

太赫兹波前调制超表面器件研究进展

贺敬文¹, 董涛¹, 张岩^{2*}

- (1. 北京卫星信息工程研究所 天地一体化信息技术国家重点实验室, 北京 100095;
2. 首都师范大学 物理系 北京市超材料与器件重点实验室 北京市成像理论与技术高精尖中心, 北京 100048)

摘要: 超表面是一种由人工微结构组成的超薄平面器件, 能够实现对电磁波振幅、相位以及偏振态的调控, 具有体积小、重量轻、集成度高、可灵活操控电磁波等优势, 在电磁波谱、波前调制中发挥着巨大的作用。综述了近年来基于超表面的太赫兹波前调制器件的研究进展。总结了基于 Pancharatnam-Berry 相位、基于局域表面等离子体共振 (LSPR)、基于 Mie 共振的三种超表面单元结构对电磁波的振幅、相位调控机理, 并讨论了实现高效率超表面的方法。之后, 介绍了用于设计波前调制超表面器件的纯相位调制方法和复振幅调制方法。综述了在太赫兹波段典型的超表面波前调制器, 包括单一功能、复合功能以及可调谐功能的超表面波前调制器件。在早期的研究工作中, 设计的超表面可实现波束偏转、波束聚焦、全息成像、以及涡旋光束、自聚焦光束、洛伦兹光束等特殊光束产生等功能。为提高太赫兹器件的利用率, 波分复用、偏振复用等功能复用的太赫兹超表面器件被提出。随着对太赫兹波前动态调控需求的增长, 一些主动的太赫兹超表面器件被提出并在实验上被验证。共有两种主动的超表面器件。其中一种主动超表面是通过将超表面结构与半导体材料或相变材料结合形成的, 另一种是通过光泵浦硅片形成的全光器件。全光超表面在不用重新加工的前提下能够被重复使用。通过调整投影在硅片上的超表面图像即可动态操控太赫兹波前。全光超表面具有动态控制波束扫描和波束聚焦的能力, 将来可应用于太赫兹通信、太赫兹雷达等领域。最后, 对太赫兹波前调制超表面器件的发展趋势与应用前景进行了展望。

关键词: 太赫兹; 超表面; 波前调制; 功能复用超表面; 可调谐超表面
中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201033

Development of metasurfaces for wavefront modulation in terahertz waveband

He Jingwen¹, Dong Tao¹, Zhang Yan^{2*}

- (1. State Key Laboratory of Space-Ground Integrated Information Technology, Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing 100095, China;
2. Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology, Beijing Key Lab of Metamaterials and Devices, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

收稿日期: 2020-06-10; 修订日期: 2020-07-20

基金项目: 中国航天科技集团创新基金 (Y-Y-Y-GJGKXZ-18, Z-Y-Y-KJJGTX-17); 国家自然科学基金 (11474206, 11404224, 1174243, 11774246)

作者简介: 贺敬文 (1988-), 女, 工程师, 博士, 主要从事太赫兹技术、超表面器件、硅基光子器件方面的研究。Email: hejw_mail@126.com

导师简介: 董涛 (1975-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事硅基光子集成、太赫兹天线设计、相控阵技术、计算电磁学方面的研究。Email: dongtaoandy@163.com

通讯作者: 张岩 (1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事微纳光学、超材料、太赫兹成像技术方面的研究。
Email: yzhang@cnu.edu.cn

Abstract: Metasurface is an ultrathin planar device composed of artificial microstructures, which can be used to manipulate the amplitude, phase, and polarization of electromagnetic (EM) waves. Metasurface has the advantages of small volume, light weight, highly integrated, flexible manipulation of EM waves, so it plays an important role in the field of EM wave spectrum and wavefront modulation. In this paper, the research progresses of metasurface for wavefront modulation in the terahertz (THz) waveband were reviewed. The amplitude and phase modulation mechanisms of three kinds of microstructure units in the metasurface, including the microstructure based on Pancharatnam-Berry (PB) phase, localized surface plasmon resonance (LSPR) and Mie resonance were summarized, and the methods for realizing metasurface with high efficiency were discussed. After that, the pure phase and complex amplitude modulation methods for designing the wavefront modulation metasurface were introduced. Specifically, the typical functions, including single function and multifunction and tunable function, of the wavefront modulation metasurfaces in the THz waveband were reviewed. In the early research, metasurfaces were used to realize beam focusing, beam deflection, holographic imaging, and special beam generation such as vortex beam, Airy beam, and Lorentz beam in the THz region. In order to improve the utilization of a THz component, multifunctional metasurfaces, such as metasurfaces with polarization and wavelength multiplexing were proposed. With the requirement of dynamic control of the THz wavefront, some active metasurfaces were proposed and demonstrated. There were two kinds of active metasurfaces. One of the active metasurfaces was formed by combining the metasurface with semiconductor or phase transition materials, and the other was the all-optical metasurface formed by a silicon wafer with pump beam. The all-optical metasurfaces can be reused without reprocessing. The THz wavefront can be modulated dynamically by adjusting the image of the metasurface projected on the silicon wafer. Thus, the all-optical metasurface had the ability to dynamically control the beam steering and focusing, and it can be applied in THz communication, THz radar and other fields. At the end, the development trend and application prospects of the metasurfaces for wavefront modulation in the THz waveband were discussed.

Key words: terahertz; metasurface; wavefront modulation; multifunction metasurface; tunable metasurface

0 引言

太赫兹是频率范围从 0.1~10 THz 的电磁波,处于微波与红外的过渡区域。与 X 射线相比,太赫兹波具有更低的单光子能量,对生物细胞的损害较小,可以被用在医学诊断^[1-3]、安全检测^[4]中;与微波相比,太赫兹波不仅具有更小的波长,还覆盖了丰富的频谱资源,可作为下一代 6G 通信的工作频段,太赫兹通信技术具有大容量、高保密性等特点。不仅如此,由于大多数物质分子振动频率处于太赫兹波段,因此,太赫兹光谱技术可以作为物质识别的一个重要手段。基于上述优势,太赫兹技术将为人类生活提供更大的便利。相对于微波电子学和红外光学领域,太赫兹技术的研究起步较晚,技术还不够成熟,尤其在太赫兹器件方面问题尤为突出。由于自然界中缺乏对太赫兹波调控的材料,现有太赫兹器件面临着体积大、重

量大、效率低、种类匮乏等问题。利用自然界存在的材料制成的太赫兹器件主要包括高阻硅透镜、石英波片以及偏振片,仅仅能实现简单的波束聚焦、偏振态调制等功能,无法实现对太赫兹光谱以及波前分布的复杂调控,这一现状在太赫兹技术的进一步推广应用中表现尤为突出。2019 年,世界无线电通信大会已经批准将 0.275~0.45 THz 频段用于固定和移动宽带通信业务中,美国、日本、欧盟也已经开始布局 6G 通信技术的相关研究^[5]。与微波通信相比,太赫兹通信技术面临着很多挑战。由于太赫兹波方向性强、波束较窄,因此其波束覆盖面积较窄,容易造成局部信号覆盖空洞问题,导致信号传输中断。因此,在太赫兹通信领域亟需一种实现太赫兹波束智能控制的功能器件,根据实际通信需要,实现波束的辐射方向与波束覆盖面积的灵活控制^[6-7]。

超表面是一种由微结构单元排布组成的平面器

件,具有超薄、超轻等优点。经过人为设计,超表面可构筑具有任意的电导率和磁导率的介质^[8-10],从而实现自然界中不存在的电磁特性。在超表面器件的研究初期,研究人员基于 LC 共振效应,利用由金属谐振环结构组成的超表面器件实现了多种太赫兹滤波器、吸收器等光谱调制器件。2010 年, Capasso F 教授的研究小组提出了利用不同几何参数的 V 形金结构实现了对散射的电磁波的相位调制,并在实验上利用设计的超表面器件证实了反常折射现象^[11]。基于超表面中微结构单元对电磁波的相位、振幅灵活的调控能力,研究人员将其引入到涡旋光束、艾里光束等特殊光束的产生、全息成像、波束赋形等波前操控当中。将超表面引入到太赫兹波段,利用超表面对电磁波的调控能力,可实现多种太赫兹功能器件。尤其在太赫兹通信领域,太赫兹超表面可实现对太赫兹波束的赋形与反射方向的调控,将其贴在墙上、建筑物表面以及无人机上能够实现信号在特定方向的传输,很好地解决太赫兹信号覆盖空洞的问题,实现中继作用。因此,太赫兹波段的超表面器件不仅能够有效解决太赫兹器件种类匮乏的问题,还能推动太赫兹技术的广泛应用。

到目前为止,超表面在太赫兹波前调制领域已经取得了一定的研究成果。文中将从超表面单元的振幅相位调控机理、波前调制超表面的设计方法入手,综述近几年超表面器件在太赫兹波前调制方面的研究进展。根据器件的功能分别介绍功能单一、功能复用以及功能可调控的波前调制超表面器件的研究成果,并对未来发展趋势进行展望。

1 超表面单元的振幅相位调控机理

构成超表面的基本单元通常被称作光学天线,通过与入射电磁波的电磁相互作用可实现对散射波电磁特性的调控。根据相互作用机制的不同,光学天线可以被分为三类:(1)基于 Pancharatnam-Berry(PB)相位,(2)基于局域表面等离子体共振(localized surface plasmon resonance, LSPR)和(3)基于 Mie 共振的光学天线。图 1 展示了基于这三种工作原理的典型光天线单元调制电磁波的示意图。

PB 相位又称几何相位,通过改变天线单元的方位角来实现对散射光相位的调控。如图 1(a)所示,当

一束左旋(右旋)圆偏振光入射到一个方位角为 θ 的条形天线时,散射光中的右旋(左旋)圆偏振光的相位将改变 2θ ,同时保持振幅不发生变化。因此,基于 PB 相位调制机理,只需将条形天线的方位角从 0 变化到 π ,即可实现对散射的圆偏振光从 0 到 2π 的相位调控。这种相位调节机制与入射波的频率无关,只取决于光天线单元的方位角。因此,多被用于宽带的波前调制超表面的设计当中。

基于电磁波与金属天线单元相互作用,在其表面发生的 LSPR 共振也可实现对散射波相位、振幅的调控,如图 1(b)所示。最初, Capasso F 教授研究小组提出的 V 形金天线就是基于这一原理进行电磁波相位调控的^[11]。当一束任意偏振方向的线偏振光入射到 V 形金天线单元后,在天线中激发出对称和反对称两种等离子体共振模式。这两种共振模式的调节可通过改变光天线单元的几何尺寸来实现,从而导致与入射光正交偏振的散射光分量的振幅和相位发生变化。LSPR 可以被看做是一种类偶极振荡,它只能提供 $0\sim\pi$ 的相位调制范围,为了实现 0 到 2π 的相位调控,需结合 PB 相位。比如在参考文献 [11] 中,通过选择四个不同臂长、不同夹角的 V 形金天线实现了对正交偏振散射波从 0 到 π 的相位调控,通过将天线的方位角旋转 90° ,利用天线的镜面对称结构基于 PB 相位引入一个额外的 π 相位,最终实现了 0 到 2π 的相位调控。这种基于 LSPR 的相位调节机制与入射波的频率相关,其相位、振幅调制规律只针对单一频率。类似的结构还有很多,如 C 形、U 形、H 形、L 形以及十字形等具有两个以上开放端口的结构。这种基于 LSPR 的金属光天线单元由于偏振依赖性以及金属损耗的存在,其效率较低,理论上不会超过 50%。

基于 Mie 共振的超表面调制单元是由高折射率材料制备的介质光天线。如图 1(c)所示,当电磁波入射时,能够同时激发电偶极共振和磁偶极共振,通过调节谐振单元的几何参数可以实现散射波的相位从 0 到 2π 的调控。这种全介质光天线对入射光的偏振不依赖,对同偏振分量的散射波具有同样的相位调制效果。为了支持磁偶极子共振模式,全介质光天线的厚度较大,通常可以与介质材料中的波长比拟。因此,全介质超表面器件的厚度要远远大于金属超表面器件的厚度。相比基于 LSPR 和 PB 相位的光天线单

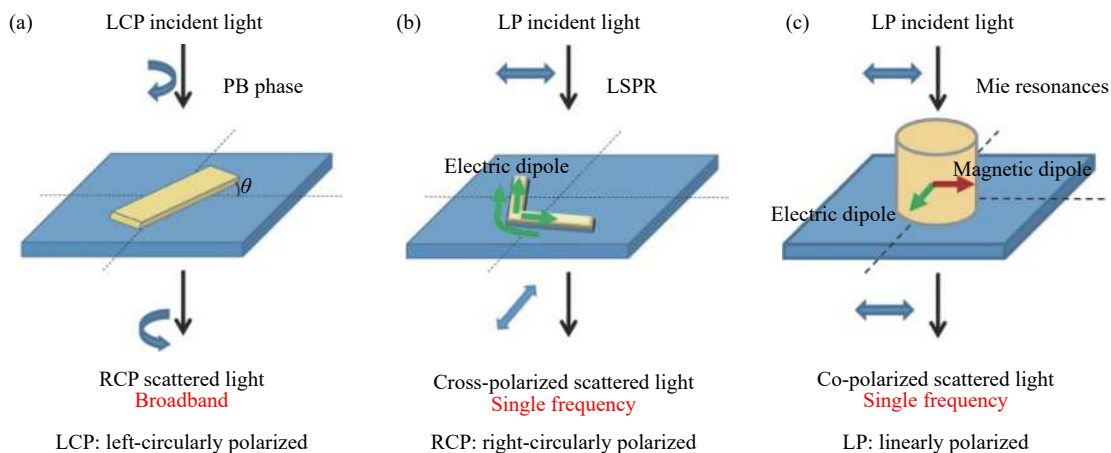


图 1 三种典型光天线单元的电磁波调制机理。(a) 基于 PB 相位的光天线单元；(b) 基于 LSPR 的光天线单元；(c) 基于 Mie 共振的光天线单元

Fig.1 Electromagnetic interaction mechanisms of three kinds of typical optical antennas. (a) Optical antenna unit based on PB phase; (b) Optical antenna unit based on LSPR; (c) Optical antenna unit based on Mie resonance

元, 介质光天线单元由于不会引入金属损耗, 同时具有较强的磁共振, 通常被用于高效率超表面器件的设计中。

根据超表面中光天线单元的电磁调制机理可知, 基于 LSPR 和 PB 相位设计的超表面由于只对与入射波正交偏振的分量起到调制作用, 而对与入射波同偏振方向的分量没有调制效果, 同时, 这类超表面会产生双向辐射, 导致透射的能量大幅降低。因此, 此类超表面器件的效率通常较低。为提高器件的效率, 除了采用基于 Mie 共振的超表面之外, 还可通过采用反射型的 MIM(metal-insulator-metal, MIM) 结构或透射型的惠更斯超表面来实现。反射型的 MIM 结构是在超表面基底下引入一层金属反射层, 金属反射层能够将电磁波全部反射出去, 可以将器件效率提高至 90% 以上^[12]。惠更斯超表面是一种高透射率的多层超表面, 由电共振结构和磁共振结构组成。比如在超表面器件上下各加一层金属光栅结构或者采用 ABA 结构, 通过设计超表面与光栅之间的介质层厚度实现最大效率的偏振转化, 最终使器件的效率达到 85% 以上^[13-15]。

2 波前调制超表面设计方法

波前调制是指对电磁波振幅、相位、偏振态空间分布的调控, 常见的波前调制有波束聚焦、全息成像、特殊光束的产生等。根据惠更斯-菲涅尔原理, 电磁波在任意表面上的光场分布可以被看作是由前

一个空间表面上的次级波源辐射出的子波叠加而成。通过调节这些子波束的电磁特性, 可实现任意想要的波前分布。在设计超表面器件前, 首先将其划分成 $N \times N$ 个点, 每个点作为一个次波波源, 根据目标波前分布, 计算得到每个点上所需的振幅和相位值, 再将其量化, 最终将设计好的光天线单元放置在相应的点上, 组成超表面波前调制器件。与二元衍射光学器件的设计方法相似, 计算这些点上所需的振幅相位信息的方法可分为纯相位调制、纯振幅调制以及复振幅调制。

纯相位调制方法是指每个位置点处所需的振幅均相等, 通过计算超表面上的相位分布, 最终实现想要的波前调控。常见的用于计算相位分布的算法有 Gerchberg-Saxton(GS) 算法、杨颀 (YG) 算法、遗传 (GA) 算法等相位恢复算法, 经过多次迭代找到最优的相位分布。纯振幅调制方法则是指每个位置点处所需的相位相同, 通过计算振幅分布来得到想要的波前分布。这种方法具有效率低的缺点, 一般不采用。复振幅调制方法是指精确得到超表面中每个点上的振幅和相位分布, 具有精确度高的特点。与纯相位调制方法相比, 复振幅调制方法得到的目标波前分布具有更高的信噪比。在已知目标波前分布的复振幅表达式, 且超表面与目标波前在同一平面上时, 可通过直接提取振幅相位的方法得到复振幅分布; 当目标波前分布与超表面器件不在同一表面上时, 可采用菲涅尔-基尔霍夫积分求解出超表面平面上的复振幅分布。

在实际设计中,可根据具体的已知条件及需求选择合适的设计方法。基于上述波前调制超表面器件的设计方法,研究人员已经设计并实验验证了多种太赫兹波前调制超表面器件。

3 功能单一的太赫兹波前调制超表面

最初的太赫兹波前调制超表面器件都是针对一种典型功能设计的,如聚焦、成像、特殊光场产生、光束赋形等,属于功能单一的太赫兹波前调制超表面器件。2013年,首都师范大学张岩教授的研究团队利用V形金狭缝天线单元设计了0.75 THz的超表面柱透镜和球透镜^[16],图2(a)为该超表面球透镜部分结构的显微镜照片及其聚焦和成像功能的实验测试结果。这一工作首次在太赫兹波段验证了超表面器件的波前调控能力。随后,该团队又利用YG相位恢复算法设计了长焦深超表面透镜、多焦点超表面透镜,并在实验中得到了预期的聚焦效果。天津大学张伟力教授的研究团队通过超表面实现了太赫兹波的紧聚焦功能^[17],以及多焦点聚焦^[18]。除此之外,研究人员还提出了一些用来实现太赫兹波束聚焦的高效率的超表面器件。Sergei A. Kuznetsov等人提出了一种反射式超表面实现了四个焦点的聚焦,整个器件的效率高达80%^[12]。Huan Zhao等人利用双层偏振转换的思想提出了高效率的透射式太赫兹超表面透镜,器件的效率可达到85%^[13]。

全息成像是波前调制超表面在太赫兹波段的另一个重要的应用方向。任意物体的三维图像再现可采用计算全息技术实现。全息成像技术能够被广泛应用于虚拟现实、商业广告、影视等领域。在可见光频段,通常利用空间光调制器(spatial light modulator, SLM)来实现计算全息图。然而,由于SLM中的液晶分子的体积远远大于工作波长,这一特点导致重建图像的过程中存在高阶衍射和孪生像等问题。在可见光波段,研究人员利用超表面形成计算全息图来实现图像重建。由于超表面是由亚波长的光天线单元组成,不会产生高阶衍射,能够大幅提高能量利用率。为提高重建图像的信噪比,研究者提出了同时调制相位和振幅的超表面设计方法,即复振幅调制方法,并在实验上进行了有效验证。多年以来,计算全息技术在太赫兹波段一直难以在实验上被验证,主要是由于

没有高效率太赫兹波段的SLM存在。随着超表面概念的提出,全息超表面被引入到太赫兹波段,并实现了多种图像的重建。2013年,首都师范大学张岩教授的研究团队不仅利用V形金狭缝天线设计了多种太赫兹透镜,还提出了全息超表面,最终利用自行搭建的太赫兹焦平面成像系统通过实验在预定平面上观测到了重建的字母^[16]。不仅如此,在太赫兹波段,全息超表面也被用于实现三维图像重建^[19]。如图2(b)所示,太赫兹波经过全息超表面后在其传播方向上的不同位置处能够清晰地再现出不同字母的重建像。

超表面在太赫兹波前调制中的另一个重要应用是特殊光束的产生、调控及传输特性的研究。特殊光束具有一系列新颖的独特性质,有着巨大的应用前景。比如,贝塞尔光束、洛伦兹光束、艾里光束等无衍射光束,具有高度的局域化强度分布,在传播过程中不会遭受衍射扩展且具有自弯曲和横向加速特性,能够被用于精密准直、微粒操控、激光切割等领域。涡旋光束由于具有螺旋相位分布、携带有轨道角动量,在微粒操控和大容量通信等领域具有重要的应用价值。另一种特殊光束为矢量光束。矢量光束的横截面上每一点的偏振方向均不一样。常见的矢量光束有角向偏振光束和径向偏振光束。矢量光束通常被应用于高分辨成像、微粒捕获及操控等领域。超表面的出现使得这些特殊光束在太赫兹波段的产生成为可能,并进一步为人们提供了深入研究其在太赫兹波段传播特性的机会。2013年,He等人利用超表面在太赫兹波段得到了拓扑数分别为1, 2, 3的涡旋光束,并首次在实验中观测到了涡旋光束的相位分布,如图2(c)所示^[20]。进一步对其远场传播特性进行了深入研究,揭示了涡旋光相位在传播过程中的演化规律,为涡旋光束在通信、粒子操控等领域的应用打下了研究基础。随后,He等人基于复振幅调制方法设计了在太赫兹波段产生环形艾里光束的超表面,并通过实验观测到波束在传播过程中的自聚焦过程^[21]。2017年,Guo等人利用由十字金天线组成的超表面在太赫兹波段产生了径向偏振的洛伦兹光束,并实验验证了其传播特性^[22]。

利用超表面不仅能够调控电磁波波前的相位和强度分布,还能调控电磁波的传播方向。东南大学崔铁军院士团队提出了宽带低散射的太赫兹超表面,能

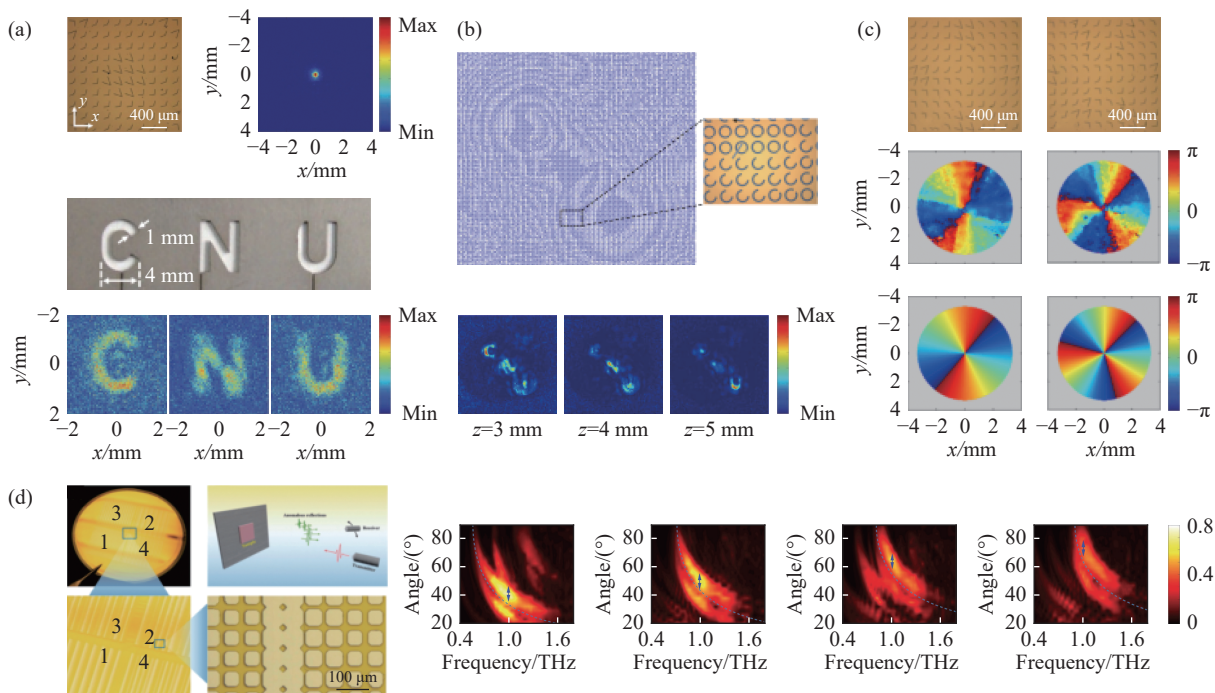


图 2 典型太赫兹波前调制超表面。(a) 太赫兹超表面透镜及其聚焦和成像性能测试结果; (b) 太赫兹全息超表面及其在不同位置处重建的字母图像; (c) 不同拓扑数的太赫兹涡旋超表面及其产生的涡旋光场的相位分布; (d) 太赫兹编码超表面及其产生的波束偏转测试结果

Fig.2 Typical terahertz (THz) metasurfaces for wavefront modulation. (a) THz metasurface lens and verification of its focusing and imaging performance; (b) THz meta-hologram and the alphabets reconstructed at different positions; (c) THz metasurfaces for generating the vortex beams with different topologies and the phase distribution of the generated vortex fields; (d) THz coded metasurfaces and the experiment results of beam deflection

够将入射到超表面上的太赫兹波漫反射到各个方向,降低雷达散射截面,将这一超表面覆盖在飞机、舰船的表面可有效躲避太赫兹雷达的捕获,做到有效隐身^[23-24]。除此之外,该团队还提出了实现太赫兹定向波束指向的超表面设计方案^[25],并在实验上观测到了波束偏转,如图 2(d) 所示。该技术可应用于太赫兹通信、太赫兹雷达等领域。

4 功能复用的太赫兹波前调制超表面

为提高超表面器件的利用率,功能复用的概念被引入到波前调制超表面器件的设计当中。即同一超表面器件具有两种或两种以上的波前调制功能。与单一功能的波前调制超表面器件相比,功能复用的超表面器件的设计较为复杂,需综合考虑多种功能的实现以及串扰问题,通常利用优化算法设定多个目标函数,综合优化出合理的振幅、相位分布,再将合适的光天线单元按照需求排列组合。常见的功能复用的超表面器件包括波分复用、偏振复用、空间复用等器

件。近年来,在太赫兹波段的波分复用和偏振复用的波前调制超表面器件研究工作已经被报道。

波分复用超表面器件指的是针对不同的入射波长,器件表现出不同的调制功能。图 3(a) 给出了一个波分复用的太赫兹超表面器件及其实验测试结果^[26],当一束水平偏振的太赫兹波经过设计的超表面器件之后,在 0.5、0.63 THz 频率处,竖直偏振的太赫兹波分量分别再现出字母“C”和“N”的图像。偏振复用的超表面器件指的是当不同偏振的光入射之后,超表面表现出不同的波前调制功能。图 3(b) 给出了一种基于 PB 相位的振幅复用太赫兹超表面,器件由条形金属天线单元设计而成。当不同自旋方向的圆偏振太赫兹波入射时,经过超表面器件后的相反自旋方向的圆偏振太赫兹波会聚焦于焦平面上左右不同的位置;当线偏振太赫兹波入射时,两种自旋方向的圆偏振太赫兹波在焦平面上会同时聚焦形成两个焦点^[27]。图 3(c) 给出了基于 Mie 共振的偏振复用太赫兹超表面器件。器件由矩形介质光天线单元组成,利用光天

线单元对 x 方向的偏振光和 y 方向偏振光的相位的不同调制规律设计得到。如图 3(c) 所示, 当一束 x 方向偏振的太赫兹波入射到设计好的超表面上时, 透射

波会形成涡旋光场分布; 当 y 方向偏振的太赫兹波入射时, 透射波会形成贝塞尔光场分布^[28]。

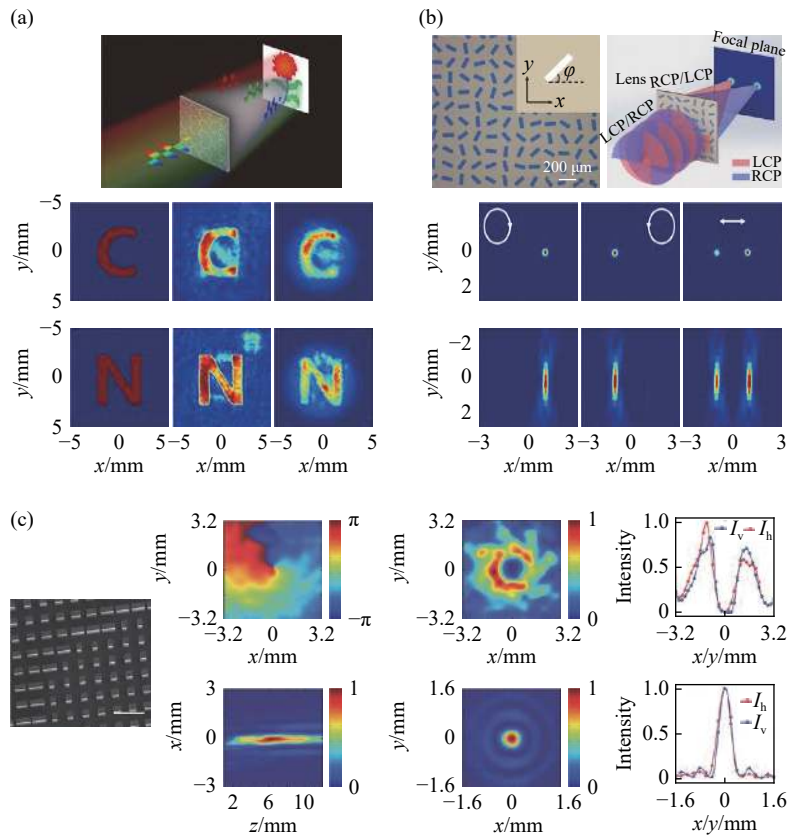


图 3 功能复用的太赫兹波前调制超表面。(a) 波分复用的太赫兹超表面功能示意图及其在 0.5 THz 和 0.63 THz 处重现的图像; (b) 基于 PB 相位的偏振复用超表面透镜及其在不同偏振的太赫兹波入射时的聚焦结果; (c) 用于产生涡旋/Bessel 光束的基于 Mie 共振的全介质偏振复用超表面及其在 x 偏振和 y 偏振的太赫兹波入射时的波前调控实验结果

Fig.3 Multifunctional metasurfaces for wavefront modulation in the THz waveband. (a) Schematic diagram of a wavelength multiplexed metasurface and the images obtained at 0.5 THz and 0.63 THz, respectively; (b) Polarization multiplexed metasurface lens based on PB phase and the experimental results of the focusing results for incident wave with different polarizations; (c) Polarization multiplexed all-dielectric metasurface based on Mie resonance for vortex/Bessel beam generation and the measured intensity distributions under x - and y -polarized incidence, respectively

5 功能可调的太赫兹波前调制超表面

尽管研究人员已经提出了功能复用的超表面器件, 但随着功能数量的增加, 会面临串扰增加、设计难度增大、功能固定等问题。为进一步提高超表面器件的波前调控功能的灵活性, 降低器件的加工成本, 研究人员将目光转向功能可调谐、可重复使用的主动型超表面器件的研究当中。在可调谐超表面器件的设计中, 通常的做法是结合半导体或相变材料, 利用材料特性的改变实现超表面器件功能的调控。常见的

调控方式有温控、光控、电控、力学控制等, 需根据材料的相变条件选取合适的调控方式。现有的温控超表面器件大多是通过将超表面与温度相变材料二氧化钒 (VO_2) 相结合, 在太赫兹波段实现了温控开关^[29]、温控滤波器^[30]等; 电控超表面器件可通过在超表面中引入石墨烯^[31-32]、砷化镓 (GaAs) 形成电控吸收器、滤波器, 还可通过将超表面与 MEMS 和液晶^[33]相结合的方式实现对太赫兹波功能的动态调控。光控超表面器件通常基于硅、GaAs 等半导体材料实现^[34-37]; 力

学控制器件通过将超表面结构与弹性材料聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 结合来实现。但目前报道的可调谐太赫兹超表面器件的研究工作大多集中在动态吸收器、滤波器 etc 太赫兹光谱调制方面, 在动态波前调控方面的研究成果数量有限。

现有的功能可调控的太赫兹波前调控超表面的工作主要是通过温控和光控两种方式实现。图 4 分别给出了三种利用 VO₂ 材料实现的太赫兹温控超表面。图 4(a) 中是将基于 V 形金天线结构设计的超表面透镜制备在 VO₂ 薄膜上形成的可调谐太赫兹透镜, 当改变器件温度时可实现太赫兹波聚焦点强度的连续变化^[38]。图 4(b) 为直接将 VO₂ 材料刻蚀形成 C 形结构单元组成的两种温控超表面器件, 一个是四焦点透镜, 另一个是环形艾里光束发生器^[39]。当器件温度为 20 °C 时, VO₂ 材料表现出介质特性, VO₂ 超表

面对太赫兹波没有调制; 当器件温度达到 70 °C 时, VO₂ 材料表现出金属特性, 在预设焦平面上太赫兹波被聚焦成四个焦点, 或产生了环形艾里光束。这一工作进一步证明了利用 VO₂ 相变材料直接制备的超表面器件在达到相变温度之后能够与入射波相互作用, 激发偶极振荡, 具有对电磁波相位的调控功能。天津大学张伟力教授课题组将 VO₂ 材料填充到 C 形金属光天线单元的开口处形成完整的圆环结构, 并与不填充 VO₂ 材料的 C 形金属光天线单元按照设计好的全息相位分布排列形成了一个太赫兹温控全息超表面^[40]。如图 4(c) 所示, 当材料温度为 25 °C 时会重建出字母“H”的图样, 当材料温度达到 100 °C 时, 则会重建出字母“G”的图样。VO₂ 材料也可通过光控使其达到相变温度, 实现光控超表面器件。

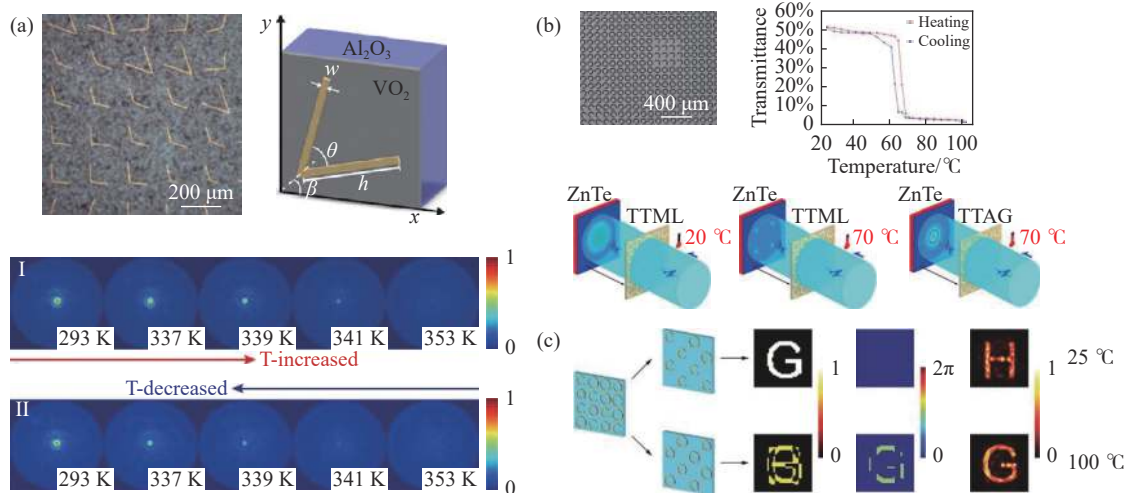


图 4 温控太赫兹波前调制超表面器件。(a)V 形金结构超表面与 VO₂ 薄膜形成的太赫兹温控超表面透镜; (b) 直接刻蚀 VO₂ 材料形成的 C 形狭缝结构超表面透镜及环形艾里光束发生器; (c)VO₂ 材料填充的 C 形金结构形成的太赫兹全息超表面

Fig.4 Temperature-controlled metasurface device for THz wavefront modulation. (a) Tunable THz metasurface lens consisting of metasurface lens with V-shaped antennas and a VO₂ film; (b) Tunable metasurface lens and ring-Airy beam generator with C-shaped slots formed by etching the VO₂ film directly; (c) Tunable THz meta-hologram consisting of C-shaped gold antenna with VO₂

上述研究工作中无论是将超表面与相变材料结合还是直接用相变材料加工成超表面器件, 均无法全面摆脱样品的加工步骤, 而且可实现的波前调控功能有限。为了进一步节约加工成本并提高超表面对波前调控的灵活性, 全光器件将成为未来太赫兹波前调控器件的发展方向。全光器件是基于半导体材料, 如硅、GaAs 等提出的。当照射到材料上的光子能量高于材料的能带间隙时, 就会激发出自由载流子, 当载

流子浓度达到一定浓度时, 材料中被照射的区域将表现出金属的特性。基于这一特性, 在太赫兹波段很容易实现一些结构简单的全光天线^[41-43] 及光致光栅器件^[44-50], 但其功能仅限于光开关等太赫兹光谱的调制。在波前调制方面, 已经有研究在实验上证明, 利用中心波长为 800 nm 的飞秒光作为泵浦光将菲涅尔波带片结构投影到高阻硅片上形成的全光波带片, 能够将太赫兹波聚焦到预定焦平面^[51]。也有研究工作

表明将产生涡旋光的计算全息图投影到硅片之后与环形金属光栅结合,能够产生径向偏振的太赫兹涡旋光束^[52]。

值得注意的是,以上两种全光器件尽管能够对太赫兹波前进行调制,但都是基于对太赫兹波的强度调制实现的,并没有激发出电磁共振,其原理不同于超表面对太赫兹波前的调控。当泵浦光的能量密度进一步提高到 $140 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 以上,才能激发出等离子体共振,形成全光等离子体超表面器件。2018 年,首都师范大学张岩教授的研究团队完成了全光超表面器件调控太赫兹波前的实验验证^[53]。将设计好的超表面样品版图加载到数字微镜阵列 (DMD) 上,再用中心波长为 800 nm 的飞秒光将样品版图投影到薄硅片

上,形成全光超表面器件。当太赫兹波经过全光超表面之后,在预定位置处再再现出设计的字母图像,如图 5(a) 所示。通过实时改变 DMD 上加载的超表面器件设计版图,即可得到想要的的全光超表面,从而实现实时对太赫兹波前的实时调控。这一全光超表面由基于 PB 相位的条形光致天线单元组成,图 5(b) 显示了光致天线几何尺寸与相位调制规律的关系,并给出了泵浦光功率密度与透过率的关系,以及经过投影得到的全光全息超表面。太赫兹波经过光致全息超表面之后实现了对字母“C”、“N”、“U”图像的动态再现,成像效果如图 5(c) 所示。该工作完全摆脱了超表面器件的微纳加工步骤,一块薄硅片可重复利用,只需通过计算机改变加载在 DMD 上的超表面设计版图就能

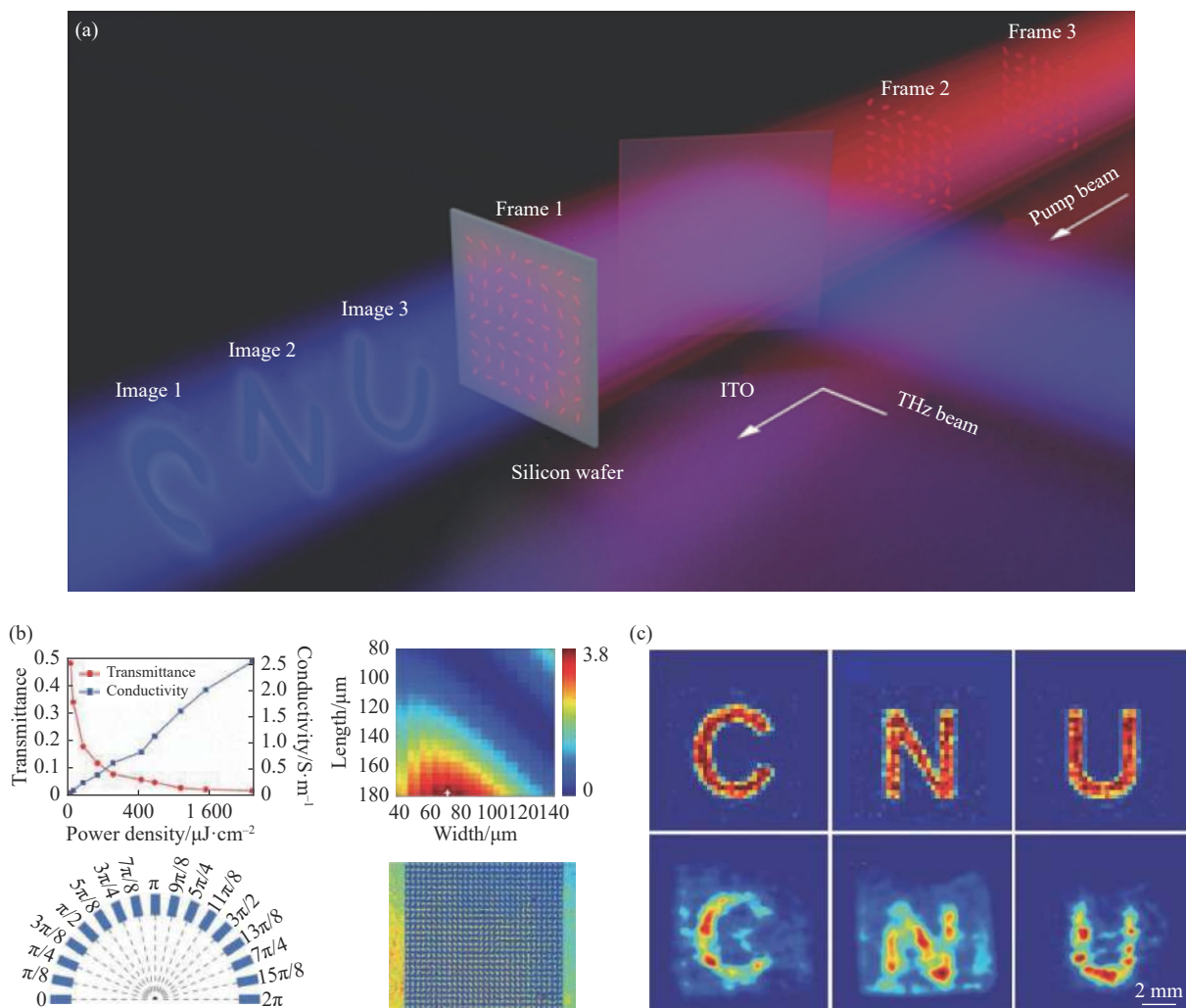


图 5 (a) 太赫兹波前调制全光等离子体超表面示意图; (b) 基于 PB 相位的光致天线设计; (c) 用 CCD 捕获到的投影到硅片上的光致全息图
Fig.5 (a) Schematic of the photo-induced THz plasmonic metasurface for wavefront modulation; (b) Design of photo-induced antennas based on PB phase; (c) Meta-hologram projected on the silicon wafer captured by charge-coupled device (CCD)

实现任意的波前调制效果。该技术不仅大幅度降低了器件的加工成本,还能做到实时快速功能切换,可广泛应用于太赫兹雷达、太赫兹通信等领域。

6 结 论

文中综述了近年来超表面器件在太赫兹波前调制方向的研究进展。根据工作机理,概括了三种超表面器件调制单元,并总结了波前调制超表面器件的设计方法;以超表面器件的波前调制功能数为主线,总结了功能单一、复合功能以及功能可调控的太赫兹超表面器件的典型研究工作。

到目前为止,超表面在太赫兹波前调制方面的研究工作已经取得了一定的研究成果,但在实际应用中仍面临很多挑战。比如,在功能可调控的太赫兹超表面器件的研制中,可进一步探索新的材料实现更多新颖的调制功能;在全光超表面器件的研究中,需进一步考虑提高超表面中光天线单元结构投影的精确性、提高器件的效率、提高再现图像的信噪比、探究全光调制速率等。随着太赫兹技术在生活中的广泛应用以及小型化可穿戴设备日益增长的需求,现有的硬质基底的超表面器件很难集成到弯曲表面的系统中,无法实现表面共形,需进一步在柔性超表面器件方面进行深入研究。在太赫兹通信领域,如何利用超表面实现太赫兹波束的定向辐射以及波束智能调控也将成为一个重要的研究方向。

参考文献:

- [1] Fan S, He Y, Ung B S, et al. The growth of biomedical terahertz research [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(37): 374009.
- [2] Oh S J, Kim S-H, Jeong K, et al. Measurement depth enhancement in terahertz imaging of biological tissues [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21299-21305.
- [3] Arbab M H, Winebrenner D P, Dickey T C, et al. Terahertz spectroscopy for the assessment of burn injuries in vivo [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2013, 18(7): 077004.
- [4] Clery D. Brainstorming their way to an imaging revolution [J]. *Science*, 2002, 297(5582): 761-763.
- [5] Rappaport T S, Xing Y C, Kanhere O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 78729-78757.
- [6] Basar E, Di Renzo M, De Rosny J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 116753-116773.
- [7] Basar E. Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: a new beyond mimo paradigm for 6G [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(5): 3187-3196.
- [8] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [9] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index [J]. *Nature*, 2008, 455(7211): 376-379.
- [10] Paul O, Reinhard B, Krolla B, et al. Gradient index metamaterial based on slot elements [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(24): 241110.
- [11] Yu N, 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.
- [12] Kuznetsov S A, Astafev M A, Beruete M, et al. Planar holographic metasurfaces for terahertz focusing [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 7738.
- [13] Zhao H, Wang X, He J, et al. High-efficiency terahertz devices based on cross-polarization converter [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 17882.
- [14] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction [J]. *Science*, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [15] Jia M, Wang Z, Li H, et al. Efficient manipulations of circularly polarized terahertz waves with transmissive metasurfaces [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 16.
- [16] Hu D, Wang X, Feng S, et al. Ultrathin terahertz planar elements [J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(2): 186-191.
- [17] Yang Q, Gu J, Wang D, et al. Efficient flat metasurface lens for terahertz imaging [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25931-25939.
- [18] Wang Q, Zhang X Q, Xu Y H, et al. A broadband metasurface-based terahertz flat-lens array [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(6): 779-785.
- [19] He J, Dong T, Chi B, et al. Meta-hologram for three-dimensional display in terahertz waveband [J]. *Microelectronic Engineering*, 2020, 220: 111151.
- [20] He J, Wang X, Hu D, et al. Generation and evolution of the terahertz vortex beam [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20230-20239.
- [21] He J, Wang S, Xie Z, et al. Abruptly autofocusing terahertz waves with meta-hologram [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2787-2790.
- [22] 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.
- [23] Liang L, Qi M, Yang J, et al. Anomalous terahertz reflection and

- scattering by flexible and conformal coding metamaterials [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(10): 1374-1380.
- [24] Gao L-H, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(9): e324-e324.
- [25] Liu S, Cui T J, Zhang L, et al. Convolution operations on coding metasurface to reach flexible and continuous controls of terahertz beams [J]. *Advanced Science*, 2016, 3(10): 1600156.
- [26] Wang B, Quan B, He J, et al. Wavelength de-multiplexing metasurface hologram [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35657.
- [27] Wang S, Wang X, Kan Q, et al. Spin-selected focusing and imaging based on metasurface lens [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26434-26441.
- [28] Zhang H, Zhang X, Quan X, et al. High-efficiency dielectric metasurfaces for polarization-dependent terahertz wavefront manipulation [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(1): 1700773.
- [29] Seo M, Kyoung J, Park H, et al. Active terahertz nanoantennas based on VO₂ phase transition [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(6): 2064-2068.
- [30] 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.
- [31] Fang Z, Thongrattanasiri S, Schlather A, et al. Gated tunability and hybridization of localized plasmons in nanostructured graphene [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(3): 2388-2395.
- [32] Ju L, Geng B, Horng J, et al. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(10): 630-634.
- [33] Wei B, Hu W, Ming Y, et al. Generating switchable and reconfigurable optical vortices via photopatterning of liquid crystals [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(10): 1590-1595.
- [34] Kanda N, Konishi K, Kuwata-Gonokami M. All-photoinduced terahertz optical activity [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3274-3277.
- [35] Lv 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.
- [36] Shen N H, Massaouti M, Gokkavas M, et al. Optically implemented broadband blueshift switch in the terahertz regime [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(3): 037403.
- [37] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Ultrafast optical switching of terahertz metamaterials fabricated on ErAs/GaAs nanoisland superlattices [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(12): 1620-1622.
- [38] He J, Xie Z, Sun W, et al. Terahertz tunable metasurface lens based on vanadium dioxide phase transition [J]. *Plasmonics*, 2016, 11(5): 1285-1290.
- [39] Wang T, He J, Guo J, 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.
- [40] Liu X, Wang Q, Zhang X, et al. Thermally dependent dynamic meta-holography using a vanadium dioxide integrated metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(12): 1900175.
- [41] Georgiou G, Tserkezis C, Schaafsma M C, et al. Active loaded plasmonic antennas at terahertz frequencies: optical control of their capacitive-inductive coupling [J]. *Physical Review B*, 2015, 91(12): 125443.
- [42] Large N, Abb M, Aizpurua J, et al. Photoconductively loaded plasmonic nanoantenna as building block for ultracompact optical switches [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(5): 1741-1746.
- [43] Georgiou G, Tyagi H K, Mulder P, et al. Photo-generated Thz antennas [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 3584.
- [44] Steinbusch T P, Tyagi H K, Schaafsma M C, et al. Active terahertz beam steering by photo-generated graded index gratings in thin semiconductor films [J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26559-26571.
- [45] Okada T, Ooi K, Nakata Y, et al. Direct creation of a photoinduced metallic structure and its optical properties in the terahertz frequency region [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1719-1721.
- [46] Kanda N, Konishi K, Kuwata-Gonokami M. Dynamics of photo-induced terahertz optical activity in metal chiral gratings [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3510-3512.
- [47] Chatzakis I, Tassin P, Luo L, et al. One- and two-dimensional photo-imprinted diffraction Gratings for Manipulating terahertz waves [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(4): 043101.
- [48] Okada T, Tanaka K. Photo-designed terahertz devices [J]. *Scientific Reports*, 2011, 1(10): 121.
- [49] Kamaraju N, Rubano A, Jian L, et al. Subcycle control of terahertz waveform polarization using all-optically induced transient metamaterials [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(2): e155.
- [50] He J W, Wang X K, Xie Z W, et al. Reconfigurable terahertz grating with enhanced transmission of TE polarized light [J]. *APL Photonics*, 2017, 2(7): 076102.
- [51] Wang X, Xie Z, Sun W, et al. Focusing and imaging of a virtual all-optical tunable terahertz Fresnel zone plate [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4731-4734.
- [52] Xie Z, He J, Wang X, 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.
- [53] Guo J, Wang T, Zhao H, et al. Reconfigurable terahertz metasurface pure phase holograms [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(10): 1801696.