

# Research Progress of Metamaterial Absorber

Jiali Chai, Yanjie Ju\*

School of Electrical and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning  
Email: 1961185114@qq.com, \*746610878@qq.com

Received: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2019; accepted: Jun. 21<sup>st</sup>, 2019; published: Jun. 28<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In order to make better use of electromagnetic waves and eliminate their negative effects, metamaterial absorbers have become a major research direction. This is a device that converts electromagnetic wave energy incident on its surface into other energy to deplete it through special structures and materials. Its particularity based on the application of metamaterials, and its unique electromagnetic properties compared with natural materials make it has great significance in the electromagnetic field. In this paper, the current research status of supermaterial absorbers at home and abroad will be introduced through the structures, mechanisms and materials of the absorbers. For the structures, it mainly introduces two types of tiled-array structure and three-dimensional structure. For the absorption mechanisms, it mainly introduces the frequency selection surface, electromagnetic resonance and surface plasma. For the materials, it introduces metal materials, ferrite materials, carbon materials and new materials in detail. With the continuous innovation in the field of materials and the unremitting efforts of researchers, we believed the absorbing device will be applied to more and more fields with more perfect performances and shine in both the civilian and military fields.

## Keywords

Metamaterials, Absorber, Graphene, Absorbing Mechanism

---

# 超材料吸波器的研究进展

柴佳丽, 鞠艳杰\*

大连交通大学电气信息工程学院, 辽宁 大连  
Email: 1961185114@qq.com, \*746610878@qq.com

收稿日期: 2019年6月3日; 录用日期: 2019年6月21日; 发布日期: 2019年6月28日

---

\*通讯作者。

## 摘要

为了更好的利用电磁波并消除其负面作用, 超材料吸波器成为一大研究方向。这是一种通过特殊结构和材料可以将入射到其表面的电磁波能量转化为其他能量损耗掉的器件, 其特殊性在于超材料的应用, 与天然材料相比独特的电磁特性使得它在电磁领域具有重大意义。本文将从吸波器的结构、机理、材料三方面来介绍目前国内外超材料吸波器的研究现状。针对吸波器结构主要介绍平铺阵列结构和立体结构两大类; 针对吸波器吸波机理, 主要介绍频率选择表面、电磁谐振和表面等离子体三方面; 针对吸波器材料将从金属材料、铁氧体材料、碳材料和新型材料四方面入手进行详细介绍。随着材料领域的不断革新和研究人员的不懈努力, 相信吸波器将会在性能上更加完备, 应用于更多领域, 在民用和军事领域中都大放异彩。

## 关键词

超材料, 吸波器, 石墨烯, 吸波机理

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

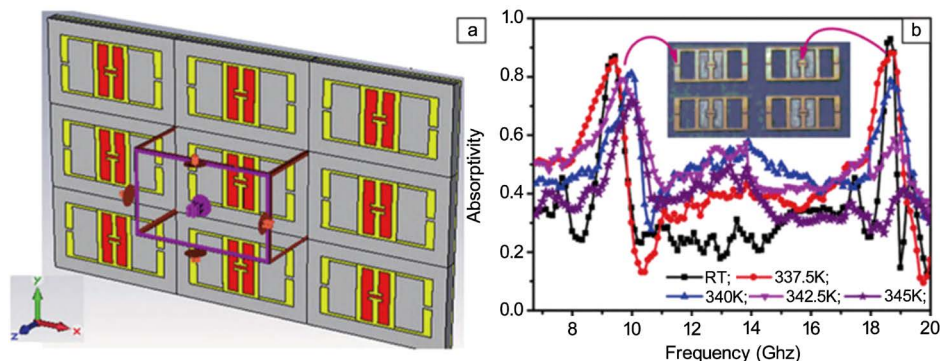
无论是从医学上的透视成像、放疗到工业上的测距、通信, 还是从微波炉等家用电器到军事上信息化战争的应用, 电磁波都展示了它举足轻重的作用。然而, 科技是把双刃剑, 电磁波被广泛应用背后也存在着诸多隐患[1]: 电子元器件之间的干扰、电磁信息泄露、电磁辐射威胁人体健康等。目前电磁屏蔽大都采用反射机制, 会造成二次电磁污染, 所以研究以吸波机制为主的吸波体是最有效的电磁防护措施。此外, 在军事领域, 电磁波吸收设备在日益重要的隐身和电磁兼容(EMC)技术中也占有一席之地, 已成为现代化军事中电子对抗的法宝和秘密武器之一。基于以上诉求, 越来越多的科学家投入到吸波器的研究中。

除了科研人员的努力, 推动吸波器不断发展的另一大原动力就是材料领域的推陈出新, 其中超材料因具有超常的物理性质而成为主要的研究对象。它本质上是一种单元结构尺寸远远小于工作波长的人工周期性结构, 其基本结构单元的谐振特性可以决定相关电磁参数[2]。研究者可以通过改变结构单元来调控超材料的等效介电常数和等效磁导率, 从而改变器件对电磁波的响应[3]。超材料吸波器(MMA)是通过独特的结构和材料将入射电磁波的能量损耗掉, 减少反射和透射, 从而达到吸波的效果。本文将从结构、机理、材料三方面总结近年来国内外对于超材料吸波器的研究进展。

## 2. 国内外发展现状

### 2.1. 吸波器的结构

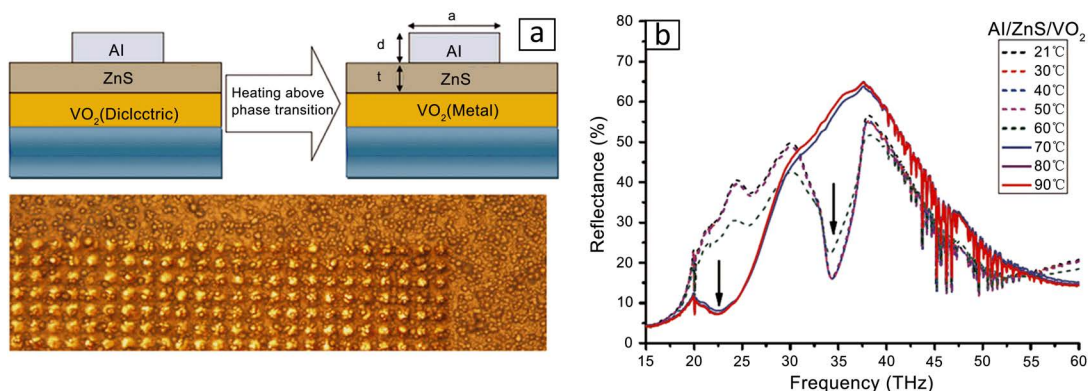
超材料吸波器从结构角度可大致分为平铺阵列结构和多层叠加立体结构。平铺阵列结构就是同一单元结构的周期性排列, 例如 Wen 曾提出的基于  $\text{VO}_2$  薄膜的混合超材料吸波器[4], 其示意图和电磁特性如图 1 所示, 由内外两种结构的电开口谐振环(eSRR)和放置在内环与基板之间的  $\text{VO}_2$  薄膜构成, 可以实现双频点吸波。



**Figure 1.** (a) Schematic of the absorber sheet with VO<sub>2</sub> patches; (b) Measured absorption curves of the VO<sub>2</sub>-based MA with respect to the different temperature [4]

**图 1.** (a) 加有 VO<sub>2</sub> 贴片的吸波器示意图; (b) 不同温度下 VO<sub>2</sub> 基超材料吸波器的实测吸收曲线[4]

多层立体结构的应用也很广泛, Naorem 等设计可调超材料吸波器就是典型的多层立体结构[5], 其结构示意图与电磁特性曲线如图 2 所示, 结构单元包括顶部的 Au、中间的 ZnS 介质层和底部的 VO<sub>2</sub> 接地地板三部分, 顶层的金和介质层同时保持电谐振和磁谐振模式, 而底层的 VO<sub>2</sub> 作为反射地板, 实现了超材料电磁性能的温度可调。多层结构的应用不仅大大增加设计的灵活性和吸波器的可调性, 对于如何实现大频率范围可调也提供了一种思路。



**Figure 2.** (a) The upper part: the structure of the switchable metamaterial unit. The lower part: optical microscopic image of a three-layer structure fabricated in a retroreflective mode; (b) Measured reflectance of the metamaterial with insulating and metallic VO<sub>2</sub> phases at different temperatures [5]

**图 2.** (a) 上部: 可切换超材料单元结构示意图, 下部: 在反射模式下制造的三层结构的光学显微图像; (b) 不同温度下具有绝缘和金属相的 VO<sub>2</sub> 超材料的实测反射率[5]

## 2.2. 吸波器吸波机理

平铺阵列结构的吸波器可以看做是在介质板上周期性地覆盖了一层固定形状的金属层[6], 即频率选择表面(FSS)。FSS 本身不吸收能量, 但可以滤波, 其频响特性会随着频率的变化而变化, 体现为在一定频段内反射电磁波而在另一频段内透射电磁波[7]。当 FSS 处于谐振频率时, 会对入射电磁波呈全反射或全透射特性。一般地, FSS 会被固定在介质基底上或嵌入介质中, 介质板不仅可以起到支撑 FSS 的作用, 其厚度和介电常数也会影响 FSS 的谐振频率[8]。

吸波器立体结构和周期结构的基本单元都可看做典型的谐振器-介质-金属板夹层结构。顶层的谐振器包括方形谐振环(SR)、圆形谐振环(RR)、开口谐振环(SRR)等谐振器及其衍生或组合结构, 它们与底层的金属板由一层介质分隔, 可等效为一个电偶极子, 入射电磁波会使谐振环积累电荷, 激发电

磁谐振；当电磁波处于谐振频率时，吸波器等效阻抗与自由空间的波阻抗实现匹配，最大程度吸收电磁波，依靠吸波材料的电极化和磁极化方式损耗电磁波。而且金属板的厚度远远大于电磁波的集肤效应，反射所有电磁波，不仅可以实现零透射，还可以使反射电磁波与入射电磁波发生相消干涉，提高吸收率。

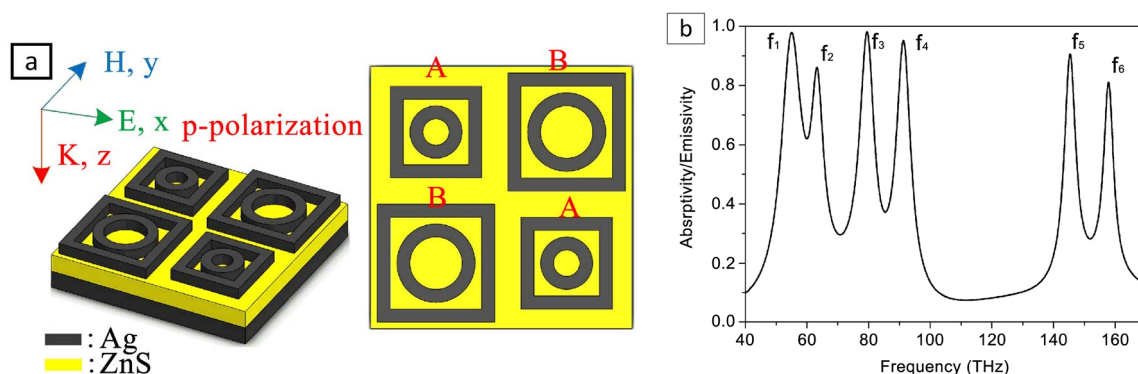
金属表面存在着大量自由电子，在外界电磁场的作用下会发生集体振荡，产生沿着金属和介质表面传播的特殊表面电磁波(即表面等离子体 SP) [9]，石墨烯在太赫兹波段也支持表面等离子体[10]，该波是一个消逝波，其场分布在沿着界面方向是高度局域的。在特定条件下，入射电磁波与振荡电子会发生表面等离子体共振，产生的表面等离子波与入射波耦合，可以增强亚波长中的波吸收能力[11]。

### 2.3. 按材料分类

吸波材料通常使用超材料或掺杂有超材料的半导体介质，材料的选取也随着化学领域的创新经历了一系列的沿革。本节将从金属材料、铁氧体材料、碳材料和新型材料四类入手，总结近年来超材料吸波器的发展现状。

#### 2.3.1. 金属材料

可以应用于吸波器的金属材料包括纯金属和金属化合物。Lei Zhao 等人结合谐振器共面方法和近场耦合思想提高了高阶电子六极模的吸收率，实现了六频点吸波，其单元结构和吸收率图像如图 3 所示。实验人员将顶层的银分别换成金、铝和铜后，发现高阶电子六极模的吸收率仍有显著提高[12]。



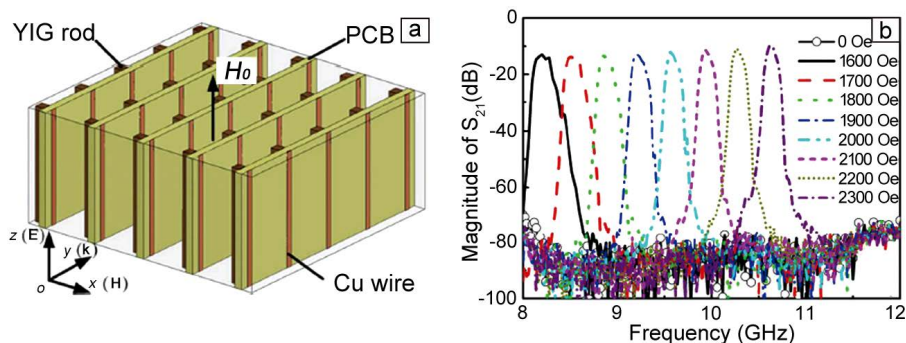
**Figure 3.** (a) Schematic of our designed MPA consisting of two different sized OSIRCRs A and B; (b) The corresponding spectral absorptivity [12]

**图 3.** (a) 我们设计的由两个不同大小的外方内圆谐振器 A 和 B 组成的超材料完美吸波器示意图；(b) 相应的光谱吸收率[12]

Li 等制造出了一种将铋化锑(InSb)半导体嵌入到亚波长金属孔阵列的超材料滤波器[13]。Luo 等基于 Zhao 等的实验[14]设计了一种基于钛酸锶(SrTiO<sub>3</sub>)的热可调双频段太赫兹吸波器[15]，之后又对现有结构进行了改进，将嵌套的闭合方环谐振器的外环削去四角，实现了三频段吸波[16]。此外，还有 VO<sub>2</sub> (二氧化钒)、砷化镓(GaAs) [17]、氮化铌(NbN) [18]等也可用于吸波器的设计中，篇幅原因在此不做赘述。

#### 2.3.2. 铁氧体材料

Zhao 等早在 2009 年就试验将钇铁石榴石(YIG)铁氧体和铜线组成周期阵列结构，沿着铁氧体棒的长轴方向外加磁场，证实了这种铁氧体基超材料可以通过铁磁共振在共振频率附近产生两个负磁导率区域 [19]，同时由金属线阵列提供负介电常数，产生两个左手通带，其示意图和电磁特性如图 4 所示。



**Figure 4.** (a) Schematic of tunable left-handed material (LHM) consisting of YIG rods and copper wires; (b) S-parameter spectrum of the structure under different applied magnetic fields [19]

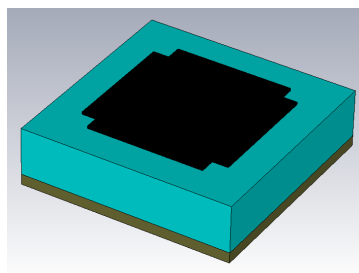
**图 4.** (a) YIG 铁氧体棒与金属线构成的可调左手超材料示意图; (b) 该结构在不同外加磁场下的 S 参数谱[19]

Huang 等尝试将铁氧体作为基板或覆板整合到传统的无源超材料吸波器上[20], 通过比较实验发现: 两种吸波器都有一个明显的吸收峰, 且可通过改变外加磁场的强度实现吸收峰的调谐。Li 等对金属-电介质-金属结构的传统吸波器进行改进, 设计了一种金属-铁氧体-金属结构的超材料吸波器[21], 结果证实了铁氧体的引入可以使该结构在一定的频带范围内具有可调的吸收峰。之后, 该课题组也设计了一种由铁氧体棒阵列和金属板组成的磁可调超材料完美吸波器结构[22], 更加证实了铁氧体基超材料吸波器结构的可行性。

### 2.3.3. 碳材料

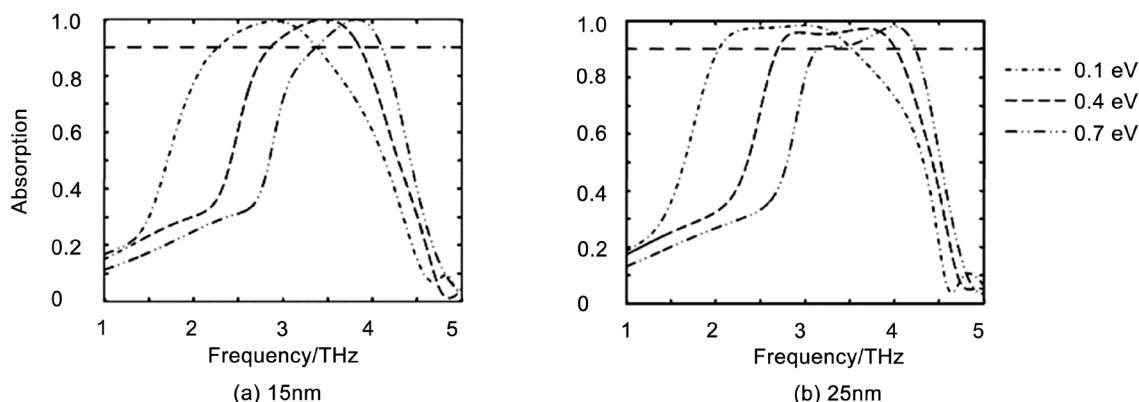
金属材料力学性能和耐疲劳性差, 且易腐蚀; 而铁氧体材料虽然具有磁性和优于金属的阻抗匹配性能, 但机械性能大, 填充量较大, 不满足特定环境下对吸波器轻、薄的要求; 于是碳材料因其低密度、高导电率、高柔性以及良好的化学稳定性和阻抗匹配性等诸多优点脱颖而出, 其中石墨烯尤为突出, 其表面电导率可以通过外置电压、化学掺杂、温度控制等方法进行动态的调节, 从而实现吸波频率的动态调节。

2012 年, J.S.Bunch 团队首次利用石墨烯作为谐振材料进行试验[23], 发现了石墨烯在谐振器件方面的应用潜力; 基于这一发现, 塞尔维亚贝尔格莱德大学的 Borislav 和 Rados Gajic 于 2013 年提出了以石墨烯作为可调谐超材料来代替传统的金属类谐振结构的吸波器[10]。此后, 基于石墨烯的纳米圆盘结构[24]、微带结构[25]、网鱼结构[26]以及石墨烯线和黄金开口线的组合结构[27]等都被证实了可以实现太赫兹波的完美吸收, 张银等人用十字形金属谐振器和双层石墨烯正交带状线结合也实现了与偏振无关的可调谐太赫兹吸波体[27], 但这些吸波器在固定的石墨烯费米能级下, 工作带宽窄, 不利于实际应用。顾钰、王民等人进行了技术改进, 他们利用单层石墨烯结合十字形亚波长金属结构, 通过控制加载在石墨烯上的偏置电压改变石墨烯的化学势, 实现了在太赫兹波段的宽带动态可调吸收[28]。其示意图和吸收曲线分别如图 5、图 6 所示。仿真结果显示, 吸波器的平均吸收带宽高达 1.3 THz, 其中 2.14 THz 至 3.53 THz 到 3.15 THz 至 4.24 THz 之间可实现吸波率 90% 以上的连续动态调节。



**Figure 5.** Structure of absorber based on graphene and metallic sub-wavelength structure [28]

**图 5.** 基于石墨烯结合金属亚波长结构的吸波器结构示意图[28]



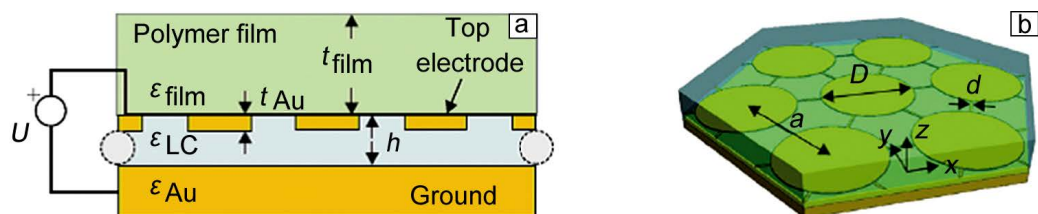
**Figure 6.** Absorption curves at different chemical potentials of graphene, when the thickness of the metallic structure is 15 nm and 25 nm [28]

**图 6.** 表面金属亚波长结构厚度为 15 nm 和 25 nm 时石墨烯处于不同化学势下吸波器的吸收曲线[28]

### 2.3.4. 新型材料

本节新型材料主要介绍变容二极管、液晶和水超材料三种。变容二极管是一种利用 PN 结电容(势垒电容)与其反向偏置电压的依赖关系及原理制成的半导体器件[29]。早在 2013 年, J. Zhao 等人就用变容二极管设计了一种可调超材料吸波体[30]; 2015 年, Zhu 等又验证了将变容二极管放置在开口谐振环开口处成为电可调超材料的猜想[31], 将二极管引入到超材料的设计中, 实现了超材料电可调的超常特性, 为吸波器在微波电路中实际应用提供了指引。

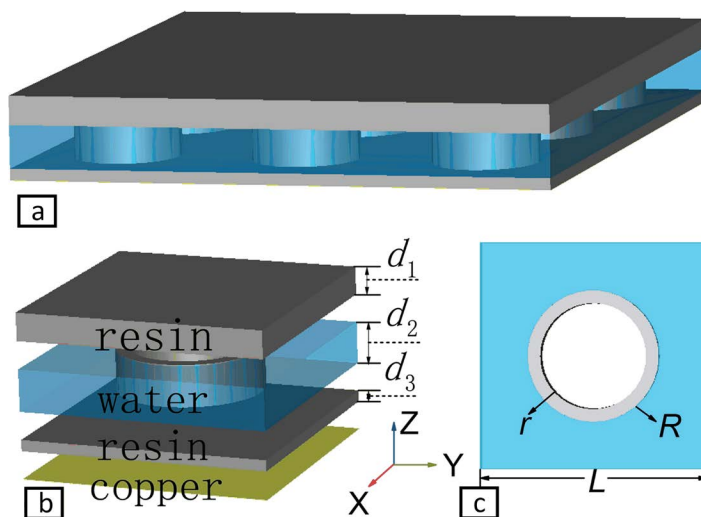
液晶是介于液态与结晶态之间的一种物质状态, 兼有液体和晶体的流动性、各向异性等特性。早在 2007 年, Zhao 等人就将向列液晶(NLC)引入到电可调超材料的设计中, 发现把开口谐振环(SRR)阵列浸入到 NLC 中后, 随着电场强度的增加, NLC 排列趋于有序, 其负磁导率频域向低频移动[32], 证明了 NLC 用于电磁领域的可行性。此后, Hokmabadi 等研究了基于各向异性液晶, 使用互补开口谐振环(CSRR)作为结构单元的可调太赫兹超材料吸波器。Isic 等提出了一种基于 NLC 的电可调太赫兹超材料吸波器[33], 结构示意图如图 7 所示, 也验证了该吸波器极化不敏感的特性。



**Figure 7.** (a) The proposed tunable absorber: cross section; (b) Bird's-eye view of the hexagonal unit cell and its six nearest neighbors with scalable features [33]

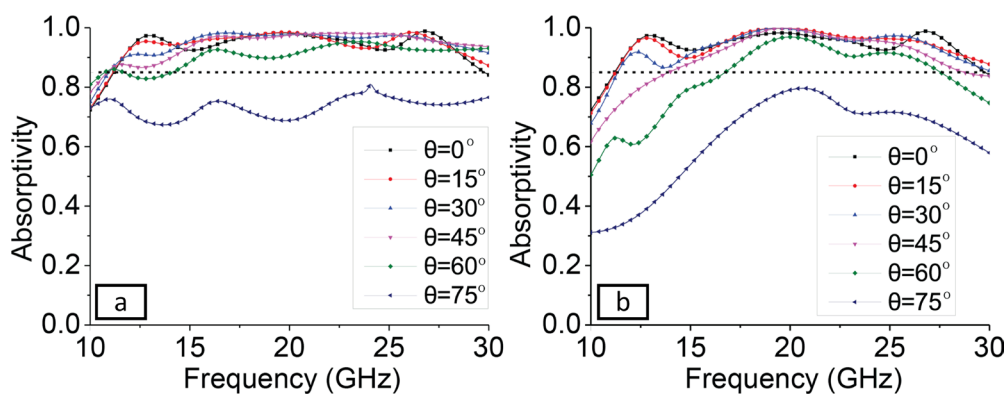
**图 7.** (a) 可调吸波器的横截面视图; (b) 六角形单元格及 6 个最邻近的具有可扩展特征的结构鸟瞰图[33]

水作为自然界中最容易获得的材料之一, 具有成本低, 环境污染小, 易于获取等优点, 流动性和高介电常数使得它支持多个散射共振, 是最理想的可调谐全电介质超材料[34] [35]。2015 年, Yoo 等人首次提出了一种使用周期性水滴的超材料吸收体, 开创了水超材料研究的先河[36]。Pang 等人提出了一种基于水基底的热可调谐宽带超材料吸收体[37], 最近, 研究发现利用“棒状”水谐振器的水基超曲面可以通过旋转超曲面来实现微波的有效切换[38], 水立方也被用于宽带微波吸收器的研究[39]。Xie 等人设计了一种亚波长水超材料吸收器, 由铜基底、树脂和水组成, 能够在微波频率下实现超宽带广角完美吸收, 且对温度的依赖性很弱, 其结构示意图和吸收率分别如图 8、图 9 所示[40]。



**Figure 8.** (a) Schematic diagram of the water metamaterial absorber; (b) Layer by view of the unit cell; (c) Cut plane view of the water layer [40]

**图 8.** (a) 水超材料吸收体的示意图; (b) 单元电池的逐层视图; (c) 水层的切割平面图[40]



**Figure 9.** Absorptivity of the water metamaterial absorber for oblique incidence waves with incident angle from  $0^\circ$  to  $75^\circ$ . (a) TE mode and (b) TM mode [40]

**图 9.** 倾斜入射波的水超材料吸收体的吸收光谱, 入射角为  $0^\circ$  至  $75^\circ$  (a) TM 模式和(b) TE 模式[40]

### 3. 结语

在拓展带宽, 保证吸收率的基础上实现吸收频率的调节是吸波器未来发展的主要性能目标, 而一些特殊场合中, 对吸波器还有轻、薄、高效的要求, 这就使得吸波器的发展还有很长一段路要走。但我们始终相信, 将来吸波器会成功地应用于各个领域, 为人类生活提供有力的保障!

### 参考文献

- [1] 席嘉彬. 高性能碳基电磁屏蔽及吸波材料的研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [2] 王玲玲. 新型电磁超材料吸波器研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [3] 陈曦. 超材料的电磁特性与应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 国防科学技术大学, 2013.
- [4] Wen, Q., Zhang, H., Yang, Q., *et al.* (2012) A Tunable Hybrid Metamaterial Absorber Based on Vanadium Oxide Films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **45**, Article ID: 235106. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/23/235106>
- [5] Naorem, R., Dayal, G., Ramakrishna, S.A., *et al.* (2015) Thermally Switchable Metamaterial Absorber with a  $\text{VO}_2$  Ground Plane. *Optics Communications*, **346**, 154-157. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.01.075>

- [6] 李婧. 新型频率选择表面的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [7] 李晨晨. FDTD 方法在新型人工平面电磁结构设计中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [8] 许莹莹. 基于石墨烯器件和大带宽频率选择表面的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [9] Atwater, H.A. and Polman, A. (2010) Plasmonics for Improved Photovoltaic Devices. *Nature Materials*, **9**, 205. <https://doi.org/10.1038/nmat2629>
- [10] 李笑笑. 基于石墨烯谐振环的可调吸波器[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2017.
- [11] 廖昌龙. 基于石墨烯表面等离子激元的电磁干涉效应研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [12] Zhao, L., Niu, Q., He, Z. and Dong, S. (2018) Absorptivity Enhancement of Higher-Order Electric Sextupole Plasmonic Modes by the Outer-Square Inner-Ring Coupled Resonators. *Optical Materials Express*, **8**, 3359-3372. <https://doi.org/10.1364/OME.8.003359>
- [13] Li, W., Kuang, D., Fan, F., et al. (2012) Subwavelength B-Shaped Metallic Hole Array Terahertz Filter with InSb Bar as Thermally Tunable Structure. *Applied Optics*, **51**, 7098-7102. <https://doi.org/10.1364/AO.51.007098>
- [14] Zhao, Q., Du, B., Kang, L., et al. (2008) Tunable Negative Permeability in an Isotropic Dielectric Composite. *Applied Physics Letters*, **92**, Article ID: 051106. <https://doi.org/10.1063/1.2841811>
- [15] Luo, C.Y., Li, Z.Z., Guo, Z.H., et al. (2015) Tunable Metamaterial Dual-Band Terahertz Absorber. *Soild State Communications*, **222**, 32-36. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2015.08.009>
- [16] Luo, C.Y., Li, D., Luo, Q., et al. (2015) Design of a Tunable Multiband Terahertz Waves Absorber. *Journal of Alloys and Compounds*, **652**, 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.089>
- [17] Valmorra, F., Scalari, G., Maissen, C., et al. (2013) Low-Bias Active Control of Terahertz Waves by Coupling Large-Area CVD Grapheme to a Terahertz Meta-Materials. *Nano Letters*, **13**, 3193. <https://doi.org/10.1021/nl4012547>
- [18] Li, C., Zhang, C., Hu, G., et al. (2017) Electrical Dynamic Modulation of THz Radiation Based on Superconducting Metamaterials Editors-Pick. *Applied Physics Letters*, **111**, Article ID: 092601.
- [19] Zhao, H., Zhou, J., Kang, L., et al. (2009) Tunable Two-Dimensional Left-Handed Material Consisting of Ferrite Rods and Metallic Wires. *Optics Express*, **17**, 13373-13380. <https://doi.org/10.1364/OE.17.013373>
- [20] Hang, Y., Wen, G., Zhu, W., et al. (2014) Experimental Demonstration of a Magnetically Tunable Ferrite Based Metamaterial Absorber. *Optics Express*, **22**, 16408-16417. <https://doi.org/10.1364/OE.22.016408>
- [21] Li, W., Wei, J., Wang, W., et al. (2016) Ferrite-Based Metamaterial Microwave Absorber with Absorption Frequency Magnetically Tunable in a Wide Range. *Materials & Design*, **110**, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.118>
- [22] Lei, M., Feng, N., Wang, Q., et al. (2016) Magnetically Tunable Metamaterial Perfect Absorber. *Journal of Applied Physics*, **119**, Article ID: 244504. <https://doi.org/10.1063/1.4954224>
- [23] Paul, M.J., Tomaino, J.L., Kevek, J.W., et al. (2012) Terahertz Imaging of Inhomogeneous Electrodynamics in Single-Layer Graphene Embedded in Dielectrics. *Applied Physics Letters*, **101**, 197. <https://doi.org/10.1063/1.4749280>
- [24] Thongrattanasiri, S., Koppens, F.H.L. and Garcia, F.J. (2012) Complete Optical Absorption in Periodically Patterned Graphene. *Physics Review Letters*, **8**, Article ID: 047401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.047401>
- [25] Alae, R., Farhat, M., Rockstuhl, C., et al. (2012) A Perfect Absorber Made of a Graphene Micro-Ribbon Meta-Material. *Optics Express*, **20**, 28017-28024. <https://doi.org/10.1364/OE.20.028017>
- [26] Andryieusk, A. and Lavrinenko, A.V. (2013) Graphene Metamaterials Based Tunable Terahertz Absorber: Effective Surface Conductivity Approach. *Optics Express*, **21**, 9144-9155. <https://doi.org/10.1364/OE.21.009144>
- [27] Zhang, Y., Feng, Y., Zhu, B., et al. (2014) Graphene Based Tunable Metamaterial Absorber and Polarization Modulation in Terahertz Frequency. *Optics Express*, **22**, 22743-22752. <https://doi.org/10.1364/OE.22.022743>
- [28] 顾钰, 王民, 蒲明博, 胡承刚, 罗先刚. 基于石墨烯结合亚波长金属结构的太赫兹宽带动态吸收器[J]. 光电工程, 2016, 43(1): 60-64+70.
- [29] 丁霄. 基于方向图可重构技术的相控阵大角度扫描特性研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [30] Zhao, J., Cheng, Q., Chen, J., Qi, M.Q., Jiang, W.X. and Cui, T.J. (2013) A Tunable Metamaterial Absorber Using Varactor Diodes. *New Journal of Applied Physics*, **15**, Article ID: 043049. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/4/043049>
- [31] Zhu, J., Li, D., Yan, S., et al. (2015) Tunable Microwave Metamaterial Absorbers Using Varactor-Loaded Split Loops. *Europhysics Letters*, **112**, Article ID: 54002. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/112/54002>
- [32] Zhao, Q., Du, B., Kang, L., et al. (2007) Electrically Tunable Negative Permeability Metamaterials Based on Nematic Liquid Crystals. *Applied Physics Letters*, **90**, Article ID: 011112. <https://doi.org/10.1063/1.2430485>
- [33] Isic, G., Vasic, B., Zografopoulos, D.C., et al. (2015) Electrically Tunable Critically Coupled Terahertz Metamaterial



- Absorber Based on Nematic Liquid Crystals. *Physics Review Applied*, **3**, Article ID: 064007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.3.064007>
- [34] Cai, X., Zhao, S., Hu, M., Xiao, J., Zhang, N. and Yang, J. (2017) Water Based Fluidic Radio Frequency Metamaterials. *Applied Physics*, **122**, Article ID: 184101. <https://doi.org/10.1063/1.4986120>
- [35] Odit, M., Kapitanova, P., Andryieuski, A., Belov, P. and Lavrinenko, A.V. (2016) Experimental Demonstration of Water Based Tunable Metasurface. *Applied Physics Letters*, **109**, Article ID: 011901. <https://doi.org/10.1063/1.4955272>
- [36] Yoo, Y.J., Ju, S., Park, S.Y., Kim, Y.J., Bong, J., Lim, T., Kim, K.W., Rhee, J.Y. and Lee, Y. (2015) Metamaterial Absorber for Electromagnetic Waves in Periodic Water Droplets. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 14018. <https://doi.org/10.1038/srep14018>
- [37] Pang, Y., Wang, J., Cheng, Q., Xia, S., Zhou, X.Y., Xu, Z., Cui, T.J. and Qu, S. (2017) Thermally Tunable Water-Substrate Broadband Metamaterial Absorbers. *Applied Physics Letters*, **110**, Article ID: 104103. <https://doi.org/10.1063/1.4978205>
- [38] Jacobsen, R.E., Lavrinenko, A.V. and Arslanagic, S. (2018) Water-Based Metasurfaces for Effective Switching of Microwaves. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **17**, 571-574. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2803214>
- [39] Zhao, J., Wei, S., Wang, C., Chen, K., Zhu, B., Jiang, T. and Feng, Y. (2018) Broadband Microwave Absorption Utilizing Water-Based Metamaterial Structures. *Optics Express*, **26**, 8522-8531. <https://doi.org/10.1364/OE.26.008522>
- [40] Xie, J., Zhu, W., Ivan, D., *et al.* (2018) Water Metamaterial for Ultra-Broadband and Wide-Angle Absorption. *Optics Express*, **26**, 5052-5059. <https://doi.org/10.1364/OE.26.005052>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-6980, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [iae@hanspub.org](mailto:iae@hanspub.org)