

### 基于超材料的可调谐的太赫兹波宽频吸收器

陈俊 杨茂生 李亚迪 程登科 郭耿亮 蒋林 张海婷 宋效先 叶云霞 任云鹏 任旭东 张雅婷 姚建铨

### Tunable terahertz wave broadband absorber based on metamaterial

Chen Jun Yang Mao-Sheng Li Ya-Di Cheng Deng-Ke Guo Geng-Liang Jiang Lin Zhang Hai-Ting  
Song Xiao-Xian Ye Yun-Xia Ren Yun-Peng Ren Xu-Dong Zhang Ya-Ting Yao Jian-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 247802 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20191216

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191216>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于声学超材料的低频可调吸收器

A kind of tunable acoustic metamaterial for low frequency absorption

物理学报. 2019, 68(3): 034301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181908>

#### 超薄柔性透射型超构材料吸收器

Ultrathin flexible transmission metamaterial absorber

物理学报. 2019, 68(8): 087802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182225>

#### 基于石墨烯的太赫兹波散射可调谐超表面

Graphene based tunable metasurface for terahertz scattering manipulation

物理学报. 2017, 66(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204101>

#### 基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial

物理学报. 2018, 67(11): 118102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180125>

#### 极化控制的双波段宽带红外吸收器研究

Polarization-controlled dual-band broadband infrared absorber

物理学报. 2018, 67(10): 107801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172716>

## 基于超材料的可调谐的太赫兹波宽频吸收器\*

陈俊<sup>1)2)</sup> 杨茂生<sup>1)2)†</sup> 李亚迪<sup>1)2)</sup> 程登科<sup>1)2)</sup> 郭耿亮<sup>1)2)</sup> 蒋林<sup>1)2)</sup>  
 张海婷<sup>1)2)</sup> 宋效先<sup>1)2)3)‡</sup> 叶云霞<sup>1)2)</sup> 任云鹏<sup>1)2)</sup>  
 任旭东<sup>1)2)</sup> 张雅婷<sup>1)2)3)</sup> 姚建铨<sup>1)2)3)</sup>

1) (江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

2) (江苏大学微纳光电子与太赫兹技术研究院, 镇江 212013)

3) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

(2019年8月10日收到; 2019年9月16日收到修改稿)

随着频谱资源的日益稀缺, 太赫兹波技术在近十几年的时间里得到了越来越多的关注, 并取得了巨大的进展. 由于高吸收、超薄厚度、频率选择性和设计灵活性等优势, 超材料吸收器在太赫兹波段备受关注. 本文设计了一种“T”型结构的超材料太赫兹吸收器, 同时获得了太赫兹多频吸收器和太赫兹波宽频可调谐吸收器. 它们结构参数一致, 唯一的区别是在太赫兹波宽频可调谐吸收器的顶端超材料层上添加了一块方形光敏硅. 这种吸收器都是三层结构, 均由金属基板、匹配电介质层以及顶端超材料层组成. 仿真结果表明, 太赫兹波多频吸收器拥有6个吸收率超过90%的吸收峰, 其平均吸收率高达96.34%. 而太赫兹波宽频可调谐吸收器通过改变硅电导率, 可以控制吸收频带的存在与否, 同时可以调整吸收峰的频率位置, 使吸收峰频率在一个频带宽度大约为30 GHz的范围内调整. 当硅的电导率为1600 S/m时, 吸收率超过90%的频带宽度达到240 GHz, 而且其峰值吸收率达到99.998%.

**关键词:** 太赫兹吸收器, 多频, 可控宽频, 超材料

**PACS:** 78.20.Ci, 81.05.Xj, 78.47.jh

**DOI:** 10.7498/aps.68.20191216

## 1 引言

超材料是一种人工设计的周期阵列, 具有许多奇异的电磁特性, 如负折射率、非对称传输和交叉极化锥. 所有的这些特殊特性使超材料成为电磁波吸收材料的优良候选材料. 自从Landy等<sup>[1]</sup>第一次提出了由金属层-介质层-超材料层三层结构构成的超材料吸收器, 并从理论和实验证明了超材料吸收器的效用后, 类似结构的超材料吸收器得到了广

泛的研究. 此后, 研究工作在各种不同波段范围开展, 比如微波段、太赫兹波段和红外光波段等. 同时, 不同结构的超材料吸收器层出不穷<sup>[2-5]</sup>. 然而, 这些超材料吸收器大多数都是单频、双频或者是多频吸收器, 这种在分散频率点的吸收限制了这类吸收器在实际中的许多应用, 比如说传感器就需要宽频可调谐的吸收器<sup>[6-8]</sup>. 为了适应多功能太赫兹器件的发展, 具有可调谐或可切换吸收率功能的宽带吸收器具有重要的研究价值. 目前, 基本上所有基于超材料结构的电磁波吸收器都是被动式的, 即通

\* 中国博士后科学基金(批准号: 2019M651725)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20180862, BK20190839)和江苏省研究生科研创新计划(批准号: KYCX19\_1583)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 2111803010@stmail.ujs.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: songxiaoxian@ujs.edu.cn

过调整吸收器的几何尺寸参数来达到调整吸收器吸收性能的目的, 这种器件一旦制备完成之后, 其吸收性能也就确定了<sup>[9]</sup>. 而日益复杂的电磁应用环境需要的是主动式的可调谐的电磁超材料吸收器, 比如可以根据电磁环境的变化控制电磁超材料吸收器对电磁波的吸收率等<sup>[10–12]</sup>.

在主动式可调谐的吸收器中, 大多是利用石墨烯或者二氧化钒来达到调节吸收谱的效果. 因为石墨烯在可见光区域吸收率高达 2.3%, 适合应用于太赫兹完全吸收材料<sup>[13,14]</sup>. 此外, 由于石墨烯的表面导电性可以通过改变化学势来调节, 因此石墨烯吸收体可以在多个频率下工作. 而二氧化钒是一种室温相变材料, 当温度等于或大于其相变温度时, 能显示金属特性, 当温度小于相变温度时, 能显示介电特性. 它的电导率能在相变过程中迅速增加. 但是, 采用石墨烯结构的吸收器往往需要用石墨烯构成复杂图案, 这使得生产工艺变得十分复杂; 而二氧化钒对温度敏感, 而且工作温度会限制在其相变温度点左右, 适用范围受到限制. 使用金属薄板加电磁材料的方案是一种新的解决思路, 它既保留

了结构简单、易于生产的特点, 也解决了吸收器只能被动调节的不足.

本文提出了一种“T”型结构的、太赫兹和远红外频率范围的超材料吸收器. 它采用经典的金属层-介质层-超材料层的层状结构, 即以一块金属薄板作为基底, 以聚酰亚胺作为匹配介质层置于金属层之上, 最上面一层是带图案的金属-硅混合层. 数值计算证明, 通过改变半导体的电导率, 所设计的吸收器可以在期望的频率范围内获得近乎完美的吸收. 当硅电导率为 1600 S/m 时, 吸收器在 0.786 THz 频率处达到吸收峰值, 其吸收率为 99.998%, 而且吸收率超过 90% 的频带宽度达到了 240 GHz. 另外, 通过调节硅片电导率, 可以轻易地调整吸收带的有无以及吸收峰频率点, 吸收峰频率点可在 30 GHz 的宽度范围内调整.

## 2 超材料太赫兹波吸收器件的设计

超材料太赫兹吸收器的单元结构如图 1 所示, 两种吸收器结构参数完全相同, 唯一的不同点在于

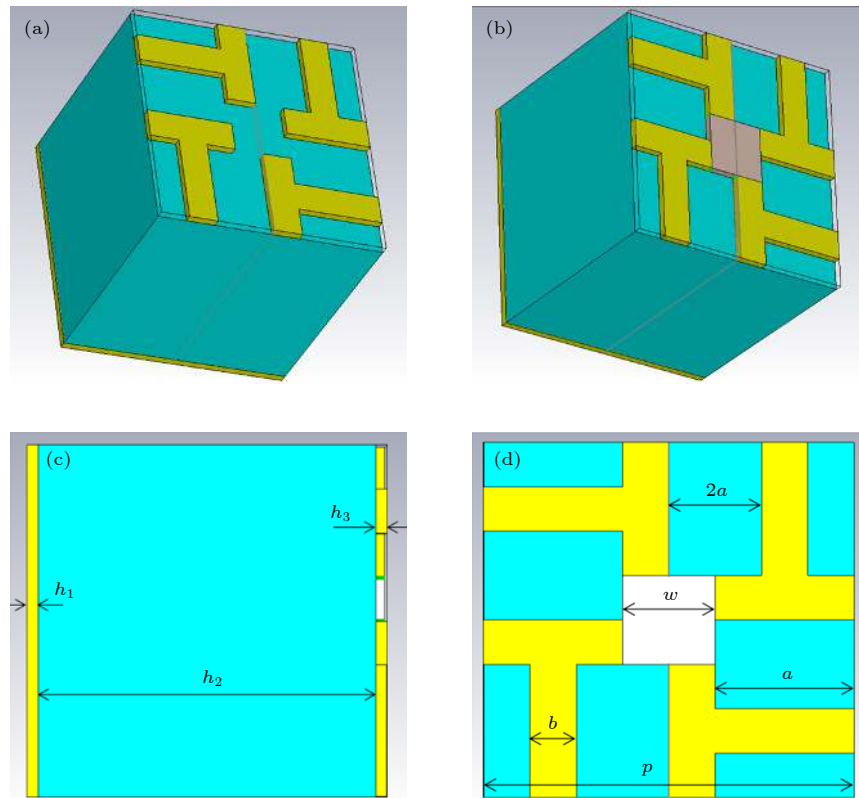


图 1 超材料太赫兹波吸收器结构示意图 (a) 多频吸收器示意图; (b) 宽频可调谐吸收器示意图; (c) 吸收器剖面图; (d) 吸收器表面结构图

Fig. 1. Structural schematic diagram of metamaterial terahertz wave absorbers: (a) Schematic diagram of multi-band absorber; (b) schematic diagram of broadband tunable absorber; (c) profile of absorber; (d) surface structure of absorber.

“T”型超材料太赫兹宽频可调谐吸收器在太赫兹波多频吸收器的顶端的超材料结构层加入了一块方形硅片<sup>[15]</sup>. 图 1(a) 和图 1(b) 为两种超材料太赫兹吸收器的仿真结构图, 可以看出所设计的太赫兹吸收器为三层结构, 其顶层设有图形结构, 且两种太赫兹吸收器的区别仅仅是有无方形光敏硅片. 图 1(c) 为“T”型超材料太赫兹波吸收器的剖面图. 其中, 底层为连续的金属薄膜 Au, 厚度为  $h_1$ ; 中间层为聚酰亚胺介质层, 厚度为  $h_2$ , 折射率设置为  $n = 3.4$ ; 最上面一层为由金属 Au 薄膜 (或者金属 Au 薄膜和方形硅板, 硅板与 Au 板的厚度一致) 制作而成的谐振单元, 厚度设置为  $h_3$ . 图 1(d) 为超材料吸收器的表面结构图 (以超材料太赫兹波宽频吸收器为例), 如图所示, “T”型 Au 薄膜结构中间嵌入了一块边长为  $w$  的正方形硅板, 其中构成“T”型 Au 薄膜的两个矩形尺寸相同, 长、宽分别是  $a$ ,  $b$ , 四个“T”型金属薄膜结构大小一致. 超材料吸收器整体是一个  $32 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$  的立方体, 其中  $a$ ,  $b$ ,  $w$ ,  $q$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  等参数见表 1.

表 1 超材料太赫兹吸收器的结构尺寸  
Table 1. Structure dimensions of metamaterial terahertz absorber.

参数	$a$	$b$	$w$	$p$	$h_1$	$h_2$	$h_3$
取值/ $\mu\text{m}$	12	4	8	32	1	30	1

### 3 太赫兹波吸收器的原理与仿真模拟

众所周知, 吸收率  $A$  可用下式计算:

$$A = 1 - R - T = 1 - |S_1|^2 - |S_2|^2, \quad (1)$$

其中  $R$ ,  $T$  分别表示反射率、透射率; 而  $S_1$ ,  $S_2$  分别表示反射系数、透射系数. 由于用来当作基底的金属板 Au 具有足够的厚度, 因此所提出的超材料太赫兹波吸收器的透射率接近于零, 即  $T \approx 0$ . 将  $T \approx 0$  这个条件代入到 (1) 式中, 可以得到

$$A = 1 - R = 1 - |S_1|^2. \quad (2)$$

因此, 吸收率  $A$  可以简单地通过 (2) 式来计算. 另外, 由于该超材料太赫兹波吸收器件的单元结构具有高度的几何旋转对称性, 因此对正常入射太赫兹波具有偏振不敏感特性.

在仿真模拟中, 所设计的超材料太赫兹波吸收器件被沿着  $Z$  轴方向的垂直入射的平面波照射. 电磁场边界条件设置在  $X$ - $Y$  平面上, 电矢量方向沿着  $X$  方向, 磁矢量方向沿着  $Y$  方向来确定边界

条件, 而沿  $Z$  轴方向则使用完全匹配层, 使用时域求解器进行仿真, 即能够获得多带吸收器的反射曲线. 其中, 金属 Au 的电导率为  $4.561 \times 10^7 \text{ S/m}$ , 中间电介质层聚酰亚胺的相对介电常数  $\epsilon = 3.4$ , 方形硅板的电导率初始值设置为  $1 \text{ S/m}$ .

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 “T”型图案太赫兹超材料多频吸收器的仿真结果

根据上述模型, 利用计算机在 2.5—8 THz 范围内计算“T”型图案太赫兹超材料多频吸收器的吸收光谱, 模拟计算结果如图 2 所示. 从图 2 可以看到, 一共有 6 个吸收率超过 90% 的频率点, 分别是: 在 2.918 THz 频率点处, 吸收率为 95.631%; 在 3.7925 THz 频率点处, 吸收率为 99.508%; 在 4.986 THz 频率点处, 吸收率为 96.34%; 在 6.966 THz 频率点处, 吸收率为 94.835%; 在 7.2685 THz 频率点处, 吸收率为 96.485%; 在 7.4665 THz 频率点处, 吸收率为 94.732%. 6 个吸收峰的平均吸收率达到了 96.26%. 此外, 吸收谱还显示出 3 个附加吸收峰的存在, 分别位于 5.5415, 7.5435 和 7.615 THz 频率点, 吸收率分别为 78.756%, 75.852%, 80.625%.

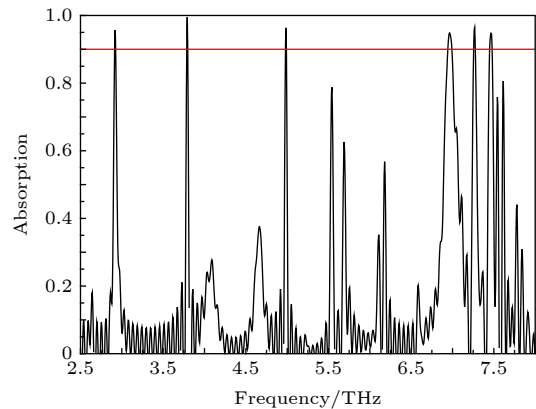


图 2 超材料太赫兹多频吸收器的吸收谱

Fig. 2. Absorption spectrum of metamaterial terahertz multi-band absorber.

### 4.2 “T”型图案太赫兹超材料宽频可调谐吸收器的仿真结果

将仿真计算的频率范围更改为 0—3 THz, 图 3 所示的是硅电导率为初始值  $1 \text{ S/m}$  时的吸收谱, 可以轻易地发现, 在这种参数条件下, 本文提出的“T”型图案太赫兹超材料吸收器对太赫兹波吸收能力不尽如人意, 虽然有两个吸收峰, 但是吸收率

都不高, 仅在 2.412 THz 处吸收率达到了 54.39%, 在 2.826 THz 处达到了 82.03%, 此时的吸收器的吸收率过低, 不适合实际使用. 在不改变其他条件的情况下, 用软件仿真计算了在  $\sigma_1 = 1 \text{ S/m}$ ,  $\sigma_2 = 200 \text{ S/m}$ ,  $\sigma_3 = 400 \text{ S/m}$ ,  $\sigma_4 = 600 \text{ S/m}$ ,  $\sigma_5 = 800 \text{ S/m}$ ,  $\sigma_6 = 1000 \text{ S/m}$  六种情况下的吸收器的吸收光谱, 结果如图 4 所示. 我们发现, 逐渐增大硅片的电导率后, 吸收器的吸收光谱发生巨大的变化: 原本在 2.412 THz 与 2.826 THz 频率处的吸收率下降, 值得注意的是, 在 0.5—1 THz 频带范围内出现了一个新的吸收峰, 这表明吸收峰频率发生了红移现象, 并且红移现象造成的频率移动高达 2.04 THz. 而且 0.5—1 THz 频带范围处的吸收峰的吸收率随着硅片电导率的增大而增大, 在硅片电导率达到 1000 S/m 的时候吸收率超过了 90%, 变成一个宽频带太赫兹波吸收器, 其中峰值吸收率在 0.78 THz 处取得, 达到了 94.61%, 在这种情况下吸收率超过 90% 的频带宽度可以达到 123 GHz. 继续增大硅板的电导率, 超材料吸收器的吸收率超过 90% 的吸收频带逐渐变宽, 峰值吸收率也逐渐变大, 在电导率为 1600 S/m 的时候吸收频带最宽, 拥有 240 GHz 的吸收率超过 90% 的频率范围, 如图 5 所示. 在这种情况下, 峰值吸收率在 0.786 THz 处取得, 同样取得了最值, 达到了 99.998%, 表现出近乎完美的吸收性能. 之后再继续增大硅板电导率, 超材料太赫兹吸收器的吸收太赫兹波的能力呈现一个下降的趋势, 当硅板电导率增大到 3300 S/m 时, 吸收器就失去了对太赫兹波的吸收能力 (没有一个频率点的吸收率超过 90%), 如图 6 所示. 在增大硅板电导率的过程中, 除了出现吸收带宽先增大

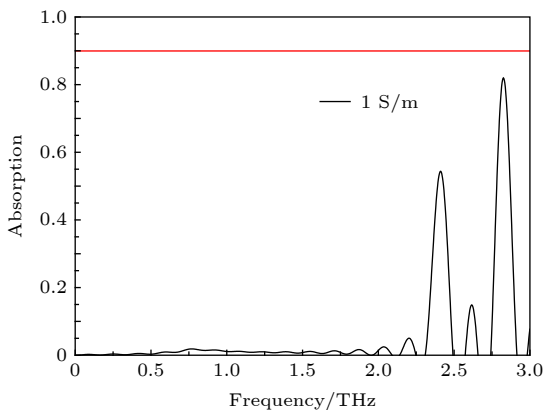


图 3 硅电导率为 1 S/m 时的超材料太赫兹波吸收器吸收谱

Fig. 3. Absorption spectra of metamaterial terahertz absorbers when silicon conductivity is 1 S/m.

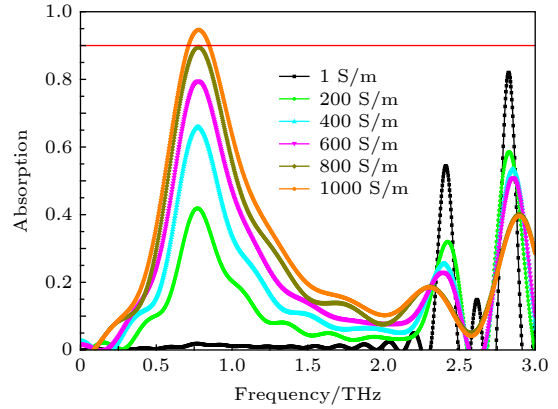


图 4 硅电导率在 1—1000 S/m 范围内六种不同取值下的太赫兹波吸收器吸收谱

Fig. 4. Absorption spectra of terahertz absorbers with six different values of silicon conductivity in the range of 1–1000 S/m.

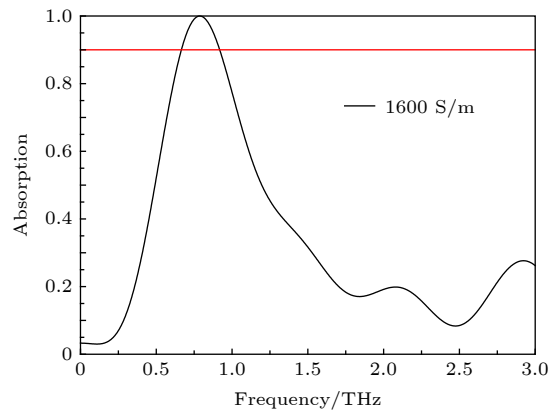


图 5 硅电导率为 1600 S/m 时的超材料太赫兹波吸收器吸收谱

Fig. 5. Absorption spectra of metamaterial terahertz absorbers when silicon conductivity is 1600 S/m.

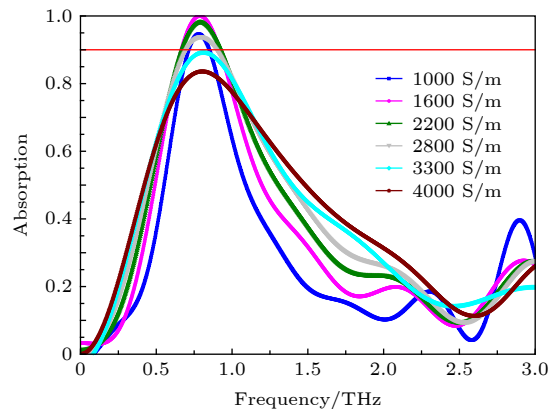


图 6 硅电导率在 1000—4000 S/m 范围内六种不同取值下的太赫兹波吸收器吸收谱

Fig. 6. Absorption spectra of terahertz absorbers with six different values of silicon conductivity in the range of 1000–4000 S/m.

再减小的过程,再一次出现了频率移动的现象,只不过这一次频移现象是蓝移,硅板电导率从 1000 S/m 变换到 3300 S/m 的过程中,峰值吸收频率点大约蓝移了 30 GHz.

### 4.3 仿真结果分析

为了进一步地说明“T”型图案太赫兹超材料多频吸收器以及宽频可调谐吸收器的吸收机理,分别研究了多频吸收器在各个吸收峰频率的磁场分布,以及宽频可调谐吸收器在硅电导率为 1600 S/m 时 0.78 THz 频率点的上下表面的表面电流分布情况,结果如图 7 和图 8 所示.

由于多频吸收器各个吸收峰的物理机制相似,因此,挑选了 2.918 THz 这个频率点进行说明. 图 7 展示了多频吸收器超材料结构层的磁场分布情况,可以很明显地观察到,在结构层中存在偶极子共振

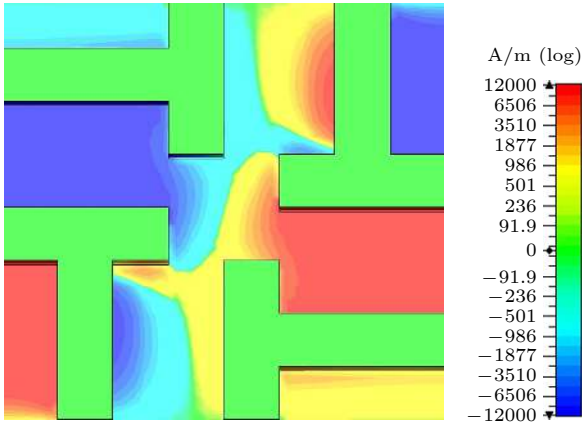


图 7 多频吸收器超材料结构层在 2.918 THz 处的磁场分布情况

Fig. 7. Distribution of magnetic field at 2.918 THz in metamaterial structure layer of terahertz multi-band absorber.

模式,正是由于激发了偶极子共振模式<sup>[16,17]</sup>,因此该频率的太赫兹波能够被有效地吸收(以下会给出更进一步的说明).而且,本文设计的多频吸收器存在多个腔室结构<sup>[18-21]</sup>,其他吸收峰的存在就是由于激发出了不同腔室之间的偶极子共振模式.

图 8(a) 和图 8(b) 分别展示了吸收器超材料结构层和金属基底在硅电导率为 1600 S/m 时 0.78 THz 频率点的表面电流的分布结果. 我们知道,顶层和底层结构内产生的反向平行电流可以形成电流环,这种电流的形成揭示出超材料太赫兹吸收器的磁偶极子共振模式被激发出来,进一步地,上下两个金属层上形成的表面电流向相反的方向流动形成的电流环会产生磁场,磁场方向可以根据右手定则判断,该磁场会与入射太赫兹波的磁场产生磁通耦合,从而导致太赫兹波被器件吸收. 根据图 8(a) 和图 8(b) 可以看到,表面超材料层金属中的电流在 X-Y 平面内沿着 X 轴的负轴方向流动,而金属基板上的电流方向则是向着 X 轴的正轴方向流动,根据右手定则,可以判断出电流环感应出的磁场磁通方向是 Y 轴的负轴方向,而在仿真模拟中设置的入射太赫兹平面波的波矢量的方向是沿着 Z 轴负轴方向,因此电场和磁场分布在 X-Y 平面内,感应磁场和入射太赫兹波相互耦合抵消,太赫兹平面波消失,表现出超材料吸收器对太赫兹波的吸收,这表明吸收峰的深层吸收机理是基于磁共振响应. 另外, 0.78 THz 这个吸收峰只有在电导率高时出现的原因是: 在光照强度低、硅电导率低的情况下,硅表现出绝缘体的性质, 0.78 THz 的太赫兹波无法在结构层和基板之间形成强烈的磁耦合,因此 0.78 THz 的吸收峰没有出现; 当光照强度变化,硅电导率变大后,硅越来越表现出导体的性质,相当

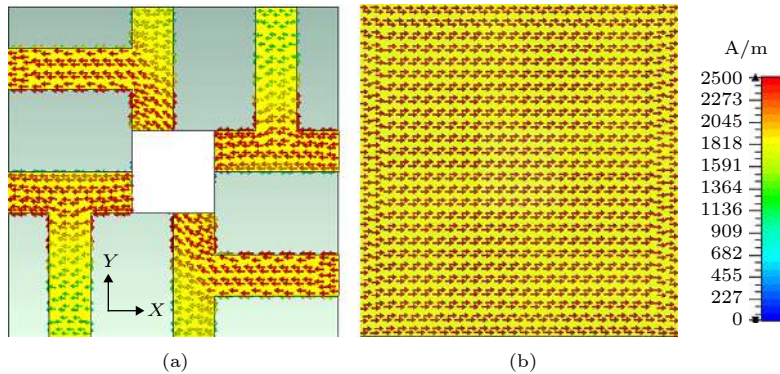


图 8 宽频可调谐吸收器在硅电导率为 1600 S/m 时 0.78 THz 频率点的上下表面的表面电流分布情况 (a) 上表面; (b) 下表面  
Fig. 8. Terahertz tunable broadband absorber of surface current distribution on upper and lower surfaces at 0.78 THz when silicon conductivity is 1600 S/m: (a) Upper surface; (b) lower surface.

于改变了结构层的几何参数, 其共振频率也发生改变, 共振频率变化为 0.78 THz, 而且由于硅导体性质的不完全性, 其吸收峰的变化没有全金属结构层那么尖锐, 比较平缓, 导致宽频吸收特性的形成.

若改变光敏硅的尺寸以及位置, 吸收器就会失去宽频吸收特性或者吸收效果大大下降. 由于表面图案的旋转对称性, 移动光敏硅的位置就会破坏表面对称腔结构, 减少旋转“T”型结构的共振模式, 使得太赫兹波在结构之间激发磁耦合变得非常困难, 导致吸收器失去宽频吸收特性, 其吸收峰频率也相应减少; 而改变硅的大小, 结构的共振峰值频率随之变化, 但由于结构原因, 太赫兹波无法在结构之间激发出足够强的极子共振模式, 使得结构对太赫兹的吸收能力大大下降.

## 5 总 结

根据太赫兹波吸收机理, 设计了一种“T”型结构的可调谐的太赫兹宽频超材料吸收器, 同时获得了太赫兹多频吸收器和太赫兹波宽频可调谐吸收器. 它们结构参数一致, 唯一的区别是在太赫兹波宽频可调谐吸收器的顶端超材料层上添加了一块方形光敏硅. 这两种吸收器都是三层结构, 均由金属基板、匹配电介质层以及顶端超材料层组成. 仿真结果表明, “T”型超材料太赫兹波多频吸收器具有多达 6 个吸收率超过 90% 的吸收峰, 其平均吸收率为 96.26%. 通过在太赫兹波多频吸收器的顶端超材料结构层加入一片方形光敏硅片, 就可以将多频吸收器转换为太赫兹可调谐宽频吸收器, 而且该宽频可调谐吸收器可以通过光辐射强度大小来调节超材料层的硅片电导率大小, 进而实现调节吸收器的吸收带的目的. 当硅片电导率达到 1600 S/m 时, 吸收带宽达到最大, 为 240 GHz, 同时峰值吸收率也达到最大, 为 99.998%. 当硅片电导率从 1 S/m 增大到 1000 S/m, 吸收峰从 2.826 THz 移到 0.78 THz, 出现了 2.046 THz 的频率红移现象, 再继续增大硅片电导率, 吸收峰从 0.78 THz 缓缓转移至 0.81 THz, 出现了 30 GHz 的频率蓝移现

象. 器件的吸收机理来源于超材料吸收器的磁偶极子共振模式的激发. 由于这些独特的性质, 本文所提出的超材料太赫兹波吸收器可能在光开关、光探测、光成像、带阻器件等领域具有潜在的应用价值.

## 参考文献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [2] Zhao B H, Wen Q Y, Xie Y S 2011 *Electr. Comp. Mater.* **30** 82 (in Chinese) [赵碧辉, 文岐业, 谢云松 2011 *电子元件与材料* **30** 82]
- [3] Shen X P, Cui T J, Ye J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 058101 (in Chinese) [沈晓鹏, 崔铁军, 叶建祥 2012 *物理学报* **61** 058101]
- [4] Bao S, Luo C R, Zhang Y P, Zhao X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3187 (in Chinese) [保石, 罗春荣, 张燕萍, 赵晓鹏 2010 *物理学报* **59** 3187]
- [5] Mo M M, Wen Q Y, Chen Z, Yang Q H, Li S, Jing Y L, Zhang H W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 237801 (in Chinese) [莫漫漫, 文岐业, 陈智, 杨青慧, 李胜, 荆玉兰, 张怀武 2013 *物理学报* **62** 237801]
- [6] Zhai Z, Zhang L, Li X, Xiao S 2019 *Opt. Commun.* **431** 199
- [7] Andryieuski A, Lavrinenko A V 2013 *Opt. Express* **21** 9144
- [8] Zhang Y, Feng Y, Zhu B, Zhao J, Jiang T 2014 *Opt. Express* **22** 22743
- [9] Cheng W, Li J S 2013 *Electr. Comp. Mater.* **32** 34 (in Chinese) [程伟, 李九生 2013 *电子元件与材料* **32** 34]
- [10] Zhao X, Wang Y, Schalch J, Duan G, Cremin K, Zhang J D, Chen C X, Averitt R D, Zhang X 2019 *ACS Photon.* **6** 830
- [11] Chen M, Yan W, Tong X, Zeng L, Li Z, Yang F 2019 *J. Opt.* **21** 035102
- [12] Faraji M, Moravvej-Farshi M K, Yousefi L 2015 *Opt. Commun.* **355** 352
- [13] Yan H, Li X, Chandra B, Tulevski G, Wu Y, Freitag M, Zhu W, Avouris P, Xia F 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 330
- [14] Kim K S, Zhao Y, Jang H, Lee S Y, Kim J M, Kim K S, Ahn J H, Kim P, Choi J J, Hong B H 2009 *Nature* **457** 706
- [15] Liang L J, Yao J Q 2016 *J. Zaozhuang Univ.* **33** 10 (in Chinese) [梁兰菊, 闫昕, 姚建铨 2016 *枣庄学院学报* **33** 10]
- [16] Chen L, Wei Y M, Zang X F, Zhu Y M, Zhuang S L 2016 *Sci. Rep.* **6** 22027
- [17] Chen L, Liao D G, Guo X G, Zhao J Y, Zhu Y M, Zhuang S L 2019 *Front. Inform. Tech. El.* **20** 591
- [18] Chen K, Wen Q Y, Zhang H W 2011 *Electr. Comp. Mater.* **30** 56 (in Chinese) [陈康, 文岐业, 张怀武 2011 *电子元件与材料* **30** 56]
- [19] Yao S T 2016 *M. S. Thesis* (Haerbin: Harbin University of Science and Technology) (in Chinese) [颜世桃 2016 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨理工大学)]
- [20] He X J, Yan S T, Ma Q X, Zhang Q F, Jia P, Wu F M, Jiang J X 2015 *Opt. Commun.* **340** 44
- [21] Gong C, Zhan M Z, Yang J, Wang Z G, Liu H T, Zhao Y J 2016 *Sci. Rep.* **6** 32466

# Tunable terahertz wave broadband absorber based on metamaterial\*

Chen Jun<sup>1)2)</sup> Yang Mao-Sheng<sup>1)2)†</sup> Li Ya-Di<sup>1)2)</sup> Cheng Deng-Ke<sup>1)2)</sup>  
 Guo Geng-Liang<sup>1)2)</sup> Jiang Lin<sup>1)2)</sup> Zhang Hai-Ting<sup>1)2)</sup>  
 Song Xiao-Xian<sup>1)2)3)‡</sup> Ye Yun-Xia<sup>1)2)</sup> Ren Yun-Peng<sup>1)2)</sup>  
 Ren Xu-Dong<sup>1)2)</sup> Zhang Ya-Ting<sup>1)2)3)</sup> Yao Jian-Quan<sup>1)2)3)</sup>

1) (*School of Mechanical and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

2) (*Institute of Micro-nano Optoelectronics and Terahertz Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

3) (*College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

( Received 10 August 2019; revised manuscript received 16 September 2019 )

## Abstract

With the increasing scarcity of spectrum resources, terahertz wave technologies have attracted more and more attention in recent decades, and have made tremendous progress. Terahertz wave referring to electromagnetic waves with a frequency in a range of 0.1–10 THz has a wide range of applications in wireless communication, nondestructive imaging and remote sensing. Due to the advantages of high absorption, ultra-thin thickness, frequency selectivity and design flexibility, metamaterial absorbers have attracted more attention in terahertz band. In this paper, two terahertz metamaterial absorbers with different performances are designed which are named “T” terahertz multi-band absorber and “T” terahertz tunable broadband absorber, respectively. The absorbers are both comprised of three layers: metal substrate, matched dielectric layer and surface metamaterial layer. The main structures of these two absorbers are composed of four T-shape Au plates on the top of polyimide dielectric layer and an Au sheet acting as a bottom layer. The only difference between these two absorbers is that the terahertz broadband tunable absorber possesses a square photosensitive silicon in the metamaterial layer. The simulations results show that the terahertz multi-band absorber has six absorption peaks at 2.918, 3.7925, 4.986, 6.966, 7.2685, and 7.4665 THz, with the absorptivity peaks of 95.631%, 99.508%, 96.34%, 94.835%, 96.485%, 94.732%, respectively, and the average absorption rate is 96.26%. Terahertz tunable broadband absorber has the characteristics of broadband absorption. When the conductivity of silicon is 1600 S/m, the absorber reaches its absorption peak at 0.786 THz with the absorptivity of 99.998%, and the frequency bandwidth with the absorption rate exceeding 90% reaches 240 GHz. The more interesting thing is that by changing the conductivity of silicon, the terahertz tunable broadband absorber shows the ability to dynamically control the existence of absorption band and adjust the frequency position of absorption peak. For terahertz tunable broadband absorber, the frequency of absorption peak can be regulated in a bandwidth of about 30 GHz. The terahertz wave absorbers designed in this paper possess rather simple structures, therefore the proposed absorbers are easy to fabricate. Because of these excellent properties, the absorbers may have potential applications in optical switch, optical detection, optical imaging, band-stop devices, and other fields.

**Keywords:** terahertz absorber, multi-band absorber, tunable broadband, metamaterial

**PACS:** 78.20.Ci, 81.05.Xj, 78.47.jh

**DOI:** 10.7498/aps.68.20191216

\* Project supported by the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2019M651725), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant Nos. BK20180862, BK20190839), and the Graduate Research Innovation Project of Jiangsu Province, China (Grant No. KYCX19\_1583).

† Corresponding author. E-mail: [2111803010@stmail.ujs.edu.cn](mailto:2111803010@stmail.ujs.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [songxiaoxian@ujs.edu.cn](mailto:songxiaoxian@ujs.edu.cn)