

雷达波镜面反射特性实时可控结构研究进展

孙伟彬^{1,2} 姚石磊² 张啸雨¹ 李慧¹ 元旭津^{1*} 王岩² 孙新² 殷红成²

1.北京理工大学 北京 10081

2.散射辐射全国重点实验室 北京 100039

DOI:10.12238/ast.v1i1.13705

[摘要] 随着传感器技术的迅速发展,装备面临日益严峻的探测与监视挑战,非隐身装备在对抗环境中暴露的风险加剧。因此,迫切需要发展可控的电磁技术以减小雷达特征,提高隐身性能。传统吸波结构因其响应固定限制了其适应性,因此引入实时可逆调控材料结构来实现动态调控的策略已逐渐成为研究热点。作为电磁散射的主要作用形式之一,材料结构的雷达波镜面反射特性在目标特性形成机制起到了重要作用。该研究概述了近期利用电调节、机械调节、可调材料等形式进行实时电磁波镜面反射特性调控的机理研究进展。雷达波镜面反射特性实时可控材料能够作为智能雷达特征对抗装备的基础模块,利用人工智能及大数据技术,提升现代装备的雷达波伪装及对抗能力。

[关键词] 材料结构; 目标特性; 动态可调; 特征对抗

中图分类号: TB381 **文献标识码:** A

Advances in Real-Time Tunable Structures for Controlling Specular Reflection of Radar Waves

Weibin Sun^{1,2}, Shilei Yao², Xiaoyu Zhang¹, Hui Li², Xujin Yuan^{1*}, Yan Wang², Xin Sun², Hongcheng Yin²

1 Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

2 National Key Laboratory of Scattering and Radiation, Beijing 100039

[Abstract] With the rapid advancement of sensor technology, military equipment is facing increasingly severe challenges in detection and surveillance, and the exposure risk of non-stealth platforms in contested environments is significantly rising. Consequently, there is an urgent need to develop tunable electromagnetic technologies to reduce radar signatures and enhance stealth performance. Traditional wave-absorbing structures, due to their fixed response characteristics, are limited in adaptability. In response, the introduction of real-time and reversibly tunable material structures has emerged as a research focus for achieving dynamic regulation. As one of the primary forms of electromagnetic scattering, the specular reflection characteristics of radar waves in material structures play a crucial role in shaping the radar signature of a target. This paper reviews recent advances in the mechanism studies of real-time tuning of radar wave specular reflection characteristics, including approaches based on electrical tuning, mechanical modulation, and reconfigurable materials. Real-time tunable materials for radar wave specular reflection can serve as foundational modules for intelligent radar signature management systems. Leveraging artificial intelligence and big data technologies, such systems can significantly enhance the radar camouflage and countermeasure capabilities of modern platforms.

[Key words] Material Structure; Target Signature Characteristics; Real-Time Tunable; Signature Countermeasure

1 引言

基于现代传感器平台的目标探测识别和监视技术不断发展,对舰船、车辆等装备的安全和生存能力形成了严峻的挑战,特别是在对抗条件下,非隐身装备可能会遭受较大的损失率。雷达特征对抗技术在整个现代冲突对抗体系中发挥着重要作用,而隐身伪装装备已经成为对抗与防御系统中不可或缺的组成部分。然而,对现有装备隐身伪装机理认识的

不足使其难以满足对抗现代雷达探测监视系统的需求。为了应对这一挑战,迫切需要发展新型的复杂电磁场调制机理及技术,以实现装备的低可探测性,并增强其与敌方探测监视系统的对抗能力。

雷达隐身机理主要通过调控材料结构对雷达波的反射作用,降低特定观察方向上的雷达波反射强度,从而减小雷达散射截面,降低装备被探测的可能性。然而,传统吸波结

构的固定响应特性已无法满足现代电子战的需求，尤其是智能化需求日益突出。因此，发展具有可调功能的电磁吸波结构变得十分迫切。

传统元表面的特性由构成的谐振单元几何参数、介质参数和周围环境所决定。一旦超表面针对某一功能或者某一频点结构设计成型后，其调控能力也随之固定下来。然而，随着当今社会的发展，单一功能器件很难满足需求，例如，在波束赋形、波束扫描、近场聚焦、极化调控等领域都需要实时动态调控。因此，如何让元表面具有动态调节电磁波的能力，是当前材料领域一个值得深入研究的课题。

可调材料，顾名思义是一种在材料单元中引入可调控材料及结构，从而实现结构的电磁特性、力学承载特性、声学特性或热学特性的实时可逆调控。基于现代电磁波可调材料结构能够实现电磁波反射的多种可调属性，包括反射幅度、反射相位、极化方式等。近十年来，基于频率选择表面的主动雷达吸波结构得到了学者们大量的研究和讨论，目前主流的设计方法大致上可以分为三类：电子调节、机械调节和可控材料调节。其中，电子调节由于其开关速度快、具有宽带调节设计潜力、尺寸紧凑、低成本等因素被更广泛的研究和讨论。因此，本文旨在概述和分析可控材料在雷达波镜面反射特性调控方面的近期研究进展，以及基于电调节、机械调节、可调材料等机理形式的实时电磁波镜面反射调控技术。这些研究成果将为智能雷达特征对抗装备的发展提供重要支撑，并借助人工智能和大数据技术，为现代装备的雷达波伪装和对抗能力提供新的思路 and 可能性。

2 可调电磁材料结构研究进展

选择能够在电磁材料结构增强设备中实现可调性的物理机制在其设计过程中具有根本的重要性，因为它直接影响到可实现的性能、成本、制造复杂性、可扩展性以及最终架构的灵活性。早期的可重构材料受到其“静态”对应物结构的启发，主要依赖于内部可调谐器件（例如开关和变容管）的引入。更具体地说，许多可重构材料最初是基于共同的构建模块，如劈裂环谐振器^[1-2]和互补劈裂环谐振器^[3]，其特性通过电压控制电容器或电阻进行适当调整^[2,4]。最近研究人员提出了几种不同的物理原理来实现可重构性，从而产生了大量的技术选择。例如，可调集总元件^[4]、可控液晶^[5]（通过热、光学和电偏置）、石墨烯^[6]等。

2.1 基于电子器件调节的可重构吸波电磁材料

目前，基于电调节的主动吸波结构一般是通过在设计好的频率选择表面添加肖特基二极管、变容二极管等有源器件，并通过连接外加偏置电压对整体结构实现调控。常见的一种采用电调节的可调吸波结构是可切换的吸收器/反射器，这种结构在有源器件的一种偏置状态下表现出对电磁波的吸收效果，另一种偏置状态下则表现出对电磁波的反射效果，这

种同时具备吸收和反射效果的结构在隐身系统中具有巨大的应用前景。

最初文献中报道了一些在窄频范围内可切换的吸收/反射器。2014年，M. Yoo 和 S. Lim 设计了一种在单波段可切换的吸收/反射结构^[7]。如图1(a)所示，晶胞几何形状由在接地电介质衬底上以周期性图案印刷的电场驱动谐振器组成，电介质为FR4（介电常数为4.4，损耗角正切为0.02），金属图案为铜元素。他们设计并制作了两种单胞形式，其中ELC谐振器中间有中心金属线连接时被记为ON状态，金属线断开时记为OFF状态。图1(c)显示了结构在两种工作状态下的反射率情况，在10.50GHz左右，结构在ON状态有强烈的吸收峰，OFF状态为全反射。

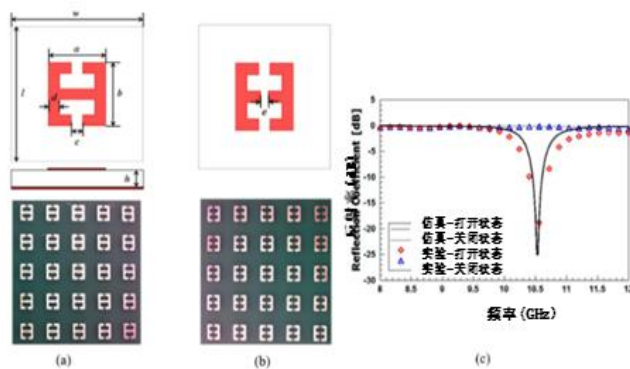


图1 M. Yoo 和 S. Lim 等人设计的可切换的吸收/反射器：(a) 单元结构 ON 状态；(b) 单元结构 OFF 状态；(c) 仿真和实验对比

后来，同组设计者通过半导体器件肖特基二极管实现了上述概念，整个设计类似于原来的图案形^[8]。图2(a-c)说明了所设计的单元，二极管在正向偏置时有一个小电阻，相当于短路，使得结构在10.79GHz处有窄带的吸收作用。相反，二极管在反向偏置时相当于一个大电容，使得结构在反向偏置时表现出全反射的效果。

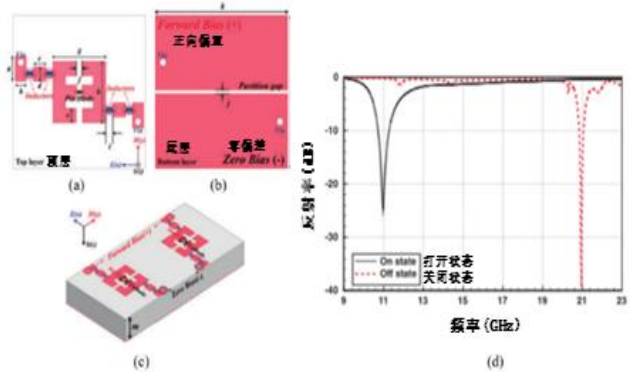


图2 M. Yoo 和 S. Lim 等人改进的可切换的吸收/反射器：(a) 单元结构俯视图；(b) 单元结构背板；(c) 主视图；(d) 不同开关状态下的反射率。

结构中的肖特基二极管需要外接直流电源进行供电。当需要二极管正偏时，需要在每一个二极管上提供高于阈值的电压，反之则需要施加零或固定的负电压使二极管在反向状态下工作。不同的二极管在不同的额定电流下会表现出不同的电阻值（导通时）和电容值（关断时），这可以从它们的数据表中获得。因此，在进行二极管选型时，合理选择偏置电压和电流是很关键的。除此之外，由于二极管连接在频率选择表面几何结构中的周期性图案上，电压源不可能单独连接在每个二极管上。所以往往需要在整体阵列两端设计一个专用的偏置电路网络拓补，以便二极管通过串联或并联相互连接，并且可以从远程位置提供所需的电压。

2010 年，南京大学的 B. Zhu 等人设计了一种用于不同极化的电磁波反射/吸收器^[9]，这种结构中的偏置网络由金属过孔提供，两组谐振器在晶胞中以正交方向图案化，每组图案由通过肖特基二极管耦合在一起的两个相同圆弧组成，如图 3(a-b)所示。在实际测试中，所提出的设计是在 FR4 电介质衬底上进行制备，而金属图案由铜制成的，当二极管工作在零偏压下处于关断状态时，结构在 3.34GHz 具有吸收峰。相反，当增加偏置电压的同时吸收率下降，结构随后切换到反射模式，如图 3(c)所示。

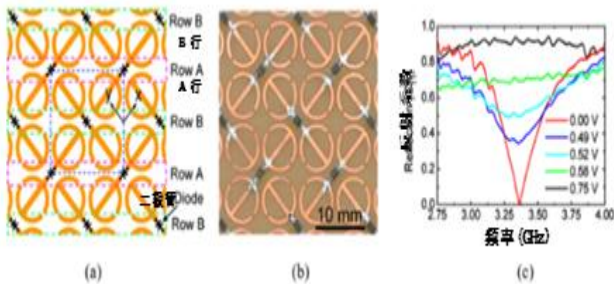


图 3 B. Zhu 等人设计的用于不同极化的电磁波反射/吸收器：
(a)单元结构仿真图；(b)制作的实验样品；(c)实验结果。

2016 年，Ghosh 和 Srivastava^[10]基于简化的拓扑结构和偏置网络设计了另一种偏振无关的可切换吸收器/反射器。图 4(a)展示了所提出结构的俯视图和侧视图，该几何结构由通过对角线互相连接的周期性方环组成，其中肖特基二极管对称地安装在对角线上。在正向偏置期间，二极管表现出小电阻（与寄生电感串联），可被视为短路线，这时结构表现出完美的反射行为。在反向偏置下，二极管提供了大的电容，使得结构在 3.71GHz 处有明显的吸收效果，接通和断开状态的等效电路模型分别如图 4(b)所示。

为了验证结构的功能性，他们加工了相应的样品并进行了测试，实际样品是一个 4×4 的阵列的 BAP70-03 肖特基二极管对称地安装在结构中的间隙上。阵列的两侧印刷有两条垂直金属线，并在远离这些垂直线的方形环上绘制宽度较窄的水平金属线，这种拓补偏置配置使得所有肖特基二极管的

阴极和阳极分别与左侧和右侧偏置线同时连接。此外，具有 3.62GHz 自谐振频率的 12nH 集总电感器被安装在连续的金属线之间，以获得所需的射频隔离。如图 4(c)所示，样品测试结果证明了仿真的有效性。当二极管处于 ON 和 OFF 状态时，如图 4(d)所示该结构分别在 3.70 GHz 处表现出全反射和全吸收。

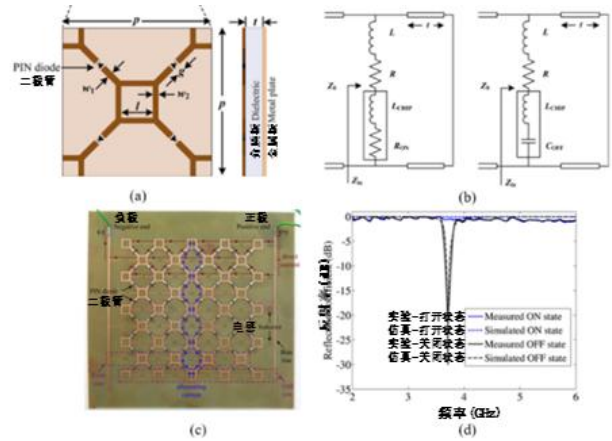


图 4 Ghosh 和 Srivastava 设计的一种偏振无关的可切换吸收器/反射器：(a)单元结构的俯视图和侧视图；(b)等效电路模型；(c)样品；(d)仿真和实验对比。

上述几篇文献所报道的可调吸波结构的适应带宽都比较窄，这限制了其在隐身装备中的进一步应用。近几年来又陆续出现了一些适应于宽频带范围的可调节电磁吸波结构案例。

2015 年，P. Kong 等人^[11]提出了一种适应于 C 波段的宽带可调电磁吸波结构，这种结构由两个在 FR4 电介质上图案化的同心开口环组成，蜂窝间隔件用作接地平面和电介质之间的隔离层。整体的结构设计如图 5(a-b)所示，集总电阻器和可切换肖特基二极管以并联方式安装在外环的两个开口上。当调节施加在结构整体上的偏置电压时，结构在 4—8GHz 频段范围内的反射率在 0—15dB 之间连续变化，如图 5(c)所示。

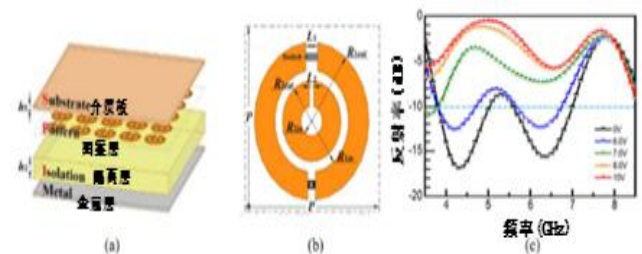


图 5 P. Kong 等人提出的适应于 C 波段的宽带可调电磁吸波结构：(a)单元结构的主视图；(b)单元结构的俯视图；(c)实验结果。

2016 年，J.L. Li 等人^[12]设计、制造和分析了一种应用于 1-12GHz 频率范围的可调谐宽带雷达吸收器。如图 6(a)所示，

所设计的结构表面为两个对称布置的半圆形金属, 一组并联的电阻和电容加载在两个金属片之间, 结构中用蜂窝将地板和上册介质进行隔离。实际加工制备的样品如图 6(b)所示, 选用的 BAP 70-03 肖特基二极管代替并联的电阻和电容器。实验采用矢量网络分析仪在微波暗室中进行测量, 当调节结构整体的偏置电压在 0—0.95V 之间变化时, 结构的反射率相应地在 0—10dB 之间进行连续变化, 如图 6(c)所示。

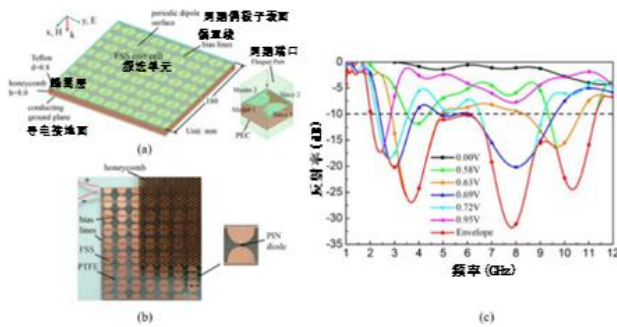


图 6 J.L. Li 等人提出的适用于 C 波段的宽带可调电磁吸波结构: (a)单元结构的主视图; (b)样件照片; (c)实验结果。

上述案例中的结构都对电磁波的极化方向敏感, 2016 年, Ghosh 和 Srivastava^[10]设计了一种应用于 C 波段的偏振不敏感的宽带可切换吸收体/反射器, 他们在原有的窄带可切换吸收/反射器上做以扩展, 将集总电阻器安装在方环拓扑中的间隙上, 并在接地平面和 FR4 电介质中引入了空气间隔物, 以保持四分之一波长条件。这种结构由于中心对称的图案设计而具有极化不敏感的优异性能。结构的示意图和加工实物如图 7(a-b)所示。当二极管在 OFF 状态下, 结构在 3.48—8.04GHz 范围内具有-10dB 以下的吸收效果, 当二极管在 ON 状态下, 结构达到全反射, 如图 7(c)所示。

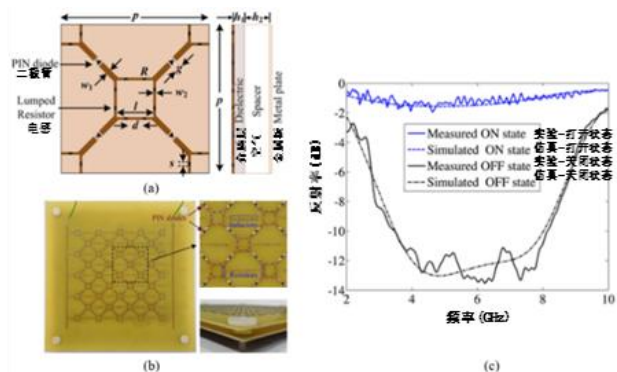


图 7 Ghosh 和 Srivastava 设计的偏振不敏感的宽带可切换吸收体/反射器: (a)单元结构的主视图; (b)样件照片; (c)实验结果。

同年, 华中科技大学的 H. Wang 等人^[13]设计并制作了一种偏振不敏感的可调吸波结构, 该结构在低频 1.6—8GHz 范围内有-8dB 的可调节幅度范围, 如图 8 所示。同组的 Y. He 等人^[14]提出了一种适用于 C 和 X 波段的偏振不敏感可调电

磁吸波结构。他们通过设计中心对称的扇形图案显著降低了结构对正常入射微波的不同极化的敏感性。该结构实现了从 4.6—13GHz 的可调吸收性能。

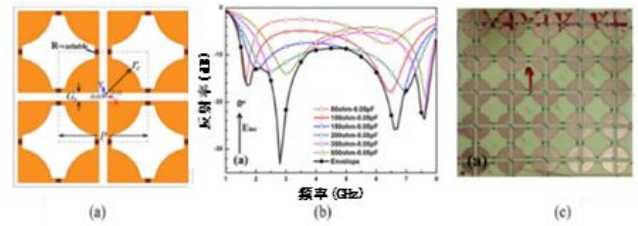


图 8 H. Wang 等人设计的偏振不敏感的宽带可调吸波结构:

(a)单元结构的主视图; (b)实验结果; (c)样件照片。

除了上述案例之外, 国内研究者也提出了宽带可调电磁吸波结构设计思路。2019 年, 南京航空航天大学的 H.Y. Li^[15]提出了一种具有多功能特性的宽带偏振不敏感吸收器。为了同时实现可切换和偏振不敏感的特性, 将四个类似的基本单元进行组合, 开发了一种超单元配置。该结构的独特之处在于它具有在多种工作状态之间切换的实时和多功能能力。2020 年, 同组的 H.W. Chen^[16]提出了一种适用于 7.5—18GHz 的超宽带反射/吸收可切换结构, 通过设计双层可调节结构的方式, 更大程度上拓宽了结构的吸波带宽。同年, 中国科学院 B. Zhao^[17]设计了一种基于有源频率选择表面的宽带偏振无关可调谐吸收体。通过设计中心对称的叶片式结构将偏振敏感性降到最低, 结构具有 8.5—18.2GHz 的宽频带应用范围。2023 年, 中南大学的 Y.C. Han^[18]设计了一种可重构吸收强度的柔性超表面吸收体, 由于使用了超薄聚酰亚胺衬底, 这种结构比刚性设计具有优越的灵活性, 结构具有 5.6—16.98 GHz 的宽频工作范围。

上述文献报道的结构设计全部适用于 C 波段及其以上的中高频段, 较少研究关注可调电磁吸波结构在低频段的应用。近年来, 一些研究者们针对可调吸波结构在超高频段的应用进行了探究。2020 年, Y.L. Zhang^[19]等人设计并实现了一种适用于超高频带的双面双调谐有源频率选择表面吸收器。如图 9(a)是他们所提出结构的示意图, 肖特基二极管和变容二极管分别布置在顶层介质板的上下两面, 通过改变两种有源器件的工作状态, 结构可以分别实现 0.4—0.75GHz 和 0.8—2.5GHz 在-10dB 以下的吸收效果。他们制作并测试了实验样品, 实验结果与仿真结果吻合良好。2023 年, 南京大学的 Z.H. Wu 等人^[20]提出了一种适用于 0.78—4.62GHz 的可调电磁吸波结构。该结构同样通过调节肖特基二极管的偏置电流来改变引入的等效电阻的值, 从而对结构的整体反射率进行调节。

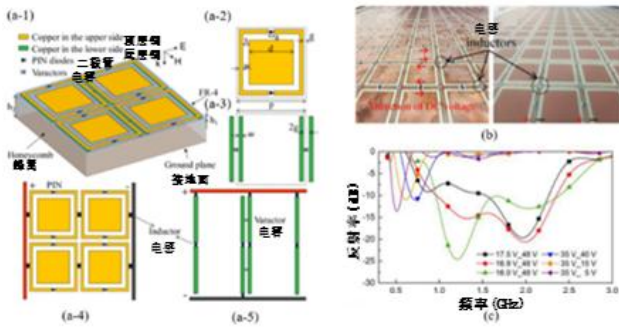


图9 Y.L. Zhang 等人设计的低频段宽带可调吸波结构: (a)单元结构的主视图; (b)样品照片; (c)实验结果

2.2 基于机械调节的可重构吸波电磁材料

除了采用电控的手段来进行微波电磁结构的调控,一些研究者探究了采用应力-应变、压力等机械调节方法来实现对微波结构的可控调节。2015年 F.L. Zhang 等人^[21]提出了一种可机械拉伸和可调谐材料吸波体。这种可调节吸波体由堆叠在薄导电橡胶层上的电谐振器组成。图 10(a)展示了实验所设计的装置示意图,图 10(b)(c)分别展示了实际制造的装置样式。当电磁波入射到几何结构上时,在陶瓷介电砖内部产生振荡磁偶极子,磁共振使得结构在无应力作用下在 11.15GHz 处有一个明显的吸收峰。

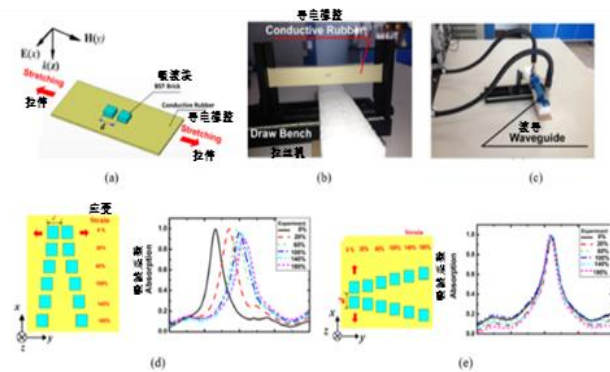


图 10 F.L. Zhang 等人提出的可机械拉伸和可调谐材料吸波体: (a)装置示意图; (b)、(c)实际制造的装置样式; (d)机械应变和距离的关系; (e)实验结果

当沿着磁场所在 y 方向施加单向拉应力时,如图 10(d)所示,定义机械应变为两个电谐振器之前距离百分比变化,当机械应变从 0% 变化到 180% 时,结构的吸收峰值从 11.15GHz 变化到 11.56GHz,产生了 410MHz 的频移,显示了实验施加应力和吸波频移之间的关系。相应的,他们还研究了在电场 x 方向上添加单轴应力对吸收效果的影响,如图 10(e)所示,实验发现,在这种方向下,应力变化对吸收几乎没有影响。这表明所提出的机械可调电磁吸波结构在不同极化方向下具有选择性。

2018 年 H.J. Jeong 等人^[22]提出了一种通过机械手段控

制基板厚度从而调控电磁吸收频率的可调结构。图 11(a)是他们提出的可调吸收体示意图,该结构由两个 FR4 介质基板组成,矩形贴片设计在上部 FR4 介质基板的顶部,接地平板设计在底部 FR4 基板上,空气层介于两者之间,空气层厚度可以在 1.5mm 到 3.5mm 之间变化,导致整个结构的有效介电常数随之变化,进而导致结构整体的吸波性能发生改变。

图 11(b)显示了所提出的吸收器在不同空气厚度(1.5 mm、2.5 mm 和 3.5 mm)下的模拟反射系数,仿真结果表明,当空气厚度为 1.5mm 时,谐振频率为 8.7GHz,反射系数为 -15dB。当空气层厚度增加到 2.5 mm 和 3.5 mm 时,共振频率分别降低到 8.4 GHz 和 8.2 GHz。在实验中,作者通过 3D 打印制备了一个具有 0.5 mm 间隔槽的 PLA 框架,如图 11(c)所示,以此实现对空气层厚度的调节。实验结构样本和装置如图 11(d)(e)所示。

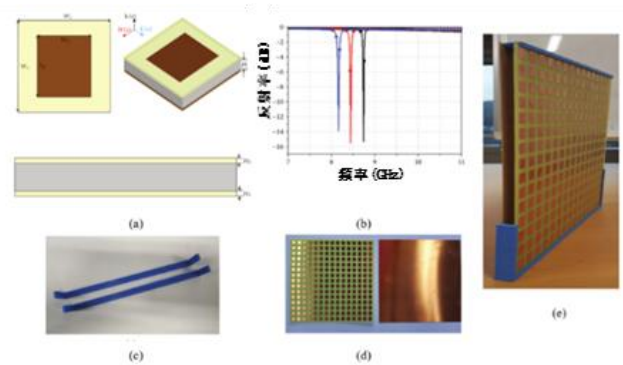


图 11 H.J. Jeong 等人提出的机械手段控制电磁吸收频率的可调结构: (a)单元结构的主视图; (b)仿真结果; (c)、(d)、(e)样品照片

2019 年, Kim 等人^[23]同样采取改变结构空气层厚度的方式对整体结构的电磁吸波性能进行调控。相较于上面采取的手动改变间隔层宽度,这篇文章在实验中使用了电控伺服的线性制动器来柔性自动调控空气层的厚度。如图 12(a)为所提出的可调吸收体的整体示意图,该结构同样由顶部的金属图案和上下两层的 FR4 介质基板以及中间可调节的空气介质层构成。通过将空气间隔层从 17mm 调节到 26mm,整体结构的谐振频率从 6.96GHz 变化到了 5.96GHz,如图 12(b)所示。在实验中,一个执行机构连接在底部 FR4 的背面,它可以通过微处理器施加电压,沿其全行程长度推动或拉动底部 FR4。直流电压消除时,执行机构将保持其位置。

另外,有一些文章报道了基于压力驱动的微流体技术被用在可调节的电磁吸波结构中进行可重构的案例。这些实验中,微通道被雕刻在弹性体基底中,金属流体通过压力等机械制动手段被注入到微管道中来实现对电磁吸波特性调节。

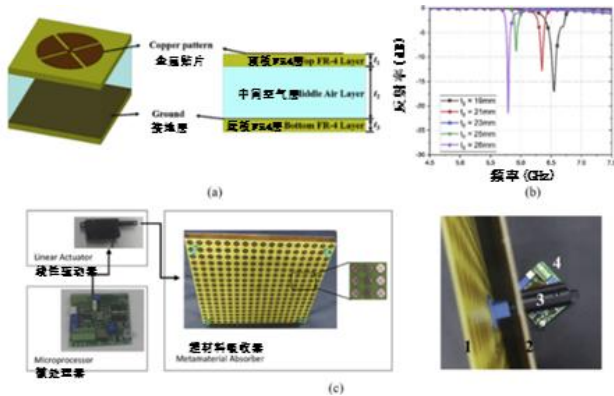


图 12 Kim 等人提出的机械控制的可调吸波结构: (a)单元结构的主视图; (b)仿真结果; (c)样件照片

D. Lim 等人^[24]提出了一种用于宽带和偏振不敏感吸收的可切换超表面,其吸收光谱可以使用液态金属进行流体切换。如图 13(a)(b)所示,单元表面的金属图案由中心对称的四个扇形结构和扇形周围的孤立贴片组成。在四个扇形和隔离贴片之间的间隙中添加了一个片式电阻器,以实现具有宽吸收范围的光谱。图 13(c)显示了所提出的元表面的微流体通道。图 13(d)为所提出元表面的整体俯视图,当微流体通道为空时,四个圆形扇形区和隔离的贴片不连接,当液态金属注入微流体通道时,两者通过微流体通道连接。从图 13(e)中可以看出,当微流体通道为空时,结构的整体吸波频段为 X 波段,当注入液态金属后,结构的吸波光谱为 C 波段。在实际加工中,金属贴片图案和片式电阻器加载在柔性印刷电路板上,微流体通道在聚二甲基硅氧烷中实现,共晶镓铜合金被用作液态金属注入进管道中。同年, Ghosh 等人^[25]也通过在整体结构中添加液态金属管道的方式,实现了可切换宽带吸收的流体可重构超表面。

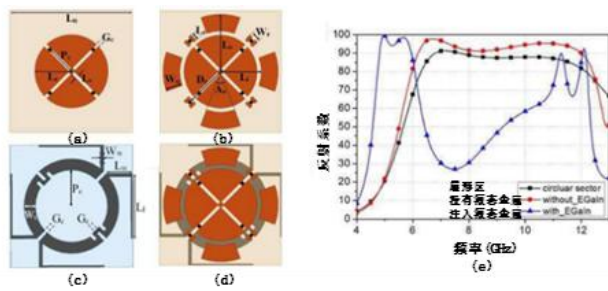


图 13 D. Lim 等人使用微流体技术制备的宽带和偏振不敏感吸收的可切换超表面: (a)、(b)、(c)、(d)单元结构的主视图; (e)实验结果。

2.3 基于可调谐材料(石墨烯、液晶、ITO 等)调节的可重构吸波电磁材料结构

自然界中存在一些可调节活性的材料,它们在外加电激励的条件下,内部分子的结构排布、密度、方向等会发生不同形式的变化,使得这些特殊材料对电场具有不同的响应机

制,从而外在表现出具有可调节的电磁性能,进而被用于设计和制备电磁可重构的器件。常见的电调谐材料有石墨烯、透明导电氧化物 (Transparent Conducting Oxide, TCO)、液晶(Liquid Crystals)、过渡金属二硫化物(Transition Metal Dichalcogenide, TMD)等。

石墨烯作为一种二维平面的碳基材料,是目前最被广泛熟知和讨论的电可调材料。随着其制备工艺的逐步进化和完善,它在多功能可重构电磁吸收体上的应用也快速的发展起来。目前常见的调控的手段是设计石墨烯电容器,并在两侧添加偏置电压来间接调控其表面的载流子浓度,进而改变石墨烯的费米能级,最后达到改变电导率的目的。

2015 年 Osman Balci 等人^[26]最早设计制备了大面积石墨烯电极,并以此实现了对微波的反射、传输和吸收控制。该结构的具体形式如图 14(a)所示,这是一种由上下两层石墨烯和中间离子液组成的三明治结构。它们测量了整块样品结构在 10.5GHz 电磁波频率入射下的反射和透射动态调控性能,实验结果如图 14(b)(c)所示,当外界偏压为 0V 时,结构的反射率为 1.8%,并随着偏压绝对值的增大而得到提升。与之相比较,结构的透射率在偏压为 0V 时最大为 76%,当电压增大到 3.5V 时,透射率减少到 36%。

除此之外,他们还在石墨烯电容下四分之一波长处放置了一块金属板来模拟 Salisbury 屏。整体结构的示意图和制备完成的样品如图 14(d)(e)所示,图 14(f)显示了该结构在 7—12GHz 工作范围内,外接电压 0—1.5V 时的反射率变化情况。

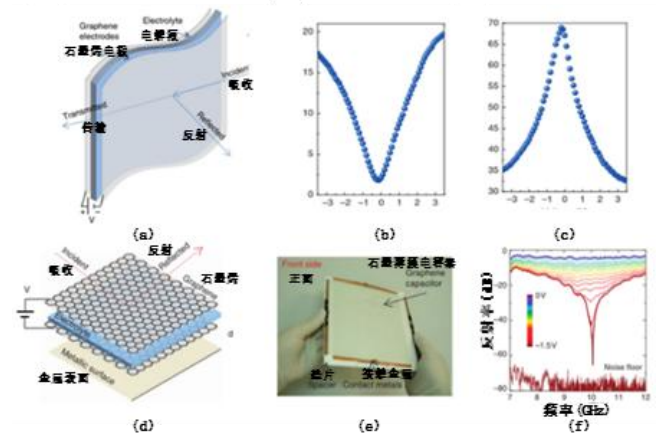


图 14 Osman Balci 等人制备的基于石墨烯的可调结构: (a)三明治结构; (b)、(c)实验结果; (d)、(e)样件照片; (f)反射率变化

2016 年, A.G. D' Aloia 团队^[27]提出了一种基于石墨烯的宽带自适应结构。所提出的结构由未掺杂的石墨烯单层、石墨烯介质混合层以及接地板层组成,三层之间采用介质进行分隔。整体结构通过对中间层掺杂的石墨烯层施加偏置电压来控制载流子速率进而控制吸波幅度,如图 15(a)(b)所示。

同年，Y.Q. Wang 等人^[28]利用图案化石墨烯来调节太赫兹频段的吸收位置和带宽，当石墨烯的化学势从 0.2eV 逐渐增加到 0.6eV 过程中，结构的吸波频率可在 2.352—3.956THz 之间连续可调谐，且可以保持峰值吸收率均大于 90%，如图 15(c)(d)所示。

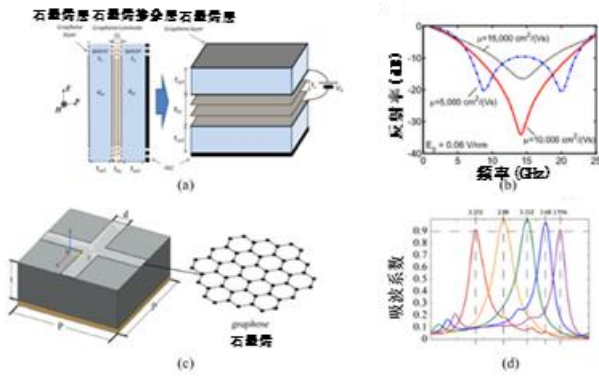


图 15 A.G. D' Aloia 提出的一种基于石墨烯的宽带自适应结构：(a)单元结构的主视图；(b)仿真结果；(c)阵列；(d)实验结果

近期还出现了将石墨烯与加载有二极管的金属涂层结合在一起进行研究的报道，这种组合更大程度上增加了可重构电磁结构的功能形式。

2020 年，中国科学院大学的 H. Cheng 等人^[29]设计了一种由周期性金属结构层和石墨烯电容器层组成的多功能可重构频率选择结构，他们所设计的结构如图 16(a)所示，在这种组合形式的结构中，周期性金属结构通过调节负载肖特基二极管的偏置状态，在传输/吸收模式选择中发挥开关的作用。另一方面，通过调节静电场偏置电压可以改变石墨烯的有效薄层的电阻，进而可以调节传输/吸收的相应振幅，如图 16(b)(c)所示。同年，他们团队又将石墨烯与有源频率选择表面进行结合，设计了一种极化不敏感、吸波频率和幅度均可独立调控的复合结构。

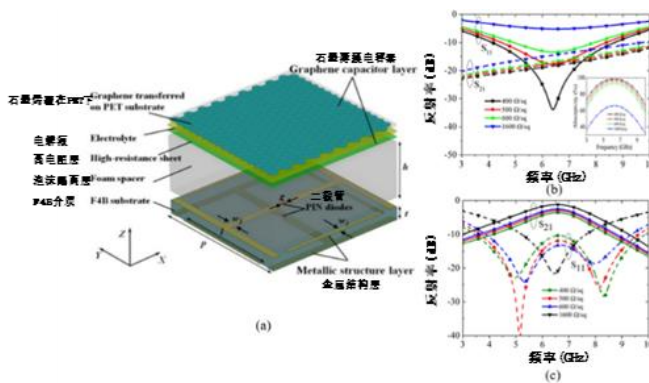


图 16 H. Cheng 设计的由周期性金属结构层和石墨烯电容器层组成的多功能可重构频率选择结构：(a)单元结构的主视图；(b)、(c)传输/吸收的相应振幅

氧化铟锡是目前使用最广泛的一种透明导电氧化物，它将光学透明能力和导电性能集成为一体，目前已有一些文章报道了使用 ITO 设计超表面结构以达到调节反射波幅度和相位功能的例子^[30]。如图 17(a)展示了 Y. Liu 等人使用 ITO 材料设计的一种透明电可调谐吸波超结构，是由两层氧化铟锡和介于两者之间的一层玻璃组成的夹层结构。结构最上部的 ITO 层被周期性地图案化，并与变容二极管组合，实验加工得到的样品图如 17(b)所示。图 17(c)为该结构在不同外加电压下的吸波状态，在 0V 时，吸收峰值位置为 2.6178GHz，吸收峰值振幅仅为 0.6075，随着电压的增加，吸收峰位置向更高的频率移动，振幅也单调增加到 3.6933 和 0.901。

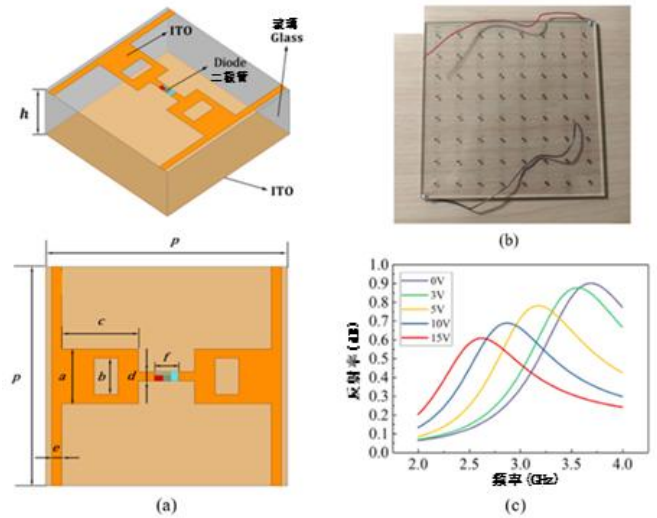


图 17 Y. Liu 等人使用 ITO 材料设计的一种透明电可调谐吸波超结构：(a)单元结构的主视图；(b)样件照片；(c)实验结果

除了氧化铟锡，掺铝氧化锌、氧化铟、氧化铟硅等材料也同样具有电调谐的能力，它们在电磁散射特征可调控超构表面拥有巨大的应用潜力。液晶是处于液态和固态之间的一种光学活性材料，折射率可调范围大，具有流动性和各向异性，并且加工工艺已经成熟，目前在太赫兹范围内被广泛的设计和应用。L.M. Liu 等人^[31]设计并实验表征了一种向列相液晶渗透的太赫兹电裂环谐振器材料（图 18）。这种电磁材料的谐振响应可以通过温度来调节。特别地，该实验证明了频率调谐强烈依赖于初始液晶取向，对于垂直于间隙的指向矢，谐振频率向较低频率偏移；对于平行于电开口环谐振器的间隙的 LC 导向矢，谐振频移向较高频率偏移。

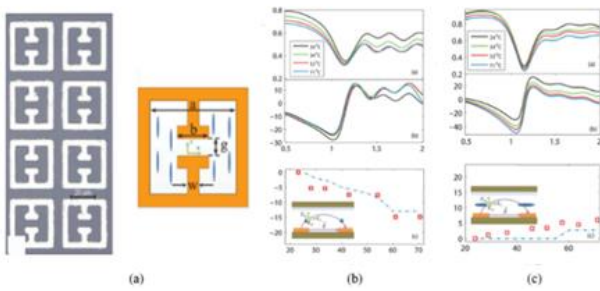


图 18 液晶渗透太赫兹电磁波调制材料：(a)单元结构；(b)、(c)频率谐振随温度的变化

虽然液晶产业技术成熟，但是随着精密光电器件的要求越来越高，液晶材料逐渐暴露了许多不足。液晶设备的响应时间通常在数十毫秒，难以与一些快速响应的光电器件相匹配，这也是后续值得讨论和解决的问题。

2.4 实现反射相位特性调节的可重构电磁材料

相位是电磁波矢量特性的重要表征。近年来，随着电子科学技术的发展日益迅速，在电磁兼容、能量吸收、物体伪装等方面对电磁材料提出越来越高的要求。现阶段电磁材料在有效的作用带宽、结构厚度、入射角稳定、极化不敏感等方面都亟需进一步的改善。同时随着对电磁材料研究地不断深入，相位调制材料 and 无源吸波材料等都得到了一定的发展，但是要满足上述的需要仍然需要寻找新的方法和手段。

南京大学冯一军教授提出提出了一种全 360° 反射相位控制的有源阻抗表面，以克服传统方法中相位调谐的不足^[32]。元表面是一种多共振结构，能够在有限频段内提供 360° 反射相位变化以及主动调谐。当改变单元中变容二极管的偏置电压时，单元的等效电路参数值会发生相应的变化，从而改变结构的表面阻抗。图 19(b)和(c)分别为单元在不同偏置电压下的反射相位和幅度随频率的变化曲线，从图中可以看出在 $3.5\text{GHz}—3.8\text{GHz}$ 频带范围内，不同电压对应的范射相位差达到 360° 。该方法可以应用于任何需要精细和全相位调谐的情况，例如反射天线中的波束转向。该结构利用串联的双谐振结构可以扩大反射相位的调谐范围。

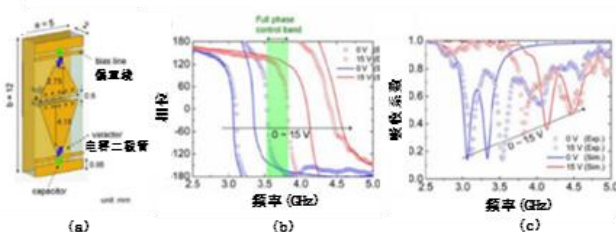


图 19 全 360° 反射相位控制的有源阻抗表面：(a)单元结构；(b)反射相位的仿真和测试结果；(c)反射幅度的仿真和测试结果

2017 年，巴黎萨克雷大学的 Ratni 等人提出如图 20(a)所示的加载变容二极管的“H”型结构^[33]。当水平和垂直极

化的电磁波照射到结构表面时，单元的等效电路和电场分布如图(b)所示。从图中可以看出，该结构对水平极化的入射电磁波会产生响应。图 20(c)和(d)分别表示单元在水平和垂直极化电磁波照射下，不同变容二极管电容值对应的反射幅度和相位曲线随频率变化曲线。该结构具有较好的反射幅度和较大范围的反射相位调谐范围，从而能够构建从线极化到圆极化转换的极化转换器。

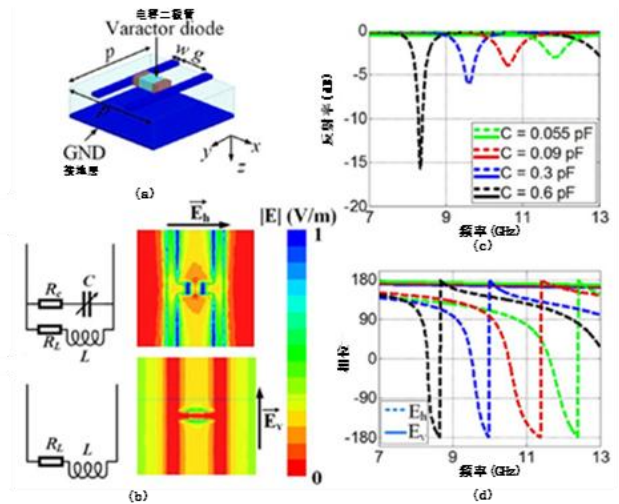


图 20 极化转换器：(a)加载变容二极管的 H 型单元结构；(b)水平和垂直极化电磁波入射时的电场分布和等效电路；(c)变容二极管不同电容值下的反射幅度；(d)单元在变容二极管不同电容值下的反射相位

数字元表面的提出为宽带相位可调提出了一种更加有效的方法。2017 年中国科学院光电技术研究所罗先刚教授团队^[34]提出了一种控制电磁波的多功能可编程元表面，通过控制有源单元变容管，改变电容 C 来调整阻抗，以获得 180° 反射相位差 180° 相位差有望通过适当的二极管配置在可变频率下实现该超表面可以动态地改变其局部相位分布以产生预先确定的电磁响应，如实现波束分裂、波束偏折和极化转换的功能，功能示意如图 21 所示。常规的 1-bit 编码可以进一步延伸至 2-bit、3-bit 甚至更高，元表面的数字位数越高，其控制电磁波的能力越强。

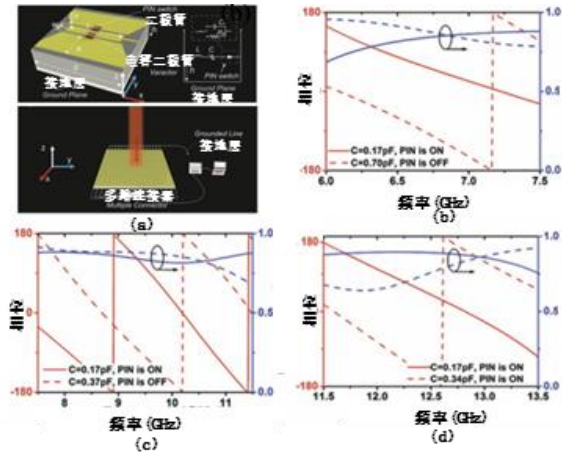


图 21 多功能可编程元表面：(a)单元结构；(b-d)可调谐元件在三个不同频段的模拟反射幅度和相位。在每个频段，两个具有不同二极管配置的可调谐元件之间可以获得约 180° 的反射相位差(见实线和虚线)

同年罗先刚教授团队提出了一种能够实现不同远场波束的 2-bit 数字编码可编程元表面的设计^[35]，如图 22 所示。通过调控每个单元上的两个二极管的状态，在 6.8GHz—7.6GHz 之间的存在四种状态。各状态下反射相位明显不同，相邻状态之间的相位差位于 7.25 GHz 左右的($90^\circ - 10^\circ$ ， $90^\circ + 10^\circ$)范围内。这意味着从状态 1 到状态 4 运行的超表面可以产生分别为 0° 、 $0^\circ + 90^\circ$ 、 $0^\circ + 180^\circ$ 和 $0^\circ + 270^\circ$ 的梯度反射相位分布。使单元具有 0 ， $\pi/2$ ， π ， $3\pi/2$ 四种相位响应，分别具有“00”，“01”，“10”，“11”四种编码状态。通过设计上述数字单元阵列的编码序列，可以任意控制反射光束。所提出的元表面已被证明具有实现波束偏转、多波束和波束扩散的能力，并通过可编程电源完成这些不同散射模式的动态切换。

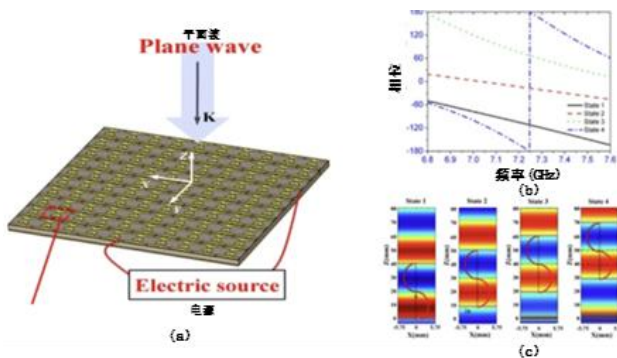


图 22 2-bit 数字编码可编程元表面：(a)单元结构；(b)不同状态相位差；(c)不同状态相位响应

2021 年西安空军工程大学屈少波教授团队^[36]提出了一种可重构多波束的可编程元表面，通过控制单元表面上的变容管即可得到单元的相位梯度变化，如图 23 中用 5×5 个单元组成一个超级单元作为实现编码序列的编码单元，在不同

的偏置电压下，单元格产生不同的反射相位，其反射波束的数量也可以在 1~5 之间进行配置。通过对偏置电压进行编程，可以根据不同的编码顺序调整反射光束的数量和方向。在正常入射下，反射波将动态控制工作模式，将输入功率分配给预期的散热器，并实现动态切换。

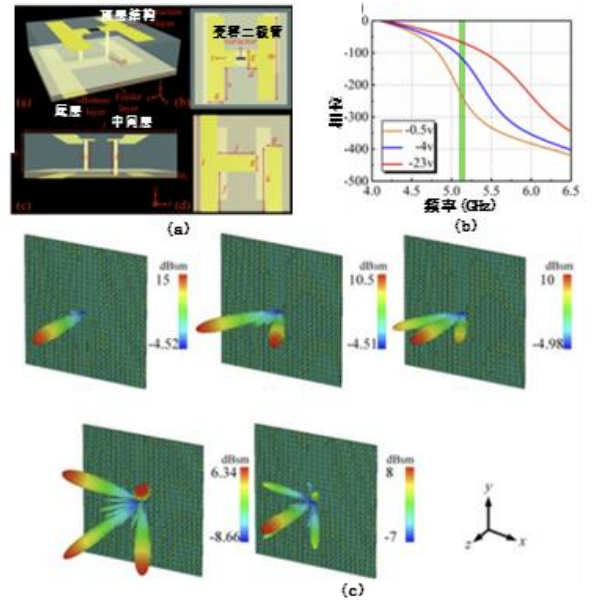


图 23 可重构多波束的可编程元表面：(a)可重构超表面单元示意图；(b)不同馈电电压下超级单元的反射相位，绿色标签线的频率为 5.17GHz；(c)模拟不同排列方式下的反射光束

2.5 智能电磁波反射特性调控材料

2020 年，浙江大学陈红胜教授将可调材料推向了智能化，实现连续频段内的反射相位任意调控，根据广义斯涅耳定律，重建无伪装物体的散射场，实现隐身^[37]。在调控效果方面，可以实现 6—10GHz 频带内的相位可调，实验结果如图 24 所示。智能方案如图所示，基于可调节材料构建了集感知模块、决策模块和控制模块为一体的复杂系统，引入了深度学习的方法，对系统进行训练，得到了由反射波和入射波到单元需要的控制电压的对应关系，并实现了实时响应，真正实现了不需要人为干预的自主隐身系统。

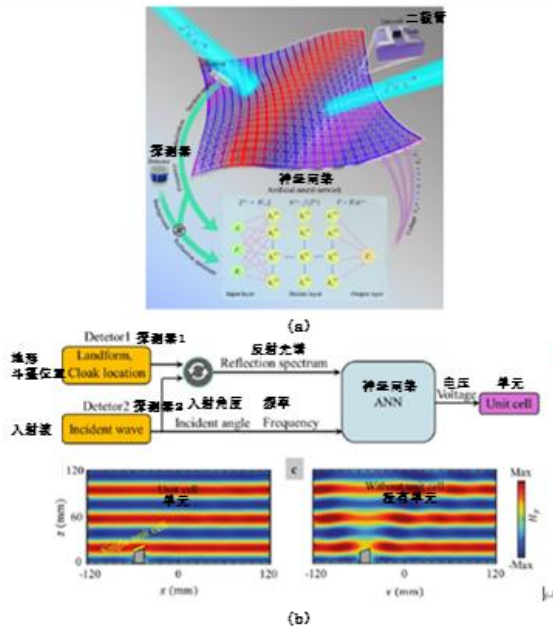


图 24 基于深度学习的智能隐身系统: (a)神经网络训练示意图; (b)、(c)有无结构的远场对比结果

2021 年, 东南大学崔铁军教授^[38]设计完成了一个宽带、全极化的电磁材料, 结构如图 25(a)所示, 主要应用于移动中的物体伪装, 是一个智能多普勒材料, 材料调控特性如图 26 所示。基于该材料结构构建了一个完整系统, 主要由一个时间调制反射材料以及感知反馈时变电子控制系统组成。实验的结果表明, 智能多普勒材料能够自适应响应并迅速适应移动物体不断变化的速度, 并且无需任何人工干预, 能够消除实时不同的多普勒频移, 实现隐身效果。

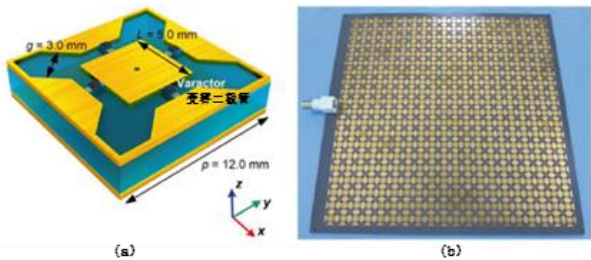


图 25 智能多普勒材料结构图: (a)可重构超表面单元示意图; (b)实验样件照片

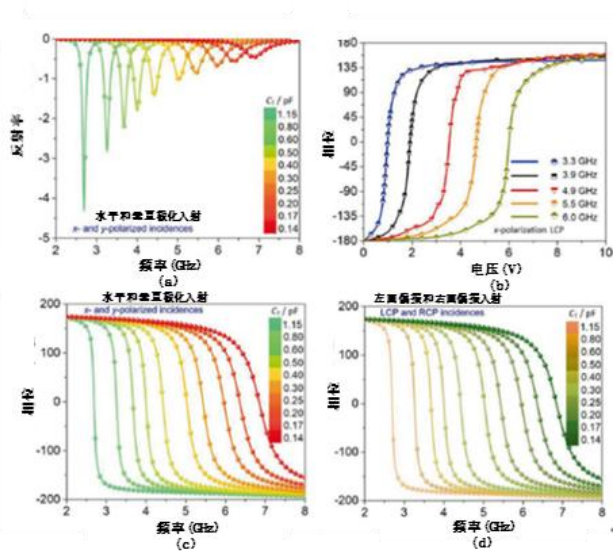


图 26 智能多普勒材料调控曲线图: (a)反射率曲线; (b)偏置电压与相位关系曲线; (c)线极化相位曲线; (d)圆极化相位曲线

大多数可编程的元表面主要集中在电磁波的操纵上, 必须有人类参与才能做出指令。为了进一步实现更智能的元表面能够自己做出决策的功能, 其应该具有收集基本信息并做出决策的感知能力。崔铁军团队^[39]制备了具有智能传感功能的智能元表面, 集成了多个传感器、一个微控制器单元, 构建了一个闭环传感反馈系统, 用于自动决策 (图 27)。其中, 嵌入式陀螺仪传感器可以即时获取不同的空间方向 ($\Delta \theta$, $\Delta \Phi$), 当飞行的飞机改变其在天空中的空间位置时, 发送相应的信息。原方向 (θ, Φ) 变为 ($\theta + \Delta \theta, \Phi + \Delta \Phi$), 求解具有波束偏转 (θ, Φ) 的数字编码图, 然后通过波束偏转将 (θ, Φ) 改为数字编码模式 ($\theta - \Delta \theta, \Phi - \Delta \Phi$), 确保辐射束始终指向卫星。假设卫星的位置相对固定, 当飞行器的空间姿态发生变化时, 陀螺仪传感器将姿态数据发送给单片机, 由单片机驱动超表面引导电磁波束方向到达卫星。当其他特定的功能和环境发生变化时, 集成的传感器可以及时检测到变化, 并将相应的信息发送给单片机, 随后 MCU 通过反馈算法自动处理所有传感信息和输出指令, 驱动 FPGA 实时自适应更新数字编码, 无需人工指令完成不同的功能切换。

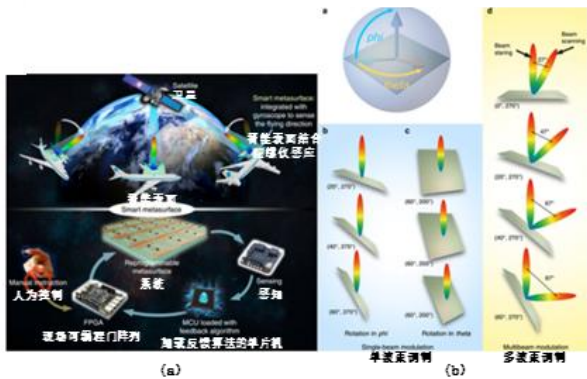


图 27 智能传感功能的智能元表面：(a)智能超表面原理图；
(b)空间自适应原理图

近年来，卷积神经网络在计算机视觉任务（如物体检测和图像处理）上取得了令人瞩目的进展。基于智能超表面，li 等人提出了智能微波识别仪（图 28），使用不同的卷积神

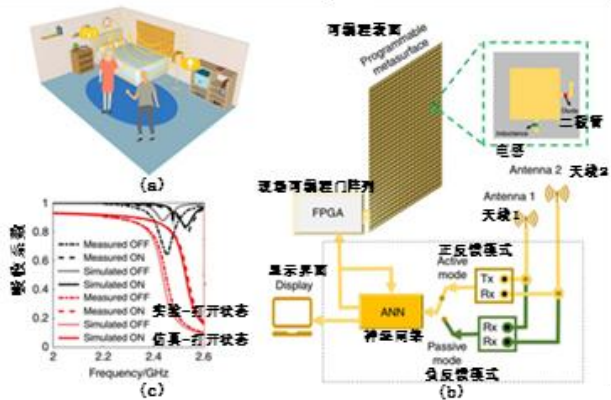
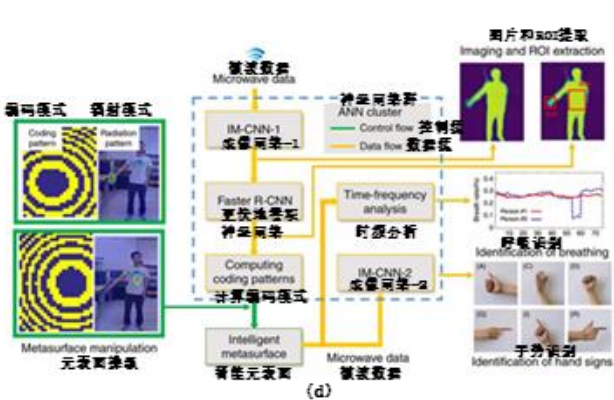


图 28 智能微波成像仪和识别器：(a)智能元表面的应用场景；(b)智能元曲面的系统架构；(c)不同数字状态下的元原子响应；
(d)可编程操作的电磁聚焦不同的功能，包括手势和生命检查

3 结论

本文对可重构电磁材料结构领域的现状进行了全面调研，并着重探讨了其在雷达波镜面反射特性调控方面的研究进展。我们总结了基于电调节、机械调节以及可调材料等机理形式，利用材料结构进行实时电磁波镜面反射调控的近期进展。这些调控机理不仅扩展了材料的适用范围，还提高了其适应性和灵活性。通过调控材料的结构和电磁特性，可以实现对雷达波的反射幅度、相位和极化方式等多种属性的调节，从而显著降低目标在雷达监视系统中的可探测性。调控材料的电磁特性可以有效地改变其对入射雷达波的反射行为，实现对目标的伪装和欺骗。这不仅可以提高装备的隐身性能，还可以增强其对抗现代雷达探测监视系统的能力。可调控材料作为智能雷达特征对抗装备基础模块的主要材料，体现出很强的应用价值。利用人工智能和大数据技术，可以实现对雷达波的实时调控，从而提升现代装备的雷达波伪装

经网络模块完成手势识别和呼吸监测两项具体任务^[40]。采集到的微波数据首先经过成像网络，由成像网络将原始数据转化为实时人体图像，如图 28(d)右图两段所示。然后，执行更快的卷积神经网络从整个图像中找到感兴趣的区域，如图中两个插图中的红色矩形所示。然后，采用自适应的全息算法计算优化后的元表面数字编码模式，实现波束聚焦到目标区域，如用于手语识别的手部或用于呼吸监测的胸部。最后，将采集到的微波数据传输到特定的网络进行各功能模式下的分析。具体来说，人类的呼吸由时频域分析仪识别，另一个卷积神经网络对数据进行处理以识别手部设计。从绘制结果来看，受试者的呼吸频率约为 0.28Hz。当受试者被要求屏住呼吸时，状态也可以被清楚地区分出来。在这 10 个类别下，手势识别的准确率达到 96%，其中的 6 个类别如图所示。人的手语速率和呼吸速率在 10—30bit/s 量级，明显比数字编码模式的切换速度慢 105 倍。



和对抗能力。

近期研究实现的散射特性实时调控方法能够应用于改进现有的固定特征材料设计，以显著提高其能力和有效性。可调控材料在具有适应性、灵活性、多功能性和小型化特点的应用中具有巨大的潜力，吸引了学术界和工业界的广泛关注。尽管可调电磁材料展现出巨大潜力，但其实际应用仍面临诸多挑战，包括制造工艺复杂、成本较高、动态范围有限以及稳定性问题等。

未来研究预期将聚焦于材料创新、结构优化、多场耦合调控机制的深入探索，以及高效、低成本的制造技术开发。材料创新是推动可调电磁材料领域发展的关键因素之一。通过开发新型可调控材料，可以拓展电磁材料的应用范围，并提高其性能和稳定性。此外，结构优化是另一个重要的研究方向。通过对电磁材料结构的优化设计，可以进一步提高其调节范围和调节精度，从而实现更加精确的电磁波控制。在

多场耦合调控机制方面,未来研究将致力于深入探索不同物理场之间的相互作用机制,并开发多功能的调控机制,以实现可调控材料在不同环境和应用场景中的适应性和灵活性。

另外,高效、低成本的制造技术开发预期将成为未来研究的重点之一。通过开发先进制造工艺和技术,可以实现电磁材料的大规模生产和商业化应用,从而推动电磁材料技术向前迈进一大步。跨学科融合将是未来研究的重要趋势。结合人工智能、自适应系统等先进技术,将有助于推动可调控电磁材料向更智能、更高效的方向发展。例如,利用人工智能技术对电磁材料的设计和优化进行智能化处理,可以加速电磁材料研发过程,提高研究效率。同时,自适应系统的引入可以使电磁材料在不同环境下实现自动调节,提高其应用的灵活性和适应性。

综上所述,未来的研究预期能够解决雷达波散射特性实时可调控材料领域面临的各种挑战,推动可调控材料技术的发展和运用,为现代装备的电磁特征提升提供更加全面和深入的解决方案。在智能化雷达靶标、智能雷达特征干扰器材、智能感知探测、电磁兼容等领域,可重构电磁材料将为智能化技术带来更多的发展机遇。

[参考文献]

- [1] GIL I, BONACHE J, GARCIA-GARCIA J, et al. Tunable metamaterial transmission lines based on varactor-loaded split-ring resonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(6): 2665-2674.
- [2] AYDIN K, OZBAY E. Capacitor-loaded split ring resonators as tunable metamaterial components[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(2): 11-16.
- [3] GIL I, MARTIN F, ROTTENBERG X, et al. Tunable stop-band filter at Q-band based on RF-MEMS metamaterials[J]. Electronics Letters, 2007, 43(21): 1153-1154.
- [4] GIL I, GARCIA-GARCIA J, BONACHE J, et al. Varactor-loaded split ring resonators for tunable notch filters at microwave frequencies[J]. Electronics Letters, 2004, 40(21): 1347-1348.
- [5] LIM S, CALOZ C, ITOH T. Metamaterial-based electronically controlled transmission-line structure as a novel leaky-wave antenna with tunable radiation angle and beamwidth[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(12): 2678-2690.
- [6] SENSEALE-RODRIGUEZ B, YAN R, LIU L, et al. Graphene for reconfigurable terahertz optoelectronics[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(7): 1705-1716.
- [7] YOO M, LIM S. Switchable electromagnetic reflector/absorber with electric-field-coupled LC resonator[J]. Electromagnetics, 2014, 34(5): 421-429.
- [8] YOO M, LIM S. Active metasurface for controlling reflection and absorption properties[J]. Applied Physics Express, 2014, 7(11): 112204.
- [9] ZHU B, FENG Y, ZHAO J, et al. Switchable metamaterial reflector/absorber for different polarized electromagnetic waves[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(5): 252-258.
- [10] GHOSH S, SRIVASTAVA K V. Polarization-insensitive single- and broadband switchable absorber/reflector and its realization using a novel biasing technique[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(8): 3665-3670.
- [11] KONG P, YU X W, ZHAO M, et al. Switchable frequency selective surfaces absorber/reflector for wideband applications[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2015, 29(11): 1473-1485.
- [12] LI J, JIANG J, HE Y, et al. Design of a tunable low-frequency and broadband radar absorber based on active frequency selective surface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 15: 774-777.
- [13] WANG H, KONG P, CHENG W, et al. Broadband tunability of polarization-insensitive absorber based on frequency selective surface[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 23081.
- [14] HE Y, JIANG J, CHEN M, et al. Design of an adjustable polarization-independent and wideband electromagnetic absorber[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(10): 83671.
- [15] LI H, COSTA F, WANG Y, et al. A wideband multifunctional absorber/reflector with polarization-insensitive performance[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 68(6): 5033-5038.
- [16] CHEN H, CAO Q, WANG Y. A wideband switchable absorber/reflector based on active frequency selective surface[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2021, 31(1): e22474.
- [17] ZHAO B, HUANG C, YANG J, et al. Broadband polarization-insensitive tunable absorber using active frequency selective surface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(6): 982-986.
- [18] HAN Y, DENG L, WANG S, et al. Flexible microwave metasurface absorber with reconfigurable absorption intensity in ultra-wideband[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications Engineering, 2021, 121: 107000.

Journal of Electronics and Communications, 2023, 170: 1547-1589.

[19] ZHANG Y, CAO Z, HUANG Z, et al. Ultrabroadband double-sided and dual-tuned active absorber for UHF band[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69(2): 1204-1208.

[20] WU Z, ZHAO J, CHEN K, et al. An active metamaterial absorber with ultrawideband continuous tunability[J]. IEEE Access, 2022, 10: 25290-25295.

[21] ZHANG F, FENG S, QIU K, et al. Mechanically stretchable and tunable metamaterial absorber[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(9): 43851.

[22] JEONG H, TENTZERIS M M, LIM S. Frequency-tunable electromagnetic absorber by mechanically controlling substrate thickness[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2018, 2018: 56-61.

[23] KIM J, JEONG H, LIM S. Mechanically actuated frequency reconfigurable metamaterial absorber[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 299: 111619.

[24] LIM D, LIM S. Liquid-metal-fluidically switchable metasurface for broadband and polarization-insensitive absorption[J]. IEEE Access, 2018, 6: 40854-40859.

[25] GHOSH S, LIM S. Fluidically switchable metasurface for wide spectrum absorption[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 10169.

[26] BALCI O, POLAT E O, KAKENOV N, et al. Graphene-enabled electrically switchable radar-absorbing surfaces[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 1-10.

[27] WANG Y, SONG M, PU M, et al. Stacked graphene for tunable terahertz absorber with customized bandwidth[J]. Plasmonics, 2016, 11: 1201-1206.

[28] HUANG C, ZHAO B, SONG J, et al. Active transmission/absorption frequency selective surface with dynamical modulation of amplitude[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69(6): 3593-3598.

[29] HUANG C, SONG J, JI C, et al. Simultaneous control of absorbing frequency and amplitude using graphene capacitor and active frequency-selective surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69(3): 1793-1798.

[30] LIU Y, ZHOU J, CHANG Q, et al. Transparent and electrically tunable electromagnetic wave absorbing metamaterial[J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(9): 75286.

[31] LIU L, SHADRIVOV I V, POWELL D A, et al. Temperature control of terahertz metamaterials with liquid crystals[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013, 3(6): 827-831.

[32] ZHU B O, ZHAO J, FENG Y. Active impedance metasurface with full 360° reflection phase tuning[J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 3059.

[33] RATNI B, DE LUSTRAC A, PIAU G P, et al. Electronic control of linear-to-circular polarization conversion using a reconfigurable metasurface[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(21): 57-63.

[34] HUANG C, ZHANG C, YANG J, et al. Reconfigurable metasurface for multifunctional control of electromagnetic waves[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(22): 1700485.

[35] HUANG C, SUN B, PAN W, et al. Dynamical beam manipulation based on 2-bit digitally-controlled coding metasurface[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 42302.

[36] LI W, QIU T, WANG J, et al. Programmable coding metasurface reflector for reconfigurable multibeam antenna application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69(1): 296-301.

[37] QIAN C, ZHENG B, SHEN Y, et al. Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention[J]. Nature Photonics, 2020, 14(6): 383-390.

[38] ZHANG X G, SUN Y L, YU Q, et al. Smart Doppler cloak operating in broad band and full polarizations[J]. Advanced Materials, 2021, 33(17): 2007966.

[39] MA Q, BAI G D, JING H B, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 98.

[40] MA Q, HONG Q R, GAO X X, et al. Smart sensing metasurface with self-defined functions in dual polarizations[J]. Nanophotonics, 2020, 9(10): 3271-3278.