

基于人工电磁介质的宽带吸波器研究进展

Research progress in broadband absorber
based on artificial electromagnetic medium

杜宏艳¹, 张子栋¹, 田 瑞¹, 张文锦¹, 张 剑²,
刘昕宇³, 孙 凯⁴, 范润华⁴

(1 山东大学 材料科学与工程学院, 济南 250061;

2 山东大学 生命科学学院, 山东 青岛 266237;

3 同济大学 新生院, 上海 200092; 4 上海海事大学
海洋科学与工程学院, 上海 201306)

DU Hong-yan¹, ZHANG Zi-dong¹, TIAN Rui¹, ZHANG Wen-jin¹,
ZHANG Jian², LIU Xin-yu³, SUN Kai⁴, FAN Run-hua⁴

(1 School of Materials Science & Engineering, Shandong University, Jinan
250061, China; 2 School of Life Sciences, Shandong University, Qingdao
266237, Shandong, China; 3 College of New Students, Tongji University,
Shanghai 200092, China; 4 College of Ocean Science and Engineering,
Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

摘要: 利用人工电磁介质拓展吸波器吸收带宽, 是国内外研究人员主要的关注领域。本文综述近年来主要研究的基于人工电磁介质的宽带吸波器的典型结构及其应用, 分析人工电磁介质结构在提高吸波器吸收率方面的机理, 介绍基于集总元件扩宽吸波器带宽的理论模型, 强调人工电磁介质在拓展吸波带宽中的重要作用。最后展望人工电磁介质在科技领域的应用前景, 并指出宽带电磁吸波器未来的发展趋势主要集中在可协调性、多物理场耦合以及低成本制备, 尤其是高效大面积低成本制备工艺将成为未来吸波器重要的研究方向。

关键词: 人工电磁介质; 吸波器; 宽带; 集总元件

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.001015

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)06-0023-11

Abstract: Artificial electromagnetic medium can effectively expand the absorption bandwidth of the absorber, which has aroused wide attention of researchers at home and abroad. The main typical structure and application of broadband absorbers based on artificial electromagnetic medium were reviewed in recent years. The mechanism of artificial electromagnetic medium structure in improving the absorption rate of the absorber was analyzed. The theoretical model of widening the bandwidth of the absorber based on lumped elements was introduced. The important role of artificial electromagnetic medium in expanding the absorbing bandwidth was emphasized. Finally, the application prospect of electromagnetic medium in the field of science and technology was prospected, and it was pointed out that the future development trend of broadband electromagnetic absorbers mainly focuses on coordinability, multi-physics coupling and low-cost production, especially the efficient large-area low-cost production process will become important for the future.

Key words: artificial electromagnetic medium; absorber; broadband; lumped element

人工电磁介质是指一种具有天然材料所不具备的电磁特性的人工复合介质或材料^[1-3], 亦称超材料, 其电磁特性往往采用等效介电常数与等效磁导率进行描

述^[4]。人工电磁介质与天然材料相比, 其特点主要表现在以下 3 方面^[5]: (1) 具有在天然材料中难以实现或尚未发现的新颖电磁特性; (2) 是一种人工制备的周期

或非周期性复合结构;(3)其电磁特性并不是由材料本身的性质决定,而是由所设计的结构来决定。对于传统电磁介质材料而言,在材料设计及应用过程中,是依据其物性参数特点来确定材料的适用范围。因此在某些特定领域,材料物性参数往往成为制约其应用的主要因素之一,例如磁性材料中存在的斯诺克极限就是典型代表。而人工电磁介质的出现则打破了这一限制:人工电磁介质能够通过对其微结构的设计及调节,对其等效物性参数进行精确设计,从而明显拓展了电磁介质材料的应用领域。而人工电磁介质的出现被认为是电磁领域的重要突破,为通讯、雷达等领域的器件设计研发提供了新的思路^[6]。

近年来,信息技术的发展促进电子产品的更新换代。然而在享受新型电子产品所带来的便捷的同时,人们所处的电磁环境却日益恶化,精密电子设备中的电磁干扰、电磁污染所导致的健康风险等一系列问题已成为广泛关注的焦点。目前,解决电磁污染的主要思路就是使用吸波材料。吸波材料是一种通过利用材料内部的极化损耗、多重反射等多种机制,消耗进入到其内部的电磁波能量的一类材料的统称,在使用的过程中往往被制成涂层、功能性器件等多种形式,在军事及民用等领域都发挥着不可或缺的作用,如隐身设备^[7-9]、电磁屏蔽、红外探测仪、太阳能发电、光检测等。吸波材料与电磁波的相互作用主要分为反射(R),透射(T)和吸收(A),三者之和为入射电磁波所具有的总能量,即 $A+R+T=1$ 。为了提高吸波材料的吸收性能,可以从以下两方面入手:一是使用的材料能够使入射到其内部的电磁波能量迅速地衰减,达到良好的吸收效果,这通常要求较高的介电损耗或磁损耗。二是当电磁波入射到物体的表面时,使电磁波能够最大限度地到达物体的内部,减少电磁波在界面处的反射,从而提高其吸收效率,即阻抗匹配条件,要求材料的介电常数与磁导率相当。然而,对于传统的吸波材料而言,这两者往往难以同时满足,其原因在于绝大多数材料的磁导率在微波频段基本趋近于1,这就意味着限制了介电常数的取值范围,在满足阻抗匹配的前提下,难以依靠介电损耗/磁损耗来调节、提升材料的吸波性能。为实现高效率的吸收,大宽带的吸波器一直是科研工作者追求的目标。人工电磁介质所具有的等效电磁参数可设计性与可调谐性,能够有效地解决传统吸波材料中存在的高损耗与阻抗匹配之间的矛盾,为吸波材料实现“薄、轻、宽、强”的性能目标提供新的设计思路。故基于人工电磁介质的吸波器自问世以来,获得迅速发展,从最初的单频^[10-11]吸波发展到后续的多频吸波;吸收频率也从射频、微波频段发展到太赫

兹^[12]、红外^[13]以及可见光^[14]波段;入射角度从最初的垂直入射延伸到之后的多角度入射;极化程度也从最初的极化敏感发展到极化不敏感^[11];而吸收带宽也从窄带扩展到了宽带。

本文对基于人工电磁介质的宽带吸波器的典型结构及其应用进行介绍,主要综述当前基于人工电磁介质的宽带吸波材料的发展概况以及面临的巨大挑战,同时介绍多种尺寸结构及基于集总元件的宽带吸波器,最后展望人工电磁介质在未来的研究热点以及应用前景。

1 宽带吸波器的典型结构

基于人工电磁介质的吸波器于2008年,由美国波士顿学院的Landy等^[15]提出,其结构为“三明治”结构。尽管该类型的吸波器能够有效克服传统吸波材料中存在的阻抗匹配及吸收强度等问题,但由于受结构局限性的影响,其工作频段被限制在微波波段,并且有效吸收带宽较窄,限制了其应用。之后,科研工作者在此基础上对该结构的吸波器进行了改进,设计出不同结构且能在大的带宽范围内实现良好的吸波性能的吸波器。目前,主要有3种方法来提高吸波器的吸收带宽:(1)在一个平面内设计不同的子单元来实现宽带吸收^[16-17];(2)在垂直方向上,通过不同尺寸的子单元层层堆叠来实现宽带吸收^[18-20];(3)通过设计复杂的集总元件来实现宽带吸收^[21-22]。

1.1 平面排列

宽带吸波器的平面排列是一种比较简单的宽带吸波结构。该结构把形状相同、大小不同的子单元设计在同一个平面中,利用不同大小的单元结构共同作用形成多峰吸收体,最终实现宽带吸波。目前,常用的单元结构有花瓣形结构、树枝状结构、十字形结构等。

Bai等^[23]设计了一种基于混合超材料的太赫兹调制器,具有偏振独立且光学控制的特点。该器件在结构上对称,频率跨度为0.45~0.85 THz。此外,利用多谐振峰相互叠加的原理同样可以实现宽带吸收,如邹涛波等^[24]设计了一种基于人工电磁介质的宽带吸波器,结构如图1(a)所示。该吸波器结构单元呈平面排列,是由多个形状相同但大小不同的单元所构成,每个单元形成一个单峰吸收体,多个单峰吸收体共同作用,最终实现宽频吸收,吸收率高达80%。2012年,Huang等^[25]提出了一种“工”字形的吸波器。该吸波器与邹涛波等^[24]设计的吸波器结构类似,3个“工”字产生的谐振频率相互叠加,实现在太赫兹频段范围内

的宽频吸收。然而,目前的宽带超材料吸波器设计存在不足,例如对入射波极化的敏感性及可接受角度窄等,基于此 Wang 等^[16]提出了一种共面宽频带和极化不敏感的理想吸收体。它是由两个方形金属谐振环、硅基片介电层和金属背板组成,结构如图 1(b)所示。该装置的半高宽相对于中心频率可达 42%,是单层结构的 2 倍,在较宽的入射角范围内,该结构可以很好地保留此特性。同时,为实现不依赖于角度和偏振的双频吸收器,Cheng 等^[26]对 SiO₂/Ag/Si 基片上的二维金属宽频吸收材料进行实验研究,其结构如图 1(c)所示。相关研究表明,结构单元之间的谐振能够有效提高微波吸收率。然而在上述结构中,谐振特性的产生与圆盘密度密切相关,当圆盘密度小于一定值之后,谐振会减弱甚至消失,从而导致吸波特性消失。因此,在适当范围内调整圆盘大小与单位面积之比,可在一定程度上提高该结构的吸收率。金属盘在横向电(TE)和横向磁(TM)两种极化作用下都表现出局域表面等离子体激元极化(localized surface plasmon polariton, LSPP)模式。由于 LSPP 模式与周期无关,因此可以

实现宽带热辐射源。通过控制比例和圆盘尺寸,获得高性能、宽角度、偏振非敏感的双频吸收材料。

以上设计表明平面排列结构吸波器结构简单,易于制备,而且能有效利用多峰吸收体来拓宽其吸收带宽,因此近年来,国内外研究者利用平面宽频吸收器的特性,开发出多种器件。Ma 等^[27]设计并制作了一个太赫兹频率范围内的高阻硅双频谐振器,结构如图 1(d)所示。该装置设计用于 2.6, 4.3 THz。测量结果与模拟数据吻合良好,这些双波段共振装置可用于双波段光谱成像和多波段生物传感器。Kafesaki 等^[28]基于开口谐振环单元(split-ring resonators, SRR)提出了一种太赫兹超材料理论模型,通过在各种 SRR 中适当地放置光电导半导体,来实现光学可切换和可调谐特性。半导体可以用作衬底材料,也可以被放置在 SRR 结构的关键部位。其原理是,当用光泵激励半导体时,半导体材料可以从绝缘状态转变为导电状态,表现出类似于开关的效果,调节超材料结构单元的响应特性,从而进一步实现对入射光束的蓝移/红移及宽带相位调制。

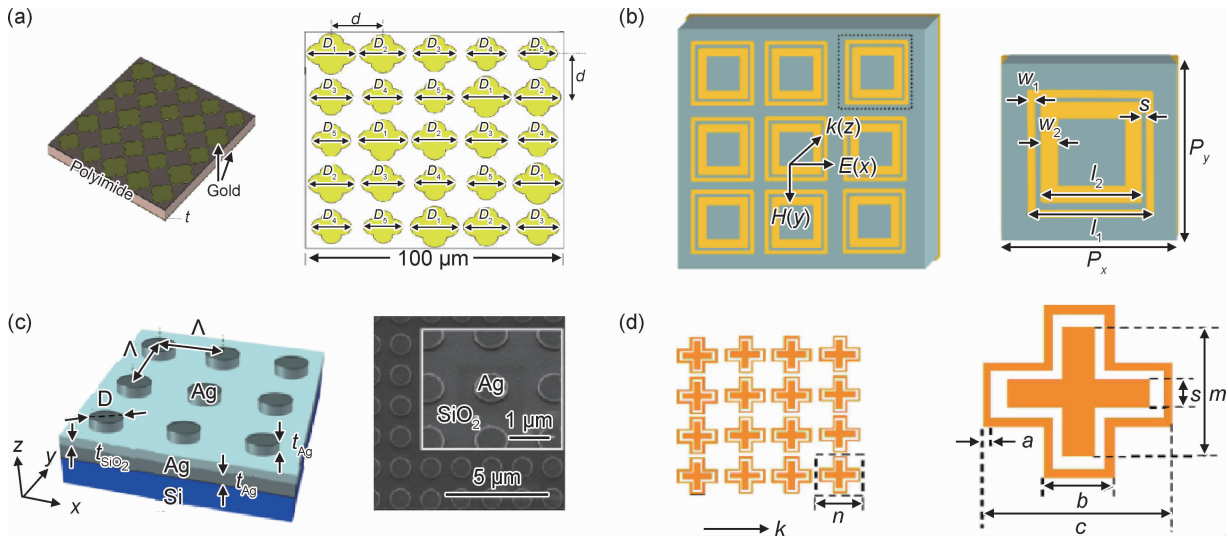


图 1 平面排列宽频吸波器结构示意图 (a)吸波器周期单元示意图^[24];(b)超材料吸波器单元示意图^[16];
(c)金属磁盘示意图^[26];(d)太赫兹双频共振装置示意图^[27]

Fig. 1 Schematic diagrams of planar array broadband absorber (a)schematic diagram of the absorber periodic unit^[24];
(b)schematic diagram of metamaterial absorber unit^[16];(c)schematic diagram of metallic disk^[26];
(d)schematic diagram of the terahertz dual-band resonant devices^[27]

但需要指出的是,为了利用超原子与入射电磁波之间的共振耦合效应实现宽频吸收,平面排列结构吸波器共振单元的尺寸、形状及排列方式必须严格设计。因此,在微波频段,平面排列吸波器的体积往往偏大,不利于器件小型化设计及应用。

1.2 垂直排列

垂直排列结构是指利用不同尺寸的子单元在空间

中进行层层堆叠,从而获得的一类具有三维结构的超材料。与平面结构相比,垂直结构能够在有效的拓宽吸波器的吸波带宽的同时,节约空间占比。这种低空间占比的特性,在太赫兹、红外及可见光频段尤为重要。在上述频段中,工作波长位于微米、纳米量级,因此器件尺寸往往较小。这也意味着可供结构设计的物理空间相对有限。因此,从实际应用的角度出发,垂直

排列结构吸波器的设计及研发,往往也多集中于上述频段。

太赫兹是一个在重要技术方面应用较广泛的频谱,因此太赫兹波段垂直结构设计吸波器目前已成为研究热点之一。Shen 等^[29]设计了一种具有超宽带和偏振不敏感的三维太赫兹吸波材料,结构如图 2(a)所示。与多层水平堆叠的设计不同,他们设计的结构是由单轴各向异性的金纳米线阵列组成,这些金纳米线阵列填充在锥体介质中,实现超宽带吸收的原理是由于位置非常接近的电磁共振相互重叠。Ye 等^[30]提出了一种用于 TE 极化和 TM 极化的近全向 THz 吸收材料。通过简单地将多个不同几何尺寸的结构层叠加,可以有效地增强这种强吸收的带宽。He 等^[19]介绍了一种采用石墨烯-介电质多层截锥体线结构的宽频带太赫兹吸波器。结构如图 2(b)所示,多层石墨烯-介电结构可以看作是具有双曲色散和各向异性介电常数的有效均匀材料,该结构从 8 THz 到 100 THz 的极宽带宽实现了高吸收。Fan 等^[20]提出了一种由周期性超材料异质结构组成的广角宽频吸波器。通过调整双绝缘体异质结构的填充因子来控制超材料吸波器的谐振频率范围,结构如图 2(c)所示。计算结果表明,4 层结构在太赫兹频段有 4 个理想的吸收峰。相关的吸收带宽为 300 GHz,平均吸收率为 98.6%。同时,该结构对入射角不敏感。Zhu 等^[31]提出的一种金

字塔式太赫兹宽带吸波器,结构如图 2(d)所示。该结构中每一个子层表现为一个有效的波导模式,随着金属层物理尺寸的逐渐增加,共振模式数目逐渐增多,多个波导模式共振吸收峰连接在一起,形成宽带吸收。另外,他们通过优化器件,利用光刻和腐蚀等工艺,在 0.9~2.5 THz 频段范围内有效提高了吸波器的吸收效率。采用金属-介电质多层复合的方法能有效提高吸波器的吸波性能,如 Wang 等^[32]提出了一种典型的垂直排列的宽带吸波器,由介质层与薄片交替排列组成的结构单元。实验结果表明,该吸波器具有 0.3 THz 的太赫兹波宽带吸收,吸收强度达到 99%。

而对于频率高于太赫兹的红外及可见光频段,工作波长进一步减小。与平面结构相比,垂直结构往往较为复杂,几何尺寸的缩小会在客观上导致加工难度的提升,这在一定程度上限制了其应用领域。但是,这并不意味着垂直结构不适用于红外及可见光频段。事实上,国内外的相关研究结果表明,在红外及可见光频段,垂直结构吸波器依然存在极大的应用潜力。Ji 等^[33]设计了一种基于双曲线超材料波导锥形阵列宽带超吸收结构,该结构可以调节从近红外到中红外光谱区域的吸收特性。Ding 等^[34]设计了一种在金基底上由铝铬一次重复堆叠构建的周期性锥形阵列超宽带强吸波器,结构如图 2(e)所示。实验结果显示该吸波器对入射角的灵敏度较低,对偏振不敏感。根据相同

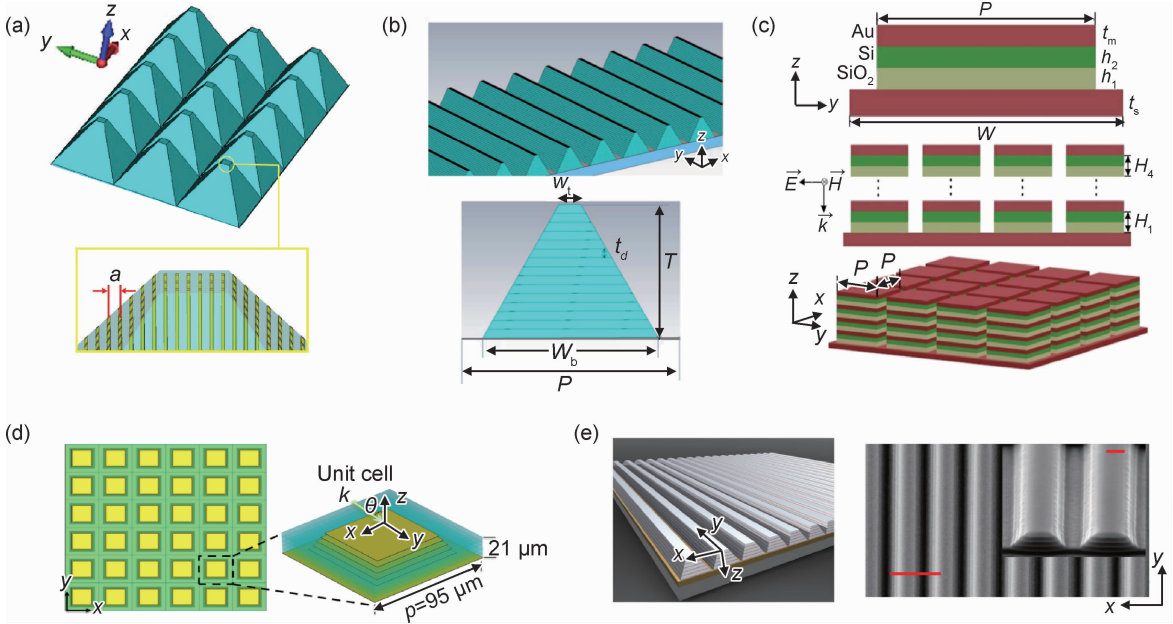


图 2 垂直排列宽频吸波器结构示意图^[19-20,29,31,34] (a)金纳米线阵列示意图;(b)多层截锥体线的示意图;

(c)单个单元和阵列的示意图;(d)金字塔形吸波器示意图;(e)锥形吸波器示意图

Fig.2 Schematic diagrams of vertically array broadband absorbers^[19-20,29,31,34] (a)schematic diagram of the gold nanowires array;

(b)schematic diagram for a line array of multilayered frustum pyramids;(c)schematic diagram of the single unit and the array;

(d)schematic diagram of the pyramid absorbers;(e)schematic diagram of taper absorber

的原理,Ding 等又设计了一种高 400 nm 的二维周期阵列超宽带强吸波器。其吸收率可达 90% 以上,吸收带宽几乎可以覆盖完整的太阳光谱,平均吸收率达到 96%,即使在较大的波长范围内也保持较高的吸收率(85% 以上)。该吸波器为热发射及热光电技术开辟了新的途径。

1.3 结合集总元件的宽带吸波器

无论是平面结构,还是垂直结构,其电磁响应特性都具有一个共同的特点,即加工成型后其电磁响应特性不能进行二次调节。因此,近年来,具有可调谐特性的超材料吸波器成为超材料研究领域的前沿,其主要的实现手段之一即在结构阵列中加载集总元件。加载集总元件的宽带吸波器,不仅保持了原有典型吸波器结构的吸波性能,而且能够结合集总元件性能的可调谐、多样化特性,探索设计并实现典型超材料结构所不能实现的新特性。在这一类超材料中,常采用的集总元件主要是电阻与电容。电阻在结构中起到能量转换的作用,使入射的电磁波最后以热能的形式释放;电容具有储能的作用,可以将入射的电磁波以能量的形式储存起来,结合电阻构成储能和耗能的装置,最后使能量得以释放。集总元件在吸波器中的使用,不仅可以有效提高吸波器的吸波性能,而且能有效解决吸波器的窄带吸收问题。同时,基于集总元件的宽带吸波器的谐振单元结构可以用等效电路模型来替代,以建模的形式对吸波器的吸波性能进行

定量分析,从而可以对吸波器的吸波性能进行进一步优化。

2011 年,顾超等^[35]设计出加载集总元件的磁谐振器,利用等效电路模型,通过加载集总元件,使得磁谐振器在较大频率范围内能被外加磁场激发,出现感应电流。出现的电流一部分被所加载的集总电阻以热能的形式释放,另一部分电流被电容储存并利用电阻将其能量消耗,形成一个充放电的回路,最终实现了宽带吸波。Ghosh 等^[36]设计出一种电路模拟吸波器,这种吸波器是由加载了集总电阻的多层 FSS 贴片所构成,这种吸波器可以通过改变表面的贴片电阻的阻值,从而解决窄带吸收的问题。Li 等^[37]通过将集总电阻加载到双八角形环的人工电磁介质中,从理论和实验方面研究了一种宽频带、薄层、偏振不敏感的理想吸收体。模拟结果表明,在 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 入射角度下,7.93 ~ 17.18 GHz 频率范围内其吸收率大于 90%,并在 $0^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 的宽入射角范围内,半高宽在 5.8 ~ 18 GHz 频率范围内带宽吸收超过 12.2 GHz。2016 年,Munaga 等^[38]设计了一种结构紧凑且极化不敏感的宽带超薄吸波器,该吸波器是由倒 Minkowski 分形环、4 个加载电阻将其连接组成了周期性排列的谐振器,结构分别为图 3(a),(b)所示,由于集总电阻的加载,使得该吸波器的阻抗与自由空间的阻抗相匹配,仿真结果与实验相结合证明加载的集总电阻存在一个最佳值,使得吸波器吸波性能最优且吸波带宽最大。

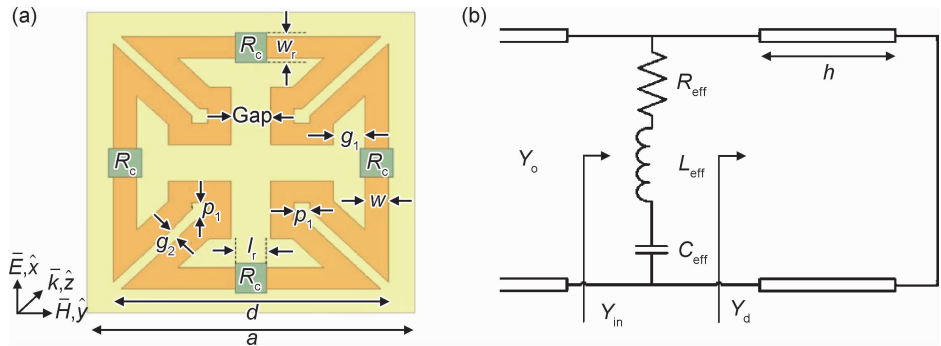


图 3 宽频吸波器周期结构单元与等效电路模型^[38] (a)倒 Minkowski 分形环;(b)等效电路模型

Fig. 3 Broadband absorber periodic structural unit and equivalent circuit model^[38]

(a)inverted Minkowski fractal loop;(b)equivalent circuit model

2019 年,吕世奇等^[39]设计出一种基于集总电阻加载的吸波体,结构如图 4 所示,这种吸波体具有小型化及超宽带的特点。该吸波体利用纵向级联的方法,通过上下两层吸波体共同作用来拓展带宽,采用加载集总电阻的方式来提高其吸波性能。同时,利用等效电路的方法分析,结果显示加载集总电阻的吸波体,在很宽的频带内可以实现良好的阻抗匹配。仿真结果与实

验结果相吻合,在 2.24 ~ 16.14 GHz 频率范围内,吸波体的吸收率始终大于 90%,证明吸波体在加载集总电阻后具有良好的吸波性能。

集总元件的引入,能够有效地增加吸波器结构中的能量损耗,从而提高吸波器的吸波性能。更为关键的是,Landy 等^[15]提出的介质损耗型吸波器中,损耗主要来源于介质层中极化的建立与极化方向的翻转,

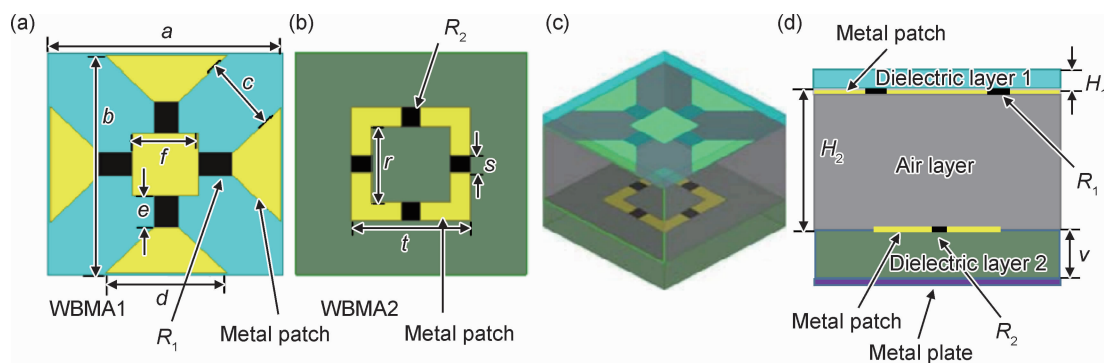


图 4 复合结构^[39] (a)WBMA1 俯视图;(b)WBMA2 俯视图;(c)立体图;(d)复合结构侧视图
Fig. 4 Composite structure^[39] (a)WBMA1 top view;(b)WBMA2 top view;
(c)perspective view;(d)composite structure side view

该过程吸收电磁波中的能量并转化为热能耗散。而加载集总元件的吸波器结构中的能量损耗,不仅包含上述过程,同时还有集总元件产生的欧姆热^[40]。相比介质损耗型吸波器,加载集总元件的吸波器增强了空间电磁能转换为电路中电能的能力,同时结合集总电阻增强电路中电能的消耗,可以更有效地吸收空间中入射的电磁波,并且加载集总元件的吸波器对入射角度具有低敏感性,能有效解决吸波器窄带吸收的问题,有望成为未来吸波器的主要发展方向。

2 应用

基于人工电磁介质的宽带吸波器突破了传统材料的限制,因其厚度小,频带宽,质量轻且吸收能力强等优点被广泛应用于多个领域。目前基于人工电磁介质的宽带吸波器应用比较广泛的领域包括太阳能、光检测、辐射热计等。

2.1 太阳能

太阳能作为最清洁的能源之一,成为目前可以开发利用的最大的能源。随着地球上自然资源的不断耗尽,对太阳能的开采利用显得尤为重要。太阳能辐射的光谱范围^[41]覆盖了紫外线、可见光以及红外线。而可见光及近红外部分是太阳能主要集中的区域,波长

范围大约在 300~1500 nm。超材料的宽带吸波器无论应用于光电效应发电的太阳能电池还是热光伏系统中的太阳能电池^[42],在很大程度上解决了太阳光分散性、不稳定性的问题,提高了太阳能利用效率并降低了生产成本,宽带吸波器在太阳能领域的应用将成为未来吸波器应用的主要方向。

在光电效应太阳能电池领域,朱路等^[43]设计出一种宽频带的纳米超材料太阳能吸波器,其结构如图 5 所示,该吸波器由多层两个正六边形组成的人工电磁介质的纳米柱以及一个硅圆环构成,并且该圆环上镶嵌了 8 个小型的金纳米柱,六边形与圆环构成波导与谐振腔的结构,在它们的共同作用下提高了吸波器的吸收带宽。一个单元结构周期性排列之后形成纳米超材料吸波器。利用 FDTD 方法,对该结构进行参数设计以及对其吸波性能进行分析,利用等效电路模型分析其等效偶极子的谐振特性。结果表明,设计的吸波器结构在 400~1500 nm 范围内对可见光及近红外光有良好的吸收,在宽角度范围内具有 90% 的高吸收率。在热光伏系统太阳能电池领域,莫磊^[42]设计出一种棋盘状结构的选择性吸波器,该吸波器利用锗纳米阵列结构的强光学腔谐振效应与相邻结构以及钽基底之间的耦合,获得优良的光谱选择性能,并且该结构在高温下具有良好的稳定性。上述研究对太阳能电池的



图 5 用于太阳能的吸波器结构示意图^[43] (a)周期性结构单元;(b)俯视图;(c)侧视图
Fig. 5 Schematic diagrams of the structure of the absorber for solar energy^[43]
(a)periodic structural element;(b)top view;(c)side view

实际应用具有重要影响,为提高太阳能利用率提供了新的思路。

2.2 光检测

光检测器是一种光电转换器,是将光信号转换为电信号再进一步放大的一种器件。在很多应用场景中,光信号的强度往往十分微弱,甚至低于传统光检测期间的响应阈值。因此,如何提高光检测器件的灵敏度成为该领域长期关注的问题。Song 等^[44]在超材料吸波器中引入二氧化钒,实现了宽带吸收。通过改进设计,同时具备了等离子体可调谐滤色片和近红外光电探测器的性能,结构如图 6(a)所示。随着二氧化钒的绝缘-金属转变,在近红外范围内的活性色和光探测带可以被调谐。由此实现了渲染颜色的变化,可以相应地指示近红外光电探测带的移动。该方法从理论上证实了通过二氧化钒基超材料吸波器设计多功能器件

的可行性,在简单的纳米结构或器件中实现多种功能,并提供了广阔的应用研究前景。

Duan 等^[45]利用空气作为介电材料在太赫兹频率范围内设计的完美吸波器,结构如图 6(b)所示。由于避免了通常由介电材料引入的损耗,质量因数提高了 3 倍。另外,在独立的氮化硅薄膜上制备了超材料,与传统的厚基片超材料相比,具有较高的灵敏度。此外,由于没有介电材料,因此有机会利用液体或气体作为介电层来表征介电常数或进行传感和检测。Wilbert 等^[46]针对极化灵敏度和宽带吸收提出了两个太赫兹超材料结构,并将标准剥离光刻技术与电子束金属沉积技术相结合,制备了吸收体。利用反射模式太赫兹时域光谱对制备的器件进行了表征。窄带吸收结构表现出高达 95% 的吸收率,带宽为 0.1~0.15 THz,极大地提高了响应灵敏度。

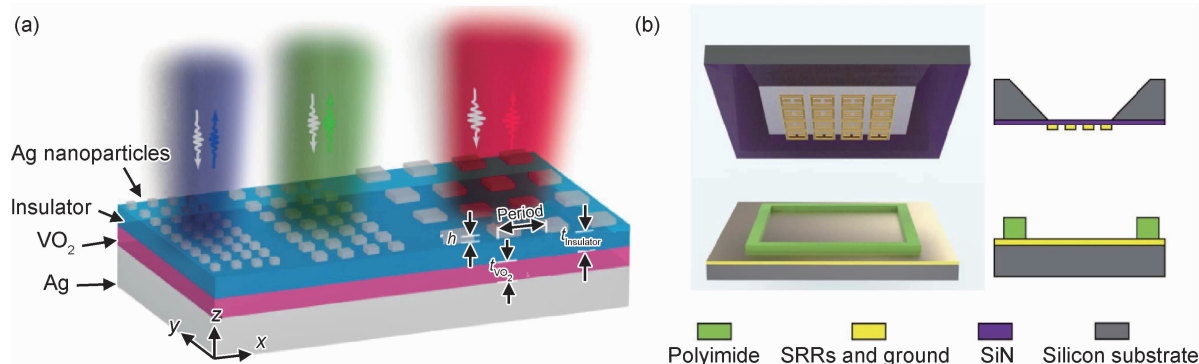


图 6 用于光检测的吸波器结构示意图^[44-45] (a)VO₂ 的超材料光电探测器示意图;(b)太赫兹吸波器示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of the absorber for photodetection^[44-45]

(a)schematic diagram of the VO₂-based metamaterial photodetector;(b)schematic diagram of the terahertz absorber

上述研究表明,通过将基于人工电磁介质的宽带吸波器应用于光检测器相关系统中,不仅可有效提高器件的灵敏度,而且提高了其响应速率,传输信号稳定可靠。

2.3 辐射热计

辐射热计一般多为微测辐射热计,辐射热计顾名思义就是检测辐射热的器件,是一种热探测器,最后通过温度计进行传感^[47]。1880 年由 Langley^[48]制作并用来探测红外辐射。早期的微测辐射热计通过红外照射后改变其结构中的电阻,通过电阻的改变值来检测其辐射热量的多少。随着微测技术的不断发展,微测辐射热计体积不断缩小到微米级别。同时,微测辐射热计的探测频率也在发生变化,从微波波段逐渐扩展到太赫兹波段。因此,如何在传统辐射热计的基础上进行有效设计,使其适应逐渐增加的检测频段宽度,具有十分重要的意义。

针对上述问题,国内外研究者针对辐射热计的工作频段,利用人工电磁介质性能的可设计特性,开发出一系列可应用于该频段范围内的材料及器件。Mason 等^[49]设计并制作了一种在中红外波长范围内具有共振的薄膜超材料。该薄膜在中红外波长范围内具有较强的可控吸收。同时,该薄膜的极化热辐射显示出高度选择性。这种结构有望用于大面积、低成本的超材料涂层,以控制灰体或黑体热信号以及中红外传感应用。Liu 等^[50]设计出一种选择性热发射器,结构如图 7(a)所示。该实验实现了一种窄带中红外热辐射源。实验结果显示发射率和吸收率与基尔霍夫热辐射定律基本一致。该研究成果证明了超材料在裁剪黑体辐射方面具有较大的灵活性。Maier 等^[51]对金属共振吸收元件进行了改进,从而在可选波长下提高了响应率。吸收峰的位置和高度由超材料的几何结构决定。根据数值模拟,作为吸收元件的方形金属/电介质/金属堆

在波长介于 $4.8\sim7.0\ \mu\text{m}$ 时显示出光谱共振,总峰吸收率为 80%。改进的超材料微测辐射热计适用于中红外和太赫兹波段的多光谱热成像系统。Grant 等^[52]提出了一种噪声等效功率优于典型商用室温单像素太赫兹探测器的单片谐振太赫兹传感器元件,结构如图 7(b)所示,该元件的热时间常数为 68 ms,接近实时读取。探测器由超材料吸波器和微测辐射热计传感器集

成。单片谐振太赫兹探测器通过添加标准读出和寻址电路,可以方便地缩放为焦平面阵列格式,从而实现紧凑、低成本的太赫兹成像。Ao 等^[53]采用传统的 MEMS 技术设计制作了 $37\ \mu\text{m}\times37\ \mu\text{m}$ 的超材料微测辐射热计阵列。红外测量表明,在 3.93 THz 时,设计的微测辐射热计表现出 31.5% 的高吸收率。然而,没有超材料的微测辐射热计在该频率下无响应。

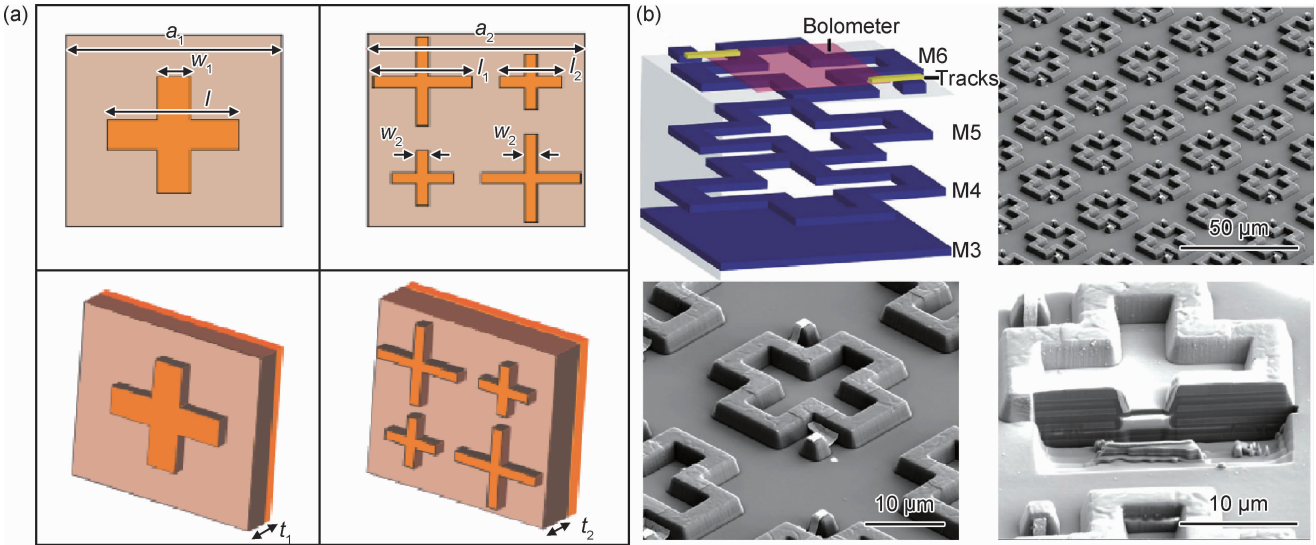


图 7 用于辐射热计的吸波器结构示意图^[50,52] (a)红外超材料吸波器示意图;(b)探测器示意图
Fig. 7 Schematic diagrams of the structure of the absorber for the bolometer^[50,52]
(a)schematic diagram of infrared metamaterial absorber;(b)schematic diagram of the detector

上述研究表明,基于人工电磁介质的宽带吸波器应用于微测辐射热计,可以在有效解决辐射热计吸收率低的同时,拓展响应频段的宽度,为今后微测辐射热计在性能的改进方面提供良好的借鉴。

3 发展趋势

随着对人工电磁介质研究的不断深入,研究人员已经制备出多种结构的宽频带吸波器,在高效、宽频电磁屏蔽及吸收领域取得了明显进展。伴随着科技的不断发展,5G 通讯、雷达探测等多个领域的应用需求呈现几何级数的增长趋势。在这一背景下,对基于人工电磁介质的宽带吸波器也提出了更高的要求,主要集中在体现在以下 3 个方面:(1)可调谐性。人工电磁介质的出现,为电磁功能材料的性能设计提供了新的思路。但由于人工电磁介质的性质来源于其结构单元,结构单元的几何形状及空间排布确定后,难以实现二次调节。因此,在已有研究的基础上,考虑将人工电磁介质的设计理念与自然材料相融合,探索实现人工电磁介质的可调谐特性,是超材料技术未来发展的主要趋势

之一。(2)多物理场耦合。随着研究的深入,通过设计周期性人工结构来实现特异性能的理念,已由最初的电磁学领域扩展至力学、热学、声学等领域。在充分研究电-磁、机-电、光-热等多物理场耦合作用的基础上,利用结构单元之间的多物理场耦合效应,实现人工介质材料的智能化响应,将对人工介质在通讯、国防、医疗等领域中的实际应用产生深远影响。(3)低成本制备。人工电磁介质中结构单元的制备,往往需要通过精密加工技术来实现,所需设备的加工精度依据结构单元的几何尺寸来确定。这也意味着对于微米、纳米级结构单元而言,加工成本成为限制其实际应用的重要因素。因此,探索研发低成本、规模化的制备工艺,对于超材料技术的工程化、产业化应用具有重大的意义。

4 结束语

基于人工电磁介质的宽带吸波材料可以通过设计其单元结构及排布,实现“薄、轻、宽、强”的优异吸波性能,被广泛应用于军事以及民用领域。目前,基于人工

电磁介质的宽带吸波材料的典型结构有 3 种:平面排列、垂直排列及加载集总元件的结构。平面排列是将不同尺寸的结构单元以一定的阵列组合在介质上,利用不同尺寸的单元对不同频率电磁波响应,最终实现宽带吸波。垂直排列是将介质层和金属层在垂直方向上交错排列构成多层结构,以实现多层结构对多个连续频率的吸收,最终达到宽带吸波的目的。加载集总元件的吸波器,相比不加载集总元件的吸波器,可以在较宽的频带范围内实现良好的吸波性能,并且加载集总元件的吸波器在结构中的参数存在最佳取值,此时吸波器的吸波性能最优。吸波器中集总电阻与电容的加入,在不改变吸波器结构的基础上增加了电路中的能量消耗,有效地提高了吸波器的吸波性能。

到目前为止,基于人工电磁介质的宽带吸波器件已在多个领域被广泛应用:基于人工电磁介质的宽带吸波器应用于以太阳能电池和太阳能热光伏为主的领域,可以有效提高太阳能的转换效率;宽带吸波器应用于光检测中,可以有效提高检测器对光的分辨率及灵敏度;宽带吸波器还可以有效提高微测辐射热计对近红外-红外辐射的吸收,拓展微测辐射热计在太赫兹波段的应用。然而,由于人工电磁介质的性能来源于周期性结构,而周期性结构的获得则需要依靠精密加工技术,从而导致其制备成本相对高昂。因此,如何实现基于人工电磁介质的宽带吸波器的低成本、大面积制备,是其在实际应用过程中亟待解决的主要问题。

参考文献

- [1] CALOZ C, ITOH T. Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications: the engineering approach [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [2] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [3] KOSCHNY T, KAFESAKI M, ECONOMOU E N, et al. Effective medium theory of left-handed materials[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(10): 107402.
- [4] 崔万照. 电磁超介质及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [5] TUONG P V, PARK J W, RHEE J Y, et al. Symmetric metamaterials based on flower-shaped structure[J]. Materials Chemistry and Physics, 2013, 141(1): 535-539.
- [6] 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.
- [7] SCHURING D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801): 977-980.
- [8] GAILLOT D P, CROENNE C, LIPPENS D. An all-dielectric route for terahertz cloaking[J]. Optics Express, 2008, 16(6): 3986-3992.
- [9] VANBÉSIEN O, FABRE N, MÉLIQUE X, et al. Photonic-crystal-based cloaking device at optical wavelengths[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): 1358-1362.
- [10] CHENG Y Z, YANG H L. Design, simulation, and measurement of metamaterial absorber[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2010, 108(3): 034906.
- [11] LANDY N I, BINGHAM C M, TYLER T, et al. Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging[J]. Physical Review B, 2009, 79(12): 125104.
- [12] SMITH D R, PENDRY J B, WILTSHIRE M C. Metamaterials and negative refractive index[J]. Science, 2004, 305(5685): 788-792.
- [13] LIU X L, STARR T, STARR A F, et al. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(20): 207403.
- [14] HAO J M, WANG J, LIU X L, et al. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(25): 251104.
- [15] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [16] WANG B X, WANG L L, WANG G Z, et al. A broadband, polarisation-insensitive and wide-angle coplanar terahertz metamaterial absorber[J]. The European Physical Journal B, 2014, 87(4): 98.
- [17] GUO Y H, WANG Y Q, PU M B, et al. Dispersion management of anisotropic metamirror for super-octave bandwidth polarization conversion[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8434.
- [18] GRANT J, MA Y, SAHA S, et al. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber[J]. Optics Letters, 2011, 36(17): 3476-3478.
- [19] HE S L, CHEN T. Broadband THz absorbers with graphene-based anisotropic metamaterial films[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013, 3(6): 757-763.
- [20] FAN J X, XIAO D, WANG Q, et al. Wide-angle broadband terahertz metamaterial absorber with a multilayered heterostructure[J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4388-4391.
- [21] GUO Y H, YAN L S, PAN W, et al. Achromatic polarization manipulation by dispersion management of anisotropic meta-mirror with dual-metasurface[J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27566-27575.
- [22] FENG Q, PU M B, HU C G, et al. Engineering the dispersion of metamaterial surface for broadband infrared absorption[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2133-2135.
- [23] BAI Y, CHEN K J. Polarization independent and optical-con-

Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2018, 19(6): 39-47.

- trolled metamaterial modulator in terahertz regime[C]//11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). Busan, Korea; IEEE, 2015: 28B1.
- [24] 邹涛波,胡放荣,肖靖,等.基于超材料的偏振不敏感太赫兹宽带吸波体设计[J].物理学报,2014,63(17):178103.
ZOU T B, HU F R, XIAO J, et al. Design of a polarization-insensitive and broadband terahertz absorber using metamaterials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(17): 178103.
- [25] HUANG L, CHOWDHURY D R, RAMANI S, et al. Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 154-156.
- [26] CHENG C W, ABBAS M N, CHIU C W, et al. Wide-angle polarization independent infrared broadband absorbers based on metallic multi-sized disk arrays[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 10376-10381.
- [27] MA Y, CHEN Q, KHALID A, et al. Terahertz dual-band resonator on silicon[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(4): 469-471.
- [28] KAFESAKI M, SHEN N H, TZORTZAKIS S, et al. Optically switchable and tunable terahertz metamaterials through photo-conductivity[J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(11): 114008.
- [29] SHEN Y, PANG Y Q, WANG J F, et al. Ultra-broadband terahertz absorption by uniaxial anisotropic nanowire metamaterials[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(21): 2284-2287.
- [30] YE Y Q, JIN Y, HE S L. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(3): 498-504.
- [31] ZHU J F, MA Z F, SUN W J, et al. Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(2): 021102.
- [32] WANG B X, WANG L L, WANG G Z, et al. Theoretical investigation of broadband and wide-angle terahertz metamaterial absorber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(2): 111-114.
- [33] JI D X, SONG H M, ZENG X, et al. Broadband absorption engineering of hyperbolic metafilm patterns[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 4498.
- [34] DING F, JIN Y, LI B, et al. Ultrabroadband strong light absorption based on thin multilayered metamaterials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 946-953.
- [35] 顾超,屈绍波,裴志斌,等.基于磁谐振器加载的宽频带超材料吸波体的设计[J].物理学报,2011,60(8):087801.
GU C, QU S B, PEI Z B, et al. Design of a wide-band metamaterial absorber based on loaded magnetic resonators[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 087801.
- [36] GHOSH S, BHATTACHARYYA S, SRIVASTAVA K V. Design, characterisation and fabrication of a broadband polarisation-insensitive multi-layer circuit analogue absorber[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, 10(8): 850-855.
- [37] LI S J, GAO J, CAO X Y, et al. Wideband, thin, and polarization-insensitive perfect absorber based the double octagonal rings metamaterials and lumped resistances[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(4): 043710.
- [38] MUNAGA P, GHOSH S, BHATTACHARYYA S, et al. A fractal-based compact broadband polarization insensitive metamaterial absorber using lumped resistors[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58(2): 343-347.
- [39] 吕世奇,高军,曹祥玉,等.一种基于集总电阻加载的小型化超宽带超材料吸波体设计[J].电子与信息学报,2019,41(6):1330-1335.
LÜ S Q, GAO J, CAO X Y, et al. A design of ultra-broad-band miniaturized metamaterial absorber based on loading lumped resistances[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(6): 1330-1335.
- [40] 宋健,李敏华,董建峰.基于集总元件的超材料吸波器研究进展[J].材料导报,2017,31(21):114-122.
SONG J, LI M H, DONG J F. Progress in metamaterial absorber based on lumped elements[J]. *Materials Review*, 2017, 31(21): 114-122.
- [41] HENRY C H. Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(8): 4494-4500.
- [42] 莫磊.宽带吸波元件及其在太阳能相关器件中的应用[D].杭州:浙江大学,2015.
MO L. Broadband absorbers and their applications on solar energy devices[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [43] 朱路,王杨,熊广,等.宽波段纳米超材料太阳能吸收器的设计及其吸收特性[J].光学学报,2017,37(9):271-280.
ZHU L, WANG Y, XIONG G, et al. Design and absorption characteristics of broadband nano metamaterial solar absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 271-280.
- [44] SONG S C, MA X L, PU M G, et al. Tailoring active color rendering and multiband photodetection in a vanadium-dioxide-based metamaterial absorber[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(6): 492-497.
- [45] DUAN G, SCHALCH J, ZHAO X, et al. An air-spacer terahertz metamaterial perfect absorber for sensing and detection applications[C]//19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS). Kaohsiung: IEEE, 2017: 1999-2002.
- [46] WILBERT D S, HOKMABADI M P, MARTINEZ J, et al. Terahertz metamaterials perfect absorbers for sensing and imaging[C]//Proceedings of SPIE. San Francisco, California: International Society for Optical Engineering, 2013: 8585.
- [47] CAPPER P, ELLIOTT C T. Infrared detectors and emitters: materials and devices[M]. New York: Springer, 2001: 020205.
- [48] LANGLEY S P. The bolometer and radiant energy[J]. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 1880, 16: 342-358.
- [49] MASON J A, SMITH S, WASSERMAN D. Strong absorption and selective thermal emission from a midinfrared metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(24): 241105.
- [50] LIU X L, TYLER T, STARR T, et al. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters[J].

Physical Review Letters,2011,107(4):045901.

[51] MAIER T, BRÜCKL H. Wavelength-tunable microbolometers with metamaterial absorbers[J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 3012-3014.

[52] GRANT J, ESCORCIA-CARRANZA I, LI C, et al. A monolithic resonant terahertz sensor element comprising a metamaterial absorber and micro-bolometer[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(6):1043-1048.

[53] AO T H, XU X D, GU Y, et al. Terahertz metamaterial-based microbolometers fabricated by conventional MEMS[J]. Optics & Photonics Journal, 2016, 6(8):215-218.

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51601105);中国博士后基金面上项目(2018T110687, 2017M622199);中国科协青年人才托举工程(2017QNRC001)

收稿日期:2019-11-07;**修订日期:**2020-03-12

通讯作者:张子栋(1986—),男,副教授,博士研究生,研究方向为电磁超材料,联系地址:山东省济南市历下区经十路 17923 号山东大学千佛山校区材料科学与工程学院主楼 707 室(250061),E-mail:zhangzidong@sdu.edu.cn

(本文责编:寇凤梅)