

〈材料与器件〉

基于超材料的太赫兹波吸波材料

刘毅^{1,2}, 彭晓昱^{1,2}, 王作斌¹, 董家蒙^{1,2}, 魏东山², 崔洪亮², 杜春雷²

(1. 长春理工大学 国家纳米操纵与制造国际联合研究中心, 长春 130022;

2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 跨尺度制造技术重庆市重点实验室, 重庆 400714)

摘要: 超材料是一种人工设计的具有周期单元阵列结构的电磁材料, 具有超常物理特性。基于超材料的太赫兹吸波材料在太赫兹技术领域有许多潜在的应用。简述了超材料吸波材料的理论基础, 综述了国内外在单频、双频、多频带和宽带太赫兹超材料吸波材料领域的研究进展, 并展望了太赫兹吸波材料研究的未来发展方向和趋势。

关键词: 太赫兹波; 吸波材料; 超材料

中图分类号: O441, TB34

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2015)09-0756-08

Terahertz-wave Absorber Based on Metamaterial

LIU Yi^{1,2}, PENG Xiao-yu^{1,2}, WANG Zuo-bin¹, DONG Jia-meng^{1,2}, WEI Dong-shan², CUI Hong-liang², DU Chun-lei²

(1. International Research Centre for Nano Handling & Manufacturing of China, Changchun University of Science and Technology,

Changchun 130022, China; 2. Key Laboratory of Multiscale Manufacturing Technology of Chongqing; Chongqing Institute of Green and

Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: As an artificially-engineered electromagnetic material with the structure of periodic unit cell array, metamaterial has shown abnormal physical properties. Metamaterial-based terahertz absorbers have numerous potential applications in terahertz fields. In this review, the brief introduction of theoretical basis of metamaterial perfect absorbers is presented. The developments of the single-band, dual-band, multi-band and broadband metamaterial absorbers operating in terahertz range are reviewed. Perspectives and future work for terahertz metamaterial absorbers are also presented.

Key words: terahertz-wave, absorber, metamaterial

0 引言

吸波材料是能够将入射到其表面的电磁波转换成热能或其它形式能量的一类材料, 它可以减少电磁波的透射部分和反射部分, 从而展现出吸波特性。基于不同的吸波机制或原理, 吸波材料种类繁多, 其中一种新兴的基于超材料结构的吸波材料在最近几年得到广泛关注。

超材料是一种人工电磁材料, 通常由按周期结构排列的单元构成, 具有自然界常规材料所不具备的超常物理性质。虽然 1968 年就已经对超材料的负折射性质进行过理论研究^[1], 但是直到 2000 年后^[2-3]超材

料才开始受到重视, 并由于超材料潜在的巨大应用前景而备受关注^[4-5]。其中一个潜在的应用就是基于共振的“完美吸收器”(Perfect Absorber, PA)^[6], 即通过有效地改变材料的介电常数和磁导率来使器件在特定频率范围内实现对电磁波近乎 100%的吸收。一个典型的超材料吸收器具有类似三明治的三层结构: 其顶层为周期性图案的金属结构, 底层是不透明的金属平面, 中间是一层非金属介质材料。通过调整单元结构的形状/尺寸、厚度、金属材料和中间介质层材料, 可以改变共振频率的位置以及吸收效率的大小。吸收器通常由于具有高品质因数(吸收峰对应的波长 λ 与半高全宽对应的波长 $\Delta\lambda$ 的比值, 即 $\lambda/\Delta\lambda$)的高谐振响

收稿日期: 2015-06-12; 修订日期: 2015-07-16。

作者简介: 刘毅(1989-), 女, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事太赫兹吸波薄膜研究。E-mail: liuyi@cigit.ac.cn。

通讯作者: 彭晓昱, 研究员, E-mail: xypeng@cigit.ac.cn。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划), 编号: 2015CB755401; 中科院重庆绿色智能技术研究院创新研究基金, 编号: Y52A010V10。

应的性质而展现出很窄的工作带宽,可用于某些特定频率的领域,如窄带滤波、频率选择、传感、调制等。然而,在许多应用中,例如带阻滤波器、宽带抗辐射、太阳能电池、微测热辐射计、隐身材料等,需要宽带的平面超材料吸波材料。为了提高热传导效率,从而提高探测器的响应速度,需要超薄的宽带超材料吸波材料才能满足需求。在太赫兹(Terahertz, THz)领域,影响太赫兹技术广泛应用的瓶颈之一就是相对缺乏各种高灵敏度的探测器,尤其缺乏在整个太赫兹频段内具有宽带响应的高灵敏探测器,如太赫兹能量计/功率计、太赫兹相机等。为了提高这些探测器的灵敏度,人们通常会在探头表层加上一层特定的吸收层来增大对太赫兹波的吸收效果,这层吸收层在太赫兹波段的响应特性和吸收效率将直接影响这些探测器的灵敏度和探测带宽。由于基于超材料的各种太赫兹吸波材料有望根据需要设计成对太赫兹各特定频段的高灵敏吸收层,成为实现太赫兹高灵敏度探测器的一种重要的可能途径。因此,近年来人们开始着重研究和探索实现各种频段或者宽带的高效超材料太赫兹波吸波材料的各种可能机制和方法。

1 超材料吸波材料的理论基础

超材料作为一种有效的电磁媒质可以用复介电常数和复磁导率表征,根据吸波理论,可以用吸收率来表示材料吸波性能的高低。

1.1 复介电常数和复磁导率

当电磁波作用在吸波材料上时,电磁波会使吸波材料内部产生磁化和极化,并反过来对外加磁场产生影响。材料内部的电磁感应强度 D 、磁感应强度 B 、与电场强度 E 、磁场强度 H 之间的关系为:

$$D = \epsilon_0 \epsilon E, B = \mu_0 \mu H \quad (1)$$

电、磁介质材料可以分别用自由空间部分和材料本身部分的电磁特性来加以描述,表征吸波材料电磁特性的两个基本参数分别为:

复介电常数: $\epsilon(\omega) = \epsilon' - j\epsilon''$

复磁导率: $\mu(\omega) = \mu' - j\mu''$

式中: ϵ' 和 μ' 分别为吸波材料在电场或磁场作用下产生的极化或磁化程度的变量; ϵ'' 和 μ'' 分别表示电损耗和磁损耗。对介质而言,电导率和磁导率的虚部反映了电磁波的吸波性能。 $\tan(\sigma_\epsilon) = \epsilon''/\epsilon'$ 为电损耗正切值, $\tan(\sigma_\mu) = \mu''/\mu'$ 为磁损耗正切值。材料的 ϵ'' 和 μ'' 越大, 介质损耗角 σ 越大, 材料的吸波性能越好。

通过改变材料的介电常数和磁导率可以提高材料的吸收率从而提高材料的吸波性能。吸波材料的吸收率一般表示为:

$$A = 1 - R - T \quad (2)$$

式中: A 表示吸收率; R 表示反射率; T 表示透射率。由式(2)可知,反射率和透射率直接影响材料的吸波特性,其中:

$$R = |S_{11}|^2, \quad T = |S_{21}|^2$$

式中: S_{11} 和 S_{21} 分别表示反射系数和透射系数。

因此可以通过调控 S_{11} 和 S_{21} 的大小来提高吸收率。由吸收率公式 $A = 1 - R - T = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ 知,当反射率和透射率同时极小时吸波材料的吸收率达到最大,若在某一频率范围内 S_{11} 和 S_{21} 同时近似为 0, 此时吸收率 A 近似为 1, 实现吸波材料和自由空间的完美匹配,即吸波材料实现近完美吸收。当使用厚度超过入射电磁波波长的趋肤深度的连续金属薄膜作为底层时,透射率为 0,即:

$$T = |S_{21}|^2 = 0$$

此时吸收率:

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - |S_{11}|^2$$

1.2 吸波理论

经典的吸波理论包括阻抗匹配理论^[7]和干涉相消理论^[8-9]。

阻抗匹配理论认为,吸波材料阻抗要与自由空间阻抗相匹配,这样使入射的电磁波能够最大限度地进入材料内部,并且损耗掉,从而可以最大程度地吸收入射电磁波。该匹配理论的核心在于通过各种损耗性介质和磁性材料,将入射电磁波的阻抗变换为金属面的阻抗。良好的阻抗匹配条件是设计性能优良吸波材料的首要条件。假设自由空间的阻抗为 Z_0 ,吸波材料的阻抗为 Z_1 ,则反射系数为:

$$S_{11} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

式中: $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$, $Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}$ 。

当 $Z_0 = Z_1$ 时自由空间和吸波材料完美匹配,此时反射率:

$$R = |S_{11}|^2 = \left| \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right|^2 = 0$$

实现对入射电磁波的零反射^[10],且相对等效阻抗:

$$z(\omega) = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} = 1$$

干涉相消理论是经典光学中常用的理论,相比于阻抗匹配理论,多次干涉叠加更为直观,缺点在于计算较为复杂,并且难于处理复杂多层结构,长期以来多用来研究简单膜层的电磁响应。干涉相消理论认

为, 电磁波在空气-金属结构表面进行反射和透射, 其中透射部分进入金属结构并在金属结构表面再次发生反射, 并在空气-金属表面发生反射和透射, 其透射部分和第一次进入结构表面的反射部分满足干涉相消条件, 则可以实现反射为 0, 即 $R=0$; 又因为采用金属作为底层, 因此透射为 0, 即 $T=0$, 此时 $A=1$, 实现完美吸收。同时, 也可以通过矢量叠加的方式进行描述, 中心频率处反射率的取值在原点左右来回振荡, 并逐渐衰减, 最终归于 0。

2 太赫兹波超材料吸波材料的发展现状

近年来, 人们对基于超材料的各种波段的吸波材料进行了大量的研究, 其中太赫兹波段的超材料吸波材料成为新的研究热点^[11]。

2.1 太赫兹波

太赫兹波为频率在 $0.1\sim10\text{ THz}$ 的电磁波, 处于电子学到光子学的过渡区域^[12], 在电磁波谱中位于微波与红外之间, 如图 1 所示。作为一门前沿的新兴交叉学科, 太赫兹科学技术在材料、化学、医药、通信等诸多领域具有独特优越性和巨大的应用前景^[13-15]。由于自然界中很少有材料能够响应该频段, 而且缺乏有效的太赫兹源和探测器, 从而导致了太赫兹技术与其它波段相比进展缓慢。太赫兹滤波器、传感器、调制器、探测器等功能化的太赫兹波器件仍无法得到广泛应用的主要技术瓶颈之一就是这些器件对太赫兹波探测的灵敏度过低。为了提高太赫兹探测器件的探测效率和灵敏度, 近年来许多科研人员将太赫兹波吸波材料的研究放在至关重要的位置, 其中基于超材料的太赫兹波吸波材料的研究是一个重要方向, 通过改变结构单元的尺寸, 超材料可以很容易响应在太赫兹频段, 从而作为一种太赫兹吸波材料应用于太赫兹器件。近 10 年来, 研究人员对单频段、双频段、多频段、局域宽带和宽带超材料太赫兹吸波材料等各种类型的超材料吸波材料进行了理论和实验研究。

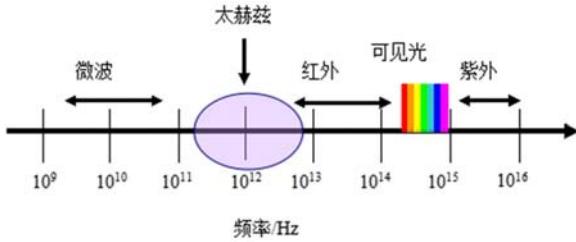


图 1 太赫兹波在电磁波谱中的位置

Fig.1 Terahertz in the electromagnetic spectrum

2.2 窄带超材料太赫兹吸波材料

2.2.1 单频段超材料太赫兹吸波材料

单频超材料太赫兹吸波材料可用于提高太赫兹

器件在某个单一频段的探测性能。常见的单频超材料吸波材料为“金属图案层-介质层-金属底层”的三层典型三明治结构, 例如 Tao 等^[16]在 2008 年利用微加工技术制备“开口谐振环 (SRRs)-介质层-金属线”结构, 实现了超材料吸波材料在太赫兹波段的单频窄带吸收, 在共振频率 1.3 THz 处对入射波的吸收率达到 70%。后来, 该小组在柔性聚酰亚胺基底上制备“SRRs-介质层-金属层”结构, 对不同倾角入射的 TE 波和 TM 波都有良好的吸收效果, 在 1.6 THz 频率处大大提高了其吸收效率 (97%)^[17]。随后, 众多研究人员对单频带太赫兹吸波材料进行了理论仿真和实验检测, 例如 2013 年 Li^[18]设计并制备的双耳异向单频带太赫兹吸波材料, 实验结果表明该吸波材料在 0.573 THz 处达到 99.6% 的近完美吸收。同年, 他还设计制备了一个类似的双耳嵌套太赫兹单峰吸波薄膜, 在 0.734 THz 实现了高达 99.2% 吸收率^[19]。除了上述的环状结构, Alves 等^[20]采用金属 Al 和氧化物 SiO_2 分别作为底层金属和介质层材料形成的单元周期为 $21\text{ }\mu\text{m}\times21\text{ }\mu\text{m}$ 的正方形结构, 其结构和反射率曲线如图 2^[20]所示, A、B、C 三个样品的正方形图案层和底层材料均为 100 nm 厚的铝膜, 介质层厚度分别为 $1.430\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.235\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.035\text{ }\mu\text{m}$ 。通过优化介质层厚度 (A 样品, $1.430\text{ }\mu\text{m}$), 在 4.1 THz 处得到了 98% 的高吸收效率。

2.2.2 双频段超材料太赫兹吸波材料

在某些情况下, 太赫兹器件需要在 2 个频段同时具有良好的探测性能, 因此需要双频段的太赫兹波吸收器, 这就要求材料在 2 个频段对太赫兹波均具有较高的吸波效率。双频吸波材料结构与单频类似, 多采用“金属图案层-介质层-金属底层”的三层典型结构, 只不过在图案层阵列的每个单元中设有 2 个不同尺寸的相似结构, 各自对应一个频率的吸收峰。例如, Wen 等^[21]提出一个由“谐振环-介质层-金属层”构成的双频窄带吸波结构, 仿真结果表明此结构在 0.5 THz 和 0.94 THz 频率点上吸收效率都达到了近 100% 的完美吸收, 但实际测量显示此结构在 0.45 THz 和 0.92 THz 两处分别为 80.8% 和 63.4% 的吸收效率。又如 Ma^[22]等提出的中心对称“回”字形结构, 这个对正交两个方向偏振不敏感的太赫兹吸波材料仍采用三层典型结构。实验表明, 该材料的吸收峰频率与模拟位置相同, 在 2.7 THz 和 5.2 THz 分别具有 68% 和 74% 的吸收效率, 其结构和吸收率曲线如图 3^[22]所示, 其中样品 A 为两个环形构成的吸波材料, 样品 B 和样品 C 分别为仅有外环和仅有内环时材料的吸收频谱图, 图 3(b) 为改变介质层厚度的吸收频谱图, 图 3(c) 为不同

入射角度下的吸收频谱图,证明了此中心对称结构是对偏振不敏感的。

2.2.3 多频段超材料太赫兹吸波材料

类似于双频段吸收材料的设计方法,通过在每个结构单元的金属图案层增加不同尺寸的相似结构从而增加更多的谐振频率,以实现对太赫兹波更多频段的吸收,用于满足太赫兹器件在多个频段的高探测性能需求。例如 Chen 等^[23]提出一个由单频吸收和双频吸收组合而成三频带太赫兹吸收器,理论和实验证实,在 0.29 THz、0.46 THz、0.92 THz 具有明显的吸收。Gu 等^[24]设计的一个多谐振多频窄带吸波薄膜,此结构在 1.69 THz、2.76 THz、3.41 THz、5.06 THz 四个频段处吸收效率分别为 63.5%、97.1%、94.1%、89.4%。Xu 等^[25]提出顶层图案层由 2 个单波段和 1 个双波段组合成,该多频段吸收材料在 0.57 THz、1.03 THz、1.44 THz 和 1.89 THz 四个频段处分别具有

99.9%、90.3%、83.0% 和 96.1% 的吸收效率。此外,还可以通过其它方法来实现多频吸收,例如 Peng 等^[26]提出了一种平板波导模型,如图 4^[26]所示,通过入射太赫兹波在其中形成基频驻波及其各阶奇次谐波的驻波共振而消耗在介质层内,从而获得多个吸收峰。其中图 4(a)为结构的俯视图和侧视图;图 4(b)为入射 EM 波在 TM 和 TE 偏振模拟的吸收光谱,虚线表示根据平板波导中驻波模型计算的驻波模式的频率。仿真结果表明,在 TM 波入射时吸波材料在 0.667 THz、2.02 THz、3.35 THz、4.63 THz、5.65 THz、6.49 THz、7.49 THz 和 7.87 THz 处的吸收率可超过 90%。他们还发现,改变平板尺寸,各吸收峰位置会相应移动,为此他们提出了利用不同尺寸的叠层平板结构来实现宽带吸波材料。这为太赫兹元器件实现宽频探测、提高探测灵敏度提供了一种可能的途径。

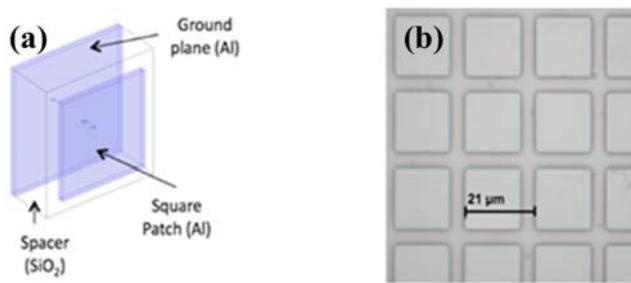


图 2 单频段超材料太赫兹吸波材料(a) 超材料单元结构 (b) 所制备的超材料吸收器的扫描电子显微镜照片
(c) 使用 FTIR 测量样品 A、B 和 C 获得的反射光谱

Fig.2 Single band metamaterial absorber (a) Simulated metamaterial unit cell (b) Scanning electron micrographs of the fabricated metamaterial absorber; (c) FTIR measurement of the reflection spectra for sample A (solid), sample B (dashed) and sample C (dotted) and simulated absorption spectra of the fabricated films A, B and C

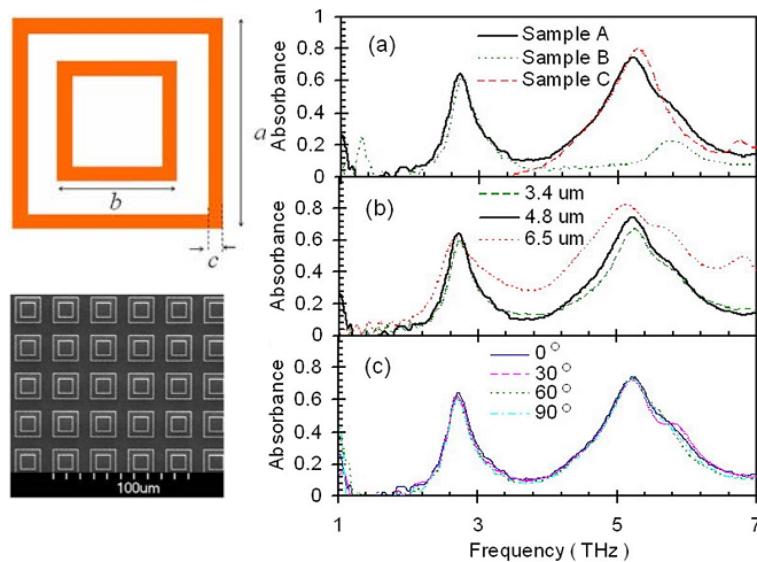


图 3 双频段超材料太赫兹吸波材料的吸收率曲线图,左边插图上图为样品的前视图,下图为结构图

Fig.3 Front view, structure pattern and absorbance of the fabricated dual-band metamaterial absorber

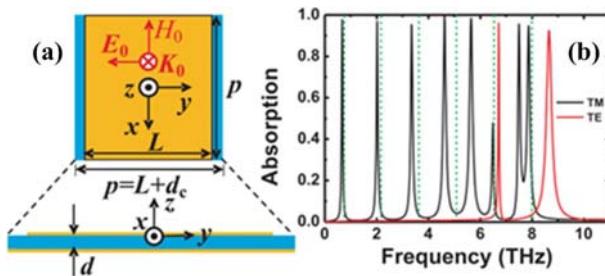


图4 基于驻波原理的平板波导多频段太赫兹超材料吸波材料
(a) 结构的俯视图和侧视图; (b) 模拟吸收光谱

Fig.4 Diagram of the ultrathin THz planar metamaterial absorber based on standing wave resonances (a) Front view at the top and side view at the bottom of the structure; (b) Simulated absorption spectra

2.3 宽带超材料太赫兹吸波材料

单频、双频等太赫兹窄带吸收器可用于窄带滤波、频率选择、传感、调制等。然而,在许多应用中,例如宽带太赫兹传感和调制器件、宽带抗反射膜、微测热辐射计以及其它宽带太赫兹探测器件等,需要宽带的太赫兹超材料吸波材料才能满足要求,这是因为这些器件的吸收层材料在太赫兹波段的响应特性和吸收效率将直接影响这些探测器的灵敏度和探测带宽。近年来这些重大需求激发了众多的研究人员去探索实现太赫兹宽带吸波材料的各种可能机制和方法。

最初人们采用典型的三层超材料结构实现局域宽频吸收,即在结构表面层设计尺寸不同但非常相近的金属单元阵列以实现局域宽带吸收。这是由于尺寸相近的相似结构的吸收峰间隔较小,通过吸收峰的叠加就可以扩展吸收带宽。例如 Gu 等^[27]提出通过正方环形和方形结构组合形成的“回”字形中心对称吸波器在 4.15~4.85 THz 的频率范围有 70% 的吸收效率。又如 Zhang 等在介质层上方的金属表面层设计双层“渔网”形结构^[28],模拟结果显示其可以有效提高吸波带宽(半高全宽约为 1.13 THz)。Huang Li 等^[29]提出一个由 3 个“工”形谐振的单层超材料吸波结构来增加吸波带宽,该结构采用 8.5 μm 厚的聚酰亚胺作为中间介质层,并使用金属钛(Ti)提高金属金(Au)和 GaAs 之间的粘合性,通过平面内大小周期的嵌套,使得不同结构对应于不同的谐振频率,从而能将带宽拓展 2~3 倍,使该结构在 0.905~0.956 THz 近完美吸收,在 0.93 THz 的中心频率上其半高全宽(Full Width Half Maximum, FWHM) 小于 0.2 THz,其结构和吸波如图 5^[29]所示,其中图 5(b)中其俯视结构图的对应参数为 $A=78 \mu\text{m}$ 、 $h=68 \mu\text{m}$ 、 $d=8 \mu\text{m}$ 、 $w=5 \mu\text{m}$ 、 $t=8.5 \mu\text{m}$ 、 $g=2.5 \mu\text{m}$ 、 $l_1=21.5 \mu\text{m}$ 、 $l_2=16.5 \mu\text{m}$ 或 $17.5 \mu\text{m}$ 。此外,有一个科研小组将 4 个参数不同

的圆形金属片进行 4×4 周期排列形成的超薄太赫兹超材料吸收器^[30],其半高全宽达到 1.49 THz,并且同时可获得较大角度上的太赫兹波入射吸收。

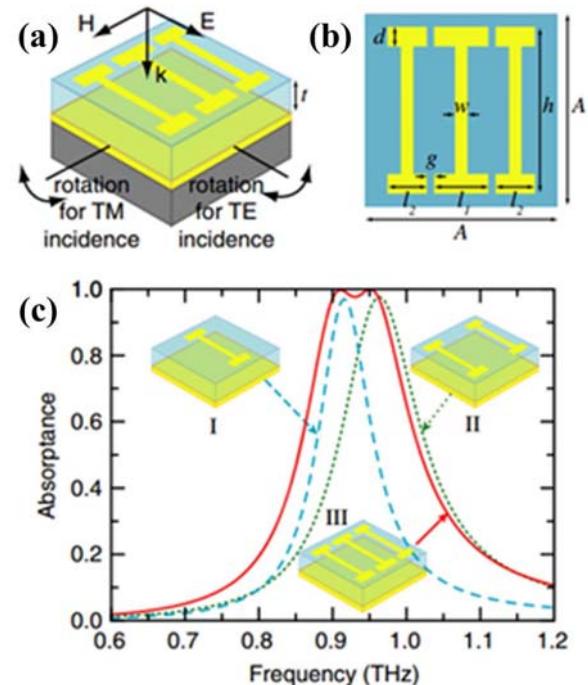


图5 三层局域宽带超材料吸波材料(a) 单元结构示意图; (b) 俯视图; (c) 垂直入射下 3 种结构的模拟吸收率曲线图

Fig.5 Schematic of the whole unit cell (a) and top view (b) of the three layers wideband metamaterial absorber; (c) numerical simulation results of absorption spectra at normal incidence for three different configurations of the I-shaped resonators that are indicated in the insets

由于在典型的三层超材料结构上通过改变上层金属阵列结构来扩展吸波带宽范围很有限,为了能有效扩展吸波带宽,研究人员尝试将不同尺寸的简单结构进行层叠,发现其吸波带宽比上述的三层典型吸波结构更宽。比如,将分形结构应用于太赫兹超材料吸收器,可以通过调节分维数并增加分形结构的层数实现宽频吸收。以“H”-分形结构^[31]为例,通过模拟“H”-分形结构的电磁谐振特性,发现分形结构可以实现显著的亚波长共振及多频操作。随后,杨娴等^[32]通过仿真优化证实,“H”-分形结构可以通过多层分形结构的叠加来增加吸波器的吸波带宽,其双层分形结构和三层分形结构明显扩宽了吸收带宽,三层结构在吸收率 90% 时其吸波带宽大约为 0.4 THz。然而,使用分型结构的吸波材料结构复杂,难于制备,至今未发现相关的实验报导。为此,科研人员不断寻找其它更为简便的方法来实现宽频吸收。2011 年,Grant 等人^[33]设计和制备了一个基于共振吸收的正交方向偏振不

敏感的宽带太赫兹超材料宽频吸收器,通过将平面尺寸不同的简单十字形金属图案-绝缘体依次进行层叠,实现宽带吸收,其结构和吸收频谱如图6^[33]所示。此结构在中心频率5 THz处(1.86 THz带宽)获得了60%的吸收。不过此吸波材料的吸收带宽既没有覆盖目前常用的低于3 THz的频率范围,也没有覆盖高于8 THz的频率范围,同时该结构虽然展宽了吸收带宽,却降低了吸收效率。与该方法类似,Pham等^[34]提出的方块状多层复合金字塔结构,在8~11.7 THz获得95%的高吸收效率。

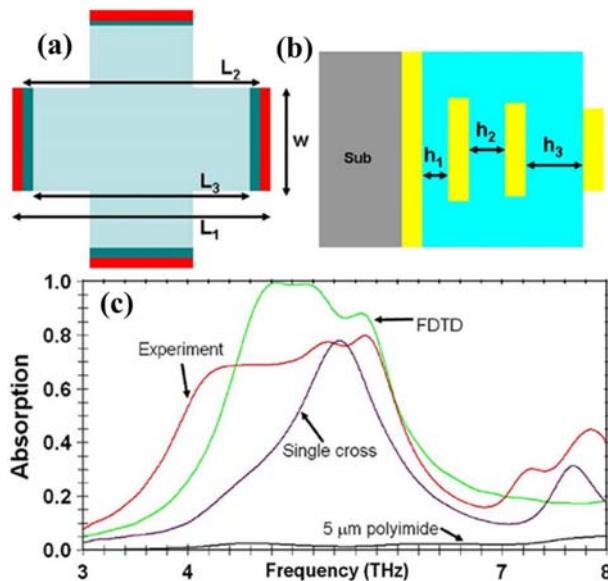


图6 多层宽带超材料吸波材料(a)平面图;(b)截面图;(c)实验和模拟(FDTD)多层结构吸波材料的吸收率曲线

Fig.6 Multilayer wideband metamaterial absorber (a) plan view of the three-layer absorber, (b) cross section of the complete device, and (c) experimental and simulated (FDTD) data of the multilayer absorber

多层结构超材料太赫兹吸波材料虽然扩展了吸波带宽,但却增加了材料的制备难度和整体材料的厚度,影响了热传导速率。实用的宽带太赫兹器件要求太赫兹吸波材料能够尽可能同时满足超薄宽带高吸收的性质。为了不增加太赫兹吸波材料厚度,还有一种途径是选择不同的材料,即用一些合金金属材料来代替常用金属或者使用本身对太赫兹波具有宽带吸收特性的材料作为介质层,以此来实现在宽带高吸收的同时不增加整体材料的厚度。Wang等人^[35]提出采用合金(Al-Si-Mg)方环代替常用金属(例如常用的Au、Ag和Cu)作为超材料的顶层结构材料,在3.21 THz的中心频率下吸波带宽达到2.69 THz。与常用金属相比,使用合金方环可以使吸波带宽扩宽21.2%。同年,Shi等^[36]提出的使用重掺杂硅来代替表面金属层和介质层材料,采用厚度为51 μm的十字交

叉结构构成的超材料吸波材料,在0.75~2.41 THz处具有95%的宽频高效吸收。

单独使用多层结构或者仅使用新型材料只能在一定程度上扩宽吸波带宽,其吸收带宽相对整个太赫兹波段仍然有较大距离。为此,研究人员尝试将多层结构和新型材料结合起来,期望制备出超宽带、高吸收的太赫兹波吸波薄膜材料。例如Wang等^[37]设计的一个由多个矩形合金(Al-Si-Mg)和介质层进行层叠形成的对偏振不敏感的超宽带吸波薄膜,在1.90 THz的中心频率下吸波带宽达到1.34 THz,且吸收效率超过90%。最近有人提出了利用石墨烯来替代典型吸波器的金属层结构并使用多层石墨烯-介质层的结构来实现高效超宽带太赫兹吸波薄膜的方案。石墨烯具有透明度高、导热性好、电阻率小、结构稳定、电子传导率快、高机械强度和弹性的特点,同时,由于石墨烯是单分子层结构,多层石墨烯的厚度与入射电磁波波长相比仍然很薄,因此将石墨烯引入吸波材料有望实现超薄、超宽带、高吸收的太赫兹波吸波材料^[38]。最近,一项理论研究证明了多层石墨烯结构可以使太赫兹波吸波材料的吸波带宽获得大幅度增加,该材料的设计利用了以下3个机制^[39]:①非对称石墨烯设计用于支持更高阶表面等离子体激元模式,这些模式与偶极模式产生干涉相消从而实现电磁波的吸收;②对每层石墨烯与相邻的支撑介质层施加不同的门电压并层层叠加从而实现依赖于偏振的宽带吸收;③通过降低石墨烯的电子迁移率至1000 cm²/V·s来提高材料的阻尼系数。仿真结果表明:与现有金属/石墨烯吸波材料的几个THz吸收带宽相比,只用了三层石墨烯材料的吸收效率在高达90%时吸波带宽就扩展到了7 THz,与常用材料相比其吸波带宽明显增加。不过,这个结果还有待于实验上进一步证明。该多层石墨烯结构和吸收效率曲线如图7^[39]所示,其中图7(b)中吸收率曲线对应参数为 $d_1=0.67 \mu\text{m}$, $d_2=0.5 \mu\text{m}$, $d_3=4.78 \mu\text{m}$ 。

3 总结和展望

本文简单介绍了超材料吸波材料的吸波原理,回顾了太赫兹超材料吸波材料的发展进程,并着重介绍了宽带太赫兹吸波材料的研究现状。典型的太赫兹单频超材料吸波材料为“金属图案层-介质层-金属底层”的三明治结构单元阵列,通过改变顶层图案的形状和大小可以获得所需要的吸收频率。双频、三频或者更多频带的太赫兹超材料吸波材料可以通过在单频吸波材料的每个结构单元的顶层中设计2个、3个或更多的尺寸不同结构相似的图案来实现,每个尺寸

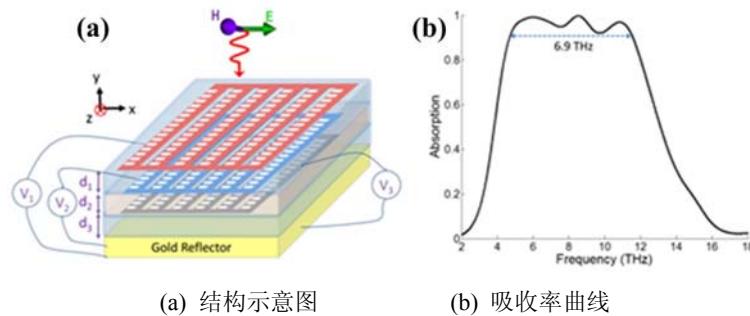


图7 石墨烯吸波材料结构

Fig.7 The schematic diagram of the proposed absorber with graphene

图案对应一个共振吸收频率。所以多频段太赫兹超材料吸波材料实际上是以典型单频超材料吸波材料为基础的功能延伸。要实现更多频段的吸收,还可以将吸波材料设计成平板波导结构的单元阵列,通过入射电磁波在其中形成基频驻波及其各阶奇次谐波的驻波共振而消耗在介质层内,从而获得多个吸收峰。多频段太赫兹吸波材料又进一步为宽带太赫兹吸波材料的设计奠定了基础,可以通过多层多频段太赫兹吸波材料的功能叠加从而实现对太赫兹波的宽频吸收。

从发展趋势来看,为满足宽带太赫兹探测器件的应用需求,太赫兹超材料吸波材料的研究将朝着能覆盖整个太赫兹频段的超宽带、高吸收率和超薄厚度的目标迈进,但目前要同时满足这3个条件仍然困难重重。除了这3个主要目标外,如何设计出结构简单、制备容易、成本较低且适宜批量生产的太赫兹波吸波材料,也是研究人员需要考虑的重要因素。尽管目前还处在实验或理论探索阶段,以多层石墨烯材料为代表的新型太赫兹吸波材料的出现还是为实现上述目标带来了曙光。最近,利用光敏硅、二氧化钒等某些对光、电磁、温度等条件变化极其敏感的材料,有人设计和制备了主动可调太赫兹波超材料吸波材料^[40-43],引起人们的极大关注。可以预见,如果能同时实现超薄、超宽带和高吸收的主动式可调太赫兹吸波材料,必将极大地拓展太赫兹吸波材料的功能和应用范围,这类材料是太赫兹波吸波材料发展的一个重要方向。总之,虽然太赫兹超材料吸波材料的研究还有很多问题亟待解决(例如如何在整个太赫兹波段实现超宽带吸收,同时满足吸收材料超薄和高效吸收以及主动式可调吸波等),但可以相信,随着太赫兹吸波材料的理论和其相关的微纳加工技术^[44]的不断完善,必将进一步促进和推动太赫兹科学技术在各个领域的应用和发展。

参考文献:

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, **10**(4): 509-514.
- [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.
- [3] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. *Science*, 2004, **305**: 788-792.
- [4] Zhang X, Liu Z. Superlenses to overcome the diffraction limit[J]. *Nature Materials*, 2008, **7**(6): 435-441.
- [5] Soukoulis C M, Wegener M. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(9): 523-530.
- [6] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(20): 7402-7406.
- [7] KNOTT E F, Shaeffer J F, Tuley M T. *Radar Cross Section*[M]. USA: SciTech Publishing, 2004.
- [8] Saville P. Review of Radar Absorbing Materials[R]. DTIC Document, 2005.
- [9] 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 Chun-Feng, Xu Zong-Cheng, Zhang Ya-Ting et al. Research progress of electromagnetic metamaterial absorber in THz frequencies[J]. *Journal of Zaozhuang University*, 2013, **30**(5): 12-18.
- [10] Smith D R, Vier D C, Koschny T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. *Physical Review E*, 2005, **71**(3): 036617.
- [11] 陈菲,曹卫平,张静媛.双频窄带超材料吸波体的设计[J].桂林电子科技大学学报,2014,34(3): 180-183.
Chen Fei, Cao Wei-ping, Zhang Jing-yuan. Design of dual narrow-bands metamaterial absorber[J]. *Journal of Guilin University of Electronic Technology*, 2014, **34**(3): 180-183.
- [12] Lee Yun-Shik. *Principles of terahertz science and technology*[M]. NY: Springer, 2008.
- [13] Xie L, Yao Y, Ying Y. The application of terahertz spectroscopy to protein detection: a review[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2014, **49**(6): 448-461.
- [14] 魏华.太赫兹探测技术发展与展望[J].红外技术,2010,32(4): 231-234.

- Wei Hua. The Prospects for THz detection techniques development[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(4): 231-234.
- [15] 王华泽, 吴晗平, 吕照顺, 等. 太赫兹成像系统分析及其相关技术研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(7): 391-397.
- Wang Hua-ze, Wu Han-ping, Lv Zhao-shun et al. Research on THz imaging system and its related technologies[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(7): 391-397.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Li Jiu Sheng. High absorption terahertz-wave absorber consisting of dual-C metamaterial structure[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, **55**(5): 1185-1189.
- [19] Li Jiu Sheng. Terahertz-wave absorber based on metamaterial[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, **55**(4): 793-796.
- [20] Alves F, Kearney B, Grbovic D, et al. Strong terahertz absorption using SiO_2/Al based metamaterial structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(11): 111104.
- [21] 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.
- [22] Ma Y, Chen Q, Grant J, et al. A terahertz polarization insensitive dual band metamaterial absorber[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(6): 945-947.
- [23] Zhi C, Ya-Xin Z. Planar terahertz metamaterial with three-resonant frequencies[J]. *Chinese Physics B*, 2013, **22**(6): 067802.
- [24] Chao G, Shao-Bo Q, Zhi-Bin P, et al. Multiband terahertz metamaterial absorber[J]. *Chinese Physics B*, 2011, **20**(1): 017801.
- [25] Xu Z C, Gao R M, Ding C F, et al. Multiband metamaterial absorber at terahertz frequencies[J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, **31**(5): 054205.
- [26] Peng X Y, Wang B, Lai S, et al. Ultrathin multi-band planar metamaterial absorber based on standing wave resonances[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(25): 27756-27765.
- [27] Gu C, Qu S, Pei Z, et al. A wide-band, polarization-insensitive and wide-angle terahertz metamaterial absorber[J]. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2010, **17**: 171-179.
- [28] Zhang X, Gu J, Cao W, et al. Bilayer-fish-scale ultrabroad terahertz bandpass filter[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(5): 906-908.
- [29] Huang Li, 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.
- [30] Wang G D, Liu M H, Hu X W, et al. Broadband and ultra-thin terahertz metamaterial absorber based on multi-circular patches[J]. *The European Physical Journal B*, 2013, **86**(7): 1-9.
- [31] Miyamaru F, Saito Y, Takeda M W, et al. Terahertz electric response of fractal metamaterial structures[J]. *Physical Review B*, 2008, **77**(4): 045124.
- [32] 杨娴, 张建民. 基于分形结构的太赫兹超材料吸波体[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2013, **41**(1): 32-35.
- Yang Xian, Zhang Jian-min. Terahertz metamaterial absorber based on fractal structures[J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2013, **41**(1): 32-35.
- [33] Grant J, Ma Y, Saha S, et al. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(17): 3476-3478.
- [34] Pham V T, Park J W, Vu D L, et al. THz-metamaterial absorbers[J]. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, **4**(1): 015001.
- [35] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, et al. A simple design of a broadband, polarization-insensitive, and low-conductivity alloy metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Express*, 2014, **7**(8): 082601.
- [36] Shi C, Zang X F, Ji X B, et al. Ultra-broadband Terahertz Perfect Absorber Based on Multi-frequency Destructive Interference and Grating Diffraction[DB/OL]. arXiv preprint arXiv:1409.6103, 2014.
- [37] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, et al. Metamaterial-based low-conductivity alloy perfect absorber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(12): 2293-2298.
- [38] Thongrattanasiri S, Koppens F H L, F Javier de Abajo G. Complete optical absorption in periodically patterned graphene[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **108**(4): 047401.
- [39] Amin M, Farhat M, Bağci H. An ultra-broadband multilayered graphene absorber[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(24): 29938-29948.
- [40] 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.
- [41] Xu Z, Gao R, Ding C, et al. Photoexcited switchable metamaterial absorber at terahertz frequencies[J]. *Optics Communications*, 2015, **344**: 125-128.
- [42] Zheng W, Li W, Chang S. A thermally tunable terahertz metamaterial absorber[J]. *Optoelectronics Letters*, 2015, **11**: 18-21.
- [43] Naorem R, Dayal G, Ramakrishna S A, et al. Thermally switchable metamaterial absorber with a VO_2 ground plane[J]. *Optics Communications*, 2015, **346**: 154-157.
- [44] 潘学聪, 姚泽瀚, 徐新龙, 等. 太赫兹波段超材料的制作, 设计及应用[J]. 中国光学, 2013, **6**(3): 283-296.
- Pan Xue-cong, Yao Ze-han, Xu Xin-long, et al. Fabrication, design and application of THz metamaterials[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(3): 283-296.