

# T 形结构太赫兹超材料吸收器的设计与仿真

于新颖\*, 闫俊佺, 杨森, 张婷

山西工程科技职业大学信息工程学院, 山西 晋中 030619

**摘要** 太赫兹频段的超材料吸收器可广泛应用于军事雷达及生物检测等方面。提出了 T 形结构的太赫兹超材料吸收器, 其吸收率可达 99.99% 以上, 接近完美吸收, 并从结构尺寸及电流分布等方面说明了此结构的吸收率影响因素及吸波机理。为了使上述 T 形结构的适用范围更广, 进一步提出了极化不敏感 T 形吸收器及频率可调 T 形吸收器。仿真结果表明, 所设计的超材料吸收器具有较高的吸收率、较灵活的频率调节范围和不敏感的极化角度, 具有较好的研究价值。

**关键词** 材料; 超材料; 太赫兹吸收器; 可调频率

中图分类号 O441

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2116003

## Design and Simulation of T-Shaped Terahertz Metamaterial Absorber

Yu Xinying\*, Yan Junya, Yang Sen, Zhang Ting

College of Information Engineering, Shanxi Vocational University of Engineering  
Science and Technology, Jinzhong, Shanxi 030619, China

**Abstract** Metamaterial absorbers in terahertz band can be widely used in military radar and biological detection. In this paper, a terahertz metamaterial absorber with a T-shape structure is proposed. Its absorptivity can reach 99.99%, close to perfect absorption. The factors influencing absorptivity and the absorptivity mechanism of the structure are disclosed from the aspects of structural size and current distribution. In order to make the above T-shaped structure apply to a wider range, the designs of a polarization-insensitive T-shaped absorber and a frequency-adjustable T-shaped structure absorber are further proposed. The simulation shows that the designed metamaterial absorber has high absorptivity, flexible frequency adjustment range, and insensitive polarization angle, so it has good research value.

**Key words** materials; metamaterial; terahertz absorber; adjustable frequency

**OCIS codes** 160.3918; 300.1030; 050.6624

## 1 引言

超材料是一类新型的人工设计的复合材料,它与自然界中的天然材料不同,设计者可以通过构造不同的超材料结构及改变结构中的材质和部分尺寸等,达到改变其有效介电常数、磁导率和吸收率的目的。因此,通常来说,超材料所表现出来的电磁属性是自然界中常规材料所不具有的,可以实现

比普通材料更加优良的特性<sup>[1]</sup>。

在利用超材料制作的器件设备中,吸收器是具有代表性的一种功能器件。它基于超材料卓越的电磁谐振性质,通过在超材料周期性的结构单元中实现共振,完成对入射电磁波的高效率吸收。如果设计得当,那么超材料制成的吸收器较自然界常规普通材料制成的吸收器,可实现更高效的吸收,甚至接近于对入射光波 100% 的完美吸收。在太赫兹

收稿日期: 2021-06-17; 修回日期: 2021-07-11; 录用日期: 2021-07-14

通信作者: \*903909480@qq.com

超材料吸收器中,被吸收的光波大多集中于 0.1~10 THz 的频率范围内。近年来,伴随着太赫兹频率范围内的探测技术和光谱科技的飞快发展<sup>[2]</sup>,太赫兹超材料吸收器适用的领域更加宽广,比如在防雷达监测的隐身飞机或隐身斗篷的设计中,在测量热量辐射大小及方向的热辐射计的完善中,以及在生物检测实现手段的改进中<sup>[3]</sup>,太赫兹超材料吸收器展现出了日益广阔的应用前景。

国内外对于太赫兹吸收器这种功能器件的研究已经有了一定的基础。杜克大学的 Shelby 等<sup>[4]</sup>在 2001 年,通过实验首次借助铜材质的开口环结构谐振器及玻璃纤维电路板上的导线,实现了人工干预的介电常数及磁导率皆是负数的负折射率材料,为后续研究左手材料打下了实验基础。2008 年, Landy 等<sup>[5]</sup>构造了顶层谐振环-中间层介质-底层金属的三层超材料吸收器结构,提出了用底层金属板来隔绝入射光波透射的研究思路,为后续超材料吸收器的研究提供了很好的防透射办法。目前,这种底层金属板结构仍然是诸多超材料吸收器最常采用的一种隔绝透射光的方法。目前,对于太赫兹超材料吸收器,研究人员已提出了很多设计模型,仿真验证能够完成单频带、多频带甚至宽频带及可调频率的设计<sup>[6]</sup>,但是在吸收率、频带范围和可调性等方面,仍存在可以继续研究的空间。

本文提出了基于 T 形结构的太赫兹超材料吸收器,其吸收率可达 99.99% 以上,但存在结构不对称导致的极化敏感的弊端。为了使上述 T 形结构的适用范围更广,在保证吸收率的基础上,进一步设计了极化不敏感 T 形单频吸收器的结构并进行了仿真分析。另外,为了更好地扩展 T 形吸收器的应用频率范围,在此结构中嵌入了半导体元件块,通过借助不同波长泵浦光源的照射,实现了频率可调控的适用于太赫兹波吸收的吸收器。在研究过程中,本文从结构尺寸及电流分布等方面说明了吸收器吸收性能的影响因素及吸波机理<sup>[7]</sup>。

## 2 实验仿真

### 2.1 T 形结构吸收器的设计与仿真

太赫兹超材料吸收器一般是由三层结构构成的:最顶层是金属层,由吸收器结构单元周期排布而成;中间层是介质层,其厚度及材质等都会对超材料的吸收率产生很大影响;最底层为基板,通常由一定厚度的金属层构成,主要是防止入射光波在此层面

上发生透射现象<sup>[8]</sup>。本文提出的超材料吸收器结构单元同样由三部分组成,其顶层结构为处于同一平面内的上下两个对称的 T 形结构,中间层为电介质聚酰亚胺,底层为金膜,具体结构如图 1 所示。

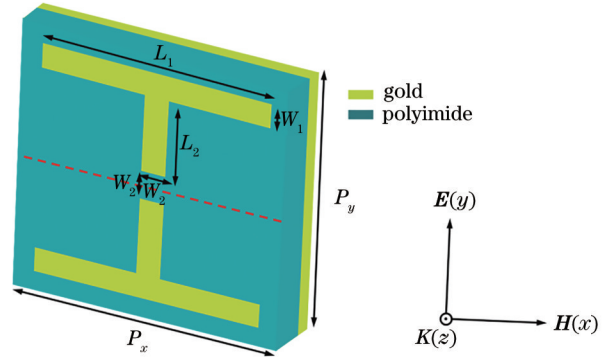


图 1 T 形吸收器的结构图

Fig. 1 Structural diagram of T-shaped absorber

本文采用 CST (CST STUDIO SUITE) 仿真软件的频域求解器对所设计的吸收器进行效果仿真和参数优化。在仿真条件中, $x$  和  $y$  均设为晶胞单元 (cell unit) 的周期性边界条件形式,磁场 ( $H$ ) 方向为  $x$  轴的正方向,电场 ( $E$ ) 方向沿  $y$  轴的正方向, $z$  轴为开放边界。其中,入射光波沿着  $z$  轴方向垂直入射到所设计的单元结构上。

通过调整 T 形结构底层、中间介质层和顶层的尺寸和所用材质,对吸收器的性能进行了对比观察。研究了横向金属条宽度 ( $W_1$ )、纵向金属条宽度、两个 T 形间距 ( $W_2$ ) 和纵向金属条长度 ( $L_2$ ) 对此吸收器吸收性能的影响,结果如图 2 所示。

由图 2 可知,顶层金属条宽度和两个 T 形间距主要影响此吸收器的谐振频率,而金属条长度  $L_2$  则会对吸收率产生较明显的影响。经过不断调整,确定了可以实现最佳吸收性能的相关参数,优化后得到的此太赫兹吸收器<sup>[9]</sup>的结构单元参数为:底层和中间层的横切面均为正方形,即  $x$  方向和  $y$  方向的长度均为  $P_x = P_y = 120 \mu\text{m}$ 。其中,顶层材质为有损耗的金膜,电导率为  $4.09 \times 10^7 \text{ S/m}$ ,其厚度  $t_1 = 2 \mu\text{m}$ ;中间层为一种聚合物,其相对介电常数为 3.5,损耗正切值为 0.057,厚度  $t_2 = 10 \mu\text{m}$ ;顶层 T 形结构的材质为有损耗的金,电导率和厚度均与底层一致。顶层 T 形结构的横向金属条长度  $L_1 = 28 \mu\text{m}$ ,T 形结构的横向金属条宽度  $W_1 = 6 \mu\text{m}$ ,T 形结构的纵向金属条长度  $L_2 = 22 \mu\text{m}$ ,宽度  $W_2 = 6 \mu\text{m}$ 。两个对称 T 形结构的垂直间距  $W_2 = 6 \mu\text{m}$ 。

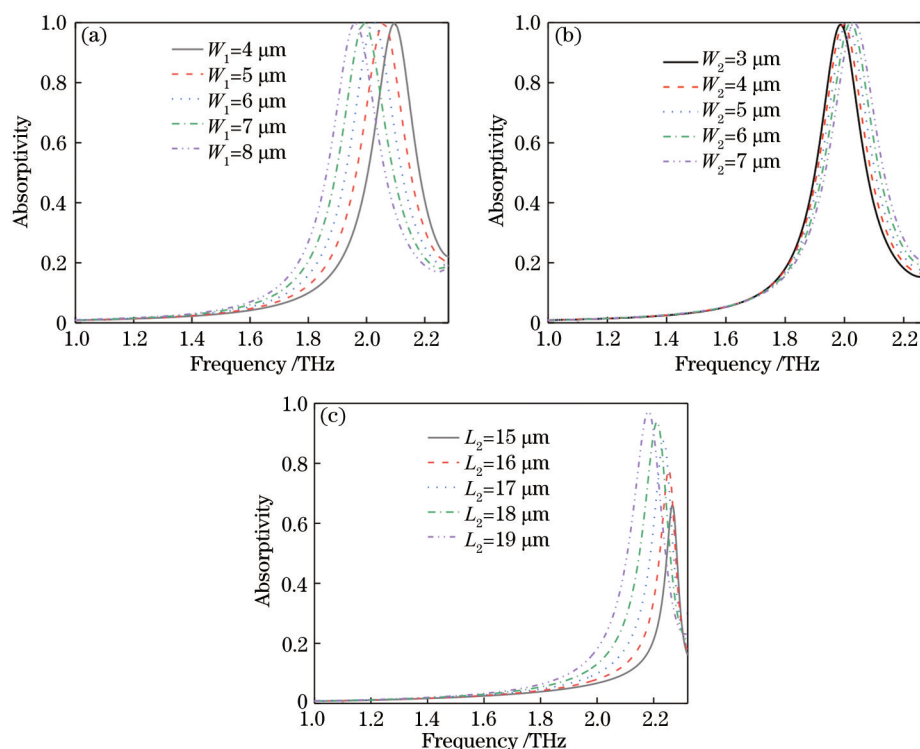


图 2 不同参数对 T 形吸收器吸收性能的影响。(a)  $W_1$ ; (b)  $W_2$ ; (c)  $L_2$

Fig. 2 Influences of parameters on absorption performance of T-shaped absorber. (a)  $W_1$ ; (b)  $W_2$ ; (c)  $L_2$

吸收率是能够直接反映吸收器的结构、尺寸及材质等是否合理的参数,其值越高,则表明该超材料吸收器对入射光波的吸收情况越理想。但是,吸收率的数值不仅仅只是取决于反射率,还与整个器件的透射情况紧密相关,其计算公式为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 - |S_{21}(\omega)|^2, \quad (1)$$

式中: $R(\omega)$ 和 $T(\omega)$ 分别为单元结构对入射光的反射率和透射率; $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 分别为反射系数和透射系数; $\omega$ 为角频率。

依据等效媒质理论,入射进来的电磁波电分量及磁分量将在所构造的超材料单元结构中发生电磁谐振,在不断尝试参数匹配和优化设计下,最终可以使得电磁波在吸收器入射面处的阻抗值与自由空间的阻抗达到完全匹配,从而使得反射率得以有效降低;而在电磁波的出射面处,应尽可能使透射率接近于零。太赫兹吸收器的底层结构通常为具有一定厚度的金属层,可隔绝入射光波透射,使得吸收器的透射率无限接近零<sup>[10]</sup>。同时降低透射率和反射率,这样才能使太赫兹超材料吸收器的吸收率在当前结构中达到最大值。

因此,(1)式中的 $T(\omega)$ 可忽略不计,得到吸收率更为简单且更接近实际情况的计算公式为

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

本文提出的 T 形结构超材料吸收器,实现了对太赫兹段入射光波的近完美单频吸收。仿真结果表明,所设计的超材料吸收器的结构单元在上述最优尺寸条件下,在 2.024 THz 频率处实现了共振,吸收器吸收率可达 99.999%,表现出优秀的吸收性能,具体吸收率曲线如图 3 所示。

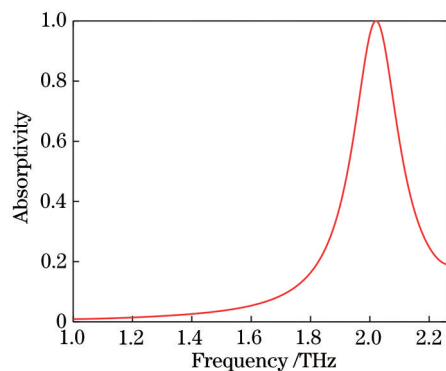


图 3 T 形吸收器的吸收曲线

Fig. 3 Absorption curve of T-shaped absorber

借助电流分布对上述吸收器的吸收性能进行原理分析。图 4(a)所示为底层金属膜上的电流分布,图 4(b)所示为顶层 T 形结构上的电流分布。对比可知,底层和顶层结构中产生的电流的方向相

反,而这种反向的平行电流能够形成一个电流环,电流环使得太赫兹超材料吸收器的磁偶极子共振模式被激发出来,从而产生磁场<sup>[11]</sup>。磁场的方向可利用右手定则加以判断。另外,此磁场与入射光波

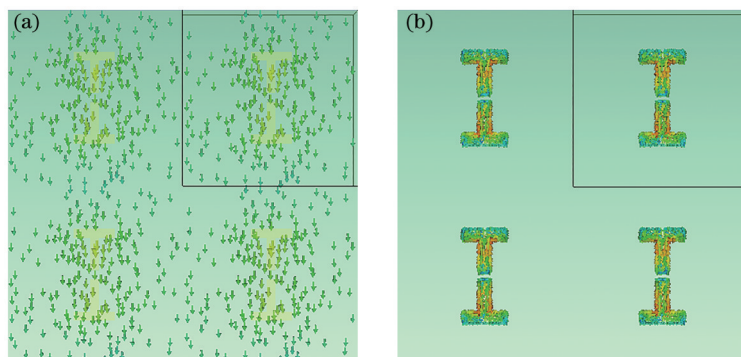


图 4 T形吸收器中的电流分布图。(a)底层电流分布;(b)顶层电流分布

Fig. 4 Current distributions of T-shaped absorber. (a) Bottom current distribution; (b) top current distribution

根据等效电路模型理论可知,T形结构太赫兹超材料吸收器的谐振频率可表示为

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC/2}} \propto \frac{1}{l}, \quad (3)$$

式中: $C$ 和 $L$ 分别表示吸收器等效电路结构中的等效电容及等效电感; $l$ 为金属结构的有效长度。进一步得出太赫兹超材料吸收器的谐振频率为

$$f_m \propto \frac{1}{l}. \quad (4)$$

由此可知,太赫兹超材料吸收器的谐振频率仅与顶层金属结构的长短有关,且成反比,而与中间层介质的厚薄参数无关。

为了验证上述理论,图5给出了当中间层介质厚度固定不变时,T形结构超材料吸收器的谐振频率随顶层金属T结构横向长度变化的规律。

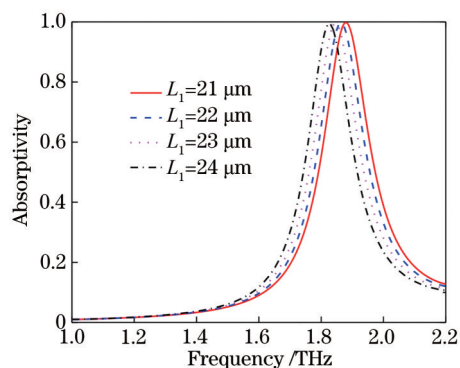


图 5 T形吸收器的谐振频率随 $L_1$ 的变化

Fig. 5 Resonance frequency of T-shaped absorber versus  $L_1$

由图5仿真结果可知,T形结构太赫兹超材料吸收器的谐振频率确实与顶层金属结构的长度成

的磁场相互作用,形成磁通耦合,从而导致入射太赫兹波被太赫兹超材料构成的吸收器所吸收<sup>[12]</sup>。整个过程表明,吸收器吸收峰值产生的深层机理源于磁共振响应。

反比,即谐振频率随着 $L_1$ 的减小而出现蓝移。

## 2.2 极化不敏感T形结构吸收器的设计和仿真

上述T形结构虽然接近完美吸收,但是由于非对称结构,其具有极化敏感特性<sup>[13]</sup>。基于此,对上述结构进行了改善,提出了图6所示的T形结构吸收器。图7仿真了此结构吸收器在横电(TE)模式和横磁(TM)模式下的吸收性能随极化角度( $\theta$ )的变化情况。

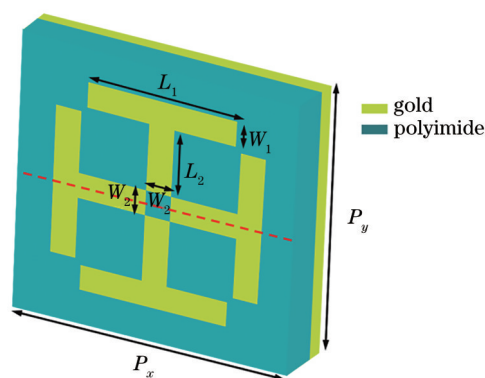


图 6 极化不敏感T形结构吸收器的结构图

Fig. 6 Structural diagram of polarization-insensitive T-shaped absorber

由图7仿真结果可知,结构单元呈几何旋转对称的太赫兹超材料吸收器具有极化不敏感特性<sup>[14]</sup>。

对上述结构吸收器进行参数优化,可使得此极化不敏感T形结构吸收器在1.722 THz处实现吸收率达99.98%的入射电磁波吸收性能,吸收率曲线图如图8所示。

借助CST中的电场分布分析,发现在TE模式和TM模式下,此极化不敏感T形结构吸收器的吸

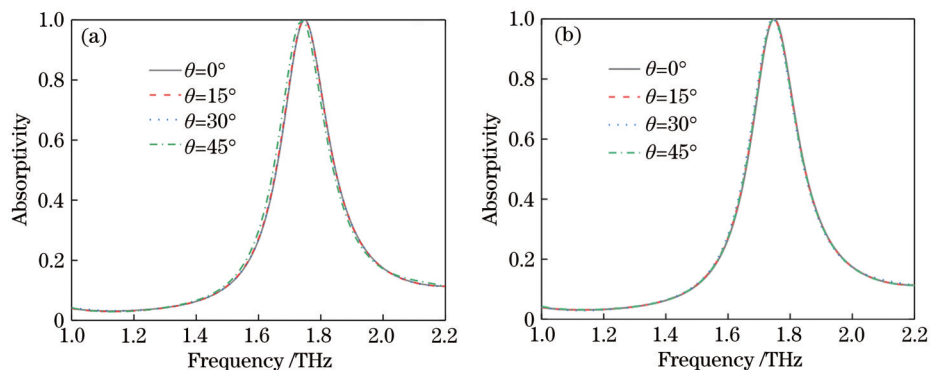


图 7 不同模式下极化角度对吸收性能的影响。(a)TE 模式;(b)TM 模式

Fig. 7 Influences of polarization angle on absorption performance in different modes. (a) TE mode; (b) TM mode

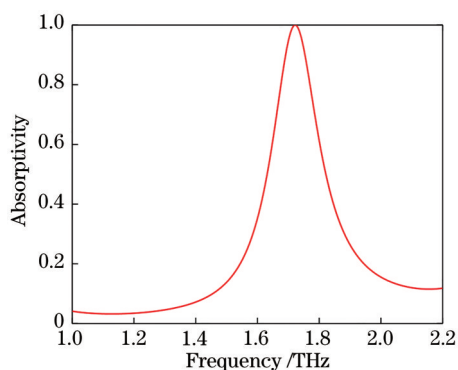


图 8 极化不敏感 T 形结构吸收器的吸收率曲线

Fig. 8 Absorptivity of polarization-insensitive T-shaped absorber

波机理仍然源于顶层与底层反向平行电流形成的电流环引起的磁共振响应,如图 9 所示。

同样,为了确定超材料结构对入射太赫兹波吸收率及谐振频率的影响,当中间层介质厚度为一定值时,图 10 给出了极化不敏感 T 形超材料吸收器的吸收曲线随顶层金属结构长度变化的规律。

由图 10 可知,极化不敏感 T 形结构太赫兹超材料吸收器的谐振频率仍然与顶层金属结构的长度成反比,即谐振频率随金属结构长度的减小而变大,随金属结构长度的增大而变小。

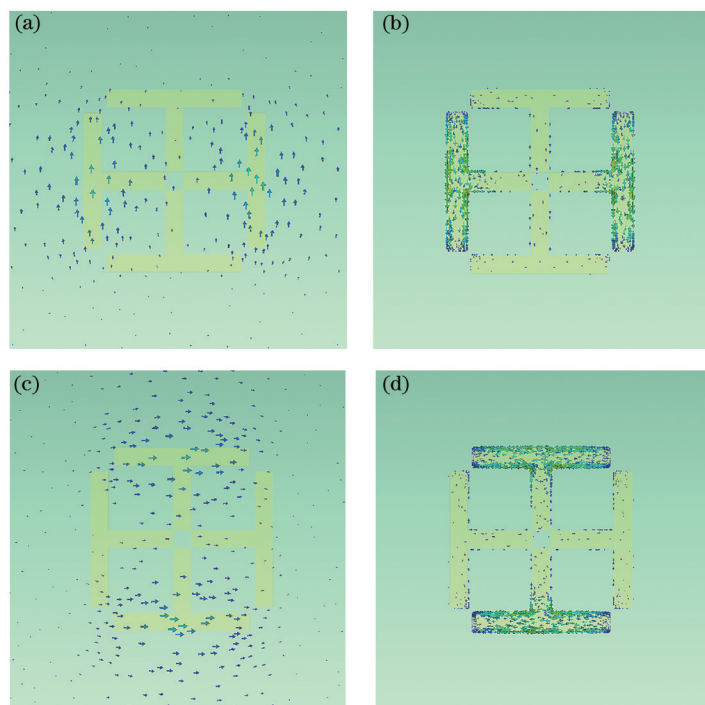


图 9 极化不敏感 T 形吸收器在不同模式下的电流分布。(a)TE 模式,底层电流分布;(b)TE 模式,顶层电流分布;

(c)TM 模式,底层电流分布;(d)TM 模式,顶层电流分布

Fig. 9 Current distributions of polarization-insensitive T-shaped absorber in different modes. (a) Bottom current distribution in TE mode;

(b) top current distribution in TE mode; (c) bottom current distribution in TM mode; (d) top current distribution in TM mode

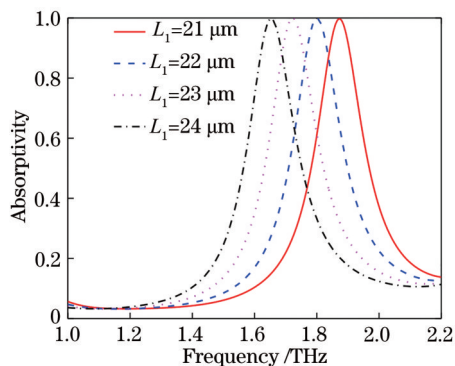


图 10 极化不敏感 T 形吸收器的谐振频率随  $L_1$  的变化  
Fig. 10 Resonant frequency of polarization-insensitive T-shaped absorber versus  $L_1$

### 2.3 可调频率 T 形结构吸收器的设计和仿真

为了进一步扩大 T 形结构吸收器的适用频率范围<sup>[15]</sup>, 增加其使用灵活性, 在上述极化不敏感 T 形吸收器单元结构中嵌入了光敏半导体硅材料, 结构如图 11 所示。此吸收器的相关参数与上述极化不敏感 T 形结构吸收器的基本参数一致, 主要差别在于新加入的半导体硅位于顶层横向金属条的中间位置, 宽度与厚度与横向金属条的相关参数相同, 长度  $W_3 = 6 \mu\text{m}$ 。利用半导体硅在不同泵浦光

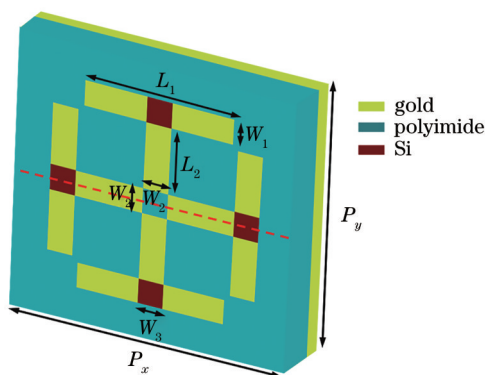


图 11 可调频率 T 形吸收器的结构图  
Fig. 11 Structural diagram of frequency-adjustable T-shaped absorber

照射下电导率不同的特性<sup>[16]</sup>, 实现了 T 形结构频率可调的超材料吸收器的设计。

半导体硅具有不同的光敏特性, 可借助外部的泵浦光源进行调控: 若没有泵浦光源照射, 硅电导率为 0; 若泵浦光源的照射强度不断增强, 硅的电导率 ( $S_{\text{Si}}$ ) 可达  $3 \times 10^5 \text{ S/m}$ <sup>[17]</sup>。因此, 随着泵浦光照强度的不断增强, 半导体硅将由绝缘状态慢慢过渡到导通状态, 变相改变了金属结构的长度, 从而导致谐振频率变化, 这样就达到了太赫兹超材料吸收器频率可调的目的<sup>[18-20]</sup>。

当泵浦光束波长为 0 时, 半导体硅处于绝缘状态, 电导率为 0, 由 CST 仿真可知, 此时该吸收器在 1.556 THz 处实现了谐振吸收, 吸收率可达 99.64%; 当泵浦光束波长为 800 nm 时, 半导体硅处于导通状态, 电导率可达  $3 \times 10^5 \text{ S/m}$ , 由 CST 仿真可知, 此时该吸收器在 1.648 THz 处实现了谐振吸收, 吸收率可达 99.92%。除此之外, 图 12 也显示了当硅的电导率处于中间值时吸收谱的变化情况。

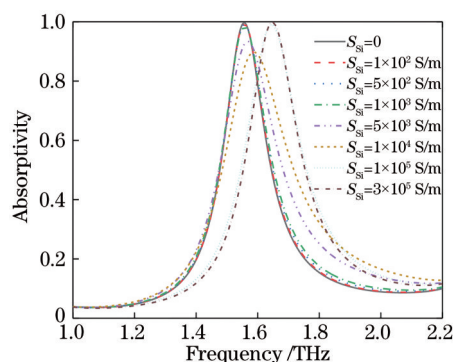


图 12 采用不同波长的激光泵浦时吸收器动态可切换的吸收谱

Fig. 12 Dynamically switchable absorption spectra of absorber pumped by lasers with different wavelengths

由图 12 可以清楚地看到, 当泵浦光束照射于吸收器结构表面时, 硅的电导率发生变化, 该吸收器在不改变结构的前提下实现了频率的移动。

## 3 分析与讨论

前文已详细介绍了 T 形结构吸收器的三种形态及吸波效果, 具体性能特点如表 1 所示。

表 1 三种 T 形吸收器的性能对比

Table 1 Performance comparison of three kinds of T-shaped absorbers

Terahertz absorber structure	Absorptivity / %	Polarization insensitive	Frequency adjustable
T-shaped structure	99.99	No	No
Polarization-insensitive T-shaped structure	99.98	Yes	No
Frequency-adjustable T-shaped structure	99.64	Yes	Yes

综上所述,第二种“极化不敏感 T 形结构吸收器”基于第一种“T 形结构吸收器”,对结构和功能进行了改善,在保持高吸收率的基础上,实现了结构的高度对称,从而具有极化不敏感特性;第三种“T 形结构频率可调吸收器”基于第二种“极化不敏感 T 形结构吸收器”,进行了优化,通过加入光敏块,对太赫兹波的吸收频率可调,适用范围得到拓展。

## 4 结 论

提出了一种 T 形结构的太赫兹超材料吸收器,其吸收率可达 99.99% 以上,接近完美吸收。借助等效电路模型和 CST 软件中的电场分布,研究了谐振频率与金属结构长度的关系及吸波机理等。为了克服上述 T 形结构太赫兹超材料吸收器的偏振敏感特性,扩展应用范围,又提出了极化不敏感 T 形吸收器,在保持高吸收率的基础上,利用高度对称性实现了极化不敏感。最后,通过在极化不敏感 T 形吸收器中嵌入光敏材料半导体硅,实现了频率可调,进一步扩大了此吸收器的适用频率范围,完善了吸收性能。所提结构可应用于宽带及多带太赫兹吸收器中,具有广泛的应用范围。

## 参 考 文 献

- [1] Wang G D. The design of electromagnetic metamaterials and its absorption characteristics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.  
王国栋. 电磁超材料的设计及其吸波性能的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [2] Zhang M, Yan F P, Du X M, et al. Design and analysis of electromagnetically induced transparency in THz multiband[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0314001.  
张敏, 延凤平, 杜雪梅, 等. 太赫兹多波段的电磁诱导透明设计与分析[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0314001.
- [3] Lu C Y, Li Y P, Yuan Y F, et al. Ultrasensitive biochemical detection by employing two-dimensional  $Ti_3C_2T_x$  MXene nanosheets[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 091601.  
陆彩燕, 李勇萍, 袁玉峰, 等. 二维  $Ti_3C_2T_x$  MXene 纳米薄层用于超灵敏等离子体生化传感的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 091601.
- [4] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [5] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [6] Wang C S, Jiang D F, Jiang X W. Polarization independent high absorption efficiency wide absorption bandwidth metamaterial absorber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 031601.  
王超素, 江达飞, 江孝伟. 偏振无关高吸收效率宽吸收带宽超材料吸收器[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 031601.
- [7] Ozbey B, Altintas A, Demir H V, et al. An equivalent circuit model for nested split-ring resonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(10): 3733-3743.
- [8] Wang B X. Study on the mechanisms of terahertz metamaterial absorbers and its application[D]. Changsha: Hunan University, 2015.  
王本新. 太赫兹超材料吸收器的机理及应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [9] Wang J L, Wang X. Research on terahertz metamaterial absorber sensor based on I-shaped resonant structure[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(7): 961-966.  
王俊林, 王鑫. 基于 I 型谐振结构的太赫兹超材料吸收体传感器研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(7): 961-966.
- [10] Meng Q L, Zhang Y, Zhang B, et al. Characteristics of optically tunable multi-band terahertz metamaterial absorber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 101603.  
孟庆龙, 张艳, 张彬, 等. 光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的特性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 101603.
- [11] Li A Y, Liu F S, Wang M, et al. Terahertz multi-frequency absorbers based on metamaterials[J]. Laser Journal, 2019, 40(4): 28-30.  
李爱云, 刘凤收, 王猛, 等. 基于超材料的太赫兹波段多频吸收器[J]. 激光杂志, 2019, 40(4): 28-30.
- [12] Chen J, Yang M S, Li Y D, et al. Tunable terahertz wave broadband absorber based on metamaterial[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(24): 247802.  
陈俊, 杨茂生, 李亚迪, 等. 基于超材料的可调谐的太赫兹波宽频吸收器[J]. 物理学报, 2019, 68(24): 247802.
- [13] Grant J, Ma Y, Saha S, et al. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber[J]. Optics Letters, 2011, 36(17): 3476-3478.
- [14] Fang B, Li B Y, Peng Y D, et al. Polarization-

- independent multiband metamaterials absorber by fundamental cavity mode of multilayer microstructure [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, 61(10): 2385-2391.
- [15] Li D M, Yuan S, Yang R C, et al. Dynamical optical-controlled multi-state THz metamaterial absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0816001.  
李达民, 袁苏, 杨荣草, 等. 动态光调控多态太赫兹超材料吸收器[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0816001.
- [16] Tong Y Q, Wang S Y, Song X X, et al. Multi-band tunable terahertz absorber based on metamaterial[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(6): 735-741.  
佟艳群, 汪诗妍, 宋效先, 等. 基于超材料的多频带可调谐太赫兹吸收器[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(6): 735-741.
- [17] Yang S, Yuan S, Wang J Y. Light-excited and switchable dual-band terahertz metamaterial absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0216001.  
杨森, 袁苏, 王佳云. 一种光激发可切换的双频太赫兹超材料吸收器 [J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0216001.
- [18] Cheng Y Z, Gong R Z, Zhao J C. A photoexcited switchable perfect metamaterial absorber/reflector with polarization-independent and wide-angle for terahertz waves[J]. *Optical Materials*, 2016, 62: 28-33.
- [19] Cheng Y Z, Zuo X, Huang M L, et al. Design of a photo-excited broadband tunable terahertz absorber [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(1): 97-102.  
程用志, 左轩, 黄木林, 等. 光驱动宽频带可调谐太赫兹吸波器设计[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(1): 97-102.
- [20] Yin S, Zhu J F, Xu W D, et al. High-performance terahertz wave absorbers made of silicon-based metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(7): 073903.