

文章编号: 1672-8785(2022)03-0031-09

基于多层结构的偏振不敏感超材料 太赫兹宽带吸收器

路 浩¹ 陈鹤鸣^{2*}

(1. 南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京邮电大学贝尔英才学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 为了解决宽带吸收器结构设计复杂的问题, 提出了一种结构简单、偏振不敏感、吸收性能优良的超材料太赫兹宽带吸收器。该吸收器采用对称结构设计, 以金属层-介质层-金属层的三层架构为基础。其中, 介质层中嵌入了两个不同尺寸的圆形金属片, 从而形成多层结构。采用频域有限元法(Frequency Domain Finite Element Method, FEM)分析了该吸收器的宽带吸收率、偏振敏感性和入射角度等特性。仿真结果表明: 该吸收器可以实现 5.86~7 THz 的宽带吸收, 吸收带宽为 1.14 THz, 带宽内的吸收率在 95% 以上, 且对于垂直入射的电磁波偏振并不敏感, 在一定入射角度内依然保持宽带吸收。该吸收器结构设计简单且具有良好的性能, 在太赫兹成像和电磁隐身等领域中具有重要的应用价值。

关键词: 太赫兹; 超材料; 多层结构; 偏振不敏感; 宽带吸收器

中图分类号: TB34 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.03.005

Polarization-Insensitive Metamaterial Terahertz Broadband Absorber Based on Multilayer Structure

LU Hao¹, CHEN He-ming^{2*}

(1. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to solve the problem of complex design of broadband absorber, a polarization insensitive metamaterial THz broadband absorber with simple structure and excellent absorption performance is proposed. The absorber adopts symmetrical structure design, which is based on the three-layer structure of metal layer-medium layer-metal layer. Two circular metal sheets of different sizes are embedded in the medium layer to form a multilayer structure. Frequency domain finite element method (FEM) is used to analyze the broadband absorption rate, polarization sensitivity and incident angle of the absorber. The simulation results show that the absorber can achieve wide band absorption of 5.86~7 THz, and the absorption bandwidth is 1.14 THz. The absorption rate is more than 95% within the bandwidth, and it is not sensitive to the polarization of verti-

收稿日期: 2021-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(61571237); 江苏省自然科学基金项目(BK20151509)

作者简介: 路浩(1997-), 男, 安徽淮南人, 硕士研究生, 主要研究方向为超材料太赫兹宽带吸收器。

*通讯作者: E-mail: chhm@njupt.edu.cn

cally incident electromagnetic wave. And it still maintains broadband absorption within a certain incidence angle. The absorber has a simple structure design and excellent performance, which has important application value in terahertz imaging and electromagnetic stealth fields.

Key words: terahertz; metamaterial; multilayer structure; polarization-insensitive; broadband absorber

0 引言

超材料是人工设计的亚波长周期性的结构材料,它可以具有与自然材料不同的特性。根据所设计超材料的结构差异,可以修改其介电常数与磁导率。因此,超材料在负折射率^[1]、完美透镜^[2]、电磁隐身^[3]等技术领域中具有重要的应用价值。太赫兹波段的范围是 0.1~10 THz。由于波长处于微波与红外光之间,太赫兹波具有穿透性强、分辨率高、光子能量低等特性。近年来,超材料逐渐应用于滤波器^[4]、调制器^[5]、吸收器^[6]等太赫兹器件。其中,吸收器在太赫兹成像、生物探测和无损传感等方面具有重大的应用价值,吸引了国内外许多学者来研究。

2008 年, Tao H 等人^[7]设计出第一个完美超材料吸收器。其单元结构顶部金属层被设计成方形环状结构并在两侧开口,中间采用聚酰亚胺作为介质层,底部为金属短线。该吸收器可在 1.12 THz 处实现 98% 的吸收率。2015 年, Wang B X 等人采用金属-介质层-金属的三层结构,先后提出了双频点^[8]、四频点^[9]和宽带^[10]的太赫兹吸收器。其中,双频点吸收器采用介质表面矩形金属条结构,在 1.42 THz 和 2.99 THz 处的吸收率均超过了 99%;而四频点、多频点吸收器的吸收率可以达到 97% 以上。在此基础上,该团队提出了一种宽带的太赫兹吸收器。他们在介质层表面采用两个矩形金属环,两者宽度不同尺寸相近,因此可以通过多频谐振产生一个相近的频率来实现宽带吸收的效果。最终,该器件在 1.42 THz 和 1.71 THz 处的吸收率分别达到 99.2% 和 99.6%;在 1.25~1.91 THz 内实现了宽带吸收,且宽带吸收率在 80% 以上。该吸收器采用高度对称结构,所以对偏振不敏感。在 45°

入射角以内,吸收率几乎不受影响。

2017 年, Wang W 等人^[11]采用非对称“十字形”结构设计了一种超材料吸收器。该吸收器实现了在 0.45 THz 和 0.762 THz 处的双频吸收,吸收率分别达到了 93% 和 87% 左右。实验结果表明,它在不同环境下依然具有较好的吸收特性。但该吸收器采用非对称结构设计,不具有偏振无关特性。2021 年, Qiu Y Q 等人^[12]通过实验设计了一种基于“对称 L 形”金属谐振结构的太赫兹宽带吸收器。实验结果表明,在 0.491~0.73 THz 处产生两个吸收峰,吸收率分别为 98.6% 和 99.6%;在 0.457~1 THz 内实现了宽带吸收,宽带内的吸收率大于 90%。

综上所述,单频点吸收器^[7]频点单一且吸收率较低,无法满足实际应用需求。多频点吸收器^[8-9]和带宽较窄的吸收器^[10,12]应用于特定的多个频点和一个窄带范围内。当吸收频点略微发生偏移时,吸收率会急剧下降,严重影响吸收器的性能,使其不利于与其他器件集成。而非对称结构吸收器^[11]的性能会受到入射波偏振特性的影响。

本文为此提出一种具有对称结构且对偏振不敏感的太赫兹宽带吸收器。在金属层-介质层-金属层三层架构的基础上,介质层内还嵌入了两个不同尺寸的圆形金属片。采用 FEM 对该器件的圆形金属层直径 d 以及每层之间的间距 h 进行了优化。另外还分析了该吸收器截面电场、表面电流的分布以及入射角度和偏振态对吸收率的影响。仿真结果表明,这种超材料太赫兹宽带吸收器结构对偏振不敏感,在 6.02 THz、6.53 THz、6.96 THz 处的吸收率分别为 99.91%、99.46%、99.86%,实现了 5.86~7 THz 的宽带吸收。吸收带宽为 1.14

THz, 且带宽内的吸收率大于 95%。当入射波的入射角小于 30° 时, 它依然保持良好的宽带吸收特性。该宽带吸收器结构简单且性能优越, 可以广泛应用于太赫兹传感、检测、成像等技术之中。

1 结构设计和原理分析

1.1 结构设计

本文提出的超材料太赫兹宽带吸收器结构如图 1 所示。其中, 图 1(a) 是该器件的周期三维结构图, 图 1(b) 是单元三维结构图, 图 1(c) 是单元结构的侧视图。吸收器单元结构的顶层为圆形金属片, 直径为 d_1 。中间半透明结构为基于聚酰亚胺材料的介质层, 厚度为 t , 介电常数 $\epsilon = 1.8 + 0.06i$ [13]。介质层之中又嵌入两个不同尺寸的圆形金属片, 其直径分别为 d_2 和 d_3 。介质层的底部采用方形金属层作为金属接地板。图 1(c) 中, 金属层间距从上往下依次为 h_1 、 h_2 和 h_3 。该吸收器的金属层均采用有损耗的金属材料——金。其电导率 $\sigma = 4 \times 10^7$ S/m, 厚度均为 t_c , 单元结构的周期为

p 。表 1 列出了结构尺寸参数。吸收器的吸收率为 [14]

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

式中, $A(\omega)$ 、 $R(\omega)$ 和 $T(\omega)$ 分别表示吸收率、反射率和透射率。由于金属层的厚度远大于典型的趋附深度 [14], 太赫兹波无法穿透该结构, 因此式 (1) 可简化为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 \quad (2)$$

1.2 吸收原理分析

太赫兹超材料吸收器的原理可以采用干涉原理 [15] 进行解释。首先, 将超材料吸收器的表面结构简化为一层零厚度半透膜。由于本文设计的吸收器介质层中嵌入了两层金属层, 但是两层金属与介质层之间依然满足干涉原理的简化条件, 等效模型如图 2 所示。简化后的模型示意图由空气/金属层、金属/介质、介质/金属接地板三个界面组成。太赫兹波以任意角度入射到空气/金属层界面上时, 产生的反射光的反射系数为 \tilde{r}_{12} :

$$\tilde{r}_{12} = r_{12} e^{i\varphi_{12}} \quad (3)$$

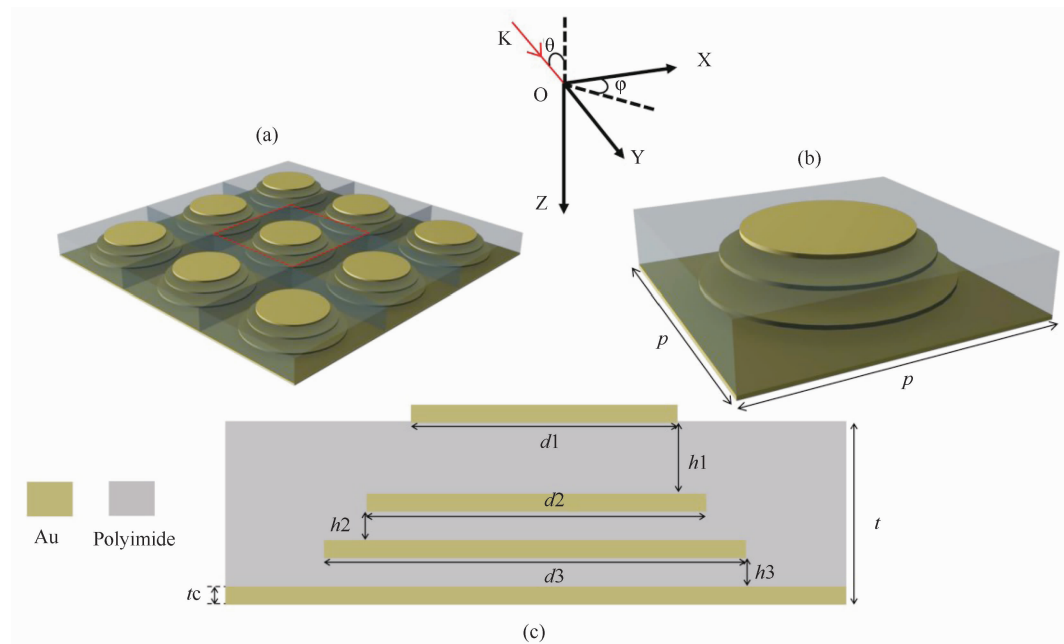


图 1 本文设计的太赫兹超材料吸收器: (a) 周期三维结构图; (b) 单元三维结构图; (c) 单元结构侧视图

表 1 结构参数

| 参数 | p | d_1 | d_2 | d_3 | h_1 | h_2 | h_3 | t_c | t |
|-------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 尺寸/ μm | 34 | 16 | 17.7 | 19.3 | 2.5 | 0.8 | 0.6 | 0.2 | 4.3 |

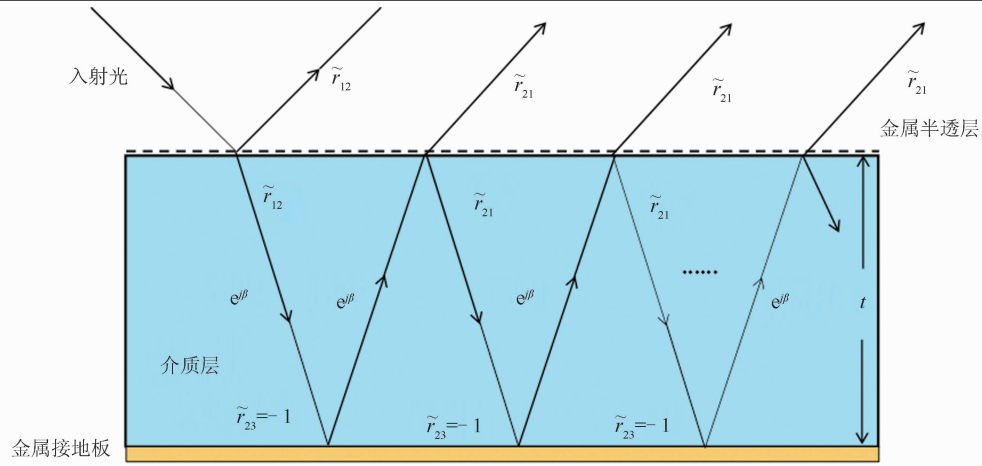


图2 吸收原理分析的干涉模型

部分光在金属/介质界面发生折射，折射光的透射系数 \tilde{t}_{12} 为

$$\tilde{t}_{12} = t_{12} e^{i\theta_{12}} \quad (4)$$

透射光继续在介质层中传播。当它传播到介质/金属接地板界面时，由于底部的金属接地板相当于一个完美的反射镜，反射系数 $\tilde{r}_{23} = -1$ 。此后该电磁波在经过金属/介质界面时，其中的一部分电磁波会在该界面发生透射，透射光的透射系数为

$$\tilde{t}_{21} = t_{21} e^{i\theta_{21}} \quad (5)$$

另一部分被该界面反射后继续在介质层中传播，此时反射光的反射系数为

$$\tilde{r}_{21} = r_{21} e^{i\theta_{21}} \quad (6)$$

在介质层中传播的透射光具有复杂的传播相位^[15]：

$$\beta = \beta_r + \beta_i = \sqrt{\epsilon_D} k_0 t \quad (7)$$

式中， ϵ_D 是介质层的介电常数， k_0 是自由空间波数， t 是介质层的厚度。由图2可以看出，电磁波在介质层内发生多次折射和反射。超材料太赫兹吸收器的全反射系数 R 是每次反射系数的叠加^[15]：

$$R = \tilde{r}_{12} + \tilde{r}_m = \tilde{r}_{12} + \tilde{t}_{12} e^{i\beta} \tilde{r}_{23} e^{i\beta} \tilde{t}_{12} + \tilde{t}_{12} e^{i\beta} \tilde{r}_{23} e^{i\beta} \tilde{r}_{21} e^{i\beta} \tilde{r}_{23} e^{i\beta} \tilde{t}_{12} \quad (8)$$

式中， \tilde{r}_{12} 是入射波第一次在空气/金属层界面反射时的反射系数， \tilde{r}_m 是在金属/介质界面和介质/金属接地板界面发生多重反射的叠加项。由于底层金属完全反射了电磁波，反射系数

$\tilde{r}_{23} = -1$ ，因此全反射系数可以简化为

$$R = \tilde{r}_{12} + \tilde{r}_m = \tilde{r}_{12} - \frac{\tilde{t}_{12} \tilde{t}_{21} e^{j2\beta}}{1 + \tilde{r}_{21} e^{j2\beta}} \quad (9)$$

由于底部为金属层，透射率 T 近似为 0，因此该器件的吸收率为

$$A(\omega) = 1 - |R|^2 = 1 - |S_{11}|^2 \quad (10)$$

2 性能分析和结构优化分析

为了便于分析，在图1(b)中建立了 $oxyz$ 坐标系。其中， \mathbf{k} 是入射波的传播方向，即入射波波矢。 \mathbf{k} 与 z 轴的夹角是 θ ，电场强度 E 与 x 轴的夹角 φ 为偏振角。仿真时，该吸收器单元结构的 x 和 y 的边界条件均设置成 unit cell， z 方向设置为 open，端口采用 Floquet 作为边界条件。当入射波的偏振角 $\varphi = 0^\circ$ 时，入射的波为横电波 (TE)， $\varphi = 90^\circ$ 时为横磁波 (TM)。下面利用 CST2020 仿真软件对该吸收器进行建模和仿真分析。

2.1 吸收性能分析

当入射角 $\theta = 0^\circ$ 时，太赫兹波垂直于吸收器 xoy 平面入射。此时吸收器的吸收率如图3所示。其中，图3(a)是入射波为 TE 偏振态时的吸收谱，由 6.04 THz、6.53 THz 和 6.96 THz 处的三个吸收峰形成。每个吸收峰值的频点所对应的吸收率分别为 99.91%、99.46% 和 99.89%。虚线与吸收曲线相交的频点为 5.86 THz 和 7 THz，吸收率在 95% 以上的带宽达到了 1.14 THz。图3(b)是入射波为 TM 偏振

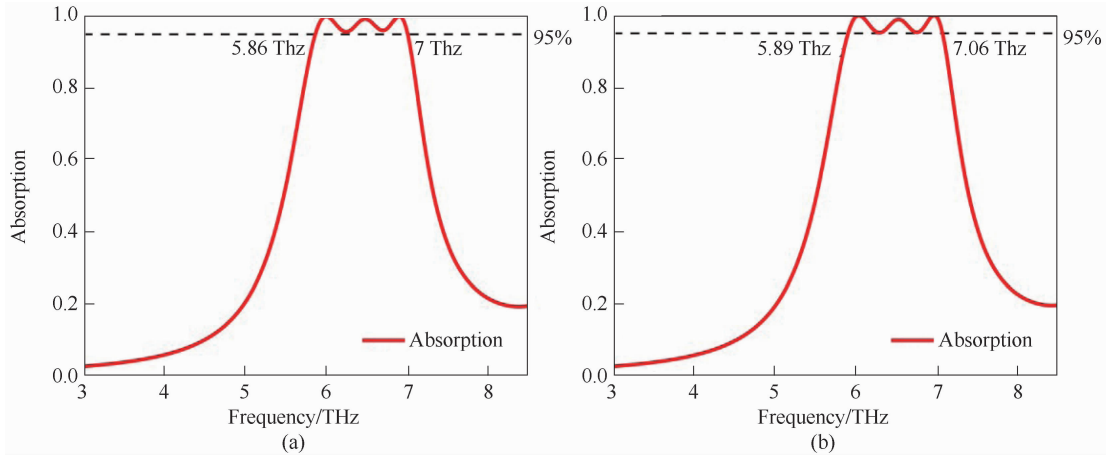


图 3 $\theta=0^\circ$ 时的吸收率: (a) TE 偏振态; (b) TM 偏振态

态时的吸收谱。吸收率的三个峰值所对应的频点分别为 6.02 THz、6.51 THz、6.95 THz，相应的吸收率分别为 99.2%、98.86%、99.99%。黑色虚线和吸收曲线相交的频点为 5.89 THz 和 7.06 THz，带宽为 1.17 THz，带宽内的吸收率达到了 95% 以上。图 3 中的吸收特性是因为该吸收器采用了三层不同尺寸的圆形金属层。每一个金属层产生的谐振频率可以定性地表示为^[16]

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \propto \frac{1}{d} \quad (11)$$

式(11)表明，吸收率与金属层的尺寸成反比。当三个吸收峰值相邻且叠加时，得到了图 3 的吸收特性曲线。通过对比图 3(a)和图 3(b)的吸收曲线可以发现，二者的吸收曲线近似重合，吸收带宽和吸收峰值的频点只有微小的偏移，整体的吸收性能并未产生较大影响。由于该吸收器的每层结构均采用高度对称的圆片结构，对偏振角度 φ 不敏感，因此该器件具有偏振无关特性。

2.2 结构参数优化分析

为了更好地解释图 3 的吸收曲线特性，在入射波为 TE 偏振态时，分析了该吸收器的每层圆形金属层直径 d 和金属层间距 h 对吸收率的影响。图 4(a)、图 4(b)和图 4(c)分别体现了每层圆形金属层直径 d 对吸收率的影响。图 4(a)中， d_1 的变化范围为 15.6~16.4 μm 。以 0.2 μm 间隔进行优化， d_1 尺寸产生的谐振频

率为最右侧的高频吸收峰值。随着尺寸的增大，吸收峰值会向左偏移，且吸收率也会略微降低。从图 4(a)中可以发现， d_1 为 15.6 μm 和 15.8 μm 时所对应的谐振频点分别为 7.13 THz 和 7.06 THz，吸收率分别为 99.24% 和 99.75%。整体带宽的吸收率分别为 88% 和 92%，吸收带宽分别为 1.43 THz 和 1.31 THz，但 d_1 尺寸较小会使中频吸收峰值降低。当 $d_1=16 \mu\text{m}$ 时，三个吸收峰值均接近完美吸收，且整体吸收率大于 95%，吸收带宽为 1.22 THz。在综合考虑吸收率和吸收带宽后，最终选取 $d_1=16 \mu\text{m}$ 。

图 4(b)中 d_2 的变化范围是 17.3~18.1 μm ，优化间隔为 0.2 μm 。从图中可以发现， d_2 所影响的谐振频率是中频谐振点。随着 d_2 尺寸的增大，中频吸收频点逐渐降低。在综合考虑吸收率和吸收带宽的条件下，选取 $d_2=17.7 \mu\text{m}$ 。此时中频吸收峰的吸收频点为 6.71 THz，吸收率为 99.6%。从图 4(c)中可以看出， d_3 的尺寸影响着左侧低频的吸收率。随着 d_3 尺寸的增大，低频吸收峰向左侧偏移，吸收带宽增大。但由于低频向左偏移，低频和中频的隔离度增加，二者之间的波谷吸收率会降低，进而影响整体吸收带宽的吸收率。因此 d_3 取 19.3 μm ，此时低频吸收频点为 6.03 THz，吸收率为 99.7%。

由图 4(d)和图 4(e)可以发现， h_{21} 和 h_{32} 主要影响每个吸收峰之间波谷的吸收率。随着

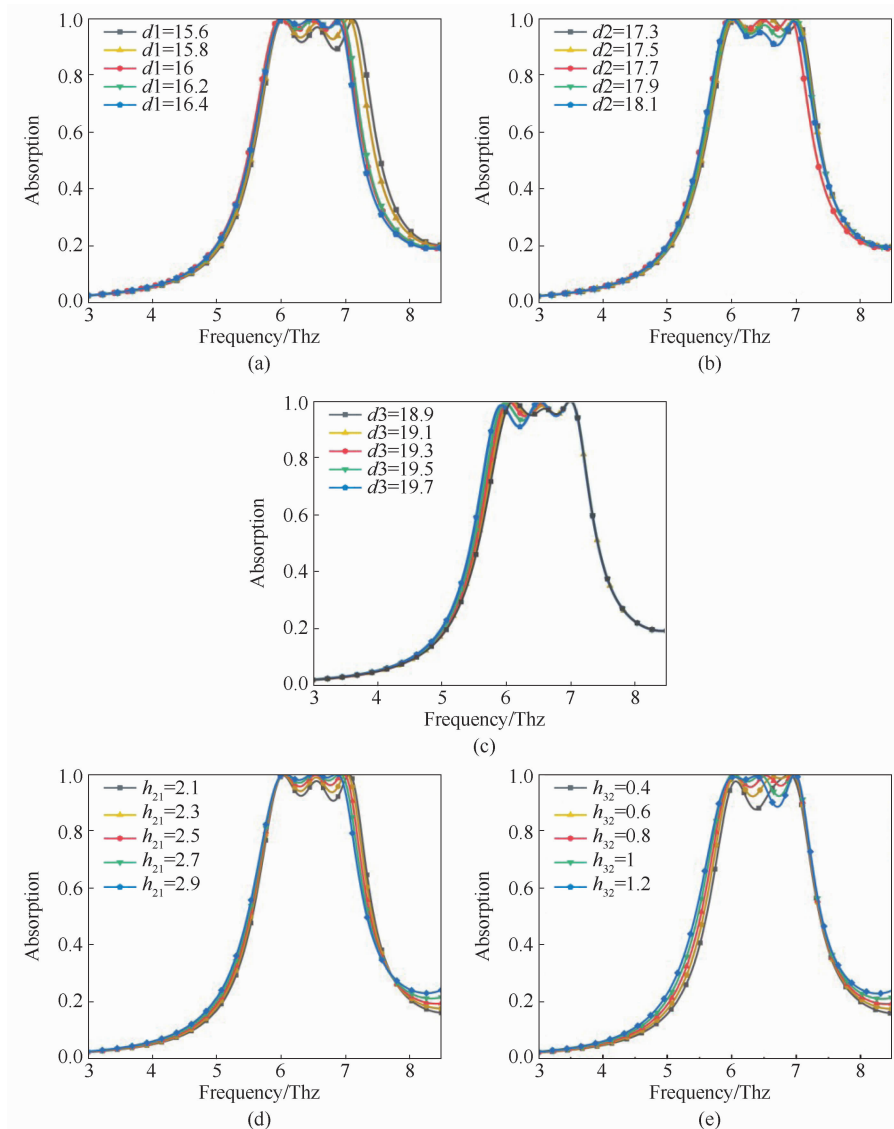


图4 每层金属层 d 和每层间距 h 对吸收率的影响: (a) $d_1=15.6\sim 16.4\ \mu\text{m}$; (b) $d_2=17.3\sim 18.1\ \mu\text{m}$; (c) $d_3=18.9\sim 19.7\ \mu\text{m}$; (d) $h_{21}=2.1\sim 2.9\ \mu\text{m}$ (h_{21} 为第一层金属层底部和第二层金属层顶部的间距); (e) $h_{32}=0.4\sim 1.2\ \mu\text{m}$ (h_{32} 为第二层金属层底部和第三层金属层顶部的间距)

h_{21} 的增大,波谷的吸收率逐渐提升,但是吸收带宽会降低;而 h_{32} 的增大首先会提高低频和中频吸收峰之间的波谷吸收率,其次会降低中频和高频之间的波谷吸收率。综合考虑吸收带宽和吸收率的影响, h_{21} 取 $2.5\ \mu\text{m}$, h_{32} 取 $0.8\ \mu\text{m}$ 。

2.3 吸收器的物理机理

为了更好地解释该吸收器吸收率的物理特性,图5给出了入射波为TE偏振态时各吸收峰值所对应的截面电场强度 E 和表面电流分布 J 。其中,图5(a)、图5(b)和图5(c)均为 $y=0$ 时的侧视图;图5(d)、图5(e)和图5(f)均为 z

$=0$ 时的俯视图。从图5(a)中可以看出, $f=6.04\ \text{THz}$ 处的电场强度主要集中在第三层金属层中,介质层中只有很少的电场强度分布。这就表明 $f=6.04\ \text{THz}$ 谐振频点吸收峰是由这层结构产生的。由此可知,不同谐振频点的吸收峰值对应不同的金属层子单元结构。这样就可以通过优化金属层子单元的结构尺寸来实现不同尺寸产生的吸收峰重叠交错,从而实现宽带吸收和接近完美的吸收峰值。同理,计算了 $f=6.53\ \text{THz}$ 和 $f=6.96\ \text{THz}$ 时的电场分布,分别如图5(b)和图5(c)所示。这是由于谐振

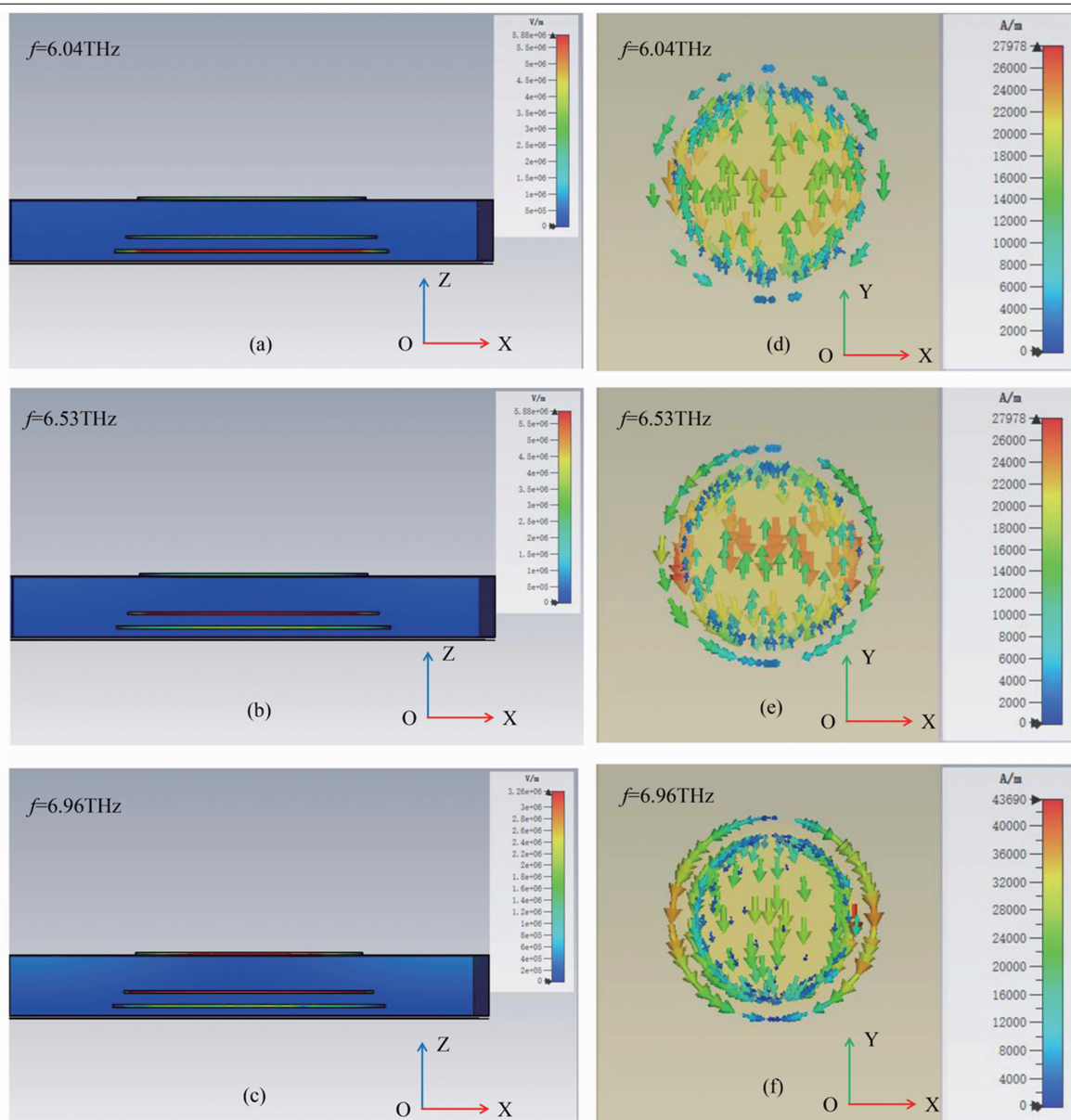


图 5 TE 偏振态下入射波垂直入射吸收器表面时的截面电场和表面电流分布

点处和非谐振点处的电荷电极特性相反, 会激发产生电偶极子谐振, 吸收器就会减弱入射波的电场能力^[17]。从图 5(d)可以看出, 电流沿超材料金属层表面从下到上流动, 而金属层周围的电流却从上到下流动, 这样会产生反向平行电流。两个电流会产生强烈的磁共振, 可以等效为一个环路电流, 导致入射的磁场转换为焦耳热量散失, 从而实现接近 100% 的完美吸收^[18]。

2.4 偏振态和入射角对吸收率的影响

在实际应用中, 太赫兹波的偏振态与入射

角度对吸收器性能也有很重要的影响。图 6 所示为入射角度 $\theta=0^\circ$ 时入射波的不同偏振态对该器件吸收率的影响。当偏振角度 $\varphi=0^\circ$ 时, 入射波为 TE 偏振态; 当 φ 变化到 90° 时, 入射波为 TM 偏振态。从图 6 中可以看出, 在 TE 和 TM 偏振态下该吸收器的吸收率几乎不变。这是因为偏振不敏感特性与吸收器单元的对称性相关。图 7(a)和图 7(b)分别展示了 TE 和 TM 偏振态下不同入射角所对应的吸收光谱。从图 7(a)可以看出, TE 偏振态下吸收光谱随着 θ 的增加出现了较大的波纹抖动, 吸收

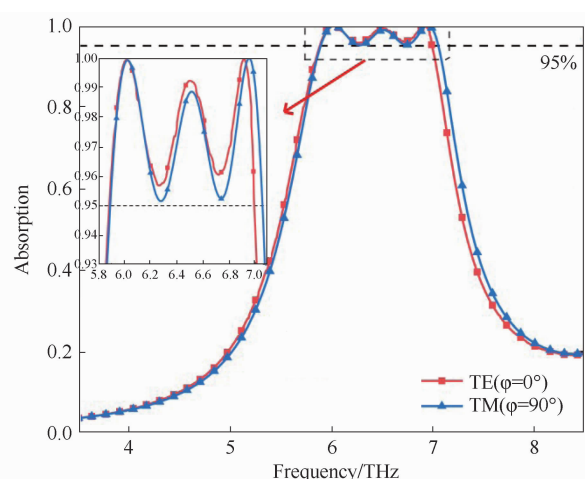


图 6 不同偏振态下的吸收率

率迅速衰减。这是因为 θ 的增大会导致该器件内入射波磁场 x 分量减小, 有效的磁极化分量和吸收的磁能也会相应减少, 导致吸收能力减弱^[19]。当入射波为 TM 偏振态且入射角度 θ 从 0° 变化到 30° 时, 吸收光谱图相较于 TE 偏振态下没有产生巨大的抖动, 吸收带宽随着入射角度 θ 的增大而减小。

3 结论

本文采用多层结构设计了一款超材料太赫兹宽带吸收器。该吸收器在各个吸收峰处接近完美吸收, 并且实现了 $5.86 \sim 7$ THz 的宽带吸收, 吸收带宽为 1.14 THz, 带宽内的吸收率在 95% 以上。通过仿真分析了该吸收器的尺寸优化过程、吸收物理机制以及偏振态和入射角度对吸收率的影响。结果表明, 与传统的多频点吸收器相比, 该吸收器具有优良的宽带吸

收和偏振不敏感特性, 在大角度入射下依然具有良好的宽带吸收率。该吸收器结构简单、尺寸紧凑小巧且易于集成, 可以利用现有的光刻、镀膜、刻蚀等微纳米加工技术进行制备。后续也可以采用石墨烯、二氧化钒等可调材料进行研究, 通过外加电压等手段来改变超材料表面电导率, 从而实现可调宽带吸收器。这些吸收器有望在太赫兹成像、生物检测等领域具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Padilla W J, Basov D N, Smith D R. Negative refractive index metamaterials [J]. *Materials Today*, 2006, **9**(7-8): 28-35.
- [2] Rosenblatt G, Orenstein M. Perfect lensing by a single interface: defying loss and bandwidth limitations of metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2015, **115**(19): 195504.
- [3] Alitalo P, Tretyakov S. Electromagnetic cloaking with metamaterials [J]. *Materials Today*, 2009, **12**(3): 22-29.
- [4] Zhou X, Yin X, Zhang T, et al. Ultrabroad terahertz bandpass filter by hyperbolic metamaterial waveguide [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(9): 11657-11664.
- [5] Shi S F, Zeng B, Han H L, et al. Optimizing broadband terahertz modulation with hybrid graphene/metamaterial structures [J]. *Nano Letters*, 2015, **15**(1): 372-377.
- [6] Hu T, Bingham C M, Strikwerda A C, et al.

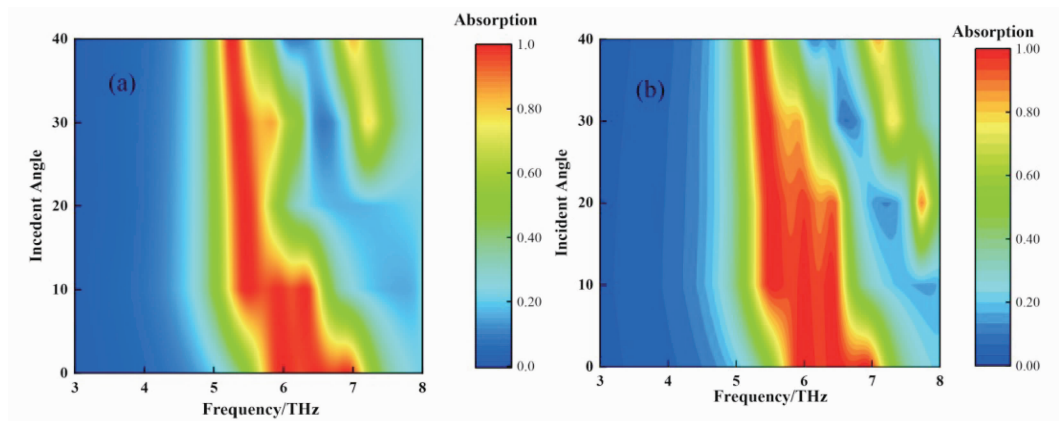


图 7 入射角度对吸收率影响的光谱图: (a)入射波为 TE 偏振态; (b)入射波为 TM 偏振态

- Highly-flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber [J]. *Physics*, 2008, **78** (24): 1879–1882.
- [7] 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.
- [8] Wang B X, Zhai X, Wang G Z, et al. A novel dual-band terahertz metamaterial absorber for a sensor application [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, **117**(1): 2075.
- [9] 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.
- [10] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, et al. A broadband, polarization-insensitive and wide-angle coplanar terahertz metamaterial absorber [J]. *The European Physical Journal B*, 2014, **87**(4): 98.
- [11] Wang W, Wang K J, Yang Z G, et al. Experimental demonstration of an ultra-flexible metamaterial absorber and its application in sensing [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2017, **50** (13): 135108.
- [12] Qiu Y Q, Wang J F, Xiao M Y, et al. Broadband terahertz metamaterial absorber: design and fabrication [J]. *Applied optics*, 2021, **60** (32): 10055–10061.
- [13] Grant J, Ma Y, Saha S, et al. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber [J]. *Optics Letters*, 2011, **36** (17): 3476–3478.
- [14] Bingham T, Strikwerda C M, Pilon A C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization [J]. *Physical review. B, Condensed Matter And Materials Physics*, 2008, **46**(2): 503–514.
- [15] Chen H T. Interference theory of metamaterial perfect absorbers [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(7): 7165–7172.
- [16] Zhou J, Economon E N, Koschny T, et al. A unifying approach to left handed material design [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(24): 3620.
- [17] Shen X, Yang Y, Zang Y, et al. Triple-band terahertz metamaterial absorber: design, experiment, and physical interpretation [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101** (15): 402–445.
- [18] Zhu J, Ma Z, Sun W, et al. Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(2): 4773–4779.
- [19] Yu Q Y, Yi J, Sailing H. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime [J]. *Josa B*, 2010, **27**(3): 498–504.