

# 太赫兹超表面透镜综述

曾志强<sup>1,2</sup>, 杜良辉<sup>1,3</sup>, 李 江<sup>1,3</sup>, 朱礼国<sup>1,3</sup>

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900; 2. 宜宾学院理学部, 四川宜宾 644000;  
3. 中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心, 四川成都 610200)

**摘 要:** 本文综述了基于人工微结构的太赫兹超表面透镜的最新研究进展, 通过仿真分析了人工微结构单元与太赫兹波的相互作用, 阐述了共振相位、几何相位和传输相位 3 种主要的相位调控机理及相应的相位调制效果. 根据透镜相位的空间分布规律, 通过合理的人工微结构布局实现对入射太赫兹波波前的调控, 从而实现太赫兹超表面透镜的聚焦和成像功能. 太赫兹超表面透镜具有设计灵活、厚度超薄、功能多样等诸多优势, 在太赫兹波无损检测、高速通信和公共安全等领域具有广阔的应用前景. 本文根据太赫兹波聚焦效率这一重要技术指标, 介绍了基于单层结构、多层结构、全介质结构以及可调谐太赫兹超表面透镜的研究成果, 并对太赫兹超表面透镜的未来发展前景进行了展望.

**关键词:** 人工微结构; 太赫兹; 超表面透镜; 共振相位; 几何相位; 传输相位; 效率

**基金项目:** 国家重点研发计划(No.2020YFA0714001); 国家自然科学基金青年基金(No.12204445, No.12002326)

**中图分类号:** TN925; O436; O439 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)10-2651-13

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20221259

## Review of Terahertz Metasurface Lenses

ZENG Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, DU Liang-hui<sup>1,3</sup>, LI Jiang<sup>1,3</sup>, ZHU Li-guo<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

2. Faculty of Science, Yibin University, Yibin, Sichuan 644000, China;

3. Microsystem & Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu, Sichuan 610200, China)

**Abstract:** In this paper, the recent research progresses on terahertz metasurface lenses (THz ML) based on artificial microstructure are introduced. The interaction between artificial microstructure unit and THz wave is analyzed by numerical simulations. And the three main existing phase modulation mechanisms, including resonance phase, geometric phase and transmission phase, are described. From the spatially phase distribution of lens, the manipulation of incident THz wavefront can be realized by the suitable artificial microstructure layout, so as to realize the focusing and imaging of THz ML. Due to the advantages of flexible design, ultra-thin thickness and multi-functions, THz ML will have great potential applications in the fields of nondestructive detection, high-speed wireless communication and public security. Considering the key technical parameter of focusing efficiency, the research works of THz ML based on single-layer structure, multi-layer structure, all dielectric structure and tunable materials are introduced, and the trends of future development of THz ML are prospected.

**Key words:** artificial microstructure; terahertz; metasurface lens; resonance phase; geometric phase; transmission phase; efficiency

**Foundation Item(s):** National Key Research and Development Program of China (No.2020YFA0714001); National Natural Science Foundation of China (No.12204445, No.12002326)

## 1 引言

太赫兹通常是指频率范围在 0.1~10 THz 的电磁波, 处于红外和微波辐射之间, 具有独特穿透性、脉冲特性、高安全性、“指纹谱”、高带宽等特性, 在无损检测、生物医学、高速无线通信等领域已经得到了越来越

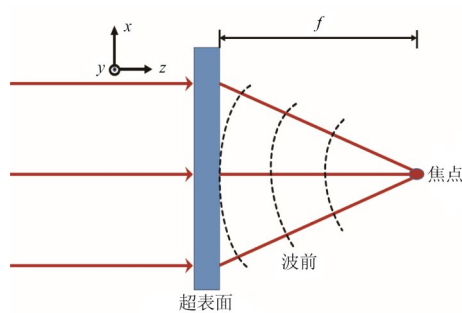
广泛的应用<sup>[1-4]</sup>. 但是相对于红外光子学和微波电子学领域, 太赫兹技术起步较晚, 发展还不够成熟, 可用于调控太赫兹波的天然材料较少, 且太赫兹波功能器件还较为缺乏. 现有的太赫兹器件存在重量重、体积大、效率低等问题, 不利于太赫兹系统轻量化、微型化、集成化的发展需求. 偏振片、石英波片、高阻硅透镜等传

统太赫兹器件,虽然具有调制偏振态、聚焦波束等功能,但是功能相对单一,不能实现对入射太赫兹波波前的复杂调控。

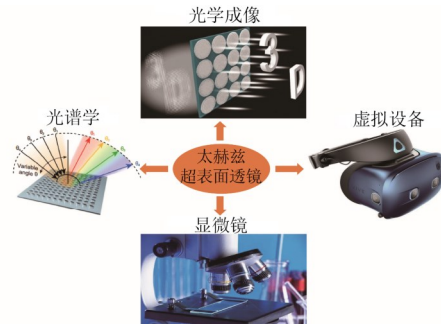
近年来,随着微纳加工技术的快速发展,亚波长尺度的微纳光学器件展现出很多新奇的物理现象和应用前景,有望提供功能多样、集成度高的太赫兹器件. 2011年 Yu 等人<sup>[5]</sup>首次提出超表面的概念,即将不同的亚波长微结构单元按照特定的排布方式组成的人工超材料表面. 利用惠更斯-菲涅尔原理,超表面将其界面上携带的“突变相位”叠加到再辐射的电磁波上,可通过人工设计的微结构单元大小、形状、材料等参数实现对电磁波相位<sup>[6,7]</sup>、振幅<sup>[8,9]</sup>以及偏振状态<sup>[10,11]</sup>的灵活调控。

其中,可以实现入射电磁波聚焦以及成像功能的超表面被称为超表面透镜. 光学超表面透镜是超表面

的重要应用之一,吸引了大批学者的广泛关注<sup>[12-18]</sup>. 传统的太赫兹透镜对入射电磁波的聚焦是通过传播路径上累积空间相位来实现的,通常需要利用元件的形状和材料厚度变化引起的相位延迟来调节不同的相位分布. 这使传统的太赫兹透镜难以集成化和微型化,限制了其在现代光学中的应用. 而基于超表面的太赫兹透镜被称为太赫兹超表面透镜,可以利用超表面对太赫兹波的波前调控来克服上述问题,其原理及应用场景如图1所示. 太赫兹超表面透镜具有完全不同于传统光学元件的光波调控机理,是通过人工微结构引入的相位梯度来改变出射太赫兹波波前的形状的,具有结构设计灵活、物理内涵丰富等诸多优点,并且非常有利于太赫兹系统的微型化和集成化,在显微镜、成像、光谱学和虚拟设备等方面具有广阔的应用前景。



(a) 太赫兹超表面透镜聚焦原理示意图



(b) 太赫兹超表面透镜应用场景示意图

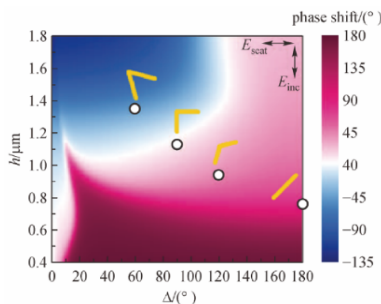
图1 太赫兹超表面透镜原理及应用场景

目前,对太赫兹波段的超表面透镜研究已经取得了一定的成果. 本文将对太赫兹超表面透镜的设计原理和相关进展进行综述. 首先分析超表面微结构单元对电磁波的调控机理,针对共振相位调控、几何相位调控和传输相位调控3种主要的相位调控机理,详细阐述超表面透镜设计的波前调制方法. 随后,根据聚焦效率这一重要技术指标,分别介绍基于单层结构、多层结构、全介质结构以及可调谐的太赫兹超表面透镜的相关研究进展和典型工

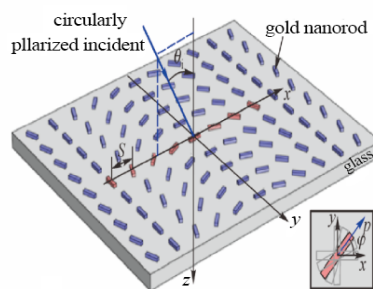
作,并对太赫兹超表面透镜的未来发展前景进行展望。

## 2 超表面对电磁波的调控机理

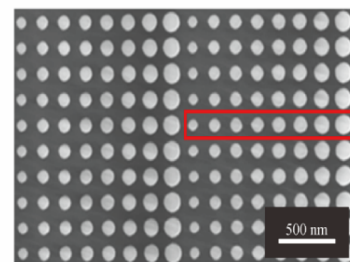
超表面是由不同人工微结构构成的二维平面材料,在其界面处具有不连续的周期性相位分布. 根据相位突变机理的不同,超表面对电磁波的调控方式可以分为共振相位(图2(a))、几何相位(图2(b))和传输相位(图2(c))3类。



(a) 共振相位<sup>[5]</sup>



(b) 几何相位<sup>[6]</sup>

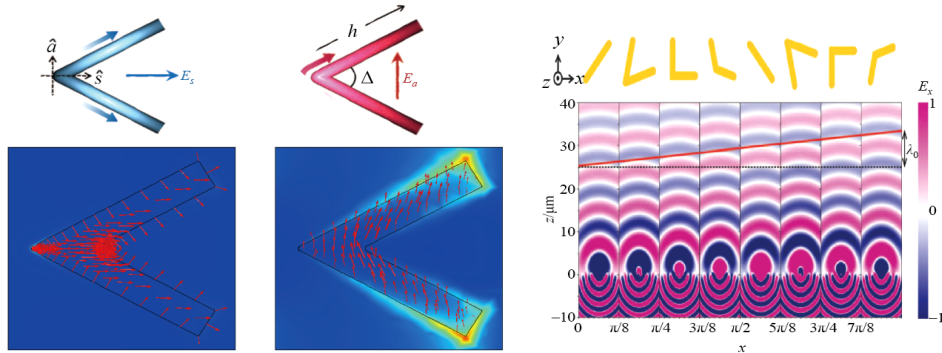


(c) 传输相位<sup>[19]</sup>

图2 3种相位调制方法的示意图

## 2.1 共振相位超表面

对超表面的研究最初主要集中于共振相位,利用电磁波与人工微结构产生的共振效应,可以实现对电磁波的异常折射<sup>[5]</sup>、偏振转换<sup>[7]</sup>、聚焦<sup>[20]</sup>等电磁波调控现象.2011年,Yu等人<sup>[5]</sup>提出的V形微结构就是基于这一原理对电磁波相位进行调控的.



(a) V形微结构的对称共振模式 (b) V形微结构的反对称共振模式 (c) 8个V形微结构实现 $2\pi$ 相移<sup>[5]</sup>

图3 V形微结构

在Yu等人<sup>[5]</sup>工作的启发下,很多科研团队通过改变金属天线的形状、大小、材料和排列样式等,对等离子体共振模式的有效调控进行了探索和研究,基本能够实现电磁波波前的有效调控<sup>[20-23]</sup>.由于等离子体共振与入射电磁波的频率相关,这种相位调控机制的超表面工作带宽受到限制.尽管共振相位超表面的研究已有重大进展,但是由于饱和效应和欧姆损耗的影响,入射电磁波能量在微结构单元内部被大量消耗,导致共振相位超表面器件的效率较低.此外,由于共振相位超表面是由不同尺寸的微结构单元阵列构成,需要精确地设计和加工差别很小的微结构单元来满足特定的相位分布,从而增加了超表面设计和加工的复杂性.

## 2.2 几何相位超表面

几何相位超表面也称Pancharatnam-Berry (PB)相位超表面,它由具有完全相同尺寸和形状的微结构单元组成.几何相位超表面对电磁波相位的调控是通过改变不同位置处微结构单元的空间方位角来实现的.当一束右旋圆偏振(Right-handed Circularly Polarized, RCP)光入射到一个方位角为 $\theta$ 的各向异性微结构时,透射光中的左旋圆偏振(Left-handed Circularly Polarized, LCP)光的相位将改变 $2\theta$ ,并且振幅保持不变.因此,只需将各向异性微结构的方位角从0变化到 $\pi$ ,几何相位超表面即可提供从0到 $2\pi$ 的相位覆盖,实现对电磁波波前的准确调控.

可以通过琼斯矩阵来分析几何相位的物理过程<sup>[6]</sup>,以图4(a)中的矩形微结构单元为例,考虑垂直入射光

如图3所示,可通过改变微结构单元的几何形状和方向来实现对称和反对称两种共振模式的调节,从而使交叉偏振散射光呈现出由两个几何参数 $h$ 和 $\Delta$ 决定的振幅和相位.因此,可通过创建的8个V形微结构单元有效地实现散射光 $0\sim 2\pi$ 的相位覆盖.

的偏振分别沿矩形微结构单元的两个主轴.当两个偏振方向的相位差为 $\pi$ 时,如图4(b)和4(c)所示,该单元结构相当于一个半波片,可以实现对圆偏振入射光的 $2\pi$ 相位调控.几何相位调节机制只取决于各向异性微结构单元的方位角,而与入射电磁波的频率和材料属性等无关,故具有一定的宽带调节能力.此外,几何相位超表面设计灵活、鲁棒性强,对圆偏振光的波前调控具有偏振依赖的特性,可提供更多的电磁波操纵自由度<sup>[24-27]</sup>.值得一提的是,文献[28-30]提出基于光学悬链线结构的连续型几何相位超表面,可实现宽带连续的几何相位调控,并通过引入3倍及以上高阶旋转对称性的超原子产生多种线性关系的广义几何相位,为高效率、宽频带的超表面构建提供了一种途径.

## 2.3 传输相位超表面

电磁波在介质传播过程中累积的相位被称为传输相位.基于传输相位的超表面调制单元主要是由高折射率的介质材料构建的.传输相位超表面可通过改变介质的等效折射率来调控光学波前.Khorasaninejad等人<sup>[31]</sup>证明了波导是实现传输相位的主要物理机制,即每个结构单元可近似为一个截断波导.对于单个波导,电磁波通过高度为 $H$ 的微结构的传输相位 $\varphi$ 定义为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} H \quad (1)$$

其中, $\lambda$ 是自由空间波长; $n_{\text{eff}}$ 是等效折射率.对于超表面光学元件,在不增加高度 $H$ 的情况下,可以通过在空间上改变等效折射率 $n_{\text{eff}}$ 来实现相位设计.为了实现

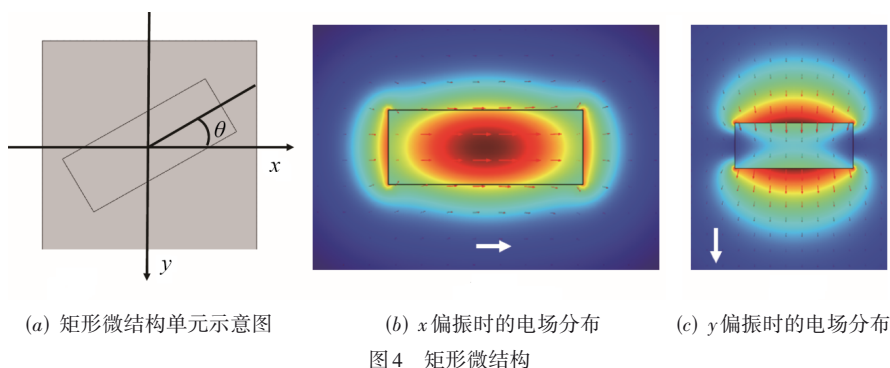


图4 矩形微结构

$\Delta\varphi = 2\pi$ 的相位覆盖,应满足以下条件:

$$H = \frac{\lambda}{\Delta n_{\text{eff}}} \quad (2)$$

考虑具有最大和最小填充因子的微结构时,即  $\Delta n_{\text{eff}} = n - 1$ ,只要折射率  $n$  大于2的介质材料,就可以获得亚波长高度的  $2\pi$  相位覆盖.但实际上,通常需要用不同尺寸大小的微结构单元来获得  $2\pi$  相位覆盖<sup>[31-33]</sup>.以圆柱形微结构单元为例,对其波导模式进行仿真分

析,如图5所示,不同直径的微圆柱,由于传播的光场分布不同,其等效折射率不一样,从而可以实现对传输相位的调控.因此,通过合适地设计不同直径的微圆柱,就能使超表面调制单元满足0到  $2\pi$  的相位覆盖.此外,由图5分析可知,选用的介质材料的折射率越大,超表面微结构的高度就越小.所以,为了降低超表面器件的加工难度,高折射率材料通常被用于减小微结构的高度.

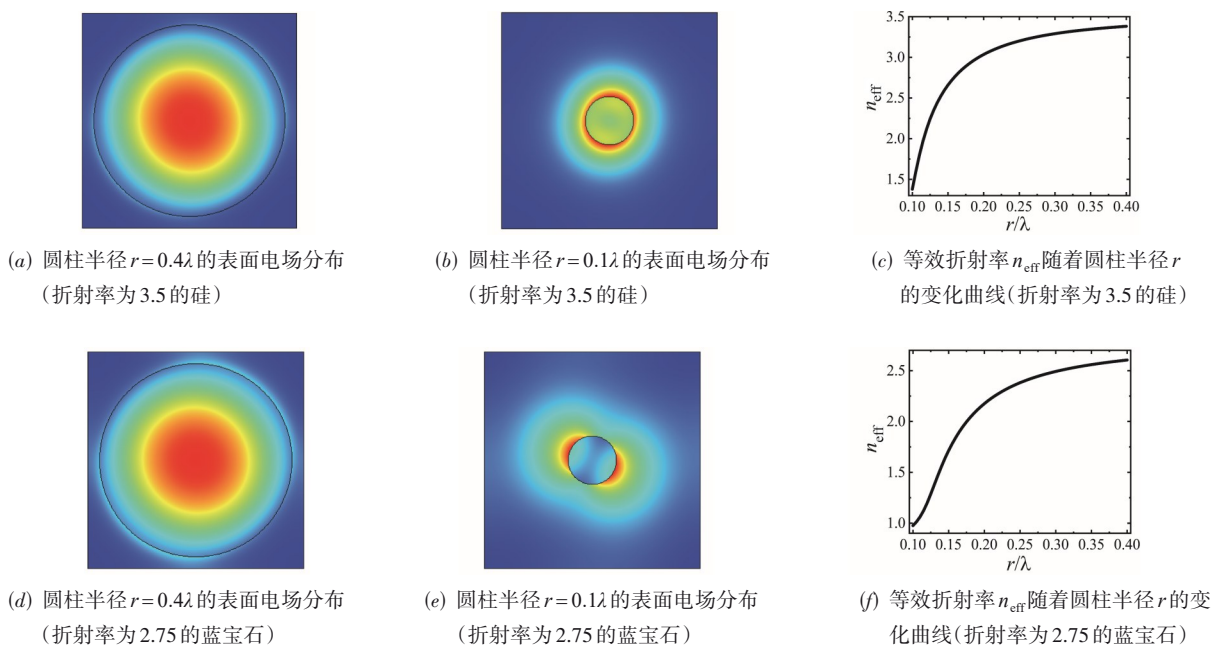


图5 圆柱形微结构

除了上述介绍的3种超表面相位调控外,还有一些超表面不只是基于单一的相位调制方法,而是集成了两种或多种相位操作,如共振相位和几何相位联合<sup>[34-36]</sup>、几何相位与传输相位联合<sup>[37-41]</sup>等.此外,逆向设计、拓扑优化等新的设计方法也可能是超表面结构优化的发展趋势.但由于这些新原理和方法还未推广到太赫兹波段,故不在本文的主要关注范围内.

### 3 太赫兹超表面透镜及研究进展

为了产生汇聚太赫兹光束所需的球面波前,经过超表面的入射太赫兹波应满足如下相位分布关系:

$$\varphi(r, \omega) = -\frac{\omega}{c} \left( \sqrt{r^2 + f^2} - f \right) \quad (3)$$

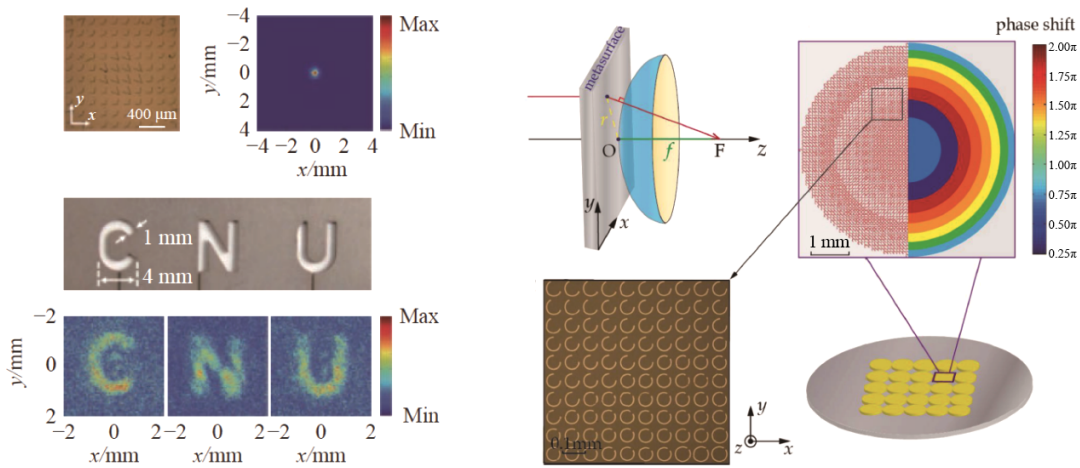
其中,  $\omega$  是入射电磁波的角频率,  $r$  是微结构单元的径向坐标,  $f$  是超表面透镜的设计焦距.基于此双曲面相位分布,具有平面结构的超表面透镜可以实现太赫兹波

的无球差聚焦,这对高分辨率的太赫兹成像系统设计具有重要意义.

### 3.1 静态太赫兹超表面透镜

由于太赫兹元件小型化和集成化的发展需求,早期的太赫兹超表面透镜大多是基于共振相位的单层金属结构的,例如 V 形天线<sup>[42,43]</sup>和 C 形开口谐振环<sup>[44]</sup>等. 2013 年, Hu 等人<sup>[42]</sup>在厚度为 100 nm 的金薄膜中设计互补 V 形天线阵列来操纵电磁波传播,首次在太赫兹波段通过实验验证了超薄超表面透镜的聚焦和成像性能,如图 6(a) 所示. 但是,由于设计的超薄太赫兹超表面透镜采用的是单层金属结构,实验测量的聚焦效率仅约为 1%. 2015 年, Wang 等人<sup>[44]</sup>采用

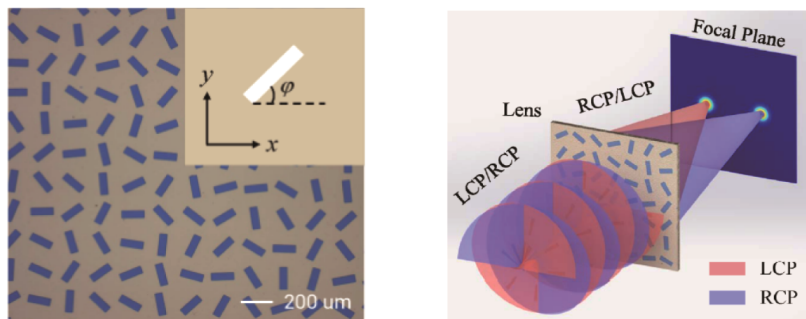
具有相位不连续的 C 形开口环谐振器,提出了一种基于共振相位超表面的太赫兹平面透镜阵列,如图 6(b) 所示. 通过调节 C 形开口环的几何形状和开口大小,能够有效地实现  $2\pi$  的相位覆盖,并在 0.5~0.9 THz 范围内实现了良好的宽带聚焦性能. 后来, Wang 等人<sup>[45]</sup>提出了一种基于几何相位调控的自旋选择太赫兹超表面透镜,器件由矩形金属狭缝天线单元设计而成,如图 7(a) 所示,可以在 0.3 THz 的宽带频率范围内聚焦和成像. 优化的几何相位超表面可以使具有不同自旋状态的太赫兹波聚焦在焦平面上不同的位置,如图 7(b) 所示,两个正交圆偏振态之间的转换效率约为 6%.



(a) 太赫兹超表面透镜及其聚焦和成像测试<sup>[42]</sup>

(b) 太赫兹超表面透镜阵列结构示意图<sup>[43]</sup>

图 6 超薄超表面透镜



(a) 太赫兹超表面透镜

(b) 自旋选择聚焦示意图

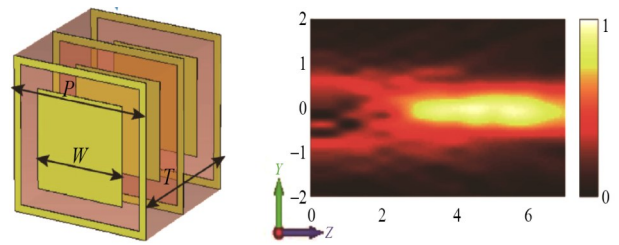
图 7 自旋选择太赫兹超表面透镜<sup>[45]</sup>

由于金属单元结构欧姆损耗的存在,单层金属结构不可能实现伴随高透射率的  $2\pi$  相位覆盖,它们的交叉偏振转换效率已被证明小于 50%<sup>[46]</sup>. 为了提高器件的效率,研究人员提出了反射型的金属-介质-金属 (Metal-Insulator-Metal, MIM) 结构<sup>[21,47,48]</sup>. 反射型的 MIM 结构是在单层金属超表面的衬下方增加一层金

属层,其作用是将透射的电磁波全部反射回去,从而提高超表面透镜的效率. 例如, Kuznetsov 等人<sup>[47]</sup>提出了一种基于 U 形开口谐振器的反射式共振相位超表面,将频率为 0.35 THz 的太赫兹入射波聚焦,实验测得的转换效率高达 80%. 同时,为了发展更适合实际应用的透射型超表面,研究人员又提出了具有多层结构的惠

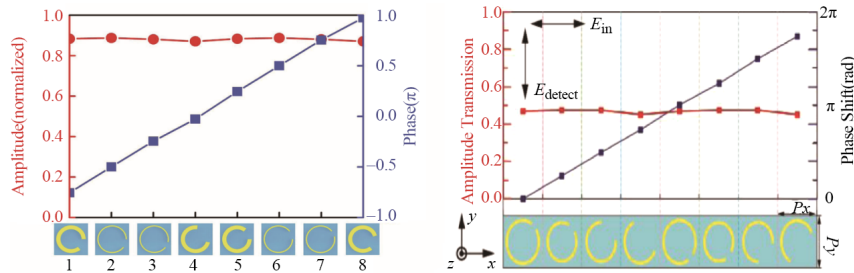
更斯超表面来有效地操纵太赫兹透射波的波前<sup>[49-51]</sup>. 比如,分别在U形超表面的前后加入金属光栅形成三层结构,偏振转换效率可通过优化几何相位超表面与光栅之间的介质层厚度来调节<sup>[50]</sup>. Yang等人<sup>[49]</sup>采用金属-介质-金属多层结构提出了具有非线性相位分布的太赫兹超表面透镜,如图8所示,结构单元由铝层上的方形槽构成,通过选取方形槽的不同宽度获得超表面透镜聚焦所需的相位分布. 该透镜空间分辨率高达 $50\ \mu\text{m}$ ,仅为太赫兹波长的 $1/6$ ,可以将频率为 $0.95\ \text{THz}$ 的入射波聚焦成波长量级的光斑,相应的效率超过45%,高于单层金属结构太赫兹超表面透镜的效率. Zhao等人<sup>[51]</sup>利用亚波长光栅和亚波长C形开口环阵列组成的结构,设计了一种转换效率达到85%的透射式太赫兹超表面透镜. 如图9所示,相比文献[43]中单层金属结构的C形开口环谐振器,由于衬下方金属光栅层的引入,共振相位超表面的交叉偏振转换效率提高了近一倍. 后来, Fan等人<sup>[52]</sup>从理论上提出了一种用于高效偏振转换和太赫兹波波前操纵的三层手性结构超表面,由于类Fabry-Perot腔的增强效应,可以实现超过

90%的交叉偏振转换效率. 设计的共振相位超表面透镜通过改变单元结构中方形开口环谐振器的几何参数来满足聚焦所需的 $2\pi$ 相位分布,并在 $0.8\ \text{THz}$ 的太赫兹波入射下实现了亚波长聚焦. 相比单层金属结构超表面,多层结构的超表面透镜在提高器件效率的同时,也大大增加了设计精度和制造难度. 此外,金属中的等离子体共振限制了金属结构超表面器件的调控带宽范围.



(a) 单元结构示意图 (b) 超表面透镜在传播方向的电场分布

图8 具有非线性相位分布的太赫兹超表面透镜<sup>[49]</sup>



(a) 两层金属结构单元交叉偏振的振幅和相位<sup>[51]</sup>

(b) 单层金属结构单元交叉偏振散射的振幅和相位<sup>[43]</sup>

图9 透射式太赫兹超表面透镜

另一种实现高效太赫兹超表面透镜的方法是利用全介质结构的超表面. 由于硅等介质材料在太赫兹范围内具有低损耗、足够高的介电常数等稳定特性,研究人员开发了基于低损耗和高折射率的全介质超表面来替代等离子体超表面以消除金属损耗. 2017年, Jia等人<sup>[53]</sup>设计了一种基于传输相位的全介质透射式太赫兹超表面透镜,如图10所示,通过简单地改变亚波长十字形微结构单元的长度实现 $2\pi$ 相位覆盖. 实验证明了其可将波长为 $96.5\ \mu\text{m}$ (对应频率 $3.11\ \text{THz}$ )的连续太赫兹波聚焦成一个半高全宽为 $630\ \mu\text{m}$ 的光斑,聚焦效率为24%,高于许多先前报道的等离子体超表面透镜的聚焦效率. Gauffillet等人<sup>[54]</sup>提出了一种在太赫兹频率范围内基于传输相位的梯度折射率超表面透镜,在 $0.3\ \text{THz}$ 的太赫兹波入射下模拟得到焦斑的半高全宽为 $0.61\lambda$ ,超衍射聚焦在理论上得以实现. Zhang等人<sup>[55]</sup>提出并证明了偏振相关的透射型全硅超表面

用于太赫兹波波前的操控,实验中分别以 $x$ 方向和 $y$ 方向的偏振光入射,得到了不同的聚焦效果,并且两个偏振方向的入射太赫兹波波前调控效率分别为59.7%和61.3%,这远远高于对应的单层金属超表面透镜的效率. 为了实现相位调制的高空间分辨率和大数值孔径(NA)的太赫兹透镜, Jiang等人<sup>[56]</sup>提出了基于几何相位的全介质超表面透镜用于太赫兹波聚焦和成像. 如图11所示,设计的太赫兹超表面透镜具有亚波长单元结构,半径为 $300\lambda$ ,焦距为 $300\lambda$ ,数值孔径为0.707,交叉偏振转换效率达到80%. 实验结果表明,在波长为 $118.8\ \mu\text{m}$ 的太赫兹波入射条件下,该超表面透镜在 $x$ 方向和 $y$ 方向的半高全宽分别为 $1.28\lambda$ 和 $1.145\lambda$ ,并且在正反两种入射情况下都具备聚焦和成像功能. 表1总结了以上介绍的基于单层金属结构、多层金属结构和全介质结构太赫兹超表面透镜的性能参数.

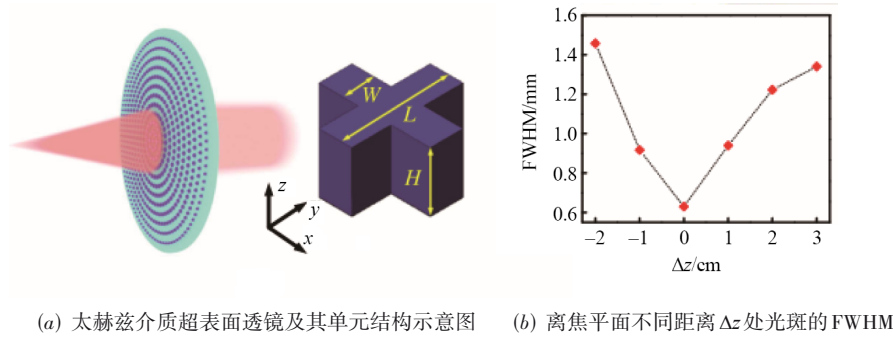


图 10 全介质透射式太赫兹超表面透镜<sup>[53]</sup>

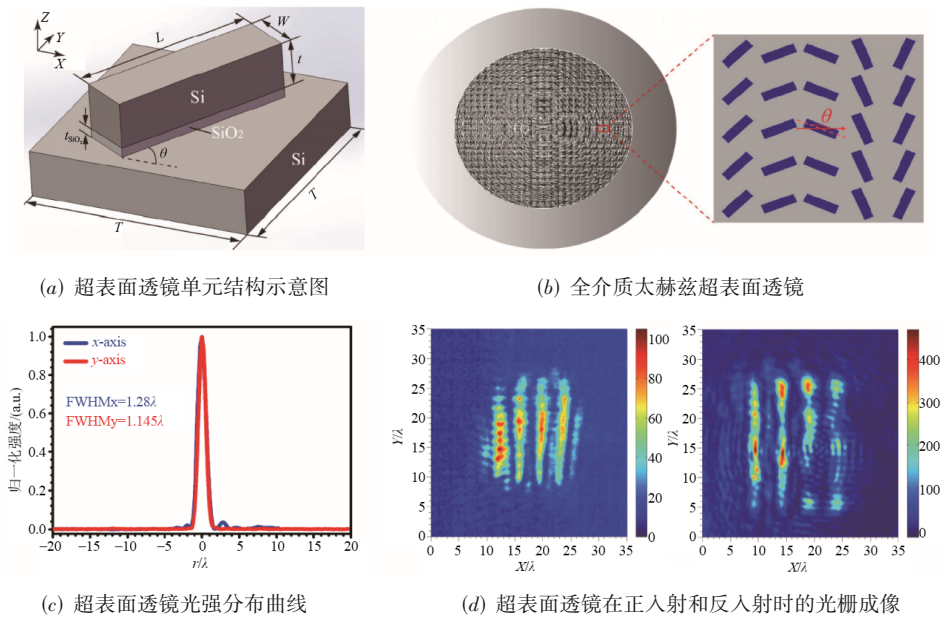


图 11 基于几何相位的全介质超表面透镜<sup>[56]</sup>

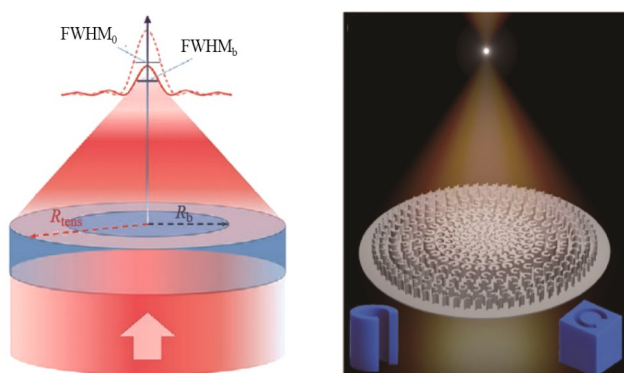
表 1 不同结构的太赫兹超表面透镜的性能对比

文献	工作频率/ THz	微结构周 期/ $\mu\text{m}$	透镜厚度/nm	透镜半径/ mm	NA 值	材料结构	效率/%	相位调控
文献[42]	0.75	200	100	4	0.71	单层金属(Au)	1	共振相位
文献[43]	0.80	80	200	2.76	0.27	单层金属(Al)	—	共振相位
文献[45]	0.75	200	100	4	0.71	单层金属(Au)	6	几何相位
文献[47]	0.35	286	350	35	0.50	反射型 MIM(Al)	—	共振相位
文献[49]	0.95	100	200	2	0.41	透射型 MIM (Al)	45	传输相位
文献[53]	3.11	80	$2 \times 10^4$	5	0.16	全介质(Si)	24	传输相位
文献[55]	1.00	150	$2 \times 10^5$	6	0.51	全介质(Si)	60	传输相位
文献[56]	2.52	46.9	$6.57 \times 10^4$	35.64	0.71	全介质(Si)	—	几何相位

值得一提的是,超表面透镜上每个单元结构具有强烈的模式色散,导致超表面透镜存在较大的色差,从而使不同波长的太赫兹入射波不能会聚到同一焦点上,这会严重阻碍其宽带应用.近 10 年来,宽带消色差超表面透镜研究在可见光和红外波段已取得了较好的发展,但由于制备材料的选取、样品加工以及单元结构设计等方面的局限,太赫兹波段的消色差超表

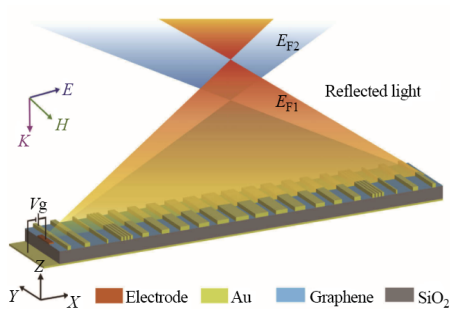
面透镜只有很少的研究. Zhao 等人<sup>[57]</sup>通过同时控制群延迟、频率相关相位和振幅透过率,设计了一个半径为 5.11 mm、焦距为 40.39 mm、NA 值为 0.125、频率范围为 2.29~2.70 THz 的宽带消色差太赫兹超表面透镜,如图 12(a)所示,并从实验上展示了超表面透镜在 0.1 THz 带宽内的消色差超衍射聚焦性能,其聚焦效率达到 30%. 由于采用了几何相位调制方法,该消色差透镜具

有偏振敏感性. Cheng 等人<sup>[58]</sup>提出了一种基于传输相位超表面的具有高纵横比的消色差太赫兹透镜,通过 C 形互补结构单元获得相位补偿,透镜直径为 10 mm, NA 值为 0.385,如图 12(b)所示. 在 0.3~0.8 THz 的宽带频率范围从理论和实验上证明了太赫兹超表面透镜的消色差行为,最大聚焦效率达到 68%,这大大高于等离子体超表面透镜的效率以及其他介质型消色差超表面透镜的效率.

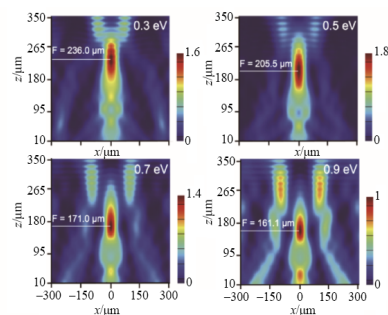


(a) 基于几何相位的宽带消色差太赫兹超表面透镜<sup>[57]</sup> (b) 基于结构相位的消色差太赫兹透镜<sup>[58]</sup>

图 12 宽带消色差太赫兹超表面透镜结构示意图



(a) 透镜结构示意图



(b) 电场分布

图 13 基于石墨烯的可调谐太赫兹超表面透镜及不同费米能级的电场分布<sup>[61]</sup>

除了基于石墨烯的电控可调谐太赫兹超表面透镜,将超表面与相变材料二氧化钒( $\text{VO}_2$ )相结合的温控超表面透镜也有报道. He 等人<sup>[63]</sup>提出并通过实验验证了一种基于  $\text{VO}_2$  相变的可调谐太赫兹超表面透镜,它由 V 形金天线、 $\text{VO}_2$  薄膜层和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衬底三层结构构成,如图 14(a)所示. 由图 14(b)可知,太赫兹超表面透镜的聚焦强度对温度很敏感,当温度从 293 K 调整到 353 K 时,聚焦强度会随着焦距的改变而改变. 因此,可以通过调整温度实现太赫兹波聚焦光斑强度的连续变化. 后来, Wang 等人<sup>[64]</sup>用  $\text{VO}_2$  薄膜刻蚀形成的 C 形微结构单元设计了一种温控可调谐太赫兹超表面透镜,当温

### 3.2 动态太赫兹超表面透镜

虽然太赫兹超表面透镜的研究取得了一系列可喜的成绩,但是集成在超表面上的微结构一旦通过光刻等技术制备完成后,便不能再改变其尺寸和形貌,即其功能和工作波长就此确定,这阻碍了超表面透镜应用领域的拓展. 为了优化太赫兹超表面器件的波前调控功能,提高器件的利用率以及拓展器件的应用领域,探索可调谐、可重构的主动型超表面透镜成了近几年的研究热点之一. 其中,石墨烯等新兴材料的加入使动态调控太赫兹超表面透镜功能成为可能<sup>[59-62]</sup>. 例如, Zhang 等人<sup>[61]</sup>从理论上提出了一种掺杂石墨烯的电控可调太赫兹超表面透镜,不同宽度和间隙的金属条组合阵列可以提供聚焦太赫兹波所必需的  $2\pi$  相位覆盖,如图 13 所示. 当改变掺杂石墨烯的费米能级时,太赫兹超表面透镜表现出明显的焦距可调性和焦强可调性,焦点能够在  $90.4 \mu\text{m}$  (对应  $3\lambda$ ) 内移动,最大聚焦效率达到 61.62%. 接着, He 等人<sup>[62]</sup>采用椭圆形穿孔石墨烯超表面从理论上提出了一种基于几何相位的可调谐反射型太赫兹超表面透镜,在焦距可调性达到  $72 \mu\text{m}$  的基础上,其聚焦效率进一步得到提高,达到 70%. 由于采用了几何相位的波前调节方式,可调谐超表面透镜还能够同时进行宽带聚焦调制,可调聚焦功能可以在 3.7~5.3 THz 的宽带范围内实现超过 60% 的聚焦效率.

度高于  $\text{VO}_2$  相变温度时,入射的太赫兹平面波可以聚焦为 4 个焦点,在 0.8 THz 的设计工作频率下衍射效率达到了 44%. 此外, Shen 等人<sup>[65]</sup>提出并演示了由两个几何相位透镜叠加构成的液晶可调谐太赫兹超表面透镜. 该器件具有自旋选择聚焦特性,可以在 0.8~1.2 THz 频率范围内分离具有相反手性圆偏振入射光的焦斑,偏振转换效率最高达到 70.2%. 这种液晶太赫兹超表面透镜具有动态可调谐、加工成本相对较低的优势<sup>[66]</sup>,但它不能实现亚波长的近场聚焦,并且上下基板的存在导致整体厚度较大,不利于太赫兹器件的集成化和小型化. 最近, Bosch 等人<sup>[67]</sup>将液晶作为环境介

质,通过外电场调控液晶折射率在可见光和近红外波段实现了具有连续变焦潜力的超表面透镜,规避了上

述液晶太赫兹超表面透镜的弊端,为可调谐的液晶太赫兹超表面透镜设计提供了一种新思路.

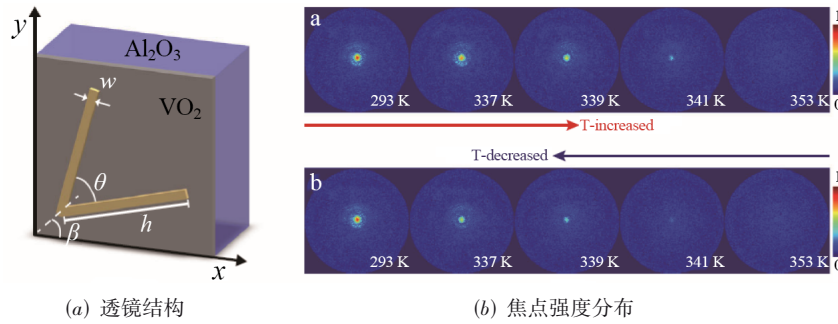


图 14 基于 VO<sub>2</sub> 的可调谐超表面透镜及不同温度的焦点强度分布<sup>[63]</sup>

以上介绍的可调谐太赫兹超表面透镜是利用材料特性的改变来动态调控太赫兹超表面透镜的聚焦功能的,而功能复用的可调谐太赫兹超表面透镜研究工作也有被报道. 2019年,Zang 等人<sup>[68]</sup>提出了一种具有偏振可控功能的多焦点太赫兹超表面透镜,其焦点的线性偏振态可以通过设计几何超表面的相位轮廓进行控制,无偏振旋转和有偏振旋转的横向焦斑的聚焦效率分别为 32% 和 30%. 最近,Zhou 等人<sup>[69]</sup>提出了一种依赖螺旋度的多焦点太赫兹超表面透镜,如图 15 所示,可以在 0.64 THz 的圆偏振光入射时独立地在横向(或纵向)生成多个焦点,并且可在线偏振太赫兹波入射下实现螺旋度相关的多焦点复用,聚焦效率可达到 36.8%. 这种多焦点复用的太赫兹超表面透镜可应用于多平面

成像,可能为未来的紧凑型太赫兹多功能器件设计提供一个平台.

此外,文献[70~76]提出了一种用于设计数字和可编程超表面的编码方案,使用具有相反相位响应的数字编码“0”和“1”代替介质参数,从而在空间域、频域和空频域提供灵活和实时的电磁波调控. 将偏置二极管集成到超表面中,可以通过使用现场可编程门阵列来控制偏置二极管的“开”和“关”状态,以数字方式修改超表面上的电压分布,从而实现可编程超表面所需的“0”和“1”状态. 如果将这种方法扩展到太赫兹区域,相信它将在太赫兹通信、成像和检测方面产生一系列实际应用,如可编程太赫兹数字超表面透镜等.

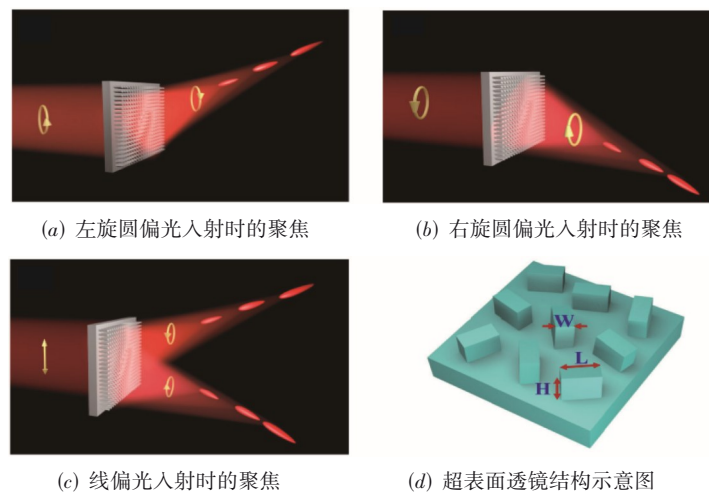


图 15 依赖螺旋度的多焦点太赫兹超表面透镜<sup>[69]</sup>

#### 4 总结与展望

近年来,太赫兹超表面透镜的加工技术和应用得到了迅速发展. 根据工作机理,本文以 V 形共振相位超表面、矩形几何相位超表面和圆柱形传输相位超表面的结构单元为例进行分析,着重阐述了超表面透镜设

计的波前调制方法. 以超表面器件的聚焦效率为主线,介绍了基于单层结构、多层结构、全介质结构以及可调谐的太赫兹超表面透镜的研究进展和典型工作.

太赫兹波前调控的超表面研究已经取得了一定的成果,但在制备过程和实际应用中仍面临许多技术挑

战. 譬如,相比光学波段和红外波段,太赫兹超表面透镜的效率相对较低,开发具有高聚焦效率和远场超聚焦的太赫兹超表面透镜是该领域研究的迫切需求之一. 同时,可调谐超表面透镜在衍射聚焦、低串扰性能等方面的指标尚待提升,并且现有的可调谐功能仅限于超表面的整体操作,而不是对单个人工微结构单元的独立调制. 实现单个结构单元可调谐的太赫兹超表面透镜可以对太赫兹波提供灵活而实时的操作,结合人工智能算法和逆向设计,可以利用太赫兹超表面透镜实现如太赫兹波段隐身、全息加密通信等前所未有的功能. 在可见光和红外波段,研究人员已对超表面透镜的高聚焦效率( $>90\%$ )<sup>[77]</sup>、大NA值( $>0.99$ )<sup>[78]</sup>、宽带消色差<sup>[36]</sup>和大面积制备<sup>[79]</sup>等方面进行了富有成效的研究,可为太赫兹超表面透镜性能的提升提供有价值的参考. 譬如,通过设计抗反射涂层等增透结构大大提高太赫兹入射波的透过率,实现高效率的透射型太赫兹超表面透镜. 在不久的将来,具有高聚焦效率、大NA值、宽带宽、大口径和智能动态调控的太赫兹超表面透镜可以集成到太赫兹显微成像、太赫兹通信等应用系统中,如图16所示,以实现系统更多的功能和更紧凑的配置. 例如,NA值接近于1的超表面透镜由于其超高的分辨率,可应用于未来的太赫兹显微成像系统中;通过色散工程优化设计的宽谱超表面透镜其带宽有望覆盖整个太赫兹通信频谱范围;大口径的超表面透镜由于其轻薄且紧凑的优点,可满足空间太赫兹通信天线系统更新的需求. 随着未来太赫兹超表面透镜偏振、色散和智能动态调控等性能的垂直集成以及大面积制造工艺的实现,其有望被集成在许多现有的光学系统中替代传统透镜. 此外,基于超表面的单个太赫兹透镜已经实现了传统功能器件难以实现的大量应用,构建集成多种超表面器件以操纵太赫兹波的太赫兹超系统,或将是一个有前景的发展方向. 比如,可以参照传统的太赫兹系统,设计由两个或多个级联超表面器件组成的太赫兹超系统,以实现更复杂的功能.

随着近年来太赫兹技术在公共安全、无损检测、高速通信等领域应用范围的日益拓展,相信具备高效率、

新颖功能、紧凑尺寸、低能耗、可扩展性和 CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 量产工艺兼容性等优良特性的太赫兹超表面透镜定会发挥越来越重要的作用,推动各种太赫兹应用系统的集成化和小型化.

#### 参考文献

- [1] TAO Y H, FITZGERALD A J, WALLACE V P. Non-contact, non-destructive testing in various industrial sectors with terahertz technology[J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 712.
- [2] MENG K, CHEN T N, CHEN T, et al. Terahertz pulsed spectroscopy of paraffin-embedded brain glioma[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(7): 077001.
- [3] ZOU Y, LIU Q, ZHAO J H, et al. Label-free monitoring of cell death induced by oxidative stress in living human cells using terahertz ATR spectroscopy[C]//2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE, 2018: 1-2.
- [4] NAGATSUMA T, DUCOURNAU G, RENAUD C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 371-379.
- [5] 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.
- [6] HUANG L L, CHEN X Z, MÜHLENBERND H, et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [7] 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.
- [8] LIU X L, STARR T, STARR A F, et al. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(20): 207403.
- [9] CHEN G, LI Y Y, WANG X Y, et al. Super-oscillation far-field focusing lens based on ultra-thin width-varied metallic slit array[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(3): 335-338.
- [10] 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.
- [11] PFEIFFER C, GRBIC A. Bianisotropic metasurfaces for optimal polarization control: Analysis and synthesis[J]. *Physical Review Applied*, 2014, 2(4): 044011.

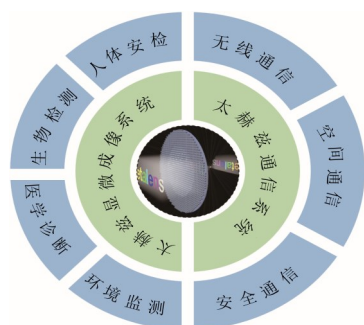


图16 超表面透镜在太赫兹系统中的应用

- [12] ZUO R Z, LIU W W, CHENG H A, et al. Breaking the diffraction limit with radially polarized light based on dielectric metalenses[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(21): 1800795.
- [13] LIANG H W, LIN Q L, XIE X S, et al. Ultrahigh numerical aperture metalens at visible wavelengths[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(7): 4460-4466.
- [14] GAO S, PARK C S, ZHOU C Y, et al. Twofold polarization-selective all-dielectric trifoci metalens for linearly polarized visible light[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(21): 1900883.
- [15] FAN Z B, QIU H Y, ZHANG H L, et al. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 67.
- [16] OU K, YU F L, LI G H, et al. Mid-infrared polarization-controlled broadband achromatic metadevice[J]. *Science Advances*, 2020, 6(37): eabc0711.
- [17] LIN P, CHEN W T, YOUSEF K M A, et al. Coherent Raman scattering imaging with a near-infrared achromatic metalens[J]. *APL Photonics*, 2021, 6(9): 096107.
- [18] XU Q, SU X Q, ZHANG X Q, et al. Mechanically reprogrammable pancharatnam-berry metasurface for microwaves[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(1): 016002.
- [19] ZHOU Z P, LI J T, SU R B, et al. Efficient silicon metasurfaces for visible light[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(3): 544-551.
- [20] LI X, XIAO S Y, CAI B G, et al. Flat metasurfaces to focus electromagnetic waves in reflection geometry[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 4940-4942.
- [21] SUN S L, YANG K Y, WANG C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [22] CHEN W T, YANG K Y, WANG C M, et al. High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(1): 225-230.
- [23] PORS A, NIELSEN M G, ERIKSEN R L, et al. Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 829-834.
- [24] KANG M, FENG T H, WANG H T, et al. Wave front engineering from an array of thin aperture antennas[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15882-15890.
- [25] CHEN X Z, HUANG L L, MÜHLENBERND H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1198.
- [26] LIN D M, FAN P Y, HASMAN E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [27] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [28] PU M B, LI X, MA X L, et al. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, 1(9): e1500396.
- [29] XIE X, PU M B, JIN J J, et al. Generalized pancharatnam-berry phase in rotationally symmetric meta-atoms[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(18): 183902.
- [30] GUO Y H, PU M B, ZHANG F, et al. Classical and generalized geometric phase in electromagnetic metasurfaces[J]. *Photonics Insights*, 2022, 1(1): R03.
- [31] KHORASANINEJAD M, ZHU A Y, ROQUES-CARMES C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(11): 7229-7234.
- [32] ARBABI A, HORIE Y, BALL A J, et al. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7069.
- [33] SUN W J, HE Q, SUN S L, et al. High-efficiency surface plasmon meta-couplers: Concept and microwave-regime realizations[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(1): e16003.
- [34] AIETA F, KATS M A, GENEVET P, et al. Achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[C]//2015 IEEE Photonics Conference (IPC). Piscataway: IEEE, 2015: 202-203.
- [35] WANG S M, WU P C, SU V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 187.
- [36] CHEN W T, ZHU A Y, SANJEEV V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 220-226.
- [37] BALTHASAR MUELLER J P, RUBIN N A, DEVLIN R C, et al. Metasurface polarization optics: Independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(11): 113901.
- [38] WANG S M, WU P C, SU V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [39] ZHANG F, PU M B, LI X, et al. All-dielectric metasurfaces for simultaneous giant circular asymmetric transmission and wavefront shaping based on asymmetric photon-

- ic spin-orbit interactions[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(47): 1704295.
- [40] ZHANG J L, LIANG Y Y, WU S Y, et al. Single-layer dielectric metasurface with giant chiroptical effects combining geometric and propagation phase[J]. *Optics Communications*, 2021, 478: 126405.
- [41] GUO Y H, PU M B, ZHAO Z Y, et al. Merging geometric phase and plasmon retardation phase in continuously shaped metasurfaces for arbitrary orbital angular momentum generation[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(11): 2022-2029.
- [42] HU D, WANG X K, FENG S F, et al. Ultrathin terahertz planar elements[J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(2): 186-191.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] WANG S, WANG X K, KAN Q A, et al. Spin-selected focusing and imaging based on metasurface lens[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26434-26441.
- [46] MONTICONE F, ESTAKHRI N M, ALÙ A. Full control of nanoscale optical transmission with a composite metascreen[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(20): 203903.
- [47] KUZNETSOV S A, ASTAFEV M A, BERUETE M, et al. Planar holographic metasurfaces for terahertz focusing[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 7738.
- [48] CHEN Z B, DENG H, XIONG Q X, et al. Phase gradient metasurface with broadband anomalous reflection based on cross-shaped units[J]. *Applied Physics A*, 2018, 124(3): 281.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] ZHAO H, WANG X K, HE J W, et al. High-efficiency terahertz devices based on cross-polarization converter[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17882.
- [52] FAN J P, CHENG Y Z. Broadband high-efficiency cross-polarization conversion and multi-functional wavefront manipulation based on chiral structure metasurface for terahertz wave[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(2): 025109.
- [53] JIA D L, TIAN Y, MA W, et al. Transmissive terahertz metalens with full phase control based on a dielectric metasurface[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4494-4497.
- [54] GAUFILLET F, MARCELLIN S, AKMANISOY É. Dielectric metamaterial-based gradient index lens in the terahertz frequency range[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 1-5.
- [55] ZHANG H F, ZHANG X Q, XU Q A, et al. High-efficiency dielectric metasurfaces for polarization-dependent terahertz wavefront manipulation[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(1): 1700773.
- [56] JIANG X E, CHEN H, LI Z Y, et al. All-dielectric metalens for terahertz wave imaging[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14132-14142.
- [57] ZHAO F, LI Z P, DAI X M, et al. Broadband achromatic sub-diffraction focusing by an amplitude-modulated terahertz metalens[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(21): 2000842.
- [58] CHENG Q Q, MA M L, YU D, et al. Broadband achromatic metalens in terahertz regime[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(20): 1525-1531.
- [59] KIM T T, KIM H, KENNEY M, et al. Amplitude modulation of anomalously refracted terahertz waves with gated-graphene metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(1): 1700507.
- [60] DING P, LI Y, SHAO L, et al. Graphene aperture-based metalens for dynamic focusing of terahertz waves[J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 28038-28050.
- [61] ZHANG Z K, QI X Q, ZHANG J F, et al. Graphene-enabled electrically tunability of metalens in the terahertz range[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 28101-28112.
- [62] HE J J, CHEN R K, LI Y F, et al. Graphene metalens with dynamic focusing and plane focusing in the terahertz range[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(20): 5752-5758.
- [63] 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.
- [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] SHEN Z X, ZHOU S H, GE S J, et al. Liquid crystal tunable terahertz lens with spin-selected focusing property

- [J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8800-8807.
- [66] ZHOU S H, SHEN Z X, LI X N, et al. Liquid crystal integrated metalens with dynamic focusing property[J]. Optics Letters, 2020, 45(15): 4324-4327.
- [67] BOSCH M, SHCHERBAKOV M R, WON K, et al. Electrically actuated varifocal lens based on liquid-crystal-embedded dielectric metasurfaces[J]. Nano Letters, 2021, 21(9): 3849-3856.
- [68] ZANG X F, DING H Z, INTARAVANNE Y, et al. Multi-foci metalenses: A multi-foci metalens with polarization-rotated focal points[J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(12): 1970051.
- [69] ZHOU T, DU J, LIU Y S, et al. Helicity multiplexed terahertz multi-foci metalens[J]. Optics Letters, 2020, 45(2): 463-466.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] LI L L, TIE J C, JI W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. Nature Communications, 2017, 8: 197.
- [74] LI L L, RUAN H X, LIU C, et al. Machine-learning reprogrammable metasurface imager[J]. Nature Communications, 2019, 10: 1082.
- [75] ZHANG L, CHEN X Q, SHAO R W, et al. Nonreciprocal metasurfaces: Breaking reciprocity with space-time-coding digital metasurfaces[J]. Advanced Materials, 2019, 31(41): 1970295.
- [76] MA Q A, LIU C, XIAO Q A, et al. Information metasurfaces and intelligent metasurfaces[J]. Photonics Insights, 2022, 1(1): R01.
- [77] WANG Y J, CHEN Q M, YANG W H, et al. High-efficiency broadband achromatic metalens for near-IR biological imaging window[J]. Nature Communications, 2021, 12: 5560.
- [78] PANIAGUA-DOMÍNGUEZ R, YU Y F, KHAIDAROV E, et al. A metalens with a near-unity numerical aperture [J]. Nano Letters, 2018, 18(3): 2124-2132.
- [79] HU T, ZHONG Q Z, LI N X, et al. CMOS-compatible a-

Si metalenses on a 12-inch glass wafer for fingerprint imaging[J]. Nanophotonics, 2020, 9(4): 823-830.

#### 作者简介



曾志强 男, 1983 年出生, 四川宜宾人. 中国工程物理研究院流体物理研究所博士研究生. 主要研究方向为微纳米光学器件、太赫兹超表面与超材料应用.

E-mail: zhiqiang\_zeng@163.com



杜良辉(通讯作者) 男, 1985 年出生, 湖北荆州人. 中国工程物理研究院副研究员. 主要研究方向为光电子学、太赫兹科学与技术.

E-mail: lianghui\_du@163.com