

# 可调慢光和开关滤波切换的多功能太赫兹超表面\*

屈左桐, 韩一宁, 王储, 赵建行\*, 周姚, 周见红

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

## 摘要

本文提出了一种基于相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)与热敏材料  $\text{SrTiO}_3$ (STO)的太赫兹超表面, 其具有多功能与可重构两大特性。当 GST 处于不同状态时, 该超表面能够分别实现可调慢光与开关滤波功能, 突破了传统太赫兹(THz)器件功能单一的局限。研究表明: 当 GST 处于绝缘态时, 明暗模式近场耦合激发出类电磁诱导反射(EIR)效应。利用 STO 的热敏特性, 能实现 EIR 反射窗口以及慢光效应的温控可调: 当温度由 200 K 升到 400 K 时, 反射窗口由 1.43 THz 移动到 1.79 THz。通过耦合谐振子模型分析, 其物理机制在于通过改变温度调控 STO 的介电常数, 影响暗模周围介质的有效折射率, 进而实现谐振频率的调节。当 GST 相变为金属态后, 器件功能切换为光开关与阻带滤波。此时, 光开关的调制深度可达 90%。阻带滤波 3 dB 带宽为 0.22 THz, 且表现出优异的温度无关性。该超表面在光缓存、光开关及信号处理中有潜在的应用价值。

**关键词:** 超表面, 太赫兹, 可调慢光, 开关滤波

**PACS:** 78.67.-n, 42.65.-k, 64.70.-p, 02.70.-c

**基金:** 吉林省科技发展计划项目(批准号 YDZJ202601ZYTS036)、国家自然科学基金(批准号 12274042)和高等学校学科创新引智计划(批准号 D21009)资助的课题。

通信作者. E-mail: [zjx@cust.edu.cn](mailto:zjx@cust.edu.cn)

第一作者. E-mail: [13863680403@163.com](mailto:13863680403@163.com)

## 1 引言

太赫兹(THz)波位于 0.1–10 THz，是电磁波谱中连接微波与远红外的重要频段<sup>[1,2]</sup>。凭借其光子能量低、穿透强、频带宽等优异特性，THz 波在感知通信<sup>[3]</sup>、片上调控<sup>[4]</sup>等领域有广阔的应用。然而，天然材料在 THz 频段普遍缺乏显著的电磁响应(如弱介电色散与低磁响应)，制约了高性能器件的发展。近年来，人工构建的亚波长周期结构——超材料及其二维形式超表面，为增强和调控 THz 波提供了有效途径<sup>[5]</sup>。

超表面由人工设计的亚波长微纳结构阵列组成，其物理厚度远小于横向尺寸<sup>[6]</sup>。相较于传统调控器件，超表面具备高效率、小体积和易集成等优势，能够灵活设计以满足不同的调控需求<sup>[7–11]</sup>。通过构建不同共振模式间的相干干涉，超表面可激发出电磁诱导效应。其中，电磁诱导反射(EIR)是由明模与暗模之间的相消干涉所产生的反射增强现象<sup>[12]</sup>。与电磁诱导透明不同，EIR 表现为宽带低反射背景中出现窄带高反射峰，并伴随强色散特性，在慢光调控<sup>[13]</sup>、频率选择<sup>[14]</sup>和高灵敏传感<sup>[15]</sup>等方面具有重要应用价值。

近年来，为突破传统超表面功能固化的局限，研究人员将动态可调材料引入微纳结构设计中，以实现器件功能的主动切换<sup>[16]</sup>。 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST)是一种典型的非易失性相变材料，具备三种物理结构状态：非晶态(a-GST，绝缘态)、亚稳面心立方相(c-GST，半导体)以及稳定六方相(h-GST，金属态)<sup>[17]</sup>。在光、电或者热激励下，该材料可实现跨相态的可逆转换。随着温度的升高，非晶态 GST 于约 423 K 发生晶化，转变为半导体；当温度升至约 573 K 时，材料相变为高电导率的金属态。撤除激励后，其物理状态仍能稳定保持。利用瞬态强光脉冲使其达到熔融态，随后快速冷却，可使其恢复至非晶态。 $\text{SrTiO}_3$ (STO)<sup>[18]</sup>是一种典型的热

敏材料,其介电常数可以通过改变温度来进行调节,进而能够调控局域电磁环境,实现器件谐振特性的连续调节。Guo 等<sup>[19]</sup>将 GST 嵌入超表面谐振器中,通过抑制暗模谐振,实现了 THz 谐振振幅的非易失性开关与多级调制;Liang 等<sup>[20]</sup>则结合 STO 的温控特性,在超表面器件中实现了谐振频率的热调谐与高灵敏度温度传感。然而,现有 THz 超表面普遍面临功能固化的局限,大多仅能实现单一的频率平移或振幅调制,在实现功能切换方面研究较少。因此,将相变材料与热敏材料相融合,探究多功能切换机制具有重要的研究意义。

为此,本文提出了一种结合相变材料 GST 与热敏材料 STO 的多功能太赫兹超表面。该器件在 GST 绝缘态下,通过明暗模式近场耦合,激发出类 EIR 效应,通过改变温度,影响 STO 的热敏特性,实现了反射窗口及慢光效应在工作频带内的连续调谐。引入耦合谐振子模型揭示了其物理机理,定量解析了谐振参数的温度演化规律。并对折射率传感的潜在应用进行了研究。GST 发生非易失性相变至金属态后,阻断明暗模式间的近场耦合,器件功能切换为高调制深度的光开关与阻带滤波,且阻带滤波不受环境温度变化的影响。最后,分析了结构参数变化对器件性能的影响,并分析了器件制备的可行性。

## 2 结构设计与仿真

设计的超表面单元结构如图 1 所示,图 1(a)是超表面单元三维示意图,图 1(b)是其微结构单元的俯视图。图中  $\mathbf{k}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  分别代表入射光的波矢量、电场和磁场方向。该器件自上而下由三部分构成: Au 与 GST 构成的结构顶层、STO 介质调控层,以及半无限厚的聚合物衬底层。超表面单元在  $x$ - $y$  平面内呈周期性排布,晶格周期设为  $P_x=P_y=100\text{ }\mu\text{m}$ ,顶层厚度为  $0.4\text{ }\mu\text{m}$ ;中间调控层的厚度为  $0.15$

$\mu\text{m}$ 。顶层金膜被刻蚀成“ $\pi$ ”型互补槽结构，由一条沿  $x$  轴延伸的水平槽和两条沿  $y$  轴延伸的垂直槽组成，GST 完全填充于垂直槽内。同时，STO 调控层放置于垂直槽正下方，用于通过温度调控局部介电环境。几何参数设定为：水平槽长  $L_1=62\ \mu\text{m}$ 、宽  $w_1=14\ \mu\text{m}$ ；垂直槽长  $L_2=70\ \mu\text{m}$ 、宽  $w_2=12\ \mu\text{m}$ ；水平槽两端与垂直槽外侧边界严格对齐，且水平槽与两侧垂直槽之间的耦合间隙设定为  $g=2\ \mu\text{m}$ 。

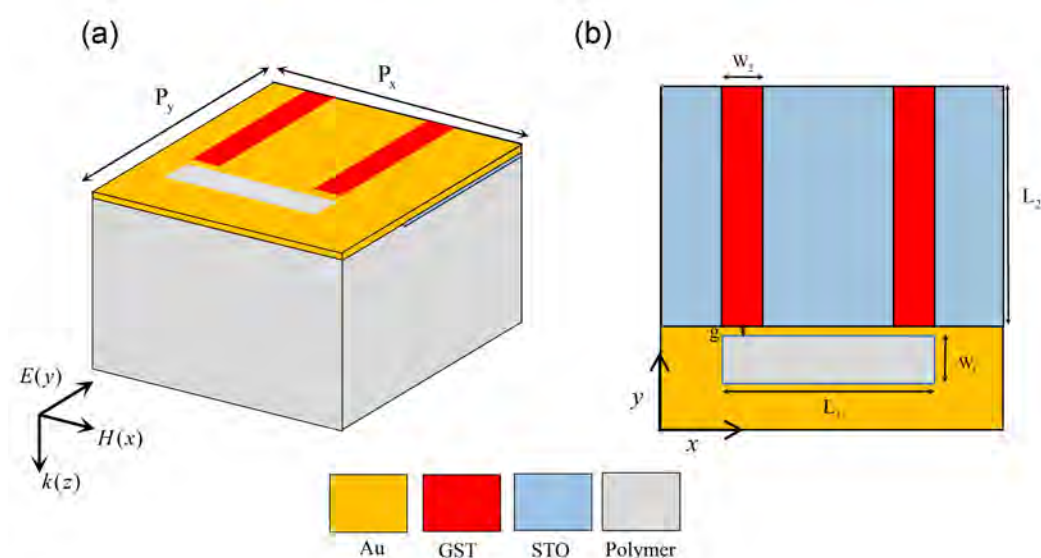


图1 所提出的太赫兹多功能器件：(a) 示意图；(b) 俯视图

Fig. 1. Proposed THz multifunctional device: (a) schematic; (b) top view.

在太赫兹频段，底层聚合物衬底选用低吸收损耗的环烯烃共聚物(Topas)，其折射率设定为  $1.53^{[21]}$ 。金材料的建模采用 Matula 提供的实验推荐电导率数据<sup>[22]</sup>定义，通过导入不同温度点对应的电导率来体现。

STO 的复相对介电常数可表示为<sup>[23]</sup>：

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{f}{\omega_0^2(T) - \omega^2 - i\omega\gamma(T)} \quad (1)$$

其中： $\varepsilon_{\infty}$  为高频 bulk 介电常数，其数值约为 9.6； $f = 2.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$  为振子强度，该参数通常被认为与温度无关； $\omega$  为入射光的角频率；软模特征频率  $\omega_0$  和阻尼参数  $\gamma$  随环境温度  $T$  动态演变，其关系遵循：

$$\omega_0(T) [\text{cm}^{-1}] = \sqrt{31.2(T - 42.5)} \quad (2)$$

$$\gamma(T) [\text{cm}^{-1}] = -3.3 + 0.094T \quad (3)$$

GST 的介电常数可用 Drude 模型描述<sup>[24]</sup>：

$$\varepsilon_{\text{GST}} = \varepsilon - \frac{\sigma_{\text{dc}}}{\varepsilon_0 \omega (1 - i\tau\omega)} \quad (4)$$

其中： $\varepsilon$  为高频介电常数； $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$  为真空介电常数； $\sigma_{\text{dc}}$  为直流电导率； $\tau$  为载流子弛豫时间。不同相态下 GST 的 Drude 模型参数详见表 1：

表 1 GST 的 Drude 模型参数  
Table 1. Drude Model Parameters of GST

| 相态        | $\varepsilon$ | $\sigma_{\text{dc}} (\text{S/m})$ | $\tau (\text{ps})$ |
|-----------|---------------|-----------------------------------|--------------------|
| 非晶态(绝缘态)  | 15.3          | 0                                 | —                  |
| 面心立方(半导体) | 38.2          | $3.82 \times 10^4$                | 1.61               |
| 六方态(金属态)  | 60.6          | $2.23 \times 10^5$                | 5.29               |

本文采用时域有限差分(FDTD)方法，对超表面的光学性质进行仿真。仿真设置如下：平面电磁波沿  $z$  轴负方向垂直入射至超表面，其电场偏振方向平行于  $y$  轴(即  $y$  偏振，如图 1 所示)。在  $x$  和  $y$  方向采用周期性边界条件， $z$  方向设置完美匹配层(PML)。为保证计算精度与收敛性，空间网格尺寸设定为  $dx = 1.5 \mu\text{m}$ ， $dy = 1.5 \mu\text{m}$ ， $dz = 0.03 \mu\text{m}$ 。

### 3 模拟结果及讨论

#### 3.1 绝缘态 GST 下的温度调控类 EIR 效应



当 GST 处于绝缘态(300 K)时, 当  $y$  偏振光入射时, 器件表现为类 EIR 效应, 如图 2 所示: 孤立水平槽在 1.65 THz 处激发出典型的宽带电偶极子共振, 充当明模谐振器; 而垂直槽在此频段无明显响应, 充当暗模谐振器。当两者组合后, 明暗模式发生近场耦合, 在原明模的宽带低反射背景下(1.65 THz)激发出反射率达 82.4% 的窄带反射峰, 形成类 EIR 效应。如插图所示, 在 EIR 反射窗口处, 反射率为 82.4%、透射率为 1.3%。吸收率(A)由透射率(T)和反射率(R)计算, 根据关系式  $A = 1 - T - R$  得出, 吸收率为 16.3%。可见, 反射损耗主要源于器件的吸收, 由金谐振器在太赫兹波段的欧姆损耗引起<sup>[25]</sup>。

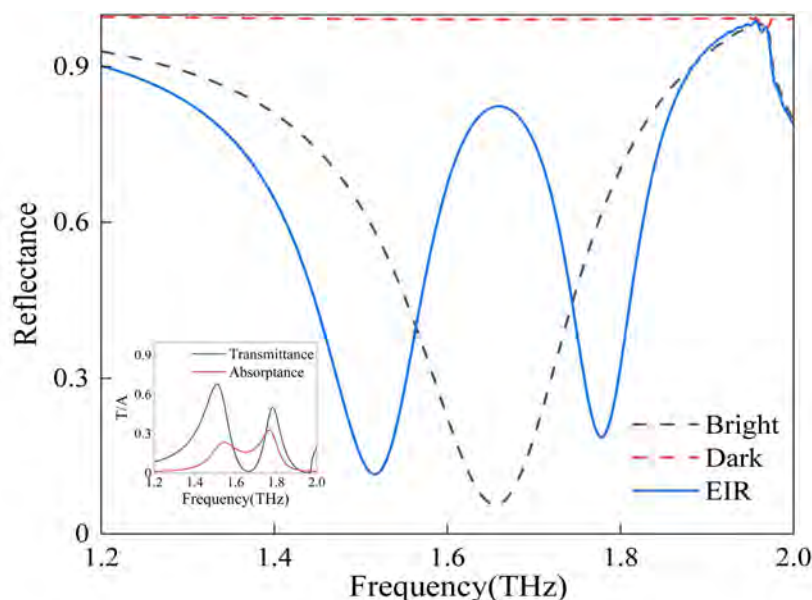


图 2 不同结构单元的反射谱（主图）以及组合结构的透射谱与吸收谱（插图）

Fig. 2. Reflection spectra of different structural units (main figure) and the transmission and absorption spectra of the combined structure (inset).

为揭示类 EIR 效应的物理机制, 图 3 给出了谐振频率处各结构的近场电场强度分布。如图 3(a)所示, 仅保留水平槽时, 电场局域在水平槽两侧。沿  $x$  轴延伸的水平槽, 其有效极化方向垂直于长轴(沿  $y$  轴), 在  $y$  偏振入射光激发下产生

电偶极子共振。该模式在耦合入射能量的同时，向远场发出强烈辐射，对应较低的辐射品质因数(Q 因子)，在体系中作为明模。

反之，如图 3(b)所示，孤立的垂直槽内未出现明显的电场增强。这是由于其与入射电场发生极化失配，难以被直接激发向远场辐射能量。因此其具有低辐射损耗特性(高 Q 因子)，充当暗模。

如图 3(c)所示，当明暗模式组合构成“ $\pi$ ”型超表面单元时，能量发生高效的转移。入射电磁能量首先耦合至低 Q 的明模，随后通过近场耦合转移至高 Q 的暗模中，高度局域于垂直槽的末端，间接激发出四极子共振。明模区域的宽带辐射振荡被显著抑制。由于四极子分布与入射场的模式重叠极弱，呈现出典型的亚辐射特征，电磁能量被局域于超表面近场区域，从而产生类 EIR 效应。

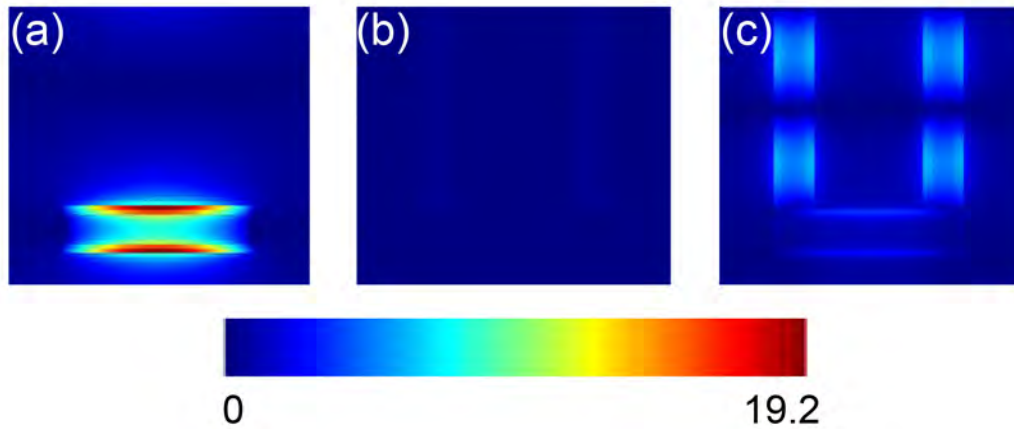


图 3 不同结构单元在 1.65 THz 处的电场强度分布：(a) 仅明模；(b) 仅暗模；  
(c) 组合结构

Fig. 3. Electric field distributions at 1.65 THz: (a) bright mode only; (b) dark mode only;  
(c) combined structure.

由于 STO 材料的温度敏感特性，该超表面的光学特性会随着环境温度的改变而变化。当温度从 200 K 升高到 400 K 时，反射窗口发生蓝移，由 1.43 THz 移动到 1.79 THz，如图 4(a)—(e)所示。调控温度始终低于 GST 相变温度，材料保持绝缘态，GST 的介电属性可视为恒定<sup>[26]</sup>。为了定量解析现象的内在物理机

制，本文引入耦合谐振子模型(CRM)对仿真结果进行理论拟合。类比于三能级原子体系中的量子相干效应，该模型包含一个基态 $|0\rangle$ 以及两个激发态 $|1\rangle$ 与 $|2\rangle$ 。其中， $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ 被定义为偶极允许跃迁，对应于本体系中可被入射太赫兹波直接激发的谐振结构(明模谐振器)； $|0\rangle \rightarrow |2\rangle$ 被定义为偶极禁戒跃迁，对应不能被直接激发的结构(暗模谐振器)。此外， $|1\rangle$ 与 $|2\rangle$ 之间的相互作用对应于两谐振器间的近场耦合。这种耦合作用在两个激发通道之间引入了相消干涉，从而导致了特定频率处 EIR 反射窗口的形成。将明模和暗模分别类比于受外场激励和不受外场激励的谐振子，两者发生相互耦合，分别满足以下方程<sup>[27,28]</sup>：

$$\ddot{x}_1 + \gamma_1 \dot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 + \kappa x_2 = E \quad (5)$$

$$\ddot{x}_2 + \gamma_2 \dot{x}_2 + (\omega_0 + \delta)^2 x_2 + \kappa x_1 = 0 \quad (6)$$

其中， $x_1$ 和 $x_2$ 、 $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ 分别代表明、暗模谐振器的谐振振幅和辐射损耗。 $\omega_0$ 是明模谐振器在与暗模谐振器耦合前的谐振频率， $\delta$ 是暗模谐振器相对明模谐振器谐振频率的失谐量， $\kappa$ 表示两谐振子之间的耦合系数。在 $\omega - \omega_0 \ll \omega_0$ 近似条件下求解上述方程组，得到系统的复极化率 $\chi$ <sup>[29]</sup>：

$$\chi = \chi_r + i\chi_i \propto \frac{(\omega - \omega_0 - \delta) + i\frac{\gamma_2}{2}}{(\omega - \omega_0 + i\frac{\gamma_1}{2})(\omega - \omega_0 - \delta + i\frac{\gamma_2}{2}) - \frac{\kappa^2}{4}} \quad (7)$$

由于系统的能量响应与极化率的虚部 $\chi_i$ 成正比，反射强度可计算为 $R = 1 - g\chi_i$ ，其中 $g$ 是表示明模式谐振器与入射电场 $E$ 耦合强度的几何参数。



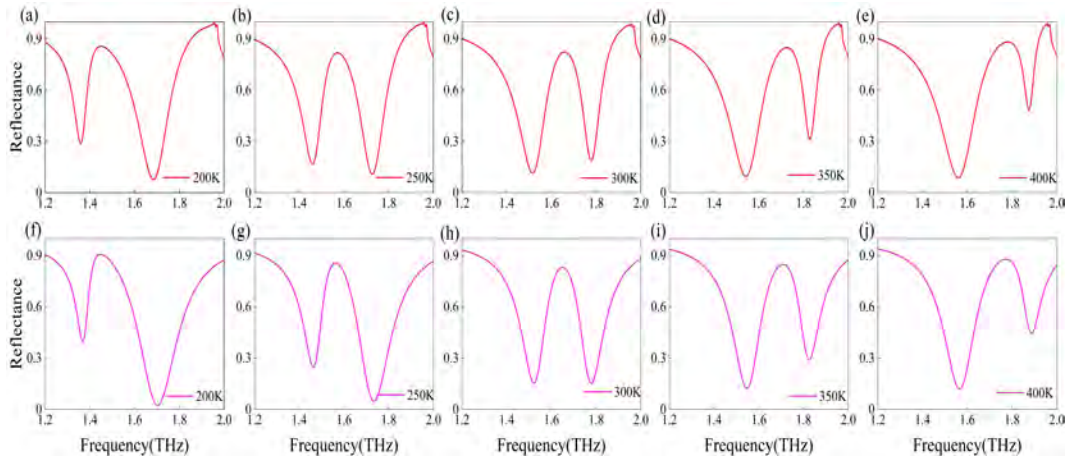


图 4 随着温度增加，EIR 超表面的仿真反射谱 (a)—(e)；对应拟合反射谱 (f)—(j)

Fig. 4. Simulated reflection spectra of the EIR metamaterial with increasing temperature(a)-(e); corresponding fitted reflection spectra(f)-(j).

如图 4(f)—(j)所示，理论与仿真的反射曲线高度吻合，考虑到实际仿真中材料的色散和损耗因素，仿真计算与理论拟合的反射曲线会有细微不同。通过求解该系统的耦合微分方程组，可提取不同温度下各模式的谐振频率、辐射损耗及耦合系数，如图 5 所示。在 200–400 K 的温度区间内，各模式的辐射损耗因子及耦合系数均未出现明显波动。

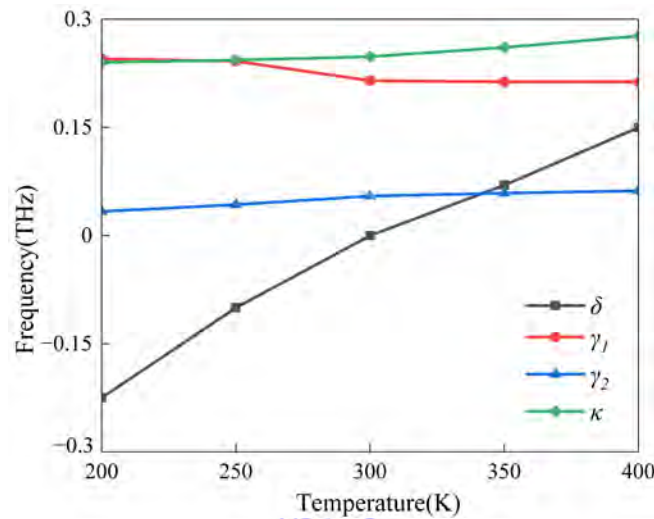


图 5 拟合参数随温度变化的趋势图

Fig. 5. Variation of fitting parameters with temperature.

相比之下，表征明暗模式频率间距的失谐量  $\delta$  随温度的升高发生了剧烈改变。明模中心频率  $f_1$  始终稳定在 1.65 THz 附近，暗模本征谐振频率  $f_2$  随温度升高发生了蓝移，从而引起失谐量的增大。为揭示上述频移的物理机制，基于半波长谐振条件，本征频率  $f$  可表示为<sup>[30]</sup>：

$$f = \frac{c}{2Ln_{eff}} \quad (8)$$

其中， $c$  为真空中的光速， $L$  为谐振槽的物理特征长度， $n_{eff}$  为周围介质的有效折射率。STO 的软模频率和阻尼参数会随环境温度变化而改变。因此，通过外部温控可以改变 STO 的介电常数，实现对局部电磁环境的调控。随着温度的升高，STO 的介电常数显著减小，降低了周围介质的有效折射率。由于暗模槽线的尺寸保持固定，有效折射率的下降，导致其谐振频率发生蓝移。

EIR 现象会改变色散性质，导致慢光效应，在光存储和量子存储方面有许多潜在的应用。为定量评估该器件的慢光性能，本文引入群延迟  $\tau_g$  进行表征，其在数学上定义为<sup>[31]</sup>：

$$\tau_g = \frac{d\varphi}{d\omega} \quad (9)$$

其中  $\varphi$  是传输相移， $\omega$  为入射电磁波的角频率。图 6(a)—(e) 呈现了 200–400 K 范围内的传输相移谱(由超表面与参考基底的传输相位差求得)，用公式(9)计算得出的群延迟如图 6(f)—(j)所示。可以看出，在反射窗口频率附近，该器件表现出较大的正群延迟，证实了慢光效应的存在。随着温度的升高，最大群延迟所在的工作频率发生蓝移，其值由 5.25 ps(200 K)减小至 2.23 ps(400 K)。

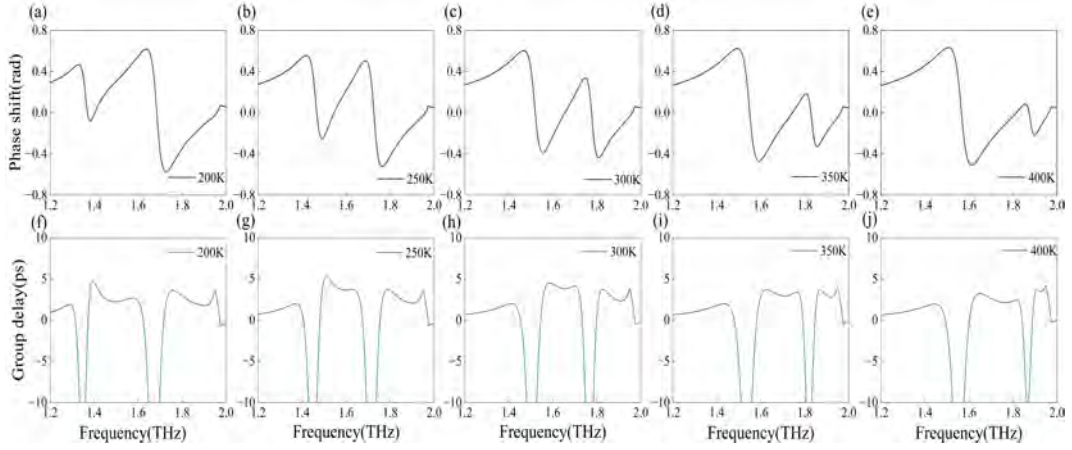


图 6 随着温度的增加，超表面的传输相移 (a)–(e)；群延迟 (f)–(j)

Fig. 6. (a)–(e) Transmission phase shift and (f)–(j) group delay of the metamaterial with increasing temperature.

慢光品质因子(DBP)用于描述器件提供的最高慢光容量，定义为群延迟与频谱带宽的乘积<sup>[32]</sup>：

$$DBP = \tau_g \times \Delta f \quad (10)$$

其中， $\Delta f$  为反射峰半高全宽， $\tau_g$  为反射窗口附近最大的群延迟。当温度由 200 K 升高到 400 K，反射窗口的 DBP 由 1.14 下降到 0.52。因此，通过调节温度，可以主动控制慢光效应的 DBP 和工作区域。

此外，类 EIR 效应具有传感应用的潜力。本文在数值仿真中将超表面上方的介质空间等效为待测分析物层，并设置不同的折射率进行数值仿真。图 7(a) 显示了不同折射率介质的反射谱。当折射率从 1.0 增加到 1.6 时，反射峰发生红移。折射率灵敏度(S)是评估传感器性能的重要指标，其表达式为<sup>[33]</sup>：

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta n} \quad (11)$$

其中， $\Delta f$  表示频率偏移量， $\Delta n$  表示折射率变化量。通过公式(10)得出，该器件的灵敏度约为 0.208 THz/RIU。这与近年来同类传感器相比，有一定优势，如表 2 所示。传感优值(FOM)定义为灵敏度与反射峰半高全宽(FWHM)的比值<sup>[34]</sup>：

$$FOM = \frac{S}{FWHM} \quad (12)$$

计算得出，本工作的 FOM 值约为  $0.945 \text{ RIU}^{-1}$ 。

表 2 与同类传感器的对比

Table 2. Comparison with recently reported sensing metasurfaces

| 参考文献      | 工作频段          | 灵敏度           |
|-----------|---------------|---------------|
| [35]      | 1.0-1.7 THz   | 0.12 THz/RIU  |
| [36]      | 1.03-2.38 THz | 0.18 THz/RIU  |
| [37]      | 0.4-1.0 THz   | 0.2 THz/RIU   |
| This work | 1.2-2.0 THz   | 0.208 THz/RIU |

此外，本文还研究了在斜入射下器件的鲁棒性，如图 7(b)所示。随着入射角的增大，反射谱整体的谐振特征依然存在，表明该器件对大角度斜入射有良好的鲁棒性。最后，仿真分析了该器件在不同偏振光入射时的反射光谱。结构只有入射光的电场沿 y 轴偏振( $90^\circ$ )时，才能有效激发明暗模式耦合。如图 7(c)所示，随着偏振角逐渐偏离  $90^\circ$ ，y 方向上的电场分量减小，反射窗口趋于平缓，EIR 效应减弱。

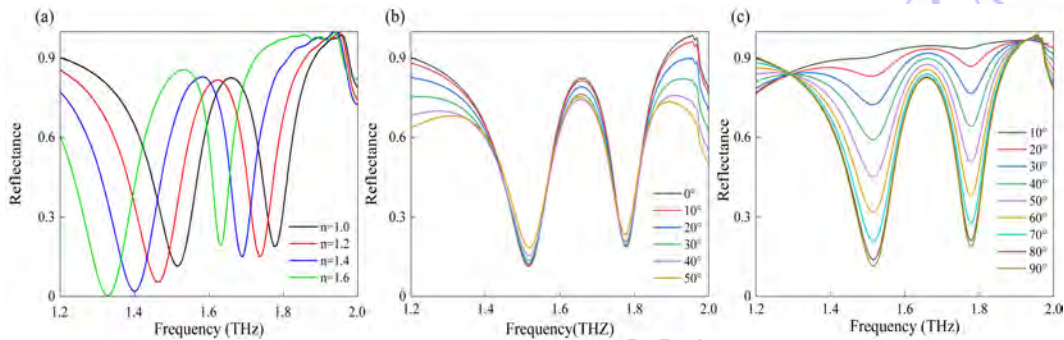


图 7 EIR 反射谱随参数的变化：(a) 介质折射率  $n$ ；(b) 入射角；(c) 偏振角

Fig. 7. Dependence of EIR reflection spectra on: (a) medium refractive index  $n$ ; (b) incident angle; (c) polarization angle

### 3.2 金属态 GST 下的温度无关太赫兹调制

太赫兹调制器在光开关与光滤波<sup>[38]</sup>等领域具有重要的应用价值，本器件利用 GST 的非易失性相变实现功能的动态切换。当 GST 结晶并处于金属态时，其高

电导率在垂直槽中引入欧姆损耗，导致暗模品质因子下降。进而抑制了暗模的有效激发，阻断近场耦合，使 EIR 效应消失。

如图 8 所示，原 EIR 谐振频率处的反射率从绝缘态的 82% 大幅降至 8%，EIR 反射窗口消失，实现光开关。为定量评估该相变过程带来的振幅调制，引入调制深度(MD)进行表征，其数学定义为<sup>[39]</sup>：

$$MD = \frac{R_a - R_h}{R_a} \times 100\% \quad (13)$$

其中， $R_a$  和  $R_h$  分别代表 GST 处于绝缘态和金属态时，器件在谐振中心频率处的反射率。计算得出，光开关的调制深度可以达到 90%，展现出优异的调制特性。

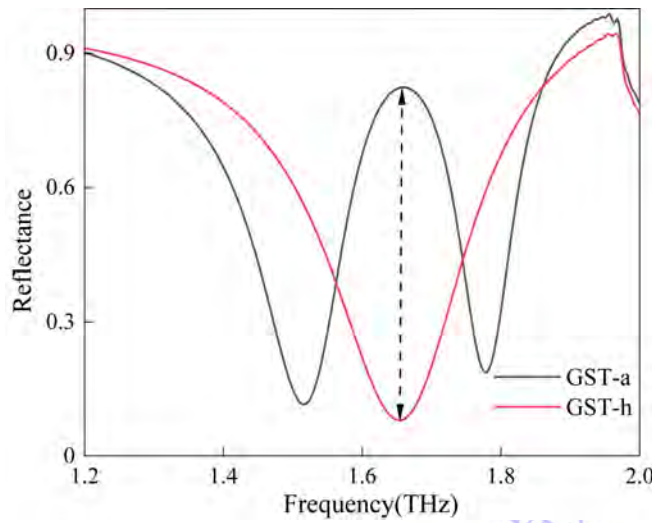


图 8 GST 金属态与绝缘态下的反射谱

Fig. 8. Reflection spectra of GST in metallic and insulating states.

该过程可通过耦合谐振子模型进行拟合，如图 9(a)所示。GST 相变后，明暗模式间的耦合强度  $\kappa$  衰减并趋于零，干涉的反馈项可以忽略，极化率  $\chi$  退化为偶极子形式：

$$\chi \propto \frac{1}{\omega - \omega_0 + i\gamma_1} \quad (14)$$



孤立的明模向远场辐射能量，随着系统辐射损耗的增加，器件表现为阻带滤波的特性。依据 3 dB 衰减阈值评估<sup>[40]</sup>，其带宽达 0.22 THz，在阻带中心频率处，反射率仅为 8%。滤波器的矩形系数 (SF) 定义为带宽 3 dB 与 8 dB 带宽之比<sup>[41]</sup>，反映了从通带到阻带过渡的陡峭程度。在本工作中，计算得到的 SF 为 2.93。同时，STO 对局域电磁环境的调控作用随之失效，器件表现出优异的温度无关性：如图 9(b)所示，在工作温度范围内，阻带滤波的特性保持稳定。进一步的分析表明，调整水平槽长度  $L_1$ ，可实现对阻带中心频率的灵活调谐，见图 9(c)。此外，该阻带滤波窗口的中心频率同样随表面介质折射率变化而偏移，见图 9(d)。

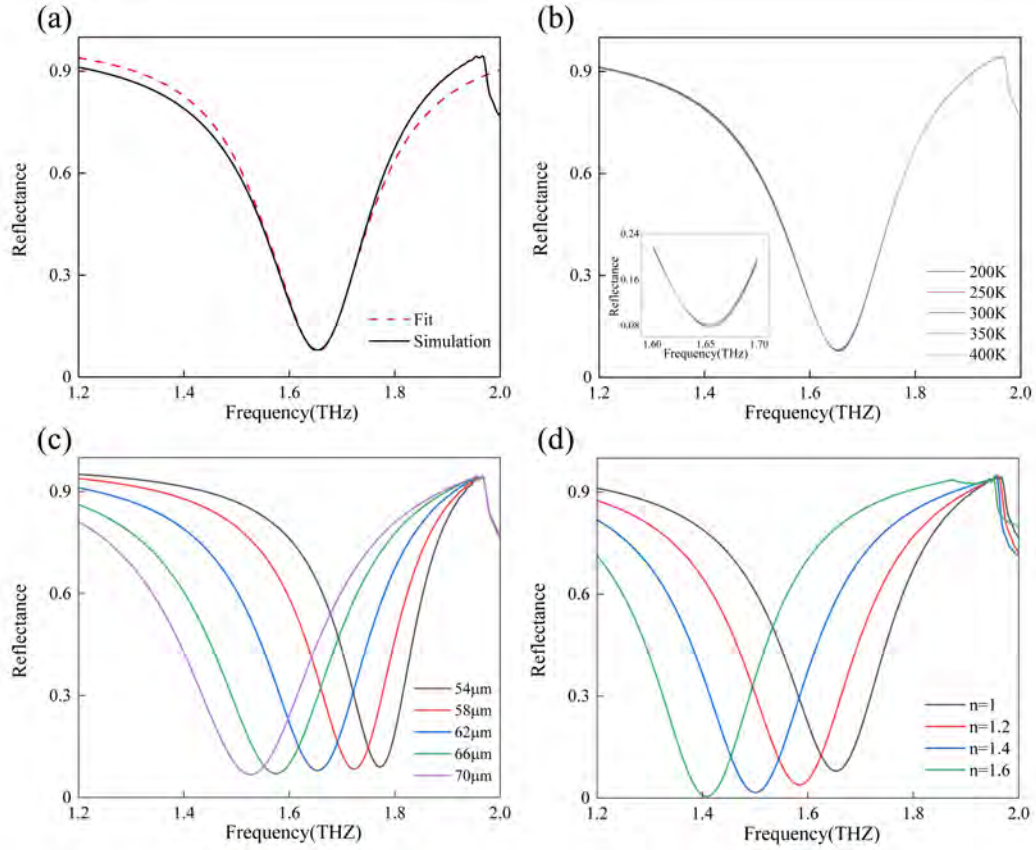


图 9 金属态 GST 反射谱：(a)与 CRM 拟合图；(b)—(d) 随参量变化：(b) 温度，(c)  $L_1$ ，(d)介质折射率  $n$

Fig. 9. Reflection spectra of metallic GST: (a) CRM fitting; dependence on (b) temperature, (c)  $L_1$ , and (d) medium refractive index  $n$ .

通过与近年同类工作在物理层面的横向对比，可以清晰看出，本工作在多功能切换以及各项物理指标上具有良好的综合优势。具体的比较结果如表 3 所示。

表 3 与同类太赫兹超表面的性能对比

Table 3. Performance comparison with similar terahertz metasurfaces

| 参考文献 | 调谐范围          | 调制深度  | 群延迟     | 功能维度                      |
|------|---------------|-------|---------|---------------------------|
| [42] | /             | 87.7% | 2.7 ps  | EIT 开关调控                  |
| [43] | /             | 77%   | 4.6 ps  | EIT 开关调控                  |
| [44] | 0.88-1.01 THz | 74.7% | 1.47 ps | EIT 开关、工作波段调控             |
| [45] | 0.74-0.82 THz | /     | >1 ps   | EIT 工作波段调谐                |
| 本工作  | 1.43-1.79 THz | 90%   | 5.25 ps | EIT 开关、工作波段调控，<br>滤波器功能切换 |

最后，以单个周期截面图为例分析该结构的制备可行性，如图 10 所示。首先，利用光刻、镀膜工艺制备嵌于基底的 STO 结构；在此基础上，制备 GST 结构及其周围的金膜层；随后，对金膜进行光刻与刻蚀，得到横槽结构。

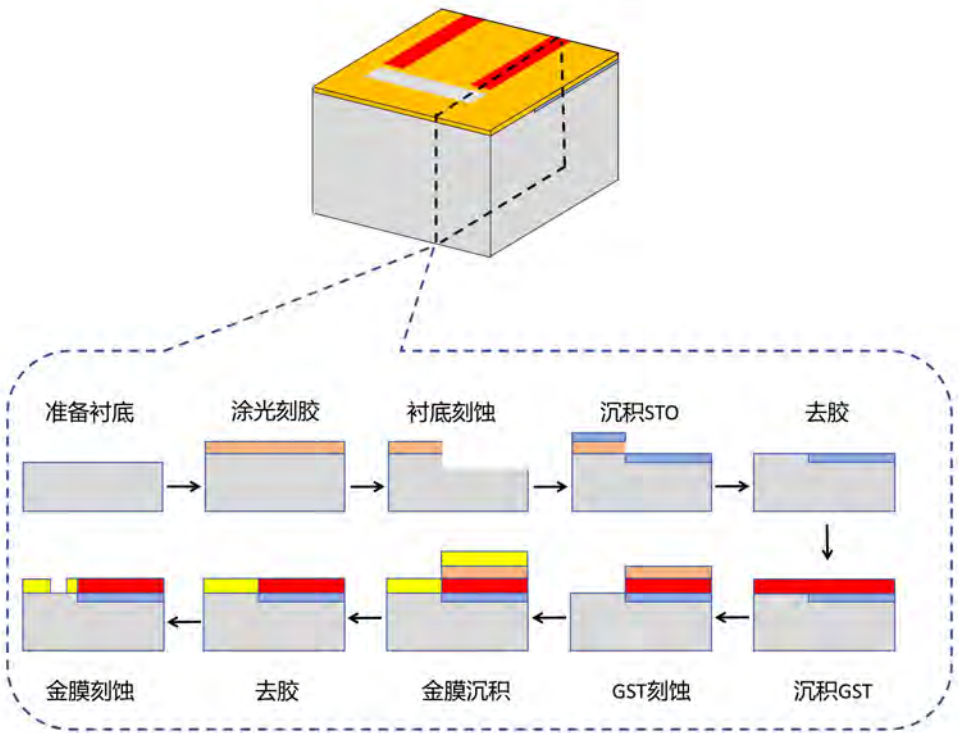


图 10 器件制备流程示意图

Fig. 10. Schematic diagram of the device fabrication process.

## 4 结 论

综上所述,本文提出一种相变材料 GST 与热敏材料 STO 的多功能 THz 超表面,通过改变 GST 的相态,能够实现可调慢光和开关滤波的功能切换。该器件由聚合物基底、STO 介质层和刻蚀“ $\pi$ ”形狭缝并填充 GST 的金膜组成。当 GST 处于绝缘态时,基于明暗模式近场耦合产生的类 EIR 效应。通过改变环境温度,实现 EIR 反射窗口及慢光效应在 1.43–1.79 THz 的调谐。且该模式下对介质折射率有 0.208 THz/RIU 的传感灵敏度。当 GST 相变至金属态后,系统退化为偶极子共振,器件实现调制深度 90%的光开关,阻带滤波 3 dB 的带宽为 0.22 THz,且阻带特性随温度保持稳定。本文提出的研究,突破了传统太赫兹器件功能固化的局限,有望应用于光缓存、光开关及信号处理等 THz 多功能器件中。

## 参考文献:

- [1] Qureshi U U R, Basir S, Mallek F, Hamam H 2024 *Sci. Rep.* **14** 5118
- [2] Preu S 2025 *APL Photonics* **10** 110901
- [3] To Y, Du J, Decroze C, Huitema L, Crunteanu A, Wong H 2026 *Adv. Funct. Mater.* **36** e15085
- [4] He X J, Wu M Z, Lu G J, Zhang Y, Geng Z X, Qu Y Q 2025 *Photon. Res.* **13** 3511
- [5] Chen H T, Taylor A J, Yu N F 2016 *Rep. Prog. Phys.* **79** 076401
- [6] Yu N F, Capasso F 2014 *Nat. Mater.* **13** 139
- [7] Wu M Z, He X J, Lu G J, Zhang Y, Geng Z X, Liu H, Zhang K 2026 *Laser Photonics Rev.* **20** e01634
- [8] Chen Y, Cao W H, Li J Q, Zhang M Z, Du X Y, Gao D S, Li P L 2025 *Chin. Phys. B* **34** 044205

- [9] Wei T, Zhang Y J, Ge H Y, Jiang Y Y, Wu X Y, Sun Z Y, Ji X D, Bu Y W, Jia K K 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 224201 (in Chinese) [魏涛, 张玉洁, 葛宏义, 蒋玉英, 吴旭阳, 孙振雨, 季晓迪, 补雨薇, 贾柯柯 2024 物理学报 **73** 224201]
- [10] Li J H, Xiong H T, Kong D Y, Zhao W P, Liu S J, Quan B G, Wu X J 2024 *Chin. Phys. Lett.* **41** 124201
- [11] Zhang Y J, Li C L, Luan J Q, Zhao M, Gao D S, Li P L 2024 *Chin. Phys. B* **33** 104210
- [12] Ma Q L, Hong W Y, Shui L L 2022 *Opt. Express* **30** 3055
- [13] Chen M, Yang X X 2023 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **25** 21547
- [14] Barzegar-Parizi S, Ebrahimi A, Ghorbani K 2023 *Phys. Scr.* **98** 065531
- [15] Wu Z L, An P Y, Ding M H, Qi Y N, Zhang L, Han S S, Lian D, Chen C M, Yang X 2022 *Appl. Sci.* **12** 7057
- [16] Wang D, Li J S, Guo F L 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 148701 (in Chinese) [王丹, 李九生, 郭风雷 2024 物理学报 **73** 148701]
- [17] Makino K, Kato K, Saito Y, Fons P, Kolobov A V, Tominaga J, Nakano T, Nakajima M 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 8209
- [18] Zhang Y G, Shi Z, Liang L, Wang Z, Yan X, Yao H, Li Z, Hu X, Li Y, Wu J, Ma S, Wang Q, Chen Y, Tian H, Zhang X, Huai F 2025 *Photon. Res.* **13** 1242
- [19] Guo W P, Wang Y, Liu C X, Liu J, Che X K, Tan P, Li L, Tian H 2026 *Opt. Mater. Express* **16** 970
- [20] Liang L J, Liu W, Yan X, Zhang Y G, Li Z H, Yao H Y, Wang Z Q, Hu X F, Li Y P, Wu G F, Zhang R, Feng Z W, Cao X, Ying K H 2024 *Opt. Express* **32** 22578
- [21] Cunningham P D, Valdes N N, Vallejo F A, Hayden L M, Polishak B, Zhou X H, Luo J, Jen A K Y, Williams J C, Twieg R J 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 043505
- [22] Matula R A 1979 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **8** 1147
- [23] Kužel P, Kadlec F 2008 *C. R. Phys.* **9** 197
- [24] Mendoza-Galván A, González-Hernández J 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 760
- [25] Zhu L, Wang S J, Wang Y, Dong L, Li H L, Wang Y Y, Ding X M 2025 *Photonics* **12** 463

- [26]Gavdush A A, Komandin G A, Bukin V V, Zaytsev K I, Ponomarev D S, Tan L, Huang W, Shi Q 2023 *J. Appl. Phys.* **134** 085103
- [27]Liu N, Langguth L, Weiss T, Kästel J, Fleischhauer M, Pfau T, Giessen H 2009 *Nat. Mater.* **8** 758
- [28]Xiao S Y, Wang T, Liu T T, Yan X C, Li Z, Xu C 2018 *Carbon* **126** 271
- [29]Ding J, Arigong B, Ren H, Zhou M, Shao J, Lu M, Chai Y, Lin Y K, Zhang H L 2014 *Sci. Rep.* **4** 6128
- [30]Lee S H, Lee D K, Kim C, Jhon Y M, Son J H, Seo M 2017 *Opt. Express* **25** 11436
- [31]Han Y N, Zhao J X, Zhou Y, Zhang G, Zhou J H 2025 *Phys. Scr.* **100** 065530
- [32]Wang Y, Tao M N, Pei Z, Yu X Z, Wang B H, Jiang J X, He X J 2018 *RSC Adv.* **8** 37057
- [33]Zhang X, Wang Y, Zhang W Y, Zhang X J, Luo F, Song B C, Zhang K, Shi W 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 026102 (in Chinese) [张向, 王玥, 张婉莹, 张晓菊, 罗帆, 宋博晨, 张狂, 施卫 2024 物理学报 **73** 026102]
- [34]Wang Y H, Xiong L, Tian M, Li G Y 2021 *Appl. Opt.* **60** 11205
- [35]Zhuang H, Ding W, Tan H, Tian C, Kong F 2023 *Opt. Quantum Electron.* **55** 390
- [36]Nasiri Shehni P, Mehranpour M 2025 *Appl. Opt.* **64** 2002
- [37]Zhao J X, Zhou J H 2023 *Phys. Scr.* **98** 015511
- [38]Ju X W, Zhang L F, Huang F, Zhu G F, Li S J, Chen Y Q, Wang J X, Zhong S C, Chen Y, Wang X F 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 060702 (in Chinese) [居学尉, 张林烽, 黄峰, 朱国锋, 李淑锦, 陈燕青, 王嘉勋, 钟舜聪, 陈盈, 王向峰 2024 物理学报 **73** 060702]
- [39]Zhang Z J, Yang J B, Bai W, Han Y X, He X, Huang J, Chen D B, Xu S Y, Xie W L 2019 *Appl. Opt.* **58** 7392
- [40]Li Z W, Li J S 2021 *Appl. Opt.* **60** 2450
- [41>Weinstein D, Bhawe S A, Tada M, Mitarai S, Morita S, Ikeda K 2007 *IEEE International Frequency Control Symposium* Geneva, Switzerland, May 29–June 1, 2007, p1362



- [42] Wang H, Zhang Y T, Hu F R, Jiang M Z, Zhang L H, Zhang W T, Han J G 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 061701
- [43] Xu X, Lou J, Gao M X, Wu S Y, Fang G Y, Huang Y D 2023 *Sensors* **23** 1174
- [44] Wu T, Wang G, Jia Y, Shao Y B, Chen C, Han J, Gao Y, Gao Y C 2021 *Nanomaterials* **11** 2876
- [45] Xu Q, Su X Q, Ouyang C M, Xu N N, Cao W, Zhang Y P, Li Q, Hu C, Gu J Q, Tian Z, Azad A K, Han J G, Zhang W L 2016 *Opt. Lett.* **41** 4562

录用稿件，非最终出版稿

# **Multifunctional terahertz metasurface with tunable slow-light and switchable filtering functions**

QU Zuotong HAN Yining WANG Chu ZHAO Jianxing<sup>†</sup> ZHOU Yao

ZHOU Jianhong

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun 130022, China)

**Abstract** Terahertz (THz) waves, occupying the frequency range of 0.1 to 10.0 THz, hold great potential for sensing and communication, as well as on-chip manipulation. However, the weak response of natural materials to THz waves fundamentally limits the development of high-performance THz devices. Metamaterials and their two-dimensional counterparts, metasurfaces, offer a promising route to enhance and manipulate THz waves. Nevertheless, most existing THz devices support only single functions, such as frequency tuning or amplitude modulation, making them difficult to adapt to diverse application scenarios. In contrast, multifunctional integrated THz devices that address complex real-world needs have attracted growing research interest. Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> (GST) is a non-volatile phase-change material that reversibly switches between phases under optical, electrical, or thermal stimulation. SrTiO<sub>3</sub> (STO) is a temperature-sensitive dielectric material; its permittivity varies with temperature, allowing modulation of the local electromagnetic environment. To realize a switchable multifunctional THz device, we propose a metasurface integrating GST and STO. The structure consists of a polymer substrate, an STO dielectric layer, and a gold film etched with  $\pi$ -shaped slot structures filled with GST. When GST is in different states, the metasurface achieves tunable

slow-light and switchable filtering functions. When GST is in its insulating state, the coupling between bright and dark modes produces an electromagnetically induced reflection (EIR)-like effect. Based on a coupled harmonic oscillator model, the tuning mechanism is elucidated: temperature variation modulates the STO permittivity, thereby altering the effective refractive index of the medium surrounding the dark mode, and thus moves the resonance frequency. As a result, both the EIR reflection window and the slow-light effect are tunable across 1.43–1.79 THz, with a maximum group delay of 5.25 ps. When GST switches to the metallic phase, the system transitions to a dipole resonance mode, and the functionality shifts to an optical switch and stopband filter. The optical switch achieves a modulation depth of 90%, while the stopband filter exhibits a 3 dB bandwidth of 0.22 THz and maintains high thermal stability over the operating temperature range. Furthermore, we explore its refractive-index sensing potential and analyze the impacts of structural parameter variations on the device performance. The proposed design shows strong potential for optical buffering, optical switching, and signal processing applications.

**Keywords:** metasurface, terahertz, tunable slow light, switchable filtering

---

\* Project supported by the Science and Technology Development Program of Jilin Province (Grant No.YDZJ202601ZYTS036), the National Natural Science Foundation of China (Grant No.12274042) and the Program of Introducing Talents of Discipline to Universities (Grant No.D21009)

† Corresponding author.E-mail: [zjx@cust.edu.cn](mailto:zjx@cust.edu.cn)

The first author.E-mail:[13863680403@163.com](mailto:13863680403@163.com)