

# 智能电磁材料与结构综述

宋维力

(北京理工大学 先进结构技术研究院, 北京 100081)

**摘要:** 随着智能化装备的发展与升级, 传统的电磁响应材料与结构难以满足智能化需求, 通过调控隐身材料本征物理参数或者改变隐身材料的结构设计与参数, 在多个频段实现谐振吸收峰的移动, 对信号作出响应功能, 实现频率或者功能转变, 能够改变隐身结构对外界目标电磁波频段的响应能力。基于智能电磁响应材料、结构、器件与系统四个层级, 提出了相对粗略的电磁智能系统框架, 并对各个层级进行了典型工作的梳理和简要讨论。最后, 对智能电磁材料与结构在设计、制造、集成、机理评价等方面提出了发展愿景, 期望从多个方面为发展新概念电磁材料与结构, 以及在此基础上开发先进微波器件与系统, 提供设计基础与应用指导, 推动智能化产品与装备的发展与应用。

**关键词:** 电磁响应; 智能材料; 智能结构; 调控; 电磁参数; 器件

**中图分类号:** O552 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)02-0012-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.02.002

## Review of Smart Electromagnetic Materials and Structures

SONG Wei-li

(Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**ABSTRACT:** With the development of upgrading of intelligent equipment, it is difficult to meet the boosting requirement in the smart and intelligent systems with traditional electromagnetic response materials. By manipulating the intrinsic physical parameters or changing structural design and parameters of stealth materials, the electromagnetic response and resonance peaks were shifted, which lead to frequency and functional variations and in turn impacted the ability to response electromagnetic waves. In the short review, a brief framework based on the four hierarchical structures, including materials, structures, devices and systems, was discussed. By simply summarizing some typical studies, anticipation on the design, manufacturing, integration, mechanism and evaluation was also imaged, aiming to developing new-concept electromagnetic materials and structures from various perspectives. These efforts are also expected to develop advanced electromagnetic devices and systems with design and application support and promote the development and application of intelligent product and system.

**KEY WORDS:** electromagnetic response; smart materials; smart structures; manipulation; electromagnetic parameter; device

高性能电磁隐身材料与结构在航天、航空、探测、通信等工业及高端装备领域需求迫切。电磁隐身技术是通过利用电磁隐身材料与结构, 减弱、抑制、吸收、

偏转电磁波的强度, 最大程度地降低探测系统发现和识别的概率。微波波段的电磁隐身材料分为: 1) 电磁隐身材料, 包括电损耗介质、磁损耗介质以及电磁

收稿日期: 2019-10-08; 修订日期: 2020-01-07

Received: 2019-10-08; Revised: 2020-01-07

作者简介: 宋维力 (1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向多场响应智能材料与结构。邮箱: weilis@bit.edu.cn

**Biography:** SONG Wei-li (1984—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: smart materials and structures. E-mail: weilis@bit.edu.cn

引文格式: 宋维力. 智能电磁材料与结构综述[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 12-17.

SONG Wei-li. Review of smart electromagnetic materials and structures [J]. Surface technology, 2020, 49(2): 12-17.

耦合共损复合介质材料; 2) 电磁隐身结构: 包括隐身超材料(超构结构)及电阻屏式隐身结构等。目前, 实现“轻、宽、薄、强”(质量轻、频段宽、厚度薄、吸收强)高性能电磁隐身材料的问题依然突出<sup>[1-3]</sup>。

对于电磁隐身材料, 单层介质通常能够在窄频段内通过产生四分之一的波长谐振, 实现较强的电磁衰减特性。然而, 由于本征复介电常数与复磁导率之间的差异较大, 单层介质与空气阻抗的匹配条件还需进一步提升。传统的电磁隐身材料包括: 介电损耗型、磁损耗型以及磁介耦合共损型<sup>[4-8]</sup>, 因在低频波段更易于拓宽有效吸收, 磁介耦合共损型吸波介质一直受到关注。自从 2004 年车仁超等人<sup>[4]</sup>发现铁@碳纳米管/环氧树脂复合材料具有宽频吸收特性以来, 基于纳米碳材料发展磁介耦合异质结构的聚合物基吸波介质的研究取得了重要进展。曹茂盛与陈玉金等人<sup>[7]</sup>在磁介耦合异质纳米结构的设计和机理研究领域进行了较为系统的研究工作。此外, 在多功能电磁响应材料方面, 由于聚合物基体与纳米碳材料在形貌、结构、组分、性能方面具有很强的设计性, 因此通过设计制备纳米碳/聚合物复合材料, 不仅具备良好的电磁响应特性, 同时具备独特的力学性能<sup>[9-12]</sup>。

对于电磁隐身结构来讲, 以电磁隐身超材料为例, 虽然容易与空气阻抗匹配, 实现材料匹配特性, 但是由于其单频率窄带的选择特性, 单层内平面单元很难在超宽带内实现多频点的有效吸波, 同样需要多层超材料结构匹配或者采用大厚度立体锥形设计, 拓宽吸波带宽。相比传统的电磁隐身材料而言, 电磁隐身超材料这类由亚波长结构单元构成的人工结构, 能够实现各种新型功能器件的设计, 为电磁理论开辟了

一个全新的研究方向, 在隐身技术、微波器件、天线、频率选择表面等多领域得到了迅猛的发展<sup>[13-26]</sup>。

与此同时, 智能可调频电磁隐身材料与结构是解决隐身材料突出问题的一种创新手段。通过调控隐身材料本征物理参数或者改变隐身材料的结构设计 with 参数, 可在多个频段实现谐振吸收峰的移动, 转变信号响应的频率, 进而改变隐身结构对外界目标电磁波频段的响应能力。因此, 相同条件下, 智能可调频电磁隐身材料与结构拥有更加优异的吸波带宽与灵活性, 极大地降低了隐身材料的厚度和质量, 增强了隐身材料的宽频响应, 并在智能化电磁响应装备中具有更广的发展前景。

目前, 智能电磁材料与结构已经受到了同行的关注, 并在近几年内取得了重要进展。本综述中, 首先提出了一个相对粗略的电磁智能系统框架, 该框架有待于同行们进一步完善与修正。在此基础上, 从不同的层级分析讨论了近几年以来的典型例子, 最后对智能材料与结构进行了展望。由于篇幅关系, 本综述不能面面俱到, 相关的优秀工作可以从近几年的其他综述中查找阅读。

## 1 从系统层级到材料层级

相比传统的电磁材料与结构而言, 智能电磁材料与结构对器件集成与系统组装匹配方面的需求更加迫切, 特别是通过主动调控与变化的器件, 在智能化系统中对多个学科与多个技术层面的交叉集成要求更高。图 1 是笔者理解的相对粗略的电磁智能系统框架, 有待进一步完善与更正。

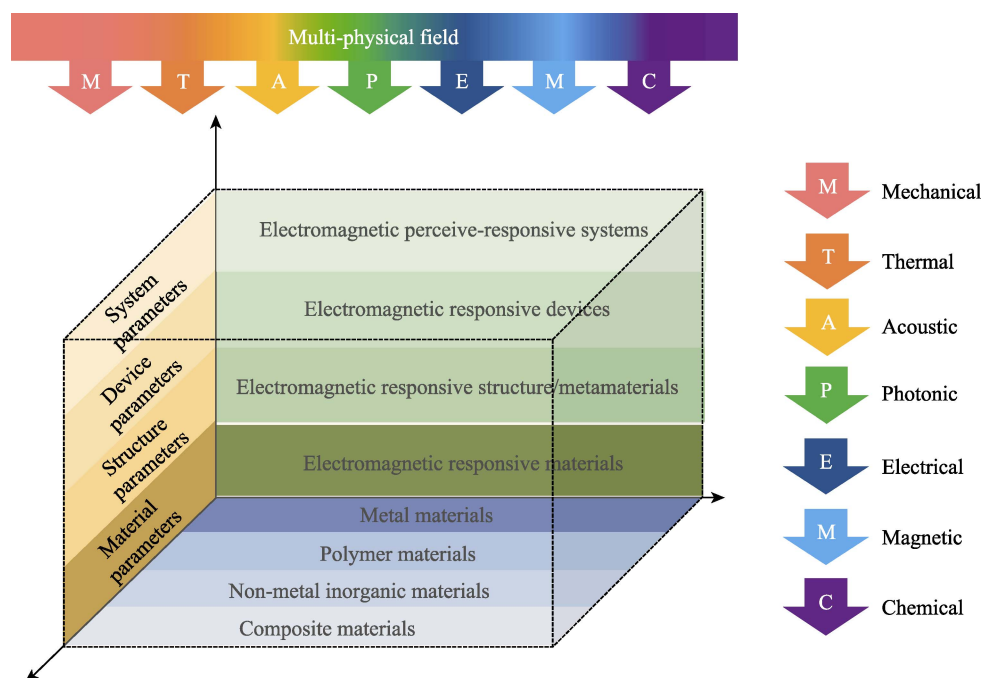


图 1 智能系统框架

Fig.1 Framework of smart systems

在图1中,笔者初步思考了从智能材料到智能系统的层级与要素。首先,从绿色区域来看,智能系统需要构建感知与响应两个功能系统,因而具有电磁响应功能的智能化器件是响应系统的关键组成。进一步往下,该器件是由特定结构构型的智能电磁响应结构设计集成,而影响该结构的关键包括两个方面——智能电磁结构本征特性以及构成结构的智能电磁响应材料。其次,黄色区域代表每一个层级所对应的关键参数。例如,在材料层级,电磁隐身材料的复介电常数、复磁导率、直流/交流电导率等对电磁响应材料性能的影响很关键;在结构层级,结构设计的特征尺寸、结构中的材料分布规律、结构的等效材料参数等会直接影响结构的电磁响应特性;在器件层级,器件的电磁响应功能对组成器件的材料与结构参数、器件调节与控制参数等非常敏感;在系统层级,组成系统的各个器件之间交互参数与控制参数会影响系统的功能特性。再次,从蓝色区域来看,对智能系统到智能材料的构造而言,每个层级均需要不同材料体系(金属材料、高分子材料、无机非金属材料以及复合材料等)。因此,材料体系能够涵盖并服务于智能系统中的每一层级需求。在图1中的上方部分为可调控外场,包括物理场或者化学场,目前可考虑为力、热、声、光、电、磁、化等。本文后续部分将围绕提出的几个层级分别进行分析。

### 1.1 智能电磁响应材料

在智能电磁响应材料方面,主要从两个场的角度进行介绍,即热场(温度)与化学场。在温度调控方面,主要考虑利用温度依赖的介电性能与电导性能,不同温度下,材料本征物理特性发生变化,影响电磁响应功能的改变。国内较早开展温度调控与研究的课题组是北京理工大学曹茂盛教授小组<sup>[27-36]</sup>,其主要围绕低维微纳米材料体系(包括金属氧化物与碳材料体系)进行研究。此外,西北工业大学殷小伟教授小组<sup>[27-41]</sup>主要围绕SiC材料体系开展工作。如图2所示,2018~2010年,曹茂盛教授课题组主要研究了具有温度响应的介质材料(包括纳米二氧化锰/二氧化硅复合材料、碳纳米管/二氧化硅复合材料、碳纤维/二氧化硅复合材料、纳米钴链/二氧化硅复合材料等体系),由于氧化物与碳材料本征极化、电损耗及磁损耗会随着温度的升高而大幅变化,当环境温度在50~300℃变化时,对应的复合材料在8.2~12.4 GHz波段内会实现不同带宽的电磁隐身性能调控<sup>[27-36]</sup>。

在化学调控方面,可以通过外场引发相变或者引入新相实现。例如,南京航空航天大学姬广斌教授等人<sup>[42]</sup>设计了一种柔性低频雷达隐身器件,通过电压控制,能够实现介电实部和虚部的可控调节,反射损耗值在1.5~2.0 GHz范围内低于-5 dB。在引入新相方面,宋维力等人<sup>[43]</sup>通过多孔电介质结构中引入极性水分,调控多孔石墨烯双三维结构的本征电磁响应参

数,在电磁波微波频段构造了具有电磁响应的三明治结构,对电磁波的传输实现了调控。

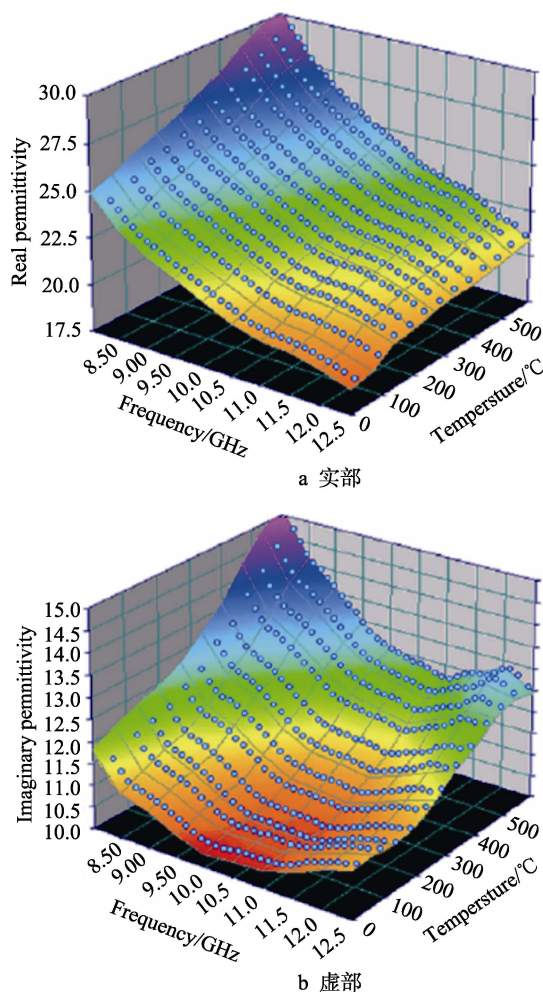


图2 碳纤维/二氧化硅复合材料温度依赖的复介电常数<sup>[27]</sup>  
Fig.2 Real part (a) and imaginary part (b) of the complex permittivity for carbon fiber/silica composites<sup>[27]</sup>

### 1.2 智能电磁响应结构与器件

电磁响应结构中,电磁隐身超材料是一种典型的可设计人工结构,能够针对性地对电磁波进行调控。国内外从事电磁超材料(微波波段)研究的科研人员(高校与行业部门)较多,由于本文篇幅限制,国内外电磁超材料课题组的工作进展可以在近期发表的电磁超材料综述中进行查阅。

智能电磁响应结构分为两类:一类是主动调控型,另一类为被动调控型。主动调控型结构通常需要匹配一个主动调控器件,通过主动控制该结构中的材料参数或者结构参数,实现电磁响应功能变化。通常来说,多数主动调控型电磁响应结构以器件的形式呈现。相比之下,被动调控型智能电磁响应结构相对简单,由于不需要额外的主动控制器件,这类结构多为开放式体系,能够在环境或者外场变化的情况下进行调节。因此,主动调控型电磁响应结构(器件)不仅



要做好电磁响应结构中材料与结构的参数设计, 还需要做好控制器件的参数匹配。在把握好两者区别的基础上, 以下列举的主动调控型与被动调控型结构与器件不单独分开讨论。

智能电磁响应结构与器件中, 以电磁隐身为设计目标的工作多以智能可调隐身超材料为主体, 其设计理念是利用超材料频率选择的特殊性, 在超材料设计时引入结构或者材料可调频参数, 通过不同场的调控, 实现电磁隐身超材料调频功能<sup>[44-48]</sup>。目前, 调控工作涉及在不同外场加载的可调电子器件领域。例如, 江建军教授等<sup>[44]</sup>设计了含 PIN 二极管的有源频率选择表面的超材料隐身结构, 通过调节结构中的偏置电压改变谐振特性, 在 5.3~13 GHz 实现最佳宽度隐身性能。黄善国教授课题组等<sup>[45]</sup>采用钇铁石榴石设计了超材料隐身结构, 通过外磁场改变磁性超材料结构的磁场分布, 在 8~12 GHz 波段实现了窄带吸收峰移动。常胜江等教授<sup>[46]</sup>在超材料结构中引入具有温度响应特性的 InSb 介质, 随着温度从 160 K 变化到 350 K, 吸收峰从 0.82 THz 逐渐增加到 1.02 THz。引入新相调频, 通过设计环境开放式电磁超材料, 利用不同天气条件下引入或者去除极性水分子、冰晶体等方式, 对超材料的本征材料参数与结构功能进行调

控, 实现了润湿与低温环境调控的超材料电磁性能的智能调控。超材料力学性能还具备调控能力, 适应多种工况环境, 为智能可调控电磁超材料的制备提供了新的方案<sup>[47]</sup>。此外, 通过光控激发<sup>[48]</sup>与电荷注入或者化学掺杂调频<sup>[49]</sup>的方法, 也在太赫兹波段的超材料中得到了验证。

需要强调的一点是, 这种主动调控电磁隐身设计理念与机理不仅在微波波段能够发挥优异的特性, 在光学波段也能够实现同样的功能。如图 3 所示, 基于吸波材料工作机理 (即 1/4 波长相位干涉相消原理), 2019 年北京理工大学方岱宁院士团队<sup>[50]</sup>通过控制纳米级硅膜的厚度 (将其控制在 1/4 光学波长范围内), 利用硅膜的反射衬底铜构造相位干涉相消。在此基础上构造电化学电池, 巧妙地利用电压控制电化学电池中锂离子在纳米硅膜中的脱嵌行为, 调控硅膜的本征材料参数以及厚度参数, 进而驱使该器件对光线反射产生干扰。该器件具有很强的设计应用前景, 能改变硅薄膜的初始厚度和导电集流体颜色, 可以任意定制所需要的颜色调控范围。通过光刻技术, 可以定制各种显色图案。并且, 该变色系统和硅基锂离子电池具有良好的兼容性, 在硅基锂离子电池的可视化实时监控中也有巨大的应用前景。

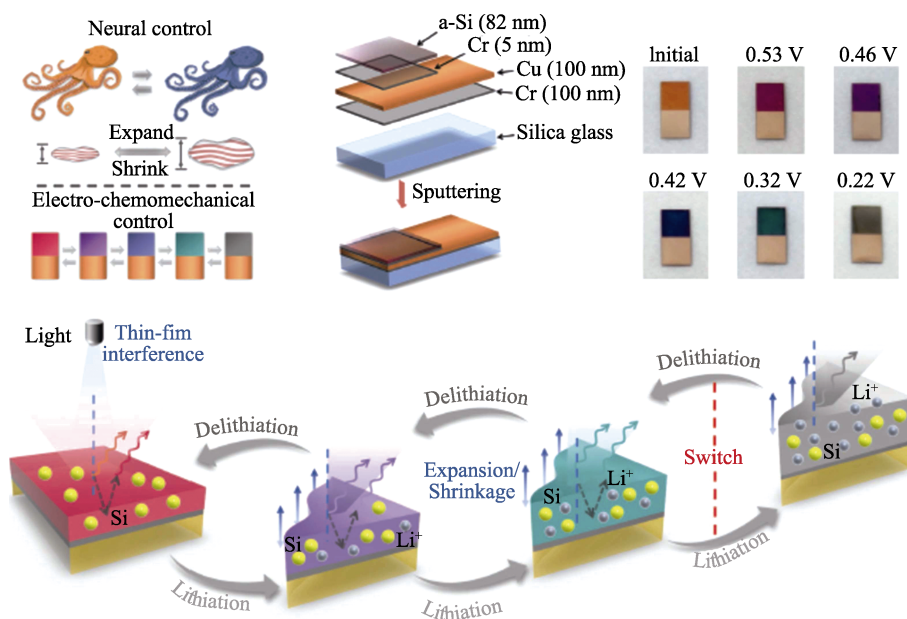


图 3 基于锂离子脱嵌的变色硅膜与机理<sup>[50]</sup>

Fig.3 Chromatic films and mechanism based on lithium ion intercalation/de-intercalation<sup>[50]</sup>

值得注意的是, 进行离位调控的其他方式, 将来均可通过设计相关的控制系统, 实现智能化电磁响应。在材料层级, 南开大学黄毅教授与陈永胜教授等人<sup>[51]</sup>基于石墨烯气凝胶, 提出了压力调控电磁隐身介质, 在 GHz 波段内实现了由体积变形引起的宽频调频隐身性能。在结构层级, 复旦大学彭慧胜教授与车仁超教授等<sup>[3]</sup>通过调整两层阵列织物堆叠时的交互角度, 改变了电磁波的极化与传播损耗方式 (组成材

料没有变化, 三维空间中整体电极结构参数发生变化)。当交互角度在  $0^\circ \sim 90^\circ$  间时, 能实现 7.2~12.2 GHz 范围内有效电磁隐身带宽的调控。

在智能电磁响应系统方面 (不包含较为成熟的智能通信系统), 由于大量的工作集中在智能电磁隐身材料与结构方面, 智能电磁隐身系统方面相对成熟的工作相对较少, 这方面不仅需要应用产业部门提出关键需求, 同时需要应用研发部门与产业部门建立系统

的产学研开发链条。

## 2 结语

发展智能电磁响应系统目前依然处于一个发展萌芽时间,随着多个学科快速发展,为该领域创造了一个充满活力的多学科交叉环境。从目前来看,不论是智能电磁响应系统,还是智能电磁响应材料,在每个层级的设计、制造、集成、机理、评价等多个方面,都存在许多尚未解决的科学问题。因此,需要同行科学与工程工作者们同时从不同层级与方向开展工作,丰富智能电磁响应系统中各方面的内涵,推动各个层级的发展步伐,从而能够更早实现智能电磁响应系统在实际工程中的使用,让智能化装备与智能化生活离我们更近。

### 参考文献:

- [1] CHEN H, PADILLA W J, ZIDE J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [2] CHEN H, O'HARA J F, AZAD A K, et al. Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials [J]. *Nature photonics*, 2008, 2(5): 295-298.
- [3] SUN H, CHE R, YOU X, et al. Cross-stacking aligned carbon-nanotube films to tune microwave absorption frequencies and increase absorption intensities[J]. *Advanced materials*, 2014, 26(48): 8120-8125.
- [4] CHE R C, PENG L M, DUAN X F, et al. Microwave absorption enhancement and complex permittivity and permeability of Fe encapsulated within carbon nanotubes[J]. *Advanced materials*, 2004, 16(5): 401-405.
- [5] WANG J, WANG J, XU R, et al. Enhanced microwave absorption properties of epoxy composites reinforced with Fe<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>-functionalized graphene[J]. *Journal of Alloys and compounds*, 2015, 653: 14-21.
- [6] LIU Q, CAO Q, BI H, et al. CoNi@SiO<sub>2</sub>@TiO<sub>2</sub> and CoNi@Air@TiO<sub>2</sub> microspheres with strong wideband microwave absorption[J]. *Advanced materials*, 2016, 28(3): 486-490.
- [7] YU H, WANG T, WEN B, et al. Graphene/polyaniline nanorod arrays: Synthesis and excellent electromagnetic absorption properties[J]. *Journal of materials chemistry*, 2012, 22(40): 21679-21685.
- [8] PAN Y, WANG G, LIU L, et al. Binary synergistic enhancement of dielectric and microwave absorption properties: A composite of arm symmetrical PbS dendrites and polyvinylidene fluoride[J]. *Nano research*, 2017, 10(1): 284-294.
- [9] CHEN Z, XU C, MA C, et al. Lightweight and flexible graphene foam composites for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. *Advanced materials*, 2013, 25(9): 1296-1300.
- [10] YAN D, PANG H, LI B, et al. Structured reduced graphene oxide/polymer composites for ultra-efficient electromagnetic interference shielding[J]. *Advanced functional materials*, 2015, 25(4): 559-566.
- [11] CHEN Y, ZHANG H, YANG Y, et al. High-performance epoxy nanocomposites reinforced with three-dimensional carbon nanotube sponge for electromagnetic interference shielding[J]. *Advanced functional materials*, 2016, 26(3): 447-455.
- [12] ZENG Z, JIN H, CHEN M, et al. Lightweight and anisotropic porous MWCNT/WPU composites for ultrahigh performance electromagnetic interference shielding[J]. *Advanced functional materials*, 2016, 26(2): 303-310.
- [13] LIU R, JI C, MOCK J J, et al. Broadband ground-plane cloak[J]. *Science*, 2009, 323(5912): 366-369.
- [14] BI K, GUO Y, ZHOU J, et al. Negative and near zero refraction metamaterials based on permanent magnetic ferrites[J]. *Scientific reports*, 2014, 4(1): 4139.
- [15] XU H, TANG S, MA S, et al. Tunable microwave metasurfaces for high-performance operations: Dispersion compensation and dynamical switch[J]. *Scientific reports*, 2016, 6(1): 38255.
- [16] LI W, GULER U, KINSEY N, et al. Refractory plasmonics with titanium nitride: Broadband metamaterial absorber [J]. *Advanced materials*, 2014, 26(47): 7959-7965.
- [17] WANG S M, MU S Y, ZHU C, et al. Hong-ou-mandel interference mediated by the magnetic plasmon waves in a three-dimensional optical metamaterial[J]. *Optics express*, 2012, 20(5): 5213-5218.
- [18] LIU X, LAN C, BI K, et al. Dual band metamaterial perfect absorber based on mie resonances[J]. *Applied physics letters*, 2016, 109(6): 0629026.
- [19] ZHAI S L, ZHAO X P, LIU S, et al. Inverse doppler effects in broadband acoustic metamaterials[J]. *Scientific reports*, 2016, 6(1): 32388.
- [20] SU Z, YIN J, ZHAO X. Terahertz dual-band metamaterial absorber based on graphene/MgF<sub>2</sub> multilayer structures [J]. *Optics express*, 2015, 23(2): 1679-1690.
- [21] YAN N, YONGZHI C, RONGZHOU G. A low-frequency wideband metamaterial absorber based on a cave-disk resonator and resistive film[J]. *Chinese physics B*, 2013, 22(4): 44102-44108.
- [22] GU S, SU B, ZHAO X. Planar isotropic broadband metamaterial absorber[J]. *Journal of applied physics*, 2013, 114(16): 163702.
- [23] CAO M S, WANG X X, ZHANG M, et al. Electromagnetic response and energy conversion for functions and devices in low-dimensional materials[J]. *Advanced functional materials*, 2019, 29(25): 1807398.
- [24] DING F, CUI Y, GE X, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Applied physics letters*, 2012, 100(10): 103506.
- [25] YE D, WANG Z, XU K, et al. Ultrawideband dispersion control of a metamaterial surface for perfectly-matched-

- layer-like absorption[J]. *Physical review letters*, 2013, 111(18): 187402.
- [26] COSTA F, MONORCHIO A, MANARA G. Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces[J]. *Antennas and propagation, IEEE transactions on*, 2010, 58: 1551-1558.
- [27] CAO M, SONG W, HOU Z, et al. The effects of temperature and frequency on the dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave-absorption of short carbon fiber/silica composites[J]. *Carbon*, 2010, 48(3): 788-796.
- [28] WEN B, CAO M, LU M, et al. Reduced graphene oxides: Light-weight and high-efficiency electromagnetic interference shielding at elevated temperatures[J]. *Advanced materials*, 2014, 26(21): 3484-3489.
- [29] WEN B, CAO M, HOU Z, et al. Temperature dependent microwave attenuation behavior for carbon-nanotube/silica composites[J]. *Carbon*, 2013, 65: 124-139.
- [30] CAO W, WANG X, YUAN J, et al. Temperature dependent microwave absorption of ultrathin graphene composites[J]. *Journal of materials chemistry C*, 2015, 3(38): 10017-10022.
- [31] LIU J, CAO M, LUO Q, et al. Electromagnetic property and tunable microwave absorption of 3D nets from nickel chains at elevated temperature[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2016, 8(34): 22615-22622.
- [32] YANG H, CAO W, ZHANG D, et al. NiO hierarchical nanorings on SiC: Enhancing relaxation to tune microwave absorption at elevated temperature[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2015, 7(13): 7073-7077.
- [33] SONG W, CAO M, HOU Z, et al. High dielectric loss and its monotonic dependence of conducting-dominated multiwalled carbon nanotubes/silica nanocomposite on temperature ranging from 373 to 873 K in X-band[J]. *Applied physics letters*, 2009, 94(23): 233110.
- [34] LU M, CAO M, CHEN Y, et al. Multiscale assembly of grape-like ferromagnetic oxide and carbon nanotubes: A smart absorber prototype varying temperature to tune intensities [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2015, 7(34): 19408-19415.
- [35] LIU J, CAO W, JIN H, et al. Enhanced permittivity and multi-region microwave absorption of nanoneedle-like ZnO in the X-band at elevated temperature[J]. *Journal of materials chemistry C*, 2015, 3(18): 4670-4677.
- [36] SHI X, CAO M, FANG X, et al. High-temperature dielectric properties and enhanced temperature-response attenuation of  $\beta$ -MnO<sub>2</sub> nanorods[J]. *Applied physics letters*, 2008, 93(22): 223112.
- [37] XU H, YIN X, LI M, et al. Mesoporous carbon hollow microspheres with red blood cell like morphology for efficient microwave absorption at elevated temperature[J]. *Carbon*, 2018, 132: 343-351.
- [38] KONG L, YIN X, HAN M, et al. Carbon nanotubes modified with ZnO nanoparticles: High-efficiency electromagnetic wave absorption at high-temperatures[J]. *Ceramics international*, 2015, 41(3B): 4906-4915.
- [39] KONG L, YIN X, LI Q, et al. High-temperature electromagnetic wave absorption properties of ZnO/ZrSiO<sub>4</sub> composite ceramics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, 96(7): 2211-2217.
- [40] LI M, YIN X, ZHENG G, et al. High-temperature dielectric and microwave absorption properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiC/SiO<sub>2</sub> composite ceramics[J]. *Journal of materials science*, 2015, 50(3): 1478-1487.
- [41] DUAN W, YIN X, LI Q, et al. A review of absorption properties in silicon-based polymer derived ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, 36(15): 3681-3689.
- [42] LV H, YANG Z, WANG P L, et al. A voltage-boosting strategy enabling a low-frequency, flexible electromagnetic wave absorption device[J]. *Advanced materials*, 2018, 30(15): 1706343.
- [43] WANG Y, CHENG X, SONG W, et al. Hydro-sensitive sandwich structures for self-tunable smart electromagnetic shielding[J]. *Chemical engineering journal*, 2018, 344: 342-352.
- [44] ZHANG M, WANG X X, CAO W Q, et al. Electromagnetic functions of patterned 2D materials for micro-nano devices covering GHz, THz, and optical frequency[J]. *Advanced optical materials*, 2019, 19(7): 1900689.
- [45] LEI M, FENG N, WANG Q, et al. Magnetically tunable metamaterial perfect absorber[J]. *Journal of applied physics*, 2016, 119(24): 244504.
- [46] ZHENG W, LI W, CHANG S. A thermally tunable terahertz metamaterial absorber[J]. *Optoelectronics letters*, 2015, 11(1): 18-21.
- [47] ZHANG K, CHENG X, ZHANG Y, et al. Weather-manipulated smart broadband electromagnetic metamaterials[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2018, 10(47): 40815-40823.
- [48] ZHANG J, WANG G, ZHANG B, et al. Photo-excited broadband tunable terahertz metamaterial absorber[J]. *Optical materials*, 2016, 54: 32-36.
- [49] ZHANG Y, LI Y, CAO Y, et al. Graphene induced tunable and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber[J]. *Optics communications*, 2017, 382: 281-287.
- [50] BAO Y, HAN Y, YANG L, et al. Bioinspired controllable electro-chemomechanical coloration films[J]. *Advanced functional materials*, 2019, 29(2): 18063832.
- [51] FILIPOV E T, TACHI T, PAULINO G H. Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(40): 12321-12326.