像及无线通信中的动态超构表面。但是,该方向的发展也面临着巨大的挑战,尤其是从实验上实现高频波段的动态可重构/可编程超构表面较为困难,因此需要更多的探索和努力来继续推进该方向的发展。

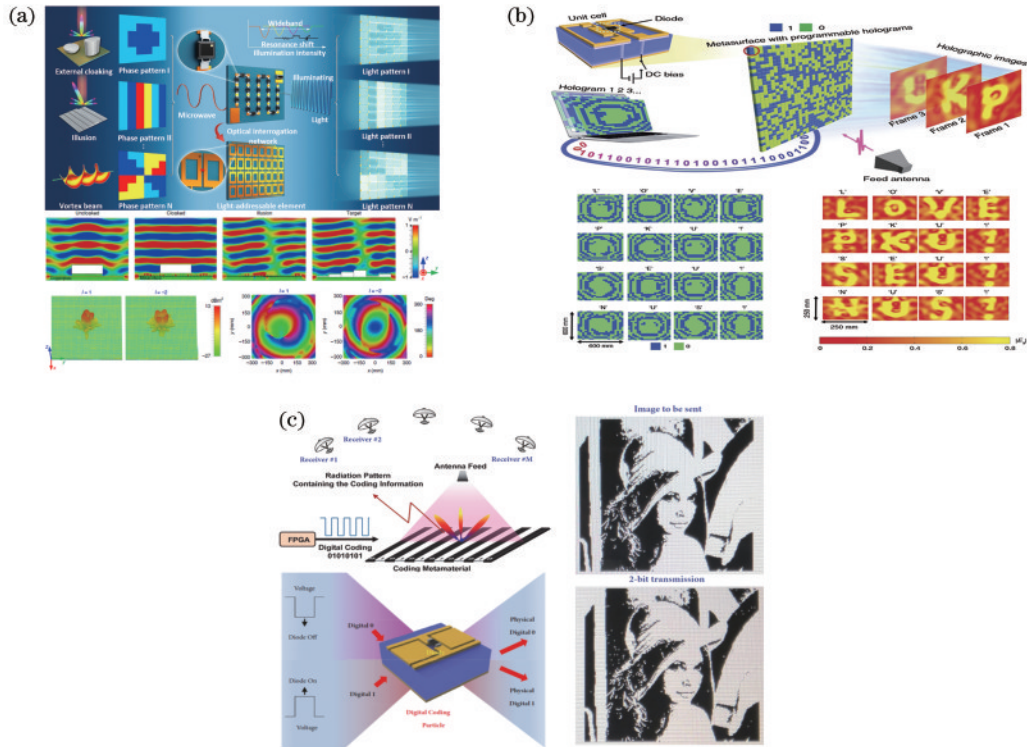


图 10 动态可重构/可编程超表面的应用。(a)光驱动数字化超表面对电磁波进行编码,以实现外部目标隐身、雷达探测及特殊光束生成及动态切换^[128]; (b)将不同的二元相位信息编码到超表面上,实现了不同图案的实时动态成像^[131]; (c)可编程的编码超表面用于光通信中数字信号的直接传输^[134]

Fig. 10 Applications of dynamic configurable/programmable metasurface. (a) Encode electromagnetic waves by optically driven digital metasurface to achieve stealth of external targets, radar detection, and special beam generation and dynamic switching^[128]; (b) different binary phase information is encoded on metasurface, realizing real-time dynamic imaging of different patterns^[131]; (c) programmable coded metasurface is used for directly transmitting digital signals in optical communications^[134]

4 总结和展望

首先系统介绍了动态超构表面常用的外部激励手段及相应的机理。目前,较常用的激励手段有电控、光控、温控、机械调控、磁调控和化学调控。不同激励手段和可调材料适用于不同波段:在微波波段,一般采用电控二极管实现动态调控器件;在太赫兹波到光学波段,一般采用电、光、温度和机械等激励半导体、二维材料、相变材料和可形变的材料,实现动态调控。接着介绍了基于动态超构表面的功能器件,尤其是太赫兹波段的功能器件。根据调控中超构原子是否独立受控制,将动态超构表面分成了均匀调控的动态超构表面和超构原子独立控制的可重构/可编程超构表面两部分。均匀调控的动态超构表面分为光谱调控、偏振调控和波前调控的动态超构表面。在均匀调控的动态超构表面中,基于特殊光束生成以及光偏振态调制的相关工

作大多只实现了开关的功能,而要真正实现动态全息或矢量光场调控,则需要对光场的不同参量进行连续调控,这对于包括动态全息显示或者基于偏振连续旋转实现操控粒子等实际应用具有重大的意义,这将是进一步开展动态超构表面相关研究的方向,以期实现性能更加优异、功能更加丰富的器件。而动态超构表面研究更重要的发展方向是能够实现超构原子的独立灵活调控,这将是动态超构表面未来研究进一步发展的主要目标。通过对超构原子进行独立控制,才能制备真正意义上的动态可重构超构表面,使得每一个动态超构表面器件的功能更加丰富。基于同一超构表面,通过采用不同的调控方案重构出多种功能器件,例如 Zhang 等^[128]的工作中,仅采用一个超构表面,分别实现了目标隐身、光学幻觉和特殊光束生成三种功能,这能节省很大一部分器件制备成本。另外,通过超构原子独立调控可以对超构表面进行编程,并可将其直接

应用到实时成像和无线通信中。虽然目前已经有一部分相关的研究工作,但是这些研究工作在器件制备、功能扩展、性能优化和实际应用等多个方面仍面临着巨大的困难和挑战,因此还需要大量研究工作的开展。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Walser R M. Metamaterials: what are they? what are they good for?[EB/OL]. [2020-07-16]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000APS.MAR.Z5001W/abstract>.
- [3] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index [J]. *Nature*, 2008, 455 (7211) : 376-379.
- [4] Shalaev V M, Cai W S, Chettiar U K, et al. Negative index of refraction in optical metamaterials [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(24): 3356-3358.
- [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] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [7] Leonhardt U. Invisibility cup[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(4): 207-208.
- [8] Cai W S, Chettiar U K, Kildishev A V, et al. Optical cloaking with metamaterials [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(4): 224-227.
- [9] Kisel V N, Lagarkov A N. Near-perfect absorption by a flat metamaterial plate[J]. *Physical Review E*, 2007, 76(6): 065601.
- [10] Ding P, Liang E J, Cai G W, et al. Dual-band perfect absorption and field enhancement by interaction between localized and propagating surface plasmons in optical metamaterials [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13 (7) : 075005.
- [11] Feng S M, Halterman K. Coherent perfect absorption in epsilon-near-zero metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2012, 86(16): 165103.
- [12] 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.
- [13] Li Z Y, Palacios E, Butun S, et al. Visible-frequency metasurfaces for broadband anomalous reflection and high-efficiency spectrum splitting[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(3): 1615-1621.
- [14] Li Y F, Zhang J Q, Zhang Y D, et al. Wideband, co-polarization anomalous reflection metasurface based on low-Q resonators[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(9): 851.
- [15] Sun S, He Q, Xiao S, et al. Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426-431.
- [16] Wang S, Zhao F, Wang X K, et al. Comprehensive imaging of terahertz surface plasmon polaritons [J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 16916-16924.
- [17] Wang S, Wang X K, Kan Q, et al. Circular polarization analyzer with polarization tunable focusing of surface plasmon polaritons[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(24): 243504.
- [18] Jiang X Y, Ye J S, He J W, et al. An ultrathin terahertz lens with axial long focal depth based on metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (24) : 30030-30038.
- [19] Wang B, Wu X, Zhang Y. Multiple-wavelength focusing and demultiplexing plasmonic lens based on asymmetric nanoslit arrays[J]. *Plasmonics*, 2013, 8 (4): 1535-1541.
- [20] Ho J S, Qiu B, Tanabe Y, et al. Planar immersion lens with metasurfaces [J]. *Physical Review B*, 2015, 91(12): 125145.
- [21] Pfeiffer C, Grbic A. Controlling vector Bessel beams with metasurfaces [J]. *Physical Review Applied*, 2014, 2(4): 044012.
- [22] He J, Wang X, Hu D, et al. Generation and evolution of the terahertz vortex beam [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20230-20239.
- [23] Guo J Y, Wang X K, He J W, et al. Generation of radial polarized Lorentz beam with single layer metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(1): 1700925.
- [24] Wang B, Quan B, He J, et al. Wavelength demultiplexing metasurface hologram [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35657.
- [25] Kuznetsov S A, Astafev M A, Beruete M, et al. Planar holographic metasurfaces for terahertz focusing[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 7738.
- [26] Huang L L, Mühlenbernd H, Li X W, et al.

- Broadband hybrid holographic multiplexing with geometric metasurfaces [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(41): 6444-6449.
- [27] Miao Z Q, Wu Q, Li X, et al. Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces[J]. *Physical Review X*, 2015, 5(4): 041027.
- [28] Lü T T, Zhu Z, Shi J H, et al. Optically controlled background-free terahertz switching in chiral metamaterial [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 3066-3069.
- [29] Wen Q Y, Zhang H W, Yang Q H, et al. A tunable hybrid metamaterial absorber based on vanadium oxide films [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(23): 235106.
- [30] Lee S, Kim S, Kim T T, et al. Reversibly stretchable and tunable terahertz metamaterials with wrinkled layouts[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(26): 3491-3497.
- [31] Sun S L, He Q, Hao J M, et al. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2019, 11(2): 380-479.
- [32] He Q, Sun S, Zhou L. Tunable/reconfigurable metasurfaces: physics and applications [J]. *Research*, 2019, 2019: 1849272.
- [33] Bao L, Cui T J. Tunable, reconfigurable, and programmable metamaterials [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(1): 9-32.
- [34] Hu Z, Xu T, Tang R, et al. Geometric-phase metasurfaces: from physics to applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202408.
胡中, 徐涛, 汤蓉, 等. 几何相位电磁超表面: 从原理到应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202408.
- [35] Zhao J, Cheng Q, Chen J, et al. A tunable metamaterial absorber using varactor diodes [J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15: 043049.
- [36] Xu H X, Sun S L, Tang S W, et al. Dynamical control on helicity of electromagnetic waves by tunable metasurfaces[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27503.
- [37] Mao R Q, Wang G M, Cai T, et al. Tunable metasurface with controllable polarizations and reflection/transmission properties [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(15): 155102.
- [38] Li S Q, Xu X W, Veetil R M, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface [J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [39] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices [J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [40] Gabbay A, Brener I. Theory and modeling of electrically tunable metamaterial devices using inter-subband transitions in semiconductor quantum wells [J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 6584-6597.
- [41] Sarma R, Campione S, Goldflam M, et al. A metasurface optical modulator using voltage-controlled population of quantum well states[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(20): 201101.
- [42] Zhang Y X, Zhao Y C, Liang S X, et al. Large phase modulation of THz wave via an enhanced resonant active HEMT metasurface [J]. *Nanophotonics*, 2018, 8(1): 153-170.
- [43] Zhang Y X, Qiao S, Liang S X, et al. Gbps terahertz external modulator based on a composite metamaterial with a double-channel heterostructure [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5): 3501-3506.
- [44] Sun Y F, Sun J D, Zhou Y, et al. Room temperature GaN/AlGaN self-mixing terahertz detector enhanced by resonant antennas [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(25): 252103.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Dai S, Ma Q, Liu M K, et al. Graphene on hexagonal boron nitride as a tunable hyperbolic metamaterial[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(8): 682-686.
- [48] Lee S H, Choi M, Kim T T, et al. Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 936-941.
- [49] Valmorra F, Scalari G, Maissen C, et al. Low-bias active control of terahertz waves by coupling large-area CVD graphene to a terahertz metamaterial[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(7): 3193-3198.
- [50] Liu P Q, Luxmoore I J, Mikhailov S A, et al. Highly tunable hybrid metamaterials employing splitting resonators strongly coupled to graphene surface plasmons [J]. *Nature Communications*, 2015, 6:

- 8969.
- [51] Huang Y W, Lee H W H, Sokhoyan R, et al. Gate-tunable conducting oxide metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(9): 5319-5325.
- [52] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, et al. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(10): 107401.
- [53] Zhou Q L, Shi Y L, Wang A H, et al. Ultrafast optical modulation of terahertz metamaterials [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(12): 125102.
- [54] Chen H T, Azad A K, et al. Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(5): 295-298.
- [55] Shen N H, Massauti M, Gokkavas M, et al. Optically implemented broadband blueshift switch in the terahertz regime [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(3): 037403.
- [56] Gu J Q, Singh R, Liu X J, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1151.
- [57] Wang G C, Zhang J N, Zhang B, et al. Photo-excited terahertz switch based on composite metamaterial structure [J]. *Optics Communications*, 2016, 374: 64-68.
- [58] Zylbersztein A, Mott N F. Metal-insulator transition in vanadium dioxide [J]. *Physical Review B*, 1975, 11(11): 4383-4395.
- [59] Liu M, Hwang H Y, Tao H, et al. Terahertz-field-induced insulator-to-metal transition in vanadium dioxide metamaterial [J]. *Nature*, 2012, 487(7407): 345-348.
- [60] Seo M, Kyoung J, Park H, et al. Active terahertz nanoantennas based on VO₂ phase transition [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(6): 2064-2068.
- [61] He J W, Xie Z W, Sun W F, et al. Terahertz tunable metasurface lens based on vanadium dioxide phase transition [J]. *Plasmonics*, 2016, 11(5): 1285-1290.
- [62] Liu X B, Wang Q, Zhang X Q, et al. Thermally dependent dynamic meta-holography using a vanadium dioxide integrated metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(12): 1900175.
- [63] Wen Q Y, Zhang H W, Yang Q H, et al. Terahertz metamaterials with VO₂ cut-wires for thermal tunability [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(2): 021111.
- [64] Wang T, He J W, Guo J Y, et al. Thermally switchable terahertz wavefront metasurface modulators based on the insulator-to-metal transition of vanadium dioxide [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20347-20357.
- [65] Ding F, Zhong S M, Bozhevolnyi S I. Vanadium dioxide integrated metasurfaces with switchable functionalities at terahertz frequencies [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(9): 1701204.
- [66] Choi S B, Kyoung J S, Kim H S, et al. Nanopattern enabled terahertz all-optical switching on vanadium dioxide thin film [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(7): 071105.
- [67] Chen S C, Du L H, Meng K, et al. Terahertz wave near-field compressive imaging with a spatial resolution of over $\lambda/100$ [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 21-24.
- [68] Fan F, Gu W H, Chen S, et al. State conversion based on terahertz plasmonics with vanadium dioxide coating controlled by optical pumping [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1582-1584.
- [69] Liu X L, Padilla W J. Dynamic manipulation of infrared radiation with MEMS metamaterials [J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(8): 559-562.
- [70] Han Z L, Kohno K, Fujita H, et al. MEMS reconfigurable metamaterial for terahertz switchable filter and modulator [J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21326-21339.
- [71] Zheludev N I, Plum E. Reconfigurable nanomechanical photonic metamaterials [J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(1): 16-22.
- [72] Wang Q G, Mao D P, Liu P, et al. NEMS-based infrared metamaterial via tuning nanocantilevers within complementary split ring resonators [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, 26(6): 1371-1380.
- [73] Kasirga T S, Ertas Y N, Bayindir M. Microfluidics for reconfigurable electromagnetic metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(21): 214102.
- [74] Ghosh S, Lim S. Fluidically switchable metasurface for wide spectrum absorption [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 10169.
- [75] Pryce I M, Aydin K, Kelaita Y A, et al. Highly strained compliant optical metamaterials with large frequency tunability [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(10): 4222-4227.
- [76] Ee H S, Agarwal R. Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2818-2823.
- [77] Reeves J B, Jayne R K, Stark T J, et al. Tunable

- infrared metasurface on a soft polymer scaffold[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2802-2806.
- [78] Wu P C, Zhu W M, Shen Z X, et al. Broadband wide-angle multifunctional polarization converter via liquid-metal-based metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(7): 1600938.
- [79] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 812.
- [80] Cui Y, Zheng G X, Chen M, et al. Reconfigurable continuous-zoom metalens in visible band [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(11): 111603.
- [81] Wei Y X, Wang Y X, Feng X, et al. Compact optical polarization-insensitive zoom metalens doublet [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(13): 2000142.
- [82] Bernet S, Ritsch-Marte M. Adjustable refractive power from diffractive Moiré elements[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(21): 3722-3730.
- [83] Han J G, Lakhtakia A, Qiu C W. Terahertz metamaterials with semiconductor split-ring resonators for magnetostatic tunability [J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14390-14396.
- [84] Kang L, Zhao Q, Zhao H J, et al. Magnetically tunable negative permeability metamaterial composed by split ring resonators and ferrite rods[J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 8825-8834.
- [85] Valente J, Ou J Y, Plum E, et al. Reconfiguring photonic metamaterials with currents and magnetic fields[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(11): 111905.
- [86] Zanutto S, Lange C, Maag T, et al. Magneto-optic transmittance modulation observed in a hybrid graphene-split ring resonator terahertz metasurface [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(12): 121104.
- [87] Qin J, Deng L J, Kang T T, et al. Switching the optical chirality in magnetoplasmonic metasurfaces using applied magnetic fields[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 2808-2816.
- [88] Duan X Y, Kamin S, Liu N. Dynamic plasmonic colour display[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 14606.
- [89] Yu P, Li J X, Li X, et al. Generation of switchable singular beams with dynamic metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(6): 7100-7106.
- [90] Li J X, Chen Y Q, Hu Y Q, et al. Magnesium-based metasurfaces for dual-function switching between dynamic holography and dynamic color display[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(7): 7892-7898.
- [91] Shen N H, Kafesaki M, Koschny T, et al. Broadband blueshift tunable metamaterials and dual-band switches [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(16): 161102.
- [92] Jiang L H, Wang F Q, Liang R S, et al. Tunable terahertz filters based on graphene plasmonic all-dielectric metasurfaces [J]. *Plasmonics*, 2018, 13(2): 525-530.
- [93] Emani N K, Chung T F, Ni X J, et al. Electrically tunable damping of plasmonic resonances with graphene[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(10): 5202-5206.
- [94] Rout S, Sonkusale S. Wireless multi-level terahertz amplitude modulator using active metamaterial-based spatial light modulation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14618-14631.
- [95] Hu D, Liu C P, Zhang Y. Active control of terahertz multimode resonance transmission through subwavelength metal annular aperture arrays [J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(18): 1548-1553.
- [96] Yuan Y H, Chen X Y, Hu F R, et al. Terahertz amplitude modulator based on metasurface/ion-gel/graphene hybrid structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614016.
袁莹辉, 陈懿宇, 胡放荣, 等. 基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614016.
- [97] Yoon G, So S, Kim M, et al. Electrically tunable metasurface perfect absorber for infrared frequencies [J]. *Nano Convergence*, 2017, 4: 36.
- [98] Zou Y X, Cao J, Gong X, et al. Ultrathin and electrically tunable metamaterial with nearly perfect absorption in mid-infrared [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2019, 9(16): 3358.
- [99] Seren H R, Keiser G R, Cao L Y, et al. Optically modulated multiband terahertz perfect absorber [J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(12): 1221-1226.
- [100] Forouzmmand A, Salary M M, Inampudi S, et al. A tunable multigate indium-tin-oxide-assisted all-dielectric metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(7): 1701275.
- [101] Tavakol M R, Rahmani B, Khavasi A. Tunable polarization converter based on one-dimensional graphene metasurfaces [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(10): 2574-2581.

- [102] Zhao X G, Schalch J, Zhang J D, et al. Electromechanically tunable metasurface transmission waveplate at terahertz frequencies [J]. *Optica*, 2018, 5(3): 303-310.
- [103] Zhang Y, Feng Y J, Jiang T, et al. Tunable broadband polarization rotator in terahertz frequency based on graphene metamaterial[J]. *Carbon*, 2018, 133: 170-175.
- [104] Sasaki T, Nishie Y, Kambayashi M, et al. Active terahertz polarization converter using a liquid crystal-embedded metal mesh[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 5901007.
- [105] Mao R Q, Wang G M, Cai T, et al. Tunable metasurface with controllable polarizations and reflection/transmission properties [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53 (15) : 155102.
- [106] Xu H X, Ma S J, Luo W J, et al. Aberration-free and functionality-switchable meta-lenses based on tunable metasurfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(19): 193506.
- [107] Callewaert F, Velev V, Jiang S Z, et al. Inverse-designed stretchable metalens with tunable focal distance [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112 (9): 091102.
- [108] Liu W G, Hu B, Huang Z D, et al. Graphene-enabled electrically controlled terahertz meta-lens [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(7): 703-708.
- [109] Colburn S, Zhan A L, Majumdar A. Varifocal zoom imaging with large area focal length adjustable metalenses[J]. *Optica*, 2018, 5(7): 825-831.
- [110] Afridi A, Canet-Ferrer J, Philippet L, et al. Electrically driven varifocal silicon metalens [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(11): 4497-4503.
- [111] Bai W, Yang P, Huang J, et al. Near-infrared tunable metalens based on phase change material $\text{Ge}_2\text{Se}_2\text{Te}_5$ [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1) : 5368.
- [112] Yilmaz N, Ozdemir A, Ozer A, et al. Rotationally tunable polarization-insensitive single and multifocal metasurface [J]. *Journal of Optics*, 2019, 21 (4) : 045105.
- [113] Wang X K, Xie Z W, Sun W F, et al. Focusing and imaging of a virtual all-optical tunable terahertz Fresnel zone plate [J]. *Optics Letters*, 2013, 38 (22): 4731-4734.
- [114] Cheng H, Chen S, Yu P, et al. Dynamically tunable broadband infrared anomalous refraction based on graphene metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(12): 1744-1749.
- [115] Su X Q, Ouyang C M, Xu N N, et al. Active metasurface terahertz deflector with phase discontinuities [J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27152-27158.
- [116] Xu H X, Wang G M, Cai T, et al. Tunable Pancharatnam-Berry metasurface for dynamical and high-efficiency anomalous reflection [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27836-27848.
- [117] Cong L, Srivastava Y K, Zhang H, et al. All-optical active THz metasurfaces for ultrafast polarization switching and dynamic beam splitting [J]. *Light, Science & Applications*, 2018, 7: 28.
- [118] Du Z Y, Hu B, Liu W G, et al. Tunable beam deflector by mutual motion of cascaded bilayer metasurfaces[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(11): 115101.
- [119] Wang Y, Zhang S H, Shen Y, et al. Manipulation on amplitude of anomalous refraction in staggered terahertz V-shaped metasurface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0713001.
汪云, 章少华, 沈云, 等. 太赫兹 V-形错位超表面异常折射振幅调控研究[J]. *光学学报*, 2020, 40 (7): 0713001.
- [120] Guo X Y, Pu M B, Guo Y H, et al. Flexible and tunable dielectric color meta-hologram[J]. *Plasmonics*, 2020, 15(1): 217-223.
- [121] Xie Z W, He J W, Wang X K, et al. Generation of terahertz vector beams with a concentric ring metal grating and photo-generated carriers [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(3): 359-362.
- [122] 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.
- [123] Guo J Y, Wang T, Zhao H, et al. Reconfigurable terahertz metasurface pure phase holograms [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(10): 1801696.
- [124] Zhu W M, Song Q H, Yan L B, et al. A flat lens with tunable phase gradient by using random access reconfigurable metamaterial [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(32): 4739-4743.
- [125] Yan L B, Zhu W M, Wu P C, et al. Adaptable metasurface for dynamic anomalous reflection [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(20): 201904.
- [126] She A, Zhang S, Shian S, et al. Adaptive metalenses with simultaneous electrical control of focal length, astigmatism, and shift [J]. *Science*

- Advances, 2018, 4(2): eaap9957.
- [127] Yan L B, Zhu W M, Karim M F, et al. Arbitrary and independent polarization control *in situ* via a single metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(21): 1800728.
- [128] 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(3): 165-171.
- [129] Li Y B, Li L L, Xu B B, et al. Transmission-type 2-bit programmable metasurface for single-sensor and single-frequency microwave imaging[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 23731.
- [130] Li L, Cui T J, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms [J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 197.
- [131] Li L, Ruan H, Liu C, et al. Machine-learning reprogrammable metasurface imager [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1082.
- [132] Dai J Y, Zhao J, Cheng Q, et al. Independent control of harmonic amplitudes and phases via a time-domain digital coding metasurface [J]. Light, Science & Applications, 2018, 7: 90.
- [133] Zhao J, Yang X, Dai J Y, et al. Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems [J]. National Science Review, 2019, 6(2): 231-238.
- [134] Cui T J, Liu S, Bai G D, et al. Direct transmission of digital message via programmable coding metasurface [J]. Research, 2019, 2019: 2584509.