

文章编号:1671-4229(2021)04-0076-12

# 微波吸收体研究现状及发展趋势

赖森锋, 李冕杰, 王 姣, 单 纯\*

(广东技术师范大学 电子与信息学院, 广东 广州 510665)

**摘要:**近年来,具有吸收电磁特性的微波吸收体发展迅速并得到极大关注。微波吸收体在雷达隐身与反隐身方面的应用,迄今为止仍然是国防科研中的重要课题。在最近的文献中,超材料完美吸波器的研究取得了巨大进展,其多元化的发展态势在工业、军事领域的应用极为广泛。文章侧重于对微波吸收体的研究进行全面的综述,首先介绍微波吸收体的分类,然后详细介绍几种微波吸收体的结构,以及微波吸收体的一些关键应用,同时简述了利用超材料制作微波吸收体的方法。最后,对微波吸收体未来的研究方向进行了讨论。

**关键词:**微波吸收体;完美吸波;超材料;带宽;应用

**中图分类号:** TN958.97 **文献标志码:** A

## Present situation and progress of microwave absorbers

LAI Sen-feng, LI Mian-jie, WANG Jiao, SHAN Chun\*

(School of Electronic and Information, Guangdong Polytechnical Normal University, Guangzhou 510665, China)

**Abstract:** In recent years, microwave absorbers with electromagnetic absorption characteristics have developed rapidly and received great attention. The application of microwave absorber in radar stealth and anti-stealth is still an important topic in national defense research. In the recent published literatures, great progresses have been made in the study of metamaterial perfect absorbers, and their diversified development trend has been widely applied in industrial and military fields. This article focuses on the study of microwave absorbers to conduct a comprehensive review, first introducing the classification of the microwave absorbers, then introducing several kinds of microwave absorber structure, as well as some key applications of microwave absorbers. Meanwhile, this paper also introduces the preparation of microwave absorbers based on meta-material surfaces. Finally, the future research direction of microwave absorbers is discussed.

**Key words:** microwave absorber; perfect absorption; metamaterials; bandwidth; applications

微波吸收体(Microwave absorber)是指能有效地吸收入射微波,从而使其目标回波强度显著衰减的一类结构。吸收微波的基本原理是通过某种物理作用机制将微波能转化为其他形式运动的能量,并通过该运动的耗散作用转化为热能。当前,超材料的微波吸收体由于其

优越的物理性能吸引了国内外学者的极大关注。超材料具备可人工设计的电学参数,因此,可以研制出天然材料不具备的有效介电常数和磁导率材料,并将其应用到具有独特电磁特性的微波吸收体的设计中,推动该领域的大力发展。超材料是一种在自然界中没有的人工

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1802402);南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设资助项目(311021011);广东省普通高校青年创新人才类资助项目(2019KQNCX069);广州市基础研究计划基础与应用基础研究资助项目(202102020307)

**作者简介:** 赖森锋(1989—),男,博士研究生. E-mail:laisenfeng@gpnu.edu.cn

\*通信作者. E-mail:shanchun@gpnu.edu.cn

**引文格式:** 赖森锋,李冕杰,王姣,等.微波吸收体研究现状及发展趋势[J].广州大学学报(自然科学版),2021,20(4):76-87.

复合材料,它具备超常的电磁特性,包括负折射率<sup>[1]</sup>、电磁波屏蔽<sup>[2-3]</sup>和逆多普勒效应<sup>[1,4]</sup>。超材料微波吸收体就是通过对这类人工复合材料的形状、尺寸、组合方式进行加工、设计,使其具有有效介电常数和磁导率,在很小或很宽的频带内产生接近统一的吸收效率,同时,克服传统1/4波长的设备厚度限制。目前,超材料的应用<sup>[5]</sup>覆盖了通信、探测、隐身等工业以及军事领域,其中,超材料微波吸收体的研究占据了重要的位置。近年来,很多具有新颖特性的微波吸收体<sup>[6-7]</sup>被提出,但是普遍无法同时具有厚度薄、频带宽、吸收高、柔韧性好等特点,实际应用时受到极大的限制。因此,研究“轻薄、宽频带、高性能、高共形性”的超材料微波吸收体符合当下电磁波吸收领域的应用需求和发展趋势。本综述侧重于对微波吸收体研究的全面描述,首先介绍微波吸收体的分类及微波吸收体的几种结构,然后讲述微波吸收体的一些关键应用,简述了微波吸收体超材料表面的制备,最后讨论微波吸收体未来的研究方向。

### 1 微波吸收体的分类

随着国内外研究的深入,微波吸收体的发展呈现了多元化发展态势。微波吸收体可分为带通吸波器和带阻吸波器。吸波器在工业、军事上的应用广泛,如太阳能光伏领域<sup>[8]</sup>、隐身技术、光电探测等。除此之外,可调的吸波器由于其可调特性倍受关注,常见的可调特性包括:频带范围、斜入射角、极化角度、反射率等,其中,应用比较多的是频带范围可调。

2008年Landy等<sup>[9]</sup>提出了在频带范围内吸收率接近100%的完美吸波器,结构如图1(a)所示,吸收频谱图如图1(b)所示。该吸波器使用2D电环谐振器使得电磁共振匹配自由空间的阻抗,消除了目标入射波的反射。这是最早提出的完美吸波器概念,这项开创性的研究引发了微波吸收体的迅速发展,完美吸波器的概念也开始扩展到其他频带范围和各种应用的研究。

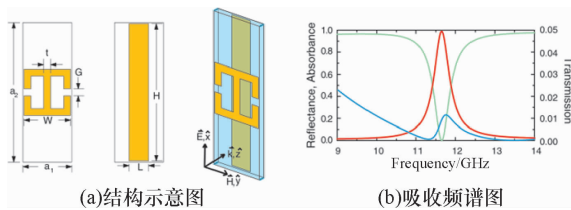


图1 Landy等<sup>[9]</sup>提出的完美吸波器

Fig. 1 Perfect absorber proposed by Landy, et al. <sup>[9]</sup>

### 1.1 带通吸波器

带通频率选择吸波体是一种基于频率选择表面(Frequency selective surface, FSS)技术的具有频率选择特性的吸波传输结构,具体表现为在某些频段透过电磁波,同时能在某些频段显著吸收电磁波能量<sup>[10]</sup>。

2018年Xu等<sup>[11]</sup>针对不同大小的FSS,分析了宽频微波的频段变化利用带通型FSS构造吸收结构(图2)。结果表明,带通FSS的扩频带效果更好,尤其是对优化后的双层结构羰基铁吸波材料,其高反射率可保持在-10 db左右。

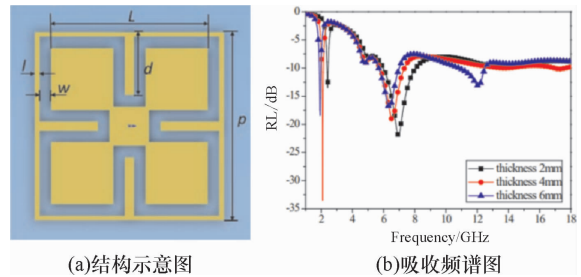


图2 Xu等<sup>[11]</sup>提出的带通吸波器

Fig. 2 Bandwidth absorber proposed by Xu, et al. <sup>[11]</sup>

### 1.2 带阻吸波器

2019年Sampath等<sup>[12]</sup>提出了用于1.6 GHz反射L波段应用的小型化带阻吸波器(图3)。FSS周期单元实现了 $0.034\lambda_0 \times 0.034\lambda_0$ 的小型化,所提出的设计表现出稳定的传输性能。此外,该带阻吸波器满足偏振无关的标准。

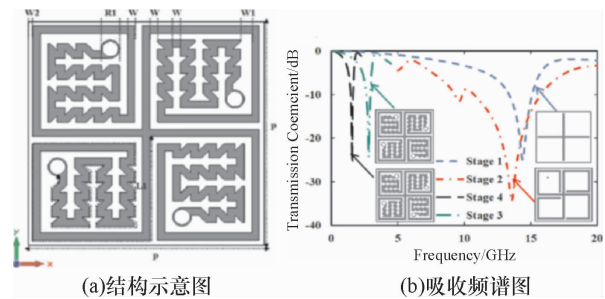
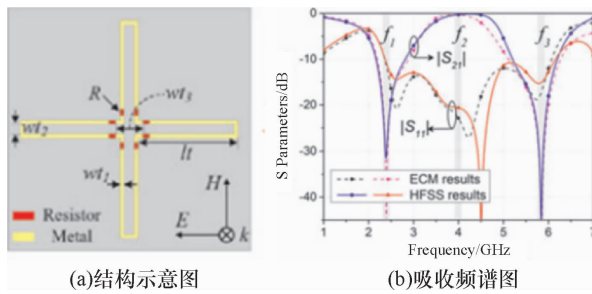


图3 Sampath等<sup>[12]</sup>提出的带阻吸波器

Fig. 3 The bandstop absorber proposed by Sampath, et al. <sup>[12]</sup>

### 1.3 Raserber型吸波器

2018年Xiu等<sup>[13]</sup>提出并研究了具有双极化特性的低剖面简单结构的raserber(图4),其特征是在2个吸收带之间有一个通带。基于一个电子对抗系统,首先研究了使用有损交叉框架单元的雷达收发机工作原理和设计策略。此外,开发了具有减小的单元尺寸的吸收体,以稳定斜入射下的频率响应。



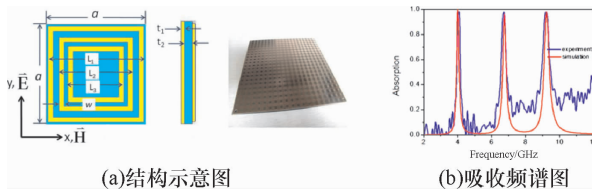
(a)结构示意图 (b)吸收频谱图

图 4 Xiu 等<sup>[13]</sup>提出的 rasorber

Fig. 4 Rasorber proposed by Xiu, et al. <sup>[13]</sup>

### 1.4 多频吸波器

2010 年 Shen 等<sup>[14]</sup>提出了一种偏振无关的广角三波段超材料吸波器。该吸波器使用了简单的三方环嵌套结构,结构如图 5(a)所示,吸收频谱图如图 5(b)所示。可以观察到该吸波器在 4. GHz、6. 7 GHz 及 9. 2 GHz 3 个频率处具有较好的吸收峰,分别是 99%、93% 及 95%。Shen 团队研究发现,该吸波器对偏振不敏感且能实现广角吸收,在热探测、光谱成像等领域有一定的应用价值。

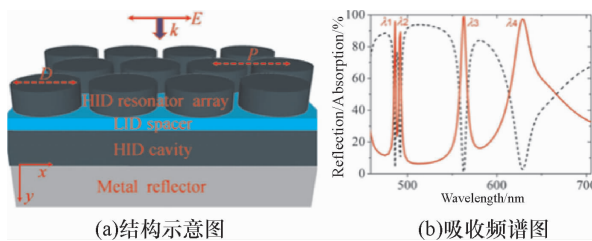


(a)结构示意图 (b)吸收频谱图

图 5 Shen 等<sup>[14]</sup>提出的三波段吸波器

Fig. 5 Three band absorber proposed by Shen, et al. <sup>[14]</sup>

在 2016 年,Liu 等<sup>[15]</sup>提出了一种金属层耦合介质超材料,可对多波段光完全吸收,结构如图 6(a)所示,吸收频谱图如图 6(b)所示。该吸波器在可见光波段范围内具有 4 个吸收峰值,吸收率分别达到 95%、89%、98% 和 97%,窄带宽为 2 nm。Liu 团队研究发现,该吸波器偏振无关且可实现广角吸收的多频带吸收,为多波段可见光吸收体的研究提供了极大的参考价值,可应用在高集成度的光电器件中。



(a)结构示意图 (b)吸收频谱图

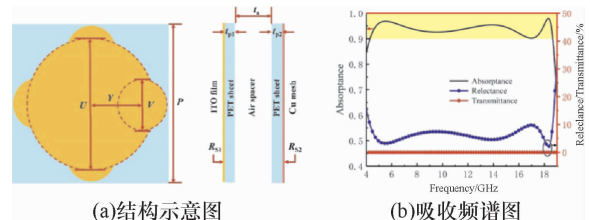
图 6 Liu 等<sup>[15]</sup>提出的多波段可见光吸波器

Fig. 6 Multi band visible light absorber proposed by Liu, et al. <sup>[15]</sup>

### 1.5 宽带吸波器

相较于窄带吸收,宽带吸收的应用会更为广泛<sup>[8]</sup>,近期的研究都比较集中在如何保证高吸收率的同时扩展其吸收宽带,这也是微波吸收体当前主要的研究方向。

2020 年 Min 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于简单图案化电阻膜表面的超宽带吸收体,该吸收体结构如图 7(a)所示,其吸收频谱图如图 7(b)所示。该吸收体上层使用了 PET-ITO 结构,下层使用了 PET 并在底面覆盖一层铜金属网,中间使用空气隔开。该吸收体通过实验测得在 4. 2 ~ 18. 2 GHz 频率范围内吸收率都大于 90%,相对带宽达到了 125%。Min 团队研究发现,该吸收体仅具有超宽带吸收、偏振不敏感、斜入射稳定及可见光透明等特性,在降低 RCS 方面也表现出了优秀的性能。由这些特性可知,该吸收体的应用十分广泛,包括隐形飞机的观察窗、电磁屏蔽室和透明射频系统等<sup>[16]</sup>。Min 团队所提出的基于简单图案化电阻膜表面的超宽带吸收体为未来具有“轻薄、宽频带、高性能、高共形性”特性的微波吸收体研究提供了一个重要的指导方向。



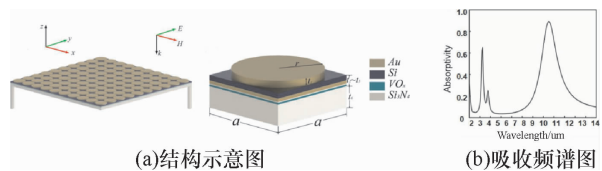
(a)结构示意图 (b)吸收频谱图

图 7 Min 等<sup>[16]</sup>提出的超宽带吸收体

Fig. 7 Ultra wideband absorber proposed by Min, et al. <sup>[16]</sup>

### 1.6 可调控吸波器

2015 年 Du 等<sup>[17]</sup>提出了一种基于超材料吸波器的微测辐射热计,可通过简单改变金盘结构的直径便可实现吸收波长在 2. 4 ~ 10. 2 μm 范围内调控,吸收峰值可达 90%,结构如图 8(a)所示,吸收频谱图如图 8(b)所示。该吸波器可应用于中远红外范围内的热成像及环境检测等。



(a)结构示意图 (b)吸收频谱图

图 8 Du 等<sup>[17]</sup>提出的可调控吸波器

Fig. 8 Tunable absorber proposed by Du, et al. <sup>[17]</sup>

2016 年 Li 等<sup>[18]</sup>提出了一种基于可调节低频宽带雷达吸波器,该吸波器采用过蝶形偶极子贴片的 PIN 二极管级联,实现了在 2 ~ 11. 3 GHz 频率范围内调控,结

构如图 9(a)所示,吸收频谱图如图 9(b)所示。该可调谐宽带雷达吸波器在隐身系统领域有广泛的应用前景。

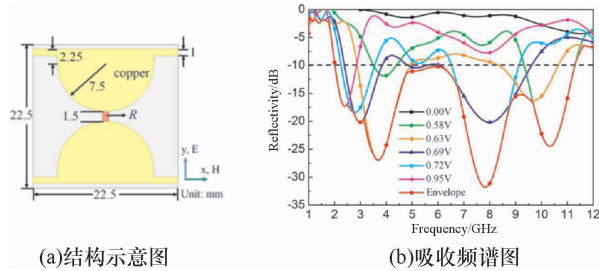


图 9 Li 等<sup>[18]</sup>提出的可调谐吸波器

Fig. 9 Tunable absorber proposed by Li, et al. <sup>[18]</sup>

## 2 微波吸收体的 6 种结构

### 2.1 频率选择表面型

在超表面微波吸收体中,频率选择表面型吸收体是其中一种典型的结构。这种吸收体的厚度很薄,它的表面是由许多无源谐振单元以一定规律排列组成的单屏或者多屏周期阵列结构。通过对这些周期性单元结构进行修改、加工,改变它的形状、尺寸和周期性,从而实现反射某种频率范围的入射电磁波。

早期有一些频率选择表面型的吸波器可以通过调节表面图案的尺寸来改变其有效介电常数和磁导率,从而在谐振频率处完成阻抗完美匹配,获得很好的单频吸收率<sup>[19-20]</sup>。但是这些吸波器在谐振频率之外的阻抗匹配不明显,使得吸收带宽过窄<sup>[21]</sup>,在应用上存在较大的限制。因此,如何在保持谐振频率可调特性的同时,扩大其吸收带宽是目前对频率选择表面型吸收体的主要研究方向。

2019 年北京航天长征飞行器研究所的王明亮团队<sup>[22]</sup>提出了对圆环 FSS 宽带吸波材料的设计研究,所提出的吸波器结构如图 10 所示。他们采用 FSS 与吸波材料的复合结构,通过改变圆环的半径、单元阵列周期及 FSS 几何形状实现了吸收体的吸收峰可在 2 ~ 12 GHz 频率范围内调控,且在该频率范围内的整体反射率都保持在 -10 dB 以下,拥有比较优秀的吸收性能。

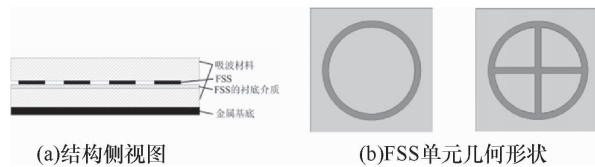


图 10 王明亮等<sup>[22]</sup>提出的 FSS 吸波结构

Fig. 10 Microwave absorbing structure of FSS proposed by Wang Mingliang, et al. <sup>[22]</sup>

2020 年南京理工大学的周仕浩团队<sup>[23]</sup>提出了一种

基于 FSS 的双频带实时可调的吸波器,结构如图 11(a)所示,吸收频谱图如图 11(b)所示。该吸波器具有可重构单元,引入了一种新型的偏置网络,通过独立控制每个 PIN 二极管的导通和截止状态,实现对双频带吸收的调控和阵面散射场的实时调控。实验证明,该吸波器的阵列 RCS 在可实现 S 频带 33 dB、X 频带 26 dB 的范围内编程调节<sup>[23]</sup>。这项研究对于 RCS 隐身和伪装的应用领域具有重大的意义。

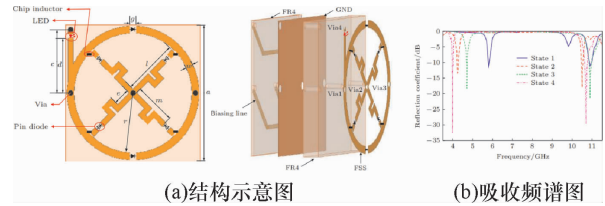


图 11 周仕浩等<sup>[23]</sup>提出的 FSS 吸波结构

Fig. 11 FSS absorbing structure proposed by Zhou Shihao, et al. <sup>[23]</sup>

### 2.2 图案化电阻膜型

基于电磁谐振设计的频率选择表面(FSS)型超表面吸波复合材料,由于谐振频点数量的限制,导致吸收带宽较窄,而且频率选择表面型超表面本身不具有损耗功能。为了改变这一现状,提出了一种加载集总元件的频率选择表面,即在单元金属片裂纹空隙之间添加欧姆电阻,以使电磁波通过超表面时产生欧姆损耗,但其加工过程繁琐,导致成本升高。

宽带吸收可以通过设计多个谐振结构,使用多层结构,或者加载集总元件来实现。吸收峰也可以通过增加谐振器的电阻来加宽。在这些情况下,电磁谐振可以转换成谐振结构和接地板之间的电路谐振,增强宽带电磁波吸收。

国内外学者在微波吸收体表面设计图案化电阻膜,以替代加载集总电阻元件的 FSS,与传统吸波材料复合形成高阻抗超表面吸波体。它在 FSS 型超材料的基础上增加了表面欧姆损耗,同时还具备超材料吸波体本身特有的电磁谐振,通过与功能粒子介质损耗层的复合,进一步实现了良好的微波吸收性能。

2020 年 Deng 等<sup>[24]</sup>提出了一种基于电阻膜的宽带、极化不敏感和宽入射角稳定的超材料吸收体,结构如图 12(a)所示,吸收频谱图如图 12(b)所示。该微波吸收体由 3 层结构组成,每层电介质基底印刷有不同形状的电阻膜,在 2.34 ~ 18.95 GHz 的频率范围内,正常入射波的吸收率在 90% 以上。所提出的多层结构不仅扩展了吸收带宽,而且在较大的电磁波入射角下依然可以保持较高的吸收率<sup>[24]</sup>。

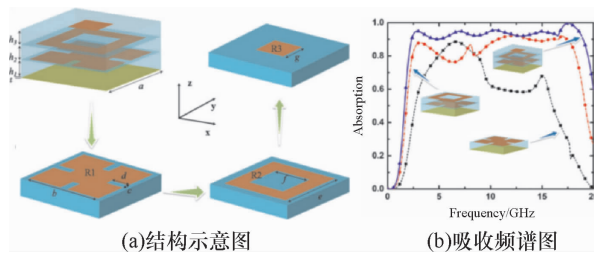
图 12 图案化电阻膜型微波吸收体<sup>[24]</sup>

Fig. 12 Patterned resistance film microwave absorber

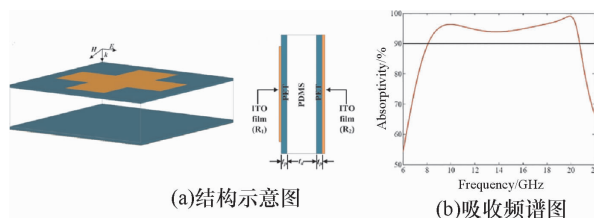
图案化电阻膜超表面结构可以使吸波复合材料兼具质量轻、吸收好、厚度薄以及制作简便等优点。超表面结构吸波材料在欧姆损耗、电路谐振以及良好阻抗匹配 3 者的协同作用下,微波吸收带宽得到大幅提升。从 FSS 裂纹间隙中加载集总电阻元件过渡到具有欧姆损耗的 PRF 超表面,其追求更简便的制备与更轻薄的设计思路也体现了超材料吸波体的发展方向。

### 2.3 柔性超材料型

目前,基于二维超表面的微波吸收体大部分是使用刚性材料(例如金属材料)为核心进行设计的,这导致微波吸收体无法进行拉伸或者弯曲,没有良好的共形性,极大地限制了吸波器在实际中的应用。

国内外的专家和学者开始对柔性超材料展开研究,发现使用柔性超材料为核心的微波吸收体经过拉伸或者弯曲等操作可以共形于各种不同表面的物体,避免了二维超表面吸收体无法共形的局限性<sup>[25-26]</sup>。此外,柔性超材料微波吸收体在各种斜入射角的情况下,仍能保持较好的吸收性能,因此,不必担心吸收体在拉伸、弯曲时导致斜入射角不同会影响吸收性能。近年来,柔性微波电子器件的介质层常用的柔性超材料为聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene Terephthalate, PET)以及聚酰亚胺(Polyimide, PI)等<sup>[27]</sup>。

在 2020 年, Tayde 等<sup>[28]</sup>提出了一种适用于 X 波段和  $K_u$  波段的光学透明柔性微波吸收体,结构如图 13(a)所示,吸收频谱图如图 13(b)所示。该吸收体的表

图 13 Tayde 等<sup>[28]</sup>提出的光学透明柔性吸收体Fig. 13 Optical transparent flexible absorber proposed by Tayde, et al. <sup>[28]</sup>

面使用了光学透明的 ITO-PET 薄片以产生欧姆损耗,中间介质使用具有柔性透明特性的 PDMS,这些柔性超材料使得该微波吸收体具备了光学透明性和柔性的新颖特性。此外,该吸收体的吸收性能也是极为优秀的,在 8~20.7 GHz 的频率范围内的吸收率高达 90% 以上。

### 2.4 三维结构超材料型

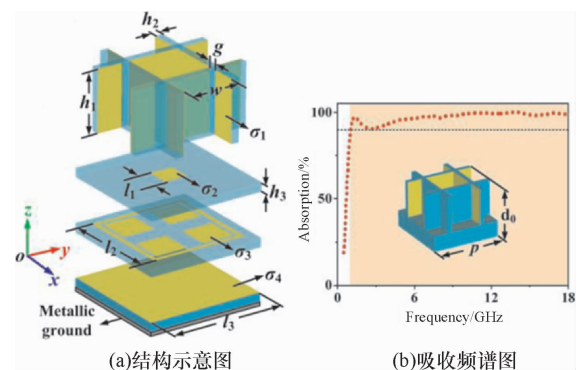
频率选择表面型微波吸收体和图案化电阻膜型微波吸收体等二维超表面结构的吸收体非常轻薄,它们的厚度一般都在微米级别,可以结合不同功能的吸波介质材料,设计出超薄的微波吸收体。但是它们还没有实现全频段吸收<sup>[29]</sup>,这时出现了三维结构的超材料型微波吸收体。

三维结构超材料具有 3D 的特性,可以保持厚度不变的情况下减小自身的重量。三维结构超材料型吸收体可以在同一个介质板上做成不一样的厚度来实现多个  $\lambda/4$  波长共振,对低频段的微波有比较好的吸收效果。同时,三维结构的阵列单元之间以及它的边角处具有电磁衍射效应,对高频段的微波有比较好的吸收效果。因此,三维结构超材料型吸收体对低频和高频微波有较强的吸收性能,这种三维结构的设计不仅提高了吸收性能并且很大程度地扩展了吸收带宽<sup>[30-31]</sup>。

三维结构超材料型吸收体一般是在传统的微波吸收体表面雕刻出人工周期性阵列单元形成三维结构。三维结构超材料型吸收体还可以分为 2 种类型,一种是将超表面的微波吸收体垂直放置,通过改变对 FSS 周期性单元结构的放置方式,形成二维超表面的三维化结构;第二种是将微波吸收体的表面图案直接进行三维化操作,设计成阵列三维结构型吸收体。

#### 2.4.1 超表面三维化结构

超表面三维化结构改变了表面周期图案与介质层传统的平铺或嵌入的结合方式,例如,2019 年 Wang 等<sup>[32]</sup>提出了一种三维混合结构的超宽带吸波器,结构如图 14(a)所示,吸收频谱图如图 14(b)所示。

图 14 Wang 等<sup>[32]</sup>提出的三维吸波结构Fig. 14 Three dimensional absorbing structure proposed by Wang, et al. <sup>[32]</sup>

该吸波器分为5层结构,顶层是由4个FSS超表面单元贴片垂直放置组成,下面3层则是3个不同形状的FSS超表面吸收体组成,最后一层是防止吸波器被电磁波透过金属层结构。Wang团队通过对吸波器每一层的参数进行优化,在每一层使用不同的优化手段(包括调节结构尺寸、电导率等)来提高每层的吸收性能,最终使得吸波器整体具有超宽带有效吸收,在1~18 GHz均拥有90%以上的吸收率<sup>[32]</sup>。

#### 2.4.2 表面图案三维化型

表面图案三维化型吸收体具有优秀的吸波性能,最重要的是它具备丰富的可设计性,距离全频段吸波的目标更近了一步。这种类型的吸收体可以自由设计和调整图案的参数,充分利用每个部分的特性,从而实现吸收不同频段微波的功能。

在2015年,Yoo等<sup>[33]</sup>提出了一种基于周期性水滴的超材料吸波器,结构如图15(a),吸收频谱图如图15(b)所示。该吸波器使用了水滴作为表面图案,通过水滴的形状来控制电磁波的吸收性能和吸收波段。Yoo团队的实验证明该吸波器在8~18 GHz表现出宽频域的吸收性能,此外,阻带边缘还可以通过水滴的高度和直径来调节,随着水滴高度的增加,它被转移到低频域;随着水滴直径的增加,它也被转移到低频域。因此,只需控制同一基底中水滴的体积,有源超材料就可以调谐到手机通信波段、卫星波段或雷达波段。据Yoo团队的研究,电导率较低的水可以使吸收体的吸收带宽变宽,这是由于激励电磁波和离子运动所产生的感应磁场共振得到的。该吸波器可与各种柔性材料基底结合,克服现有金属超材料吸波结构吸收带窄的缺点,可应用于各种领域。

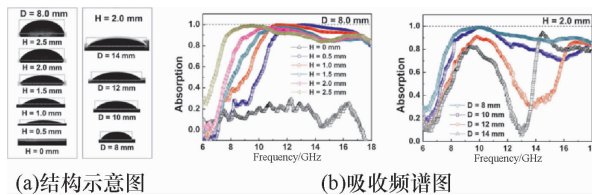


图15 Yoo等<sup>[33]</sup>提出的水滴图案吸波器

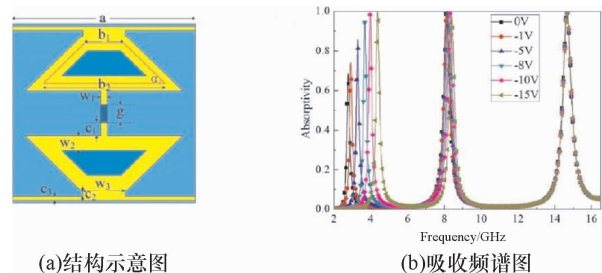
Fig. 15 Water drop pattern absorber proposed by Yoo, et al. <sup>[33]</sup>

#### 2.5 带集总元件型

根据等效电路理论,微波吸收体的表面金属图案可以理解为等效的电感和电容,从而近似确定它们的谐振频率<sup>[34]</sup>。与传统的金属图案加介质衬底的复合材料吸收体相比,加载集总元件(包括电阻、电容、电感、二极管等)的微波吸收体具备可调谐性和光谱展宽等特

性<sup>[35-36]</sup>。集总元件是通过焊接加载在金属图案上的,可将不同的谐振模式连接在一起,从而更好地消耗电磁波。而且在微波吸收体表面的金属图案上加载集总元件,可将电磁谐振转换为电路谐振,通过调节集总元件的值来改变输入阻抗和损耗特性。

2018年Xu等<sup>[37]</sup>提出了一种基于加载变容二极管的动态可调谐三频段超材料吸波器,结构如图16(a)所示,不同偏置电压下的吸收率如图16(b)所示。该吸波器将变容二极管串联在两个相对的梯形谐振环的中间,通过控制变容二极管的反向偏压,可以实现对吸波器吸收特性的调控。由图16(b)的吸收频谱图可知,随着反向偏压的增加使得第一吸收峰向高频方向移动了1.59 GHz,吸收率从68%增加至99%;第二吸收峰的峰值高达97%以上,但是它的吸收频率改变没有第一吸收峰明显,可调带宽仅有0.3 GHz,吸收峰频率由8.1 GHz移动至8.4 GHz;第三吸收峰的峰值一直保持高达99%以上的完美吸收,但吸收峰频率保持在14.6 GHz,几乎不受反向偏压的影响。



(a)结构示意图

(b)吸收频谱图

图16 Xu等<sup>[37]</sup>提出的加载变容二极管的吸波器

Fig. 16 A varactor loaded absorber proposed by Xu, et al. <sup>[37]</sup>

由Xu团队的研究可知,带集总元件型微波吸收体可以通过所加载的集总元件参数改变吸波器一层或多层阻抗,实现可调谐的吸收特性<sup>[37]</sup>。带集总元件型微波吸收体不仅使模型结构简化,而且制备工艺更加简单,此外,还具备成本低、稳定性好等优势。

#### 2.6 等离子复合材料型

在典型的超材料完美吸波结构中,当其在近红外或者可见光谱下工作时,一般占主导地位的是金属吸收。介电吸收的作用在这些频率范围内不太重要,因此,吸波器可以做得更轻薄,且在高频范围内有优秀的吸波性能。而金属纳米粒子在共振频率下为吸收和散射增强提供了定制的等离子体激元响应<sup>[38-39]</sup>。吸波器的顶层采用超薄(约20 nm)等离子体纳米复合材料(由随机分散在一般为电介质基质中的金属纳米粒子制成)代替。通过介质与自由空间的阻抗匹配可以避免外层的反射、层

与层之间的多次光反射、微小金属颗粒的光捕获和吸收,纳米复合材料可以在从紫外到可见光和近红外的宽光谱范围工作。

2018 年 Li 等<sup>[40]</sup>提出了一种适用于可见光、近红外和微波波段的宽带兼容多光谱超材料吸波器,结构如图 17(a)所示,吸收频谱如图 17(b)所示。该吸波器采用导电炭黑聚合物复合材料,填充 PE 后,该吸波器对可见光(300~780 nm)的吸收率高达 95% 以上,;对近红外(780~2 400 nm)的吸收率在 95% 左右;在微波波段(2.35~18 GHz)的吸收率在 96.8% 左右,具备宽带兼容的多光谱吸收特性。

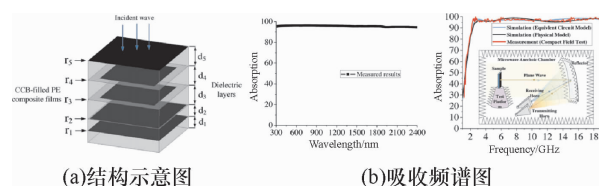


图 17 Li 等<sup>[40]</sup>提出的水滴图案吸波器

Fig. 17 Water drop pattern absorber proposed by Li, et al.<sup>[40]</sup>

纳米复合材料的类型、填充因子、周围的介电环境和不同的层厚度都会影响吸收峰的强度和位置,这给微波吸收体的设计提供了很大的设计空间。纳米复合材料的制造工艺不复杂(不涉及复杂的光刻和昂贵的电子束光刻),并且它们具备较好的吸收性能。但是,由于金属纳米粒子的等离子体特性,它们的工作频率被限制在紫外、可见光和红外的区域范围内。

### 3 微波吸收体的关键应用

微波吸收体不仅在民事应用领域有着广泛的应用前景,而且在军事领域具有很高的潜在应用价值,如电磁屏蔽、减小雷达截面和飞行器隐形隐身。由于微波吸收体在减小和抑制雷达截面方面的效果十分显著,在过去的几十年中,国内外学者进行了广泛的研究。传统的吸收体,如单层有损耗磁性和介电材料,被称为 Dallenbach 层<sup>[41]</sup>,其工作带宽由材料的电磁特性决定,这意味着设计灵活性有限;另一种典型的吸波结构是 Salisbury 屏,见图 18(a),它在导电接地层前面有一个电阻片,Salisbury 屏的工作带宽可以通过使用更多的电阻片得到扩展,得到的结构被称为 Jaumann 吸收体,见图 18(b)。与 Salisbury 屏和 Jaumann 吸收体相比,FSS 吸收器通常包括几个薄片,不仅包含电阻成分,还包含电抗成分,这有利于增加吸收带宽,减小微波吸收体的厚度,

提高可设计性<sup>[42]</sup>。

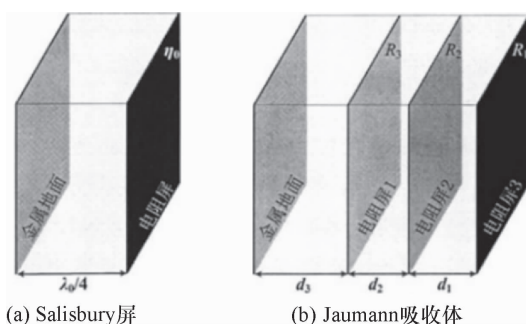


图 18 2 种经典的电磁波吸收体结构示意图<sup>[42]</sup>

Fig. 18 Two classical structures of electromagnetic absorber<sup>[42]</sup>

### 3.1 隐身技术

微波吸收体广泛应用于从军事设备到民用建筑以及无线通信设施的各个领域,因为它们能有效地耗散微波能量而不会产生任何的二次污染。大多数应用需要宽带吸收,这与雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)减小和电磁兼容性有关。

电磁波屏蔽是指电磁波的能量被表面反射或吸收而使其传播受阻或减少,是实现电磁兼容的有效方法之一。根据 Schelkunoff 理论,屏蔽效能总和可以分为反射损失、吸收损失以及材料内部多次反射损失。电磁波能量衰减程度的大小表示了屏蔽效应的好坏,以分贝值(dB)来表示,分贝值越大,则表示衰减的效果越好<sup>[43]</sup>。

电磁屏蔽材料按应用形式可分为涂敷型和结构型屏蔽材料。涂敷型材料包括电磁屏蔽涂料、表面敷层屏蔽材料、金属熔射和非电解电镀屏蔽塑料等;结构型电磁屏蔽材料包括金属化织物、复合导电纤维、碳黑和碳纤维填充复合型屏蔽塑料、金属粉或金属纤维填充型复合屏蔽塑料等。多数电磁屏蔽材料通过填充吸波剂来增强电磁波吸收性能,同时新型基材的吸波材料也得到了发展,宽频轻质吸波材料包括新型铁氧体吸波材料、金属磁性吸波材料、导电聚合物吸波材料、新型轻质碳基吸波材料以及超材料等<sup>[44]</sup>,成为军用电磁波屏蔽与吸收领域的研发和应用重点。

隐身技术在现代军事应用中起着重要的作用,尤其是在飞行器的应用。飞机的天线和机翼结构的前缘、进气口及表面凸出很容易被雷达检测到。与一般物体不同,飞机的天线是辐射体,雷达散射截面是衡量目标隐身性能的重要指标。因此,如何降低飞机天线的 RCS 成为隐身技术应用的关键问题和热门问题。雷达干扰隐身是指战斗机主动传输电磁波,具有在检测和分析来自敌方雷达电磁波后确定的干扰特性,这使敌人无法获得

有关战斗机的准确信息<sup>[45]</sup>。

20世纪30年代雷达发明后不久,关于如何减小飞机和其他军事目标雷达散射截面(RCS)的研究开始吸引学者们的关注。雷达散射截面小的飞机可以避免被雷达探测到,有更好的突防和打击能力,被敌方火力跟踪和击落的概率更低。飞机的雷达散射截面可以用不同的方法来减小,如使用微波吸收体表面,通过机动和回避战术以及雷达干扰设备。

隐身材料是指战斗机表面的隐身超材料微波吸收体涂层。敌方雷达的电磁波传输到这些隐形材料时,会被吸收并衰减。美国的F-117A隐身战斗机、B-2隐身战略轰炸机(图19)及YF-22隐身战斗机代表着当今世界隐身技术的先进水平。B-2第二代隐身轰炸机已研制成功,第一架飞机已开始服役。B-2大部分结构采用塑料、石墨/环氧树脂、碳纤维及陶瓷材料,发动机外部涂有超高密度的碳质吸波材料。B-2隐身战略轰炸机的雷达散射截面积小于 $0.1\text{ m}^2$ ,仅仅相当于一只鸟的大小。

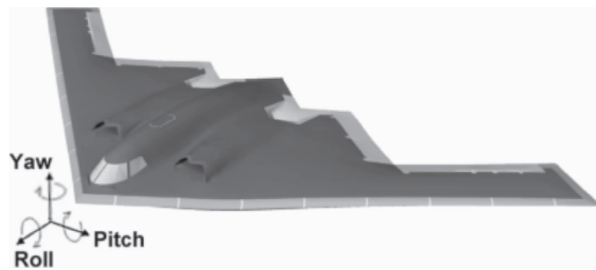


图19 使用隐身技术的B-2轰炸机<sup>[45]</sup>

Fig. 19 B-2 bomber using stealth technology<sup>[45]</sup>

目前,许多国家都对隐形技术进行了广泛的研究,特别是雷达散射截面减小的微波吸收体。

### 3.2 超材料微波吸收体

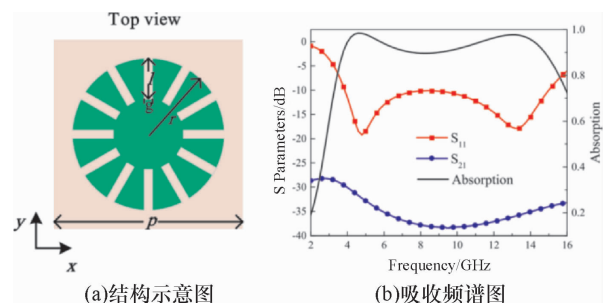
超材料是人工合成的材料,具有天然材料所不具备的优越物理特性。通过对材料关键物理尺度上的结构进行设计,可以突破某些自然规律的限制,获得超越自然界固有普通性质材料的性能。

最近几年,人工合成的超材料微波吸收器体由于其优异的可设计性而得到了广泛的研究。超材料吸收器获得宽带吸收的主要途径有2种:①通过超材料的参数调控,获得多个吸收峰,这些吸收峰被多层结构或单层结构的多个谐振器组件在频率范围内重叠;②通过加载集总电阻,涂电阻油墨使用电阻膜,增加周期性导电图形的电阻,以获得耗散能量的优良效果。

近年来,由于其显著的光学和电磁特性,基于氧化铟锡的超材料光学透明微波吸收体引起了广泛的关注。

氧化铟锡(ITO),具有独特的物理性质,便于实现高透光率和微波吸收。这一特性意味着具有周期性导电图案的氧化铟锡超材料吸收体在许多领域具有潜在的应用,如隐身飞机或潜艇、射频识别系统和电子收费系统。对氧化铟锡微波吸收体的研究主要集中在吸收方面,因为它具有突出的抗损耗特性。

2019年Zhang等<sup>[46]</sup>设计了一种超表面透明微波吸收体,结构如图20(a)所示,吸收频谱图如图20(b)所示。在提出的吸收体中,开发设计了一种齿轮形的周期单元结构,该结构由在聚甲基丙烯酸甲酯上制造的光学透明的氧化铟锡-聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜组成,以确保电磁波很好地进入并消散在吸波结构中。在4.8 GHz和13.6 GHz处分别产生2个谐振频率,分别对应于电磁谐振和电气谐振,以实现从3.86~15.04 GHz的宽吸收频带,覆盖S,C,X和Ku频带<sup>[46]</sup>。



(a)结构示意图

(b)吸收频谱图

图20 ITO超表面光学透明微波吸收体<sup>[46]</sup>

Fig. 20 Optically transparent microwave absorber based on ITO meta-surface<sup>[46]</sup>

目前,具有代表性的超材料不仅仅只有氧化铟锡,还有石墨烯。石墨烯具有优异的光学、电学和力学特性,在材料学、微纳加工、能源、生物医学和药物传递等方面具有重要的应用前景,被认为是一种未来革命性的材料。

石墨烯作为一种由碳原子层构成的新型二维材料,被广泛应用于实现可调谐微波吸收体。由于能够控制石墨烯上的电荷密度,国内外学者开始使用石墨烯夹层结构(GSS)设计新的超宽带和可调微波吸收体,并在许多应用领域发挥着显著的作用。

2019年Chen等<sup>[47]</sup>设计并分析了一种灵活可调的微波吸收体(图21),得到了一个高透过率通带和2个相邻吸收带。此外,通过集成GSS结构实现了连续可调谐传输,使微波吸收体具有能量操纵的功能。与传统的微波吸收体相比,该设计没有采用焊接工艺,使设计的微波吸收体具有更广泛的适用频率。同时,这种处理可以降低馈电网络的复杂性,并且采用的制造工艺与不能

承受焊接温度的柔性材料(如聚氯乙烯)兼容,因此,该微波吸收体设计也可以应用于保形情况。石墨烯夹层结构(GSS)设计在电磁隐身、兼容性和防护领域有很大的应用前景<sup>[47]</sup>。

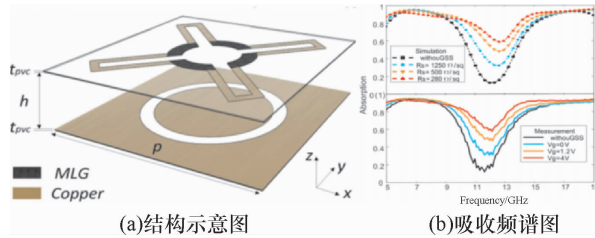


图 21 石墨烯夹层结构(GSS)微波吸收体<sup>[47]</sup>

Fig. 21 Graphene sandwich structure (GSS) microwave absorber<sup>[47]</sup>

石墨烯虽然具有优越的光学、力学材料特性,但是高品质石墨烯的制备工艺较为困难,掺有杂质的石墨烯层会影响吸波结构的吸收率,在未来的实际应用还有待考证。

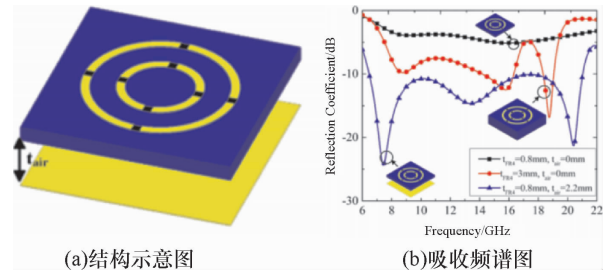
### 3.3 极化不敏感超带宽吸波结构

除了吸收带宽,另一个关键要求是微波吸收体的极化不敏感。极化不敏感吸收体使用对称结构,薄的、宽带的和极化不敏感的微波吸收体在不同的潜在应用中有很大的需求。但是,这种微波吸收体的设计确实是一项具有挑战性的任务。最近,研究者们已经进行了一些努力来加宽薄吸收体的带宽。通过设计晶胞几何形状,使得共振紧密间隔,从而产生宽带宽。多重共振结构、多层电阻的使用,以及分形图案的使用等也用于加宽带宽。现阶段部分微波吸收体拥有可观的吸收带宽,但是尺寸不小,一些微波吸收体尺寸小,但没有足够的带宽。因此,如何使用薄而轻的结构实现超宽带范围的完美吸收是一个问题。现阶段微波吸收体研究工作的新颖性在于通过使用最佳的周期单元几何形状结构、电阻负载和人工智能来设计极化不敏感超宽带超薄微波吸收体。

在高频电路中消除杂散和抑制无效的辐射是困难的。在薄的单层微波吸收体中实现超宽带吸收成为挑战。

2021年 Sambhav 等<sup>[48]</sup>研究了一种新的、极化不敏感的、超宽带且重量轻的薄微波吸收体,结构如图 22(a)所示,吸收频谱图如图 22(b)所示。所提出的微波吸收体在 6.7~20.58 GHz 的频率范围内实现了 90% 以上的吸收率。由于 4 重结构的对称性使得吸收体极化不敏感,该微波吸收体紧凑、重量轻(使用空气作为隔离物)且薄,并且提供了构造宽带微波吸收体以减少电磁

干扰的替代方案<sup>[48]</sup>。



(a)结构示意图

(b)吸收频谱图

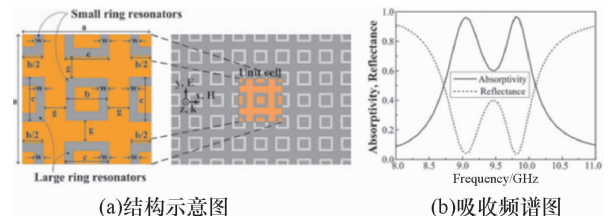
图 22 极化不敏感超宽带微波吸收体<sup>[48]</sup>

Fig. 22 Polarization insensitive ultra wideband microwave absorber<sup>[48]</sup>

### 3.4 可穿戴吸波设备

一般而言,在 FSS 微波吸收体设计中,周期性谐振器贴片位于有损耗衬底的顶侧,而接地位于衬底的后侧。在共振频率下,由于材料和空气之间的阻抗匹配,反射波减少。此外,由于吸收器的损耗,透射波被吸收。然而,基于共振的微波吸收体具有窄的吸收带宽。因此,需要一个双波段微波吸收体来克服这个问题。虽然使用同心环可以实现双频带特性,但很难实现相邻吸收峰的宽带吸收。由于其重量轻、成本低、易于制造和实用性,使用纺织材料用于可穿戴应用的微波组件已成为一个有吸引力的研究课题。通常,导电纺织品用于导电元件,例如天线的辐射元件或接地;而非导电织物,如丝、羊毛、皮革或毡用作基底。使用纺织材料的研究主要集中在共形、柔性 and 标识天线的可穿戴设备上。

2017年, Tak 等<sup>[49]</sup>提出了一种用于室内雷达透明应用的可穿戴超材料微波吸收器(图 23),它是由 2 个不同尺寸的方形、环形谐振器、背衬接地层和厚度为 1 mm 的毡衬底组成,所有导电材料都是用导电纺织品制造的。由于 2 个相邻的谐振峰,不同的方形环谐振器的栅格陈列提供了较宽的吸收频谱。模拟和测量结果显示,在 9.475 GHz 时,吸收峰值在 90% 以上。此外,所提出的吸波器具有高吸收率,且与电磁波的偏振角和变形效应无关。该频率选择结构可以很容易地扩展到多波段应用的吸收器设计,并可以集成应用在衣服上<sup>[49]</sup>。



(a)结构示意图

(b)吸收频谱图

图 23 可穿戴吸波设备<sup>[49]</sup>

Fig. 23 Wearable absorber<sup>[49]</sup>

## 4 超材料表面制备

上文出现的 ITO 超材料薄膜可以在微波波段制备出基于人工电磁结构的微波透明吸波结构。ITO 超材料薄膜虽然透过率高,导电能力强,但是 ITO 超材料薄膜也有缺陷,不能弯折且易碎的特性使其在实际应用中受到限制。为了能够使吸波结构有更大的应用范围和实用价值,基于柔性衬底吸波结构的研究和应用成为当下研究的热点。目前,已经有一些研究组开展了基于柔性材料微波元器件方面的研究:Singh 等<sup>[50]</sup>在 PI 基板上利用开口谐振环设计出了频点位于 77 GHz 的柔性电磁超材料吸波器,单频吸收器的峰值吸收在 77.2 GHz、94.8 GHz 和 109.5 GHz 时分别为 92%、94% 和 99%;多频吸收器的峰值吸收在 77 GHz、95 GHz 和 109.8 GHz 时分别为 92%、94% 和 99%;Jang 等<sup>[51]</sup>提出一种在 PET 和 PDMS 上喷涂由铝构成的超材料结构以及使用铝网作为地板层而设计出的一种吸收频带在 5.8 ~ 12.2 GHz 的柔性微波吸波结构,整个结构的透光率大于 62%。这些柔性吸波器件仍然使用金属材料在柔性的基板上设计并制备出相应的吸波器件,国内外学者提议改用非金属导电材料来设计和加工吸波器件,可以得到性能良好的透明、柔性吸波结构,这将给吸波器件的应用打开全新的方向。

为了将吸波结构投入到更大范围的实际应用中,需要设计实现基于柔性衬底的微波吸波结构。首先将 ITO 膜镀在柔性的 PET 衬底上,然后再进行蚀刻,得到周期排列的人工电磁结构,进而制备出在微波波段的柔性微波吸波结构。这种柔性透明微波吸波结构将为隐身电磁系统以及柔性微波电路提供新的设计思路。

激光蚀刻和光刻工艺是成熟的半导体工艺流程,根据所设计出的吸波器谐振单元图形可以利用激光蚀刻和光刻完成样品制备。同时,利用静电直写仪,可以对样品进行相同的制备。在制备过程中,由于大部分设计出的微波吸收体图形较为复杂,需要对静电直写仪的输入电压、推流速度和机械移动平台移动速度进行调试,以便制备出性能最为接近的样品。同时,利用静电直写可以在曲面样品表面制备相同的微波吸收体,这需要对机械移动平台进行相应调试,以保证在高速运动

的同时,相近的喷射点位置电压和射流保持稳定。

## 5 微波吸收体未来的研究方向

微波吸收体的未来研究方向主要在 2 方面:军事应用和民事应用。人们发明微波吸收体的初衷是在武器装备对雷达隐身与反隐身方面的应用,并且迄今为止仍然是国防科研中的重要课题。譬如,将微波吸收材料应用在雷达隐身方面用于降低目标的雷达散射截面,已经逐渐成为提升现代武器装备及指挥系统作战能力的重要参考指标;此外,随着电子工业的发展,各种电子无线设备产生的电磁辐射污染日益严重,不仅造成电子无线设备间的相互干扰,而且严重影响人体健康。另外,电子无线设备中的信息通过传导和辐射的形式向外部泄露,对于信息安全来说,电磁辐射比传导更容易被侦获。因此,使用微波吸收体用于提高电子设备电磁环境安全性方面的研究就显得极为重要。

现阶段微波吸收体研究主要从吸波机理入手,通过增加表面层、结构图案设计、超材料参数调控、阻抗匹配和等效电路模型模拟,进一步拓宽吸收带宽并提升吸收性能。

在实际应用中,除了对微波吸收体的吸波性能有要求外,还要求吸波材料具有良好的物理化学性能,可概括为“薄、轻、宽、强”。“薄”是对厚度的要求,“宽”是对工作频带的要求,“轻”是对重量的要求,“强”是对吸波材料力学性能、环境适应性能和理化性能等方面的要求。

## 6 总 结

微波吸收体的发展极为迅速,短短几年时间已经出现了多种具有新颖特性的吸收体。若想让微波吸收体拥有良好的发展前景,如何进一步扩宽带宽并提升吸收性能是主要的研究方向。微波吸收体在保持优秀吸收性能的同时,使其具备更多新颖特性(如吸收带宽可调、光学透明、可共形性等)是未来微波吸收体的发展趋势。本文综述了微波吸收体的分类、结构、应用、制备及展望 5 个部分内容,总结了近年来一些优秀微波吸收体的研究方案,对未来微波吸收体的设计具有重大的参考意义。

### 参考文献:

- [1] 于靖军,谢岩,裴旭. 负泊松比超材料研究进展[J]. 机械工程学报,2018,54(13):1-14.
- [2] 沈杨,王甲富,张介秋,等. 基于超材料的雷达吸波材料研究进展[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2018,19

- (6):39-47.
- [3] 王彦朝,许河秀,王朝辉,等. 电磁超材料吸波体的研究进展[J]. 物理学报,2020,69(13):39-51.
- [4] 田小永,尹丽仙,李涤尘. 三维超材料制造技术现状与趋势[J]. 光电工程,2017,44(1):69-76,119.
- [5] 周济,李龙土. 超材料技术及其应用展望[J]. 中国工程科学,2018,20(6):69-74.
- [6] Habib H, Atassi Y, Salloum A, et al. An ecofriendly, cost-effective, lightweight microwave absorber based on waste toner [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2021, doi: 10.1007/s11664-020-08679-6.
- [7] Yang C, Chen S, Niu S, et al. Transparent broadband microwave metamaterial absorber with thermal insulating and soundproof[J]. *Optoelectronics Letters*, 2021, doi:10.1007/s11801-021-0023-8.
- [8] Liang Q Q, Yu W X, Zhao W C, et al. Numerical study of the meta-nanopyramid array as efficient solar energy absorber [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(8): 1187-1196.
- [9] Landy N I, Sajuygbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, doi: 10.1103/PhysRevLett.100.207402.
- [10] 涂灏. 带通频率选择吸波体研究与设计[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2017.
- [11] Xu Y, Xu Q, Liu T, et al. A wide band absorbing material design using band-pass frequency selective surface[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol:IOP Publishing, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/322/2/022029.
- [12] Sampath S S, Sivasamy R, Kumar K J J. A novel miniaturized polarization independent band-stop frequency selective surface[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 61(5): 1678-1681.
- [13] Xiu X, Che W, Han Y, et al. Low-profile dual-polarization frequency-selective absorbers based on simple-structure lossy cross-frame elements[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(6): 1002-1005.
- [14] Shen X, Cui T J, Zhao J, et al. Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10):9401-9407.
- [15] Liu Z, Liu G, Fu G, et al. Multi-band light perfect absorption by a metal layer-coupled dielectric metamaterial[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5):5020-5025.
- [16] Min P, Song Z, Yang L, et al. Transparent ultrawideband absorber based on simple patterned resistive metasurface with three resonant modes[J]. *Optics Express*, 2020, doi:10.1364/OE.396812.
- [17] Du K, Li Q, Zhang W, et al. Wavelength and thermal distribution selectable microbolometers based on metamaterial absorbers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3):1-8.
- [18] Li J, Jiang J, He Y, et al. Design of a tunable low-frequency and broadband radar absorber based on active frequency selective surface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2015.2473688.
- [19] Ding F, Cui Y X, Ge X C, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letter*, 2015, doi:10.1063/1.3692178.
- [20] 徐艳丽,梅中磊,罗姣莲. 一种斜层复合结构及其在吸波材料中的潜在应用 [J]. 量子电子学报, 2018,35(182): 99-104.
- [21] Chen X, Li Y Q, Fu Y Q, et al. Design and analysis of lumped resistor loaded metamaterial absorber with transmission band[J]. *Optics Express*, 2012,20(27): 28347-28352.
- [22] 王明亮,刘佳琪,刘鑫,等. 基于圆环 FSS 的宽带吸波材料设计研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2019, 5(6):103-106.
- [23] 周仕浩,房欣宇,李猛猛,等. S/X 双频段吸波实时可调的吸波器[J]. 物理学报, 2020, 69(20):226-234.
- [24] Deng G, Lyu K, Sun H, et al. An ultra-wideband, polarization insensitive metamaterial absorber based on multiple resistive film layers with wide-incident-angle stability[J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2021, 13(1):58-66.
- [25] 王玲玲. 新型电磁超材料吸波器研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- [26] 高丽,陆炳卫,徐航勋. 柔性光学超材料和等离子激元的发展和应[J]. 中国科学:物理学力学天文学,2016,46(4): 30-41.
- [27] Deng R, Li M, Badar M, et al. Theoretical analysis and design of ultrathin broadband optically transparent microwave metamaterial absorbers[J]. *Materials*, 2018, doi:10.3390/ma11010107.

- [28] Yakeen T, Kajal C, Gaganpreet S, et al. An optically transparent and flexible microwave absorber for X and Ku bands application[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, doi:10.1002/mop.32269.
- [29] Han X, Wu Y B, Dong J, et al. Ultra-thin and broadband tunable metamaterial graphene absorber[J]. *Optics Express*, 2018,26(2): 1681-1688.
- [30] Zhou Q, Yin X W, Ye F, et al. A novel two-layer periodic stepped structure for effective broadband radar electromagnetic absorption[J]. *Materials & Design*, 2017,123:46-53.
- [31] Song W L, Zhou Z L, Wang L C, et al. Constructing repairable meta-structures of ultra-broad-band electromagnetic absorption from three-dimensional printed patterned shells[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017,9: 43179-43187.
- [32] Wang C Y, Liang J G, Cai T, et al. High-performance and ultra-broadband metamaterial absorber based on mixed absorption mechanisms[J]. *IEEE Access*, 2019, doi:10.1109/ACCESS.2019.2913278.
- [33] Yoo Y J, Ju S, Park S Y, et al. Metamaterial absorber for electromagnetic waves in periodic water droplets[J]. *Scientific Reports*, 2015, doi:10.1038/srep14018.
- [34] Zhou J, Zhang L, Tuttle G, et al. Negative index materials using simple short wire pairs[J]. *Physical Review B*, 2006, doi:10.1103/PhysRevB.73.041101.
- [35] Gu S, Barrett J P, Hand T H, et al. A broadband low-reflection metamaterial absorber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, doi:10.1063/1.3485808.
- [36] Li S, Gao J, Cao X, et al. Wideband, thin, and polarization-insensitive perfect absorber based the double octagonal rings metamaterials and lumped resistances[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, doi:10.1063/1.4891716.
- [37] Xu J, Wang J, Yang R, et al. Frequency-tunable metamaterial absorber with three bands[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2018, 172:1057-1063.
- [38] Wu J, Yu P, Susha A S, et al. Broadband efficiency enhancement in quantum dot solar cells coupled with multispiked plasmonic nanostars[J]. *Nano Energy*, 2015, 13:827-835.
- [39] Yu P, Yao Y, Wu J, et al. Effects of plasmonic metal core -dielectric shell nanoparticles on the broadband light absorption enhancement in thin film solar cells[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):1-10.
- [40] Li M, Muneer B, Yi Z, et al. A broadband compatible multispectral metamaterial absorber for visible, near - infrared, and microwave bands[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, doi:10.1002/adom.201701238.
- [41] 施扣忠. Dallenbach 型薄层吸波材料的电磁性能与设计理论[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [42] 常玉梅. 基于天线阵列和多模谐振理论的宽带微波吸收体的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014.
- [43] 王永杰, 许轶, 芦艾, 等. 电磁屏蔽与吸波材料研究进展[J]. *化工新型材料*, 2009(11):24-26.
- [44] 孔静, 高鸿, 李岩, 等. 电磁屏蔽机理及轻质宽频吸波材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(9):9055-9063.
- [45] Alves M A, Port R J, Rezende M C. Simulations of the radar cross section of a stealth aircraft[C]//*Microwave and Optoelectronics Conference*, 2007. IMOC 2007. SBMO/IEEE MTT-S International. Piscataway: IEEE, 2007:409-412.
- [46] Zhang L, Shi Y, Yang J X, et al. Broadband transparent absorber based on indium tin oxide-polyethylene terephthalate film [J]. *IEEE Access*, 2019, 7:137848-137855.
- [47] Chen H, Lu W B, Liu Z G, et al. Flexible rasorber based on graphene with energy manipulation function[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(1):351-359.
- [48] Sambhav S, Ghosh J, Singh A K. Ultra-wideband polarization insensitive thin absorber based on resistive concentric circular rings[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021(99):1-8.
- [49] Tak J, Choi J. A wearable metamaterial microwave absorber[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2017, doi:10.1109/LAWP.2016.2604257.
- [50] Singh P K, Korolev K A, Afsar M N, et al. Single and dual band 77/95/110 GHz metamaterial absorbers on flexible polyimide substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, doi:10.1063/1.3672100.
- [51] Jang T, Youn H, Shin Y J, et al. Transparent and flexible polarization-independent microwave broadband absorber[J]. *Acs Photonics*, 2014, 1(3): 279-284.