

可调谐多功能超表面的研究进展

贺景琳, 董建峰*

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 超表面具有在亚波长的厚度范围内操纵电磁波的卓越性能, 伴随调谐技术的发展和器件小型化、集成化的需求, 超表面设计已从单功能结构转向多功能集成, 在不同的激励条件下实现特定功能的切换。从外加电场、热控、机械拉伸、波长与极化控制等较常见的调谐方法出发, 分别介绍多种具有双功能、三功能的可调谐超表面。最后, 对可调谐多功能超表面的进一步研究发展进行了展望。

关键词: 可调谐; 超表面; 多功能; 功能切换; 集成器件

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)03-0060-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of tunable multifunctional metasurfaces

HE Jinglin, DONG Jianfeng*

(College of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China)

Abstract: Metasurface has excellent performance of manipulating electromagnetic waves in the sub-wavelength thickness range. With the development of tuning technology and the need for miniaturization and integration of devices, the design of metasurface has changed from single-function structure to multi-function integration, realizing the switch of specific functions under different excitation factors. Based on several common tuning methods, such as external electric field, thermal control, mechanical stretching, wavelength and polarization manipulation, this paper introduces a variety of tunable metasurfaces with dual and three functions. Finally, the prospect of further research and development of the tunable multi-functional metasurface is suggested.

Key words: tunable, metasurface, multifunction, function switching, integrated device

0 引言

超表面的二维平面结构一般由金属和介质层组成, 其厚度比入射波波长小。随着研究的深入, 人们提出了越来越多具有多功能的超表面, 但这类超表面的厚度随之增加, 单元结构更加复杂, 并且一旦制备完成, 功能也随之固定。因此, 若将多种电磁(光学)功能集合到一个器件中, 在不同的激励条件下运行并能够灵活切换到想要的功能, 这样可以有效地压缩超表面的制作成本, 且拓宽其应用领域。于是, 许多研究人员

便在超表面设计中引入了可调材料, 如石墨烯^[1-6]、相变材料^[7-13]等; 再加上一系列的主动控制方法, 如光激励^[2-3]、外加电场^[1-6]、热控^[7-12]和机械拉伸^[13-14]等, 为可调谐的多功能超表面的研发创造了良好的先决条件。然而, 目前具有 2 种以上可调谐的多功能超表面的报道很少。

本文对近年来关于可调谐的多功能超表面的相关研究进行总结, 分别从具备双功能、三功能的可调谐超表面对应的调谐方法出发, 重点介绍各类灵活可调的多功能超表面。

1 可调谐的双功能超表面

可调谐的双功能超表面的研发与制作相对较简单, 主要包括基于外加电场、热控、机械拉伸、波长与极化控制等条件的双功能超表面。

1.1 基于外加电场的双功能超表面

石墨烯是一种二维材料, 具有优异的动态可调性

收稿日期: 2021-09-14。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 62175119)资助。

作者简介: 贺景琳(1998—), 男, 江西吉安人, 现为浙江省宁波大学信息科学与工程学院在读硕士, 主要研究方向为手征超介质、超材料和可调谐多功能超表面等, 当前研究内容为基于新型相变材料($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$)的可调谐多功能全介质手征超表面。

* 通信作者: 董建峰(1964—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事超材料、手征介质波导等方面的研究工作。



和高光学透明度^[15],既可以通过施加栅极电压来改变它的费米能级,也可以动态调控超表面结构中石墨烯层的电导率与介电常数。基于这些优良的光电特性,该材料已被广泛应用于吸波器^[16-18]、调制器^[19-21]和波导^[22]等超表面光学器件中。

2016年,LIU H Q 等人^[1]结合石墨烯材料提出了一种可作为波分复用器、分光器的双功能器件。这是一种介电常数可调的超表面,其结构由石墨烯和 SiO₂ 交替组成。通过在超材料层上施加不同的栅极电压改变石墨烯的化学势,其介电常数出现较大差值,从而改变了不同波长入射时的透射率与折射率,使其分别在对应的路径中传输,最终实现了在波分复用器与分光器之间的任意切换。这种可调谐的多功能光学器件在高度集成的光子电路中具有潜在的应用前景。

2019年,ZHANG C 等人^[5]提出并论证了一种新颖的电可调超表面,该超表面可以实现辐射和散射 2 种功能。超表面单元阵列中的每个单元都使用了 4 个变容二极管,通过调节二极管偏置电压调谐谐振和同相反射带,并添加馈电结构实现整个可移动单元阵列的辐射功能。调整不同单元的反射相位,即施加不同的偏置电压可以实现低散射功能。

2020年,YANG Y 等人^[2]提出了一种基于石墨烯和半导体材料的双模可控互补(CPIR)超表面,其通过光激励和外加电场来达到调控目的。这种超表面在裂环谐振器(SRR)的缝隙中嵌入硅介质,随着输入光激励能量的不同,实现了对 CPIR 窗口的动态控制(由于亮模式和暗模式之间的耦合效应,CPIR 超表面在 0.735 THz 处呈现对称的洛伦兹感应 CPIR 窗口)。当入射波以 CPIR 窗口的共振频率穿过该超表面时,入射波的速度会显著减慢(慢光效应);同时,在切割线槽(CWS)下引入单层石墨烯,可实现外加电压对整个谐振模式的动态控制,并且随着费米能级的增加,明暗模式都将被抑制。同年,SHIRMANESH G K 等人^[3]展示了一种近红外波段的光电可调双功能超表面,它能够在通信波长范围内实现多种光学功能,可以通过电光激励调控阵列中每个表面单元的散射光的相位,使得该超表面在动态光束控制(旋转 θ 角度)和动态聚焦(调整焦距 f)功能之间来回切换,如图 1 所示。通过调整施加到单个表面单元的栅极电压,可以重新配置其焦距和数值孔径。除了二维光束控制和聚焦外,这种二维阵列还可以应用在快速、节能的可编程器件中,如动态全息图、涡流板和旋光仪等。

2021年,PENG L 等人^[6]提出了一种采用金和石墨

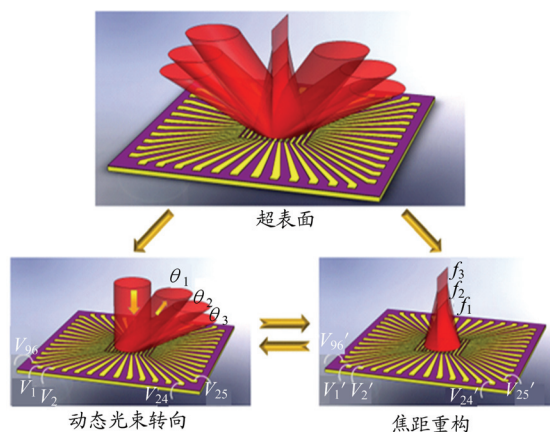


图1 光/电可调双功能超表面原理图

烯的多功能超表面。通过施加外部偏置电压,该超表面能够在吸波功能和极化转换功能之间切换。当外加电场致使石墨烯层的化学势 $\mu_c=0$ eV 时,基于金的极化转换型表面(PCM)起主导作用,入射电磁波的偏振态发生极化转换;当 $\mu_c=0.7$ eV 时,基于石墨烯的吸波型表面(AM)开始主导,超表面器件开始吸收入射波。同年,ZHANG H 等人^[4]设计了一种基于中空石墨烯的高反射率极化转换超表面器件,如图 2 所示。该超表面器件可以同时实现一系列优异的性能:近完美偏振转换比(PCR)的宽带 x-y 交叉偏振转换(CPC)功能、双频线到圆偏振转换(LTC-PC)功能和高倾斜入射角下高灵敏度的极化转换操纵功能。通过人工施加的

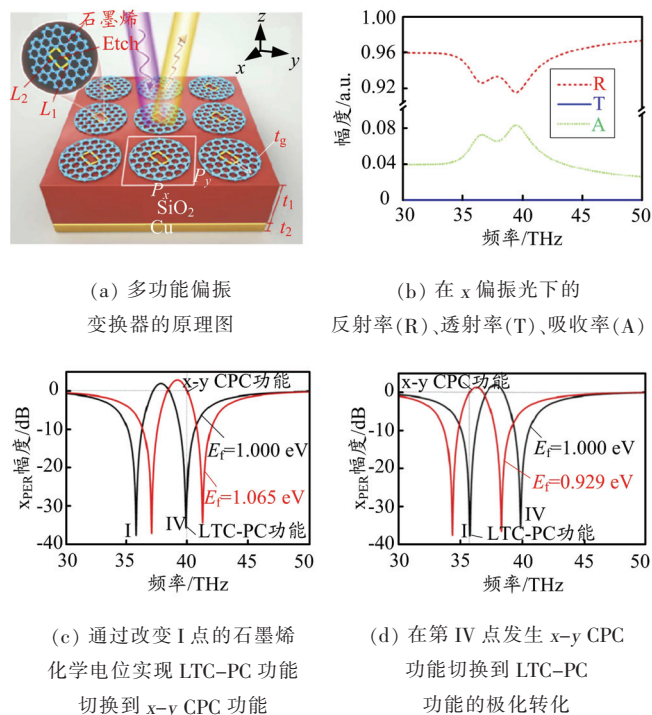


图2 多功能偏振变换器的原理图

外部栅极电压调节结构中石墨烯的化学势,便可以反复切换这3种功能。基于这些优异的性能,该石墨烯极化转换器在集成化、小型化器件中具有潜在的应用前景,如极化传感器、光偏振控制器件等。

1.2 基于热控的双功能超表面

虽然石墨烯在超表面可调谐方面具有非常优异的表现,但是往往都需要对其施加不间断的外部偏置电压,才能达到调谐多重功能的目的。与石墨烯相比,相变材料则不存在这个问题。相变材料是基于热控改变材料的内部单元结构实现光学可重构^[23]。 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)是典型的可热调控相变材料,该材料有晶态和非晶态2种相态(其临界温度为 160°C),且两态的介电常数有着极大的差值,导致了在两态间的反射率与吸收率存在显著差异,这也是GST能够实现对器件的光学性能连续波前调控的关键。

2012年,LI Z W等人^[9]采用另一种新颖的相变材料GeTe设计了可热控的双功能超表面。它由嵌入GeTe的金属图案层、 SiO_2 基板层和GeTe底层组成。当TE波垂直入射时,该超表面可以在不同的温度(250°C 发生相态变化)下实现单频带太赫兹吸波、三频带太赫兹吸波及双频电磁诱导透明的功能。当底部GeTe为晶态时,其相对阻抗的实部和虚部分别为0.99和0.04,这就意味着相对阻抗 Z 接近为1,该状态可以实现完美的波吸收,从而可作为太赫兹吸波器;当上、下2层均为非晶态时,表层的2个相分离金属结构的近场耦合会产生强烈的干扰效果,并出现2个传输峰,导致电磁诱导透明,此时超表面便由太赫兹吸波转变为双波段电磁诱导透明。

2020年,SONG Z Y等人^[10]应用 VO_2 实现了一种宽带吸收体和宽带偏振转换器的可热控超表面设计。该设计中的 VO_2 同样存在2种相态:一种是当温度低于 68°C 时,该 VO_2 的电阻率很大,呈现出绝缘体或对中远红外的光和微波有较强的透射率特性;另一种是当温度高于 68°C 时,该 VO_2 的电阻率则会急剧下降,展现出金属的导电性,极大降低对光的透过率。因此,当 VO_2 为金属态(温度维持在 68°C)时,该层材料具有高浓度的自由载流子,产生的谐振效应表现出极高的吸收特性,此时超表面为宽带吸收体,对偏振不敏感,即使在大入射角时也能很好地工作;当 VO_2 为绝缘态(常温状态)时,其表面只有由金、 SiO_2 隔离层和金连续膜组成的底部结构起作用,表现为高效的线性极化转换器。

2020年,LUO J等人^[11]提出了一种可调双功能多

层金属- VO_2 结构,仿真结果表明:在 $0.66\sim 1.40\text{ THz}$ 的宽频带内且温度维持在 68°C 时,该结构可以由绝缘态下的半波片(HWP)功能(可实现偏振转换)转换为四分之一波片(QWP)功能(可将入射的线极化波转换为圆极化波)。此外,作者提出的这种宽带可切换HWP/QWP具有较大的角度公差,适合应用于极化相关的太赫兹系统领域。

2021年,ABDOLLAHRAMEZANI S等人^[7]将相变材料GST与金属-介电单元结构相结合,提出了相对应的可重构热控超表面。该超表面结构可以在不影响散射效率的情况下,通过改变温度实现GST介电常数的动态变化,选择性地控制超表面的等离子体-光子混合共振;其混合金属-介电单元可通过施加高温(达到约 160°C)将a-GST(非晶态)转化为c-GST(晶态),其整体反射响应会发生显著的变化。之后的实验也逐一验证了该超表面结构的2种功能:①偏振不敏感的吸收型超表面的高吸收性能;②光束控制超表面(偏转器),即将垂直透射光束偏转到异常/镜面角度性能。同年,ZHU Q H等人^[8]提出了一种由GST-225薄膜、十字形硅纳米柱和 CaF_2 衬底组成的超表面结构,基于GST在晶态和非晶态这2种相态之间的可切换性,能够实现对线极化波透射和反射的主动调谐。作者充分利用该结构覆盖了 2π 范围的相位梯度,同时实现了具有 $7\text{ }\mu\text{m}$ 焦距的聚焦透镜功能。该设计在未来光通信中光开关和聚焦透镜方面具有潜在的发展意义。

以上提到的2种波片超表面属于非常典型的偏振控制器件,现已广泛应用在生物医学成像、光纤通信、半导体工业和航空航天等领域。为了实现波片的主动可调性,LI Y等人^[12]提出了一种具备高透射率和高偏振转换率的矩形天线超表面,这是一种基于矩形天线的GST超表面波片,该波片可以在GST的不同相态下实现不同的功能。在GST发生相变之前,超表面是一个波长为 $10.0\sim 11.9\text{ }\mu\text{m}$ 的QWP, GST经过热控转变为晶态后,该超表面则可看作HWP以实现半波片功能。GST处于晶态与非晶态时的工作原理示意图如图3所示。

相比前面的几种可热控多功能超表面,2021年,ERALAR V等人^[13]提出具有新的声子诱导透明(PIT)特性和近乎完美的中红外(MIR)共振吸收特性的超表面。该超表面结构由对称的六方氮化硼(HBN)环组成,其与均匀的 VO_2 薄膜分离,并与顶部石墨烯片集成。由于 VO_2 的绝缘相位,再加上TE声子极化模式的支持,该器件在HBN的RS波段内表现出了具有80%

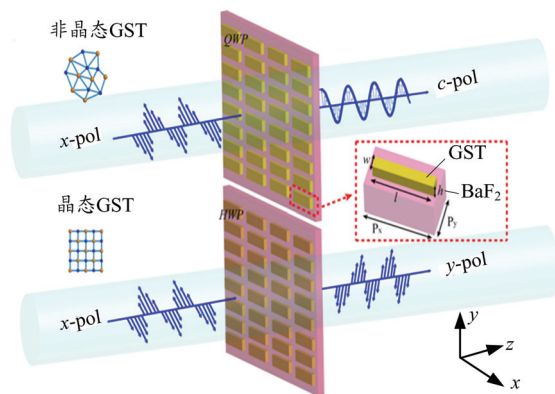


图3 基于矩形天线的超表面可调波片原理图

透射对比度的 PIT 特性。当超表面为 $i\text{-VO}_2$ (绝缘态) 时, 该结构可获得 9.5 ps 群延迟和 1.8 THz 的单位频移; 当超表面为 $m\text{-VO}_2$ (金属态) 时, 光传输被阻断, 并且出现接近完美的共振吸收峰。在 RS 波段内外还可观察到 $i\text{-VO}_2$ 情况下的可调谐阱状效应和 $m\text{-VO}_2$ 时近乎完美的光吸收性能。这种可调谐 HBN 超表面有望在 MIR 慢光器件、传感器和热发射器件中得到应用。

1.3 基于机械拉伸的双功能超表面

由上文可知, 多功能可调谐的实现往往需要各种功能材料的部分集成或组合, 但是一般相变材料的使用都会在加热与冷却过程中耗费时间, 调制时间久, 且调谐范围窄^[25]。使用机械致动实现主动波前控制则是一种避免出现上述问题的有效方法, 该方法只涉及超表面的空间变化, 不会给系统带来任何额外的固有损耗, 几乎适用于整个光谱范围^[26]。

2017 年, CONG L 等人^[14]提出了一种基于微机电系统 (MEMS) 的超表面。通过机械拉伸微调每个偶极单元和施加不同的外部电压实现功能的切换和机械致动, 可精确地控制结构中 Bimorph 悬臂的悬架角度。其单元结构也随之微调, 导致其电感与电容同步变化, 使得偶极共振频率出现连续调谐, 入射光发生相位差变化, 从而实现了动态的偏振转换。另外, 该超表面还可通过调控不同的悬臂阵列, 改变局部入射波的相位和幅度实现动态波前偏转和可重写全息显示的多功能操作。

2020 年, PHAM T L 等人^[15]提出了一种基于折纸的新型毫米板。通过机械拉伸改变其折叠状态, 使其从超宽带吸波器转换为反射器。在压缩模式下, 该结构的吸收率超过 90%; 在拉伸模式下, 吸波功能则被关闭, 所有的入射波被反射。作者提出的这种折纸工艺可伸缩超表面 (OBMM) 可以通过使用电阻印刷油墨和折叠结构来实现^[19-21], 结构参如图 4 所示。

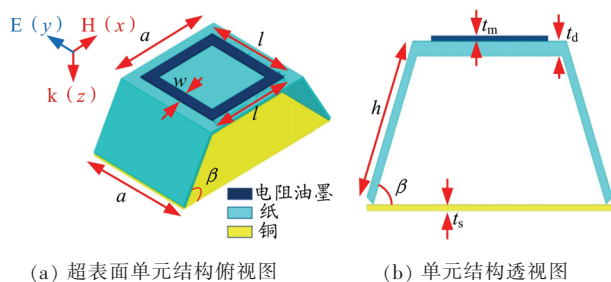


图4 基于机械拉伸的超表面单元结构示意图

1.4 基于波长、极化控制的双功能超表面

上文几种方法通过机械、热和电调谐来达到切换多种功能的目的, 其实已经直接或间接地增大了所需器件的尺寸, 这与想要获得微型化器件的理念相冲突。因此, 在保证超表面具备多功能又不会增加单元尺寸的前提下, 人们提出了许多新的方法。例如: 通过改变入射波的波长、偏振或入射角来达到可调谐作用, 较常见的对应器件在不同波段和偏振光入射下, 实现其表面相位梯度在 $0\sim 2\pi$ 改变, 相应的谐振频率即电磁响应也随之变化, 从而形成沿不同方向行进的反射或透射光束 (即波前调控)。

2016 年, WEN D 等人^[27]提出并实验验证了一种具有 2 种功能的超表面器件, 其每种功能的实现都取决于入射光的偏振态。当入射光的偏振态为左旋圆偏振 (LCP) 光时, 该超表面器件可充当全息图; 当偏振态变为右旋圆偏振 (RCP) 光时, 同一器件将会变成凸透镜。此外, 该器件在超薄的基础上还具有极宽的工作带宽, 这可以显著增加集成光学系统中的功能数量。此外, 单元结构中纳米棒的取向控制着散射光的相位分布, 从而实现该表面任意的无色散相位梯度, 其制造工艺比传统器件更简单。

2017 年, LING Y 等人^[28]提出了一种基于偏振和波长共同调控的双功能超表面。该超表面由夹在 2 层金属天线阵列之间的金属薄膜层组成, 彼此间由介质间隔层隔开。当 Y 偏振波入射时, 该表面的 2 种介质之间发生局部相位突变, 沿 Y 方向的磁偶极子开始响应, 散射光获得额外的切向动量, 从而发生波束聚焦; 当 X 偏振波入射时, 激发的则是沿 X 轴的电偶极子阵列, 先是发生零后向散射, 沿上界面传播, 随后的正向传播过程中, 则在大相位梯度下耦合成沿下界面传播的表面等离子体 (SPP) 波, 即可实现在平面聚焦透镜和 SPP 耦合器之间的功能切换。另外, 如果更换不同波长的入射波, SPP 波还可以分别在超表面的上或下界面单独传播, 或者沿上、下界面同步传播。SPP 波传播原理如图 5 所示。

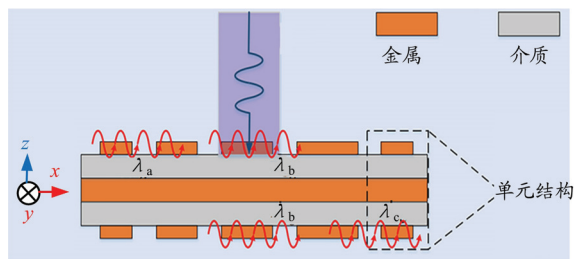


图5 SPP工作原理图和单元结构示意图

2019年,SHANG X J等人^[29]提出并研究了一种频率依赖型双功能超表面,这是一种带宽近红外波段反射型偏振转换器。该超表面在不同波长的波束入射时,单元间的耦合间隙发生改变,其波长共振次数也由2次变为1次,从而实现 90° 偏振转换器到QWP功能的切换,但是这2种功能的实现都只能保持在短波长区域。同年,BIAN K等人^[28]提出了一种包含2层椭圆非晶硅纳米鳍,其图案分布在玻璃基板2侧的双功能可调谐超表面,结构如图6所示。该结构可以在2个不同的波长实现2种不同的功能。一个工作波长中,上(下)层的每个单元结构都可以充当半波片,通过调整上层纳米鳍的取向角控制其相位分布;同样,通过调整底层纳米鳍的取向角,则可激发另一个工作波长时对应的功能,即全波片功能。

2020年,IQBAL S等人^[30]提出了一种极化选择性2位编码超表面,该结构通过改变线偏振入射波的偏振态可以在2个不同的频带(较低Ku带和较高K带)处激发波前调控;同时,作者还设计了3种不同的编码结构以实现不同的功能,比如在双频带中产生具有不同拓扑电荷的涡旋光束、不同偏转角度的反常折射和

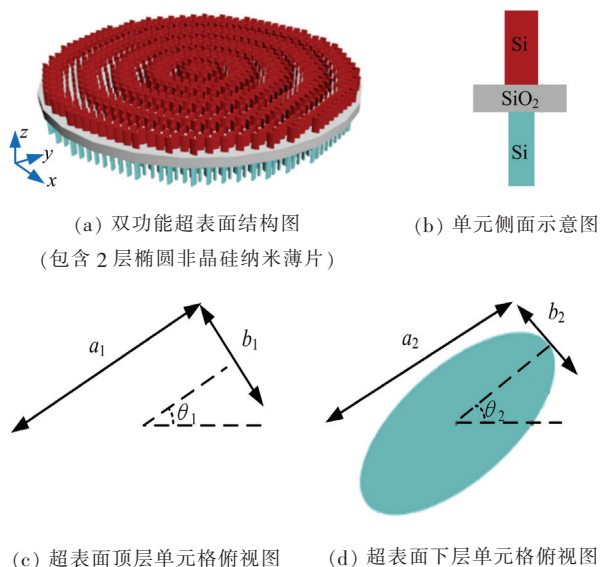


图6 双功能超表面结构图

双频带聚焦透镜功能,且每个结构都能在2个不同方向('+'和'-')入射波中执行所需的功能。为了进行验证,作者还制作了2个用于涡旋光束产生和透镜化的样品,并对近场和远场进行了测量实验,结果与模拟结果一致。这种工作频带由入射波的偏振来决定的设计,在未来制作多光谱、多功能光学器件中具有潜在的应用前景。

在全空间操纵方面,多功能超表面如今已经显示出了较强的操纵电磁波能力。然而,这些多功能超表面功能大部分是通过极化或控制波长来实现的,很少涉及到入射角。2021年,ZHANG Z等人^[32]提出了一种由频率、极化和入射角控制的全空间多功能超表面。当电磁波在C波段垂直入射时,超表面具有非对称透射特性和高效的极化转换特性;在Ku波段,沿两侧的x极化和y极化电磁波都被反射,实现宽频、高效的交叉极化转换。当电磁波斜入射时,两面都能实现一定频率的高效反射。

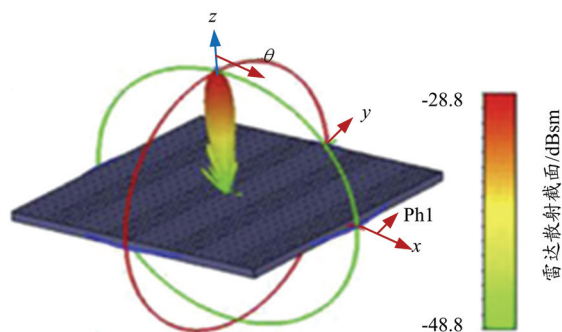
2 可调谐三功能的超表面

此前,PAN W K等人^[33-34]已提出了2种具有三功能的超表面结构,并分别实现了波分束、线极化偏振和波束聚焦3种功能,但该结构未具备调谐性。现已报道的双功能可调谐超表面并不多,而可调谐三功能的超表面报道更少。

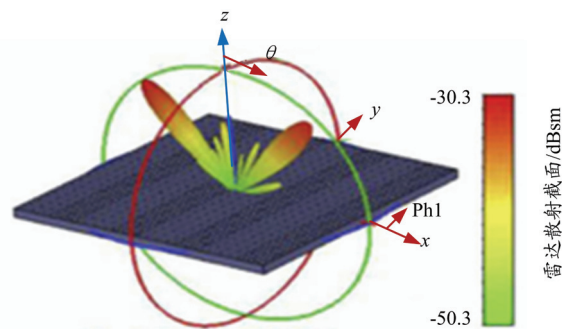
2020年,FAN J等人^[35]提出了一种可调谐三功能的手性结构超表面(CSM),该CSM单元由2根正交金属丝夹在方形裂缝环形谐振器(SRR)结构中组成。当垂直入射的太赫兹波穿过结构表面时,y偏振波几乎完全转换成x偏振波,而x偏振波很少转换成y偏振波。后续的实验证明了这种CSM相位不连续超表面可以通过调整单元结构的几何参数来实现完全的 2π 相位覆盖。通过改变其晶格常数,可以将入射的线偏振波转换成任意折射角的正交线偏振波,并在宽带频率范围内实现异常折射、双焦距透镜和涡旋光束3种功能。这种CSM结构具备优异的多功能调谐性,可以被用于各种潜在的多功能宽带太赫兹器件中,如偏振转换器、平聚焦透镜和其它光电器件等。

2021年,LI J S等人^[36]提出了一种由圆形空心硅基板和底部金属板组成的硅介质超表面。该超表面有4个随机编码的粒子(particles)阵列,其表面单元粒子是不同半径的圆形空气孔,硅基板的厚度 $h=90\text{ }\mu\text{m}$ 。太赫兹波垂直入射时,4种硅介质超表面粒子阵列的反射幅值均可以达到0.98以上。由于其圆形空气孔半径

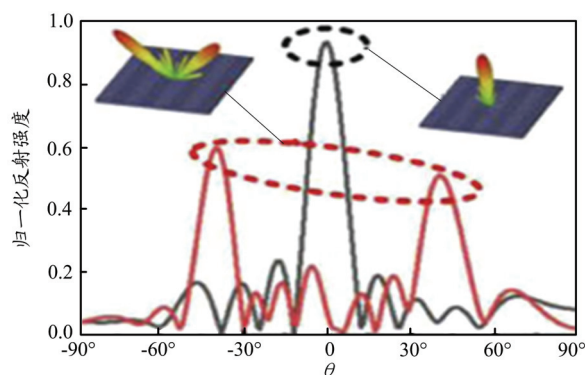
“ r ”的不同从而引起共振频率点移位,并在相邻超表面粒子之间产生相位梯度,这使得该超表面可在不同频段下实现3种不同的功能,其工作原理图如图7所示,即在0.6 THz发生异常反射,0.78 THz发生光波分束,而在0.9 THz时,则会出现涡旋光束。该研究也进一步证实了硅介质超表面可以实现对太赫兹波的多功能控制。



(a) 0.6 THz 的太赫兹波垂直入射时的三维远场散射图



(b) 0.78 THz 的太赫兹波垂直入射时的三维远场散射图



(c) 0.9 THz 的太赫兹波垂直入射时
硅介质超表面的归一化反射强度振幅

图7 硅介质超表面的工作原理图

3 结束语

近年来,随着多功能超表面的研究越发深入,人

们开始将目光转向可调谐的多功能超表面,这是最近国内外关于超表面研究的热门话题之一。本文从各类调谐方式出发简单地介绍了具有双功能、三功能的可调谐多功能超表面,并阐述了其特有的优势。可调材料不单局限于本文提到的石墨烯、相变材料等,许多研究人员还提出了其它可调元器件(液晶^[37]),都能实现对同一器件的多重功能切换,为广大学者对该领域的进一步研究提供了新的思路。

作为一个新兴研究方向,可调谐的多功能超表面虽然在近几年取得了一定的发展,但仍存在一些亟待解决的问题,具体如下:①目前大部分可调谐多功能超表面都含有金属层,也就是金属和介质混合的超表面,而金属在光频段都存在较大的电阻损耗,不可避免地存在效率低、带宽小等问题,所以人们希望能采用高折射率、性能稳定的全介质材料,例如应用新型相变材料 GSST 在高频段进行设计;②可调谐材料对超表面的电磁调谐通常借助于谐振模式的改变,由于调谐的带宽受限于谐振的谱宽,通常较窄,因此在具备较宽工作带宽的同时实现高效的调谐值得进一步研究;③目前的可调谐多功能超表面只能同时实现2个或3个电磁特性的调谐,若要实现更多功能同时调谐的集成超表面还有待继续挖掘。但是,随着将石墨烯、相变材料和全介质等电磁材料相结合使用,这些局限也许会被一一打破。总之,可调谐的多功能超表面将会朝着低损耗、宽频段和易加工等可提高应用性的方向发展,并在集成光子器件^[38]、成像技术^[39]和多功能光学器件等领域中起到关键的作用。

参考文献:

- [1] LIU H Q, RENA G, GAO A Y, et al. Numerical investigation of a multi-functional optical device based on graphene-silica metamaterial [J]. Journal of Modern Optics, 2016, 23 (11): 1099-1105.
- [2] YANG Y, LI J, LI J, et al. Plasmon-induced reflection metasurface with dual-mode modulation for multi-functional THz devices [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020 (127): 105969-1-105969-7.
- [3] SHIRMANESH G K, SOKHOYAN R, WU P C, et al. Electro-optically tunable multi-functional metasurfaces [J]. ACS Nano, 2020, 14 (6): 6912-6920.
- [4] ZHANG H, LIU Y, LIU Z, et al. Multi-functional polarization conversion manipulation via graphene-based metasurface reflectors [J]. Optics Express, 2021, 29 (1): 70-81.
- [5] ZHANG C, GAO J, CAO X, et al. Multifunctional tunable metasurface for radiation and scattering manipulation [J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2019, 13 (15): 2649-2653.
- [6] PENG L, JIANG X, LI S M. Multi-functional device with switchable

- functions of absorption and polarization conversion at terahertz range[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2018, 13(1): 385-1-385-9.
- [7] ABDOLLAHRAMEZANI S, HEMMATYAR O, TAGHINEJAD M, et al. Dynamic hybrid metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(3): 1238-1245.
- [8] ZHU Q H, DONG J F, WANG J J, et al. Linear optical switch metasurface composed of cross-shaped nano-block and Ge₂Sb₂Te₅ film [J]. *Optics Communications*, 2021, 498: 127222-1-127222-8.
- [9] LI Z W, LI J. Multifunctional terahertz metasurface based on GeTe medium[J]. *Optics Communications*, 2012, 490: 126909-1-126909-6.
- [10] SONG Z Y, ZHONG J H. Achieving broadband absorption and polarization conversion with a vanadium dioxide metasurface in the same terahertz frequencies[J]. *Optical Express*, 2020, 28(8): 12487-12497.
- [11] LUO J, SHI X, LUO X, et al. Broadband switchable terahertz half-/quarter-wave plate based on metal-VO₂ metamaterials [J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 30861-30870.
- [12] LI Y, LUO J, LI X, et al. Switchable quarter-wave plate, and half-wave plate based on phase-change metasurface[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 4600410-1-4600410-10.
- [13] ERALAR V, HAJIAN H, ZBAY E. VO₂-graphene-integrated hBN-based metasurface for bi-tunable phonon-induced transparency and nearly perfect resonant absorption[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(24): 245101-1-245101-11.
- [14] CONG L, PITCHAPPA P, WU Y, et al. Active multifunctional micro-electromechanical system metadevices: applications in polarization control, wavefront deflection, and holograms[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 5: 1600716-1-1600716-8.
- [15] PHAM T L, XUAN K B, TUNG B S, et al. Origami-based stretchable bi-functional metamaterials: reflector and broadband absorber[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(16): 165111-1-165111-10.
- [16] NOVOSELOV K S, FALKO V I, COLOMBO L, et al. A roadmap for graphene[J]. *Nature*, 2012, 490: 192-200.
- [17] YE M Q, HUI F M, YONG Z R, et al. Near-infrared absorption-induced switching effect via guided mode resonances in a graphene-based metamaterial[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5253-5263.
- [18] 汪国崔, 胡滨, 张岩. 动态超构表面设计及其功能器件[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 9-28.
- [19] CHANG P H, LIN C, HELMY A S. Efficient integrated graphene photonics in the visible and near-IR [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(5): 1700003-1-1700003-5.
- [20] GUAN S, CHENG J, CHEN T, et al. Bi-functional polarization conversion in hybrid graphene-dielectric metasurfaces[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(23): 5683-5686.
- [21] 袁莹辉, 陈懿宇, 胡放荣, 等. 基于人工超表面 / 离子凝胶 / 石墨烯复合结构的太赫兹调制器件[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 194-202.
- [22] GUO T, CHRISTOS A. Broadband polarizers based on graphene metasurfaces[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23): 5592-5595.
- [23] NIKITIN A Y, GUINEA F, GARCIA-VIDAL F J, et al. Edge and waveguide THz surface plasmon modes in graphene micro-ribbons [J]. *Physical Review B*, 2011, 84(16): 1401-1408.
- [24] HE J W, DONG T, CHI B H, et al. Metasurfaces for terahertz wavefront modulation: a review [J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2020, 41(6): 607-631.
- [25] BANG S, KIM J, YOON G, et al. Recent advances in tunable and reconfigurable metamaterials[J]. *Micromachines*, 2018, 9(11): 560-1-560-12.
- [26] CHEN K, ZHANG X, CHEN X, et al. Active dielectric metasurfaces for switchable terahertz beam steering and focusing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(1): 99-1-99-11.
- [27] WEN D, CHEN S, YUE F, et al. Metasurface device with helicity-dependent functionality[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(2): 321-327.
- [28] LING Y, HUANG L, HONG W, et al. Polarization-switchable and wavelength-controllable multi-functional metasurface for focusing and surface-plasmon-polariton wave excitation [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29812-29821.
- [29] SHANG X J, HE H R, YANG H, et al. Frequency dependent multi-functional polarization converter based on metasurface [J]. *Optics Communications*, 2019, 449: 8-12.
- [30] BIAN K, LU D, HU W. Dual-functional dielectric metasurface doublets[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34259-34269.
- [31] IQBAL S, LIU S, LUO J, et al. Controls of transmitted electromagnetic waves for diverse functionalities using polarization-selective dual-band 2bit coding metasurface [J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(1): 015104-1-015104-13.
- [32] ZHANG Z, WANG J, ZHU R, et al. Multifunctional full-space metasurface controlled by frequency, polarization and incidence angle[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7544-7557.
- [33] PAN W K, DONG J F, CAI T, et al. Trifunctional metasurfaces: concept and characterizations[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17447-17457.
- [34] FANG Q H, DONG J F, WU L P, et al. Trifunctional metasurface for manipulating linearly and circularly polarized waves in transmission and reflection modes[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 11(7): 074102-1-074102-6.
- [35] FAN J, CHENG Y. 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): 025109-1-025109-10.
- [36] LI J S, ZHOU C. Multi-functional terahertz wave regulation based on a silicon medium metasurface [J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(2): 310-318.
- [37] VASIC B, ZOGRAFOPOULOS D C, ISIC G, et al. Electrically tunable terahertz polarization converter based on overcoupled metal-isolator-metal metamaterials infiltrated with liquid crystals [J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(12): 124002-1-124002-11.
- [38] 廖琨, 甘天奕, 胡小永, 等. 基于介质超表面的片上集成纳米光子器件[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 9-21.
- [39] WEN S, JIN C. Multilayer Huygens' metasurface absorber toward snapshot multispectral imaging[J]. *Journal of Optics*, 2021, 23(4): 044001-1-044001-6.