

综述

电磁超材料吸波体的研究进展*

王彦朝 许河秀[†] 王朝辉 王明照 王少杰

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

(2020年3月10日收到; 2020年4月1日收到修改稿)

电磁吸波技术在军用和民用领域得到了广泛应用, 但传统吸波技术不能满足现代吸波材料新的需求, 基于超材料的吸波体具有结构简单、轻薄、吸收率高等优点, 并可以实现对电磁波的灵活调控, 使得电磁吸波领域获得了飞速发展. 本文针对电磁超材料吸波研究进行了综述, 首先介绍了电磁超材料吸波方法与机理, 指出了研究中遇到的瓶颈问题. 其次针对吸波关键技术难题分别从多频及宽频带吸波、极化和角度不敏感吸波、动态可调吸波三个方面介绍了目前电磁超材料吸波体的研究进展. 尽管研究学者们在超材料吸波方向已做了很多工作, 仍面临着诸多问题和挑战. 为了更好地预示未来研究, 本文从高性能、多功能、新三维结构三个角度对超材料吸波体的研究方向进行了展望, 包括突破波长限制的低频超薄宽带超材料吸波体、能应对复杂环境的多功能集成超材料吸波体以及随3D打印技术而兴起的新型三维结构超材料吸波体. 最后结合超材料在隐身领域的应用进一步总结了超材料吸波应用研究的发展趋势.

关键词: 超材料吸波, 宽频带, 角度不敏感**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs**DOI:** 10.7498/aps.69.20200355

1 引言

现代战争环境错综复杂, 对武器装备的隐身性能和电磁兼容要求也日益提高, 传统雷达吸波材料已经难以满足“薄、轻、宽、强”的要求. 随着电子设备的不断发展, 多天线干扰问题、电磁辐射和污染问题也愈加严重. 电磁吸波技术不仅可以为隐身技术、电磁兼容提供解决方案, 也可以用来抑制电磁辐射污染, 此外在能量收集、传感和探测等诸多方面也有广阔的应用前景^[1-3], 因而无论在军用还是民用领域都受到广泛关注和研究.

所谓电磁吸波是指通过使用高损耗材料或强谐振结构将入射电磁波的能量耗散和吸收掉. 通常来说电磁吸波需满足两个基本条件: 一是通过阻抗

匹配使入射波最大限度地进入材料内部, 二是通过良好的衰减特性将能量耗散掉. 电磁吸波技术是通过涂覆吸波剂和吸波结构来实现雷达性能和武器装备隐身性能的提升^[3]. 由于传统吸波剂(如铁磁性材料等)性能不足推动了纳米材料等新型吸波材料的研究^[4], 而吸波结构具有承载和降低雷达散射截面(radar cross section, RCS)的双重功效, 自第二次世界大战起就引起了国内外研究人员的广泛兴趣^[5]. 经典的吸波结构如 Salisbury 屏、Jaumann 层吸波体、Dallenbach 吸波结构等^[6-8], 一直存在体积大、带宽窄的问题, 经研究发现吸收带宽随电阻屏层数的增加会有所改善, 但急剧增加的厚度和有限的参数调控自由度使应用十分受限, 难于推广. 超材料的出现一定程度上为上述问题提供了部分解决方案. 与传统吸波技术相比, 基于超

* 中国科协青年人才托举工程(批准号: 17-JCJQ-QT-003)、国防科技项目基金(批准号: 2019-JCJQ-JJ-081)、陕西省自然科学基金重点项目(批准号: 2020JZ-33)、空军工程大学校长基金重点项目(批准号: XNLX19030601)和校长基金研究生类项目(批准号: XZJY2019040)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: hxxuellen@gmail.com

材料的吸波体具有结构简单、轻薄、吸收率高等优点,并可以实现对电磁波的灵活调控,在国防领域具有潜在应用价值,成为电磁吸波技术的重要研究方向.

2 电磁超材料吸波方法与瓶颈

电磁超材料 (metamaterial) 是指人们依据电磁理论设计出来的具有某种电响应或者磁响应的“特异”人工材料,通常由亚波长结构单元按周期或有规律的非周期的方式排列组合而成^[9]. 从最初理论预测^[10]到实验验证^[11,12],超材料经过人工设计可呈现出诸多自然界不存在的“特异”性质,如负折射率、反常多普勒效应、反常切连科夫辐射等^[13–15]. 在经历短暂质疑后超材料被人们所接受,并两度被 *Science* 杂志评为年度十大科技进展之一. 经历了近二十年的发展,从左手材料、完美透镜、隐身斗篷等早期应用研究^[16–20],到当下备受瞩目的相位梯度超表面^[21–23]、可编码超材料^[24–26]等新概念,超材料已不仅仅是一种新型材料形态,更代表着一种全新的材料设计理念. 通过设计单元的结构、排布方式以及设置电磁参数就能够实现对散射电磁波的频率、极化、幅度和相位等特性的灵活调控,因此超材料被广泛应用于多功能器件、电磁隐身、极化控制与高性能天线等领域^[27–32].

在超材料的早期研究中,人们关注的重点是如何解决高损耗和强色散的问题. 由于谐振结构产生的高损耗曾为超材料在潜在应用上带来很大难题,这反而成为超材料吸波体应用的优势. 超材料吸波体主要是利用自身结构的谐振损耗吸收电磁波. 根据损耗机理不同可以将吸波材料分为电阻损耗型、介质电损耗型和磁损耗型^[33–37]. 磁损耗型吸波材料通常采用铁氧体、羰基铁粉等具有磁性的材料作为吸收剂,相比而言具有厚度小、吸波频带宽、低频吸波效果好等优点,但是密度大、质量重^[35],且一般磁性会受到温度的限制,在高温下会失去吸波性能,所以磁性吸波材料通常只应用于中常温电磁吸波. 而高温吸波材料大多选取电损耗型吸波材料(包括碳化硅、碳纤维、石墨等),主要通过设计多层材料的电磁匹配、调控材料的复介电常数等方式来提高吸波性能^[36].

超材料的吸波性能可通过吸波率 $A(\omega)$ 来衡量,它与反射率 $R(\omega)$ 和透射率 $T(\omega)$ 的关系式如下:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (1)$$

人们据此提出用阻抗匹配法设计吸波体,通过合理设计超材料的单元结构使其等效电磁参数(介电常数和磁导率)相等,使其满足下面的阻抗匹配关系:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{\text{eff}}}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}}}} = Z_0, \quad (2)$$

其中, Z_1 为材料的波阻抗, Z_0 为自由空间中波阻抗,通过匹配使入射波无反射地进入到吸波结构中,而能量损耗由复等效电磁参数的虚部来贡献,故通过对虚部进行设计可使能量最大限度耗散,从而减少透射,最终实现完美吸波. 超材料完美吸波体是由 Landy 等^[33]于 2008 年首次提出,他们利用如图 1 所示的电开口谐振环、介质层和金属线作为单元结构率先实现了在微波频段的完美吸波,仿真结果表明该结构在 11.65 GHz 的吸收率高达 99%,且不受传统吸波厚度限制,尺寸较小,但仍存在频带窄、极化敏感、调控不灵活等不足. 不过这项开创性工作很快激发了其他频率领域的相关工作,随着研究的深入已经覆盖从微波到可见光等各个频段^[38–41].

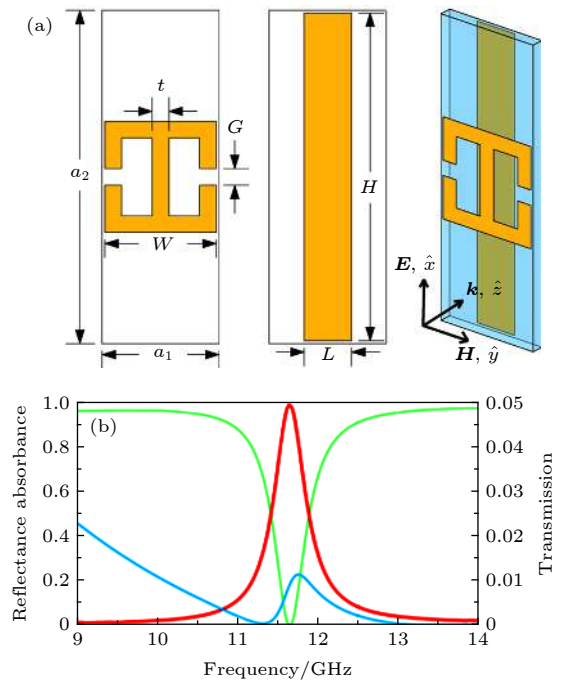


图 1 超材料完美吸波体 (a) 单元结构示意图; (b) 吸波性能的仿真结果

Fig. 1. Perfect metamaterial absorber: (a) The schematic of a unit cell; (b) simulation results for the absorption.

为了更好地设计和优化吸波结构,研究者们先后提出了等效媒质理论、等效电路理论、多级反射

干涉理论等多种方法来对超材料吸波机理进行分析[42-48]. 由于超材料的周期单元是亚波长结构, 可以将超材料整体视为均匀媒质, 通过等效媒质理论[43,44]来进行分析, 其等效电磁参数可利用反演法[45,46]由散射参数逆向推出, 这种方法起初作为验证负折射率的有效手段广受欢迎, 但其缺乏对单元结构间的相互作用分析. 进而人们基于传输线理论提出了等效电路法[37,47], 将吸波体的物理结构等效为含有集总参数的电路来对吸波特性进行定量分析, 可以更直观地描述和理解结构所起的作用和工作机理. 而对于多层结构, 可用多级反射干涉法对传输过程进行分析[48]. 电磁波的反射和透射系数分别用 $\tilde{r}_{12} = r_{12}e^{j\phi_{12}}$ 和 $\tilde{t}_{12} = t_{12}e^{j\phi_{12}}$ 来表示, 透射波以 $\tilde{\beta} = \beta_r + i\beta_i = \sqrt{\tilde{\epsilon}_{\text{spacer}}}k_0d$ 为相位继续传输, 总反射系数可根据所提取的吸波材料界面的反射和透射系数来算出:

$$\tilde{r} = \tilde{r}_{12} - \frac{\tilde{t}_{12}\tilde{t}_{21}e^{i2\tilde{\beta}}}{1 + \tilde{r}_{21}e^{i2\tilde{\beta}}}, \quad (3)$$

其他分析方法包括谐振腔理论、Fabry-Perot 腔体理论、Mie 散射理论和模式分析方法等[49-51]. 虽然上述方法在应用中仍有不足, 但利用仿真软件通过数值算法优化可以指导结构设计并弥补性能不足. 就结构而言可将超材料吸波体大致分为三类: 单层结构、多层结构和三维立体结构. 目前最常见的是“三明治”型超材料吸波体, 即由“金属-介质-金属”三层构造, 在介质板表层刻蚀金属图案以提供电谐振, 底部采用金属板以防止电磁波透过, 金属板与表层金属结构耦合形成磁谐振器. 虽然这种构造普遍能够接近完美吸波, 但基于强谐振理论只能实现窄带吸波, 而且平面结构对于极化和角度都比较敏感[52], 不能保持良好的稳定性. 针对以上瓶颈问题, 目前的主要研究方向有多频及宽频吸波、极化和角度不敏感电磁吸波、动态可调吸波等, 主要研究内容包括: 理论与机制研究、结构设计及实验研究、应用和测试技术研究等. 超材料吸波体的可设计性为新型器件的发展提供了新的机遇.

3 电磁超材料吸波体研究进展

“完美吸波体”虽然吸波效率高但仍存在带宽窄、极化敏感、角度敏感、调控不灵活等关键技术难题, 为了攻克上述难题, 研究人员后续进行了大

量有益探索, 这也深入推进了电磁超材料吸波体的相关研究, 下面分别从多频及宽频带、极化和角度不敏感、可调性等方面对研究进展进行详细综述.

3.1 多频及宽频超材料吸波体

早期的多频带吸波体可以通过设计具有多模式谐振的独特单元结构[53-55]或者将具有相同拓扑结构的单元通过嵌套或阵列排布等方式进行复合[56-58]来实现. 如图 2 所示, Xu 等[55]将分形结构引入超材料吸波体设计, 利用分形结构的自相似性并通过巧妙构建多个局域谐振回路, 获得了 S、C 和 X 波段同时工作的三频吸波体, 三个工作频段内吸收率均大于 90% 且具有极化不敏感和宽角度入射特性, 上述性能得益于吸波体的对称性以及分形结构的自我填充特性, 使得单元结构非常电小, 一定程度上具有大角度吸波特性. Shen 等[56]设计出一款三频段超材料吸波体, 其吸波单元结构是由三个不同尺寸的方形金属环嵌套而成, 最终在 4.06, 6.73 和 9.22 GHz 分别实现了 99%, 93%, 95% 的吸收率. 多频吸波体已被广泛应用在天线、滤波器、电磁屏蔽等领域.

在多频带的基础上, 研究人员考虑利用多个或者多层工作在相邻频点的谐振单元复合在一起来扩展吸波带宽, 例如 Huang 等[59]设计了如图 3(a)所示的宽频吸波体, 其单元结构由不同几何尺寸的 I 型结构组成, 每个 I 型结构都会引入一个吸收峰, 最终材料整体呈现的吸波特性就是通过这几个吸收峰的叠加来实现. 而由于吸收峰数目和单个带宽的限制, 使得吸收峰组合的方式所拓展的带宽有限. 研究学者提出多层吸波的方案, 可以通过设计结构参数使得每层的折射率不同, 利用入射波与反射波干涉相消达到吸波的目的[60-68]. 2012 年 Ding 等[63]利用超材料的慢波特设计了一款多层金字塔结构的超宽带吸波体, 垂直入射下可在 7.8—14.7 GHz 实现 90% 以上的吸收率, 并在入射角小于 60° 范围内保持良好吸收. 相比较而言, 采用多层堆叠的方法虽然能够有效拓展带宽, 但增加了吸波体的厚度, 更为复杂的结构也为制造带来了困难. 在尺寸一定的条件下, 利用加载集总元件的方式可以改善品质因数从而有效拓展带宽[65], 而集总元件的引入阻碍了吸波体单元的小型化. 此外, 利用电阻膜在微波频段频散特性弱的特点, 或利用人工表面等离激元 (spoof surface plasmon

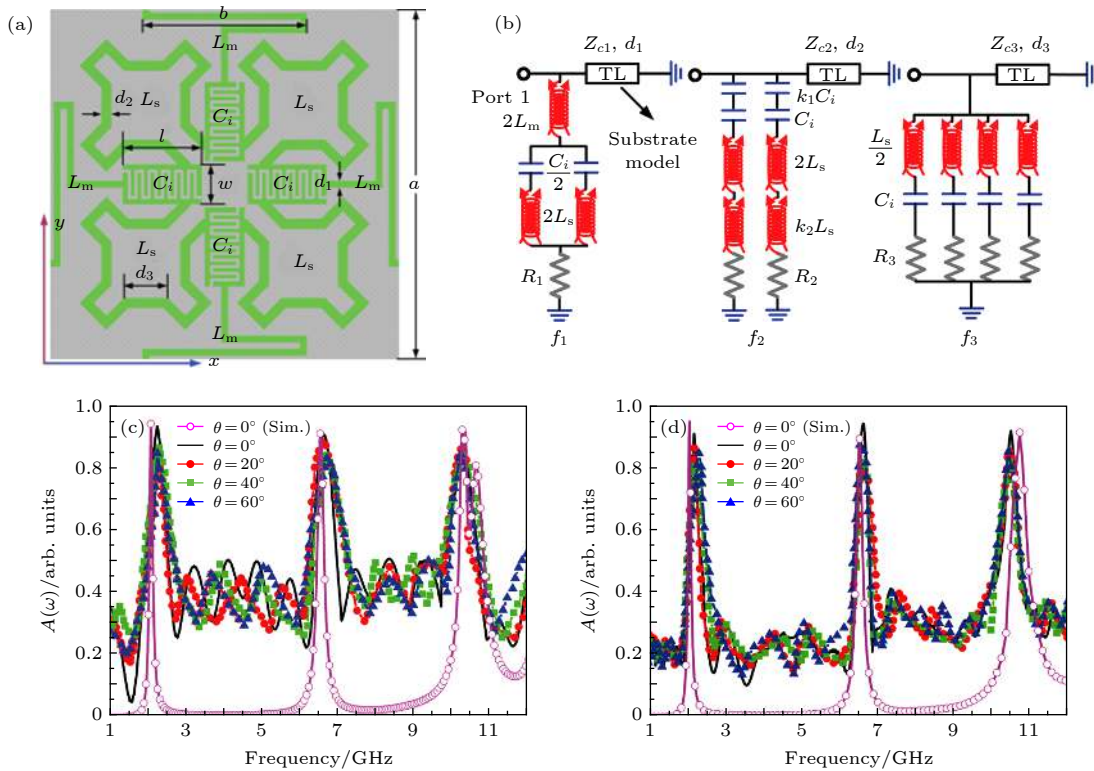


图 2 三频带超材料吸波体 (a) 单元拓扑结构; (b) 等效电路模型; (c) 横电波 (transverse electric, TE) 模式下在不同入射角下测得的吸收率与频率的关系; (d) 横磁波 (transverse magnetic, TM) 模式下在不同入射角下测得的吸收率与频率的关系^[55]

Fig. 2. Triple-band metamaterial absorber: (a) Topology structure of the element; (b) equivalent circuit models; (c) measured absorption as a function of frequency for TE mode radiation at different angles of incidence; (d) measured absorption as a function of frequency for TM mode radiation at different angles of incidence^[55].

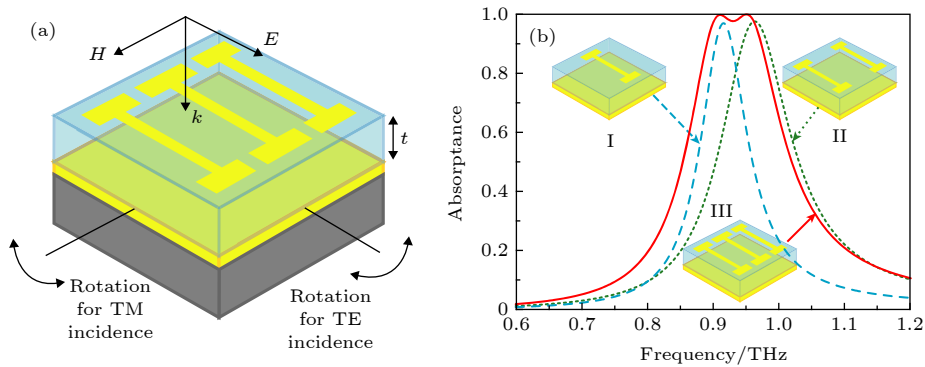


图 3 宽带太赫兹超材料吸波体 (a) 单元结构示意图; (b) 不同 I 型谐振器组合的吸收率^[59]

Fig. 3. Terahertz metamaterial absorbers with broad band absorption: (a) Schematic of the whole unit cell; (b) simulation results of absorption for three different configurations of the I-shaped resonators^[59].

polariton, SSPP) 的方法将入射波束缚在分界面再对其进行耗散, 都实现了宽频吸波^[69–75].

总结起来, 目前超材料吸波主要有以下方法可以拓展带宽, 即平面排布或多层堆叠^[59–63]、加载集总元件^[64–68], 加载电阻膜^[69–72]和基于 SSPP^[73–75]等. 如图 4 所示, Li 等^[76]通过以上多种方法结合实现了一款极化不敏感的宽角宽频吸波体, 在 4.52–25.42 GHz 频段内的吸收率均大于 80%. 除以上主

流方法外, 采用新型结构也可以拓展吸波带宽, 如互补结构超材料、金属树枝型结构、分形几何结构等^[77,78]. 表 1 总结了采用不同方法实现的多频/宽频吸波体, 包括工作频率、10 dB 相对带宽、吸收率、厚度、周期和结构. 当前人们不仅仅关注宽频特性, 同时兼顾其稳定性和可调性, 新的结构和技术仍不断被提出, 丰富和发展了宽频吸波研究, 宽频超材料吸波体将在隐身、探测和成像等领域具有

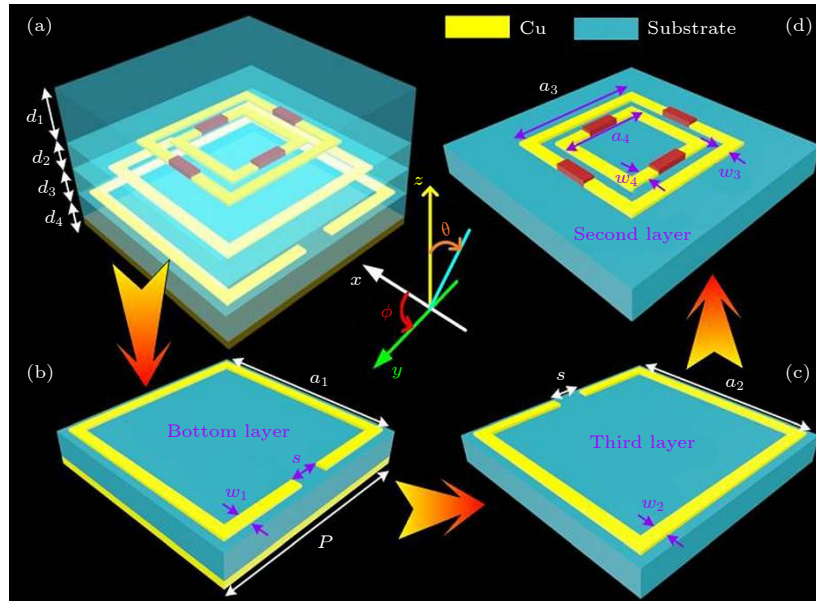


图 4 超宽带完美超材料吸波体单元原理图 (a) 单元三维示意图; (b) 带有开口谐振环 II 的底层结构; (c) 带有开口谐振环 I 的第三层结构; (d) 加载集总电阻的第二层结构^[76]

Fig. 4. Schematic geometry of unit cell for the ultra-broadband perfect metamaterial absorber: (a) the 3 D schematic of a unit cell; (b) the bottom layer with the split ring resonator-II; (c) the third layer with the split ring resonator-I; (d) the third layer with lumped resistances^[76].

表 1 用于实现多频/宽频吸波体的不同方法总结
Table 1. A summary of methods used to create multiple/broadband absorbers.

方法	工作频率	相对带宽	吸收率	厚度	周期	结构	文献
平面排布	30.6—37.5 THz	20.26%	$\geq 80\%$	$0.041 \lambda_L$	$10.8 \mu\text{m}$	“三明治”	[61]
多层堆叠	24.8/25.5 THz	N	$\geq 90\%$	$0.062 \lambda_L$	500 nm	多层结构	[62]
多层堆叠	7.8—14.7 GHz	61.33%	$\geq 90\%$	$0.130 \lambda_L$	11 mm	金字塔结构	[63]
集总元件	5.3—11.2 GHz	70.7%	$\geq 90\%$	$0.077 \lambda_L$	13.6 mm	单层结构	[68]
用电阻膜	7.0—27.5 GHz	118.8%	$\geq 90\%$	$0.093 \lambda_L$	5.5 mm	“三明治”	[69]
用电阻膜	2.0—18.5 GHz	160.97%	N	$0.082 \lambda_L$	11 mm	多层结构	[72]
基于SSPP	7.6—14.7 GHz	63.7%	$\geq 90\%$	$0.177 \lambda_L$	14 mm	非平面结构	[74]
混合方法	4.5—25.4 GHz	139.6%	$\geq 80\%$	$0.075 \lambda_L$	8.4 mm	多层结构	[76]
新型结构	9.05—11.4 GHz	23.0%	$\geq 80\%$	$0.060 \lambda_L$	5 mm	分形结构	[78]

注: 相对带宽指10 dB吸收带宽, λ_L 为最低工作频率所对应的工作波长, N代表没有提及.

可观的应用价值^[79].

3.2 极化和角度不敏感吸波体

通常吸波性能会受到极化和入射角度的影响, 关于极化不敏感的研究从超材料吸波体提出之初就引起了广大学者的关注, 诸多学者为此做出了贡献^[80–90]. 2009年 Zhu等^[81]通过改善4个谐振单元的排布, 使其在平面内呈垂直正交排布, 从而实现了超材料吸波体的极化不敏感性, 其单元结构如图5(a)所示. 2011年 Li等^[82]采用四箭头谐振器

的单元结构实现了双波段、极化不敏感的广角吸波体, 2016年 Chen等^[84]设计了一款三频带的极化不敏感吸波体, 其中单频带单元如图5(b)所示, 通过调整单元的比例因子将三种不同尺寸的单频单元排列组成三频带单元, 实验表明该吸波体也是极化和角度不敏感的. 2018年 Wang等^[86]利用多段金属圆弧进行不同方位的排布, 实现了多频段的极化和角度不敏感吸波. 从图5给出的单元结构示意图可以看出, 具有极化和角度不敏感特性的超材料单元结构都有多重旋转对称性, 从而在任意极化入

射波下产生相同的电磁响应, 达到极化不敏感的效果. 若没有对称性, 也可以在不同极化下通过不同机制调控来实现电磁波的吸收^[87]. 此外采用手性结构巧妙设计也可实现对不同极化的吸收, 如 Wang 等^[88]设计了一款手性谐振器, 由于单元结构紧凑也实现了极化不敏感的特性.

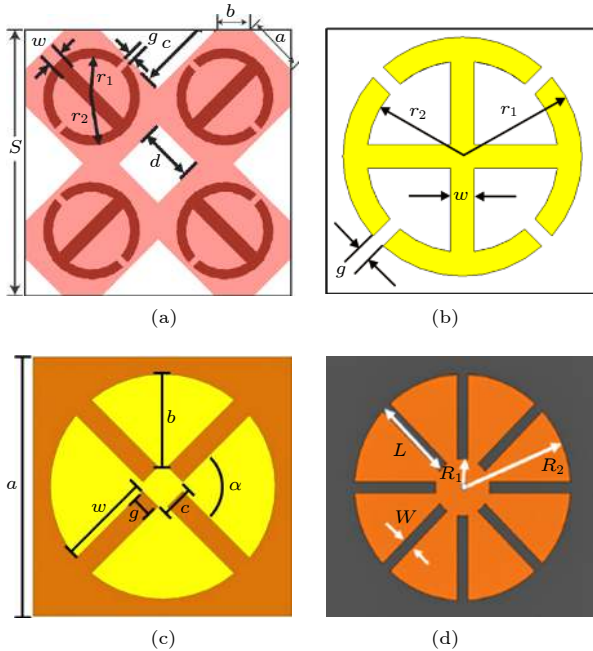


图 5 极化和角度不敏感超材料吸波体单元结构示意图 (a) 正交排布的极化不敏感单元^[81]; (b) 单频带单元^[84]; (c) 四个扇形为基础的角度不敏感单元; (d) 八个扇形为基础的角度不敏感单元^[91]

Fig. 5. Schematic diagram of polarization and angle-independent metamaterial absorber unit cell: (a) Orthogonal polarization insensitive unit cell^[81]; (b) single-band metamaterial absorber unit cell^[84]; (c) four circular sector-based unit cell; (d) eight circular sector-based unit cell^[91].

对于角度不敏感性的研究而言, 一般会遇到两个问题: 一是由于斜入射下单元的有效工作尺寸改变而引起的频率偏移; 二是随着角度变化所引起阻抗失配^[89]. 多项研究表明由于随着入射角的增大, 平行磁场分量趋于零, 因而不能有效地在表层金属结构和底部金属板间诱导反平行电流, 从而导致磁通量下降^[81]. 为了尽可能减少斜入射带来的影响, 单元小型化以及各向同性和对称结构是设计角度不敏感电磁吸波超材料的关键, Ghosh 等^[91]在该方向做了诸多工作, 如图 5(c)和 (d) 所示, 研究人员将圆形贴片切分成 4 个扇区部分、8 个扇区部分, 这两种单元高度的旋转对称性保证了吸波性能具有良好的极化稳定性, 并在 70° 入射角范围内能保

持 90% 以上的高吸收率. 通过增加圆形扇区的数量, 使吸波体对于 TE 和 TM 极化吸收频率的变化限制均在 0.7% 内, 具有更好的角度稳定性. 尽管研究者们一直在试图找到合适的单元结构来获得大角度不敏感的特性, 但一直没有统一的良好机制, 亟需新的材料结构和方法, 如 Shen 等^[92]研究了折角结构对于大角度入射电磁波的宽带吸波特性的影响, 相比于平面结构, 折角结构对 TM 波有更好的宽带吸收能力. 并在此基础上设计了具有宽带宽入射角电磁吸波性能的三维超材料. 由此可见, 三维结构的引入为宽角吸波体提供了新的技术途径^[92,93], 但在方法上和工艺上的创新对于实现角度不敏感的吸波超材料来说是个挑战, 超材料结构小型化的研究有望为研究角度不敏感吸波体提供新的解决方案.

3.3 动态可调超材料吸波体

如上所述, 早期的超材料吸波体是通过电磁参数进行设计来调控, 且大部分是基于结构几何参数将其工作特性固定在特定频带范围内, 一旦应用场景发生改变就必须重新进行设计. 随着超材料研究的深入和电磁操控技术的发展, 动态可调超材料的出现为实用型超材料吸波体提供了新的技术途径, 推动了新一轮技术的革新. 最早对可调超材料的研究是通过外加调控器件的方式来实现对谐振频率的动态调控, 如 Chang 等^[94]通过加载 PIN 开关来实现对可调频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 的设计. 由此, 人们基于多种机理对可调超材料进行了广泛的研究, 提出了诸多具有建设性的调控方法^[95–101]. 根据材料的电磁参数随环境电场、磁场、温度的变化来进行有效动态调控, 将可调技术分为电可调、磁可调、温度可调等^[102], 从而实现对材料电磁特性的操控. 在吸波应用方面, 通过采用如加载变容二极管、石墨烯、活性液晶、机械可调的材料等多种方式^[103–107]来实现对不同的吸收特性 (频率、极化、角度) 和功能的调控. 如 Zhao 等^[103]通过调节变容二极管的偏置电压实现了 1.5 GHz 的连续可调带宽吸收, 即不需要在整个吸收频段内同时展现出超强的吸收性能. 2016 年 Li 等^[104]提出了一种具有可切换吸收和辐射工作状态的新型集成结构, 通过加载 PIN 二极管开关来对结构的吸波和辐射功能进行动态控制. 近年来石墨烯的发展受到了广泛关注, 由于它的可

调性以及薄板导电性常被用于设计可调谐太赫兹器件, Zhang 等^[105]设计了一款加载石墨烯的吸波超材料, 通过对其偏置电压的调节即可实现对吸收光谱和极化状态的灵活控制. Shrekenhamer 等^[106]通过加入活性液晶设计了一款电子可调的超材料, 单元结构如图 6(c) 所示, 该结构可实现 30% 的振幅和 4% 的频率的可调性, 表明通过全电子的动态控制可以实现对于光的基本调控. 除了通过电特性调控外, 也可采用机械可调的方式, 如 2015 年 Zhang 等^[107]设计了一款机械可伸缩的全介质可调超材料吸波体, 如图 6(d) 所示, 通过对拉伸底部导电橡胶基板对单元间距进行调控, 实现了对单元周期大小的改变, 为可调超材料吸波提供了新的方法. 相比而言, 介质超材料损耗低、敏感度高的特性更易实现可调特性, 但机械可调的方式不适于微波器件的集成. 为了适应未来多功能新型器件的发展, 动态可切换或可调谐吸波仍需要进行更为广泛

深入的研究.

4 超材料吸波体的研究展望

尽管研究学者们在超材料吸波方向已做了很多工作, 仍面临着诸多问题. 在吸波性能方面, 由于材料的损耗随频率降低而下降, 故在低频范围实现宽带吸波仍是一个挑战; 在功能方面, 随着应用场景日益复杂, 多功能集成超材料将逐渐成为关注的热点; 在结构方面, 二维超表面对斜入射电磁波极为敏感, 新型三维结构有望成为新的突破口, 为超材料吸波体未来的研究引入新的活力.

4.1 低频超薄宽带超材料吸波体

不同波段电磁波的性质和作用各不相同, 由于低频段波长较长, 所对应的传统吸波结构体积较大, 而厚度和带宽的关系^[108]制约了超薄宽带吸波超材料的设计, 特别是在低频范围, 受到 Snoek 理

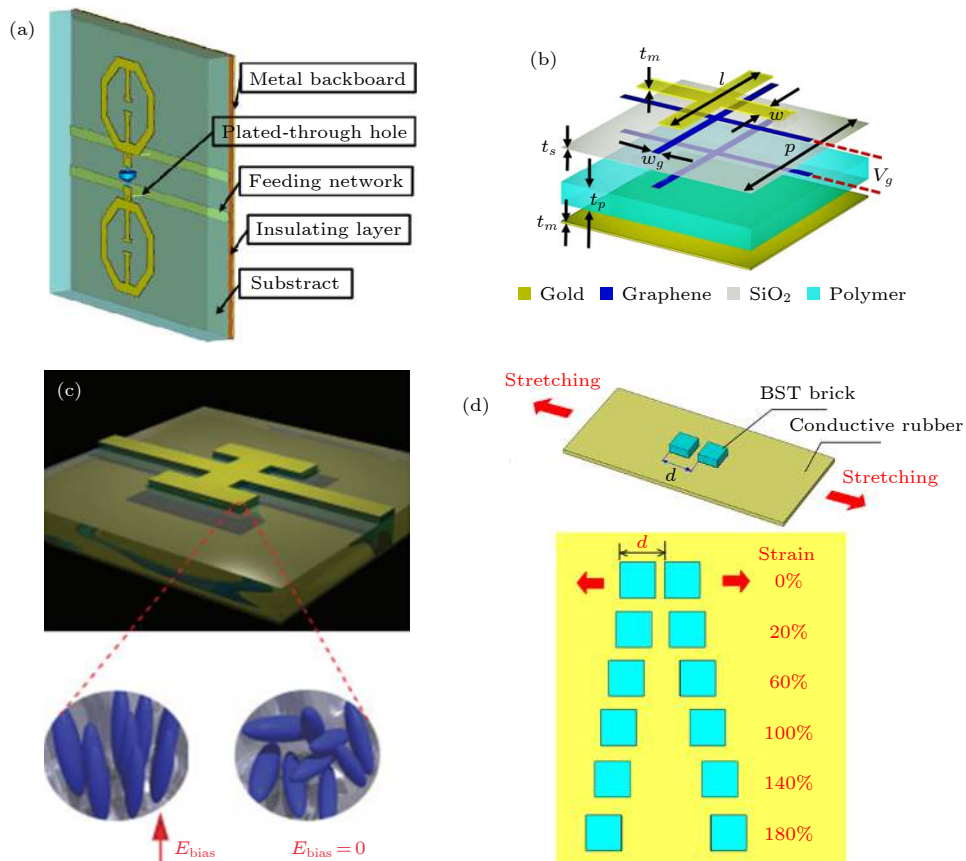


图 6 动态可调超材料吸波体 (a) 加载变容二极管的超材料吸波体^[103]; (b) 加载石墨烯的超材料吸波体单元结构^[105]; (c) 液晶可调超材料完美吸波体^[106]; (d) 基于机械可调谐的吸波体^[107]

Fig. 6. Dynamically tunable metamaterial absorber: (a) Tunable metamaterial absorber using varactor diodes^[103]; (b) schematic of the unit cell of the graphene based tunable metamaterial absorber^[105]; (c) liquid crystal tunable metamaterial perfect absorber^[106]; (d) mechanically stretchable and tunable metamaterial absorber^[107].

论限制^[109], 超材料在低频段的吸收性较差, 用单一的超材料结构难以满足目前对于低频超薄超材料的需求, 故可以通过传统磁性吸波材料与超材料复合来实现低频宽带吸波^[110]. 近几年研究者们通过尝试多种方法来实现低频的宽带吸收^[111–116], 例如 Mou 和 Shen^[111] 设计了一款加载 Non-Foster 电路的宽带吸波体, 可工作在 150—950 MHz 频段, 为了减小其厚度, 他们又利用磁性材料代替介质材料, 最终将厚度从 30 mm 降为 7.5 mm^[112]. 2018 年 Banadaki 等^[113] 通过修改吸波体单元结构, 使最低工作频率在参考结构基础上降低了 20%, 并实现在 1.35—3.5 GHz 范围内吸波率超过 90%, 大大提高了吸波体的实际应用能力. 常见的实现低频吸波方法还包括采用加载电阻膜、加载无源元件和有源器件等方式, 例如 Li 等^[114] 基于铁氧体与超材料复合的方式设计了厚度仅为 1 mm 的可调吸波体, 实现了在 0.2—7.6 GHz 范围内的宽频可调吸收. 然而带宽问题依旧是超材料吸波体共同面临的难题, 且随着低频预警雷达的发展, 低频段的宽带吸波隐身研究将越来越受到重视.

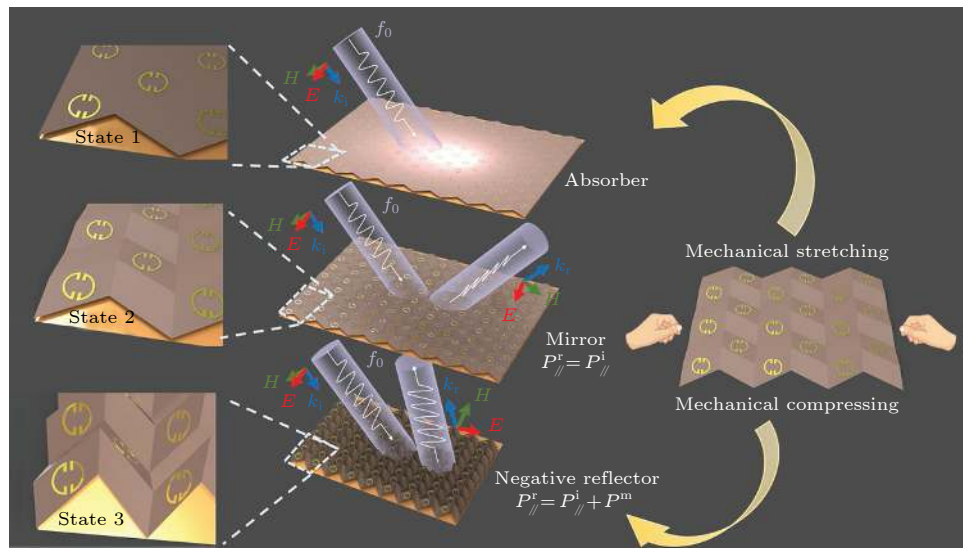
4.2 多功能集成超材料吸波体

超材料通过利用空间相位的积累来实现对电磁波的调控, 进而实现不同功能. 由于早期技术水平的限制, 研究者们创新地提出二维形式的超表面 (metasurface), 通过在介质表面上合理的布局一些亚波长结构单元, 实现对电磁波波前和极化等特性的灵活调控, 近几年成为超材料研究领域的热点和前沿. 许河秀^[117] 在可调超材料/超表面与动态电磁控制方面也做出了诸多成果, 利用超表面的突变相位实现特定功能概括起来主要有以下方式: 传输相位调控、几何相位调控以及基于传输、几何相位的混合调制, 通过超表面的调控将多种功能集成超材料是未来发展方向. 2017 年 Zhang 等^[60] 提出了一种同时具有光学透明性和微波宽带吸收的超材料, 利用氧化铟锡 (indium-tin oxide, ITO) 薄膜获得了良好的透光特性, 并在 8.3—17.4 GHz 实现了宽带吸收. 随着信息技术的快速发展, 整合吸波与其他电磁功能的多功能集成电磁器件受到了研究者的广泛关注. 在超材料领域, 通过改变金属的几何尺寸可以实现反射相位的任意调控, 在吸波体设计中, 通过阻抗匹配可以实现完美吸波. 然而目前为止这些功能仅仅在单一分离的设备上实

现, 2019 年 Sun 等将^[118] 金属结构和加载电阻元件相结合, 通过单元的各向异性, 实现了工作于微波段的波前塑性和吸波集成的多功能超表面. 该思想在 THz 频段也有相当广泛的应用, 例如 Peng 等^[119] 通过将金属结构和石墨烯结合设计出可以同时实现极化转换和吸波功能的超表面单元. 随后 Chen 等^[120] 提出了一个可以在 THz 频段实现超透镜和吸波体转换的多功能超表面. 此外吸-透波一体化、多频谱兼容、多物理场兼容超材料也有望成为研究者们探索的新方向^[121].

4.3 新型三维结构超材料吸波体

在超材料发展初期人们就对三维结构器件进行了大量探索研究^[122,123], 虽然通过三维超材料可以根据人们的意愿任意操控电磁波^[124,125], 但其高损耗和制作的复杂性极大地限制了它的应用. 随着工艺和技术的进步, 考虑到三维结构对电磁波调控优势以及 3D 打印技术的发展, 故将二者结合有望为吸波超材料提供新的方向. 2018 年熊益军等^[126] 采用 3D 打印技术成功制备了一款由三层方阵结构组成的宽频吸波超材料, 其总厚度为 4.7 mm 且结构精细, 充分证明了 3D 打印技术在超材料应用的可能性. 相比二维超表面结构, 三维立体超材料结构能够更有效地对电磁波进行调控, 特别是在低频段和小型化方面具有潜在应用, 如 2018 年 Lim 等^[127] 提出用 3D 打印结构实现阶梯状的十字结构超材料吸波体, 研究发现采用三维结构有利于吸波超材料的小型化. 同年, Jiang 等^[128] 提出了由蜂窝结构和电阻薄膜构成的三维超材料结构, 可在 3.53—24 GHz 实现宽频吸波, 且采用 3D 打印技术有利于实现吸波结构轻质化. 2019 年 Xie 等^[129] 将水注入一个由 3D 打印制造的塑料容器中制造了微波频段的全介质超材料吸波体. 其他的 3D 研究包括石墨烯超材料吸波结构、FSS 吸波等^[130–132]. 同时利用非平面结构和其他结构复合也为实现宽带吸波提供了新的思路, 如 Li 等^[133] 对于加载磁性谐振结构的“站立式”超材料吸波体进行了研究. 由于三维结构引入了空间角度的调控, 故有望应用于多功能一体化超材料, 有利于促进新型多功能器材的研发与应用. 例如, 2019 年 Chen 等^[134] 结合折纸技术设计了一款可调谐且聚集多功能于一体的三维结构超材料, 结构示意图如图 7 所示. 通过调节顶角可实现吸波体、镜面反射器和逆向反射器等

图 7 多功能可重构三维超材料^[134]Fig. 7. Multifunctional reconfigurable 3D metamaterial^[134].

不同功能之间的切换, 但如何精确自动调节顶角从而使得实验和实际应用过程中调谐更可靠, 仍需进行深入研究. 三维结构的引入为超材料新型器件的发展带来新的生机, 随着技术的进步未来会有更多新型结构出现, 人们对电磁波的调控亦将变得更加自由.

5 结 语

电磁超材料吸波近年来成为超材料研究中的热点, 受到国内外很多团队与学者的青睐. 研究方向从宽频、极化和角度不敏感等问题逐步深入到智能可调、多功能集成等方向, 结构研究也逐渐从二维超表面扩展到三维非平面结构, 并取得了丰硕的成果. 根据吸收机制的不同, 可以将吸波材料分为吸收型和干涉型, 通过加载有源技术、与传统材料相复合、引入新型材料和结构等方法可以更加灵活地调控吸波性能, 这对于吸波超材料在隐身、探测、天线、能量收集等方面的应用具有重要价值. 在这些应用中, 隐身作为现代军事中不可或缺的技术, 是未来研究的重中之重. 目前基于超材料实现隐身的途径主要有四种: 一是基于电磁吸波理论应用于雷达探测领域的隐身技术; 二是以隐身斗篷为代表的基于光学变换的隐身技术; 三是基于散射相消理论的等离子体隐身技术; 四是基于超表面打散电磁波的漫反射隐身技术. 而由于各种反隐身技术的发展, 目前单频段低可探测的武器装备在未来战

场上仍会面临极大威胁, 因此实现宽频乃至全频段隐身成为研究的主要方向. 此外, 在航空航天技术领域, 高温状态下工作的特殊部件材料的隐身性能也需要进一步提高, 而目前所研究的吸波超材料大多工作于室温环境, 以陶瓷基超材料为代表的耐高温隐身材料将成为航空航天领域隐身技术的主要方案. 目前高温吸波材料主要有陶瓷型吸波材料、碳材料吸波剂、半导体等, 采用调控电子结构、掺杂元素、材料复合技术、设计多层或多孔结构等多种方式可以有效提升高温下的电磁吸波性能^[36,135]. 同时为应对未来小型化、多功能、智能化的趋势, 亟需进行基于超材料的新型多功能器件的应用研究, 通过建立超材料模型库可供人们针对不同需求进行自主选择. 随着理论的不断发展和制造工艺的进步, 未来吸波超材料将不断朝着轻质、承载力强、吸波性能好、智能可调、多频段兼容方向发展, 以满足复杂环境下对于电磁吸波技术的更高要求, 有望在军事武器装备、通信技术、信息技术等行业领域带来重大变革.

参考文献

- [1] Duan X, Chen X, Zhou Y, Zhou L, Hao S 2018 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **17** 1617
- [2] Li W, Valentine J 2014 *Nano Lett.* **14** 3510
- [3] Watts C M, Liu X, Padilla W J 2012 *Adv. Mater.* **24** OP98
- [4] Choi I, Lee D 2015 *Compos. Struct.* **119** 218
- [5] Liu S H, Liu J M, Dong X L 2014 *Electromagnetic Shielding and Absorb-ing Materials* (Vol. 2) (Beijing: Chemical Industry Press) p270 (in Chinese) [刘顺华, 刘军民, 董星龙 2014 电磁

- 波屏蔽及吸波材料(北京: 化学工业出版社) 第270页]
- [6] Fante R L, McCormack M T 1988 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **36** 1443
- [7] Toit D, J L 1994 *IEEE Antennas and Propag. Mag.* **36** 17
- [8] Jaggard D, Engheta N, Liu J 1990 *Electron. Lett.* **26** 1332
- [9] Wang G M, Xu H X, Liang J G, Cai T 2015 *Compact Metamaterials Mechanism, Design and Application* (Beijing: National Defense Industry Press) (in Chinese) [王光明, 许河秀, 梁建刚, 蔡通 2015 紧凑型异向介质: 机理、设计与应用(北京: 国防工业出版社)]
- [10] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [11] Pendry J B, Holden A, Stewart W, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [12] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2075
- [13] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [14] Seddon N, Bearpark T 2003 *Science* **302** 1537
- [15] Lu J, Grzegorzczak T M, Zhang Y, Pacheco Jr J, Wu B I, Kong J A, Chen M 2003 *Opt. Express* **11** 723
- [16] Koschny T, Zhang L, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. B* **71** 121103
- [17] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [18] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [19] Leonhardt U 2006 *Science* **312** 1777
- [20] Schurig D, Mock J J, Justice B, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [21] Feng M C, Li Y F, Zhang J Q, Wang J F, Wang C, Ma H, Qu S B 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 198101 (in Chinese) [丰茂昌, 李勇峰, 张介秋, 王甲富, 王超, 马华, 屈绍波 2018 物理学报 **67** 198101]
- [22] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [23] Zhuang Y Q, Wang G M, Zhang C X, Zhang X K, Zong B F, Ma W D, Wang Y W 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 154101 (in Chinese) [庄亚强, 王光明, 张晨新, 张小宽, 宗彬锋, 马卫东, 王亚伟 2016 物理学报 **65** 154101]
- [24] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light: Sci. Appl.* **3** e218
- [25] Tran M C, Pham V H, Ho T H, Nguyen T T, Do H T, Bui X K, Bui S T, Le D T, Pham T L, Vu D L 2020 *Sci. Rep.* **10** 1
- [26] Wu H, Liu S, Wan X, Zhang L, Wang D, Li L, Cui T J 2017 *Adv. Sci.* **4** 1700098
- [27] Hum S V, Perruisseau-Carrier J 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 183
- [28] Cai T, Tang S, Wang G, Xu H, Sun S, He Q, Zhou L 2017 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1600506
- [29] Xu H X, Zhang L, Kim Y, Wang G M, Zhang X K, Sun Y, Ling X, Liu H, Chen Z, Qiu C W 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800010
- [30] Yuan F, Xu H X, Jia X Q, Wang G M, Fu Y Q 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 2463
- [31] Sun S, He Q, Hao J, Xiao S, Zhou L 2019 *Adv. Opt. Photonics* **11** 380
- [32] Zhang L, Wan X, Liu S, Yin J Y, Zhang Q, Wu H T, Cui T J 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 3374
- [33] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [34] Marin P, Cortina D, Hernando A 2008 *IEEE Trans. Magn.* **44** 3934
- [35] Liu X X, Chen X, Wang X J, Liu Y 2013 *Surf. Technol.* **42** 104 (in Chinese) [刘祥萱, 陈鑫, 王焯军, 刘渊 2013 表面技术 **42** 104]
- [36] Zhou W C, Wang J, Luo F, Zhu D M, Huang Z B, Qing Y C 2013 *Mater. China* **000** 463 (in Chinese) [周万城, 王婕, 罗发, 朱冬梅, 黄智斌, 卿玉长 2013 中国材料进展 **000** 463]
- [37] Costa F, Monorchio A, Manara G 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 1551
- [38] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, Yang Q H, Liu Y L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 241111
- [39] Hao J, Wang J, Liu X, Padilla W J, Zhou L, Qiu M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 251104
- [40] Liu X, Starr T, Starr A F, Padilla W J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 207403
- [41] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, Atwater H A 2011 *Nat. Commun.* **2** 1
- [42] Simovski C 2009 *Opt. Spectrosc.* **107** 726
- [43] Smith D R, Schultz S, Markoš P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. B* **65** 195104
- [44] Chen X, Grzegorzczak T M, Wu B I, Pacheco J J, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016608
- [45] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [46] Arslanagić S, Hansen T V, Mortensen N A, Gregersen A H, Sigmund O, Ziolkowski R W, Breinbjerg O 2013 *IEEE Antennas and Propag. Mag.* **55** 91
- [47] Costa F, Monorchio A, Manara G 2012 *IEEE Antennas and Propag. Mag.* **54** 35
- [48] Chen H T 2012 *Opt. Express* **20** 7165
- [49] Peng X Y, Wang B, Lai S, Zhang D H, Teng J H 2012 *Opt. Express* **20** 27756
- [50] Liu X, Zhao Q, Lan C, Zhou J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 031910
- [51] Zheng H, Jin X, Park J, Lu Y, Rhee J Y, Jang W, Cheong H, Lee Y 2012 *Opt. Express* **20** 24002
- [52] Im K, Kang J H, Park Q H 2018 *Nat. Photonics* **12** 143
- [53] Tao H, Bingham C, Pilon D, Fan K, Strikwerda A, Shrekenhamer D, Padilla W, Zhang X, Averitt R 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 225102
- [54] Chen K, Adato R, Altug H 2012 *ACS Nano* **6** 7998
- [55] Xu H X, Wang G M, Qi M Q, Liang J G, Gong J Q, Xu Z M 2012 *Phys. Rev. B* **86** 205104
- [56] Shen X, Cui T J, Zhao J, Ma H F, Jiang W X, Li H 2011 *Opt. Express* **19** 9401
- [57] Ma Y, Chen Q, Grant J, Saha S C, Khalid A, Cumming D R 2011 *Opt. Lett.* **36** 945
- [58] Jia D, Xu J, Yu X 2018 *Opt. Express* **26** 26227
- [59] Huang L, Chowdhury D R, Ramani S, Reiten M T, Luo S N, Taylor A J, Chen H T 2012 *Opt. Lett.* **37** 154
- [60] Zhang C, Cheng Q, Yang J, Zhao J, Cui T J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 143511
- [61] Zhang Y, Li Y, Cao Y, Liu Y, Zhang H 2017 *Opt. Commun.* **382** 281
- [62] Su Z, Yin J, Zhao X 2015 *Opt. Express* **23** 1679
- [63] Ding F, Cui Y, Ge X, Jin Y, He S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 103506
- [64] Nguyen T Q H, Phan H L, Phan D T 2017 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **59** 1157
- [65] Cheng Y Z, Wang Y, Nie Y, Gong R Z, Xiong X, Wang X 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 044902
- [66] Yuan W, Cheng Y 2014 *Appl. Phys. A* **117** 1915
- [67] Kim Y J, Hwang J S, Yoo Y J, Khuyen B X, Rhee J Y, Chen X, Lee Y 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 405110
- [68] Kundu D, Mohan A, Chakrabarty A 2016 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **15** 1589
- [69] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Lin B Q, Zhou H, Bai P, Gu

- W, Peng W D, Ma H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 087802 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 林宝勤, 周航, 柏鹏, 顾巍, 彭卫东, 马华 2011 物理学报 **60** 087802]
- [70] Sun L, Cheng H, Zhou Y, Wang J 2012 *Opt. Express* **20** 4675
- [71] Mo M M, Ma W W, Pang Y Q, Chen R H, Zhang X M, Liu Z T, Li X, Guo W T 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 217801 (in Chinese) [莫漫漫, 马武伟, 庞永强, 陈润华, 张笑梅, 柳兆堂, 李想, 郭万涛 2018 物理学报 **67** 217801]
- [72] Tayde Y, Saikia M, Srivastava K V, Ramakrishna S A 2018 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **17** 2489
- [73] Ji T, Wang Y, Cui Y, Lin Y, Hao Y, Li D 2017 *Mater. Today Energy* **5** 181
- [74] Pang Y, Wang J, Ma H, Feng M, Li Y, Xu Z, Xia S, Qu S 2016 *Sci. Rep.* **6** 29429
- [75] Fan Y, Wang J, Li Y, Pang Y, Zheng L, Xiang J, Zhang J, Qu S 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 215001
- [76] Li S J, Wu P X, Xu H X, Zhou Y L, Cao X Y, Han J F, Zhang C, Yang H H, Zhang Z 2018 *Nanoscale Res. Lett.* **13** 386
- [77] Pitchappa P, Ho C P, Kropelnicki P, Singh N, Kwong D L, Lee C 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 193109
- [78] Gu S, Su B, Zhao X 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 163702
- [79] Yu P, Besteiro L V, Huang Y, Wu J, Fu L, Tan H H, Jagadish C, Wiederrecht G P, Govorov A O, Wang Z 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1800995
- [80] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [81] Zhu B, Wang Z B, Yu Z Z, Zhang Q, Zhao J M, Feng Y J, Jiang T 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 114102
- [82] Li L, Yang Y, Liang C 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 063702
- [83] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z 2011 *Chin. Phys. B* **20** 037801
- [84] Chen J, Hu Z, Wang S, Huang X, Liu M 2016 *Eur. Phys. J. B* **89** 14
- [85] Zhu B, Wang Z, Huang C, Feng Y, Zhao J, Jiang T 2010 *Prog. Electromagn. Res.* **101** 231
- [86] Wang J, Yang R, Tian J, Chen X, Zhang W 2018 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **17** 1242
- [87] Xu Y Q, Zhou P H, Zhang H B, Chen L, Deng L J 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 044102
- [88] Wang B, Koschny T, Soukoulis C M 2009 *Phys. Rev. B* **80** 033108
- [89] Munk B A, Munk P, Pryor J 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 186
- [90] Bhattacharyya S, Srivastava K V 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 064508
- [91] Ghosh S, Nguyen T T, Lim S 2019 *EPJ Appl. Metamater.* **6** 12 064508
- [92] Shen Y, Pang Y, Wang J, Ma H, Pei Z, Qu S 2015 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 445008
- [93] Chen T, Li S J, Cao X Y, Gao J, Guo Z X 2019 *Appl. Phys. A* **125** 232
- [94] Chang T, Langley R J, Parker E 1993 *IEEE Microwave Guided Wave Lett.* **3** 387
- [95] Shadrivov I V, Morrison S K, Kivshar Y S 2006 *Opt. Express* **14** 9344
- [96] Zhu H, Liu X, Cheung S, Yuk T 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 80
- [97] Li Y H, Deng L W, Luo H, He L H, He J, Xu Y C, Huang S X 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 095201 (in Chinese) [李宇涵, 邓联文, 罗衡, 贺龙辉, 贺君, 徐运超, 黄生祥 2019 物理学报 **68** 095201]
- [98] Zhao X, Wang Y, Schalch J, Duan G, Cremin K, Zhang J, Chen C, Averitt R D, Zhang X 2019 *ACS Photonics* **6** 830
- [99] Zhai Z, Zhang L, Li X, Xiao S 2019 *Opt. Commun.* **431** 199
- [100] Chen J, Yang M S, Li Y D, Cheng D K, Guo G L, Jiang L, Zhang H T, Song X X, Ye Y X, Ren Y P, Ren X D, Zhang Y T, Yao J Q 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 247802 (in Chinese) [陈俊, 杨茂生, 李亚迪, 程登科, 郭耿亮, 蒋林, 张海婷, 宋效先, 叶云霞, 任云鹏, 任旭东, 张雅婷, 姚建铨 2019 物理学报 **68** 247802]
- [101] Balci O, Kakenov N, Karademir E, Balci S, Cakmakyapan S, Polat E O, Caglayan H, Özbay E, Kocabas C 2018 *Sci. Adv.* **4** eaao1749
- [102] Bi K, Wang X Y, Lan C W, Hao Y N, Zhou J 2019 *Mater. China* **38** 1 (in Chinese) [毕科, 王旭莹, 兰楚文, 郝亚楠, 周济 2019 中国材料进展 **38** 1]
- [103] Zhao J, Cheng Q, Chen J, Qi M Q, Jiang W X, Cui T J 2013 *New J. Phys.* **15** 043049
- [104] Li M, Yi Z, Luo Y, Muncer B, Zhu Q 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 944
- [105] Zhang Y, Feng Y, Zhu B, Zhao J, Jiang T 2014 *Opt. Express* **22** 22743
- [106] Shrekenhamer D, Chen W C, Padilla W J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 177403
- [107] Zhang F, Feng S, Qiu K, Liu Z, Fan Y, Zhang W, Zhao Q, Zhou J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 091907
- [108] Rozanov K N 2000 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **48** 1230
- [109] Acher O, Dubourg S 2008 *Phys. Rev. B* **77** 104440
- [110] Yuan W, Yang J, Wang Y L, Li W, Guan J G 2016 *Mater. Rev.* **30** 104 (in Chinese) [阮伟, 杨进, 王一龙, 李维, 官建国 2016 材料导报 **30** 104]
- [111] Mou J, Shen Z 2017 *Sci. Rep.* **7** 1
- [112] Mou J, Shen Z 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 696
- [113] Banadaki M D, Heidari A A, Nakhkash M 2017 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **17** 205
- [114] Li W, Wei J, Wang W, Hu D, Li Y, Guan J 2016 *Mater. Des.* **110** 27
- [115] Cheng Y Z, Wang Y, Nie Y, Zheng D H, Gong R Z, Xiong X, Wang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134102 (in Chinese) [程用志, 王莹, 聂彦, 郑栋浩, 龚荣洲, 熊炫, 王鲜 2012 物理学报 **61** 134102]
- [116] Li W, Liu Q, Wang L, Zhou Z, Zheng J, Ying Y, Qiao L, Yu J, Qiao X, Che S 2018 *AIP Adv.* **8** 015318
- [117] Xu H X 2019 *Investigations on Electromagnetic Wave Manipulations and Functional Device Applications Using Metasurfaces* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [许河秀 2019 超表面电磁调控机理与功能器件应用研究 (北京: 科学出版社)]
- [118] Sun J, Chen K, Ding G, Guo W, Zhao J, Feng Y, Jiang T 2019 *IEEE Access* **7** 93919
- [119] Peng L, Li X F, Gao X, Jiang X, Li S M 2019 *Opt. Mater. Express* **9** 687
- [120] Chen W, Chen R, Zhou Y, Ma Y 2019 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **31** 1187
- [121] Shen Y, Wang J F, Zhang J Q, Li Y F, Zheng L, Pang Y Q, Qu S B 2018 *J. Air Force Engineering Univ. (Nat. Sci. Ed.)* **19** 39 (in Chinese) [沈杨, 王甲富, 张介秋, 李勇峰, 郑麟, 庞永强, 屈绍波 2018 空军工程大学学报 (自然科学版) **19** 39]
- [122] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Fu Z T, Ma H, Yang Y M 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 155413
- [123] Lu Lei, Qu S B, Shi H Y, Zhang A X, Zhang J Q, Ma H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 158102 (in Chinese) [鲁磊, 屈绍波, 施宏宇, 张安学, 张介秋, 马华 2013 物理学报 **62** 158102]
- [124] Xu H X, Wang G M, Tao Z, Cui T J 2014 *Sci. Rep.* **4** 5744
- [125] Xu H X, Wang G M, Ma K, Cui T J 2014 *Adv. Opt. Mater.*

- 2 572
- [126] Xiong Y J, Wang Y, Wang Q, Wang C Q, Huang X Z, Zhang F, Zhou D 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 084202 (in Chinese) [熊益军, 王岩, 王强, 王春齐, 黄小忠, 张芬, 周丁 2018 *物理学报* **67** 084202]
- [127] Lim D, Yu S, Lim S 2018 *IEEE Access* **6** 43654
- [128] Jiang W, Yan L, Ma H, Fan Y, Wang J, Feng M, Qu S 2018 *Sci. Rep.* **8** 4817
- [129] Xie J, Quader S, Xiao F, He C, Liang X, Geng J, Jin R, Zhu W, Rukhlenko I D 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 536
- [130] Tian X Y, Shang Z T, Yin L X, Li D C 2019 *Aeronaut. Manuf. Technol.* **62** 14 (in Chinese) [田小永, 尚振涛, 尹丽仙, 李涤尘 2019 *航空制造技术* **62** 14]
- [131] Rashid A K, Li B, Shen Z 2014 *IEEE Antennas and Propag. Mag.* **56** 43
- [132] Yu Y, Shen Z, Deng T, Luo G 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 4363
- [133] Li W, Wu T, Wang W, Guan J, Zhai P 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 022903
- [134] Li M, Shen L, Jing L, Xu S, Zheng B, Lin X, Yang Y, Wang Z, Chen H 2019 *Adv. Sci.* **6** 1901434
- [135] Liang C Y, Wang Z J 2018 *J. Aeronaut. Mater.* **38** 5 (in Chinese) [梁彩云, 王志江 2018 *航空材料学报* **38** 5]

REVIEW

Research progress of electromagnetic metamaterial absorbers*Wang Yan-Zhao Xu He-Xiu[†] Wang Chao-Hui

Wang Ming-Zhao Wang Shao-Jie

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(Received 10 March 2020; revised manuscript received 1 April 2020)

Abstract

Electromagnetic absorbing technology can effectively suppress the radiation of electromagnetic waves, and has been widely used in military and civilian fields. However, traditional absorbing technology cannot meet the new requirements for modern absorbing materials. The advent of metamaterials provides a solution for this problem. Metamaterial absorber has the advantages of simple structure, light weight, high absorption rate, and can realize the flexible control of electromagnetic waves, which has led the electromagnetic absorption research to rapidly develop. In this paper, the research and development of using metamaterials to absorb electromagnetic wave is reviewed. Firstly, the principle, implementation, and presently existing bottlenecks of electromagnetic wave absorption in using metamaterials are outlined. Secondly, recent progress of the aforementioned key issues in three aspects is introduced, including multi-band and broadband, polarization and angle independence, and dynamic tunability. Several typical methods of making metamaterial absorbers are illustrated here. Generally speaking, the prerequisite of broadband metamaterial absorbers is to provide multiple resonances that are close enough to each other. The structure with multiple rotationally symmetric geometry is helpful in achieving polarization- and angle-insensitive properties. The flexible control of absorption performance can be realized by introducing lumped elements such as resistances, capacitances, and diodes. In addition, by means of composite traditional materials or new materials and other methods the dynamic adjustment of the absorption performance can be achieved. Although researchers have done a lot of work on the metamaterial absorbers, there remain many problems and challenges. For the future design, several promising directions are suggested from three perspectives: high performance, multifunctionality, and new structures. In terms of high performance, it is still a challenge to achieve ultra-thin broadband metamaterial absorber for low-frequency which can break through the limitation of wavelength. Integrated multifunctional metamaterials can adapt to the increasingly complex application scenarios and should gradually become the focus of attention. Since three-dimensional (3D) printing technology has proved to be applicable to the preparation of complex metamaterial structures, the new 3D metamaterial absorbers will bring more vitality to the development of metamaterials. Finally, as regards the application of metamaterials in stealth, the future development of metamaterial absorbers is further summarized.

Keywords: metamaterial absorber, broadband, angle-independence**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs**DOI:** 10.7498/aps.69.20200355

* Project supported by the Youth Talent Lifting Project of the China Association for Science and Technology (Grant No. 17-JCJQ-QT-003), the National Defense Program of China (Grant No. 2019-JCJQ-JJ-081), the Key Program of Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2020JZ-33), the Key Principal's Fund of Air Force Engineering University (Grant No. XNLX19030601) and Principal's Fund for Graduate Students of Air Force Engineering University (Grant No. XZJY2019040).

[†] Corresponding author. E-mail: hxxuellen@gmail.com