

# 实现动态手征光学特性的全介质可调谐超表面

蒋豪光<sup>1</sup>, 史卓琳<sup>1</sup>, 李敏华<sup>1\*</sup>, 董建峰<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波

<sup>2</sup>宁波财经学院数字技术与工程学院, 浙江 宁波

收稿日期: 2025年11月17日; 录用日期: 2025年12月12日; 发布日期: 2025年12月22日

## 摘要

文章提出了一种基于相变材料Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> (GST)的全介质手征超表面。该结构由尺寸相同但取向各异的GST方形开口环谐振器组成, 谐振器单元间以氟化镁(MgF<sub>2</sub>)介质层进行隔离。该超表面对线偏振与圆偏振入射波均展现出显著的手征响应。数值仿真结果表明: 在线偏振波入射条件下, 其工作波段位于近红外范围, 最大不对称传输系数(asymmetric transmission, AT)达0.8, 调谐范围达420 nm; 在圆偏振波入射时, 最大圆二色性(circular dichroism, CD)达0.81, 调谐范围达275 nm。本研究对基于GST的可调谐功能器件研究具有重要参考价值, 同时在低损耗、多功能光子器件领域展现出广阔的应用前景。

## 关键词

手征超表面, 相变材料GST, 圆二色性

# All-Dielectric Tunable Metasurface Realizing Dynamic Chiroptical Characteristics

Haoguang Jiang<sup>1</sup>, Zhuolin Shi<sup>1</sup>, Minhua Li<sup>1\*</sup>, Jianfeng Dong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

<sup>2</sup>College of Digital Technology and Engineering, Ningbo University of Finance & Economics, Ningbo Zhejiang

Received: November 17, 2025; accepted: December 12, 2025; published: December 22, 2025

## Abstract

In this paper, we propose an all-dielectric chiral metasurface composed of phase-change material Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> (GST) square split-ring resonators (SRRs) with identical sizes but different orientations, sandwiched between magnesium fluoride (MgF<sub>2</sub>) dielectric layers. This metasurface exhibits strong chiral responses to both linearly and circularly polarized incident waves. Numerical simulations

\*通讯作者。

文章引用: 蒋豪光, 史卓琳, 李敏华, 董建峰. 实现动态手征光学特性的全介质可调谐超表面[J]. 光电子, 2025, 15(4): 103-112. DOI: 10.12677/oe.2025.154011

reveal that it operates in the near-infrared spectral range, achieving a maximum asymmetric transmission (AT) of 0.8 with a tuning range of 420 nm under linearly polarized wave incidence, and a maximum circular dichroism (CD) of 0.81 with a tuning range of 275 nm under circularly polarized wave incidence. This study has significant implications for the research on tunable functional devices based on GST and potential applications in low-loss and multifunctional photonic devices.

## Keywords

Chiral Metasurface, Phase-Change Material GST, Circular Dichroism

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

手征是指物体无法通过平移、旋转等操作与其镜像完全重合的特性。超材料由亚波长尺度的人工原子构成,作为一类人工三维材料,它能实现负折射、电磁隐身等传统材料无法具备的电磁特性[1]-[3]。作为其二维结构,超表面的出现推动了偏振转换器、超透镜、光学开关等器件的快速发展[4]-[6]。手征超表面展现出天然材料所不具备的物理特性[7],包括不对称传输、圆二色性以及强旋光性[8][9]。近年来,虽然人们对手征超表面已开展广泛研究,但通常这些结构在加工完成后的实际应用中并不具备可调谐能力。因此,可调谐手征超表面成为新兴研究方向,一般通过引入可调材料实现动态调控。于是,相变材料如VO<sub>2</sub>、硅以及锗锑碲化合物(Ge<sub>x</sub>Sb<sub>y</sub>Te<sub>z</sub>, GST)逐渐成为研究焦点[10][11]。基于GST优异的非易失性、显著的复折射率对比度及快速响应特性,其在低功耗、快速切换的光子多功能器件中展现出广阔的应用前景[12][13]。通过有效介质理论与洛伦兹-洛伦茨关系[14],不同晶化条件下GST的有效介电常数可表示为:

$$\frac{\varepsilon_{\text{eff}}(\lambda)-1}{\varepsilon_{\text{eff}}(\lambda)+2} = m \times \frac{\varepsilon_{\text{CGST}}(\lambda)-1}{\varepsilon_{\text{CGST}}(\lambda)+2} + (1-m) \times \frac{\varepsilon_{\text{AGST}}(\lambda)-1}{\varepsilon_{\text{AGST}}(\lambda)+2} \quad (1)$$

其中 $\varepsilon_{\text{CGST}}(\lambda)$ 与 $\varepsilon_{\text{AGST}}(\lambda)$ 分别表示晶态与非晶态GST随波长变化的有效介电常数。GST的晶化分数 $m$ 可通过电脉冲或激光脉冲等外部激励进行调节。

2013年,Cao等设计出金属-介质-金属结构的手征超表面[15],随后进一步设计了基于椭圆纳米孔阵列(ENA)的多波段可调谐圆二色性手征超表面[16]。Yin等通过将Ge<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>(GST326)与手征结构结合,在实验中首次实现了中红外波段的可调谐手征超表面[17]。2020年,Dong等通过数值仿真验证了由不对称开口环金属/GST225/金属多层结构构成的透射型超材料具有可调手征光学响应[18]。当GST在晶态与非晶态间转变时,其不对称传输与圆二色性的调谐范围均可达38.7%。Huang等研究了一种三层超表面宽带线偏振器,在4.6~14.0 GHz频段内偏振转换率大于0.9,并在6.0~12.9 GHz频段实现不对称系数达0.8的宽带不对称传输[19]。Han提出采用Z形手征微结构与类光栅微结构的多层手征超表面,实现了不对称传输系数0.38和圆二色性值0.75[20]。

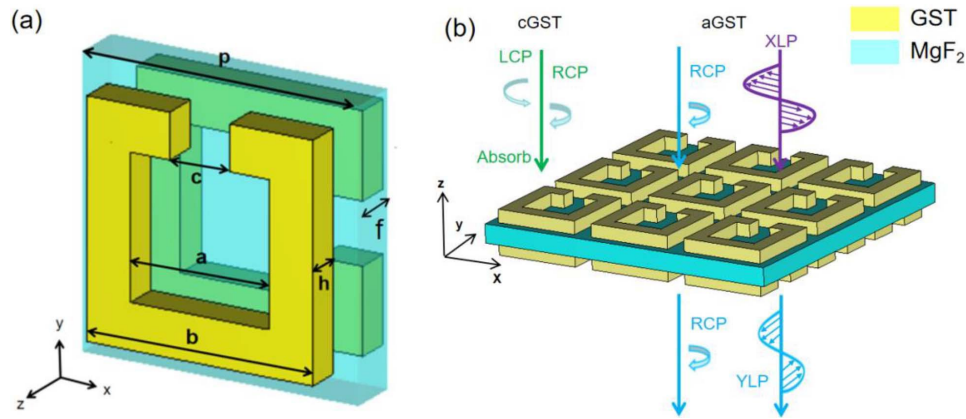
然而,金属-介质混合超表面在光学频段存在显著的本征欧姆损耗[21],即自由电子在电磁场作用下振荡会产生热量,导致能量耗散。这使得金属超表面的效率普遍较低,尤其是在传输模式下,导致该类器件存在效率低、工作带宽窄等问题。为解决这些难题,学界提出全介质可调谐超表面设计方案,相比金属超表面,全介质超表面具有更低的能量损耗、更高的反射率和透射率、更高的光操纵效率和自由度、

更丰富的电磁调控能力以及更高的损伤阈值和热稳定性,可以实现高效低损耗的光学功能器件。2018年, Ma 等提出一种具有几何相位的全介质手征超表面,在圆偏振波入射下展现出超过 0.8 的显著圆二色性与不对称传输特性[22]。数年之后, Wang 设计出可在光通信波段同时实现宽带高偏振消光比与高圆二色性的二维全介质手征超表面[23]。在 1.39~1.6  $\mu\text{m}$  波长范围内,该超表面透射谱的圆二色性达 0.9,偏振消光比超过 20 dB。Abdennadher 等在多种等离子激元木堆结构的复能带结构中发现了宽带圆偏振带隙,该带隙覆盖 3~4  $\mu\text{m}$  大气透明窗口,并在该光谱范围内实现最高 90% 的平均圆二色性[24]。Liu 等于 2024 年利用导模共振原理设计手征超表面,在透射与反射双通道同时实现显著圆二色性[25]。

本文设计了一种全介质手征超表面,在近红外波段实现了不对称传输与圆二色性的大范围调谐。研究表明,该结构在线偏振波与圆偏振波入射下均展现出显著的手征响应特性:当 GST 处于非晶态时,在红外波段达到 0.80 的线偏振不对称传输系数;当 GST 转变为晶态时,该系数降至 0.328。在圆偏振波入射条件下, GST 非晶态时的最大圆二色性值达 0.81,而晶态时最大圆二色性值降至 0.23。这些数据充分验证了该结构在不同偏振波入射下具备优异的手征响应特性,且其光学性能与 GST 的相变状态密切相关。

## 2. 设计原理与方法

本文提出一种基于相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) 的全介质手征超表面。如图 1(a) 所示,其单元结构由两个完全相同的 GST 方形开口环谐振器垂直堆叠构成,中间以  $\text{MgF}_2$  介质层隔开,且两个开口环的开口方向呈 90° 旋转错位。该结构对线偏振和圆偏振入射波均表现出优异的手征响应。超表面具体参数为:周期  $p = 1200 \text{ nm}$ ,厚度  $h = 150 \text{ nm}$ ,开口间距  $f = 220 \text{ nm}$ ,开口环尺寸  $a = 600 \text{ nm}$ 、 $b = 980 \text{ nm}$ 、 $c = 260 \text{ nm}$ 。 $\text{MgF}_2$  是一种低折射率介质材料,其介电常数为 1.85, GST 的有效介电常数见参考文献[26] [27]。数值仿真定义光沿  $z$  轴负方向传播, $x$  和  $y$  方向设置周期性边界条件, $z$  方向采用开放边界条件。基于有限积分法(FIT)对相关光学特性进行仿真计算[28]。超表面功能如图 1(b) 所示,当 GST 为非晶态时,超表面表现为不对称传输以及圆二色性特性,当 GST 为晶态时,超表面表现为吸收特性。



**Figure 1.** Schematic diagram of the designed metasurface: (a) Unit structure; (b) Functional schematics of the metasurface  
**图 1.** 超表面单元结构: (a) 单元结构; (b) 功能示意图

经数据处理,我们求得超表面的透射率并计算出圆二色性(CD)与不对称传输(AT)的数值,结果如下所示。

$$T_{RR} = |t_{RR}|^2, T_{RL} = |t_{RL}|^2, T_{LR} = |t_{LR}|^2, T_{LL} = |t_{LL}|^2 \quad (2)$$

其中  $T_{ij}$  表示透射率,  $t_{ij}$  代表传输系数,  $T_{LL}$  与  $T_{RR}$  分别表示共偏振透射分量,  $T_{LR}$  和  $T_{RL}$  则表示交叉偏振透射分量。第一个下标 “ $i$ ” 表示出射波的偏振状态, 第二个下标 “ $j$ ” 表示入射波的偏振状态, 具体而言,  $T_{LR}$  表示右旋圆偏振波(RCP)经交叉偏振透射转换为左旋圆偏振波(LCP)的过程, 而  $T_{RL}$  则表示相反的过程。由此, 圆偏振波的圆二色性( $T_{CD}$ )可定义为:

$$T_{CD} = T_{RCP} - T_{LCP} = |T_{RR}| + |T_{LR}| - |T_{LL}| - |T_{RL}| \quad (3)$$

其中  $T_{LCP}$  表示左旋圆偏振波的透射率,  $T_{RCP}$  表示右旋圆偏振波的透射率。 $AT$  是指光波从两个相反方向入射时透射率的差值, 其定义为:

$$AT_{RCP} = T_{RCP}^f - T_{RCP}^b = |t_{LR}|^2 - |t_{RL}|^2 \quad (4)$$

$$AT_{LCP} = T_{LCP}^f - T_{LCP}^b = |t_{LR}|^2 - |t_{RL}|^2 \quad (5)$$

$$AT_{RCP} = -AT_{LCP} \quad (6)$$

其中  $AT_{RCP}$  与  $AT_{LCP}$  分别表示右旋与左旋圆偏振波的不对称传输值, 上标 “ $f$ ” 代表前向入射光, “ $b$ ” 则代表后向入射光。同理,  $x$  偏振波与  $y$  偏振波的不对称传输可表示为:

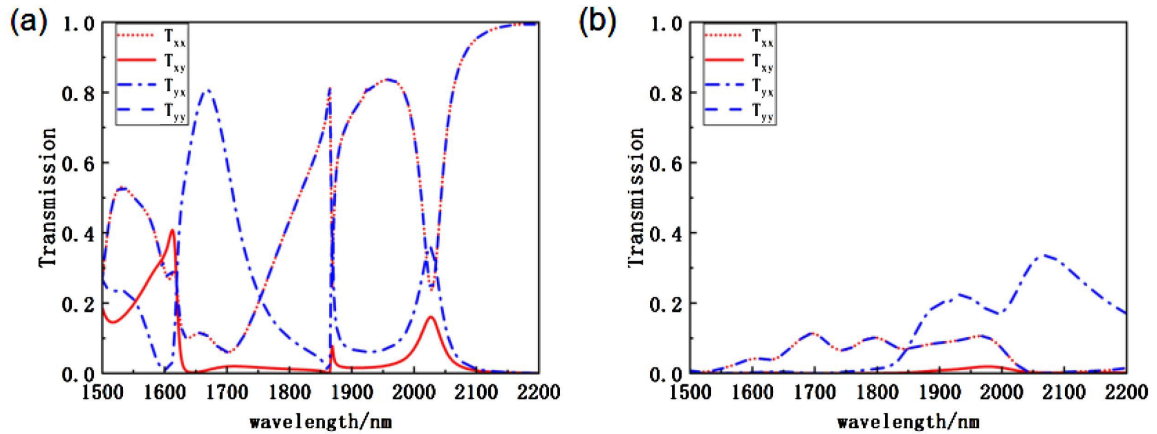
$$AT_x = T_{yx} - T_{xy} \quad (7)$$

$$AT_y = T_{xy} - T_{yx} \quad (8)$$

### 3. 数值仿真结果与分析

图 2 展示了所提出超表面在线偏振波入射下的透射仿真结果。如图 2(a)所示, 当 GST 处于非晶态时, 可以观察到在 1500~2200 nm 波长范围内, 两个共偏振透射曲线  $T_{xx}$  与  $T_{yy}$  完全重合, 而两个交叉偏振透射曲线  $T_{xy}$  与  $T_{yx}$  则呈现显著差异。这表明当 GST 处于非晶态时, 该结构产生明显的不对称传输现象。在 1650 nm 波长处,  $T_{yx}$  达到最大值 0.81, 而对应的  $T_{xy}$  值仅为 0.01。根据公式(7)(8)计算可得, 此时  $x$  偏振波与  $y$  偏振波的最大不对称传输值分别为 0.8 与 -0.8。

当 GST 处于晶态时, 如图 2(b)所示, 其工作波长出现明显红移。与非晶态情况相似, 两个共偏振透射曲线  $T_{xx}$  与  $T_{yy}$  仍然保持重合, 而交叉偏振透射曲线  $T_{xy}$  与  $T_{yx}$  则存在差异。但当 GST 从非晶态转变为晶态时, 损耗显著增加, 导致不对称传输系数大幅降低。最大不对称传输出现在 2070 nm 波长处, 数值为 0.334。由于 GST 介电常数的变化, 工作波长从 1650 nm 红移至 2070 nm, 实现了约 420 nm 的调谐范围。



**Figure 2.** The transmission of metasurface under LP incident when GST in (a) amorphous state and (b) crystalline state  
**图 2.** GST 处于(a)非晶态与(b)晶态时超表面的线偏振波入射透射特性

图 3 展示了所提出超表面在圆偏振波入射下的透射仿真结果。与线偏振波入射情况不同, 无论 GST 处于何种相态, 两条交叉偏振透射曲线  $T_{LR}$  与  $T_{RL}$  基本重合。因此, 当圆偏振波入射至超表面时, 不会产生不对称传输现象。

当 GST 处于非晶态时, 如图 3(a) 所示, 两条共偏振透射曲线  $T_{LL}$  与  $T_{RR}$  有显著差异。在 1625 nm 波长处,  $T_{RR}$  达到最大值 0.845, 而  $T_{LL}$  仅为 0.035。根据公式(3)计算可得最大圆二色性值为 0.81。当 GST 转为晶态时, 如图 3(b) 所示, 超表面仍存在圆二色性效应, 在 1900 nm 波长处 CD 值约为 0.23。工作波长从 1625 nm 红移至 1900 nm, 实现了约 275 nm 的调谐范围。

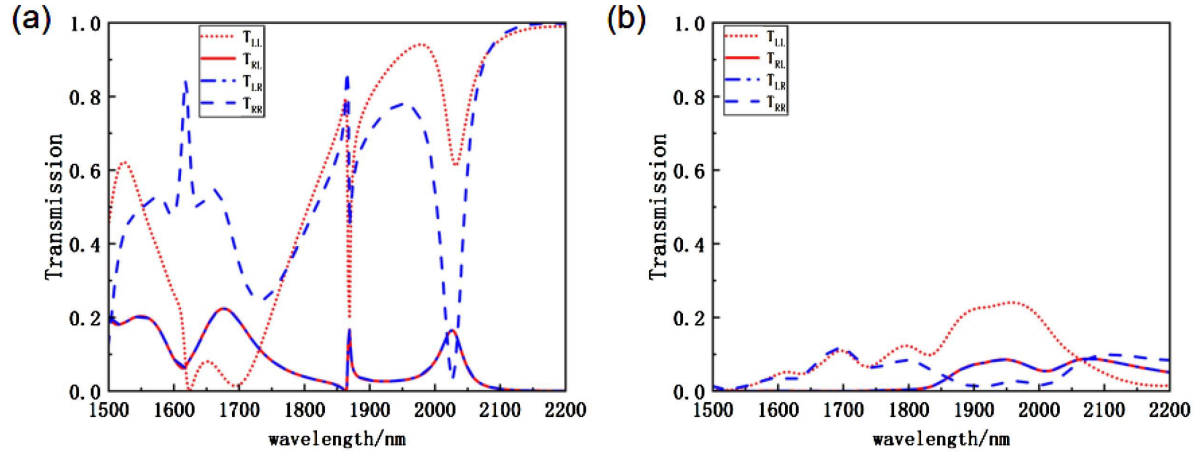


Figure 3. The transmittance of metasurface under CP incident when GST in (a) amorphous state and (b) crystalline state  
图 3. GST 在(a)非晶态与(b)晶态时超表面的圆偏振入射透射率

图 4 展示了 GST 在非晶态与晶态下, 超表面在线偏振波入射时的不对称传输特性及圆偏振波入射时的圆二色性特性。当 GST 从非晶态转变为晶态时, 超表面的 AT 与 CD 均发生显著红移, 且调谐范围较大, 但其数值均出现一定程度的衰减。此外可以发现在 1500~1800 nm 波长范围内, 如图 3(b) 所示, 超表面的透射率极低。为此, 进一步计算了超表面的吸收率 ( $A = 1 - T - R$ ), 结果如图 5 所示。数据表明, 该超表面在低频波段呈现完全吸收特性, 随着频率上升其吸收率逐渐下降。

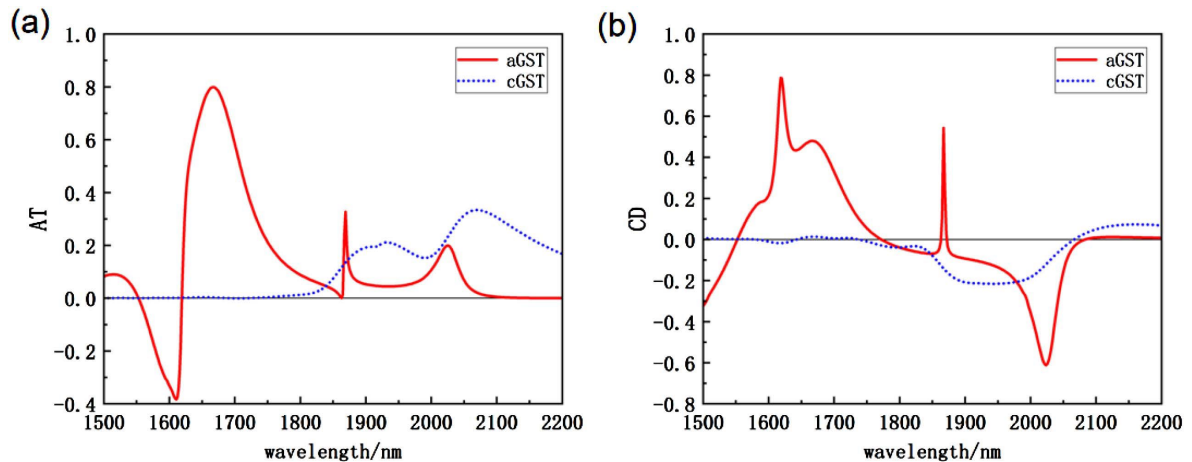
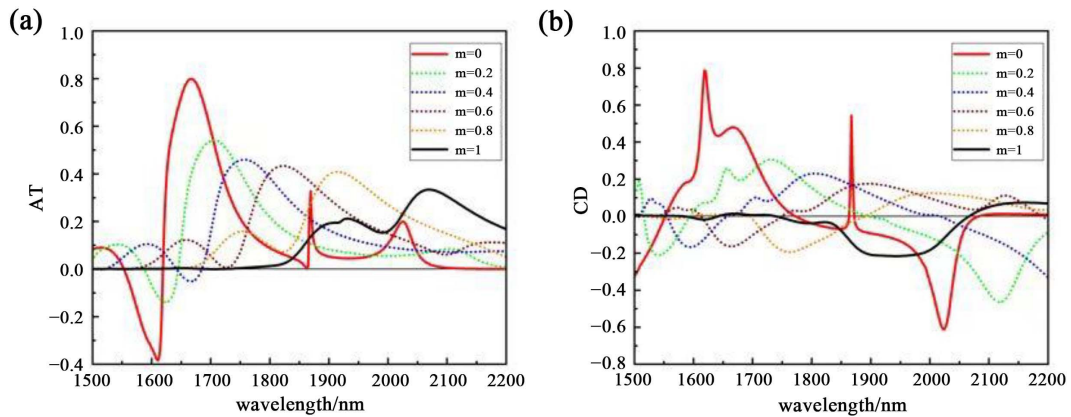
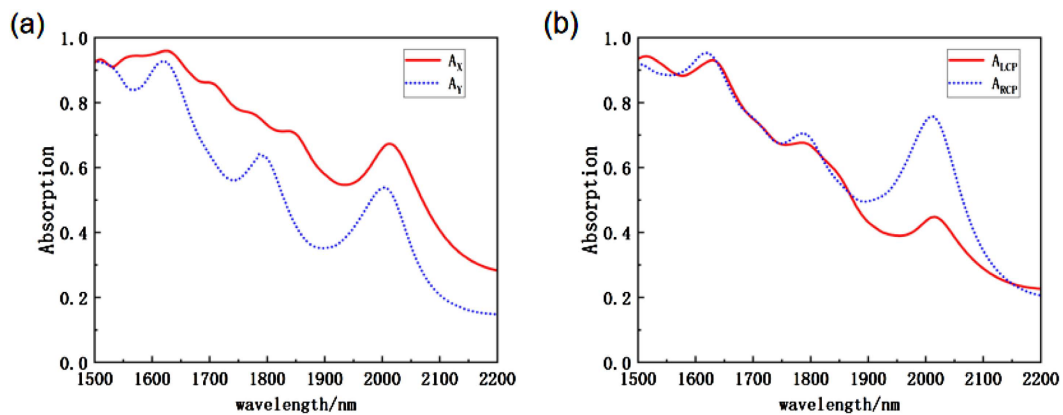


Figure 4. (a) AT curves of the metasurface; (b) CD curves of the metasurface  
图 4. (a) 超表面不对称传输曲线; (b) 超表面圆二色性曲线

在实际应用中,可以通过激光刺激 GST 相变材料,使其从非晶态转变为中间态,最终达到完全晶态。图 5 为不同 GST 晶化率  $m$  与超表面的不对称传输以及圆二色性特性的关系。此处以 0.2 为间隔,测得  $m$  从 0 至 1 变化下超表面的性能数值。由图 5(a)可知,AT 曲线发生明显红移,振幅也随着  $m$  的增大逐渐降低;相似的,如图 5(b)所示,CD 曲线也随着  $m$  的增大发生明显红移,振幅降低。



**Figure 5.** The effect of different crystallization rates  $m$  on the performance of metasurfaces: (a) AT curves; (b) CD curves  
**图 5.** 不同晶化率  $m$  对超表面性能的影响: (a) 不对称传输曲线; (b) 圆二色性曲线

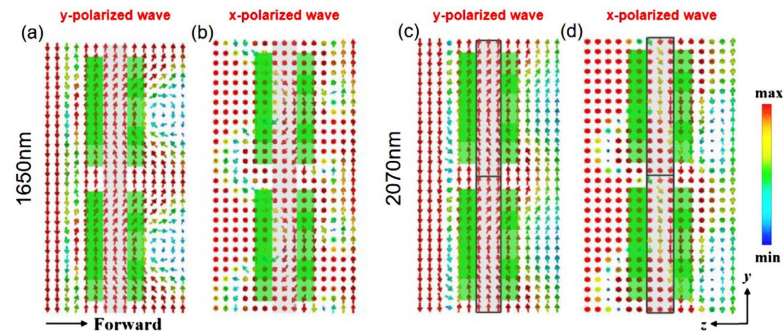


**Figure 6.** The absorption for (a) XLP, YLP wave and (b) LCP, RCP wave incidence when GST is in crystalline state  
**图 6.** GST 晶态时对不同入射偏振波的吸收特性: (a)  $x/y$  轴线偏振波; (b) 左/右旋圆偏振波

当线偏振波入射时,如图 6(a)所示,该超表面在 1500~1750 nm 波段吸收率均大于 0.8。在  $x$  偏振波入射时,超表面在 1625 nm 处达到最大吸收率 0.96,而  $y$  偏振波入射时在 1615 nm 处达到最大吸收率 0.926。当圆偏振波入射时,如图 6(b)所示,在 1500~1675 nm 波长范围内吸收率均大于 0.8。其中右旋圆偏振波入射时在 1620 nm 处达到最大吸收率 0.952,左旋圆偏振波入射时则在 1510 nm 处达到最大吸收率 0.942。这些结果证明,在 1500~1750 nm 波长范围内,当 GST 处于晶态时超表面呈现以吸收为主导的电磁响应。

为了深入分析超表面的电磁调控特性,本研究设计了不同的电场监测方案。将沿  $z$  轴负方向的入射标记为“前向”。图 7(a)、图 7(b)展示了 GST 非晶态时在共振点 1650 nm 处  $y$ - $z$  平面的电场分布,当  $y$  偏振波入射时,其透射波电场发生  $180^\circ$  偏振旋转,导致大部分入射能量被反射;而  $x$  偏振波入射时,主要能量以  $90^\circ$  偏振旋转形式透过超表面(对应图 2(a)中  $T_{yx} = 0.81$ ),超表面实现了偏振转换与不对称传输。图 7(c)、图 7(d)展示了 GST 晶态时 2070 nm 处的电场分布,与非晶态类似, $x$  和  $y$  偏振波透射后均发生偏振

旋转, 但可观察到透射电场强度明显减弱, 这归因于 GST 晶化后吸收损耗的急剧增加。这一现象与图 2(b) 中透射率  $T_{yx} = 0.335$  和  $T_{xy} = 0.001$  相符合。

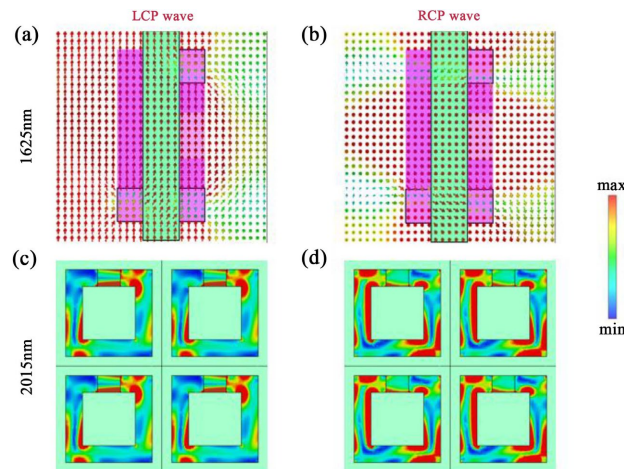


**Figure 7.** Simulated electric field distribution of (a) aGST, y-polarized wave incidence, wavelength = 1650 nm; (b) aGST, x-polarized wave incidence, wavelength = 1650 nm; (c) cGST, y-polarized wave incidence, wavelength = 2070 nm, and (d) cGST, x-polarized wave incidence, wavelength = 2070 nm

**图 7.** 电场分布: (a) 非晶态 GST,  $y$  偏振波入射, 波长 1650 nm; (b) 非晶态 GST,  $x$  偏振波入射, 波长 1650 nm; (c) 晶态 GST,  $y$  偏振波入射, 波长 2070 nm; (d) 晶态 GST,  $x$  偏振波入射, 波长 2070 nm

图 8 展示了圆偏振波入射时超表面的电场分布与能量损耗密度。如图 8(a)、图 8(b)所示, 当 GST 为非晶态时, 左旋圆偏振波在 1625 nm 处的透射电场强度可忽略不计, 说明其透射被完全抑制; 而右旋圆偏振波则保持原偏振态并表现出电场增强的强透射特性。这一现象与图 3(a)中透射率  $T_{RR} = 0.845$  和  $T_{LL} = 0.035$  相符合。

如图 8(c)、图 8(d)所示, 当 GST 为晶态时, 超表面在 2015 nm 波长处表现出显著的吸收效应。可以发现, 右旋圆偏振波比左旋圆偏振波产生更强的能量损耗, 因为该波长处右旋圆偏振波入射时超表面有更高的吸收率, 如图 6(b)所示。



**Figure 8.** Simulated electric field distribution of the metasurface when (a) aGST, LCP wave incidence, wavelength = 1625 nm; (b) aGST, RCP wave incidence, wavelength = 1625 nm; power loss density of the metasurface when (c) cGST, LCP wave incidence, wavelength = 2015 nm, and (d) cGST, RCP wave incidence, wavelength = 2015 nm

**图 8.** 超表面的电场分布: (a) 非晶态 GST, 左旋圆偏振波入射, 波长 1625 nm; (b) 非晶态 GST, 右旋圆偏振波入射, 波长 1625 nm; 能量损耗(c) 晶态 GST, 左旋圆偏振波入射, 波长 2015 nm; (d) 晶态 GST, 右旋圆偏振波入射, 波长 2015 nm

表 1 给出相关工作的 AT、CD、可调谐性的数据对比。相比已有的一些研究工作,本文所设计的超表面在 AT 和 CD 都有了提升,并且本文采用了全介质相变材料的超表面设计,保留了多功能特性,实现了超表面工作波长范围的可调谐性,同时还具有较低的吸收损耗,使该超表面在实际应用中具有更高价值。

**Table 1.** Comparison of the proposed metasurface with existing typical designs  
**表 1.** 本文超表面与现有典型设计的对比研究

| 参考文献 | 偏振态   | AT   | CD    | 可调谐性 |
|------|-------|------|-------|------|
| [18] | 线、圆偏振 | 0.28 | 0.36  | 可调   |
| [19] | 线偏振   | 0.8  | 无     | 可调   |
| [20] | 线、圆偏振 | 0.38 | 0.75  | 不可调  |
| [22] | 线、圆偏振 | 0.78 | 0.88  | 不可调  |
| [23] | 圆偏振   | 无    | 0.993 | 不可调  |
| [24] | 圆偏振   | 无    | 0.8   | 不可调  |
| 本文   | 线、圆偏振 | 0.8  | 0.81  | 可调   |

#### 4. 结论

综上所述,基于  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST)的相变特性,本文提出了一种具有手征功能的全介质可调谐超表面,可实现线偏振波的不对称传输与圆偏振波的圆二色性调控。GST 作为一种新型非易失性光学相变材料,具备低损耗与可调谐优势。其晶态与非晶态间显著的光学对比度促使圆二色性与不对称传输特性的产生。通过 CST Studio Suite 仿真软件,我们验证了该超表面在近红外波段的优异手征响应特性。本研究对基于 GST 的可调谐功能器件研发具有重要参考价值,在低损耗多功能光子器件领域展现出应用潜力。

#### 致 谢

全体作者均对研究构思与设计做出贡献。研究的概念化、方案论证与仿真模拟由蒋豪光与史卓琳共同完成。论文初稿由蒋豪光撰写,所有作者均参与后续版本的修订与完善。最终稿件经全体作者审议通过。

#### 基金项目

本研究工作获得国家自然科学基金(项目批准号: 62175119)、浙江省自然科学基金(项目批准号: LY24F010003)。

#### 参考文献

- [1] Padilla, W.J., Basov, D.N. and Smith, D.R. (2006) Negative Refractive Index Metamaterials. *Materials Today*, **9**, 28-35. [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(06\)71573-5](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(06)71573-5)
- [2] Jahani, S. and Jacob, Z. (2014) Transparent Subdiffraction Optics: Nanoscale Light Confinement without Metal. *Optica*, **1**, 96-100. <https://doi.org/10.1364/optica.1.000096>
- [3] Pendry, J.B., Schurig, D. and Smith, D.R. (2006) Controlling Electromagnetic Fields. *Science*, **312**, 1780-1782. <https://doi.org/10.1126/science.1125907>
- [4] Aieta, F., Genevet, P., Kats, M.A., Yu, N., Blanchard, R., Gaburro, Z., *et al.* (2012) Aberration-Free Ultrathin Flat Lenses and Axicons at Telecom Wavelengths Based on Plasmonic Metasurfaces. *Nano Letters*, **12**, 4932-4936. <https://doi.org/10.1021/nl302516v>
- [5] Wang, W., Guo, Z., Sun, Y., Shen, F., Li, Y., Liu, Y., *et al.* (2015) Ultra-Thin Optical Vortex Phase Plate Based on the

- L-Shaped Nanoantenna for Both Linear and Circular Polarized Incidences. *Optics Communications*, **355**, 321-325. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.06.074>
- [6] Chu, C.H., Tseng, M.L., Chen, J., Wu, P.C., Chen, Y., Wang, H., *et al.* (2016) Active Dielectric Metasurface Based on Phase-Change Medium (Laser Photonics Rev. 10(6)/2016). *Laser & Photonics Reviews*, **10**, 1063. <https://doi.org/10.1002/lpor.201670068>
  - [7] Kim, J., Rana, A.S., Kim, Y., Kim, I., Badloe, T., Zubair, M., *et al.* (2021) Chiroptical Metasurfaces: Principles, Classification, and Applications. *Sensors*, **21**, Article 4381. <https://doi.org/10.3390/s21134381>
  - [8] Ren, Y., Jiang, C. and Tang, B. (2020) Asymmetric Transmission in Bilayer Chiral Metasurfaces for Both Linearly and Circularly Polarized Waves. *Journal of the Optical Society of America B*, **37**, 3379-3385. <https://doi.org/10.1364/josab.401783>
  - [9] Li, F., Li, Y., Tang, T., Liao, Y., Lu, Y., Liu, X., *et al.* (2022) Dual-band Terahertz All-Silicon Metasurface with Giant Chirality for Frequency-Undifferentiated Near-Field Imaging. *Optics Express*, **30**, 14232-14242. <https://doi.org/10.1364/oe.455956>
  - [10] Gong, Z., Yang, F., Wang, L., Chen, R., Wu, J., Grigoropoulos, C.P., *et al.* (2021) Phase Change Materials in Photonic Devices. *Journal of Applied Physics*, **129**, Article ID: 030902. <https://doi.org/10.1063/5.0027868>
  - [11] Abdollahramezani, S., Hemmatyar, O., Taghinejad, H., Krasnok, A., Kiarashinejad, Y., Zandehshahvar, M., *et al.* (2020) Tunable Nanophotonics Enabled by Chalcogenide Phase-Change Materials. *Nanophotonics*, **9**, 1189-1241. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0039>
  - [12] Wang, Q., Rogers, E.T.F., Gholipour, B., Wang, C., Yuan, G., Teng, J., *et al.* (2015) Optically Reconfigurable Metasurfaces and Photonic Devices Based on Phase Change Materials. *Nature Photonics*, **10**, 60-65. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.247>
  - [13] Raeis-Hosseini, N. and Rho, J. (2017) Metasurfaces Based on Phase-Change Material as a Reconfigurable Platform for Multifunctional Devices. *Materials*, **10**, Article 1046. <https://doi.org/10.3390/ma10091046>
  - [14] Abdollahramezani, S., Chizari, A., Dorche, A.E., Jamali, M.V. and Salehi, J.A. (2017) Dielectric Metasurfaces Solve Differential and Integro-Differential Equations. *Optics Letters*, **42**, 1197-1200. <https://doi.org/10.1364/ol.42.001197>
  - [15] Cao, T., Zhang, L., Simpson, R.E., Wei, C. and Cryan, M.J. (2013) Strongly Tunable Circular Dichroism in Gammadion Chiral Phase-Change Metamaterials. *Optics Express*, **21**, 27841-27851. <https://doi.org/10.1364/oe.21.027841>
  - [16] Cao, T., Li, Y., Wei, C. and Qiu, Y. (2017) Numerical Study of Tunable Enhanced Chirality in Multilayer Stack Achiral Phase-Change Metamaterials. *Optics Express*, **25**, 9911-9925. <https://doi.org/10.1364/oe.25.009911>
  - [17] Yin, X., Schäferling, M., Michel, A.U., Tittl, A., Wuttig, M., Taubner, T., *et al.* (2015) Active Chiral Plasmonics. *Nano Letters*, **15**, 4255-4260. <https://doi.org/10.1021/nl5042325>
  - [18] Dong, G., Qin, C., Lv, T., Sun, M., Lv, B., Li, Y., *et al.* (2020) Dynamic Chiroptical Responses in Transmissive Metamaterial Using Phase-Change Material. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **53**, Article ID: 285104. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab8516>
  - [19] Huang, X., Ma, X., Gao, H., Guo, L. and Li, X. (2023) Ultra-Wideband Linear-Polarization Conversion Metasurface with High-Efficient Asymmetric Transmission. *Applied Physics A*, **129**, Article No. 278. <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06541-0>
  - [20] Han, B., Li, S., Li, Z., Huang, G., Tian, J. and Cao, X. (2021) Asymmetric Transmission for Dual-Circularly and Linearly Polarized Waves Based on a Chiral Metasurface. *Optics Express*, **29**, 19643-19654. <https://doi.org/10.1364/oe.425787>
  - [21] Kruk, S. and Kivshar, Y. (2017) Functional Meta-Optics and Nanophotonics Governed by Mie Resonances. *ACS Photonics*, **4**, 2638-2649. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.7b01038>
  - [22] Ma, Z., Li, Y., Li, Y., Gong, Y., Maier, S.A. and Hong, M. (2018) All-Dielectric Planar Chiral Metasurface with Gradient Geometric Phase. *Optics Express*, **26**, 6067-9078. <https://doi.org/10.1364/oe.26.006067>
  - [23] Wang, R., Wang, C., Sun, T., Hu, X. and Wang, C. (2023) Simultaneous Broadband and High Circular Dichroism with Two-Dimensional All-Dielectric Chiral Metasurface. *Nanophotonics*, **12**, 4043-4053. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0407>
  - [24] Abdennadher, B., Iseli, R., Steiner, U. and Saba, M. (2023) Broadband Circular Dichroism in Chiral Plasmonic Woodpiles. *Applied Physics A*, **129**, Article No. 229. <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06481-9>
  - [25] Liu, Y., Lin, Y., Yu, C., Lu, J. and Wang, C. (2024) Giant Circular Dichroism in All-Dielectric Planar Chiral Meta-GMR. *Chinese Journal of Physics*, **90**, 341-347. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2024.05.028>
  - [26] Zhang, Y., Chou, J.B., Li, J., Li, H., Du, Q., Yadav, A., *et al.* (2019) Broadband Transparent Optical Phase Change Materials for High-Performance Nonvolatile Photonics. *Nature Communications*, **10**, Article No. 4279. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12196-4>

- [27] Zhang, Q., Zhang, Y., Li, J., Soref, R., Gu, T. and Hu, J. (2017) Broadband Nonvolatile Photonic Switching Based on Optical Phase Change Materials: Beyond the Classical Figure-Of-Merit. *Optics Letters*, **43**, 94-97. <https://doi.org/10.1364/ol.43.000094>
- [28] Wang, L., Huang, X., Li, M. and Dong, J. (2019) Chirality Selective Metamaterial Absorber with Dual Bands. *Optics Express*, **27**, 25983-25993. <https://doi.org/10.1364/oe.27.025983>