

## 光控电磁超材料研究进展

柏 林 张信歌 蒋卫祥\* 崔铁军\*

(东南大学信息科学与工程学院毫米波国家重点实验室 南京 210096)

**摘 要:** 电磁超材料是由亚波长尺寸单元周期或非周期排列组成的人工结构, 能对电磁波的频率、幅度、相位和极化等基本物理特征进行调控, 突破了传统材料的限制, 可实现很多自然界不存在的有趣物理现象及应用。过去二十余年, 超材料因其强大的电磁调控能力一直是物理领域的研究热点。但无源超材料在电磁波调控中存在局限性, 如工作频率固定、实现功能单一等。所以, 可调有源超材料越来越受关注。通过引入有源元器件, 超材料的功能可通过外部激励信号进行动态调控, 在实际应用中具有重要意义。目前常用的控制方式包括电控、温控、光控和机械控制等, 其中光控具有可远程调控、无接触式控制、调制速度快以及结构简单等优点。该文概述了近年来光控电磁超材料的研究进展, 从直流、微波、太赫兹和光频段4种不同频段分别介绍现有光控超材料和超表面的工作, 重点介绍其工作机制和应用场景, 并对这一快速发展领域进行总结和展望。

**关键词:** 电磁超材料; 有源超表面; 光调控; 电磁波调控; 动态功能

**中图分类号:** TN82

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-283X(2021)02-0240-19

**DOI:** 10.12000/JR21013

**引用格式:** 柏林, 张信歌, 蒋卫祥, 等. 光控电磁超材料研究进展[J]. 雷达学报, 2021, 10(2): 240–258. doi: 10.12000/JR21013.

**Reference format:** BAI Lin, ZHANG Xin'ge, JIANG Weixiang, *et al.* Research progress of light-controlled electromagnetic metamaterials[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(2): 240–258. doi: 10.12000/JR21013.

## Research Progress of Light-controlled Electromagnetic Metamaterials

BAI Lin ZHANG Xin'ge JIANG Weixiang\* CUI Tiejun\*

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Electromagnetic metamaterials are artificial structures composed of a periodic or aperiodic arrangement of subwavelength unit cells and can regulate the physical characteristics of electromagnetic waves, such as their frequency, amplitude, phase, and polarization. Metamaterials overcome many limitations of traditional materials and can be used to realize interesting physical phenomena and applications that do not occur in nature. Over the past two decades, metamaterials have become a focus in the fields of physics and electronics owing to their powerful electromagnetic regulation ability. However, passive metamaterials have limitations in electromagnetic wave regulation, such as fixed operating frequency and single function. As such, increasing attention is being paid to tunable and active metamaterials. By introducing active elements, the functions of metamaterials can be dynamically regulated by external excitation signals, which is highly significant for practical applications. At present, commonly used control methods include electrical, temperature, light, and mechanical controls, among which light control has the advantages of remote and noncontact control, a fast modulation speed, and a simple structure. In this study, we summarize the latest progress in light-controlled electromagnetic metamaterial research, and introduce recent work on light-controlled metamaterials and metasurfaces in direct currents, microwaves, terahertz waves, and optics. We

收稿日期: 2021-02-19; 改回日期: 2021-03-29; 网络出版: 2021-04-25

\*通信作者: 蒋卫祥 wxjiang81@seu.edu.cn; 崔铁军 tjcui@seu.edu.cn

\*Corresponding Author: JIANG Weixiang, wxjiang81@seu.edu.cn; CUI Tiejun, tjcui@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61890544), 国家重点研发计划(2017YFA0700201)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61890544), The National Key Research and Development Program of China (2017YFA0700201)

责任编辑: 朱卫仁 Corresponding Editor: ZHU Weiren

focus primarily on relevant operational mechanisms and application scenarios and discuss future prospects.

**Key words:** Electromagnetic metamaterials; Active metasurfaces; Light-controlled; Electromagnetic wave control; Dynamic functions

## 1 引言

自然界现有的材料很难满足人类自由灵活地操控电磁波的愿望,尤其是在千兆赫兹、太赫兹和光波等高频段。此需求促使了电磁超材料这个新物理领域的出现。超材料是一种由周期或非周期排列的亚波长单元组成的人工结构,具有许多自然界材料所不具备的特殊性质<sup>[1]</sup>。通过设计单元结构的几何形状和排列方式,可以随意调控其电磁参数,实现一些奇异功能,例如负折射率<sup>[2]</sup>、隐身<sup>[3-10]</sup>、完美透镜<sup>[11,12]</sup>和全息成像<sup>[13-16]</sup>等。超表面作为超材料的二维特殊形式<sup>[17]</sup>,相比而言具有低损耗、超薄、低成本、加工简便和易于集成等优点。超材料和超表面还进一步拓展到声学<sup>[18-21]</sup>、光学<sup>[22-25]</sup>、热力学<sup>[26-29]</sup>等领域,相关研究成果层出不穷。

上述工作大多数都是不可动态调控的无源超材料(超表面),其功能和特性在加工完成后便已固化。为克服无源超材料的局限性,研究人员对有源超材料进行了广泛研究,通过外部激励来动态改变超材料的电磁特性。目前,常用的控制手段包括电控<sup>[30-32]</sup>、温控<sup>[33-35]</sup>、机械控制<sup>[36-38]</sup>和光控<sup>[39-68]</sup>等。精心设计的有源超材料不仅可以改变工作频率,拓宽工作带宽,还能实现多功能切换,产生复杂形状的波束,特别是可编程超材料,能够在单一平台上完成对电磁波的实时调控<sup>[30]</sup>。可调超材料的出现解决了实际应用方面的迫切需求,推动了该领域的快速发展,成为超材料研究的前沿。

现有的控制方法中,电控一般需要大量导线、外部电源和复杂的控制电路为超材料提供直流控制信号。一般而言,外部电源和控制电路需要通过导线与超材料相连,这将增加系统的体积,甚至带来直流和电磁信号间的串扰。温控对工作环境的要求很高,改变温度需要耗费大量的时间和能源,转换效率较低,成本较高,难以实现快速调控,并且温度调控仅适用于对超材料进行整体调控,可编程性受到限制,可调功能有限。机械控制的方式同样需要大量导线和复杂外部控制设备,成本较高,系统体积较大,并且机械调节方式也难以实现快速调控。相比而言,光控的调制速度比温控、机械控快,具有超快调制速度和开关能力;同时光控方式无需大量物理导线连接和额外控制电路,外部光源既可以充当电压源又可以充当控制器,还能实现远程无接触式调控,具有重量轻、结构紧凑等优势,是未来动态超表面一个重要的研究方向。

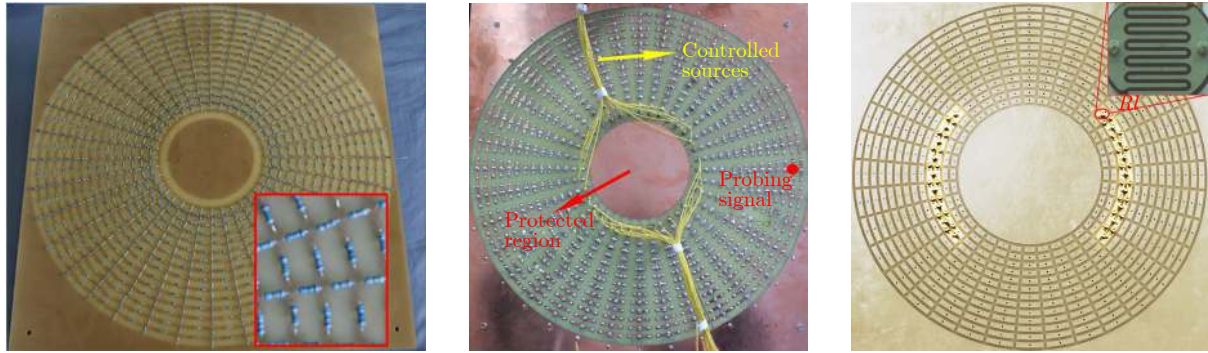
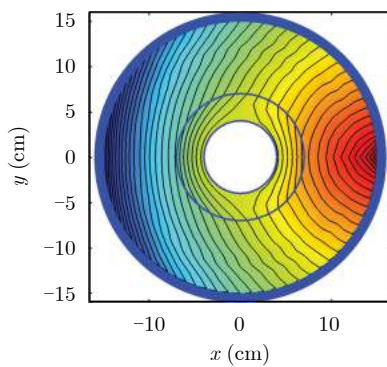
本文结构如下:第2节概述光控电磁超材料的研究进展,按照直流(2.1节)、微波(2.2节)、太赫兹(2.3节)和可见光(2.4节)4个不同工作频段分别介绍了现有几个光控超材料和超表面工作,并重点介绍它们的工作机制和应用场景。最后在第3节对光控超材料领域进行总结和展望。

## 2 光控电磁超材料与超表面

不同工作频段的光控有源超材料需根据频段自身的特点,选择不同调控方法。在直流情况下,通常使用的光调制器件是光敏电阻,照射光强改变时光敏电阻的阻值会发生变化,而变容二极管和“正-本征-负”(Positive-Intrinsic-Negative, PIN)二极管等微波器件则不适用于直流频段。同样在太赫兹频段,变容二极管和PIN二极管等微波器件的损耗变大,且较大体积也不适用于太赫兹的单元设计,而半导体硅、砷化镓、锗和金属氧化物二氧化钒( $\text{VO}_2$ )等材料的介电常数可以通过改变照射光强来调控。光频段常用的光调控材料包括透明导电氧化物、二维材料、相变材料、硅和III-V族化合物半导体材料等,除此之外还存在利用两束相干光束相互作用的调控方法。在微波频段,变容二极管和PIN二极管本身并不具有光控特性,它们是通过改变直流偏压来调控的。为了实现光控,需要添加光电二极管为变容二极管或PIN二极管提供直流偏压,光电二极管所产生的电压会随着照射光强的增加而增加。本文将按照直流、微波和太赫兹的顺序对光控超材料进行总结和概述。

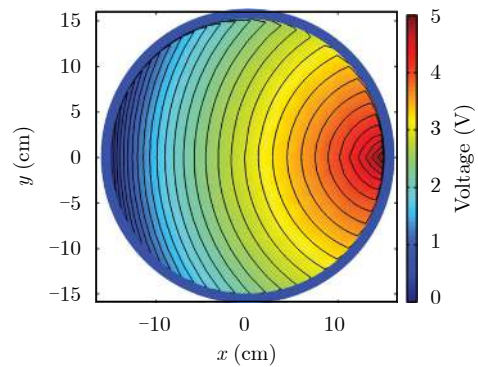
### 2.1 光控变换静电学超材料

2006年, Pendry等人<sup>[3]</sup>提出了基于超材料的变换光学概念,其原理是利用麦克斯韦方程组的形式不变性,对电磁场进行坐标变换。变换光学为任意调控电磁场提供了一种全新方法,广泛应用于设计隐身斗篷<sup>[4-10]</sup>、电磁波集中器<sup>[69,70]</sup>、电磁波旋转器<sup>[71]</sup>等。2012年,东南大学与兰州大学研究者<sup>[72]</sup>合作实现了一种利用电阻网络设计的直流场隐形斗篷(图1(a)),将变换光学的理论引入静电场或恒流场,称为变换静电学。但上述隐身斗篷是无源的,只能对特定形状的物体进行隐身,且隐身效果不能改变。2013年,东南大学与兰州大学研究者<sup>[73]</sup>又合作设计了有源直流隐身衣(图1(b)),通过改变边界处的电压分布,实现对不同物体的隐身或幻象。

(a) 利用电阻网络设计的直流场隐形衣<sup>[72]</sup>(a) Photograph of direct current invisibility cloak designed using resistor network<sup>[72]</sup>(b) 有源直流电隐身衣<sup>[73]</sup>(b) Photograph of active cloaking and illusion device for steady current fields<sup>[73]</sup>(c) 光控多功能直流超材料<sup>[39]</sup>(c) Photograph of light-controlled transformation direct-current device<sup>[39]</sup>

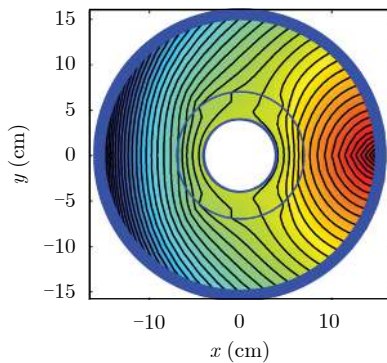
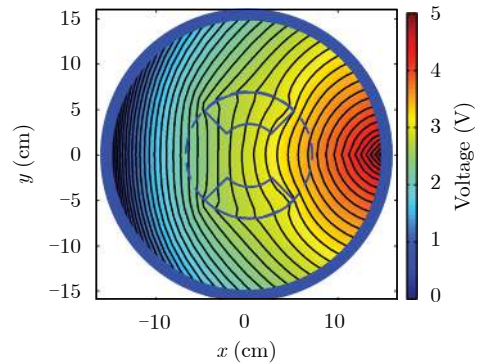
(d) 照射光关闭时的测试结果

(d) The tested equipotential-line distributions when the illuminating light turns off



(e) 与(d)对应的均匀空间没有物体的仿真结果

(e) The simulated equipotential-line distributions when there is nothing in virtually homogeneous space corresponding to (d)

(f) 照射光强为11000 lm, 对应光敏电阻为114  $\Omega$  时的测试结果(f) The tested equipotential-line distributions when the resistor value is 114  $\Omega$  with light intensity 11000 lm

(g) 与(f)对应的幻象物体的仿真结果

(g) The illusion objects corresponding to (f)

图1 变换静电学超材料

Fig. 1 Transformation direct-current metamaterials

为了实现对直流隐身衣的远程无接触式调控, 2015年, 文献[39]利用光敏电阻设计了一种根据照射光强度调控的多功能变换静电学超材料, 如图1(c)所示。当外部光源为关状态时, 超材料是一个直流隐身斗篷, 预先设计好的电阻网络可以恢复等电位线, 使位于中心区域的物体不可见。当外部光源为开状态时, 超材料变成一个可调的静电幻象设备,

调节照射光的强度, 被感知的虚拟物体大小和材料属性随之相应改变。其设计原理首先是根据变换光学理论设计隐身衣的电阻网络, 然后在普通电阻上并联光敏电阻。光敏电阻的阻值随照射光强而改变, 虚拟空间的幻象物体可以通过照射光强来远程调控。图1(c)是用印刷电路板和电阻网络加工得到的实物图, 测试和仿真的电位分布结果如图1(d)–



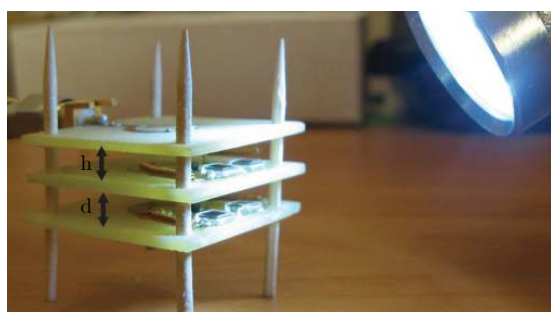
图1(g)所示。当照射光关闭时, 超材料是一个直流隐身斗篷, 设备外等电位线分布如图1(d), 与图1(e)仿真得到的没有物体的均匀空间结果基本一致。当照射光打开时, 超材料是一个可调的静电幻象设备, 图1(f)是照射光强为11000 lm, 对应光敏电阻为114  $\Omega$ 时的测试结果, 图1(g)是对应的幻象物体的仿真结果, 与图1(f)设备外的等电位线分布基本一致。该设计验证了利用外部光源远程调控变换静电学设备的可行性, 未来有望拓展到其他远程调控的多功能设备中。

### 2.2 光控微波超材料与超表面

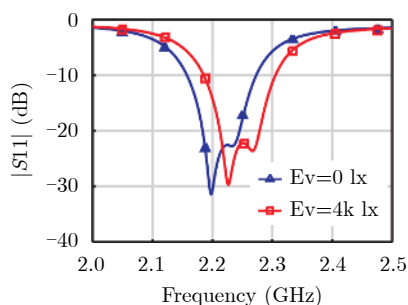
在微波频段, 加载变容二极管的开口谐振环(Split-Ring Resonator, SRR)是一种典型的可调非线性单元结构, 可以用来设计可调磁谐振超材料, 实现功率诱导的波束调控。2011年, Kapitanova等人<sup>[40]</sup>提出了一种新型可调超材料, 可以通过外部光源, 对超材料进行写入和擦除的特定功能(图2(a))。这里使用了两层SRR的耦合结构来增强明暗模式之间的谐振响应, 光电二极管为变容二极管提供偏压, 因此改变光照强度可以调节SRR的磁谐振。由图2(b)可以看出, 当光照强度从0 lx增加到4000 lx,

SRR的谐振频率从2.20 GHz变化到2.23 GHz, 证明了单元的谐振频率与光强相关。该工作结合光电二极管和变容二极管实现光控的方法, 为微波频段光控超材料的设计奠定了基础。但该设计的光强是对超材料进行整体调控, 只能对谐振频率进行微调, 距离实际应用还很远。于是该课题组Shadrivov等人<sup>[41]</sup>又设计了一种用一排发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)控制SRR的超材料, 每个LED可以独立连续地控制一个超材料单元, 通过改变LED的光照图案, 超材料的反射特性也随之改变。该工作中同样使用光电二极管为变容二极管供电, 随着光照强度增加, 光电二极管产生的偏置电压增加, SRR发生相位偏移, 由此实现了波束偏折、聚焦(图2(d))和发散(图2(e))等功能。值得注意的是, 该工作中每个超材料单元可以通过光照强度独立调控, 是光控多功能超材料的雏形, 可实现更多复杂功能。

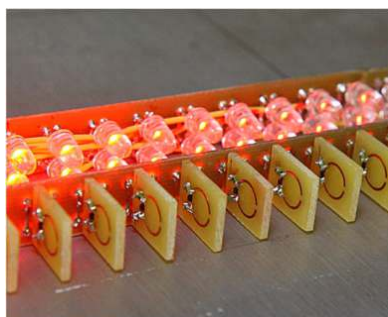
传统超材料一直围绕等效媒质理论设计, 其连续的特性被归类为“模拟超材料”。2014年, 东南大学Cui等人<sup>[30]</sup>从信息科学角度研究超材料, 摒弃等效媒质的表征方法, 创造性地提出用数字编码来表征超材料的新思想。数字编码超材料可以用二进



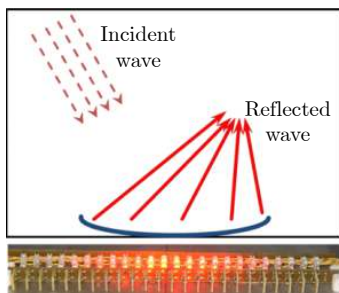
(a) 两层SRR耦合的超材料实物图<sup>[40]</sup>  
(a) Photograph of the metamaterials with two coupled SRRs<sup>[40]</sup>



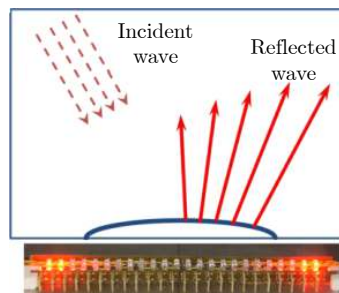
(b) 明暗模式的切换  
(b) Reflection coefficient of tunable SRR with the resonance shifted by an external light



(c) 由一排发光二极管控制的超材料实物图<sup>[41]</sup>  
(c) Photograph of the metamaterial controlled by an LEDs array<sup>[41]</sup>



(d) 聚焦功能, 下方为对应的LED光照图案  
(d) Metamaterial operating as focusing reflector, and the corresponding illumination pattern



(e) 发散功能, 下方为对应的LED光照图案  
(e) Metamaterial operating as defocusing reflector, and the corresponding illumination pattern

图2 SRR结构的光控超材料

Fig. 2 Light-controlled metamaterials with SRR structures

制比特数来量化相位响应为 $0\sim 2\pi$ 的单元,  $N$ 比特超材料或超表面需要 $2^N$ 个离散相位来表征单元的特性。例如, 最简单的1比特编码超表面的单元具有两个离散的相位状态, 相位相差 $180^\circ$ , 用数字“0”和“1”表示。采用编码超材料的机制, 可以更灵活地调控电磁波的不同特性, 具有良好的自主设计性。

2018年, 文献[42]将光控方法与编码超表面结合, 设计了一种1比特光控数字编码超表面, 通过控制光源的开关实现反射波为主波束和两波束两种功能的切换(图3(a))。如图3(b)所示, 超表面是由 $6\times 6$ 个超级子单元组成的, 每个超级子单元又包括 $6\times 6$ 个数字单元, 每个数字单元的缝隙中都集成了一个变容二极管, 一个超级子单元中的所有数字单元共享相同的偏置电压, 具有相同的相位响应。超表面左侧固定了一排PIN硅光电池为超表面提供电压, 光源部分是由一排LED并联组成的, 通过控制照射在硅光电池上的LED的光强, 硅光电池产生的直流偏压也相应改变。为了降低成本、简化实验过程, 文章中选用两种编码序列“000000”和“010101”来证明光控数字编码超表面的可行性。将超表面第2, 4, 6列超级子单元与硅光电池相连, 控制光源的开关即可实现两种不同的反射波束。该工作解决了传统可调编码超表面馈线复杂问题, 实现对编码超表面远程的多功能调控。

但由于光源阵列和超表面设计的限制, 文献[42]中的超表面是窄带的, 且只能在整体或者一维方向进行调控, 仅实现了两种功能的切换, 大大限制了可调编码超表面的可编程性。伴随着无线通信十年一代的发展更新和电磁环境的日益复杂, 设计高集

成化、宽带、多任务并行处理且具有强可编程能力的通信系统和电磁器件成为未来的发展趋势和研究热点。2020年, 文献[43]设计并实现了一种宽带的光驱动可编程数字编码超表面(图4(a)), 大规模光源阵列可对电磁功能进行编程, 解决了传统多通道电控超表面需要大量的导线和复杂的控制器带来的困扰, 同时实现了非接触式远程的光控方式。该工作精心设计了一个基于变容管的宽带超表面单元,  $4\times 4$ 个超表面单元组成一个子阵列, 每个子阵列背后都集成了一个基于硅光电池的传感网络。整个超表面包含 $6\times 6$ 个子阵列, 36个光传感网络相对独立, 可单独控制。为了远程调控所加工的光驱动可编程平台, 研究者还设计制作了一台包含 $6\times 6$ 个聚光灯的光源阵列, 设计的光传感网络能够接收不同强度的可见光, 然后产生不同的偏置电压, 进而实时调控超表面的微波反射相位。实验在微波暗室中进行, 如图4(b)所示, 不同的光照图案照射在数字平台, 实现了微波外部隐身、电磁幻觉和动态涡旋波束调控等功能, 数值仿真结果(图4(c)—图4(e))与实验结果(图4(f)—图4(h))都验证了该平台的可编程性。由于集成的光传感网络既能充当外部直流电源, 也能充当控制器, 因此与传统的包含外部电源、大量导线和控制器的电控超表面相比, 所研制的光驱动可编程数字超表面平台具有重量轻、结构紧凑且可无线远程调控等优点。该工作成为光信号与微波信号转换的桥梁, 为未来发展光电混合器件和可见光微波融合通信系统奠定了基础。

现有编码超表面基本上都是反射式, 且编码方式都是基于电磁波的相位响应[15,30,42,43,74,75]。除相位响应之外, 幅度响应也是电磁波的一个重要性质,

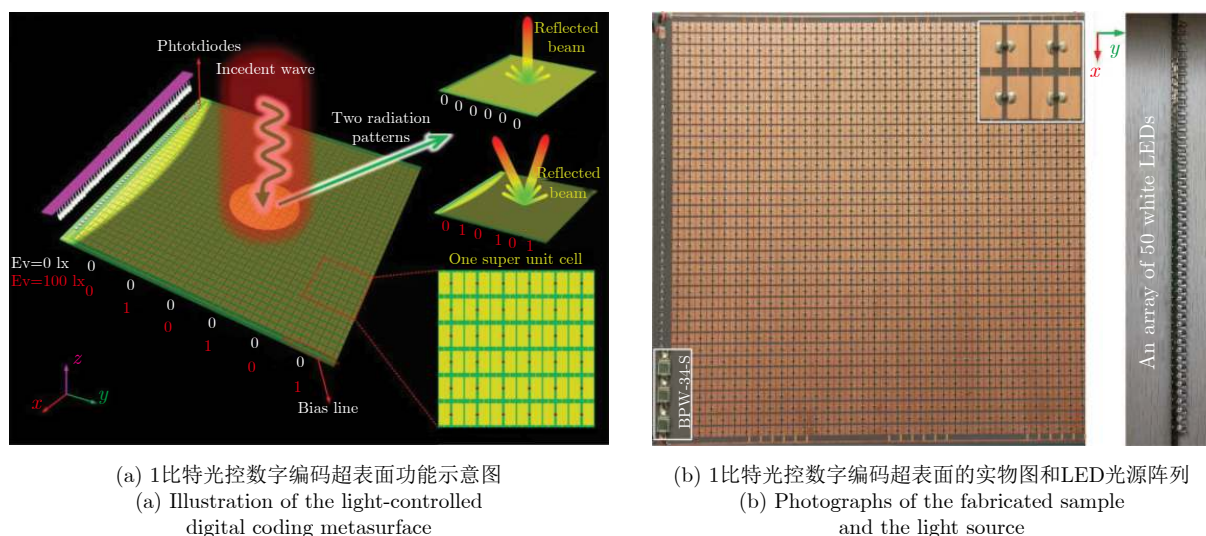
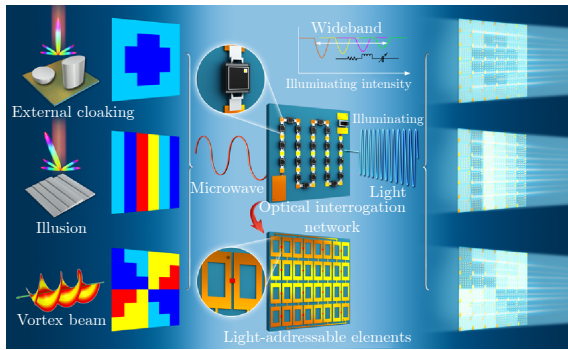


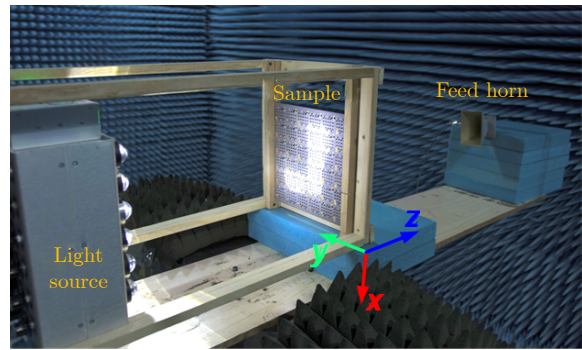
图 3 1比特光控数字编码超表面[42]

Fig. 3 1-bit light-controlled digital coding metasurface[42]

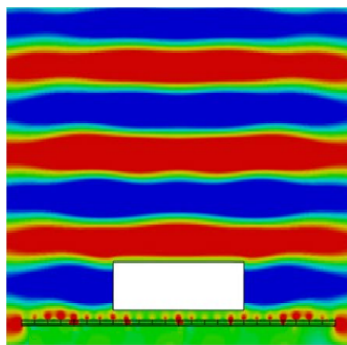




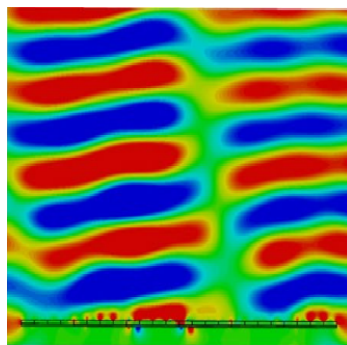
(a) 光驱动可编程数字超表面功能示意图  
 (a) Optically interrogated digital platform and its programmable electromagnetic functions



(b) 微波暗室中测试场景照片  
 (b) Photograph of the microwave measurement setup



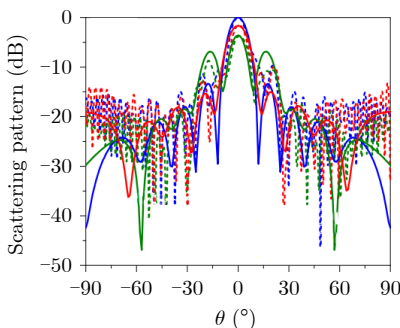
(c) 超表面隐身功能的仿真电场强度分布  
 (c) Simulated electric-field intensity distributions of the metasurface for the cloaked case



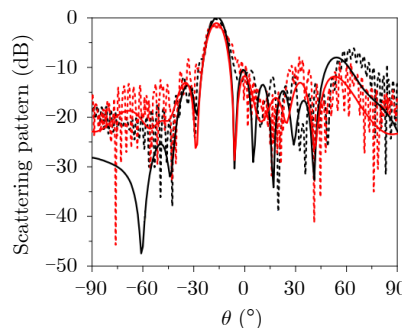
(d) 超表面幻觉功能的仿真电场强度分布  
 (d) Simulated intensity distributions of the metasurface for the illusion case



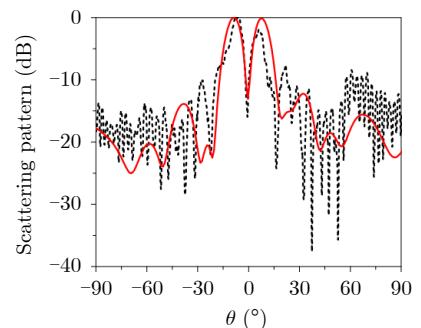
(e) 三维涡旋波束的仿真结果  
 (e) Simulated result of 3D vortex beam



(f) 非隐身、隐身和金属板情形下，测试和仿真的二维散射方向图  
 (f) Measured and simulated 2D scattering patterns for the unclashed case, cloaked case and copperplate  
 ..... Copperplate ..... Unclashed  
 ..... Cloaked



(g) 超表面和目标的测试和仿真二维散射方向图  
 (g) Measured and simulated 2D scattering patterns of the planar metasurface and target ladder, respectively  
 ..... Object ..... Illusion



(h) 涡旋波束的测试和仿真二维散射方向图  
 (h) Measured and simulated 2D scattering patterns of the vortex beams  
 — Measured — Simulated

图4 光驱动可编程数字编码超表面<sup>[43]</sup>

Fig. 4 Light-driven digital metasurface for programming electromagnetic functions<sup>[43]</sup>

例如频率选择表面<sup>[76-79]</sup>、吸波器<sup>[80-82]</sup>、天线罩<sup>[83,84]</sup>、低副瓣天线<sup>[85,86]</sup>等设备都是利用了对幅度的调制。2018年，文献<sup>[44]</sup>设计了一种透射式光控编码超表面，通过调节照射光的强度和入射波频率，编码超表面的透射状态可以自由切换。图5(a)是所提出的透射式光控编码超表面的数字单元，其

上表面金属层中有一个圆环缝隙，一个变容二极管加载在缝隙上连接内外金属片，PIN硅光电池阵列为数字单元提供直流偏压。当变容二极管的电容值分别为2.67 pF和0.63 pF时，数字单元透射系数 $S_{21}$ 的幅值如图5(b)所示，可以观察到单元有两个谐振模式(i)和(ii)，图中橙色区域代表数字单元的两

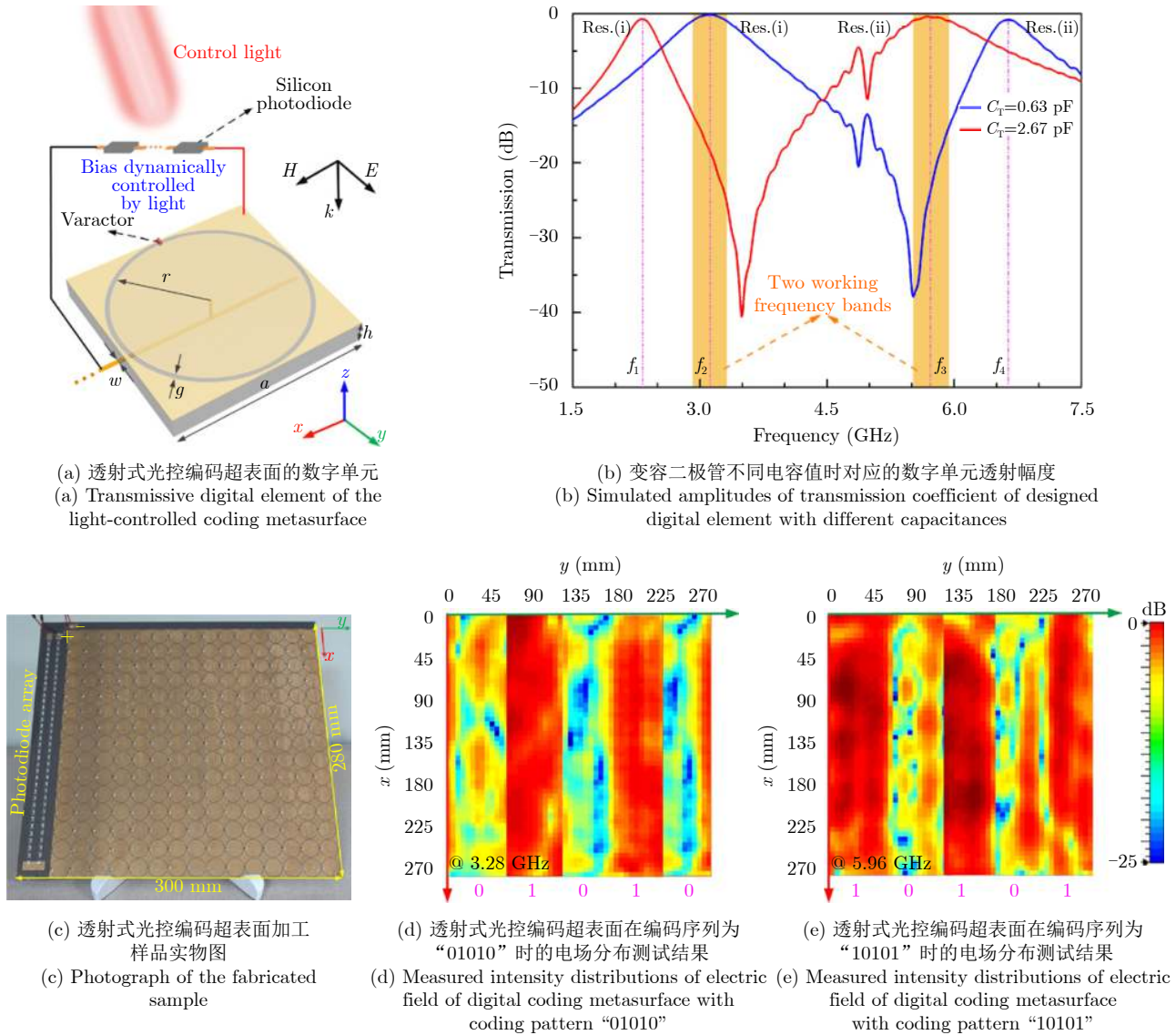


图 5 透射式光控编码超表面<sup>[44]</sup>  
Fig. 5 Light-controlled transmission-type digital coding metasurface<sup>[44]</sup>

个工作频段。这里定义透射幅度低于-13 dB为“0”单元，透射幅度高于-1 dB为“1”单元。为了验证透射式幅度可调超表面的可行性，该工作对超表面进行了加工测试，样品实物图如图5(c)所示。以列控编码为例，在第1工作频段编码序列为“01010”（图5(d)），而在第2工作频段编码序列切换为相反状态“10101”（图5(e)），展现了完美的幅度可调特性。这个透射式光控超表面从一个新的角度设计编码超表面，丰富了光控超表面的功能和应用场景，未来可用于实现高性能透波调控器件。

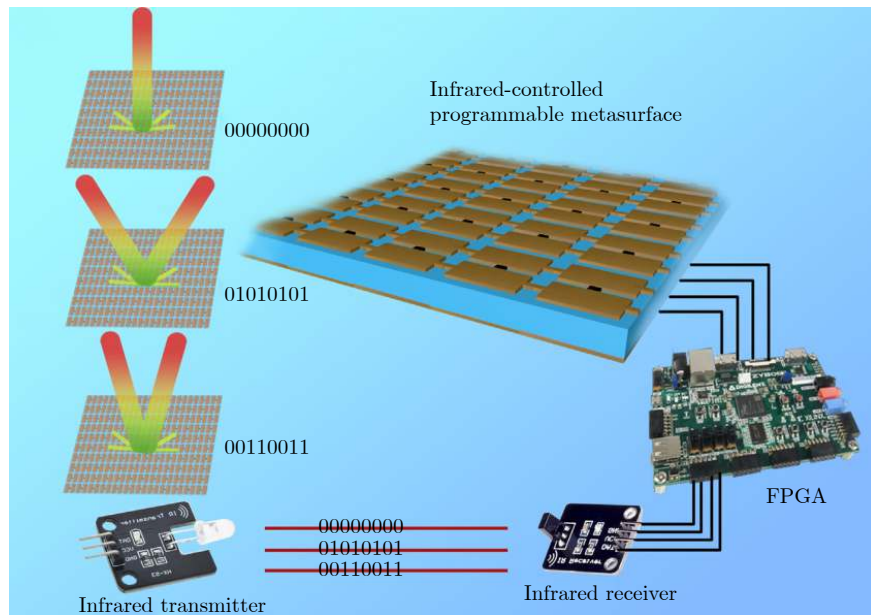
与可见光调控机制相比，红外调控方法具有更长的远程控制距离和更高的能源效率，并且红外线是不可见光，可以更有效地避免环境光的影响。2020年，文献[45]将红外传感器引入可编程超表面，设计了一种红外调控可编程超表面，利用红外

线和现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)实时调控超表面波束分裂和波束扫描的功能。如图6所示，红外接收模块、FPGA控制器和可编程超表面连接在一起。研究者首先将预先设计好的编码序列储存在FPGA中，然后利用红外线动态选择所需的编码序列，FPGA将直流控制信号传输到超表面，调控超表面的反射相位。为了简化控制电路，实验环节采用了列控的方法。编码序列为“0000000”时超表面没有发生相位变化，产生镜面反射；对于两个交替编码序列“01010101”和“00110011”，超表面分裂成两个对称的波束，这两个编码序列对应的波分裂波束方向不同，产生了波束扫描效应。

### 2.3 光控太赫兹超材料与超表面

电磁诱导透明(Electromagnetically Induced



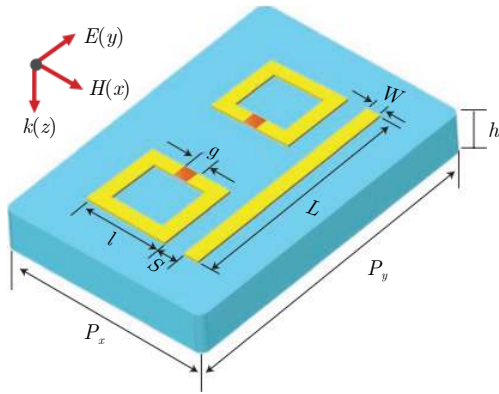
图6 红外调控的可编程超表面的功能示意图<sup>[45]</sup>Fig. 6 Illustration of the infrared-controlled programmable metasurface<sup>[45]</sup>

Transparency, EIT)是发生在三能级原子体系中的量子干涉效应,表现为当两束电磁波照射到某种不透明介质上时,在宽带吸收谱内出现了窄带的透明窗口,介质不再吸收能量<sup>[87]</sup>。该效应可以有效改变介质的色散特性,为设计慢光器件、超灵敏传感器件、非线性器件等开辟了新的途径。在太赫兹频段, EIT效应可广泛应用于太赫兹谐振器和吸波器,丰富了EIT在整个频谱范围内的研究。近年来,由于超材料具有设计灵活、易于实现等优点,利用超材料实现EIT效应成为研究热点。设计EIT超材料的一个经典结构是由金属短线(Cut Wire, CW)和SRR组成的,利用两种结构之间的近场耦合产生EIT效应。但传统的EIT超材料存在透射带宽较窄、透射频点和透射率固定等缺点,限制了EIT超材料的实际应用。基于上述背景,2012年,文献[46]提出了一种在单元结构中嵌入光敏材料硅的光控EIT超材料,如图7(a)所示,由两个方形SRR和一个CW组成。随着光照强度的增加,半导体硅的电导率相应增加,从而改变单元的透射幅度,实现透射率的光控可调。图7(b)给出了不同功率光的激励下,归一化透射系数的仿真结果。没有光照时,在0.74 THz处透射率为85%;当激励光功率增加到1000 mW时,透射峰消失,透射率减小到50%;当激励光功率调到最大的1350 mW时,透射率降低至43%,完成了EIT峰值由开到关的调制。2019年,文献[47]也设计了一种太赫兹光控的EIT超材料,如图7(c)所示。与上一个工作类似,该工作中的SRR是一个圆形结构,将光敏材料硅嵌

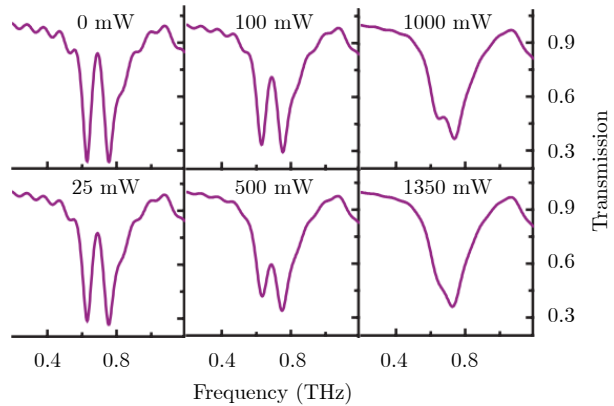
入SRR的开口处,通过改变光照强度控制硅的电导率,从而调节EIT的透射率。图7(d)给出了不同电导率下, EIT超材料的透射谱。没有光照时,硅的电导率为1 S/m,透射谱在1.33 THz呈现出的透射率为94%的透明窗口;硅电导率为5000 S/m时,透射率变为58%;电导率为15000 S/m时,透射峰消失,整个调控效率可达66%。

近年来,基于超材料的吸波器成为研究热点,太赫兹吸波器在太赫兹通信、成像、隐身、传感等方面具有广泛的应用前景。但是传统太赫兹吸波器带宽较窄、吸收频点和吸收率固定,在一定程度上限制了吸波器的发展。光控有源超材料通常有两种实现方式:一是控制光的开关状态,二是调节光照强度。第1种方法只有两种状态难以实现多功能可调,第2种方法可以实现连续调控,但准确性和稳定性受到限制。2018年,文献[48]提出了一种结构光调控的可调吸波器,可以通过改变空间光的分布来切换超材料的多种谐振模式,既实现了多种状态切换又保证了稳定性。超材料单元是由4个非对称的1/4圆环组成的多谐振结构,如图8(a)所示,在4个圆环缝隙处集成4个光敏硅片,结构光由一系列点光源组成,这些点光源通过人为控制在二维空间产生不同光照图案,照射在光敏硅片上来切换或组合超材料的谐振模式。图8(b)给出了不同模式下结构光的空间分布图以及对应的反射系数,超材料的吸波带宽和吸波频率均可调节。该工作中工作带宽和谐振频率是通过空间光分布来控制的,而不只是简单光强变化,这种方法具有更好的灵活性和准确

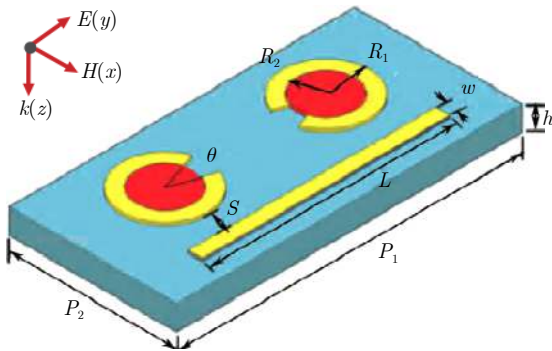




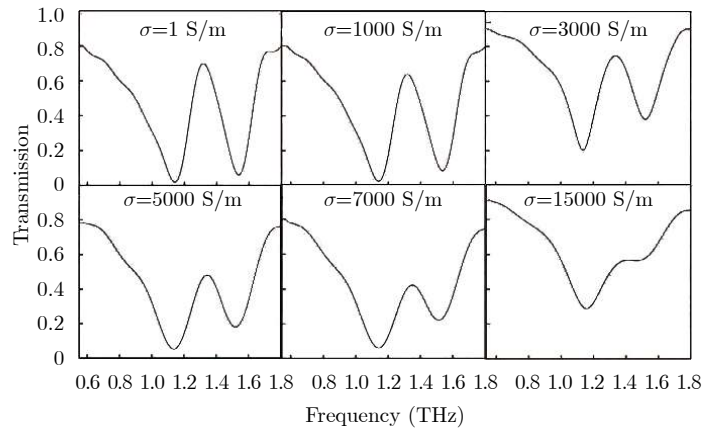
(a) 文献[46]中EIT超材料的单元结构  
(a) Unit structure of EIT metamaterial in Ref. [46]



(b) 不同功率光的激励下, 归一化透射谱的仿真结果  
(b) Simulation results of normalized transmission spectra with different excitation power of the pump beam



(c) 文献[47]中EIT超材料的单元结构  
(c) Unit structure of EIT metamaterial in Ref. [47]



(d) 不同电导率下的透射谱  
(d) Transmission spectra under different conductivities

图7 基于CW和SRR结构的EIT超材料

Fig. 7 EIT metamaterials based on CW and SRR structures

性, 有望在太赫兹开关和太赫兹吸波器等领域得到应用。

2019年, 文献[49]设计了一种光控可调谐多频超材料吸收器, 其单元结构包含4个长度不同金属条, 如图8(c)所示。每个金属条对特定频率的太赫兹波都具有吸收特性, 4种金属条组合起来构成了一个多频带吸波单元。在两对金属条之间填充光敏介质砷化镓(图8(c)中红色区域), 砷化镓的电导率会随着光照强度增加而增加, 通过光控可以实现从绝缘体到金属的转变。图8(d)给出了吸波率与砷化镓电导率的关系曲线。可以看出当电导率较小时, 超材料在4个频段具有吸波特性的, 随着电导率增大, 吸收频段由4个变为2个, 且吸波率随着电导率改变。2020年, 文献[50]也设计了一个光控多态太赫兹吸收器, 利用不同波长的泵浦光对半导体材料砷化镓和锗激发不同的特性, 实现了单频、双频、三频吸波状态任意可切换的超材料吸收器。超材料单元结构由3个嵌套的方环组成(图8(e)), 在方环的

间隙嵌入具有不同光敏特性的砷化镓和锗。无泵浦光照射时, 砷化镓和锗均处于绝缘状态, 3个方环相对独立, 产生3个吸收峰, 如图8(f1); 用1550 nm泵浦光照射时, 只有锗被激发, 增加照射光强, 锗的电导率逐渐增大, 3个吸收峰转变为2个, 如图8(f2); 用800 nm泵浦光照射时, 砷化镓和锗同时被激发, 随着光强增加, 3个吸收峰转变为1个, 如图8(f3)。多频带的光控吸波器在隐身、探测、成像等方向具有广泛的应用前景。

文献[51]设计了一种光控超材料传感器, 通过改变照射光强实现了对超材料谐振峰的调节, 同时超材料的谐振峰会随着待测液体的浓度发生变化, 可以用作太赫兹波段液体传感器。图9(a)为光控超材料传感器单元示意图, SRR顶端有两个用光敏材料硅填充的缝隙, 外部光源可以改变硅的电导率, 实现绝缘体与金属的切换。图9(b)和图9(c)给出了不同电导率不同极化下超材料单元的透射幅度。随着电导率的增加, 电场方向垂直于顶端开口方向

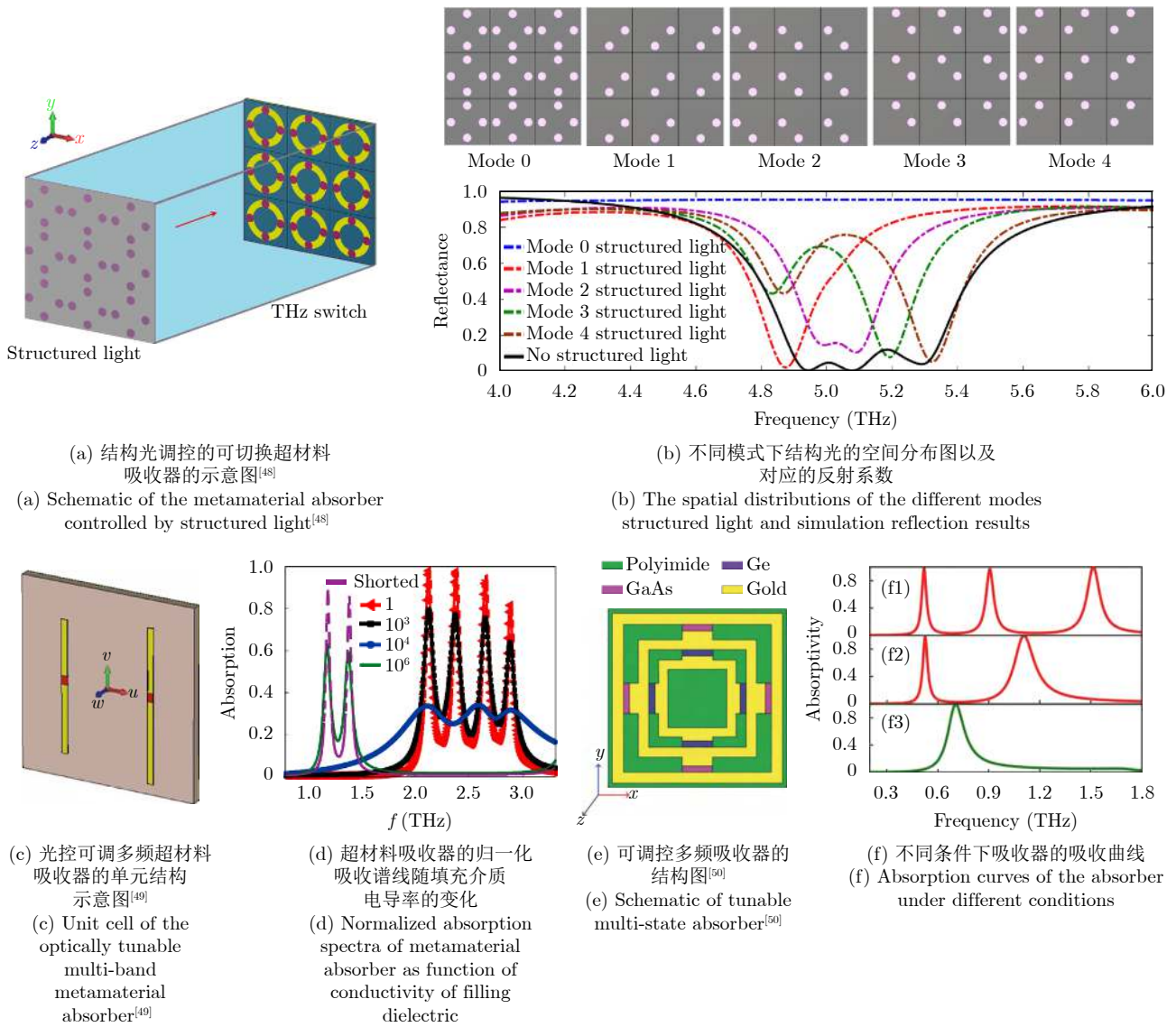


图 8 基于超材料的太赫兹光控吸收器

Fig. 8 Light-controlled Terahertz absorbers based on metamaterials

时，谐振频率由1.139 THz偏移到0.800 THz；电场方向平行于顶端开口方向时，谐振频率由双频0.645 THz和1.716 THz变化为单频1.256 THz，在两个极化方向都具有调制效果。该工作可以进一步应用于低密度或薄膜生物样品的无损检测。

文献[52]设计了一种光控太赫兹光子自旋超表面，利用P-B(Pancharatnam-Berry)相位和VO<sub>2</sub>的光调制特性设计了一种可调的多功能太赫兹光子自旋器件。如图9(d)所示，单元是一个C字形结构，开口缝隙由VO<sub>2</sub>填充。P-B相位响应是由C字形单元的几何方向决定的，对入射的左旋和右旋圆极化波具有相反的相位响应。在没有光源激励的情况下，VO<sub>2</sub>在太赫兹波段是介电常数为9的透明绝缘体，当足够强的光照射到VO<sub>2</sub>上时，电导率激增，绝缘体变为金属。研究者利用上述单元结构设计了

3种功能可切换的太赫兹器件。图9(e)是根据P-B相位由圆形阵列组成的超反射镜，当VO<sub>2</sub>处于绝缘状态时，反射镜对垂直入射的右旋和左旋圆极化波具有聚焦和发散的功能，当VO<sub>2</sub>转变为金属状态时，聚焦和发散功能消失。图9(f)和图9(g)分别为反射式波束分裂和涡旋波发生器，它们的作用也会随着VO<sub>2</sub>状态转变而消失。该工作为设计多功能和可调太赫兹器件提供了新方法。

### 2.4 光控光频段超材料与超表面

随着当今技术的快速发展，种类繁多的半导体材料为光控光频段超材料提供了广阔的发展前景，例如透明导电氧化物(如氧化铟锡ITO、掺杂氧化锌ZnO、掺杂氧化镉CdO)<sup>[53-55]</sup>、二维材料(如石墨烯、二硫化钼MoS<sub>2</sub>、二硒化钨WSe<sub>2</sub>)<sup>[56-60]</sup>、相变材料(如锗锑碲合金(Ge:Sb:Te, GST))<sup>[61-64]</sup>、硅和III-



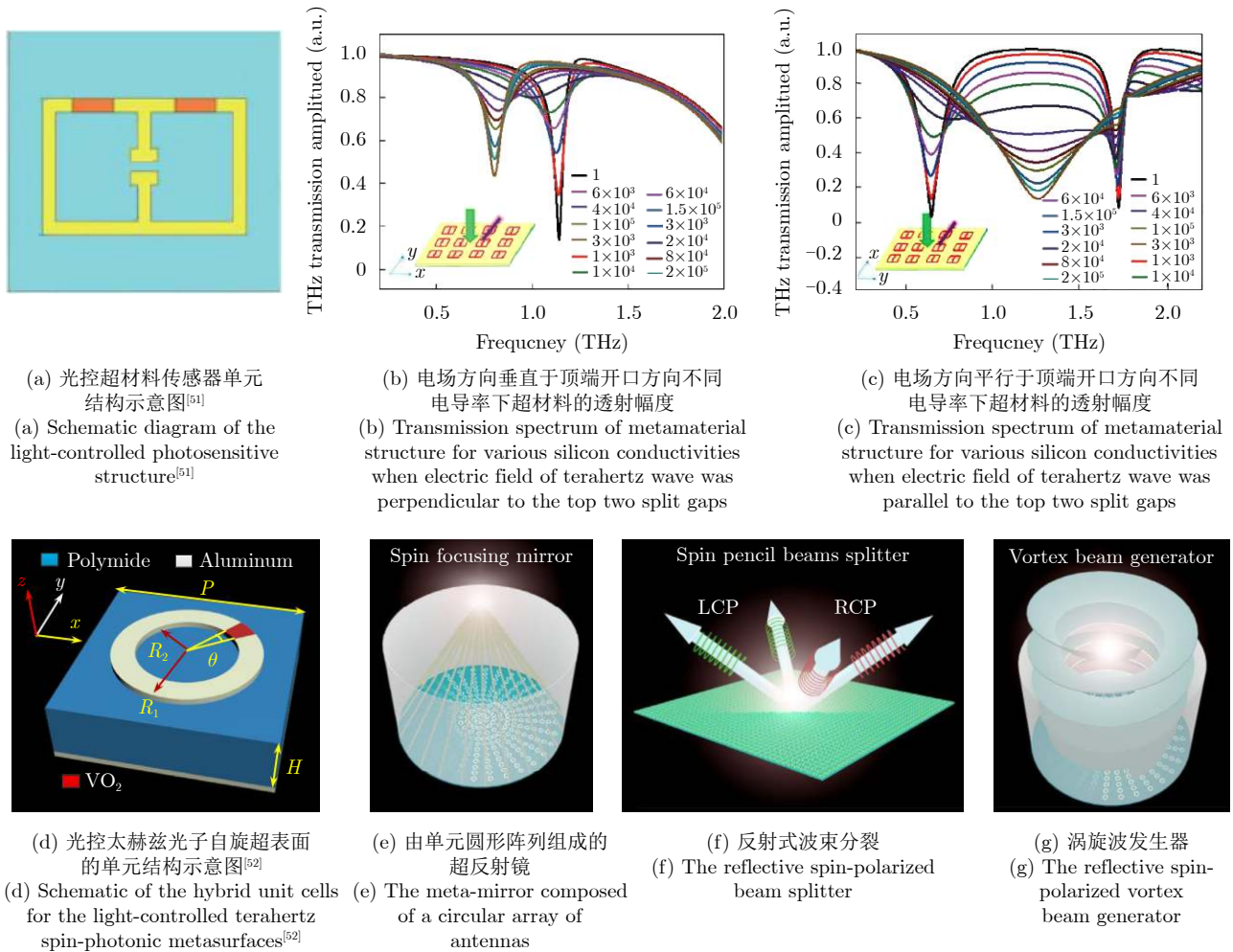


图9 光控超材料传感器和光子自旋设备超表面

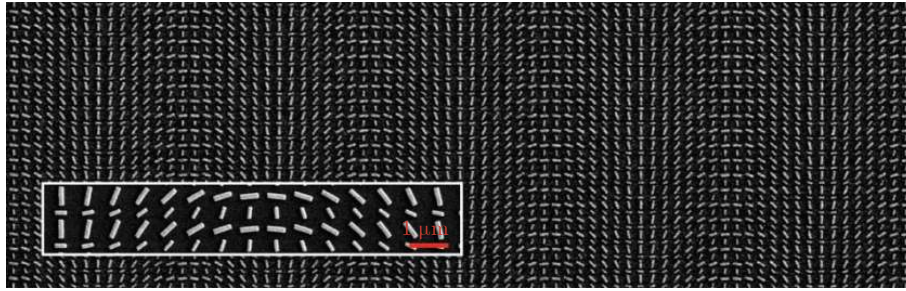
Fig. 9 Light-controlled metamaterial sensor and spin-photonics devices based on metasurface

V族化合物半导体材料(如砷化镓GaAs、钙钛矿)等<sup>[65-67]</sup>。此外,也存在两束相干光束相互作用的调控方式<sup>[68]</sup>。所实现的功能包括谐振频率可调、透射反射率可调、吸波率可调、折射率可调、聚焦透镜焦距可调等。

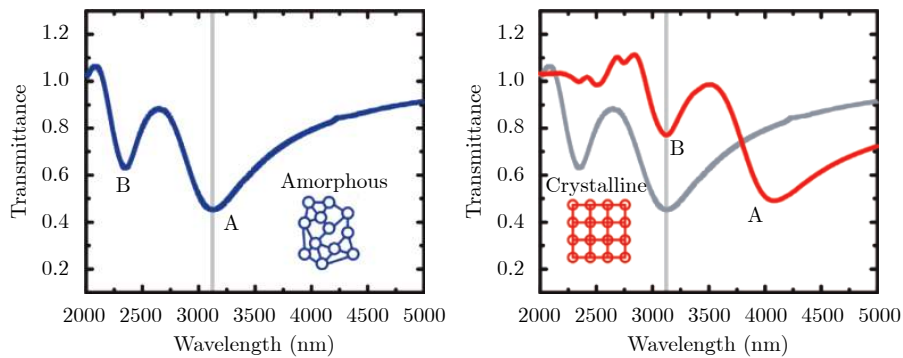
GST是一种基于碲的硫族化物合金,目前可重写光盘和非易失性电子存储器都是基于这种材料,具有良好的热稳定性、高的切换速度和大量重写周期。GST通常包含两种可以可逆切换的相态:非晶态和晶态。在非晶态和晶态之间,介电性能存在巨大的反差,由此产生的折射率变化导致谐振、透射和反射谱发生变化。文献<sup>[63]</sup>使用GST设计了一种光控纳米天线超表面,如图10(a)所示,两组不同的纳米棒天线A和天线B在空间上交错排列,使光束折射到相反的方向。根据GST的状态不同,天线A和天线B具有不同的谐振波长。非晶态的天线A和晶态的天线B谐振波长重叠(图10(b)),由此设计了一个双焦距超表面透镜,根

据聚焦透镜公式计算出天线A和天线B沿 $x$ 方向的旋转角度(图10(c)),对应非晶态时焦点在 $z=0.5$  mm处, GST晶态时焦点在 $z=1.0$  mm处,图10(d)为非晶态和晶态时的仿真场强分布,仿真结果与理论分析吻合较好。

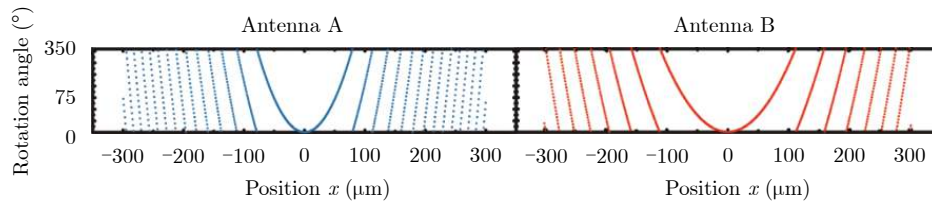
近年来,半导体材料甲基铵卤化铅钙钛矿(MAPbX<sub>3</sub>, MA=CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, X=Cl, Br, I或其他混合物)因其优异的光致发光特性成为研究热点。文献<sup>[65]</sup>利用MAPbX<sub>3</sub>光栅的外部结构色和内部发射色相互作用,实现了动态色彩显示,通过控制泵浦光,可以在纳秒级的过渡时间内进行大范围的颜色调谐。其工作原理如图11(a)所示,白光和泵浦光同时入射到MAPbX<sub>3</sub>光栅上。外部结构色依赖MAPbX<sub>3</sub>纳米结构的几何参数,而内部发射色来自MAPbX<sub>3</sub>的光致发光特性,由泵浦光功率密度决定。根据混色理论,将两种颜色混合即可产生第3种颜色,通过将外部结构色和内部发射色混合,外部结构色作为基色,内部发射色作为微调,可以动态和可逆地调节所呈现的颜色。图11(b)为未掺杂光子的大学校



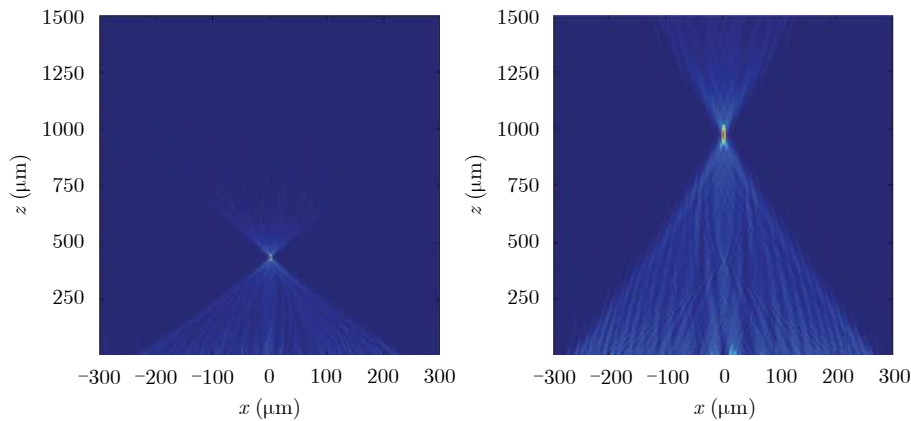
(a) 超表面的电子显微镜图像，天线A和天线B在GST衬底上交替排布  
(a) Scanning electron microscope image of the beam switching metasurface, antenna A and antenna B are line-wise alternated on a GST substrate



(b) 超表面在非晶态和晶态的透射率  
(b) Transmittance for the metasurface in amorphous and crystalline state



(c) 天线A和天线B在x方向的旋转角度  
(c) Rotation angle versus  $x$ -position for antenna A and antenna B



(d) 非晶态和晶态时的仿真场强分布  
(d) Full-field simulation of field intensities arising in the amorphous and crystalline cases

图 10 基于GST的光控超表面<sup>[63]</sup>

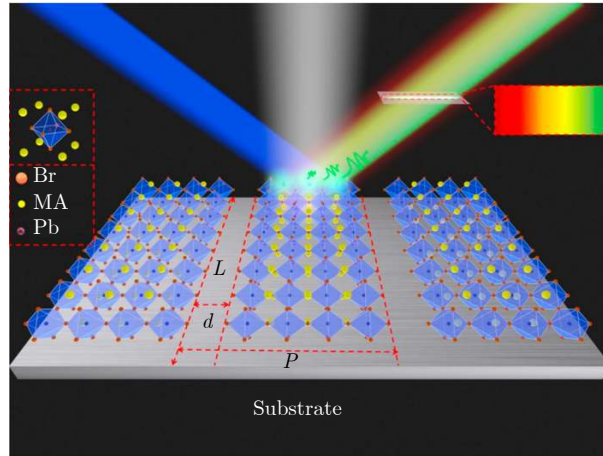
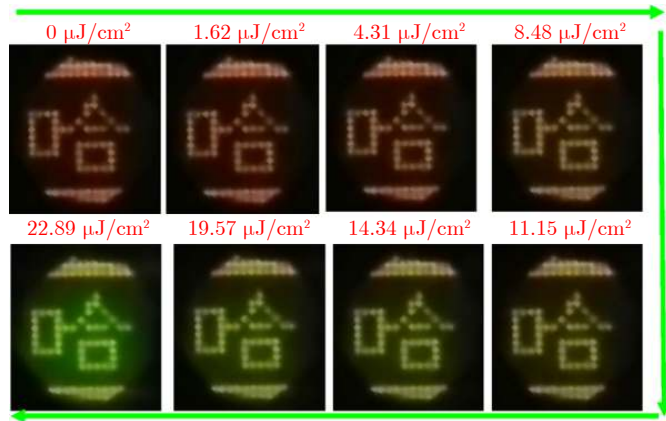
Fig. 10 Optically reconfigurable metasurface based on GST<sup>[63]</sup>

显微镜图像。当泵浦密度从0增加到 $22.89 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时，大学校徽的汉字从红色调到绿色(图11(c))，产生了明显的色彩调控。

### 3 总结与展望

本文介绍了近年来光控电磁超材料的研究进



(a) 基于MAPbX<sub>3</sub>钙钛矿光栅的动态彩色纳米打印原理图(a) The schematic design of dynamic color nanoprining based on MAPbX<sub>3</sub> perovskite gratings(b) 未掺杂光子的大学校徽显微镜图像  
(b) Microscope image of the university logo without photon doping(c) 不同泵浦光密度下部分大学校徽的显微镜图像  
(c) Microscope images of some part of the university logo at different pumping densities图 11 动态颜色显示的钙钛矿纳米结构<sup>[65]</sup>Fig. 11 Perovskite nanostructure for dynamic color display<sup>[65]</sup>

展, 概述了现有关于光控超材料和超表面工作, 按照工作频段从直流、微波、太赫兹和光频段4个方面介绍了它们的工作机制及应用场景。光控方法因具有远程调控、无接触式控制、调制速度快和结构简单等优点, 在短短不到十年里得到了迅速发展。表1对比总结了上述光控电磁超材料(超表面)在频率、光控材料、实现功能和有无实验结果等特点。常用的光控方式是利用光敏电阻、光电二极管、半导体材料和金属氧化物等有源器件和材料的光敏特性来改变超材料和超表面的电磁参数, 目前光控电磁超材料已在隐身、幻象、吸波、多功能切换等领域取得了一系列重要进展。在太赫兹等高频波段, 由于加工成本高、加工工艺复杂, 大部分光控超材料只停留在理论模型和仿真验证阶段, 离实际应用还有一定距离。近年来, 由于可调超材料(超表面)的快速发展, 相关综述论文相继发表<sup>[88-94]</sup>。这

些综述论文各有侧重, 展现和总结现有可调超材料(超表面)的研究进展和动态。但光调控仍属于初步发展阶段, 发展历程较短, 目前尚未发现相关综述文章发表。本文归纳总结了现有光控电磁超材料(超表面)的研究现状, 也为未来的研究提供思路和参考。

光控超材料未来的发展趋势及应用前景包括以下几个方面:

#### (1) 光控大规模超材料

可编程超材料可以在单一平台上实现多种功能, 且可按照编写好的程序实时切换<sup>[95]</sup>, 是未来将超材料推向信息化的基础。在光控超表面中, 文献[42]提出了一种1比特列控的数字编码超表面, 实现了两种功能的切换; 文献[43]设计了一种2比特的可编程超表面, 每个子阵可独立可编程, 实现了几种完全不同的功能。未来可设计规模更大、可控单

表 1 光控电磁超材料(超表面)特点总结表

Tab. 1 Summary of the characteristics of light-controlled electromagnetic metamaterials (metasurfaces)

文献	频率	光控材料	实现功能	是否有实验结果
[39]	直流	光敏电阻	隐身斗篷与可调幻象设备	是
[40]	2.20~2.23 GHz	光电二极管+变容二极管	谐振频率可调	是
[41]	3 GHz左右	光电二极管+变容二极管	波束偏折、聚焦、发散	是
[42]	3.69~4.10 GHz	光电二极管+变容二极管	主波束与波束分裂的切换	是
[43]	5.2~7.6 GHz	光电二极管+变容二极管	微波外部隐身、电磁幻觉、动态涡旋波束调控	是
[44]	3.12 GHz, 5.72 GHz	光电二极管+变容二极管	透射状态切换	是
[45]	4.1~4.5 GHz	红外接收模块+FPGA+变容二极管	主波束与波束分裂	是
[46]	0.74 THz左右	光敏材料硅	电磁诱导透明效应可调	是
[47]	1.3 THz左右	光敏材料硅	电磁诱导透明效应可调	否
[48]	4.86~5.36 THz	光敏材料硅	多种谐振模式可切换	否
[49]	1.19~2.96 THz	光敏材料砷化镓	可调多频吸波器	否
[50]	0.518~1.514 THz	光敏材料砷化镓+锗	可调多频吸波器	否
[51]	0.645~1.716 THz	光敏材料硅	谐振峰可调	否
[52]	0.67 THz左右	二氧化钒	聚焦、发散、波束分裂、涡旋波发生器	否
[56]	远红外-中红外	石墨烯	等离子体共振可调	是
[61]	近红外-可见光	锗铋碲合金	透射反射率可调	是
[63]	近红外-可见光	锗铋碲合金	聚焦透镜焦距可调	是
[65]	可见光	钙钛矿	动态色彩显示	是
[68]	190.50~196.08 THz	两束相干光	脉冲恢复、相干滤波器和光对光调制器	否

元数更多以及比特数更多的光控可编程超材料, 可实时切换更多更复杂的功能, 为超材料的设计提供无穷的可能性。

### (2) 光控自适应超材料

现有的光控超材料虽然能够实现任意调控电磁波, 但不同功能的切换仍需通过手动操作来实现, 无法脱离人为控制。自适应超材料在动态超材料的基础上引入传感器, 自动感知周围环境或状态, 并通过实时反馈系统为控制端提供决策, 自动调整超材料的功能, 无需人为控制<sup>[96]</sup>。例如, 在光控方面, 可以将光学传感芯片集成到设计的超材料结构中, 构成具有传感特征的自适应超材料。通过结合定制的控制计算程序以及执行电路, 自适应超材料可以检测环境光强度, 或者根据光强定位自主改变功能, 为下一代无线系统构建具有自主自适应可编程功能的智能超材料设备。未来还可以结合机器学习和优化算法等人工智能的方法辅助设计超材料, 开发具有可认知能力的超材料和超表面。

### (3) 光控时域超材料

传统超材料和超表面都是调控电磁波的空间分布, 近年来, 时域超表面<sup>[97-100]</sup>为电磁波频谱分布调控开辟了新的途径。例如, 利用时域超表面研制的无线通信系统, 省去了传统的模拟或数字电路,

功耗降低, 极大地简化了现代通信系统的架构, 同时具有良好的实时信号传输性能<sup>[97,98]</sup>。利用时间-空间联合编码的超表面可以同时调控电磁波的频谱和空间分布, 实现了许多新奇的物理现象<sup>[99,100]</sup>。未来可以构造光控时域超表面, 光和电磁的多物理场融合也将会在物理模型和信息系统中产生新的研究方向。

### 参考文献

- [1] CUI Tiejun, SMITH D R, and LIU Ruopeng. Metamaterials: Theory, Design, and Applications[M]. New York: Springer, 2010: 1-19.
- [2] SHELBY R A, SMITH D R, and SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79. doi: [10.1126/science.1058847](https://doi.org/10.1126/science.1058847).
- [3] PENDRY J B, SCHURIG D, and SMITH D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782. doi: [10.1126/science.1125907](https://doi.org/10.1126/science.1125907).
- [4] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980. doi: [10.1126/science.1133628](https://doi.org/10.1126/science.1133628).
- [5] CUMMER S A, POPA B I, SCHURIG D, et al. Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures[J]. *Physical Review E*, 2006, 74(3): 036621. doi: [10.1103/](https://doi.org/10.1103/)



- PhysRevE.74.036621.
- [6] CAI Wenshan, CHETTIAR U K, KILDISHEV A V, *et al.* Optical cloaking with metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(4): 224–227. doi: [10.1038/nphoton.2007.28](https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.28).
- [7] CHEN Hongsheng, WU B I, ZHANG Baile, *et al.* Electromagnetic wave interactions with a metamaterial cloak[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(6): 063903. doi: [10.1103/PhysRevLett.99.063903](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.063903).
- [8] RUAN Zhichao, YAN Min, NEFF C W, *et al.* Ideal cylindrical cloak: Perfect but sensitive to tiny perturbations[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(11): 113903. doi: [10.1103/PhysRevLett.99.113903](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.113903).
- [9] MILLER D A B. On perfect cloaking[J]. *Optics Express*, 2006, 14(25): 12457–12466. doi: [10.1364/OE.14.012457](https://doi.org/10.1364/OE.14.012457).
- [10] SILVEIRINHA M G, ALÛ A, and ENGHEA N. Parallel-plate metamaterials for cloaking structures[J]. *Physical Review E*, 2007, 75(3): 036603. doi: [10.1103/PhysRevE.75.036603](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.036603).
- [11] JIANG Weixiang, QIU Chengwei, HAN Tiancheng, *et al.* Broadband all-dielectric magnifying lens for far-field high-resolution imaging[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(48): 6963–6968. doi: [10.1002/adma.201303657](https://doi.org/10.1002/adma.201303657).
- [12] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966–3969. doi: [10.1103/PhysRevLett.85.3966](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3966).
- [13] WEN Dandan, YUE Fuyong, LI Guixin, *et al.* Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8241. doi: [10.1038/ncomms9241](https://doi.org/10.1038/ncomms9241).
- [14] ZHENG Guoxing, MÜHLENBERND H, KENNEY M, *et al.* Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308–312. doi: [10.1038/NNANO.2015.2](https://doi.org/10.1038/NNANO.2015.2).
- [15] LI Lianlin, CUI Tiejun, JI Wei, *et al.* Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 197. doi: [10.1038/s41467-017-00164-9](https://doi.org/10.1038/s41467-017-00164-9).
- [16] CHEN Tianhang, LI Jun, CAI Tong, *et al.* Design of a reconfigurable broadband greyscale multiplexed metasurface hologram[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(12): 3660–3665. doi: [10.1364/AO.386811](https://doi.org/10.1364/AO.386811).
- [17] HOLLOWAY C L, KUESTER E F, GORDON J A, *et al.* An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2012, 54(2): 10–35. doi: [10.1109/MAP.2012.6230714](https://doi.org/10.1109/MAP.2012.6230714).
- [18] POPA B I and CUMMER S A. Design and characterization of broadband acoustic composite metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2009, 80(17): 174303. doi: [10.1103/PhysRevB.80.174303](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.174303).
- [19] LIANG Zixian and LI J. Extreme acoustic metamaterial by coiling up space[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(11): 114301. doi: [10.1103/PhysRevLett.108.114301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.114301).
- [20] GARCÍA-CHOCANO V M, CHRISTENSEN J, and SÁNCHEZ-DEHESA J. Negative refraction and energy funneling by hyperbolic materials: An experimental demonstration in acoustics[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(14): 144301. doi: [10.1103/PhysRevLett.112.144301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.144301).
- [21] DÍAZ-RUBIO A and TRETAKOV S A. Acoustic metasurfaces for scattering-free anomalous reflection and refraction[J]. *Physical Review B*, 2017, 96(12): 125409. doi: [10.1103/PhysRevB.96.125409](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.125409).
- [22] KHORASANINEJAD M, CHEN Weiting, DEVLIN R C, *et al.* Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190–1194. doi: [10.1126/science.aaf6644](https://doi.org/10.1126/science.aaf6644).
- [23] HUANG Lingling, CHEN Xianzhong, MÜHLENBERND HOLGER, *et al.* Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808. doi: [10.1038/ncomms3808](https://doi.org/10.1038/ncomms3808).
- [24] EL MAKLIZI M, HENDAWY M, and SWILLAM M A. Super-focusing of visible and UV light using a meta surface[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(10): 105007. doi: [10.1088/2040-8978/16/10/105007](https://doi.org/10.1088/2040-8978/16/10/105007).
- [25] ZHANG Xiyue, LI Qi, LIU Feifei, *et al.* Controlling angular dispersions in optical metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 76. doi: [10.1038/s41377-020-0313-0](https://doi.org/10.1038/s41377-020-0313-0).
- [26] LI Ying, SHEN Xiangying, WU Zuhui, *et al.* Temperature-dependent transformation thermotics: From switchable thermal cloaks to macroscopic thermal diodes[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(19): 195503. doi: [10.1103/PhysRevLett.115.195503](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.195503).
- [27] NICOLAOU Z G and MOTTER A E. Mechanical metamaterials with negative compressibility transitions[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(7): 608–613. doi: [10.1038/NMAT3331](https://doi.org/10.1038/NMAT3331).
- [28] PAN Fei, LI Yilun, LI Zhaoyu, *et al.* 3D pixel mechanical metamaterials[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(25): 1900548. doi: [10.1002/adma.201900548](https://doi.org/10.1002/adma.201900548).
- [29] LI Yong, SHI Zhusheng, RONG Qi, *et al.* Effect of pin arrangement on formed shape with sparse multi-point flexible tool for creep age forming[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 140: 48–61. doi: [10.1016/j.ijmactools.2019.03.001](https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2019.03.001).
- [30] CUI Tiejun, QI Meiqing, WAN Xiang, *et al.* Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218. doi: [10.1038/lsa.2014.99](https://doi.org/10.1038/lsa.2014.99).
- [31] GAO Xi, YANG Wanli, MA Huifeng, *et al.* A reconfigurable broadband polarization converter based on

- an active metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(11): 6086–6095. doi: [10.1109/TAP.2018.2866636](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2866636).
- [32] RATNI B, DE LUSTRAC A, PIAU G P, *et al.* Active metasurface for reconfigurable reflectors[J]. *Applied Physics A*, 2018, 124(2): 104. doi: [10.1007/s00339-017-1502-4](https://doi.org/10.1007/s00339-017-1502-4).
- [33] SINGH R, AZAD A K, JIA Quanxi, *et al.* Thermal tunability in terahertz metamaterials fabricated on strontium titanate single-crystal substrates[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1230–1232. doi: [10.1364/OL.36.001230](https://doi.org/10.1364/OL.36.001230).
- [34] CESELYUSZKA N, SEČUJSKI M, ENGHETA N, *et al.* Temperature-controlled acoustic surface waves[J]. *New Journal of Physics*, 2016, 18(10): 103006. doi: [10.1088/1367-2630/18/10/103006](https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/10/103006).
- [35] MAO Min, LIANG Yaoyao, LIANG Ruisheng, *et al.* Dynamically temperature-voltage controlled multifunctional device based on VO<sub>2</sub> and graphene hybrid metamaterials: Perfect absorber and highly efficient polarization converter[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(8): 1101. doi: [10.3390/nano9081101](https://doi.org/10.3390/nano9081101).
- [36] BAI Lin, SONG Gangyong, JIANG Weixiang, *et al.* Acoustic tunable metamaterials based on anisotropic unit cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(23): 231902. doi: [10.1063/1.5125735](https://doi.org/10.1063/1.5125735).
- [37] HAND T and CUMMER S. Characterization of tunable metamaterial elements using MEMS switches[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007, 6: 401–404. doi: [10.1109/LAWP.2007.902807](https://doi.org/10.1109/LAWP.2007.902807).
- [38] FU Y H, LIU Aiqun, ZHU Weiming, *et al.* A micromachined reconfigurable metamaterial via reconfiguration of asymmetric split-ring resonators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(18): 3589–3594. doi: [10.1002/adfm.201101087](https://doi.org/10.1002/adfm.201101087).
- [39] JIANG Weixiang, LUO Chenyang, GE Shuo, *et al.* An optically controllable transformation-dc illusion device[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(31): 4628–4633. doi: [10.1002/adma.201500729](https://doi.org/10.1002/adma.201500729).
- [40] KAPITANOVA P V, MASLOVSKI S I, SHADRIVOV I V, *et al.* Controlling split-ring resonators with light[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(25): 251914. doi: [10.1063/1.3671617](https://doi.org/10.1063/1.3671617).
- [41] SHADRIVOV I V, KAPITANOVA P V, MASLOVSKI S I, *et al.* Metamaterials controlled with light[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(8): 083902. doi: [10.1103/PhysRevLett.109.083902](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.083902).
- [42] ZHANG Xin'ge, TANG Wenxuan, JIANG Weixiang, *et al.* Light-controllable digital coding metasurfaces[J]. *Advanced Science*, 2018, 5(11): 1801028. doi: [10.1002/advs.201801028](https://doi.org/10.1002/advs.201801028).
- [43] ZHANG Xin'ge, JIANG Weixiang, JIANG Haolin, *et al.* An optically driven digital metasurface for programming electromagnetic functions[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(3): 165–171. doi: [10.1038/s41928-020-0380-5](https://doi.org/10.1038/s41928-020-0380-5).
- [44] ZHANG Xin'ge, JIANG Weixiang, and CUI Tiejun. Frequency-dependent transmission-type digital coding metasurface controlled by light intensity[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(9): 091601. doi: [10.1063/1.5045718](https://doi.org/10.1063/1.5045718).
- [45] SUN Yalun, ZHANG Xin'ge, YU Qian, *et al.* Infrared-controlled programmable metasurface[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(11): 883–888. doi: [10.1016/j.scib.2020.03.016](https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.03.016).
- [46] GU Jianqiang, SINGH R, LIU Xiaojun, *et al.* Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1151. doi: [10.1038/ncomms2153](https://doi.org/10.1038/ncomms2153).
- [47] 王娅茹, 梁兰菊, 杨茂生, 等. 一种光控的电磁诱导透明太赫兹超材料[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041603. doi: [10.3788/LOP56.041603](https://doi.org/10.3788/LOP56.041603).
- WANG Yaru, LIANG Lanju, YANG Maosheng, *et al.* Terahertz metamaterial based on controllable electromagnetic induced transparency structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041603. doi: [10.3788/LOP56.041603](https://doi.org/10.3788/LOP56.041603).
- [48] GONG Cheng, SU Wenming, ZHANG Yang, *et al.* An active metamaterials controlled by structured light illumination[J]. *Optik*, 2018, 171: 204–209. doi: [10.1016/j.ijleo.2018.06.052](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.06.052).
- [49] 孟庆龙, 张艳, 张彬, 等. 光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(10): 101603. doi: [10.3788/LOP56.101603](https://doi.org/10.3788/LOP56.101603).
- MENG Qinglong, ZHANG Yan, ZHANG Bin, *et al.* Characteristics of optically tunable multi-band terahertz metamaterial absorber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 101603. doi: [10.3788/LOP56.101603](https://doi.org/10.3788/LOP56.101603).
- [50] 李达民, 袁苏, 杨荣草, 等. 动态光调控多态太赫兹超材料吸收器[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0816001. doi: [10.3788/AOS202040.0816001](https://doi.org/10.3788/AOS202040.0816001).
- LI Damin, YUAN Su, YANG Rongcao, *et al.* Dynamical optical-controlled multi-state THz metamaterial absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0816001. doi: [10.3788/AOS202040.0816001](https://doi.org/10.3788/AOS202040.0816001).
- [51] 刘婧, 沈京玲, 张存林, 等. 光调制超材料及其传感应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(4): 430–433. doi: [10.11972/j.issn.1001-9014.2020.04.006](https://doi.org/10.11972/j.issn.1001-9014.2020.04.006).
- LIU Jing, SHEN Jingling, ZHANG Cunlin, *et al.* Photo-excited tunable metamaterial and its sensing application[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(4): 430–433. doi: [10.11972/j.issn.1001-9014.2020.04.006](https://doi.org/10.11972/j.issn.1001-9014.2020.04.006).
- [52] LI Jie, LI Jitao, ZHANG Yating, *et al.* All-optical switchable terahertz spin-photonic devices based on

- vanadium dioxide integrated metasurfaces[J]. *Optics Communications*, 2020, 460: 124986. doi: [10.1016/j.optcom.2019.124986](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124986).
- [53] GUO Peijun, SCHALLER R D, KETTERSON J B, *et al.* Ultrafast switching of tunable infrared plasmons in indium tin oxide nanorod arrays with large absolute amplitude[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(4): 267–273. doi: [10.1038/NPHOTON.2016.14](https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2016.14).
- [54] ALAM M Z, SCHULZ S A, UPHAM J, *et al.* Large optical nonlinearity of nanoantennas coupled to an epsilon-near-zero material[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(2): 79–83. doi: [10.1038/s41566-017-0089-9](https://doi.org/10.1038/s41566-017-0089-9).
- [55] YANG Yuanmu, 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. doi: [10.1038/NPHOTON.2017.64](https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2017.64).
- [56] DAI Yunyun, XIA Yuyu, JIANG Tao, *et al.* Dynamical tuning of graphene plasmonic resonances by ultraviolet illuminations[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(6): 1701081. doi: [10.1002/adom.201701081](https://doi.org/10.1002/adom.201701081).
- [57] AKSELROD G M, MING Tian, ARGYROPOULOS C, *et al.* Leveraging nanocavity harmonics for control of optical processes in 2D semiconductors[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5): 3578–3584. doi: [10.1021/acs.nanolett.5b01062](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01062).
- [58] YI Fei, REN Mingliang, REED J C, *et al.* Optomechanical enhancement of doubly resonant 2D optical nonlinearity[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(3): 1631–1636. doi: [10.1021/acs.nanolett.5b04448](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b04448).
- [59] WANG Zhuo, DONG Zhaogang, GU Yinghong, *et al.* Giant photoluminescence enhancement in tungsten-diselenide-gold plasmonic hybrid structures[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11283. doi: [10.1038/ncomms11283](https://doi.org/10.1038/ncomms11283).
- [60] WANG Zhuo, DONG Zhaogang, ZHU Hai, *et al.* Selectively plasmon-enhanced second-harmonic generation from monolayer tungsten diselenide on flexible substrates[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(2): 1859–1867. doi: [10.1021/acsnano.7b08682](https://doi.org/10.1021/acsnano.7b08682).
- [61] GHOLIPOUR B, ZHANG Jianfa, MACDONALD K F, *et al.* An all-optical, non-volatile, bidirectional, phase-change meta-switch[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(22): 3050–3054. doi: [10.1002/adma.201300588](https://doi.org/10.1002/adma.201300588).
- [62] WANG Qian, ROGERS E T F, GHOLIPOUR B, *et al.* Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 60–65. doi: [10.1038/NPHOTON.2015.247](https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2015.247).
- [63] YIN Xinghui, STEINLE T, HUANG Lingling, *et al.* Beam switching and bifocal zoom lensing using active plasmonic metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17016. doi: [10.1038/lssa.2017.16](https://doi.org/10.1038/lssa.2017.16).
- [64] GHOLIPOUR B, KARVOUNIS A, YIN Jun, *et al.* Phase-change-driven dielectric-plasmonic transitions in chalcogenide metasurfaces[J]. *NPG Asia Materials*, 2018, 10(6): 533–539. doi: [10.1038/s41427-018-0043-4](https://doi.org/10.1038/s41427-018-0043-4).
- [65] GAO Yisheng, HUANG Can, HAO Chenglong, *et al.* Lead halide perovskite nanostructures for dynamic color display[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(9): 8847–8854. doi: [10.1021/acsnano.8b02425](https://doi.org/10.1021/acsnano.8b02425).
- [66] SHCHERBAKOV M R, VABISHCHEVICH P P, SHOROKHOV A S, *et al.* Ultrafast all-optical switching with magnetic resonances in nonlinear dielectric nanostructures[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(10): 6985–6990. doi: [10.1021/acs.nanolett.5b02989](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02989).
- [67] SHCHERBAKOV M R, LIU Sheng, ZUBYUK V V, *et al.* Ultrafast all-optical tuning of direct-gap semiconductor metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 17. doi: [10.1038/s41467-017-00019-3](https://doi.org/10.1038/s41467-017-00019-3).
- [68] ZHANG Jianfa, MACDONALD K F, and ZHELUDEV N I. Controlling light-with-light without nonlinearity[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(7): e18. doi: [10.1038/lssa.2012.18](https://doi.org/10.1038/lssa.2012.18).
- [69] RAHM M, SCHURIG D, ROBERTS D A, *et al.* Design of electromagnetic cloaks and concentrators using form-invariant coordinate transformations of Maxwell's equations[J]. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 2008, 6(1): 87–95. doi: [10.1016/j.photonics.2007.07.013](https://doi.org/10.1016/j.photonics.2007.07.013).
- [70] LUO Yu, CHEN Hongsheng, ZHANG Jingjing, *et al.* Design and analytical full-wave validation of the invisibility cloaks, concentrators, and field rotators created with a general class of transformations[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(12): 125127. doi: [10.1103/PhysRevB.77.125127](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.125127).
- [71] CHEN Huanyang and CHAN C T. Transformation media that rotate electromagnetic fields[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(24): 241105. doi: [10.1063/1.2748302](https://doi.org/10.1063/1.2748302).
- [72] YANG Fan, MEI Zhonglei, JIN Tianyu, *et al.* dc Electric invisibility cloak[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(5): 053902. doi: [10.1103/PhysRevLett.109.053902](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.053902).
- [73] MA Qian, MEI Zhonglei, ZHU Shoukui, *et al.* Experiments on active cloaking and illusion for Laplace equation[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(17): 173901. doi: [10.1103/PhysRevLett.111.173901](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.173901).
- [74] MOCCIA M, LIU Shuo, WU Ruiyuan, *et al.* Coding metasurfaces for diffuse scattering: Scaling laws, bounds, and suboptimal design[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(19): 1700455. doi: [10.1002/adom.201700455](https://doi.org/10.1002/adom.201700455).
- [75] LIU Shuo, CUI Tiejun, XU Quan, *et al.* Anisotropic coding metamaterials and their powerful manipulation of differently polarized terahertz waves[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(5): e16076. doi: [10.1038/lssa.2016.76](https://doi.org/10.1038/lssa.2016.76).
- [76] SARABANDI K and BEHDAD N. A frequency selective



- surface with miniaturized elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(5): 1239–1245. doi: [10.1109/TAP.2007.895567](https://doi.org/10.1109/TAP.2007.895567).
- [77] DEBUS C and BOLIVAR P H. Frequency selective surfaces for high sensitivity terahertz sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(18): 184102. doi: [10.1063/1.2805016](https://doi.org/10.1063/1.2805016).
- [78] HUSSEIN M N, ZHOU Jiafeng, HUANG Yi, *et al.* A miniaturized low-profile multilayer frequency-selective surface insensitive to surrounding dielectric materials[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(12): 4851–4860. doi: [10.1109/TMTT.2017.2709317](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2709317).
- [79] GHOSH S and SRIVASTAVA K V. Broadband polarization-insensitive tunable frequency selective surface for wideband shielding[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(1): 166–172. doi: [10.1109/TEMC.2017.2706359](https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2706359).
- [80] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402. doi: [10.1103/PhysRevLett.100.207402](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402).
- [81] LI Aobo, KIM S, LUO Yong, *et al.* High-power transistor-based tunable and switchable metasurface absorber[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(8): 2810–2818. doi: [10.1109/TMTT.2017.2681650](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2681650).
- [82] AKSELROD G M, HUANG Jiani, HOANG T B, *et al.* Large-area metasurface perfect absorbers from visible to near-infrared[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(48): 8028–8034. doi: [10.1002/adma.201503281](https://doi.org/10.1002/adma.201503281).
- [83] COSTA F and MONORCHIO A. A frequency selective radome with wideband absorbing properties[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(6): 2740–2747. doi: [10.1109/TAP.2012.2194640](https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2194640).
- [84] MEI Peng, LIN Xianqi, YU Jiawei, *et al.* Development of a low radar cross section antenna with band-notched absorber[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(2): 582–589. doi: [10.1109/TAP.2017.2780903](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2780903).
- [85] KUMAR P, KEDAR A, and SINGH A K. Design and development of low-cost low sidelobe level slotted waveguide antenna array in X-Band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(11): 4723–4731. doi: [10.1109/TAP.2015.2475632](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2475632).
- [86] KEIZER W P M N. Fast low-sidelobe synthesis for large planar array antennas utilizing successive fast Fourier transforms of the array factor[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(3): 715–722. doi: [10.1109/TAP.2007.891511](https://doi.org/10.1109/TAP.2007.891511).
- [87] HARRIS S E. Electromagnetically induced transparency[J]. *Physics Today*, 1997, 50(7): 36–42. doi: [10.1063/1.881806](https://doi.org/10.1063/1.881806).
- [88] OLIVERI G, WERNER D H, and MASSA A. Reconfigurable electromagnetics through metamaterials—a review[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 103(7): 1034–1056. doi: [10.1109/JPROC.2015.2394292](https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2394292).
- [89] NEMATI A, WANG Qian, HONG Minghui, *et al.* Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(5): 180009. doi: [10.29026/oea.2018.180009](https://doi.org/10.29026/oea.2018.180009).
- [90] 宋健, 李敏华, 董建峰. 基于集总元件的超材料吸波器研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(11): 114–122. doi: [10.11896/j.issn.1005-023X.2017.021.016](https://doi.org/10.11896/j.issn.1005-023X.2017.021.016).
- SONG Jian, LI Minhua, and DONG Jianfeng. Progress in metamaterial absorber based on lumped elements[J]. *Materials Reports*, 2017, 31(11): 114–122. doi: [10.11896/j.issn.1005-023X.2017.021.016](https://doi.org/10.11896/j.issn.1005-023X.2017.021.016).
- [91] HE Qiong, SUN Shulin, and ZHOU Lei. Tunable/reconfigurable metasurfaces: Physics and applications[J]. *Research*, 2019, 2019: 1849272. doi: [10.34133/2019/1849272](https://doi.org/10.34133/2019/1849272).
- [92] 崔铁军, 吴浩天, 刘硕. 信息超材料研究进展[J]. 物理学报, 2020, 69(15): 158101. doi: [10.7498/aps.69.20200246](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200246).
- CUI Tiejun, WU Haotian, and LIU Shuo. Research progress of information metamaterials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(15): 158101. doi: [10.7498/aps.69.20200246](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200246).
- [93] 崔铁军. 电磁超材料——从等效媒质到现场可编程系统[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(10): 1427–1461. doi: [10.1360/SSI-2020-0123](https://doi.org/10.1360/SSI-2020-0123).
- CUI Tiejun. Electromagnetic metamaterials—from effective media to field programmable systems[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2020, 50(10): 1427–1461. doi: [10.1360/SSI-2020-0123](https://doi.org/10.1360/SSI-2020-0123).
- [94] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 可重构电磁超表面及其应用研究进展[J]. 雷达学报, 2021, 10(2): 206–219. doi: [10.12000/JR20137](https://doi.org/10.12000/JR20137).
- YANG Huanhuan, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Recent advances in reconfigurable metasurfaces and their applications[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(2): 206–219. doi: [10.12000/JR20137](https://doi.org/10.12000/JR20137).
- [95] LI Lianlin and CUI Tiejun. Information metamaterials - from effective media to real-time information processing systems[J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(5): 703–724. doi: [10.1515/nanoph-2019-0006](https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0006).
- [96] MA Qian, BAI Guodong, JING Hongbo, *et al.* Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 98. doi: [10.1038/s41377-019-0205-3](https://doi.org/10.1038/s41377-019-0205-3).
- [97] ZHAO Jie, YANG Xi, DAI Junyan, *et al.* Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems[J]. *National Science Review*, 2019, 6(2): 231–238. doi: [10.1093/nsr/nwy135](https://doi.org/10.1093/nsr/nwy135).
- [98] DAI Junyan, TANG Wankai, ZHAO Jie, *et al.* Wireless communications through a simplified architecture based on time-domain digital coding metasurface[J]. *Advanced*

*Materials Technologies*, 2019, 4(7): 1900044. doi: [10.1002/admt.201900044](https://doi.org/10.1002/admt.201900044).

- [99] ZHANG Lei, CHEN Xiaoqing, LIU Shuo, *et al.* Space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4334. doi: [10.1038/s41467-](https://doi.org/10.1038/s41467-018-06802-0)

[018-06802-0](https://doi.org/10.1038/s41467-018-06802-0).

- [100] ZHANG Lei, CHEN Xiaoqing, SHAO Ruiwen, *et al.* Breaking reciprocity with space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(41): 1904069. doi: [10.1002/adma.201904069](https://doi.org/10.1002/adma.201904069).

### 作者简介



柏 林(1993–), 女, 吉林辽源人, 东南大学博士研究生。主要研究方向为声学超材料、声电结合超材料、光控电磁超表面等。目前已发表SCI论文8篇, 其中第一作者4篇。多次参加国内外学术会议。

E-mail: [mustbl@163.com](mailto:mustbl@163.com)

张信歌(1991–), 男, 河南信阳人, 东南大学博士研究生, 主要研究方向为电磁超表面、基于超表面的新型功能器件和通信系统。目前以第一作者身份发表了9篇SCI论文, 包括1篇《Nature Electronics》、2篇《Advanced Science》等。多次在国内外学术会议上做口头报告, 获第1届全国超材料大会“研究生学术新人奖”。

E-mail: [xinge.zhang@qq.com](mailto:xinge.zhang@qq.com)



蒋卫祥(1981–), 男, 江苏东台人, 东南大学青年首席教授、博士生导师, 中国电子学会高级会员、“青年科学家”俱乐部成员、中国材料学会超材料分会理事、IEEE Senior Member。2010年于东南大学毫米波国家重点实验室博士毕业后留校任教, 主要研究方向为变换光学、透镜天线及可编程超表面。在《Nature Electronics》、《Advanced Materials》等学术刊物上发表SCI论文110余篇, 合作撰写英文专著、中文专著各一本, 研究成果曾多次被国际学术期刊选为“研究亮点”, 所发表论文被国内外同行正面引用4300余次。曾获2011年教育部自然科学一等奖(排二), 2014年国家自然科学二等奖(排三)、第十七届江苏省青年科技奖和2018年国家自然科学二等奖(排三), 获国家自然科学基金优秀青年基金资助。

后留校任教, 主要研究方向为变换光学、透镜天线及可编程超表面。在《Nature Electronics》、《Advanced Materials》等学术刊物上发表SCI论文110余篇, 合作撰写英文专著、中文专著各一本, 研究成果曾多次被国际学术期刊选为“研究亮点”, 所发表论文被国内外同行正面引用4300余次。曾获2011年教育部自然科学一等奖(排二), 2014年国家自然科学二等奖(排三)、第十七届江苏省青年科技奖和2018年国家自然科学二等奖(排三), 获国家自然科学基金优秀青年基金资助。

E-mail: [wxjiang81@seu.edu.cn](mailto:wxjiang81@seu.edu.cn)



崔铁军(1965–), 男, 中国科学院院士, 东南大学首席教授, IEEE Fellow, 研究方向为电磁超材料和计算电磁学。1993年获西安电子科技大学博士学位, 1995–2002年先后任职德国洪堡学者、美国UIUC博士后和研究科学家。

2001年受聘东南大学长江学者特聘教授; 2002年获得国家杰出青年科学基金。2014年创建信息超材料新方向。发表学术论文500余篇, 被引用35000余次、H因子93(谷歌学术)。研究成果入选2010年中国科学十大进展、2016年中国光学重要成果; 获2011年教育部自然科学一等奖、2014年国家自然科学二等奖、2016年军队科学技术进步一等奖、2018年国家自然科学二等奖。

E-mail: [tjcui@seu.edu.cn](mailto:tjcui@seu.edu.cn)