

激光与光电子学进展

可调谐极化不敏感太赫兹吸收器的设计

于新颖*, 杨森, 樊东燕

山西工程科技职业大学, 山西 晋中 030619

摘要 太赫兹吸收器广泛应用于军事装备及传感仪器等研究领域,因此,提出了一种四重对称结构的极化不敏感太赫兹超材料吸收器,并通过改变结构尺寸以及电流分布分析了该结构的吸收机理及影响因素。实验结果表明,该吸收器的谐振频率处于太赫兹频段且吸收率可达到 99.98%。为了扩大该太赫兹吸收器的应用范围,进一步提出了两种频率可调的极化不敏感太赫兹吸收器。电磁仿真软件 CST 的仿真结果表明,该太赫兹超材料吸收器的吸收率较高、频率调节性能较好且对极化角度不敏感,具有较大的应用研究意义。

关键词 材料; 超材料; 太赫兹吸收器; 极化不敏感; 频率可调

中图分类号 O441

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0316004

Design of Tunable Polarization Insensitive Terahertz Absorber

Yu Xinying*, Yang Sen, Fan Dongyan

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

Abstract Terahertz absorbers can be widely used in research fields such as military equipment and sensing instruments. Therefore, a polarization-insensitive terahertz metamaterial absorber with a fourfold symmetrical structure is proposed, and the absorption mechanism and influencing factors of the structure are analyzed by changing the structure size and current distribution in this paper. Experimental results show that the resonance frequency of the absorber is in the terahertz frequency band and the absorption rate can reach 99.98%. In order to make the application range of the terahertz absorber wider, two polarization-insensitive terahertz absorbers with adjustable frequency are further proposed. The simulation results of the electromagnetic simulation software CST show that the terahertz metamaterial absorber has high absorption rate, good frequency adjustment performance, and is insensitive to polarization angle, which has great application research significance.

Key words materials; metamaterial; terahertz absorber; polarization insensitive; frequency adjustment

1 引言

不同于自然存在的常规材料,超材料是人工设计出来的一种具有特殊结构、材质和尺寸的复合型材料,具有更优越的电磁属性和吸波性能。随着超材料研究的不断进步和发展,越来越多的先进设备

及仪器应用在了人们的生产生活以及军事航天等领域中^[1]。作为一种依赖超材料电磁谐振特性制作的功能器件,超材料吸收器可对入射光波实现更高效甚至接近百分之百的完全吸收。

目前,对于超材料吸收器的研究主要集中在太赫兹超材料吸收器方面,即待研究吸收器的吸波对

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-08-16; 录用日期: 2021-08-23

基金项目: 山西省自然科学基金(201801D221164)、山西省优秀研究生创新项目(2019BY015)

通信作者: *903909480@qq.com

象频率集中在 0.1~10 THz 范围内。太赫兹波段广泛存在于生物医学、无线通信及无损检测等领域^[2], 因此, 对太赫兹吸收器的研究具有很大的应用价值。如果能设计合理的太赫兹超材料吸收器, 甚至可以对入射电磁波实现百分百近完美吸收, 该特性是由天然材料制成的吸收器不可比拟的。Landy 等^[3-4]开创了超材料吸收器的三层结构并对该结构进行了不断优化, 设计出了第一款极化不敏感太赫兹吸收器。近年来, 针对太赫兹超材料吸收器的研究, 人们提出了多种单频、多频甚至宽频及可调频的结构。如 Wen 等^[5]设计了一种双带太赫兹吸收器结构, 袁晨等^[6]利用石墨烯实现了宽带且频率可调的太赫兹吸收器, 李辉等^[7]借助混合石墨烯-二氧化钒完成了宽带的动态调控, 潘晓航等^[8]利用亚波长的柔性可弯曲超材料实现了高性能吸收器的设计。因此, 对于太赫兹吸收器的吸收性能、可调灵活性及极化不敏感性等方面的研究具有重要意义。

为了提高吸收器对太赫兹波的吸收性能, 增加其灵活性, 本文提出了三种高效吸收的太赫兹超材料吸收器结构。先提出了一种四重对称结构的太赫兹超材料吸收器, 在极化不敏感的前提下保证了其接近完美的吸收率。为了使超材料吸收器具有更好的灵活性, 在前者的基础上借助光敏元件半导体硅和锗, 设计了两种具有高吸收率且频率可调的太赫兹吸收器。仿真结果表明, 这两种频率可调的太赫兹吸收器吸收率均大于 99%。

2 设计原理及结构

设计的三种太赫兹超材料吸收器的结构单元均由三部分构成, 分别为顶层四重对称金属结构、中间聚合物介质层和底层防透射金属膜。在确定结构尺寸的过程中, 主要借助电磁仿真软件 CST 对各吸收器进行参数调试和效果仿真, 并将吸收率作为首要考虑指标。原因是太赫兹吸收器的吸收率是最能直观反映吸收器结构参数是否合适的一个重要指标^[9], 吸收率越高, 表明吸收器的吸波效果越好; 吸收率越低, 表明相关参数的设置不合理。吸收率可表示为

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

式中, ω 为角频率, $R(\omega)$ 和 $T(\omega)$ 分别为入射光波照射到吸收器单元结构时的反射率和透射率, $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 分别为反射系数和透射系数。

目前设计的吸收器底层多为较厚的金属膜, 能有效隔绝入射光波的透射现象, 可认为此类吸收器的透射率 $T(\omega)$ 无限接近于 0^[10]。此外, 根据等效媒质理论, 通过调整参数、优化设计, 使吸收器入射处的阻抗值与自由空间阻抗值达到完全匹配, 有效降低反射率, 从而得到最优的结构参数和吸收率, 此时, 可将(1)式修正为

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

2.1 四重对称极化不敏感太赫兹吸收器

四重对称极化不敏感太赫兹吸收器的结构如图 1 所示, 其中, E 为电场方向, H 为磁场方向, K 为波矢方向。在 CST 中不断调整参数、优化设计, 得到的最优结构参数: 底层材质为金, 电导率为 4.09×10^7 S/m, 横切面形状为正方形, 即切面边长 $P_x = P_y = 120 \mu\text{m}$, 厚度 $t_1 = 2 \mu\text{m}$; 中间层为一类聚合物, 损耗正切值为 0.057, 相对介电常数为 3.5, 厚度 $t_2 = 10 \mu\text{m}$; 顶层材质为金, 电导率及厚度与底层参数一致。顶层四重对称结构中, 横向长度 $L_1 = 46 \mu\text{m}$, 横向宽度 $W_1 = 6 \mu\text{m}$, 纵向长度 $L_2 = 22 \mu\text{m}$, 纵向宽度 $W_2 = 6 \mu\text{m}$ 。

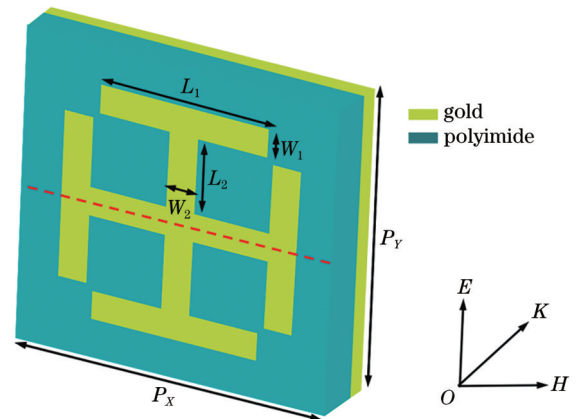


图 1 四重对称极化不敏感太赫兹吸收器的结构

Fig. 1 Structure of fourfold symmetrical polarization-insensitive terahertz absorber

2.2 基于光敏硅的可调谐太赫兹吸收器

对上述四重对称极化不敏感太赫兹吸收器进行改进, 加入半导体硅^[11]构成了基于光敏材料半导体硅的可调谐太赫兹超材料吸收器, 其结构单元如图 2 所示。在 CST 中不断调整参数、优化设计, 得到的最优结构参数: 新加入的硅模块长度 $L_3 = 8 \mu\text{m}$, 宽度 $W_3 = 6 \mu\text{m}$, 其余数值与上述四重对称结构中的对应参数相同。

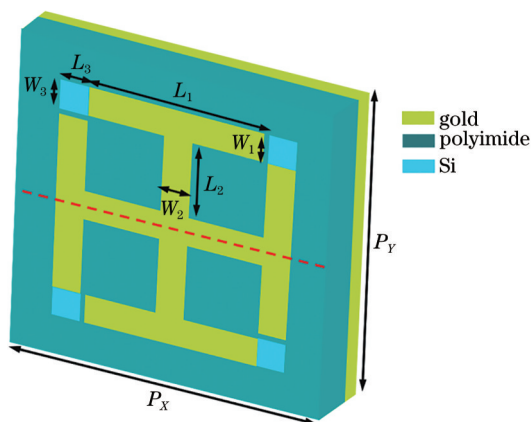


图 2 基于光敏硅的可调谐太赫兹吸收器结构

Fig. 2 Structure of the tunable terahertz absorber based on photosensitive silicon

2.3 基于硅和锗的可调谐太赫兹吸收器

为了进一步提高调频的灵活性、扩大频率应用范围,对前两种太赫兹吸收器结构进行优化^[12]。加入光敏材料,构成基于硅和锗的可调谐太赫兹超材料吸收器,其结构单元如图 3 所示。在 CST 中不断

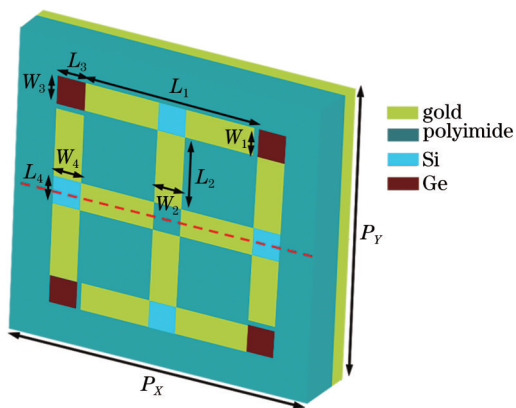


图 3 基于硅和锗的可调谐太赫兹吸收器结构图

Fig. 3 Structure of the tunable terahertz absorber based on silicon and germanium

调整参数、优化设计,得到的最优结构参数:新加入的锗模块长度 $L_4 = 6 \mu\text{m}$, 宽度 $W_4 = 6 \mu\text{m}$, 顶层金属结构的横向长度 $L_1 = 48 \mu\text{m}$, 其余数值与上述结构中的对应参数相同。

3 实验结果与分析

3.1 四重对称极化不敏感太赫兹吸收器

在四重对称极化不敏感太赫兹吸收器的最优结构参数下进行 CST 仿真,得到该结构的吸收性能曲线如图 4 所示。仿真结果表明,该太赫兹吸收器具有很好的吸收性能,在 1.7476 THz 处实现谐振吸收的吸收率可达到 99.98%, 接近完美吸收。

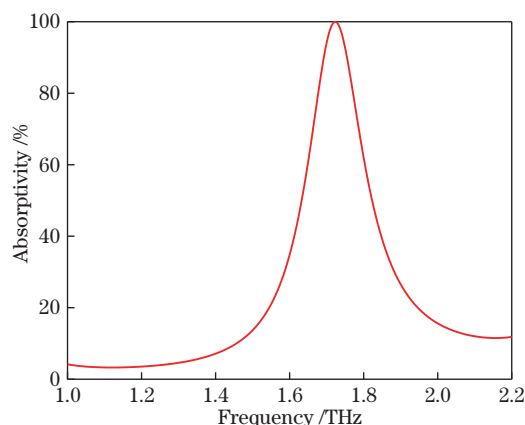


图 4 四重对称极化不敏感太赫兹吸收器的吸收率

Fig. 4 Absorptivity of fourfold symmetrical polarization-insensitive terahertz absorber

为了进一步了解吸收器的吸波机理^[13],借助 CST 中的电流分布分别在横电 (TE) 和横磁 (TM) 模式下对该吸收器进行了仿真分析。图 5(a)、图 5(b) 分别为 TE 模式下吸收器底层和顶层的电流分布,图 5(c)、图 5(d) 分别为 TM 模式下吸收器底层和顶层的电流分布。可以发现,不论是 TE 模式还 TM

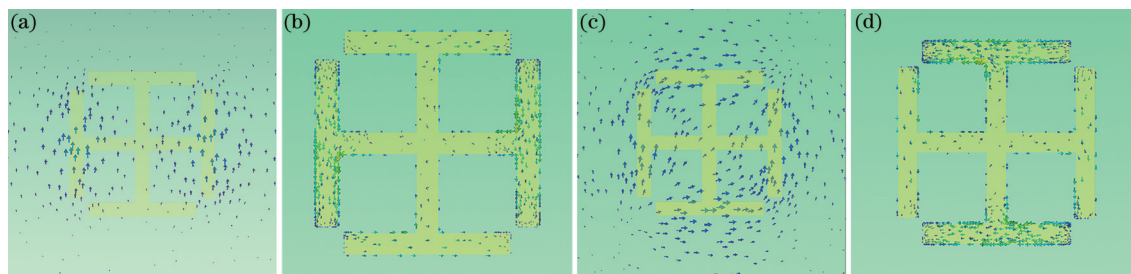


图 5 四重对称极化不敏感吸收器的电流分布。(a) TE 模式的底层电流分布;(b) TE 模式的顶层电流分布;(c) TM 模式的底层电流分布;(d) TM 模式的顶层电流分布

Fig. 5 Current distribution of fourfold symmetrical polarization-insensitive terahertz absorber. (a) Bottom current distribution of TE mode; (b) top current distribution of TE mode; (c) bottom current distribution of TM mode; (d) top current distribution of TM mode

模式,底层和顶层电流的方向均相反,原因是该吸收器的吸波机理源于磁共振响应^[14]。

由等效电路模型理论可知,太赫兹吸收器的谐振频率可近似表示为^[15]

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

式中, L 和 C 分别为吸收器等效电路中的等效电感和等效电容, l 为金属结构的有效长度, \propto 为正比符号。可以发现,吸收器吸波谐振频率点仅与顶层结构的长度有关且成反比。为了验证该结论,仿真了仅顶层金属结构长度发生变化时,吸收器谐振频率的变化情况,结果如图6所示。可以发现,太赫兹吸收器的谐振频率与顶层金属结构的长度成反比,即随着顶层金属长度的增长,谐振频率出现红移。

仿真验证了太赫兹吸收器吸收峰的产生机理和影响谐振频率的因素后,还需验证吸收器的极化敏感性^[16],即当极化角 φ (入射电磁波与 Z 轴的夹角为固定角度时,入射波在 XOY 面上的投影与 X 轴的夹角)发生变化时,吸收性能是否会发生明显变化。由于该吸收器结构呈高度对称性,理论上是极化不

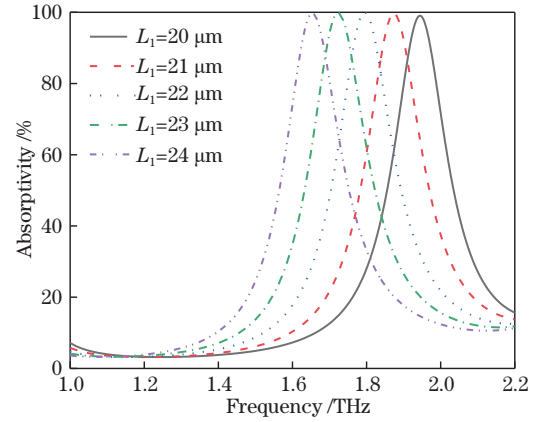


图6 太赫兹吸收器谐振频率与顶层金属横向长度的关系
Fig. 6 Relationship between the resonance frequency of the terahertz absorber and lateral length of the top metal

敏感的^[17],为了验证该理论,分别在TE模式和TM模式下进行了极化角度的变化测试,结果如图7所示。可以发现,该太赫兹吸收器的吸收性能基本不随极化角度的变化而变化,表现出了极化不敏感性,且基于光敏硅和基于硅和锗的可调谐太赫兹吸收器的吸波机理及极化敏感性均与该吸收器相同。

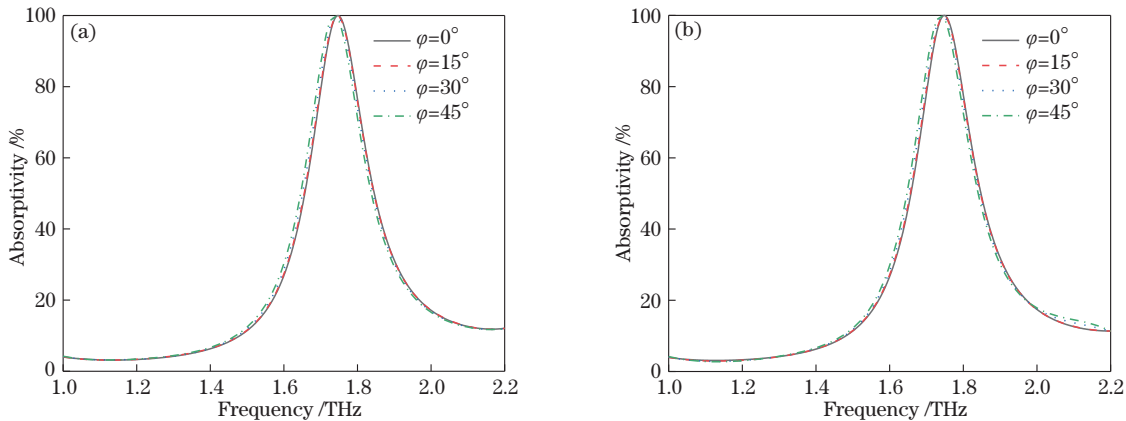


图7 不同模式下极化角度对吸收性能的影响。(a) TE模式;(b) TM模式

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

3.2 基于光敏硅的可调谐太赫兹吸收器

为了提高吸收器的灵活性,在四重对称极化不敏感太赫兹吸收器的结构基础上进行了改进,添加了光敏材料半导体硅,半导体硅电导率的变化对吸收性能的影响如图8所示。可以发现,半导体硅的电导率 δ 会随外在泵浦激光源的变化而变化,当没有外部泵浦激光照射时,硅的电导率为 0 S/m ,此时吸收器在 1.7308 THz 处实现谐振吸收,吸收率可达到 99.98% ;当外部泵浦光源存在且照射功率逐渐增强时,硅电导率可达 $3 \times 10^5 \text{ S/m}$,实现由绝缘态到

导通态的过渡^[18],此时吸收器在 1.4824 THz 处实现谐振吸收,吸收率可达到 99.52% 。仿真结果表明,电导率的变化会影响顶层金属结构开口间隙的大小,从而导致有效长度的变化和谐振频率的迁移,实现太赫兹吸收器谐振频率可调的设计目的。

3.3 基于硅和锗的可调谐太赫兹吸收器

用泵浦激光照射基于硅和锗的可调谐太赫兹吸收器,当无激光照射超材料吸收器时,硅和锗不导通,电导率均为 0 S/m ;用波长为 800 nm 的光束照射时,随着功率的不断增大,硅和锗同时被激发,

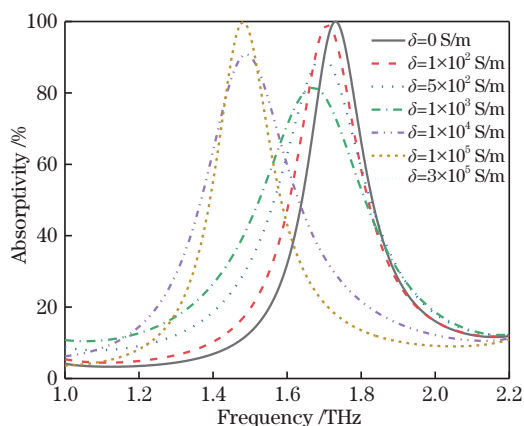


图 8 不同电导率条件下吸收器的吸收谱

Fig. 8 Absorption spectrum of the absorber under different conductivity conditions

电导率均可达 3×10^5 S/m; 用波长为 1500 nm 的光束照射时, 随着功率的不断增大, 只有锗被激发, 此时, 硅的电导率为 0 S/m, 锗的电导率可达 3×10^5 S/m^[19]。图 9 和表 1 为该结构吸收器中硅和锗电

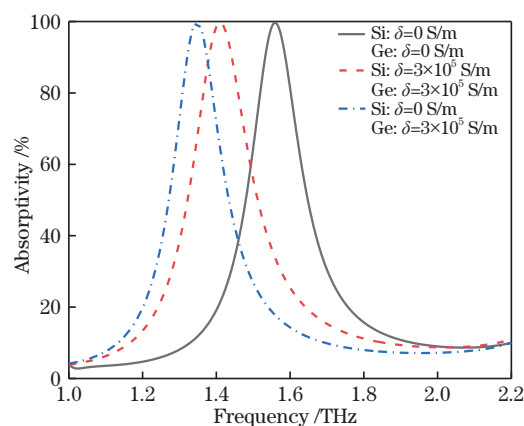


图 9 太赫兹吸收器吸收性能与半导体电导率的关系

Fig. 9 Relationship between the absorption performance of the terahertz absorber and semiconductor conductivity

导率的变化对吸收性能的影响, 可以发现, 基于硅和锗的可调谐太赫兹吸收器在保证吸收率的基础上, 能有效实现谐振频率的迁移^[20-22], 满足了同一器件在不同场合下的使用需求^[23]。

表 1 太赫兹吸收器吸收性能与半导体电导率的对应关系

Table 1 Correspondence between the absorption performance of the terahertz absorber and the semiconductor conductivity

Conductivity	Absorption rate /%	Resonant frequency /THz
Si: 0 S/m, Ge: 0 S/m	99.66	1.5592
Si: 3×10^5 S/m, Ge: 3×10^5 S/m	99.77	1.4104
Si: 0 S/m, Ge: 3×10^5 S/m	99.92	1.3468

综上所述, 实验设计的三种太赫兹超材料吸收器在接近完美吸收率的基础上, 均具有极化不敏感特性; 且通过借助半导体硅和锗, 其中两种超材料吸收器能实现频率可调, 单频吸收谐振频率点分别由一个扩展至了两个谐振点和三个谐振点, 拓宽了器件的使用频率范围。

4 结 论

提出了三种结构的太赫兹超材料吸收器, 最大吸收效率均可达 99% 以上, 接近完美吸收。为了克服单频吸收频率固定的弊端, 满足吸收器使用范围的灵活性和多样性需求, 用半导体硅和锗材料使吸收峰值谐振频率随半导体电导率的变化而变化, 由单一的单频吸收扩展成了两个和三个单频吸收谐振点, 达到了频率可调的目的且吸收效果均比较理想, 使该吸收器在吸收性能和对称结构上均具有一定优势。基于等效电路模型理论和电场分布特点, 仿真分析了谐振频率的影响因素及吸波机理, 并验证了该太赫兹吸收器的极化不敏感特性。结果表明, 该太赫兹吸收器的吸收率高、频率可调且极化

不敏感, 在探测及成像等领域具有潜在应用前景。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Zheng X B. Research on the electromagnetic response of metamaterials based on single-layer, double-layer and three-layer resonator in the terahertz band[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2018.
郑孝波. 基于单体、双体以及三体谐振器超材料在太赫兹波段的电磁响应研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2018.
- [3] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [4] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, et al. Design, theory, and measurement of a polarization insensitive absorber for terahertz imaging[J]. Physical Review

- B, 2009, 79(12): 125104.
- [5] Wen Q Y, Xie Y S, Zhang H W, et al. Transmission line model and fields analysis of metamaterial absorber in the terahertz band[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 20256-20265.
- [6] Yuan C, Tian J P, Yang R C. Graphene-based terahertz tunable broadband metamaterial absorber [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020, 34(3): 265-271.
袁晨, 田晋平, 杨荣草. 基于石墨烯的太赫兹可调谐宽带超材料吸收器[J]. 测试技术学报, 2020, 34(3): 265-271.
- [7] Li H, Yu J, Chen Z. Broadband tunable terahertz absorber based on hybrid graphene-vanadium dioxide metamaterials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0903001.
李辉, 余江, 陈哲. 基于混合石墨烯-二氧化钒超材料的太赫兹可调谐宽带吸收器[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0903001.
- [8] Pan X H, Xu H, Yu W W, et al. Flexible metasurface-based terahertz super-absorber[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(1): 50-54.
潘晓航, 许昊, 俞伟伟, 等. 柔性可弯曲人工超构材料太赫兹波超吸收研究[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(1): 50-54.
- [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] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Jiang X W, Wu H. Dual-channel narrow bandwidth metamaterial absorber[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1416002.
江孝伟, 武华. 双通道窄带宽超材料吸收器[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1416002.
- [14] 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.
- [15] Ye Y Q, Jin Y, He S L. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(3): 498-504.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [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] 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.
- [20] 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.
- [21] Zhu G, Huo Y H, Shi Y Q. Switchable broadband terahertz absorber based on temperature control[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13):

1316001.
朱广, 霍跃华, 史艳琼. 基于温度控制的可切换宽带太赫兹吸波器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1316001.
- [22] Gong J, Zong R, Li H, et al. Dynamically tunable broadband terahertz metamaterial absorber based on vanadium dioxide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0316001.
龚江, 宗容, 李辉, 等. 基于二氧化钒的太赫兹超材料动态可调宽带吸收器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0316001.
- [23] 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.