

可调谐光学超构材料及其应用

曹瞰 刘宽 李阳 廉盟 胡子贤 刘萱 李贵新

Tunable optical metamaterials and their applications

CAO Tun, LIU Kuan, LI Yang, LIAN Meng, HU Zi-xian, LIU Xuan, LI Gui-xin

引用本文:

曹瞰, 刘宽, 李阳, 廉盟, 胡子贤, 刘萱, 李贵新. 可调谐光学超构材料及其应用[J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 968–985. doi: 10.37188/CO.2021–0080

CAO Tun, LIU Kuan, LI Yang, LIAN Meng, HU Zi-xian, LIU Xuan, LI Gui-xin. Tunable optical metamaterials and their applications[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 968–985. doi: 10.37188/CO.2021–0080

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0080>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电磁编码超材料的理论与应用

Theory and application of coding metamaterials

中国光学. 2017, 10(1): 1 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0001>

电环形谐振腔表面几何参数对太赫兹超材料吸收体性能的影响

Influence of the geometric parameters of the electrical ring resonator metasurface on the performance of metamaterial absorbers for terahertz applications

中国光学. 2018, 11(1): 47 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0047>

超分辨率成像荧光探针材料应用进展

Advances in application of materials of super-resolution imaging fluorescent probe

中国光学. 2018, 11(3): 344 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0344>

太赫兹偏振测量系统及其应用

Polarization sensitive terahertz measurements and applications

中国光学. 2017, 10(1): 98 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0098>

结构光照明超分辨光学显微成像技术与展望

Structured illumination super-resolution microscopy technology: review and prospect

中国光学. 2018, 11(3): 307 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0307>

超颖表面原理与研究进展

The principle and research progress of metasurfaces

中国光学. 2017, 10(5): 523 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0523>

可调谐光学超构材料及其应用

曹 瞰^{1*}, 刘 宽¹, 李 阳^{1,2}, 廉 盟¹, 胡子贤², 刘 萱³, 李贵新^{2*}

(1. 大连理工大学 光电工程与仪器科学学院, 大连 116024;

2. 南方科技大学 材料科学与工程系, 深圳 518055;

3. 北京工业大学 材料与制造学部, 北京 100124)

摘要: 光学超构材料是由亚波长功能单元组成的新型人工结构材料, 拥有天然材料所不具备的新颖光学特性。利用光学超构材料可以灵活调控光波的传播特性, 可实现负折射、隐身、单向传输等新奇的光学现象。传统的光学超构材料通常具有固定的几何结构和不变的材料特性, 其光学性能难以改变, 限制了光学超构材料器件的可调谐性。近年来, 人们通过特殊材料或者结构来设计光学超构材料, 实现了对光波的动力学调控。本篇综述主要围绕活性材料(如变容二极管、液晶、相变材料、石墨烯等)和结构重构(微机电系统、柔性可拉伸材料等)这两种调控机制, 介绍了可调谐光学超构材料领域的研究进展, 分析了基于不同调控机制的可调谐光学超构材料的特点, 阐述了可调谐光学超构材料在未来应用中所面临的挑战, 并展望了可调谐光学超构材料的发展前景。

关键词: 光学超构材料; 光学超构表面; 可调谐

中图分类号: O436; O441

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2021-0080

Tunable optical metamaterials and their applications

CAO Tun^{1*}, LIU Kuan¹, LI Yang^{1,2}, LIAN Meng¹, HU Zi-xian², LIU Xuan³, LI Gui-xin^{2*}

(1. *Department of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science,*

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. *Department of Materials Science and Engineering, Southern University of Science*

and Technology, Shenzhen 518055, China;

3. *Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)*

* *Corresponding author, E-mail: caotun1806@dlut.edu.cn; ligx@sustech.edu.cn*

Abstract: Optical metamaterials are composed of array of artificial sub-wavelength resonators, exhibiting novel optical phenomena that not occur in natural materials. By using optical metamaterials, one can flexibly control the light propagation and realize fantastic optical phenomena such as negative refraction, cloaking and unidirectional transmission, etc. Traditional optical metamaterials usually have fixed geometric structures and unchanged material properties, which limits their capabilities of tuning optical responses. Recently, tunable optical metamaterials based on exceptional materials or structures have attracted much attention. In this review, we investigate the fundamentals of tunable optical metamaterials realized by either integrating the active materials (i.e., varactor diodes, liquid crystals, phase change materials, graphene, etc.) or recon-

structuring the resonators array (i.e., micro electromechanical systems, stretchable materials, etc.). We systematically summarize the progress in this area, analyze the features of tunable optical metamaterials under different control mechanisms, elaborate the challenges of tunable optical metamaterials facing in future applications, and predict the future development direction.

Key words: optical metamaterials; optical metasurface; tunable

1 引言

光学超构材料是通过对天然材料进行加工,在其表面或内部形成周期性排列的亚波长结构阵列来获得的,拥有天然材料所不具备的特殊光学性质。有别于天然材料的“组分决定性质”,光学超构材料的“超常”光学性质是由材料先天的本征性质和后天人工设计的亚波长结构所共同决定的。1996年,英国科学家 Sir John Pendry 提出使用周期性排列的金属丝能够实现负的介电常数^[1]。随着纳米科学技术的发展,超构材料作为一类新型的功能材料受到了越来越多的关注。借鉴超构材料的设计思想,人们可以在不违背基本物理学规律的前提下,通过设计物理结构来突破某些自然规律的限制,从而获得具有超常物理性质的“新材料”,把功能材料的设计和开发带入一个崭新的天地。早期的被动光学超构材料,通过将亚波长功能单元排列为周期性的阵列,在亚波长尺度下对光波的传播特性进行灵活地调控,实现了许多有趣的光学功能,例如:完美透镜^[2-3]、隐形斗篷^[4-7]等。然而,被动光学超构材料的材料特性和几何结构固定,其光学功能难以改变,其光学性能不可调谐。

随着可调谐光学超构材料领域的不断发展,光学超构材料研究逐渐进入了新的阶段^[8]。目前,可调谐光学超构材料主要分为两大类。一类是基于活性材料的光学超构材料,将活性材料作为光学超构材料的功能单元或周围环境介质的一部分,利用活性材料的光学参数可以随着热、电、光、磁等外部刺激的变化而变化的特性,实现动态操控光波的功能^[9]。典型的活性材料有相变材料、石墨烯、半导体、液晶等。另一类是基于结构重构的可调谐光学超构材料^[10],它们通过改变功能单元的排列、形状和方向,使局部场态和整个系统的光学响应发生相应的变化。典型的结构重构方法有采用柔性可拉伸材料、微机电系统(MEMS)

等。无论何种可调谐光学超构材料,其调制速度、调制深度、循环稳定性、可逆性和过程复杂性都是衡量超构材料物理调控特性的关键因素。

本文系统介绍了可调谐光学超构材料的最新研究进展,主要包括基于活性材料型和结构重构型的可调谐光学超构材料,重点讨论了活性材料型光学超构材料的调谐机理、结构重构型光学超构材料的驱动和制造方法。最后,总结了当前可调谐光学超构材料的优缺点及其发展所面临的问题,并展望了未来可调谐光学超构材料的发展方向。

2 可调谐光学超构材料的定义及功能

可调谐光学超构材料是一种光学性能主动实时可控的超构材料,其中光学性能主要包括光波的偏振、振幅、频率及相位等参量^[11]。超构材料的作用环境主要包含结构层和周围环境,因此可通过改变超构材料的结构形状、尺寸大小、用材种类、所处周围环境等条件来实现光学性能的可调^[12]。值得注意的是,每种条件的改变均会对超构材料的光学性能产生影响,因此需要综合考虑各种条件,才能设计出具有特定光学性能可调谐的光学超构材料^[13]。

随着材料科学的发展,近年来涌现出许多对温度、电场、光场、磁场等外场能量高度敏感的材料。在不同外场的激励下,这些活性材料的状态会发生变化并表现出不同的光学参数,可用于构建可调谐光学超构材料^[14]。此外,从改变超构材料结构的角度的角度,人们利用柔性可拉伸材料、微机电系统(MEMS)等手段来调控超构材料结构形状和尺寸,以构成结构重构型可调谐光学超构材料^[15]。无论是基于活性材料还是结构重构型的可调谐光学超构材料,都在光波的偏振、振幅、频率及相位调控等方面展现出了出色的能力,实现了多种可调谐的超构材料光学功能器件,如偏振片^[16]、吸波器^[17]、超构透镜^[18]以及全息^[19]等。

3 基于活性材料的可调谐光学超构材料

活性材料是一类光学性能可主动调控的材料,其在外加场的调控下能在不同状态间切换并展现出不同的光学参数,可被用作光学超构材料的结构层、介质层或周围环境介质,来实现超构材料光学性能的调控。根据活性材料所需的外加驱动场种类,可以将其分为热驱动、电驱动、光驱动以及磁驱动等可调谐光学超构材料。

3.1 热驱动可调谐光学超构材料

热敏材料在热场作用下,其材料的相态将发生变化,进而导致其光学参数改变,利用热敏材料的这一特性可制得热驱动可调谐的光学超构材料。二氧化钒(VO_2)作为典型的热敏材料,在 68°C 下会发生相变,由绝缘态变为金属态。已有的研究中基于 VO_2 的超构表面调节方法主要有直接

加热(加热台)、电加热和光刺激(激光加热),但其调制速度在一定程度上受到其调制机制本身的限制^[20]。热驱动 VO_2 超构表面在太赫兹 (THz)、红外及可见光波段都展现出一定的振幅调制功能^[21-22]。在 THz 波段,Min Zhong 等人基于 VO_2 研制了一种可调谐的吸收器,其吸收峰数量和吸收频率均会随着温度发生变化(图 1(a))^[23]。在中红外波段, VO_2 在两种状态间的光学参数差异较大, Federico Capasso 等人 在该波段利用 VO_2 实现了可调谐的完美吸波器,其调制深度高达 80%^[24]。在可见光波段, Mu Wang 等人通过在 VO_2 介质层上排列周期性的银纳米柱阵列,构成了一种反射式可调谐的光学超构表面。当温度升高时, VO_2 由绝缘态转变到金属态,其光学参数将发生变化并影响局部表面等离子体共振,进而导致反射光谱发生变化,光学超构表面呈现出由绿色到黄色的变色效果(图 1(b))^[25]。

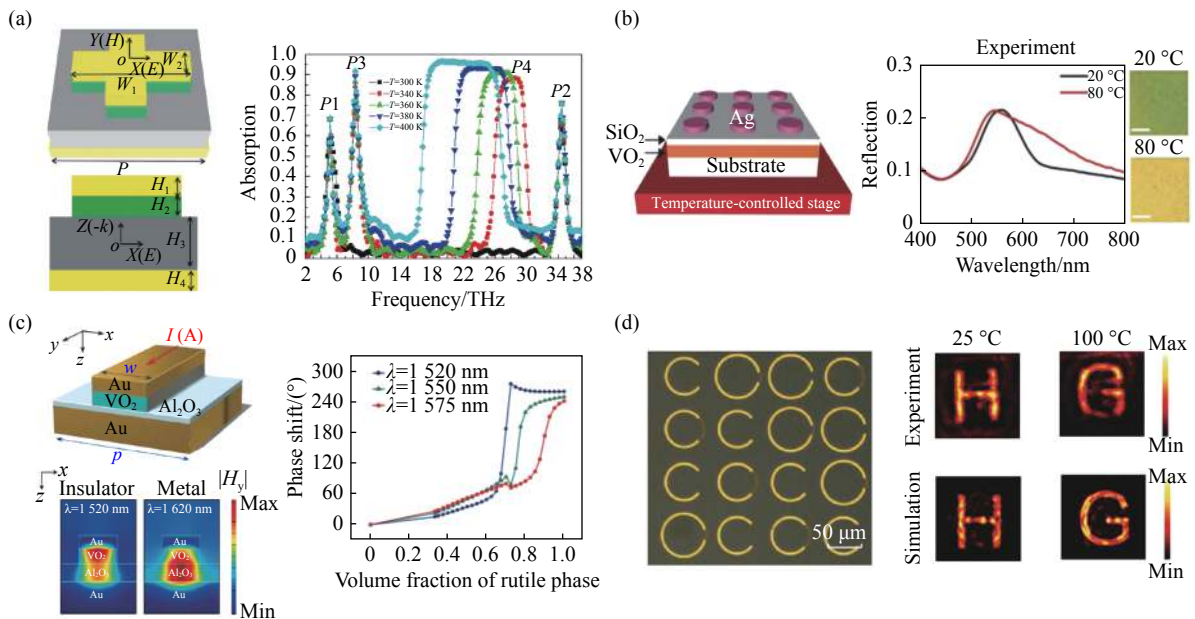


图 1 VO_2 基热驱动可调谐光学超构材料。(a) THz 波段可调谐吸收器示意图(左)及其实验测得的温控吸收谱线(右)^[23]。(b) 可见光波段反射式可调谐光学超构表面的示意图(左)及其在 20°C 和 80°C 下测得的反射光谱和颜色显示图(右),比例尺为 $30\ \mu\text{m}$ ^[25]。(c) 反射式相位可调谐光学超构表面示意图(左上)及其在 $1520\ \text{nm}$ 和 $1620\ \text{nm}$ 波长处的磁场分布(左下);超构材料的相位调控与电压的关系谱线(右)^[20]。(d) THz 波段温控动态全息超构表面及其在 25°C 和 100°C 时的实验(右上)和模拟(右下)全息图像^[19]

Fig. 1 Thermally-driven tunable optical metamaterials based on VO_2 . (a) Schematic of a tunable absorber in the THz region (left) and the measured temperature dependent absorption spectra (right)^[23]. (b) Schematic of a tunable optical metasurface in the visible region (left) and the measured reflection spectra and observed colors at 20°C and 80°C , accordingly (right), scale bar: $30\ \mu\text{m}$ ^[25]. (c) Schematic of a phase-tunable optical metasurface (top left) and the simulated magnetic field distributions at the two wavelengths of $1520\ \text{nm}$ and $1620\ \text{nm}$, respectively (bottom left); the relationship between phase shift of metamaterials and external voltage (right)^[20]. (d) A temperature-controlled dynamic holographic metasurface in the THz region^[19] and the measured (upper right) and simulated (lower right) holographic images at 25°C and 100°C

近年来, 基于 VO_2 的光学超构表面相位调制技术也取得了较好的进展。图 1(c) 显示了集成 VO_2 介质层的反射式超构表面, 该超构表面具有强的磁共振, VO_2 层的磁场强度得到很大的增强。在该设计中, 电致焦耳热使得 VO_2 薄膜的光学参量发生变化, 从而导致 1520 nm 和 1620 nm 波长处的磁偶极子共振模式发生变化。通过调节 VO_2 薄膜中绝缘态和金属态的体积分数, 可以实现高达 250° 的相位移动, 调制速度达到毫秒级^[20]。此外, Weili Zhang 等人利用 VO_2 材料在 THz 波段实现了温控动态全息功能, 其功能单元为 C 形金属开口谐振环。在升温过程中, 全息图像由“H”变为“G”^[19](见图 1(d))。此外, 基于 VO_2 的相位可调谐光学超构材料也被用于实现光束的动态偏转^[26]。

相变化合物作为典型的热敏材料也被广泛应用于可调谐光学超构材料中, 此类材料在脉冲热

激励下可以实现非晶态和晶态之间的快速转变, 且这两种状态之间具有较大的光学性质差异^[27-29]。与 VO_2 相比, 相变化合物同样有直接加热、电加热、光加热三种调控方法, 但其晶态到非晶态的转变过程是相变材料经历快速熔融淬火的过程, 目前只能通过纳秒乃至飞秒激光或电脉冲在微米级的区域面积内实现^[30]。相变材料苛刻的相变条件限制了它在可调谐光学超构材料中的广泛应用, 但其具有非易失性、不需要维持温度来保持材料状态的优点, 这使得基于相变材料的超构表面具有更高的稳定性和实用性^[31]。2013 年, Tun Cao 等人首次将相变材料引入到超构材料的设计中, 设计出一种基于金属-相变材料-金属三层结构的中红外可调谐完美吸波器。通过结晶相变材料, 该吸波器的吸收峰从 2230 nm 红移至 2460 nm, 共振波长的调控范围高达 230 nm(图 2(a))^[32]。此后, 英国南安普顿大学 Nikolay I. Zheludev 等人利

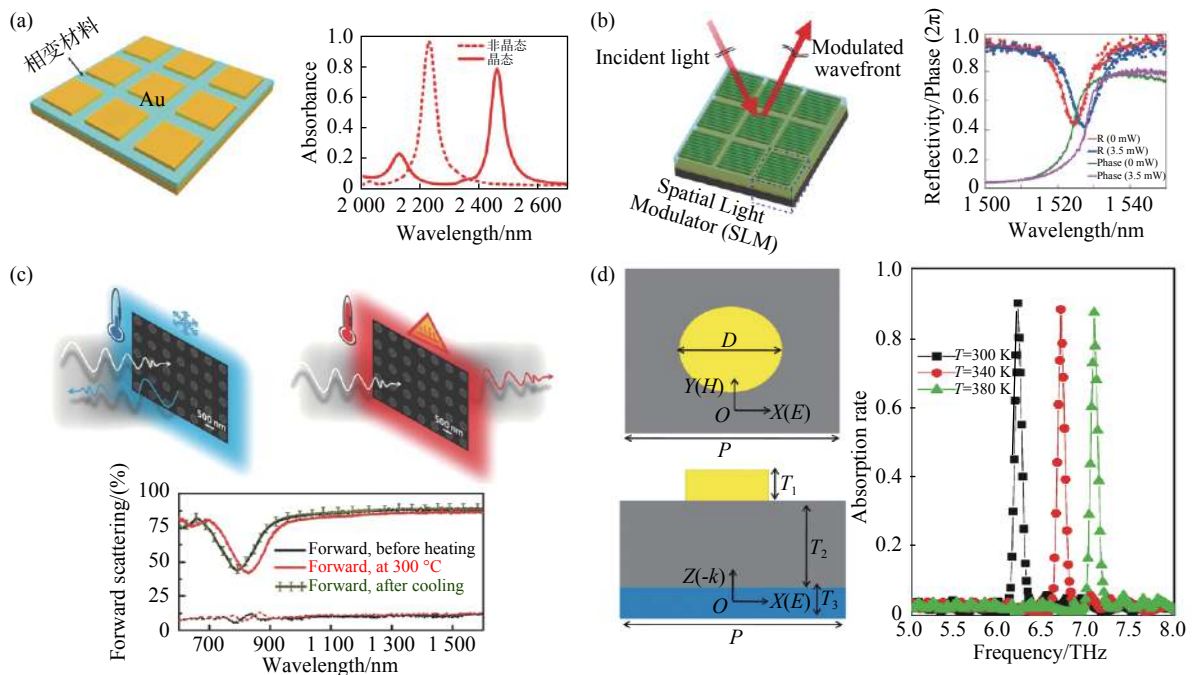


图 2 热驱动可调谐光学超构材料。(a) 基于相变材料的可调谐完美吸波器示意图及相变材料处于非晶态或晶态时模拟得到的吸收光谱^[32]。(b) 电热驱动的硅基空间光调制器的示意图及其在 3.5 mW 的电驱动下的相位、振幅调制谱线^[47]。(c) 温控硅基可调谐光学超构表面示意图及其温控可调谐的散射光谱特性^[48]。(d) 基于 SrTiO_3 的可调谐吸波器的结构示意图, 其中黄色部分为金属层, 灰色部分为光刻胶层(SU-8), 蓝色部分为 SrTiO_3 层(左), 实验测得的温控吸收光谱(右)^[51]

Fig. 2 Thermally-driven tunable optical metamaterials. (a) Schematic of a tunable perfect absorber based on phase change material and the simulated absorption spectra of the absorber with the structural states of amorphous and crystalline^[32]. (b) Schematic of an electrothermally-driven silicon-based spatial light modulator and its modulation spectra of phase and amplitude under a driving power of 3.5 mW^[47]. (c) Schematic of a temperature-controlled silicon-based tunable optical metasurface and its scattering spectra^[48]. (d) Schematic of the meta-atom of SrTiO_3 -based tunable absorber, where the yellow, gray, blue parts represent the three layers of metal, photoresist (SU-8), and SrTiO_3 , accordingly (left). The measured temperature-controlled absorption spectra in the THz region (right)^[51]

用 ZnS/SiO₂-相变材料-ZnS/SiO₂-Au 多层混合结构, 实现了具有 400% 调谐范围和 10 MHz 调制速度的相变材料基可调谐光学超构材料^[33]。近年来, 基于相变材料的可调谐光学超构表面被广泛研究^[34-41]。英国牛津大学 Harish Bhaskaran 教授等人通过对相变材料基超构表面进行局部振幅调制, 实现了高分辨率的结构彩色显示技术^[42-43]。基于相变材料的可调谐超构材料不仅可以实现光波的振幅调制, 还可用于光波的相位调制, 在可调谐的光束控制^[44]和超构透镜^[45]等领域展现出了一定的应用潜力。

除了 VO₂ 和相变化合物之外, 以硅为代表的一些半导体材料同样具备折射率随温度变化的特性。其中, 硅因其成本低且易于与 CMOS 集成制造, 成为光子器件的首选材料^[46]。图 2(b) 展示了由硅超构材料层和分布式布拉格反射器组成的光学谐振器, 通过电热改变硅的光学常数, 该器件实现了对光波的相位调制, 响应时间为~70 μs, 比传统基于液晶的空间光调制器快一个数量级^[47]。2017 年, 澳大利亚国立大学 Mohsen Rahmani 教授等人演示了一种硅纳米盘超构表面, 在 20~300 °C 的温度范围内, 其散射光谱随温度的升高发生了 30 nm 的红移, 且该过程可逆^[48](图 2(c))。与以硅为代表的半导体材料类似, 钛酸锶 (SrTiO₃) 材料的光学常数同样具有较高的温度敏感特性。基于该特性, 研究人员将 SrTiO₃ 材料用于可调谐光学超构材料中, 其在 THz 波段表现出了优异的性能^[49-50]。Min Zhong 等人基于 SrTiO₃ 和金属材料实现了 THz 波段的可调谐吸收器, 当温度从 300 K 增加到 380 K 时, 其吸收频率可从 6.2 THz 移至 7.1 THz, 具有较高的吸收性能^[51](图 2(d))。

3.2 电驱动可调谐光学超构材料

为了易于与现有的电子信息技术兼容, 电驱动可调谐光学超构材料受到材料和光电子领域研究人员的广泛关注。根据材料的不同, 本小节主要介绍基于液晶、二极管、透明导电氧化物以及石墨烯这 4 类电驱动可调谐光学超构材料的研究进展。

液晶(Liquid Crystals, LC)材料通电时液晶分子排列变得有序, 而不通电时其排列较为混乱。在这个过程中, 液晶的光学常量会发生变化^[52-53]。因此, 基于液晶的可调谐光学超构材料大多是通过施加电场来对向列相液晶分子进行重新排列, 进而改变超构表面周围的局部环境, 实现共振调制

效果^[54-55]。为了减少损耗, 获得更好的光学响应, Arseniy I. Kuznetsov 等人将液晶在二氧化钛(TiO₂)结构上进行整合, 制造出液晶基空间光调制器。图 3(a) 为透射式液晶基 TiO₂ 介质超构表面调控光束的示意图, 通过加载 6~8 V 电压控制液晶的取向, 在保证 35% 的透射率的同时, 可实现 0~2π 的相位调控, 在光束转向和全息成像等方面具有广泛的应用前景^[56]。此外, 将超构表面的极化选择性与电场诱导的液晶分子扭曲排列相结合也是一种基本的调制方法。Mukesh Sharma 等人将具有偏振响应的结构阵列与液晶分子相结合, 在 0~5 V 电压控制和入射偏振光输入共同作用下, 实现了一种偏振敏感的结构色彩调制^[57](图 3(b)), 但该工作中获得的颜色饱和度和反射强度都还有待进一步提高^[58]。此外, 基于液晶的可调谐光学超构表面的功能单元尺寸较大, 且只有毫秒级的调制速度, 在一定程度上限制了其应用^[13]。

二极管作为电控活性材料, 在微波可调谐超构材料中起重要作用, 将其设置在微波开口谐振环的开口处, 可实现微波振幅、相位的调控^[59]。Sameer Sonkusale 等人将二极管与超构材料阵列的结构单元串联放置, 设计出一种频率可控的超构材料反射器。在 0~9 V 的偏置电压调控下, 该超构材料的反射峰可以在 2.0~6.0 GHz 范围内变化^[60](图 3(c))。Tiejun Cui 等人提出了时空编码超构表面的概念^[61](图 3(d)), 同时在空域和频域中实现了对电磁波的操纵。该团队利用现场可编程门阵列(FPGA)输出电信号, 控制二极管基可调谐超构材料, 进而组成时空编码超构材料。通过优化时空编码序列实现了认知雷达^[62]、自适应波束形成^[63]、全息成像^[64]等功能。

通过改变导电材料的载流子密度来实现材料光学参量的变化, 也是一种电驱动可调谐超构材料设计方法^[13], 近年来一些基于铟锡氧化物(ITO)等透明导电氧化物的研究充分利用了该方法。Harry A. Atwater 等人于 2016 年报道了一种基于 ITO 材料的可调谐超构表面, 在 1610 nm 波长处通过 2.5 V 的偏压作用实现了相位差为 π 的调制, 且调制频率超过了 10 MHz^[65](图 4(a))。然而, 该工作只能实现 30% 的反射调幅比, 限制其调制深度的主要因素是 ITO 的屏蔽效应, 使其电耗尽层/积累层的厚度不大于 1 nm^[14]。采用双门或多门结构模型可以解决这一问题, 获得了超过

300°的相位调谐能力^[66-67]。Junghyun Park 等人于2020年研制出一种基于ITO活性材料的全固态、可电调控的反射式超构表面, 每个功能单元都有独立的上下两个栅极电极(图4(b)), 用于独立调整反射系数的实部和虚部, 首次实现了相位和振幅的解耦调谐。该超构表面在250 μm×

250 μm 的面积内具有550个可单独寻址的功能单元, 可以在独立调控振幅的同时, 以5.4 MHz的频率在0~2π范围内进行连续的相位扫描。不仅解决了调制深度有限的问题, 还实现了覆盖0~2π范围的相位调谐, 可应用于光学检测、测距、全息、光通信等领域^[68]。

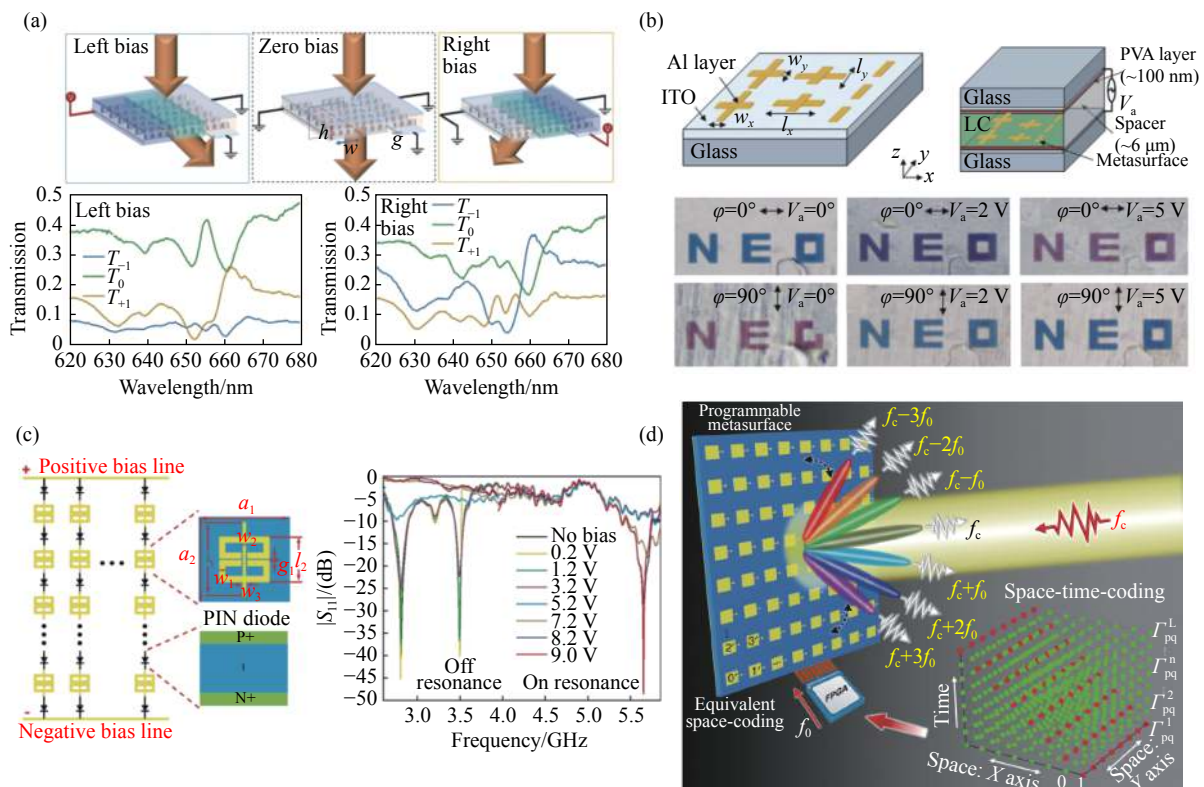


图3 液晶基和二极管基电驱动可调谐超构材料。(a) 液晶基透射式可调谐超构表面操控光束示意图(上), 实验测得的三个主要衍射级的透射谱(下)^[56]。(b) 偏振敏感的超构材料示意图(上左)以及液晶基偏振敏感的电控可调谐超构材料(上右), 0~5 V 电压驱动和入射偏振光共同作用下的颜色调制光学照片(下)^[57]。(c) 二极管基可调谐超构材料反射器的示意图(左)以及实验测得的不同电压驱动下的反射谱(右)^[60]。(d) 二极管基时空编码超构表面示意图^[61]

Fig. 3 The electrically-driven tunable metamaterials based on liquid crystal and diode, respectively. (a) Schematic of a liquid crystal based transmissive metasurface for beam steering(top), the measured transmission spectra of the three main diffraction orders (bottom)^[56]. (b) Schematic of polarization-sensitive metamaterials(top left) and liquid crystal based polarization-sensitive electrically-controlled tunable metamaterials (top right), color modulation with the combination of 0~5 V external voltage and polarization states of incident light (bottom)^[57]. (c) Schematic of a diode-based tunable metamaterial reflector (left) and the measured reflection spectra with the different external voltages (right)^[60]. (d) Schematic of the diode-based space-time coding metasurface^[61]

石墨烯因其独特的电子能带和晶体结构而展现出优异的光电性能, 其费米能级可以随电调制引起的载流子密度变化而发生显著位移, 进而引起其光学参量变化^[69-70]。石墨烯与超构表面的结合可以实现具有更高调谐速度、更大振幅调制范围和高稳定性的可调谐光电器件^[71-72]。该可调谐的超构表面通常由连接石墨烯的金属和约几百纳

米厚的介电隔离层组成, 这种方式往往需要较大的调制电压, 从而限制了相关器件的应用^[73-74]。为了克服这一障碍, Hou-Tong Chen 等人利用非晶硅作为介电隔离层在中红外(MIR)波段研制出了一种石墨烯超构表面调制器^[75]。非晶硅在MIR 波段的光学损耗低且在特定的栅电压下导电, 因此在不需要减少介电隔离层厚度的前提下,

就能以低于 10 V 的电压驱动器件, 并达到 90% 左右的调制深度和超过 1 GHz 的调制速度(图 4(c))。除了振幅调制, 近年来石墨基可调谐超构材料也被用于相位调制, 并展现出了不凡的调制效果。Iskandar Kholmanov 等人将单层石墨烯与包含纳米

级间隙的等离基元超构材料结合得到了相位可调谐的光学超构材料(图 4(d)), 超构材料将入射光集中到纳米间隙内, 显著增强了光与单层石墨烯之间的耦合。在不同电压的驱动下, 可对该超构材料的反射光相位进行调制, 调制范围可达 55° [76]。

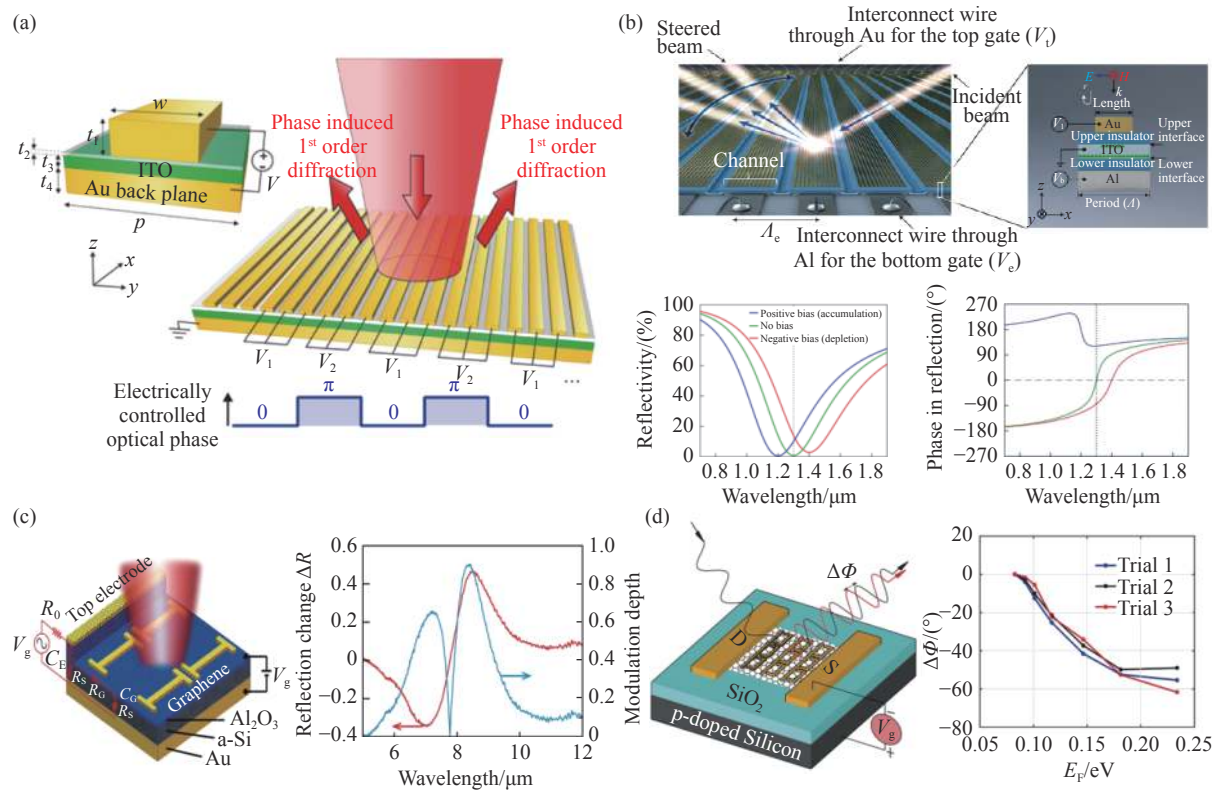


图 4 ITO 基和石墨基电驱动可调谐光学超构材料。(a) 电控 ITO 基相位可调谐超构材料示意图^[65]。(b) ITO 基相位和振幅解耦调谐的超构表面示意图(左上), 结构单元示意图(右上)及其电控可调谐的反射光谱(左下)和相位调制光谱(右下)^[68]。(c) 石墨基可调谐超构表面示意图(左)及栅极偏压相关的调制深度光谱(右)^[75]。(d) 基于单层石墨烯的相位可调谐超构材料示意图(左)及实验测得的不同石墨烯费米能级下超构材料的相位调制曲线(右)^[76]

Fig. 4 The electrically-driven tunable optical metamaterials based on ITO and graphene, respectively. (a) Schematic of an electrically-controlled ITO-based phase tunable metamaterials^[65]. (b) Schematic of a ITO-based tunable metasurface with decoupling modulation of phase and amplitude (top left), schematic of meta-atom (top right) and its electrically-controlled reflection spectra (bottom left) and phase shift spectra (bottom right)^[68]. (c) Schematic of a graphene-based tunable metasurface (left) and gate bias voltage related modulation depth spectra (right)^[75]. (d) Schematic of a phase-tunable metamaterial based on single-layer graphene (left) and the measured phase modulation curves of metamaterials at the different graphene Fermi levels (right)^[76]

3.3 光驱动可调谐光学超构材料

本节介绍的光驱动可调谐光学超构材料, 主要是利用泵浦激光诱导材料的光载流子变化, 引起材料的电导率改变, 从而实现调控电磁波的功能。研究人员发现在泵浦脉冲激光的照射下, 硅材料局部载流子会聚集, 从而使局部的电磁参数发生变化。基于硅材料的这一特性, 将其与超

构材料相结合构成硅基光驱动可调谐超构表面, 实现了 THz 波段透射振幅的调谐。Yalin Lu 等人通过在蓝宝石衬底上外延生长硅实现了可调谐超构材料(图 5(a)), 其在飞秒脉冲激发下电偶极子谐振位置的绝对透射率调制可达 38%, 且开启时间在 20 ps 内, 恢复时间仅为 300 ps, 展现出超快的调谐特性^[77]。此外, Weili Zhang 等人基于光活

性硅材料设计出一种光驱动的可调超构材料。在 1350 mW 泵浦光的激励下, 该超构材料在 0.74 THz 下的传输振幅从 85% 被调制为 43%, 实现了光控电磁透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 现象 (图 5(b))^[78]。

相比硅材料, III-V 型半导体不仅具有同样的光敏特性, 而且具有更快的调制速度^[79]。Maxim R. Shcherbakov 等人设计出一种 GaAs/AlGaAs 异质结构超构表面, 通过低泵浦通量 (<400 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$) 的激光, 实现了近红外区域 Mie 氏共振的调谐。如图 5(c) 所示, 实验结果显示磁共振模式发生了

30 nm 的蓝移, 反射率调制高达 35%, 恢复时间仅为 ~6 ps^[80]。Yuanmu Yang 等人利用铟掺杂氧化镉 (CdO:In) 材料, 在外延抛光的 MgO 衬底上制备出一种全光偏振开关器件 (图 5(d))。在亚带隙泵浦光照射下, CdO:In 材料的有效电子瞬间聚集, 使该器件的完美吸收峰发生红移, 从而导致该器件对 p 偏振光的绝对反射率从 1% 变为 86.3%, 与前面提到的器件相比, 该器件具有更快的调制速度, 可以在 800 fs 内打开和关闭^[81]。此外, 基于钙钛矿材料的光驱动可调谐光学超构材料也受到了关注和研究^[82-84]。

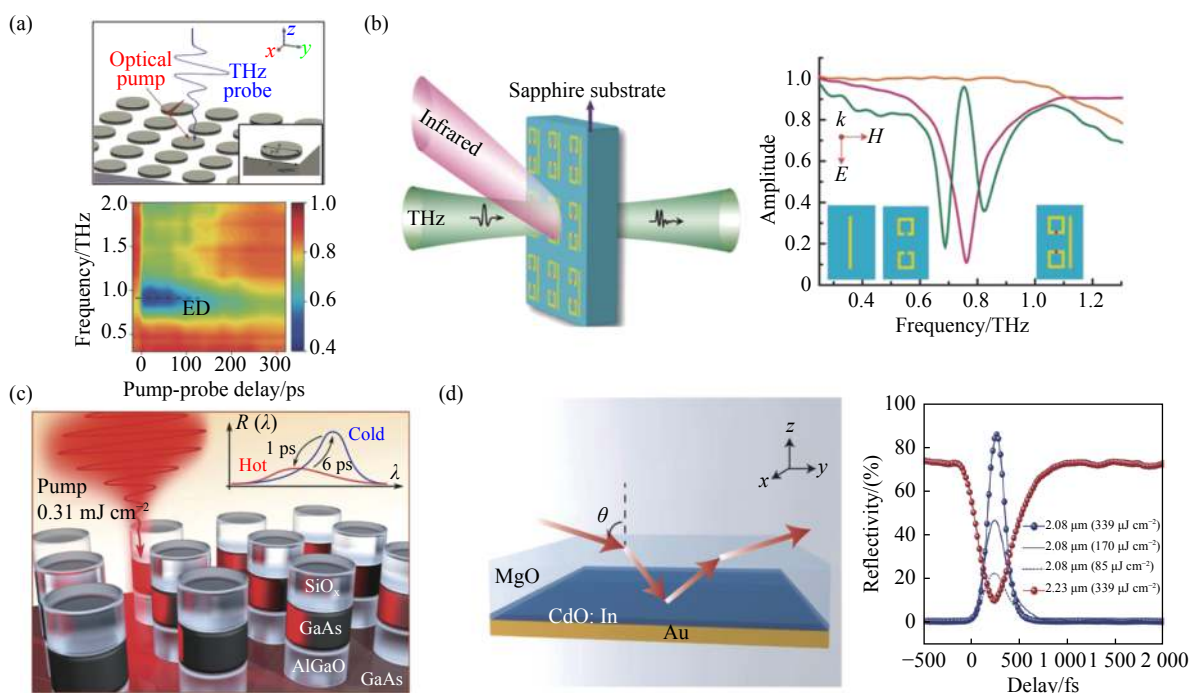


图 5 光驱动可调谐光学超构材料。(a) 硅基光控可调谐超构表面示意图(上)及其在不同延迟的飞秒激光激励下的透射调制响应(下)^[77]。(b) 光驱动硅基 EIT 可调谐超构材料示意图(左), 单线结构(粉红色)、双开口谐振环结构(橙色)和 EIT 超构材料(橄榄色)的透射振幅光谱^[78]。(c) 低泵浦光驱动的 GaAs 基可调谐超构表面示意图^[80]。(d) 基于 CdO:In 材料的全光偏振开关器件示意图(左)及其在亚带隙泵浦光照射下的 p 偏振光反射谱^[81]

Fig. 5 Light-driven tunable optical metamaterials. (a) Schematic of a tunable metasurface integrated with silicon elements (top) and the transmittance modulation response under femtosecond laser excitation with the different delay (bottom)^[77]. (b) Schematic of silicon-based EIT tunable metamaterials (left), the transmission spectra of cutting wire structure (pink), double-splitting resonance ring structure (orange) and EIT metamaterial (olive)^[78]. (c) Schematic of GaAs-based tunable metasurface pumped with a low light power^[80]. (d) Schematic of all-optical polarization switching device based on CdO:In material (left) and the reflection spectra of p -polarized light under sub-band gap pumping light irradiation^[81]

3.4 磁驱动可调谐光学超构材料

当线偏振光沿着磁场方向传播, 穿过磁光物质时, 光的偏振面会发生旋转, 该现象被称为法拉第磁光效应。利用这一效应, 在磁性物质上构造超构表面并施加不同的磁场, 可实现基于磁性物

质的磁驱动可调谐超构材料。

V. I. Belotelov 等人设计了一种金属-介质材料纳米结构, 实现了所谓的磁等离子体晶体, 在入射光激发耦合等离子体振荡和波导模式。面内的磁场变化会影响波导模式, 从而改变磁等离子体

晶体的透射光谱,对透射光强实现了高达 24% 的调制(图 6(a))^[85]。Fei Fan 等人提出了一种由金属和磁光材料混合构成的几何相位超构表面,实现了宽带半波片、光束偏转、贝塞尔光束和涡旋光产生等功能(图 6(b))^[86]。其中,在 THz 波段设计的宽带半波片的效率可高达 80%,并可通过改变外部磁场,控制其功能的开关。Lei Bi 等人利用 $\text{Ce}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 材料的低光损耗和强磁光效应的特点,将它作为介质层,设计出一种磁驱动的可调谐手性超构表面。通过改变施加磁场的大小和方向,不仅可以调控远场手性光谱的符号,还实现了高达 0.6 的光学手性场调制幅度,并且展示了其

磁场控制的手性成像功能^[87](图 6(c))。在磁驱动可调谐超构表面设计中,磁性物质除了以层膜形式起作用之外,还能以亚波长功能单元的形式存在。Irina Zubritskaya 等人直接将磁性物质镍加工成圆盘结构,设计出一种由激发手性的金纳米盘和提供法拉第磁光效应的镍纳米盘组成的超构材料,通过调控施加磁场的方向可实现手性透射光谱的调制(图 6(d))。并且他们认为,在可见光和近红外光谱范围内,该器件的电磁感应开关极限速度可达 10 GHz,同时能保持 100%~150% 的调制范围,可用于手性分子传感、光通信等领域^[88]。

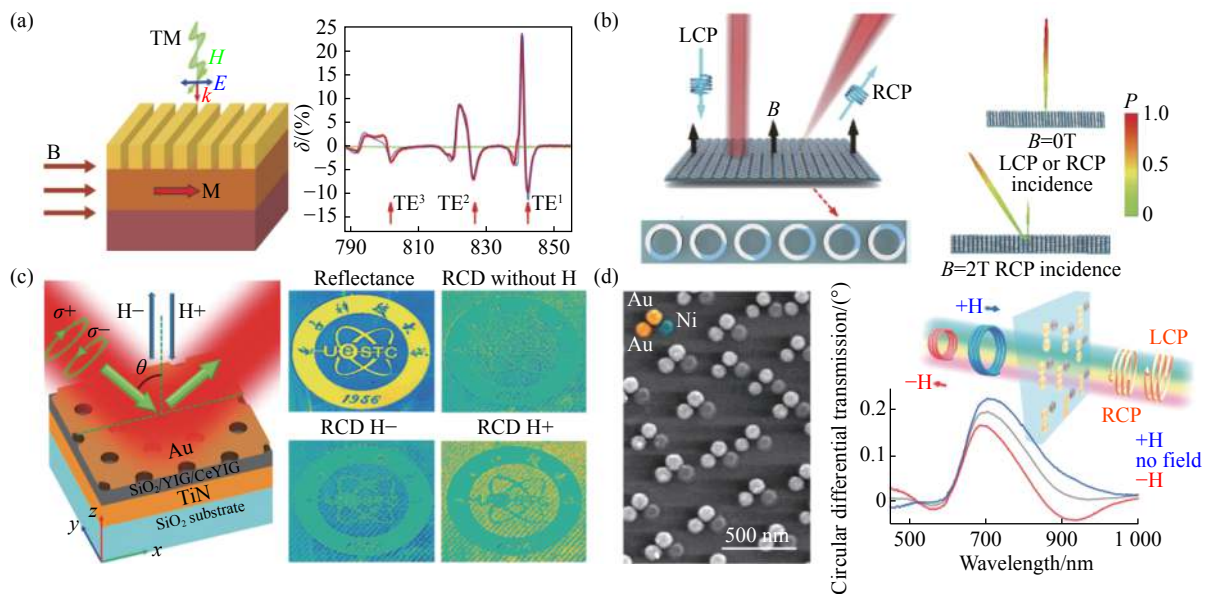


图 6 磁驱动可调谐光学超构材料。(a) 磁等离子超构材料示意图(左)及其在饱和磁场作用下,纵向磁光强度效应 δ 的频谱幅值谱线(右),蓝线为计算值,红线为实验值^[85]。(b) 由金属和磁光材料混合构成的光束偏转超构表面示意图(左)及其在不同强度磁场作用下的光束偏转情况(右)^[86]。(c) 以磁性物质 $\text{Ce}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 作为介质层的磁可调谐超构表面示意图(左)及其磁场可调手性成像效果(右)^[87]。(d) 以磁性物质镍作为圆盘结构的磁可调谐超构表面的扫描电子显微镜图像(左)及其在不同方向的磁场作用下的手性透射光谱(右)^[88]

Fig. 6 Magnetically-driven tunable optical metamaterials. (a) Schematic of the magnetic plasma metamaterial (left) and the spectra of longitudinal magneto-optical intensity effect δ with a saturated magnetic field (right), where simulated and measured spectra are shown in the blue and red curves, respectively^[85]. (b) Schematic of a beam deflection metasurface composed of a mixture of metal and magneto-optical materials (left) and its beam deflection under different magnetic (H-) fields intensity (right)^[86]. (c) Schematic of a magnetically tunable metasurface integrated with a magnetic material $\text{Ce}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ dielectric layer (left) and its H-field induced tunable chiral imaging effect (right)^[87]. (d) Scanning electron microscope image (left) of a magnetically tunable metasurface integrated with magnetic dielectric Ni disk and its chiral transmission spectra with the magnetic fields in different directions (right)^[88]

4 结构重构型可调谐光学超构材料

与基于切换材料特性的调谐方法不同,一些研究尝试通过改变超构材料微/纳米结构的排列、

形状和方向,使得超构材料局部场态和整个系统的电磁响应发生相应的变化,从而实现调谐超构材料电磁响应的功能。目前,此类结构重构型可调谐超构材料主要分为基于柔性可拉伸材料的可调谐超构材料和基于微机电系统的可调谐超构材

料两大类。

4.1 柔性可拉伸材料

如何实现超构表面的光学响应可调控性, 结构重构是一种相对简单的方法。近年来, 人们研究了柔性可伸缩衬底的尺寸敏感性和对外界刺激的可变性^[89-90]。以聚二甲基硅氧烷(PDMS)为代表的高弹性、无毒、低损耗的有机材料在可调的超构材料领域得到了广泛的应用^[90-94]。由柔性可伸缩衬底与亚波长结构单元组成的结构重构型可调谐超构材料, 其可调性主要体现在结构阵列周期的变化。Xiangang Luo 等人利用 PDMS 柔性衬底制作了一种可调控的超构表面结构色, 通过对 PDMS 进行不同程度的拉伸引起结构周期的变化, 从而实现绿色到紫红色的颜色变化(图 7(a))^[95]。

从整个 PDMS 基板样品的角度来看, 拉伸过程中产生的总变形的精确方向不一定是沿着拉力的方向, 这使得可拉伸器件的亚波长功能单元具有各向异性, 从而导致其光学性能具有较强的偏振敏感性。针对这一难题, Shumin Xiao 等人为了实现偏振不敏感的可拉伸光学器件, 将 TiO_2 超构表面与 PDMS 结合, 充分利用 TiO_2 超构表面同时支持磁偶极共振和电偶极共振的特性, 在平行和垂直于应变的方向上引入两种不同的共振机制, 成功研制出一种偏振不敏感的可拉伸的变色超构表面(图 7(b))^[96], 并实验展示了其在彩色动态显示方面的应用潜力。

在近红外波段, 拉伸可调谐超构表面的振幅调制同样备受关注^[97]。

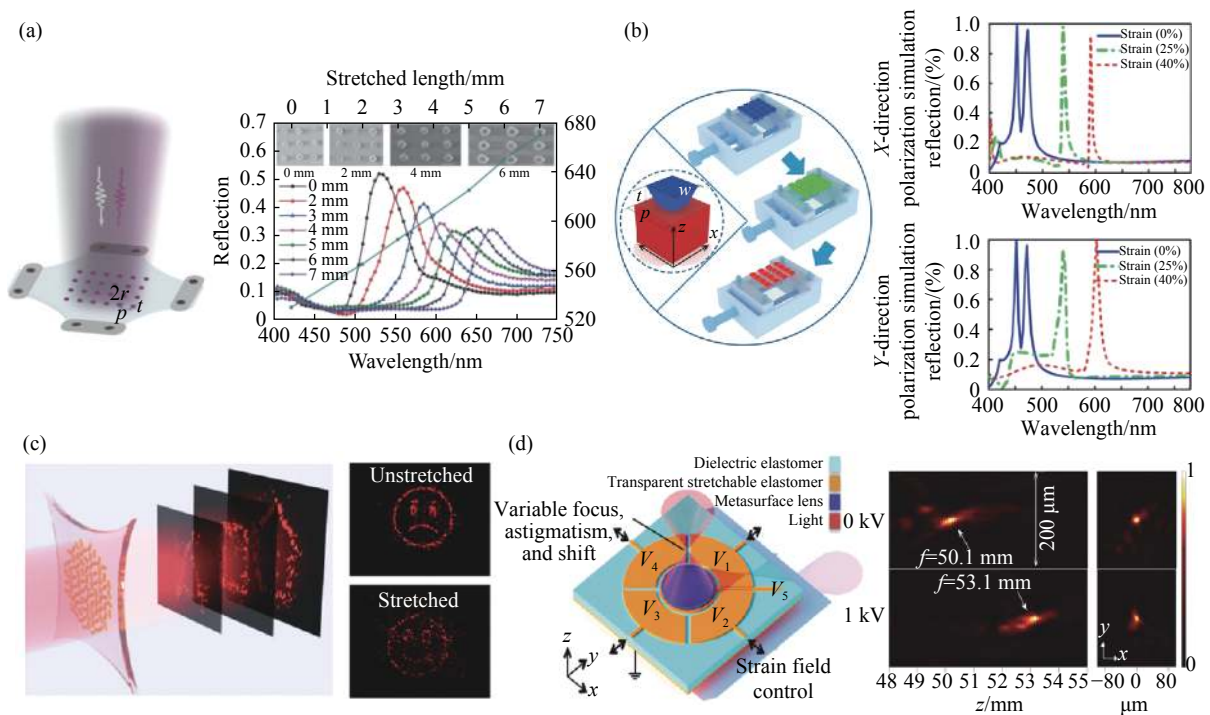


图 7 拉伸可调谐光学超构材料。(a) 基于 PDMS 基板的动态调谐结构示意图(左)以及超构材料在不同拉伸长度下的反射光谱(右)^[95]。(b) 可拉伸 TiO_2 超构表面的示意图(左)及其在不同偏振状态下不同应变的反射光谱(右)^[96]。(c) 可拉伸基材上的超构表面全息图(左), 在拉力作用下, 该全息图从“皱着眉头”变为“笑脸”(右)^[93]。(d) 电控可调谐超构透镜的示意图(左), 1 kV 电压驱动下, 超构透镜的焦距从 50.1 mm 变为 53.1 mm(中)以及两个条件下焦点处的光场强度分布(右)^[104]

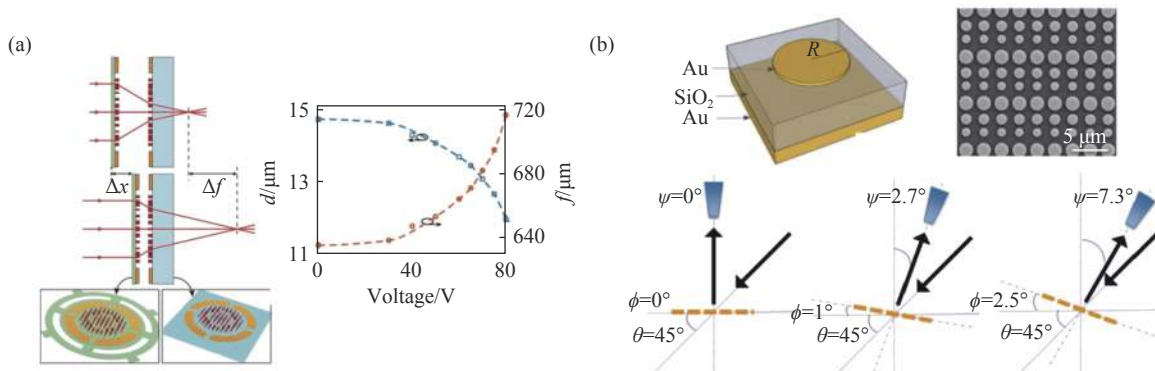
Fig. 7 Stretching tunable optical metamaterials. (a) Schematic of a dynamically tunable structure based on PDMS substrate (left) and reflection spectra of metamaterials under the different stretchable lengths (right)^[95]. (b) Schematic of a stretchable TiO_2 metasurface (left) and its reflection spectra of the different strains in the different polarization states (right)^[96]. (c) Metasurface hologram on a stretchable substrate (left). Under the action of tension, the hologram changes from "frowning" to "smiling face" (right)^[93]. (d) Schematic diagram of an electrically-controlled tunable metalens (left), the focal length changes from 50.1 mm to 53.1 mm (middle) under 1 kV voltage drive, and the light field intensity distributions at the focal point with two conditions (right)^[104]

Cherie R. Kagan 课题组制作出金等离子晶格光栅, 实验显示每 1% 的应变就能引入 48 nm 的表面晶格共振峰位的位移^[98]。此外, Harry A. Atwater 等人在 PDMS 衬底上设计了一种基于金开口环结构的超构表面, 在中红外波段实现了高达 400 nm 的反射峰调谐范围^[99]。针对不同的应用场景, 可以在 PDMS 柔性衬底上制备各种形状的功能单元^[98, 100]。基于可拉伸基材实现的可调谐超构表面全息图是另一项备受关注的工作。通过拉伸柔性衬底以改变超构表面结构的相对位置, 进而改变相位的不连续性, 实现对光波前的重构。如图 7(c) 所示, 通过将柔性基板拉伸 130%, 全息图可由“皱着眉头”变为“笑脸”^[93]。但是, 与原始表面相比, 获得的“笑脸”在细节上模糊不清, 这可能是由于基板上的制造缺陷、图形单元的尺寸不均匀变形、较低的传输效率或相互干扰等因素引起的。因此, 为实现高效、彩色和稳定的可调谐全息图仍有许多工作亟需完成^[101-102]。拉伸可调谐的光学超构表面也为实现可调谐的超构透镜提供了有效的方法^[103]。Federico Capasso 等人将 5 个可拉伸碳纳米管电极、超构透镜以及聚丙烯酸酯弹性致动器基板组合, 通过 5 个可寻址电极调制出不同的拉伸组合来实现超构表面电调制, 重建了出射光的波前, 以达到电控超构透镜焦距和像散的目的^[104](图 7(d))。该设备中可拉伸电极的响应时间可达到 (33 ± 3) ms。若采用更好的弹性体材料或进一步优化制造工艺, 基于柔性可拉伸材料的可调谐超构表面有望获得更快的调制速度^[105-106]。

4.2 微机电系统 (MEMS)

微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)是一种单元尺寸在微米甚至纳米量级的

智能控制系统。多个超构表面以垂直集成的方式相互作用, 辅以 MEMS 作为执行器对每个超构表面进行操控, 可以扩大调制范围。Andrei Faraon 等人设计出一种基于 MEMS 系统的可调谐超构透镜。如图 8(a) 所示, 该设计由两个超构透镜组成, 一个固定在玻璃基板上, 另一个可移动的超构透镜制作在 SiN_x 薄膜上。由 MEMS 电力驱动可移动超构透镜, 以控制两个超构透镜之间的距离, 实现透镜的有效焦距从 565 到 629 μm 可调^[18]。除了位置自由度之外^[107], MEMS 平台还可为超构表面引入角度变化的自由度。Tapashree Roy 等人将超构透镜和二维扫描的 MEMS 系统集成在一起, 由 MEMS 平台沿着两个正交方向控制透镜的角度, 实现对聚焦光的动态控制(图 8(b))^[108]。将 MEMS 平台与柔性衬底相结合, 通过操纵单元结构的几何形状, 可以得到动态可控超构表面^[109-113]。Jeremy B. Reeves 等人将 MEMS 与柔性可变性的机械脚手架相结合, 通过施加单方向的力来调节单元结构之间的距离, 从而调控超构表面的反射光谱, 当外加力减小时, 超构表面在长波范围内的共振峰将发生红移(图 8(c))^[114]。MEMS 平台还可将静电力用于操纵超构表面结构的形变。Xin Zhang 等人设计了一种基于机电驱动的微悬臂阵列结构的可调太赫兹超构表面四分之一波片^[115]。他们制备了 1 μm 宽的悬臂并将其作为功能单元和机电致动器。通过在悬臂和基板之间施加电压, 感应静电力将拉低悬臂的自由端, 从而实现阵列结构的可控(图 8(d)), 实时调节透射光的偏振态。此外, 该技术与 CMOS 工艺兼容, 不仅能丰富太赫兹光学元件库, 还能促进太赫兹波段的实际应用。



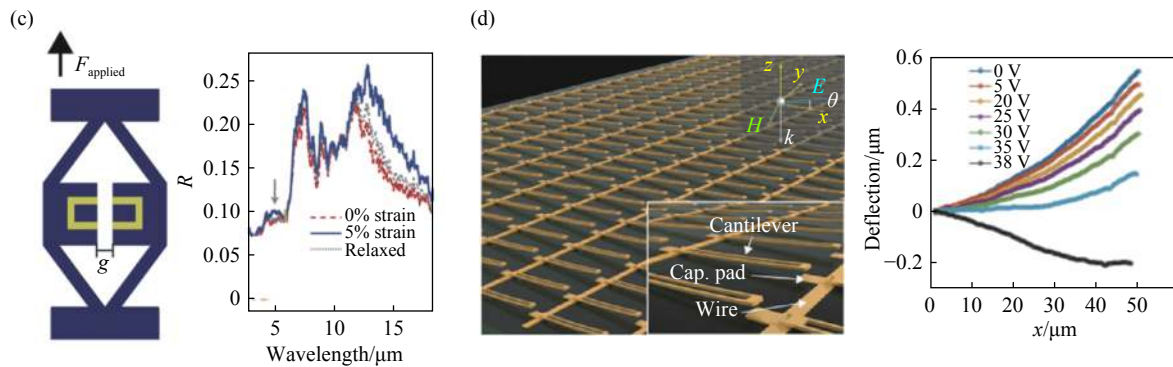


图 8 结构重构型可调谐光学超构材料。(a) MEMS 可调超构透镜的示意图(左);实验测得的前焦距 f 和两个超构透镜之间距离 d 随施加的直流电压变化曲线(右)^[18]。(b) 超构表面透镜单元结构示意图(左上),超构透镜样品的扫描电子显微镜图像(右上)及其调制机制(下)^[108]。(c) 基于柔性聚合物支架的可拉伸电磁超构材料示意图(左),不同外力拉伸下超构表面的反射光谱(右)^[114]。(d) 由悬臂、电容垫和互连线组成的 THz 可调谐超构材料示意图(左)和不同电压下悬臂曲率偏转曲线(右)^[115]

Fig. 8 Reconfigurably tunable optical metamaterials. (a) Schematic of a MEMS tunable metalens (left); measured front focal length f and the distance d between two metalenses varying with external DC voltage (right)^[18]. (b) Schematic of the meta-atom (top left), a scanning electron microscope image (top right) and the modulation mechanism (bottom) of the metalens^[108]. (c) Schematic of a stretchable electromagnetic metamaterial based on a flexible polymer stent (left), and the reflection spectra of a metasurface under the different external forces (right)^[114]. (d) Schematic of a tunable THz metamaterial composed of a cantilever, a capacitor pad and an interconnection line (left) and the deflection curve of the cantilever curvature under different voltages (right)^[115]

5 总结与展望

本文主要综述了可调谐光学超构材料的最新研究进展,重点介绍了可调谐光学超构材料的调制机制和控制方法。通过附加外场与控制系统得到的可调谐光学超构材料,实现了独特的光学响应和信息的实时调制。基于相变材料、二氧化钒、半导体和石墨烯等活性材料的可调谐超构表面最高可以实现 GHz 的调制频率,已应用于全息成像、结构彩色等领域。然而,目前可调谐超构材料的光学效率较低,主要是由于多数动态超构表面器件都是基于金属超构表面和可调元素相集成的复合型超构表面,金属材料本身的光学损耗限制了金属复合型动态超构表面的调控效率。再加上可调元素苛刻的驱动条件进一步限制了其广泛应用。TiN 等低损耗类等离子材料^[116]以及新型活性材料的研发,将会为解决目前可调谐超构材料损耗大、驱动难的问题,提供新的方法。除了利用外部刺激改变活性材料光学特性外,利用结构重构引起的尺寸变化也是实现可调超构表面的有效方法,实现形状和尺寸变化的方法通常包括机械变形(例如,柔性可拉伸材料)、MEMS^[117]

等。然而,合适的开关电源的合成难度大,而且 MEMS 工艺复杂、成本高,这些都是目前亟待解决的问题。3D 打印等加工制造技术的稳步发展使得在微米尺度甚至纳米尺度上创建具有特征尺寸的复杂结构成为可能,有望简化超构材料的加工工艺,降低加工成本,为可调谐超构材料的进一步发展提供契机^[118]。

不同调制机制和活性材料适用于不同波段:在微波波段一般采用电控二极管来实现可调控器件,由于微波波长较长,对应器件尺寸相对较大,外加较为成熟的电路印刷技术,实现集成二极管的微波调控器件较为容易;在太赫兹到光学波段,一般采用热、电、光、磁和机械等激励相变材料、二维材料、半导体材料和可形变材料实现超构材料动态调控。从实验上实现高频波段的动态可调谐超构材料较为困难,主要由于高频波段超构材料中的超构原子周期一般在百微米(可见光波段在纳米)量级,对每一个超构原子进行独立控制,就需要有非常精密的加工以及控制手段才能够实现,技术难度较大。因此需要更多的探索和努力来继续推进该方向的发展。

实现超原子独立灵活调控是可调谐超构材料未来研究的主要目标之一。对超构原子进行独立

控制,才是真正意义上的动态可重构超构材料,这可以丰富每一个动态超构材料器件的功能。同时,基于同一超构材料,通过采用不同的调控方案,重构出多种功能器件,能节省很大一部分器件制备成本。另外,通过超原子独立调控可以对超构材料进行编程,并将其直接应用到实时成像和无线通信中。虽然已经有一部分相关的工作^[119],但是包括器件加工手段,功能扩展,性能优化和实际应用等多个方面仍面临着巨大的困难和挑战,需要进一步开展大量研究工作。

目前可调谐超构材料主要通过人为控制切换有源器件或利用 FPGA 发送指令的方法实现功能可调,主要采用开环的控制系统,不包含用于建立可自动决策的闭环系统所需的传感和反馈组件,不具有智能调控能力。未来,随着人工智能技术的发展,如果将可调谐超构材料与感应反馈系统、机器学习算法相结合,形成具有自动决策能力的智能可调谐超构材料,超构材料将有望在视觉成像、信息处理等各个领域取得重要应用。

参考文献:

- [1] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, *et al.*. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(25): 4773-4776.
- [2] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [3] FANG N, LEE H, SUN CH, *et al.*. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [4] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, *et al.*. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [5] LIU R, JI C, MOCK J J, *et al.*. Broadband ground-plane cloak[J]. *Science*, 2009, 323(5912): 366-369.
- [6] MA H F, CUI T J. Three-dimensional broadband ground-plane cloak made of metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2010, 1(3): 21.
- [7] ERGIN T, STENGER N, BRENNER P, *et al.*. Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths[J]. *Science*, 2010, 328(5976): 337-339.
- [8] CUI T J, LI L L, LIU SH, *et al.*. Information metamaterial systems[J]. *iScience*, 2020, 23(8): 101403.
- [9] ZHELUDDEV N I, KIVSHAR Y S. From metamaterials to metadevices[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 917-924.
- [10] REN ZH H, CHANG Y H, MA Y M, *et al.*. Leveraging of MEMS technologies for optical metamaterials applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(3): 1900653.
- [11] CHEN H T, TAYLOR A J, YU N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, 79(7): 076401.
- [12] HE Q, SUN SH L, ZHOU L. Tunable/reconfigurable metasurfaces: physics and applications[J]. *Research*, 2019, 2019: 1849272.
- [13] CHE Y H, WANG X T, SONG Q H, *et al.*. Tunable optical metasurfaces enabled by multiple modulation mechanisms[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(15): 4407-4431.
- [14] CUI T, BAI B F, SUN H B. Tunable metasurfaces based on active materials[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(10): 1806692.
- [15] CHANG Y H, WEI J X, LEE C. Metamaterials-from fundamentals and MEMS tuning mechanisms to applications[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3049-3070.
- [16] MENG K, PARK S J, LI L H, *et al.*. Tunable broadband terahertz polarizer using graphene-metal hybrid metasurface[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33768-33778.
- [17] ZHANG J, WEI X ZH, RUKHLENKO I D, *et al.*. Electrically tunable metasurface with independent frequency and amplitude modulations[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(1): 265-271.
- [18] ARBABI E, ARBABI A, KAMALI S M, *et al.*. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 812.
- [19] LIU X B, WANG Q, ZHANG X Q, *et al.*. Thermally dependent dynamic meta - holography using a vanadium dioxide integrated metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(12): 1900175.
- [20] KIM Y, WU P C, SOKHOYAN R, *et al.*. Phase modulation with electrically tunable vanadium dioxide phase-change

- metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(6): 3961-3968.
- [21] LEI D Y, APPAVOO K, LIGMAJER F, *et al.*. Optically-triggered nanoscale memory effect in a hybrid plasmonic-phase changing nanostructure[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(9): 1306-1313.
- [22] HAIL C U, MICHEL A K U, POULIKAKOS D, *et al.*. Optical metasurfaces: evolving from passive to adaptive[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(14): 1801786.
- [23] ZHONG M. A multi-band metamaterial absorber based on VO₂ layer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 139: 106930.
- [24] KATS M A, SHARMA D, LIN J, *et al.*. Ultra-thin perfect absorber employing a tunable phase change material[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(22): 221101.
- [25] SHU F ZH, YU F F, PENG R W, *et al.*. Dynamic plasmonic color generation based on phase transition of vanadium dioxide[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(7): 1700939.
- [26] HASHEMI M R M, YANG SH H, WANG T Y, *et al.*. Electronically-controlled beam-steering through vanadium dioxide metasurfaces[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35439.
- [27] ZHU M, COJOCARU - MIRÉDIN O, MIO A M, *et al.*. Unique bond breaking in crystalline phase change materials and the quest for metavalent bonding[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(18): 1706735.
- [28] DING F, YANG Y Q, BOZHEVOLNYI S I. Dynamic metasurfaces using phase - change chalcogenides[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(14): 1801709.
- [29] JEONG Y G, BAHK Y M, KIM D S. Dynamic terahertz plasmonics enabled by phase-change materials[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(3): 1900548.
- [30] WUTTIG M, YAMADA N. Phase-change materials for rewriteable data storage[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(11): 824-832.
- [31] CAO T, WANG R Z, SIMPSON R E, *et al.*. Photonic Ge-Sb-Te phase change metamaterials and their applications[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 74: 100299.
- [32] CAO T, ZHANG L, SIMPSON R E, *et al.*. Mid-infrared tunable polarization-independent perfect absorber using a phase-changing metamaterial[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(6): 1580-1585.
- [33] GHOLIPOUR B, ZHANG J F, MACDONALD K F, *et al.*. An all-optical, non-volatile, bidirectional, phase-change meta-switch[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(22): 3050-3054.
- [34] TITTL A, MICHEL A K U, SCHÄFERLING M, *et al.*. A switchable mid-infrared plasmonic perfect absorber with multispectral thermal imaging capability[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(31): 4597-4603.
- [35] QU Y R, LI Q, DU K K, *et al.*. Dynamic thermal emission control based on ultrathin plasmonic metamaterials including phase-changing material GST[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(5): 1700091.
- [36] BEHERA J K, LIU K, LIAN M, *et al.*. A reconfigurable hyperbolic metamaterial perfect absorber[J]. *Nanoscale Advances*, 2021, 3(6): 1758-1766.
- [37] CAO T, LIU K, LU L, *et al.*. Large-area broadband near-perfect absorption from a thin chalcogenide film coupled to gold nanoparticles[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(5): 5176-5182.
- [38] JULIAN M N, WILLIAMS C, BORG S, *et al.*. Reversible optical tuning of GeSbTe phase-change metasurface spectral filters for mid-wave infrared imaging[J]. *Optica*, 2020, 7(7): 746-754.
- [39] DE GALARRETA C R, SINEV I, ALEXEEV A M, *et al.*. Reconfigurable multilevel control of hybrid all-dielectric phase-change metasurfaces[J]. *Optica*, 2020, 7(5): 476-484.
- [40] WANG Y F, LANDREMAN P, SCHOEN D, *et al.*. Electrical tuning of phase-change antennas and metasurfaces[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021. doi: [10.1038/s41565-021-00882-8](https://doi.org/10.1038/s41565-021-00882-8).
- [41] ZHANG Y F, FOWLER C, LIANG J H, *et al.*. Electrically reconfigurable non-volatile metasurface using low-loss optical phase-change material[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021. doi: [10.1038/s41565-021-00881-9](https://doi.org/10.1038/s41565-021-00881-9).
- [42] HOSSEINI P, WRIGHT C D, BHASKARAN H. An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films[J]. *Nature*, 2014, 511(7508): 206-211.
- [43] YOO S, GWON T, EOM T, *et al.*. Multicolor changeable optical coating by adopting multiple layers of ultrathin phase change material film[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(7): 1265-1270.
- [44] DE GALARRETA C R, ALEXEEV A M, AU Y Y, *et al.*. Nonvolatile reconfigurable phase - change metadevices for beam steering in the near infrared[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(10): 1704993.

- [45] BAI W, YANG P, HUANG J, *et al.*. Near-infrared tunable metalens based on phase change material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 5368.
- [46] STAUDE I, SCHILLING J. Metamaterial-inspired silicon nanophotonics[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(5): 274-284.
- [47] HORIE Y, ARBABI A, ARBABI E, *et al.*. High-speed, phase-dominant spatial light modulation with silicon-based active resonant antennas[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1711-1717.
- [48] RAHMANI M, XU L, MIROSHNICHENKO A E, *et al.*. Reversible thermal tuning of all-dielectric metasurfaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(31): 1700580.
- [49] NGUYEN Q M, ANTHONY T K, ZAGHLOUL A I. Free-Space-Impedance-Matched composite dielectric metamaterial with high refractive index[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(12): 2751-2755.
- [50] CHEN X, FAN W H. Tunable bound states in the continuum in all-dielectric terahertz metasurfaces[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(4): 623.
- [51] ZHONG M, JIANG X T, ZHU X L, *et al.*. Design and fabrication of a single metal layer tunable metamaterial absorber in THz range[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 125: 106023.
- [52] MA Z, MENG X, LIU X, *et al.*. Liquid crystal enabled dynamic nanodevices[J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(11): 871.
- [53] SI G Y, ZHAO Y H, LEONG E S P, *et al.*. Liquid-crystal-enabled active plasmonics: a review[J]. *Materials*, 2014, 7(2): 1296-1317.
- [54] KOMAR A, FANG ZH, BOHN J, *et al.*. Electrically tunable all-dielectric optical metasurfaces based on liquid crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(7): 071109.
- [55] ATORF B, MÜHLENBERND H, MULRARISNUR M, *et al.*. Electro-optic tuning of split ring resonators embedded in a liquid crystal[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1129-1132.
- [56] LI SH Q, XU X W, VEETIL R M, *et al.*. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface[J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [57] SHARMA M, HENDLER N, ELLENBOGEN T. Electrically switchable color tags based on active liquid - crystal plasmonic metasurface platform[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(7): 1901182.
- [58] FRANKLIN D, FRANK R, WU S T, *et al.*. Actively addressed single pixel full-colour plasmonic display[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15209.
- [59] AMER A A G, SAPUAN S Z, NASIMUDDIN N, *et al.*. A comprehensive review of metasurface structures suitable for RF energy harvesting[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 76433-76452.
- [60] XU W R, SONKUSALE S. Microwave diode switchable metamaterial reflector/absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(3): 031902.
- [61] ZHANG L, CHEN X Q, LIU SH, *et al.*. Space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4334.
- [62] 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.
- [63] LI L L, SHUANG Y, MA Q, *et al.*. Intelligent metasurface imager and recognizer[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 97.
- [64] LI L L, CUI T J, JI W, *et al.*. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 197.
- [65] HUANG Y W, LEE H W H, SOKHOYAN R, *et al.*. Gate-tunable conducting oxide metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(9): 5319-5325.
- [66] SHIRMANESH G K, SOKHOYAN R, PALA R A, *et al.*. Dual-gated active metasurface at 1550 nm with wide (> 300°) phase tunability[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2957-2963.
- [67] FOROUZMAND A, SALARY M M, INAMPUDI S, *et al.*. A tunable multigate indium-tin-oxide-assisted all-dielectric metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(7): 1701275.
- [68] PARK J, JEONG B G, KIM S I, *et al.*. All-solid-state spatial light modulator with independent phase and amplitude control for three-dimensional LiDAR applications[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(1): 69-76.
- [69] WANG F, ZHANG Y B, TIAN CH SH, *et al.*. Gate-variable optical transitions in graphene[J]. *Science*, 2008, 320(5873): 206-209.

- [70] LI Z Q, HENRIKSEN E A, JIANG Z, *et al.*. Dirac charge dynamics in graphene by infrared spectroscopy[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(7): 532-535.
- [71] YAO Y, SHANKAR R, KATS M A, *et al.*. Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(11): 6526-6532.
- [72] BONACCORSO F, SUN Z, HASAN T, *et al.*. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(9): 611-622.
- [73] SHERROTT M C, HON P W C, FOUNTAINE K T, *et al.*. Experimental demonstration of $> 230^\circ$ phase modulation in gate-tunable graphene-gold reconfigurable mid-infrared metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(5): 3027-3034.
- [74] FAN K B, SUEN J, WU X Y, *et al.*. Graphene metamaterial modulator for free-space thermal radiation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25189-25201.
- [75] ZENG B B, HUANG ZH Q, SINGH A, *et al.*. Hybrid graphene metasurfaces for high-speed mid-infrared light modulation and single-pixel imaging[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 51.
- [76] DABIDIAN N, DUTTA-GUPTA S, KHOLMANOV I, *et al.*. Experimental demonstration of phase modulation and motion sensing using graphene-integrated metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(6): 3607-3615.
- [77] CAI H L, HUANG Q P, HU X, *et al.*. All-optical and ultrafast tuning of terahertz plasmonic metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(14): 1800143.
- [78] GU J Q, SINGH R, LIU X J, *et al.*. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1151.
- [79] YANG Y M, KAMARAJU N, CAMPIONE S, *et al.*. Transient GaAs plasmonic metasurfaces at terahertz frequencies[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(1): 15-21.
- [80] SHCHERBAKOV M R, LIU SH, ZUBYUK V V, *et al.*. Ultrafast all-optical tuning of direct-gap semiconductor metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 17.
- [81] YANG Y M, KELLEY K, SACHET E, *et al.*. Femtosecond optical polarization switching using a cadmium oxide-based perfect absorber[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(6): 390-395.
- [82] CHANANA A, LIU X J, ZHANG CH, *et al.*. Ultrafast frequency-agile terahertz devices using methylammonium lead halide perovskites[J]. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaar7353.
- [83] MANJAPPA M, SRIVASTAVA Y K, SOLANKI A, *et al.*. Hybrid lead halide perovskites for ultrasensitive photoactive switching in terahertz metamaterial devices[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(32): 1605881.
- [84] KUMAR A, SOLANKI A, MANJAPPA M, *et al.*. Excitons in 2D perovskites for ultrafast terahertz photonic devices[J]. *Science Advances*, 2020, 6(8): eaax8821.
- [85] BELOTELOV V I, KREILKAMP L E, AKIMOV I A, *et al.*. Plasmon-mediated magneto-optical transparency[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2128.
- [86] TAN ZH Y, FAN F, LI T F, *et al.*. Magnetically active terahertz wavefront control and superchiral field in a magneto-optical Pancharatnam-Berry metasurface[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2037-2048.
- [87] QIN J, DENG L J, KANG T T, *et al.*. Switching the optical chirality in magnetoplasmonic metasurfaces using applied magnetic fields[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 2808-2816.
- [88] ZUBRITSKAYA I, MACCAFERRI N, EZEIZA X I, *et al.*. Magnetic control of the chiroptical plasmonic surfaces[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(1): 302-307.
- [89] GUTRUF P, ZOU CH J, WITHAYACHUMNANKUL W, *et al.*. Mechanically tunable dielectric resonator metasurfaces at visible frequencies[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(1): 133-141.
- [90] TSENG M L, YANG J, SEMMLINGER M, *et al.*. Two-dimensional active tuning of an aluminum plasmonic array for full-spectrum response[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6034-6039.
- [91] YOO D, JOHNSON T W, CHERUKULAPPURATH S, *et al.*. Template-stripped tunable plasmonic devices on stretchable and rollable substrates[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(11): 10647-10654.
- [92] MORITS D, MORITS M, OVCHINNIKOV V, *et al.*. Multifunctional stretchable metasurface for the THz range[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(3): 032001.
- [93] MALEK S C, EE H S, AGARWAL R. Strain multiplexed metasurface holograms on a stretchable substrate[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(6): 3641-3645.
- [94] KAMALI S M, ARBABI A, ARBABI E, *et al.*. Decoupling optical function and geometrical form using conformal

- flexible dielectric metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11618.
- [95] SONG SH CH, MA X L, PU M B, *et al.*. Actively tunable structural color rendering with tensile substrate[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(9): 1600829.
- [96] ZHANG CH, JING J X, WU Y K, *et al.*. Stretchable all-dielectric metasurfaces with polarization-insensitive and full-spectrum response[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(2): 1418-1426.
- [97] HUANG F M, BAUMBERG J J. Actively tuned plasmons on elastomerically driven Au nanoparticle dimers[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(5): 1787-1792.
- [98] CHEN W X, LIU W J, JIANG Y J, *et al.*. Ultrasensitive, mechanically responsive optical metasurfaces via strain amplification[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(11): 10683-10692.
- [99] PRYCE I M, AYDIN K, KELAITA Y A, *et al.*. Highly strained compliant optical metamaterials with large frequency tunability[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(10): 4222-4227.
- [100] LIU X, HUANG ZH, ZHU CH K, *et al.*. Out-of-plane designed soft metasurface for tunable surface plasmon polariton[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(2): 1435-1441.
- [101] GAO Y SH, FAN Y B, WANG Y J, *et al.*. Nonlinear holographic all-dielectric metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 8054-8061.
- [102] WAN W W, GAO J, YANG X D. Metasurface holograms for holographic imaging[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(21): 1700541.
- [103] KAMALI S M, ARBABI E, ARBABI A, *et al.*. Highly tunable elastic dielectric metasurface lenses[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 1002-1008.
- [104] SHE A L, ZHANG SH Y, SHIAN S, *et al.*. Adaptive metalenses with simultaneous electrical control of focal length, astigmatism, and shift[J]. *Science Advances*, 2018, 4(2): eaap9957.
- [105] OPRIS D M. Polar elastomers as novel materials for electromechanical actuator applications[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(5): 1703678.
- [106] SKOV A L, YU L Y. Optimization techniques for improving the performance of silicone - based dielectric elastomers[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(5): 1700762.
- [107] SHAH S I H, SARKAR A, PHON R, *et al.*. Two - dimensional electromechanically transformable metasurface with beam scanning capability using four independently controllable shape memory alloy axes[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(22): 2001180.
- [108] ROY T, ZHANG SH Y, JUNG I W, *et al.*. Dynamic metasurface lens based on MEMS technology[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(2): 021302.
- [109] LIU X L, PADILLA W J. Dynamic manipulation of infrared radiation with MEMS metamaterials[J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(8): 559-562.
- [110] FU Y H, LIU A Q, ZHU W M, *et al.*. A micromachined reconfigurable metamaterial via reconfiguration of asymmetric split - ring resonators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(18): 3589-3594.
- [111] HU F R, QIAN Y X, LI ZH, *et al.*. Design of a tunable terahertz narrowband metamaterial absorber based on an electrostatically actuated MEMS cantilever and split ring resonator array[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(5): 055101.
- [112] KAN T, ISOZAKI A, KANDA N, *et al.*. Enantiomeric switching of chiral metamaterial for terahertz polarization modulation employing vertically deformable MEMS spirals[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8422.
- [113] ZHU W M, LIU A Q, ZHANG X M, *et al.*. Switchable magnetic metamaterials using micromachining processes[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(15): 1792-1796.
- [114] REEVES J B, JAYNE R K, STARK T J, *et al.*. Tunable infrared metasurface on a soft polymer scaffold[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2802-2806.
- [115] ZHAO X G, SCHALCH J, ZHANG J D, *et al.*. Electromechanically tunable metasurface transmission waveplate at terahertz frequencies[J]. *Optica*, 2018, 5(3): 303-310.
- [116] NAIK G V, SCHROEDER J L, NI X J, *et al.*. Titanium nitride as a plasmonic material for visible and near-infrared wavelengths[J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(4): 478-489.
- [117] BANG S, KIM J, YOON G, *et al.*. Recent advances in tunable and reconfigurable metamaterials[J]. *Micromachines*, 2018, 9(11): 560.
- [118] KANG L, JENKINS R P, WERNER D H. Recent progress in active optical metasurfaces[J]. *Advanced Optical*

Materials, 2019, 7(14): 1801813.

- [119] ZHANG X G, JIANG W X, JIANG H L, *et al.*. An optically driven digital metasurface for programming electromagnetic functions[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(3): 165-171.

作者简介:



曹 瞰(1979—),男,辽宁大连人,大连理工大学光电工程与仪器科学学院教授,博士生导师。获大连理工大学电子系学士学位,英国 University of Bristol 电子系博士学位。曾于英国 City University London、韩国 Yonsei University 任博士后、研究助理教授。主要研究领域:超构材料、光子晶体、光电子器件。在包括 *Physical Review Letters*、*Advanced Materials*、*Nano Energy*、*Nano Letters*、*Research*、*Light-Science & Applications*、*Advanced Photonics* 等期刊发表研究论文 80 余篇。E-mail: caotun1806@dlut.edu.cn



李贵新(1981—),男,山东莱芜人,南方科技大学材料科学与工程系教授、量子科学与工程研究院研究员。1999–2006 年毕业于北京师范大学物理系获学士、硕士学位,2009 年于香港浸会大学物理系取得博士学位。曾于香港浸会大学、伦敦帝国理工学院、英国伯明翰大学、德国帕德博恩大学等研究机构任博士后、研究助理教授等职。主要研究领域:非线性光学超构表面、超构材料、几何相位。以第一和通讯作者身份在包括《自然-光子学》、《自然-物理学》、《自然-材料学》、《自然综述-材料学》、《自然-纳米技术》等期刊发表研究论文约 80 余篇。2019 年求是杰出青年学者奖获得者,中国材料研究学会超材料分会常务理事。E-mail: ligx@sustech.edu.cn