

引用格式: 景致, 张健. 航空电磁超材料研究进展及发展建议[J]. 航空材料学报, 2023, 43(6): 44-51.

JING Zhi, ZHANG Jian. Research progress and development suggestions on aeronautical electromagnetic metamaterial[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(6): 44-51.

航空电磁超材料研究进展及发展建议

景 致^{1,2*}, 张 健¹

(1. 沈阳理工大学, 沈阳 110158; 2. 电磁信息控制与效应全国重点实验室, 沈阳 110035)

摘要: 电磁超材料是由亚波长微结构周期排列而成的人工复合材料, 对电磁波有很强的传导调控作用或吸收作用, 在航空武器装备隐身设计领域被广泛研究。本文首先介绍了电磁超材料的概念, 综述了电磁调控型超材料、电磁吸收型超材料、主动可调型超材料和智能超材料的最新研究进展; 然后介绍了航空电磁偏折超材料、电磁吸收超材料和频率选择超材料的隐身机理及应用研究现状, 分析认为隐身机理丰富和可设计性强是电磁超材料有别于传统吸波材料的主要优势。从拓展吸波频谱、增强吸波性能、吸波智能可调三方面对电磁超材料提出发展建议, 包括吸波频谱进一步向红外、激光、紫外波段拓展, 宽频吸波性能进一步提升, 吸波频带智能可调。

关键词: 电磁超材料; 隐身; 电磁偏折; 电磁吸收; 频率选择

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2021.000098

中图分类号: V259

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2023)06-0044-08

Research progress and development suggestions on aeronautical electromagnetic metamaterial

JING Zhi^{1,2*}, ZHANG Jian¹

(1. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110158, China; 2. National Key Laboratory of Electromagnetic Information Control and Effects, Shenyang 110035, China)

Abstract: Electromagnetic metamaterial is an artificial composite composed of periodic subwavelength microstructure, which has a strong conduction regulation or absorption effect on electromagnetic wave, and it has been widely studied in the field of stealth design of aviation weapons and equipment. In this paper, the concept of electromagnetic metamaterial is introduced firstly, and the latest research progresses of electromagnetic control metamaterial, electromagnetic absorbing metamaterial, active tunable metamaterial and intelligent metamaterial are reviewed. Then, the stealth mechanism and the application research status of electromagnetic deflection metamaterial, electromagnetic absorbing metamaterial and frequency selective metamaterial are introduced. It is analyzed that the rich stealth mechanism and the strong designability are the main advantages of electromagnetic metamaterials as distinct from the traditional absorbing materials. For the development of electromagnetic metamaterial, this paper puts forward three suggestions from expanding the absorbing spectrum, enhancing the absorbing performance, and smart tunable of absorbing ability, specifically including the expansion of absorbing spectrum to infrared, laser and ultraviolet band, further improving the broadband absorbing ability, and intelligent adjusting the absorbing frequency band.

Key words: electromagnetic metamaterial; stealth; electromagnetic deflection; electromagnetic wave absorbing; frequency selection

超材料 (metamaterial) 是具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合材料, 因其具有超常

的物理性质和极强的可设计性而受到广泛关注。自然界材料由原子电子的规律排布组成, 具有固定

的材料属性。而超材料是一种人工设计的材料,一般通过在材料的关键物理尺度上的结构有序设计来突破某些表现自然规律的限制,从而获得超出自然界固有物理性质的新材料。

超材料是由苏联理论物理学家 Veselago^[1] 首先提出的。Pendry 等^[2] 设计开口谐振环周期结构,首次实现了负磁响应。Smith 等^[3] 实验制备了开口谐振环型超材料,首次实现了微波波段的负介电常数和负磁导率,证明了负折射率材料的存在。Parazzoli 等^[4] 在实验过程中直接观测到了负折射现象。至此超材料技术走入人们的视野并逐渐成为各国学者研究的热点。电磁超材料是超材料中最重要的分支,具有常规材料所不具备的电磁调控能力或电磁吸收能力,在民用、军工领域被广泛研究。

本文首先介绍电磁调控型超材料、电磁吸收型超材料、主动可调型超材料和智能超材料的最新研究进展,然后介绍航空电磁超材料的应用研究进展,分析电磁超材料的优势以及走向工程应用所面临的难点与挑战,最后给出航空电磁超材料的发展建议。

1 电磁超材料研究进展

电磁超材料是一种由人工合成的具有超常电磁学和光学特性的结构型材料^[5]。通过亚波长微结构的周期性排布,可实现特定频段内电磁波的高效吸收、电磁波传播路径的调控和电磁波频率选择性透过,为隐身设计提供了全新的技术途径。

基于超材料的负折射效应可以实现对电磁波传播路径的调控,产生电磁偏折、极化旋转等物理现象。Pendry 等^[6] 提出超材料能够改变电磁波的传播方向从而实现隐形,原理模型如图 1,电磁波在穿过超材料的过程中可以产生负折射效应,使电磁波的传播方向发生连续渐变,最终使电磁波绕过目标而不产生电磁回波,实现隐形。Schurig 等^[7] 提出了超材料隐身衣的设计理论,Liu 等^[8] 实现了超材料隐身衣的设计与制备,实验证明了超材料实现完美隐身的可行性。Huang 等^[9] 设计了石墨烯超材料,在太赫兹实现了电磁波极化转换和不对称传输。Comley^[10] 基于等效电路法设计了一种超材料,该超材料会根据电磁波长而改变电磁波传输的时间响应和光学相响应,可用于调控特定波长激光束的聚焦特性。Huang 等^[11] 设计了一种由双层超表面组成的超材料,顶层超表面由两个不同维度的交叉线结构组成,用于产生 180°的相位响应,底层

超表面通过 I 形图案的拓扑变形实现相位梯度分布,该超材料在 K 波段具有良好的电磁偏折效果。

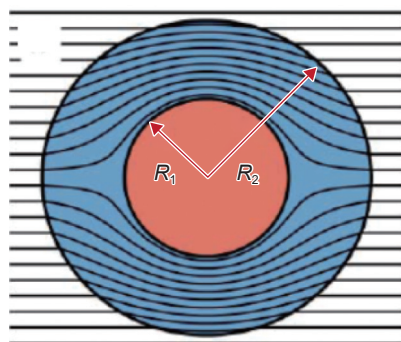


图 1 电磁波绕过物体^[6]

Fig. 1 Electromagnetic wave bypassing a ball^[6]

电磁超材料对入射电磁波具有强谐振效应,可表现出优秀的电磁吸收特性。Landy 等^[12] 基于超材料的电磁谐振耦合特性提出了一种具有“完美”吸波特性的超材料吸波体,其结构单元由电谐振环、损耗介质和金属微带线组成,实验结果表明该超材料吸波体在窄频带内几乎可以实现对入射电磁波的完全吸收。Tao 等^[13] 设计了由两种开口谐振环单元组成的超材料吸波体,实验结果表明在 1.4 THz 和 3.0 THz 的吸收率分别可达 0.85 和 0.94。Liu 等^[14] 将两种十字型谐振单元组成棋盘状超材料吸波体,对波长为 6.18 μm 和 8.32 μm 的电磁波吸收率分别达到 0.8 和 0.935。Grant 等^[15] 设计了一种工作在太赫兹频段的宽带超材料吸波体,通过将不同尺寸的谐振单元组合以产生多个谐振吸收峰,实现了吸波带宽的有效拓展,实验测得该吸波体吸收率大于 60% 的频率带宽为 1.86 THz。Zhang 等^[16-17] 采用等效电路理论,建立了周期结构电磁吸波的约束方程,基于约束方程进行周期结构多谐振设计,相比 Salisbury 吸波屏^[18] 吸收带宽得到有效拓展且总厚度仅为 59%。Xiao 等^[19-20] 将表面等离子激元效应与超材料技术相结合,通过控制和调节金属的等效等离子体频率,使得超材料与入射波的电场发生共振响应,设计的超材料吸波体具有很高的电磁吸收效率。Long 等^[21] 将多层尺寸渐变方形单元沿材料厚度方向叠加,设计了一种类金字塔型的超材料吸波体,在 7~18 GHz 频率范围内的吸收效率超过 90%,相比相同厚度的单层超材料吸波带宽提高了 38%。Cen 等^[22] 设计了哑铃形石墨烯超材料,研究了该种材料在太赫兹频段的吸收特性,提出通过改变石墨烯单元几何参数和费米能级,可以改变超材料的吸收特性。Kim 等^[23] 提出了非线性超材料的概念,这种超材料会根据表

面波能量的大小改变吸收效率,该超材料本质上是一种非线性电路,表面波能量越大其吸收效率就越高,因此表面波在该超材料上的传播具有低能量通过、高能量吸收的特性。Cheng等^[24]设计了一种兼备光学透明和微波吸收特性的超材料,该超材料由风车形单元组成,在8.3~17.4 GHz频带内吸收率大于90%,同时通过使用具有中等表面电阻的氧化铟锡(ITO)薄膜实现了较高的光学透射率。礼嵩明等^[25-26]将超材料与传统吸波蜂窝相结合,制备了蜂窝夹层型吸波超材料,该超材料吸波体相比普通吸波蜂窝宽频吸波性能均有显著提升,2~18 GHz的平均吸收效率从7 dB提高到12 dB。

超材料周期结构可以与可调器件一起印刷在电路板上,实现材料电磁响应的主动可调。Cui等^[27-28]研究了一种数字编码超材料,将超材料单元与开关二极管、变容二极管或MEMS等可调器件相结合设计,通过改变可调器件的工作状态即可改变超材料的相位响应和电磁特性,并将所有的编码程序写进外围的控制电路,以用来实时地调控可调器件的工作状态,实现超材料电磁性能的现场可编程。Wang等^[29]、韩亚娟等^[30]基于表面等离子激元效应,设计了超材料天线并采用印刷电路板技术加工,相较于传统天线体积小、剖面低、设计自由度高,且与微波电路兼容。黄金国等^[31]在超材料结构中引入电阻和有源变容二极管,通过改变外加电压实现吸波频带的动态可调,在3.7倍频带范围内实现吸波频段的自调节,吸波体的总厚度仅为波长的1/180,相比于传统吸波材料厚度更薄、吸波性能更佳。

智能超材料是电磁超材料未来重要的发展方向。于相龙等^[32]研究了智能电磁超材料、智能机械超材料、智能热学超材料和智能耦合超材料的发展现状,提出了智能超材料研究的关键技术——新

型设计与仿真技术、材料制备技术和材料基因工程,论述了智能超材料在微型天线及无线互联、光电磁隐身、医用完美成像、航空航天或汽车智能蒙皮、精密仪器制造等领域的广泛应用前景。蒋卫祥等^[33]梳理了数字编码超表面的发展历程,重点介绍其在可编程与智能电磁调控领域的最新研究进展。刘晨阳等^[34]将超材料智能表面应用于MIMO无线网络设计,研究了智能超表面的反射单元组成、有源单元数量等因素对移动传输速率的影响。

2 航空电磁超材料应用研究进展

基于超材料对电磁波的调控或吸收特性可设计超材料隐身结构^[35-36],是航空武器装备提升隐身性能的一项重要技术途径。航空电磁超材料根据电磁调控机理可分三类:其一是电磁偏折超材料^[37-38],主要利用超材料改变电磁波的透射、反射特性,将雷达信号反射到传感器接收不到的方位,实现回波信号的降低;其二是吸波超材料,通过阻抗渐变设计^[39-43]、电磁谐振设计^[44-47]等方式吸收雷达波,实现电磁散射强度的降低;其三是频率选择超材料^[48-50],基于周期结构的滤波特性实现电磁波的频率选择透过,提升雷达罩、天线罩的隐身性能。本章分别介绍了三类电磁超材料在航空武器装备上的应用研究情况,并分析电磁超材料相比传统吸波材料的优势。

2.1 电磁偏折超材料

电磁偏折超材料是基于超材料对电磁波传播方向的调控作用实现隐身。电磁偏折产生原理见图2,通过超材料微结构单元的尺寸、角度渐变设计,可使电磁波在穿过相邻超材料单元的过程中产生光程差,形成电磁回波相位梯度变化或极化变化^[51-52],实现电磁波回波方向或极化方向的改变。

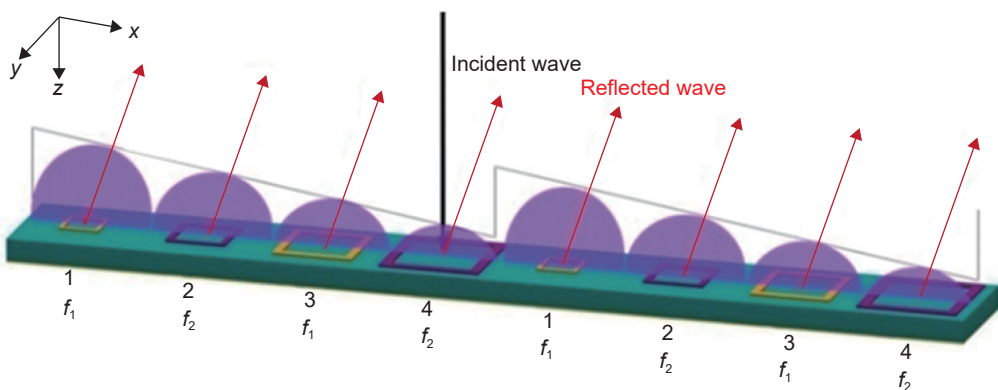


图2 电磁偏折超材料作用原理

Fig. 2 Mechanism of electromagnetic deflection metamaterial

电磁偏折超材料可以改变电磁波的反射方向,适用于解决镜面回波类散射问题。如图3所示的F-15飞机,其垂尾侧壁面接近于垂直水平面,法向的镜面回波散射量值很高。如果在垂尾侧壁面采用电磁偏折超材料,即可将电磁波反射到传感器接收不到的方位,有效降低垂尾的侧向强散射。

隐身飞机的垂尾、机身侧壁面均采用倾斜设计,在物理上已实现镜面散射的回波偏离,因此电磁偏折类超材料只在F-15这类非隐身飞机上有应用前景。目前电磁偏折类超材料可以实现对窄带电磁波反射方向的调控^[53-55],不具备宽频隐身能力,无法满足工程应用需求。目前鲜见公开报道或文献显示电磁偏折类超材料在航空武器装备上应用。

2.2 电磁吸收超材料

电磁吸收超材料是基于超材料的谐振效应来实现特定频段电磁波的强衰减。电磁谐振效应与电磁波的波长具有强相关性,大量研究^[56-60]表明,超材料在谐振频带内具有优秀的吸波性能,但在谐



图3 电磁偏折超材料应用设想

Fig. 3 Application assumption of electromagnetic deflection metamaterial

振频带外吸波性能会迅速下降,如何提升吸波带宽是电磁吸收超材料的设计难点。在超材料设计中引入电磁损耗材料是提高其吸波带宽的一种有效途径,目前一般是将超材料与吸波蜂窝/泡沫/层板相结合^[25-26],利用超材料的阻抗匹配特性、电磁谐振特性拓展吸波带宽,实现宽频电磁波吸收(图4)。

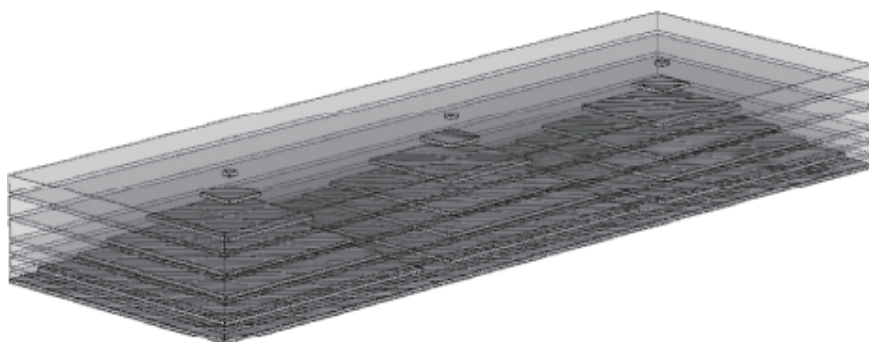


图4 超材料吸波结构示意图^[25]

Fig. 4 Schematic diagram of metamaterial wave absorbing structure^[25]

飞机的翼面边缘是强散射源,采用超材料吸波结构是提升其隐身性能的有效手段。翼面边缘散射按散射机理可分为前缘柱面散射和后缘行波散射,基于超材料的电磁谐振吸收特性可降低前缘柱面散射,基于超材料的阻抗匹配特性可降低后缘行波散射。有资料显示美国的F-35等飞机在翼面边缘部位应用了超材料吸波结构。

2.3 频率选择超材料

频率选择超材料是通过微结构单元形状、尺寸、排布、取向等参数的定向设计,使不同频率的电磁波在穿过超材料时表现出不同的透射现象^[61-63]。图5是一种频率选择超材料的S参数仿真结果,其在4.5 GHz处产生了一个带宽约为0.5 GHz的阻带,带内电磁波强反射,带外电磁波强透射。

对于隐身飞机,雷达/天线罩在辐射频带内电磁波高透过、在非辐射频带内电磁波强截止是主要设计目标。基于超材料频率选择特性设计的隐身

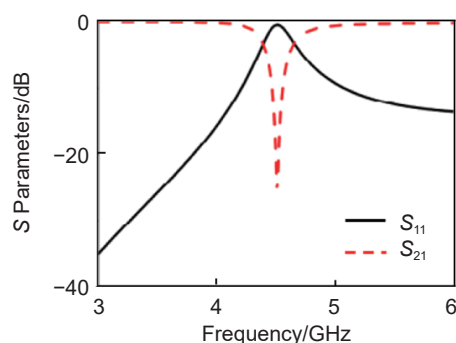


图5 频率选择超材料S参数仿真结果

Fig. 5 S-parameter simulation results of frequency-selective metamaterial

雷达/天线罩具有优秀的带内高透过、带外强截止特性,相比传统雷达/天线罩隐身性能更好。国内外的隐身雷达/天线罩大多采用了频率选择超材料技术。

2.4 电磁超材料的优势与挑战

大量应用研究表明,电磁超材料相比传统隐身材料的技术优势主要表现为两方面。一方面,电磁超材料可以调控电磁波的传输特性,特定频率的电磁波在超材料表面会产生电磁偏折、频率选择性透过等现象,为隐身设计提供了新的技术手段。另一方面,超材料具有很强的可设计性,可根据不同的散射机理针对性设计吸收方案,实现更优的吸波效果。

虽然电磁超材料已取得了一些应用研究成果,但更好地应用于航空武器装备还面临三方面挑战。第一,受现有仿真方法和能力制约,在超材料隐身结构电磁散射特性分析过程中需要对电磁模型和电磁参数进行大量的简化、等效处理,仿真评估结果与真实情况存在一定偏差,方案设计迭代还大量依赖实物测试,导致研制周期长、成本高。第二,隐身技术是降低目标与背景对比度的技术,由于天空背景是极低散射,所以航空武器装备对于隐身性能的追求是电磁散射尽可能低。超材料隐身结构被设计应用于翼面边缘等强散射部位,由于使用部位本身具有较高的散射量值,所以需要超材料具有很强的吸波性能。目前超材料相比传统隐身材料在低频有比较明显的性能优势,但高频下性能接近,宽频吸波性能还需提升。同时,超材料的微结构单元自身在某些情况下会产生次级散射。如何在进一步提升超材料隐身结构吸波性能的同时降低自身次级散射,是航空电磁超材料设计上面临的挑战。第三,航空武器装备使用环境伴随振动、高温等极端环境,因此超材料结构不仅要质量轻,还需具有高强度、耐环境性能和高可靠性。同时为满足飞机功能性需求,超材料结构还需要有宽频、高效的电磁吸波能力。如何在有限的空间和严格的质量条件约束下满足隐身、强度、耐环境等多种性能要求,是超材料从理论研究走向工程应用需要解决的瓶颈问题。

3 航空电磁超材料发展建议

电磁超材料对雷达波有很强的调控或吸收效应,是航空武器装备隐身设计研究的热点。航空电磁超材料从作用机理上可分为电磁偏折型、电磁吸

收型和频率选择型三类,目前已在部分航空武器装备上应用,隐身效果虽优于传统吸波材料或吸波结构,但性能仍有优化设计空间。在有限质量、空间条件约束下,满足强度、耐环境要求的同时实现最优的隐身性能,是航空电磁超材料的设计目标。目前电磁超材料设计主要依赖于电磁仿真,仿真能力直接决定了方案的迭代速度和最大可设计规模,建立大型仿真环境是开展超材料应用研究的必要条件,同时还应该建立超材料微结构性能数据库,收录典型微结构的关键性能参数,加快方案设计收敛速度。

随着探测技术的不断发展,一方面探测器的灵敏度越来越高,另一方面探测器的工作频谱从雷达、红外、可见光波段扩展到紫外、激光波段。为适应未来战场需求,电磁超材料需要从拓展吸波频谱、增强吸波性能、吸波智能可调三方面发展。

(1)拓展吸波频谱:目前航空电磁超材料主要针对雷达波设计,仅对波长为毫米到米级的电磁波有良好吸收效果。考虑未来探测威胁,电磁超材料的吸波频谱应进一步向红外、紫外、激光拓展。

(2)增强吸波性能:随着航空武器装备对隐身能力需求的不断提高,航空电磁超材料的吸波性能也需进一步提升。为满足未来航空武器装备需求,需要突破现有吸波机理,持续针对设计和工艺方案开展技术攻关,优化提升航空电磁超材料的宽频吸波性能。

(3)吸波智能可调:将电磁超材料与可调器件结合设计,通过有源加载改变可调器件的工作状态可以调控超材料的电磁响应,从而实现超材料吸波频段的智能可调。采用智能可调设计可以进一步拓展超材料的吸波带宽,甚至有希望在多个频谱同时实现电磁吸收。

参考文献:

- [1] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov Phys Usp*, 1968, 10(4): 509-514.
- [2] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [3] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [4] PARAZZOLI C G, GREGOR R B, LI K, et al. Experi-

- mental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(10): 107401.
- [5] ELEFThERIADES G V, ENGHETA N. Metamaterials: fundamentals and applications in the microwave and optical regimes[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(10): 1618-1621.
- [6] PENDRY J B, SCHURIG D, SMITH D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [7] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [8] LIU R P, JI C, MOCK J J, et al. Broadband ground-plane cloak[J]. *Science*, 2009, 323(5912): 366-369.
- [9] HUANG Y Y, YAO Z H, HU F R, et al. Tunable circular polarization conversion and asymmetric transmission of planar chiral graphene-metamaterial in terahertz region[J]. *Carbon*, 2017, 119: 305-313.
- [10] COMLEY A J. Laser beam zooming and deflection using a nonlinear metamaterial refracting medium[J]. *EPJ Applied Metamaterials*, 2018, 5: 8.
- [11] HUANG C, PAN W, MA X, et al. Multi-spectral metasurface for different functional control of reflection waves[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23291.
- [12] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. A perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 207402.
- [13] TAO H, BINGHAM C M, PILON D, et al. A dual band terahertz metamaterial absorber[J]. *Journal of Physics D*, 2010, 43(22): 225102.
- [14] LIU X, TYLER T, STARR T, et al. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(4): 045901-045901.
- [15] GRANT J, MA Y, SAHA S, et al. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3476-3478.
- [16] ZHANG H B, ZHOU P H, DENG L W, et al. Frequency-dispersive resistance of high impedance surface absorber with trapezoid-coupling pattern[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(1): 207402.
- [17] ZHANG H B, ZHOU P H, LU H P, et al. Resistance selection of high impedance surface absorbers for perfect and broadband absorption[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2013, 61(2): 976-979.
- [18] SALISBURY W W. Absorbent body for electromagnetic waves: US2599944 [P/OL]. (1952-06-10) [2022-9-27]. <http://www.google.co.in/patents/US2599944>.
- [19] XIAO S Y, WANG T, LIU Y B, et al. An ultrasensitive and multispectral refractive index sensor design based on quad-supercell metamaterials[J]. *Plasmonics*, 2017, 12(1): 185-191.
- [20] XIAO S Y, WANG T, LIU Y B, et al. Tunable light trapping and absorption enhancement with graphene ring arrays[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, 18(38): 26661-26669.
- [21] LONG C, YIN S, WANG W, et al. Broadening the absorption bandwidth of metamaterial absorbers by transverse magnetic harmonics of 210 mode[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21431.
- [22] CEN C, CHEN J, LIANG C, et al. Plasmonic absorption characteristics based on dumbbell-shaped graphene metamaterial arrays[J]. *Physica E-low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2018, 103: 93-98.
- [23] KIM S, WAKATSUCHI H, RUSHTON J J, et al. Switchable nonlinear metasurfaces for absorbing high power surface waves[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(4): 1516.
- [24] CHENG Z, QIANG C, JIN Y, et al. Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(14): 722.
- [25] 礼嵩明, 蒋诗才, 望咏林, 等. “超材料”结构吸波复合材料技术研究[J]. *材料工程*, 2017, 45(11): 10-14.
- LI S M, JIANG S C, WANG Y L, et al. Study on “metamaterial” structure absorbing composite technology[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(11): 10-14.
- [26] 礼嵩明, 吴思保, 王甲富, 等. 含超材料的新型蜂窝夹层结构吸波复合材料[J]. *航空材料学报*, 2019, 39(3): 94-99.
- LI S M, WU S B, WANG J F. Novel honeycomb sandwich structure wave-absorbing composites with metamaterials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(3): 94-99.
- [27] CUI T J, QI M, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Sci Appl*, 2014, 3(10): 1-8.
- [28] CUI T J, LIU S, ZHANG L. Information metamaterials and metasurfaces[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(15): 3644-3668.
- [29] WANG J F, QU S B, MA H, et al. Broadband and high-efficiency spoof plasmon polariton coupler mediated by gradient metasurfaces[J]. *Applied physics letters*, 2012, 101(20): 1-4.
- [30] 韩亚娟, 王甲富, 李勇峰, 等. 基于人工表面等离激元的天线研究进展[J]. *电波科学学报*, 2018, 33(3): 280-286.
- HAN Y J, WANG J F, LI Y F, et al. Recent progresses of antennas based on spoof surface plasmon polaritons[J].

- Chinese Journal of Radio Science, 2018, 33(3): 280-286.
- [31] 黄金国, 郭宇, 赵治亚, 等. 基于有源超材料的可调超薄雷达吸波体研究[J]. 材料工程, 2019, 47(6): 77-81.
HUANG J G, GUO Y, ZHAO Z Y, et al. Investigation on tunable ultra-thin radar absorber based on active metamaterial[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(6): 77-81.
- [32] 于相龙, 周济. 智能超材料研究与进展[J]. 材料工程, 2016, 44(7): 119-128.
YU X L, ZHOU J. Research advance in smart metamaterials[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(7): 119-128.
- [33] 蒋卫祥, 田翰闰, 宋超, 等. 数字编码超表面: 迈向电磁功能的可编程与智能调控[J]. 雷达学报, 2022, 11(6): 1003-1019.
JIANG W X, TIAN H W, SONG C, et al. Digital coding metasurfaces: toward programmable and smart manipulations of electromagnetic functions[J]. Journal of Radars, 2022, 11(6): 1003-1019.
- [34] 刘晨阳, 王国刚, 潘多涛, 等. 超材料智能表面在MIMO无线网络中辅助应用的仿真研究[J]. 电波科学学报, 2023, 38(2): 325-333.
LIU C Y, WANG G G, PAN D T, et al. Simulation research on auxiliary application of metamaterial smart surface in MIMO wireless network[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(2): 325-333.
- [35] 沈杨, 王甲富, 张介秋, 等. 基于超材料的雷达吸波材料研究进展[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(6): 39-47.
SHEN Y, WANG J F, ZHANG J Q, et al. Research progresses in radar absorbing materials based on metamaterial[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(6): 39-47.
- [36] 院伟, 杨进, 王一龙, 等. 宽带吸波超材料的研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(11): 104-108.
YUAN W, YANG J, WANG Y L, et al. Recent advances in broadband metamaterial absorbers[J]. Materials Review, 2016, 30(11): 104-108.
- [37] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [38] MA H F, CUI T J. Three-dimensional broadband and broad-angle transformation-optics lens[J]. Nature Communications, 2010, 1(8): 124.
- [39] ENGHETA N. Thin absorbing screens using metamaterial surfaces[C]//Antennas & Propagation Society International Symposium. [S.l.]: IEEE, 2002.
- [40] TRETYAKOV S A, MASLOVSKI S I. Thin absorbing for all incidence angle based on the use of a high-impedance surface[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 38(3): 175-178.
- [41] SIMMS S, FUSCO V. Thin radar absorber using artificial magnetic ground plane[J]. Electronics Letters, 2005, 41(24): 1311-1313.
- [42] COSTA F, MONORCHIO A, MANARA G. Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(5): 1551-1558.
- [43] KAZEMZADEH A, KARLSSON A. On the absorption mechanism of ultra thin absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(10): 3310-3315.
- [44] 邓光晟, 陈文卿, 余振春, 等. 基于导电塑料膜的角度不敏感宽带超材料吸波体设计及制备[J]. 光学学报, 2022, 42(22): 8.
DENG G S, CHEN W Q, YU Z C, et al. Design and preparation of angle-insensitive broadband metamaterial absorber based on conductive plastic film[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(22): 8.
- [45] HUANG L, CHOWDHURY D R, RAMANI S, et al. Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band[J]. Optics Letters, 2012, 37(2): 154-156.
- [46] CUI Y X, XU J, FUNG K H, et al. A thin film broadband absorber based on multi-sized nanoantennas[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(25): 193.
- [47] WU C, SHVETS G. Design of metamaterial surfaces with broadband absorbance[J]. Optics Letters, 2012, 37(2): 308-310.
- [48] TENNANT A, CHAMBERS B. Adaptive radar absorbing structure with pin diode controlled active frequency selective surface[J]. Smart Materials & Structures, 2004, 13(1): 122-125.
- [49] LIAO Z Q, GONG R Z, NIE Y, et al. Absorption enhancement of fractal frequency selective surface absorbers by using microwave absorbing material based substrates[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2011, 9(3): 287-294.
- [50] LI M, XIAO S Q, BAI Y Y, et al. An ultrathin and broadband radar absorber using resistive FSS[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 748-751.
- [51] XIA R, JING X F, GUI X C, et al. Broadband terahertz half-wave plate based on anisotropic polarization conversion metamaterials[J]. Optical Materials Express, 2017, 7(3): 977.
- [52] KHAN M I, FRAZ Q, TAHIR F A. Ultra-wideband cross polarization conversion metasurface insensitive to incidence angle[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(4): 045103.
- [53] ZHENG Q, GUO C J, YUAN P L, et al. Wideband and

- high-efficiency reflective polarization conversion metasurface based on anisotropic metamaterials[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(2): 2658-2666.
- [54] PARK J, KANG J, KIM S J, et al. Dynamic reflection phase and polarization control in metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2016, 17(1): 407.
- [55] TAO Z, XIANG W, BAI C P, et al. Reconfigurable conversions of reflection, transmission, and polarization states using active metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(12): 121901.
- [56] YANG J, ZHANG H F, ZHANG H, et al. Ultra-broadband absorber based on plasma metamaterials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091602.
- [57] PHAM T L, XUAN K B, TUNG B S, et al. Origami-based stretchable bi-functional metamaterials: reflector and broadband absorber[J]. *Journal of Physics D*, 2021, 54(16): 165111.
- [58] HAO L, YONG Z C. Design of an ultrabroadband visible metamaterial absorber based on three-dimensional metallic nanostructures[J]. *Modern Physics Letters B*, 2017, 31(6): 1750231.
- [59] 张泽奎, 王东红, 王蓬, 等. 基于电阻膜与超材料的超薄宽频吸波体设计[J]. *功能材料*, 2018, 49(4): 219-222.
- ZHANG Z K, WANG D H, WANG P, et al. Design of an ultrathin and wideband absorber based on resistance film and metamaterial[J]. *Functional Materials*, 2018, 49(4): 219-222.
- [60] BIBI M, ABBAS S M, AHMAD N, et al. Microwaves absorbing characteristics of metal ferrite/multiwall carbon nanotubes nanocomposites in X-band[J]. *Composites Part B*, 2017, 114: 139-148.
- [61] NARAYAN S, JHA R M. A novel metamaterial FSS-based structure for wideband radome applications[J]. *Computers, Materials and Continua*, 2013, 37(2): 97-108.
- [62] TAN L H, RAHIM S, NAWABJAN A, et al. A metamaterial-based dual-band frequency selective surface using composite material[C]//2019 6th International Conference on Space Science and Communication (IconSpace). [S. l.]: IEEE, 2019.
- [63] CUI K, SHI D, SUN C, et al. A compact and high-performance shielding enclosure by using metamaterial design[J]. *Applied Computational Electromagnetics Society journal*, 2021, 36(11): 1484-1491.

收稿日期: 2021-06-11; 修订日期: 2021-09-10

通讯作者: 景致(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事隐身材料结构应用研究, 联系地址: 辽宁省沈阳市皇姑区塔湾街40号(110035), E-mail: 344497851@qq.com

(责任编辑: 徐永祥)