

基于相变材料的慢光和吸收可切换 多功能太赫兹超材料*

金嘉升 马成举[†] 张焱 张跃斌 鲍士仟
李咪 李东明 刘洺 刘芊震 张贻歆

(西安石油大学理学院, 西安 710065)

(2022年12月7日收到; 2023年2月12日收到修改稿)

基于相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) 设计了一种太赫兹超材料, 在太赫兹波段实现了慢光和吸收功能的切换. 该超材料由三部分构成, 分别是金环构成的微结构层、 SiO_2 介质层和 GST 薄膜. 研究表明: 当 GST 薄膜处于绝缘态时, 由于两个谐振环的电磁诱导透明效应, 入射 THz 光脉冲通过该 THz 超材料时群速度会减慢, 最大群延迟可以达到 3.6 ps; 当 GST 薄膜转变为金属态时, THz 超材料可实现双波段吸收, 在 0.365 THz 处吸收率可以达到 97%, 在 0.609 THz 处吸收率可以实现完美吸收 (吸收率 100%). 另外还研究了该 THz 超材料的入射光偏振不敏感特性, 发现当入射光脉冲的偏振角从 0° 变化到 90° 时, THz 超材料的慢光和吸收特性不受影响. 所设计的 THz 超材料在光缓存器、光传感器、光开关等领域具有潜在的应用价值.

关键词: 超材料, 太赫兹, 慢光, 吸收器, 相变材料

PACS: 42.25.Bs, 42.79.Gn, 47.11.Bc

DOI: 10.7498/aps.72.20222336

1 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波通常是指频率在 0.1—10.0 THz (波长在 0.03—3.00 mm) 的电磁波^[1]. THz 技术在无线通信^[2]、生物医学^[3]、无损检测^[4]、军用雷达^[5] 等领域具有潜在的应用前景. 对于 THz 功能器件, 由于其结构尺寸和材料损耗等方面的限制, 一些传统结构已经不再适用, 而超材料的出现为 THz 技术的发展和應用带来了新契机. 超材料是指电磁参数 (介电常数和磁导率) 可以人工设计的一种周期结构, 可以实现天然材料不具备的奇特物理性质 (负折射率^[6]、逆多普勒效应^[7] 和完美吸收^[8] 等). 超材料的出现弥补了 THz 频段电磁材料的匮乏, 为 THz 功能器件的实现提供了有效途径, 广泛

应用于调制器^[9]、吸收器^[10]、滤波器^[11]、传感器^[12]、慢光器件^[13] 和偏振转换器^[14] 等多种 THz 功能器件的研究. 但是上述 THz 超材料器件实现的功能都是单一的, 从应用的角度看, 多种功能集成的 THz 超材料器件具有更广阔的前景.

为了设计多种功能集成的 THz 超材料器件, 一种有效的方法是将超材料与相变材料相结合. 因为随着外部激励条件 (电、光、热等) 的变化, 相变材料会实现非晶态与晶态之间的转变, 进而可以实现超材料多种功能的切换. $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) 是一种典型的相变材料, 在外部的光照或电压刺激下可以实现绝缘态和金属态之间的可逆相变^[15]. 相比于另一种相变材料 VO_2 , GST 的状态能稳定存在, 无需持续的热源维持, 因此在设计性能稳定的超材料结构中有着更大的优势. Zhou 等^[16] 通过 GST 材料实现了 THz 波透射振幅的主动调谐. Guo 等^[17]

* 西安石油大学创新与实践能力的培养项目 (批准号: YCS20213210) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: chengjuma@xysu.edu.cn

通过 GST 材料实现了超材料吸收器的吸收峰的主动调谐. GST 材料多被用于 THz 波振幅或相位的调谐, 在实现功能切换方面研究较少, 因此通过 GST 材料来实现 THz 慢光和完美吸收切换功能是很有必要的.

本文基于 GST 相变材料, 设计了一种可实现慢光和吸收功能切换的 THz 超材料. 在 THz 超材料微结构中, 通过加入 GST 薄膜来实现 THz 慢光和完美吸收的多功能切换. 研究表明当 GST 为绝缘态时, 可在 0.547 THz 处实现类电磁诱导透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 效应和慢光效应. 而通过高温退火将 GST 由绝缘态过渡金属态时, 可将慢光功能切换为吸收功能, 在 0.609 THz 处实现了完美吸收. 另外, 这种基于 GST 相变材料的慢光和吸收可切换 THz 超材料, 具有偏振光不敏感特性.

2 超材料结构参数

设计的 THz 超材料结构如图 1 所示. 图 1(a) 为 THz 超材料阵列, 图 1(b), (c) 分别是其微结构单元俯视图和侧视图. 该 THz 超材料由三层构成, 分别是金 (Au) 环构成的微结构层、SiO₂ 介质层和 GST 相变材料薄膜. 超材料微结构单元周期性排列, 其排列周期为 $P_x = P_y = 180 \mu\text{m}$, Au 环的厚度为 $0.3 \mu\text{m}$; SiO₂ 厚度为 $24 \mu\text{m}$; GST 薄膜厚度为 $0.1 \mu\text{m}$. 微结构单元由两个同心 Au 环构成, 外环的外径为 $R_1 = 75 \mu\text{m}$, 内径为 $R_2 = 65 \mu\text{m}$; 内环的外径为 $r_1 = 50 \mu\text{m}$, 内径为 $r_2 = 40 \mu\text{m}$. 图 1 中 \mathbf{k} , \mathbf{E} , \mathbf{H} 分别代表入射光的波矢量、电场和磁场方向.

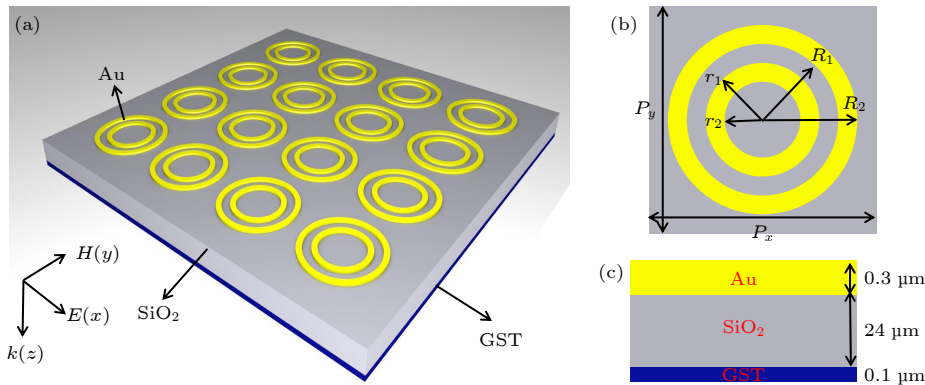


图 1 THz 超材料结构示意图 (a) THz 超材料阵列; (b) 微结构单元俯视图; (c) 微结构单元侧视图

Fig. 1. Schematic structure diagram of the THz metamaterials: (a) THz metamaterial array; (b) top view of microstructure cells; (c) side view of microstructure units.

THz 波段 SiO₂ 衬底的折射率为 $2.0+0.025i$ [18]; Au 的介电常数可用 Drude 模型来描述 [19]:

$$\epsilon_{\text{Au}} = \epsilon - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (1)$$

其中 ω 为入射光的角频率, 阻尼常数 $\gamma = 1.225 \times 10^{14} \text{ rad/s}$, 等离子体频率为 $\omega_p = 1.374 \times 10^{16} \text{ rad/s}$, $\epsilon = 1$.

根据 Drude 模型, 相变材料 GST 介电常数可以表示为 [20]

$$\epsilon_{\text{GST}} = \epsilon - \frac{\sigma_{\text{dc}}}{\epsilon_0\omega(1 - i\tau\omega)}, \quad (2)$$

其中 ϵ , σ_{dc} 和 τ 分别代表相变材料 GST 的高频介电常数、直流电导率以及载流子弛豫时间. 三种相态 (*a*-GST, *c*-GST 和 *h*-GST) GST 材料的 Drude 模型参数由表 1 给出.

表 1 三种相态 GST 材料的 Drude 模型参数
Table 1. Drude model parameters of the GST materials for the three phases.

相态	ϵ	τ	σ_{dc}
非晶态 (<i>a</i> -GST)	15.3	—	0
面心立方 (<i>c</i> -GST)	38.2	1.61	382
六方 (<i>h</i> -GST)	60.6	5.29	2230

3 基于类 EIT 超材料的 THz 慢光效应

GST 是一种典型的相变材料, 在外部的光照或电压刺激下能表现出非晶态和晶态之间的可逆相变 [15]. 热处理过程中, 非晶态的 GST (*a*-GST, 绝缘体) 在 150 °C 左右会转变成立方相 (*c*-GST, 半导体), 当温度升高到 300 °C 左右时会转变成六角相 (*h*-GST, 金属). 进一步升高温度到 650 °C 左右,

h -GST 会进入熔融状态, 在此温度下冷却后, 重新变成 α -GST. 随着热处理温度的增加, GST 的载流子密度和载流子迁移率也会增加, 从而引起光反射率增加. 在我们设计的结构中, 当 GST 薄膜处于绝缘状态时, THz 脉冲可以完全透过 GST 薄膜, 而不产生吸收和反射, 两个金环会在 THz 脉冲的激发下相互作用, 产生类 EIT 效应.

利用时域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 方法, 研究了相变材料 GST 处于绝缘状态时, 该 THz 超材料的类 EIT 效应. 仿真条件设置: 平面光波沿 z 轴负方向入射到该超材料的上表面, 如图 1(a) 所示, 电场 E 的方向沿 x 轴方向 (x 偏振). x 和 y 方向采用周期边界条件, z 方向采用完美匹配层 (perfectly matched layer, PML). 网格精度为 $dx = 2 \mu\text{m}$, $dy = 2 \mu\text{m}$, $dz = 0.02 \mu\text{m}$. Au 和 GST 采用 Drude 模型, SiO_2 衬底采用折射率模型. 仿真结果如图 2 所示, 图 2(a) 为外环、内环和双环结构的透射光谱图; 图 2(b)–(d) 为超材料结构分别在两个透射谷和透射峰处的表面电流分布. 由图 2(a) 可以看出, 在 THz 脉冲的激发下,

外环在 0.503 THz 处产生共振, 内环在 0.805 THz 处产生共振, 当两种 Au 环以一定距离放置时, 会在 0.547 THz 处产生一个透射率为 86.6% 的类 EIT 窗口. 这是因为当两个谐振频率相近的谐振器以一定距离放置时, 两种谐振模式会发生相消干涉, 共振反射受到抑制, 从而产生类 EIT 效应.

为进一步说明该 THz 超材料产生类 EIT 效应的物理机制, 模拟了 x 偏振光入射时, 在两个透射谷 (0.453, 0.834 THz) 以及透射峰值频率 (0.547 THz) 处的表面电流分布, 其结果如图 2(b)–(d) 所示. 从图 2(b) 可以看出, 在 0.453 THz 处, 外环被 THz 光脉冲激发, 外环的上半部分与下半部分的电流方向相反, 产生电偶极子共振. 从图 2(d) 可以看出, 在 0.834 THz 处, 内环被 THz 光脉冲激发, 内环的上半部分与下半部分的电流方向相反, 产生电偶极子共振. 从图 2(c) 可以看出, 在 0.547 THz 处, 外环和内环均被 THz 光脉冲激发, 但是两者的表面电流方向相反, 两种共振模式发生相消干涉, 共振反射受到抑制, 从而产生类 EIT 效应.

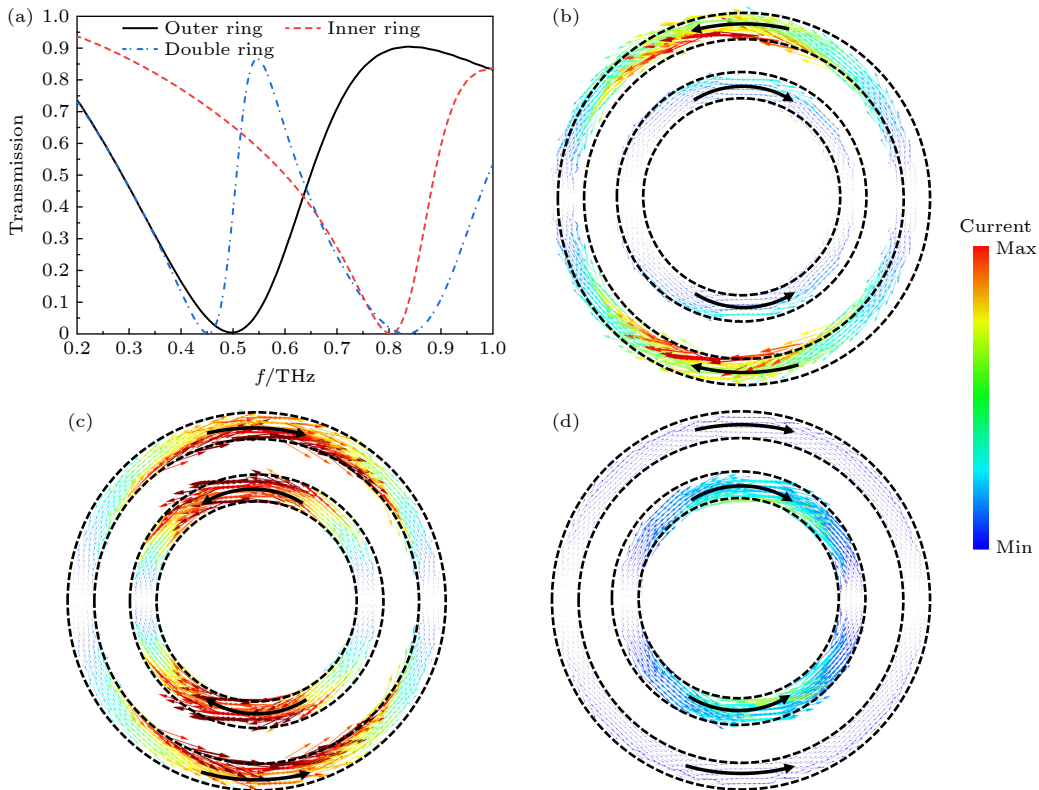


图 2 (a) GST 薄膜处于绝缘状态时, 外环、内环和双环结构的透射光谱图; (b)–(d) 0.453, 0.547, 0.834 THz 处超材料结构的表面电流分布

Fig. 2. (a) Transmission spectrum of outer ring, inner ring, and double ring structures with GST films in an insulating state; (b)–(d) surface current distribution of metamaterial structures at 0.453, 0.547, and 0.834 THz.

超材料结构中两种谐振器的近场耦合作用可采用耦合谐振子模型进行分析, 两种谐振器与入射电场 $E = E_0 e^{i\omega t}$ 的相互作用如下^[21,22]:

$$\ddot{x}_1 + \gamma_1 \dot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 + kx_2 = \frac{q_1 E}{m_1}, \quad (3)$$

$$\ddot{x}_2 + \gamma_2 \dot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 + kx_1 = \frac{q_2 E}{m_2}, \quad (4)$$

其中 x_1 和 x_2 分别为内环和外环谐振器的振幅, γ_1 和 γ_2 为两个谐振器的阻尼系数, ω_1 和 ω_2 分别是两个谐振器的共振频率, k 是两个谐振器之间的耦合系数, q_1 和 q_2 是两个谐振器的有效电荷, m_1 和 m_2 是两个谐振器的有效质量. 令 $A = q_1/q_2$, $B = m_1/m_2$, A 和 B 为无量纲的常数. 通过对 (3) 式和 (4) 式求解, 得到 x_1 和 x_2 的表达式:

$$x_1 = \frac{[(B/A)k^2 + (\omega^2 - \omega_2^2 + i\omega\gamma_2)] (q_1 E/m_1)}{k^4 - (\omega^2 - \omega_1^2 + i\omega\gamma_1)(\omega^2 - \omega_2^2 + i\omega\gamma_2)}, \quad (5)$$

$$x_2 = \frac{[k^2 + (B/A)(\omega^2 - \omega_1^2 + i\omega\gamma_1)] (q_1 E/m_1)}{k^4 - (\omega^2 - \omega_1^2 + i\omega\gamma_1)(\omega^2 - \omega_2^2 + i\omega\gamma_2)}. \quad (6)$$

该 THz 超材料的极化强度 P 表示为

$$P = q_1 x_1 + q_2 x_2. \quad (7)$$

该 THz 超材料的有效极化率 χ_{eff} 表示为

$$\chi_{\text{eff}} = \chi_r + i\chi_i = \frac{P}{\varepsilon_0 E} = \frac{K}{A^2 B} \times \left[\frac{A(B+1)k^2 + A^2(\omega^2 - \omega_2^2) + B(\omega^2 - \omega_1^2)}{k^4} - (\omega^2 - \omega_1^2 + i\omega\gamma_1)(\omega^2 - \omega_2^2 + i\omega\gamma_2) + i\omega \frac{A^2\gamma_2 + B\gamma_1}{k^4 - (\omega^2 - \omega_1^2 + i\omega\gamma_1)(\omega^2 - \omega_2^2 + i\omega\gamma_2)} \right], \quad (8)$$

其中, K 是比例因子, χ_r 和 χ_i 分别表示该 THz 超材料的色散和吸收系数. 因此超材料结构的透射率可以表示为

$$T = \left| \frac{4\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}}{(\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} + 1)^2 e^{j\frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} - (\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} - 1)^2 e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}}} \right| = \left| \frac{4\sqrt{\chi_{\text{eff}} + 1}}{(\sqrt{\chi_{\text{eff}} + 1} + 1)^2 e^{j\frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\chi_{\text{eff}} + 1}} - (\sqrt{\chi_{\text{eff}} + 1} - 1)^2 e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\chi_{\text{eff}} + 1}}} \right|. \quad (9)$$

由上述耦合谐振子模型, 当 $K = 2.98 \times 10^{25}$ Hz, $k = 2.65 \times 10^{12}$ Hz, $\gamma_1 = 2.90 \times 10^{12}$ Hz, $\gamma_2 = 2.00 \times 10^{11}$ Hz, $A = 30$, $B = 2$ 时, 得到该 THz 超材料的透射光谱如图 3(a) 蓝线部分所示. 可以看出, 仿真与理论计算的类 EIT 透明窗口基本吻合. 两者透射光谱之间存在的细微差异, 是由于理论计算并没

有考虑 THz 超材料的损耗和色散特性.

由慢光效应的基本理论可知, 当 THz 光脉冲入射到超材料时, 会在类 EIT 透明窗口附近产生强色散效应, 同时相位会剧烈变化, 导致 THz 光脉冲群速度减慢, 即产生类 EIT 效应. THz 光脉冲的群速度可表示为^[23]

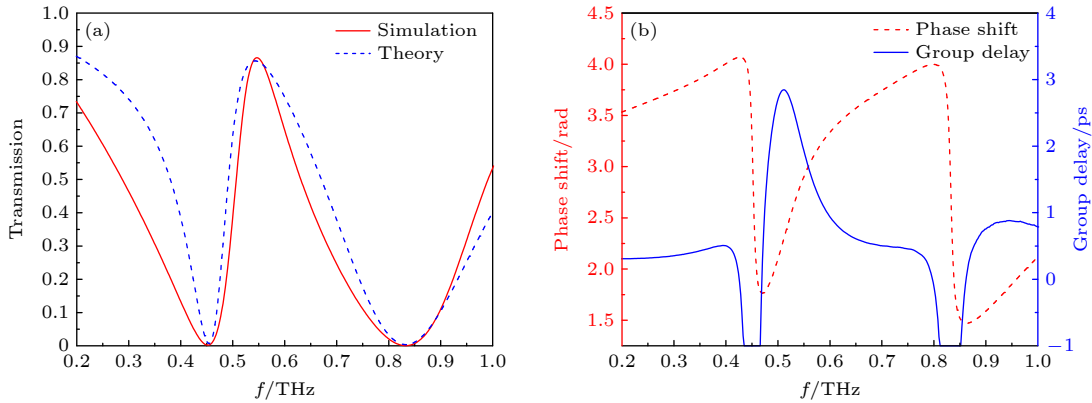


图 3 (a) THz 超材料的类 EIT 效应的理论计算与仿真结果; (b) THz 光脉冲在超材料中传输时的相位变化和相对群延迟
Fig. 3. (a) Theoretical calculation and simulation results of EIT-like effects of THz metamaterials; (b) phase change and relative group delay of THz light pulse transmission in metamaterials.

$$\nu_g = \frac{c}{n_g}, \quad (10)$$

其中 ν_g 为入射 THz 光脉冲的群速度, c 为光在真空中的传播速度, n_g 为群折射率. THz 光脉冲的群延时可表示为^[24,25]

$$\tau_g = \frac{d(\varphi_a - \varphi_b)}{d\omega}, \quad (11)$$

其中, φ_a 和 φ_b 为入射 THz 光脉冲的相位, ω 为角频率, L 为超材料的厚度.

利用 FDTD 方法, 对该 THz 超材料的相位变化和群延时特性进行了仿真分析. 如图 3(b) 所示, 在 EIT 窗口的峰值频率附近超材料的相位斜率最大, 同时在该频率处相对群延迟达到最大值 3.6 ps.

4 THz 超材料的吸收和偏振特性

THz 吸收器在 THz 波屏蔽、THz 成像和 THz 传感等方面具有广泛的应用前景, 而基于超材料的 THz 吸收器因其高吸收率、低密度、厚度小而备受科研人员的广泛关注. 一般基于超材料的 THz 吸收器是金属图案-绝缘体-金属薄膜结构, 通过将超材料的阻抗与自由空间的阻抗进行匹配, 可以在一定频率范围内实现对 THz 波吸收. 我们所设计的 THz 超材料, 当 GST 薄膜处于金属状态时, 顶部的 Au 环微结构层、中间的 SiO₂ 间隔层和底部的 GST 薄膜形成了典型的金属图案-绝缘体-金属薄膜结构, 由于存在厚度为 1 μm 的底部 GST 薄膜来抑制波的传播 (透射率 T 约为 0), 整个结构的吸收率为

$$A = 1 - R - T = |1 - S_{11}^2 - S_{21}^2| = 1 - R,$$

其中 S_{11} 和 S_{21} 分别表示反射系数和透射系数^[26].

因此可以通过最大限度减小超材料结构的反射率 R 来实现完美吸收 ($A = 100\%$).

首先, 仿真分析了所设计 THz 超材料的吸收特性, 仿真结果如图 4 所示. 从仿真结果可以看出, 当相变材料 GST 薄膜转变为金属态时, 所设计的 THz 超材料就转变为 THz 吸收器. 图 4(a) 是在 x 偏振光入射时, THz 超材料的透射、反射和吸收光谱. 可以看出 GST 薄膜显著降低了 THz 光的传播, 透射率基本为 0, 并且在 0.365 THz 和 0.609 THz 处产生了两个吸收峰, 吸收率分别为 96% 和 100%. 为了研究两个吸收峰形成的原因, 分别模拟了单独的外环、内环和双环的吸收光谱, 如图 4(b) 所示. 可以看出, 单独的外环在 0.365 THz 处有一个吸收峰, 并与双环结构的左侧吸收峰重合; 单独的内环在 0.584 THz 处有一个吸收峰, 与双环结构的左侧吸收峰基本一致. 这说明该 THz 超材料微结构的双环结构的双波长吸收, 是内外环中的 THz 波谐振形成的. 而双环微结构和单独内外环微结构的吸收峰值频率和幅度的细微差异, 是由于双环微结构中内外环之间的相互耦合影响造成的.

该 THz 超材料的吸收特性, 可以用超材料的阻抗匹配理论进一步深入解释. 阻抗匹配^[27]指超材料吸收器的亚波长结构单元, 处于某一特定频率范围内, 自身阻抗最大限度地与自由空间阻抗相匹配, 使入射的电磁波最大程度地进入材料内部而被吸收.

THz 超材料的反射系数为

$$r = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}, \quad (12)$$

其中自由空间的阻抗为 Z_0 , 吸收器的等效阻抗为 Z_1 ,

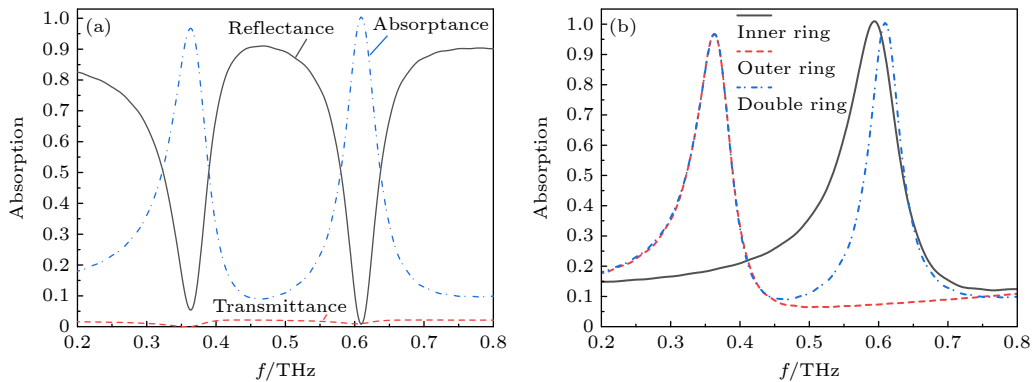


图 4 (a) THz 超材料的透射、反射和吸收光谱; (b) THz 超材料的外环、内环和双环微结构的吸收光谱

Fig. 4. (a) Transmission, reflection, and absorption spectra of THz metamaterials; (b) absorption spectra of the outer ring, inner ring, and two-loop microstructures of THz metamaterials.

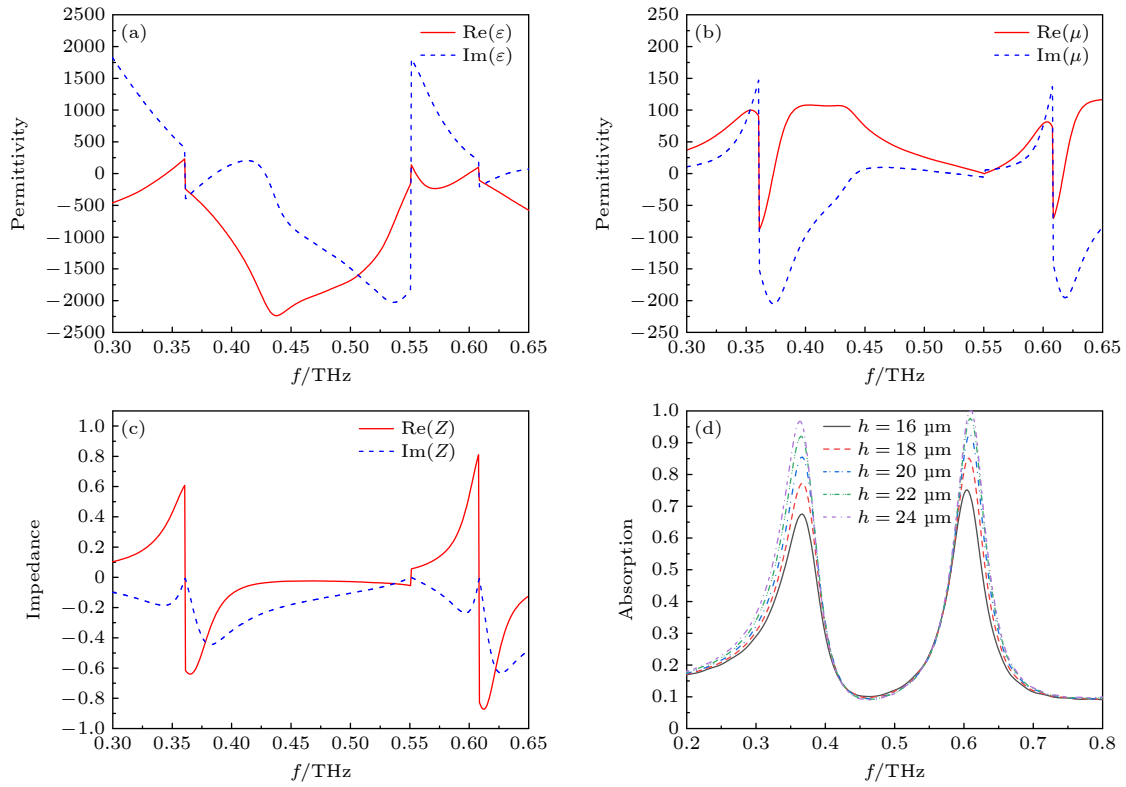


图 5 (a)–(c) SiO₂ 层厚度 $h = 24 \mu\text{m}$ 时, THz 超材料结构的介电常数 (a)、磁导率 (b) 和等效阻抗 (c); (d) 不同 SiO₂ 层厚度时 THz 超材料结构的吸收光谱

Fig. 5. (a)–(c) Permittivity (a), permeability (b) and equivalent impedance (c) of THz metamaterial structure at SiO₂ layer thickness $h = 24 \mu\text{m}$; (d) absorption spectrum of THz metamaterial structure at different SiO₂ layer thickness.

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (13)$$

式中, ε 和 μ 分别为 THz 超材料的有效介电常数和磁导率. 当 THz 超材料的等效阻抗与自由空间的阻抗相等时, 反射系数 r 为 0, 可实现 THz 波完美吸收. 利用 S 参数反演法获得了 THz 超材料的介电常数、磁导率和等效阻抗, 如图 5(a)–(c) 所示. 从图 5(a)–(c) 可以看出, 在 0.609 THz 处 THz 超材料的介电常数和磁导率基本相等, 等效阻抗的实部为 0.82, 虚部为 0.10, 这表示超材料结构等效阻抗与自由空间的阻抗近似匹配, 此时该结构的反射率接近于 0, 吸收率接近 100%, 可实现完美吸收. 当然, SiO₂ 层厚度变化, 对其吸收性能也有影响. 为了研究中间 SiO₂ 层厚度变化对 THz 超材料吸收能的影响, 仿真了不同 SiO₂ 层厚度的 THz 超材料吸收光谱, 如图 5(d) 所示. 可以看出随着 SiO₂ 层厚度增加, THz 超材料的两个吸收峰的峰值幅度逐渐增大, 当 SiO₂ 厚度 $h = 24 \mu\text{m}$ 时, 0.609 THz 处的吸收率达到 100%.

在实际应用中, 光源的入射角度对吸收峰的影响

是衡量吸收器性能的一个重要指标. 图 6 为 GST 处于金属态时, 入射角度从 0° 增加到 80° 吸收光谱的变化. 随着入射角度的增大, 吸收峰的位置基本保持不变. 入射角从 0° 增大到 60° 时, 0.609 THz 处吸收峰的峰值幅度保持在 90% 以上; 入射角从 60° 增大到 80° 时, 峰值幅度迅速下降. 因此在一个宽的入射角范围内, 我们设计的超材料结构保持了良好的吸收性能.

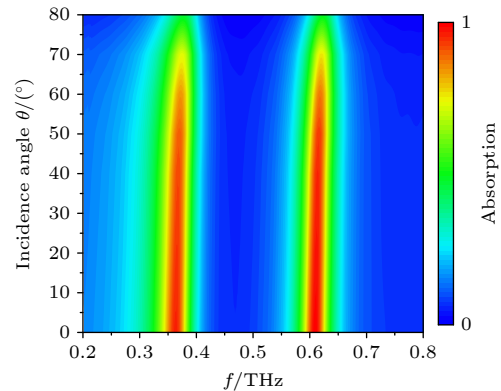


图 6 吸收光谱与入射角的关系

Fig. 6. Dependence of the absorption spectra on the incidence angle.

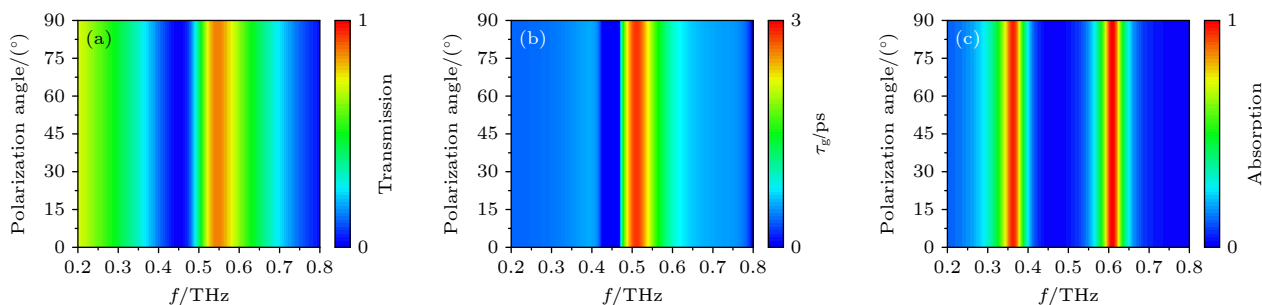


图7 入射光的偏振角从 0° 到 90° 变化时, THz超材料的透射光谱(a)、群延迟(b)和吸收光谱(c)

Fig. 7. Transmission spectrum (a), group delay (b), and absorption spectrum (c) of the THz metamaterials, when the polarization angle of the incident light varies from 0° to 90° .

最后, 仿真分析了该 THz 超材料在不同偏振光入射时的透射光谱、群延迟和吸收光谱的变化, 如图 7 所示. 从图 7(a)—(c) 可以看出, 入射光的偏振角从 0° 到 90° 变化时, 透明窗口的位置和峰值幅度、最大群延迟的位置和大小、两个吸收峰的位置和峰值幅度都没有变化, 表明该 THz 超材料的慢光和吸收特性对偏振光不敏感, 这都受益于该 THz 超材料双 Au 环微结构单元的空间对称性设计.

5 总结

综上所述, 本文提出了一种具有慢光和吸收切换功能的 THz 超材料, 通过 GST 相变材料实现了慢光和吸收功能切换. 当 GST 材料处于绝缘态时, 基于两种谐振环之间的近场耦合产生的类 EIT 效应, 实现了最大群延迟为 3.6 ps 的慢光效应. 当 GST 材料转变为金属态时, 超材料结构切换为吸收器, 在 0.365 THz 和 0.609 THz 处产生了两个吸收峰, 吸收率分别为 96% 和 100%. 另外, 分析了中间介质厚度对吸收性能的影响, 同时利用阻抗匹配理论分析了该结构产生完美吸收的原因, 且发现该结构的慢光和吸收性能均对偏振光不敏感. 本文设计的超材料结构有望应用于光开关、光缓存器、光传感器等新型 THz 多功能器件中.

参考文献

- [1] Tonouchi M 2007 *Nat. Photonics* **1** 97
- [2] Yang X W, Zhao F 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 0806002
- [3] Wang Y Y, Wang G Q, Xu D G, Jiang B Z, Ge M L, Wu L M, Yang C Y, Mu N, Wang S, Chang C, Chen T, Feng H, Yao J Q 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 1017001
- [4] Shen Y C, Lo T, Taday P F, Cole B E, Tribe W R, Kemp M C 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 241116
- [5] Li H Y, Li Q, Xia Z W, Zhao Y P, Chen D Y, Wang Q 2013 *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* **34** 88
- [6] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101
- [7] Seddon N, Bearpark T 2003 *Science* **302** 1537
- [8] Zhong Y J, Huang Y, Zhong S C 2021 *Opt. Mater.* **14** 110996
- [9] Cai H 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800257
- [10] Zhu H L, Zhang Y, Ye L F, Li Y K, Xu Y H, Xu R 2020 *Opt. Express* **28** 414039
- [11] Hu F R, Wang H, Zhang X W, Xu X L, Jiang W Y, Rong Q, Zhao S, Jiang M Z, Zhang W T 2019 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **25** 4700207
- [12] Seo M, Park H R 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1900662
- [13] Cui W, Wang Y X, He Z H, He H 2021 *Results Phys.* **26** 104356
- [14] Gansel J K, Thiel M, Rill M S, Decker M, Bade K, Saile V, Freymann G V, Linden S, Wegener M 2009 *Science* **325** 1513
- [15] Makino K, Kato K, Saito Y, Fons P, Kolobov A V, Tominaga J J, Nakano T, Nakajima M 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 8209
- [16] Zhou K, Nan J Y, Shen J B, Li Z P, Cao J C, Song Z T, Zhu M, He B Q, Yan M, Zeng H P, Li H 2021 *APL Mater.* **9** 101113
- [17] Guo L Y, Ma X H, Chang Z Q, Xu C L, Liao J, Zhang R 2021 *J. Mater. Res. Technol.* **14** 772
- [18] Fabio A, Brian K, Dragoslav G, Nickolay V L, Gamani K 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 111104
- [19] Sun H Y, Zhao L, Dai J S, Liang Y Y, Guo J P, Meng H Y, Liu H Z, Dai Q F, Wei Z C 2020 *Nanomaterials* **10** 1359
- [20] Galván A M, Hernández J G 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 760
- [21] Manjappa M, Chiam S Y, Cong L Q, Bettiol A A, Zhang W L, Singh R J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 181101
- [22] Meng F Y, Wu Q, Erni D, Wu K, Lee J C 2012 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **60** 3013
- [23] Niakan N, Askari M, Zakery A 2012 *J. Opt. Soc. Am. B* **29** 2329
- [24] Sun H, Hu Y Z, Tang Y H, You J, Zhou J H, Liu H Z, Zheng X 2020 *Photonics Res.* **8** 263
- [25] Bagcia F, Akaoglu B 2018 *J. Appl. Phys.* **123** 173101
- [26] Suna Y B, Shi Y P, Liu X Y, Song J M, Lia M P, Wang X D, Yang F H 2021 *Nanoscale Adv.* **3** 4072
- [27] Mattiucci N, Bloemer M J, Aközbeck N, D'Aguanno G 2013 *Sci. Rep.* **3** 3203

Switchable multifunctional terahertz metamaterial with slow-light and absorption functions based on phase change materials*

Jin Jia-Sheng Ma Cheng-Ju[†] Zhang Yao Zhang Yue-Bin Bao Shi-Qian
Li Mi Li Dong-Ming Liu Ming Liu Qian-Zhen Zhang Yi-Xin

(School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

(Received 7 December 2022; revised manuscript received 12 February 2023)

Abstract

Terahertz (THz) wave usually refers to the electromagnetic wave with a frequency between 0.1–10.0 THz. It has potential applications in wireless communication, biomedical image processing, nondestructive testing, military radar, and other fields. However, owing to function limitation of the natural material, multifunctional terahertz devices are difficult to design and fabricate, which becomes a bottleneck for THz technology. The emergence of metamaterials fills the gap in the electromagnetic materials in the THz frequency band, and now they are widely used in THz functional devices, such as THz modulators, THz absorbers, THz filters, THz sensors, and THz slow-light devices. However, the above-mentioned THz devices all have a single function. For practical application, multifunction integrated THz devices have broader application prospects. As is well known, the $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) is a typical phase transition material. Under excitation of light or electronic field, GST can realize a reversible phase transition between insulating state and metallic state. In order to achieve a switchable multifunctional THz device, in this work we design a THz metamaterial based on the phase transition material GST and realize a switchable function with slow-light and absorption functions. The THz metamaterial consists of a microstructure layer, which is composed of gold rings arranged periodically, and a GST thin film spaced by an SiO_2 dielectric layer. When GST is in an insulating state, the two gold rings are coupled to each other under the excitation of the THz pulse. Then, we can observe the EIT-like effect. The THz pulses propagating in the metamaterial we proposed can be slowed down, and a maximum group delay of the THz pulse can reach 3.6 ps. However, when GST is in a metallic state, we can observe two absorption peaks in the spectrum of the proposed THz metamaterial, and the absorption rate is 97% at a frequency of 0.365 THz and 100% at a frequency of 0.609 THz. Furthermore, we also investigate the polarization properties of the proposed THz metamaterial, and find that it has polarization insensitive characteristic. When the polarization angle of the incident THz light pulse changes from 0° to 90° , the slow-light and absorption properties of the THz metamaterial are unaffected. The proposed THz metamaterial has potential applications in THz biomedical image processing, THz optical switching, and THz optical buffer.

Keywords: metamaterials, terahertz, slow light, absorber, phase change materials

PACS: 42.25.Bs, 42.79.Gn, 47.11.Bc

DOI: 10.7498/aps.72.20222336

* Project supported by the Innovation and Practice Ability Training Project of Xi'an Shiyou University, China (Grant No. YCS20213210).

[†] Corresponding author. E-mail: chengjuma@xsyu.edu.cn



基于相变材料的慢光和吸收可切换多功能太赫兹超材料

金嘉升 马成举 张焱 张跃斌 鲍士仟 李咪 李东明 刘洺 刘芊震 张贻歆

Switchable multifunctional terahertz metamaterial with slow-light and absorption functions based on phase change materials

Jin Jia-Sheng Ma Cheng-Ju Zhang Yao Zhang Yue-Bin Bao Shi-Qian Li Mi Li Dong-Ming Liu Ming Liu Qian-Zhen Zhang Yi-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 084202 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222336

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222336>

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

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure

物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

基于双开口金属环的太赫兹超材料吸波体传感器

Double-opening metal ring based terahertz metamaterial absorber sensor

物理学报. 2022, 71(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212303>

基于超材料复合结构的太赫兹液晶移相器

Terahertz liquid crystal phase shifter based on metamaterial composite structure

物理学报. 2022, 71(17): 178701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212400>

吸收波长和吸收效率可控的超材料吸收器

Metamaterial absorber with controllable absorption wavelength and absorption efficiency

物理学报. 2021, 70(2): 027804 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201173>

基于超材料的可调谐的太赫兹波宽频吸收器

Tunable terahertz wave broadband absorber based on metamaterial

物理学报. 2019, 68(24): 247802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191216>

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>