

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200921.004

吸波超材料研究进展

吕通*, 张辰威, 刘甲, 马向雨, 宫元勋, 赵宏杰

(航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074)



分享本文

摘 要: 吸波超材料由于其独特的电磁特性, 在过去十几年内成为吸波功能材料领域的研究热点。本文通过对近些年吸波超材料报道的归纳总结, 对吸波超材料的研究进展进行介绍。经过多年来的发展, 吸波超材料从最初的单一功能窄频段吸波特性逐渐向宽频带、宽角度入射、可智能调节等多功能方向发展, 而在吸波频段的研究也由微波频段扩展至太赫兹、近红外、可见光等频段。对不同类型的吸波超材料分别进行介绍, 对于不同特点吸波超材料的制备、设计方法和工作原理进行总结, 最后对吸波超材料的发展方向进行了展望。

关键词: 超材料; 吸波; 智能可调节; 介质超材料; 电磁特性

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)01-0025-11

Research progress in metamaterial absorber

LV Tong*, ZHANG Chenwei, LIU Jia, MA Xiangyu, GONG Yuanxun, ZHAO Hongjie
(Aerospace Institute of Advanced Material & Processing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: Due to the exotic electromagnetic properties, metamaterial absorber has spawned extensive research into wave absorption materials over the past decade. This paper provides an introduction on metamaterial absorber by summarizing the reports in recent years. The metamaterial absorber has progressed significantly with special function from narrow bandwidth to broad bandwidth, wide angle tolerance, polarization independence and smart/tunable absorbance. Meanwhile the working frequency across the electromagnetic spectrum is broadened from microwave to terahertz, near-infrared and optical. This paper introduces different types of metamaterial absorber and summarizes the fabrication, design method and working principle of metamaterial absorber. Finally, the promising research field of metamaterial absorber is predicted.

Keywords: metamaterial; wave absorption; smart tunability; dielectric metamaterial; electromagnetic property

随着科学技术的发展, 吸波材料无论在基础研究, 还是在工程应用领域, 均受到广泛关注, 逐渐成为功能材料的一类重要分支。吸波材料是指能够吸收入射电磁波能量, 并将其转化成热能或其他形式能量而损耗掉的一类材料^[1]。吸波材料已经在许多领域体现出应用价值, 如电磁防护、微波暗室、移动通讯等应用场景下对于吸波材料均有不同程度需求。由于吸波材料可以有效减少雷达回波, 从而降低目标的雷达散射截面积(RCS), 其在军事隐身技术领域具有至关重要的作用^[2]。

传统吸波材料是基于材料本身的电磁特性, 将入射的电磁波有效转换为其他形式的能量, 从

而达到吸收电磁波的目的, 一般由基体材料和吸收剂组成。材料吸收电磁波的能力取决于两个参数, 即介电常数和磁导率。介电常数和磁导率的实部部分分别描述的是一种物质储存电能和磁能的能力。存在电能/磁能的本质是由于材料中存在原子级、分子级或晶格级的电偶极子/磁偶极子^[3]。研究者先后发展了包括导电高聚物^[4]、碳纤维^[5]、铁氧体^[6]、石墨烯^[7]、磁性金属微粉^[8]等多种材料为吸收剂的复合吸波材料。吸波材料的核心设计有两条原则: 一是实现材料表面与自由空间的阻抗匹配, 二是尽可能提高材料的电磁损耗。为满足阻抗匹配, 往往在设计中加入磁性吸波材料

收稿日期: 2020-08-20; 录用日期: 2020-09-13; 网络首发时间: 2020-09-21 15:21:22
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200921.004>
基金项目: 国家自然科学基金(51803203)
通信作者: 吕通, 博士, 工程师, 研究方向为吸波复合材料 E-mail: lv tong.12@163.com

引用格式: 吕通, 张辰威, 刘甲, 等. 吸波超材料研究进展 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(1): 25-35.
LV Tong, ZHANG Chenwei, LIU Jia, et al. Research progress in metamaterial absorber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(1): 25-35(in Chinese).

(如金属微粉等), 使材料密度大大增加。同时为实现宽频带吸收, 常使用多层结构匹配不同频率电磁波, 使材料厚度增加^[9]。传统吸波材料这些缺点难以满足“薄、轻、宽、强”的设计理念, 新型吸波材料亟待研究开发。

随着材料科学的不断发展, 超材料的概念进入研究人员的视野, 与传统材料不同, 超材料的性质由其人工结构决定, 而不由其组成成分决定^[10]。超材料最初的研究兴趣来源于自然界中不存在的奇异电磁特性, 1968 年 Veselago^[11] 提出了具有负介电常数和负磁导率的介质, 当时被定义为“左手材料”, 这是超材料的概念第一次被提出。直到 1999 年, Pendry 等^[12] 提出人工磁体, 打开了负介电参数材料的一扇门, 超材料从此在电磁领域开始突飞猛进的发展。Pendry 等^[12] 提出使用人工制备的亚波长单元结构模拟传统材料中的原子, 用这种单元结构组成周期性材料, 这种由“人造原子”制备出的材料具备等效的介电常数和磁导率, 这些结构单元被叫做“开口谐振环”。除了负折射现象外, 超材料展示出一系列的超常特性, 如隐身斗篷^[13]、完美透镜^[14]、无相差透镜^[15] 等, 其中吸波超材料是超材料众多应用领域中的一个重要分支。

吸波超材料具有许多传统吸波材料无法企及的优势, 如超材料能够在材料厚度方面有很好的控制, 较传统吸波材料厚度薄, 其厚度远小于电磁波波长^[16]。同时, 吸波超材料较传统的电损耗型吸波材料能够提供更丰富的损耗机制, 比传统的磁损耗型吸波材料具有更低的密度。由于以上原因, 吸波超材料已经成为近年来吸波材料的研究热点^[17]。

1 窄频吸波超材料

吸波材料设计原则之一是实现阻抗匹配, 而传统吸波材料的电磁特性由组成材料的微观粒子(如原子、离子、分子)的特性决定。通过调节这些粒子的电磁特性来实现阻抗匹配显然是困难的。较传统吸波材料, 吸波超材料的组成单元是“人工原子”, 调节这些“人工原子”的电磁特性来实现阻抗匹配要容易得多, 同时组成超材料的“人工原子”本身是良好的吸收剂, 使吸波超材料在特定频率下可以实现接近 100% 的吸收率。吸波超材料在 2008 年被首次报道, Landy 等^[18] 使用两层金属层和一层绝缘层组成的三明治结构超

材料实现了对微波波段电磁波的吸收。材料的顶层由周期性电谐振环排列组成, 通过入射电场的共振效应在某固定频率上产生强烈耦合而引发电响应 ϵ_{eff} , 顶层结构如图 1(a) 所示, 底层的金属层为切断的平行金属线, 如图 1(b) 所示, 两层之间由绝缘层分开, 如图 1(c) 所示。电谐振环和底层金属板内的反向平行电流产生磁响应 μ_{eff} 。通过模拟计算, 超材料在 11.48 GHz 频点具有 99% 的吸收率, 但通过实验测试吸收率仅为 88%, 研究者认为模拟结果和测试结果之间的差异主要来源于制造误差。另外, 研究者对吸波超材料的损耗机制也进行了研究, 发现吸波超材料的绝缘层损耗远远超过欧姆损耗, 模拟结果显示绝缘层的损耗超过欧姆损耗数个数量级^[19]。

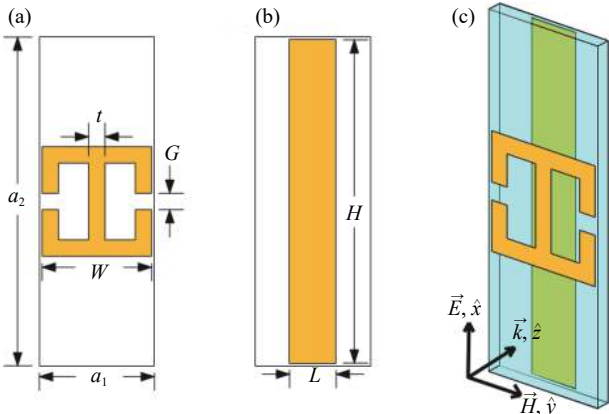


图 1 三明治结构吸波超材料^[18]: (a) 顶层超材料层; (b) 底层金属线; (c) 结构单元透视图

Fig. 1 Metamaterial absorber with sandwich structure^[18]: (a) Top metamaterial layer; (b) Cut wire; (c) A perspective view of unit cell

在最初的微波频段窄频吸波超材料被报道后, 在其他频段工作的吸波超材料也很快出现相关报道。Tao 等^[20] 利用相同的电谐振环结构单元和平行金属线结构制备了太赫兹吸波超材料, 超材料中间绝缘层为聚酰亚胺。材料设计与之前的微波吸波超材料实验设计几乎是相同的, 通过电谐振环和平行金属线与入射电场进行强耦合, 而磁响应通过电谐振环和平行金属线反向的电流耦合作用获得。模拟结果显示, 在 1.12 THz 处吸波超材料的吸收率为 98%, 而实验结果则是在 1.3 THz 处的吸收率为 70%。Liu 等^[21] 使用更低尺寸的超材料单元结构对中红外频段吸波超材料进行研究, 在 6 μm 波长处实现了 97% 的吸收率。吸波超材料采用十字形状的结构单元设计, 使用绝缘层将

基底与超材料结构分开。中红外吸波超材料的损耗大部分发生在绝缘层, 与之前微波吸波超材料的研究结果相吻合。

2 双频、多频和宽频吸波超材料

由于早期吸波超材料单元结构较为简单, 而单一结构单元吸波超材料存在窄带吸波的特点。在许多实际应用场景 (如光电探测、热光伏电池及军事隐身等领域) 更需要具有宽频带吸收的吸波材料, 因此研究者把目光转向双频、多频和宽频的吸波超材料的研究。Wen 等^[22] 通过超材料结构单元设计, 制备了在太赫兹频段内的双频吸波超材料。该吸波超材料采用三层结构, 表面为超材料结构层, 中间为绝缘层, 底层为金属薄板。吸波超材料具有两种不同的开口结构, 因此吸波超材料在两个不同频率下分别显示出两种独立的 LC 共振 (如图 2(a) 所示)。吸波超材料在 0.45 THz 和 0.92 THz 处有明显吸收峰, 吸收率分别为 80.8% 和 63.4%(如图 2(b) 所示)。Shen 等^[23] 设计出一种具有三个特征频率吸波特性的太赫兹吸波超材料, 实验结果表明, 在 0.5 THz、1.03 THz 和 1.71 THz 处的吸收率分别为 96.4%、96.3% 和 96.7%。并采用多重干涉理论对超材料的吸波机制进行了分析, 理论模型模拟结果与实验结果吻合, 该研究对于多频吸波超材料的设计提供了可行方案。Wang 等^[24] 设计出一种吸波超材料, 采用平面内周期性图案的三层超材料结构, 在微波频段内实现四个特征频率的高效吸波特性, 认为同样的设计理念对于其他波段的吸波材料也同样适用。Cen 等^[25] 设计出一种石墨烯开口谐振环吸波超材料, 通过模拟计算结果可知, 吸波超材料在 3.56 THz、10.38 THz 和 12.96 THz 处的吸收率分别为 99.57%、99.98% 和 99.76%。同时还考察了吸波超材料的传感性能, 材料在高频波段的传感性能优于低频波段。该吸波超材料在生化传感、光学转换等领域具有潜在应用价值。

虽然通过平面内超材料结构单元的设计可以有效实现吸波材料的宽带吸收, 但由于平面内空间结构的限制, 在多个吸收峰之间的频率部分吸收率并不高, 也限制了吸波超材料的应用。为实现连续频段的宽带吸收, 研究者发现在面外垂直方向的结构单元设计可以有效拓宽吸波超材料的吸波带宽。Wen 等^[26] 设计了一种多层吸波超材料结构, 实现了在微波频段的宽频吸波。吸波超材

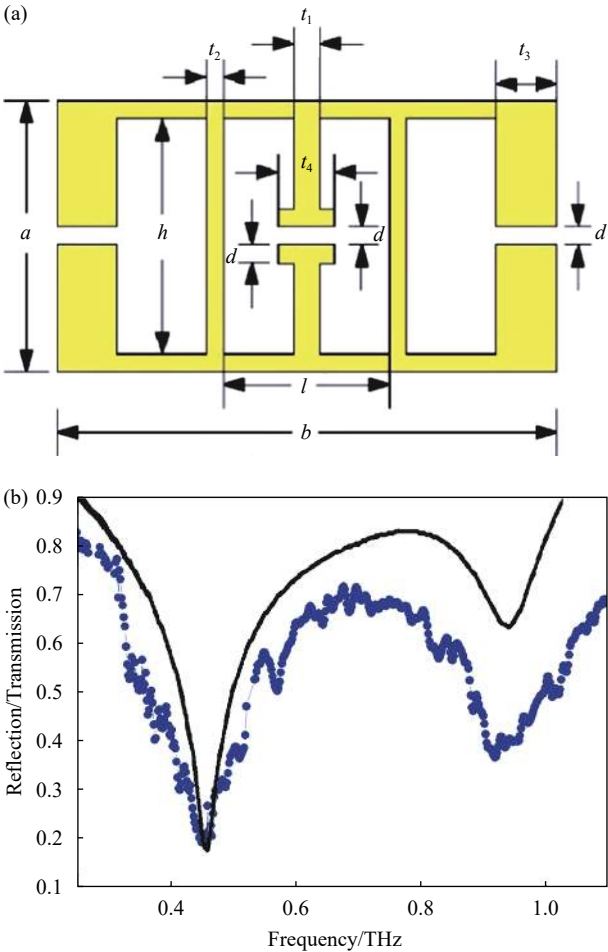


图2 双频太赫兹吸波超材料^[22]: (a) 吸波超材料结构单元; (b) 吸波超材料模拟透射率 (光滑线) 和测试反射率 (虚线)

Fig. 2 Dual-band terahertz metamaterial absorber^[22]: (a) Unit cell of metamaterial absorber; (b) Simulated transmission curve of absorber (smooth line) and measured reflection curve of absorber (dotted line)

料的结构单元由三层双频吸波次级结构单元组成, 由于次级结构单元可以产生两个谐振频点, 三层次级单元的堆叠形成了宽频吸波带。次级超材料结构由分别刻蚀在损耗层上的环形和圆形结构单元组成, 不同的结构半径对应不同的谐振频率。次级单元之间的空气层形成了磁响应, 同时避免了次级结构之间的耦合效应。该吸波超材料在 8.8~10.8 GHz 频段的吸收率超过 80%, 吸收峰的半高宽达 2.3 GHz。Cui 等^[27] 采用多层金属片结构制备了宽带红外吸波超材料。超材料由不同宽度的金属片层和绝缘层交替堆积, 形成具有三维锯齿结构的吸波超材料, 高频红外波由顶层超材料吸收, 而低频红外波由底层超材料吸收。锯齿结构吸波超材料在 3~5.5 μm 波长频段的吸收率为 95%, 材料有望在光伏器件及热辐射器等领域进行应用。Ding 等^[28] 采用金属层和绝缘层交替结构构筑金字

塔单元结构宽频吸波超材料,超材料金字塔形结构单元由四边形金属和绝缘层堆叠而成,组成金字塔结构不同尺寸的四边形超材料结构对应不同响应频率,累加后得到宽频吸波带。该吸波超材料在 7.8~14.7 GHz 频段的吸收率为 90%,实验结果与模拟结果一致。

3 极化不敏感吸波超材料

由于初期的吸波超材料单元结构存在各项异性,因此吸波超材料在谐振频率上产生的感应电磁场方向性较强,如对于金属线形超材料,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。导致初期设计的吸波超材料对于极化方向较为敏感,在某些应用领域受到限制,因此许多研究者开始致力于开发极化不敏感吸波超材料。Bo 等^[29]将超材料结构单元按照四次折叠的方法排布,每四个结构单元均是中心对称的,如图 3(a)所示。通过模拟计算结果可知,吸波超材料在 9.5 GHz 不同极化条件下均具有近乎完全的吸收特性,图 3(b)和图 3(c)分别为两个不同极化条件下超材料的吸波性能,可以看出,按照此方式排布的吸波超材料具备极化不敏感特性,在不同的极化条件下,特征频率下的吸收率可达 92%。Aydin 等^[30]采用超薄的交叉梯形金属结构制备了极化不敏感的吸波超材料,吸波超材料由金属-绝缘体-金属的纳米微结构堆叠而成,在可见光波段的吸收率达 85% 以上。Ji 等^[31]采用同心的方形和圆形金属结构组成超材料结构单元,制备出极化不敏感的吸波超材料。模拟结果显示,吸波超材料在 3.70 GHz、6.57 GHz 和 17.62 GHz 处的吸收率分别为 99.67%、99.05% 和 99.98%,吸波超材料在不同极化条件下,吸波频率及吸收率均未发生改变,说明材料具备良好的极化不敏感特性。

4 宽角度入射吸波超材料

吸波材料在使用过程中,电磁波的入射方向往往不是沿材料法线方向,因此需要吸波材料具有良好的宽角度入射吸波性能。而吸波超材料大多采用金属-绝缘体-金属三层结构,随着入射角的增加,平行磁场分量接近 0,在超材料中难以引发反向平行电流,导致磁通量下降。Tao 等^[32]发现对称结构的吸波超材料结构单元具有较宽的入射角不敏感特性,利用三维对称回转体超材料结构解决了吸波超材料宽角度入射问题。采用多层金属-绝缘体结构构筑圆锥结构单元吸波超材

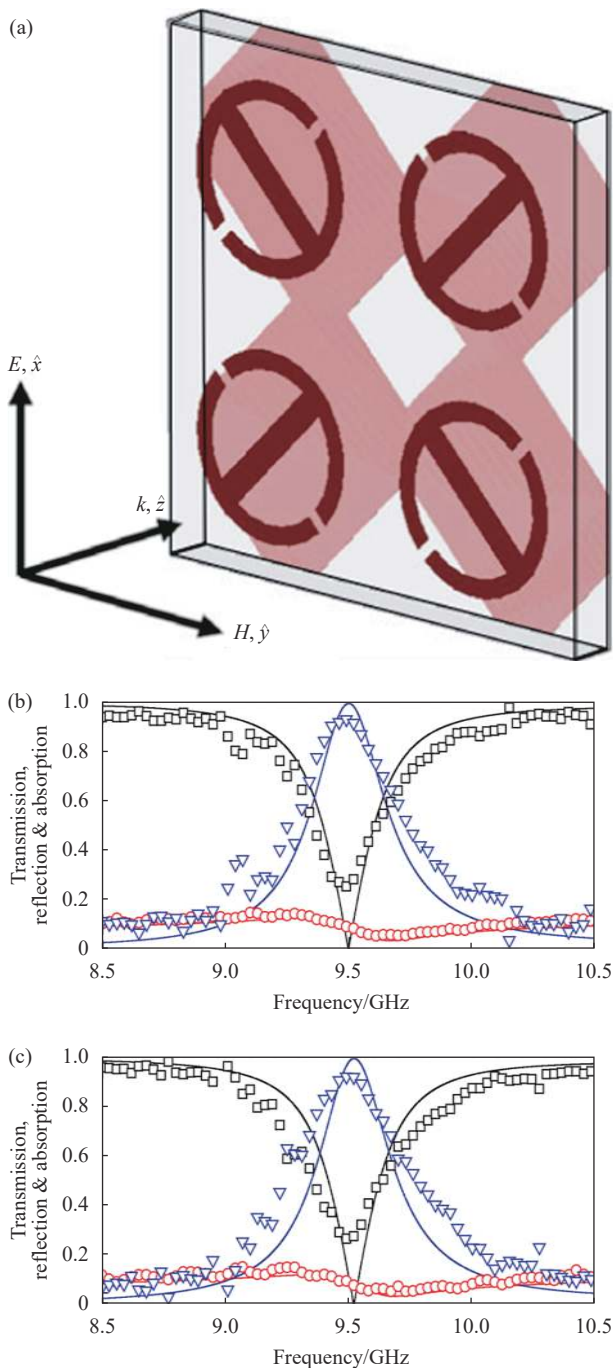


图3 极化不敏感吸波超材料^[29]: (a) 极化不敏感结构单元; (b) 电场沿 x 轴方向入射吸波性能; (c) 在 xy 平面内旋转 45° 极化方向入射吸波性能 (在图 (b) 和图 (c) 中, 实线为模拟值, 圆点标记为透射率, 方块标记为反射率, 三角标记为吸收率)

Fig. 3 Metamaterial absorber with polarization insensitivity^[29]: (a) Unit cell of metamaterial absorber with polarization insensitivity; (b) Wave absorption performance for polarization of electric component along x axis; (c) Wave absorption performance for polarization rotated 45° in xy plane (In fig. (b) and fig. (c), the solid lines is simulated line, the transmission is marked by circle, the reflection is marked by square and absorption is marked by triangle)

料(如图 4(b)所示)。通过在不同入射角下的测试

发现,材料表现出良好的宽角度入射及极化不敏感特性(如图 4(a) 所示),可以看出,对称结构对于宽角度入射及极化不敏感吸波特性的均具有重要意义。Hoa 等^[33]通过结构单元设计,实现了吸波超材料在太赫兹频段的宽角度吸收。模拟结果表明,在平行磁场(TM)极化方式入射,当入射角小于 80°时,吸收率可保持 99%;在平行电场(TE)极化方式入射,入射角小于 50°时,吸收率可保持 90%以上。Shi 等^[34]在微波频段下制备了宽频带、大角度入射及极化不敏感的吸波超材料。吸波超材料由周期性带有集总电阻的结构单元构成,采用金属和绝缘体交替的三层结构,超材料结构单元具有对称特征,吸波超材料具有低厚度和极化不敏感的特点。由表面电流分布可知,超材料响应来源于偶极子响应和 LC 响应,多种响应模式实

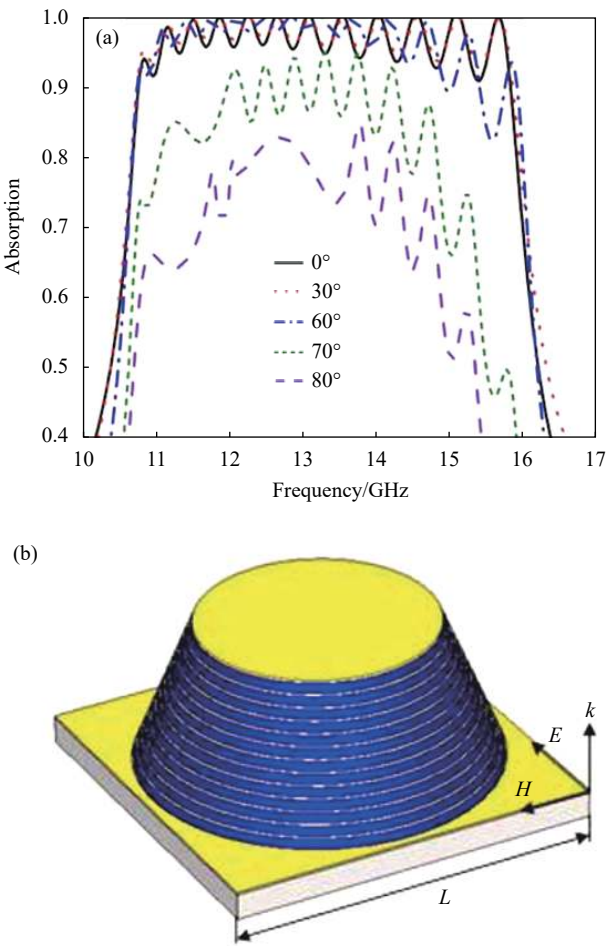


图 4 具有宽角度入射吸收特性吸波超材料^[32]: (a) 不同入射角度下吸波超材料吸收率; (b) 3D 回转体结构单元

Fig. 4 Metamaterial absorber with incident angle insensitivity^[32]: (a) Wave absorptions of different incident angle; (b) Unit cell of 3D rotational symmetrical structure

现了较宽的吸收频段。通过模拟和试验结果可知,在 6~16.2 GHz 频段下垂直入射吸收率可达 80% 以上,小于 45°斜入射条件下,材料吸收率可达 60%。

5 智能可调节吸波超材料

目前吸波超材料在宽频段、宽角度入射、极化不敏感等方面已取得相关研究成果,同时从微波频段至可见光频段范围内的各频段吸波超材料均有大量文献研究报道,也取得了巨大的进展。但随着人们对吸波材料的需求逐渐增高,这种静态吸波超材料已经不能满足要求,对于动态智能可调谐吸波超材料的开发需求迫切。上述介绍的吸波超材料由于其单元结构在制备过程中已固定,因此材料电性能不可改变,只能实现固定频段的电磁波吸收。而在实际吸波材料的使用中,往往需要对不同频段进行电磁波吸收,如目标飞行器使用吸波材料进行隐身,在不同应用场合下需要对不同波段雷达波进行兼容^[35]。另外,可调谐吸波超材料在太赫兹成像^[36]、无线电系统和智能雷达系统^[37]等方面也具有巨大应用潜力。目前关于可调谐吸波超材料已出现许多相关报道。

对于可调谐吸波超材料的研究主要通过两种方法实现,一种是通过有效调节谐振单元或基底的电磁特性,另一种是通过调节超材料结构单元的重组^[38]。由于超材料的吸波机制是通过共振结构单元产生的电容和电感进行谐振吸收,因此可以通过在超材料结构单元中加载变容二极管来实现对超材料电容的智能调节,从而实现吸波性能的智能调节。Xu 等^[39]制备了一种超薄宽带频选吸波材料(如图 5(a) 所示),其中加载了电阻和可变电容,实现了吸波超材料的可控调节,在偏压为 10~48 V 的范围内,实现了 0.7~1.9 GHz 低于 -10 dB 的反射率吸波频率转换,可调谐反射率测试结果如图 5(b) 所示。Zhu 等^[40]采用二极管与吸波超材料结构单元进行结构耦合,通过改变加载二极管之间的电压,超材料可以在吸波体与反射体之间进行智能切换。Yang 等^[41]和 Huang 等^[42]分别采用 PIN 二极管集成超材料,实现了对电磁波的动态调控。除采用可变电容调节超材料的吸波性能外,还可以通过材料电磁特性的特殊响应性实现可控调节,如 Pang 等^[43]利用水的电磁温度响应性实现了吸波超材料的可控调节。Yao 等^[44]采用不同电压加载石墨烯材料,改变超材料的临界耦合条件,从而实现吸波频率的调控。Li 等^[45]采用形状

记忆高分子材料对超材料基底电阻进行调控, 实现了在温度响应条件下, 吸波超材料吸波频率在 10~17 GHz 范围内的可逆调节。

除对于材料电磁性能的动态调节外, 超材料的性能还与其结构单元的几何尺寸有关, 如果能够通过动态调控结构单元几何尺寸, 就可以对其电磁性能进行调控, 从而实现吸波性能的调控。近些年对于超材料几何结构的调控也迅速发展。Hu 等^[46] 基于微机电系统 (MEMS) 驱动和电偶极子共振器阵列实现了对太赫兹吸波超材料的动态调控, 静电力可以对超材料结构单元的结构进行调控, 从而实现吸波频率和振幅的动态调节。Zhang 等^[47] 采用外力对柔性吸波超材料进行拉伸驱动, 超材料结构拉伸示意图如图 6(a) 所示。在横向外力作用下, 吸波超材料结构单元之间的间

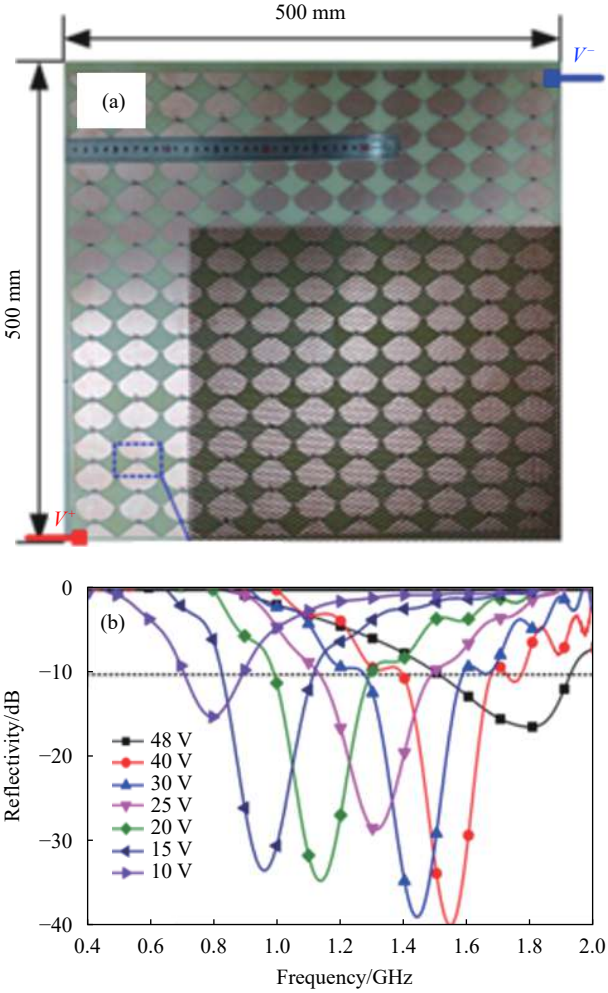


图 5 动态频选表面吸波超材料^[39]: (a) 500 mm×500 mm 实物图; (b) 可调谐反射率测试结果

Fig. 5 Active frequency selective surface absorber^[39]: (a) Photo of 500 mm×500 mm sample; (b) Measured reflectivity of broadband tunable active frequency selective surface absorber

距发生变化, 导致吸波频率的改变, 从而实现通过外力对吸波超材料吸波频率的动态调节, 实验结果如图 6(b) 所示。Yang 等^[48] 采用柔性基底材料制备吸波超材料“皮肤”, 通过对材料的拉伸改变超材料结构单元之间的距离, 从而实现吸收频率的改变。Wang 等^[49] 制备了一种结构单元可移动的吸波超材料, 通过机械力可以改变可活动的结构单元与固定结构单元之间的位置, 从而实现吸波频率的可逆调节。

虽然一些可调节超材料的研究工作没有特指

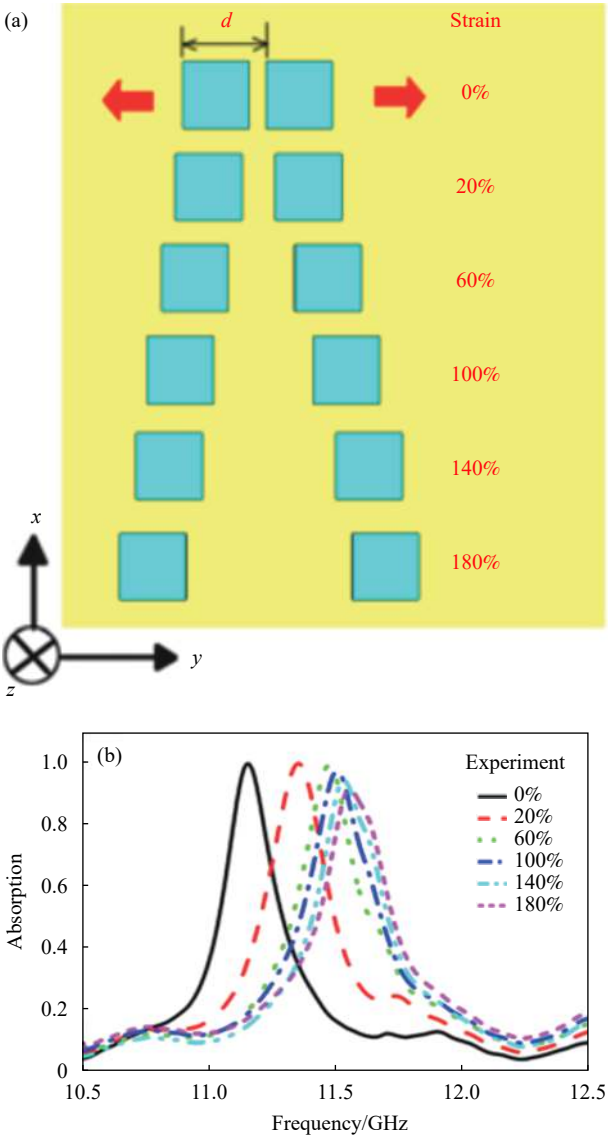


图 6 机械力加载可调节吸波超材料: (a) 超材料结构拉伸示意图; (b) 吸收率变化实验结果^[47]

Fig. 6 Mechanically stretchable tunable metamaterial absorber^[47]: (a) Schematic of stretchable metamaterial absorber; (b) Experimental absorption of metamaterial absorber in different strain

在吸波方面的应用，但这些对超材料结构调控机制和设计思想是相同的^[50]。Zhu 等^[51]采用微机械技术控制磁性超材料结构单元的形状重构，超材料的单元结构可以在“□”、“[]”、“I”三种形状之间进行切换，实现了超材料磁响应的转换，示意图如图 7(a) 所示。Ou 等^[52]利用材料的热膨胀效应制备了具有温度响应的可重构超材料，随着温度的改变，结构单元产生变形，超材料谐振响应发生可逆变化，图 7(b) 为超材料结构单元扫描电镜图像及温度调控示意图。折纸艺术是中国古老的传统民间艺术，Wang 等^[53]受到折纸艺术的启发，制备出折纸基超材料，通过改变 Miura-ori 开口谐振环的基底折纸状态，实现了超材料电磁响应的动态调控，示意图如图 7(c) 所示。Bilal 等^[54]制备出可重复设计的光子超材料，利用磁场可以控制超材料结构单元的结构构型，实现对于波传播的动态可逆调控，图 7(d) 为超材料微结构调控前后表面照片。这些对于超材料结构单元的调控思想均可借鉴到吸波超材料的设计和制备中，吸波超材料的智能化是重要的研究方向，会有更多的相关研究出现。

6 介质吸波超材料

随着超材料领域学科不断的发展，超材料的概念早已突破了由金属结构单元组成的定义范围，

一般由人工结构单元设计而成、具有原材料所不具备特殊性能的材料均涵盖于超材料范围内。近年来，吸波超材料的研究者们开始将传统吸波材料与超材料结构相结合，制备出“介质吸波超材料”，而介质吸波超材料在原金属吸波超材料的基础上显示出更多的优异特性^[55]。介质吸波超材料具有传统吸波材料吸收频段相对较宽及制备简单等优点，与传统吸波材料相比，又具备超材料的结构特性，将传统吸波材料的性能进一步丰富并提高。与人类相比，生物体在几百万年前就已经开始运用微结构构建特殊功能。飞蛾使用六边形凸起结构来减小其复眼的反射。飞蛾复眼由多个微凸起结构在其外表面组成，这些凸起一般具有小于 300 nm 的高度和间距。这些亚波长的凸起阵列产生了折射率等级的转变，导致其在较宽波长和入射角的范围内实现了反射的最小化。Min 等^[56]受到飞蛾复眼减反射现象的启发，模仿飞蛾的复眼结构，通过离子刻蚀的方法在硅板基底构筑纳米级超结构阵列，如图 8(a) 所示。结果表明，经过表面微观结构构筑的硅板在整个可见光波段的反射率由 30% 降低至 2.5% 以下，测试结果如图 8(b) 所示。同时，研究者还制备了表面具有超结构的玻璃基底，玻璃基底使用溶胶-凝胶法在表面具有微结构的转印模板中聚合，较平整的玻璃

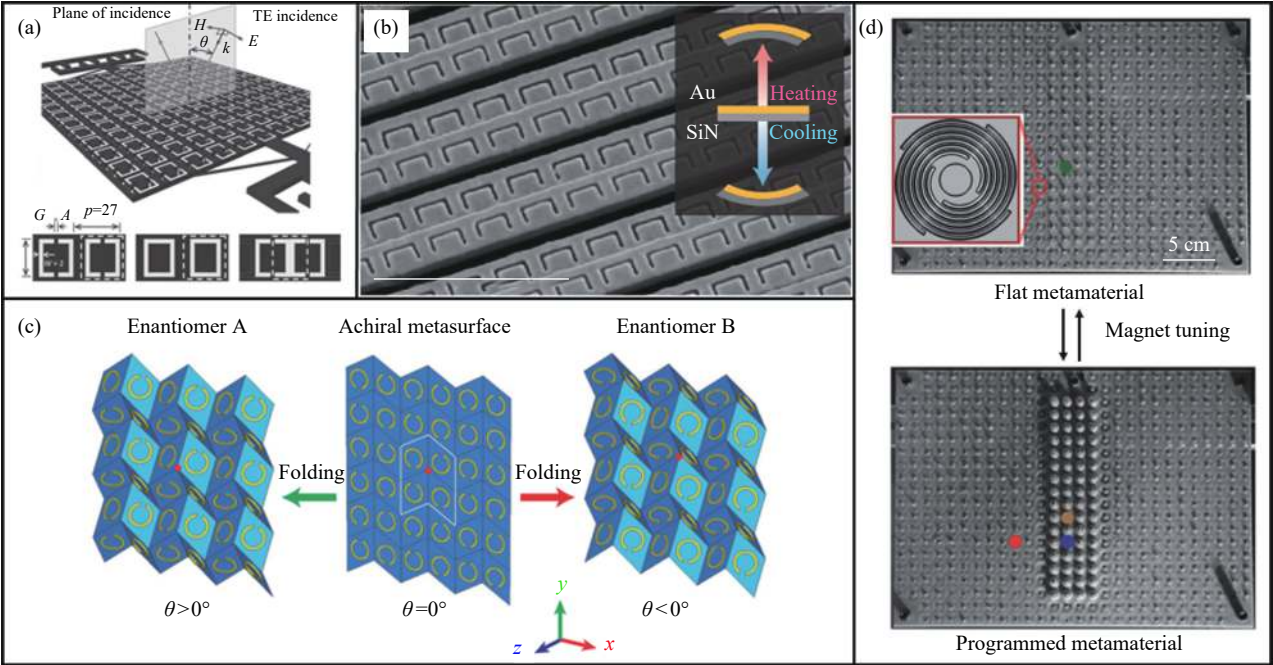


图 7 超材料结构单元动态调控研究

Fig. 7 Study on dynamic tunable metamaterial structures

基底，经过微结构构筑的玻璃基底的反射率由4%降低至0.5%。无论硅板还是玻璃表面均显示出良好的超疏水自清洁特性，这项技术在光学器件方面将具有重要作用。Li等^[57]采用TiN构筑三层吸波超材料，吸波超材料结合了TiN在光学波段的高损耗及超材料的吸波特性，材料在400~800 nm可见光频段展示出宽角度入射、宽频吸收及极化不敏感等特性，更重要的是，由于TiN的高熔点，材料具有耐高温特性。吸波超材料在800℃加热8 h的条件下仍然保持了结构特征及光学特性。

除可见光波段外，研究者们同样意识到在微波波段超结构对于介质吸波材料的重要性。Chen

等^[58]以与碳材料共混的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)线材作为原料，采用3D打印的方法构筑金字塔形吸波超材料阵列。吸波超材料在5.3~18 GHz频率范围内达到超过90%的吸收率，同时展示出宽角度入射特性。郭建勇等^[59]利用熔融沉积3D打印方法，制备出由聚乳酸结构空腔和蒸馏水复合组成的吸波超材料，超材料在8.2~30 GHz范围内展示出90%以上的吸收率，同时超结构具有极化不敏感和宽角度入射等优异特性。Assimonis等^[60]采用对称结构单元设计了一种吸波超材料，超材料结构单元采用四个开口谐振环按照中心旋转90°的排布方式组成，分别研究了金属结构单元和电阻结构单元的吸波性能，结果显示，电阻结构单元组成的介质吸波超材料具有更宽的吸波带宽，吸波超材料在平面和曲面表面均实现了较好的吸波特性。Shen等^[61]设计出一种3D吸波超材料，超材料由竖立的电阻膜方筒阵列组成，材料具有宽带、轻质和极化独立等特性，在3.9~26.2 GHz范围内实现了90%以上的吸收率。侯志灵等^[62-63]对复合介质吸波超材料的吸波机制进行了详细研究，通过对复合吸波超材料的电磁场分布分析发现，复合吸波材料表面的结构单元可以增加材料的谐振频率，从而实现多频点谐振，同时吸波复合材料表面的结构还能对高频电磁波提供边界散射效应，从而降低材料反射率。另外，Zhang等^[64]还将介质吸波超材料与频选表面相结合，进一步提高了介质吸波超材料的吸波性能。介质吸波超材料结合了传统吸波材料和超材料的优点，发挥出更加优异的特性，超结构对于传统吸波材料的影响和作用将会得到更深入的研究。

7 未来发展方向

今后吸波材料的研究将会围绕解决如何使吸波材料具备“宽、薄、轻、强”等特性问题，同时兼具高温使用、极化不敏感等特性。吸波超材料给予了吸波材料一种全新吸波机制，受到广泛关注。吸波超材料的出现不仅提供了吸波机制的基础研究平台，同时在技术应用领域也发挥了重要作用，在选择热发射器、检测传感器、自动雷达、局域无线网等方面均报道了雏形级别的应用。另外，在雷达传感器、光子回路、光谱学成像和微波-红外信号控制等方面具有潜在应用价值。在今后的研究工作中，这些应用领域将会不断深入，

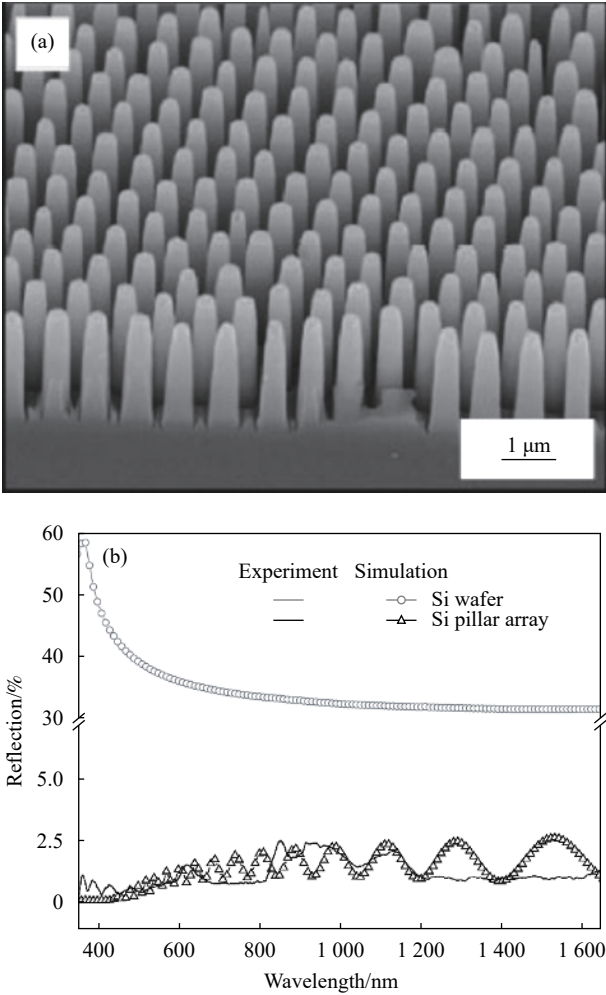


图8 仿生减反射吸波超材料^[56]: (a) 硅阵列扫描电镜图; (b) 平面硅板和表面带有微结构硅板的垂直入射反射率

Fig. 8 Bioinspired antireflection metamaterial absorber^[56]: (a) SEM image of silicon pillar arrays; (b) Reflection at normal incidence from a flat silicon wafer and silicon pillar array

从而提高技术的实用性和成熟度。

吸波超材料的一个重要的研究方向是可调节性,这一特点是传统吸波材料较难具备的特点,因此在此领域将会产生更多的研究报道,如通过外部环境刺激来对吸波超材料实现性能的动态调控。动态可调节吸波超材料可能在光成像、热发射装置领域中具有应用价值,同时对于军事伪装和隐身技术具有重要作用。通过红外波段可调节的吸波超材料可以实现红外线选择性的热发射,实现红外伪装。而通过外部环境刺激对微波吸波超材料进行吸波性能的动态调控则有可能实现对雷达波的自适应隐身,是军事智能隐身领域的重要发展方向。在过去的几年中,吸波超材料已经实现了飞速发展,相信在吸波性能提高、智能特性提升及吸波频段扩大几个方面会是吸波超材料的重要发展方向。

参考文献:

[1] HUO J, WANG L, YU H. Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption[J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(15): 3917-3927.

[2] 邓龙江, 周佩珩, 陆海鹏, 等. 多频谱隐身涂层材料研究进展[J]. *中国材料进展*, 2013, 32(8): 449-462.

DENG L J, ZHOU P H, LU H P, et al. Research progress in multispectral stealth coating material[J]. *Materials China*, 2013, 32(8): 449-462(in Chinese).

[3] 王亚林, 李悦霖. 隐身飞机雷达吸波材料背后的“魔法”[J]. *国际航空*, 2017(3): 73-77.

WANG Y L, LI Y L. The magic of stealth materials[J]. *International Aviation*, 2017(3): 73-77(in Chinese).

[4] LI X, YU L, ZHAO W, et al. Prism-shaped hollow carbon decorated with polyaniline for microwave absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 379: 122393.

[5] YANG M, YUAN Y, LI Y, et al. Dramatically enhanced electromagnetic wave absorption of hierarchical CNT/Co/C fiber derived from cotton and metal-organic-framework[J]. *Carbon*, 2020, 161: 517-527.

[6] LEI Y, YAO Z, LI S, et al. Broadband high-performance electromagnetic wave absorption of Co-doped NiZn ferrite/polyaniline on MXenes[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(8): 10006-10015.

[7] HUANG Z, CHEN H, HUANG Y, et al. Ultra-broadband wide-angle terahertz absorption properties of 3D graphene foam[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(2): 1704363.

[8] WANG L, QUAN Q, ZHANG L, et al. Microwave absorption of NdFe magnetic powders tuned with impedance mat-

ching[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, 449: 385-389.

[9] MICHELI D, APOLLO C, PASTORE R, et al. X-Band microwave characterization of carbon-based nanocomposite material, absorption capability comparison and RAS design simulation[J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(2): 400-409.

[10] CUI T J, SMITH D R, LIU R. *Metamaterials*[M]. New York: Springer, 2014.

[11] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10(4): 509-514.

[12] 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(10): 2075-2084.

[13] SCHURIG D, MOCK J, JUSTICE B, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.

[14] FANG N, LEE H, SUN C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.

[15] SCHURIG D, SMITH D R. Negative index lens aberrations[J]. *Physical Review E*, 2004, 70(6): 065601.

[16] ENGHETA N. Thin absorbing screens using metamaterial surfaces[C]//*IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. San Antonio: IEEE, 2002.

[17] WATTS C M, LIU X, PADILLA W J. Metamaterial electromagnetic wave absorbers[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(23): 98-120.

[18] LANDY N I, SAJUJIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.

[19] HU C, LI X, FENG Q, et al. Investigation on the role of the dielectric loss in metamaterial absorber[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6598-6603.

[20] TAO H, LANDY N I, BINGHAM C M, et al. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization[J]. *Optics express*, 2008, 16(10): 7181-7188.

[21] LIU X, STARR T, STARR A F, et al. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(20): 207403.

[22] WEN Q Y, ZHANG H W, XIE Y S, et al. Dual band terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(24): 241111.

[23] SHEN X, YANG Y, ZANG Y, et al. Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical

- interpretation[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(15): 154102.
- [24] WANG N, TONG J, ZHOU W, et al. Novel quadruple-band microwave metamaterial absorber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1-6.
- [25] CEN C, YI Z, ZHANG G, et al. Theoretical design of a triple-band perfect metamaterial absorber in the THz frequency range[J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102463.
- [26] WEN D E, YANG H, YE Q, et al. Broadband metamaterial absorber based on a multi-layer structure[J]. *Physica Scripta*, 2013, 88(1): 015402.
- [27] CUI Y, FUNG K H, XU J, et al. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1443-1447.
- [28] DING F, CUI Y, GE X, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(10): 103506.
- [29] BO Z, ZHENG B W, ZHEN Z Y, et al. Planar metamaterial microwave absorber for all wave polarizations[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(10): 114102.
- [30] AYDIN K, FERRY V E, BRIGGS R M, et al. Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers[J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 517.
- [31] JI S, JIANG C, ZHAO J, et al. Design of a polarization-insensitive triple-band metamaterial absorber[J]. *Optics Communications*, 2019, 432: 65-70.
- [32] TAO H, BINGHAM C M, STRIKWERDA A C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization[J]. *Physical Review B*, 2008, 78(24): 241103.
- [33] HOA N, LAM P H, TUNG P D. Wide-angle and polarization-independent broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(5): 1157-1161.
- [34] SHI Y, LI Y C, HAO T, et al. A design of ultra-broadband metamaterial absorber[J]. *Waves in Random and Complex Media*, 2016, 27(2): 381-391.
- [35] 张亚坤, 曾凡, 戴全辉, 等. 雷达隐身技术智能化发展现状与趋势[J]. *战术导弹技术*, 2019(1): 56-63.
- ZHANG Y K, ZENG F, DAI Q H, et al. Development status and trend of intelligent radar stealth technology[J]. *Tactical Missile Technology*, 2019(1): 56-63(in Chinese).
- [36] CHAN W L, CHEN H T, TAYLOR A J, et al. A spatial light modulator for terahertz beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(21): 213511.
- [37] YUAN H, ZHU B O, FENG Y. A frequency and bandwidth tunable metamaterial absorber in x-band[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(17): 173103.
- [38] LIU A Q, ZHU W M, TSAI D P, et al. Micromachined tunable metamaterials: A review[J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(11): 114009.
- [39] XU W, HE Y, KONG P, et al. An ultra-thin broadband active frequency selective surface absorber for ultrahigh-frequency applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(18): 184903.
- [40] ZHU B, FENG Y, ZHAO J, et al. Polarization modulation by tunable electromagnetic metamaterial reflector/absorber[J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 23196-23203.
- [41] YANG H, CAO X, YANG F, et al. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35692.
- [42] HUANG C, ZHANG C, YANG J, et al. Reconfigurable metasurface for multifunctional control of electromagnetic waves[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(22): 1700485.
- [43] PANG Y, WANG J, CHENG Q, et al. Thermally tunable water-substrate broadband metamaterial absorbers[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(10): 104103.
- [44] YAO Y, SHANKAR R, KATS M A, et al. Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(11): 6526-6532.
- [45] LI W, ZHAO L, DAI Z, et al. A temperature-activated nanocomposite metamaterial absorber with a wide tunability[J]. *Nano Research*, 2018, 11(7): 3931-3942.
- [46] HU F, XU N, WANG W, et al. A dynamically tunable terahertz metamaterial absorber based on an electrostatic MEMS actuator and electrical dipole resonator array[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, 26(2): 025006.
- [47] ZHANG F, FENG S, QIU K, et al. Mechanically stretchable and tunable metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(9): 091907.
- [48] YANG S, LIU P, YANG M, et al. From flexible and stretchable meta-atom to metamaterial: A wearable microwave meta-skin with tunable frequency selective and cloaking effects[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21921.
- [49] WANG B X, WANG L L, WANG G Z, et al. Frequency continuous tunable terahertz metamaterial absorber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(6): 1183-1189.
- [50] ZHELUDEV N I, PLUM E. Reconfigurable nanomechanical photonic metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(1): 16-22.
- [51] ZHU W M, LIU A Q, ZHANG X M, et al. Switchable magnetic metamaterials using micromachining processes[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(15): 1792-1796.
- [52] OU J Y, PLUM E, JIANG L, et al. Reconfigurable photonic

metamaterials[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(5): 2142-2144.

[53] WANG Z, JING L, YAO K, et al. Origami-based reconfigurable metamaterials for tunable chirality[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(27): 1700412.

[54] BILAL O R, FOEHR A, DARAIO C. Reprogrammable phononic metasurfaces[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(39): 1700628.

[55] 周济. 超材料与自然材料融合的若干思考[J]. *新材料产业*, 2014(9): 5-8.
ZHOU J. Some thoughts on the merging of metamaterials and natural materials[J]. *Advanced Materials Industry*, 2014(9): 5-8(in Chinese).

[56] MIN W L, JIANG B, JIANG P. Bioinspired self-cleaning anti-reflection coatings[J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(20): 3914-3918.

[57] LI W, GULER U, KINSEY N, et al. Refractory plasmonics with titanium nitride: Broadband metamaterial absorber[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(47): 7959-7965.

[58] CHEN X, WU Z, ZHANG Z, et al. Ultra-broadband and wide-angle absorption based on 3D-printed pyramid[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 105972.

[59] 郭建勇, 梁庆宣, 江子杰, 等. 一种熔融沉积3D打印的高性能超材料吸波结构[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(23): 226-232.
GUO J Y, LIANG Q X, JIANG Z J, et al. A high-performance metamaterials absorbing structures based on fused deposition modeling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(23): 226-232(in Chinese).

[60] ASSIMONIS S D, FUSCO V. Polarization insensitive, wide-angle, ultra-wideband, flexible, resistively loaded, electromagnetic metamaterial absorber using conventional inkjet-printing technology[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 12334.

[61] SHEN Y, PEI Z, PANG Y, et al. An extremely wideband and lightweight metamaterial absorber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(22): 224503.

[62] 侯志灵, 王殿杰, 何鹏, 等. Fe₃O₄纳米纺锤体复合材料的制备及其高性能微波吸收[J]. *科学通报*, 2018, 63(34): 3667-3676.
HOU Z L, WANG D J, HE P, et al. Preparation of Fe₃O₄ nanospindle composites and high performance microwave absorption[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(34): 3667-3676(in Chinese).

[63] ZHANG K L, ZHANG J Y, HOU Z L, et al. Multifunctional broadband microwave absorption of flexible graphene composites[J]. *Carbon*, 2018, 141: 608-617.

[64] ZHANG K L, HOU Z L, BI S, et al. Modeling for multi-resonant behavior of broadband metamaterial absorber with geometrical substrate[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(12): 127802.