

## 激光与光电子学进展

## 一种基于方形对称型的超材料太赫兹多频吸波器

户瑞珍<sup>1</sup>, 王建扬<sup>1</sup>, 吴倩楠<sup>1,2,3,4\*</sup><sup>1</sup>中北大学理学院物理系, 山西 太原 030051;<sup>2</sup>中北大学南通智能光机电研究院, 江苏 南通 226000;<sup>3</sup>中北大学微系统集成研究中心, 山西 太原 030051;<sup>4</sup>中北大学前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051

**摘要** 设计了一种方形对称型的超材料太赫兹多频吸波器,可解决吸波器高频、多频、高吸收率的问题。这种太赫兹吸波器由金属-介质-金属结构组成,底层为金属薄膜,中间层为聚碳酸酯介质基板,顶层为方形对称的金属谐振结构。采用时域有限差分法对吸波器的透射性能进行模拟仿真,通过计算得到该吸波器在3~10 THz频率范围内有5个较为明显的谐振吸收峰,吸收峰所在频率分别为4.8 THz、6.55 THz、6.85 THz、7.65 THz及7.88 THz,这些吸收峰的吸收率分别可以达到98.56%、99%、99.64%、99%及90.39%,实现了多频高吸收率的特性,并且该吸波器对入射角不敏感,在大角度入射下依然可以保持优异的吸收特性。该款吸收器的单元尺寸为50 μm×50 μm×9.6 μm,可用于多功能、多通道、多频通信及隐身领域,起到防治电磁污染、消除电磁干扰、提高武器战斗能力的作用。

**关键词** 材料; 超材料; 吸波器; 多频; 太赫兹

中图分类号 O43

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0516001

## A Metamaterial Terahertz Multi-Frequency Absorber Based on Square Symmetry

Hu Ruizhen<sup>1</sup>, Wang Jianyang<sup>1</sup>, Wu Qiannan<sup>1,2,3,4\*</sup><sup>1</sup>Department of Physics, College of Science, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;<sup>2</sup>Nantong Institute of Intelligent Opto-Mechatronics of North University of China, Nantong, Jiangsu 226000, China;<sup>3</sup>Center for Microsystem Integration, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;<sup>4</sup>Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** In this paper, a square symmetrical metamaterial terahertz multi-frequency absorber is designed, which can solve the problem of high frequency, multi-frequency, and high absorption rate of the absorber. The terahertz absorber is composed of a metal-dielectric-metal structure, the bottom layer is a metal film, the middle layer is a polycarbonate dielectric substrate, and the top layer is a square symmetrical metal resonance structure. The finite difference time domain method is used to simulate the transmission and reflection performance of the absorber. The finite-difference time-domain method is used to simulate the transmission and reflection performance of the absorber. Through calculation, five obvious resonant absorption peaks are obtained in the frequency range of 3–10 THz. The frequencies of the absorption peaks are 4.8 THz, 6.55 THz, 6.85 THz, 7.65 THz, and 7.88 THz, respectively.

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-05-31; 录用日期: 2021-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(61705200)、中北大学青年学术带头人项目(QX201905)、山西省研究生教育创新项目(2020SY385)

通信作者: \*qiannanwoo@nuc.edu.cn

The absorption rates of these absorption peaks can reach 98.56%, 99%, 99.64%, 99%, and 90.39%, respectively. The characteristics of multi-frequency and high absorption rate are realized, and the absorber is insensitive to the incident angle. It can still maintain excellent absorption characteristics at large incident angles. The unit size of the absorber is  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m} \times 9.6\ \mu\text{m}$ , which can be used in the fields of multi-function, multi-channel, multi-frequency communication, and plays a role in preventing electromagnetic pollution, eliminating electromagnetic interference, and improving weapon combat capability.

**Key words** materials; metamaterial; absorber; multi-frequency; terahertz

## 1 引言

随着现代化、信息化、电子化技术的发展,人们所处的环境中处处充斥着电磁干扰,这对人们的身体健康<sup>[1-3]</sup>造成威胁,对很多精度要求较高的科学实验<sup>[4-5]</sup>、军事领域产生不可忽视的影响。为了防治电磁污染、为科学实验构建纯净的实验环境以及实现武器隐身<sup>[6-7]</sup>,科研人员对吸波器展开了一系列的研究。吸波器<sup>[8-9]</sup>对入射的电磁波有较小的反射和透射率,能快速有效地吸收入射的电磁波,然后通过各种的物理或化学机理将其转化成热能或其他各种形式的能量,并将其释放出来<sup>[10]</sup>。吸波器通常是由人工复合结构组成,在治理电磁污染、消除实验室的电磁干扰,以及各种武器装备的隐身等方面有着重要的应用价值。

2008年,Landy等<sup>[11]</sup>第一次提出了“完美吸波器”的概念,他们在超材料<sup>[12]</sup>的基础上,通过设计其形状与尺寸以改变其物理性能,得到对特定频点的电磁波具有吸收率为100%的结构,这是基于入射电磁波与设计结构发生耦合现象<sup>[13]</sup>实现的。“完美吸波器”概念的提出在学术界具有里程碑式的意义,近年来,对吸波器的研究,主要从四个方向入手,即可吸收的频率从窄带到宽带<sup>[14]</sup>、从单频到多频<sup>[15-16]</sup>、从低频到高频、从极化敏感到极化不敏感<sup>[16]</sup>,并在各个方向均取得了不错的成就。同样,各类太赫兹功能器件<sup>[17-18]</sup>进入人们的视野,太赫兹吸波器也已经可以吸收太赫兹及以上频带的电磁波<sup>[19]</sup>,多频点、不敏感的太赫兹吸波器也迅速地被用于各个领域。2013年,Hu等<sup>[20]</sup>设计了一种可以工作于0~5 THz之间的太赫兹吸波器,在工作频段内有四个吸收峰,各峰的吸收率均大于97%,该吸波器具有高吸收性能及良好的不敏感性,但其结构由金属-介质层-金属-介质层-金属5层组成,所以加工制作比较困难。2017年,张勇<sup>[21]</sup>设计的毫米波多频吸波器,在0~0.3 THz频段内有四个吸收峰,吸收率均大于93%,该吸波器由金属-介质层-金属3层

结构组成,制作方法简单,并且具有良好的吸收性能,但其工作频段较低,还有向高频段发展的空间。2018年,时家阔等<sup>[19]</sup>设计出的吸波器在0~10 THz之间有四个具有良好性能的吸收峰,吸收峰的频率分别为1.504 THz、4.38 THz、6.41 THz及8.2 THz,该吸波器具有良好的吸收性能,制作工艺也比较简单,并且具有较大的适用范围,对后面的研究具有指导意义。2019年,He等<sup>[16]</sup>设计出了具有五个吸收峰的吸波器,最高吸收率可达99.87%,具有良好的吸收性能,该吸波器结构简单,制作成本比较低廉,具有很好的适用性,但工作频率较低(0.1~1 THz),在高频段的研究方面还有很大的提升空间。

综上所述,太赫兹吸波器的研究已经取得很大的成就,现如今,已经设计出很多在某些特定的频段或频点吸波性能良好的吸波器,但在高频、多频以及结构简单制作成本低廉等方面的研究较少,因此,本文设计了一种方形对称型的太赫兹多频吸波器,可在3~10 THz内实现5个频点的吸收,为吸波器高频、多频和高吸收率提供设计方案。

## 2 太赫兹吸波器的设计与仿真

本文设计了方形对称型的太赫兹吸波器,它是由三层结构构成的,如图1(a)所示,底层是金的正方形金属薄膜,其长和宽与吸波器周期长宽相同,为 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ ,厚度为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。金属薄膜可以有效阻止入射的电磁波能量透过吸波器,所以透射率为0,吸收率为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ <sup>[22]</sup>,其中 $\omega$ 为频率; $A(\omega)$ 为吸收率, $R(\omega)$ 是反射率, $T(\omega)$ 是透射率。中间介质基板的材料是聚碳酸酯(电力有损耗),聚碳酸酯的介电常数 $\epsilon$ 和磁导率 $\mu$ 分别为2.9和1,基板厚度设为 $t$ 。顶层结构是以金为材料的方形对称结构。该吸波器的单元结构及尺寸如图1所示( $b$ 是谐振结构边角横向内部长度, $e$ 是谐振结构边角竖向外部长度, $f$ 是谐振结构边角竖向内部长度)。

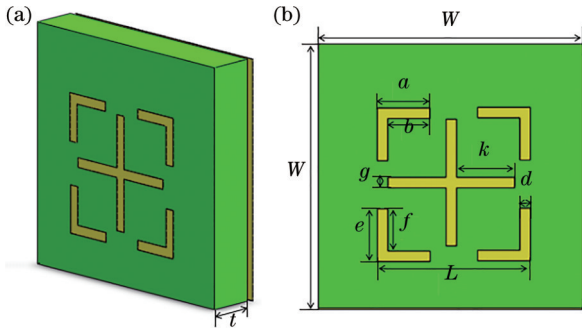


图 1 方形对称结构的超材料太赫兹多频吸波器。(a) 三维结构图; (b) 正视图及结构尺寸

Fig. 1 Metamaterial terahertz multi-frequency absorber with square symmetric structure. (a) Three-dimensional structure diagram; (b) front view and structural dimensions

方形对称结构的超材料太赫兹吸波器的结构参数如表 1 所示,采用时域有限差分法对太赫兹多频吸波器的吸波性能进行模拟仿真。波源为平面波,垂直正面入射,得到吸波器的吸收率随频率变化图如图 2 所示。在图中,当电磁波入射时,吸波器在 3~10 THz 频率内有 7 个吸收峰,其中吸波效果比较好的吸收峰有 5 个,这 5 个吸收峰的频率分别为 4.8 THz、6.55 THz、6.85 THz、7.65 THz 和 7.88 THz,这些吸收峰的吸收率分别为 98.56%、

表 1 方形对称结构的超材料吸波器的结构参数

Table 1 Structural parameters of square symmetric metamaterial absorber

| Parameter             | $a$ | $b$ | $d$ | $e$ | $f$ | $g$ | $k$ | $W$ | $L$ | $t$ |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Value / $\mu\text{m}$ | 10  | 8   | 2   | 8   | 6   | 2   | 11  | 50  | 28  | 9.3 |

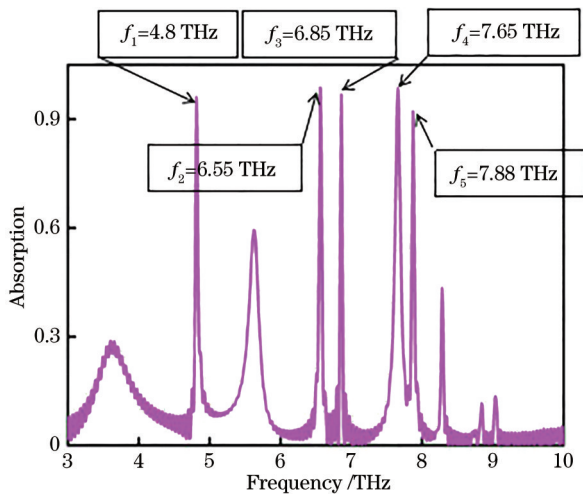


图 2 方形对称结构的超材料吸波器的仿真结果  
Fig. 2 Simulation results of a square symmetric metamaterial absorber

99%、99.64%、99% 和 90.39%。

为了更好地分析该超材料吸波器具有多频点、高吸收率的良好吸波性能的原因,本文采用时域有限差分法获得该吸波器的表面电流分布情况,如图 3 所示。电磁波垂直入射吸波器上表面,与上表面谐振结构发生耦合,形成回路电流,由右手定则可知,回路电流可以产生磁矩,从而产生磁谐振;吸波器下表面的电流方向相同,强弱不一,这些表面电流产生不同的电谐振。当电磁波入射该吸波器时,表面产生的电磁谐振相互叠加,从而产生多频吸波特性的。

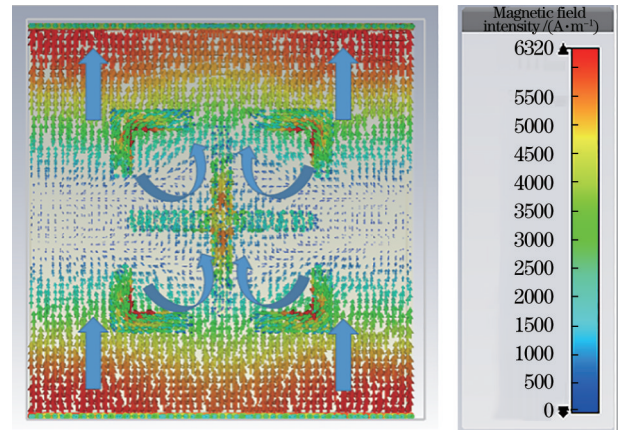


图 3 横磁波偏振态下太赫兹吸波器表面的电流分布图

Fig. 3 Current distribution diagram on terahertz absorber surface in transverse magnetic polarization state

### 3 吸波器的参数分析与讨论

该吸波器展现了多频吸波性能,为了能够进一步地提升该吸收器的吸波性能,下面通过控制变量法,对吸波器各参数进行优化仿真,以获得更加优异的吸波特性,并能得到更多频点的吸收情况,从而让这种吸波器用于更广阔的领域。在下面的讨论中,为了能更加详细具体地分析各参数对吸波器性能的影响,文中将工作频率 3~10 THz 分为 3 个频段,分别为低频段(3~5 THz)、中频段(5~7.5 THz)和高频段(7.5~10 THz)。

#### 3.1 中央十字键的宽度 $g$ 对吸波器性能的影响

通过研究发现,中央十字键的厚度对太赫兹吸波器的吸波性能影响不明显,下面分析中央十字键的宽度  $g$  对吸波器的吸波性能的影响。对  $g$  分别取值为  $2\ \mu\text{m}$ 、 $3\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ ,然后进行对比分析,通过时域有限差分法对吸波器的吸波性能进行仿真分析,得到结果如图 4 所示。图 4 表明,不同中央十字键



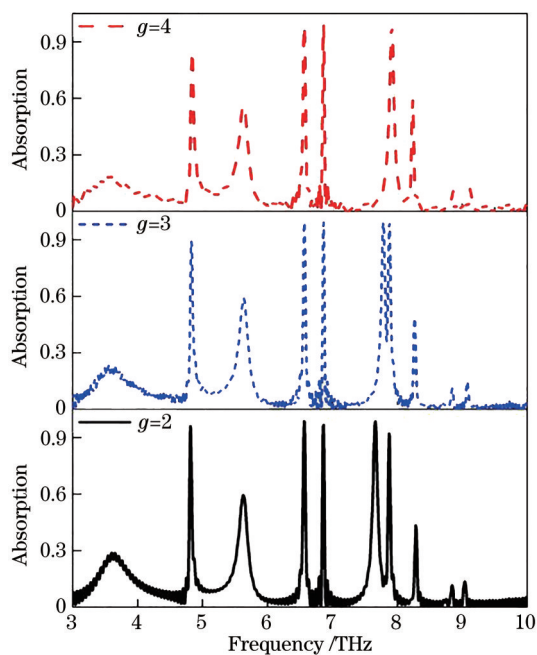


图 4 不同十字键宽度  $g$  吸收曲线对比  
Fig. 4 Comparison of absorption curves of different cross bond widths  $g$

宽度  $g$  对太赫兹吸波器吸收电磁波的影响在整个工作频段都有体现,随着中央十字键宽度的逐渐增加,在低频段,吸波器吸收电磁波的性能明显下降;中频段内,吸波器的吸收峰向低频方向略微移动,吸收性能有所提升;高频段内,吸波器的吸收峰向高频方向移动,并且当  $g=3 \mu\text{m}$  时,原有的两个吸收峰明显有合二为一的趋势,当  $g=4 \mu\text{m}$  时,原来的两个吸收峰合并为一个吸收峰。当  $g=3 \mu\text{m}$  时,吸收率大于 90% 的吸收峰由原来的 5 个减少到 4 个,当  $g=4 \mu\text{m}$  时,吸收率大于 90% 的吸收峰只有 3 个。综合考虑,本文决定令中央十字键宽度为  $g=2 \mu\text{m}$ ,此时吸波器可以实现良好的吸波性能。

### 3.2 中央十字键的长度 $k$ 对吸波器性能的影响

紧接着研究中央十字键的伸展长度  $k$  对该吸波器的吸波性能的影响,设置  $k$  为  $9 \mu\text{m}$ 、 $11 \mu\text{m}$ 、 $13 \mu\text{m}$ ,通过时域有限差分法仿真分析,得到吸收率随着频率变化的结果图,如图 5 所示。图中,当  $k=9 \mu\text{m}$  时,低频位置吸收峰的吸收率较  $k=11 \mu\text{m}$  时降低;当  $k=13 \mu\text{m}$  时,低、中频段的吸收情况基本稳定,但高频段吸收峰的吸收率较  $k=11 \mu\text{m}$  时降低。考虑吸波器在整个工作频段的吸收性能,本文确定  $k$  取值为  $11 \mu\text{m}$  时,吸波器拥有最佳的吸波性能。

### 3.3 谐振结构边角长度 $a$ 对吸波器性能的影响

本节研究了吸波器顶层谐振结构边角部分长

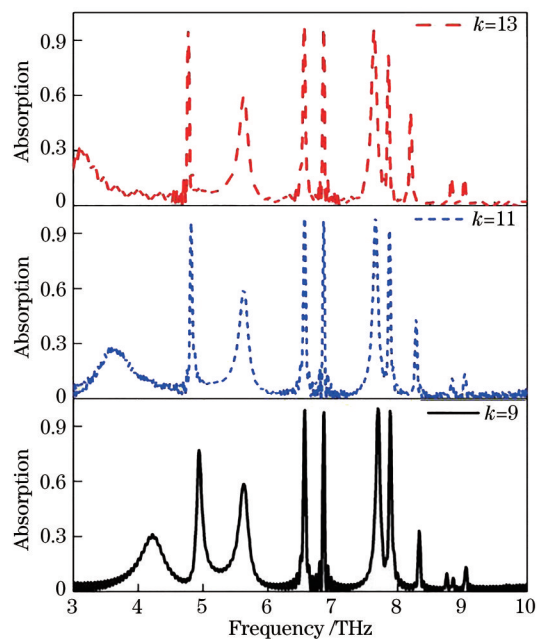


图 5 不同十字键长度  $k$  吸收曲线对比  
Fig. 5 Comparison of absorption curves of different cross bond lengths  $k$

度  $a$  对吸波性能的影响,对谐振结构边角长度  $a$  为  $9 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 、 $11 \mu\text{m}$  时,得到的不同  $a$  值下吸收率随着频率变化的结果进行对比分析,如图 6 所示。图 6 中,较  $a=10 \mu\text{m}$  而言, $a=9 \mu\text{m}$  时,中频段吸收峰的吸收性能明显减弱,高频位置的两个吸收峰有合并的迹象,所以有效吸收峰个数明显减少;当  $a=$

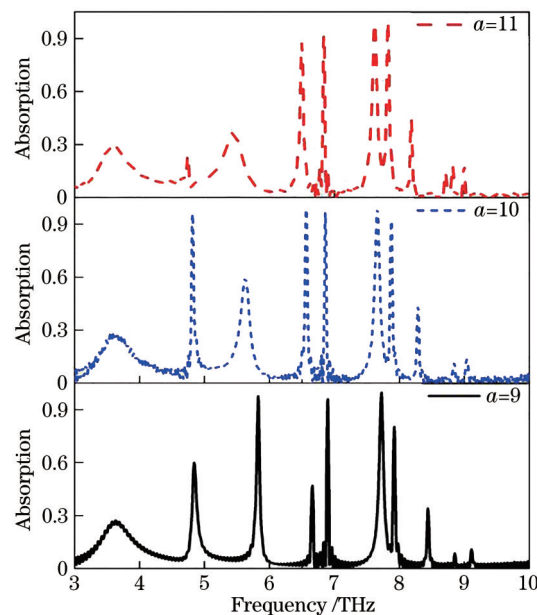


图 6 不同边角长度  $a$  吸收曲线对比  
Fig. 6 Comparison of absorption curves of different corner lengths  $a$

11  $\mu\text{m}$  时,良好的吸收峰只有高频位置的两个。所以,谐振结构边角部分长度  $a$  被定为 10  $\mu\text{m}$  时,该吸波器才能表现出最优良的吸波性能。

### 3.4 谐振结构边角部分宽度 $d$ 对吸波器性能的影响

吸波器顶层谐振结构的边角部分长度对吸波性能的影响比较显著,其宽度  $d$  对该吸波器的吸波性能的影响同样比较明显。下面通过时域有限差分法,对  $d$  分别为 1  $\mu\text{m}$ 、2  $\mu\text{m}$ 、3  $\mu\text{m}$  时的吸波性能进行仿真,得到吸波器的吸收率随频率变化的结果图,如图 7 所示。图中可以看出,当  $d$  为 1  $\mu\text{m}$ 、3  $\mu\text{m}$  时,吸收率大于 90% 的吸收峰有四个,低频处虽然还有吸收峰,但其吸波性能比较差。当  $d=2 \mu\text{m}$  时,吸波性能良好的吸收峰有五个,所以该吸波器的顶层谐振结构边角部分宽度  $d$  取值为 2  $\mu\text{m}$ ,此时该吸波器能在工作频段内具有良好的吸波性能。

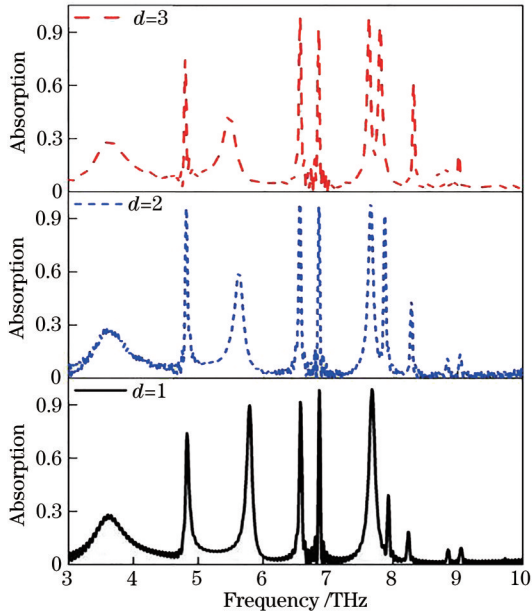


图 7 不同边角宽度  $d$  吸收曲线对比

Fig. 7 Comparison of absorption curves of different edge angle widths  $d$

### 3.5 谐振结构边缘距离 $L$ 对吸波器性能的影响

本节讨论的是方形对称结构的边缘距离对该超材料吸波器吸波性能的影响,本文选取  $L$  为 24  $\mu\text{m}$ 、28  $\mu\text{m}$ 、32  $\mu\text{m}$  作为研究对象,通过时域有限差分法对其进行模拟仿真,得到的吸收率随频率变化曲线图,如图 8 所示。图中, $L$  为 24  $\mu\text{m}$ 、32  $\mu\text{m}$  时,在整个工作范围内没有一个吸收率较高的吸收峰,所以当  $L$  继续增大或减小时,该吸波器将不能表现出好的吸波性能;当  $L=28 \mu\text{m}$  时,该吸波器都具有五个较好的吸收峰。因此谐振结构边距  $L$  取值为

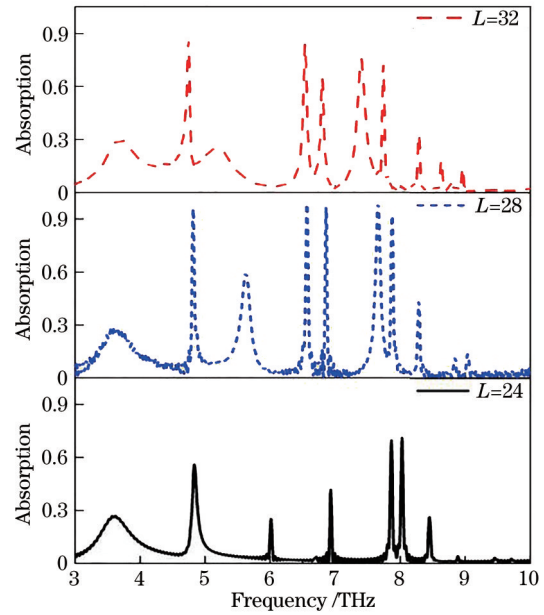


图 8 不同边距  $L$  吸收曲线对比

Fig. 8 Comparison of absorption curves of different margins  $L$

28  $\mu\text{m}$ ,这时该吸波器具有最佳的吸波性能。

### 3.6 介质基板的厚度 $t$ 对吸波器性能的影响

经过上面改变吸波器顶层金属结构几何参数的分析发现,单一地改变某个参数能明显对吸波性能造成影响,同时还需分析不同的介质基板厚度  $t$  对吸波器吸波性能的影响,本文对五组数据进行对比分析, $t$  分别为 9.6  $\mu\text{m}$ 、9.3  $\mu\text{m}$ 、9  $\mu\text{m}$ 、8.7  $\mu\text{m}$ 、8.4  $\mu\text{m}$ ,通过时域有限差分法仿真分析,结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出,在低频范围,随着介质基板厚度  $t$  的减小,吸收峰向高频方向移动,吸波能力先增强再减小;在 6.6 THz 附近,当基板厚度  $t=9.3 \mu\text{m}$  时,吸波性能达到峰值,并不是随着基板厚度的增加或减小就呈持续上升或下降状态。在高频段,吸收率随着基板厚度的减小逐渐增加,同时吸收峰的数量明显增多,但是吸波性能减弱,有效的吸收峰由原来的 4 个变为 2 个。从整个频段整体分析可以看出,随着介质基板厚度  $t$  减小,吸收峰的数量增加但吸收性能变差了,具有优良性能的吸收峰的数量减少。综合考虑,介质基板厚度在  $t=9.3 \mu\text{m}$  处达到最佳性能。

### 3.7 周期长度 $W$ 对吸波器性能的影响

下面讨论超材料吸波器的吸波性能随周期长度  $W$  的变化情况,设置周期长度  $W$  为 48  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$ 、52  $\mu\text{m}$ 、54  $\mu\text{m}$ 。对应的吸收率随频率变化曲线图如图 10 所示,从图中分析可知,当  $W=48 \mu\text{m}$  时,高频段的吸收峰

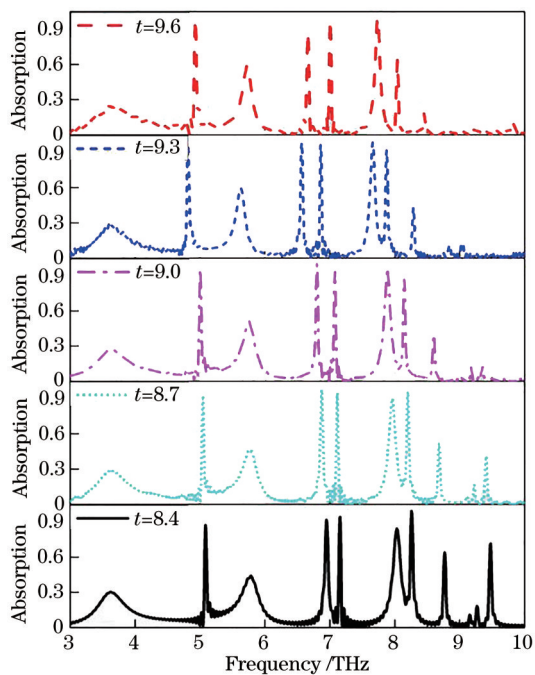


图 9 不同基板厚度  $t$  吸收曲线对比

Fig. 9 Comparison of absorption curves of different substrate thicknesses  $t$

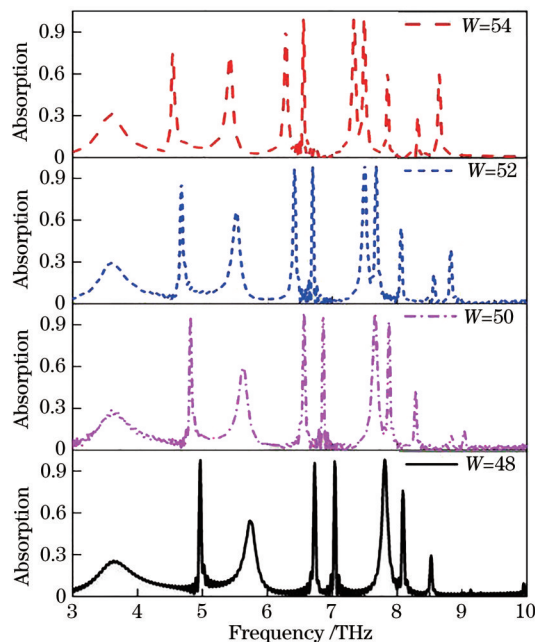


图 10 不同周期长度  $W$  吸收曲线对比

Fig. 10 Comparison of absorption curves for different period lengths  $W$

位置向高频方向移动,吸收率较  $W=50 \mu\text{m}$  时减小,良好的吸收峰数量较少;当  $W=50 \mu\text{m}$  时,有五个吸收率良好的吸收峰。当  $W$  为  $52 \mu\text{m}$ 、 $54 \mu\text{m}$  时,低频段没有吸收率大于 90% 的吸收峰,高频段吸收峰的数量增加,但是吸收率较高的吸收峰只有四个。所

以,设定  $W$  为  $50 \mu\text{m}$ ,此时该超材料吸波器在整个工作频段有五个吸收峰,吸收率大于 90%,具有最佳的吸收性能。

### 3.8 不同入射角度对吸波器性能的影响

电磁波从不同角度入射吸波器,对吸波器的吸收性能有很大影响,这种特性被称为吸波器的敏感性或不敏感性。本文在前面结构的基础上,对不同入射角度进行模拟仿真,得到不同入射角度下吸波器的吸收性能对比结果,如图 11 所示,设置角度分

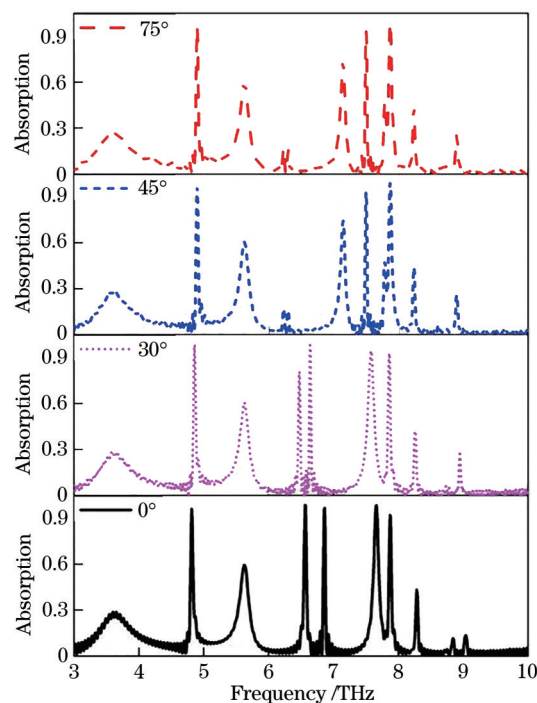


图 11 不同入射角度吸收曲线对比

Fig. 11 Comparison of absorption curves of different incident angles

别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $75^\circ$ 。由图可以看出,电磁波以不同角度射入吸波器,吸波器的第一个吸收峰向高频方向移动一点,吸收率基本没有受到影响;高频段的两个吸收峰向低频方向移动,并且吸收率减小,但大部分吸收率在 90% 以上。由此可见,该吸波器具有比较良好的角度不敏感性,在大角度入射时依然能够保持优异的吸收特性。近年来太赫兹多频吸波器已有的研究成果与本文设计的对比,如表 2 所示。

## 4 结 论

本文设计了一种方形对称结构的基于超材料的太赫兹多频吸波器,并通过时域有限差分法对该吸波器的各种参数进行模拟仿真,分析该吸波器在不同情况下的吸波性能,探究了吸波器吸波性能变



表 2 太赫兹多频吸波器研究成果

Table 2 Research results of terahertz multi-frequency absorbers

| Reference | Frequency / THz | Peak number | Absorption / % | Angle / (°) |
|-----------|-----------------|-------------|----------------|-------------|
| [20]      | 0-3.5           | 4           | 97.00-98.00    | -           |
| [23]      | 0.75-3.5        | 5           | 98.00-99.00    | 0-45        |
| [24]      | 0-2.0           | 5           | 94.16-99.68    | -           |
| [25]      | 0.5-4.0         | 4           | 75.00-95.00    | 0-45        |
| [26]      | 4.5-6.5         | 3           | 96.40-99.80    | 0-70        |
| [27]      | 0-4.0           | 2           | 91.50-98.20    | 0-80        |
| [28]      | 0.1-1.0         | 5           | 90.44-99.88    | 0-60        |
| Proposed  | 3.0-10.0        | 5           | 90.39-99.64    | 0-75        |

化的各种影响因素。并通过分析得到吸波器的最佳结构,从而在工作频率 3~10 THz 内有 5 个最佳的谐振吸收峰,5 个吸收峰的吸收率都在 90% 以上,最高吸收率可达 99%。此外该吸收器的单元尺寸为 50 μm × 50 μm × 9.6 μm,可用于多模太赫兹通信系统及飞行器隐身领域,能起到消除电磁干扰、实现电磁屏蔽、提高武器隐身能力的作用,具有较广的应用前景与现实需求。

参 考 文 献

[1] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.

[2] Li J Z, Tian H, Liu H T, et al. Design and verification of a radar-infrared stealth-compatible material based on metamaterial[J]. *Journal of Functional Materials*, 2017, 48(5): 5137-5143.  
李君哲, 田浩, 刘海韬, 等. 一种基于超材料的雷达红外兼容隐身材料设计与验证[J]. *功能材料*, 2017, 48(5): 5137-5143.

[3] Wang C, Zhang G. Environmental pollution caused by electromagnetic radiation and protective measures [J]. *Environment and Development*, 2018, 30(9): 56-57.  
汪丛, 张庚. 电磁辐射对环境的污染及防护措施[J]. *环境与发展*, 2018, 30(9): 56-57.

[4] Wang Y N. Electromagnetic biological effect and electromagnetic environment monitoring system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2007.  
王亚楠. 电磁生物效应与电磁环境监测系统[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.

[5] Lü Z Y. Study on metamaterial wideband absorbers and applications[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.  
吕志勇. 电磁超材料宽带吸波结构的研究及应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.

[6] Ye D X, Zheng B, Lu L. Stealth talk[J]. *Physics*, 2018, 47(4): 253-256.  
叶德信, 郑斌, 陆凌. 隐身漫谈[J]. *物理*, 2018, 47(4): 253-256.

[7] Zhang S W. Overview of anti-stealth radar technology [J]. *China New Telecommunications*, 2018, 20(21): 36.  
张士文. 反隐身雷达技术概况[J]. *中国新通信*, 2018, 20(21): 36.

[8] Shimpi T M, Swanson D E, Drayton J, et al. CdS barrier to minimize Zn loss during CdCl<sub>2</sub> treatment of Cd-Zn-Te absorbers[J]. *Solar Energy*, 2018, 173: 1181-1188.

[9] Yang R G. Electromagnetic field and electromagnetic wave[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2007.  
杨儒贵. 电磁场与电磁波[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2007.

[10] Jiang Y N, Wang Y, Ge D B, et al. An ultra-wideband absorber based on graphene[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(5): 054101.  
姜彦南, 王扬, 葛德彪, 等. 一种基于石墨烯的超宽带吸波器[J]. *物理学报*, 2016, 65(5): 054101.

[11] Landy N I, Sajujigbe S, Mock J J, et al. A perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.

[12] Zhu R, Liu X N, Hu G K, et al. Microstructural designs of plate-type elastic metamaterial and their potential applications: a review[J]. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2015, 6(1): 14-40.

[13] Zhou Q, Yin X W, Zhang L T, et al. Research progress of microwave tunable metamaterial absorber [J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(18): 40-46.  
周倩, 殷小玮, 张立同, 等. 微波可调谐超材料吸波体研究进展[J]. *科技导报*, 2016, 34(18): 40-46.

[14] Hao H G, Ding T Y, Luo W, et al. Design of novel broadband microwave absorber based on metamaterials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061604.  
郝宏刚, 丁天玉, 罗伟, 等. 基于超材料的新型宽带微波吸波器设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 061604.

[15] Han S, Yang H L. Study on the design and measurement of dual-directional multi-band metamaterial

- absorber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(17): 174102.
- 韩松, 杨河林. 双向多频超材料吸波器的设计与实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(17): 174102.
- [16] He Y, Wu Q N, Yan S N. Multi-band terahertz absorber at 0.1–1 THz frequency based on ultra-thin metamaterial[J]. *Plasmonics*, 2019, 14(6): 1303-1310.
- [17] Wang J Y, Wu Q N. Metamaterial terahertz broadband reflector with double-layer grid[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0614002.
- 王建扬, 吴倩楠. 基于双层格栅的超材料太赫兹宽频反射器[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0614002.
- [18] 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.
- 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设计与研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0516001.
- [19] Shi J K, Pan C, Li J X, et al. Design of terahertz four band metamaterial absorber[J]. *Science & Technology Vision*, 2018(24): 48-50.
- 时家阔, 潘灿, 李静娴, 等. 太赫兹四波段超材料吸波器设计[J]. *科技视界*, 2018(24): 48-50.
- [20] Hu F R, Wang L, Quan B G, et al. Design of a polarization insensitive multiband terahertz metamaterial absorber[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(19): 195103.
- [21] Zhang Y. Millimeter waves multibands absorbers based on flexible metamaterial[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- 张勇. 基于柔性超材料的毫米波多频吸波器[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [22] Hao M Z, Yan F P, Wang W, et al. Metamaterial-based terahertz polarization-insensitive broadband absorber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1214002.
- 郝梦真, 延凤平, 王伟, 等. 基于超材料的太赫兹偏振不敏感宽带吸波器[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1214002.
- [23] Wang G Z, Wang B X. Five-band terahertz metamaterial absorber based on a four-gap comb resonator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(24): 5151-5156.
- [24] Sabah C, Mulla B, Altan H, et al. Cross-like terahertz metamaterial absorber for sensing applications [J]. *Pramana*, 2018, 91(2): 1-7.
- [25] Bakshi S C, Mitra D, Minz L. A compact design of multiband terahertz metamaterial absorber with frequency and polarization tunability[J]. *Plasmonics*, 2018, 13(6): 1843-1852.
- [26] Liu Y, Xu S Q, Liu M, et al. Tunable multi-band terahertz absorber based on a one-dimensional heterostructure containing semiconductor[J]. *Optik*, 2018, 170: 203-209.
- [27] Huang M L, Cheng Y Z, Cheng Z Z, et al. Based on graphene tunable dual-band terahertz metamaterial absorber with wide-angle[J]. *Optics Communications*, 2018, 415: 194-201.
- [28] He Y. The simulation and design of multiband terahertz metamaterial absorber[D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- 贺瑜. 多波段太赫兹超材料吸波器的仿真与设计[D]. 太原: 中北大学, 2020.