



DOI: 10.12086/oe.2021.200218

可调谐手征超表面电磁特性研究进展

王金金, 朱邱豪, 董建峰*

宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211

摘要: 手征超表面是由具有特定电磁响应的平面手征单元结构构成的超薄超材料, 由于其具有自由控制电磁波的奇异能力而引起了极大的关注。通过在超表面设计中加入可调谐材料, 可以实现其功能受外部激发控制的可调谐或可重构的超器件, 为动态调谐电磁波开辟了新的道路。本文介绍了可调/可重构手征超表面电磁特性的一些理论基础, 当线偏振光进入可调谐手征超表面时, 会被分解为左旋圆偏振(LCP)波和右旋圆偏振(RCP)波。通过外部环境改变介质的介电常数和磁导率, 超表面光器件可以动态地控制各种偏振光特别是圆偏振光的响应特性如折射率、二色性、旋光性、不对称传输等。按照可调谐手征超表面所控制的负折射率、圆二色性和旋光性、不对称传输性质, 对其最新的研究进展进行了综述。最后, 对可调谐手征超表面这一快速发展领域未来可能的发展方向和挑战提出了自己的看法。

关键词: 可调谐手征超表面; 负折射; 圆二色性和旋光性; 不对称传输

中图分类号: TB34

文献标志码: A

王金金, 朱邱豪, 董建峰. 可调谐手征超表面电磁特性研究进展[J]. 光电工程, 2021, 48(2): 200218

Wang J J, Zhu Q H, Dong J F. Research progress of electromagnetic properties of tunable chiral metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(2): 200218

Research progress of electromagnetic properties of tunable chiral metasurfaces

Wang Jinjin, Zhu Qiuhao, Dong Jianfeng*

College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract: Chiral metasurfaces are ultra-thin metamaterials composed of planar chiral cell structures with specific electromagnetic responses. They have attracted great attention due to their singular ability to control electromagnetic waves at will. With tunable materials incorporated into the metasurfaces design, one can realize tunable/reconfigurable metadevices with functionalities controlled by external stimuli, opening a new platform to dynamically manipulate electromagnetic waves. In this paper, we introduce some theoretical foundations of the electromagnetic properties of tunable/reconfigurable chiral metasurfaces. When a linearly polarized light enters a tunable chiral metasurface, it can be decomposed into left-handed circularly polarized (LCP) wave and right-handed circularly polarized (RCP) wave. By changing the dielectric constant and magnetic permeability of the medium through the external environment, the metadevices can dynamically control the response characteristics to various polarized lights, especially circularly polarized lights such as refractive index, dichroism, optical rotation, asymmetric transmission, etc. According to the properties of negative refractive index, circular dichroism, optical rotation, and

收稿日期: 2020-06-12; 收到修改稿日期: 2020-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61475079)

作者简介: 王金金(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事手征超表面的研究。E-mail: 13566022263@163.com

通信作者: 董建峰(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事负折射率材料、手征介质波导等方面的研究。

E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

asymmetric transmission controlled by the tunable chiral metasurfaces, we review the latest research progress. Finally, we put forward our own opinions on the possible future development directions and existing challenges of the rapidly developing field of the tunable chiral metasurface.

Keywords: tunable chiral metasurface; negative refraction; circular dichroism and optical rotation; asymmetric transmission

1 引言

超材料(Metamaterials, MTMs)是由亚波长金属/介电微结构(例如,超原子)在空间中按照一定周期性或非周期性构造而成的人工材料,由于其特殊的操纵电磁波的能力,在过去几十年里引起了人们强烈的研究兴趣。为了克服结构复杂、尺寸庞大、损耗较大(尤其是在光学领域)、不利于实际应用的问题,人们提出由平面人工原子构成的超薄 MTMs—超表面(metasurface)^[1]。超表面在信息、通信、国防、能源、超分辨成像、全息显示、传感等领域具有广阔的应用前景^[2-3],因此超表面成为了物理、材料、信息科学以及相关交叉学科的研究热点。

手征(Chiral)是一个几何上的概念,即一个物体缺乏对称性,不能通过旋转与其镜像重合。近年来,由手征单元结构构成的手征超表面因其具有令人感兴趣的性质,如圆二色性和旋光性^[4]、不对称传输^[5]、负折射率^[6]而引起了人们极大的研究热情。这些手征超表面,具有比自然界中的手征材料高几个数量级的旋光性和圆二色性等性质,而且负折射率性质不需要负磁导率和负介电常数就能达到。

目前,人们已经对手征超表面的手征光学性质进行了广泛的研究,但随着手征超表面研究的快速发展,人们逐渐认识到一般手征超表面在实际应用中缺乏可调谐性。因此,许多科学家一直致力于研究可调谐/可重构的手征超表面,可以在外部调谐时主动控制电磁波,如传感^[7]、太赫兹(THz)区域的圆二色性开关^[8-9]、偏振器^[10-11]、自旋解析探测器^[12]等各种光子学器件。通过在手征超表面设计中加入可调谐材料如相变材料(phase-change materials, PCMs)、石墨烯、单层黑磷(BP)、液晶、透明导电氧化物、半导体、聚合物等,可以实现手征可调谐/可重构的超器件,其功能受外部激发控制。在可调谐介质手征超表面结构中,手征超表面电磁特性的调谐一般与介电共振相关^[13],由于加入可调谐材料的电磁效应不同,使得各种可调谐材料的有效电磁参数可以独立地、任意地控制,使手征超表面可以表现出一些自然界无法实现的奇异特性,如

负折射率调谐、圆二色性和旋光性调谐、不对称传输特性调谐等。

手征特性可调谐这一特性也使得手征超表面在一定程度上减少了某些超表面制作复杂、功能单一、带宽窄的通病,也更利于集成芯片和实际应用。本文对利用相变材料(PCMs)、石墨烯、单层黑磷(BP)等新型材料来实现手征超表面的可调谐电磁特性,如负折射率、圆二色性和旋光性、不对称传输的最新研究进展进行综述,最后给出了对于可调谐手征超表面未来发展的一些个人看法。

2 理论基础

负折射性质指的是光波在介质表面发生折射时,折射波和入射光在法线的同一侧。当任意一个线偏振光进入手征超表面时,就会被分解为左旋圆偏振(LCP)波和右旋圆偏振(RCP)波,这两种波在手征介质中的折射率不同,导致透射波相比于入射波的偏振面发生旋转,从而显示出旋光性(optical activity, OA),若左旋圆偏振波和右旋圆偏振波透过率不同,则显示出圆二色性(circular dichroism, CD, 用 C_{CD} 表示), RCP波和 LCP 波的传输特性可以用琼斯矩阵表示^[14]:

$$\begin{bmatrix} T_+ \\ T_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{++} & t_{+-} \\ t_{-+} & t_{--} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_+ \\ I_- \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中:下标‘+’和‘-’分别表示 RCP 和 LCP 波, I 为入射波振幅, T 为透射波振幅。 t_{++} 和 t_{--} 表示 RCP 和 LCP 波的传输系数,而 t_{+-} 和 t_{-+} 表示 RCP 和 LCP 波之间的转换系数。旋光性和圆二色性分别由下面公式来表征:

$$\theta = \frac{1}{2}[\arg(t_{++}) - \arg(t_{--})],$$

$$C_{CD} = |t_{++}|^2 - |t_{--}|^2. \quad (2)$$

不对称传输则是指对某一偏振波来说前向传输和后向传输的透射率不同,也可称为圆转换二色性(CCD),可以用不对称传输参数 Δ 表示:

$$\Delta = |t_{-+}|^2 - |t_{+-}|^2. \quad (3)$$

常规的手征超表面一旦被制造出来,其电磁特性也随之被固定,通过在手征超表面设计中加入可调谐

材料可以实现电磁特性受外部激发控制的可调谐手征超表面, 一些常见的外部激发类型是机械力、热、光场、磁场和电场^[13]。

3 负折射率可调

负折射率超表面由于其不寻常的电磁特性引起了广泛关注, 特别是可以通过金属-介质-金属(MDM)纳米孔阵列结构获得负折射, 在 2005 年首次提出将 MDMs 嵌入纳米孔阵列来实现负折射率^[15], 是光学负折射率最早的例子之一, 但是不具有可调性。由于相变材料在相变期间介电常数变化很大, 并且相变可以通过热诱导, 加入相变材料成为可调谐手征超表面负折射率特性的重要途径。2013 年, Cao 等^[16]提出并数值分析了相变材料($\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$)嵌入在 MDM 中的椭圆纳米孔阵列(ENAs)的可调光学特性, 证明了利用 $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$ 非晶和晶态之间切换使介电常数发生改变, 可以在中红外(M-IR)光谱区域获得较大的负折射率可调性。这项工作所提出的结构也可以延申至整个可见光和红外波段工作。

2018 年, Li 等^[17]从理论上研究了一种在 THz 区域具有负折射率(NRI)的热可调谐宽带超表面, 如图 1(a)所示, 通过调节温度动态地调节 InSb 的传导率, 实现了负折射率的连续宽带可调谐。从图 1(b)可以看出 THz 折射波(红色箭头线)和 THz 入射波在表面法线的同一侧, 直接观察到 NRI 的行为。与 $\text{Ge}_2\text{Sb}_1\text{Te}_4$ 类似, VO_2 同样能够与手征超表面结合实现对负折射率的动态调控。Ling 等^[18]提出了一种由对称十字和热敏 VO_2

组成的超表面, 相位和负折射等特性通过控制温度表现出实时响应。同年, 他们^[19]还提出了一种由两个铝环和两个光敏环形硅孔组成的光学可调谐负折射率超表面(NIM), 当硅的电导率增加时, NIMs 的传输由低通调谐到高通, NIMs 的负折射率表现为动态可调特性, 如图 1(c), 1(d)所示。

除了上述热调谐, 通过电诱导调谐负折射率已广泛用于可调谐手征超表面, 其中石墨烯具有高导电性, 性能优异。2019 年, Luo 等^[20]提出了一种基于石墨烯的 THz 可调谐负折射率超表面, 由金属共振结构和嵌入石墨烯组成, 通过调节嵌入石墨烯的化学势, 在相应的波段呈现动态负折射率, 为可控负折射率材料的实际应用提供了一个经典案例。

2020 年, Iwai 等^[21]通过实验和理论计算了一种由等离子体阵列和负磁导超材料构成的可调谐双负器件, 通过控制等离子体管内的电子数密度来动态调节透射特性, 实现了一种可调的负折射率器件。Sorathiya 等^[10]数值研究了一种基于有效负折射率的主动可调平方型石墨烯开环远红外光谱共振器, 如图 2(a)所示。负折射率的调谐也是通过改变石墨烯的不同化学势来控制的, 而这种化学势可以通过外部来控制, 如图 2(b)所示, 该结构在 0.1 eV 到 0.9 eV 的不同化学势下, 在 1 THz 到 2.5 THz 的频率范围内产生多个共振频带, 在每一个谐振点上, 都可以观察到高的负折射率。

4 圆二色性和旋光性可调

除了负折射率之外, 手征超表面还具有很强的圆

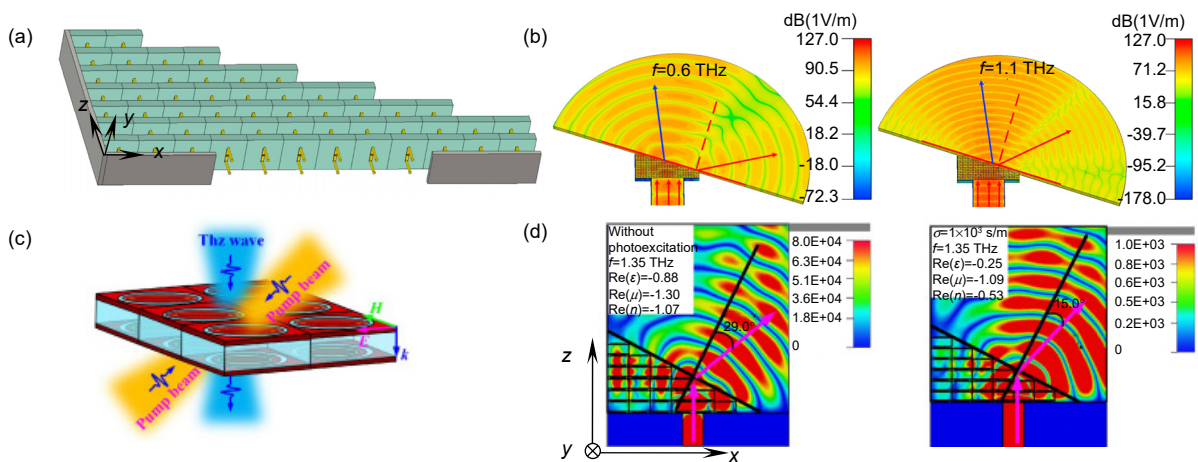


图 1 (a) 楔形棱镜的模拟结构^[17]; (b) 楔形结构在两种不同的频率 0.6 THz 和 1.1 THz 处的电场分布; (c) 可调 NIMs 的单元结构^[19]; (d) NIMs 的负折射

Fig. 1 (a) The wedge-shaped prism simulation structure^[17]; (b) The electric field distributions of the wedge structure at two different frequencies of 0.6 THz and 1.1 THz; (c) Schematic illustration of a unit cellof the tunable NIMs^[19]; (d) The negative refraction of the NIMs

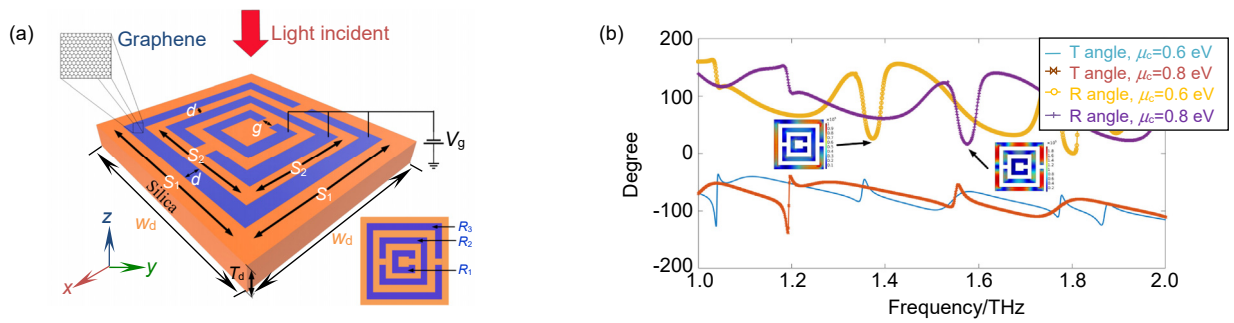


图 2 (a) 偏置结构石墨烯分裂环谐振器(GSRR)原理图^[10]; (b) GSRR 对 TE 法向入射波的透射和反射偏振响应的示意图

Fig. 2 (a) Schematic of graphene split ring resonator (GSRR) with biasing configuration^[10]; (b) Transmission and reflection polarization response of the GSRRs for the TE normal incidence wave

二色性和旋光性，现已广泛应用于光学、分析化学和分子生物学等领域^[22]。研究人员对圆二色性和旋光性可调的实现进行了大量的工作，提出并研究了多种可调谐材料。

4.1 相变材料

通过使用相变材料设计结构单元是一个有效调谐圆二色性和旋光性的方法，而硫系相变材料锗-碲-碲化合物(Ge-Sb-Te, GST)因为其光学性质在非晶态-晶态相变前后会经历急剧的变化，而且具有极快的相变速度，因此基于 GST 的超表面已经成为光子学和光电子学中的一个新兴研究领域。2013 年，Cao 等^[23]用数值模拟方法研究了具有希腊十字形共振器的金属-介质 GST225(Ge₂Sb₂Te₅)-金属手征超表面，随后，他们^[24]通过倾斜由椭圆纳米孔阵列(ENA)组成的外在手征超

表面，数值演示了一个多波段圆二色性(CD)调谐，如图 3(a)所示。当 GST225 的状态从非晶态转变为晶态，CD 光谱可以在从近红外(NIR)到中红外(MIR)的大范围内进行主动调谐，如图 3(b)所示，但这些都只是数值模拟的结果。2015 年，Yin 等^[25]通过把 GST326 (Ge₃Sb₂Te₆)夹在中间，用堆积的金属纳米棒构成两种对应异构体构型，如图 3(c)所示。数值模拟并从实验上证实了工作中在中红外区的第一个可调谐手征超表面，如图 3(d)所示。通过 GST326 在非晶态(较亮的曲线)和晶态(较暗的曲线)之间变化引起的大折射率改变，透射率和 CD 在 4.1 μm~4.9 μm 光谱范围内发生改变。

近年来，相变材料 VO₂ 被用于设计超表面全吸收器、热开关、电光开关和 THz 区域的圆二色性开关，2019 年，Mandal 等^[9]提出了一种基于金属和金属-VO₂

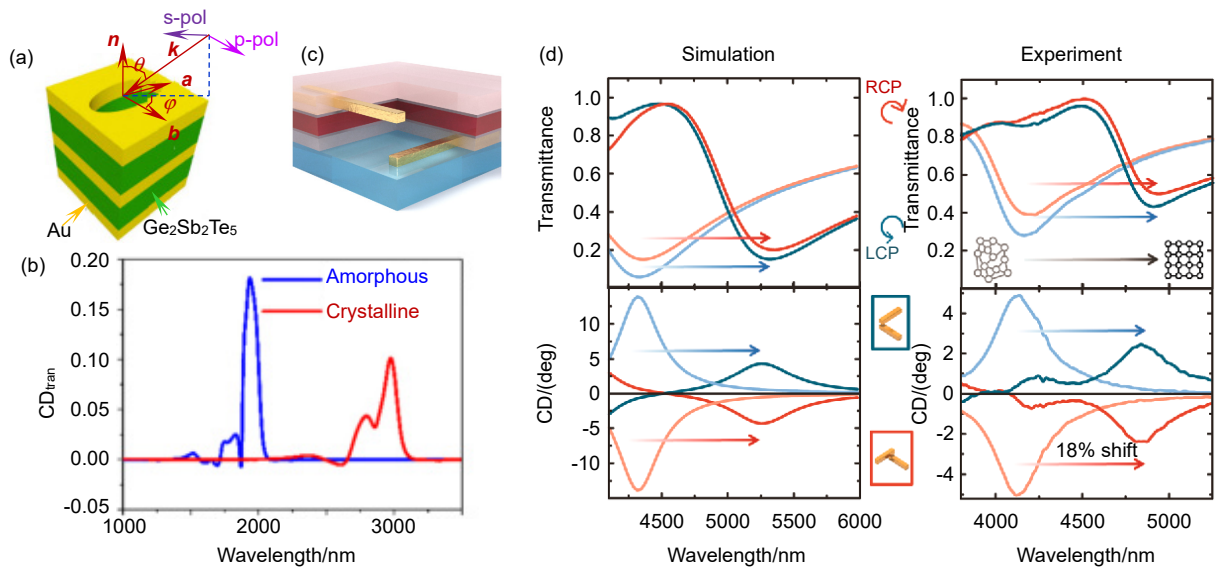


图 3 (a) 工作原理图^[24]; (b) $\theta=\varphi=45^\circ$ 时非晶态和晶态的 CD_{tran} 光谱;

(c) 主动可调手征的相变超材料^[25]; (d) 模拟和测量的透射率和 CD 光谱

Fig. 3 (a) Schematic of the operation concept^[24]; (b) The CD_{tran} spectra for both amorphous and crystalline states under $\theta=\varphi=45^\circ$; (c) A phase transition metamaterial with actively adjustable chirality^[25]; (d) Simulated and measured transmittance and CD spectra

杂化的新型手征结构,如图 4(a)所示,并利用时域有限差分(FDTD)对其进行了数值模拟,实现了可见光-近红外波段的宽频带多共振圆二色性(CD)。2020年, Gao 等^[26]实验和仿真了一种能够实现可调手征的 VO₂ 嵌入超表面,具体地说,通过改变激光功率和超表面上的辐照位置,VO₂ 在辐照区发生相变,并产生可调谐的圆二色性效应,如图 4(b)所示。

4.2 石墨烯

石墨烯是一种具有高导电性、宽带电光特性和稳定的耐化学性的材料,通过向石墨烯层施加外部电压,可以调节石墨烯的费米能级,因此可以改变其光学性质。2016年, Wang 等^[27]利用石墨烯双层分裂环(BSRs)产生可调圆二色性(CD), CD 的调谐是通过不断改变

石墨烯的栅极电压来改变石墨烯的费米能级而产生的,通过交换开环的栅极电压,可以逆转 CD,如图 4(c)所示。

2017年, Kim 等^[28]通过实验证明了一种电可调谐的手征超表面,如图 5(a)所示,在不改变 LCP 传输的情况下,通过改变施加的电压可以显著改变 RCP 波和 LCP 波的传输,获得了高达 45 dB 的大 CD 值,如图 5(b)所示,但不可避免地存在高损耗问题。2018年, Huang 等^[29]数值研究了由一种新型电可调的可调谐超表面,由一层黄金开口环谐振器(SRR)和一层石墨烯光栅组成,如图 5(c)所示,通过改变石墨烯的费米能级,可以动态调整 CD,最大 CD 达到了 13%左右,如图 5(d)所示。

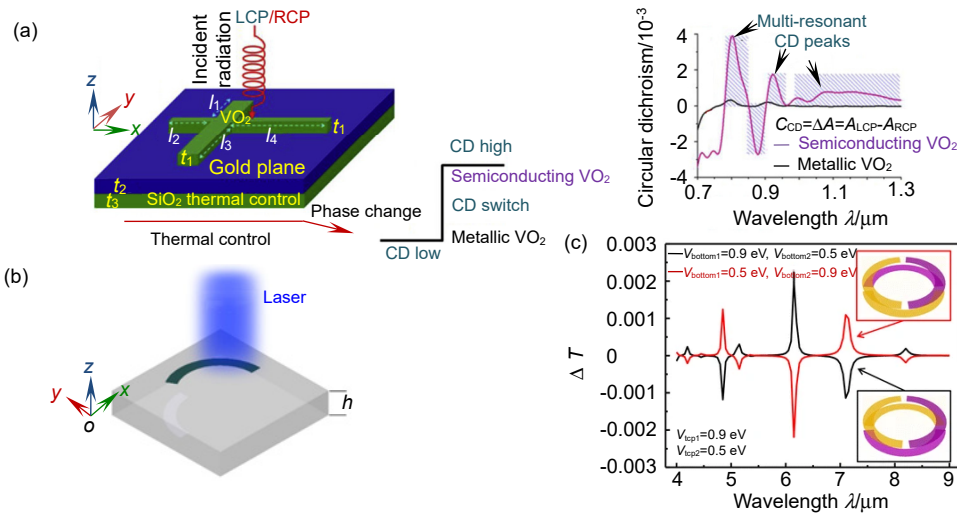


图 4 (a) 平面手征匕首状结构热控制原理图^[9]; (b) 基于 VO₂ 的超表面原理图^[26]; (c) 模拟 BSR 的 CD 差异^[27]
 Fig. 4 (a) Schematic view of a planar chiral dagger-like structure with thermal control^[9]; (b) Schematic view of the VO₂ based metasurface^[26]; (c) Simulated difference of CD of the BSR^[27]

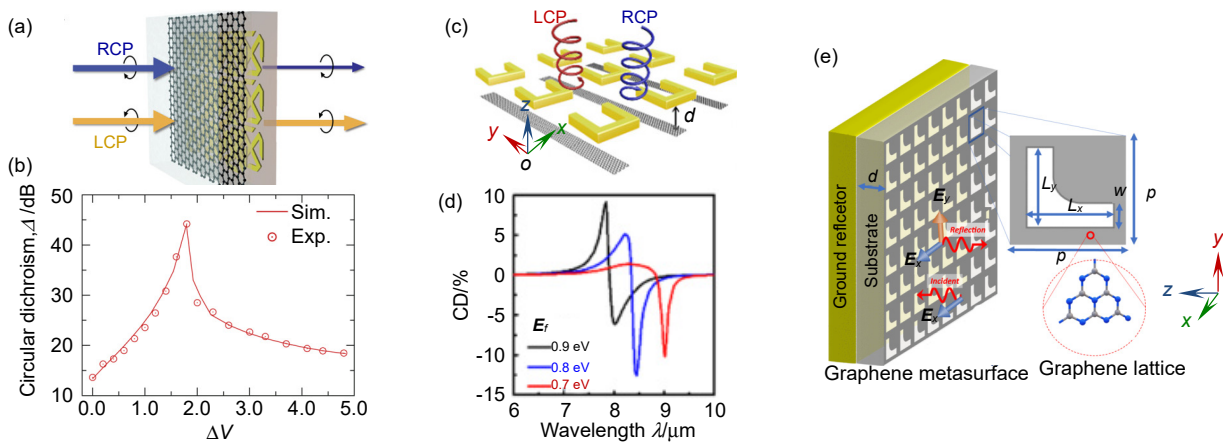


图 5 (a) 单元结构^[28]; (b) CD 和 OA; (c) 手征超材料的三维示意图^[29]; (d) 具有不同费米能级的混合结构的 CD 谱; (e) 石墨烯超表面示意图^[33]

Fig. 5 (a) Illustration of the unit cell^[28]; (b) CD and OA; (c) 3D schematic view of the chiral metamaterial^[29]; (d) CD spectra of the hybrid structure with different Fermi energies; (e) A schematic illustration of a graphene metasurface^[33]

2019年, Vila等^[30]研究了一个改进的Haldane模型的光吸收偏振依赖关系, 该模型在存在样本边界的情况下显示出反手征边缘模式, 通过改变费米能级独立调谐圆二色性。Zhou等^[31]用数值方法研究了石墨烯外在手征超表面在中红外波段的可调。为了提高调谐带宽, Yao等^[32]提出一种基于石墨烯超表面在太赫兹范围内的动态可调透射极化转换器, 实现了带宽为5.15 THz~5.52 THz的左手圆偏振(LHCP)。

2020年, Amin等^[33]提出了一种超薄石墨烯手征超表面, 由石墨烯衬底上的周期性蚀刻的L形空隙组成, 衬底由导电平面支撑, 如图5(e)所示, 线性或圆偏振入射波被不同比例的超表面有效吸收, 呈现出半波片和四分之一波片的行为, 特别地, 由于石墨烯的折射率随其化学势的变化而变化, 其线和圆二色性均可调谐。

4.3 其他可调谐材料

跟石墨烯一样, 黑磷(BP)也可以通过外部电压来调谐。Hong等^[34]从理论和数值上表明, 在不使用共振结构的情况下, 可以在无图案的单层黑磷(BP)中获得较强的旋光性, 可与之前报道的手征超表面相媲美。

从图6(a), 6(b)可知, 在75°入射角下, 当BP的费米能级从 $n=2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 增加到 $n=8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 时, 圆二色性从6.5%上升到14.7%。

2018年, Lin等^[7]将单分子层WSe₂与手征超表面结合, 得到了超薄圆偏振器, 如图6(c), 6(d)所示, 通过光子与手征超表面的耦合控制了单分子层WSe₂光子的偏振态, 可以增强和反转手征, 进一步微调CD, 从-26%到+20%(-26.2%到+19.7%), 同时, WSe₂原子层的圆偏振度也提高了4倍以上, 为光学信息技术、芯片级生物传感等领域的实际应用提供了一个平台。随后, Yin等^[35]从理论上提出了一种基于液晶的可重构手征超表面, 如图6(e), 6(f)所示, 在共振位置的圆二向色性的幅度可以达到80%, 手征超表面在开关模式下CD可以动态重新配置。2019年, Peng等^[36]数值演示了一种具有可调圆二色性的微流体自旋选择性手征超表面, 如图7(a)所示, 由类似于伽马射线的多层纳米结构周期性排列而成。借助微流控技术, 可以实现手征超表面的圆二色性微调, 图7(b)所示数值结果表明, 可以实现40 nm的宽调谐范围, CD的幅度可以达到60%左右。

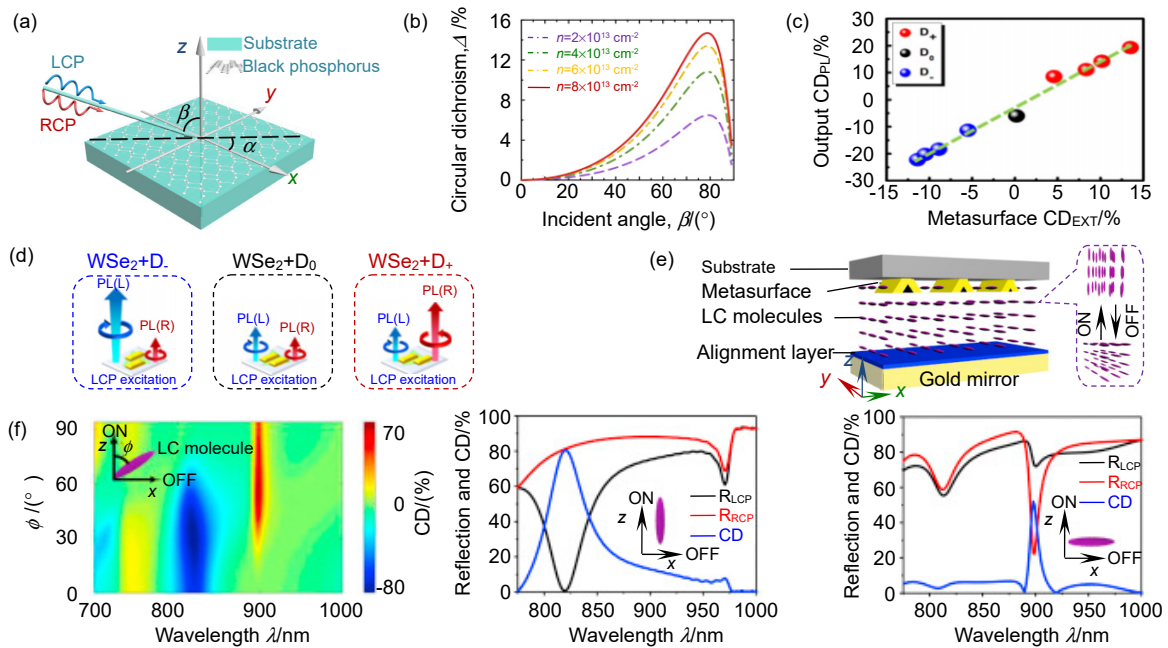


图6 (a) 圆偏振波在直角坐标系中以斜入射方式入射到无图案单层黑磷(BP)膜的示意图^[34]; (b) 圆二色性光谱; (c) 将 CD_{PL} 作为手征超表面 CD_{EXT} 的函数输出; (d) 示意图显示了在不改变激发的CP态情况下, 通过MMs耦合操纵PL极化^[7]; (e) 手征超表面示意图^[35]; (f) LC集成等离子体手征超表面在开、关条件下的模拟反射和CD光谱

Fig. 6 (a) Schematic of circularly polarized waves impinge at a film of unpatterned monolayer black phosphorus (BP) at an oblique incidence in a Cartesian coordinate system^[34]; (b) Circular dichroism spectra; (c) Output CD_{PL} as a function of the CD_{EXT} of chiral metasurfaces; (d) Schematic diagrams indicate the manipulation of the PL polarization through the coupling to MMs without switching the CP state of the excitation^[7]; (e) Schematic of the chiral metasurface^[35]; (f) Simulated reflection and CD spectra of the LC-integrated plasmonic chiral metasurface at 'ON' and 'OFF' conditions

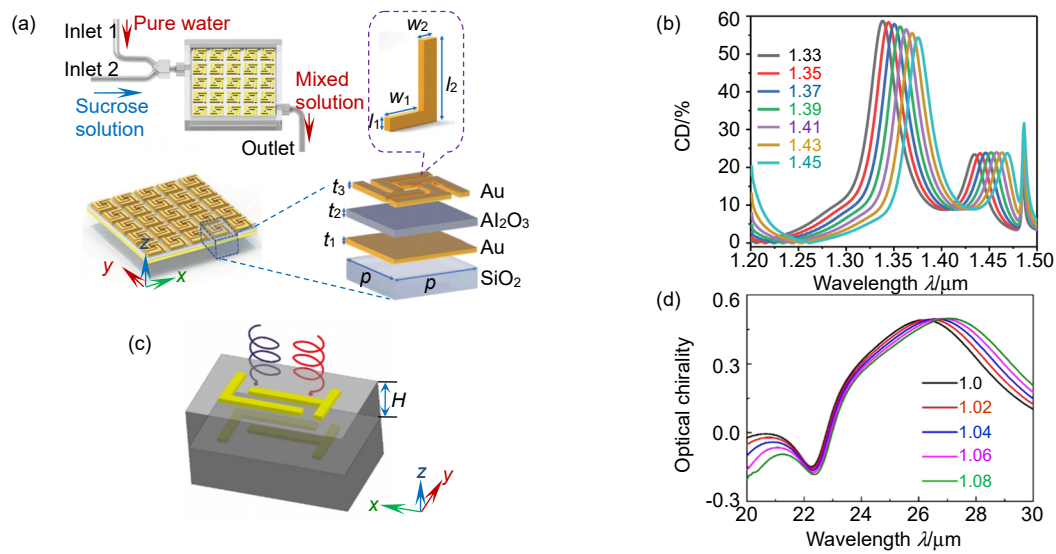


图 7 (a) 与微流体系统结合的手征超表面示意图^[36]; (b) 不同折射率混合溶液的 CD 谱; (c) 手征超表面示意图^[39]; (d) 在不同折射率的情况下, SCMM-BLT 沿 x 轴拉伸 10% 的 OC 光谱
 Fig. 7 (a) Schematic view of the chiral metasurface integrated with a microfluid system^[36]; (b) The CD spectrum as a function of the refractive index of the mixed solution; (c) Schematic view of the chiral metasurface^[39]; (d) OC spectra of SCMM-BLT stretched along x-axis at the level of 10% with different surrounding refractive index

通过机械力也可调谐手征超表面电磁响应,例如: kirigami 的圆极化转换器^[37], 可变形手性结构^[38], 也可以在特殊衬底上设计纳米天线阵列, 最常见的衬底是聚二甲基硅氧烷(PDMS)。2020 年, Zhou 等^[39]从理论上研究了 PDMS 衬底上具有双层 L 形和 T 形金图案的可拉伸手征超表面的圆二色性(CD), 如图 7(c), 7(d) 所示。由于等离子体杂交模式的激发, CD 效应发生, 可以在中红外区产生 53.6%的大光学手性。通过拉伸 PDMS, CD 的波段向更长的波长移动, 证明了 PDMS 可以作为可调谐手征超表面的候选材料。除了上述材料, 还有许多可调谐材料已被用于可调谐超表面器件, 如: 五氧化二钒锂(Li_xV₂O₅)^[40]、介电层^[41-42]等, 这些发现由于其简洁的制作过程和良好的性能, 在分析化学、成像、传感和光谱学等领域具有广泛的应用前景。

5 不对称传输特性可调

通过手征超表面还可以实现不对称传输的可调, 电磁波的不对称传输在信息传输过程当中起着非常重要的作用, 而经特殊设计的手征超表面则可使不对称传输可调谐, 极大地拓展了其在通信领域的应用前景。2015 年, Cao 等^[43]用数值模拟方法分别研究了利用介质中间层 GST225 和石墨烯实现中红外区的圆转换二色性(CCD)的超快调谐。2016 年, Zhao 等^[44]用数值方法证明了圆偏振波通过具有 G 形孔的石墨烯手征超表面在 THz 区的不对称传输可调, 如图 8(a)所示, 并随

石墨烯费米能级的变化而变化, 当费米能级是 0.6 eV 时, 在 335 μm 处达到最大值 6.8%, 费米能级增加到 0.8 eV, 在 305 μm 处最大值达到 15.6%, 如图 8(b)所示。在衬底存在的情况下, 石墨烯薄膜的等离子体共振移到更长的波长。

2017 年, Jiang 等^[45]将简单形状的硅阵列与石墨烯片相结合, 数值研究了中红外区的高效不对称传输可调, 在 12.68 THz 时, 介质纳米带结构的非对称参数达到了 0.92, 可调谐光谱的宽度(>0.7 处)为 1 100 nm, 与之前报道的 AT 相比, 这是一个很大的进步。

2019 年, Shokati 等^[46]提出了一种在 THz 频段可调的石墨烯手征超表面, 如图 8(c)所示, 采用有限积分法对结构进行了数值模拟, 证明了圆转换二色性(CCD)的可调, 最高可达 0.2, 如图 8(d)所示。Zhou 等^[47]提出了一种基于双层石墨烯基平面手征超表面的 J 型结构来产生中红外区的圆偏振波的不对称传输, 如图 8(e), 8(f)所示, 双层结构的非对称透射率可达 16.64%, 远高于单层结构。Zhao 等^[48]采用时域有限差分(FDTD)方法, 提出了一种三层金属-石墨烯-金属超表面, 研究了三层金属-石墨烯-金属超表面的可控线性非对称传输和完全极化转换, 如图 9(a), 9(b)所示, 通过将石墨烯的费米能级从 0.8 eV 改变为 0 eV, 实现了不对称传输和完全极化转换的开关控制。

同年, 还有许多的不同种类的可调手征超表面被提出。Song 等^[49]研究了一个分裂阿基米德螺线超表

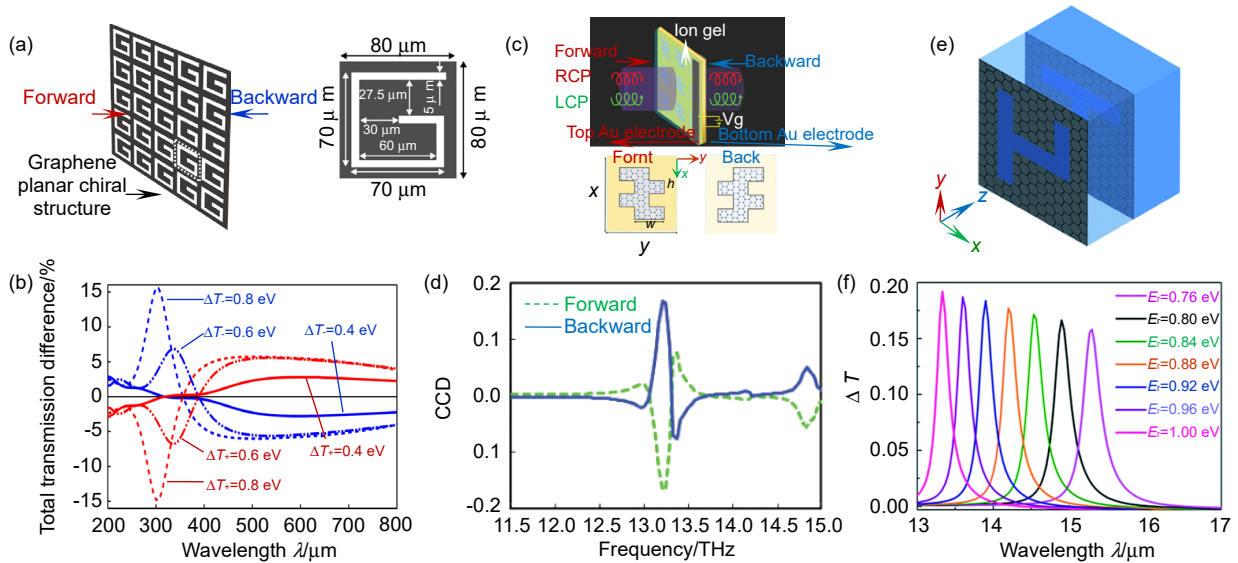


图 8 (a) 具有 G 形孔的石墨烯手征超表面^[44]; (b) 无衬底时相对与总透射的传输差; (c) 石墨烯手征超表面^[46]; (d) 结构的正反传播方向的圆转换二色性(CCD)光谱示意图; (e) 单层石墨烯平面手征超表面^[47]; (f) 不同费米能级下非对称透射与波长的关系

Fig. 8 (a) The graphene chiral metasurface with G-shaped holes^[44]; (b) The relative enantiomeric difference in the total transmission without a substrate; (c) Schematic view of the graphene chiral metasurface^[46]; (d) Circular conversion dichroism (CCD) spectra of the structure for forward and backward propagation directions; (e) The schematic diagram of the monolayer graphene-based planar chiral metasurface^[47]; (f) The relation between the asymmetric transmission and the wavelength under different fermi energies

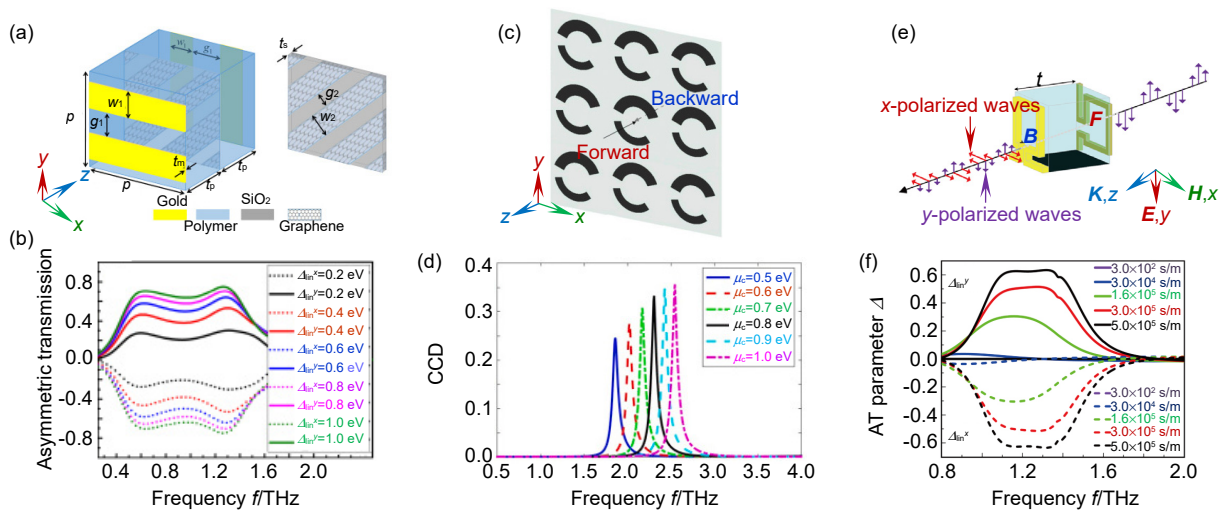


图 9 (a) 混合金属-石墨烯超表面单元示意图^[48]; (b) 不同费米能级石墨烯的不对称传输参数; (c) 超表面三维视图^[52]; (d) 不同 μ_c 向前传播的 CCD 光谱; (e) 装置原理图^[53]; (f) y 极化(实线)和 x 极化波(虚线)的 AT 参数

Fig. 9 (a) Schematic diagram of a unit cell of the proposed hybrid metal-graphene metasurface^[48]; (b) Asymmetric transmission parameters with different Fermi energies of graphene; (c) Three dimensional view of the metasurface array^[52]; (d) CCD spectra of the structure for forward propagation directions with different values of μ_c ; (e) Schematic diagram of the device^[53]; (f) AT parameters of y -polarized (solid line) and x -polarized waves (dashed line)

面, 作为概念的证明, 利用分裂螺旋结构的耦合, 证明了双频非对称传输在 GHz 区域的存在, 最大不对称传输参数达到 53%, 利用微流控技术对分裂螺旋结构的高度进行控制, 得到了带宽为 25.9%的宽带非对称传输调谐。Hajian 等^[50]从理论上分析了六方氮化硼

(hBN)/石墨烯/hBN 异质结构的不对称传输特性, 最高可达 45%。同年, 他们^[51]还证明了用平面多层石墨烯-hBN 超材料可以产生超宽带、高对比度的光的不对称透射(AT)和不对称吸收(AA), 中红外区的 AT 可达 75%。

2020年Asgari等^[52]研究了一种由拆分环阵列组成的新型THz频段可调石墨烯手征超表面,如图9(c)~9(d)所示,实现了圆转换二向色性(CCD)可调,CCD可达到0.36。Li等从^[53]理论上论证了一种由一层金属结构和一层相变结构组成的超表面,在这两层结构之间有聚酰亚胺间隔物,如图9(e),9(f)所示,通过改变电导率的值,实现了线不对称传输参数0~0.63大范围的变化。

6 总结与展望

在本文中,我们简要回顾了可调谐手征超表面这个快速发展的光子领域中取得的主要成就,重点介绍了可调谐手征超表面的电磁特性,特别是与手征性相关的负折射率、圆二色性和旋光性、不对称传输特性的调谐性质,但目前出现的一些可调谐手征超表面的设计,大部分是通过数值模拟和理论分析,实验实现的很少。作为一个新兴研究方向,可调谐手征超表面尽管在近年来取得了长足的发展,但仍然存在一些亟待解决的问题:1)文中介绍的可调谐超表面大部分都有金属层,也就是金属和介质混合的超表面,而金属在光频段都有较大的内在欧姆损耗,利用金属-介质超表面的器件存在效率低、带宽小等问题,未来期望利用低损耗的新型可调谐材料,结合几何(PB)相位的梯度超表面、Mie共振超表面等,设计、制备结构简单的全介质手征超表面光功能器件,更加深入地研究超表面光器件对各种偏振光的响应特性,如圆二色性、旋光性、不对称传输等,实现结构简单,高效的可调谐全介质多功能手征超表面光器件;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,如何同时实现宽带、高效的调谐值得做进一步的深入研究;3)上述的可调谐手征超表面可以同时实现一个或两个电磁特性的调谐,更多功能的集成还有待挖掘。相信未来随着可调谐手征超表面的不断深入研究,电磁特性不断优化,可以应用到更多领域,包括生物医学传感和成像、量子信号处理、激光和热探测器等。

参考文献

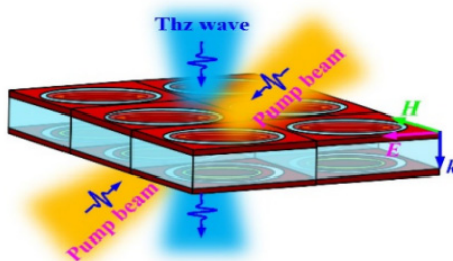
- [1] Choudhury S M, Wang D, Chaudhuri K, et al. Material platforms for optical metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2018, **7**(6): 959–987.
- [2] Chang S Y, Guo X X, Ni X J. Optical metasurfaces: progress and applications[J]. *Annu Rev Mater Res*, 2018, **48**(1): 279–302.
- [3] Sun S L, He Q, Hao J M, et al. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications[J]. *Adv Opt Photonics*, 2019, **11**(2): 380–479.
- [4] Rizza C, Falco A D, Scalora M, et al. One-dimensional chirality: strong optical activity in epsilon-near-zero metamaterials[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, **115**(5): 057401.
- [5] Fedotov V A, Mladyonov P L, Prosvirnin S L, et al. Asymmetric propagation of electromagnetic waves through a planar chiral structure[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **97**(16): 167401.
- [6] Dong J F, Zhou J F, Koschny T, et al. Bi-layer cross chiral structure with strong optical activity and negative refractive index[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(16): 14172–14179.
- [7] Lin H T, Chang C Y, Cheng P J, et al. Circular dichroism control of tungsten diselenide (WSe₂) atomic layers with plasmonic metamolecules[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, **10**(18): 15996–16004.
- [8] Lv T T, Li Y X, Ma H F, et al. Hybrid metamaterial switching for manipulating chirality based on VO₂ phase transition[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 23186.
- [9] Mandal P, Mohan S, Sharma S, et al. Broadband multi-resonant circular dichroism in metal-VO₂ hybrid dagger-like plasmonic structure for switching application[J]. *Photonics Nanostruct-Fundam Appl*, 2019, **37**: 100735.
- [10] Sorathiya V, Dave V. Numerical study of a high negative refractive index based tunable metamaterial structure by graphene split ring resonator for far infrared frequency[J]. *Opt Commun*, 2020, **456**: 124581.
- [11] Zhang F, Pu M B, Li X, et al. All-dielectric metasurfaces for simultaneous giant circular asymmetric transmission and wavefront shaping based on asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Adv Funct Mater*, 2017, **27**(47): 1704295.
- [12] Mao L B, Liu K, Zhang S, et al. Extrinsicly 2D-chiral metamirror in near-infrared region[J]. *ACS Photonics*, 2020, **7**(2): 375–383.
- [13] Wu R Y, Cui T J. Microwave metamaterials: from exotic physics to novel information systems[J]. *Front Inform Technol Electron Eng*, 2020, **21**(1): 4–26.
- [14] Plum E, Liu X X, Fedotov V A, et al. Metamaterials: optical activity without chirality[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, **102**(11): 113902.
- [15] Zhang S, Fan W J, Panoiu N C, et al. Demonstration of near-infrared negative-index materials[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **95**(13): 137404.
- [16] Cao T, Simpson R E, Cryan M J. Study of tunable negative index metamaterials based on phase-change materials[J]. *J Opt Soc Am B*, 2013, **30**(2): 439–444.
- [17] Li W L, Meng Q L, Huang R S, et al. Thermally tunable broadband terahertz metamaterials with negative refractive index[J]. *Opt Commun*, 2018, **412**: 85–89.
- [18] Ling F, Zhong Z Q, Huang R S, et al. A broadband tunable terahertz negative refractive index metamaterial[J]. *Sci Rep*, 2018, **8**: 9843.
- [19] Ling F, Zhong Z Q, Zhang Y, et al. Broadband negative-refractive index terahertz metamaterial with optically tunable equivalent-energy level[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(23): 30085–30099.
- [20] Luo Y B, Zeng Q S, Yan X, et al. A graphene-based tunable negative refractive index metamaterial and its application in dynamic beam-tilting terahertz antenna[J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2019, **61**(12): 2766–2772.
- [21] Iwai A, Righetti F, Wang B, et al. A tunable double negative device consisting of a plasma array and a negative-permeability metamaterial[J]. *Phys Plasmas*, 2020, **27**(2): 023511.

- [22] Huang Y J, Xie X, Pu M B, *et al.* Dual-functional metasurface toward giant linear and circular dichroism[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(11): 1902061.
- [23] Cao T, Zhang L, Simpson R E, *et al.* Strongly tunable circular dichroism in gammadion chiral phase-change metamaterials[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(23): 27841–27851.
- [24] Cao T, Li Y, Wei C W, *et al.* Numerical study of tunable enhanced chirality in multilayer stack achiral phase-change metamaterials[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(9): 9911–9925.
- [25] Yin X H, Schäferling M, Michel A K U, *et al.* Active chiral plasmonics[J]. *Nano Lett*, 2015, **15**(7): 4255–4260.
- [26] Gao F, Zhu J W, Ma H F, *et al.* Tunable circular dichroism of chiral metamaterial based on phase transition of vanadium dioxide (VO₂) [J]. *Mater Res Express*, 2020, **7**(4): 045802.
- [27] Wang T K, Wang Y K, Luo L N, *et al.* Tunable circular dichroism of achiral graphene plasmonic structures[J]. *Plasmonics*, 2017, **12**(3): 829–833.
- [28] Kim T T, Oh S S, Kim H D, *et al.* Electrical access to critical coupling of circularly polarized waves in graphene chiral metamaterials[J]. *Sci Adv*, 2017, **3**(9): e1701377.
- [29] Huang Z, Yao K, Su G X, *et al.* Graphene–metal hybrid metamaterials for strong and tunable circular dichroism generation[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(11): 2636–2639.
- [30] Vila M, Hung N T, Roche S, *et al.* Tunable circular dichroism and valley polarization in the modified Haldane model[J]. *Phys Rev B*, 2019, **99**(16): 161404.
- [31] Zhou S E, Lai P T, Dong G H, *et al.* Tunable chiroptical response of graphene achiral metamaterials in mid-infrared regime[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(11): 15359–15367.
- [32] Yao Z F, Lu M J, Zhang C Y, *et al.* Dynamically tunable and transmissive linear to circular polarizer based on graphene metasurfaces[J]. *J Opt Soc Am B*, 2019, **36**(12): 3302–3306.
- [33] Amin M, Siddiqui O, Farhat M. Linear and circular dichroism in graphene-based reflectors for polarization control[J]. *Phys Rev Appl*, 2020, **13**(2): 024046.
- [34] Hong Q L, Xu W, Zhang J F, *et al.* Optical activity in monolayer black phosphorus due to extrinsic chirality[J]. *Opt Lett*, 2019, **44**(7): 1774–1777.
- [35] Yin S T, Ji W, Xiao D, *et al.* Intrinsically or extrinsically reconfigurable chirality in plasmonic chiral metasurfaces[J]. *Opt Commun*, 2019, **448**: 10–14.
- [36] Peng R H, Liu J X, Xiao D, *et al.* Microfluid-enabled fine tuning of circular dichroism from chiral metasurfaces[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2019, **52**(41): 415102.
- [37] Jing L Q, Wang Z J, Zheng B, *et al.* Kirigami metamaterials for reconfigurable toroidal circular dichroism[J]. *NPG Asia Mater*, 2018, **10**(9): 888–898.
- [38] Liu Z G, Xu Y, Ji C Y, *et al.* Fano-enhanced circular dichroism in deformable stereo metasurfaces[J]. *Adv Mater*, 2020, **32**(8): 1907077.
- [39] Zhou L, Wang Y K, Zhou J X, *et al.* Tunable circular dichroism of stretchable chiral metamaterial[J]. *Appl Phys Express*, 2020, **13**(4): 042008.
- [40] Zanutto S, Blancato A, Buchheit A, *et al.* Metasurface reconfiguration through lithium-ion intercalation in a transition metal oxide[J]. *Adv Opt Mater*, 2017, **5**(2): 1600732.
- [41] Qu Y, Zhang Z D, Fu T, *et al.* Dielectric tuned circular dichroism of L-shaped plasmonic metasurface[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2017, **50**(50): 504001.
- [42] Hu J P, Zhao X N, Lin Y, *et al.* All-dielectric metasurface circular dichroism waveplate[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**: 41893.
- [43] Cao T, Wei C W, Mao L B. Numerical study of achiral phase-change metamaterials for ultrafast tuning of giant circular conversion dichroism[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**: 14666.
- [44] Zhao J Y, Zhang J F, Zhu Z H, *et al.* Tunable asymmetric transmission of THz wave through a graphene chiral metasurface[J]. *J Opt*, 2016, **18**(9): 095001.
- [45] Jiang H, Zhao W Y, Jiang Y Y. High-efficiency tunable circular asymmetric transmission using dielectric metasurface integrated with graphene sheet[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(17): 19732–19739.
- [46] Shokati E, Asgari S, Granpayeh N. Dual-band polarization-sensitive graphene chiral metasurface and its application as a refractive index sensor[J]. *IEEE Sens J*, 2019, **19**(21): 9991–9996.
- [47] Zhou J X, Wang Y K, Lu M J, *et al.* Giant enhancement of tunable asymmetric transmission for circularly polarized waves in a double-layer graphene chiral metasurface[J]. *RSC Adv*, 2019, **9**(58): 33775–33780.
- [48] Zhao J X, Song J L, Xu T Y, *et al.* Controllable linear asymmetric transmission and perfect polarization conversion in a terahertz hybrid metal-graphene metasurface[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(7): 9773–9781.
- [49] Song Q H, Wu P C, Zhu W M, *et al.* Split archimedean spiral metasurface for controllable GHz asymmetric transmission[J]. *Appl Phys Lett*, 2019, **114**(15): 151105.
- [50] Hajian H, Ghobadi A, Serebryannikov A E, *et al.* VO₂-hBN-graphene-based bi-functional metamaterial for mid-infrared bi-tunable asymmetric transmission and nearly perfect resonant absorption[J]. *J Opt Soc Am B*, 2019, **36**(6): 1607–1615.
- [51] Hajian H, Ghobadi A, Serebryannikov A E, *et al.* Tunable infrared asymmetric light transmission and absorption via graphene-hBN metamaterials[J]. *J Appl Phys*, 2019, **126**(19): 193102.
- [52] Asgari S, Rahmanzadeh M. Tunable circular conversion dichroism and asymmetric transmission of terahertz graphene metasurface composed of split rings[J]. *Opt Commun*, 2020, **456**: 124623.
- [53] Li T, Hu F R, Qian Y X, *et al.* Dynamically adjustable asymmetric transmission and polarization conversion for linearly polarized terahertz wave[J]. *Chin Phys B*, 2020, **29**(2): 024203.

Research progress of electromagnetic properties of tunable chiral metasurfaces

Wang Jinjin, Zhu Qiu hao, Dong Jianfeng*

College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China



Schematic illustration of a unit cell of the tunable NIMs

Overview: Chiral metasurfaces composed of planar chiral cell structures have negative refractive index, circular dichroism, optical rotation, asymmetric transmission, and other electromagnetic properties. With simple structure, they are easy to be miniaturized and integrated. In recent years, they have become a research hotspot in the field of optical application devices such as information, national defense, energy, super-resolved imaging, holographic display, sensing, polarizer, and switch.

The basic materials of chiral metasurfaces are metal materials, metal-dielectric mixed materials, and all dielectric materials. With the rapid development of chiral metasurfaces research, the optical properties of chiral metasurfaces have been extensively studied. However, the current chiral metadevices lack tunability, and once they are designed and manufactured, their electromagnetic properties and functions will also be fixed and cannot be used in the field of dynamically changing optoelectronics. Therefore, it is necessary to add new tunable materials such as phase-change materials (VO_2 , $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_4$), graphene, single-layer black scale, liquid crystal, semiconductors, polymers, etc. Through heat, light, electricity and other external factors to induce the change of the dielectric constant and permeability of the medium, so as to achieve the tuning effect of the electromagnetic characteristics. These new tunable materials greatly enrich the modeling of chiral metasurfaces, providing more effective methods for theoretical analysis of unique electromagnetic and optical properties, and also providing a new research platform for electromagnetism, optics, physics, and nanoscience.

In this review, we describe the research progress of several common tunable chiral metasurfaces in recent years. The first one is the negative refractive index tunable chiral metasurfaces, which experimentally show that the negative refractive index can be adjustable in wide band. The second one is the chiral metasurfaces with tunable circular dichroism and optical rotation. The dynamic regulation of internal and external chiral metasurfaces based on circular dichroism and optical rotation is introduced in detail, which can realize the functional tuning of polarization conversion, circular dichroism switch, quarter wave plate, and reflector. It is divided into phase change materials, graphene, and other tunable materials according to the tunable materials. The optical properties of phase-change materials vary only with the phase transition and have a very fast phase transition speed. Graphene has high electrical conductivity, wide band electro-optical properties, and stable chemical resistance, and the circular dichroism and optical rotation can be changed by adjusting the Fermi energy level of graphene. Finally, a tunable chiral metasurface with asymmetric transmission is introduced. Among them, the discovery of the tunable all-dielectric chiral metasurfaces provides a possibility to solve the problem of low efficiency and high loss of the metal materials, which can be applied to more fields.

Wang J J, Zhu Q H, Dong J F. Research progress of electromagnetic properties of tunable chiral metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(2): 200218; DOI: 10.12086/oee.2021.200218

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61475079)

* E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn