

激光与光电子学进展

太赫兹电磁超材料完美吸收器的研究进展

周维¹, 陈骏², 李豪¹, 谢林峰¹, 王心仪¹, 汪赢鞠¹, 叶鑫^{2**}, 陈百利^{1*}

¹四川轻化工大学化学与环境工程学院, 四川 自贡 643000;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 电磁超材料完美吸收器独特的亚波长结构能够与入射电磁波产生有效的电磁共振, 在特定的频率范围内能够达到近乎 100% 的完美吸收。近年来, 电磁超材料完美吸收器, 特别是太赫兹波段完美吸收器受到了国内外研究人员的广泛关注, 取得了一定进展。综述了基于太赫兹波段的电磁超材料完美吸收器的研究进展, 阐述了超材料吸收器的基本结构特征、性能以及理论模型, 并对太赫兹完美吸收器的未来发展趋势以及应用前景作了简要探讨。

关键词 材料; 电磁超材料完美吸收器; 太赫兹单频吸收器; 太赫兹双/多频吸收器; 太赫兹宽频吸收器; 太赫兹可调谐吸收器

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1100006

Progress of Electromagnetic Metamaterial Perfect Absorber Based on Terahertz Band

Zhou Wei¹, Chen Jun², Li Hao¹, Xie Linfeng¹, Wang Xinyi¹, Wang Yingju¹,
Ye Xin^{2**}, Chen Baili^{1*}

¹School of Chemical and Environmental Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, Sichuan, China;

²Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

Abstract Electromagnetic metamaterial perfect absorbers have unique subwavelength structures, which can generate effective electromagnetic resonance with the incident electromagnetic wave, and achieve nearly 100% perfect absorption over a specific frequency range. Electromagnetic metamaterial perfect absorbers, especially the terahertz band perfect absorbers, have been widely concerned by researchers at home and abroad, and have made some progress. In this paper, the research progress of the terahertz band-based electromagnetic metamaterial perfect absorber is reviewed, the basic structural characteristics, performance, and theoretical model of the metamaterial absorber are described, and the future development trend and application prospect of them are briefly discussed.

Key words materials; electromagnetic metamaterial perfect absorber; terahertz single-frequency absorber; terahertz dual/multifrequency absorber; terahertz broadband absorber; terahertz tunable absorber

1 引言

电磁超材料能够对入射电磁波产生均匀吸收,

在红外成像^[1]、能量收集^[2]、滤波器^[3]、电磁隐身^[4]、传感器^[5]、人工智能^[6]等方面有很好的应用和发展前景, 这些独特性质和良好的应用前景引起了科研

收稿日期: 2021-07-06; 修回日期: 2021-07-18; 录用日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61805221)、四川轻化工大学人才引进项目(2017RCL43, 2017RCL46)

通信作者: *chenbl@mail.ustc.edu.cn; **yexin@caep.cn

工作者的极大关注。电磁超材料是一种周期性的人工复合材料^[7],具有天然物质所没有的独特性质,它的结构单元一般由三层结构(“三明治”)组成^[8],分别是金属接地层、电解质层和金属超材料层。电磁超材料的结构尺寸小于外界刺激电磁波长,这种结构有利于其在特定的波长范围内与入射电磁波产生电磁共振,对入射电磁波产生均匀吸收,甚至是达到完美吸收。电磁超材料的性质不仅与其组成材料有关,还与其尺寸参数以及排列方式有关。通过对电磁超材料结构单元的尺寸参数及排列方式进行合理优化处理,能够对超材料的吸收特性进行动态调节,使其在不同的波长范围内产生有利的电磁共振,以达到对入射电磁波近乎 100% 的吸收率。随着研究的不断跟进,电磁超材料吸收器的诸多优点被挖掘出来,例如设计灵活多变、制造工艺简单、吸收强度大及响应易调节等。

超材料在太赫兹波段能够产生有效的电磁响应,因此太赫兹波电磁超材料受到了研究工作者的极大关注。2008年,Tao等^[9]首次报道了一种基于太赫兹波段的宽角度、单频窄带电磁超材料吸收器,并对其进行了不断优化。2013年,天津大学的丁春峰等^[10]综述了最初几年超材料吸收器在太赫兹波段的研究进展,简要综述了单频带、多频带、宽带以及可调谐太赫兹吸收器,并简要介绍了各类吸收器的结构及性能特性。近几年,被陆续设计的太赫兹超材料吸收器具有更优的结构及性能特征,如具有制备工艺简单、成本低、灵敏度高,以及与偏振高度无关及双控可切换等性能。2019年,华南理工

大学的邓洪朗等^[11]综述了红外及太赫兹波段电磁超材料吸收器的研究进展,文中仅介绍了太赫兹宽带及可调谐两大类超材料吸收器,而未对单频带及多频带太赫兹超材料吸收器的研究进展进行阐述。为系统阐述太赫兹超材料吸收器的最新研究现状,本文就超材料吸收器的基本结构进行了简要介绍,综述了国内外超材料吸收器在太赫兹波段的研究进展,分类介绍了几种太赫兹电磁超材料吸收器的结构及性能特征,最后对太赫兹波电磁超材料吸收器的发展趋势及应用前景作了简要探讨。

2 超材料吸收器的结构及工作原理

2.1 超材料吸收器的结构

2008年,Landy等^[12]设计出一种微波电磁超材料,并首次提出了完美吸收器的概念。他们指出电磁超材料完美吸收器由三层材料结构组成,每层结构都有独特的性能特点,其中窄带吸收器对入射电磁波具有近乎 100% 的吸收率,因而称之为完美吸收器。因其在滤波器、电磁隐身、传感器等方面具有潜在的应用价值,受到了人们的极大关注。同年,Tao等^[9]首次设计了一种太赫兹电磁超材料吸收器,如图 1 所示,其结构由超材料层、底层金属结构层和中间电介质层组成,该电磁超材料吸收器能够对 1.3 THz 的入射电磁波达到 70% 的吸收。而后,Tao等^[13]不断优化超材料吸收器,使其对 1.6 THz 频率电磁波的吸收达到了 97%,几乎达到了完美吸收。人们对电磁超材料不断研究优化,发现由超材料层、金属结构底层和中间电介质层组成

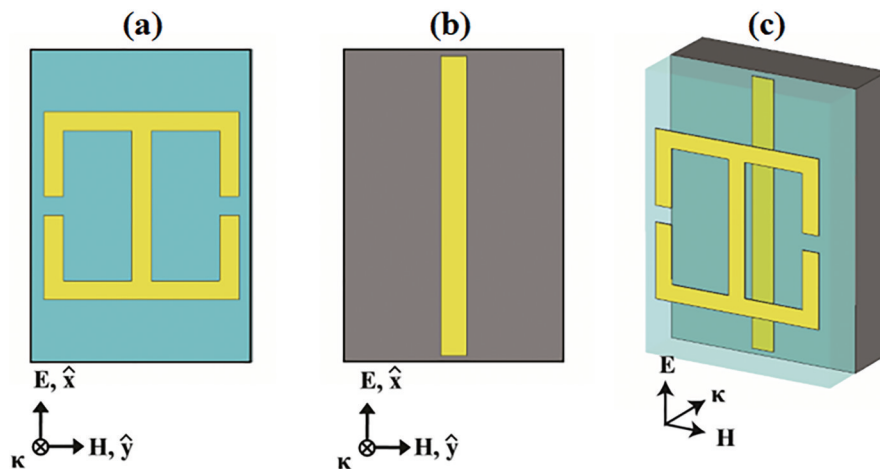


图 1 太赫兹波段完美吸收器结构示意图^[9]。(a)聚酰亚胺垫片顶部的超材料层;(b)GaAs晶圆片上的底层金属切割线;(c)包含中间介质层(聚酰亚胺)的单元结构

Fig. 1 Structure diagram of perfect absorber structure in terahertz band^[9]. (a) Metamaterial layer on top of polyimide gasket; (b) underlying metal cutting lines on GaAs wafers; (c) a cell structure containing an intermediate layer (polyimide)

的三层式结构吸收效果最佳,且制造工艺简单,这种结构逐渐成为了吸收器设计的常用结构。

也有少量双层结构的超材料,如 2019 年 Luo 等^[14]设计了一种基于低介电常数的双层聚二甲基硅氧烷全介质谐振腔结构的太赫兹超材料完美吸收器,该吸收器的结构单元由粘在连续金膜上的具有十字槽和方孔结构的双层聚二甲基硅氧烷组成,这是多频带吸收器单元结构的重要创新点。由于该吸收器能够与自由空间形成完美阻抗匹配,其分别对 2.167 THz 和 2.452 THz 的入射太赫兹电磁波的吸收率分别达到 99.6% 和 99.9%。

2.2 超材料吸收器的工作原理

超材料吸收器通常为三层结构,即超材料层、底层金属结构层和中间电介质层,这种结构使其具有其他材料所没有的独特性质。现有的完美吸收器超材料,其吸波特性和由反射率 $R(\omega)$ 和透射率 $T(\omega)$ 来表征^[15],即吸收率通常可以表示为 $A(\omega) = 1 - T(\omega) - R(\omega)$,为了最大程度地增大吸收器的吸收率,就应该最大限度地同时减小超材料结构的反射率 $R(\omega)$ 和透射率 $T(\omega)$,在一定条件下,若能

使 $T(\omega)$ 和 $R(\omega)$ 同时接近 0 或者等于 0,则将达到完美吸收的效果,即吸收率 $A(\omega) = 100\%$ 。干涉理论表明,超材料吸收器中的两层金属结构仅通过多次反射连接在一起,几乎没有近场相互作用或磁共振,通过多次反射的叠加,能够实现超材料吸收器的整体反射,如图 2(a) 所示^[16],通过多次反射相消干涉,可以使超材料对入射电磁波达到完美吸收。根据干涉理论的推导,反射系数的计算公式^[16]为

$$r = r_{12} - \frac{t_{12}t_{21}\exp(i2\beta)}{1 + r_{21}\exp(i2\beta)}, \quad (1)$$

式中: r 为整体反射; $\beta = nkd$ 为间隔材料的单向相位延迟, n 、 k 和 d 分别为间隔材料的折射率、真空中的波数和间隔材料的厚度; r_{12} 和 t_{12} 分别是空气侧入射的反射系数和透射系数, r_{21} 和 t_{21} 分别是衬底侧入射的反射系数和透射系数, r_{12} 、 r_{21} 、 t_{12} 、 t_{21} 与入射太赫兹波的关系如图 2(b) 所示^[16]。由于底层金属的零透射,超材料的吸收可表示为 $A(\omega) = 1 - T(\omega) - R(\omega) = 1 - |r|^2$ 。因此,通过将反射系数优化到 0,就可以达到完美吸收。

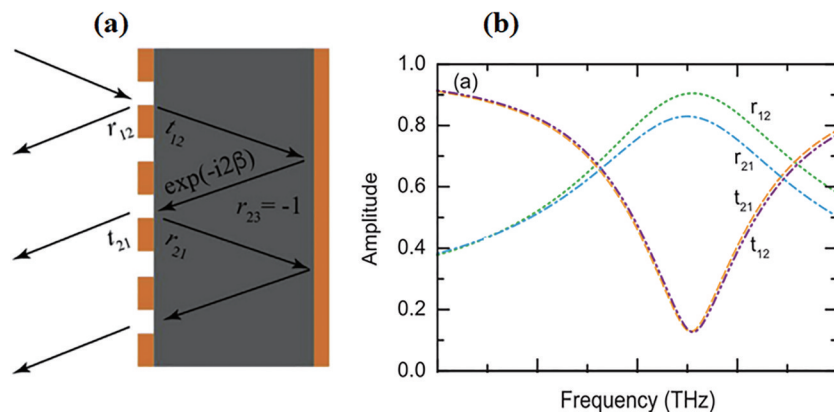


图 2 超材料吸收器。(a) 多次反射和透射模型^[16]; (b) 空气-电介质层分界面上的反射、透射系数
Fig. 2 Metamaterial absorber. (a) Multi-reflection and transmission model^[16]; (b) reflection and transmission coefficients at air-dielectric interface

超材料吸收器的吸收原理还可以利用阻抗匹配理论来论证。超材料结构单元中存在一定的电阻、电感和电容,其大小可以通过超材料结构单元的几何形状、尺寸、单元间距、导电材料厚度和电性来控制,还可以通过设计超材料吸收器单元结构的尺寸大小以及排列方式来调节结构单元的阻抗、感抗和容抗,使其在特定的电磁波频率下产生电磁响应。阻抗匹配理论表明,研究超材料完美吸收器时需要考虑材料本身的阻抗匹配及衰减特性。阻抗

匹配特性是指,超材料吸收器的亚波长结构单元,处于某一特定频率范围内,自身阻抗最大限度地与自由空间阻抗相匹配,使入射的电磁波最大程度地进入材料内部被吸收。通过电谐振和磁共振实现超材料和入射电磁波之间的相互作用,令自由空间的阻抗为 Z_0 ,吸收器的等效阻抗为 Z_1 ,则反射系数 R 的表达式^[17]为

$$R = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}. \quad (2)$$

其中

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}}, \quad (3)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}, \quad (4)$$

式中： μ_1 和 ϵ_1 分别是结构单元的等效磁导率和等效介电常数； μ_0 和 ϵ_0 分别是自由空间的磁导率和介电常数。根据上述等式可以看出，当 $Z_1 = Z_0$ 时，吸收器的等效阻抗大致等于自由空间的阻抗，此时，吸收器对入射波的反射达到最小值，入射电磁波将完全进入结构的内部^[17]。衰减特性是指，通过提高中间层电介质材料的电磁参数虚部来耗损更多的入射电磁波，以便使进入材料内部的电磁波最大限度地被损耗掉。若超材料满足阻抗匹配和衰减特性，入射电磁波将在吸收器内部被完全消耗掉，理论上吸收率可以达到 100%。此类完美吸收器在隐身技

术、电磁成像、电磁干扰以及热发射等领域具有极大的应用前景^[1,4]。

3 太赫兹单频吸收器

2008 年，Tao 等^[13]设计了一种太赫兹波段的宽角度、单频窄带吸收器。该吸收器由超材料层、底层金属结构层和中间电介质层构成，结构示意图如图 3(a) 所示。研究发现，该吸收器对 1.6 THz 频率电磁波吸收能够达到 97%，几乎达到了完美吸收，其吸收光谱图如图 3(b) 所示。2017 年，Shankhwar 等^[18]设计了一种宽角度角超材料完美吸收器，对 88 mm (3.4 THz) 的电磁波的吸收达 99.9%，几乎达到了完美吸收。

2009 年，Landy 等^[19]设计了一种太赫兹波偏振不敏感的单频带吸收器，该吸收器对 1.13 THz 的电磁波的吸收达 95%。2010 年，Ye 等^[20]设计了一种

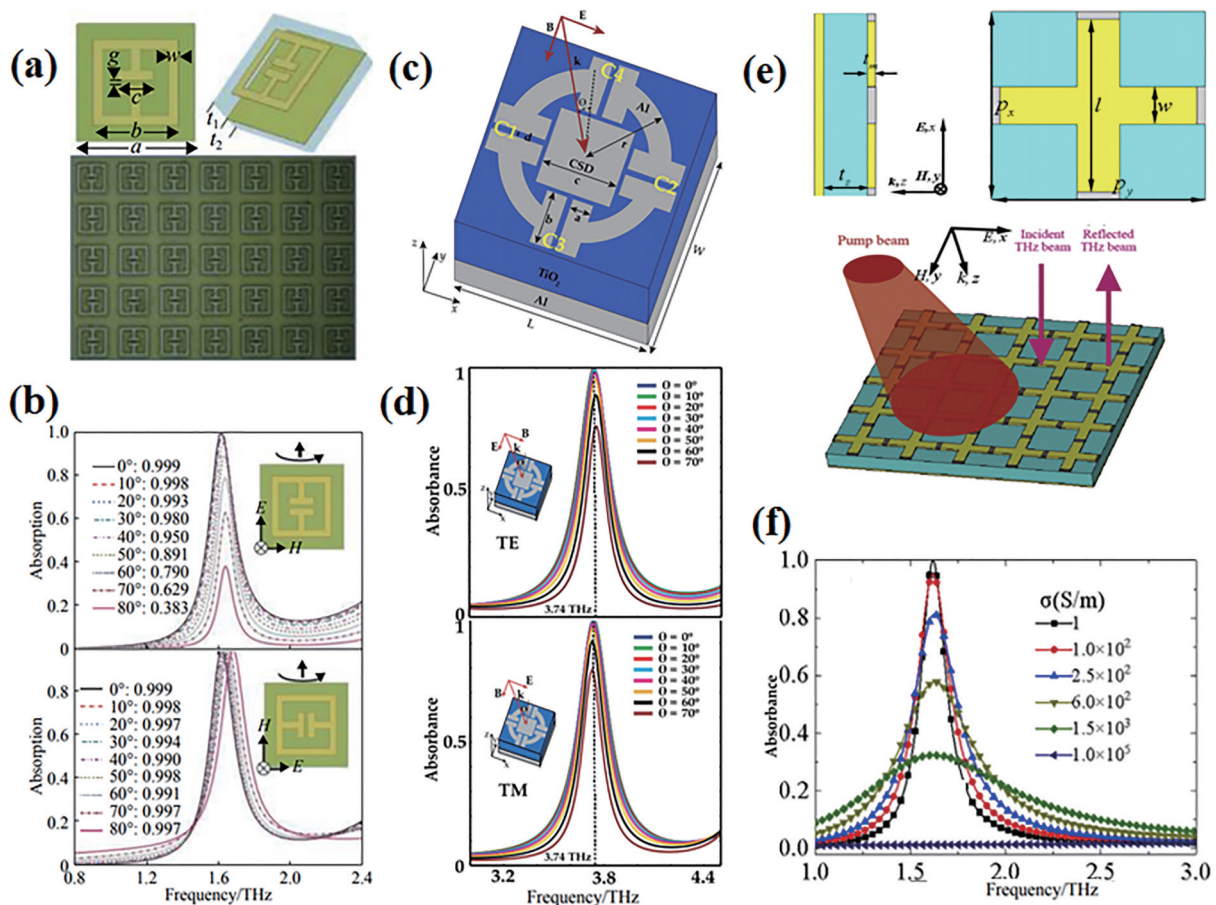


图 3 Tao 等^[13]设计的太赫兹超材料完美吸收器的(a)结构示意图及(b)吸收光谱图; Daniel 等^[22]设计的太赫兹超材料完美吸收器的(c)结构示意图及(d)吸收光谱图; Cheng 等^[23]设计的太赫兹超材料完美吸收器的(e)结构示意图及(f)吸收光谱图
 Fig. 3 (a) Structure diagram and (b) absorption spectra of terahertz metamaterial perfect absorber proposed by Tao *et al.*^[13]; (c) structure diagram and (d) absorption spectra of terahertz metamaterial perfect absorber proposed by Daniel *et al.*^[22]; (e) structure diagram and (f) absorption spectra of terahertz metamaterial perfect absorber proposed by Cheng *et al.*^[23]

厚度小于 $\lambda/25$ 全向偏振不敏感的太赫兹波段吸收器,其对横电波(TE)和横磁波(TM)极化都实现了几乎全向高吸收。2018年,Astorino等^[21]设计了一种太赫兹超薄窄带极化不敏感超材料吸收器。当入射电磁波频率为 1.092 THz,且入射角度在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时,吸光度不变。同年,芬兰的 Daniel等^[22]设计了一种与入射电磁波的偏振态高度无关的太赫兹单频带吸收器,其结构单元表现出高度的对称性,这也是对入射波偏振态高度无关的原因,结构示意图及吸收光谱图如图 3(c)~(d)所示。该吸收器在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 的大范围入射角内高度不敏感,对 3.74 THz 电磁波吸收均大于 80%,最高达 100%,表现出近乎完美的吸光特性,在传感器方面具有很好的应用潜力。

2016年,Cheng等^[23]设计了一种能够在太赫兹波段实现完美吸收和全反射的单频带电磁超材料。该吸收器是基于十字形结构(CSS)集成半导体光敏硅,光敏硅的电磁响应特性可以通过泵浦光束的改变而改变,结构示意图如图 3(e)所示,其结构设计和制造都简单易行。在不同的工作频率下,其吸收率可以在 $0 \sim 100\%$ 之间灵活调节,实现了入射太赫兹电磁波的完美吸收和反射的灵活转换,其吸收光谱如图 3(f)所示。而随着半导体领域的高速发展,2020年,Aslinezhad等^[24]设计了一种基于太赫兹范围内的半导体窄带电磁超材料吸收器,其具有高灵敏度的折射率和温度传感性能。该吸收器结构中的半导体能够使电磁超材料在太赫兹波段范围内具有较高的温度和折射率灵敏度,即在 $1.005 \sim 1.025$ 范围内的折射率以及在 $300 \sim 305$ K 的温度条件下,吸收器对入射电磁波都有着接近 100% 的吸收率,且两种条件下均有着较高的灵敏度,在化学和生物领域都有巨大的应用价值。同年,Hu等^[25]设计了一种用于太赫兹区域折射率传感的超窄超材料完美吸收器。该吸收器由不透明的铜/硅衬底上的砷化镓(GaAs)十字形谐振器阵列组成,对 2.44 THz 的太赫兹吸收率为 99.49%,灵敏度可达 506 RIU^{-1} 。

4 太赫兹双频及多频吸收器

尽管太赫兹单频吸收器具有高灵敏度,且在传感领域展现出了巨大的应用潜力,但仍存在一些局限性,如吸收带非常窄,只能响应特定频率的太赫兹波,一旦偏离谐振频率,吸收率将迅速衰减,因此太赫兹双频及多频吸收器逐渐受到人们广泛关注。

2009年,Wen等^[26]首次报道了一种在太赫兹区域内的双波段超材料吸收器。该吸收器的结构单元由两个对称的单共振超材料组成,其中一个内陷于另外一个之中,结构示意图如图 4(a)所示。经过理论和实验研究发现,吸收器可以使太赫兹电磁波在一定范围内集中到指定的位置,此时能量明显加强,随后转化为热能,吸收大幅增强。模拟实验表明,吸收器在 0.5 THz 和 0.94 THz 处有两个明显的吸收峰,各吸收峰的峰值均大于 99.99%,达到了完美吸收,吸收光谱图如图 4(b)所示。与之前报道的单频带吸收器相比,该吸收器的响应范围显著扩大,应用领域也极大拓展,在科技领域应用潜力大。2011年,Ma等^[27]设计了一种基于单晶胞结构的极化不敏感双波段太赫兹超材料完美吸收器,与以往的吸收器相比,其极化不敏感的性质有更为广阔的应用领域;2015年,Shan等^[28]设计了一种超薄柔性的极化不敏感双波段太赫兹超材料完美吸收器。Su等^[29]设计了一种基于石墨烯/MgF₂多层结构的太赫兹双频超材料吸收器,由于石墨烯/MgF₂多层晶胞具有很强的各向异性,因此具有双曲色散,且吸收器显示出良好的光热效应。2018年,Lu等^[30]设计了一种超薄非对称结构的太赫兹双频超材料吸收器,有望应用于雷达隐身领域。Xing等^[31]报道了一种基于石墨烯带的太赫兹双频超材料吸收器,该石墨烯吸收体结构简单,易于制备,为实现完美吸收提供了一条可行的途径。Janneh等^[32]报道了一种新颖的双频太赫兹完美吸收器,该吸收器具有非常高的 Q 因子;2019年,Li等^[33]报道了一种基于单层石墨烯的太赫兹双频极化不敏感超材料吸收器,近乎达到了 100% 吸收。Cui等^[34]设计了一种具有各向同性双频太赫兹吸收的拓扑柔性超材料,能与复杂表面完美契合,在较大的角度范围内有电磁吸收,其在电磁隐身和电磁控制领域具有潜在的应用前景。2020年,Wang等^[35]报道了一种基于两个水平金属条和两个垂直连接金属条组成的双频偏振可控太赫兹超材料吸收器,当入射光束偏振沿水平方向(x 偏振)时,可实现两个接近理想吸收的共振峰。当入射光束偏振沿垂直方向(y 偏振)时,可获得两个新的吸收峰,平均吸收率 97.28%。Cen等^[36]报道了一种基于石墨烯的双频带太赫兹超材料完美吸收器,该吸收器在传感和空间光调制器领域具有广阔的应用前景。近年来研究工作者不断对这些双频带太赫兹超材料完美吸收器性能特征进行

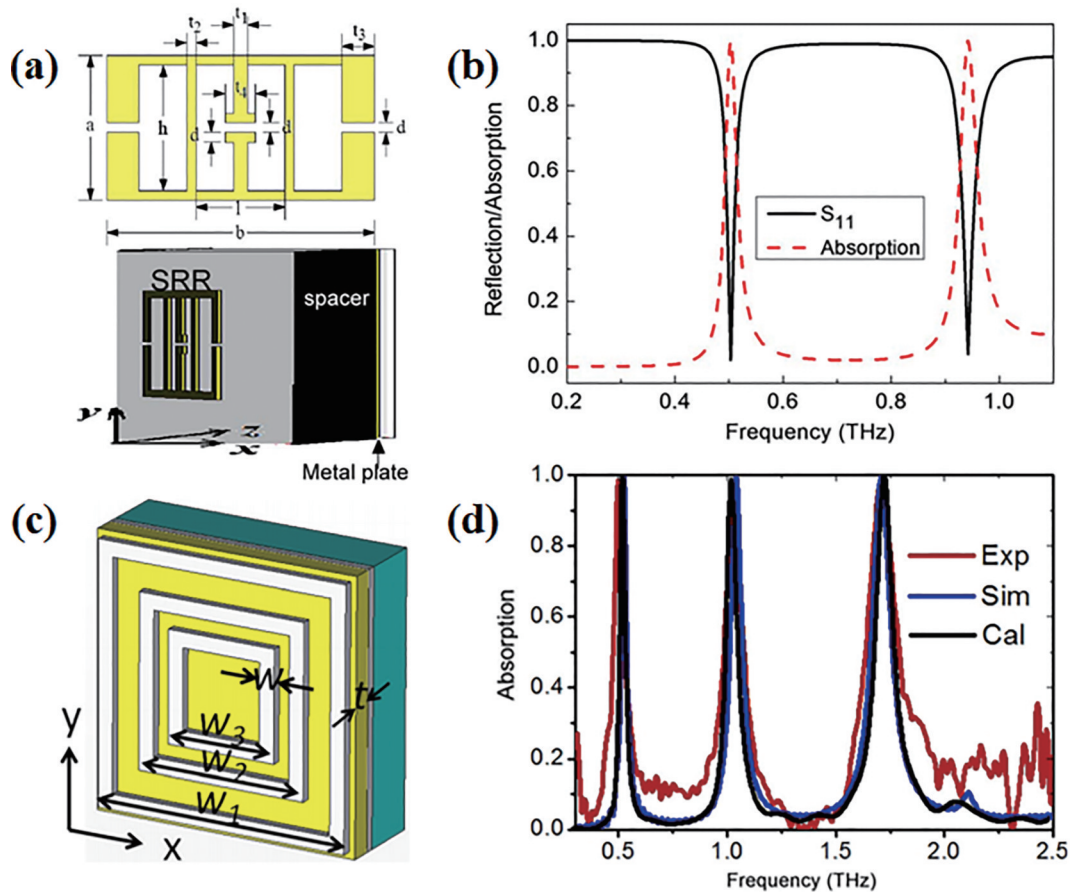


图 4 Wen 等^[26]设计的太赫兹超材料完美吸收器的 (a) 结构示意图及 (b) 模拟实验的吸收光谱图; Shen 等^[37]设计的太赫兹超材料完美吸收器的 (c) 结构示意图及 (d) 吸收光谱图

Fig. 4 (a) Structure diagram and (b) absorption spectra of simulated experiments of terahertz metamaterial perfect absorber proposed by Wen *et al.* ^[26]; (c) structure diagram and (d) absorption spectra of terahertz metamaterial perfect absorber proposed by Shen *et al.* ^[37]

优化和创新,探索应用价值。

除了太赫兹双频吸收器,太赫兹多频吸收器的研究也取得了诸多成果。2012年,Shen 等^[37]设计了一种太赫兹三波段超材料完美吸收器,吸收器的结构单元由三个不同大小的同心金属环组成,结构示意图如图 4(c) 所示。以多反射干涉理论研究了所设计的三波段太赫兹完美吸收器,结果表明,制备的超材料完美吸收器在 0.5、1.03、1.71 THz 处有 3 个独特的吸收峰,结构单元中的每个同心环对应一个吸收峰,相互干扰很小,吸收率分别为 96.4%、96.3% 和 96.7%,达到了完美吸收,实验与理论完美吻合,吸收光谱图如图 4(d) 所示。所设计的多波段吸收器易于制造,对入射极化不敏感,吸收高,有利于各种应用。2018年,Chen 等^[38]报道了一种三维石墨烯超材料结构,可实现太赫兹波入射下多重等离子体共振模式的有效激发,这是首次设计可以应用于基于多个等离子体共振模式太赫兹传感的结

构,该多波段吸收器可以实现频率选择性检测,减少环境干扰,从而提高检测灵敏度和准确性。Wang 等^[39]设计了一种三波段偏振可控制的太赫兹超材料吸收器,该结构具有极好的极化不敏感特性,在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内对太赫兹波的吸收率略有变化,且均保持在 96% 以上。2019年,Meng 等^[40]报道了一种基于巴克·狄拉克半金属的三波段太赫兹超材料吸收器,该吸收器不仅具有高吸光度,而且对极化不敏感。Cen 等^[41]报告了一种基于周期排列石墨烯裂环谐振器阵列的三频带完美超材料吸收器,在优化纳米结构几何参数的条件下,三带吸收效率可达 99% 以上。2021年,Han 等^[42]设计了一种具有角稳定性和偏振不敏感的新型太赫兹超材料吸收器,该吸收器的参数是完全可伸缩的,通过调整组成单元电池的三个回路的长度,可以重新设计以适应任何工作频率的需要。

2015年,Wang 等^[43]经过对同心环系列的电磁

超材料吸收器进一步优化处理,得到了太赫兹偏振不敏感四波段完美吸收器以及太赫兹五波段完美吸收器,吸收器的制造工艺简单,且其吸收率均达到了 97% 以上,达到了完美吸收。他们指出四波段及五波段吸收的机理归因于四个共振频率的重叠,吸收峰的频率可以通过改变相应金属环的尺寸来灵活控制,这些均适用于其他类型的多波段太赫兹超材料吸收结构,并能够很容易地拓展到在微波频率范围内工作的超材料结构中去。此类吸收器在电磁成像、太赫兹探测和隐身技术等方面都具有极大的潜在应用前景^[1,4,43]。2015年,Gao等^[44]设计了一种多波段吸收器,通过将石墨烯置于由厚间隔层隔开的反射金属基底上的开放式微环阵列和微柱中,实现了完美的吸收,还证明了完美太赫兹波吸收是由于驻波效应形成的局部能量场所致。2016年,Hu等^[45]设计了一种更简单和新型的六波段太赫兹完美超材料吸收器,结构中的U型封闭环是实现六波段吸收器最简单的结构,解决了单元尺寸大和制造难度大的问题。工作机理源于多个等离子体共振(基共振和高阶等离子体共振),使其谐振机理具有新颖性。2018年,Meng等^[46]设计了一种极化不敏感的五波段太赫兹完美超材料吸收器,该吸收器的图案金属结构偶极共振、六极共振和表面等离子体共振结合,这与以往报道的吸收器的工作机理不同。

5 太赫兹宽频吸收器

与上述的太赫兹单频带及多频带吸收器相比,宽频带吸收器的应用范围更为广泛,如能量收集^[2]、传感器集成^[47]。因而宽频带超材料吸收器逐渐受到人们的关注。

2011年,英国 Grant等^[47]设计了一种极化不敏感的宽带谐振太赫兹超材料吸收器,该吸收器在 1.86 THz 频率范围内获得大于 60% 的吸收率,具有极化不敏感的特性,且制造工艺简单。该类吸收器在太赫兹成像、传感器集成和太赫兹检测等方面有极大的应用价值^[1-2,47]。2013年,Cheng等^[48]公布了一种基于方形铜薄膜周期阵列的太赫兹超材料吸收器,该吸收器可以通过改变等效谐振电路模式的边长来实现完美的吸收特性,通过调节单元结构的几何参数,可以有效地增大理想吸收的带宽。同年,He等^[49]推出了一种超宽频带太赫兹超材料吸收器,该吸收器采用在金属片上构造石墨烯-介质多层锥状金字塔周期阵列,多层石墨烯片被介质层隔

开,结构示意图如图 5(a)所示。结构单元中的多层石墨烯介质结构可以认为是一种具有各向异性介电常数的有效均匀超材料,当石墨烯层受到表面等离子体波的激发后,不同频率的入射太赫兹电磁波在层叠金字塔的结构作用下被不同程度吸收。研究发现,该超宽带吸收器能够在 8~100 THz 的太赫兹电磁波范围内实现超宽带宽的高吸收,吸收光谱如图 5(b)所示。该太赫兹宽带吸收器在太赫兹探测器及热发射器等器件上有一定应用价值。2018年,Iman等^[50]利用三种周期阵列的石墨烯带和发展的传输线理论,设计了一种基于石墨烯带周期阵列的超宽带太赫兹吸收器,该吸收器的单元结构的输入阻抗可以在较宽的频率范围内与自由空间紧密匹配,吸收率近乎达到 100%。

2015年,Peng等^[51]公开了一种双层掺杂硅光栅结构的超宽带和极化无关的太赫兹完美吸收器,该宽频带太赫兹吸收器的优良特性主要是由于气隙模谐振以及一阶和二阶光栅衍射引起的。同年,He等^[52]设计了一种宽带、极化不敏感、广角太赫兹超材料吸收器,该吸收器结构单元中四层超材料的厚度大约为中心工作波长的 1/27,该工作为设计尺寸紧凑的宽带吸收器提供了一种参考。

2016年,Rufangura等^[53]设计了一种基于同心环形谐振器拓扑结构的新型宽带超材料完美吸收器,用于提高太阳能光伏电池在可见光频段的吸收,该吸收器对入射电磁波以及 TE 和 TM 偏振波均具有完美吸收。2019年,Li等^[54]设计了一种采用单一尺寸图案金属结构的吸收器,该吸收器在大气红外透明窗口中能够获得完美的超宽带吸收,且还表现出良好的偏振和倾斜角度不敏感性。

在太赫兹完美吸收器发展的最开始及几年中,实现宽频带的完美吸收是一个很大的挑战,达到完美吸收的基本上都是窄带吸收器,吸收率大于 99% 的太赫兹宽带吸收器难以实现。随着宽带太赫兹超材料完美吸收器的研究深入,Li等^[55]于 2019 年设计了一种交叉嵌套结构开环太赫兹宽带完美吸收器,其由一个开环和一个无连接的交叉组成,结构示意图如图 5(c)所示。当入射角小于 40° 时,不同入射角下吸收率均大于 99%,吸收光谱如图 5(d)所示。该吸收器的强宽频带吸收是由金属条和金属环产生的电磁共振引起的,易于实现近乎 100% 吸收,在太赫兹耦合器、滤波器和电磁隐身方面有极大的潜在应用价值,同时为未来太赫兹超材料完美

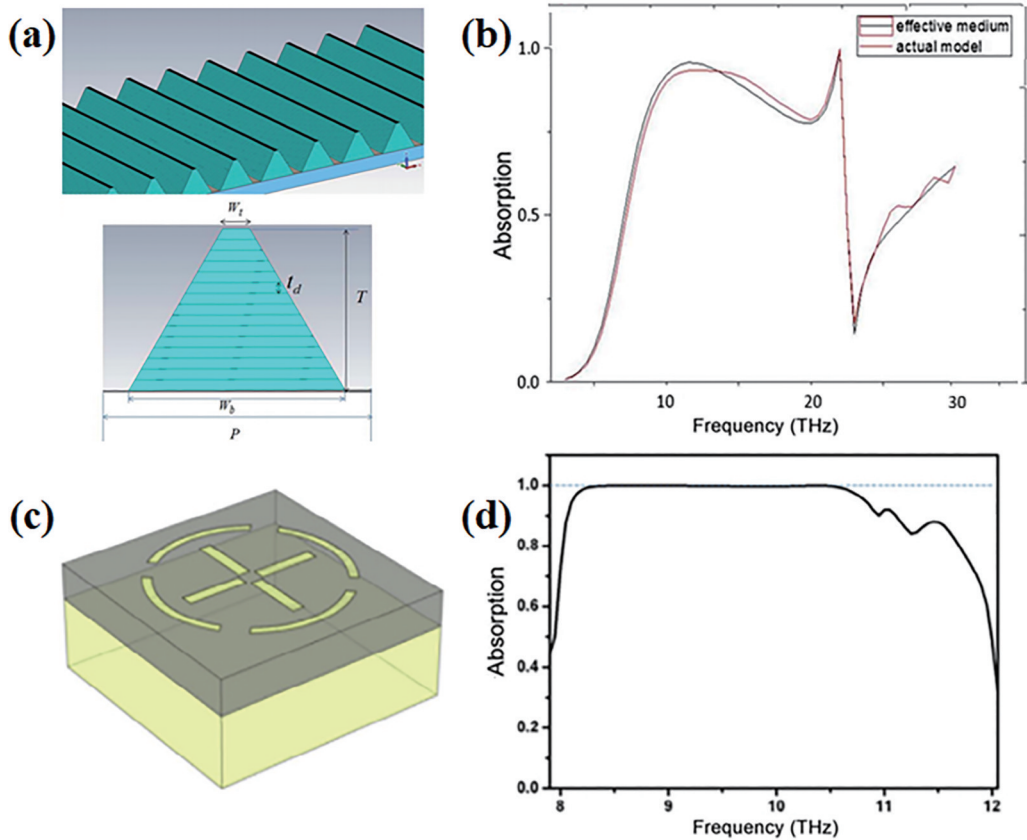


图 5 He 等^[49]设计的太赫兹超材料完美吸收器的(a)结构示意图及(b)吸收光谱图;Li 等^[55]设计的太赫兹超材料完美吸收器的(c)结构示意图及(d)吸收光谱图

Fig. 5 (a) Structure diagram and (b) absorption spectrum of terahertz metamaterial perfect absorber proposed by He *et al.*^[49]; (c) structure diagram and (d) absorption spectrum of terahertz metamaterial perfect absorber proposed by Li *et al.*^[55]

吸收器的研究提供了更广泛的思路。

6 太赫兹可调谐吸收器

随着对太赫兹超材料完美吸收器的研究不断深入和科学技术的不断发展,窄带、多频带和宽带太赫兹超材料吸收器已经不能满足人们的需要。窄带、多频带和宽带太赫兹吸收器的结构一旦固定下来,就不能灵活地调节所需的吸收频率范围,而设计一种结构固定后还能灵活调节太赫兹波的吸收波段的超材料吸收器就迫在眉睫,因此研究工作者们就这一问题,设计了各类太赫兹可调谐超材料吸收器^[56-57]。

2014年,Wang 等^[56]设计了一种宽带可调谐太赫兹超材料吸收器,其在 0.88~1.28 THz 太赫兹波范围内,吸收器存在两个吸收波段,且两个波段内吸收率均在 98% 以上,达到了完美吸收,吸收器的响应带宽可以通过两个图像化方环的耦合距离进行灵活调节,响应波段可根据系统的偏振角从宽带向单波段进行调谐,实现了结构固定后的响应可调谐。吸收

器的设计理念也适用于其他类型的非对称吸收结构,在太赫兹检测、电磁成像等方面应用潜力极大。

随着可调谐超材料完美吸收器的兴起,科研工作者不断推出了各类太赫兹超材料完美吸收器,例如光控^[58-61]、温控^[62-65]及电控^[66-74]等可调谐太赫兹超材料完美吸收器。

2015年,Xu 等^[58]设计了一种受光影响的太赫兹可调谐电磁超材料吸收器,这种超材料是基于两个分裂环谐振器,将光导硅集成到超材料单元中进行调谐,结构示意图如图 6(a)所示。光导硅的电导率可以通过外部不同功率的泵浦光束得到有效的调谐,将半导体硅填充在谐振器内部的间隙之中,通过泵浦光束改变硅的电导率,可以灵敏地改变谐振器的光学响应。实验证明了在光照下可以实现谐振频率的蓝移,当硅的电导率处于 1~2000 S/m 时,其吸收频率在 0.68~1.41 THz 之间可以实现灵活调节,其太赫兹电磁波调谐范围为 51.8%,吸收光谱图如图 6(b)所示。该吸收器的设计及制造工艺简单,为实现可切换超材料吸收器提供了有利的

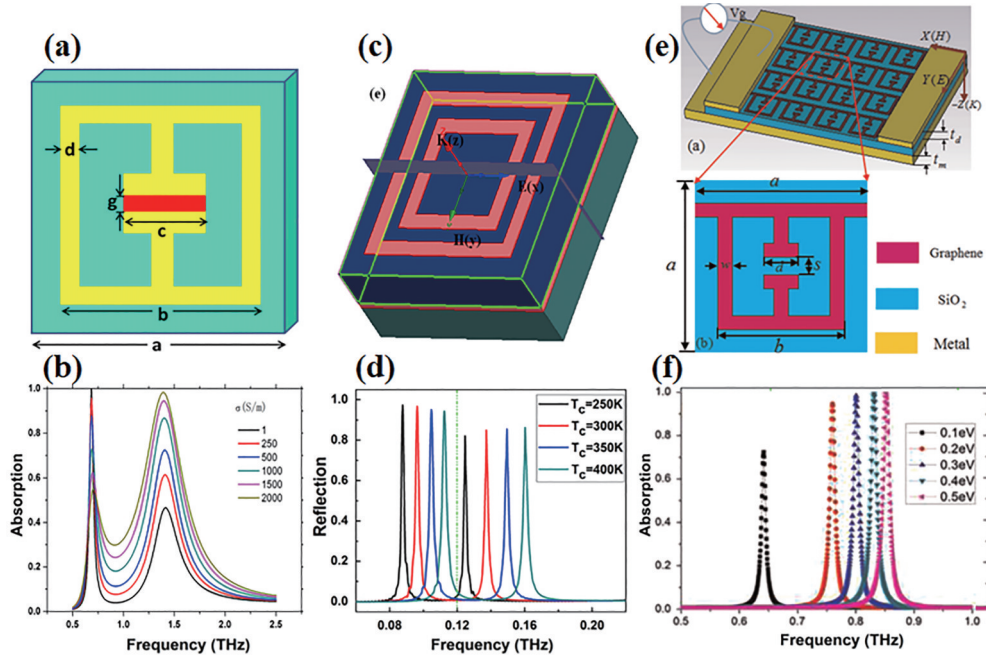


图 6 Xu 等^[58]设计的太赫兹超材料完美吸收器的(a)结构示意图及(b)不同的硅电导率条件下的响应吸收光谱图;Luo 等^[62]设计的太赫兹超材料完美吸收器的(c)结构示意图及(d)不同温度对吸收光谱的影响;Zhang 等^[66]设计的太赫兹超材料完美吸收器的(e)结构示意图及(f)吸收光谱图

Fig. 6 (a) Structure diagram and (b) response absorption spectra under different silicon conductivity conditions of terahertz metamaterial perfect absorber proposed by Xu *et al.* ^[58]; (c) structure diagram and (d) effect of different temperatures on absorption spectrum of terahertz metamaterial perfect absorber proposed by Luo *et al.* ^[62]; (e) structure diagram and (f) absorption spectra of terahertz metamaterial perfect absorber proposed by Zhang *et al.* ^[66]

参考价值。

2015年,Luo 等^[62]设计了一种受温度控制的可调谐双频带太赫兹超材料吸收器,吸收器的结构单元由两个嵌套的封闭方环形谐振器和一层金属层组成,金属层由衬底钛酸锶中间介质层隔开,结构示意图如图 6(c)所示。研究表明,在 0.096 THz 和 0.137 THz 波段范围内,该吸收器有两个独特的吸收峰,峰值分别达到了 97% 和 75%。与室温共振频率相比,400 K 冷却到 250 K 吸收器会产生 25% 和 27% 的位移,当温度冷却到 150 K 时,两种频率均可达到 53% 以上,温度对吸收光谱的影响如图 6(d)所示。该吸收器具有频率可调谐特性是由于中间介质层的折射率受温度影响显著,使其在太赫兹探测、电磁成像和隐身领域有巨大的潜在应用价值。

2015年,Zhang 等^[66]设计了一种受偏置电压影响的可调谐双频带太赫兹超材料吸收器。石墨烯是最近十年内新兴起来的新型超材料,有诸多独特的性质,其优点之一是能够通过化学掺杂或改变偏置电压动态调节其导电性,基于此他们设计了可调谐电控太赫兹吸收器,该吸收器是由周期性图纹的石墨烯结构、薄 SiO₂ 中间介质层及底层金属组成,

结构示意图如图 6(e)所示。实验表明,吸收器在固定的费米能级下可以实现完美吸收,最重要的是可通过调整偏置电压的大小来改变电介质层的费米能级,从而使吸收器在宽带频率范围内动态可调,而无需重新优化其物理结构,显示出极好的灵敏可调谐性。当费米能级从 0.1 eV 增加到 0.5 eV 时,吸收器谐振频率从 0.642 THz 增加到 0.853 THz,频率调制深度为 25%,吸收光谱图如图 6(f)所示。吸收器受偏振电压的影响显著,灵敏度极高,在可调谐传感器和吸收器、开关和慢光器件等领域有很好的应用价值。由于石墨烯的诸多独特的性质,科研工作者对使用石墨烯研发电控可调谐太赫兹超材料完美吸收器产生了极大的兴趣,因此国内外的研究人员陆续提出了基于不同结构的石墨烯电控可调谐太赫兹超材料完美吸收器^[67-69]。

虽然石墨烯具有很多优良的性质,但在某些方面仍不适用,因此研发基于其他材料的电控可调谐太赫兹超材料完美吸收器迫在眉睫,Wang 等^[70]和 Yin 等^[71]就此设计了基于液晶混合物的电控可调谐太赫兹超材料完美吸收器;Liu 等^[72]、Xiong 等^[73]及 Fang 等^[74]设计了基于狄拉克半金属的电控可调谐

太赫兹超材料完美吸收器

上文阐述的可调谐太赫兹超材料完美吸收器都只能单控,2020年,Kang等^[75]设计了一种基于狄拉克半金属和二氧化钒(VO_2)的双控制宽带可调谐太赫兹超材料相干完美吸收器,是一种动态双控可切换吸收器,该器件由带有空心十字形阵列的狄拉克半金属顶层、 SiO_2 介电层和带有空心十字形阵列的 VO_2 底层组成。实验表明,通过调节入射太赫兹电磁波之间的相位差,可以使吸收器在2.75 THz处的吸收率在0.13%~99.4%之间灵活调制;当 VO_2 处于绝缘状态且狄拉克半金属的费米能级为95 meV时,该吸收器表现为可调谐的太赫兹单波段吸收器;当费米能级从90 meV到110 meV时,该吸收器的共振频率从1.46 THz变为1.86 THz;当 VO_2 由绝缘态向金属态的转变时,该吸收器可以作为一个可调谐的太赫兹双频完美吸收器;当将这两个独立的控制单元一起使用时,可以获得吸收速率大于90%的宽带吸收。该吸收器就以前的可调谐吸收器而言,灵活调制性得到了极大的提高,应用领域更为广泛。

7 结束语

综上所述,电磁超材料的优势在于能够突破传统材料的束缚,构造出功能新颖、制备工艺简单的电磁功能结构,更易与实际应用相结合。本文从太赫兹电磁超材料完美吸收器的概念出发,详细介绍了国内外单频、双频及多频、宽频和可调谐完美吸收器在太赫兹波段的研究进展。纵观太赫兹电磁超材料完美吸收器的发展,自发现以来迅速成为人们的研究热点,并一直朝着结构简单化、功能多元化、应用领域不断拓展的方向发展。在最近几年,虽然已经取得了一定的研究成果,但是太赫兹完美吸收器理论研究和应用研究仍然处于起步阶段与实验室阶段。因此,基于太赫兹波段的完美吸收器仍然有很多问题需要人们去发现和解决,如何将其应用于实际是目前需要克服的一大难题。

基于太赫兹波段的电磁超材料完美吸收器的未来研究趋势主要着重于宽频带、可调谐太赫兹完美吸收器以及与功能材料相结合。宽频带太赫兹完美吸收器能够实现大范围的电磁响应,在电磁隐身、能量收集、能量转换、热发射等领域具有广阔的应用前景。可调谐太赫兹完美吸收器可以灵活调节超材料的电磁响应范围,从而实现多频吸收,在

电控液晶材料、温控相变材料、智能开关等领域具有广阔的应用前景。超材料与功能材料相结合能够使功能多元化,在光电材料、非线性材料、相变材料等领域具有广阔的应用领域。随着科学技术的提高以及各类新型材料的出现,这些超材料完美吸收器也将得到快速发展,理论与实验技术也将越来越成熟,各类高性能太赫兹完美吸收器也将不断被研发出来。如果技术成熟,还可以和数控技术结合在一起,达到更优的性能。

参 考 文 献

- [1] McCrindle I J H, Grant J, Drysdale T D, et al. Multi-spectral materials: hybridisation of optical plasmonic filters and a terahertz metamaterial absorber [J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(2): 149-153.
- [2] Corrigan T D, Park D H, Drew D, et al. Nanostructured broad band infrared absorber[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2011, 1303: 316.
- [3] 高万, 王建扬, 吴倩楠. 基于双金属环的超材料太赫兹宽频带通滤波器的设计与研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0516001.
Gao W, Wang J Y, Wu Q N. Design and investigation of a metamaterial terahertz broadband bandpass filter based on dual metallic rings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0516001.
- [4] In S R. Consideration on the electromagnetic wave absorption properties of the plasma for the stealth technology[J]. *Journal of the Korean Vacuum Society*, 2008, 17(6): 501-510.
- [5] 霍红, 延凤平, 王伟, 等. 基于超材料的太赫兹高灵敏度传感器的设计[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0814004.
Huo H, Yan F P, Wang W, et al. Terahertz high-sensitivity sensor design based on metamaterial[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0814004.
- [6] 刘彻, 马骞, 李廉林, 等. 人工智能超材料[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823004.
Liu C, Ma Q, Li L L, et al. Artificial intelligence metamaterials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823004.
- [7] Cui Y X, He Y R, Jin Y, et al. Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(4): 495-520.
- [8] Feng R, Ding W Q, Liu L H, et al. Dual-band infrared perfect absorber based on asymmetric T-shaped plasmonic array[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): A335-A343.

- [9] Tao H, Landy N I, Bingham C M, et al. A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7181-7188.
- [10] 丁春峰, 续宗成, 张雅婷, 等. 电磁超材料吸收器在太赫兹波段的研究进展[J]. *枣庄学院学报*, 2013, 30(5): 12-18.
Ding C F, Xu Z C, Zhang Y T, et al. Research progress of electromagnetic metamaterial absorber in THz frequencies[J]. *Journal of Zaozhuang University*, 2013, 30(5): 12-18.
- [11] 邓洪朗, 周绍林, 岑冠廷. 红外和太赫兹电磁吸收超表面研究进展[J]. *光电工程*, 2019, 46(8): 180666.
Deng H L, Zhou S L, Cen G T. Progress on infrared and terahertz electro-magnetic absorptive metasurface [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(8): 180666.
- [12] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [13] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization[J]. *Physical Review B*, 2008, 78(24): 241103.
- [14] Luo H, Cheng Y Z. Dual-band terahertz perfect metasurface absorber based on bi-layered all-dielectric resonator structure[J]. *Optical Materials*, 2019, 96: 109279.
- [15] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10(4): 509-514.
- [16] Chen H T. Interference theory of metamaterial perfect absorbers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7165-7172.
- [17] Mattiucci N, Bloemer M J, Aközbeğ N, et al. Impedance matched thin metamaterials make metals absorbing[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3203.
- [18] Shankhwar N, Kalra Y, Sinha R K. LiTaO₃ based metamaterial perfect absorber for terahertz spectrum [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2017, 111: 754-759.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Astorino M D, Fastampa R, Frezza F, et al. Polarization-maintaining reflection-mode THz time-domain spectroscopy of a polyimide based ultra-thin narrow-band metamaterial absorber[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1985.
- [22] Daniel S, Bawuah P. Highly polarization and wide-angle insensitive metamaterial absorber for terahertz applications[J]. *Optical Materials*, 2018, 84: 447-452.
- [23] Cheng Y Z, Gong R Z, Zhao J C. A photoexcited switchable perfect metamaterial absorber/reflector with polarization-independent and wide-angle for terahertz waves[J]. *Optical Materials*, 2016, 62: 28-33.
- [24] Aslinezhad M. High sensitivity refractive index and temperature sensor based on semiconductor metamaterial perfect absorber in the terahertz band [J]. *Optics Communications*, 2020, 463: 125411.
- [25] Hu D, Meng T H, Wang H Y, et al. Ultra-narrow-band terahertz perfect metamaterial absorber for refractive index sensing application[J]. *Results in Physics*, 2020, 19: 103567.
- [26] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, et al. Dual band terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(24): 241111.
- [27] Ma Y, Chen Q, Grant J, et al. A terahertz polarization insensitive dual band metamaterial absorber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 945-947.
- [28] Shan Y, Chen L, Shi C, et al. Ultrathin flexible dual band terahertz absorber[J]. *Optics Communications*, 2015, 350: 63-70.
- [29] Su Z X, Yin J B, Zhao X P. Terahertz dual-band metamaterial absorber based on graphene/MgF₂ multilayer structures[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1679-1690.
- [30] Lu T G, Zhang D W, Qiu P Z, et al. Ultrathin terahertz dual-band perfect metamaterial absorber using asymmetric double-split rings resonator[J]. *Symmetry*, 2018, 10(7): 293.
- [31] Xing R, Jian S S. A dual-band THz absorber based on graphene sheet and ribbons[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 100: 129-132.
- [32] Jannah M, de Marcellis A, Palange E, et al. Design of a metasurface-based dual-band terahertz perfect absorber with very high Q -factors for sensing applications [J]. *Optics Communications*, 2018, 416: 152-159.
- [33] Li H L, Niu J B, Wang G Y. Dual-band,

- polarization-insensitive metamaterial perfect absorber based on monolayer graphene in the mid-infrared range[J]. *Results in Physics*, 2019, 13: 102313.
- [34] Cui J L, Zhang B Z, Xu H C, et al. Topological flexible metamaterials with isotropic dual-frequency terahertz-band absorption[J]. *Optics Communications*, 2019, 441: 90-95.
- [35] Wang B X, He Y H, Xu N X, et al. Design of dual-band polarization controllable metamaterial absorber at terahertz frequency[J]. *Results in Physics*, 2020, 17: 103077.
- [36] Cen C L, Zhang Y B, Chen X F, et al. A dual-band metamaterial absorber for graphene surface plasmon resonance at terahertz frequency[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2020, 117: 113840.
- [37] Shen X P, Yang Y, Zang Y Z, et al. Triple-band terahertz metamaterial absorber: design, experiment, and physical interpretation[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(15): 154102.
- [38] Chen X, Fan W H, Song C. Multiple plasmonic resonance excitations on graphene metamaterials for ultrasensitive terahertz sensing[J]. *Carbon*, 2018, 133: 416-422.
- [39] Wang B X, Xie Q, Dong G X, et al. Design of triple-band polarization controlled terahertz metamaterial absorber[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2018, 114: 225-232.
- [40] Meng W W, Que L C, Lü J, et al. A triple-band terahertz metamaterial absorber based on buck Dirac semimetals[J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102461.
- [41] Cen C L, Yi Z, Zhang G F, et al. Theoretical design of a triple-band perfect metamaterial absorber in the THz frequency range[J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102463.
- [42] Han X C, Zhang Z J, Qu X. A novel miniaturized tri-band metamaterial THz absorber with angular and polarization stability[J]. *Optik*, 2021, 228: 166086.
- [43] Wang B X, Zhai X, Wang G Z, et al. Design of a four-band and polarization-insensitive terahertz metamaterial absorber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 4600108.
- [44] Gao R M, Xu Z C, Ding C F, et al. Graphene metamaterial for multiband and broadband terahertz absorber[J]. *Optics Communications*, 2015, 356: 400-404.
- [45] Hu D, Wang H Y, Zhu Q F. Design of six-band terahertz perfect absorber using a simple U-shaped closed-ring resonator[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 5500608.
- [46] Meng T H, Hu D, Zhu Q F. Design of a five-band terahertz perfect metamaterial absorber using two resonators[J]. *Optics Communications*, 2018, 415: 151-155.
- [47] Grant J, Ma Y, Saha S, et al. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3476-3478.
- [48] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z. A polarization-insensitive and omnidirectional broadband terahertz metamaterial absorber based on coplanar multi-squares films[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 415-421.
- [49] 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.
- [50] Iman C, Sadegh B. Ultra-broadband terahertz absorber based on graphene ribbons[J]. *Optik*, 2018, 172: 1026-1033.
- [51] Peng Y, Zang X F, Zhu Y M, et al. Ultra-broadband terahertz perfect absorber by exciting multi-order diffractions in a double-layered grating structure[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2032-2039.
- [52] He X J, Yan S T, Ma Q X, et al. Broadband and polarization-insensitive terahertz absorber based on multilayer metamaterials[J]. *Optics Communications*, 2015, 340: 44-49.
- [53] Rufangura P, Sabah C. Wide-band polarization independent perfect metamaterial absorber based on concentric rings topology for solar cells application[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 680: 473-479.
- [54] Li L, Chen H J, Xie Z W, et al. Ultra-broadband metamaterial absorber for infrared transparency window of the atmosphere[J]. *Physics Letters A*, 2019, 383(36): 126025.
- [55] Li M W, Liang C P, Zhang Y B, et al. Terahertz wideband perfect absorber based on open loop with cross nested structure[J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102603.
- [56] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, et al. Tunable bandwidth of the terahertz metamaterial absorber[J]. *Optics Communications*, 2014, 325: 78-83.
- [57] Ling X Y, Xiao Z Y, Zheng X X. Tunable terahertz metamaterial absorber and the sensing application[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*,

- 2018, 29(2): 1497-1503.
- [58] Xu Z C, Gao R M, Ding C F, et al. Photoexcited broadband blueshift tunable perfect terahertz metamaterial absorber[J]. *Optical Materials*, 2015, 42: 148-151.
- [59] Zhang J N, Wang G C, Zhang B, et al. Photo-excited broadband tunable terahertz metamaterial absorber[J]. *Optical Materials*, 2016, 54: 32-36.
- [60] Cheng Y Z, Gong R Z, Cheng Z Z. A photoexcited broadband switchable metamaterial absorber with polarization-insensitive and wide-angle absorption for terahertz waves[J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 41-46.
- [61] Zhu J F, Yang Y, Li S F. A photo-excited broadband to dual-band tunable terahertz perfect metamaterial polarization converter[J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 336-340.
- [62] Luo C Y, Li Z Z, Guo Z H, et al. Tunable metamaterial dual-band terahertz absorber[J]. *Solid State Communications*, 2015, 222: 32-36.
- [63] Li D, Huang H L, Xia H, et al. Temperature-dependent tunable terahertz metamaterial absorber for the application of light modulator[J]. *Results in Physics*, 2018, 11: 659-664.
- [64] Lei G P, Xiao K, Li S H, et al. Design and simulation of a temperature-tunable terahertz metamaterials based on VO₂ particles[J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102405.
- [65] Luo H, Cheng Y Z. Thermally tunable terahertz metasurface absorber based on all dielectric indium antimonide resonator structure[J]. *Optical Materials*, 2020, 102: 109801.
- [66] Zhang Q F, Ma Q X, Yan S T, et al. Tunable terahertz absorption in graphene-based metamaterial [J]. *Optics Communications*, 2015, 353: 70-75.
- [67] Deng G S, Chen P, Yang J, et al. Graphene-based tunable polarization sensitive terahertz metamaterial absorber[J]. *Optics Communications*, 2016, 380: 101-107.
- [68] Chen M, Sun W, Cai J J, et al. Frequency-tunable terahertz absorbers based on graphene metasurface [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 144-150.
- [69] Biabanifard S, Biabanifard M, Asgari S, et al. Tunable ultra-wideband terahertz absorber based on graphene disks and ribbons[J]. *Optics Communications*, 2018, 427: 418-425.
- [70] Wang R X, Li L, Liu J L, et al. Triple-band tunable perfect terahertz metamaterial absorber with liquid crystal[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32280-32289.
- [71] Yin Z P, Lu Y J, Xia T Y, et al. Electrically tunable terahertz dual-band metamaterial absorber based on a liquid crystal[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(8): 4197-4203.
- [72] Liu G D, Zhai X, Meng H Y, et al. Dirac semimetals based tunable narrowband absorber at terahertz frequencies[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11471-11480.
- [73] Xiong H, Shen Q, Long T B. Broadband terahertz absorber based on Dirac semimetal with tunable working bandwidth[J]. *Results in Physics*, 2020, 19: 103683.
- [74] Fang P P, Shi X W, Liu C, et al. Single- and dual-band convertible terahertz absorber based on bulk Dirac semimetal[J]. *Optics Communications*, 2020, 462: 125333.
- [75] Kang W J, Gao Q G, Dai L L, et al. Dual-controlled tunable terahertz coherent perfect absorption using Dirac semimetal and vanadium dioxide[J]. *Results in Physics*, 2020, 19: 103688.