

动态光调控多态太赫兹超材料吸收器

李达民, 袁苏, 杨荣草*, 田晋平, 张文梅

山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006

摘要 基于光敏半导体材料电导率可被外部泵浦光调控的特性, 通过在嵌套的类方环单元结构中嵌入半导体材料砷化镓, 设计了一种动态光控单频/双频可切换的超材料吸收器。在此基础上, 根据不同波长的泵浦光对不同半导体材料的激发特性, 引入第二种半导体材料锗, 将第一种结构进行拓展, 提出了一种光可控的多频段超材料吸收器, 利用不同波长的泵浦光调控半导体材料的电导率, 实现了单频/双频/三频吸收状态任意切换的吸收特性。仿真结果表明, 所设计的吸收器具有偏振不敏感和宽角度入射的特性, 有望在调制器、频率选择器、探测器等领域得到应用。

关键词 材料; 太赫兹; 多态; 超材料; 吸收器

中图分类号 O441

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0816001

Dynamical Optical-Controlled Multi-State THz Metamaterial Absorber

Li Damin, Yuan Su, Yang Rongcao*, Tian Jinping, Zhang Wenmei

College of Physics & Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract Based on the characteristic that the conductivity of photosensitive semiconductor material can be controlled by external pump light, a dynamic optical-controlled single-/dual-band switchable metamaterial absorber is designed by embedding the semiconductor material of gallium arsenide into the nested square ring-like cell structure. On this basis, according to the different excitation characteristics of different semiconductor materials pumped by light with different wavelengths, the first structure is expanded by introducing the second semiconductor material of germanium, and an optical-controlled multi-band metamaterial absorber is proposed. The proposed absorber possesses the absorption characteristic of arbitrary switch among the single-/dual-/triple-band absorption states by using pump light with different wavelengths to tune the conductivities of the semiconductors. The simulation results show that the proposed absorber has the characteristics of insensitive polarization and wide-angle incidence, which is expected to be applied in modulators, frequency selectors, detectors, and so on.

Key words materials; terahertz; multi-state; metamaterial; absorber

OCIS codes 160.3918; 300.1030; 050.6624

1 引 言

近年来, 由于太赫兹波在成像、传感、探测、频率选择以及通信等方面具有巨大的应用前景, 太赫兹器件受到广泛关注^[1-7]。Tao 等^[8]提出第一个太赫兹超材料完美吸收器。Ye 等^[9]通过堆叠三层金属十字结构, 实现了一种太赫兹全向宽带吸收器。Hu 等^[10]提出了一种由两层介质分隔的三层金属结构, 实现了极化不敏感四个窄带吸收。值得注意的是, 这些吸收器制成后, 其吸收带宽也随之固定, 这在一定程度上限制了吸收器的应用。为了解决这一

问题, 一些相变材料^[11]如二氧化钒(VO_2)^[12-14], 石墨烯^[15-18], 光敏半导体^[19-22]等相继被引入到可调或可开关的太赫兹超材料吸收器中。Zhao 等^[13]提出了一种基于 VO_2 的多层叠加结构, 通过控制 VO_2 的相变, 实现了从一个宽带到另一个宽带的可切换吸收。Huang 等^[17]通过调节石墨烯的化学势, 设计了一种宽带动态可调吸收器。Zhao 等^[19]利用半导体 GaAs 贴片制作了光控超薄可调超材料吸收器。通过在金属谐振器结构中嵌入半导体材料硅(Si), Cheng 等^[20]提出了一种光激发单频/单频段可切换吸收器。Yuan 等^[21]设计了两种分别实现蓝移和红

收稿日期: 2019-11-18; 修回日期: 2019-12-23; 录用日期: 2019-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61775126)、山西省自然科学基金(201801D221164, 201801D121119)

* E-mail: sxdxyrc@sxu.edu.cn

移的单频/双频可切换吸收器。然而,上述可调或可开关的超材料吸收器大多数仅能实现单频/单频或单频/双频段的切换。为了扩展超材料吸收器的工作频段,考虑到 GaAs 比 Si 具有更高的电子迁移率、更大的禁带宽度以及更低的功耗^[22],基于文献[21]的工作和不同光敏半导体材料对不同波长泵浦光响应的特性,本文利用 GaAs 和 Ge 两种光敏半导体材料,设计了一种新型可开关的多频段超材料吸收器。

本文在吸收器单元结构中嵌入半导体材料 GaAs,采用嵌套的类方环结构实现了一种动态光控单频/双频可切换的超材料吸收器。在此基础上,将第一种结构进行拓展,将具有不同光敏特性的 GaAs 和 Ge 分别嵌入到三个嵌套类方环的间隙中,利用不同波长的泵浦光照射吸收器,实现了单频/双频/三频吸收状态间的任意切换。此外,通过分析吸收器的表面电流分布和偏振敏感及斜入射特性,研究了吸收器切换效应的机理和吸收特性。

2 仿真分析

2.1 动态光调控双态吸收器的设计和分析

为了构造可调控的多频吸收器,首先设计了一个单频/双频可开关的超材料吸收器。图 1(a)所示为其 5×5 的阵列结构示意图,图 1(b)、(c)分别为其单元结构的俯视图和侧视图。该吸收器由金属底板、聚酰亚胺介质层以及顶层金属谐振单元构成,顶

层的谐振单元由两个带有凸起嵌套的金属方环组成,中间由半导体 GaAs 相连。底板金薄膜以及顶层金图案层厚度 t_1 为 $0.2 \mu\text{m}$,电导率 $\sigma_{\text{Au}} = 4.561 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[23]。半导体 GaAs 的介电常数为 12.9,电导率可表示为 $\sigma_{\text{GaAs}} = \frac{i\epsilon_0 \omega_p^2}{\omega + i\gamma}$,其中 ω 是入射光的角频率,等离子体振荡频率 $\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m^*}}$, n 是光生载流子密度, ϵ_0 是自由空间的介电常数, γ 是阻尼系数, e 是电子电荷量, m^* 是有效载流子质量^[24]。由于载流子的密度 n 随泵浦光的功率呈比例变化,因此 GaAs 的电导率可通过外部泵浦光来调控,GaAs 的电导率对泵浦功率的依赖关系可根据文献[19]中的实验参数拟合得到: $\sigma_{\text{GaAs}} = 0.32047I^3 - 15.89563I^2 + 778.914I + 91.16367$,其中 I 为泵浦功率,单位为 mW。本文采用波长为 800 nm 的泵浦光激发 GaAs,没有光照时 GaAs 的电导率为 $100 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,随着光功率的增加,其电导率最高可到 10^5 量级^[22]。顶层谐振单元和底层金薄膜之间的聚酰亚胺介质的厚度 t_2 为 $7.5 \mu\text{m}$,介电常数为 2.9,损耗正切值为 0.017。其他优化后的结构参数如下:结构单元的周期 $p = 88 \mu\text{m}$,外方环的边长 $a = 84 \mu\text{m}$,线宽 $w_1 = 6.2 \mu\text{m}$,四个朝里的小凸起的尺寸 $d \times l_1$ 均为 $15 \mu\text{m} \times 4.7 \mu\text{m}$,内方环的边长 $b = 40 \mu\text{m}$,线宽 $w_2 = 3.8 \mu\text{m}$,四个朝外的小凸起的尺寸 $d \times l_2$ 均为 $15 \mu\text{m} \times 5.6 \mu\text{m}$,内外方环间隙处的 GaAs 块尺寸 $d \times g$ 为 $15 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$ 。

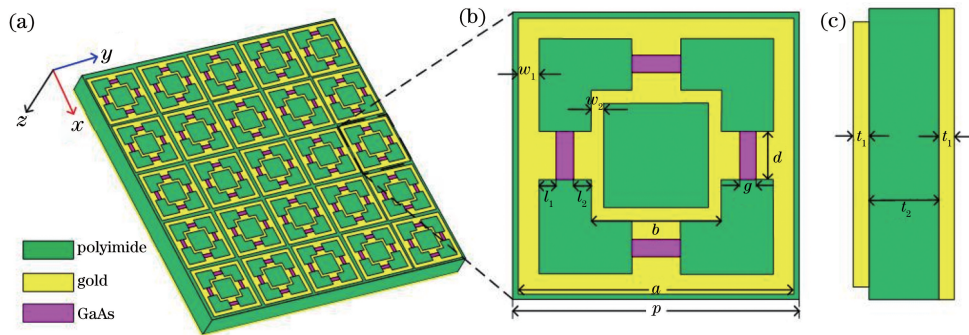


图 1 第一种吸收器的结构示意图。(a) 5×5 阵列;单元结构的(b)俯视图和(c)侧视图

Fig. 1 Schematic of the first absorber. (a) 5×5 array; (b) top view and (c) side view of unit structure

采用 CST 软件对吸收器的吸收特性进行模拟仿真。单元晶胞的 x 方向和 y 方向设为周期边界条件, x 方向为磁场方向, y 方向为电场方向,电磁波沿着 z 轴方向垂直入射到单元结构上,如图 1(a)所示。由于所提出的结构底层采用金属薄膜,电磁波无法穿透,因此其吸收率 A 可以直接由模拟获得

的反射系数计算得到: $A = 1 - |S_{11}|^2$,其中 S_{11} 是反射系数。

图 1 所示吸收器的分解结构的吸收特性如图 2 所示。从图 2(a)、(b)可以看到,当顶层谐振单元为带有四个外凸起的方环时,吸收器在 1.344 THz 处发生了共振,此时吸收率为 98.43%;当顶层为带有

四个内凸起的方环时,可在 0.544 THz 处发生共振,形成吸收率为 99.47% 的吸收峰;而当两个子结构简单组合在一起形成一个新的谐振单元时,两个方环可分别对入射电磁波产生响应,可在各自的共振频率 0.544 THz 和 1.336 THz 处产生共振,形成

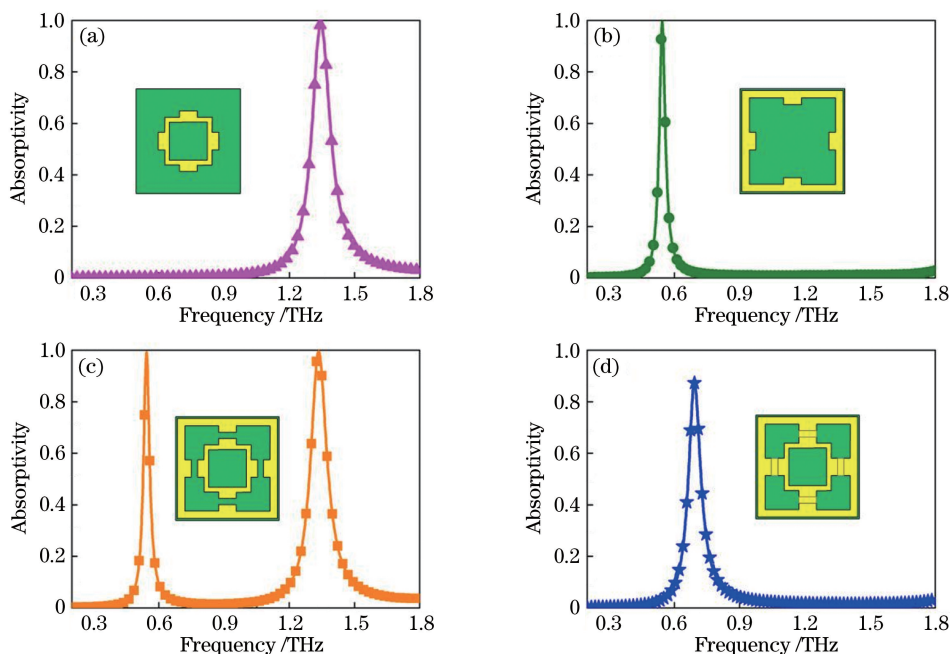


图 2 第一种吸收器的分解结构的吸收率曲线。(a)带外凸起的方环;(b)带内凸起的方环;(c)组合的两个方环;(d)通过金块连接的两个方环

Fig. 2 Absorptivity of decomposition structure of the first absorber. (a) Square ring with outer-protrusions; (b) square ring with inner-protrusions; (c) two combined square rings; (d) two square rings connected by gold blocks

基于上面的分解结构,用光敏半导体 GaAs 代替图 2(d)中的金块,设计了图 1 所示的单频/双频可开关或可调谐吸收器。当采用波长为 800 nm 的泵浦光照射吸收器表面时,随着光照功率的增强,GaAs 的电导率逐渐增大,GaAs 从绝缘态逐渐过渡到金属态,内外环逐渐连为一个整体。在不同 GaAs 电导率下,吸收器的动态吸收曲线如图 3(a)所示。可以看到,无光照时 GaAs 电导率为 $100 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,外方环和内方环独立对入射电磁波产生响应,在 0.53 THz 和 1.32 THz 处形成两个吸收峰,其吸收率分别为 98.91% 和 99.02%,这与图 2(c)的结果基本一致。在 0.53 THz 和 1.32 THz 共振频率处的表面电流分布分别如图 3(b)、(c)所示,可以看到,对于 0.53 THz 处的吸收峰,顶层表面电流主要分布在外方环,而对于 1.32 THz 处的吸收峰,顶层表面电流主要分布在内方环,并且与金属底板的电流形成反向平行电流对,这表明两个吸收峰主要源于磁共振响应。随着泵浦光的增强,GaAs 的电导率逐渐增加,双频吸收峰逐渐降低,当 GaAs 的

吸收率分别为 99.27% 和 99.59% 的双峰吸收峰,如图 2(c)所示。如果进一步用金块把图 2(c)所示的结构连接在一起,如图 2(d)所示,该连接的结构作为一个整体对电磁波产生响应,在 0.693 THz 处发生共振,形成吸收率为 87.33% 的吸收峰。

电导率继续增加到 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 时, 0.53 THz 和 1.32 THz 处的两个吸收峰消失,而在 0.686 THz 处形成了吸收率为 98.61% 的新吸收峰,完成了双峰吸收到单峰吸收的转换。0.686 THz 单频吸收时所对应的表面电流如图 3(d)所示,电流基本均匀分布在顶层谐振单元与金属底板表面,这意味着新的吸收峰源于内外方环对电磁波的共同响应。通过调控嵌入在顶层谐振单元中 GaAs 的电导率,可实现吸收器在双频和单频之间的任意切换。

2.2 动态光调控多态吸收器的设计和分析

不同特性的光敏半导体材料可被不同波长的泵浦光激发,基于此,将图 1 所示的嵌套方环结构进行拓展,设计了一种可实现三频、双频、单频三个吸收状态动态切换的多频可调谐的吸收器。拓展后的吸收器结构图如图 4 所示,新增加的半导体 Ge 的介电常数为 16.3^[24],其电导率也可以通过控制外部泵浦光的强度来调控。该结构所采用的其他材料参数与图 1 中的相同,顶层谐振单元和底层金属底板的厚度也与图 1 中的相同,优化后的结构参数如下:单

元的周期 $p = 88 \mu\text{m}$, 外方环边长 $a = 84 \mu\text{m}$, 线宽 $w_1 = 5.5 \mu\text{m}$, 中间方环边长 $b = 58 \mu\text{m}$, 线宽 $w_2 = 5 \mu\text{m}$, 内方环边长 $c = 38 \mu\text{m}$, 线宽 $w_3 = 4.5 \mu\text{m}$, 聚

酰亚胺介质的厚度 $t_2 = 7.8 \mu\text{m}$, 四个 GaAs 和四个 Ge 尺寸均为 $15 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ 。

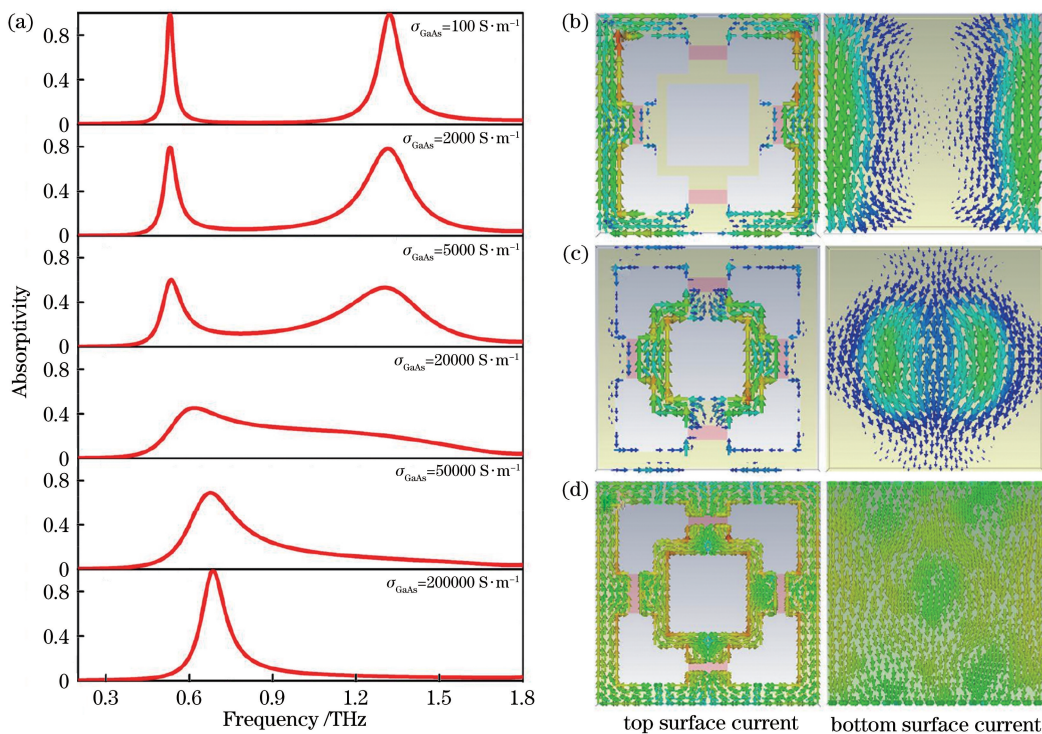


图 3 不同 GaAs 电导率下第一种吸收器的吸收曲线和表面电流分布。(a) 动态变化的吸收曲线; (b) 0.53 THz, (c) 1.32 THz, (d) 0.686 THz 处表面电流分布

Fig. 3 Absorption curves and surface current distributions of the first absorber under different GaAs conductivities. (a) Dynamic absorption curves; surface current distributions at (b) 0.53 THz, (c) 1.32 THz, and (d) 0.686 THz

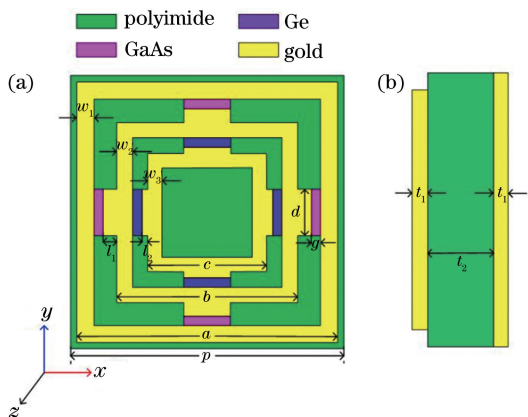


图 4 可调控多态吸收器的结构图。单元结构的 (a) 俯视图和 (b) 侧视图

Fig. 4 Schematic of tunable multi-state absorber. (a) Top view and (b) side view of unit structure

由于 GaAs 和 Ge 的光敏特性不同, 当采用不同波长的光泵浦时, 嵌入在谐振单元间的 GaAs 和 Ge 可分别处于绝缘和导通状态, 图 4 所示的吸收器可在三频/双频/单频三个吸收状态间转换, 对应的吸收曲线如图 5 所示。当无泵浦光照射时, GaAs 和

Ge 的电导率均为 $100 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, 两种半导体均处于绝缘状态, 三个方环独立地对电磁波产生响应, 故吸收频谱在 0.518, 0.906, 1.514 THz 处出现三个吸收峰, 对应的吸收率分别为 98.19%、96.93%、99.97%, 如图 5(a1)、(b1) 所示。当采用 1550 nm 波长的泵浦光照射时, 只有 Ge 被激发, 通过改变入射泵浦光的功率使 Ge 的电导率逐渐增大, 三个吸收峰逐渐转换为 0.524 THz 和 1.106 THz 处的两个吸收峰, 如图 5(a7) 所示, 所对应的吸收率分别为 97.35% 和 99.67%。值得注意的是, 在频率转换过程中, 0.5 THz 附近的吸收峰仅仅发生了很小的偏移, 而 0.906 THz 和 1.514 THz 处的吸收峰逐渐合二为一, 在 1.106 THz 处形成一个新的吸收峰。这是因为随着 Ge 电导率的增加, 里边的两个方环逐渐由断开状态连接为一个整体而对电磁波产生响应, 所以 0.906 THz 和 1.514 THz 处两个独立的吸收峰转换成 1.106 THz 处的吸收峰, 而 0.5 THz 附近的吸收峰是由最外层的方环引起的, Ge 的电导率的增加对最外层的方环几乎没有产生影响, 因此该

吸收峰几乎没有移动。当采用波长为 800 nm 的泵浦光照射时, Ge 和 GaAs 同时被激发, 假设 GaAs 和 Ge 的电导率的变化一致^[25], 随着泵浦光的增强, 当 GaAs 和 Ge 的电导率增加至 $2 \times 10^5 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 半导体块的导通使得三个方环逐渐连接成为一个整体, 从而对电磁波产生响应, 三个吸收峰逐渐转换成 0.706 THz 处的近完美吸收峰, 吸收率达到 99.91%, 如图 5 (b7) 所示。由图 5 可知, 当采用

1550 nm 波长的光照射时, 所提出的第二种吸收器可实现三频段/双频段的转换; 当采用 800 nm 波长的光照射时, 可实现三频/单频的转换。当采用不同波长的泵浦光时, 可实现双频/单频的转换, 各吸收状态之间的转换如表 1 所示。可以看出, 通过控制照射到吸收器上的泵浦光的波长和功率, 所提出的第二种吸收器可以在三频/双频/单频三种吸收状态之间任意切换。

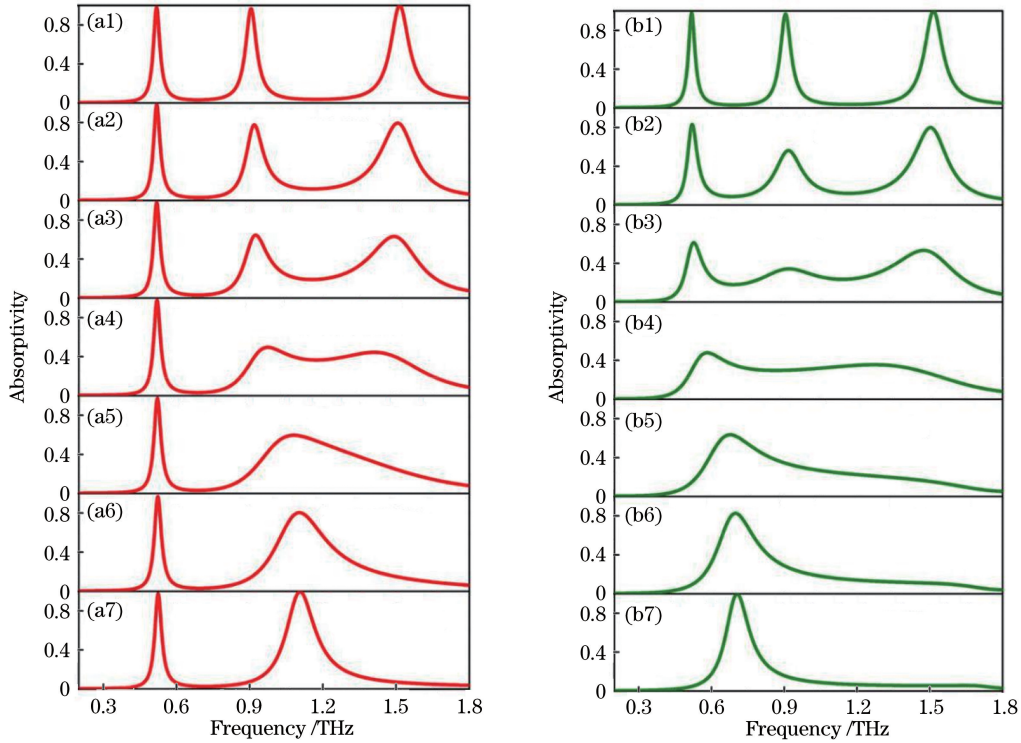


图 5 不同条件下第二种吸收器的吸收曲线。(a1) 无泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 100 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a2) 1550 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 1 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a3) 1550 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 2 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a4) 1550 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 5 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a5) 1550 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 1 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a6) 1550 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 2 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a7) 1550 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 7 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b1) 无泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 100 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b2) 800 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 1 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b3) 800 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 3 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b4) 800 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 1 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b5) 800 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 3 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b6) 800 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 6 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b7) 800 nm 泵浦光, $\sigma_{\text{GaAs}} = 2 \times 10^5 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$

Fig. 5 Absorption curves of the second absorber under different conditions. (a1) No pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 100 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a2) 1550 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 1 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a3) 1550 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 2 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a4) 1550 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 5 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a5) 1550 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 1 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a6) 1550 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 2 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (a7) 1550 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 7 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b1) no pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 100 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b2) 800 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 1 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b3) 800 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 3 \times 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b4) 800 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 1 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b5) 800 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 3 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b6) 800 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 6 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; (b7) 800 nm pump light, $\sigma_{\text{GaAs}} = 2 \times 10^5 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$

表 1 动态可调谐多态超材料波吸收器的调控特性

Table 1 Absorption properties of dynamically tunable multi-state metamaterial absorber

Wavelength of pump light	Absorption mode	Frequency /THz	Absorptivity /%
No pump	Triple-band absorption	0.518/0.906/1.514	98.19/96.93/99.97
1550 nm pump light	Triple-/dual-band absorption	0.518/0.906/1.514/0.524/1.106	98.19/96.93/99.97/97.35/99.67
800 nm pump light	Triple-/single-band absorption	0.518/0.906/1.514/0.706	98.19/96.93/99.97/99.91

图 6 给出了第二种吸收器的三个吸收状态对应的表面电流分布。从图 6(a)~(c)看到,当没有泵浦光照射时,Ge 和 GaAs 均未导通,此时在 0.518, 0.906, 1.514 THz 三个频率处出现吸收峰,外方环、中间方环、内方环与金属底板分别在三个谐振频率处对入射电磁波产生独立的磁响应,形成了反向平行电流。而当 Ge 被波长为 1550 nm 的泵浦光完全激发时, GaAs 依旧处于绝缘状态,此时在 0.524 THz 处,外方环单独对入射电磁波产生磁响

应,对应的表面电流分布如图 6(d)所示;而在峰值频率 1.106 THz 处,因为 Ge 被导通,内方环和中间方环被连接为一个整体而对电磁波产生响应,表面电流分布如图 6(e)所示。当用波长为 800 nm 的泵浦光照射时, Ge 和 GaAs 均被导通,此时在 0.706 THz 处出现一个吸收峰,对应的表面电流分布如图 6(f)所示,电流均匀分布在三个方环上,表明这三个方环被 Ge 和 GaAs 连接为一个整体结构,从而对入射电磁波产生响应。

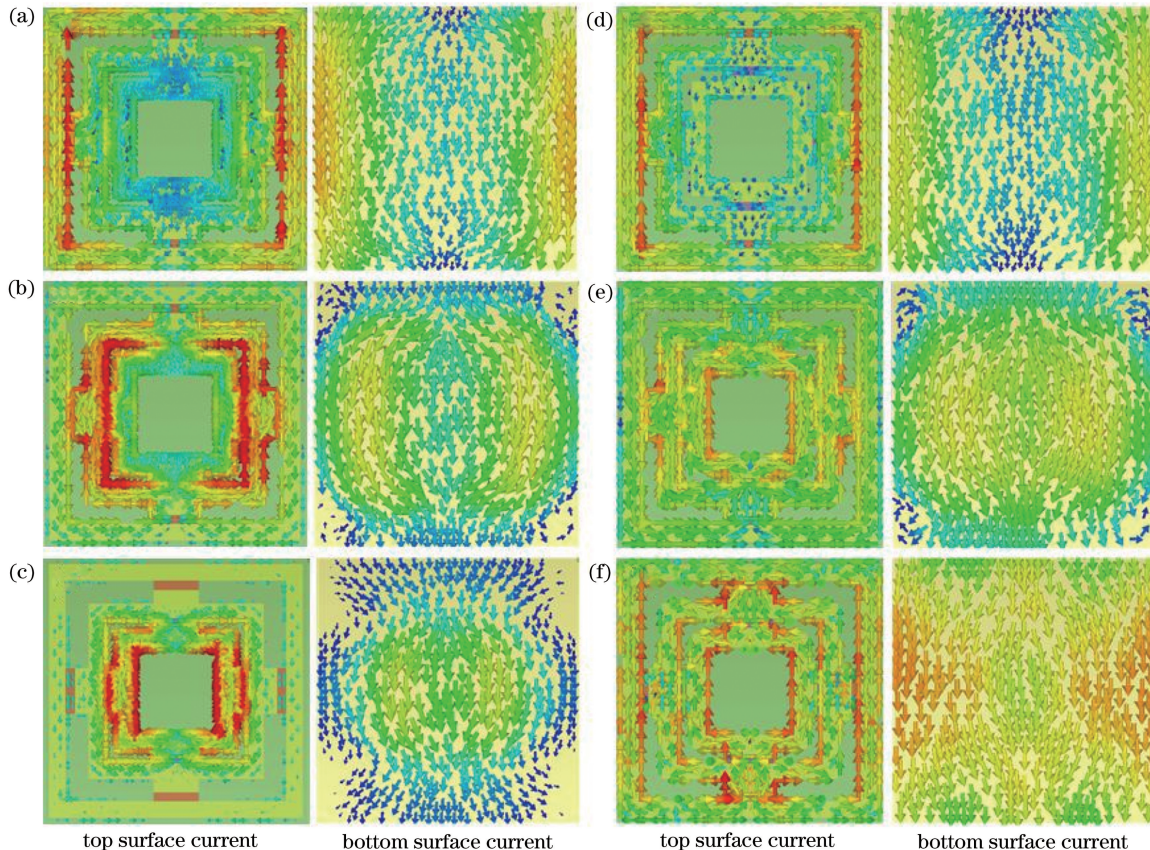


图 6 不同条件下第二种吸收器的表面电流分布。(a)无泵浦光,0.518 THz;(b)无泵浦光,0.906 THz;(c)无泵浦光,1.514 THz;(d) 1500 nm 泵浦光,0.524 THz;(e) 1500 nm 泵浦光,1.106 THz;(f) 800 nm 泵浦光,0.706 THz
Fig. 6 Surface current distributions of the second absorber under different conditions. (a) No pump light, 0.518 THz; (b) no pump light, 0.906 THz; (c) no pump light, 1.514 THz; (d) 1500 nm pump light, 0.524 THz; (e) 1500 nm pump light, 1.106 THz; (f) 800 nm pump light, 0.706 THz

另外,由于所提第二种可调多频吸收器具有四重旋转对称性的结构,因此该吸收器具有良好的极化不敏感特性,如图 7(a1)~(a3)所示,极化角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内,无论是三峰吸收,双峰吸收还是单峰吸收,吸收率都没有受到影响。图 7(b1)~(b3)和图 7(c1)~(c3)分别显示了在横电(TE)和横磁(TM)模式下入射角对吸收率的影响。可以看到,随着入射角的增大,吸收频率虽然略微蓝移,但吸收器的吸收率都保持在 90% 以上,说明所提第二种吸

收器具有良好的宽角入射特性。但是,无论是 TE 模式还是 TM 模式,入射角增大时,在工作频率以外的地方会产生额外的小吸收峰,这是因为随着入射角的增大,吸收器的某个部分发生了寄生谐振^[26]。

3 结 论

基于光敏半导体材料电导率可被外部泵浦光调控的特性,设计了一种嵌套双环的吸收器结构,通过

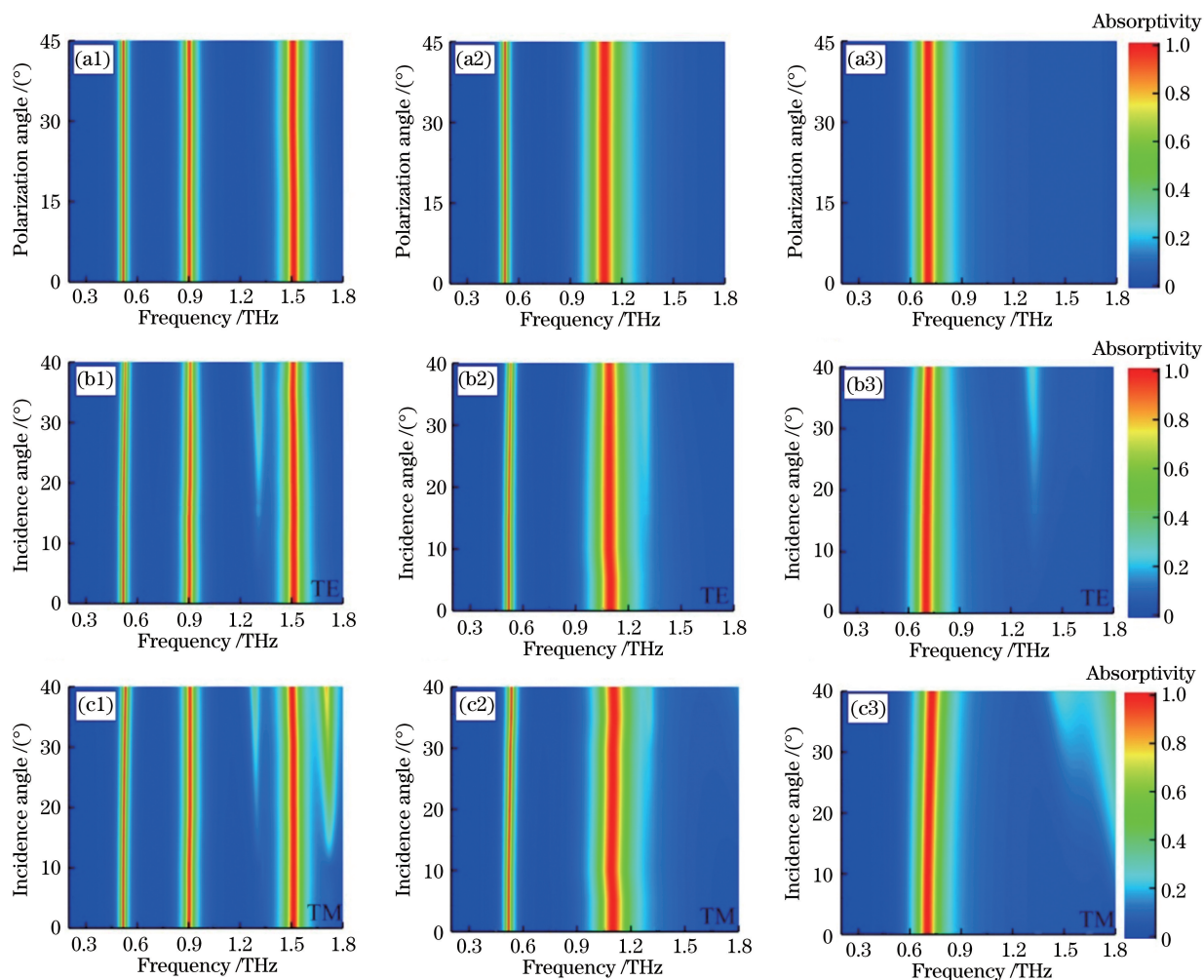


图7 第二种吸收器在不同吸收模式下的吸收率随偏振角和入射角的变化情况。(a1)(b1)(c1)三频段吸收；(a2)(b2)(c2)双频段吸收；(a3)(b3)(c3)单频段吸收

Fig. 7 Absorptivity of the second absorber versus polarization angle and incidence angle under different absorption modes. (a1)(b1)(c1) Triple-band absorption; (a2)(b2)(c2) dual-band absorption; (a3)(b3)(c3) single-band absorption

调控填充在双环间隙的 GaAs 块的电导率来调节吸收峰的共振频率和吸收强度,从而实现动态光控的单频/双频可切换的吸收特性。通过分析各频率处的表面电流分布,解释了该光调控吸收机理。在此基础上,将双环嵌套结构扩展到三环嵌套结构,根据不同波长的泵浦光对不同半导体材料的激发特性,在三环结构中嵌入了两种半导体材料 GaAs 和 Ge,通过分别调控 GaAs 和 Ge 的电导率,实现了动态光控的三频/双频/单频三态可切换的吸收特性。此外,分析了不同偏振角和入射角下所提吸收器的吸收特性,发现所提吸收器具有极化不敏感和宽角度入射的特性。研究结果为实现多频段可调控的吸收器提供了参考,所提出的多态吸收器有望在调制器、频率选择器、探测器等领域得到应用。

参 考 文 献

- [1] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices [J]. *Nature*, 2006, 444 (7119): 597-600.
- [2] Chen H T, O' Hara J F, Azad A, et al. Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(5): 295-298.
- [3] Shen N H, Massaoui M, Gokkavas M, et al. Optically implemented broadband blueshift switch in the terahertz regime [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(3): 037403.
- [4] Liu X W, Liu H J, Sun Q B, et al. Metamaterial terahertz switch based on split-ring resonator embedded with photoconductive silicon [J]. *Applied Optics*, 2015, 54 (11): 3478-3483.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Xie J W, Jing X F. Design of an all-dielectric ultra-period grating terahertz broadband perfect reflector [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2019, 30(4): 365-375.
谢靖文, 井绪峰. 全介质超周期光栅太赫兹波段宽带完美反射器设计 [J]. *光电子·激光*, 2019, 30(4): 365-375.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Wei M L, Song Z Y, Deng Y D, et al. Large-angle mid-infrared absorption switch enabled by polarization-independent GST metasurfaces [J]. *Materials Letters*, 2018, 236: 350-353.
- [12] Liu M K, Hwang H Y, Tao H, et al. Terahertz-field-induced insulator-to-metal transition in vanadium dioxide metamaterial [J]. *Nature*, 2012, 487(7407): 345-348.
- [13] Zhao Y, Huang Q P, Cai H L, et al. A broadband and switchable VO₂-based perfect absorber at the THz frequency [J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 443-449.
- [14] Huang Y Q, Li Y, Li Z P, et al. Tunable mid-infrared broadband absorber based on W/VO₂ square nano-pillar array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (3): 0316001.
黄雅琴, 李毅, 李政鹏, 等. W/VO₂方形纳米柱阵列可调中红外宽频吸收器 [J]. *光学学报*, 2019, 39 (3): 0316001.
- [15] Zhang Y, Feng Y J, Zhu B, et al. Graphene based tunable metamaterial absorber and polarization modulation in terahertz frequency [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22743-22752.
- [16] Zhao Y T, Wu B, Huang B J, et al. Switchable broadband terahertz absorber/reflector enabled by hybrid graphene-gold metasurface [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7161-7169.
- [17] Huang M L, Cheng Y Z, Cheng Z Z, et al. Design of a broadband tunable terahertz metamaterial absorber based on complementary structural graphene [J]. *Materials*, 2018, 11(4): 540-549.
- [18] Wang Y, Leng Y B, Dong L H, et al. Design of tunable metamaterial absorber based on graphene-metal hybrid structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0716001.
王越, 冷雁冰, 董连和, 等. 基于石墨烯-金属混合结构的可调超材料吸波体设计 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0716001.
- [19] Zhao X G, Fan K, Zhang J D, et al. Optically tunable metamaterial perfect absorber on highly flexible substrate [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 231: 74-80.
- [20] Cheng Y Z, Gong R Z, Cheng Z Z. A photoexcited broadband switchable metamaterial absorber with polarization-insensitive and wide-angle absorption for terahertz waves [J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 41-46.
- [21] Yuan S, Yang R C, Xu J P, et al. Photoexcited switchable single-/dual-band terahertz metamaterial absorber [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6 (7): 075807.
- [22] Yuan C, Zhao X L, Cao X L, et al. Optical control of terahertz nested split-ring resonators [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(8): 087111.
- [23] Dao R N, Kong X R, Zhang H F, et al. A tunable broadband terahertz metamaterial absorber based on the vanadium dioxide [J]. *Optik*, 2019, 180: 619-625.
- [24] Liu J X, Zhang K L, Liu X K, et al. Switchable metamaterial for enhancing and localizing electromagnetic field at terahertz band [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 13944.
- [25] Ji H Y, Zhang B, Wang G C, et al. Photo-excited multi-frequency terahertz switch based on a composite metamaterial structure [J]. *Optics Communications*, 2018, 412: 37-40.
- [26] Yao G, Ling F R, Yue J, et al. Dual-band tunable perfect metamaterial absorber in the THz range [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1518.