

基于不同材料体系的吸波超材料研究进展

王文豪, 王 龙, 汪刘应, 刘 颀, 葛超群, 许可俊, 王伟超, 胡灵杰

(火箭军工程大学 智剑实验室, 陕西 西安 710025)

摘 要: 吸波材料在国防和民生领域发挥着至关重要的作用, 但是传统吸波材料因质量大、频带窄已难以满足日益复杂的电磁环境。融合了结构设计思路的吸波超材料以“薄、轻、宽、强”和动态可调、极化角度不敏感等突出优势, 助推了电磁吸波领域的飞速发展。本文首先阐明了超材料吸波的原理和方法, 明确几何结构设计对电磁吸波性能的重要影响。其次, 详细讨论了碳基、水基、金属基和无机化合物基等材料体系下吸波超材料的发展现状, 指明目前发展趋势以主动调谐、轻质宽频、多波段兼容为主线。最后总结了目前的发展瓶颈并展望了未来重点研究方向, 为吸波超材料优化设计提供了思路。

关键词: 超材料; 电磁吸波; 研究进展

中图分类号: TB34

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)03-0856-14

无线通信技术的飞速发展和军用侦察手段的不断革新, 对如何有效解决电磁污染的不利影响以及电磁隐身领域的技术难题提出了新的考验^[1-5]。吸波材料在电磁抗干扰、雷达隐身、多频段吸波上取得了突破^[6-8]。伴随着物联网技术的兴起, 吸波材料的应用不仅局限于吸波降干扰、反侦察上, 得益于设计思路的优化和结构尺度的扩展, 现已广泛应用在高性能天线、陷光吸热与光热转换和图像全息成像等领域^[9-14]。其优异的性能表现使得吸波材料有广阔的应用前景, 故而在电磁技术领域占有重要的地位。

传统电磁吸波材料主要围绕阻抗匹配和增强损耗的设计理念, 通过物理和化学手段不断改性, 满足多波段、宽带宽和高反射损耗等性能指标要求^[15-18]。虽然新型复合材料和纳米材料等推动了吸波性能的改善, 但是受限于材料本身理化性质, 难以兼顾“薄、轻、宽、强”的应用需求。而自 2008 年 Landy 等^[19]设计了一种基于开口谐振环结构的完美超材料吸收体后, 超材料作为一种新的电磁材料设计理念, 成为突破传统吸波材料技术瓶颈的有效手段。基于超材料所设计的电磁吸波体, 具备角域宽、极化不敏感等诸多优良性质, 而且使得吸波频段实现了从“被动选择”到“主动调控”的转变^[20-22]。更为关键的是, 超材料不受材料体系局限且能实现异质材料与功能构型的融合, 在电磁吸波隐身和国防高新技术领域前景广阔。

1 超材料吸波原理与方法

电磁超材料, 即人工构型尺寸在亚波长尺度且具有自然界中无可比拟的电磁特性的周期元胞材料, 通过周期性结构设计和元胞结构间的协同增效作用, 可以呈现出负折射率、逆切伦科夫辐射和电磁绕射等奇特性质^[23-24]。超材料对电磁波的损耗主要分为欧姆损耗、介电损耗和磁损耗 3 种类型, 通过与电磁波不同模式的相互作用将其转化为热能或其他形式的能量耗散掉^[25]。通过周期性结构的调控与设计, 超材料与自由空间具有良好的阻抗匹配, 使得电磁波能够最大限度地与超材料相互作用而非被大量反射。此外, 通过对表面结构的设计与尺寸的优化, 引发的电、磁偶极子共振、表面等离子极化激元(SPP)、边缘衍射和介质波导等效^[26-28], 极大地增强了对电磁波的损耗贡献。除了从上述强吸收、低反射和高损耗的角度考虑, 减少电磁波的透射也是改善吸波性能的关键因素, 因此为了最大限度地将电磁波局域在材料内部, 多数超材料一般按照“三明治”结构构型进行设计^[29-30], 即周期性表面、介电层、金属基板。周期性表面通过调节输入阻抗使波尽可能进入超材料内部, 介电层发挥各种损耗机制的作用耗散电磁波, 最后金属基板的趋肤效应能有效防止电磁波透射, 起到“困”波的作用。此外, 金属基板与表面周期结构层上诱导的反向平行

收稿日期: 2023-03-07

基金项目: 基础加强计划技术领域基金重点项目(2020-JCJQ-JJ-222); 国防科技创新特区项目(22-TQ08-04-ZT-01-013); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JQ-356); 中国博士后科学基金(2022M723884)

作者简介: 王文豪, 男, 2000 年生, 博士生, 火箭军工程大学智剑实验室, 陕西 西安 710025, E-mail: phil_wangwenhao@163.com

电流引发的磁谐振，还能进一步增加电磁损耗性能。

吸波超材料的发展经历了从超表面到超结构的转变，尺度从二维逐渐扩展到三维，在吸波机制上呈现出明显的差异。如图 1^[31-35]所示的二维超表面，其结构设计主要关注邻间耦合增益和介质层厚度，研究者们通过多级波长干涉理论和等效介质理论为几何结构的优化提供了理论参考，为更好的控制吸收频带与吸收峰强度起到了指导性的作用^[15,36]。干涉相消是利用介质层间 1/4 波长的距离间隔，使两束波相位差为 π ，起到衰减电磁波的效果。而对于一些类 Fabry-Perot 空腔结构，可以利用波长干涉理论，从反射和透射系数求得整体吸收率：

$$\tilde{r}_{\text{all}} = r_{12}e^{i\phi_{12}} - \frac{t_{12}t_{21}e^{i(\alpha_{12} + \alpha_{21} + 2\tilde{\beta})}}{1 + r_{21}e^{i(\phi_{21} + 2\tilde{\beta})}} \quad (1)$$

其中 t 和 \tilde{r} 分别表示透射和反射系数， ϕ 和 α 表示电磁

波相位， $\tilde{\beta} = \beta_r + i\beta_i = -\sqrt{\epsilon_r}k_0t_s / \cos(\theta_s)$ 表示传输相位。这种方法计算复杂、运算量大而且需要考虑路径相位的转化，不适用于三维结构。等效介质理论将二维超材料整体等效为一块平板介质，对复杂结构的求解尤为方便，直接通过公式(2)对 S 参数反演得到等效阻抗，其值越趋近于 1 则阻抗匹配特性越好^[16]。

$$Z_{\text{eff}}(\omega) = \sqrt{\frac{\mu_{\text{eff}}(\omega)}{\epsilon_{\text{eff}}(\omega)}} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (2)$$

式中， μ_{eff} 为磁导率， ϵ_{eff} 为介电常数， S_{11} 和 S_{21} 分别为反射系数和透射系数。

该方法在仿真分析中可以非常方便地研究平面几何结构对电磁参数的影响规律，但是对结构之间的耦合作用无法有效进行分析，为了更好地探究三维结构的超材料吸波机制，人们又以传输线理论为依据，建立了吸波超材料等效电路模型^[17,20]。如图 2^[37-42]所示的三维超

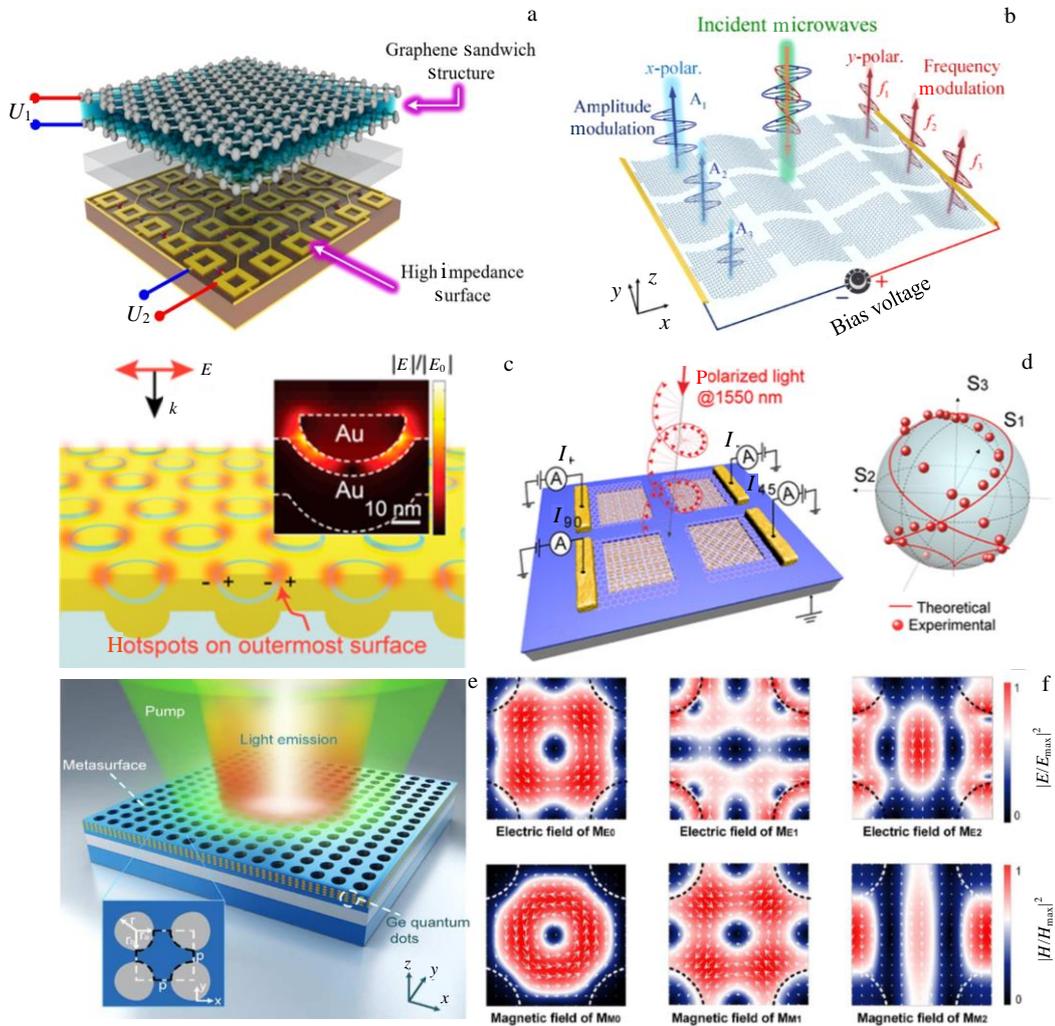


图 1 二维超材料

Fig.1 Two-dimensional metamaterials^[31-35]: (a) varactor-loaded metasurface; (b) graphene-based optically transparent metasurface; (c) nano-lotus pod metasurface; (d) plasmonic polarimeter; (e-f) nano-metasurface and electric mode profiles and field vector distributions

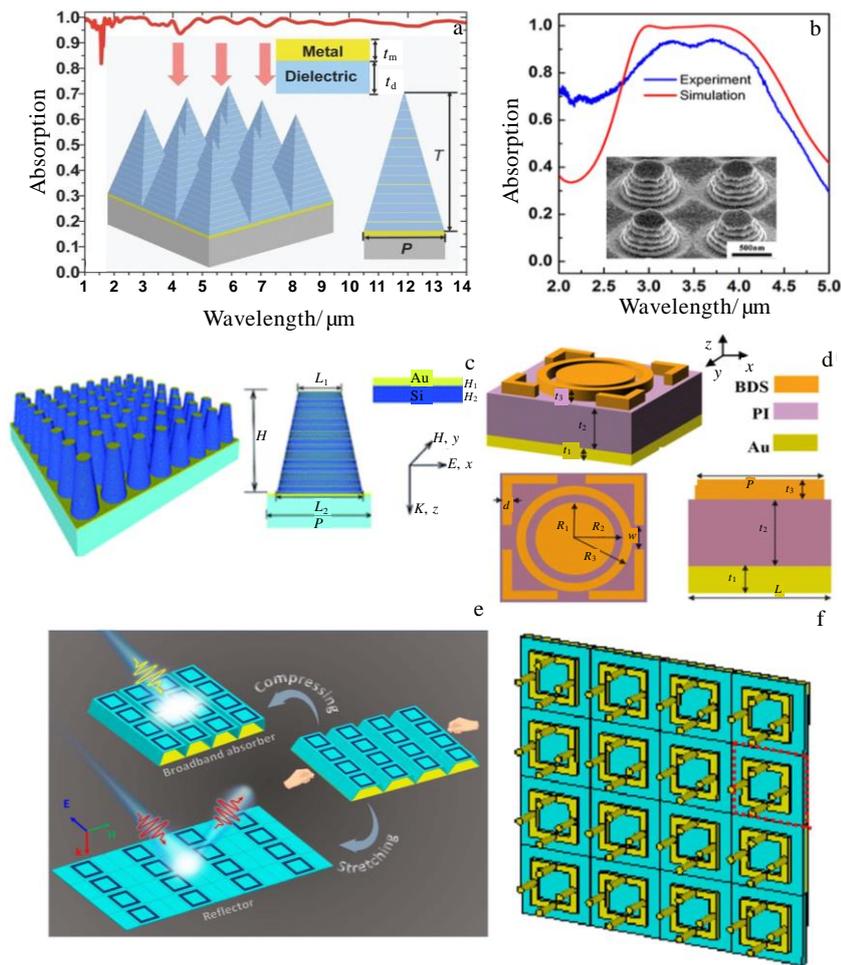


图 2 三维超材料

Fig.2 Three-dimensional metamaterials^[37-42]: (a) absorption spectrum for the multiple-layer pyramid metamaterial absorber; (b) truncated- cone-type metamaterial absorber; (c) multi-layer plasmonic structure; (d) circle-rectangle resonator metamaterial; (e) conceptual illustration of two reverse modes—absorber and reflector using origami-based stretchable metamaterial; (f) metallic resonator structure and a metal ground-plane complex metamaterial

材料可在多维度实现结构耦合增强效应，相较于二维超表面构型仅在单一平面的耦合增效作用，三维结构的引入使超材料吸波效果更具优势。将整体看做由 R 、 L 、 C 构成的端口网络，可以准确计算出电路的谐振频率进而确定超材料的共振频率，其等效阻抗有如下表达式：

$$Z_i = R_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i} \quad (3)$$

式中， R 、 L 、 C 分别表示电阻、电感和电容大小， ω 为角频率。

材料-结构的耦合增益效应使制成的超材料吸波体实现完美吸波，甚至使本身不具有电磁损耗性能的材料实现吸波。研究者们基于不同材料体系，开发了适用不同场景的超材料器件，如石墨烯 THz 吸波器^[43-45]、碳纳米管雷达吸波器^[46]及氮化钛太阳能吸收器^[47]等。材

料的性质与其性能表现息息相关，不同材料体系构建的吸波超材料因为吸波机理、应用频带和调控机制的不同各有优劣。近年来吸波超材料成为隐身领域研究的热点，而大量的研究工作主要聚焦于碳基、水基、金属基以及无机化合物基 4 种材料体系进行剖析，并指出发展趋势与存在的技术问题及解决思路，为后续研究者基于不同材料体系的吸波超材料性能改进提供借鉴。

2 超材料吸波体研究进展

2.1 碳基超材料

作为最传统的吸波材料体系，碳基吸波材料因其优异的结构稳定性和质轻等优点被广泛应用在隐身飞机、电磁屏蔽罩上^[18,48-49]。其损耗主要来源于欧姆损耗的焦耳热和电损耗的极化弛豫作用。

基于碳材料体系构筑的吸波超材料取得了较为理

想的吸波效果，例如 Xie 等^[50]通过 3D 打印六棱柱模板，利用倒模法将炭黑粉末与石膏相结合，如图 3 所示的工艺流程得到六棱柱形超材料吸波体，实现了在 2~18 GHz 的宽频吸收，但是其高达 25 mm 的尺寸厚度与现实应用指标要求差距显著。基于此，如图 4a 所示，Chen 等^[51]将炭黑与 ABS 混合后通过熔融沉积法 (FDM) 3D 打印制作了“米”字型宽频吸波体，在 7 mm 厚度时其 -10 dB 带宽基本全覆盖了 5.1~40 GHz，但是在低频段吸波性能的欠缺制约了其应用场景的扩宽。炭黑是非定型碳，能带无序，且仅在微波波段有较好

的吸波效果，而同样价格低廉的石墨制成吸波超材料后不仅在微波段能实现宽频吸收，还在 THz 波段吸波性能优异。如图 4b 所示，Chen^[52]等制作的方形环石墨谐振结构，在 12.7~18 GHz 反射损耗均在 -10 dB 以下，而 Hu 等^[53]用石墨设计了五层级联的内旋风车型超材料，利用石墨的层间与邻间共振耦合，在 0~35 THz 相对带宽达到 168.94%，还证实了其在 THz 波段也具有较好的吸波效果。Vahid 等^[54]为了进一步展宽频带，提出了一种三维蜂窝片层的石墨吸波体，在 50~460 GHz 吸收率均在 90% 以上。

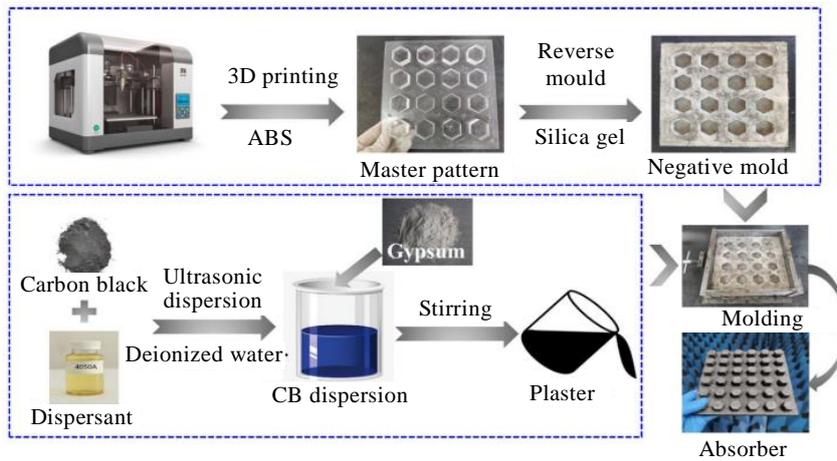


图 3 倒模法制备炭黑基六棱柱形超材料工艺过程

Fig.3 Preparation process of carbon black-based hexagonal prism metamaterial by reverse mold method^[50]

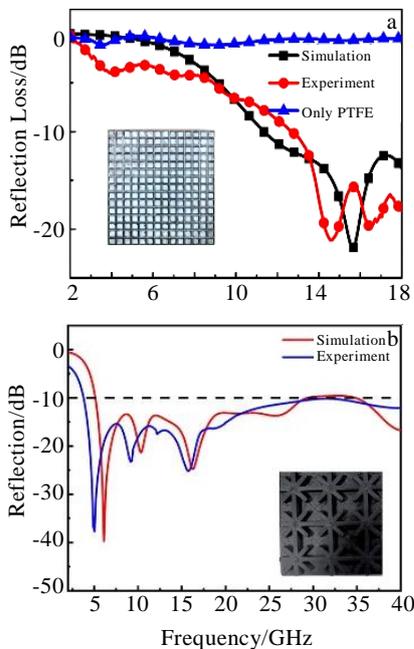


图 4 炭黑与石墨吸波超材料

Fig.4 Carbon black (a) and graphite (b) absorbing metamaterials^[51-52]

石墨和炭黑具有密度低、可塑性好、耐腐蚀、高损耗等特性，但是由低电导率导致的高趋肤深度使得吸波超材料整体厚度较大^[52-56]。碳纳米管(CNT)卷曲形成的空心管状结构，相较于石墨和炭黑能够更好的构建导电网络，使其吸波性能增强^[29,57-58]。Quan 等^[59]通过碳纳米管油墨 3D 打印了棱锥结构的轻质、抗烧蚀宽频吸波超材料，有效带宽能够覆盖整个 X 和 Ku 波段以及 C 波段的大部分。此外，碳纳米管最大抗拉强度高达 200 GPa，Xiao 等^[46]利用这一特点，如图 5 所示，用飞秒激光在垂直排列的碳纳米管表面刻蚀出微米级平顶锥结构后，以 PDMS 为基底通过二次转移法制作了柔性碳纳米管超材料，厚度仅为 0.5 mm，不仅共形性好，而且在 300 次弯曲循环后仍能在 0.1~2.5 THz 达到 98.9% 的平均吸收率。

虽然上述碳基材料都能实现较好的吸波效果，并且可以通过调节超材料结构尺寸实现吸收频带与强度的调控，但是面临制作成型后无法根据需要进行主动调节的难题。石墨烯作为一种低损耗等离子体材料，在 THz 波段能够激发表面等离子共振(SPP)，极大增强吸收效果。其电导率可以通过化学掺杂和偏置电

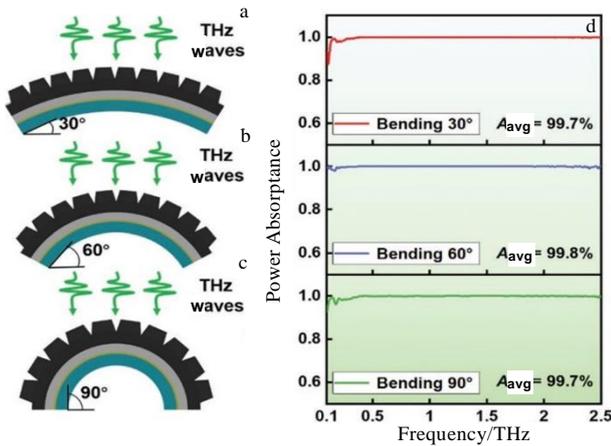


图 5 柔性太赫兹吸收器在不同弯曲状态下的反射光谱

Fig.5 Reflectance spectra for the flexible THz absorber under different bending status: (a-c) schematic diagrams of different bending tests for the THz absorber at 30° (a), 60° (b), and 90° (c) (the 3D-printed holders were used to bend the flexible THz absorber with different bending angles); (d) measured power absorbance within 0.1-2.5 THz for the THz absorber with different bending angles from 30° to 90°^[46]

压调控费米能级实现主动控制，从而成为解决动态调控这一瓶颈的理想材料。Feng 等^[26]设计了如图 6 所示的圆环嵌套十字架构型的石墨烯可调超材料吸波体，在 1.10~1.86 THz 实现 90% 以上吸收，其中在 1.23~1.68 THz 吸收率高达 99% 以上。偏置电压可以通过石墨烯表面涂覆的导电离子凝胶调节石墨烯电化学势，从而实现超材料吸收率的深度调制，而且其结构的中心对称性，保证了在 0°~60° 入射时保持良好的吸收稳定性。Xu 等^[27]在介电层中插入 9 层不同尺寸的石墨烯片层，每一层都可单独调控，通过仿真验证其有效带宽可达 4.8 THz，且能在 3~7.8 THz 实现高反射与高吸收模式的切换。尽管多层堆叠的设计思路有效拓宽了吸收频带，但是急剧增加的质量和厚度成为限制其应用的关键因素。未来还应针对超材料整体厚度与吸波性能间的平衡开展广泛研究，充分利用平面结构耦合共振效应和多层堆叠引发的干涉效应。

总的来说，碳基超材料因其质轻、环境耐受性好等优点已经在宽频、多波段吸波领域广泛应用。同时，石墨烯吸波超材料的提出，赋予了碳基超材料主动调控的特性。由于等离子共振效应的本身局限，使其难以兼具宽频和多波段吸波，但是这一特性使其可作为良好的传感检测器件^[60-61]。虽然通过几何结构杂化

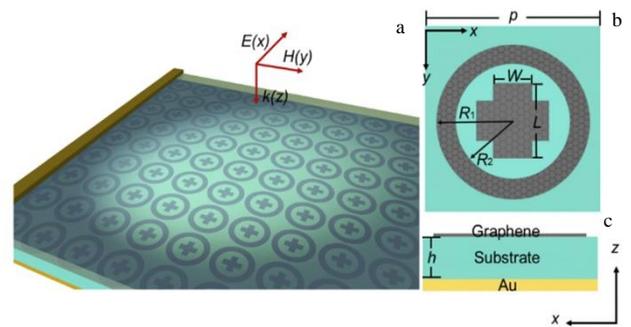


图 6 石墨烯宽频吸波体示意图

Fig.6 Schematic diagram of the designed broadband absorber (a); the geometrical parameters of the GCRC metamaterial absorber (b-c)^[26]

耦合共振模式能有效扩宽频带，但是石墨烯加工难度大、成本高，目前主流的物理气相沉积和化学气相沉积法难以精确控制结构形貌，使其主动调控这一属性停留在仿真阶段。尽管如此，THz 作为连接近红外和微波的桥梁，奠定了石墨烯吸波超材料在生物医学领域的重要地位^[62-63]。

2.2 水基超材料

作为一种天然的吸波材料，水具有良好的生物兼容性、易获得性、高透光性和多样调节性。相较于碳基体系超材料以黑色作为典型特征，水的高光学透过性使其应用场景可扩展到光学窗上，并且极高的性价比奠定了它作为新一代吸波超材料的重要基础。其损耗机制主要来源于分子极化以及在电磁波激发下的强磁共振引发的涡旋电流^[64]。微波波段的介电常数和损耗角正切可由 Debye 公式得到：

$$\varepsilon(\omega, T) = \varepsilon_{\infty}(\omega, T) + \frac{\varepsilon_s(T) - \varepsilon_{\infty}(T)}{1 - i\omega\tau(T)} \quad (4)$$

式中， ε_s 和 ε_{∞} 分别为静态和高频介电常数， τ 为旋转弛豫时间， T 为溶液温度， ω 为角频率。

水的介电常数实部和波长的平方成反比，具有良好的频散特性，使其在微波波段具有宽频阻抗匹配的特性^[65]。

水的良好流动性，使其能有效填充复杂的微结构，在 3D 打印技术的助推下实现其他材料难以实现的吸波超材料。Zhang 等^[55]用 3D 打印构筑了“万”字形聚乳酸(PLA)微通道，将水注入后能在 9.3~49 GHz 吸收 90% 以上的电磁波。Chen 等^[66]在此基础上进一步优化，利用复杂结构的耦合效应，通过聚乳酸 3D 打印构筑了如图 7a 中 Model_IV 的双叠层谐振结构水基超材料，相较于于仅

引入交叉十字结构 Model_III，其有效频带从 18.4~67.1 GHz 扩宽到 9.6~98.9 GHz，证明了加入方形环结构后的多共振模式耦合能有效扩宽吸收频带，并在 0~100 °C 表现出良好的热稳定性。这得益于其对称结构激发的多种共振模式，弥补了水在加热后由于氢键断裂导致极性减弱引起的吸波性能衰减。对于大多数微波波段工作的吸波超材料，其温度会随着工作时间的增加而显著升高，水基超材料的高比热容和良好热稳定性保证了其长时工作的稳定效能。这一特点使水基超材料兼具了良好的红外隐身性能。Gao 等人^[67]通过对比水基超材料与对照组加热后的红外成像图证实了这一结果。Lu 等^[68]用具有梯度结构的透明树脂作为基体，在 7.28~28.22 GHz 实现 90% 以上吸波，相较于聚乳酸，很好地利用了水的透光性，使其可用于飞机窗户的吸波。Li 等^[69]设计了一种无金属底板的空心圆柱水基超材料，以牺牲轻薄性换取了工艺的简化，打破了传统“三明治构型”的限制。虽然上述研究者的工作极大地推动了水基超材料技术的革新，但是提高柔韧性和降低蒸发率依然是亟待解决的关键问题。Gogoi 等^[70]在有机硅中构建了 2 种不同大小的矩形水微腔，这种嵌入式结构既保证了柔韧性又有效减少了水分的蒸发，延长了水基超材料的使用寿命，在厚度仅为 3 mm 时其有效工作带宽覆盖整个 X 波段。Wu 等^[71]用 TPU 实现了韧性更好的水基超材料，因其作为典型的 3D 打印基材而引入了更佳的三维共振结构，在米氏共振激发下其有效吸收带宽覆盖 5.9~25.6 GHz。

极性分子的相容性使得水溶液介电常数具有了更加灵活的调控性，而且也为解决水在 L、S 2 个低频段兼容性差的困境带来了突破。Xiong 等^[72]以填充盐溶液的聚四氟乙烯椎体超材料吸波体满足了 1.4~3.3 GHz 和 4.3~63 GHz 2 个频段的 90% 以上吸波，使其有效带宽达到 180%，当盐度从 0~100 ppt 变化时，能够在低频

段观察到较为明显的峰移和带宽变化，其结构如图 8 所示。盐水的介电常数可由改进 Debye 方程(5)得到。

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0(T, N) - \epsilon_{\infty}}{1 - i2\pi\tau(T, N)f} + i \frac{\sigma_{NaCl}(T, N)}{2\pi\epsilon_0^* f} \quad (5)$$

式中， ϵ_0 和 ϵ_{∞} 分别为溶液的静态和高频介电常数， τ 为旋转弛豫时间， T 为溶液温度， N 为溶液常数， ϵ_0^* 为自由空间介电常数， f 为电磁波频率， σ_{NaCl} 为盐溶液的离子电导率。

由于钠离子和氯离子的引入使得其导电率可通过盐度调节，从而赋予了溶液可调性。Zhang 等^[73]用树脂制作了一种立方体微结构与包含四甲脲圆柱体结构的复合超材料吸波体，相较于纯水填充，四甲脲的憎水甲基和亲水醚基周围能形成水合壳层调控水的介电弛豫过程，极大地改善了低频微波段吸波性能，在 4~40 GHz 实现了 90% 以上的吸波。因其给排水的便捷性，水基超材料还可实现高反射与高吸收的“开关”功能，如 Li 等^[74]制造的双单元耦合结构水基超材料，通过注水与排水实现在 12~30 GHz 的高反射与 12.47~28.43 GHz 高吸收转换。Gui 等^[75]利用重力将水基超材料的调控更加便捷化，通过旋转灯泡状的 FR-4 壳体实现宽频与窄带 2 种模式的切换。尽管水基超材料通过谐振耦合、溶液调控和构型设计等手段实现了微波宽频吸收与多功能兼具，但是由于水本身电磁属性使其扩展到太赫兹波段的应用面临挑战。Ruan 等与 Lan 等^[76-77]虽成功证实水基超材料应用在太赫兹波段的潜力，分别在 0.3~1.5 THz 和 115~300 GHz 实现 90% 以上吸收，但微米级的腔体对工艺要求严格及制造工艺难度大。

综上所述，多功能与多途径调谐的特性使水基超材料成为超材料吸波领域的重要分支。其极高的性价比和光学透明属性为解决目前装备上光学窗的隐身提供了新方法，而且水在雷达波段良好的频散属性为水

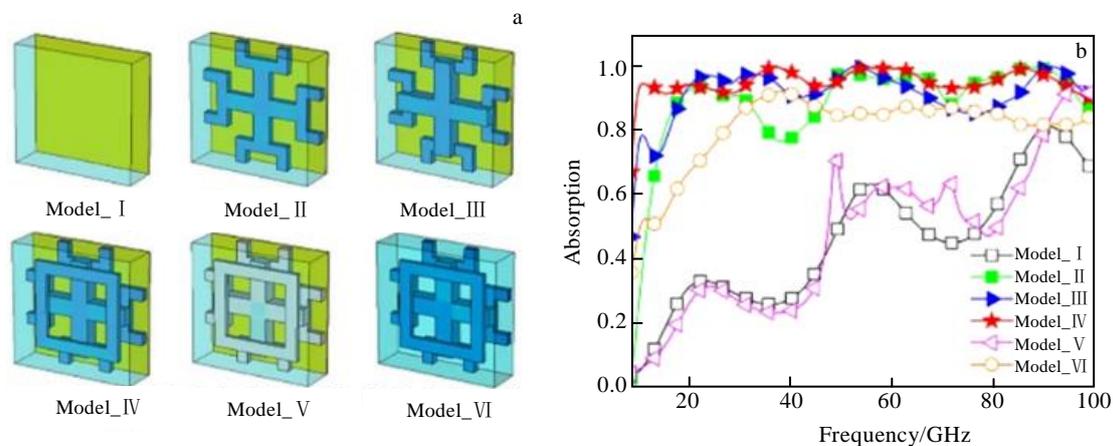


图 7 水基超材料不同构型示意图及其吸收率

Fig.7 Unit cell of the designed devices (a); simulated absorption spectra of different devices (b)^[66]

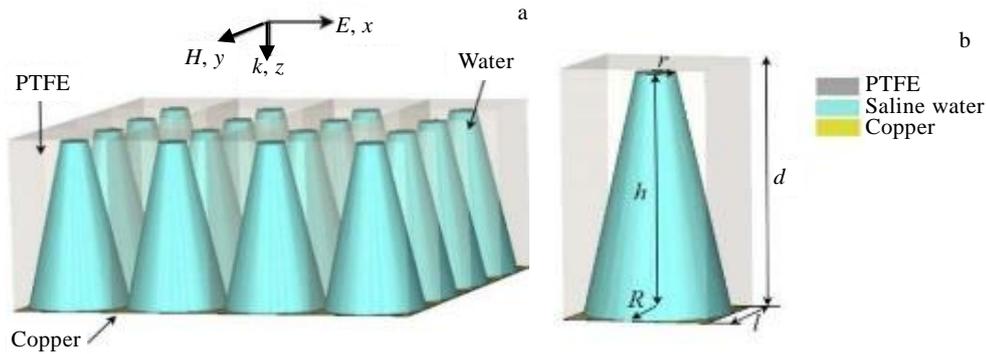


图 8 盐水基超材料整体结构和单元尺寸示意图

Fig.8 Schematic diagrams of the saline water-based absorber structure (a) and unit cell (b)^[71]

基超材料吸波体将来应用在装备隐身领域提供了机会。但是水基超材料面临的质量大、蒸发快等难题，成为目前摆在 3D 打印这一主流加工工艺前的技术难关。为了适应未来复杂环境的应用，针对水基吸波超材料的改进应重点从低密度和低冰点溶液入手，有效减轻质量和克服温度引起的性能衰退，而离子液体可以为这一难题的解决注入新的活力。

2.3 金属基超材料

金属基超材料因其能够激发显著的等离子体共振，广泛用光学波段的吸波^[78-80]，实现高效能量转换与吸收。诸多学者基于金属基超材料开展了创新性的研究工作，如引入开口谐振环^[81]、加载集总元件^[82]、液态金属^[83]等手段拓宽了应用频段、改善了吸波性能。

等离激元引发的强磁共振具有很强的电磁吸波增强能力，Chen 等^[78]利用 Ag 纳米盘阵列激发的反对称谐振模式实现 800~1000 nm 的单窄峰完美吸收，具有应用在传感检测领域的潜力。在法罗空腔谐振与等离激元共振双模耦合下，Liang 等^[79]所设计的银凹槽环超材料吸波体分别在 1059 和 1304 nm 实现完美窄峰吸收。除了利用等离激元共振窄峰的吸收性质，Li 等^[84]所设计的金纳米方块超材料吸波体与二硫化钼光子晶体结合，在整个可见光波段实现良好的吸波效果，这极大归功于等离子共振的近场增强效应，基于这一思路 Yu 等^[80]利用金属钛圆盘与长方体的耦合增强效应，获得了角度稳定性更好、带宽更宽的能量捕获吸波体，有效波长达到 1759 nm，如图 9 所示。Rana 等^[85]选用耐高温金属钨，通过十字架构型实现良好的阻抗匹配，在不依赖等离激元共振模式下分别在 422 和 545 nm 实现 94% 和 99.7% 的高效吸收，但是有效带宽较窄。从上述研究者的工作可以看出，窄带和低平均吸收强度是目前金属基超材料吸波体的通病，且微纳级加工尺

寸不仅精度要求苛刻并且此时的金属稳定性差。经过国内外学者不断探索，发现金属基超材料在微波波段具有良好的吸波效果和稳定的性能，使其成为吸波领域的又一宠儿。在 GHz 波段的金属基超材料主要有 2 种构型设计思路：多层堆叠和平面阵列，前者的高效吸波可通过驻波理论和“慢波”效应合理解释，而后者是以多元共振耦合来保证宽频高吸收性能。如 Lleshi 等^[86]用商用 Electrifi 丝材与介电丝材 3D 打印出交替层叠的类金字塔结构超材料吸波体，虽然制造误差达到 5%，但是在 X 和 Ku 波段吸收率仍大于 90%。Ma 等^[87]将不同单元尺寸的金十字架耦合在一起，相比于单一十字架，将 Q 值从 6.39 降低到 1.85，在 2.5~6 μm 波段极大地拓宽了吸收带宽。虽然上述 2 种思路一定程度突破了金属基超材料吸波体窄带吸波的固有限制，但是局限性也较为突出，多层堆叠带来厚度急剧增加使得整体厚重，而平面阵列受限于空间大小难以有效耦合且制造难度大。为了克服上述困难，通过激光刻蚀覆铜 PCB 板成为制造轻薄、高效、宽带宽超材料的低成本便捷手段。Araujo 等^[88]为了实现完全覆盖 Ku 波段的宽频吸收，设计了一款基于 FR-4 覆铜板的方形螺旋结构超材料，分割线的设计是为了对电荷重分配，以此激发更多的电磁偶极子，最终实现在 11.44~20 GHz 对 TE 极化波吸收率达到 90% 以上，并且厚度仅为 λ/16.4。Wang 等^[89]通过引入紧凑型正交曲折结构，使得共振模式更加多元，在 1.84~5.96 GHz 吸收率达到 85% 以上。值得一提的是，该超材料吸波体在打破对称体系的情况下仍保持较好的角度和极化稳定性，但是刚性大和环境耐受性差成为限制这一工艺的瓶颈问题。Mol 等^[82]制造的超薄铜贴片超材料吸波体，在圆柱面卷曲后实现 11.25~11.4 GHz 窄带有效吸波，其厚度仅为 λ/128，一定程度上解决了这一难题。

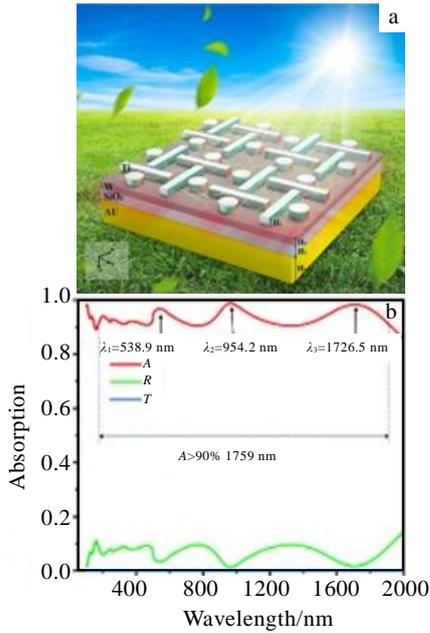


图 9 钛基多结构耦合宽频吸波体

Fig.9 Structure diagram of the ultra-wide band solar energy absorber (a); ultra-wide band spectra of the solar energy absorber (b)^[80]

动态可调控性一直是赋能吸波超材料区别于传统吸波材料脱颖而出的关键。加载变容二极管、PIN 二极管、电容和电阻等不仅能通过调节输入阻抗实现完美匹配，而且还能有效扩宽频带，同时，在外加偏置电压的作用下还可以非常方便和快速的实现吸波性能调节。Nguyen 等^[90]用贴片电阻将 4 个扇形结构相互连接，当电阻值为 200 Ω 时在 7~12.8 GHz 吸波强度大于 96%，而且对称结构的引入对 45° 以下入射的电磁波均有较好的吸收稳定性。Zhang 等^[91]将电容与电阻同时加载在铜表面，如图 10 所示，通过参数优化发现电容与阻抗虚部有关而电阻主要影响阻抗实部，其 -10 dB 带宽覆盖了 L 波段的 0.69~2.13 GHz。Thummaluru 等^[92]用变容二极管在不同电压刺激下实现了吸收峰从 4.2~7 GHz 的动态可调。虽然通过加载集总元件能够有效展宽频带和调控吸收峰，但是受限于集总元件的大小，整体的设计尺寸难以降低。液态金属又作为一种新的思路来满足日益苛刻的吸波要求。如图 11 所示，Tian 等^[83]在沟槽中填充油和镓/铟，在重力的作用下液态金属分别填覆长边与短边实现两种吸波状态的切换，当从 state 1 到 state 2 转变时，TE 波的吸收峰从 9.24 GHz 移到 7.4 GHz，TM 波的吸收峰从 12.06 GHz 移到 10.96 GHz，这是因为非对称结构导致其极化敏感。液态金属因为良好的形变能力有望在柔性基底上广泛应用，克服了固态金属强度高、延展性差的劣势。

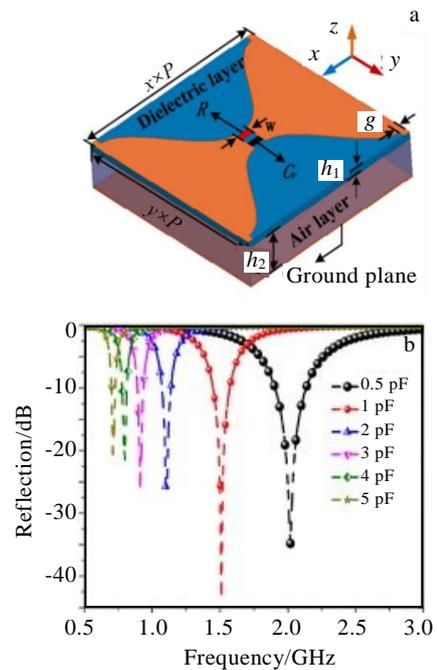


图 10 加载集总元件的动态可调超材料

Fig.10 Schematic diagram and reflection results of the MA^[91]: (a) the geometry of the unit cell; (b) simulated reflection of the MA with the changed capacitance and unchanged others values

金属基超材料吸波体在多个波段优异的性能表现在近年来受到研究者们广泛的关注。太赫兹波段等离子体效应的激发使其有望成为高效的能量捕获器，不过高频段的欧姆阻尼效应限制了其宽频应用。在 GHz 波段通过与 3D 打印、印刷电路等技术结合，不仅表现出高效宽频的吸波效果，还实现了加载集总元件的动态调控。尽管液金和合金能够作为一种新的思路扩宽其应用前景，但是受限于金属密度较大以及成本较高，未来可以在机器学习辅助下优化形貌结构，减少金属单元大小。

2.4 无机化合物基超材料

研究者们对无机化合物基超材料吸波体的兴趣源于其庞大的备选材料库，而近年来具有各向异性吸收的黑磷、热相变的氧化钒和具有阻抗表面的氧化铟锡 (ITO) 吸引学者们开展了许多创新性的研究，取得了丰硕的成果。

氧化钒的热相变属性来源于晶相结构的改变，当达到相变温度 341 K 时，其结构从单斜晶系转变为四方晶系，实现绝缘相到金属相的过渡转变，导致电导率呈 4~5 个数量级的急剧变化^[93]。Zheng 等^[30]设计了

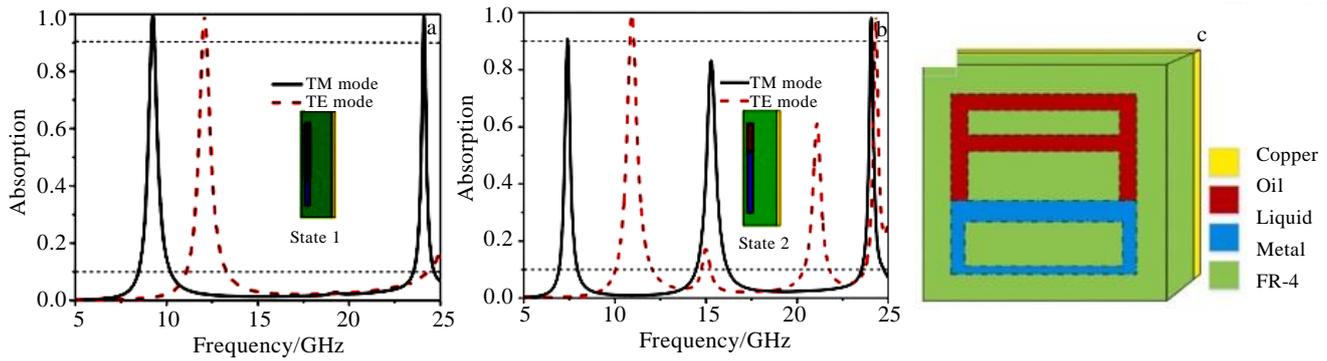


图 11 液态金属吸波超材料 2 种吸收模式转换

Fig.11 Simulated spectra of the absorption with a normal incident for TE and TM waves in the state 1 (a) and the state 2 (b); schematic diagram of the proposed absorber (c)^[83]

一款氧化钒基的太赫兹可调超材料吸波体，发现当温度从 318 K 升高至 345 K 时，由于金属相程度的加深，等离激元效应随之增强，使得表面能局域更多的电场，如图 12 所示。该设计实现了在温场控制下吸波强度从 0%~99.9% 的灵活调控，并在 3.7~9.7 THz 实现了完美吸收。Song 等^[94]也利用氧化钒的相变特性，设计了一款兼具宽带吸收与偏振转换的双功能吸波超材料，通过金属与绝缘态的转变，在 0.52~1.04 THz 可由宽带吸收器切换为线偏振转换器。相较于石墨烯而言，虽然二者均可通过电导率调节来调控吸波性能，但是氧化钒无须外置电压的热源调控机制，使其对吸波性能

的调节更加灵活。

偏振和极化敏感性超材料吸波体在光电子器件中占有重要地位。黑磷褶皱的晶体结构，决定其介电常数依赖于晶轴取向，使其具有了各向异性吸收的特性。Qing 等^[95]将单层黑磷覆于如图 13 所示具有孔洞结构的介电材料表面，由于临界耦合的吸收增强效应，TE 极化下时在 4.31 THz 处吸收率为 99.9%，但是黑磷的各向异性使得在对称结构下，TM 吸收峰偏移了 353.5 nm。Liu 等^[96]也基于黑磷设计了一种偏振敏感的太赫兹超材料吸波体，并且能实现从椭圆型色散到双曲型色散的拓扑转变。

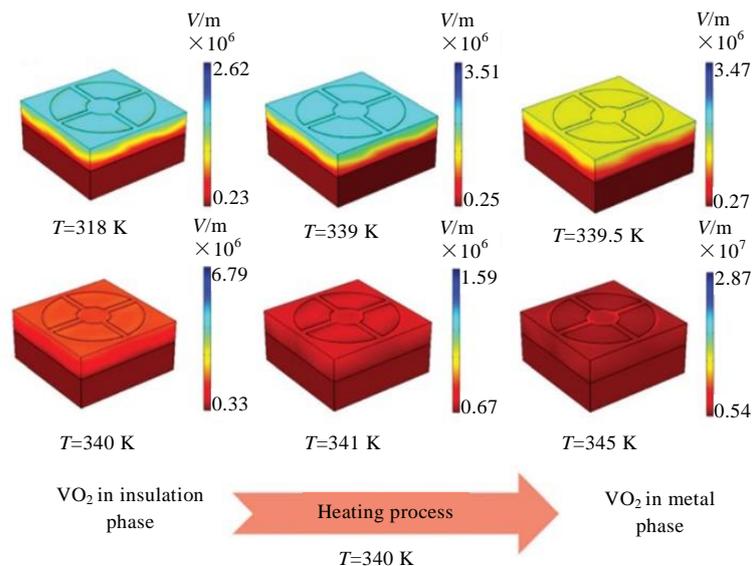


图 12 氧化钒在不同温度下的相变特性及电场分布图

Fig.12 Electric field intensities of the absorber at different temperatures during the heating process (the incident electromagnetic wave is a TE wave with a frequency of 6.7 THz and is incident vertically)^[30]

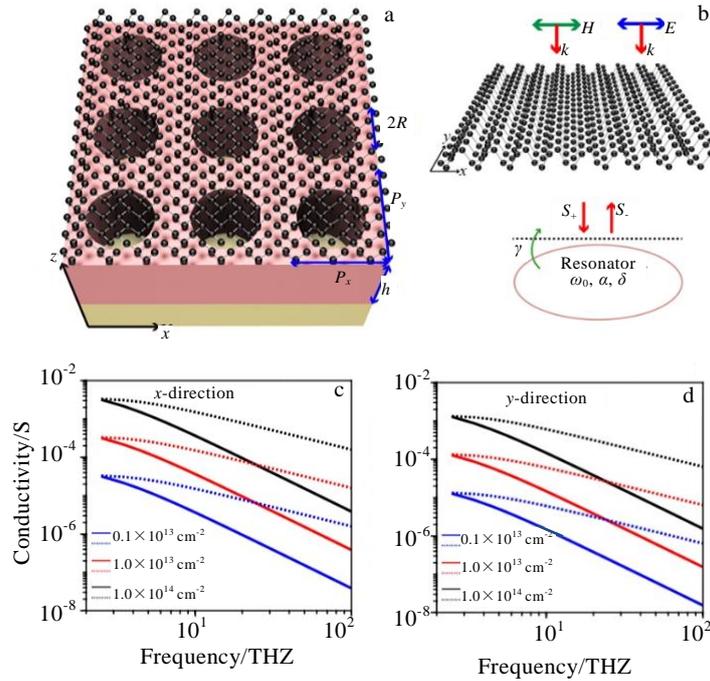


图 13 黑磷各向异性吸收超材料

Fig.13 Schematic diagram of the proposed structure (a); schematic diagram of monolayer BP (b); frequency-dependent surface conductivity along the x-direction (c) and the y-direction (d) (solid lines and dashed lines denote the real part and imaginary part, respectively)^[95]

上述材料因具有相变调控和各向异性吸收功能成为新型吸波超材料中的亮点，但是受加工手段的局限以及氧化钽沉积困难和黑磷剥离难度大等因素的直接影响，目前仅停留在仿真设计层面。ITO 作为一种可沉积在靶材表面的吸波材料，因其制造简单且光学透明而受到研究者们青睐^[97]。Deng 等^[98]将 ITO 磁控溅射在 PET 衬底后用激光分别刻蚀出 3 种不同谐振图案，利用三层堆叠构型实现谐振图案组合，实现了在 10~75.5 GHz 的 90% 以上吸收，相对带宽达到 153%。Du 等^[99]利用多层结构耦合进一步改进了在低频段的吸收表现，将全极化、高效率、超宽带、低质量等优点集成一体。其选用质轻的聚苯乙烯泡沫作为介质层，相较于传统吸波体将整体质量降低了两个数量级，最终在 1~18 GHz 吸收率达到 90% 以上。Xu 等^[100]将 ITO 沉积在钠钙玻璃上，在保证高光学透过率的同时，8~20 GHz 吸收率均保持在 90% 以上。然而高硬度和脆性大成为其最大的缺陷，而 Wu 等^[101]制造的如图 14 所示的 ITO 吸波超材料，巧妙地利用 PDMS 薄膜实现了柔性基底 WIFI 信号吸收，在 2.2~5.85 GHz 吸收率达到 80% 以上，且可以包覆任意形状的待屏蔽物。

综上所述，虽然氧化钽能够以非接触的形式实现动态调控，但是受限于其等离激元的吸收增强机制，

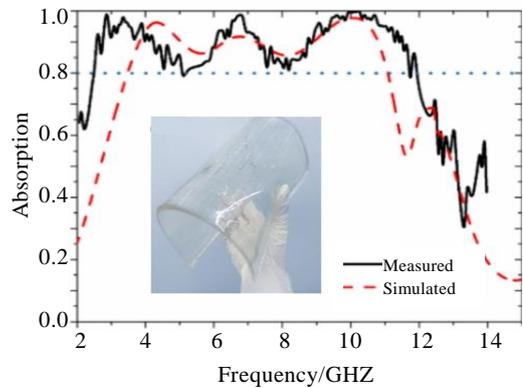


图 14 柔性 ITO 吸波超材料

Fig.14 Comparison of the simulation and experiment results of the MMA using PETPDMS-PET as the medium layer and picture of the transparent PET-PDMS-PET at medium MMA bended state by hand^[101]

仅在太赫兹波段有较好应用前景。黑磷虽然具有各向异性的特殊吸收效果，但是受制造工艺水平限制目前难以实际应用。而 ITO 作为一种光学透明的吸波材料，目前已在多个吸波频段得到应用，并且以轻薄的特性而越来越受到研究者的重视。

3 现状与展望

电磁超材料吸波体凭借在多方面具有传统吸波材料无可比拟的优异性能而备受关注，同时还因功能多样、轻质宽频、可共形等突出优势有望推动电磁吸波领域飞跃式进步。俄罗斯五代战机、美国 F-35 战斗机和 B-2 轰炸机等军用航天装备上已应用电磁超材料吸波体作为提升隐身性能的关键技术，并且美国朱姆沃尔特级驱逐舰也在舰船壳体上使用超材料实现更好的隐身效果。除了在军事领域有较好的应用，电磁超材料吸波体还作为提升民航飞行器通信质量的新技术，极大地减小了信号干扰，提升了飞行的安全性。碳基超材料在满足宽频吸波要求的前提下具有质轻、损耗高的特点，但目前降低整体厚度还是一个较为棘手的问题。随之水基超材料以其光学透过率高、整体柔韧性好、频散特性佳而成为一大研究热点，但是溶液蒸发快和质量大成为抑制其发展的技术瓶颈。再而，金属基超材料因显著的等离激元效应表现出对短波较好的吸收，加载集总原件后不仅因阻抗匹配性好可实现宽频毫米波吸收，还具有动态可调的性质；但是加工难度大和元胞小型化困难成为亟待解决的关键问题。具有相变特性和有各向异性吸收的无机化合物超材料成为新型光电子器件的研究热点，此外，ITO 也因表面良好的导电性和易加工性成为柔性吸波器件的理想材料。

表 1 对比了不同材料体系下吸波超材料在构型、有效工作频段、厚度等方面的特点，并列出了是否具备功能扩展性与动态可调性。总的来看，现阶段基于这 4 种主流材料体系的吸波超材料研究，均在一定程度上实现了宽频、轻质、动态调谐与功能复合，并巧妙利用了多样化的结构设计思路，因此凸显了吸波超材料在电磁研究领域的重要地位。

虽然目前基于不同材料体系的吸波超材料研究已经取得了长足进步，但是仍面临许多关键问题需要重点突破，未来以这些技术难点作为导向具有重要意义。针对现在吸波超材料的瓶颈问题，向智能化、三维化、多功能化发展攻关可重点关注以下 4 个方面：

1) 开发智能超材料器件。动态可调的优点虽然已打破了传统吸波材料的固有壁垒，但是人工智能的兴起对超材料也提出了新的要求。未来可以将超材料与智能化器件融合，包括芯片植入、并入物联网及动态编码超材料等，实现自感知与自主调整吸波频段的反馈链路。

2) 研制多功能一体的新型超材料。超材料吸波有多样化的应用场景，但是隐身抗干扰的军事应用始终是重中之重，而目前军事技术的发展集中于新域新质的特点，催生了超材料功能更完善的需求。满足高温吸波性能稳定的隔热吸波一体超材料、多频谱兼容的宽频隐身超材料、吸透一体化超材料和具备三维拓扑结构的宽频与角度不敏感超材料等都是具有极高研究和应用价值的关键方向。

3) 建立超材料体系数据库。以结构设计思路为牵引，数据库的完善为主线，一方面在算法与几何结构设计间建立数形结合模型，通过大数据+人工智能探寻三维最优结构；另一方面构筑不同材料体系下吸波超材料的性能参数数据库，增加自主选择性，助力今后研究者开发更完善的功能器件。

4) 完善仿真设计与实物制造互补的闭环链路。虽然 4D 打印、仿生超材料和光刻技术已经为解决目前超材料结构复杂和精度要求高的难题提供了方法，但是在器件集成、微型化和材料可选性上还存在局限。由此导致许多仿真性能优异的模型难以形成实体转化，所以未来应重点着眼可打印材料体系扩宽和微纳加工工艺提升两方面，充分发挥仿真设计指导实物制作与实物制作推进仿真优化互补链路的重要作用。

表 1 吸波超材料总结

Table 1 Summary of absorbing metamaterials

Material type	Structure	Effective band	Thickness	Function/Tunability	Ref.
Carbon black	Star-shaped	5.1-40 GHz	7 mm	-	[34]
Graphite	Square ring	12.7-18 GHz	2.6 mm	-	[38]
Carbon nanotube	Hexagonal pyramid	5.31-18 GHz	11 mm	Ablation resistance	[89]
Carbon nanotube	Flat-topped cone	0.1-2.5 THz	0.5 mm	Bending resistance	[40]
Graphene	Cross	1.1-1.86 THz	30 μm	Electrically adjustable	[41]
Distilled water	Cubic combination	5.9-25.6 GHz	4 mm	Flexibility	[59]
Salt water	Centrum	1.4-3.3 & 4.3-63 GHz	26 mm	Salinity regulation	[56]
Electrifi	Gradual pyramid	8.2-17.2 GHz	6.3 mm	-	[68]
Cu	Multi-element coupling thin layer	11.25-11.4 GHz	0.2 mm	Flexibility	[72]
Cu	Fan-type thin layer	4.2-7 GHz	0.6 mm	Variode regulation	[76]
Ga/In liquid metal	Rectangular	-	-	Gravity regulation	[77]
VO ₂	Sector	3.7-9.7 THz	17.5 μm	Thermal phase change regulation	[79]
ITO	Rectangular split ring	2.2-5.85 GHz	6.25 mm	Flexibility	[90]

4 结束语

电磁超材料吸波体相较于传统吸波材料表现出多维度综合性优势, 尤其表现在吸波效能提升、功能化应用和多样化基材选择等方面。虽然不同材料体系的超材料由于本身物化性质的局限, 存在不同程度的缺点, 但是已经能较好的填补传统吸波材料的技术空白。超材料吸波体在军用和民用领域上有广阔的应用前景, 但是离完全取代传统吸波材料还存在距离。总的来说, 超材料吸波体利用结构与电磁波之间的耦合作用突破了传统吸波材料许多固有壁垒, 并凭借多样化材料体系可选择性已经在隐身装备领域受到广泛关注, 但是目前面临的仿真与实物制造不统一、智能化应用欠缺和多功能复合体难以实现等突出问题是加快超材料广泛应用亟待解决的重点。

参考文献 References

- [1] Binion J D, Lier E, Hand T H *et al.* *Nature Communications*[J], 2019, 10(1): 108
- [2] Tian X, Lee P M, Tan Y J *et al.* *Nature Electronics*[J], 2019, 2(6): 243
- [3] Karaaslan M, Bağmancı M, Ünal E *et al.* *Optics Communications* [J], 2017, 392: 31
- [4] Li Ze(李泽), Zhao Fang(赵芳), Wang Jianjiang(王建江) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(11): 3628
- [5] Li Ze(李泽), Sun Haitao(孙海涛), Cheng Zhaogang(程兆刚) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(1): 398
- [6] Watts C M, Liu X, Padilla W J. *Advanced Materials*[J], 2012, 24(23): 98
- [7] Xu H X, Ma S J, Ling X H *et al.* *ACS Photonics*[J]. 2018, 5(5): 1691
- [8] Wang Y, Xu H X, Wang C *et al.* *Advanced Photonics Research*[J], 2022, 3(10): 2200063
- [9] Alam T, Almutairi A F, Samsuzzaman M *et al.* *Scientific Reports*[J], 2021, 11(1): 14087
- [10] Zheng G, Mühlendernd H, Kenney M *et al.* *Nature Nanotechnology*[J], 2015, 10(4): 308
- [11] Lin K T, Chen H L, Lai Y S *et al.* *Nature Communications*[J], 2014, 5(1): 3288
- [12] Zhu H, Yi F, Cubukcu E. *Nature Photonics*[J], 2016, 10(11): 709
- [13] Ozpinar H, Aksimsek S. *Scientific Reports*[J], 2022, 12(1): 19758
- [14] Lin K T, Lin H, Yang T *et al.* *Nature Communications*[J], 2020, 11(1): 1389
- [15] Zhang Z L, Zhang L, Chen X Q *et al.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2020, 497: 166075
- [16] Chen X, Grzegorzczak T M, Wu B *et al.* *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*[J], 2004, 70: 16608
- [17] Zhang H, Yang J, Zhang D *et al.* *Physica B: Condensed Matter*[J], 2021, 612: 412734
- [18] Wang C, Han X J, Xu P *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2011, 98(7): 72906
- [19] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J *et al.* *Physical Review Letters*[J], 2008, 100(20): 207402
- [20] Wang Q Z, Liu S Y, Ren G J *et al.* *Optics Communications*[J], 2021, 494: 127050
- [21] Boşdurmaz E B, Hajian H, Erçağlar V *et al.* *Journal of the Optical Society of America B*[J], 2021, 38(9): C160
- [22] Zhang B H, Xu K D. *Journal of the Optical Society of America B*[J], 2021, 38(11): 3425
- [23] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. *Science*[J], 2001, 292(5514): 77
- [24] Lu J, Grzegorzczak T, Zhang Y *et al.* *Optics Express*[J], 2003, 11(7): 723
- [25] Sun S L, He Q, Hao J M *et al.* *Advances in Optics and Photonics*[J], 2019, 11(2): 380
- [26] Feng H, Xu Z X, Li K *et al.* *Optics Express*[J], 2021, 29(5): 7158
- [27] Xu Z H, Wu D, Liu Y M *et al.* *Nanoscale Research Letters*[J], 2018, 13(1): 143
- [28] Lin H, Sturmberg B C P, Lin K *et al.* *Nature Photonics*[J], 2019, 13(4): 270
- [29] Ordek B, Esat V, Sabah C. *Materials Today Communications*[J], 2022, 32: 104073
- [30] Zheng Z P, Luo Y, Yang H *et al.* *Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP*[J]. 2022, 24(15): 8846
- [31] Zhang J, Shao L D, Li Z F *et al.* *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2022, 14(27): 31075
- [32] Li L F, Wang J Z, Kang L *et al.* *ACS Nano*[J]. 2020, 14(12): 16634
- [33] Lee N, Kim R, Kim J Y *et al.* *ACS Photonics*[J], 2021, 8(6): 1616
- [34] Yuan S, Qiu X Z, Cui C C *et al.* *ACS Nano*[J], 2017, 11(11): 10704
- [35] Zhang J, Wei X, Rukhlenko I D *et al.* *ACS Photonics*[J], 2020, 7(1): 265

- [36] Duan Y B, Liang Q X, Yang Z *et al.* *Materials & Design*[J], 2021, 208: 109900
- [37] Zou H J, Cheng Y Z. *Modern Physics Letters B*[J], 2020, 34(18): 2050207
- [38] Hu S, Yang S Y, Liu Z *et al.* *The Journal of Physical Chemistry C*[J], 2019, 123(22): 13856
- [39] Sun Y B, Shi Y P, Liu X Y *et al.* *Nanoscale Advances*[J], 2021, 3(14): 4072
- [40] Pham T, Bui X K, Tung B S *et al.* *Journal of Physics D, Applied Physics*[J], 2021, 54(16): 165111
- [41] Liang Q Q, Wang T S, Lu Z W *et al.* *Advanced Optical Materials*[J], 2013, 1(1): 43
- [42] Wang X Y, Lin J C, Yan Z Y *et al.* *RSC Advances*[J], 2022, 12(5): 32583
- [43] Fu P, Liu F, Ren G J *et al.* *Optics Communications*[J], 2018, 417: 62
- [44] Chen H, Chen Z H, Yang H *et al.* *RSC Advances*[J], 2022, 12(13): 7821
- [45] Zhang J G, Tian J P, Li L. *IEEE Photonics Journal*[J], 2018, 10(2): 1
- [46] Xiao D Y, Chen W L, Sun L M *et al.* *Advanced Materials Interfaces*[J], 2022, 9(11): 2102414
- [47] Guo Z J, Liu X Y, Li C X *et al.* *Optical Materials*[J], 2021, 119: 111352
- [48] Cheng J B, Yuan W J, Zhang A N *et al.* *Journal of Materials Chemistry C*[J], 2020, 8(39): 13712
- [49] Sun H, Che R C, You X *et al.* *Advanced Materials*[J], 2014, 26(48): 8120
- [50] Xie S, Ji Z J, Ma C *et al.* *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2022, 33(6): 3115
- [51] Chen M Z, Wang L Y, Liu G *et al.* *Frontiers in Materials*[J], 2022, 9: 980907
- [52] Chen X, Jia X B, Wu Z *et al.* *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*[J], 2019, 18(5): 1016
- [53] Hu C X, Tian X L, Zhou Z W *et al.* *Journal of Optics (2010)*[J], 2021, 23(2): 25101
- [54] Vahidi A, Rajabalipanah H, Abdolali A *et al.* *Applied Physics A*[J], 2018, 124(4): 337
- [55] Zhang X F, Zhang D J, Fu Y J *et al.* *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*[J], 2020, 19(5): 821
- [56] Li M L, Muneer B, Yi Z X *et al.* *Advanced Optical Materials*[J], 2018, 6(9): 1701238
- [57] Dehghan B M, Heidari A A, Nakhkash M. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*[J], 2020, 14(13): 1566
- [58] Pander A, Onishi T, Hatta A *et al.* *Nanomaterials*[J], 2022, 12(3): 464
- [59] Quan B, Gu W H, Sheng J Q *et al.* *Nano Research*[J], 2021, 14(5): 1495
- [60] Yi Z, Huang J, Cen C L *et al.* *Results in Physics*[J], 2019, 14: 102367
- [61] Cen C L, Yi Z, Zhang G F *et al.* *Results in Physics*[J], 2019, 14: 102463
- [62] Zhuang S L, Li X Y, Yang T *et al.* *Micromachines*[J], 2022, 13(8): 1239
- [63] Kim S, Jang M S, Brar V W *et al.* *Nano Letters*[J], 2018, 18(2): 971
- [64] Wen J D, Ren Q, Peng R G *et al.* *Journal of Physics D, Applied Physics*[J], 2022, 55(28): 285103
- [65] Wen J D, Zhao Q, Peng R G *et al.* *Optical Materials Express*[J], 2022, 12(4): 1461
- [66] Chen Y, Chen K J, Zhang D J *et al.* *Photonics Research*[J], 2021, 9(7): 1391
- [67] Gao Z Q, Fan Q, Tian X X *et al.* *Optical Materials*[J], 2021, 112: 110793
- [68] Lu Y, Chen J, Li J X. *Journal of Physics D, Applied Physics*[J], 2021, 55(11): 115502
- [69] Li S R, Shen Z Y, Yang H L *et al.* *Plasmonics*[J], 2021, 16(4): 1269
- [70] Gogoi D J, Bhattacharyya N S. *Journal of Applied Physics*[J], 2018, 124(7): 75106
- [71] Wu Z, Chen X Q, Zhang Z L *et al.* *Applied Physics Express*[J], 2019, 12(5): 57003
- [72] Xiong H, Yang F. *Optics Express*[J], 2020, 28(4): 5306
- [73] Zhang J Q, Wu X Y, Liu L Y *et al.* *Optics Express*[J], 2019, 27(18): 25595
- [74] Li H Y, Feng Y Y, Yuan H *et al.* *Journal of Physics D, Applied Physics*[J], 2022, 55(43): 435005
- [75] Gui D, Yao J Q, Wang Q Y *et al.* *Physica Scripta*[J], 2021, 96(12): 125504
- [76] Ruan J F, Lan F, Zou R Z *et al.* *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*[J], 2022, 36(4): 557
- [77] Lan F, Meng Z F, Ruan J F *et al.* *Optical Materials*[J], 2021, 121: 111572
- [78] Chen J, Nie H, Tang C J *et al.* *Applied Physics Express*[J], 2019, 12(5): 52015
- [79] Liang C P, Yi Z, Chen X F *et al.* *Plasmonics*[J], 2020, 15(1): 93
- [80] Yu P Q, Yang H, Chen X F *et al.* *Renewable Energy*[J], 2020, 158: 227
- [81] Ghosh S, Bhattacharyya S, Chaurasiya D *et al.* *IEEE*

- Antennas and Wireless Propagation Letters*[J], 2015, 14: 1172
- [82] Libi M V A, Aanandan C K. *Journal of Physics Communications* [J], 2018, 2(1): 15007
- [83] Tian X L, Hu C, Zhang D *et al. Physica B: Condensed Matter*[J], 2021, 614: 413030
- [84] Li J K, Chen Z Q, Yang H *et al. Nanomaterials*[J], 2020, 10(2): 257
- [85] Rana A S, Mehmood M Q, Jeong H *et al. Scientific Reports*[J], 2018, 8(1): 2443
- [86] Lleshi X, Van H T Q, Loiseaux B *et al. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*[J], 2021, 20(1): 28
- [87] Ma W, Wen Y Z, Yu X M. *Optics Express*[J], 2013, 21(25): 30724
- [88] Araujo J B O, Siqueira G L, Kemptner E *et al. IEEE Transactions on Antennas and Propagation*[J], 2020, 68(5): 3739
- [89] Wang Q, Cheng Y Z. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*[J], 2020, 120: 153198
- [90] Nguyen T T, Lim S. *Applied Physics Letters*[J], 2018, 112(2): 21605
- [91] Zhang G W, Gao J, Cao X Y *et al. Radioengineering*[J], 2019, 27(3): 579
- [92] Thummaluru S R, Chaudhary R K. *Journal of Applied Physics*[J], 2018, 124(20): 204901
- [93] Song Z Y, Wei M L, Wang Z S *et al. IEEE Photonics Journal*[J], 2019, 11(2): 1
- [94] Song Z Y, Zhang J H. *Optics Express*[J], 2020, 28(8): 12487
- [95] Qing Y M, Ma H F, Cui T J. *Optics Express*[J], 2018, 26(25): 32442
- [96] Liu J, Chen W, Ma W Z *et al. Results in Physics*[J], 2021, 22: 103818
- [97] Li L, Xi R, Liu H X *et al. Applied Physics Express*[J], 2018, 11(5): 52001
- [98] Deng G, Lv K, Sun H *et al. Journal of Physics D, Applied Physics*[J], 2021, 54(16): 165301
- [99] Du Z Q, Liang J G, Cai T *et al. Optics Express*[J], 2021, 29(5): 6434
- [100] Xu J, Fan Y C, Su X P *et al. Optical Materials*[J], 2021, 113: 110852
- [101] Wu Y H, Wang J J, Lai S F *et al. Optical Materials Express* [J], 2018, 8(11): 3351

Research Progress of Absorbing Metamaterials Based on Different Material Systems

Wang Wenhao, Wang Long, Wang Liuying, Liu Gu, Ge Chaoqun, Xu Kejun, Wang Weichao, Hu Lingjie
(Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Wave-absorbing materials play a vital role in national defense and people's livelihood, but traditional wave-absorbing materials are difficult to meet the increasingly complex electromagnetic environment due to their large mass and narrow frequency band. The integration of structural design ideas of wave-absorbing metamaterials with "thin, light, wide and strong", dynamic tunable and insensitive polarization angles has contributed to the rapid development of electromagnetic wave absorption. In this paper, we firstly clarify the principles and methods of metamaterial wave absorption and the important influence of geometric design on electromagnetic wave absorption performance. Secondly, the development status of wave-absorbing metamaterials in carbon, water, metal and inorganic compound-based material systems is discussed in detail, and the current development trend of active tuning, lightweight, broadband, and multi-band compatibility is indicated as the main line. Finally, the current development bottlenecks and future research directions are summarized, providing ideas for the optimal design of wave-absorbing metamaterials.

Key words: metamaterials; electromagnetic wave absorption; research progress

Corresponding author: Wang Liuying, Ph. D., Professor, Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, P. R. China, E-mail: lywangxa@163.com