

## 雷达吸波材料研究进展

刘晓明, 华宇晨, 傅远翔, 孙杨阳, 余欣燃, 杨在清, 王 强

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 军事雷达的不断发展使得武器装备面临严峻挑战, 如何提高武器装备的隐身性能成为国内外学者的研究重点。能够将入射雷达波吸收并转化成热能的吸波材料被广泛应用于雷达隐身技术中。铁氧体、碳材料等传统吸波涂层材料技术成熟且已被大规模应用, 但还无法实现吸波材料在实际应用中的“薄、轻、宽、强”等性能。超材料作为一类具有天然常规材料所不具备的超常物理特性的人工材料, 为雷达吸波材料的设计带来无限可能。吸波超材料与传统吸波材料的融合有望实现恶劣战争环境对吸波材料的更高要求。从传统吸波材料、吸波超材料、传统吸波材料与吸波超材料的融合 3 个方面综述了吸波材料的研究现状, 并展望了吸波材料的未来发展。

**关键词:** 吸波材料; 雷达隐身; 雷达电磁波; 吸波超材料; 阻抗匹配

**中图分类号:** TB34      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-3962(2023)09-0685-14

**引用格式:** 刘晓明, 华宇晨, 傅远翔, 等. 雷达吸波材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(9): 685-698.

LIU X M, HUA Y C, FU Y X, *et al.* Research Progress of Radar Absorbing Materials[J]. Materials China, 2023, 42(9): 685-698.

## Research Progress of Radar Absorbing Materials

LIU Xiaoming, HUA Yuchen, FU Yuanxiang, SUN Yangyang, YU Xinran,  
YANG Zaiqing, WANG Qiang

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials (Ministry of Education), Northeastern University,  
Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The continuous development of military radar makes weapons and equipment face severe challenges. How to improve the stealth performance of weapons has become the research focus of scholars at home and abroad. Absorbing materials that can absorb and convert incident radar waves into heat energy are widely used in radar stealth technology. Traditional microwave absorbing coating materials, such as ferrite and carbon materials, have been widely used, but they cannot achieve the properties of “thin, light, wide and strong” in practical applications. Metamaterials, as a kind of artificial materials with extraordinary physical properties that conventional materials do not have, bring infinite possibilities for the design of radar absorbing materials. The fusion of metamaterial absorbers and traditional material absorbers is expected to achieve better absorber used in harsh war environments. In this paper, the research status of microwave absorbing materials is summarized for three aspects: traditional material absorbers, metamaterial absorbers, and the fusion of traditional material absorbers and metamaterial absorbers. Finally, the future development of microwave absorbing materials is prospected.

**Key words:** absorbing materials; radar stealth; radar electromagnetic wave; metamaterial absorber; impedance match

## 1 前 言

随着雷达探测技术的日新月异与各种新型雷达的不断问世, 武器装备面临着严峻挑战<sup>[1]</sup>。面对逐步完善的雷达探测系统以及日益激烈的国际军事竞争, 如何使军事武器有效躲避雷达探测实现隐身功能成为当下的研究热点。实现隐身功能首先要缩小被探测物体的雷达散射截面(radar cross section, RCS), 而缩小雷达散射截面就必须降低雷达接收功率与发射功率的比值, 即降低雷达的回波强度。目前, 降低目标物体雷达回波强度的几种

收稿日期: 2022-12-15      修回日期: 2023-04-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52003039); 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(220253)

第一作者: 刘晓明, 女, 1986 年生, 副教授, 博士生导师,  
Email: liuxm@smm.neu.edu.cn

通讯作者: 王 强, 男, 1971 年生, 教授, 博士生导师,  
Email: wangq@mail.neu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202212017

方法分别为隐身外形设计<sup>[2]</sup>、等离子体隐身技术<sup>[3, 4]</sup>、吸波材料设计<sup>[5-7]</sup>等。隐身外形设计的目的在于尽可能避免雷达探测方向上由于物体结构所产生的强反射点,但结构的变化会损失飞行器等一些武器装备的气动性能,降低其实际作战能力。等离子体隐身技术是在物体表面形成等离子云,通过电磁波与等离子云内部的等离子体相互作用来实现隐身效果,但等离子体的不稳定性导致它在恶劣环境下的隐身效果较差。吸波材料能够将入射电磁波吸收并在材料内部转换成热能等其他形式的能量,减小雷达回波强度的同时缩小雷达散射截面积。由于绝大多数航空或海上雷达的工作频率区间为 1~18 GHz,所以对雷达吸波材料的研究大多聚焦于此频率范围,希望在此频率范围内实现雷达吸波材料“薄、轻、宽、强”的性能<sup>[8]</sup>。其中“薄”和“轻”指电磁波在厚度尽可能薄、密度尽可能小的材料中被吸收,“宽”和“强”指材料对电磁波的吸收频带尽可能宽、吸收强度尽可能大。集上述四大性能于一体是当今吸波材料研究领域的难点。研究最广泛的传统吸波材料通常由基体材料和吸收剂组成,受制于吸收剂的电磁参数及频散特性导致其吸波性能难以进一步突破。超材料作为一类具有天然常规材料所不具备的超常物理特性的人工材料,通过人工设计超材料结构来调控其等效电磁参数,可使它在吸波性能上有所突破的同时具有吸波频带可调、可以作为结构件承受载荷的优点,为吸波材料的设计打开了新的大门。本文按照雷达吸波材料的发展历程,归纳总结了传统吸波材料、吸波超材料、传统吸波材料和吸波超材料的融合

3 类吸波材料,分析它们的吸波机理和研究进展,并展望了吸波材料的未来发展趋势。

## 2 传统吸波材料

传统吸波材料是基于材料本身的电磁特性,将入射的电磁波能量转换为热能等其他形式的能量,从而达到吸收电磁波的目的。传统吸波材料一般由基体材料和吸收剂组成<sup>[9]</sup>,按其电磁波损耗衰减机制的不同可以分为电阻损耗型吸波材料、电介质损耗型吸波材料和磁损耗型吸波材料<sup>[6, 10, 11]</sup>。

### 2.1 电阻损耗型吸波材料

电阻损耗型吸波材料可以在变化的电场中产生感应电流或在变化的磁场中产生涡流,将电磁波能量转换为热能<sup>[4]</sup>。吸波材料的电导率越高,其载流子引起的宏观电流越大,越有利于将电磁能转化为热能。电阻损耗型吸波材料通常由电导率较高的材料构成,常见构成材料包括石墨烯<sup>[12-21]</sup>、碳纳米管<sup>[22-32]</sup>、导电高分子<sup>[33-35]</sup>等。

石墨烯是一种新型碳材料,由于具有独特的平面结构、介电损耗高、耐腐蚀、密度低、比表面积大、残余缺陷和含氧基团多等优点,受到国内外学者的广泛关注。目前,国内外关于石墨烯吸波材料的研究成果较多,主要通过还原氧化石墨烯(RGO)和蜂窝状石墨烯泡沫来改善石墨烯吸波材料的吸波性能。Bhattacharyya 等<sup>[19]</sup>通过微波控制技术对原始氧化石墨烯(GO)和经过不同时间微波处理的氧化石墨烯(GOn)中的缺陷进行重构从而获得了较为优异的宽带吸收特性,如图 1a~1d 所示。GO20 材料在 4~15 GHz 频率范围内的吸收率高达 96%,带宽

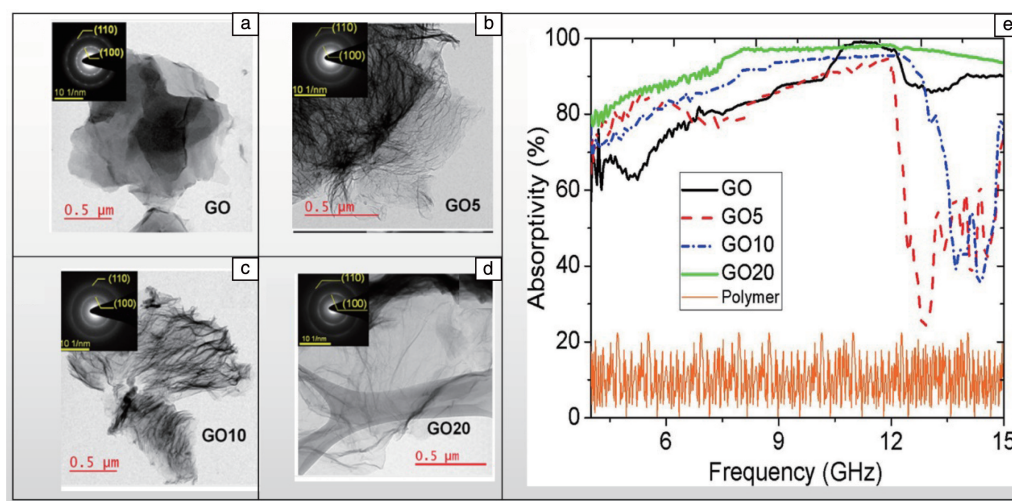


图 1 石墨烯吸波材料的形态、结构及吸波性能<sup>[19]</sup>: 原始氧化石墨烯(GO)的形态和结构(a); 经微波处理的氧化石墨烯 GO5(b)、GO10(c)和 GO20(d)的形态和结构; GO 和微波处理的 GOn 样品涂层的吸收率(e)

Fig. 1 Graphene-absorbent material morphology structure and absorbent properties<sup>[19]</sup>: morphology and structure of original graphene oxide (GO) (a); morphology and structure of microwave treated graphene oxide GO5 (b), GO10 (c) and GO20 (d); absorptivity of GO and various microwave treated GOn sample coatings(e)

超过 9 GHz, 实现了宽频雷达吸收功能, 如图 1e 所示。Shen 等<sup>[20]</sup>将氧化石墨烯薄膜制备成蜂窝状石墨烯泡沫, 该石墨烯泡沫在 8.2~59.6 GHz 频率范围内的反射损耗均低于-10 dB, 其雷达吸波性能比石墨烯薄膜更优异, 实现了对电磁波的宽频吸收与屏蔽<sup>[21]</sup>。

碳纳米管结构直径(1~100 nm)远小于雷达波波长(1~10 000 nm), 且其电阻损耗正切角大、频带兼容性强<sup>[22]</sup>、热稳定性好、比表面积高。随着表面原子比例的升高, 高比表面积的碳纳米管形成了大量晶格缺陷及表面悬挂键, 促进了界面极化和多重散射, 从而有效衰减了入射电磁波能量, 达到了吸收电磁波的目的。因此, 碳纳米管吸波材料对雷达波的吸收性能比普通吸波材料更加优异<sup>[22-24]</sup>。目前, 主要通过原位聚合法、电弧放电法等方法制备碳纳米管吸波材料。Wang 等<sup>[31]</sup>采用原位聚合法合成碳纳米管/聚苯胺杂化材料, 通过控制碳纳米管壁的解压实现了传统吸波材料在“薄、轻、宽、强”方面的突破, 涂层的厚度仅为 2.4 mm, 有效吸波带宽达 5.6 GHz, 在 12.0 GHz 时最小反射损耗值达到-45.7 dB。贺可强等<sup>[32]</sup>将利用电弧法制得的含铁单壁碳纳米管与铁氧体混合制备了具有网状结构的碳纳米管/铁氧体复合吸波材料, 该吸波材料反射损耗小于-10 dB 的频带宽度可以达到 6.30 GHz, 吸波性能良好。

导电高分子是指某些具有共轭主链的绝缘高分子聚合物通过化学或电化学的方法与掺杂剂进行电荷转移复合而成的材料, 具有密度小、结构多样、电导率高、电磁参数可调、稳定性强且易实现电磁损耗等特点, 是电阻损耗型吸波材料的组成部分之一<sup>[34]</sup>。目前人们着重关注导电高分子在吸波材料性能和材料厚度方面的突破。Wei 等<sup>[35]</sup>制成了一种由四氧化三铁( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )和二茂铁-酞菁铜(FCP)混合而成的新型纳米微球吸波薄膜, 厚度仅为 135 nm, 在 12~18 GHz 的最小反射损耗为-25 dB, 吸收率高达 99.7%, 该吸收材料在厚度和吸波性能方面都实现了较大突破。

## 2.2 电介质损耗型吸波材料

电介质损耗型吸波材料主要依靠介质的电子极化、离子极化、分子极化或界面极化等弛豫衰减吸收电磁波。电介质损耗型吸波材料的电导率较低, 材料中几乎没有自由电子, 因此不能形成宏观电流。电介质损耗型吸波材料通常包括碳化硅<sup>[36-38]</sup>、钛酸钡<sup>[39-45]</sup>等。

碳化硅具有密度小、耐腐蚀、抗氧化、热导率高、膨胀系数小等优异特性, 且其介电性能可调, 是具有巨大发展前景的吸波材料。然而, 单一的碳化硅材料吸波效果并不理想, 主要通过掺杂、陶瓷化、制成碳化硅纤维等方法使用或与其他传统吸波材料复合使用。吴有朋

等<sup>[36]</sup>将微米级碳化硅掺杂在纳米炭黑中, 再与环氧树脂复合制成新型复合吸波材料, 其厚度为 2 mm, 反射衰减率在 7.5~13.5 GHz 宽频范围内低于-10 dB, 吸收峰最大值达-40 dB。该研究为解决碳化硅吸波材料吸收峰值小、吸收波段窄等缺点提供了新思路, 在碳化硅吸波材料的研究中取得了突破性的进展。

钛酸钡成本低、化学性能稳定、介电性能优异、极化效应好, 是一种使用较为广泛的雷达波吸收剂。目前, 国内外主要通过化学电镀法或掺杂稀土法提高钛酸钡基吸波材料的吸收效率, 拓宽其吸波频段。王桂芹等<sup>[39]</sup>通过溶胶-凝胶法制备了钛酸钡/环氧树脂复合吸波材料, 该材料在 8~18 GHz 有较好的吸波效果。韩霞光<sup>[40]</sup>通过向钛酸钡中掺杂适量的稀土钕和镧元素明显改善了其吸波性能, 当涂层厚度为 2.5 mm 时, 最小反射率为-51 dB, 反射损耗小于-10 dB 的吸收频带宽度为 4 GHz。

## 2.3 磁损耗型吸波材料

磁损耗型吸波材料主要是通过自然共振和涡流损耗的方式消耗入射电磁能, 通常包括铁氧体<sup>[46-49]</sup>、羰基铁<sup>[50-53]</sup>、磁性金属微粉<sup>[54-59]</sup>等。其中, 铁氧体吸波材料是研究较多、应用较广泛的传统吸波材料, 因具有高磁导率、高电阻率和较好的阻抗匹配性能, 且吸收损耗强、抗腐蚀、成本低, 受到大众广泛关注。但是, 铁氧体吸波材料存在着密度大、耐高温性能差等问题。为提高其性能, 主要通过化学共沉淀法、掺杂或纳米化等方式制备铁氧体吸波材料。汪忠柱等<sup>[46]</sup>通过化学共沉淀法制备了六角晶系  $\text{BaZnCoTi-W}$  型铁氧体吸波材料, 该吸波材料在 7~28 GHz 全频段内吸收衰减小于-10 dB, 具有超宽吸收频带, 最大吸收衰减为-25 dB, 涂层厚度为 2.2 mm。Mu 等<sup>[47]</sup>采用静电纺丝技术制备铁氧体纳米纤维构成吸波材料, 其厚度为 2 mm, 最低反射损耗可达-23.02 dB, 损耗值低于-10 dB 的频带达 12.6 GHz, 实现了铁氧体吸波材料在“宽”和“强”方面的突破。

综上所述, 虽然传统吸波材料的研究已较为成熟, 但不同类别的吸波材料存在各自的应用局限。例如: 电阻损耗型吸波材料阻抗匹配水平低, 只能对一种或几种频率的雷达波进行吸收, 单独使用时无法同时满足吸波材料“薄、轻、宽、强”的要求, 实际应用受限<sup>[60, 61]</sup>。电介质损耗型吸波材料虽密度小, 可实现轻量化, 但存在损耗机制单一、阻抗匹配较差等问题。如何提高电介质损耗型吸波材料对电磁波的吸收性能并拓宽其有效的吸收频带依然是其研究难题<sup>[34, 62]</sup>。磁损耗型吸波材料吸收率高, 具有在低频波段实现强吸收的可能性, 但同时也在应用中也存在一些问题, 如密度大、稳定性差、制备工艺复杂等<sup>[63, 64]</sup>。吸收频带窄、阻抗匹配差是传统吸波材



料的共性问题<sup>[63]</sup>,单一组分的吸波材料只具有单一的电导损耗或介电损耗或磁损耗,很难同时满足现代吸波材料对“薄、轻、宽、强”的多种要求,单纯依靠传统材料的掺杂或复合等手段无法突破这一瓶颈问题,基于人工结构设计的吸波超材料为实现现代吸波材料的需求提供了无限可能。

### 3 吸波超材料

自然材料由原子、离子或分子排列而成,这些粒子的尺寸、性能及粒子间的距离和相互作用决定了物质的性能。然而原子、离子或分子的尺寸非常小,难以对它们进行人工自由调控,因此自然物质的性能也不能被任意地调控设计。相较于自然材料,超材料(metamaterials)是由目标材料人为组合的人工“原子”排列而成,人工“原子”的尺寸远大于自然原子,因此可以通过调节人工“原子”的尺寸和性能参数来设计出自然界中不存在的具有超常电磁响应的人工材料。超材料在电磁谐振频率附近可以提供数值为 0 甚至为负数的介电常数和磁导率,并且其电磁参数的数值可以人为调控,因此人们常利用超材料特异的电磁响应来实现负折射材料、零折射材料和隐身斗篷等新奇材料的制备。随着研究的不断深入,超材料逐渐应用于更广阔的领域,其中超材料在吸波材料领域的重大应用价值引起了人们的广泛关注。

吸波材料需要满足两点要求才能最大限度地吸收入射电磁波:首先,入射电磁波要能够无反射地进入到吸波材料的内部;其次,吸波材料要能通过各种损耗机制如电阻损耗、电介质损耗、磁损耗等将入射的电磁波完全损耗掉。根据能量守恒定律,无反射无透射才能保证电磁波能量全部被吸波材料吸收掉。电磁波无反射要求吸波材料与入射媒介满足阻抗匹配条件,入射媒介是空气时要求吸波材料自身的介电常数和磁导率相等。在传统吸波材料中,通常采用透波材料如塑料和泡沫等来实现阻抗匹配,其介电常数和磁导率均接近 1,与空气的电磁参数相近。无透射要求吸波材料包含有效的吸波剂,例如将细小金属颗粒或石墨纤维等掺杂到透波材料中,最大限度地消耗掉入射的电磁波。作者发现传统吸波材料在设计时难以同时满足阻抗匹配条件并实现最大吸波效率,这是因为满足阻抗匹配条件的透波材料是不能吸波的,而吸波体的加入又使透波材料偏离阻抗匹配条件。因此,传统吸波材料的制备要慎重考虑透波材料与吸收剂的配比来最大限度地提高吸收率。超材料的出现为设计制备吸波材料提供了崭新的思路,当组成超材料的人工“原子”产生电谐振时,超材料的等效介电常数产生谐振。当组成超材料的人工“原子”产生磁谐振时,超材料

的等效磁导率产生谐振。当超材料的人工“原子”同时产生电磁谐振时,超材料的等效介电常数和磁导率均被调制,如果这两个电磁参数数值刚好相等,满足阻抗匹配条件,电磁波就会无反射地进入超材料内部被人工“原子”损耗掉。由于人工“原子”本身为良好的吸波剂,而且其电磁参数可以人为调控,只要设计使之满足阻抗匹配条件,就可以得到吸收率接近 100%的吸波超材料。根据超材料谐振基元材料的性质,可以将吸波超材料分为金属基元吸波超材料、电阻膜基元吸波超材料和高介电材料基元吸波超材料。

#### 3.1 金属基元吸波超材料

##### 3.1.1 单频吸波金属基元超材料

2008 年, Landy 等<sup>[65]</sup>理论模拟和实验验证了微波段的金属基元吸波超材料完美工作的可能性,所设计的样品对工作波段电磁波的吸收率达到了 99%,因此又称为完美吸波器。在本领域研究伊始,学者们最初设计的吸波超材料人工“原子”包含电谐振器单元,只有当电磁波的电场与电谐振器的金属线平行时才能诱导产生电谐振,所以吸波超材料对入射波的极化方向要求严格。为解决这一问题, Landy 等提出如图 2a 所示的吸波超材料金属基元人工“原子”,该金属基元相对于电场和磁场的方向的作用是等价的,因此具有极化不敏感的特性,制备的吸波超材料在 1.13 THz 处的吸收率达到了 99%,组成该吸波超材料的人工“原子”由典型的电谐振器、中间介质层和背面金属线组成。入射电磁波的电场沿平行于电谐振器的金属线方向,这样外加电场会诱导电谐振器产生电谐振,而磁场会诱导电谐振器中间的金属线与背面金属线形成反向环形电流从而产生磁谐振,同时发生的电磁谐振调制了超材料的等效介电常数和磁导率数值,使它们在 11.65 GHz 时数值相等满足阻抗匹配条件,从而得到吸收率接近 100%的吸收峰(图 2b)。Landy 等指出,虽然发表的金属基元吸波超材料在微波波段工作,但是通过调节人工“原子”的尺寸,材料可以在从微波到可见光的任意波段工作。Tao 等<sup>[66]</sup>利用相同的金属基元人工“原子”结构实现了太赫兹波段的吸波超材料的制备。吸波超材料由于设计巧妙,且能在工作的窄频段得到接近 100%的吸收率,引起了学者们的广泛研究<sup>[65-70]</sup>。Liu 等<sup>[67]</sup>提出如图 2c 所示的金属树枝形人工“原子”结构,由于该结构具有二维各向同性,在 2.79  $\mu\text{m}$  波长的频段得到了吸收率为 98.6%的极化方向不敏感的吸收峰。此外, Grant 等<sup>[68]</sup>提出的金属中空十字结构(图 2d)、Park 等<sup>[69]</sup>提出的金属甜甜圈结构(图 2e)以及 Jiang 等<sup>[70]</sup>提出的金属十字结构(图 2f)均成功解决了吸波超材料极化方向敏感的问题。图 2 为上文所描述的典型单频吸波金属



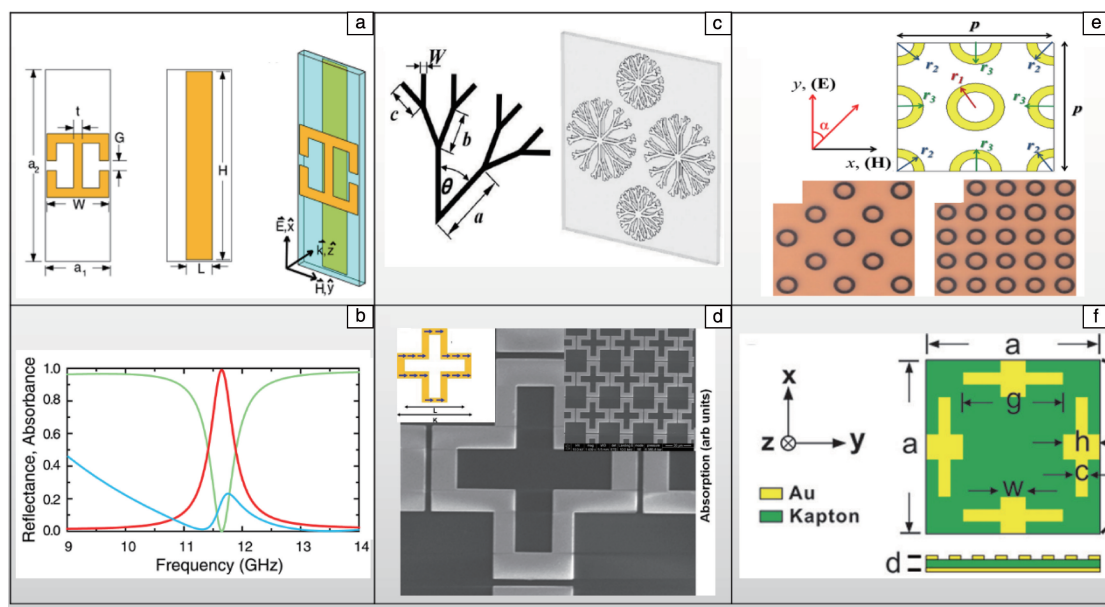


图2 典型单频吸波金属基元超材料金属功能团图样及部分吸波性能: (a) 完美吸波器, (b) 完美吸波器吸收图谱<sup>[65]</sup>; (c) 金属树枝形结构<sup>[67]</sup>; (d) 金属中空十字结构<sup>[68]</sup>; (e) 金属甜甜圈结构<sup>[69]</sup>; (f) 金属十字结构<sup>[70]</sup>

Fig. 2 Typical single frequency absorbing metal metamaterial metal functional group and partial absorbing properties: (a) perfect absorber, (b) perfect absorber absorption patterns<sup>[65]</sup>; (c) metal dendrimer structure<sup>[67]</sup>; (d) metal hollow cross structure<sup>[68]</sup>; (e) metal donut structure<sup>[69]</sup>; (f) metal cross structure<sup>[70]</sup>

基元超材料金属功能团图样及部分吸波性能, 主要组成部分有 Landy 等设计的完美吸波器及衍生的多种形态的金属基元功能团和单波吸收峰示意图。

### 3.1.2 多频吸波金属基元超材料

多频吸波材料在生产生活及国防军事领域具有重大的应用价值, 遵循单频吸波金属基元超材料的设计思路, 人们设计和发展了具有多个响应结构的多频吸波金属基元超材料, 例如同心多矩形<sup>[71-75]</sup>、同心多圆环<sup>[76-80]</sup>、双十字结构<sup>[81, 82]</sup>等, 典型结构如图 3a~3c 所示<sup>[71, 77, 82]</sup>。多个谐振子相互作用使金属基元超材料在多个电磁波段实现完美吸收。Hakim 团队<sup>[83]</sup>提出了一种基于双分裂环谐振微波吸收金属基元超材料的设计, 如图 3d 所示, 将具有不同尺寸、相同几何形状的双分裂环金属基元谐振结构组合在一起, 利用多个不同方向开口的矩形谐振单元实现多频吸收, 使该吸波超材料在 1~10 GHz 存在 4 个吸收率大于 92% 的吸收峰(图 3d)。Wang 等<sup>[84]</sup>在金属板支撑的超薄电介质层上设计了螺旋状金属图案(如图 3e 所示), 该图案由 4 根相同的呈 90°角旋转的螺旋形金属线组成。仿真和实验结果表明, 该多频吸波金属基元超材料在 6.69, 8.70, 11.90 和 15.14 GHz 频率下的吸收率分别达到了 96.49%, 94.25%, 98.94% 和 92.04%。由于该吸波超材料结构是四倍旋转对称的, 多频吸收峰对入射波的偏振不敏感。通过调节吸波超材料金属基元

的几何尺寸和分布, 理论上可以将这些多频共振吸收峰渐变成一个连续的宽波段吸收峰, 但是受到水平方向周期的限制, 金属基元个数会达到饱和, 进而阻碍多频吸波金属基元超材料吸收峰进一步宽化。实际上, 吸波超材料在垂直方向的设计具有较大自由度, 一些研究团队将介质和金属层在垂直方向依次堆叠形成金字塔结构或沟槽结构, 实现多频吸波功能。Ozturk 等<sup>[85]</sup>引入了一个由十字和圆网结构组成的超材料单元, 将不同的谐振结构按照不同层次垂直排列, 以实现 Ku 波段的完美吸收, 命名为圆形鱼网超材料(CF-MMs), 如图 3f 所示。所提供的金属超材料吸收器在 14.28, 14.77 和 15.2 GHz 的窄频带上的吸收率分别达到了 99.9%, 96.2% 和 58%。图 3 汇总了上文所描述的典型多频吸波金属基元超材料金属功能团图样及吸波性能, 从原始的形态单一的金属基元功能团到利用多个、多种形态、多种排列形式等方式对功能图案进行设计并且选取了这个过程中比较有代表性的图形和吸波性能。

### 3.1.3 宽频吸波金属基元超材料

针对超材料的窄频带光谱响应问题, 诸多学者进行了大量基于超材料人工结构设计的吸波频带宽化研究<sup>[86-93]</sup>。常规超材料难以避免地会出现窄频带光谱响应特征, 其根本原因在于超材料对电磁波的调控是基于人工“原子”的谐振机制, 一种谐振模式式人工结构只具有

单一的窄频带光谱响应。针对这一问题,大量研究通过不同人工“原子”金属基元的叠加组合或者同一人工“原子”金属基元的参数渐变形成多种谐振模式式人工结构,利用多谐振模式叠加实现超材料光谱响应频带的宽化<sup>[86-91]</sup>。例如,通过不同人工“原子”在面外或面内方向的叠加组合可以拓宽超材料的光谱响应频段<sup>[86-90]</sup>。Cui 等<sup>[86]</sup>设计了由不同尺寸的金层与介质层交替排列形成的多层超材料,如图 4a 所示,通过 20 层不同人工“原子”面外方向的叠加得到 3~5.5  $\mu\text{m}$  波段模拟吸收率高于

95%的宽频吸波功能。Liu 等<sup>[87]</sup>设计了同一平面内排列的不同尺寸的金十字形结构超材料(如图 4b 所示),通过 16 个不同人工“原子”在面内方向的叠加得到 0.5~1.5  $\mu\text{m}$  波段模拟吸收率高于 60%的宽频吸波功能。虽然基于不同人工“原子”在面外或面内方向的叠加组合可以在一定程度上拓宽超材料的光谱响应频段,但是拓宽范围有限且由于加工技术的局限使得相关工作仅限于模拟计算研究。此外,通过同一人工“原子”的参数渐变也可以拓宽超材料的响应频段<sup>[88]</sup>。Aydin 等<sup>[89]</sup>制备了具有交

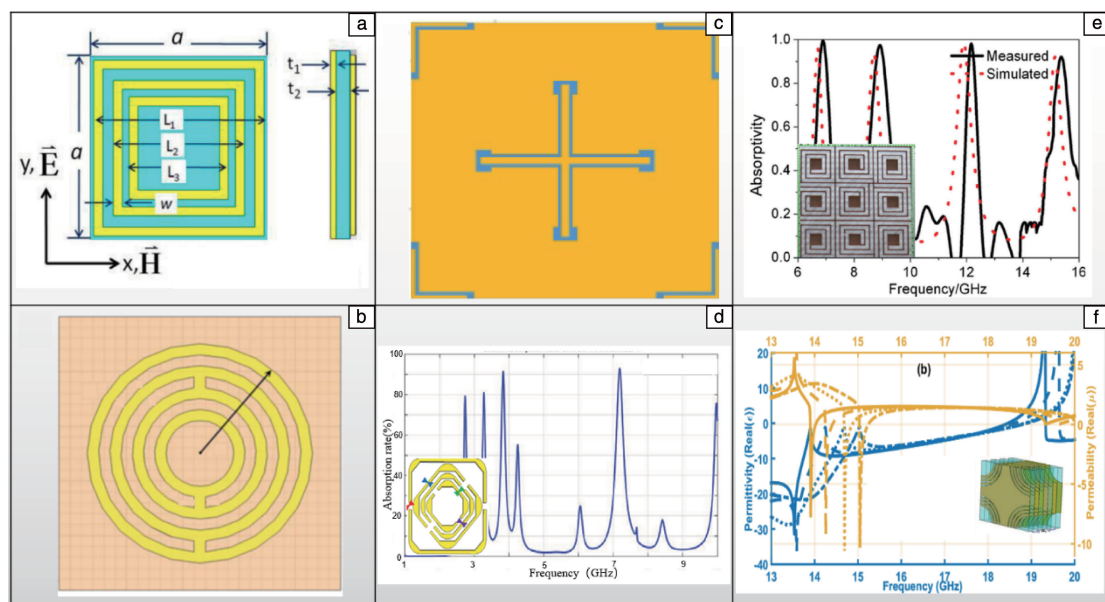


图 3 典型多频吸波金属基元超材料金属功能团图样及吸波性能: (a) 同心多矩形<sup>[71]</sup>, (b) 同心多圆环<sup>[77]</sup>, (c) 双十字金属基元<sup>[82]</sup>, (d) 双分裂环谐振器及吸收图谱<sup>[83]</sup>, (e) 基于螺旋结构的微波吸收器及吸收图谱<sup>[84]</sup>, (f) 圆网超材料吸收器及吸收图谱<sup>[85]</sup>

Fig. 3 Typical multi-frequency absorbing metal metamaterial metal functional group pattern and absorbing performance: (a) concentric polyrectangular<sup>[71]</sup>, (b) concentric multi-torus<sup>[77]</sup>, (c) multicross metal primitives<sup>[82]</sup>, (d) double split ring resonator<sup>[83]</sup>, (e) microwave absorber based on spiral structure<sup>[84]</sup>, (f) circular mesh supermaterial absorber<sup>[85]</sup>

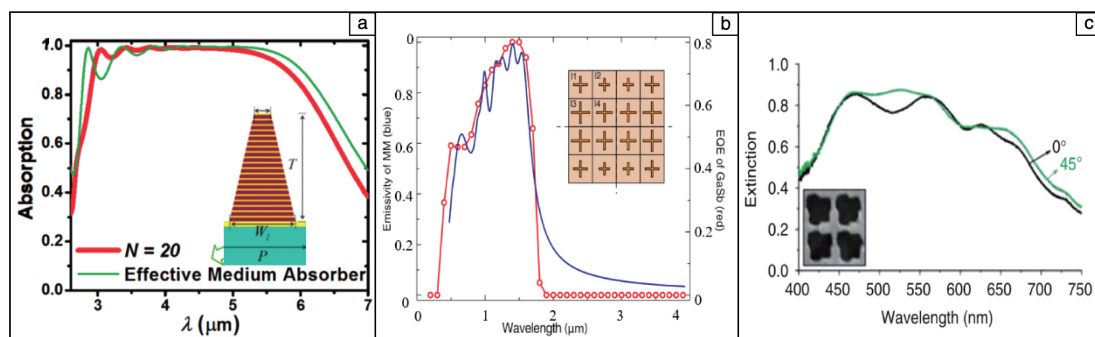


图 4 典型宽频吸波机体设计图样及吸波性能: (a) 超材料谐振模式叠加方案<sup>[86]</sup>, (b) 不同尺寸的金十字形结构<sup>[87]</sup>, (c) 尺寸渐变人工“原子”三明治结构<sup>[89]</sup>

Fig. 4 Typical wideband absorption body design drawing and absorption performance: (a) metamaterial resonant mode superposition scheme<sup>[86]</sup>, (b) metal cross-shaped structures of different sizes<sup>[87]</sup>, (c) size gradient artificial “atomic” sandwich structure<sup>[89]</sup>

叉梯形结构的尺寸渐变人工“原子”三明治结构超材料(如图4c所示),在400~700 nm波长段得到平均实验吸收率71%、模拟吸收率85%的宽频吸波性能,虽然实现了光谱的宽频吸收,但吸收强度相应降低。以上宽频光谱调控机制均源于超材料谐振模态的叠加机制,其调制频宽正比于叠加模态的数量。但受到超材料本身结构尺寸与加工精度的制约,模态数量必然存在叠加上限,因此基于模态叠加思路的超材料人工结构设计也会受到模态上限数量的制约,无法满足更高的频带宽化需求<sup>[93]</sup>。图4为上文所描述的典型宽频吸波机体设计图样及吸波性能,其中选取了具有代表性的纵向叠加利用电磁波长机制实现宽频吸收的模型以及利用数据优化和参数渐变的方式设计的吸波单元结构的模型和吸波性能。

### 3.2 电阻膜基元吸波超材料

电阻膜是一类具有电阻性质的新兴薄膜材料,可作为基元用于吸波超材料的设计与制造。电阻膜材料的单位面积电阻值(方阻)是影响电阻膜基元吸波超材料性能的一个重要参数,不同电阻膜材料具有不同的方阻值,因而电阻膜材料是决定电阻膜基元吸波超材料性能的关键。电阻膜基元吸波超材料一般由电阻膜基元图案层、介质层和金属背板3层结构构成,在结构上与金属基元吸波超材料类似,不同的是将金属谐振基元替换为了电阻膜谐振基元。相较于传统金属材料,电阻膜材料具有密度小、厚度薄、方阻值可调等优势。同时,电阻膜基元吸波超材料具有较宽的吸波带宽,具有低频吸波性能好、吸收频段宽和厚度薄等优点<sup>[94]</sup>,应用前景广阔。下文将具体介绍氧化铟锡(ITO)基元吸波超材料<sup>[95-100]</sup>、石墨烯导电墨水基元吸波超材料<sup>[101-104]</sup>和导电塑料膜基元吸波超材料<sup>[105]</sup>这3种常见的电阻膜基元吸波超材料。

#### 3.2.1 氧化铟锡(ITO)基元吸波超材料

ITO是一种透明且导电的置换固溶体,多应用于制备电子元器件。ITO基元吸波超材料由ITO基元周期阵列图案层、介质层以及底层的金属板3层结构组成。可以通过溅射沉积技术在背面附有金属板的介质层表面沉积ITO图案层,用于电阻膜基元吸波超材料的设计和制备。ITO基元吸波超材料通过电阻损耗和共振作用拓宽吸收频带。宽频吸波ITO基元吸波超材料设计结构如图5a插图所示<sup>[98]</sup>,4层不同边长的正方形ITO薄膜与环氧玻璃布层压板(FR4)介质复合堆叠在金属薄板上,基于电阻损耗和多模态谐振损耗实现宽频吸波,吸收率谱线如图5a所示。该ITO基元吸波超材料在3.16~51.6 GHz频段内对垂直入射的电磁波的吸收效率高于88%,实现了中心频率为27.38 GHz、相对带宽为176.9%的宽频吸收,覆盖了C、X、Ku、K和Ka波段,部分覆盖S和U波段。与金属基元吸波超材料相比,ITO基元吸波超材料具有吸收频带宽<sup>[96]</sup>、极化不敏感等优势<sup>[97-99]</sup>;同时,ITO基元吸波超材料的制备方法多样、图案控制简便、制备成本低、耐热、抗氧化,具有更强的实用性。

#### 3.2.2 石墨烯导电墨水基元吸波超材料

石墨烯导电墨水是一种具有高导电性、高韧度、高强度的电阻膜特性材料,常用来制备吸波超材料电阻膜基元图案层。与ITO基元吸波超材料结构类似,石墨烯导电墨水基元吸波超材料由石墨烯导电墨水基元周期阵列图案层、介质层以及底层的金属板多层材料复合而成。

石墨烯导电墨水基元吸波超材料结构如图5b所示<sup>[104]</sup>,石墨烯导电墨水谐振单元通过丝网印刷技术加载于介质层上,底层为金属反射背板,整体尺寸16.0 mm×15.5 mm,厚度2.5 mm,如图5b中插图所示。该石墨烯

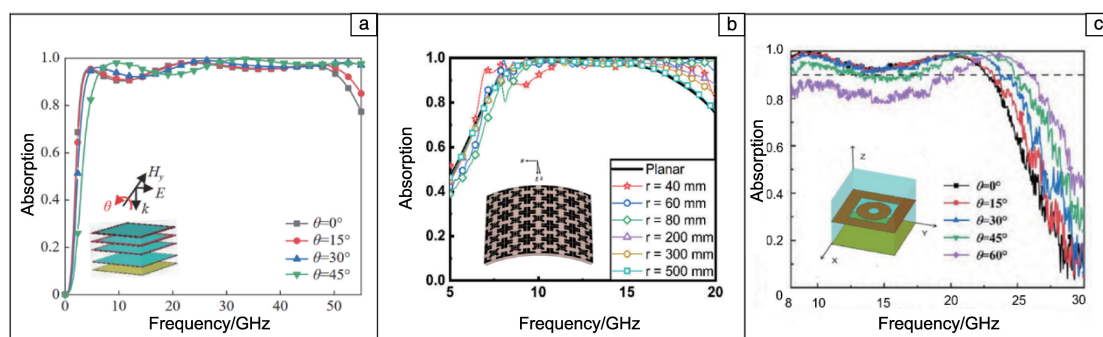


图5 典型电阻膜吸波超材料结构示意图与吸波性能:(a)氧化铟锡(ITO)基元吸波超材料<sup>[98]</sup>, (b)石墨烯导电墨水基元吸波超材料<sup>[104]</sup>, (c)导电塑料膜基元吸波超材料<sup>[105]</sup>

Fig. 5 Structure diagram of a typical resistance film wave absorbing metamaterial and wave absorbing performance: (a) ITO primitive absorbing metamaterials<sup>[98]</sup>, (b) graphene conductive ink-based absorbing metamaterials<sup>[104]</sup>, (c) plastic film substrate absorbing metamaterial<sup>[105]</sup>



导电墨水基元吸波超材料实现了在 6.7~19.8 GHz 频段内的宽频吸收,吸收带宽达到 13.1 GHz,如图 5b 所示<sup>[104]</sup>。即使将超材料以半径( $r$ )进行弯曲测试,其吸波性能也没有受到很大影响,依然可以实现宽频吸收。相比 ITO 基元吸波超材料,石墨烯导电墨水基元吸波超材料不仅拥有宽频电磁吸收、极化不敏感等优良性能<sup>[101-103]</sup>,还具有轻薄可弯曲的特性<sup>[104]</sup>,具有广阔的应用前景。

### 3.2.3 导电塑料膜基元吸波超材料

导电塑料膜是将树脂和导电物质混合,用塑料的加工方式进行加工的功能型高分子膜材料,在电子、集成电路包装等方面应用广泛,但极少应用于电磁吸波超材料设计,在吸波超材料方面有很大的应用前景。导电塑料膜基元吸波超材料由聚醚醚酮(PEEK)介质、导电塑料膜、PEEK 介质和金属反射背板共 4 层材料堆叠而成,谐振单元尺寸为 5 mm×5 mm,总厚度为 4.4 mm,如图 5c 插图所示<sup>[105]</sup>。该材料在 5~25 GHz 波段内对垂直入射电磁波的吸收率大于 90%、相对吸收带宽可达 106.8%,吸收率谱线如图 5c 所示,且对入射波的极化特性不敏感,对宽角入射电磁波仍能实现宽频吸收。此外,以导电塑料膜为基础的吸波超材料的最大优势在于,中间层的导电塑料膜谐振结构与介质基板可以独立加工,加工完成后可以直接拼接堆叠形成吸波超材料,这种积木拼搭式的加工方案不仅节省了制备时间,还使得基底材料的选择不再受电阻膜加工技术的制约。与石墨烯导电墨水基元吸波超材料相比,导电塑料膜基元吸波超材料不仅能够克服加工过程中墨水厚度不均匀对方阻的影响,还可兼容激光刻蚀工艺,提高谐振结构的加工精度。同时,导电塑料膜基元吸波超材料也具有与其他材料结构相同的轻薄等优点,为宽带吸波超材料的发展提供了新的思路。

## 3.3 高介电材料基元吸波超材料

高介电材料基元吸波超材料是基于高介电颗粒的多级 Mie 谐振及其谐振耦合设计出来的新型超材料,这类吸波超材料由周期排列的高介电“原子”代替常见的周期排列的金属“原子”作为顶层,低介电的介质层作为中间隔离层,金属薄板作为底层,形成高介电材料基元吸波超材料。利用高介电“原子”的多级 Mie 谐振及其谐振耦合,可以实现偏振不敏感、入射角不敏感的强吸收,这一特性引起了学者们的广泛研究<sup>[106-111]</sup>。根据实际应用需求,可以设计制备出单频、双频和宽频吸波高介电材料基元吸波超材料。与金属“原子”型吸波超材料相比,高介电材料基元吸波超材料的吸收峰与高介电材料的介电常数紧密相关,通过调控高介电材料的介电常数可人

为调控高介电材料基元吸波超材料吸收峰的频率、强度及宽化程度。

### 3.3.1 单频吸波高介电材料基元超材料

单频吸波高介电材料基元超材料在传感、热成像、热发射以及光开关等方面的重要应用引起了人们的广泛关注<sup>[112-118]</sup>。这种超材料舍弃了图案化的金属基元,采用高介电立方体作为人工“原子”构筑吸波超材料。Liu 等<sup>[119]</sup>通过模拟计算设计了一种由高介电介质“原子”(SrTiO<sub>3</sub> 立方体)利用丙烯腈-丁二烯苯乙烯(ABS)塑料支撑周期排列于金属薄板上形成的吸波超材料,其结构如图 6a 所示。高介电人工“原子”通过 Mie 谐振与入射电场和磁场形成耦合作用,在 8~12 GHz 吸波材料的反射参数( $S_{11}$ )与传输参数( $S_{21}$ )曲线如图 6b 所示,模拟计算与实验测试表明该高介电材料基元吸波超材料在 8 GHz 的吸收率分别为 99%和 98.5%,且该吸收峰具有极化不敏感和宽入射角的特点。作为谐振基元的高介电立方体可以支持多级电、磁共振模式,且该吸波超材料对偏振不敏感,可以在广角入射下工作,为吸波超材料的设计制备提供了一条更简单的路线。

### 3.3.2 双频吸波高介电材料基元超材料

双频吸波高介电材料基元超材料在探测器、收发系统和光谱成像仪等领域拥有潜在应用前景<sup>[120-123]</sup>。Liu 等<sup>[124]</sup>设计了一种在宽入射角下偏振不敏感的双频吸波高介电材料基元超材料。该超材料结构如图 6c 所示,边长为 0.74 mm 的高介电 SrTiO<sub>3</sub> 介质“原子”利用 ABS 塑料支撑以 5 mm 间隙周期排列于金属薄板上形成吸波超材料。该超材料在 8.45 与 11 GHz 两个吸收峰处的模拟吸收率分别达到了 99%和 96%,实验吸收率分别达到了 97%和 94%,如图 6d 所示。横磁波(TM 波)入射时,当入射角  $\theta$  从 0°变化到 60°,两个吸收峰的吸收率均在 85%以上;横电波(TE 波)入射时,当入射角  $\theta$  从 0°变化到 60°,两个吸收峰的吸收率均在 70%以上,表明该双频吸收峰对入射角与偏振方向不敏感。且与传统双频吸波超材料双频吸收来源于两个谐振单元不同,该双频吸波高介电材料基元超材料仅仅借助单一谐振单元同时实现了双频吸收,这是由于结构简单的高介电材料基元具有多级 Mie 谐振,可以通过巧妙合理的设计利用单一谐振基元实现双频乃至多频吸波,为高对称性多级吸波超材料的设计提供了更为简单的方法。

### 3.3.3 宽频吸波高介电材料基元超材料

宽频吸波超材料在飞机、坦克、舰船等的隐身技术方面具有重大应用需求,因此成为当前热门研究方向<sup>[125-127]</sup>。可以通过人工“原子”尺寸渐变、介电常数渐变以及高阶 Mie 谐振峰耦合等方法实现宽频吸波高介电

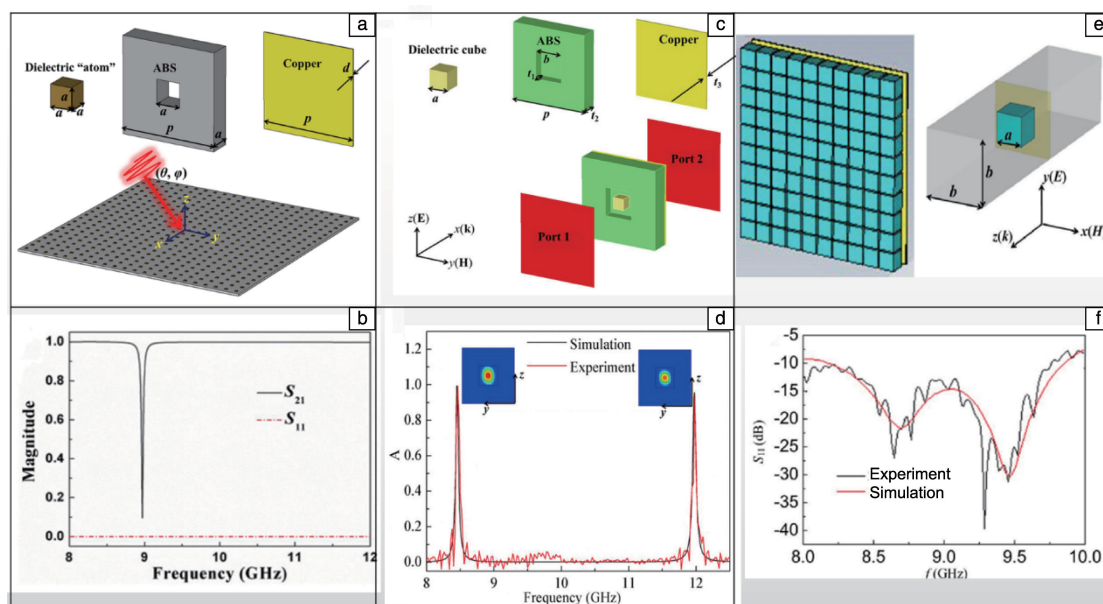


图6 典型高介电材料基元吸波超材料结构示意图与吸波性能: (a) 所设计的介质超材料吸收器及其单元, (b) 模拟  $S_{11}$  和  $S_{21}$  光谱<sup>[119]</sup>; (c) 双波段超材料吸收器单元示意图, (d) 模拟吸收光谱和实验吸收光谱(左、右插图为  $y$ - $z$  平面电场能量分布, 谱线峰值为不同极化角  $\psi$  在 8.45 和 11 GHz 处的吸收率)<sup>[124]</sup>; (e) 基于高阶 Mie 谐振峰耦合的宽频吸波材料及其晶胞示意图, (f) 基于高阶 Mie 谐振峰耦合的宽频吸波材料反射参数  $S_{11}$  谱图<sup>[128]</sup>

Fig. 6 Structure diagram and wave absorbing performance of typical high dielectric materials: (a) the designed dielectric metamaterial absorber and its unit cell, (b) the simulated  $S_{11}$  and  $S_{21}$  spectra<sup>[119]</sup>; (c) schematic diagram of the unit cell of the dual-band metamaterial absorber, (d) the simulated and experimental absorption spectra (the left and right insets show the electric field energy distributions in  $y$ - $z$  plane, the line peak shows the absorptivity with different polarization angles  $\psi$  at 8.45 and 11.97 GHz)<sup>[124]</sup>; (e) schematic diagram of wideband absorbing material and its cell based on high-order Mie resonant peak coupling, (f) reflection parameter  $S_{11}$  spectra of wide-frequency absorbing materials based on high-order Mie resonant peak coupling<sup>[128]</sup>

材料基元超材料的制备。刘晓明<sup>[128]</sup>设计出一种基于高阶 Mie 谐振峰耦合的宽频吸波材料(如图 6e 所示), 该材料是由高介电高损耗的介质颗粒紧密排列于金属薄板上构成的, 立方体颗粒的边长为 2 mm, 介电常数为 2000, 损耗角正切为 0.05, 周期为 2.2 mm。该超材料在 8.4~9.4 GHz 的范围内吸收率达到 95% 以上。模拟计算与实验测量的  $S_{11}$  图谱如图 6f 所示, 该宽频吸收峰的吸波机理为: 紧密排列的高介电谐振单元之间发生了强烈的电磁耦合, 在 8.4~9.4 GHz 的宽频范围内满足阻抗匹配条件, 仅仅通过单一的谐振单元即实现了宽频吸波功能。

#### 4 传统吸波材料与吸波超材料的融合

传统吸波材料, 如铁氧体、碳纳米管和羰基铁等, 由于吸收频带较窄、易脱落、易受环境因素影响, 应用存在局限性。吸波超材料是一种吸波性能可调的人工材料, 在中高频段可以实现对电磁波的完美吸收, 但存在难以实现宽入射角和宽频吸波等问题。无论是传统吸波材料还是新兴的吸波超材料, 都无法同时满足雷达吸波材料对“薄、轻、宽、强”这 4 方面的性能要求。因此,

将传统吸波材料与吸波超材料融合, 构筑宽频带、强吸收的轻薄型吸波材料具有重要意义。传统吸波材料与吸波超材料融合型吸波材料的结构与吸波超材料类似, 一般由透射层、吸波结构层和反射层组成<sup>[129-131]</sup>, 如图 7a 所示<sup>[132]</sup>。与吸波超材料不同的是, 融合型吸波超材料通常将传统吸波材料作为吸波结构层嵌入吸波超材料结构体中。与传统吸波材料相比, 融合型吸波超材料具有超材料人工结构, 能够起到承载与吸波的双重作用<sup>[133]</sup>, 可以在“薄”和“轻”的前提下拓宽吸波频带。目前, 铁氧体融合型吸波超材料<sup>[132-135]</sup>、羰基铁融合型吸波超材料<sup>[136-141]</sup>等均取得较优异的吸波性能。

铁氧体是研究较广且较为成熟的磁性吸波材料, 传统铁氧体吸波材料在横向偏置和纵向偏置磁场中展现出不同的电磁特性, 因此对电磁波的吸收性能截然不同。在纵向磁化作用下, 反射波将发生极化旋转; 在横向磁化下, 铁氧体吸波材料只会吸收某一极化的电磁波<sup>[133]</sup>。铁氧体的旋磁性是指铁氧体材料所具有的一种特殊的磁性质, 也称为磁各向异性。利用铁氧体的旋磁性, 结合超材料结构设计的铁氧体融合型吸波超材料可实现宽频

吸波功能。高海涛等<sup>[132]</sup>通过将钡铁氧体涂层作为超材料结构的中间介质层设计了性能较为优越的铁氧体融合型吸波超材料,如图 7b 插图所示。与单一铁氧体吸波材料相比,铁氧体融合型吸波超材料的吸波性能得到了极大改善,在 8~18 GHz 频段内反射损耗均小于 -10 dB,如图 7b 所示。目前,提高铁氧体吸波材料吸波性能的方法有掺杂、离子取代、包覆、复合性能较优越的吸波材料等,但上述方法只能在一定程度上改善铁氧体吸波材料的吸波性能,难以突破其吸波频率的极限。融合型吸波超材料可以突破铁氧体吸波材料吸波频率的限制,从而获得性能优越的宽频吸波材料。

羰基铁具有高磁导率、高饱和磁化强度、耐高温等优异性能,但存在密度大、抗氧化能力差、高频段吸波性能差等缺陷。为克服羰基铁吸波性能的缺陷,研究者们借鉴超材料思想设计出了羰基铁融合型吸波超材料,吸波性能有效改善。Zhang 等<sup>[136]</sup>将周期性排列的方形导电贴片阵列构成的超材料嵌入羰基铁磁性吸收基底中,该磁性吸收基底具有圆孔阵列并由金属薄板支撑,如图 7c 所示。模拟计算与实验测量的反射参数如图 7d 所

示,该融合型吸波超材料在 6.3~17.3 GHz 的反射系数均小于 -10 dB,几乎是羰基铁磁性吸收基板带宽的 3.6 倍<sup>[136]</sup>。通过打孔和嵌入方形导电贴片,可以调整并改善羰基铁磁性吸收基底的吸波性能。该设计可以通过调节通孔和方形导电贴片的尺寸自由调控其吸波性能,体现出传统吸波材料与吸波超材料融合的巨大优越性。图 7 为典型融合型吸波超材料结构示意图与吸波性能,选取了具有代表性的铁氧体融合型吸波超材料和多孔有频率选择性表面(FSS)的磁性基底的融合型吸波超材料单元。

综上所述,传统吸波材料存在吸收频带窄、稳定性差等问题,吸波超材料也存在着无法解决低频段吸波、厚度大等问题,将传统吸波材料与吸波超材料融合将更有利于获得宽带薄层雷达吸波材料,对设计高效吸波材料提供了切实可行的解决方案。将传统吸波材料与吸波超材料融合突破了单一材料的局限性,结合传统吸波材料与吸波超材料的优势,利用微观结构与人工结构的双重设计实现融合型吸波超材料吸波性能的大幅提升,从根本上解决了单独使用传统吸波材料和吸波超材料时性能不足的问题。

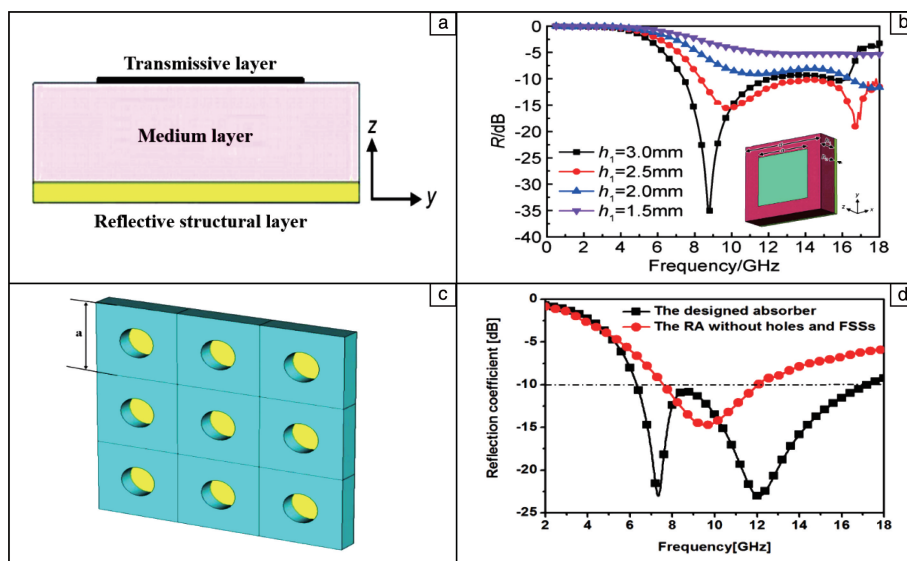


图 7 典型融合型吸波超材料结构示意图与吸波性能: (a) 融合型吸波超材料结构示意图, (b) 铁氧体融合型吸波超材料结构示意图及吸波曲线<sup>[132]</sup>; (c) 多孔有频率选择性表面(FSS)的磁性基底的融合型吸波超材料的几何结构示意图, (d) 吸波性能<sup>[136]</sup>

Fig. 7 Structure diagram of typical fusion absorbing material structure and absorption performance: (a) structure diagram of fusion absorbing material, (b) structure diagram and absorption curves of ferrite fusion absorbing material<sup>[132]</sup>; (c) schematic diagram of the geometric structure of a fusion absorbing material with a porous magnetic substrate of FSS, (d) absorbing properties<sup>[136]</sup>

## 5 结 语

各类电磁吸波材料的研究取得了极大的进展,从最初的传统吸波材料,到基于人工谐振结构的吸波超材料,

研究者们通过对材料的改进和对工艺的完善不断提高吸波超材料的性能,使吸波材料逐渐向着“结构薄、材料轻、频带宽、吸收强”的方向发展。但是,在雷达隐身材料大面积应用的需求下,吸波材料仍然存在一些短板,



如厚度大、吸收频带不够宽、难以实现宽入射角等,需要通过改良吸波超材料的结构、选择更合适的组成材料等方式完善吸波材料的设计。同时,实际应用的吸波材料除了需要具有较强的隐身性能之外,还应考虑提高其耐高温、抗氧化、延展度等性能,以适用恶劣的应用环境。传统吸波材料与吸波超材料融合型吸波超材料性能与结构方面的研究还需更加深入,研究前景仍然十分广阔。

## 参考文献 References

- [1] OU J P, ZHANG J, ZHAN R H. International Journal of Aerospace Engineering[J], 2020, 2020: 1-19.
- [2] RAO G A, MAHULIKAR S P. The Aeronautical Journal[J], 2002, 106(1066): 629-642.
- [3] 何小锋. 现代导航[J], 2015, 6(3): 306-309.  
HE X F. Modern Navigation[J], 2015, 6(3): 306-309.
- [4] YUAN J J, MENG G P, GU M, *et al.* Nuclear Science and Techniques[J], 2022, 33(6): 1-9.
- [5] KONG L B, LI Z W, LIU L, *et al.* International Materials Reviews [J], 2013, 58(4): 203-259.
- [6] 韩敏阳, 韦国科, 周明, 等. 复合材料学报[J], 2022, 39(4): 1363-1377.  
HAN M Y, WEI G K, ZHOU M, *et al.* Acta Materiae Compositae Sinica[J], 2022, 39(4): 1363-1377.
- [7] 来佩, 陈美玉, 孙润军, 等. 西安工程大学学报[J], 2015, 29(6): 655-665.  
LAI K, CHEN M Y, SUN R J, *et al.* Journal of Xi'an Polytechnic University[J], 2015, 29(6): 655-665.
- [8] JAYALAKSHMI C G, INAMDAR A, ANAND A, *et al.* Journal of Applied Polymer Science[J], 2018, 136(14): 47241.
- [9] 李洪瑞, 刘长华, 朱守中. 中国西部科技[J], 2008, 7(25): 6-16.  
LI H R, LIU C H, ZHU S Z. Science and Technology in Western China[J], 2008, 7(25): 6-16.
- [10] LI M, CAO X J, ZHENG S R, *et al.* Journal of Materials Science: Materials in Electronics[J], 2017, 28: 16802-16812.
- [11] 周聪俐. MXene 复合物的合成及其在微波吸收中的应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.  
ZHOU C L. Synthesis of MXene Complex and Its Application in Microwave Absorption[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [12] SUN X X, LI Y B, HUANG Y X, *et al.* Advanced Functional Materials[J], 2021, 32(5): 2107508.
- [13] LI Y Q, ZHANG Q, XIE X, *et al.* Journal of Materials Science: Materials in Electronics[J], 2020, 31: 13273-13283.
- [14] CHADHA N, SAINI P. Materials Research Bulletin[J], 2021, 143: 111458.
- [15] WANG L, SHI X T, ZHANG J L, *et al.* Journal of Materials Science & Technology[J], 2020, 52: 119-126.
- [16] 倪梦然, 张超智, 高蕾. 南京大学学报(自然科学)[J], 2022, 58(3): 540-559.  
NI M R, ZHANG C Z, GAO L. Journal of Nanjing University (Natural Science)[J], 2022, 58(3): 540-559.
- [17] TAN L, ZHU M H, LI X Y, *et al.* Journal of Saudi Chemical Society[J], 2020, 24(1): 9-19.
- [18] LI T, ZHI D D, GUO Z H, *et al.* Journal of Materials Engineering [J], 2021, 49(11): 14-29.
- [19] BHATTACHARYYA R, KUMAR S V, BHATTACHARYYA S, *et al.* Applied Surface Science[J], 2021, 537: 147840.
- [20] SHEN B, LI Y, YI D, *et al.* Carbon[J], 2016, 102: 154-160.
- [21] 金伦, 郝雅鸣, 陈国华. 安全与电磁兼容[J], 2017, 1: 53-58.  
JIN L, HAO Y M, CHEN G H. Safety and Electromagnetic Compatibility[J], 2017, 1: 53-58.
- [22] 金宇龙, 董胜奎. 材料导报[J], 2015, 29(26): 19-22.  
JIN Y L, DONG S K. Materials Reports [J], 2015, 29(26): 19-22.
- [23] 王生浩, 文峰, 李志. 材料导报[J], 2006, 20(S2): 99-102.  
WANG S H, WEN F, LI Z. Materials Reports[J], 2006, 20(S2): 99-102.
- [24] 邱军, 王玉磊. 玻璃钢/复合材料[J], 2012, 3: 80-84.  
QIU J, WANG Y L. FRP/Composite[J], 2012, 3: 80-84.
- [25] 孙晓刚, 程利, 杜国平. 人工晶体学报[J], 2009, 38(5): 1114-1118.  
SUN X G, CHENG L, DU G P. Journal of Synthetic Crystals[J], 2009, 38(5): 1114-1118.
- [26] DHAHRI A, DHAHRI J, ZEMNI S, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2006, 420: 15-19.
- [27] LI D F, ZHENG J, ZOU Z G. Journal of Physics and Chemistry of Solids[J], 2006, 67(4): 801-806.
- [28] 李宝华, 郑文君, 庞文琴. 无机化学学报[J], 1998, 14(4): 116-118.  
LI B H, ZHENG W J, PANG W Q. Journal of Inorganic Chemistry [J], 1998, 14(4): 116-118.
- [29] 袁华, 杜波, 刘俊峰, 等. 材料科学与工程学报[J], 2009, 27(1): 68-71.  
YUAN H, DU B, LIU J F, *et al.* Journal of Materials Science and Engineering[J], 2009, 27(1): 68-71.
- [30] 张靓, 冯辉霞, 徐海东, 等. 化工新型材料[J], 2022, 50(8): 7-18.  
ZHANG L, FENG H X, XU H D, *et al.* New Chemical Materials [J], 2022, 50(8): 7-18.
- [31] WANG H G, MENG F B, HUANG F, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2018, 11(12): 12142-12153.
- [32] 贺可强, 郁黎明, 盛雷梅. 复合材料学报[J], 2011, 28(4): 112-116.  
HE K Q, YU L M, SHENG L M. Acta Materiae Compositae Sinica [J], 2011, 28(4): 112-116.
- [33] EISAZADEH H, KHORSHIDI H R. Polymer-Plastics Technology and

- Engineering[J], 2010, 49(15): 1591–1596.
- [34] 郭亚晋, 刘峥, 魏席. 化工新型材料[J], 2016, 44(4): 14–16.  
GUO Y J, LIU Z, WEI X. New Chemical Materials[J], 2016, 44(4): 14–16.
- [35] WEI J J, ZHAO R, LIU X B. Journal of Magnetism and Magnetic Materials[J], 2012, 324(20): 3323–3327.
- [36] 吴友朋, 刘祥萱, 张泽洋. 表面技术[J], 2010, 39(5): 58–83.  
WU Y P, LIU X X, ZHANG Z Y. Surface Technology[J], 2010, 39(5): 58–83.
- [37] 魏子涵, 彭雨晴, 康治伟, 等. 陶瓷学报[J], 2021, 42(4): 547–559.  
WEI Z H, PENG Y Q, KANG Z W, *et al.* Journal of Ceramics[J], 2021, 42(4): 547–559.
- [38] 王军, 陈革, 宋永才, 等. 功能材料[J], 2001(1): 37–39.  
WANG J, CHEN G, SONG Y C, *et al.* Journal of Functional Materials[J], 2001(1): 37–39.
- [39] 王桂芹, 陈晓东, 段玉平, 等. 无机材料学报[J], 2007, 2: 293–297.  
WANG G Q, CHEN X D, DUAN Y P, *et al.* Journal of Inorganic Materials[J], 2007, 2: 293–297.
- [40] 韩霞光. BaTiO<sub>3</sub> 及稀土掺杂 BaTiO<sub>3</sub> 吸波材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
HAN X G. Preparation and Properties of BaTiO<sub>3</sub> and Rare Earth Doped BaTiO<sub>3</sub> Microwave Absorbing Materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [41] 马立欣. 钛酸钡复合粉体的制备及电磁性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.  
MA L X. Preparation and Electromagnetic Properties of Barium Titanate Composite Powders[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [42] GAIROLA S P, VERMA V, KUMAR L. Synthetic Metals[J], 2010, 160(21/22): 2315–2318.
- [43] POLITIS J K, NEMES J C. Journal of the American Chemical Society[J], 2001, 123(11): 2537–2547.
- [44] 贺正义. 钛酸钡/碳复合材料的制备及吸波性能研究[D]. 海口: 海南大学, 2019.  
HE Z Y. Preparation and Microwave Absorbing Properties of Barium Titanate/Carbon Composites[D]. Haikou: Hainan University, 2019.
- [45] 刘延坤. 稀土掺杂钛酸钡和铁氧体纳米材料的制备及吸波性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
LIU Y K. Preparation and Microwave Absorbing Properties of Rare Earth Doped Barium Titanate and Ferrite Nanomaterials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [46] 汪忠柱, 毕红, 林玲, 等. 安徽大学学报(自然科学版)[J], 2006, 30(2): 64–66.  
WANG Z Z, BI H, LIN L, *et al.* Journal of Anhui University (Natural Science Edition)[J], 2006, 30(2): 64–66.
- [47] MU G H, SHEN H, QIU J, *et al.* Applied Surface Science[J], 2006, 253: 2278–2281.
- [48] 宣益民, 李强, 杨岗, 等. 材料导报[J], 2007, 21(5): 198–203.  
XUAN Y M, LI Q, YANG G, *et al.* Materials Reports[J], 2007, 21(5): 198–203.
- [49] WANG J, ZHANG H, BAI S X, *et al.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials[J], 2007, 312(2): 310–313.
- [50] GUO C, YANG Z H, SHEN S, *et al.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials[J], 2018, 454: 32–38.
- [51] DANG S C, LIN Y, WEI X Z, *et al.* Journal of Materials Science: Materials in Electronics[J], 2018, 29: 17651–17660.
- [52] 高芳乾. 中国粉体技术[J], 2011, 17(4): 29–31.  
GAO F Q. China Powder Science and Technology[J], 2011, 17(4): 29–31.
- [53] KHSNI O, ZARGAR M Z, ACKLAND K, *et al.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials[J], 2017, 428: 28–35.
- [54] 王超. 改性羰基铁粉复合材料的制备与吸波性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
WANG C. Preparation and Microwave Absorption Properties of Modified Carbonyl Iron Powder Composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [55] 王相元, 钱鉴, 伍瑞新, 等. 南京大学学报(自然科学版)[J], 2001, 37(5): 625–629.  
WANG X Y, QIAN J, WU R X, *et al.* Journal of Nanjing University (Natural Science)[J], 2001, 37(5): 625–629.
- [56] DUAN W J, LI X D, WANG Y, *et al.* Applied Surface Science[J], 2018, 427: 594–602.
- [57] 罗平, 刘朝辉, 陶睿, 等. 电镀与涂饰[J], 2018, 37(6): 247–253.  
LUO P, LIU C H, TAO R, *et al.* Electroplating & Finishing[J], 2018, 37(6): 247–253.
- [58] CHEN C C, LIANG W F, NIEN Y H, *et al.* Materials Research Bulletin[J], 2017, 96: 81–85.
- [59] LI C P, SUI J, ZHANG Z Q, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2019, 375(1): 122017.
- [60] 刘唯, 马振叶. 南京师大学报(自然科学版)[J], 2023, 46(2): 15–24.  
LIU W, MA Z Y. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)[J], 2023, 46(2): 15–24.
- [61] 康帅, 乔士亚, 胡祖明, 等. 中国材料进展[J], 2020, 39(1): 64–69.  
KANG S, QIAO S Y, HU Z M, *et al.* Materials China[J], 2020, 39(1): 64–69.
- [62] 秦秀兰, 黄英, 杜朝锋. 磁性材料及器件[J], 2007, 4: 15–24.  
QIN X L, HUANG Y, DU C F. Magnetic Materials and Devices[J], 2007, 4: 15–24.
- [63] 王彩霞, 刘元军. 丝绸[J], 2021, 58(2): 27–34.  
WANG C X, LIU Y J. Silk[J], 2021, 58(2): 27–34.
- [64] 赵佳, 姚艳青, 杨焯赫, 等. 复合材料学报[J], 2020, 37(11): 2684–2699.

- ZHAO J, YAO Y Q, YANG X H, *et al.* *Acta Materialiae Compositae Sinica*[J], 2020, 37(11): 2684–2699.
- [65] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, *et al.* *Physical Review Letters*[J], 2008, 100(20): 207402.
- [66] TAO H, LANDY N I, BINGHAM C M, *et al.* *Optics Express*[J], 2008, 16(10): 7181–7188.
- [67] LIU B Q, ZHAO X P, ZHU W R, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2008, 18(21): 3523–3528.
- [68] GRANT J, MA Y, SAHA S, *et al.* *Optics Letters*[J], 2011, 36(8): 1524–1526.
- [69] PARK J W, TUONG P V, RHEE J Y, *et al.* *Optics Express*[J], 2013, 21(8): 9691–9702.
- [70] JIANG Z H, YUN S, TOOR F, *et al.* *ACS Nano*[J], 2011, 5(6): 4641–4647.
- [71] SHEN X P, CUI T J, ZHAO J M, *et al.* *Optics Express*[J], 2011, 19(10): 9401–9407.
- [72] ALICI K B, BILOTTI F, OZBAY E, *et al.* *Open Journal of Antennas and Propagation*[J], 2016, 4(1): 1–11.
- [73] CHENG Y Z, NIE Y, GONG R Z, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2014, 105(18): 31301.
- [74] HUANG X, HE W, YANG F, *et al.* *Optics Express*[J], 2018, 26(20): 25558–25566.
- [75] HUANG L, CHEN H. *Progress in Electromagnetics Research*[J], 2011, 113: 103–110.
- [76] MONIRUZZAMAN M, ISLAM M T, SAMSUZZAMAN M, *et al.* *Scientific Reports*[J], 2022, 12: 12497.
- [77] GHOSH S, BHATTACHARYA S, SRIVASTAVA K V. *PIERS Proceedings*[J], 2013, 2: 1097–1101.
- [78] XU Z X, MENG H Y, CHEN A, *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2021, 129(9): 094502.
- [79] MEHRAN M Z, ARCHANA R, KUSHMANDA S, *et al.* *IET Microwaves, Antennas and Propagation*[J], 2020, 14(11): 1296–1303.
- [80] SMITH D R, VIER D C, KOSCHNY T. *Physical Review E*[J], 2005, 71: 036617.
- [81] MULLA B, SABAH C. *Plasmonics*[J], 2016, 11: 1313–1321.
- [82] ZARGAR M M, RAJPUT A, SAURAV K, *et al.* *IEEE Access*[J], 2021, 9: 150426–150442.
- [83] FAHMI A, HAKIM L, RINI E M. 2019 2<sup>nd</sup> International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE) [C]. America: IEEE, 2019: 110–115.
- [84] WANG W J, YAN M B, PANG Y Q, *et al.* *Applied Physics*[J], 2014, 118(2): 443–447.
- [85] OZTURK Y, YILMAZ A E. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*[J], 2016, 31(12): 1445–1451.
- [86] CUI Y X, FUNG K H, XU J, *et al.* *Nano Letters*[J], 2012, 12(3): 1443–1447.
- [87] LIU X, TYLER T, STARR T, *et al.* *Physics Review Letters*[J], 2011, 107(4): 045901.
- [88] AUBRY A, LEI D Y, PENDRY J B. *Nano Letters*[J], 2010, 10(7): 2574–2579.
- [89] AYDIN K, FERRY V, BRIGGS R, *et al.* *Nature Communications*[J], 2011, 2: 517.
- [90] GONG G, YANG F, ZHANG X. *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 2017, 50(45): 455105.
- [91] SØNDERGAARD THOMAS, NOVIKOV S M, HOLMGAARD T, *et al.* *Nature Communications*[J], 2012, 3: 969–969.
- [92] SONG Z Y, WANG Z S, WEI M L. *Materials Letters*[J], 2019, 234: 138–141.
- [93] TEPERIK T V, GARCÍA DE ABAJO F J, BORISOV A G, *et al.* *Nature Photonics*[J], 2008, 2: 299–301.
- [94] XIONG Y, CHEN F, CHENG Y Z, *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 920: 166008.
- [95] 邓显玲, 黎泽伦, 杨孟涛, 等. *重庆大学学报*[J], 2020, 43(8): 47–53.
- DENG X L, LI Z L, YANG M T, *et al.* *Journal of Chongqing University*[J], 2020, 43(8): 47–53.
- [96] 房新蕊, 王茜, 张庆东, 等. *电子技术与软件工程*[J], 2020(6): 216–218.
- FANG X R, WANG Q, ZHANG Q D, *et al.* *Electronic Technology and Software Engineering*[J], 2020(6): 216–218.
- [97] ZHANG C, CHENG Q, YANG J, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2017, 110(14): 143511.
- [98] 孔祥林, 马洪宇, 陈鹏, 等. *电波科学学报*[J], 2021, 36(6): 947–952.
- KONG X L, MA H Y, CHEN P, *et al.* *Chinese Journal of Radio Science*[J], 2021, 36(6): 947–952.
- [99] 张泽奎, 王东红, 王蓬, 等. *功能材料*[J], 2018, 49(4): 4213–4216.
- ZHANG Z K, WANG D H, WANG P, *et al.* *Journal of Functional Materials*[J], 2018, 49(4): 4213–4216.
- [100] WANG C X, CHEN M J, LEI H S, *et al.* *Composite Structures*[J], 2020, 235(1): 1–8.
- [101] TIWARI P, PATHAK S K, ANITHA V P. *Waves in Random and Complex Media* [J], 2021, doi.org/10.1080/17455030.2021.1972182.
- [102] OLSZEWSKA-PLACHA M, SALSKEI B, JANCZAK D, *et al.* *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*[J], 2015, 63(2): 565–572.
- [103] DENG G, LV K, SUN H, *et al.* *Nanomaterials and Nanotechnology*[J], 2020, 10: 1847980420935718.
- [104] LONG L V, KHIEM N S, TUNG B S, *et al.* *Photonics*[J], 2021, 8(10): 440.
- [105] 邓光晟, 陈文卿, 余振春, 等. *光学学报*[J], 2022, 42(22): 119–126.
- DENG G S, CHEN W Q, YU Z C, *et al.* *Acta Optica Sinica*[J], 2022, 42(22): 119–126.
- [106] CHEN X, CHEN Y, YAN M, *et al.* *ACS Nano*[J], 2012, 6(3): 2550–2557.



- [107] CHENG Y, YANG H. Journal of Applied Physics[J], 2010, 108(3): 034906.
- [108] COSTA F, GENOVESI S, MONORCHIO A, *et al.* IEEE Transactions on Antennas and Propagation[J], 2013, 61(3): 1201–1209.
- [109] LI L, YANG Y, LIANG C. Journal of Applied Physics[J], 2011, 110(6): 63702.
- [110] MAIER T, BRUCKL H. Optics Letters[J], 2009, 34(19): 3012–3014.
- [111] NARIMANOV E E, KILDISHEV A V. Applied Physics Letters[J], 2009, 95(4): 41106.
- [112] WILLIAMS G P. Reports on Progress in Physics[J], 2005, 69(2): 301.
- [113] TONOUCHI M. Nature Photonics[J], 2007, 1: 97–105.
- [114] HAO J, WANG J, LIU X L, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2010, 96(25): 251104.
- [115] LIU N, MESCH M, WEISS T, *et al.* Nano Letters[J], 2010, 10(7): 2342–2348.
- [116] LIU X L, STARR T, STARR A F, *et al.* Physical Review Letters[J], 2010, 104(20): 207403.
- [117] YU S, PIAO X, HONG J, *et al.* Physical Review A[J], 2015, 92(1): 011802.
- [118] MIN C, VERONIS G. Optics Express[J], 2009, 17(13): 10757–10766.
- [119] LIU X M, REN Z Y, YANG T, *et al.* Journal of Materials Science & Technology[J], 2021, 62: 249–253.
- [120] WEN Q, ZHANG H, XIE Y, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2009, 95(24): 1111.
- [121] BUTUN S, AYDIN K. Optics Express[J], 2014, 22(16): 19457–19468.
- [122] MA Y, CHEN Q, GRANT J, *et al.* Optics Letters[J], 2011, 36(6): 945–947.
- [123] TAO H, BINGHAM C M, PILON D, *et al.* Journal of Physics D: Applied Physics[J], 2010, 43(22): 225102.
- [124] LIU X M, LAN C W, LI B, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2016, 109(6): 062902.
- [125] AVITZOUR Y, URZHUMOV Y A, SHVETS G. Physical Review B[J], 2009, 79: 045131.
- [126] DING F, CUI Y, GE X, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2012, 100(10): 103506.
- [127] HUANG L, CHOWDHURY D R, RAMANI S, *et al.* Optics Letters[J], 2012, 37(2): 154–156.
- [128] 刘晓明. 介质超材料的设计、制备及其对电磁波的调控[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- LIU X M. Design, Preparation and Regulation of Dielectric Metamaterials and Their Regulation of Electromagnetic Waves[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [129] 孙占红, 郭春艳. 航空制造技术[J], 2002, 1: 38–40.
- SUN Z H, GUO C Y. Aviation Manufacturing Technology[J], 2002, 1: 38–40.
- [130] 马科峰, 张广成, 刘良威, 等. 材料开发与应用[J], 2010, 25(6): 53–57.
- MA K F, ZHANG G C, LIU L W, *et al.* Material Development and Application[J], 2010, 25(6): 53–57.
- [131] 穆武第, 王凤春, 黄克明, 等. 材料保护[J], 2013, 43(S1): 85–88.
- MU W D, WANG F C, HUANG K M, *et al.* Material Protection[J], 2013, 43(S1): 85–88.
- [132] 高海涛, 王建江, 李泽. 材料工程[J], 2019, 47(1): 70–76.
- GAO H T, WANG J J, LI Z. Journal of Materials Engineering[J], 2019, 47(1): 70–76.
- [133] 叶康平. 铁氧体超构材料的电磁波吸收和超散射研究[D]. 南京: 南京大学, 2021.
- YE K P. Study on Electromagnetic Wave Absorption and Superscattering of Ferrite Superstructured Materials[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021.
- [134] ADENOT-ENGELVIN A L, DUDEK C, TONEGUZZO P, *et al.* Journal of the European Ceramic Society[J], 2007, 27(2/3): 1029–1033.
- [135] ADENOT-ENGELVIN A L, DUDEK C, ACHER O. Journal of Magnetism and Magnetic Materials[J], 2006, 300(1): 33–37.
- [136] ZHANG L, ZHOU P, ZHANG H, *et al.* A Broadband Radar Absorber Based on Perforated Magnetic Polymer Composites Embedded with FSS[C]//2013 National Doctoral Academic Forum—Electronic Thin Films and Integrated Devices. Chengdu: Academic Degrees Committee Office of the State Council, 2013: 211–218.
- [137] 礼嵩明, 蒋诗才, 望咏林, 等. 材料工程[J], 2017, 45(11): 10–14.
- LI S M, JIANG S C, WANG Y L, *et al.* Journal of Material Engineering[J], 2017, 45(11): 10–14.
- [138] 杨芾黎, 郑可, 程颖瑛. 微波学报[J], 2022, 38(6): 52–57.
- YANG F L, ZHENG K, CHENG Y Y. Journal of Microwave[J], 2022, 38(6): 52–57.
- [139] 张娜, 华伟, 潘靖凯, 等. 高分子材料科学与工程[J], 2020, 36(9): 124–129.
- ZHANG N, HUA W, PAN J K, *et al.* Polymeric Materials Science and Engineering[J], 2020, 36(9): 124–129.
- [140] 李泽, 赵芳, 王建江, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2019, 48(11): 3628–3633.
- LI Z, ZHAO F, WANG J J, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2019, 48(11): 3628–3633.
- [141] 程宗辉, 段本方, 陈云鹏, 等. 磁性材料及器件[J], 2022, 53(4): 41–47.
- CHENG Z H, DUAN B F, CHEN Y P, *et al.* Magnetic Materials and Devices[J], 2022, 53(4): 41–47.

(编辑 吴 锐)