

# 基于微纳结构设计的电磁性能调控研究进展

黄洁, 汪刘应, 王滨, 刘顾, 王伟超, 葛超群

(火箭军工程大学 智剑实验室, 西安 710025)

**摘要:** 吸波材料通过吸收电磁波能量, 减少或消除电磁波的反射, 从而有效降低电磁波的干扰。材料的电磁参数决定其电磁波吸收性能, 调整填充比例、改变宏观形态以及复合方式等传统的调控策略存在一定局限性, 无法根本改变电磁参数, 阻碍了吸波材料的进一步发展。微纳结构设计策略可以改变材料的电导率、电荷密度以及磁性等理化性质, 进而根本性改变材料的电磁参数, 在调控电磁波吸收能力上展现出巨大优势。由于精确设计微纳结构材料难度较大且批量生产较为困难, 其发展受到限制。此外, 确定微纳结构与电磁波响应和损失机制之间的结构-性质理论关系仍然是一个重大的挑战。基于此, 本文分析了微纳结构与电磁性能的构效关系, 阐明了微纳结构设计策略在调控电磁波吸收能力方面的绝对优势, 并且梳理了元素掺杂设计、表面效应调控以及成核生长控制等微纳结构改变对电磁响应机制和损耗机制的影响, 为研究者们提供了基于微纳结构调控电磁性能的策略和理论指导。最后, 以量子点、纳米晶以及纳米线等典型微纳米材料作为范例, 综述了其调控电磁参数的策略、优势以及在电磁波吸波领域的研究现状与应用前景, 为微纳米材料在电磁波吸波领域的发展提供了理论基础和策略支撑。

**关键词:** 电磁性能; 微纳结构; 吸波机理; 电磁参数; 综述

中图分类号: TB34 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2024)08-0853-18

## Research Progress on Modulation of Electromagnetic Performance through Micro-nanostructure Design

HUANG Jie, WANG Liuying, WANG Bin, LIU Gu, WANG Weichao, GE Chaoqun

(Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Absorptive materials, by absorbing electromagnetic wave energy, effectively mitigate electromagnetic interference through reduction or elimination of wave reflection. The electromagnetic parameters of materials determine their electromagnetic wave absorption performance. Traditional control strategies, such as adjusting filler ratio, changing macroscopic morphology, and regulating composite methods, have certain limitations to control their structure and cannot fundamentally alter their electromagnetic parameters, which severely hinders their further development. Now, micro-nanostructure design strategies can basically change electromagnetic parameters of the materials by altering their electrical conductivity, charge density and magnetic properties, showing significant advantages in controlling electromagnetic wave absorption capacity. However, the precise micro-nanostructure design

收稿日期: 2023-12-21; 收到修改稿日期: 2024-02-04; 网络出版日期: 2024-03-30

基金项目: 陕西省自然科学基金(2022JQ-356); 中国博士后科学基金(2022M723884); 陕西省高层次人才特支计划(2020-44)

Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2022JQ-356); China Postdoctoral Science Foundation (2022M723884); Special Support Program for High-level Talents of Shaanxi Province (2020-44)

作者简介: 黄洁(1997-), 女, 博士研究生. E-mail: huangjierfue@sina.com

HUANG Jie (1997-), female, PhD candidate. E-mail: huangjierfue@sina.com

通信作者: 汪刘应, 教授. E-mail: lywangxa@163.com; 王滨, 讲师. E-mail: wangbin403403@126.com

WANG Liuying, professor. E-mail: lywangxa@163.com; WANG Bin, lecturer. E-mail: wangbin403403@126.com

and the mass production still face challenges to be overcome. Additionally, structure-property relationship between micro-nanostructures and electromagnetic wave response, and its underline mechanisms are still not fully understood. Herein, a comprehensive review on these relationships was introduced to elucidate the advantages of micro-nanostructure design strategies for regulating electromagnetic wave absorption capacity. Moreover, by introducing these strategies, such as element doping, surface effect modulation and nucleation-controlled growth, this review provides researchers with deep insights and theoretical guidance for modulating electromagnetic properties through micro-nanostructure design. Finally, the research progresses on electromagnetic performance modulation through micro-nanostructure design based on the case of quantum dots, nanocrystals and nanowires, as well as the current research status and prospects in the field of electromagnetic absorption were summarized, providing a theoretical foundation and strategic support for the development of micro-nanoparticles.

**Key words:** electromagnetic performance; micro-nanostructure; wave absorption mechanism; electromagnetic parameter; review

随着 5G 时代的到来, 电子通信技术迅猛发展, 随之产生的电磁波辐射和干扰严重影响了人们的日常生活<sup>[1]</sup>。现如今电磁波已经成为继水污染、空气污染和噪声污染之后的第四大污染源, 因此电磁波吸收材料受到了研究者的青睐。轻质量、高吸收、宽频带、低负载特性已经成为了电磁波吸收材料的研究热点<sup>[2-4]</sup>。

材料的电磁波吸收效果与电磁参数密切相关, 传统的调控策略通过优化具备不同电磁参数材料的比例和含量从而同时达到阻抗匹配与电磁波损耗的目的<sup>[5-6]</sup>。由于材料本身电磁参数的限制很难同时实现宽频带和高吸收, 在引入如铁氧体、磁性粒子这种高密度的磁性材料时高的填充比例难以满足低负载的特性<sup>[7-10]</sup>, 使得这种宏观条件下的调控策略很快面临瓶颈问题。后期研究者们发现复合材料的接触界面对电磁波吸收影响很大, 通过调控复合材料形态结构、键合方式以及结合位点能够提高材料的电磁波吸收性能<sup>[11-17]</sup>, 但是复合材料的键合、界面这种微尺度变化如何影响电磁吸波特性一直缺乏准确统一的定论。随着微纳米技术的日趋完善, 本课题组发现通过微纳结构调控可以根本改变电磁参数, 这有望成为下一代调控电磁波吸收性能的有力策略。此外, 相比于大尺寸的宏观材料, 微纳结构材料在调控电磁性能方面具有以下优势。(1)微纳米粒子的尺寸在纳米级别, 使得相邻界面间的接触距离缩短, 这有利于形成新的吸波通道, 从而使电磁波衰减<sup>[18]</sup>。(2)微纳米粒子的比表面积大, 表面大量的悬挂键和未成键电子<sup>[19-20]</sup>使得界面极化更容易发生。(3)磁性微纳米粒子同样也为磁损耗贡献了很大的作用, 在引入缺陷后粒子的内应力比宏观材料更

大, 纳米粒径使得磁性粒子的磁畴结构变为单磁畴, 产生自发磁化导致磁性粒子的矫顽力增加, 此外粒径变小又使得粒径间交换耦合作用增强, 由此产生更大的磁损耗<sup>[9, 21]</sup>。(4)微纳结构调控对超小尺寸的纳米粒子结构影响更大, 能够显著提高其理化性能。因此, 通过微纳结构设计调控材料的电磁性能将是未来电磁波吸收领域发展的重要策略。

基于此, 本文从微纳米材料出发, 对纳米粒子在吸波领域的调控策略与研究现状进行了综述, 分别介绍了具有量子限域效应的量子点、原子序列排列规则的纳米晶以及高横纵比的一维纳米线在电磁波吸波领域的研究现状与应用前景(图 1)。

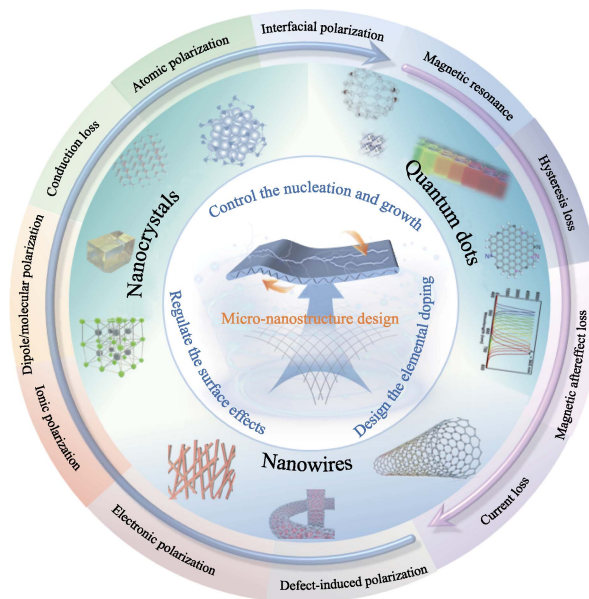


图 1 纳米电磁波吸收材料的分类及机理

Fig. 1 Categorization and mechanisms of nanoscale electromagnetic wave-absorption materials

# 1 微纳结构与电磁性能的构效关系

电磁波入射到介质表面主要发生反射、吸收和透过三种相互作用(图 2)。吸波材料的优异性取决于入射的电磁波转换为热能或其他能量耗散的能力<sup>[22]</sup>, 因此吸波材料需要减少入射电磁波的反射和透过作用, 即材料需具有良好的阻抗匹配和优异的电磁波损耗能力<sup>[17, 23]</sup>。材料的介电常数( $\epsilon_r$ )和磁导率( $\mu_r$ )是决定阻抗匹配和电磁波损耗能力的关键参数<sup>[8]</sup>, 分别表示为:

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

其中,  $\epsilon'$ (介电常数实部)、 $\mu'$ (磁导率实部)为衡量吸波材料在电磁场作用下极化或磁化程度的变量<sup>[24]</sup>;  $\epsilon''$ (介电常数虚部)、 $\mu''$ (磁导率虚部)为电磁场作用下材料损耗电磁波的量度<sup>[25]</sup>。

## 1.1 微纳结构与阻抗匹配

$\epsilon_r$  和  $\mu_r$  决定材料的阻抗匹配能力<sup>[26-27]</sup>, 阻抗匹配要求吸波材料与自由空间的阻抗相等, 两种阻抗越接近, 电磁波越容易从自由空间进入吸波材料内部<sup>[28-29]</sup>(图 3)。

微纳米粒子的尺寸为纳米级别, 在调控材料的  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  方面有独特的能力。首先随着纳米材料尺寸减小, 比表面积显著变大, 从而使得吸波材料能够最大限度接触电磁波, 进而提高电磁波的吸收率<sup>[30]</sup>。其次纳米材料受量子限域效应的影响, 粒子尺寸达到纳米级别时电子数量会从原来的无穷大趋向于有限量, 导致宏观材料几乎为零的能级间距在纳米尺度下发生劈裂, 从而改变材料的导电能力和介质传播方式<sup>[31]</sup>。这一方面能够控制介电型吸波材料在电磁场作用下产生的极化强度进而调控  $\epsilon_r$  的实部, 另一

方面能够改变磁损耗型材料的磁介质传播路径和磁化程度进而调控  $\mu_r$  的实部<sup>[32-33]</sup>。最后当纳米材料与其他材料组成复合型吸波材料时, 微纳米粒子可以通过化学键合和物理附着等方法调整复合材料的介电常数和磁导率。调控微纳结构可以增强复合材料的均匀度和稳定性, 而且不会影响复合基体的原形貌, 这将是复合材料中一个非常具有吸引力的方法<sup>[34]</sup>。

## 1.2 微纳结构与衰减特性

材料的衰减特性是指吸收和耗散进入材料内部电磁波的能力, 衰减能力随着电磁损耗增大而提高<sup>[35-36]</sup>。按照材料对电磁波损耗的形式差异, 其损耗机制可分为介电损耗和磁损耗两个类别, 它的强弱用损耗角正切值  $\tan\delta$  来反映<sup>[37-38]</sup>。其中, 介电损耗角正切值( $\tan\delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$ )反映出材料将电磁场中的电能转换成热能和其他形式能量的能力<sup>[39-40]</sup>; 磁损耗角正切值( $\tan\delta_\mu = \mu''/\mu'$ )反映出材料将电磁场中的磁能转化为热能和其他形式能量的能力<sup>[41-42]</sup>。因此,

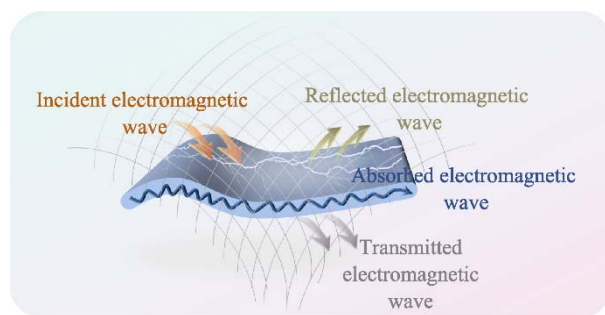


图 2 电磁波入射到介质表面发生的反射、吸收和透过三种相互作用

Fig. 2 Three interactions occurring when electromagnetic waves are incident on the surface of medium: reflection, absorption, and transmission

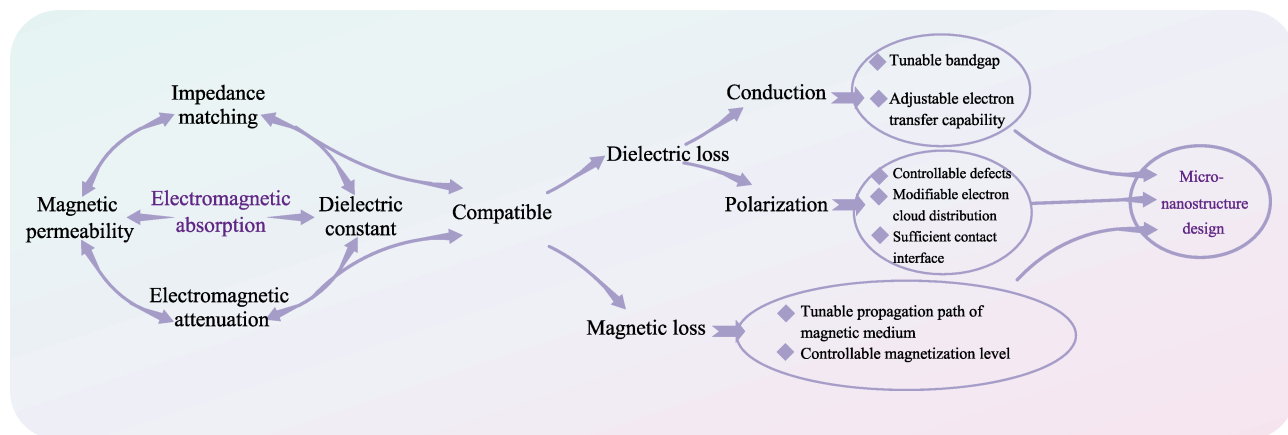


图 3 微纳结构与电磁性能的构效关系

Fig. 3 Structure-property relationship of micro-nanostructures and electromagnetic performance

提升材料的介电常数虚部以及磁导率虚部是提高材料电磁波衰减能力的有效途径。

介电型材料主要发生电导损耗和极化损耗<sup>[43-44]</sup>。在满足上节提到的阻抗匹配条件下,材料的导电能力越强,所产生的电导损耗越强<sup>[45-46]</sup>。纳米粒子在量子限域效应的影响下,能级间距发生劈裂而改变了材料的价带和导带的距离,从而调控了吸波材料的电子传输能力<sup>[47]</sup>。此外,在宏观调控中,复合材料调控电导率是常用的手段,而纳米粒子的微粒径能够使其与材料充分接触进而提高填充率,节省材料<sup>[48]</sup>。极化损耗主要通过极化和弛豫对电磁波进行能量转换,其中偶极子极化和界面极化是极化损耗的主要途径<sup>[49]</sup>。偶极子极化是由分子中正负电荷的相对位移引起的,当偶极子极化滞后于电磁场的周期性变化时会产生弛豫损耗,因此偶极子的转向时间决定了偶极子极化所产生的电磁波损耗<sup>[50-51]</sup>。基质中的缺陷和局部界面能够积累自由电子,导致电子分布不均,偶极矩发生变化,偶极子产生极化<sup>[52-53]</sup>。因此,微纳米粒子可以通过共价键、离子键、氢键以及范德瓦尔斯力等方式,在不改变原基体形貌的前提下,通过诱导效应、场效应以及共轭效应改变电子云的分布<sup>[54]</sup>,进而影响偶极子极化<sup>[55-56]</sup>。此外,当粒子尺寸被细化时,粒子表面效应和量子限域效应突出,表面原子比例增高、悬挂键增多从而使极化损耗增强。界面极化又被称为麦克斯韦-瓦格纳极化<sup>[57]</sup>。当界面两侧介质的介电常数不同时,界面附近两种介质的原子或分子会受到电场作用而产生电偶极子<sup>[58]</sup>,电偶极子和电场相互作用形成了一种新的电场,电介质会产生介电极化<sup>[59]</sup>。这种极化过程导致能量进一步损失,从而产生界面极化损耗。纳米粒子由于比表面积大很容易与其他材料复合产生多重界面,发生界面极化损耗。

磁损耗型材料的能量损耗是介质中的磁成分在反复磁化过程中引起的<sup>[60]</sup>。磁性材料具有各种磁性结构,根据不同磁性介质的分布和排列方式可分为单畴、涡态和多畴<sup>[61-62]</sup>。当磁网络与电磁波发生强烈的相互作用、且磁感应强度比外加的交变磁场落后一个或多个相位时,电磁波会发生损耗,其中磁性纳米材料因量子限域效应发生电子能级分裂,其能级间隔与微波能量范围( $10^{-2} \sim 10^{-5}$  eV)相近,从而有利于形成新的吸波通道<sup>[63]</sup>。磁损耗包括磁滞损耗、涡流损耗以及域壁共振、交换共振、自然共振损耗等<sup>[64-65]</sup>。其中涡流损耗和自然共振损耗是最常发生的磁损耗形式。涡流损耗是指材料在交变的电磁场中发生电磁感应现象,产生的涡电流通过电阻

发热耗散电磁波的能量<sup>[66]</sup>。材料粒径逐渐减小至纳米级别时,粒子内部活性会大幅增加,当电磁波辐射到粒子表面时,粒子内部的分子、电子运动加剧,促进电磁能转化为热能,加速磁损耗<sup>[67-68]</sup>。共振损耗与共振频率有关,材料的共振频率越高,电磁波损耗能力也就越强<sup>[1,69]</sup>。磁性粒子的尺寸越小,各向异性越明显,其共振频率越高<sup>[25]</sup>,因此纳米级别的粒子有利于产生强共振损耗从而进一步增强材料的吸波损耗。

介电损耗型材料和磁损耗型材料的协同作用有望实现“薄、轻、宽、强”的综合需求。因此,复合材料成为近些年来研究热点<sup>[70]</sup>。多界面结构的复合材料是电磁波吸收的理想材料,它可以获得丰富的异质界面和表面缺陷,从而提高电磁波的损耗能力<sup>[71]</sup>。微纳材料在该方面展现出独特的魅力,零维的量子点材料极易与其他材料复合,纳米级别的量子点表面带有大量悬挂键和不饱和键,它与其他基体复合不仅不会影响材料的结构,而且在调控阻抗匹配<sup>[60]</sup>、协调介电损耗与磁损耗的同时构建了大量的异质界面,有效提高了电磁波吸收能力<sup>[72-73]</sup>。一维的纳米线材料一方面能够复合其他材料实现多机制损耗<sup>[74]</sup>,另一方面能够作为电子传输通路提高电磁波在材料内部的传输能力<sup>[75]</sup>。因此,通过调控微纳结构增加损耗机制多样性有望实现高效的电磁波衰减。

## 2 微纳结构调控策略

材料内部原子的排列及运动方式是决定电磁性能的根本原因,微纳结构调控可以重构原子排列,改变材料的物相、化学性质以及物理特征,是调控材料电磁参数的一种重要手段。本章节基于元素掺杂设计、表面效应调控以及成核生长控制的微纳结构调控策略综述了改变微纳结构对电磁响应机制和损耗机制的影响。

### 2.1 元素掺杂设计

元素掺杂已经成为调控纳米晶体的化学环境、电荷迁移率、磁性、缺陷和晶界形成<sup>[76]</sup>的重要策略。该策略是将某些元素引入晶体结构中,取代原有晶体结构中的部分原子,通过改变掺杂元素的种类<sup>[77]</sup>、浓度<sup>[78]</sup>、替代位置<sup>[78]</sup>以及掺杂方式<sup>[79]</sup>等调控上述理化性质。因此,元素掺杂的微纳结构调控策略能够改变材料的电磁参数,进而影响电磁波吸收性能。

化学环境的变化能够调节纳米粒子与其他电磁波材料的复合能力,为调控阻抗匹配和电磁波衰减提供了先决条件。通过引入电负性差异较大的原子



能够使晶胞内的电子云偏移, 从而改变晶体的表面结合能, 最终使化学环境发生变化(图 4)。Swarnkar 等<sup>[80]</sup>通过部分取代全无机  $\text{CsPbX}_3$  钙钛矿量子点的 B 位点阳离子, 显著提高了其化学稳定性, 从而增强其他各项性质(图 4(a))。本课题组<sup>[20]</sup>通过在碳量子点中掺杂 N 元素, 显著改善了量子点内部的异质电荷分布, 实现了高效的介电损耗(图 4(d))。西北工业大学 Liu 等<sup>[81]</sup>通过改变石墨烯的化学环境增强了其与四氧化三铁的复合能力, 在改善阻抗匹配的同时实现了介电和磁性能之间的平衡。由此可见, 电荷迁移率和电导率是影响电导损耗的关键参数。掺入具有不同价态的化学元素能够引入额外的电子或空穴, 影响晶体的费米能级以及价带和导带的位置, 从而改变带隙大小, 提升材料电导率。Sarangi 等<sup>[82]</sup>通过铅离子掺杂策略有效调整了  $\text{SnO}_2$  的带隙, 实现了约 0.8 eV 的带隙转换。引入磁性元素有利于实现多种损耗机制的协同作用。通过元素掺杂可以引入磁性原子, 从而改变晶体的磁性性质。此外原子进入晶格某些特定的格位可能为材料提供更为优异的磁性环境, 这对磁损耗具有重要意义。南京航空

航天大学 Wang 等<sup>[83]</sup>发现钙钛矿氧化物一般具有反铁磁性与绝缘性, 掺杂后易产生 Jahn-Teller 畸变, 同时提升介电损耗与磁损耗, 材料吸波性能得到显著提高。

缺陷的形成对于介电损耗有着举足轻重的意义, 晶体产生缺陷时, 偶极子正负电荷的对称性变弱, 瞬时偶极矩变大, 极化速率变慢, 使其更难以赶上电磁波的周期变化, 因此电磁波的损耗增大。Lau 等<sup>[84]</sup>发现  $\text{Sr}^{2+}$  掺杂能够降低量子点表面陷阱密度和电荷复合(图 4(b))。同样, 元素掺杂可以影响纳米晶的晶界结构和性质, 晶界以及异质界面的出现是产生界面极化的重要途径。复旦大学 Zhao 等<sup>[85]</sup>采用第一性原理计算发现材料结构内部的缺陷和异质界面会产生强烈的极化, 从而表现出优异的电磁波吸收性能, 实现了 -54.5 dB 的最小反射(图 4(c))。本课题组<sup>[86]</sup>研究了离子掺杂后  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$  氧空位的变化, 发现其对电磁波衰减起到很大作用。总之, 元素掺杂是一种重要的材料设计策略, 可以用来调节和优化晶体的性质, 以满足微纳米粒子的阻抗匹配和电磁波损耗的综合需求。

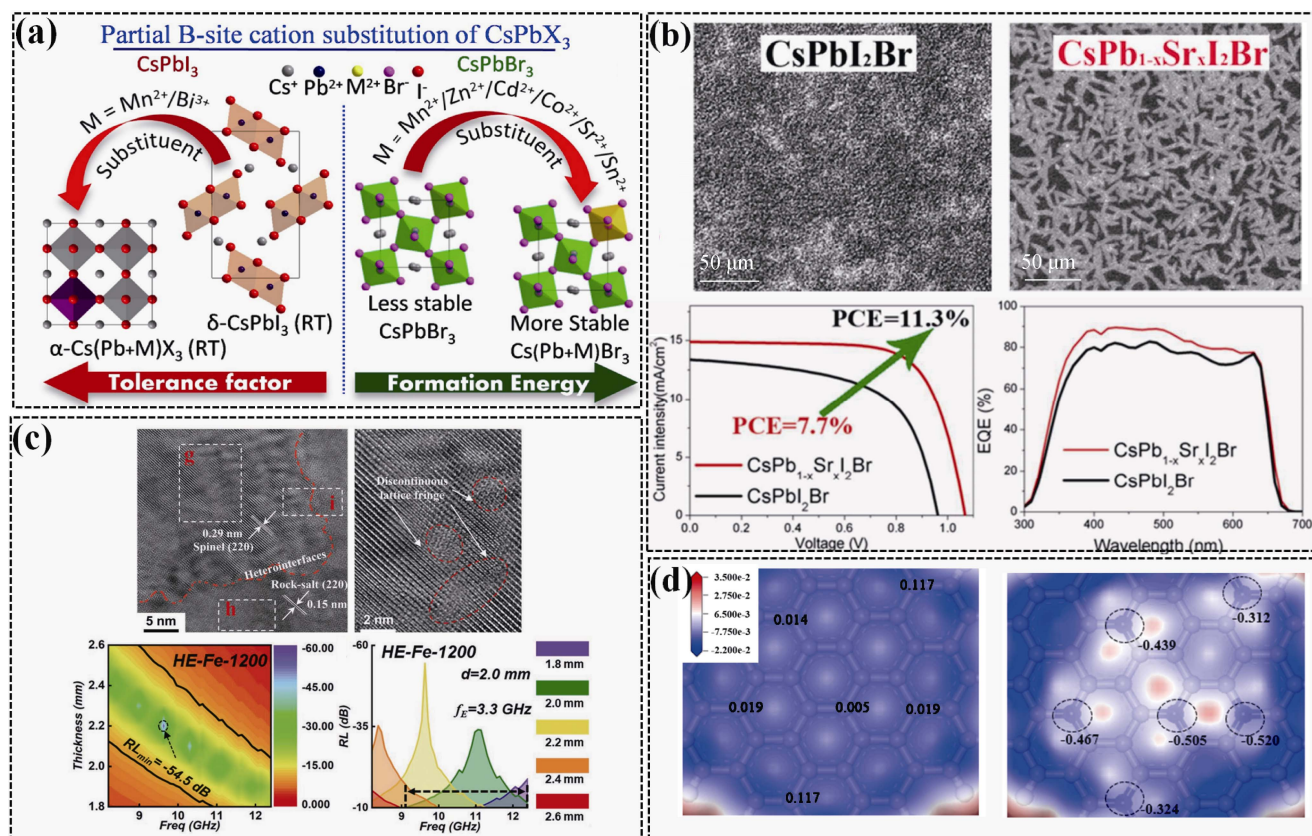


图 4 元素掺杂策略调控材料电子状态

Fig. 4 Element doping strategy for regulating material electron states

- (a) Various metal ion-doped perovskite quantum dots at the B-site cation enhancing their thermal stability and phase stability<sup>[80]</sup>; (b)  $\text{Sr}^{2+}$  doping reducing the surface trap density and charge recombination in quantum dots<sup>[84]</sup>; (c) Defects within the material structure and strong polarization at heterojunction interfaces showing outstanding electromagnetic wave absorption performance<sup>[85]</sup>; (d) Nitrogen element doping in carbon quantum dots improving their internal heterogeneous charge distribution<sup>[20]</sup>

## 2.2 表面效应调控

表面效应是微纳米尺寸材料特有的属性, 当材料的尺寸小于激子半径时, 表面原子的活性和表面能够显著影响电子结构和相关参数, 如带结构、电荷运输、电荷分布、微分密度和晶格应变, 这些参数与电磁性能具有直接关系。

具体来说, 微纳米粒子的表面效应主要产生以下几个方面的影响。首先, 由于量子点、纳米晶等微纳米材料的尺寸很小, 大部分原子位于粒子的表面, 表面原子配位不足, 不饱和键和悬挂键增多, 从而导致粒子表面的结合能增大<sup>[87]</sup>。这使得微纳米粒子表面的原子容易与其他原子结合或反应, 进而导致表面输运和结构的变化。当微纳米粒子需要与其他材料组合形成复合材料时, 高的表面能能够提高材料的结合能力, 促进多种材料之间的电子输运, 进而提高电磁波在材料内部的运输能力。其次, 随着微纳米粒子尺寸减小, 表面存在的缺陷能级作用逐渐明显。这些能级一方面可以捕获电子和空穴, 影响激子的复合, 产生非辐射跃迁<sup>[88]</sup>, 使得粒子更

容易将吸收的能量转换为其他能量耗散, 另一方面, 缺陷能级能够增加载流子输运路径, 加速能量损耗, 影响载流子的定向输运和电导率, 从而改变介电损耗。哈尔滨工业大学 Zhang 等<sup>[89]</sup>分析了缺陷能级的热电性能, 证明了缺陷能级与温度和载流子传输具有依赖关系(图 5(a))。Wu 等<sup>[90]</sup>证明了高密度的缺陷能够促进介质的扩散(图 5(b))。最后, 由于微纳米粒子尺寸小, 经常对其表面进行修饰或者包覆, 这使其容易与其他电磁波吸收材料形成复合材料。此外, 表面改性可以改变微纳米粒子表面的化学性质和稳定性, 从而影响溶解性、生物相容性和环境适应性, 这为微纳米粒子在复杂生存环境中的应用提供了可行性条件。本课题组<sup>[91]</sup>证明了多配体的协同作用能够对量子点的晶相、激子复合以及载流子迁移率产生积极影响(图 5(c))。总的来说, 微纳米粒子的表面效应对其光电性质、电子结构和稳定性等方面都有重要影响。因此, 充分利用微纳米粒子的表面效应, 并通过表面修饰和包覆等方法来优化其电磁性能能够对调控电磁参数产生积极影响。

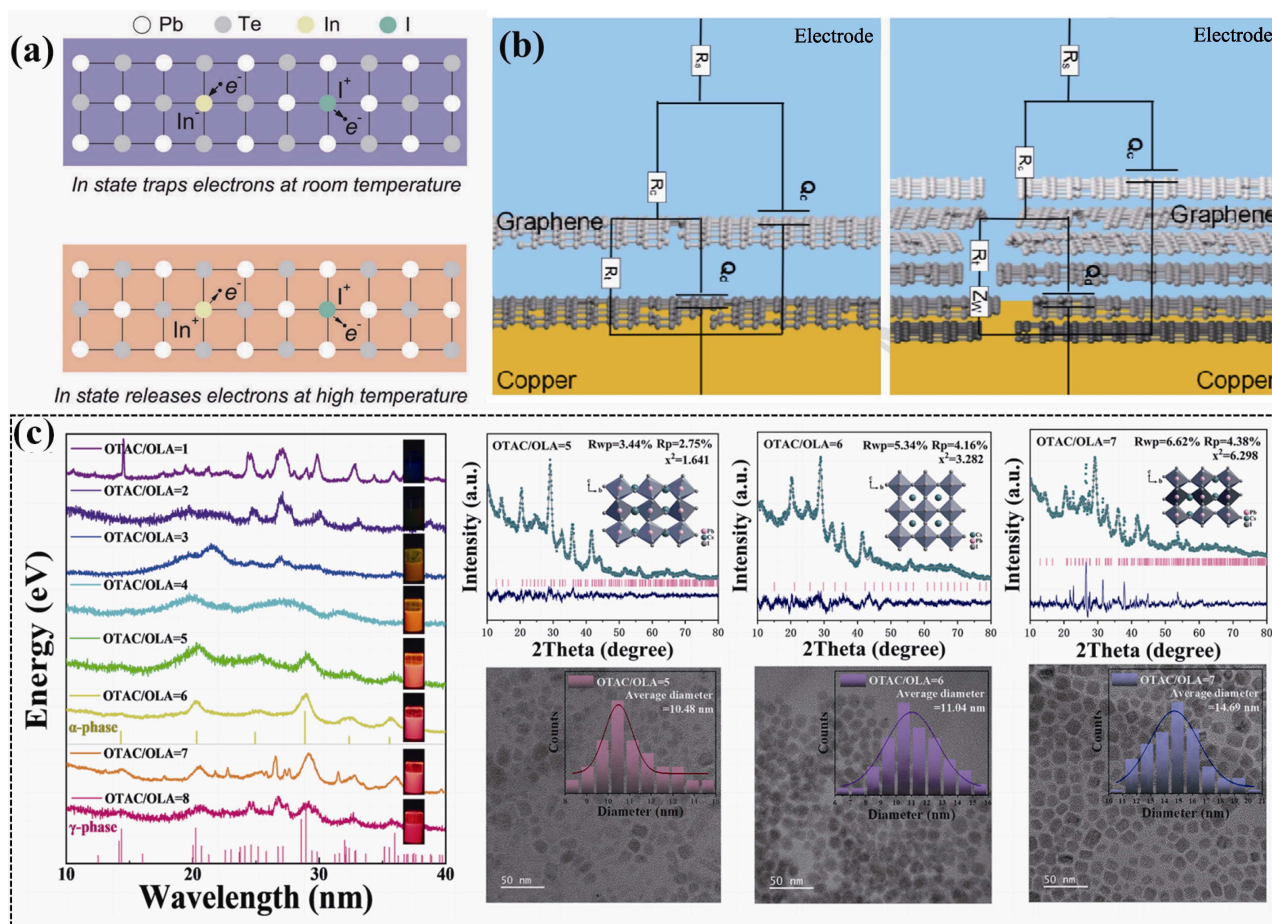


图 5 表面效应策略调控电子状态

Fig. 5 Surface effect strategy for regulating electron states

(a) Capturing electrons at lower temperature with deep defect levels<sup>[89]</sup>; (b) Equivalent circuits of graphene coatings with low- and high-concentration defects<sup>[90]</sup>; (c) Impact of surface ligand on the crystal phase, exciton recombination and charge carrier mobility of quantum dots<sup>[91]</sup>



### 2.3 成核生长控制

调控粒子成核生长环境能够影响微纳结构的变化, 这对调控材料电磁参数有重要影响。对材料的生长环境进行多尺度调控与设计, 进而控制粒子内部电子结构, 实现电磁参数可调。

温度是晶体生长的关键参数之一。在不同的合成温度下, 粒子内部原子或分子的热振动和排列方式会发生变化, 从而影响粒子的电子结构。高温条件能够促进晶体的生长速率, 但同时也会在结晶过程中产生缺陷, 导致材料结晶性较差; 低温条件能够延缓粒子的成核和结晶速率, 在该条件下, 粒子

的缺陷较少, 结晶性较好。因此, 通过改变反应温度能够调控粒子的结晶性和缺陷程度。结晶性较差的粒子会影响材料的电荷迁移率和粒子内部产生极化的能力, 粒子缺陷增多时, 偶极子极化增强会增加材料的极化损耗能力, 因此控制微纳米粒子的合成温度能够有效调控电磁参数。吉林大学 Zeng 等<sup>[92]</sup>通过控制碳量子点的成核生长温度与时间, 合成了不同结晶度的碳量子点, 实现了不同量子效率的荧光转换(图 6(a))。同样 Malik 等<sup>[93]</sup>在不同反应温度下合成了不同带隙的  $\text{Cu}_2\text{MnSnS}_4$  量子点(图 6(b))。过饱和度也是控制晶体生长速率的重要参数, 通过

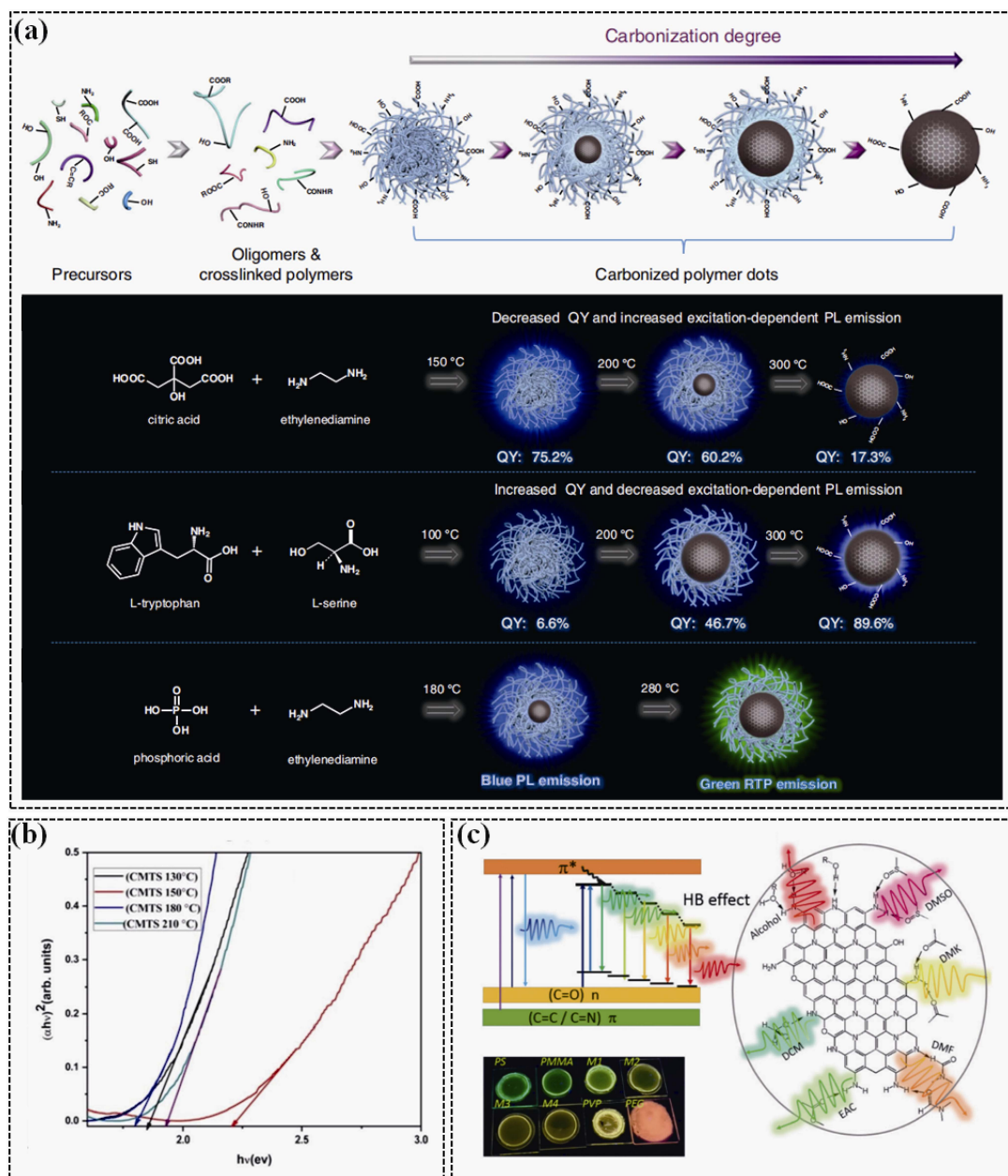


图 6 成核生长控制策略调控电子状态

Fig. 6 Nucleation-growth control strategy for regulating electron states

(a) Synthesizing carbon quantum dots with different quantum efficiencies by controlling the reaction temperature<sup>[92]</sup>; (b) Tuning bandgap by controlling the reaction temperature<sup>[93]</sup>; (c) Generating carbon quantum dots with adjustable bandgaps in different polar solvent environments<sup>[94]</sup>

控制前驱体溶液的过饱和度可以调控晶体缺陷和杂质,从而调控微纳米材料的电磁参数。此外,前驱体结晶生长溶剂能够影响晶体的化学组成和结构,不同的溶液条件可以产生多晶形态或同素异形体。通过选择不同极性、沸点、化学成分以及电导率的溶剂,可以调控粒子的表面结构,从而调控理化性质。Zhang 等<sup>[94]</sup>通过不同极性的前驱体溶液反应合成了具有不同荧光带隙的碳量子点,实现了带隙可调(图 6(c))。晶体的生长方向对调控异质界面起到关键作用。在微纳米粒子生长过程中通过特定的表面处理来控制或抑制某个晶面的生长,从而将特定的晶面暴露在表面,获得不同取向的晶体。晶体的不同取向可以影响材料的电子传输、力学性能,以及磁性方向,这些都是调控电磁参数的关键条件。总之,调控微纳米粒子生长条件能够调节其在电磁场作用下产生极化或磁化的能力,以及能量损耗的能力,是调控微纳米粒子电磁参数的有效策略。

### 3 微纳材料与电磁波吸收

众所周知,目标的“可检测性”受到探测波长和目标物体相对尺寸的影响,当波长远小于物体尺寸时,容易获得电磁波反射信号。对于微纳米材料,其尺寸远小于普通电磁波的波长,因此该材料对雷达波的透过率远高于常规材料,电磁波反射率显著降低。上文提出微纳结构设计对材料理化性质调控有很大的积极作用,相比于传统宏观材料,一方面微纳结构的调控策略对极小尺寸的纳米材料影响更为明显;另一方面微纳材料由小的结构单元组成且粒子尺寸极小,通过微纳结构调控能够使其表现出许多独特的理化性质,这对实现电磁参数可调做出了更大的贡献。基于此,本章节介绍了具有独特理化性质的微纳材料作为微纳结构调控电磁参数的典型范例,包括具有量子限域效应的量子点、原子序列排列规则的纳米晶以及高纵横比的一维纳米线,并介绍了这些材料在电磁波吸波领域的研究现状与应用前景。

#### 3.1 量子点

在量子化的时代背景下,量子点特殊的微纳结构在电磁波吸波领域具有巨大潜力,为开发高性能吸波材料提供了新的思路和方法。基于 Froning 和 Czysz 的观点,美国国防部门提出在 2025 年和 2050 年的下一代军机概念中利用量子真空的零点能量来增加磁流体动力学呼吸推进和中子聚变推进功

率<sup>[95-96]</sup>,将量子理论应用到国防事业中。由此可见,深入研究和开发量子理论将有可能对我们的生活产生巨大的影响。

量子点是一种零维半导体材料,粒子尺寸通常在 1~20 nm 之间,由于高表面体积比、量子限域效应和边缘效应,它表现出独特的化学和物理性质。当材料尺寸缩小到纳米级别时,表面效应导致比表面积增大,使其能够在粒子表面发生多重散射<sup>[97]</sup>。此外,在裸量子点表面通常存在悬挂键或缺陷<sup>[98]</sup>,与其他相材料复合时,通过在界面处传递能量将会产生强的偶极子和界面极化损耗<sup>[59]</sup>。合肥工业大学 Lyu 等<sup>[99]</sup>采用三步液体化学法合成了石墨烯量子点界面修饰的分层 Ni/PS 核壳纳米胶囊,其中石墨烯量子点在界面上修饰,通过缺陷的固有极化和官能团的界面极化增强了材料的介电损耗。此外,东南大学 He 等<sup>[100]</sup>首次将量子点材料  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene 应用于吸波领域,通过简单的水热反应制备了具有独特三维/零维异质结构的菊花样  $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7/\text{MXene}$  量子点复合材料。该异质结构具有丰富的官能团和表面缺陷,产生的极化中心促进了偶极子极化,同时量子点较大的比表面积大大增强了界面极化(图 7(a))。独特的异质结构不仅可以调整电磁参数,实现阻抗匹配,而且实现了多重损耗协同效应。当与石蜡的填充比为 15% 时,其反射损耗在 2.6 mm 的厚度下达到 -48.28 dB,有效吸收带宽达到 6.38 GHz,覆盖了 X-Ku 波段(图 7(b)),证实了量子点可作为高效的电磁波吸收材料应用于吸波领域。量子点具有独特的量子限域效应,调控不同的量子点能够精确控制电子能级分裂,产生不同的能级带隙。半导体的带隙决定了其传递电子的途径<sup>[101]</sup>,因此通过控制量子点带隙结构理论上可以精确调控材料表面的导电能力,从而满足阻抗匹配条件,使电磁波进入材料内部。此外可以通过调节量子点尺寸和组成来实现对特定波长光的吸收<sup>[102]</sup>,这使得量子点在制备吸波材料方面具有潜力。通过调节量子点的能带结构和能级分布,可以实现对特定频率范围内电磁波的吸收,从而实现吸波材料的设计和制备。Gao 等<sup>[103]</sup>利用  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  量子点的量子限域效应设计和制备了性能优良的电磁波吸收材料(图 7(c, d))。

本课题组<sup>[20]</sup>通过控制交联和碳化程度合成了不同发射波长的碳量子点,将该量子点与碳纳米管复合实现了高效的微波吸收,并且材料填充比仅为 7%。研究表明窄带隙的量子点更有利于电子跃迁和转移,因此碳量子点内部的量子限域效应对调



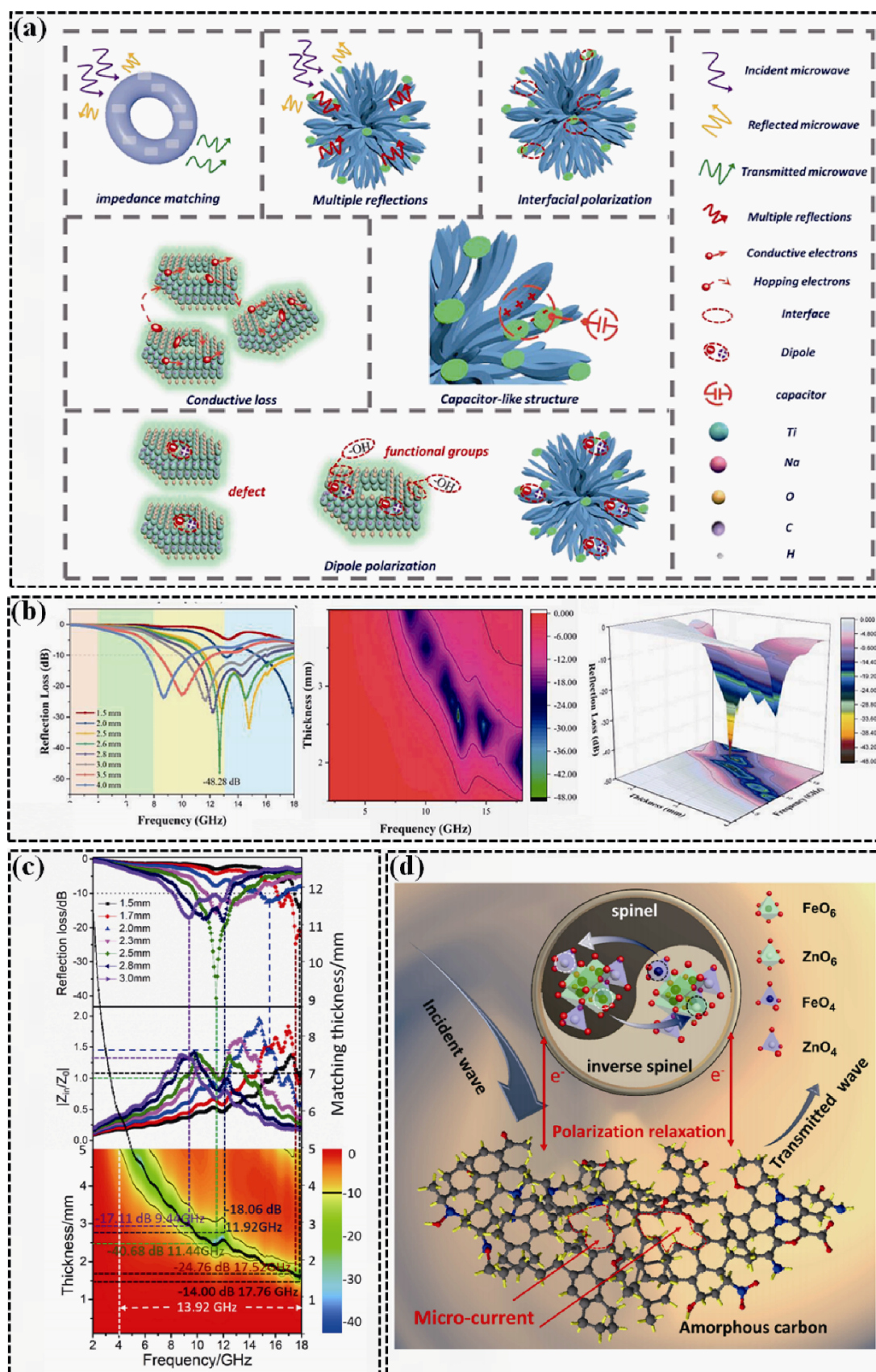


图 7 量子点在吸波领域的应用

Fig. 7 Application of quantum dots in the field of electromagnetic wave absorption

(a) High-efficiency electromagnetic wave absorption mechanism of  $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7/\text{MXene}$  quantum dot composite material<sup>[100]</sup>; (b) One-, two-, and three-dimensional absorption performances of  $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7/\text{MXene}$  quantum dot composite material<sup>[100]</sup>; (c) Reflection loss values of  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  quantum dot composite material at different thicknesses<sup>[103]</sup>; (d) Schematic illustration of mechanisms for  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  quantum dot polycrystalline inversion and electromagnetic microwave absorption<sup>[103]</sup>

控复合材料的电磁参数有显著作用。磁量子点作为量子点家族的重要组成部分,具有较强的交换耦合效应,由于电子结构和磁性质可以被精确地控制和调节<sup>[104]</sup>,这有利于材料的磁损耗行为。更重要的是,因其尺寸超小,涡流效应通常可以被抑制。Wu 等<sup>[105]</sup>将  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  量子点与碳球结合,发现在量子点与碳球界面处发生强的偶极子极化,同样,磁性量子点的引入加强了复合材料的磁损耗,磁损耗与介电损耗的协同作用有效衰减了电磁能量。此外,量子点具有各种类型的晶体结构,通过在不具备磁性的量子点的晶格中掺杂磁元素还可以为其引入磁性,从而增强材料的磁损耗。

量子点作为一个新兴材料以其独特的物理化学性质在光伏光电<sup>[106]</sup>、生物传感器<sup>[107]</sup>、催化<sup>[108]</sup>以及能源<sup>[109]</sup>等领域表现出绝对的优势和应用前景,然而量子点目前暂未广泛应用于吸波领域。抓住量子点大爆炸式发展趋势,深入研究和探索其特有性质与电磁参数之间的确切联系,有望将量子点作为主流吸波材料广泛应用于电磁波吸收领域。

### 3.2 纳米晶

纳米晶是一种具有纳米尺寸晶粒的材料,晶粒的尺寸通常在 1~100 nm 之间。与传统的宏观材料相比,纳米晶具有更高的比表面积和更多的晶界,这使得纳米晶在许多方面表现出与传统材料不同的性质,如更高的强度、硬度和塑性等;与非晶材料相比,纳米晶的原子按照规则进行空间排列,形成周期性结构,具有长程有序性,从而使得纳米晶具有更高的电导率和更强的饱和磁感应强度与磁导率。因此,纳米晶在介电损耗和磁损耗上都表现出了良好的应用前景。

纳米晶的晶体结构赋予了其独特的调控机制(图 8)。西北大学 Feng 等<sup>[110]</sup>在 N 掺杂的石墨烯纳米片上修饰  $\text{FeNi}_3$  纳米晶,使其表现出了显著的微波吸收能力,这主要源于有效阻抗匹配条件和  $\text{FeNi}_3$  纳米晶的磁损耗与 N 掺杂石墨烯的介电损耗之间的良好互补性(图 8(a))。此外, Qi 等<sup>[111]</sup>通过扩展异质结构界面的策略合成了碳化水热炭/ $\text{ZnO}$  纳米晶体复合材料,引入氧化锌纳米晶体形成了特殊的异质结构,从而发生了显著的界面极化,提高了电磁波吸收特性(图 8(b))。南京航空航天大学 Cheng 等<sup>[62]</sup>采用浸渍过程和煅烧处理,构建了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米晶/介孔碳空心球核壳杂化体。由于  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米晶高度有序的空间周期结构,产生了强的磁损耗,平衡了碳材料在磁损耗上的缺失,该复合材料的最大反射损耗达到 -60.2 dB,在填充比为 20%、2.6 mm 厚度下能

够达到 8.0 GHz 的有效带宽。在晶体结构的合成过程中,温度、辐射、化学反应等外部环境的影响可能使晶体结构中的原子发生缺失,产生晶格缺陷。Su 等<sup>[112]</sup>利用缺陷调控策略,采用一步碳化葡萄糖酸铁前驱体合成了富含氧空位的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米晶/碳纳米片复合吸波材料,该材料表现出优越的微波吸收能力,在与石蜡的填充比为 40%时,具有 -65.4 dB 的反射损耗和 6.24 GHz 的超宽有效吸收带宽(图 8(d))。密度泛函计算显示  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米晶不仅为复合体系引入了磁损耗,还通过表面的氧空位缺陷形成电荷分离诱导了极化损耗(图 8(c))。目前纳米晶的晶格缺陷已经实现精确调控,而通过晶格缺陷诱导极化损耗吸收电磁波的策略还未深入展开研究,未来有值得期待的发展空间。

纳米晶不仅可以调控内部缺陷,还可以通过控制反应条件形成特定的形貌结构和晶体形状。苏州大学 Liu 等<sup>[113]</sup>在还原氧化石墨烯薄片上生长  $\text{ZnO}$  纳米晶有效地防止了石墨烯的团聚,合成了具有高性能、宽带宽和轻质量的电磁波吸收材料。通过调节 pH 控制  $\text{ZnO}$  纳米晶的形貌,发现小六角形圆柱状  $\text{ZnO}$  纳米晶具有最好的吸波效果。Liu 等<sup>[114]</sup>合成了花状、海胆状、球状和链状形态的  $\text{Co}_{20}\text{Ni}_{18}$  合金球,研究了不同的纳米晶形态结构对微波吸收的影响,其中花状  $\text{Co}_{20}\text{Ni}_{18}$  纳米晶吸收带宽能够达到 5.5 GHz,海胆状的  $\text{Co}_{20}\text{Ni}_{18}$  纳米晶反射损耗能够达到 -33.5 dB。此外, Lü 等<sup>[115]</sup>利用多元醇方法制备了具有一维纳米棒结构的金属钴纳米晶体,该特殊的纳米棒状结构提高了其电磁波吸收性能,在 1243 GHz 时最小反射损耗为 -57.8 dB,有效吸收带宽可达 11.3 GHz。值得一提的是,通过调节成核结晶过程中原子、分子排列方式来控制每个晶面的生长速率,从而产生形状各异的纳米晶,最终使纳米晶的表面暴露出不同的晶面。暴露在表面不同的晶面具有不同的紧密度、间隙、表面能、光学性质和机械性质,当电磁波进入后会产生不同的能量转换路径,从而产生不同的电磁波吸收效果。厦门大学 Liu 等<sup>[31]</sup>用不同的表面活性剂诱导不同晶面生长,合成了三角形、球形和方形的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米晶,其中球形  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米晶的阻塞温度远低于室温,而三角形纳米晶在高温下表现出阻塞行为。此外,三角形纳米晶的共振行为在介电损耗切线和磁损耗切线上产生损失峰,使其表现出最大的电磁波吸收。

纳米晶的晶体结构可设计、内部缺陷可调控以及生长方向易改变,使其能够实现电磁性能的调控。但至今为止,晶体的特性与电磁参数的关系还



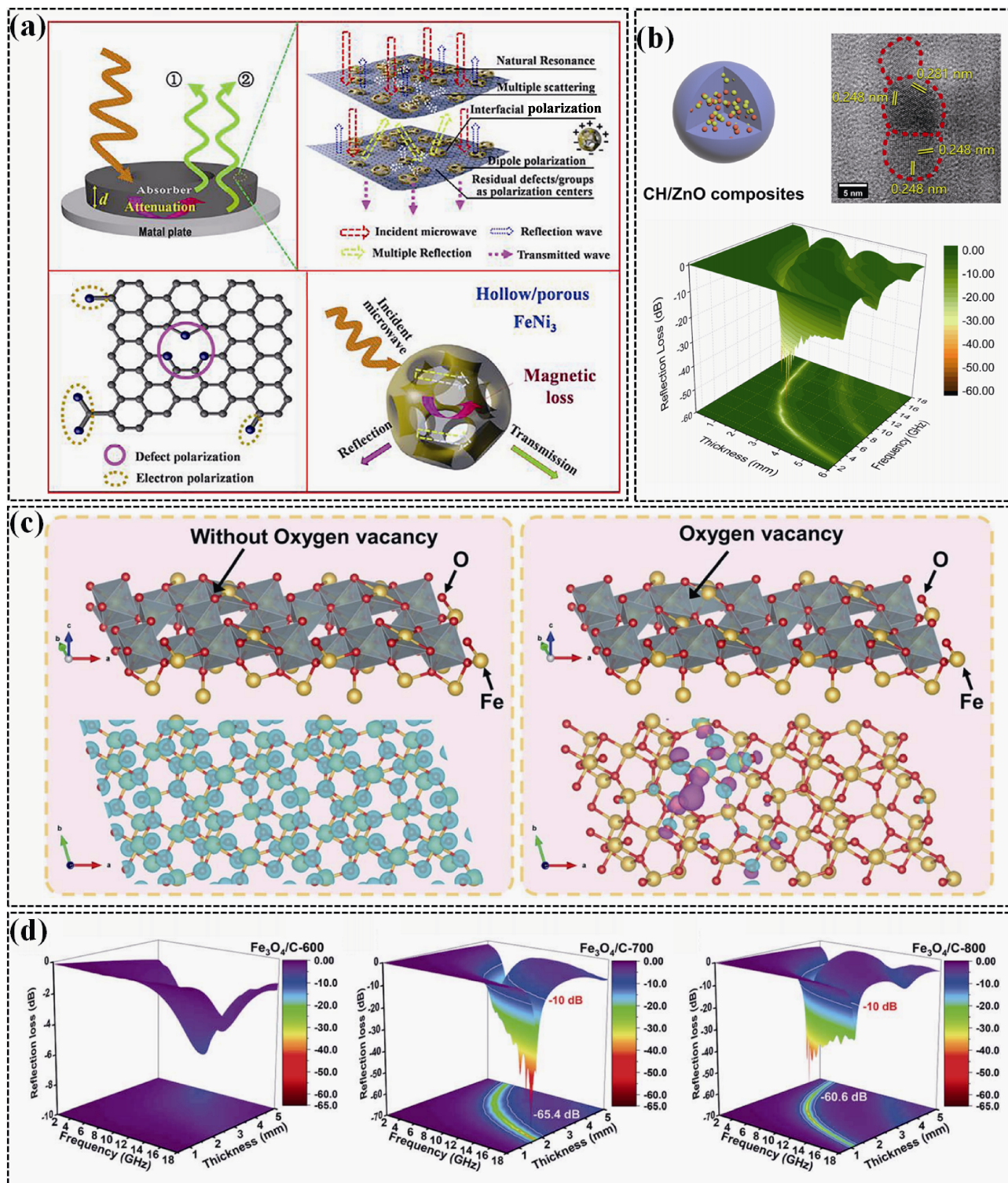


图8 纳米晶在吸波领域的应用

Fig. 8 Application of nanocrystals in the field of electromagnetic wave absorption

- (a) Schematic typical synergistic mechanism on relationship between magnetic loss of  $\text{FeNi}_3$  nanocrystals and dielectric loss of graphene nanosheets<sup>[110]</sup>; (b) Enhanced electromagnetic loss facilitated by promoted interfacial polarization using ZnO nanocrystals<sup>[111]</sup>; (c) Charge separation-induced polarization loss in  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanocrystals through surface oxygen vacancy defects<sup>[112]</sup>; (d) Three-dimensional absorption performance of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanocrystal composite at different annealing temperatures<sup>[112]</sup>

缺乏准确的理论基础, 这限制了纳米晶在电磁波吸收领域的发展。因此, 深入探究纳米晶内部结构与电磁参数的机理是当前亟需解决的问题。

### 3.3 纳米线

纳米线具有高的纵横比, 是纳米尺度下的一维结构材料<sup>[75]</sup>, 其在纵向生长没有限制使得电荷载流

子可以沿着纳米线纵向传播,因此它可以作为复合材料电子传输和互连的关键材料。通过微纳结构设计,一方面能够调控电子云分布状态,进而提高导电损耗和极化损耗;另一方面调控纳米线的微纳结构能够提高其表面能,增加材料的复合能力,引入磁性材料等多种损耗形式,从而提高材料的电磁性能。

近年来,复合材料在电磁波吸收领域发挥了巨大的作用,通过调控复合材料的成分、复合方式以及结构设计能够满足材料和空气的阻抗匹配,同时协调介电类材料和磁性材料的协同作用,进而达到最佳的电磁波吸收效果。其中核壳结构是复合材料典型结构,常见的核壳结构有以磁性金属包裹铁氧体<sup>[116]</sup>、碳材料包裹磁性颗粒<sup>[117]</sup>以及无机空心壳包裹磁性纳米颗粒<sup>[118]</sup>等。这些复合材料一方面能够集成材料的不同性质,从而提高导电损耗、磁损耗和介电损耗能力,另一方面通过调控核壳比例与厚度进一步改善材料的阻抗匹配。然而,核壳结构虽然能够调控阻抗匹配性并协同电磁、介电损耗,但是每个核壳结构单元的独立性导致电子很难在整个材料系统中传递。这不仅使得未被转换的电磁波很难继续进入材料内部被消耗,而且阻挡了粒子之间的电子转移,进而抑制了界面极化的产生。具有一维结构的纳米线在纵向生长没有限制使得电荷载流子可以沿着纳米线纵向传播,因此它可以克服传统核壳结构电子传输困难的问题,成为电磁波吸收领域中复合材料电子传输和互连的关键材料。

常见的电磁波吸收纳米线可以分为金属纳米线和碳基纳米线两大类。金属纳米线是通过表面效应和控制粒子成核生长来促进前驱体沿特定方向生长成纳米线状材料。Wu 等<sup>[119]</sup>通过在表面对吡咯单体原位聚合包裹 Ag 纳米线进行高温热解,得到了核壳结构的纳米线,微纳结构调控的异质结构纳米线具有更高的电导率和高纵横比,激活了界面极化、偶极子极化和相关弛豫等多种损耗机制,实现了高的电磁波吸收性能(图 9(a))。此外,Qian 等<sup>[120]</sup>采用成核生长控制策略合成了聚乙烯吡咯烷酮定向的镍纳米线,镍纳米线高的纵横比、优异的电子传输能力和优异的磁性使其具备高的电磁波吸收性能。Yuan 等<sup>[121]</sup>利用聚多巴胺涂层的二氧化锰纳米线进行热硝化处理合成了具有丰富内部空隙的碳涂层 Mn<sub>4</sub>N 纳米线,当与石蜡的填充比为 20%时,最小反射损耗为-58 dB,有效带宽达到 6.1 GHz。研究表明 Mn<sub>4</sub>N 纳米线连接了导电网络,加速了电子迁移和跃迁的速率,有效地增强了导电损耗。由此可见,金属纳米线不仅可以引入磁性质,而且能够提高电子

转移和跃迁能力,从而导通体系的导电网络。碳基纳米线最具代表性的两种材料为碳化硅和碳纳米管。碳化硅的基本结构单元为 Si-C 以共价键结合而成的正四面体,碳原子位于四面体的中心,硅原子位于四面体的四个顶点,碳和硅的电负性相差较大,所生成的共价键较强,因此碳化硅物理性质非常稳定。此外,一维的纳米线结构赋予其优异的电子传输能力,可广泛应用于电磁波吸收领域。北京科技大学 Kuang 等<sup>[122]</sup>制备了不同长度的碳化硅纳米线,随着纳米线长度增加,基体的电导率显著提高,主要损耗机制从极化损耗转换为导电损耗,基体的微波吸收能力得到提升。同样,中国人民解放军陆军工程大学 Duan 等<sup>[123]</sup>通过无额外碳源的碳化硅直接碳化表面,成功合成了纳米多孔碳壳包裹的碳化硅纳米线材料,该材料具有优异的微波吸收性能,当填充比为 30%时,最小反射损耗为-60 dB,有效微波吸收带宽达到 7.2 GHz。纳米线表面碳化后产生的缺陷破坏了电荷分布平衡,导致偶极子极化和德拜弛豫。此外纳米线间形成了良好的三维导电网络,产生的偏移和跳跃电子在外部电磁场下快速将微波能量转化为热能,显著提高了电磁波的损耗。除此之外,碳化硅在武器装备上也发挥了巨大作用,法国马特拉防御公司研制的碳化硅陶瓷复合材料已经成功应用在 M88-2 和 F100 发动机喷管外调节片上<sup>[124]</sup>。在 F110-GE-129 发动机尾喷管、F136 发动机涡轮叶片、F414 发动机和 CFM56-7C 发动机涡轮壳环等部位均使用了英美联合研制的碳化硅陶瓷基复合隐身材料<sup>[124]</sup>。

碳纳米管由 sp<sup>2</sup> 共轭  $\pi$  键构成,具有非常优异的电子传输性能,一维的纳米线结构使其能够构建一个完整的导电网络,此外表面的悬挂键能够产生极化,因此碳纳米管被广泛应用于目标频率的微波吸收。Wei 等<sup>[69]</sup>在不同的退火温度下合成了碳纳米管-Sc<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 陶瓷,研究表明高效的电磁波吸收是由碳纳米管形成的三维网络结构产生的电导率损失和 Sc<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 产生的极化损失引起的(图 9(b))。复旦大学 Hu 等<sup>[125]</sup>研究发现形成碳纳米管异质结构是提高材料微波吸收能力的有效方法,该课题组通过合成三氧化二铁颗粒,将其分别锚定碳纳米管的内部和外部形成了碳纳米管基异质结构,证实了碳纳米管内表面的界面极化强于外表面,推进了碳纳米管在电磁波吸收领域的进一步发展。Zhou 等<sup>[126]</sup>采用碳纳米管与树脂基复合设计蜂窝型超材料,优化后的超材料吸收体在 5.65~40 GHz 内实现了>90%的吸收,表明碳纳米管具有广泛的应用前景。此外,碳纳米管作为一种相对成熟的微纳米材料,在国防领域展现出了巨大



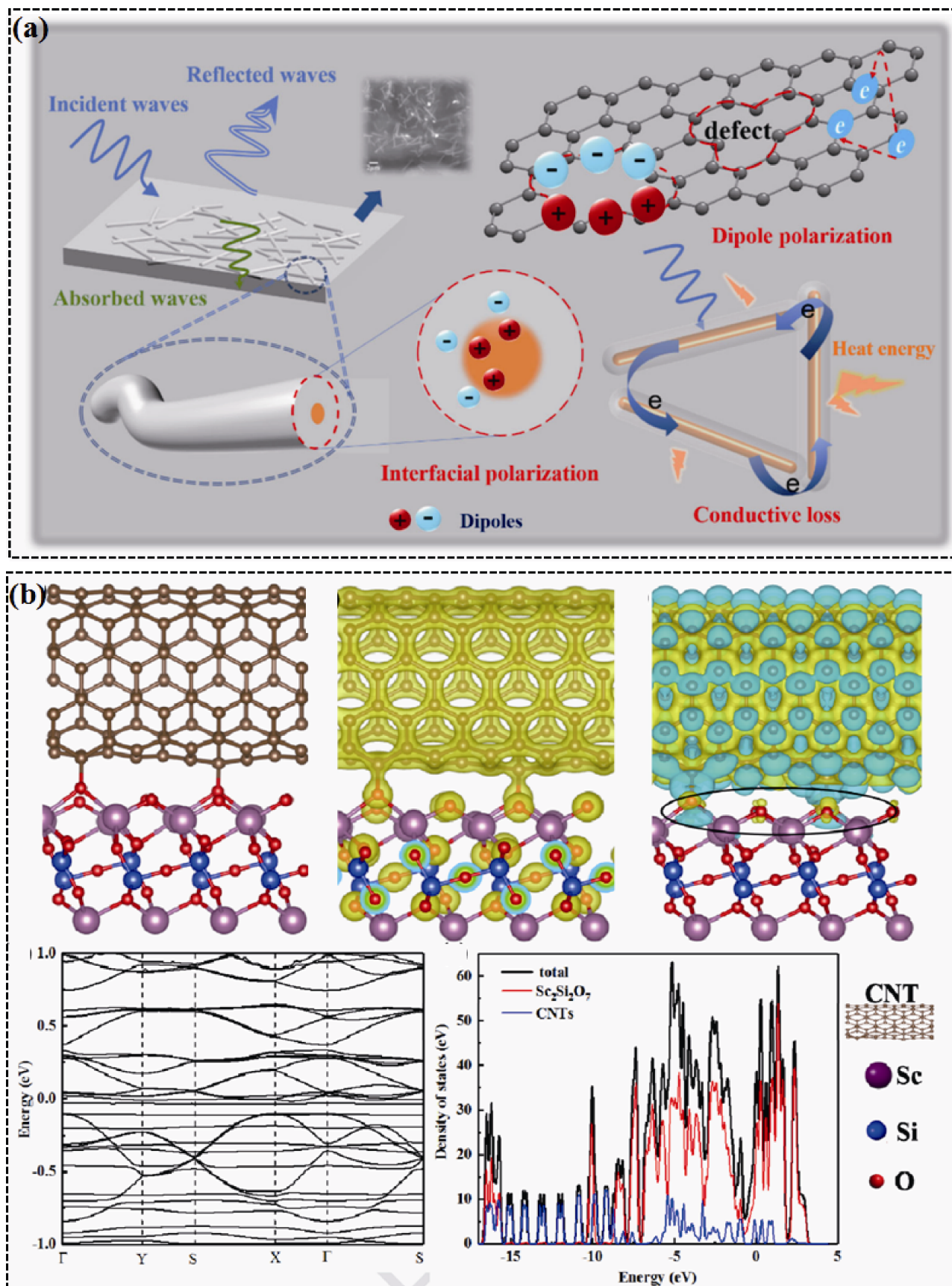


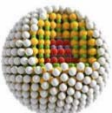
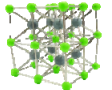

图 9 纳米线在吸波领域的应用

Fig. 9 Application of nanowires in the field of electromagnetic wave absorption

(a) Schematic mechanisms of various loss including interface polarization, dipole polarization, and their related relaxation activated by Ag nanowires<sup>[119]</sup>; (b) First-principles confirmation of efficient electromagnetic wave absorption which resulted from conductivity loss generated by a three-dimensional network structure formed with carbon nanotubes and polarization loss induced by Sc<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>[69]</sup>

表 1 微纳结构调控策略与量子点、纳米晶以及纳米线的对应关系

Table 1 Micro-nanostructure modulation strategies and their corresponding relationships with quantum dots, nanocrystals, and nanowires

Micro-nano material	Typical feature	Micro-nanostructure modulation strategy	Common features
Quantum dots 	(a) Quantum confinement effect (b) Designable crystal structure	(a) Defect engineering <sup>[99-100]</sup> (b) Bandgap engineering <sup>[101-103]</sup> (c) Surface functionalization <sup>[105]</sup> (d) Nucleation-growth control <sup>[120]</sup>	(a) High specific surface area Micro-nano materials with high specific surface area enable surface functionalization, nucleation-growth control, and composite material design, thereby optimizing the electromagnetic performance of the materials.
Nanocrystals 	(a) Designable crystal structure (b) Controllable crystal growth direction	(a) Elemental doping <sup>[110]</sup> (b) Heterojunction engineering <sup>[111]</sup> (c) Defect engineering <sup>[112]</sup> (d) Crystal facet control <sup>[31, 113-115]</sup>	(b) Extremely small particle size Nanostructure engineering has a significant impact on the physicochemical properties of nanomaterials, enabling their improvement.
Nanowires 	(a) High aspect ratio (b) High electron transmission rate	(a) Heterojunction engineering <sup>[125]</sup> (b) Composite material design <sup>[69, 119-120]</sup>	

的潜力。美国国家航空航天局<sup>[127]</sup>于 2010 年发布了有关纳米材料未来应用的全面路线图,指出碳纳米管具有轻质、耐用以及电导优良等特性,在军机上具有潜在应用。美国第五代隐身战斗机 F22<sup>[127]</sup>采用了碳纳米管复合材料作为隐身蒙皮,后面的研制也都采用该材料,证明了碳纳米管的高应用潜力。由此可见,纳米线材料高的横纵比使其可以在基体中形成三维导电网络,产生高的电损耗正切角,依靠介质的电子极化、偶极子极化以及界面极化有效衰减电磁波。将纳米线作为复合材料的基底是未来复合吸波材料的主流方向之一。

量子点、纳米晶以及纳米线是典型的零维或一维纳米材料,微纳结构设计对其具有重要意义。基于上文提出的微纳结构与电磁学的构效关系和微纳结构的设计策略,本章节介绍了微纳结构调控对这三种材料电磁性能的积极作用。如表 1 所示,量子点、纳米晶以及纳米线具有极小的粒子尺寸和高的比表面积,使得微纳结构调控对超小尺寸的纳米粒子结构影响更大;此外高的比表面积使材料具备更强的表面效应,进而优化材料电磁性能,调控电磁参数。其中量子点具备独特的量子限域效应,基于成核生长控制策略能够调控其能级带隙,影响材料导电性,调控阻抗匹配与介电损耗。此外量子点的晶体结构可设计性使其可以通过元素掺杂策略引入缺陷、磁性元素等,进而调控介电损耗和磁损耗。纳米晶的典型特征是规则有序的晶体结构,其晶体结构可设计且结晶生长方向可控,基于表面效应策略可抑制纳米晶的特定晶面生长,控制晶体形状,进而调控介电损耗和电磁参数。纳米线的典型特征是具有高的横纵比和电子传输特性,其中金属纳米

线通过表面效应控制前驱体生长方向,调节材料导电性,此外通过元素掺杂等微纳结构调控方式能够改变其电子云分布以及复合能力,进而提高导电损耗和极化损耗。因此,深入探究微纳结构与电磁学的构效关系,结合材料自身性质,有望精确调节材料的电磁参数。

4 总结与展望

当前,研究人员主要通过共掺、混合等方式进行复合型吸波材料的研究。随着高分辨成像技术以及精密表征设备的发展,揭开纳米粒子内部微观结构与电磁参数的定量关系将成为可能,通过调控微纳结构,改变材料内部根本理化性质,有望替代传统的宏观材料设计方法实现低成本的电磁性能可调。本文从一个全新的视角探究了微纳结构与电磁性能的构效关系。基于微纳米粒子的高比表面积、量子限域效应、特定的配位环境以及缺陷和生长方向可控等,梳理与总结了异质界面、导电网络、偶极子极化、介磁协同、介电协同以及磁磁协同与微纳结构设计的构效关系,以期微纳结构调控在电磁波吸收领域的进一步发展与应用提供理论参考与设计途径。

量子点、纳米晶以及纳米线等微纳米材料已经在光电、光伏、催化以及能源领域表现出绝对的优势与发展前景,但在电磁波吸收领域中的应用尚未成熟,其主要原因及待解决的问题如下:(1)微纳结构与电磁响应机制研究相对较浅,关于界面、缺陷以及各种特殊的极化和弛豫过程的电子运动缺乏精确的理论依据;(2)受原位高分辨技术发展的限制,

微纳结构设计及分析难以精确到原子级别,使得难以从成像角度直观地观察和设计微纳结构,例如缺陷、配体等,只能通过分子振动、转动以及电子跃迁等间接方式表征微纳结构变化,这限制了微纳结构精确设计的发展;(3)设计材料的微纳结构可以精确控制电磁参数,但量产问题有待解决,在设计材料的微纳结构时,进一步提纯后得到的样品量过少,使得微纳材料从实验室走向实际应用还需要进一步发展。因此,机遇与挑战是并存的,随着凝聚态物理、分子动力学、机器学习以及高分辨技术的进一步发展,期待未来能够利用微纳结构中电子的运动与电磁性能的数学关系实现电磁参数的精确可调,为电子信息以及航天航空研究做出贡献。

## 参考文献:

- [1] HUANG B, HU H, LIM S, *et al.* Gradient FeNi-SiO<sub>2</sub> films on SiC fiber for enhanced microwave absorption performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, **897**: 163204.
- [2] LIU C, LIAO X. Collagen fiber/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/polypyrrole nanocomposites for absorption-type electromagnetic interference shielding and radar stealth. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, **3**(12): 11906.
- [3] CHAI X, ZHU D, LIU Y, *et al.* Silver-modified chromium(III) oxide as multi-band compatible stealth materials for visual/infrared stealth and radar wave transmission. *Composites Science and Technology*, 2021, **216**(10): 109038.
- [4] WU D, CHEN G D, GE C Y, *et al.* DFT+U analysis on stability of low-index facets in hexagonal LaCoO<sub>3</sub> perovskite: effect of Co<sup>3+</sup> spin states. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2017, **30**(3): 295.
- [5] DING Y, ZHAO X, LI Q, *et al.* Broadband electromagnetic wave absorption properties and mechanism of MoS<sub>2</sub>/rGO nanocomposites. *Materials Chemistry Frontiers*, 2021, **5**(13): 5063.
- [6] CHEN X, ZHONG K, SHI T, *et al.* Urchin-like polyaniline/magnetic carbon sphere hybrid with excellent electromagnetic wave absorption performance. *Synthetic Metals*, 2019, **248**: 59.
- [7] GUAN G, GAO G, XIANG J, *et al.* CoFe<sub>2</sub>/BaTiO<sub>3</sub> hybrid nanofibers for microwave absorption. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, **3**(8): 8424.
- [8] GREEN M, TIAN L, XIANG P, *et al.* FeP nanoparticles: a new material for microwave absorption. *Materials Chemistry Frontiers*, 2018, **2**(6): 1119.
- [9] WANG B, WU Q, FU Y, *et al.* A review on carbon/magnetic metal composites for microwave absorption. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, **86**(30): 91.
- [10] FU H, GUO Y, YU J, *et al.* Tuning the shell thickness of core-shell  $\alpha$ -Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> nanoparticles to promote microwave absorption. *Chinese Chemical Letters*, 2022, **33**(2): 957.
- [11] WU Z, DENG Y, MENG Z, *et al.* Microwave absorbing properties of novel SiC/C<sub>f</sub> composites containing SiC array modified coating. *Journal of Inorganic Materials*, 2021, **36**(3): 306.
- [12] ZHAO G, LV H, ZHOU Y, *et al.* Self-assembled sandwich-like MXene-derived nanocomposites for enhanced electromagnetic wave absorption. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, **10**(49): 42925.
- [13] CHEN J, YE W, WANG S, *et al.* Design of two-dimensional organic-inorganic heterostructures for high-performance electromagnetic wave absorption. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, **11**(32): 10816.
- [14] DU B, CAI M, WANG X, *et al.* Enhanced electromagnetic wave absorption property of binary ZnO/NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> composites. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, **10**(4): 832.
- [15] CUI L, TIAN C, TANG L, *et al.* Space-confined synthesis of core-shell BaTiO<sub>3</sub>@carbon microspheres as a high-performance binary dielectric system for microwave absorption. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, **11**(34): 31182.
- [16] ZHANG Z, XIONG Z, YAO Y, *et al.* Constructing conductive network in hybrid perovskite for a highly efficient microwave absorption system. *Advanced Functional Materials*, 2022, **32**(39): 2206053.
- [17] GREEN M, LIU Z, XIANG P, *et al.* Doped, conductive SiO<sub>2</sub> nanoparticles for large microwave absorption. *Light, Science & Applications*, 2018, **7**(1): 5432.
- [18] WANG F, LIU Y, ZHAO H, *et al.* Controllable seeding of nitrogen-doped carbon nanotubes on three-dimensional Co/C foam for enhanced dielectric loss and microwave absorption characteristics. *Chemical Engineering Journal*, 2022, **450**: 138160.
- [19] WU Z, JIN C, YANG Z, *et al.* General biotemplating of hierarchically ultra-vesicular microspheres for superior microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2022, **431**: 133925.
- [20] HUANG J, WANG L, WANG B, *et al.* Unraveling the carbon dot bridges in oxidized carbon nanotubes for efficient microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2023, **473**: 145356.
- [21] QIN M, ZHANG L, ZHAO X, *et al.* Defect induced polarization loss in multi-shelled spinel hollow spheres for electromagnetic wave absorption application. *Advanced Science*, 2021, **8**(8): 2004640.
- [22] ZHOU L, LIU E K. Application fields and development research of electromagnetic wave absorbing materials. *China Plant Engineering*, 2022, **7**(2): 1671.
- [23] XU M, ZHANG Y, ZHANG J, *et al.* Spontaneous formation of graphene-like stripes on high-index diamond C(331) surface. *Nanoscale Research Letters*, 2012, **7**(1): 460.
- [24] XI Z T, XIONG J, QIAO B B, *et al.* Dielectric tunable materials and their microwave applications. *Chinese Polymer Bulletin*, 2021, **15**(9): 11.
- [25] CHEN F, ZHANG S, MA B, *et al.* Bimetallic CoFe-Mof@Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene derived composites for broadband microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2022, **431**(1): 134007.
- [26] LI H, GUO Y. High microwave absorption characteristic nanomaterial preparation and mechanism analysis. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, **765**(15): 936.
- [27] LI Y, LIU X, LIU R, *et al.* Improved microwave absorption properties by atomic-scale substitutions. *Carbon*, 2018, **139**: 181.
- [28] LING A, PAN J, TAN G, *et al.* Thin and broadband Ce<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3-δ</sub>/MWCNTs composite absorber with efficient microwave absorption. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, **787**(30): 1097.
- [29] SUN M, MOLLAAABBASI R, LI B, *et al.* Effects of contact angle on single and multiscale bubble motions in the aluminum reduction cell. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, **58**(37): 17568.
- [30] DUAN Y, XIAO Z, YAN X, *et al.* Enhanced electromagnetic microwave absorption property of peapod-like MnO@carbon nanowires. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, **10**(46): 40078.
- [31] LIU X, CAO K, CHEN Y, *et al.* Shape-dependent magnetic and microwave absorption properties of iron oxide nanocrystals. *Materials Chemistry and Physics*, 2017, **192**: 339.
- [32] CHEN X, YANG M, ZHAO X, *et al.* Tailoring superhydrophobic PDMS/CeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/MWCNTs nanocomposites with conductive network for highly efficient microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2022, **432**(15): 134226.
- [33] WANG X, LU Y, ZHU T, *et al.* CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/N-doped reduced graphene oxide aerogels for high-performance microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **388**: 124317.
- [34] LI Y, GAO T, ZHANG W, *et al.* Fe@CN<sub>x</sub> nanocapsules for microwave

- absorption at gigahertz frequency. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, **2**(6): 3648.
- [35] YU L, ZHU Y, FU Y. Waxberry-like carbon@polyaniline microspheres with high-performance microwave absorption. *Applied Surface Science*, 2018, **427**(1): 451.
- [36] HE G, DUAN Y, PANG H. Microwave absorption of crystalline Fe/MnO@C nanocapsules embedded in amorphous carbon. *Nano-Micro Letters*, 2020, **12**(1): 57.
- [37] AYUB S, GUAN B H, AHMAD F, *et al.* Optimization of magnetite with modified graphene for microwave absorption properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, **936**: 168182.
- [38] CUI X J, JIANG Q R, WANG C S, *et al.* Encapsulating FeCo alloys by single layer graphene to enhance microwave absorption performance. *Materials Today Nano*, 2021, **16**: 100138.
- [39] SUN X, ZHAO X, ZHANG X, *et al.* TiO<sub>2</sub> nanosheets/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene 2D/2D composites for excellent microwave absorption. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, **6**(15): 14421.
- [40] ZHOU L, XU H, SU G, *et al.* Tunable electromagnetic and broadband microwave absorption of SiO<sub>2</sub>-coated FeSiAl absorbents. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, **861**(25): 157966.
- [41] CAI M, SHUI A, WANG X, *et al.* A facile fabrication and high-performance electromagnetic microwave absorption of ZnO nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, **842**: 155638.
- [42] GREEN M, TIAN L, XIANG P, *et al.* Co<sub>2</sub>P nanoparticles for microwave absorption. *Materials Today Nano*, 2018, **1**: 1.
- [43] DAI B, ZHAO B, XIE X, *et al.* Novel two-dimensional Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXenes/nano-carbon sphere hybrids for high-performance microwave absorption. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, **6**(21): 5690.
- [44] MIAO P, ZHANG T, WANG T, *et al.* A two-dimensional semi-conductive metal-organic framework for highly efficient microwave absorption. *Chinese Journal of Chemistry*, 2022, **40**(4): 467.
- [45] LEI C, DU Y. Tunable dielectric loss to enhance microwave absorption properties of flakey FeSiAl /ferrite composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, **822**(5): 153674.
- [46] CAO Q, ZHANG J, ZHANG H, *et al.* Dual-surfactant templated hydrothermal synthesis of CoSe<sub>2</sub> hierarchical microclews for dielectric microwave absorption. *Journal of Advanced Ceramics*, 2022, **11**(3): 504.
- [47] HUANG B, CHEN F, SHEN Y, *et al.* Preparation, characterization, and evaluation of pyraclostrobin nanocapsules by *in situ* polymerization. *Nanomaterials*, 2022, **12**(3): 549.
- [48] WANG L, GUAN H, SU S, *et al.* Magnetic FeO<sub>x</sub>/biomass carbon composites with broadband microwave absorption properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, **903**: 163894.
- [49] MIAO P, CHEN J, CHEN J, *et al.* Review and perspective of tailorable metal-organic framework for enhancing microwave absorption. *Chinese Journal of Chemistry*, 2023, **41**(9): 1080.
- [50] ZHANG Y, ZHANG Y, LI Y, *et al.* BaTiO<sub>3</sub>@C core-shell nanoparticle/paraffin composites for wide-band microwave absorption. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, **4**(12): 13176.
- [51] LI X, ZHU L T, KASUGA T, *et al.* Chitin-derived-carbon nanofibrous aerogel with anisotropic porous channels and defective carbon structures for strong microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2022, **450**: 137943.
- [52] ZHAO H, CHENG Y, LIU W, *et al.* Biomass-derived porous carbon-based nanostructures for microwave absorption. *Nano-Micro Letters*, 2019, **11**(1): 24.
- [53] LI X, YIN S, CAI L, *et al.* Sea-urchin-like NiCo<sub>2</sub>S<sub>4</sub> modified MXene hybrids with enhanced microwave absorption performance. *Chemical Engineering Journal*, 2023, **454**(2): 140127.
- [54] LIAO Y, HE G, DUAN Y. Morphology-controlled self-assembly synthesis and excellent microwave absorption performance of MnO<sub>2</sub> microspheres of fibrous flocculation. *Chemical Engineering Journal*, 2021, **425**(1): 130512.
- [55] LIN H, GREEN M, XU L J, *et al.* Microwave absorption of organic metal halide nanotubes. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, **7**(3): 1901270.
- [56] LI J, HONG Y, HE S, *et al.* A neutron diffraction investigation of high valent doped barium ferrite with wideband tunable microwave absorption. *Journal of Advanced Ceramics*, 2022, **11**(2): 263.
- [57] GAO J, MA Z, LIU F, *et al.* Preparation and microwave absorption properties of Gd-Co ferrite@silica@carbon multilayer core-shell structure composites. *Chemical Engineering Journal*, 2022, **446**: 137157.
- [58] DONG S, HU P, LI X, *et al.* NiCo<sub>2</sub>S<sub>4</sub> nanosheets on 3D wood-derived carbon for microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **398**: 125588.
- [59] LAKSHMI N V, TAMBE P. EMI shielding effectiveness of graphene decorated with graphene quantum dots and silver nanoparticles reinforced PVDF nanocomposites. *Composite Interfaces*, 2017, **24**(9): 861.
- [60] ZHANG W T, DING E, ZHANG W X, *et al.* Microstructure controllable polyimide/MXene composite aerogels for high-temperature thermal insulation and microwave absorption. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, **11**(28): 9438.
- [61] CHEN Q, LI L, WANG Z, *et al.* Synthesis and enhanced microwave absorption performance of CIP@SiO<sub>2</sub>@Mn<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ferrite composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, **779**(30): 720.
- [62] CHENG Y, CAO J, LI Y, *et al.* The outside-in approach to construct Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocrystals/mesoporous carbon hollow spheres core-shell hybrids toward microwave absorption. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, **6**(1): 1427.
- [63] TIAN C, YAO Q, TONG Z, *et al.* The influence of Nd substitution on microstructural, magnetic, and microwave absorption properties of BiFeO<sub>3</sub> nanopowders. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, **859**: 157757.
- [64] DENG J, ZHANG X, ZHAO B, *et al.* Fluffy microrods to heighten the microwave absorption properties through tuning the electronic state of Co/CoO. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, **6**(26): 7128.
- [65] CHENG Z, WANG R, CAO Y, *et al.* Intelligent off/on switchable microwave absorption performance of reduced graphene oxide/VO<sub>2</sub> composite aerogel. *Advanced Functional Materials*, 2022, **32**(40): 2205160.
- [66] GU Z F, YU Z C, HONG B, *et al.* Effect of lanthanum substitution on microstructures, magnetic properties and microwave absorption properties of SrCo<sub>2</sub>Z hexaferrites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, **969**: 172296.
- [67] KUANG B, DOU Y, WANG Z, *et al.* Enhanced microwave absorption properties of Co-doped SiC at elevated temperature. *Applied Surface Science*, 2018, **445**: 383.
- [68] LUO J, YUE L, JI H, *et al.* Investigation on the optimization, design and microwave absorption properties of BaTb<sub>0.2</sub>Eu<sub>0.2</sub>Fe<sub>11.6</sub>O<sub>19</sub>/PANI decorated on reduced graphene oxide nanocomposites. *Journal of Materials Science*, 2019, **54**(8): 6332.
- [69] WEI H, YIN X, JIANG F, *et al.* Optimized design of high-temperature microwave absorption properties of CNTs/Sc<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, **823**: 153864.
- [70] HAN T, LUO R, CUI G, *et al.* Effect of SiC nanowires on the high-temperature microwave absorption properties of SiC/SiC composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, **39**(5): 1743.
- [71] ELMAHAISHI M F, AZIS R S, ISMAIL I, *et al.* A review on electromagnetic microwave absorption properties: their materials and performance. *Journal of Materials Research and Technology*,



- 2022, **20**: 2188.
- [72] FENG L, ZHAO D, YU J, *et al.* Two-dimensional transition metal dichalcogenides based composites for microwave absorption applications: a review. *Journal of Physics: Energy*, 2023, **5**(1): 012001.
- [73] JIANG Z, SI H, LI Y, *et al.* Reduced graphene oxide@carbon sphere based metacomposites for temperature-insensitive and efficient microwave absorption. *Nano Research*, 2022, **15**(9): 8546.
- [74] LI B, MAO B, HE T, *et al.* Preparation and microwave absorption properties of double-layer hollow reticulated SiC foam. *ACS Applied Electronic Materials*, 2019, **1**(10): 2140.
- [75] YU M, LIU J H, LI S M, *et al.* Preparation and electromagnetic property for microwave absorbing of nickel nanowires. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, **43**(1): 99.
- [76] WEIDNER M, FUCHS A, BAYER T J M, *et al.* Defect modulation doping. *Advanced Functional Materials*, 2019, **29**(14): 1807906.
- [77] TORIYAMA M Y, QU J, SNYDER G J, *et al.* Defect chemistry and doping of BiCuSeO. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, **9**(36): 20685.
- [78] ZHAI B G, HUANG Y M. Extending the afterglow of Tb<sup>3+</sup> doped CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> to 8 hours via the control of doping concentration. *Journal of Luminescence*, 2022, **244**: 118725.
- [79] HE S Y, SHI H L, YANG J, *et al.* A comparative investigation into the thermoelectric properties of doped graphene nanoribbons in different doping manners. *Diamond and Related Materials*, 2023, **135**: 109889.
- [80] SWARNKAR A, MIR W J, NAG A. Can B-site doping or alloying improve thermal- and phase-stability of all-inorganic CsPbX<sub>3</sub> (X = Cl, Br, I) perovskites? *ACS Energy Letters*, 2018, **3**(2): 286.
- [81] LIU X, HUANG Y, DING L, *et al.* Synthesis of covalently bonded reduced graphene oxide-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposites for efficient electromagnetic wave absorption. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, **72**: 93.
- [82] SARANGI S N, PRADHAN G K, SAMAL D. Band gap engineering in SnO<sub>2</sub> by Pb doping. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, **762**: 16.
- [83] WANG F, JI G B. Research progress of microstructure control and electromagnetic wave absorbing properties of perovskite oxide. *Journal of Inorganic Chemistry*, 2021, **37**(8): 1353.
- [84] LAU C F J, ZHANG M, DENG X, *et al.* Strontium-doped low-temperature-processed CsPbI<sub>2</sub>Br perovskite solar cells. *ACS Energy Letters*, 2017, **2**(10): 2319.
- [85] ZHAO B, DU Y, YAN Z, *et al.* Structural defects in phase-regulated high-entropy oxides toward superior microwave absorption properties. *Advanced Functional Materials*, 2023, **33**(1): 2209924.
- [86] LIU G, WANG W, WANG L, *et al.* Effect of annealing temperature on the electromagnetic properties of La<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>MnO<sub>3</sub> prepared by Sol-Gel process. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, **33**(13): 9830.
- [87] SALAWU Y A, SALAWU Y A, KIM H J, *et al.* Bi-stability and orientation change of a thin  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer on a  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (004) surface. *ACS Omega*, 2019, **4**(8): 13330.
- [88] MANI R, JIANG H, GUPTA S K, *et al.* Role of synthesis method on luminescence properties of europium(II, III) ions in  $\beta$ -Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>: probing local site and structure. *Inorganic Chemistry*, 2018, **57**(3): 935.
- [89] ZHANG Q, SONG Q, WANG X, *et al.* Deep defect level engineering: a strategy of optimizing the carrier concentration for high thermoelectric performance. *Energy & Environmental Science*, 2018, **11**(4): 933.
- [90] WU Y H, ZHU X Y, ZHAO W J, *et al.* Corrosion mechanism of graphene coating with different defect levels. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, **777**: 135.
- [91] CHEN X, CHEN Y, HUANG J, *et al.* Phase regulation and surface passivation of stable  $\alpha$ -CsPbI<sub>3</sub> nanocrystals with dual-mode luminescence via synergistic effects of ligands. *Journal of Physical Chemistry C*, 2022, **126**(11): 5233.
- [92] ZENG Q, FENG T, TAO S, *et al.* Precursor-dependent structural diversity in luminescent carbonized polymer dots (CPDs): the nomenclature. *Light: Science & Applications*, 2021, **10**(1): 142.
- [93] MALIK J H, AHMAD M K, ASSADULLAH I, *et al.* Electronic structure, growth and properties of hydrothermally derived crystalline Cu<sub>2</sub>MnSnS<sub>4</sub> quantum dots: optimization of physiochemical parameters and electrochemical performance. *Applied Physics A*, 2023, **129**(2): 86.
- [94] ZHANG T, ZHU J, ZHAI Y, *et al.* A novel mechanism for red emission carbon dots: hydrogen bond dominated molecular states emission. *Nanoscale*, 2017, **9**(35): 13042.
- [95] KRELINA M. Quantum technology for military applications. *EPJ Quantum Technology*, 2021, **8**(1): 24.
- [96] FRONING D, CZYSZ P. Advanced Technology and Breakthrough Physics for 2025 and 2050 Military Aerospace Vehicles. Albuquerque: AIP Conference Proceedings, 2006.
- [97] ZHANG L, LIU F, WANG T, *et al.* Design of saline gel coil for inner heating of electrolyte solution and liquid foods under induced electric field. *Foods*, 2022, **11**(2): 213.
- [98] CHEN P R, HOANG M S, LAI K Y, *et al.* Bifunctional metal oleate as an alternative method to remove surface oxide and passivate surface defects of aminophosphine-based InP quantum dots. *Nanomaterials*, 2022, **12**(3): 573.
- [99] LYU N, WANG J, SHEN H, *et al.* Graphene quantum dots interfacial-decorated hierarchical Ni/PS core/shell nanocapsules for tunable microwave absorption. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, **848**: 156529.
- [100] HE M, CHEN H, PENG H, *et al.* Ultralight Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>-derivative chrysanthemum-like Na<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>7</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene quantum dots 3D/0D heterostructure with advanced microwave absorption performance. *Chemical Engineering Journal*, 2023, **456**(15): 140985.
- [101] FERNANDES R J C, MAGALHÃES C A B, RODRIGUES A R O, *et al.* Photodeposition of silver on zinc/calcium ferrite nanoparticles: a contribution to efficient effluent remediation and catalyst reutilization. *Nanomaterials*, 2021, **11**(4): 831.
- [102] SINGH K J, AHMED T, GAUTAM P, *et al.* Recent advances in two-dimensional quantum dots and their applications. *Nanomaterials*, 2021, **11**(6): 1549.
- [103] GAO Z, XU B, MA M, *et al.* Electrostatic self-assembly synthesis of ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> quantum dots (ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@C) and electromagnetic microwave absorption. *Composites Part B: Engineering*, 2019, **179**(15): 107417.
- [104] KOBAC J, SMOLEŃSKI T, GORYCA M, *et al.* Designing quantum dots for solotronics. *Nature Communications*, 2014, **5**: 3191.
- [105] WU G, CHENG Y, YANG Z, *et al.* Design of carbon sphere/magnetic quantum dots with tunable phase compositions and boost dielectric loss behavior. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **333**: 519.
- [106] SHEN L, CHEN R, ZHANG D, *et al.* High-performance perovskite photovoltaics by heterovalent substituted mixed perovskites. *Advanced Functional Materials*, 2022, **32**(47): 2207911.
- [107] SILVI S, BARONCINI M, LA ROSA M, *et al.* Interfacing luminescent quantum dots with functional molecules for optical sensing applications. *Topics in Current Chemistry*, 2016, **374**(5): 65.
- [108] XU X, PAN Y, ZHONG Y, *et al.* Ruddlesden-popper perovskites in electrocatalysis. *Materials Horizons*, 2020, **7**(10): 2519.
- [109] CHI W, BANERJEE S K. Application of perovskite quantum dots as an absorber in perovskite solar cells. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022 **61**(9): e202112412.

- [110] FENG J, ZONG Y, SUN Y, *et al.* Optimization of porous FeNi<sub>3</sub>/N-GN composites with superior microwave absorption performance. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **345**: 441.
- [111] QI Y, QI L, LIU L, *et al.* Facile synthesis of lightweight carbonized hydrochars decorated with dispersed ZnO nanocrystals and enhanced microwave absorption properties. *Carbon*, 2019, **150**: 259.
- [112] SU Z, ZHANG W, LU J, *et al.* Oxygen-vacancy-rich Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/carbon nanosheets enabling high-attenuation and broadband microwave absorption through the integration of interfacial polarization and charge-separation polarization. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, **10**(15): 8479.
- [113] LIU X, LU X, GUAN H, *et al.* Rational design of ZnO/ZnO nanocrystal-modified rGO foam composites with wide-frequency microwave absorption properties. *Ceramics International*, 2021, **47**(23): 33584.
- [114] LIU Q, XU X, XIA W, *et al.* Dependency of magnetic microwave absorption on surface architecture of Co<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub> hierarchical structures studied by electron holography. *Nanoscale*, 2015, **7**(5): 1736.
- [115] LV S Q, HAN P Z, ZHANG X J, *et al.* Graphene-wrapped pine needle-like cobalt nanocrystals constructed by cobalt nanorods for efficient microwave absorption performance. *RSC Advances*, 2021, **11**(50): 31499.
- [116] WANG G, CHANG Y, WANG L, *et al.* Synthesis, characterization and microwave absorption properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Co core/shell-type nanoparticles. *Advanced Powder Technology*, 2012, **23**(6): 861.
- [117] LIU X, MA Y, ZHANG Q, *et al.* Facile synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/C composites for broadband microwave absorption properties. *Applied Surface Science*, 2018, **445**: 82.
- [118] LIU T, LIU N, ZHAI S, *et al.* Tailor-made core/shell/shell-like Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>@PPy composites with prominent microwave absorption performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, **779**: 831.
- [119] WU J, ZHAO Y, ZHAO X, *et al.* Core-shell nanowires comprising silver@polypyrrole-derived pyrolytic carbon for high-efficiency microwave absorption. *Journal of Materials Science*, 2022, **57**(44): 20672.
- [120] QIAN Y, MENG X, LIU H, *et al.* Magnetic field-induced synthesis of one-dimensional nickel nanowires for enhanced microwave absorption. *Advanced Materials Interfaces*, 2023, **10**(3): 2201604.
- [121] YUAN X, HUANG W, ZHANG X, *et al.* Carbon-coated Mn<sub>4</sub>N nanowires with abundant internal voids for microwave absorption. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, **2**(12): 7848.
- [122] KUANG J, JIANG P, HOU X, *et al.* Dielectric permittivity and microwave absorption properties of SiC nanowires with different lengths. *Solid State Sciences*, 2019, **91**: 73.
- [123] DUAN L Q, XU C, DAI X Q, *et al.* Nano-porous carbon wrapped SiC nanowires with tunable dielectric properties for electromagnetic applications. *Materials & Design*, 2020, **192**: 108738.
- [124] CHEN M W, XIE W J, QIU H P. Research progress on continuous carbon fiber reinforced silicon carbide ceramic matrix composite. *Advanced Ceramics*, 2016, **37**(6): 393.
- [125] HU H, ZHENG Y, REN K, *et al.* Position selective dielectric polarization enhancement in CNT based heterostructures for highly efficient microwave absorption. *Nanoscale*, 2021, **13**(4): 2324.
- [126] ZHOU Q, QI C, SHI T, *et al.* 3D printed carbon based all-dielectric honeycomb metastructure for thin and broadband electromagnetic absorption. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, **169**: 107541.
- [127] KUMAR N, VADERA S R. Stealth materials and technology for airborne systems//Aerospace materials and material technologies. Singapore: Springer, 2017: 519.