

一种光激发可切换的双频太赫兹超材料吸收器

杨森^{1*}, 袁苏², 王佳云²¹ 山西大学商务学院, 山西 太原 030031;² 山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006

摘要 提出了一种基于方环-金属线结构的光激发动态可切换双频太赫兹超材料吸收器。通过调节嵌入在结构间隙中的光敏硅和锗的绝缘/导通状态, 该吸收器可在不改变结构的前提下在三个双频完美吸收态之间自由切换。结果表明: 当没有光泵浦时, 该吸收器工作在 0.987 THz 和 1.767 THz 双频吸收态; 当采用 800 nm 激光泵浦时, 该吸收器可切换为 0.717 THz 和 1.444 THz 处的双频吸收; 当采用 1550 nm 激光泵浦时, 该吸收器的吸收状态可切换为 0.716 THz 和 1.767 THz 处的双频吸收。本文从等效电路、匹配阻抗和电流分布三方面解释了三种可切换的双频吸收机制, 并讨论了极化不敏感的吸收特性。

关键词 材料; 超材料; 太赫兹吸收器; 光激发; 可切换双频吸收

中图分类号 O441

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0216001

Light-Excited and Switchable Dual-Band Terahertz Metamaterial Absorber

Yang Sen^{1*}, Yuan Su², Wang Jiayun²¹ Business College of Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030031, China;² School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract In this paper, we propose a light-excited, dynamically switchable, dual-band terahertz metamaterial absorber based on a square ring-wire structure. By adjusting the insulation/conduction state of photosensitive silicon and germanium chips embedded in the gaps of the structure, the absorber can be switched freely between three dual-band perfect-absorption states without changing its structure. The results show that when there is no laser pumping, the absorber works in a dual-band absorption state at 0.987 THz and 1.767 THz; when using 800 nm laser pumping, it switches to dual-band absorption at 0.717 THz and 1.444 THz; and when using 1550 nm laser pumping, it switches to dual-band absorption at 0.716 THz and 1.767 THz. In addition, the three switchable dual-band absorption mechanism is explained from equivalent circuit, impedance matching and current distributions, and the polarization-insensitive absorption characteristics are discussed.

Key words materials; metamaterial; terahertz absorber; light excitation; switchable dual-band absorption

OCIS codes 160.3918; 300.1030; 050.6624

1 引言

自 2008 年 Landy 等^[1]首次提出超材料吸收器以来, 从微波到可见光范围的超材料吸收器受到了人们的广泛关注^[2-9]。其中, 工作在太赫兹频段的超材料吸收器因在传感器、调制器以及成像、信号检测

等方面的潜在应用而成为当前研究的热点^[10-13]。然而, 大多数超材料吸收器一旦制作成功, 其吸收强度和谐振频率就基本固定, 从而在一定程度上限制了它的实际应用范围。为了解决这一问题, 研究人员通过在设计中引入相变材料^[14-18]、石墨烯^[19-22]、光敏半导体^[23-29]等方法, 实现了对太赫兹波段超材料

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2020-07-23; 录用日期: 2020-08-12

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)

* E-mail: 475919749@qq.com

吸收器性能的动态调控。例如: Song 等^[15]和 Huang 等^[16]利用 VO₂ 的相变特性,设计了不同结构的超材料吸收器,实现了窄带和宽带的调控; Wang 等^[17-18]在结构单元中引入液晶材料,利用外电场改变液晶材料的折射率,实现了吸收器在多波段的动态调控; Xu 等^[20]提出一种基于多层不同尺寸的石墨烯带和介质交叉堆叠的吸收器结构,通过改变外部电压调节石墨烯的费米能,实现了在近完美吸收和反射两种状态之间的切换; Zhai 等^[21]设计了一种由光敏硅(Si)带和石墨烯层组合的吸收器结构,实现了吸收器的宽带可切换; Cheng 等^[23]和 Yue 等^[24]将光敏硅嵌入开口谐振环的缝隙中,分别设计了一种光调控的单频/单频可切换的超材料吸收器; Ji 等^[25]同时将光敏硅和锗(Ge)嵌入开口谐振环中,实现了一种基于复合超材料结构的光激发多频率太赫兹开关; Yuan 等^[28]通过在组合谐振器的不同分裂环处嵌入光敏硅,实现了单频/双频的可调谐太赫兹吸收器; Li 等^[29]将半导体砷化镓和锗嵌入到类方环结构中,实现了单频/双频、单频/三频吸收的动态调控。之前的工作表明,相变材料、石墨烯、

光敏半导体在可调谐太赫兹吸收器设计中具有巨大的潜力。然而,上文提到的吸收器的吸收频带较少,大多数仅能实现单频/单频、单频/双频或单频/三频吸收状态的切换,这并不能满足日益提高的实际应用需求。因此,实现在多频段、多状态之间任意切换的超材料吸收器具有重要意义。

本文设计了一种方环-金属线结构的超材料吸收器,通过在其单元结构中嵌入光敏半导体硅和锗,利用半导体硅和锗的不同光敏特性,采用不同波长的泵浦光照射吸收器,分别调控硅和锗的电导率,在 0.6~1.8 THz 范围内实现了光激发的三种双频吸收状态的任意切换。另外,本文从等效电路和匹配阻抗角度解释了该吸收器三种可切换的双频吸收机制,并分析了三个双频吸收状态对应的电流分布以及极化不敏感的吸收特性。

2 结构模型与等效电路

所设计的超材料吸收器采用三层结构:顶层的金属图案层、中间介质层、底层接地板,如图 1(a)所示。

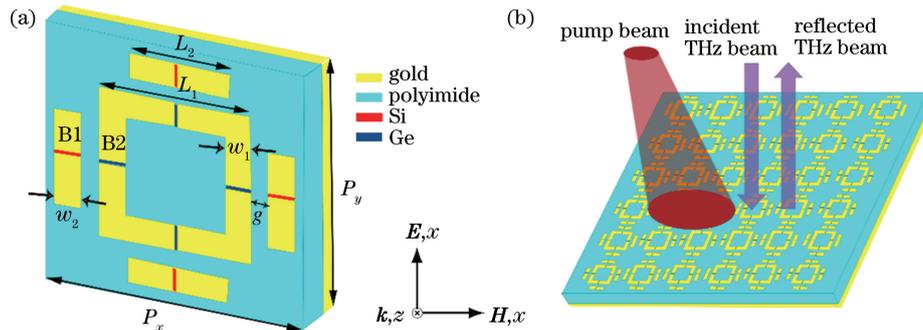


图 1 所提出的吸收器结构示意图。(a)单元结构图;(b)阵列结构图

Fig. 1 Schematics of proposed absorber structure. (a) Unit structure; (b) array structure

图 1(a)、(b)分别是吸收器中谐振器的单元结构和阵列结构示意图。谐振器单元由一个金属方环和 4 条金属线图案构成,金属图案结构中内嵌了光敏硅块 B1 和锗块 B2,底层接地板和顶层金属图案层均为有损的金薄膜,其厚度为 0.4 μm ,电导率为 4.561×10^7 S/m;光敏硅块 B1 和锗块 B2 的厚度与金薄膜相同,其尺寸参数均为 $14 \mu\text{m} \times 0.4 \mu\text{m} \times 0.4 \mu\text{m}$,硅和锗的相对介电常数分别为 11.7 和 16.3^[25]。中间介质层采用聚酰亚胺材料,其相对介电常数为 3.5,损耗正切值为 0.008,介质层厚度为 6 μm 。优化后的单元结构尺寸参数如下: $P_x = P_y = 130 \mu\text{m}$, $L_1 = 80 \mu\text{m}$, $L_2 = 52 \mu\text{m}$, $w_1 = 14 \mu\text{m}$, $w_2 = 14 \mu\text{m}$, $g = 9 \mu\text{m}$ 。半导体硅和锗具有

不同的光敏感特性,硅和锗的电导率均通过外部泵浦光进行调控。在室温(300 K)下,硅能被波长小于 1100 nm 的光激发,而锗可被波长小于 1600 nm 的泵浦光激发^[30-31]。因此,当采用波长为 1550 nm 的泵浦光照射吸收器表面时,只有锗块被激发导通;而当采用 800 nm 的泵浦光照射时,硅和锗都可被激发导通。由文献[32]给出的硅电导率 σ_{Si} 和泵浦光功率 I 之间的关系 $\sigma_{\text{Si}} = 4.863 \times 10^{-4} \times I^2 + 0.1856 \times I + 1.569$ 可知:当没有泵浦光照射时,硅的电导率为 0 S/m;当泵浦光的功率约为 615.5 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时,硅的电导率为 3×10^5 S/m。假设硅和锗的电导率随泵浦光的变化规律一致^[25],则随着泵浦光功率增强,硅和锗的电导率可逐步由

0 S/m 增大到 3×10^5 S/m, 即由绝缘状态逐渐切换到导通状态, 引起谐振频率和吸收强度的变化, 由此可调控吸收器的工作状态。

本文所提吸收器的谐振器单元的等效电路模型如图 2 所示, 谐振器单元的顶层金属方环和 4 条金属线图案层可以等效为两个并联的 RLC(电阻电感电容)谐振电路^[33-35], 其中 R_i ($i=1, 2$) 为描述谐振电路损耗的等效电阻, L_i ($i=1, 2$) 为描述谐振器对高频电磁波磁响应的等效电感, C_i ($i=1, 2$) 为开口环的等效电容。谐振单元中的硅块 B1、锗块 B2 等效为动态开关, $R_1-L_1-C_1$ 和 $R_2-L_2-C_2$ 分别为硅块和锗块处于绝缘态时外侧金属线和内侧方环的等效电路, 而 $R_1'-L_1'-C_1'$ 和 $R_2'-L_2'-C_2'$ 分别为硅块和锗块导通时对应的等效电路, Z_0 是自由空间的阻抗, Z_d 是聚酰亚胺衬底的等效阻抗。当没有泵浦光照射吸收器表面时, 硅和锗的电导率都为 0 S/m, 处于绝缘态, 等效电路开关 S_1 和 S_2 均处于左侧支路; 当用 800 nm 泵浦光照射吸收器表面时, 硅和锗可被激发至导通, 等效开关 S_1 和 S_2 均切换到右侧支路; 当用波长为 1550 nm 的泵浦光照射吸收器表面时, 只有锗块可被激发至导通, 等效电路开关 S_1 处于左侧支路, S_2 切换至右侧支路。通过调节硅和锗的电导率可以改变谐振器开口间隙的大小和金属线的有效长度, 电路的等效电感和电容随之变化。这样, 当硅和锗处于不同的状态(即同时绝缘、同时导通、一个导通一个绝缘)时, 电路可在不同的频率处谐振, 从而实现三个双频段响应的可控切换。

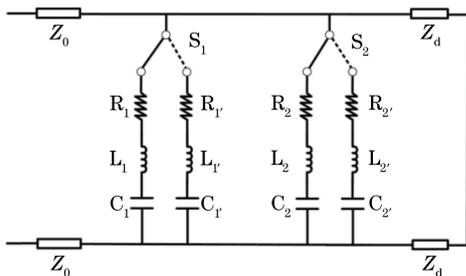


图 2 所提吸收器的谐振器单元的等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of resonator unit of proposed structure

3 结果与讨论

为了证实所设计的吸收器的可切换吸收特性, 本文采用基于有限积分技术(FIT)的微波仿真软件 CST 对所提结构进行仿真。仿真时, 将 x 轴和 y 轴设置为 unit cell 边界条件, 将 z 轴设置为 open (add space) 边界条件, 此时电磁波沿着 z 轴方向入射到

吸收器表面, 其中电场沿着 x 轴方向, 磁场沿着 y 轴方向, 如图 1(a) 中的坐标所示。吸收器的吸收率 $A(\omega)$ 可通过仿真提取的反射系数 $S_{11}(\omega)$ 和透射系数 $S_{21}(\omega)$ 求得, 即: $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 - |S_{21}(\omega)|^2$, 其中, $R(\omega)$ 为反射率, $T(\omega)$ 为透射率, ω 为角频率。由于结构中接地金属板的厚度远远大于入射波在金属薄膜中的趋肤深度, 故透射率 $T(\omega)$ 接近 0。因此, 吸收率可以简化为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2$ 。

图 3 给出了所提吸收器的可切换吸收谱。图 3(a) 是当采用波长为 800 nm 的激光同时激发硅和锗时, 该结构吸收状态的动态切换过程。当没有激光照射吸收器表面时, 硅和锗均处于绝缘态, 其电导率均为 0 S/m, 该吸收器在 0.987 THz 和 1.767 THz 处呈现出双频吸收, 相应的吸收率分别为 96.13% 和 99.14%, 如图 3(a) 中实线所示。当采用波长为 800 nm 的激光照射吸收器表面时, 随着光功率增大, 硅和锗的电导率随之增大, 硅和锗可同时被激发, 原来在 0.987 THz 和 1.767 THz 处的双频吸收峰的吸收率逐渐降低, 并且吸收峰频率出现了红移; 当硅和锗的电导率为 2×10^3 S/m 时, 双频吸收率降至最低值, 如图 3(a) 中虚线所示; 随着硅和锗的电导率进一步增大, 在 0.717 THz 和 1.444 THz 处形成了新的双频吸收峰, 如图 3(a) 中短虚线所示; 当硅和锗的电导率增大到 3×10^5 S/m 时, 该结构在 0.717 THz 和 1.444 THz 处的吸收率分别达到了 98.37% 和 97.95%, 如图 3(a) 中点线所示。图 3(b) 为采用波长为 1550 nm 的激光照射吸收器表面时, 吸收器吸收状态的动态切换过程。当采用波长为 1550 nm 的激光束照射时, 只有锗块被激发。随着光功率增大, 锗的电导率随之增大, 在低频 0.987 THz 处的吸收率逐渐降低, 峰值频率发生红移; 由于此时硅块不会被激发, 故较高频率 1.767 THz 处的吸收峰基本保持不变; 当锗的电导率达到 2×10^3 S/m 时, 该吸收器在低频 0.987 THz 处的吸收率降至 28.02%, 如图 3(b) 中虚线所示; 随着锗的电导率进一步增大到 3×10^5 S/m, 原来在低频 0.987 THz 处的吸收峰红移至 0.716 THz 处, 吸收率达到 98.11%, 如图 3(b) 中点线所示。图 3(c)~(e) 给出了吸收器工作在三种双频吸收状态时的吸收谱, 可以清楚地看到: 当没有光泵浦时, 该结构在 0.987 THz 和 1.767 THz 处形成了两个近乎完美的吸收峰; 当采用波长为 800 nm 的激光同时激发硅和锗至导通时, 吸收状态切换为

0.717 THz 和 1.444 THz 处的近乎完美的双峰吸收;当采用波长为 1550 nm 的激光激发锗块至导通时,吸收状态切换到 0.716 THz 和 1.767 THz 处的双峰吸收。可见,采用不同波长的泵浦激光照射吸收

器表面时,随着泵浦光功率增大,该吸收器可以在不改变结构的前提下在(0.987 THz, 1.767 THz)、(0.717 THz, 1.444 THz)和(0.716 THz, 1.767 THz)三种双频完美吸收状态之间任意切换。

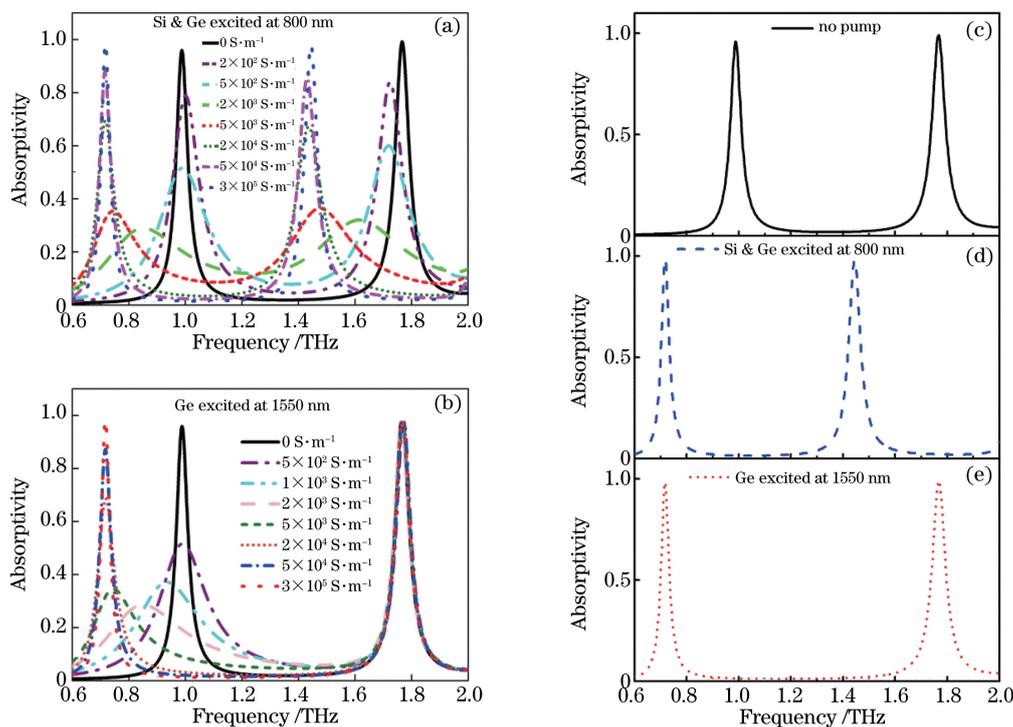


图 3 采用不同波长的激光泵浦时吸收器动态可切换的吸收谱以及三种双频吸收状态时的吸收谱。

(a) 800 nm 激光泵浦时的吸收谱; (b) 1550 nm 激光泵浦时的吸收谱; (c)(d)(e) 三种双频吸收状态时的吸收谱

Fig. 3 Dynamically switchable absorption spectra of absorber excited by laser with different wavelengths and absorption spectra at three dual-frequency absorption states. (a) Absorption spectra excited by 800 nm laser; (b) absorption spectra excited by 1500 nm laser; (c)(d)(e) absorption spectra at three dual-frequency absorption states

另外,超材料吸收器的强度调制深度 d 和频率调谐带宽 b 可定义为^[36]: $d = (A_{\max} - A_{\min}) / A_{\max}$, $b = (f_1 - f_2) / f_1$, 其中, A_{\max} 和 A_{\min} 分别为吸收器的最大吸收率和最小吸收率, f_1 和 f_2 分别为吸收峰处所对应的最高频率和最低频率。由此可计算出所设计的动态可切换双频吸收器能实现的最大调制深度为 71.74%, 最大频率调谐带宽为 27.46%。因此,本文设计的可切换双频吸收器可以用作强度调制器和频率选择吸收器。

为了更好地理解所设计的可切换吸收器的工作机制,本文研究了硅和锗在不同激发状态时吸收器相对于自由空间的阻抗,结果如图 4 所示。可以看到:当无激光泵浦时,即硅块和锗块均处于绝缘态时,在 0.987 THz 和 1.767 THz 处,吸收器相对阻抗的实部接近于 1,虚部接近于 0,如图 4(a)所示;当采用 1550 nm 激光泵浦时,即硅块和锗块均处于导通状态时,在 0.717 THz 和 1.444 THz 处,吸收

器相对阻抗的实部接近于 1,虚部接近于 0,如图 4(b)所示;当采用 800 nm 激光泵浦时,即仅有锗块导通时,在 0.716 THz 和 1.767 THz 处,吸收器相对阻抗的实部接近 1,虚部接近 0,如图 4(c)所示。这意味着,在三种双频工作状态下,该吸收器的相对阻抗在对应频段都能较好地与自由空间中的阻抗相匹配,因此可以实现三种双频段的完美吸收。

为了进一步阐明所提出的光激发可切换吸收器的吸收机理,本文分析了三种不同状态下谐振频率处的表面电流分布,如图 5 所示。

在无激光照射的情况下,硅块和锗块都不导通,方环和金属线独立地与入射电磁波发生响应,实现双频吸收。如图 5(a)、(b)所示,顶层金属图案上的电流主要分布在平行于电场方向的方环和金属线上,而底层金属薄膜上的电流与顶层金属图案上的电流方向相反,形成了一个闭合电流环,等效于一个 LC 谐振电路。谐振频率近似为 $f = 1 / (2\pi\sqrt{LC}) \propto$

$1/l^{[37]}$, 其中 l 为等效电流流经相应金属线的等效长度, L 为等效电感, C 为等效电容。由于外金属线的长度比方环边长短, 故外金属线主要对高频谐振峰有贡献, 即在 1.767 THz 处产生响应, 而方环则是对低频谐振峰有贡献, 即在 0.987 THz 处产生响应。相应地, 对于第二种状态, 即硅块和锗块同时导通时, 方环和外金属线上的等效电流流经金属线的等效长度变长, 导致原来的双频吸收峰的谐振频率

发生红移, 外金属线对应的谐振频率出现在 1.444 THz 处, 方环的谐振频率出现在 0.717 THz 处, 如图 5(c)、(d) 所示。而对于第三种状态, 即仅锗块被导通时, 流经方环的等效电流流经金属线的等效长度变长, 导致原来在较低频率 0.987 THz 处的吸收峰频率红移至 0.717 THz 处, 而外金属线中间的硅块未被导通, 故其对应的谐振频率仍在 1.767 THz 处, 如图 5(b)、(c) 所示。

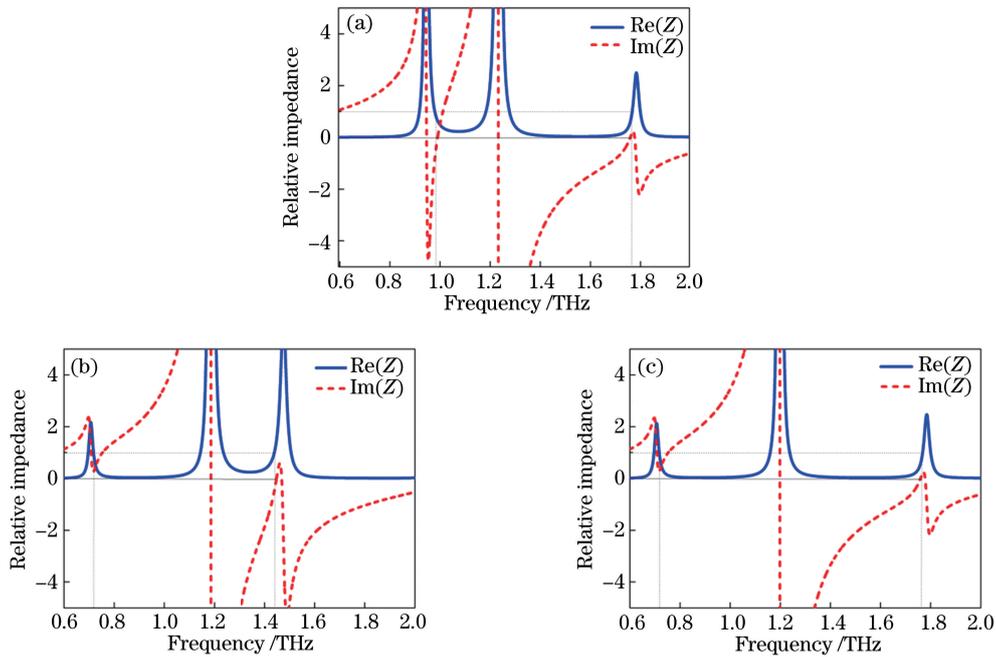


图 4 不同激发状态下吸收器的相对阻抗。(a)无激光泵浦;(b) 1550 nm 激光泵浦;(c) 800 nm 激光泵浦

Fig. 4 Relative impedances of absorber at different excitation states. (a) No laser pumping; (b) 1550 nm laser pumping; (c) 800 nm laser pumping

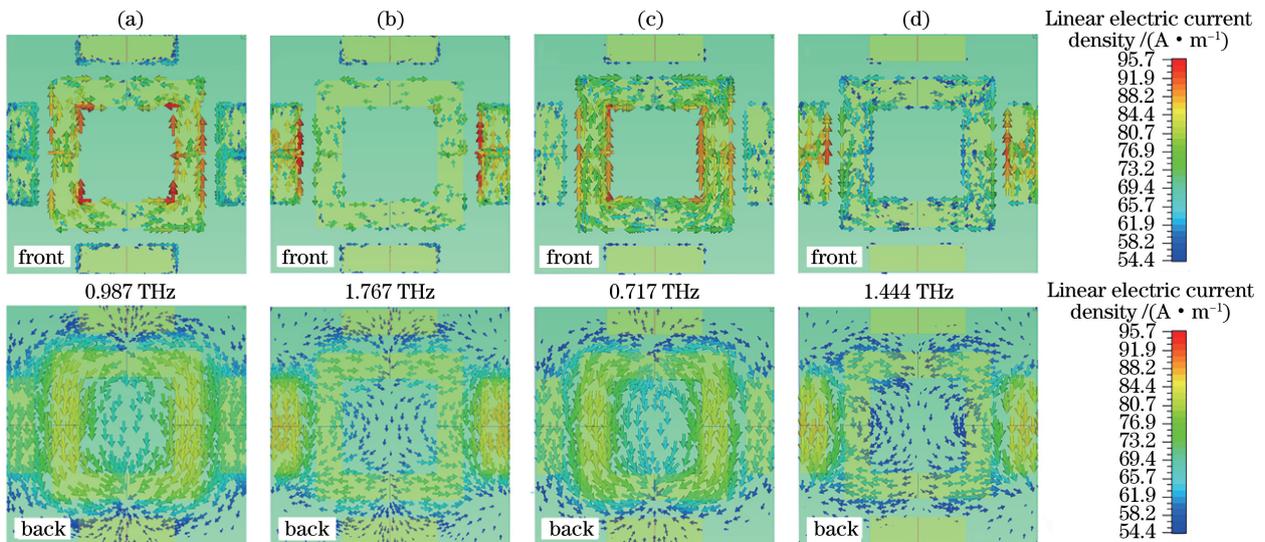


图 5 不同共振频率处的电流分布。(a) 0.987 THz;(b) 1.767 THz;(c) 0.717 THz;(d) 1.444 THz

Fig. 5 Current distributions at different resonance frequencies. (a) 0.987 THz; (b) 1.767 THz; (c) 0.717 THz; (d) 1.444 THz

此外,本文还研究了所设计吸收器在不同极化角下的吸收特性。图 6 分别给出了三种双频工作状态下所设计结构对垂直入射的 TE 和 TM 电磁波的极化不敏感吸收特性。由于所设计吸收器单元结构具有四重旋转对称性,故仅需考虑极化角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内的变化情况。如图 6(a)、(b)所示,当无激光

照射时,随着极化角从 0° 逐渐变化到 45° ,无论对于 TE 波还是 TM 波,0.987 THz 和 1.767 THz 处的吸收峰基本保持不变。同样,无论是采用波长为 800 nm 还是 1550 nm 的激光照射该结构表面,所设计吸收器的吸收性能也都几乎不受极化角变化的影响,如图 6(c)~(f)所示。

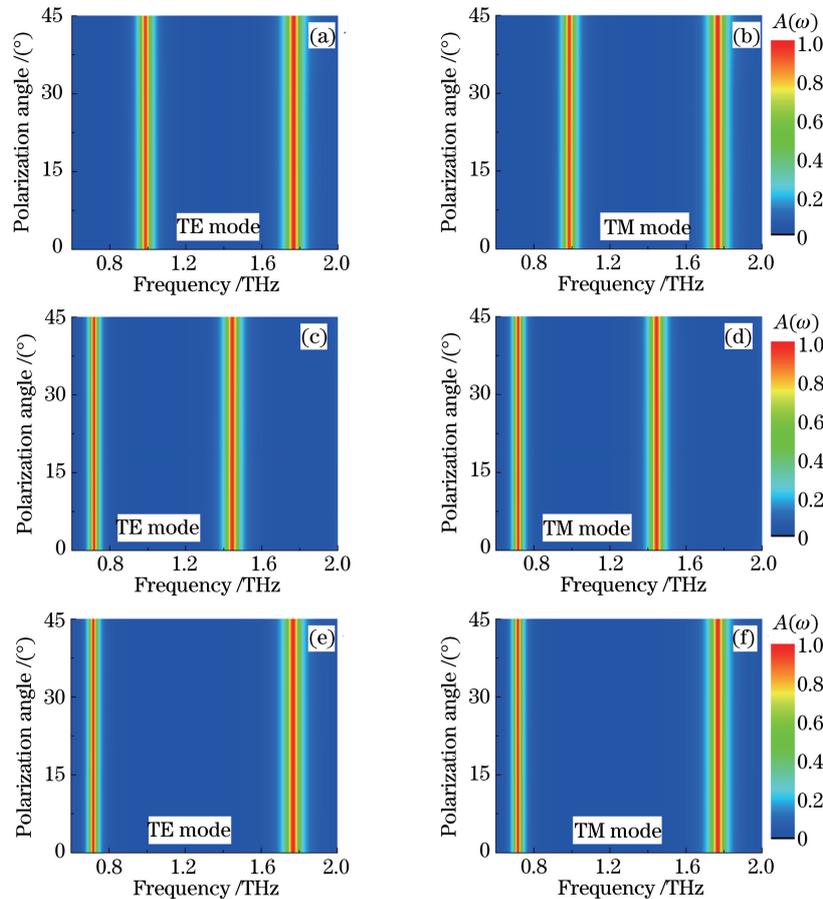


图 6 所设计吸收器对垂直入射的 TE 和 TM 波的吸收特性。

(a)(b) 无激光泵浦;(c)(d) 800 nm 激光泵浦;(e)(f) 1550 nm 激光泵浦

Fig. 6 Absorption characteristics of proposed absorber for normal incident TE and TM waves.

(a)(b) No laser pumping; (c)(d) 800 nm laser pumping; (e)(f) 1550 nm laser pumping

最后,本文以 1550 nm 泵浦光激发状态为例,研究了单元结构的主要尺寸参数(如方环边长 L_1 和宽度 w_1 、外侧金属线长度 L_2 和宽度 w_2)对吸收性能的影响。从图 7(a)、(b)中可以看出, L_1 和 w_1 的变化会使低频处的吸收峰产生偏移,高频处的吸收峰基本保持不变。由图 7(c)、(d)可以看出, L_2 和 w_2 的变化会使高频处的吸收峰产生偏移,低频处的吸收峰基本保持不变。其实, L_1 、 w_1 、 L_2 和 w_2 参数的影响可以由图 5 所示的表面电流分布进行解释。在图 5 中可以看到,低频处的吸收峰主要源于方环对入射电磁波的响应,而高频处的吸收峰则主要由外侧金属线对入射电磁波的响应引起。比较图

7 所示的吸收曲线可以发现,虽然方环的边长和宽度、外侧金属线的长度和宽度会对吸收特性有不同程度的影响,但在一定的误差范围内,吸收器还能保持较稳定的吸收性能。

4 结 论

本文提出了一种基于方环-金属线结构的光激发可切换双频太赫兹超材料吸收器。通过改变嵌入在结构中的光敏材料硅和锗的电导率可以调节吸收器的共振频率,从而使吸收器在三种双频吸收状态之间自由切换。研究结果表明:当没有光泵浦时,硅块和锗块均处于绝缘状态,所提结构在 0.987 THz

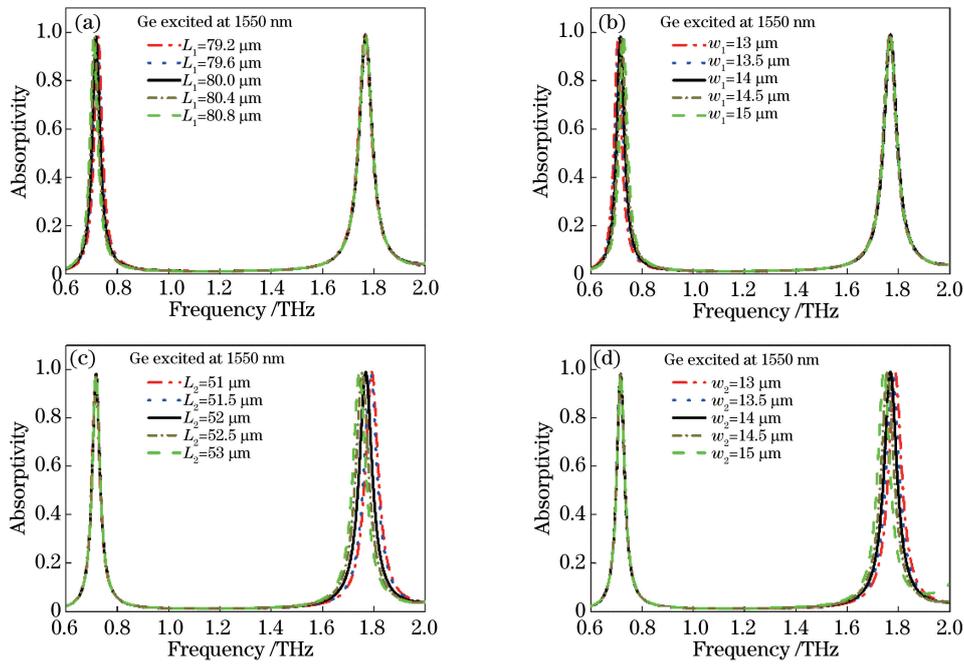


图 7 单元结构的主要尺寸参数对吸收特性的影响。(a)方环边长 L_1 ; (b)方环宽度 w_1 ; (c)外侧金属线长度 L_2 ; (d)外侧金属线宽度 w_2

Fig. 7 Influence of main size parameters of unit structure on absorption characteristics. (a) Side length of square ring L_1 ; (b) width of square ring w_1 ; (c) length of outer wire L_2 ; (d) width of outer wire w_2

和 1.767 THz 处形成两个近乎完美的吸收峰;当采用波长为 800 nm 的激光束将硅和锗同时激发至导通时,吸收状态将切换为 0.717 THz 和 1.444 THz 处的双峰吸收;而当采用波长为 1550 nm 的激光束将锗激发至导通时,吸收状态可切换为 0.716 THz 和 1.767 THz 处的双峰吸收。通过利用不同的光照条件来控制硅和锗的通断状态,可使所提吸收器在不改变结构的前提下在三个双频完美吸收状态之间任意切换,其最大强度调制深度为 71.74%,最大频率调谐带宽为 27.46%。同时,由于所设计吸收器单元结构的高度对称性,在 TE 和 TM 两种模式下,所提可切换双频吸收器具有良好的极化角稳定性,在调制器、传感器等领域具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
 - [2] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization[J]. Physical Review B, 2008, 78(24): 241103.
 - [3] Li H, Yuan L H, Zhou B, et al. Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(1): 014909.
 - [4] Grant J, Ma Y, Saha S, et al. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber[J]. Optics Letters, 2011, 36(17): 3476-3478.
 - [5] 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): 1518-1527.
 - [6] Lu T G, Zhang D W, Qiu P Z, et al. Dual-band perfect metamaterial absorber based on an asymmetric H-shaped structure for terahertz waves[J]. Materials, 2018, 11(11): 2193.
 - [7] Luo H, Cheng Y Z. Dual-band terahertz perfect metasurface absorber based on bi-layered all-dielectric resonator structure[J]. Optical Materials, 2019, 96: 109279.
 - [8] 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.
 - [9] Xie J W, Jing X F. Design of an all-dielectric ultraperiod 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.
- [10] Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al. THz ima-

- ging and sensing for security applications: explosives, weapons and drugs[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20(7): S266-S280.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Faruk A, Sabah C. Absorber and sensor applications of complimentary H-shaped fishnet metamaterial for sub-terahertz frequency region [J]. *Optik*, 2019, 177: 64-70.
- [14] 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.
- [15] Song Z Y, Chen A, Zhang J H. Terahertz switching between broadband absorption and narrowband absorption [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2037-2044.
- [16] 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.
- [17] Wang R X, Li L, Liu J L, et al. Triple-band tunable perfect terahertz metamaterial absorber with liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32280-32289.
- [18] Wang R X, Xue Y C, Gong R, et al. Tunable terahertz absorber based on toroidal resonance metamaterial [J]. *Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition)*, 2019, 32(6): 14-20.
王若星, 薛喻宸, 龚瑞, 等. 基于环形电磁矩超材料的可调谐太赫兹吸收器 [J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2019, 32(6): 14-20.
- [19] 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.
- [20] Xu Z H, Wu D, Liu Y M, et al. Design of a tunable ultra-broadband terahertz absorber based on multiple layers of graphene ribbons [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2018, 13(1): 1-8.
- [21] Zhai Z C, Zhang L, Li X J, et al. Tunable terahertz broadband absorber based on a composite structure of graphene multilayer and silicon strip array [J]. *Optics Communications*, 2019, 431: 199-202.
- [22] Li H, Yu J, Chen Z. Polarization-independent and incident angle insensitive switchable broadband absorber/reflector with a single graphene layer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0803001.
李辉, 余江, 陈哲. 基于单层石墨烯的偏振无关和入射角度不敏感的可切换宽带吸收器/反射器 [J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0803001.
- [23] 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.
- [24] Yue W, Xin L, Chao Z W, et al. Broadband tunable hybridized metamaterials absorber at terahertz regime [J]. *Ferroelectrics*, 2018, 528(1): 38-44.
- [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] Song Z Y, Wang Z S, Wei M L. Broadband tunable absorber for terahertz waves based on isotropic silicon metasurfaces [J]. *Materials Letters*, 2019, 234: 138-141.
- [27] Chu Q H, Yang M S, Chen J, et al. Characteristics of tunable terahertz multi-band absorber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1214003.
初启航, 杨茂生, 陈俊, 等. 可调控的太赫兹多频带吸收器特性 [J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1214003.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Zhang J N, Wang G C, Zhang B, et al. Photo-excited broadband tunable terahertz metamaterial absorber [J]. *Optical Materials*, 2016, 54: 32-36.
- [31] Li J S. Terahertz wave modulator based on optically controllable metamaterial [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(1): 102-105.
- [32] 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.
- [33] Yang R C, Xu J P, Wang J Y, et al. Frequency-

- reconfigurable metamaterial absorber/reflector with eight operating modes[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16550-16559.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Shen X P, Cui T J. Photoexcited broadband redshift switch and strength modulation of terahertz metamaterial absorber[J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(11): 114012.
- [37] Zhou J, Zhang L, Tuttle G, et al. Negative index materials using simple short wire pairs[J]. *Physical Review B*, 2006, 73(4): 041101.