

从远场到近场:太赫兹超表面波前调控

张莹¹, 巴灵丽², 阳权龙^{2*}, 韩家广^{3,4}

¹云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500;

²中南大学物理与电子学院, 湖南 长沙 417100;

³天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

⁴桂林电子科技大学光电工程学院, 广西 桂林 541004

摘要 太赫兹是电磁波研究中的前沿热点之一,在通信、雷达、生物化学检测等方面有巨大的应用前景。人工电磁材料,特别是超表面的出现和发展,为太赫兹的高效波前控制提供了新的思路和方法。从太赫兹电磁场空间分布的角度出发,阐述了目前超表面在太赫兹波段波前调控的相关工作和方法,对比和讨论了太赫兹远场和近场波前调控的多类应用场景和调控方法,对太赫兹超表面波前调控的发展前景进行了展望,为研究太赫兹波前调控提供了新思路。

关键词 太赫兹; 超表面; 波前调控; 表面波

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231640

From Far-Field to Near-Field: Terahertz Wavefront Control with Metasurface

Zhang Ying¹, Ba Lingli², Yang Quanlong^{2*}, Han Jianguang^{3,4}

¹Institute of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, Yunnan, China;

²School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 417100, Hunan, China;

³College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

⁴School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract Terahertz, one of the cutting-edge research hotspots in electromagnetic waves, shows enormous application prospects in communication, radar, and biochemical detection and so on. The emergence and development of artificial electromagnetic materials, especially metasurface, provide a new avenue for efficient wavefront control at terahertz frequency. We elaborate on the relevant works of terahertz metasurface for wavefront control from the perspective of the spatial distribution of the terahertz electromagnetic field. We discuss various design details and application scenarios of terahertz far-field and near-field wavefront control and provide the development prospects of terahertz metasurface wavefront control in the future, which provide new ideas for the study of terahertz wavefront control.

Key words terahertz; metasurface; wavefront control; surface wave

1 引言

太赫兹是位于远红外和毫米波之间的电磁波。随着飞秒激光、半导体、非线性技术以及量子级联激光器等方面的发展,实用的太赫兹产生和探测技术被提出,太赫兹波成为了国内外电磁波研究的热点波段。由于其独特的性质,太赫兹在生物检测以及分析、成像、通信和雷达领域有着广泛的应用^[1-3]。目前缺乏有效调

控太赫兹介电常数的自然材料,对应的诸如透镜、相位板等波前操控器件。现有的商用化器件体积大,价格成本较高,这在一定范围内限制了太赫兹的发展与应用。因此,研制高效、经济且体积小的太赫兹波前调控器件可以有效解决困扰太赫兹发展的瓶颈问题。

超表面是由亚波长尺寸的人工微纳单元结构组成的新型功能材料,按照需求设计其特定的振幅或者相位分布可以实现对电磁波的偏振、振幅、相位的调控。

收稿日期: 2023-06-30; 修回日期: 2023-08-10; 录用日期: 2023-08-22; 网络首发日期: 2023-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(61905207,61935015,62205380)、云南省基础研究计划(202301AT070075,202001AU070063)

通信作者: *quanlong.yang@csu.edu.cn

相比自然界材料,它具有很高的灵活性,为实现太赫兹波段的高效波前调控发展提供了一种新的思路和方法^[4-7]。目前,研究者已经完成了一系列基于超表面的太赫兹波前调控的研究工作,并在透镜、全息、复用、矢量光束等方面探索了其广泛的应用场景。考虑到不同的材料、周期以及电磁场分布的特点,太赫兹超表面波前调控的工作可以分为金属和介质超表面,周期、准周期和随机分布超表面以及超表面远场和近场波前调控等等。其中,对于太赫兹的远场和近场波前调控,电磁场分布的特点就决定了两者在原理、实现方法以及应用场景上有着很大的区别。首先,远场波前调控是对

空间光进行调控,近场调控主要针对在表面上传播的包括表面波或者边界态等束缚态,两者的色散曲线存在本质区别;其次,两者在加工方法和产生及探测手段方面也有着很大的区别;另外远场和近场超表面波前调控在应用场景上也存在较大的差异。

如图 1 所示,本文将从太赫兹电场分布的特点出发,从远场和近场分布两个空间角度分析太赫兹超表面波前调控的特点以及面临的挑战;从现有的工作出发阐述其不同应用场景下的发展趋势;最后对太赫兹超表面波前调控未来可能的发展方向进行展望。

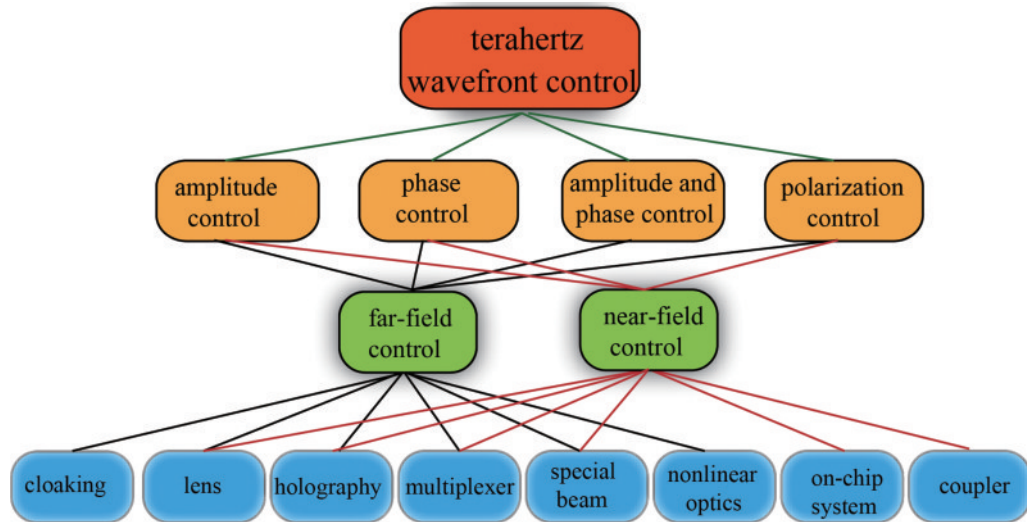


图 1 太赫兹超表面波前调控的不同应用场景和调控方法

Fig. 1 Different application scenarios and control methods of terahertz wavefront control with metasurface

2 太赫兹超表面波前调控方法和远场分布特点

2.1 太赫兹超表面波前调控方法

由惠更斯原理可知,一个波阵面上的每个点可认为是产生新的次级球面波的中心波源,次级波源的波速与频率等于初级波的波速与频率。通过控制每个子波源的振幅、相位、偏振等分布,可以实现任意波前的调控。在超表面的设计中,通常将连续的振幅和相位分布离散化为一个个单独的单元结构,每个独立的单元结构可以看作波阵面新的子波源。当单元结构阵列满足所设计的功能对应的振幅或者相位分布时,在远场和近场可以实现太赫兹的波前调控。总的来说,超表面的波前调控是通过振幅调控、相位调控、偏振调控、振幅和相位同时调控等 4 种不同的途径来实现的,如图 1 所示。

振幅分布型的超表面通常关注超表面本身的透射率和反射率,通过透过和反射的太赫兹波的干涉效应来实现对应的功能。这在太赫兹的波前调控工作中不常见,仅在菲涅耳透镜以及一部分超表面光栅的工作中涉及。而相位分布型的超表面是目前最常用的,它借助超表面单元结构的谐振引起的相位突变,对透射

光和反射光的相位进行有效调控。另外,改变单元结构的尺寸和形状等可以实现对谐振频率的调控,满足不同频段的设计要求。需要注意的是,人们通常选取透射率或者反射率都相同的单元结构,从而消除振幅分布不均匀所带来的调制,如超表面透镜和超表面涡旋光束产生。在一些特殊的太赫兹波前调控的工作中,振幅分布也需要被考虑进来,如在太赫兹超表面全息中同时引入振幅和相位调控可以实现高质量和高精度的全息成像。另外偏振态调控也可以引入太赫兹的波前调控,它主要是振幅和相位分布共同作用的结果。本文主要讨论基于相位分布调控和振幅与相位分布同时调控这两类的太赫兹超表面波前调控。

2.2 太赫兹远场和近场分布特点

远场分布是指电磁波在自由空间或者介质中传播时的光场分布,其频率与波矢为线性关系。而近场分布是指电磁波(包括表面等离子激元或拓扑边缘态等具有高度束缚性的表面波)沿界面传播时的二维电场分布,当电磁波的传播常数大于光在自由空间或者介质中传播的波矢时,电磁波才能被束缚在界面传播。由于近场中的电磁波波矢和自由空间中的电磁波波矢不匹配,表面波和自由空间的电磁波无法直接相互转换。

空间场分布的特点决定了太赫兹远场和近场波前调控的不同。从激发源和探测源来说:太赫兹远场可以利用现有常见的太赫兹源和探测器;而近场则需要引入探针或者周期性亚波长孔阵列等来对太赫兹波进行耦合入和耦合出。从传播路径来说:太赫兹近场调控中,由于电磁波被束缚在界面中传播,相比于远场调控,其具有尺寸小的特点;不同于远场调控的自由空间的均匀分布,近场的场分布都局限在某些特定的区域;此外近场调控中电磁波的损耗通常要比在自由空间中的大。最后从超表面设计的角度来说:太赫兹远场调控可以利用单元结构本身的谐振来控制太赫兹波的振幅和相位;而近场调控更多从色散曲线出发来设计单元结构。下面将从这些不同点出发,阐述太赫兹超表面波前调控的发展。

3 太赫兹远场波前调控

3.1 太赫兹偏折镜和透镜

作为光学系统中最常用的器件,偏折镜和透镜在很多场景中有着广泛的用途,包括成像、通信和探测等。目前基于超表面的偏折镜、透镜、消色差透镜和惠更斯透镜等层出不穷。Zhang 等^[8]设计了一种由 C 型开口谐振环组成的太赫兹超表面,通过改变谐振环的开口尺寸和角度来满足特定的相位不连续,实现了宽带的波阵面倾斜,并验证了不同入射角和偏振的影响,如图 2(a)所示。后续 Su 等^[9]设计了太赫兹波阵面主动调控器件,该器件由在掺杂半导体衬底上制造的互补 C 型开口谐振环元件组成,通过混合金属-半导体形成的肖特基二极管效应以及施加外部电压偏置可以改变掺杂半导体衬底的实时电导率,从而主动控制异常偏转太赫兹波的角度。

不同于偏折镜的线性相位分布,要实现透镜的聚焦则需要满足特定的二次相位分布:

$$\Delta\varphi = \left(\sqrt{f^2 + r^2} - f\right) \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为半径 r 处与中心点的相位差; f 为透镜的焦距; λ 为工作波长。基于此,Yang 等^[10]设计了一种基于金属-介质-金属结构的高效太赫兹超表面透镜,该超表面由薄介质层 BCB 间隔两侧的开槽金属谐振器阵列组成,如图 2(b)所示。通过改变单元结构的几何参数以满足特定的相位分布,能够将太赫兹波的光斑聚焦到一个波长的大小,其透射效率为 56%。该设计是偏振不敏感的,即使在广角入射下也能有效工作。后续该课题组^[11]还利用太赫兹近场扫描系统进行了实验验证,实验证明该透镜可以在正入射和小角度入射的场景下高效工作,工作效率为 45%。Wang 等^[12]设计了图 2(c)所示的 C 型开口环谐振器构成的太赫兹透镜阵列,该超透镜可以将 x 偏振的入射太赫兹波聚焦成一个 y 偏振的光斑,该超表面透镜阵列能够在 0.5~0.9 THz 范围内工作。后续基于类似的金属结构,其他课题组^[13-16]也

对金属超表面透镜进行了探索。

但是金属的欧姆损耗使金属超表面透镜的效率无法被提高,因此,后续人们的研究重点转变为介质材料。Zhang 等^[17]利用介质方形柱实现了偏振无关的太赫兹超表面透镜,该透镜可以实现高达 64.5% 的透射效率。Wang 等^[18]也利用介质方形柱的几何相位实现了透射效率高达 88% 的太赫兹超表面透镜。受限于硅与空气之间的大折射率差所带来的反射,一般的介质超表面透镜的效率还是无法被进一步提高。惠更斯超表面的提出为提高透镜的效率提供了一种新的方法^[19-22]。它通过控制电偶极子和磁偶极子的重合来消除后向反射,理论上可以实现近似 100% 的透射效率。惠更斯超表面透镜首先在其他波段得到了验证^[23-24]。Yang 等^[25]提出了一种基于 Mie 谐振的高效全介质惠更斯超表面的新设计。该设计由 free-standing 的介质薄膜超表面打孔构成,可以有效操控电偶极子和磁偶极子的重合,消除基底所带来的附生影响,通过改变孔的大小来满足透镜的相位分布。实验实现了高达 84.7% 的工作效率,如图 2(d)所示。

由于超表面透镜通过谐振所引入的相位突变来满足相位,因此太赫兹超表面透镜存在明显的色差。尽管超表面透镜可以在一定频率范围内工作,但是不同频率的焦点并不重合。消色差透镜的出现可以有效解决这一色差问题。消色差透镜将透镜的相位分布分成两部分:一部分为某个固定频率的相位(可以是工作频率范围的最小或者最大频率),这一部分跟频率无关;另一部分为给定半径位置处与频率相关的相位差。相比普通的超表面透镜,设计消色差透镜单元结构时,同时满足两部分相位要求需要更丰富的单元结构库。一系列基于多种不同金属单元和介质复合柱的多种设计方案首先在光波段被提出^[26-29]。Cheng 等^[30]提出了一种基于 C 形结构的消色差超表面,其工作范围为 0.3~0.8 THz,带宽超过中心频率的 91%,具有 68% 以上的工作效率以及相对较高的数值孔径(0.385)。后续 Gao 等^[31]设计了偏振不敏感的介质消色差超表面透镜,模拟了其焦距和不同频率下焦点的半高全宽,证明了消色差透镜与彩色对应物相比的不同消色差行为。Xu 等^[32]进一步提出了一种由 Si-SiO₂-Si 夹层结构组成的新型单元结构,该单元结构由上下两层超表面构成,且高和宽比之前设计的要小很多,这样可以有效简化消色差透镜单元结构的设计和加工难度。实验证明该消色差透镜可以在 0.5~1.1 THz 范围内实现无色差的聚焦,平均效率为 43.1%,数值孔径为 0.47,如图 2(e)所示。

3.2 太赫兹全息

传统的全息图实现方法基于参考光和来自物体的散射波之间的干涉。数字全息图通过计算全息干涉图样(相位信息)并将其编码到表面结构生成全息图像,如超表面或者空间光调制器(SLM)等。由于超表面可以精确地操纵电磁波的波前,因此许多研究围绕超

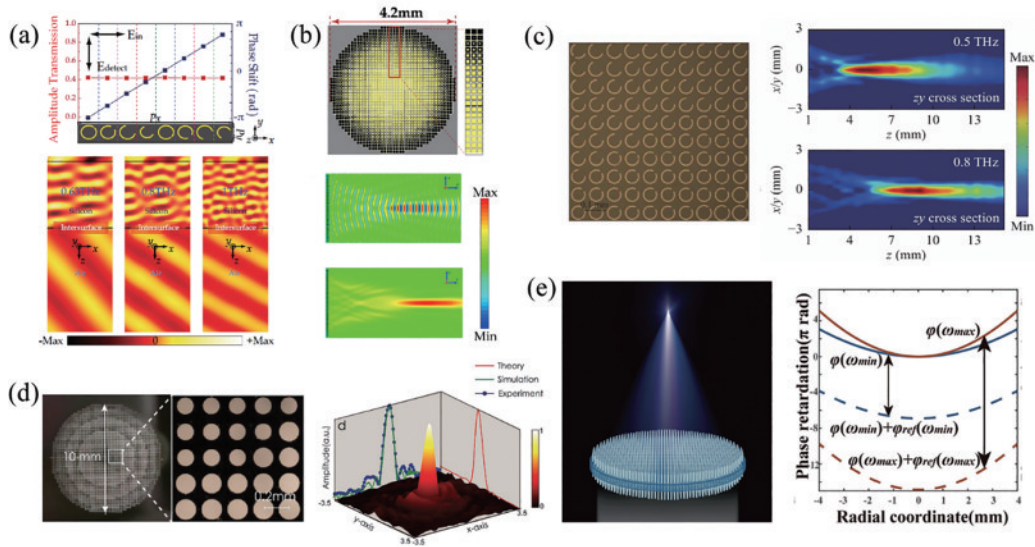


图2 太赫兹超表面偏折镜和透镜。(a)太赫兹超表面偏折镜^[8];(b)(c)太赫兹金属超表面透镜^[10,12];(d)太赫兹惠更斯超表面透镜^[25];(e)太赫兹消色差超表面透镜^[32]

Fig. 2 Terahertz metasurface deflectors and lenses. (a) Terahertz metasurface deflector^[8]; (b)(c) terahertz metal metasurface lens^[10,12]; (d) terahertz Huygens metasurface lens^[25]; (e) terahertz achromatic metasurface lens^[32]

表面生成全息图展开。与基于SLM的全息技术相比,全息超表面具有更高的图像质量,更宽的工作频率和更广泛的视野,也成为了电磁波研究中的一个热点,首先在其他波段得到了验证^[33-38]。

2013年,Hu等^[39]采用互补的V形天线金属结构设计了太赫兹超表面全息图,通过控制V形天线臂的长度和开口角度,将全息所需的相位分布编码到超表面上。实验中在距离超表面4 mm的观察平面上得到了字母“C”“N”“U”的图像,验证了太赫兹超表面的全息成像效果。但是仅用相位分布得到的全息图的质量较差,后续Wang等^[40]设计了具有不同旋转角度和开口角度的C形开口谐振环,同时实现了振幅和相位调制,如图3(a)所示。结果表明,在 x 偏振太赫兹波的照明下,在超表面后面可以清晰地观察到由“T”“J”和“U”等字母重建的全息图。相比仅由相位调制的相同字母的全息图,振幅和相位同时调制产生的全息图的分辨率要明显优于单相位全息图的分辨率。通常全息超表面只调制虚拟物体的振幅分布,经常忽略了重建图像的相位分布,这不可避免地会导致信息丢失。为了解决这一问题,Wang等^[41]通过对虚拟对象的相位分布和振幅分布进行设计,提出了将介电硅柱谐振器作为基本单元结构的全息超表面,并且在理论和实验上都证明了全息图像沿纵向(z 轴)的移动、拉伸和旋转特性。图3(b)是当 x 极化沿 z 轴不同位置正入射到1.0 THz时 y 极化电场分量的振幅分布,可以清晰地看到“T”组件沿着 z 轴从4 mm平移到8 mm的位置。超表面所能实现的功能主要取决于其单元控制局部电磁响应的能力,即单元完全记录目标图像信息的能力。为了实现光的完全控制,Wu等^[42]设计了由两个独立的各向异性介质单元结构组成的全息超表面,其相

互之间的干涉实现了对相位、振幅和偏振的完全控制。此外,他们还设计了偏振无关、偏振依赖和矢量超全息图,并进行了实验表征。图3(c)是该超表面结构在 x 和 y 偏振照明下生成的不同字母“A”和“P”的全息图像。后续其他课题组^[43-45]也实现了一系列基于波长和偏振光的太赫兹超表面全息复用,通过改变入射光的波长或者偏振态信息,得到了不同的全息图像,如图3(d)所示。此外,基于光子超表面也可以实现动态可调的太赫兹超表面全息图像^[46]。

3.3 太赫兹复用器件

太赫兹复用器件主要基于不同偏振态或者光场模式等相互独立的参数来实现不同功能的复用。太赫兹超表面复用器件在拓展太赫兹系统与器件功能的多样性上有着重要的应用,不仅能够减少超表面器件的数量,从而降低太赫兹系统的复杂性,还能进一步扩展太赫兹成像和通信等应用场景,因此受到了很多关注。

偏振态作为光的一种基本参数,最先被用于太赫兹超表面复用器件。图4(a)展示了一种基于光控硅和开口谐振环的主动太赫兹偏振分束器,通过改变光控硅的电导率,实现了正常光和偏振光60:40的分束比,该器件也可被用于诸如可变焦距透镜或者实时全息显示等领域^[47]。Yang等^[48]基于椭圆孔的介质薄膜超表面实现了偏振敏感型的太赫兹复用器件,该器件可以从水平偏振下的反射性介质磁镜转变为垂直偏振下的透明惠更斯超表面。这一偏振选择性可以通过改变椭圆介质孔的Mie-谐振多极子干涉来实现,如图4(b)所示。此外基于单元结构对偏振态的选择性,可以实现不同偏振态的不同全息成像。后续发展出了一些基于正交偏振态的偏振复用器件,包括线偏振选择和手性

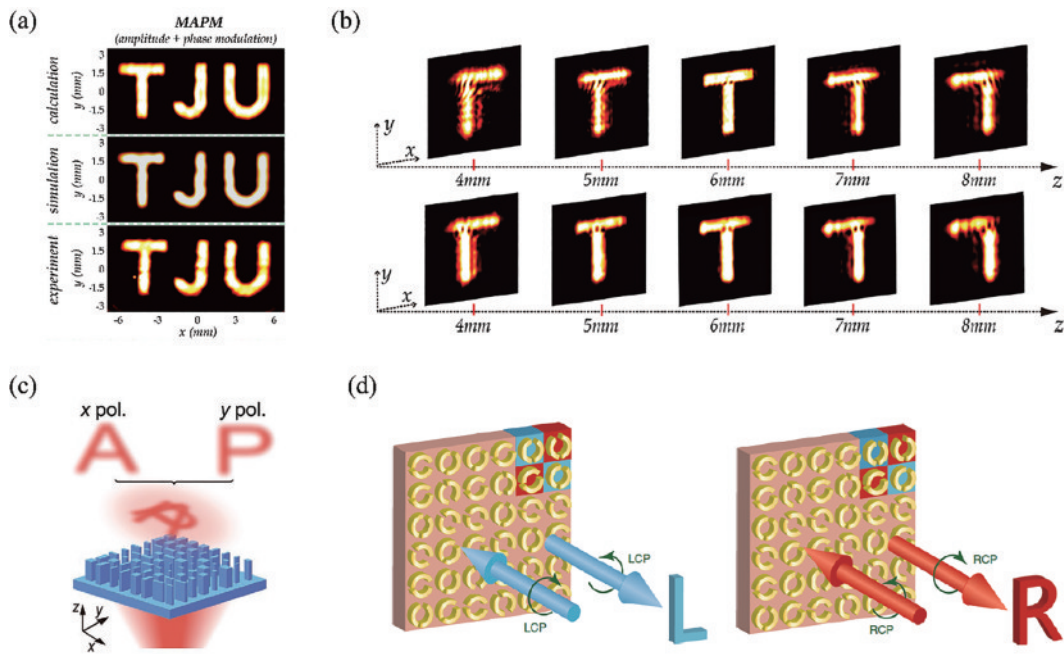


图3 太赫兹全息超表面。(a)振幅相位同时调制的太赫兹全息超表面^[40]；(b)太赫兹超表面全息图样的纵向移动^[41]；(c)全参数控制的太赫兹全息超表面^[42]；(d)太赫兹手性全息超表面^[43]

Fig. 3 Terahertz holographic metasurfaces. (a) Terahertz holographic metasurface with simultaneously modulated amplitude and phase^[40]; (b) longitudinal movement of holographic pattern from terahertz metasurface^[41]; (c) terahertz holographic metasurface with full-parameter control^[42]; (d) terahertz chiral holographic metasurfaces^[43]

全息成像等一系列的工作^[49-53]。

除了偏振复用器件以外,模分复用器件也在太赫兹波前调控等领域有了长足的发展。如图4(c)所示,Liu等^[54]利用太赫兹时域近场扫描系统实验验证了多功能介质超表面可以用于太赫兹模分和轨道角动量(OAM)复用。多功能介质超表面可以将入射的太赫兹基模高斯光模式转化为高阶HG(Hermite-Gauss)模式和OAM模式,同时通过引入轴棱锥和偏转镜的相位可以控制出射高阶HG模式的发散并自由控制不同模式之间的空间位置。另外Zhao等^[55]设计了一种可以在太赫兹波段实现OAM复用的单层金属超表面。在高斯光束入射下,该超表面可以产生4个携带不同拓扑电荷 l 的聚焦涡旋光束。当单个涡旋光束作为入射光时,只有一个通道会被识别并被提取焦点,由此实现了OAM解复用,如图4(d)所示。Huang等^[56]基于自旋角动量复用的全介质超表面实现了左右旋圆偏振光不同完美涡旋光束的产生。此外基于OAM和频率等多维度的复用,不同通道的离轴圆偏振光可以转化成多个垂直偏振的共轴光束^[57-58]。这些工作拓展了太赫兹模分复用和OAM复用的信号通道和功能,对发展下一代太赫兹无线通信技术(6G)的带宽具有重要的指导意义。

3.4 太赫兹特殊光束

超表面通过控制自旋角动量或OAM和相位可以产生涡旋光束、贝塞尔光束、艾里光束等特殊光束,这些特殊光束在超分辨成像、颗粒捕捉以及通信等方面

有着重要的作用。如图5(a)所示,Yang等^[25]利用介质薄膜超表面实现了径向的线性相位分布,在太赫兹波段实现了高效贝塞尔光束的产生。所产生的贝塞尔光束在1.2 cm (33λ)波长以上传播,其透射效率为75%以上,且实验观察到了中心光束周围的高阶衍射模式。由此可知,贝塞尔光束的无衍射传播距离要比上述超表面透镜远的多。Liu等^[59]也利用多层金属C形环所组成的透射型编码超表面来设计线性的相位分布实现了长距离传播的贝塞尔光束的产生。Zhang等^[17,60]也利用介质方形柱和六边形分布的圆形介质柱实现了偏振无关和偏振相关的无衍射贝塞尔光束的产生。除透射式的贝塞尔光束外,Ma等^[61]利用介质立方谐振体控制反射光的振幅和相位实现了反射型的贝塞尔光束的产生。艾里光束由于其不扩散、自弯曲以及光斑自愈等特点在太赫兹波段也受到了许多的关注。图5(b)是通过改变硅介质柱的尺寸与朝向来产生特定的相位分布,从而产生太赫兹艾里光束的设计。该超表面可以在0.4~0.8 THz产生无色差的艾里光束。经过实验验证,该艾里光束对于散射子有光自愈能力^[62]。同样的设计方法也可以实现二维艾里光束的产生^[63]。Wen等^[64]基于产生艾里光束的立方相位和非涅耳透镜相位构成的合成相位实现了一系列工作距离可调的艾里光束的产生。

涡旋光束由于其携带的OAM的独特性质引起了人们的关注,也有很多工作在太赫兹波段对其进行了验证。上述Zhang等^[17,60]和Ma等^[61]在验证贝塞尔光

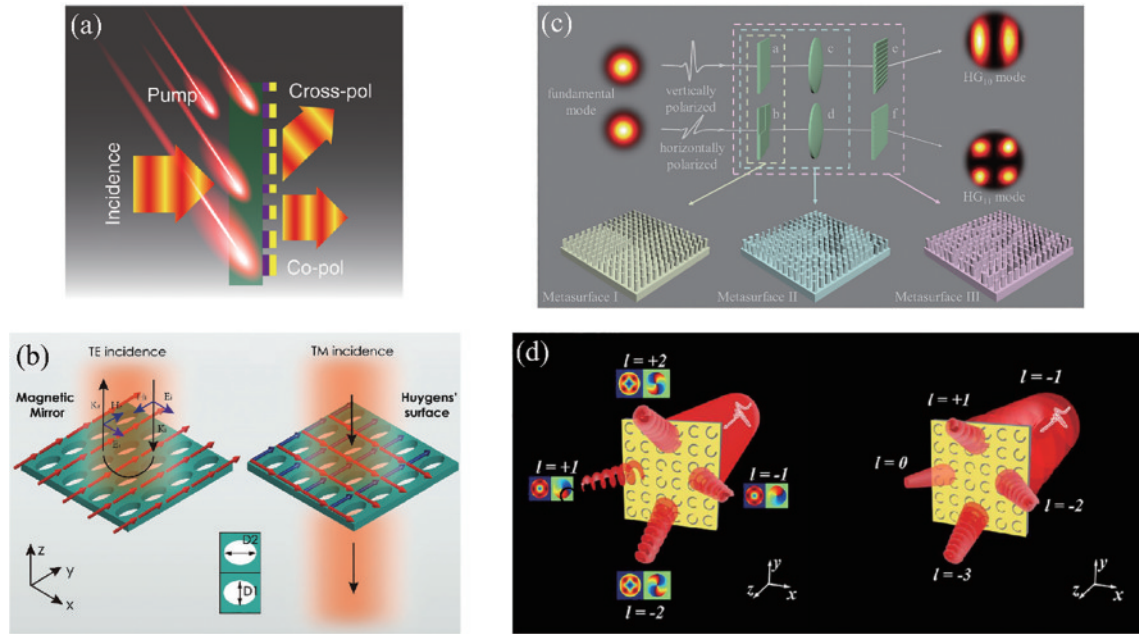


图 4 太赫兹复用器件。(a)太赫兹偏振复用主动多功能器件^[47];(b)太赫兹偏振复用超表面^[48];(c)太赫兹模分复用器件^[54];(d)太赫兹 OAM 复用器件^[55]

Fig. 4 Terahertz multiplexing devices. (a) Terahertz polarization multiplexing active multifunctional device^[47]; (b) terahertz polarization multiplexing metasurface^[48]; (c) terahertz mode division multiplexing device^[54]; (d) terahertz OAM multiplexing device^[55]

束的同时,也从实验上对涡旋光束的产生进行了验证。除此之外,还有一些工作报道了比较特殊的涡旋光束的产生。图 5(c)展示了一种通用的产生太赫兹涡旋光束的方法,即通过自选-解耦合的相位来同时控制单元结构的动态相位和几何相位,实现两个圆偏振光分量的干涉,从而产生偏振相关的太赫兹涡旋光束和矢量贝塞尔光束^[65]。Liu 等^[66]利用多功能超表面的相位叠加实现了涡旋光束的产生,并引入负的轴棱锥相位,产生了一种特殊的涡旋光束——准完美涡旋光束。准完美涡旋光束拥有更小的发散角和更小的环宽度,为实现高效太赫兹 OAM 复用提供了新的方法。除了以上常见的特殊光束外,Guo 等^[67]通过改变十字金属结构的尺寸和朝向实现了连续的振幅和相位调制,产生了一种径向偏振分布的特殊光束——洛伦茨光束,该光束可以调控入射光的空间偏振态分布,如图 5(d)所示。

3.5 非线性太赫兹光场调控

太赫兹波除了利用光电导天线、量子级联激光器或者基于电学方法等常规方法产生,也可以通过将飞秒激光作用于非线性晶体产生光整流效应来产生。通过非线性效应产生的太赫兹波的频带很宽,能覆盖几十 THz,但是需要用几百 mW 甚至 W 量级的飞秒激光放大级来激发。后续发现,利用非线性超表面也可以产生和非线性晶体同量级的太赫兹波,由于其不需要相位匹配和波面倾斜,为非线性太赫兹波的产生提供了一种更加紧凑和高效的方法。基于 U 型开口谐振环和 C3 等结构的高效太赫兹波的产生在实验上得

到了验证^[68-73]。

随后人们发现,通过改变非线性谐振子的尺寸或者朝向,可以改变产生的太赫兹波的相位,从而在产生太赫兹波的同时实现对出射太赫兹波的波阵面调控。目前该方向的研究取得了很大的进展。图 6(a)展示了一种改变开口谐振环的朝向对出射太赫兹光波的角度调控的方法。通过改变红色和蓝色区域的开口谐振环的朝向,使两者存在一个 π 的相位差,从而构建了类似的一维光子晶体^[74]。产生的非线性太赫兹波将沿着多个衍射极次方向上出射,这为操控非线性太赫兹光场提供了新的思路。采用类似的方法可以构建出菲涅耳波带片,从而使产生的非线性太赫兹波聚焦^[75]。Lu 等^[76]也利用类似的开口谐振环和氧化铟锡(ITO)相结合,得到了高效的非线性太赫兹波,并从理论和实验上分析了 ITO 对太赫兹波的增强效应。此外,通过引入水平方向和角度上的相位梯度,实现了非线性太赫兹波左右旋圆偏振光的分束以及不同拓扑电荷数的涡旋光束的产生,如图 6(b)所示。

图 6(c)是利用 ITO 微结构阵列构建的菲涅耳波带片。当波带片被倾斜放置时,入射的飞秒激光可以产生同方向出射的太赫兹波,波带片将太赫兹波聚焦并产生携带不同拓扑电荷数的涡旋光束^[77]。同样,Feng 等^[78]利用对称、斜放置的石英基底镜面上放置的 ITO 层构建轴棱锥,产生了非线性太赫兹柱矢量贝塞尔光束。除此之外,Wang 等^[79]采用金属棒和开口谐振环组成的类似电磁诱导透明的结构,通过改变两者之间的相对位置来控制两者之间的耦合,

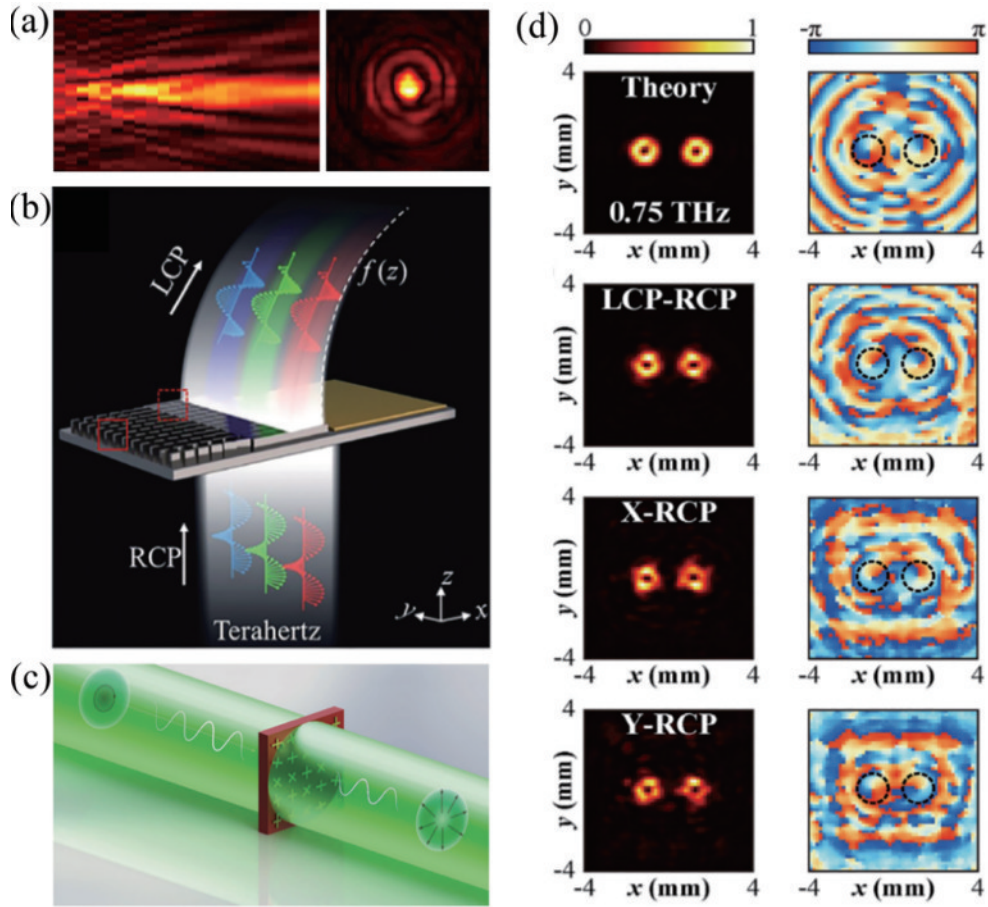


图 5 太赫兹特殊光束。(a)太赫兹贝塞尔光束^[25];(b)太赫兹艾里光束^[62];(c)太赫兹涡旋光束^[65];(d)太赫兹洛伦茨光束^[67]
 Fig. 5 Terahertz special beams. (a) Terahertz Bessel beam^[25]; (b) terahertz Airy beam^[62]; (c) terahertz vortex beam^[65]; (d) terahertz Lorentz beam^[67]

从而使开口谐振环的局域场强变化,实现对非线性太赫兹波强度的控制。并通过该结构分别设计实现

了手性和非手性太赫兹涡旋光束的调控,如图 6(d)所示。

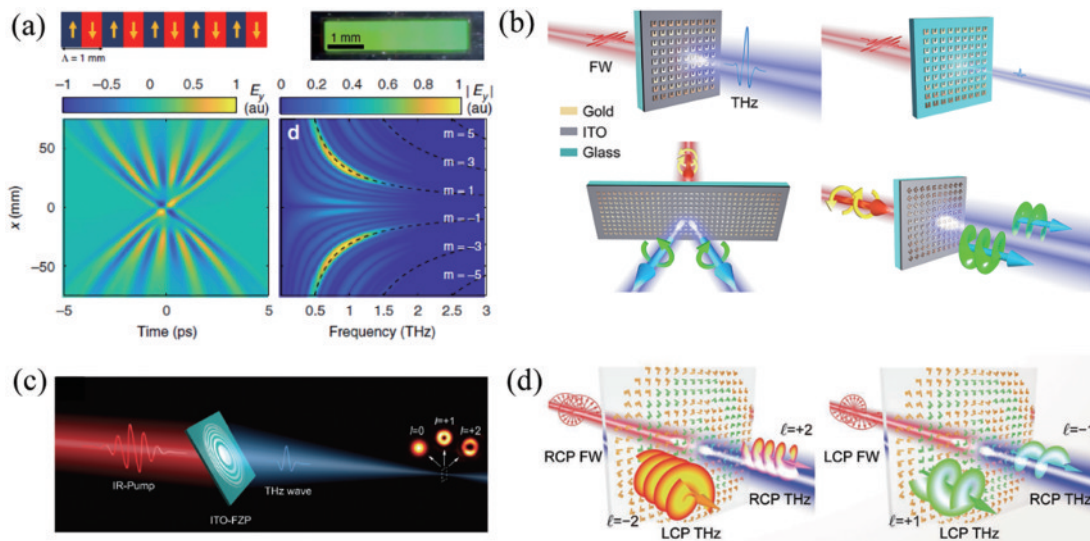


图 6 非线性太赫兹光场调控。(a)非线性太赫兹光子晶体对波阵面的调控^[74];(b)非线性太赫兹光波分束和涡旋光束的产生^[76];
 (c)非线性太赫兹菲涅耳波带片^[77];(d)非线性太赫兹手性和非线性超表面^[79]
 Fig. 6 Nonlinear terahertz wavefront control. (a) Control of wavefronts with nonlinear terahertz photonic crystals^[74]; (b) nonlinear terahertz optical beam splitting and vortex beam generation^[76]; (c) nonlinear terahertz Fresnel bands sheet^[77]; (d) nonlinear terahertz chirality and nonlinear metasurfaces^[79]

3.6 太赫兹隐身与编码超表面

除了上述太赫兹波前控制以外,超表面还在隐身以及信息编码等领域取得了长足的进展。Orazbayev 等^[80]基于相位补偿的方法设计了相位梯度分布的超表面,实现了一个非定向的超薄太赫兹地毯式隐身超表面。该超表面覆盖了一个高度为 4.1 mm、倾斜角为 20° 的三角形区域,可以在 45° 方向上实现一个 35° 角谱范围的隐身。相比于原有三维隐身超表面,该超表面设计更简单,加工更便利。后续 Wei 等^[81]基于反射型金属超表面提供的连续相位变化也实现了一个大范围的 free-standing 地毯式隐身(216.125λ²)超表面,并利用太赫兹角分辨时域光谱系统验证了其隐身效果,该超表面可以实现 44.2% 的反射效率。Chen 等^[82]利用周期性分布的石墨烯方片组成的超表面实现了动态可调的太赫兹透射式隐身。通过改变石墨烯方片的尺寸和费米能级,该超表面可以覆盖在电介质和导体表面,并消除其所带来的散射。此外,Li 等^[83]利用 H 型的金属超表面实现的相位梯度也验证了太赫兹地毯隐身的效果。

通常太赫兹超表面依靠单元尺寸变化来调控其电磁响应,随着超表面研究的发展,采用全数字表征的编码超表面也为太赫兹动态调控提供了新的发展方向。编码超表面通常采用二进制数字编码的形式来表征,即数字比特 0 和 1,等价于出射和反射太赫兹波的相位 0 和 π。有别于传统超表面的 8 阶或者 16 阶等相位不连续分布,该方法可以更加方便地集成动态可调材料或者器件,实现有源调控的功能,这改变了通常超表面设计完成后无法改变设计功能的局限性。该方法最早用于反射型超表面的设计,后续逐渐拓展到透射型以及透/反射型超表面的设计^[59,84-87]。Gao 等^[88]提供了利用数字编码超表面实现宽带和宽角度太赫兹波扩散的新方法。该工作利用金属 Minkowski 分形循环产生 1 比特编码(0 和 180° 相位)、2 比特编码(0、90°、180°、270° 相位)以及多比特编码,由这些编码单元构成特殊的编码序列,从而实现太赫兹的波前调控。后续 Liu 等^[89]设计的各向异性的单元结构实现了超薄且偏振控制灵活的编码超表面,通过控制不同偏振方向上的编码序列,使不同的偏振态实现了不同的功能,扩展了编码超表面的应用场景。此时超表面仅能实现被动式功能,后续编码超表面与主动可调材料和器件,包括液晶、电可调二极管、场可编程门阵列(FPGA)等^[90-94]结合,通过自由控制外部条件,改变编码超表面的单元结构输出高电平或者低电平,从而往数字可调方向发展,进一步扩展了编码超表面的应用范围。如,Liu 等^[94]提出了工作在太赫兹频段的液晶基底可编程超表面。在偏压激励下,液晶分子发生旋转,从而改变太赫兹波的透射相位。按照数字编码功能对不同区域的液晶施加不同偏压,能够实现不同电磁功能的动态可编程控制。

4 太赫兹近场波前调控

4.1 表面等离子激元耦合器

表面等离子激元是沿金属-介质分界面传播的二维电磁波。由于在太赫兹波段缺少直接的表面等离子激元源,通常需将自由空间的光耦合为表面等离子激元,耦合的关键是激发光的波矢与表面波的波矢相等,即相位匹配。传统的耦合方法有:边缘散射激发、波导耦合激发、棱镜耦合激发和直接激发。下面主要介绍基于超表面激发表面波并控制表面波的波阵面的方法。亚波长金属狭缝孔是用来激发表面波的一种常用结构,Han 课题组^[95]开展了一系列太赫兹表面等离子激元的研究工作,其中部分工作皆利用亚波长孔阵列将垂直入射的自由空间光耦合为表面波,使周期结构孔阵列的倒格子矢 \mathbf{G} 等于表面波波矢 \mathbf{k} ,通过改变周期大小实现不同频率表面波的激发。除此之外,他们还将孔阵列设计为弧线型,实现了会聚型表面波的激发^[96]。通常利用此方法激发的表面波波面依赖于激发区域的结构形状。2015 年,Xu 等^[97]利用特殊间距的两列狭缝孔激发表面波,并通过实验验证了表面波的激发方向依赖于入射光的偏振态。实验结果表明:当左旋圆偏振光入射时,表面波沿右侧传播;而当右旋光入射时,表面波沿左侧传播。同年,Wang 等^[98]同样将相互垂直的金属狭缝孔作为激发单元,通过改变狭缝的相对位置而引入传播相位,实现了对激发的表面波的会聚,并且会聚点同样依赖于入射光的偏振,左旋光入射时表面波会聚于结构左侧,右旋光入射时表面波会聚于结构右侧,因此该结构也可作为偏振探测器。

2011 年,哈佛大学 Capasso 教授课题组^[99]提出相位不连续的概念,即在两种介质的界面处放置一系列微结构,入射光与界面微结构相互作用后相位突变,可有效调控出射光相位实现对波前的控制。引入相位不连续后,入射光 θ_i 与出射光 θ_t 之间满足:

$$n_t \sin \theta_t = n_i \sin \theta_i + \frac{1}{k_0} \frac{d\varphi}{dx}, \quad (2)$$

式中: n_i 和 n_t 为入射介质和出射介质的折射率; $d\varphi/dx$ 为相位梯度; k_0 为自由空间光的传播常数。由式(2),即广义斯内尔定律可知,当入射角 θ_i 一定时,出射光角度 θ_t 可由相位梯度 $d\varphi/dx$ 决定。因此只需在介质界面构建微结构单元,改变微结构大小及旋向,使其相位在 2π 范围内可调,即可控制出射光波面。Zhang 等^[100]将此概念运用于表面等离子激元的激发及波面控制。采用尺寸相同的双狭缝孔为激发单元,如图 7(a)所示,两狭缝中心间距为 $\lambda_{spw}/2$ (λ_{spw} 为单个狭缝的谐振波长),各自的中心线与水平方向的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ,且夹角满足 $\theta_2 - \theta_1 = 270^\circ$ 。当圆偏振光 $E = \sqrt{2}/2 (1, \sigma i)$ [σ 为圆偏振光的旋向(+1 为左旋圆偏振, -1 为右旋圆偏振)]垂直入射到狭缝上,在距离狭缝中心 l 处的表面波场可表示为

$$\mathbf{E}_{\pm x} = \frac{Ae^{ik_{sp}l}}{2\sqrt{l}} e^{i\sigma(\theta_1 + \theta_2 + \pi/2)} \cdot (\pm \hat{x}), \quad (3)$$

式中: A 为表面波振幅; \hat{x} 为沿 x 方向的单位矢量。由式(3)可知, 激发出表面波的相位取决于狭缝的旋向 ($\theta_2 + \theta_1$) 以及入射圆偏振光的旋向。将双孔结构沿竖直方向排列, 依次改变相邻双孔结构的旋转角度, 可以形成线性的相位变化, 进而实现对表面波出射角度的控制。同时, 当入射电磁波的圆偏振光旋向变化时, 表面波出射角度也随之变化, 如图 7(b) 所示。Wei 等^[101] 将单列的双孔结构扩展到三列 [图 7(c)], 分别设计每一列双孔结构的旋转角度以控制不同频率表面波的激发相位分布, 并且利用双层狭缝缩小表面波的带宽, 最终使不同频率的表面波聚焦于不同点, 且使表面波具

有波分复用的功能。Xu 等^[102] 通过引入振幅调控的策略进一步扩展了表面波的波前调控。双狭缝不再固定为相互垂直, 其排列方式由列推广至闭合圆环, 如图 7(d) 所示, 通过改变孔的旋转角度可以在环内生成表面波的复杂全息轮廓。除了金属狭缝, C 形狭缝谐振器也可作为激发表面波的单元结构。Xu 等^[103] 选用 10 个 C 形狭缝谐振器构建了线性梯度相位超表面, 通过改变其几何参数和旋转角度同时控制激发表面波的相位和振幅, 使沿激发方向的相位梯度满足 $d\varphi/dx = k_{spw}$ (k_{spw} 为波矢 k 在 x 方向上的分量), 实现了垂直入射的自由空间光到表面波的耦合 [图 7(e)]。同时他们还令垂直于激发方向的相位梯度为某一常数, 即 $d\varphi/dy = C$, 实现了倾斜出射的波面, 如图 7(f) 所示。

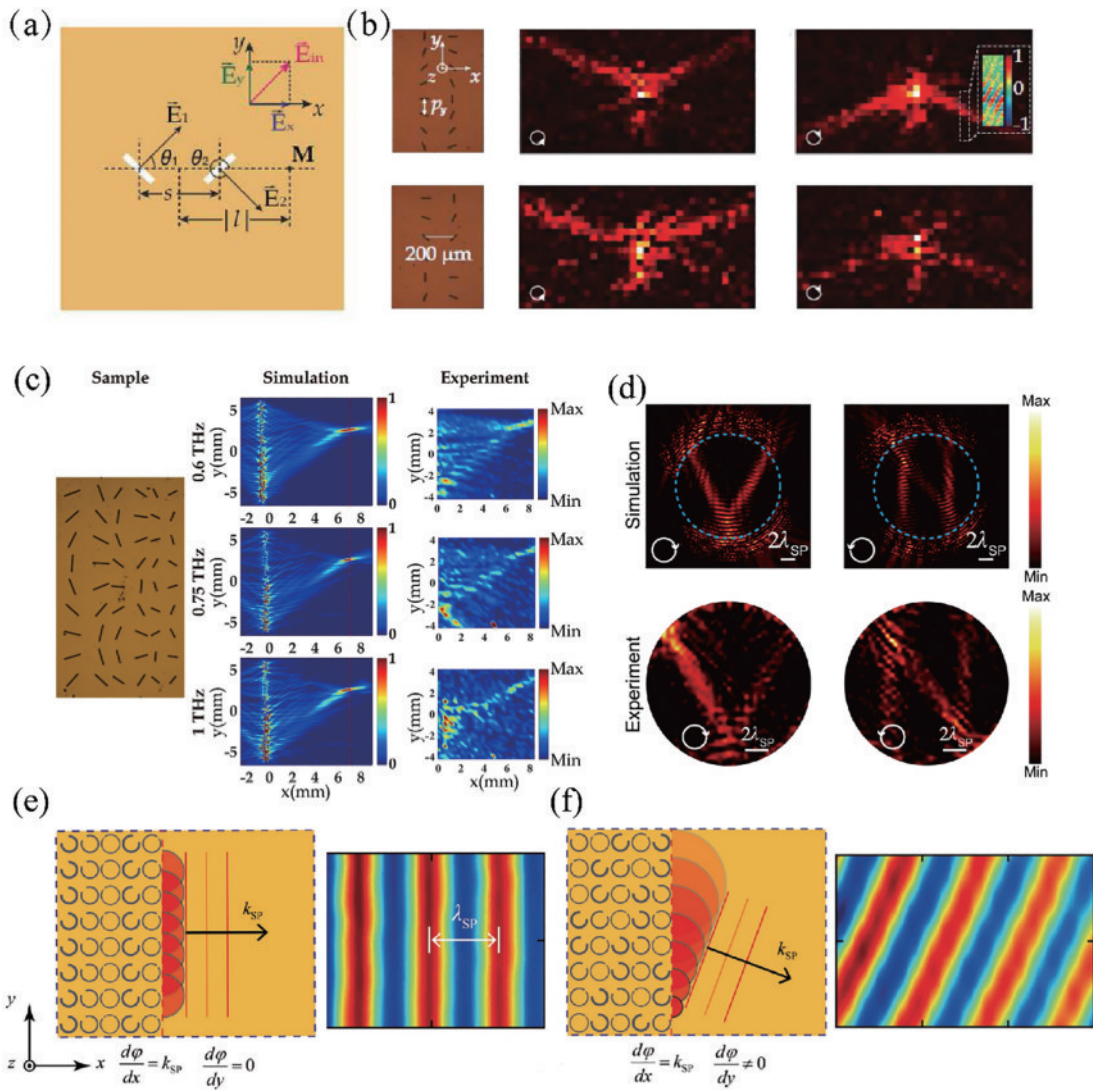


图 7 太赫兹表面等离子元耦合器。(a) 表面等离子元激发单元^[100]; (b) 偏振相关的耦合器(入射圆偏振光旋向不同, 出射的表面等离子元角度不同)^[100]; (c) 基于双狭缝孔列的表面等离子元透镜^[101]; (d) 表面波的复杂全息成像^[102]; (e) (f) 基于 C 形狭缝谐振器的表面等离子元耦合器^[103]

Fig. 7 Terahertz surface plasmon polariton couplers. (a) Surface plasmon excitation unit^[100]; (b) polarization dependent coupler (the wavefronts are different under normal incidences of circular polarization with different directions of the rotation)^[100]; (c) surface plasmon lenses based on slit-pair column^[101]; (d) complex surface plasmon holography imaging^[102]; (e) (f) surface plasmon polariton coupler consisting of C-shape slit resonators^[103]

上述耦合器的设计中,亚波长金属狭缝谐振器可看作单独的源来激发表面波,且谐振器之间的耦合作用可忽略。但随着谐振器之间的间距减小,耦合效应增强,谐振器之间的近场耦合同样可以作为激发表面波的一种方式。Zhang 等^[104]将电磁诱导透明效应应用于近场表面波的激发,表面等离子激元耦合器的基本单元结构由金属狭缝和开口环狭缝谐振器组成,谐振器之间的间距为深度亚波长量级,如图 8(a)所示。狭缝孔作为偶极子在 x 偏振的入射光激发下可向两侧对称激发表面波,表现为明模;而开口环狭缝谐振器很难被 x 偏振的入射光激发,表现为暗模。将明暗模谐振器组合在一起,表面波则呈现出非对称激发,即沿 $+x$ 方向激发的表面波被抑制,而在 $\pm y$ 方向出现了对称分布的激发表面波。改变两谐振器的相位位置,如增大

间距或改变开口环狭缝在竖直方向上的位置,可减弱两谐振器之间的耦合作用,整体激发响应逐渐由非对称变为对称。除此之外,以谐振耦合器为基本单元还能实现表面等离子激元透镜。在两个点源的波前交点处摆放谐振器,如图 8(b)所示。狭缝孔谐振器在 x 偏振入射光作用下实现了表面波的激发和会聚,开口环狭缝谐振器在 y 偏振入射光的作用下实现了相同的功能,两者波的会聚方向皆平行于入射光的偏振方向。将上述结构单元换成耦合谐振器,则可成功在入射偏振方向(x 方向)以及正交方向上(y 方向)形成表面波的聚焦。Xu 等^[105]进一步将镜像分布的开口环狭缝谐振器作为明暗模[图 8(c)],在 x 偏振、 y 偏振、左旋圆偏振和右旋圆偏振光入射下分别实现了不同的非对称激发,如图 8(d)所示。

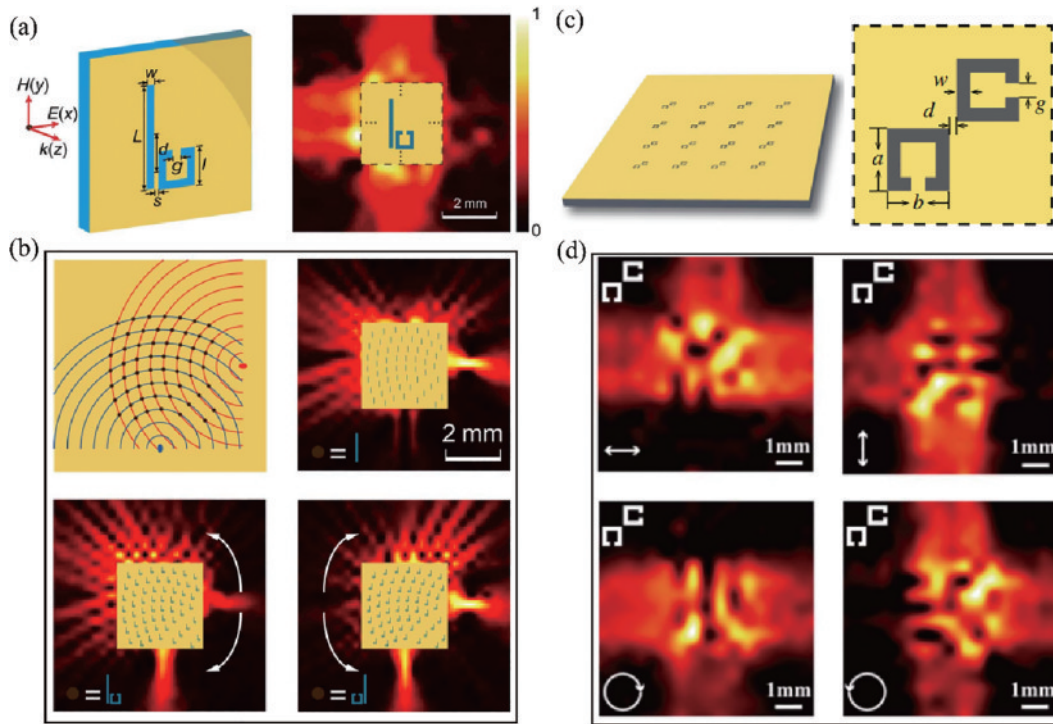


图 8 太赫兹表面等离子激元耦合器。(a)由金属狭缝和开口环狭缝谐振器组成的谐振耦合器,实现非对称激发^[104]; (b)谐振耦合器作为基本单元实现表面等离子激元会聚^[104]; (c)镜像分布的开口环谐振器^[105]; (d)不同偏振光入射下实现的非对称激发^[105]

Fig. 8 Terahertz surface plasmon polariton couplers. (a) A coupled resonator pair composed of a slit resonator and a split-ring shaped resonator can realize asymmetric excitation^[104]; (b) surface plasmon polariton focusing structure using resonant coupler as the basic unit^[104]; (c) split-ring shaped resonator with mirror distribution^[105]; (d) asymmetric excitation under different polarized light incidence^[105]

4.2 表面等离子激元特殊光束

如前所述,在激发过程中可以控制表面波的波前。采用类似的方法可以构建特殊的场分布,例如表面等离子激元涡旋光束。考虑到表面等离子激元是束缚态的二维电磁波,表面等离子激元涡旋光束既具有空间涡旋光束的特征,即螺旋相位波前,同时又具有近场特征,如亚波长尺度范围和局域场增强效应。这在微粒操控以及片上量子信息处理等方面有重要的应用前景^[106-109]。涡旋场携带 OAM,在空间相位上存在一

个数学关系 $\exp(i\theta)$ (θ 为方位角, l 为拓扑荷数),第 l 级的涡旋光振幅正比于贝塞尔函数 $J_l(k_{\text{qw}}r)$ ^[110]。Zang 等^[111]将多列金属狭缝排列成圆环和阿基米德螺旋状,通过调整狭缝的方位角(几何相位)和径向位置(动态相位),得到任意拓扑电荷,形成了自旋无关和自旋相关的太赫兹表面等离子激元涡旋场,如图 9(a)所示。同时,该课题组^[112]通过仅改变狭缝方位角即几何相位,产生了两个具有相等或不同拓扑电荷的涡旋光,如图 9(b)所示。Lang 等^[113]通过实验验证了一种表面等离子激元

涡旋透镜的通用设计策略。同样采用金属狭缝作为基本单元,组成不同半径的同心圆环,实现了两个涡旋光耦合器[图 9(c)]。当圆偏振光入射时,来自两个耦合器的涡旋光相互叠加可实现对涡旋光的拓扑电荷的调控,如图 9(d)所示。除此之外,此设计方案还可以用来测量光束信息,如偏振、自旋角动量和

OAM。近期, Yuan 等^[114]设计了两种不同结构的涡旋光耦合器,针对两者产生的同一拓扑荷数的涡旋光,利用太赫兹近场扫描系统获得了超高时空分辨率下表面等离子激元涡旋场的产生和演变过程,如图 9(e)、(f)所示,发现不同结构的耦合器会影响表面等离子激元涡旋光的时空动态。

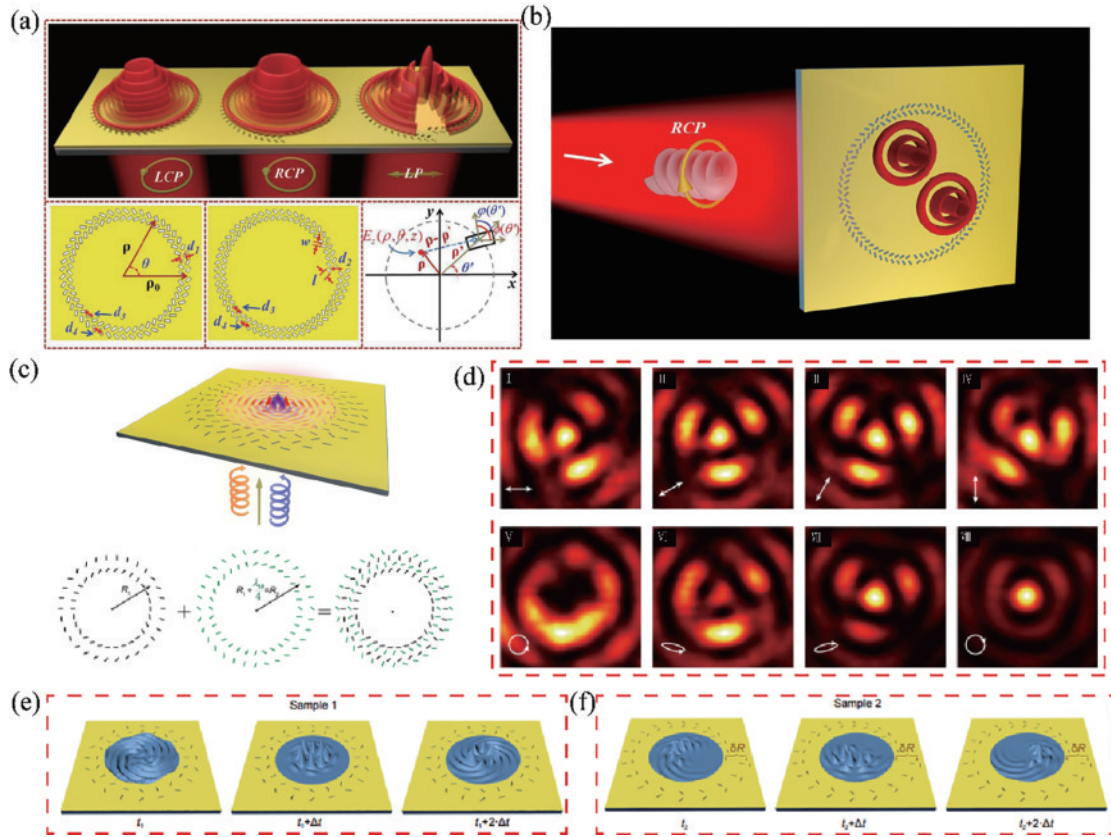


图 9 表面等离子激元涡旋光。(a)金属狭缝排列成圆环和阿基米德螺旋状阵列所产生的表面等离子激元涡旋光^[111]; (b)通过改变几何相位同时实现两个涡旋光^[112]; (c)采用金属狭缝为基本单元组成不同半径的同心圆环,实现两个涡旋光耦合器^[113]; (d)两个耦合器的涡旋光相互叠加实现对涡旋光的拓扑电荷的调控^[113]; (e) (f)不同结构的耦合器对表面等离子激元涡旋光的时空动态调控^[114]

Fig. 9 Plasmonic vortex. (a) Plasmonic vortex generated by circular-shaped slit arrays and Archimedes spiral-shaped slit arrays^[111]; (b) two plasmonic vortices generated by controlling geometric phase^[112]; (c) two plasmonic vortex couplers generated from two circular-shaped slit arrays with different radius^[113]; (d) arbitrary topological charge resulted from the interference between plasmonic vortices came from two couplers^[113]; (e) (f) temporal evolution progress of plasmonic vortices controlled by couplers with different structures^[114]

4.3 表面等离子激元功能器件(透镜、波导、波分复用器)

利用超表面可以在自由空间光耦合到表面等离子激元的过程中控制表面波,在传播过程同样需要对表面等离子激元进行控制,这对发展太赫兹片上集成系统有重要的意义。然而在太赫兹波段,大多数金属表现为良导体,其表面不支持束缚态的表面等离子激元,因此难以控制其传播过程。在金属表面覆盖一层介质能有效减少表面波向自由空间的扩散,但在传播过程中介质对表面波的吸收会造成较大的损耗,不利于表面波的长距离传播。2004年, Pendry 等^[115]证明只要在导体表面作周期性开槽处理,便可在低频波段获得类似于表

面等离子激元的束缚态表面波,该束缚态表面波被称为人工表面等离子激元或赝表面等离子激元。赝表面等离子激元虽然并不是金属表面电子的集体振荡,但其在色散关系、高度局域性和对周围介质的敏感性等方面与可见光波段的表面等离子激元十分相似。

波导是控制表面等离子激元传输的重要功能器件。Maier 等^[116]于 2006 年在金属线上加工了一系列周期排列的环形金属槽。这种结构支持束缚态的太赫兹表面波,更重要的是,赝表面等离子激元的传播模式会受到金属几何尺寸的影响,基于此,优化尺寸后的结构可以实现对太赫兹表面波的会聚。Williams 等^[117]于 2008 年通过实验对周期性凹槽所支持的太赫兹表面波进行

了测量,实验结果与理论计算值一致,进一步验证了对金属表面作凹槽处理可以实现束缚态的太赫兹表面等离子激元。除此之外,金属 V 形槽、楔形结构和开口环状凹槽皆支持高度束缚的太赫兹表面波^[118-120]。Kumar 等^[121-122]利用亚波长的凹槽和方块皆实现了直波导和 Y 形分束器。采用电光晶体 ZnTe 作为探测器对波导元件的属性进行表征,实验得出波导的传播长度为 5 cm,在空气中的衰减长度为 1.1 mm。近年来,随着研究的深入和探测技术的发展,基于膜表面等离子激元的太赫兹功能器件逐渐向着性能更优、功能更丰富的方向发展。Zhang 等^[123]采用周期性排列的金属矩形柱实现了一系列的功能器件,如直波导、S 形波导、Y 形分束波导和定向耦合波导。利用太赫兹近场显微测试系统对膜表面等离子激元进行直接测量,通过近场场强分布成像图可直观地观察到表面波的传播路径,结果表明,器件实现了表面波传播方向控制、表面波分束和表面波耦合等,如图 10(a)所示。Yuan 等^[124]利用金属矩形柱设计了一系列不同功能的膜表面等离子激元器件,包括:1) 不同半径的 90° 弯曲的波导器件。经过实验测量后,半径为 2300 μm 的弯曲波导在 0.56 THz 处的弯曲损耗为 6.45 dB,此结构使表面波实现了与传播方向呈 90° 夹角的偏转。2) 基于马赫-曾德尔干涉仪的逻辑门。实现了对光信号的开关和选择性输出^[125],如图 10(b)所示。3) 表面等离子激元波分复用器。通过在定向耦合器的耦合部分加入一定数量的周期性矩形柱,可调控定向耦合器中奇模的波矢,从而改变不同频率下奇偶模的耦合长度;通过设计周期柱的结构参数,实现了两个目标频率的表面等离子激元沿不同端口输出^[96],如图 10(c)所示。表面等离子激元的色散特性与金属结构的尺寸息息相关,一旦加工完成,表面波的传输特性很难被改变。Zhang 等^[126]在不改变金属微结构尺寸和周期的基础上,通过控制金属微结构的旋转角度实现了膜表面等离子激元色散特性以及波导之间耦合效果的控制。基于马赫-曾德尔干涉仪,通过控制波导路径中一段区域内微结构的旋向可以控制表面波的相干和相消,最终实现在特定频率处的光开关。基于马赫-曾德尔干涉仪的表面波波分复用器通过控制不同频率处的相位差,使频率为 0.57 THz 和 0.62 THz 的表面波分别从不同的端口输出。除此之外,基于表面波定向耦合波导,通过改变其中直波导微结构的旋转角度可以实现分束比可控的 1×2、1×3 多端口分束波导,如图 10(d)所示。综上:传输路径上周期排列的金属微结构可以控制膜表面等离子激元的传播;两列波导之间的耦合可以实现滤波、分束等功能。

转换光学是光学设计中的一种通用方法,即只需材料的光学特性满足空间变化分布便可控制光的传播。近年来,转换光学被应用于等离子激元学,其目的在于控制表面波的传播。2020 年, Su 等^[127]通过改变立

体微结构的几何参数,使微结构的有效折射率在 1.0~1.5 范围内可调,如图 10(e)所示(这与梯度折射率光学类似),按空间中折射率的分布情况放置对应尺寸的微结构,实现了一系列可集成的梯度折射率装置,包括:膜表面等离子激元望远镜(可压缩入射表面波的波前)、波导耦合器(可将宽波前的入射波耦合至窄波导中)和波分复用器(可将两束斜入射的表面波耦合至同一波导中)。2023 年, Gu 等^[128]采用相同的方法设计了多种膜表面等离子激元透镜,如自聚焦透镜(可控制波沿非直线传播)、伦勃透镜[可将入射平面波转换为点源,如图 10(f)所示]和鱼眼透镜(使表面上的点源从一端会聚到另一端)。与传统光学透镜相比,膜表面等离子激元梯度折射率透镜便于加工且结构紧凑。

5 结束语

目前不管是太赫兹超表面的远场波前调控还是近场波前调控都取得了非常大的进展和突破,并且其在各个应用场景中都有了一定的研究。但是现阶段的太赫兹超表面波前调控还有一些不足的地方,离实用化还有很大的距离,需要科研人员在诸如工作效率、工作带宽、加工工艺、多功能性、智能辅助设计以及主动调控等方面进一步努力突破。

5.1 工作效率和带宽

工作效率对超表面的波前调控来说是一个非常重要的参数,它决定了超表面器件的实际性能。目前已经有许多工作对如何提高太赫兹超表面的工作效率进行了有效的探索,包括低损耗的介质材料和惠更斯超表面等多种方法已得到了实验验证。但这些方法还是存在一些局限性,如:介质材料往往都是高折射率材料,会引入一定的反射损耗;惠更斯超表面往往只能在一个较小的频率范围内工作。因此对于不同超表面的设计可以采用一些特殊的方法,如:金属超表面可以利用低损耗的聚合物材料作为基底;介质超表面可以采用薄膜超表面等 free-standing 的设计;此外利用一些超高折射率的陶瓷材料进一步缩小谐振子的尺寸也可以提高超表面的效率;利用谷-霍尔光子晶体等产生的特殊边界态进行太赫兹的近场波前调控等。工作带宽决定了超表面器件的工作范围,但是谐振子的谐振特性以及色散决定了超表面器件往往只能工作在较窄的范围内,因此扩展超表面的工作频率范围具有很好的实际意义。目前太赫兹波段的消色差透镜也有了一定的进展,类似消色差的设计也可以扩展到诸如全息等波前调控上去。

5.2 加工工艺

目前太赫兹超表面的加工都采用光刻+蒸镀或者光刻+深硅刻蚀等较为成熟的工艺,但是它们对设备和超净间以及加工工艺等都有一定的要求。此外这些工艺的加工成本较高,耗时也较长,无法进行大面

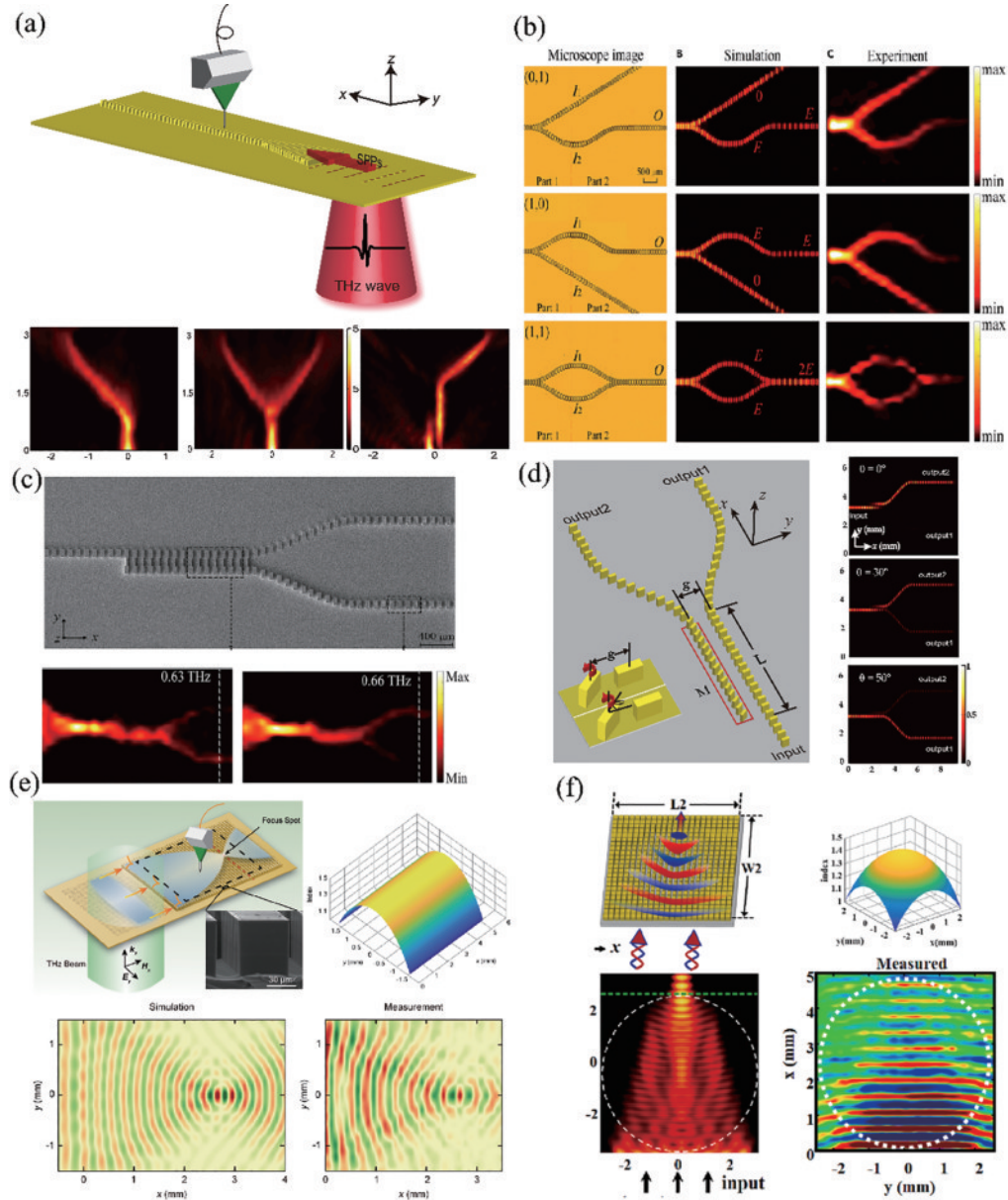


图 10 赝表面等离激元功能器件。(a) 基于立方块实现的赝表面等离激元直波导、S形波导、Y形分束器和定向耦合器^[123]; (b) 逻辑门^[125]; (c) 波分复用器^[96]; (d) 分束比可控的 1×2 分束器^[126]; (e) (f) 基于梯度折射率的赝表面等离激元透镜^[127-128]
 Fig. 10 Spoof surface plasmon polariton functional devices. (a) A series of waveguides based on spoof surface plasmon polaritons: straight waveguide, S-bend waveguide, Y-splitter and directional coupler^[123]; (b) logic gate^[125]; (c) wavelength diplexer^[96]; (d) 1×2 splitter with controlled splitting ratio^[126]; (e) (f) spoof surface plasmon polariton lenses based on gradient index^[127-128]

积的加工,因此探索新的简单加工工艺对太赫兹超表面走向实用化有重要的意义。根据超表面的加工要求,目前有三种不同的工艺可用于太赫兹超表面的加工:1)采用印刷电子的工艺,如将金属浆料印刷到基底上,通过退火将其固化,该方法可以加工超大面积的金属超表面,适用于各种衬底,可在低频太赫兹波段广泛使用;2)采用激光刻蚀的方法,该方法不需要使用任何模板或者掩模板,可用于金属和介质的加工,加工成本较低;3)采用微纳压印技术,可在短时间内制备大规模的太赫兹超表面,适用于一些较软的材料。上述三种方法相比传统光刻有着明显的优势,在未来低成本以及大面积太赫兹超表面的加工中能够发挥重要

作用。

5.3 多功能拓展

相比传统的光学器件,超表面具备多功能集成的天然优势。集多种功能于一个超表面,可以提高超表面器件的功能性与实用性。目前大部分超表面的设计都集中在某一个单一功能上,如透镜、全息等功能。如果能在实现某一个功能的同时,集成偏振调控、手性调控等,则可有效提高超表面器件的功能性。如:超表面实现全息成像的同时,加入聚焦相位分布和轴棱锥相位分布,则可以在空间上操控全息图像的成像位置,在不同偏振上实现不同波前调控等等。超表面的多功能拓展将会是后续超表面研究的一个重要方向。

5.4 智能辅助设计

通常,超表面的设计需要选取不同的单元结构来满足特定的振幅和相位分布,而这一过程往往是复杂且耗时的。如能利用深度学习辅助超表面设计则能有效提高超表面设计的便利性^[129-130]。目前也有一些工作利用深度学习等来辅助超表面的设计,但是这些方法还比较初级,需要大量的数据进行学习,且深度学习的结果往往只能用于某一种特定功能的超表面设计。不同于现有深度算法深耕于图像处理,对于超表面的设计来说,需要发展一些新的深度学习算法,并且深度学习需要能够与仿真软件联动,最终发展一种通用的辅助设计超表面的方法,这对以后超表面的发展和实用化具有重要的意义。

5.5 主动控制

目前太赫兹超表面的波前调控主要实现某种特定功能,往往完成超表面的设计后,其功能是固定的,无法通过改变外部条件来改变其功能,这一类的超表面都属于被动超表面。这使太赫兹波的波前调控缺乏灵活性,也会在一定程度上限制超表面的广泛应用,如太赫兹调制器件等。因此通过引入基于可调谐材料的主动超表面实现不同功能的主动切换,可以极大拓宽超表面波前调控的应用范围。其中,相变材料的引入可灵活调控太赫兹波,如:Liu等^[131]将相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 与超表面相结合,通过改变相变材料的特性实现了电磁诱导现象的开关;Chen等^[90]设计了基于相变材料 VO_2 的集成自适应超表面,可使太赫兹波的反射角度在 $0\sim 42.8^\circ$ 范围内可调。大多数主动控制超表面的研究皆通过改变热、电和光等外部条件改变超表面中材料的电导性能,实现超表面单元结构的偏振、振幅和相位等控制,从而主动调控超表面的功能^[132-133]。另外也可基于机械驱动或者材料的弹性形变等改变超表面的特性。可主动控制的太赫兹超表面波前调控将会是后续超表面研究的研究热点,后续将会有各种新的可调谐材料引入到太赫兹波前调控中,使太赫兹波的调控向着更宽频、超快、更灵活的方向发展。

综上所述,本文从太赫兹电磁场空间分布的角度出发,阐述了目前超表面在太赫兹波段的波前调控的发展;并从不同的应用场景分类介绍了太赫兹超表面的波前调控的现状;对太赫兹超表面波前调控目前存在的一些问题和未来发展方向进行了展望。相信随着太赫兹超表面研究的进一步发展,超表面用于太赫兹的波前调控会逐步走出实验室,走向实用化,迈向商业化应用。

参 考 文 献

- [1] Fitzgerald A J, Wallace V P, Jimenez-Linan M, et al. Terahertz pulsed imaging of human breast tumors[J]. Radiology, 2006, 239(2): 533-540.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J].

Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.

- [3] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements[J]. Optics Express, 2010, 18(25): 26399-26408.
- [4] 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.
- [5] Ni X J, Emani N K, Kildishev A V, et al. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. Science, 2012, 335(6067): 427.
- [6] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. Nano Letters, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [7] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [8] Zhang X Q, Tian Z, Yue W S, et al. Broadband terahertz wave deflection based on C-shape complex metamaterials with phase discontinuities[J]. Advanced Materials, 2013, 25(33): 4567-4572.
- [9] Su X Q, Ouyang C, Xu N N, et al. Active metasurface terahertz deflector with phase discontinuities[J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27152-27158.
- [10] Yang Q L, Gu J Q, Wang D Y, et al. Efficient flat metasurface lens for terahertz imaging[J]. Optics Express, 2014, 22(21): 25931-25939.
- [11] Yang Q L, Gu J Q, Xu Y H, et al. Broadband and robust metalens with nonlinear phase profiles for efficient terahertz wave control[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(10): 1601084.
- [12] 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.
- [13] He J W, Ye J S, Wang X K, et al. A broadband terahertz ultrathin multi-focus lens[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28800.
- [14] Jia D L, Xu J, Xin T, et al. Multifocal terahertz lenses realized by polarization-insensitive reflective metasurfaces [J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(10): 101105.
- [15] Kuznetsov S A, Astafev M A, Beruete M, et al. Planar holographic metasurfaces for terahertz focusing[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 7738.
- [16] Jiang X, Chen H, Li Z Y, et al. All-dielectric metalens for terahertz wave imaging[J]. Optics Express, 2018, 26(11): 14132-14142.
- [17] Zhang H F, Zhang X Q, Xu Q, et al. High-efficiency dielectric metasurfaces for polarization-dependent terahertz wavefront manipulation[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(1): 1700773.
- [18] Wang Z, Yao Y, Pan W K, et al. Bifunctional manipulation of terahertz waves with high-efficiency transmissive dielectric metasurfaces[J]. Advanced Science, 2023, 10(4): 2205499.
- [19] Decker M, Staude I, Falkner M, et al. High-efficiency dielectric Huygens' surfaces[J]. Advanced Optical

- Materials, 2015, 3(6): 813-820.
- [20] Liu W, Kivshar Y S. Generalized kerker effects in nanophotonics and meta-optics[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 13085-13105.
- [21] Shamkhi H K, Baryshnikova K V, Sayanskiy A, et al. Transverse scattering and generalized kerker effects in all-dielectric Mie-resonant metaoptics[J]. Physical Review Letters, 2019, 122(19): 193905.
- [22] Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(19): 197401.
- [23] Zhang L, Ding J, Zheng H Y, et al. Ultra-thin high-efficiency mid-infrared transmissive Huygens meta-optics [J]. Nature Communications, 2018, 9: 1481.
- [24] Fathnan A A, Liu M K, Powell D A. Achromatic Huygens' metalenses with deeply subwavelength thickness[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(22): 2000754.
- [25] Yang Q L, Kruk S, Xu Y H, et al. Mie-resonant membrane Huygens' metasurfaces[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(4): 1906851.
- [26] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 85.
- [27] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. Nature Communications, 2017, 8: 187.
- [28] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[J]. Science, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [29] Chen W T, Zhu A Y, Sisler J, et al. A broadband achromatic polarization-insensitive metalens consisting of anisotropic nanostructures[J]. Nature Communications, 2019, 10: 355.
- [30] Cheng Q Q, Ma M L, Yu D, et al. Broadband achromatic metalens in terahertz regime[J]. Science Bulletin, 2019, 64(20): 1525-1531.
- [31] Gao Y F, Gu J Q, Jia R D, et al. Polarization independent achromatic meta-lens designed for the terahertz domain[J]. Frontiers in Physics, 2020, 8: 606693.
- [32] Xu Y, Gu J Q, Gao Y F, et al. Broadband achromatic terahertz metalens constituted by Si-SiO₂-Si hybrid meta-atoms[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 10: 2302821.
- [33] Larouche S, Tsai Y J, Tyler T, et al. Infrared metamaterial phase holograms[J]. Nature Materials, 2012, 11(5): 450-454.
- [34] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(11): 937-943.
- [35] Chong K E, Wang L, Staude I, et al. Efficient polarization-insensitive complex wavefront control using Huygens' metasurfaces based on dielectric resonant meta-atoms[J]. ACS Photonics, 2016, 3(4): 514-519.
- [36] Ni X J, Kildishev A V, ShalaeV M. Metasurface holograms for visible light[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2807.
- [37] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2808.
- [38] Wang L, Kruk S, Tang H Z, et al. Grayscale transparent metasurface holograms[J]. Optica, 2016, 3(12): 1504-1505.
- [39] Hu D, Wang X K, Feng S F, et al. Ultrathin terahertz planar elements[J]. Advanced Optical Materials, 2013, 1(2): 186-191.
- [40] Wang Q, Zhang X Q, Xu Y H, et al. Broadband metasurface holograms: toward complete phase and amplitude engineering[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 32867.
- [41] Wang Q, Xu Q, Zhang X Q, et al. All-dielectric meta-holograms with holographic images transforming longitudinally[J]. ACS Photonics, 2018, 5(2): 599-606.
- [42] Wu T, Zhang X Q, Xu Q, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase, amplitude, and polarization [J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(1): 2101223.
- [43] Wang Q, Plum E, Yang Q L, et al. Reflective chiral meta-holography: multiplexing holograms for circularly polarized waves[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 25.
- [44] Wang Q, Zhang X Q, Plum E, et al. Polarization and frequency multiplexed terahertz meta-holography[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(14): 1700277.
- [45] Zhao H, Zhang C M, Guo J Y, et al. Metasurface hologram for multi-image hiding and seeking[J]. Physical Review Applied, 2019, 12(5): 054011.
- [46] Guo J Y, Wang T, Zhao H, et al. Reconfigurable terahertz metasurface pure phase holograms[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(10): 1801696.
- [47] Cong L Q, Srivastava Y K, Zhang H F, et al. All-optical active THz metasurfaces for ultrafast polarization switching and dynamic beam splitting[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 28.
- [48] Yang Q L, Liu M K, Kruk S, et al. Polarization-insensitive dielectric membrane metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(20): 2000555.
- [49] Li B H, Li X W, Zhao R Z, et al. Polarization multiplexing terahertz metasurfaces through spatial femtosecond laser-shaping fabrication[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(12): 2000136.
- [50] Chen B W, Yang S X, Chen J, et al. Directional terahertz holography with thermally active Janus metasurface [J]. Light: Science & Applications, 2023, 12: 136.
- [51] Wang H, Qin Z, Huang L L, et al. Metasurface with dynamic chiral meta-atoms for spin multiplexing hologram and low observable reflection[J]. Photonix, 2022, 3(1): 10.
- [52] Rajabalipannah H, Rouhi K, Abdolali A, et al. Real-time terahertz meta-cryptography using polarization-multiplexed graphene-based computer-generated holograms[J].

- Nanophotonics, 2020, 9(9): 2861-2877.
- [53] Jia, M, Wang, Z, Li, H T, et al. Efficient manipulations of circularly polarized terahertz waves with transmissive metasurfaces [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 16.
- [54] Liu W Y, Yang Q L, Xu Q, et al. Multifunctional all-dielectric metasurfaces for terahertz multiplexing[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(19): 2100506.
- [55] Zhao H, Quan B G, Wang X K, et al. Demonstration of orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing based on a metasurface in the terahertz band[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1726-1732.
- [56] Huang F, Xu Q, Liu W Y, et al. Generating superposed terahertz perfect vortices via a spin-multiplexed all-dielectric metasurface[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(3): 431-441.
- [57] Wang L, Yang Y, Deng L, et al. Terahertz angle-multiplexed metasurface for multi-dimensional multiplexing of spatial and frequency domains[J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2020, 3(10): 2000115.
- [58] Wang L, Yang Y, Gao F, et al. Terahertz reconfigurable dielectric metasurface hybridized with vanadium dioxide for two-dimensional multichannel multiplexing[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 992037.
- [59] Liu S, Noor A, Du L L, et al. Anomalous refraction and nondiffractive Bessel-beam generation of terahertz waves through transmission-type coding metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(10): 1968-1977.
- [60] Zhang H F, Zhang X Q, Xu Q, et al. Polarization-independent all-silicon dielectric metasurfaces in the terahertz regime [J]. *Photonics Research*, 2017, 6(1): 24-29.
- [61] Ma Z J, Hanham S M, Albella P, et al. Terahertz all-dielectric magnetic mirror metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(6): 1010-1018.
- [62] Cheng Q Q, Wang J C, Ma L, et al. Achromatic terahertz Airy beam generation with dielectric metasurfaces [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(3): 1123-1131.
- [63] Xi K L, Fang B, Ding L, et al. Terahertz Airy beam generated by Pancharatnam-Berry phases in guided wave-driven metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 16699-16711.
- [64] Wen J, Chen L, Yu B B, et al. All-dielectric synthetic-phase metasurfaces generating practical airy beams[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(1): 1030-1038.
- [65] Xu Y H, Zhang H F, Li Q, et al. Generation of terahertz vector beams using dielectric metasurfaces via spin-decoupled phase control[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3393-3402.
- [66] Liu W Y, Yang Q L, Xu Q, et al. Multichannel terahertz quasi-perfect vortex beams generation enabled by multifunctional metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(16): 3631-3640.
- [67] 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.
- [68] Luo L, Chatzakis I, Wang J G, et al. Broadband terahertz generation from metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3055.
- [69] McDonnell C, Deng J H, Sideris S, et al. Functional THz emitters based on Pancharatnam-Berry phase nonlinear metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 30.
- [70] Fang M, Niu K K, Huang Z, et al. Investigation of broadband terahertz generation from metasurface[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14241-14250.
- [71] Minerbi E, Sideris S, Khurgin J B, et al. The role of epsilon near zero and hot electrons in enhanced dynamic THz emission from nonlinear metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(15): 6194-6199.
- [72] Sideris S, Ellenbogen T. Terahertz generation in parallel plate waveguides activated by nonlinear metasurfaces[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(14): 3590-3593.
- [73] Liu C Q, Wang S J, Zhang S, et al. Active spintronic-metasurface terahertz emitters with tunable chirality[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(5): 056002.
- [74] Keren-Zur S, Tal M, Fleischer S, et al. Generation of spatiotemporally tailored terahertz wavepackets by nonlinear metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1778.
- [75] Minerbi E, Keren-Zur S, Ellenbogen T. Nonlinear metasurface Fresnel zone plates for terahertz generation and manipulation[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(9): 6072-6077.
- [76] Lu Y C, Feng X, Wang Q W, et al. Integrated terahertz generator-manipulators using epsilon-near-zero-hybrid nonlinear metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(18): 7699-7707.
- [77] Feng X, Chen X Y, Lu Y C, et al. Direct emission of focused terahertz vortex beams using indium-tin-oxide-based Fresnel zone plates[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(1): 2201628.
- [78] Feng X, Wang Q W, Lu Y C, et al. Direct emission of broadband terahertz cylindrical vector Bessel beam[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(22): 221110.
- [79] Wang Q W, Zhang X Q, Xu Q, et al. Nonlinear terahertz generation: chiral and achiral meta-atom coupling[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(29): 23006.
- [80] Orazbayev B, Mohammadi Estakhri N, Beruete M, et al. Terahertz carpet cloak based on a ring resonator metasurface[J]. *Physical Review B*, 2015, 91(19): 195444.
- [81] Wei M G, Yang Q L, Zhang X Q, et al. Ultrathin metasurface-based carpet cloak for terahertz wave[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15635-15642.
- [82] Chen P Y, Soric J, Padooru Y R, et al. Nanostructured graphene metasurface for tunable terahertz cloaking[J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(12): 123029.
- [83] Li M, Han S, Gan H Y, et al. Improvement of wide-angle response for terahertz carpet cloaking by using a metasurface with multilayer microstructure[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2019, 40(9): 917-928.

- [84] 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.
- [85] Liu S, Zhang L, Yang Q L, et al. Frequency-dependent dual-functional coding metasurfaces at terahertz frequencies[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(12): 1965-1973.
- [86] Liu S, Zhang H C, Zhang L, et al. Full-state controls of terahertz waves using tensor coding metasurfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(25): 21503-21514.
- [87] Zhang L, Liu S, Li L L, et al. Spin-controlled multiple pencil beams and vortex beams with different polarizations generated by pancharatnam-berry coding metasurfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(41): 36447-36455.
- [88] 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.
- [89] Liu S, Cui T J, Xu Q, et al. Anisotropic coding metamaterials and their powerful manipulation of differently polarized terahertz waves[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(5): e16076.
- [90] Chen B W, Wang X R, Li W L, et al. Electrically addressable integrated intelligent terahertz metasurface [J]. *Science Advances*, 2022, 8(41): eadd1296.
- [91] Liu S, Xu F, Zhan J L, et al. Terahertz liquid crystal programmable metasurface based on resonance switching [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(7): 1891-1894.
- [92] Fu X J, Shi L, Yang J, et al. Flexible terahertz beam manipulations based on liquid-crystal-integrated programmable metasurfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(19): 22287-22294.
- [93] 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.
- [94] Liu C X, Yang F, Fu X J, et al. Programmable manipulations of terahertz beams by transmissive digital coding metasurfaces based on liquid crystals[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(22): 2100932.
- [95] Zhang Y, Li S X, Xu Q, et al. Terahertz surface plasmon polariton waveguiding with periodic metallic cylinders[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14397-14405.
- [96] Yuan M R, Wang Q W, Li Y F, et al. Ultra-compact terahertz plasmonic wavelength diplexer[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(33): 10451-10456.
- [97] Xu Y H, Zhang X Q, Tian Z, et al. Mapping the near-field propagation of surface plasmons on terahertz metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(2): 021105.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] Zhang X Q, Xu Y H, Yue W S, et al. Anomalous surface wave launching by handedness phase control[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(44): 7123-7129.
- [101] Wei M G, Yang Q L, Xu Q, et al. Multi-wavelength lenses for terahertz surface wave[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 24872-24879.
- [102] Xu Q, Zhang X Q, Xu Y H, et al. Polarization-controlled surface plasmon holography[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(1): 1600212.
- [103] Xu Q, Zhang X Q, Wei M G, et al. Efficient metacoupler for complex surface plasmon launching[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(5): 1701117.
- [104] Zhang X Q, Xu Q, Li Q, et al. Asymmetric excitation of surface plasmons by dark mode coupling[J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1501142.
- [105] Xu Q, Zhang X Q, Yang Q L, et al. Polarization-controlled asymmetric excitation of surface plasmons[J]. *Optica*, 2017, 4(9): 1044-1051.
- [106] Tsai W Y, Huang J S, Huang C B. Selective trapping or rotation of isotropic dielectric microparticles by optical near field in a plasmonic Archimedes spiral[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(2): 547-552.
- [107] Shen Y J, Wang X J, Xie Z W, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 90.
- [108] Quidant R, Girard C. Surface-plasmon-based optical manipulation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(1/2): 47-57.
- [109] Erhard M, Fickler R, Krenn M, et al. Twisted photons: new quantum perspectives in high dimensions[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(3): 17146.
- [110] Al-Awfi S. Formation of a plasmonic surface optical vortex by evanescent Bessel light[J]. *Plasmonics*, 2013, 8(2): 529-536.
- [111] Zang X F, Zhu Y M, Mao C X, et al. Manipulating terahertz plasmonic vortex based on geometric and dynamic phase[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(3): 1801328.
- [112] Zang X F, Li Z, Zhu Y, et al. Geometric metasurface for multiplexing terahertz plasmonic vortices[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(17): 171106.
- [113] Lang Y H, Xu Q, Chen X Y, et al. On-chip plasmonic vortex interferometers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(10): 2200242.
- [114] Yuan X Y, Xu Q, Lang Y H, et al. Tailoring spatiotemporal dynamics of plasmonic vortices[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6(4): 220133.
- [115] Pendry J B, Martín-Moreno L, García-Vidal F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. *Science*, 2004, 305(5685): 847-848.
- [116] Maier S A, Andrews S R, Martín-Moreno L, et al. Terahertz surface plasmon-polariton propagation and focusing on periodically corrugated metal wires[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(17): 176805.
- [117] Williams C R, Andrews S R, Maier S A, et al. Highly

- confined guiding of terahertz surface plasmon polaritons on structured metal surfaces[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(3): 175-179.
- [118] Fernández-Domínguez A I, Moreno E, Martín-Moreno L, et al. Guiding terahertz waves along subwavelength channels[J]. *Physical Review B*, 2009, 79(23): 233104.
- [119] Fernández-Domínguez A I, Moreno E, Martín-Moreno L, et al. Terahertz wedge plasmon polaritons[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 2063-2065.
- [120] Kumar G, Cui A, Pandey S, et al. Planar terahertz waveguides based on complementary split ring resonators [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1072-1080.
- [121] Kumar G, Pandey S, Cui A, et al. Planar plasmonic terahertz waveguides based on periodically corrugated metal films[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(3): 033024.
- [122] Kumar G, Li S S, Jadidi M M, et al. Terahertz surface plasmon waveguide based on a one-dimensional array of silicon Pillars[J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(8): 085031.
- [123] Zhang Y, Xu Y H, Tian C X, et al. Terahertz spoof surface-plasmon-polariton subwavelength waveguide[J]. *Photonics Research*, 2017, 6(1): 18-23.
- [124] Yuan M R, Lu Y C, Zhang Y, et al. Curved terahertz surface plasmonic waveguide devices[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 1987-1998.
- [125] Yuan M R, Wang Q W, Li Y F, et al. Terahertz spoof surface plasmonic logic gates[J]. *iScience*, 2020, 23(11): 101685.
- [126] Zhang Y, Lu Y C, Yuan M R, et al. Rotated Pillars for functional integrated on-chip terahertz spoof surface-plasmon-polariton devices[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(11): 2102561.
- [127] Su X Q, Xu Q, Lu Y C, et al. Gradient index devices for terahertz spoof surface plasmon polaritons[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(12): 3305-3312.
- [128] Gu S H, Yuan X Y, Liu L, et al. Terahertz spoof surface plasmon polariton gradient index lens[J]. *Results in Physics*, 2023, 47: 106332.
- [129] Nadell C C, Huang B H, Malof J M, et al. Deep learning for accelerated all-dielectric metasurface design [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27523-27535.
- [130] Xu L, Rahmani M, Ma Y X, et al. Enhanced light-matter interactions in dielectric nanostructures via machine-learning approach[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(2): 026003.
- [131] Liu K, Chen X Y, Lian M, et al. Nonvolatile reconfigurable electromagnetically induced transparency with terahertz chalcogenide metasurfaces[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(4): 2100393.
- [132] Hu Y Z, Tong M Y, Hu S Y, et al. Reassessing Fano resonance for broadband, high-efficiency, and ultrafast terahertz wave switching[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(2): 2204494.
- [133] Venkatesh S, Lu X Y, Saeidi H, et al. A high-speed programmable and scalable terahertz holographic metasurface based on tiled CMOS chips[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(12): 785-793.