

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.04.010

基于表面金属结构的太赫兹超材料吸波器件研究*

陈伟强¹, 钟舜聪^{1,2*}

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 上海大学 机电工程及自动化学院, 上海 200072)

摘要: 由于局限于微纳加工技术以及本身的响应特性, 现有超材料吸波器件仅能实现对单一频率或窄频带的完美吸收, 针对这一问题, 提出了一种新型超材料太赫兹宽带吸波器件。利用将十字结构与谐振环结构两种不同的表面金属结构进行组合的方法, 扩展了吸波频带宽度和提高了吸收率, 并使其具备了极化模式和入射角度不敏感的优点; 同时对吸波器件工作机理进行了剖析, 并采用数值模拟的方法研究了电磁波极化模式、入射角度、结构尺寸等参数对于超材料吸波器件性能的影响。研究表明: 该吸波器件在 1.26 THz ~ 1.33 THz 的吸收率均超过 99%, 在 1.23 THz ~ 1.37 THz 的吸收率均大于 90%; 相对于其他宽带吸波器件, 该吸波器件吸收率和吸收频带的带宽均有所提升。

关键词: 太赫兹吸波器件; 表面金属结构; 超材料; 共振频率; 极化模式

中图分类号: TH86; TB34

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2021)04-0464-05

Terahertz metamaterial absorbing device based on surface metal structure

CHEN Wei-qiang¹, ZHONG Shun-cong^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at solving the problem that metamaterial absorbing device could only achieve perfect absorption of single frequency or narrow frequency band due to micromachining technology and response characteristics of the device, a new type of metamaterial terahertz broadband absorbing device was proposed. The method of combining two different surface metal structures (e.g. cross structure and resonant ring structure) was proposed to expand the absorption band width. Absorption at the resonance frequency was improved and the advantages of insensitive polarization mode and incident angle were proposed. Numerical simulation and analysis of the absorbing performance of the device was conducted in the work. The working mechanism of the absorber was analyzed. The influence of polarization mode, incident angle, structure size and other parameters on the performance of the absorber was investigated. The simulation results indicate that the absorptivity of the absorber is over 99% in the range of 1.26 THz ~ 1.33 THz, and over 90% in the range of 1.23 THz ~ 1.37 THz. Comparing with other broadband absorbers, the bandwidth of both absorption rate and absorption band is effectively improved.

Key words: terahertz absorbing device; surface metal structure; metamaterial; resonance frequency; polarization mode

0 引言

电磁吸波器件是指可以将入射电磁波尽可能吸收, 并通过不同的机制转化损耗, 减少能量反射的功能器件。这类器件作为电磁隐身技术^[1,2]的重要组成部分

分。除此之外, 随着科技的高速发展, 人们身边种类、数量繁多的电子设备同样也带来了电磁污染的风险, 电磁吸波技术的发展也是解决这一问题的关键。同时, 这项技术在无线通讯^[3]和太阳能电池^[4]等领域也有着巨大应用潜力。

收稿日期: 2020-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675103); 上海市自然科学基金资助项目(18ZR1414200); 福建省科技计划资助项目(2019I0004)

作者简介: 陈伟强(1993-), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 主要从事太赫兹仪表技术及应用方面的研究。E-mail: 799072285@qq.com

通信联系人: 钟舜聪, 男, 教授, 博士生导师, IET Fellow。E-mail: sczhong@fzu.edu.cn

传统吸波器件以经典的 Salisbury 吸收屏^[5]为例,是由金属底板、厚度为四分之一波长的介质材料与电阻层组成,利用干涉相消来实现吸波的目的。这类传统吸波器件由于天然材料本身性质的局限性,存在着器件体积大、质量重、吸波频带窄等缺点。超材料的出现为这领域的研究注入新的活力。

超材料作为一种新型电磁材料,其响应性质是人为可调控的,因此这种材料具有负介电常数^[6,7]、负折射率^[8-9]、逆多普勒效应及逆斯涅耳定律^[10]等独特的属性。基于超材料的电磁吸波器件可通过合理设计亚波长单元结构,在实现对特定频率段电磁波完美吸收的同时,还具有频带宽、厚度薄、集成度高、高吸收等优点。在缺乏有效功能器件的太赫兹波段,超材料理论的提出与证实为太赫兹吸波器件迈向实用提供了可能,也成为了太赫兹^[11-13]领域相关人士所关注的热点。

早期太赫兹波段的超材料吸波器件仅能实现对一个单一频率或窄频带的完美吸收;同时由于材料各向异性等性质存在,还只能对 TE 或 TM^[14]其中一种极化波进行吸收,对于多频点、宽频带、极化模式不敏感的器件还处于理论模拟阶段。目前,对于太赫兹超材料吸波器件的研究已扩展到多频点和宽频带的吸收。

本研究提出一种基于超材料的太赫兹吸波器件。

1 超材料吸波器件模型

因为超材料器件吸收带宽非常窄,为了实现宽带及多频点吸收,研究人员主要采取的方法是,将对应不同谐振频率的结构组合到一个超材料单元,如双谐振环^[15]、双十字^[16]及多层结构^[17]等。

在此,笔者采用了将两种不同的表面金属结构进行组合的方法来扩展吸波频带宽度,器件的结构如图1所示。

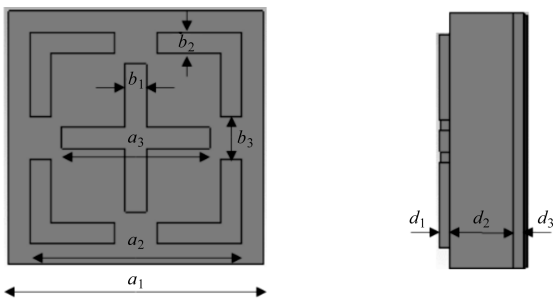


图1 超材料吸波器件模型

超材料吸波器件参数如表1所示。

表1 超材料吸波器件参数

材料	介电常数	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
聚亚酰胺	$3.1 + j0.217$	—
金	—	4.56×10^7

图1中的器件为金属结构-介质层-金属底板的典型三层结构,第一层为十字结构与谐振环结构组合而成,其中结构的周期 a_1 为 $120 \mu m$, 方形开口环边长 a_2 为 $100 \mu m$, 十字结构长度 a_3 和宽度 b_1 分别为 $70 \mu m$ 及 $10 \mu m$, 方形谐振环宽度 b_2 和缺口尺寸 b_3 分别为 $10 \mu m$ 和 $20 \mu m$, 三层结构厚度 d_1 、 d_2 、 d_3 分别为 $0.2 \mu m$ 、 $12.5 \mu m$ 和 $1 \mu m$, 模拟时第一层和第三层采用的金属材质均为损耗金属金,它在太赫兹频段的电导率为 $4.56 \times 10^7 S \cdot m^{-1}$, 第二层介质选用聚亚酰胺材料,聚亚酰胺在太赫兹段的介电常数为 $3.1 + j0.217$ 。通常情况下,器件的透射率 $T(\omega)$ 、反射率 $R(\omega)$ 及吸收率 $A(\omega)$ 三者关系满足下式:

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

式中: A —吸收率; $R(\omega)$ —反射率; $T(\omega)$ —透射率。

对于本器件而言,由于最后一层金属底板的厚度大于电磁波的趋肤深度,太赫兹波无法穿透金属底板,透射率 $T(\omega)$ 为0,上式可简化为:

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

2 模拟结果与讨论

首先,笔者在 CSTStudio 仿真软件中分别建立如图1所示的超材料结构、十字结构以及方形开口环结构,随后设置仿真条件:器件的边界条件设为 Unit Cell,入射电磁波角度设为垂直入射,极化模式设置为 TEM 极化,仿真的频率范围设为 $1 THz \sim 3 THz$ 。

仿真条件设置完毕后,运行仿真软件后得到器件反射率曲线,如图2所示。

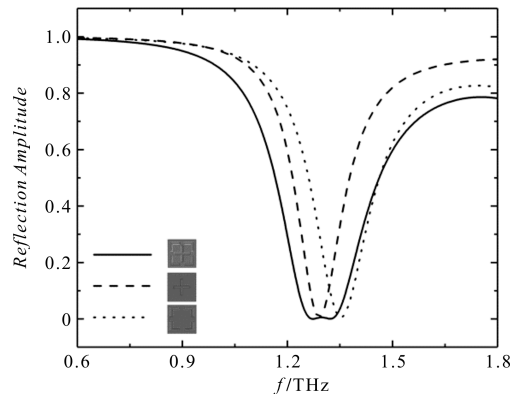


图2 吸波器件反射率曲线

图2中,器件在 $1.26 THz \sim 1.33 THz$ 的吸收率均超过 99%, 在 $1.23 THz \sim 1.37 THz$ 吸收率均大于 90%; 而单独十字结构在共振频率 $1.29 THz$ 处吸收率为 99.3%, 在 $1.27 THz \sim 1.31 THz$ 吸收率超过 90%; 方形开口环在共振频率 $1.36 THz$ 处吸收率为 99.4%, 在 $1.32 THz \sim 1.38 THz$ 处吸收率超过 90%。

与组合前单独的一种结构吸波性能相比,组合后的器件不论吸收率还是吸收频带的带宽均得到了有效提升;同时,其吸收频带略微向低频移动,并非是简单的两个单独吸收频带的叠加,这是由于两个结构之间发生了耦合。

为了定性分析器件的吸波机理,笔者对共振频率处的电场分布和磁场分布进行了仿真,得到器件的电场和磁场分布,如图 3 所示。

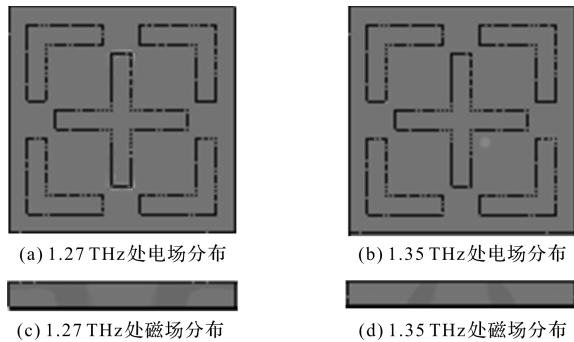


图 3 吸波器件电磁场分布

图 3 中,在 1.27 THz 处,电场主要集中在十字结构的上下两端,在 1.35 THz 处电场则主要集中在开口环的 4 个缺口处。

由于对电磁波的主要吸收来源于介质内的磁响应,从图 3 (c, d) 中可以看出,不论是 1.27 THz 还是 1.35 THz,介质中磁场主要都集中在开口环上下端与开口环上下两个缺口处。这表明器件对于太赫兹波的吸收主要是由于这些位置的强电磁场谐振引起的。

吸波器件的电流和功率损耗分布如图 4 所示。

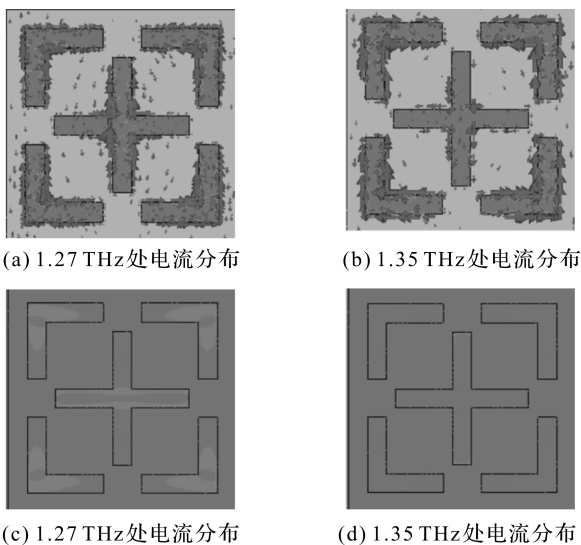


图 4 吸波器件电流及功率损耗分布

图 4 中,当入射电磁波在器件第一层金属表面结构发生耦合时,在开口环两侧形成了相反的电流,这对反向电流消除了开口环表面磁响应,因此,此时在开口

环上只存在电响应;在器件的底板则出现了与表面电流方向相反的电流引起了循环位移电流,在介质材料间产生了磁共振引起了介电损耗。

从图 4 还可以看出,损耗主要集中在谐振环缺口及十字结构垂直部分两端,这也与磁场的分布相吻合,也证明了当模拟的入射电场以平行 x 轴形式入射时,由于这些位置产生的响应电磁场强度大,进而产生较高的位移电流引起了主要的介电损耗,使入射波能量发生吸收转化。

3 超材料吸波器件的性能分析

不同介质厚度下器件的反射率曲线如图 5 所示。

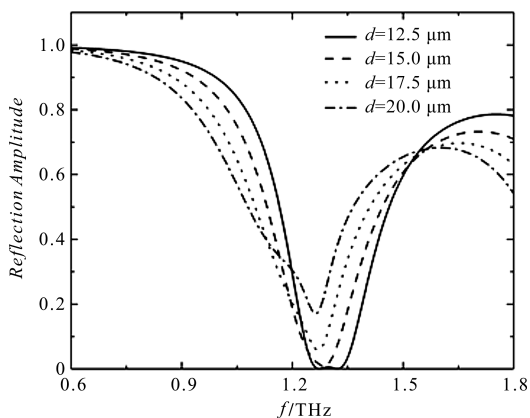


图 5 不同介质厚度下器件的反射率曲线

图 5 中,随着介质厚度的增加,器件共振频率逐渐往低频移动,同时反射率也发生变化,在厚度取 $12.5 \mu\text{m}$ 时,共振频率处的反射率最小,吸收峰值最大,超过 99.9%,可以视为完美吸收;

同时,这个厚度下器件的吸收带宽最宽,随着厚度增加到 $15 \mu\text{m}$ 、 $17.5 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 时,共振频率往低频移动至 1.29 THz、1.27 THz、1.26 THz 处,共振频率处的反射率升高,吸收峰值下降至 99%、96% 以及 87%,吸收带宽也逐渐缩窄。

这一由介质厚度变化引起的器件吸收性能变化的现象,可以通过多重干涉理论来解释。

太赫兹波在器件内的传播如图 6 所示。

图 6 中,太赫兹波在到达空气与器件界面时发生第一次反射,部分电磁波发生反射不进入器件内部,此时反射系数为 $r_{12}e^{i\varphi_{12}}$,剩余电磁波则继续向前透射(透射系数 $r_{12}e^{i\theta_{12}}$) 经过一个相位到达金属底板发生第二次反射,此时由于金属底板厚度大于太赫兹波的趋肤深度,透射率为 0,所有太赫兹波都将反射(反射系数 $r_{23} = -1$) 再次经过一个相位 β 到达空气与器件界面,并再次发生反射(反射系数 $r_{21}e^{i\varphi_{12}}$) 与透射(透射

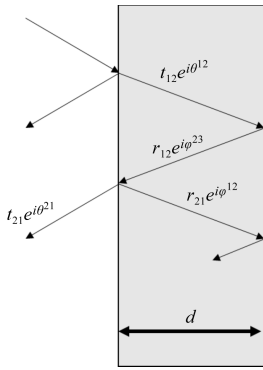


图6 太赫兹波传播路径示意图

系数 $r_{21}e^{i\theta_{12}}$)。

如此循环反复,所以反射波就等于所有出射波的总和,其表达式如下:

$$\begin{aligned} \tilde{r} &= \tilde{r}_{12} + \tilde{t}_{12}e^{i\beta}\tilde{r}_{23}e^{i\beta}\tilde{t}_{21} + \tilde{t}_{12}e^{i\beta}\tilde{r}_{23}e^{i\beta}(\tilde{r}_{21}e^{i\beta}\tilde{r}_{23}e^{i\beta})\tilde{t}_{21} + \\ &\quad \tilde{t}_{12}e^{i\beta}\tilde{r}_{23}e^{i\beta}(\tilde{r}_{21}e^{i\beta}\tilde{r}_{23}e^{i\beta})^2\tilde{t}_{21} + \dots = \\ &\tilde{r}_{12} + \tilde{t}_{12}\tilde{t}_{21}\tilde{r}_{23}e^{i2\beta} \sum_{n=0}^{\infty} (\tilde{r}_{21}\tilde{r}_{23}e^{i2\beta})^n = \\ &\tilde{r}_{12} + \frac{\tilde{t}_{12}\tilde{t}_{21}\tilde{r}_{23}e^{i2\beta}}{1 - \tilde{r}_{21}\tilde{r}_{23}e^{i2\beta}} = \\ &\tilde{r}_{12} - \frac{\tilde{t}_{12}\tilde{t}_{21}e^{i2\beta}}{1 + \tilde{r}_{21}e^{i2\beta}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\tilde{r}_{12}, \tilde{r}_{21}, \tilde{r}_{23}$ — 器件界面处的反射系数; $\tilde{t}_{12}, \tilde{t}_{21}$ — 界面处的透射系数; β — 电磁波的传播相位, $\beta = \sqrt{\epsilon}k_0t$, k_0 — 自由空间波数。

为了使反射波为0,根据式(3)可以得到其各反射波和透射波幅值大小应满足下式:

$$|\tilde{r}_{12}| = |\tilde{t}_{12}\tilde{t}_{21} - \tilde{r}_{12}\tilde{r}_{21}| \quad (4)$$

反射波和透射波相位满足下式:

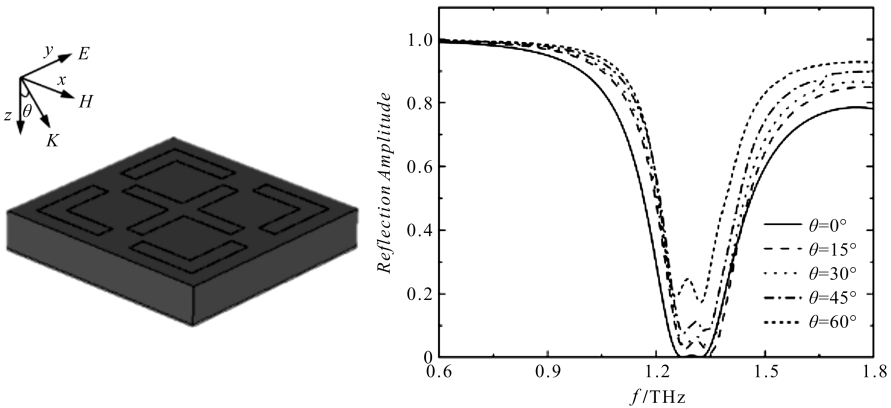
$$\begin{aligned} \varphi(\tilde{r}_{12}) - \varphi(\tilde{t}_{12}\tilde{t}_{21} - \tilde{r}_{12}\tilde{r}_{21}) - \beta &= 2n\pi \\ n &= 0, \pm 1, \pm 2 \dots \end{aligned} \quad (5)$$

此时器件发生干涉相消,反射波为0,吸波器件实现了对入射波的完美吸收。

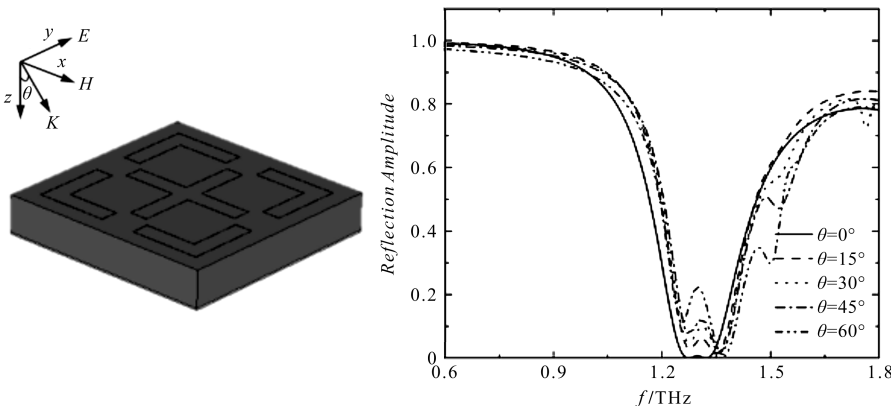
图5中,当介质层厚度 d 发生,引起了传播过程相位 β 的变化,这就使在共振频率处原本匹配的振幅、相位不再匹配,仅能实现部分干涉相消,反射波不再为0,反应在吸波性能上就表现为共振频率的移动和吸收峰值的下降。

对于吸波器件而言,在不同极化模式和不同入射角度下,能否一样保证良好的性能是评价其性能的重要指标,因此,在 TE 和 TM 极化模式、不同入射角度下,笔者对于器件性能进行了仿真。

TE 和 TM 模式下器件的反射率曲线如图7所示。



(a) TE模式不同入射角度下器件反射率曲线



(b) TM模式不同入射角度下器件反射率曲线

图7 TE 与 TM 模式下器件反射率曲线

图 7 中,当入射波为 TE 波时,当入射角度为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时,共振频率略微向低频移动,同时共振频率处的反射率也随之升高;当入射角度小于 45° 时,共振频率处的吸收率均高于 90%;当入射角度为 60° 时,共振频率处吸收率也仍高于 20%;当入射波为 TM 波时,当入射角度为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 过程中,共振频率也同样略微向低频移动,共振频率处的反射率也同样随之升高;当入射角度小于 60° 时,器件的最大吸收率仍大于 90%。

由此可见,该器件具有极化不敏感和偏振不敏感的优点。

4 结束语

为了实现器件从单一频带吸收扩展到多频带吸收,从窄频带吸收扩展到宽频带吸收,笔者利用了将十字与方形开口环两种不同金属单元结构进行组合的方法,成功拓宽了器件的吸收频带,提高了共振频率处的吸收率,同时还具备极化模式和入射角度不敏感的优点。

综上所述,相对于其他宽带吸波体,该器件的吸收率和吸收频带的带宽均有所提升,并且其较为简单的结构也有利于加工制作。

参考文献 (References):

[1] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801):977-980.

[2] PENDRY J, SCHURIG D, SMITH D. Controlling electromagnetic fields [J]. *Science*, 2006, 312(5781):1780-1782.

[3] 李维佳,梁迪飞,谢建良,等.吸波材料在 NFC 天线领域的应用[J].安全与电磁兼容,2012(5):69-71,74.

[4] MUNDAY J N, ATWATER H A. Large integrated absorption enhancement in plasmonic solar cells by combing metallic gratings and antireflection coatings[J]. *Nano Letters*, 2011,11(6):2195-2201.

[5] SALISBURY W W. Absorbent body for electromagnetic waves[P]. US Patent, 2599944, 1952.

[6] 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.

[7] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000,85(18):3966-3969.

[8] 杨方清,李杰,董建峰.手征超常介质结构及其强旋光性和负折射率[J].材料导报,2011,25(15):36-41.

[9] PENDRY J, RAMAKRISHNA S. Focussing light using negative refraction [J]. *Journal of Physics Condensed Matter*, 2003,15(15):6345-6364.

[10] BILOTTI F, NUCCI L, VEGNI L. An SRR based microwave absorber [J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2006,48(11):2171-2175.

[11] 孔姣,钟舜聪,姚海子,等.基于金属阵列等离子体共振增强的太赫兹光电导天线设计[J].机电工程,2017,34(8):880-884.

[12] HUANG Y, ZHONG S, SHI T. Terahertz plasmonic phase-jump manipulator for liquid sensing [J]. *Nanophotonics*, 2020,9(9):3011-3021.

[13] HUANG Y, ZHONG S, SHEN Y. Terahertz phase jumps for ultra-sensitive graphene plasmon sensing [J]. *Nanoscale*, 2018,10(47):22466-22473.

[14] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20):207402(1)-207402(4).

[15] LEE H M, LEE H. A Dual-Band metamaterial absorber based with resonant-magnetic structures [J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2012(33):1-12.

[16] JIANG Z H, YUN S, TOOR F, et al. Conformal dual-band near-perfectly absorbing mid-infrared metamaterial coating [J]. *ACS Nano*, 2011,5(6):4641-4647.

[17] 程用志.调控电磁特性超材料设计及其性能研究[D].武汉:华中科技大学光学与电子信息学院,2015.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

陈伟强,钟舜聪.基于表面金属结构的太赫兹超材料吸波器件研究[J].机电工程,2021,38(4):464-468.

CHEN Wei-qiang, ZHONG Shun-cong. Terahertz metamaterial absorbing device based on surface metal structure [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021,38(4):464-468.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>