

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 基于相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ 的可切换边缘检测与聚焦成像超表面

胡杰, 唐紫依, 蓝翔, 邓钦荣, 张汶婷, 黄奕嘉, 李玲

#### 引用本文:

胡杰, 唐紫依, 蓝翔, 等. 基于相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ 的可切换边缘检测与聚焦成像超表面[J]. 光电工程, 2023, 50(8): 220284.

Hu J, Tang Z Y, Lan X, et al. Switchable edge detection and imaging based on a phase-change metasurface with  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ [J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 220284.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220284>

收稿日期: 2022-11-01; 修改日期: 2023-01-27; 录用日期: 2023-01-31

### 相关论文

#### All-optical controlled-NOT logic gate achieving directional asymmetric transmission based on metasurface doublet

Yijia Huang, Tianxiao Xiao, Shuai Chen, Zhengwei Xie, Jie Zheng, Jianqi Zhu, Yarong Su, Weidong Chen, Ke Liu, Mingjun Tang, Peter Müller-Buschbaum, Ling Li

*Opto-Electronic Advances* 2023, 6(7): 220073 doi: 10.29026/oea.2023.220073

#### 基于扭转悬链线结构的高效手性吸波器

蓝翔, 邓钦荣, 张汶婷, 唐紫依, 胡杰, 黄奕嘉, 李玲

光电工程 2022, 49(10): 220157 doi: 10.12086/oe.2022.220157

#### 基于相变材料GST的圆二色性可调谐外在手征超表面设计

史卓琳, 贺景琳, 王金金, 邵汉儒, 董建峰

光电工程 2022, 49(10): 220092 doi: 10.12086/oe.2022.220092

#### Crosstalk-free achromatic full Stokes imaging polarimetry metasurface enabled by polarization-dependent phase optimization

Yaxin Zhang, Mingbo Pu, Jinjin Jin, Xinjian Lu, Yinghui Guo, Jixiang Cai, Fei Zhang, Yingli Ha, Qiong He, Mingfeng Xu, Xiong Li, Xiaoliang Ma, Xiangang Luo

*Opto-Electronic Advances* 2022, 5(11): 220058 doi: 10.29026/oea.2022.220058

更多相关论文见光电期刊集群网站 

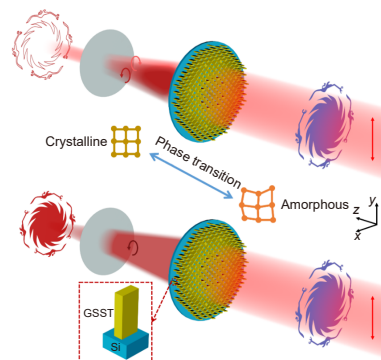


DOI: 10.12086/oe.2023.220284

# 基于相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ 的可切换边缘检测与聚焦成像超表面

胡杰, 唐紫依, 蓝翔, 邓钦荣,  
张汶婷, 黄奕嘉\*, 李玲\*

四川师范大学物理与电子工程学院,  
微纳光学实验室, 四川成都 610101



**摘要:** 本文提出了一种在不借助 4f 成像系统的情况下实现可切换边缘检测与聚焦成像的超表面。超表面由相变材料 ( $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ , GSST) 方柱和硅 (Si) 基底组成的单元结构周期性排列而成。其不同功能的实现来源于 GSST 处于非晶态和晶态下所提供的不同传输相位与几何相位的优化组合。当 GSST 处于非晶态和晶态下, 单元结构平均交叉偏振透射系数分别在 0.77 和 0.42 以上。为了验证设计的可行性, 本文对所设计的可切换超表面在晶态和非晶态下分别进行了仿真与理论计算, 表现出优异的成像与边缘检测效果。所提出的超表面及其工作原理在生物医学成像和缺陷检测等领域有潜在应用价值。

**关键词:** 边缘检测; 聚焦成像; 相变材料; 超表面

**中图分类号:** TH74

**文献标志码:** A

胡杰, 唐紫依, 蓝翔, 等. 基于相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  的可切换边缘检测与聚焦成像超表面 [J]. 光电工程, 2023, 50(8): 220284

Hu J, Tang Z Y, Lan X, et al. Switchable edge detection and imaging based on a phase-change metasurface with  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ [J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 220284

## Switchable edge detection and imaging based on a phase-change metasurface with $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$

Hu Jie, Tang Ziyi, Lan Xiang, Deng Qinrong, Zhang Wenting, Huang Yijia\*, Li Ling\*

Laboratory of Micro-Nano Optics, College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610101, China

**Abstract:** A versatile metasurface platform based on phase change materials (PCMs) is provided to realize dynamic switching between edge detection and imaging without the assistance of a 4f imaging system. The metasurface consists of a periodic arrangement of unit structures which consists of a  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST) nanofin on a silicon substrate. The dynamically switchable performance results from the combination of the geometric phase and two independent propagation phases that are provided by the composed phase-change material meta-atoms in amorphous and crystalline states. The average cross-polarized transmission coefficients are 0.77 and

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2023-01-27; 录用日期: 2023-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62105228); 四川省自然科学基金资助项目 (2022NSFSC2000)

\*通信作者: 黄奕嘉, bradbiubi@sicnu.edu.cn; 李玲, lingli70@aliyun.com。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

0.42 in the amorphous and crystalline states. In order to verify the feasibility of the design, simulation and theoretical calculation of the designed switchable metasurface are carried out in crystalline state and amorphous state respectively, which show excellent imaging and edge detection results. The proposed metasurface and its working principle have potential applications in biomedical imaging and defect detection.ect detection.

**Keywords:** edge detection; imaging; phase change material; metasurface

## 1 引言

图像处理在许多技术领域有着不可替代的作用。起初, 图像处理的方法主要是通过集成电路在数字领域进行数学运算, 但该方法运算速度慢、功耗高, 限制了其进一步的应用<sup>[1-2]</sup>。为了解决这些问题, Solli 等<sup>[3]</sup>在 2015 年提出了基于光学器件的光模拟计算方法。这种方法通过操纵携带图像信息的光信号来进行图像处理。虽然通过光学模拟计算, 图像处理可以更快更有效, 但通常需要庞大的光学仪器配制<sup>[4]</sup>, 这不适用于高集成度的现代光学系统。最近, 一种二维亚波长结构—超表面, 凭借对电磁波的偏振、振幅和相位的控制能力<sup>[5-16]</sup>引起了广泛的关注。在过去的几年里, 许多基于超表面的新方法被提出用于各种光学元件和系统, 包括全息图<sup>[17-21]</sup>、光束整形<sup>[22-23]</sup>、次级衍射成像<sup>[24-25]</sup>、电磁隐身<sup>[26-27]</sup>等等。与此同时, 超表面也作为边缘检测中的空间微分器被用于光学模拟计算类的图像处理<sup>[28-30]</sup>。近年来, 有一些研究利用精细设计的超表面结构实现了二维边缘检测<sup>[31-34]</sup>。Huo 等<sup>[33]</sup>基于超表面与 4f 成像系统的结合, 通过切换入射光的偏振态实现了边缘检测与明场成像之间的动态切换, 提取了物体上的不同形态信息, 扩展了超表面的应用场景; He 等<sup>[34]</sup>演示了无需 4f 成像系统的二维边缘检测, 进一步提高了超表面的集成度。

尽管相关研究已经取得相当大的进展, 但上述超表面在本质上仍然是静态的, 其光学性质在制造完成时就已固定, 不利于超表面的进一步应用。因此, 越来越多的研究聚焦于主动调控超表面。在此过程中, 相变材料是超表面动态控制中非常重要的一部分。迄今为止, 已有多种不同的调制方法被运用研究各种功能材料, 如导电氧化物、石墨烯、液晶和相变材料 (PCMs)<sup>[35]</sup>。其中,  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) 是一种典型的相变材料, 由于其在外界刺激下由晶态转变为非晶态时折射率差异较大而得到了广泛的应用<sup>[36-37]</sup>。并且, GST 的晶态和非晶态在室温下稳定, 具有高折射率差异和更快的开关速度<sup>[38-42]</sup>。但晶态 GST 在红外光范围内的

光学损耗限制了它的应用。近年, 通过将 GST 中的 Te 原子替换为 Se 原子, 出现了一种新的相变材料  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  (GSST)。与 GST 相比, GSST 不仅具有上述优点, 并且在红外光谱范围内的光学损耗极低<sup>[43]</sup>。

基于上述背景, 本文提出了一种基于 GSST 的单片超表面, 在不需 4f 成像系统辅助的情况下, 可实现边缘检测与聚焦成像之间的动态切换。超表面被设计在两种结晶状态下实现两种不同的图像处理机制。通过不同结晶态下的传输相位和几何相位组合, 左旋圆偏振光束和右旋圆偏振光束 (下文简称 LCP 光和 RCP 光) 将携带不同的相位。通过优化这些相位, 可以分别实现边缘检测和聚焦成像两种功能。图 1 为超表面在边缘检测和聚焦成像之间动态切换的示意图。动态开关功能依赖于 GSST 的可变结晶状态。当 GSST 为晶态 (crystalline) 时, 出射光会在像面直接显示太阳神鸟边缘。当 GSST 为非晶态 (amorphous) 时, 出射光可以直接成像太阳神鸟。为了方便后文分别简称晶态 GSST 和非晶态 GSST 为 c-GSST 和 a-GSST。

## 2 单元结构与梯度超表面仿真

图 2(a) 和 2(b) 中的 GSST 柱可视为弱耦合的低质量因子法布里-珀罗谐振腔, 传输相位和交叉偏振系数几乎不随旋转角  $\theta$  的变化而变化<sup>[44]</sup>。这种情况下, 几何相位起源于光子自旋轨道相互作用 (the photonic spin-orbit interactions, SOIs), 它只与 GSST 柱的旋转角度有关<sup>[45]</sup>, 而传输相位只与单元结构的固有性质有关, 包括材料、形状和大小。这使得几何相位和传输相位可以自由组合, 因此不同 GSST 结晶态下的不同旋向圆偏振光 (LCP 和 RCP 光) 将会得到不同的总相位。以单个各向异性光散射体为例进行分析, 假设一个透明的各向异性散射体可以引入传输相位  $\varphi$ , 当该散射体旋转角度为  $\theta$  (相对  $x$  轴逆时针旋转), 总相位写作  $2\sigma\theta + \varphi$  ( $\sigma = \pm 1$ , 对于 LCP 和 RCP 光,  $\sigma$  分别等于 +1 和 -1)。通过观察不同状态下的相位表达式, 当使用具有相同固有特性但旋转角度变化的单元结构时,

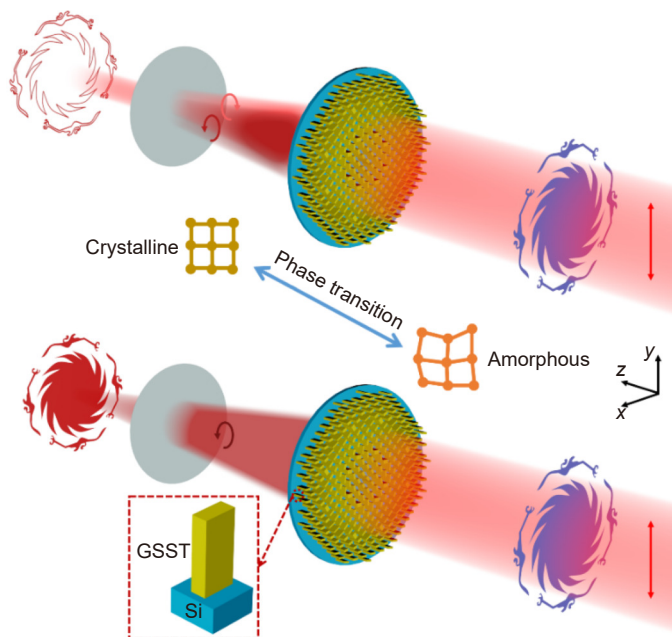


图 1 基于 GSST 相变实现边缘检测和聚焦成像间动态切换的超表面原理图

Fig. 1 Schematic of the metasurface platform enables dynamic switching between the edge detection and imaging based on the phase transition of GSST

由于传输相位  $\varphi$  是不变的, 相对相位分布只依赖于几何相位, 透过超表面的 LCP 光和 RCP 光将具有相反相位分布, 即对称 SOIs<sup>[46]</sup>。利用各种尺寸和旋转角度同时变化的单元结构时, 通过传输相位和几何相位的共同贡献, LCP 光和 RCP 光可以具有任意的相位组合, 即非对称 SOIs<sup>[46]</sup>。传统不可调谐材料的超表面具有固定的 SOIs 类型, 该特性限制了超表面功能的进一步开发。而由于 c-GSST 和 a-GSST 具有不同的介电常数, 超表面在不同的 GSST 结晶态下也会对应有  $\varphi_c$  和  $\varphi_a$  两个传输相位, 由此当  $\varphi_c$  和  $\varphi_a$  分别具有上述两种传输相位特点时, 即可得到可调谐 SOIs。

基于上述结论, 本文优化设计了一组实现可调谐 SOIs 的单元结构。不同单元结构的电磁响应在 CST 微波工作室频域求解器中使用有限积分技术进行了模拟计算, 其中边界条件  $x$  和  $y$  方向设置为 unit cell,  $z$  方向设置为 open; 入射波波长为  $10\ \mu\text{m} \sim 11\ \mu\text{m}$ 。图 2(a) 和 2(b) 中显示了相关几何参数 ( $L, W, P, H$ )。当工作波长为  $10.6\ \mu\text{m}$  时, c-GSST 和 a-GSST 的折射率  $n$  分别为 4.16 和  $3.18^{[43]}$ , 底层材料硅 (Si) 的折射率  $n=3.42$ 。从图 2(c) 和 2(d) 中可以看出, 通过调整纵横比 ( $L/W$ ), c-GSST 下单元结构的传输相位能覆盖整个  $0 \sim 2\pi$  范围, a-GSST 下单元结构的传输相位

几乎一致, 从而实现了可调谐 SOIs。单元结构的平均交叉偏振透射系数达到  $0.77(\text{a-GSST})$  和  $0.42(\text{c-GSST})$ , 与相关研究处于同一水平, 能够在红外光谱范围内正常工作<sup>[47]</sup>。

为了证明该设计的通用性和有效性, 在 CST 微波工作室时域求解器中使用有限积分技术 (FIT) 模拟计算了透射光在 GSST 不同结晶态下的异常折射。其中边界条件  $x$  和  $y$  方向设置为 periodic,  $z$  方向设置为 open; 并设置了足够的网格单元用以捕捉场分布, 减少误差。入射光源采用波长为  $10.6\ \mu\text{m}$  的圆偏振光。图 3(a) 为设计的长度为  $32\ \mu\text{m}$  的梯度超表面示意图。非晶态和晶态下梯度超表面的传输相位梯度分别为  $0$  和  $\pi/4$ 。每个相邻单元之间的旋转角度之差 ( $\Delta\theta$ ) 为  $\pi/8$ 。梯度超表面理论设计用于在 a-GSST 下表现对称 SOIs, 得到 RCP 和 LCP 出射光的对称折射角分别为  $-17.1^\circ$  和  $17.1^\circ$ 。在 c-GSST 下表现非对称 SOIs, RCP 和 LCP 出射光的折射角分别为  $0^\circ$  和  $32^\circ$ 。对应的模拟结果如图 3(b) 和 3(c) 所示: 在 a-GSST 下, 模拟折射光偏转角度为  $-19.5^\circ$  和  $17.7^\circ$ ; 在 c-GSST 下, 折射光偏转角度角分别为  $0^\circ$  和  $31.2^\circ$ 。通过对仿真结果与设计角度的比较, 可以发现两者一致性较好, 其中存在的细微误差经分析源于单元结构间的振幅和相位匹配不完美。

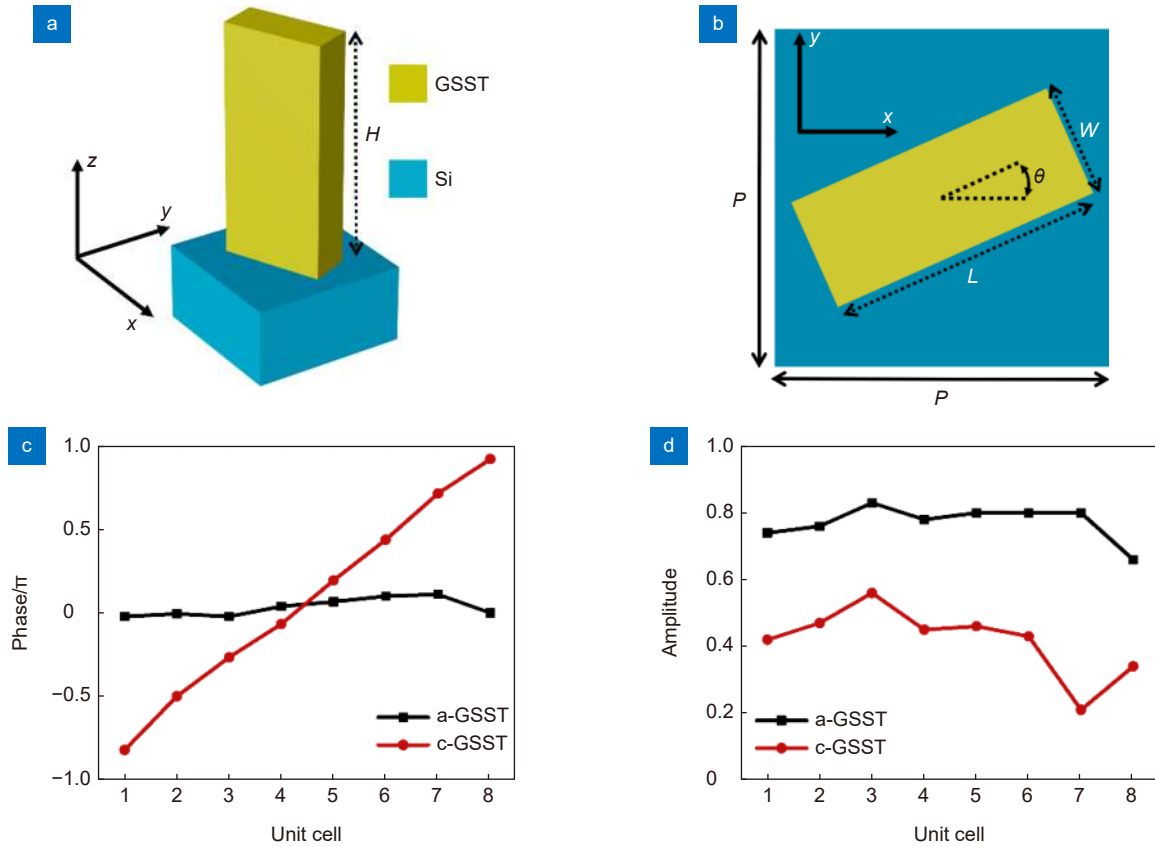


图 2 (a, b) 不同视图下的单元结构示意图; (c, d) 10.6  $\mu\text{m}$  波长下八个单元结构的相位响应和交叉偏振系数。方柱结构和基底的材料分别是 GSST 和 Si。恒定参数 (高度、周期):  $H = 6 \mu\text{m}$ ,  $P = 4 \mu\text{m}$ ; 八个单元结构的长度 ( $L$ ) 和宽度 ( $W$ ) 分别为  $L = 2.9 \mu\text{m}$ ,  $3.0 \mu\text{m}$ ,  $3.3 \mu\text{m}$ ,  $3.2 \mu\text{m}$ ,  $3.5 \mu\text{m}$ ,  $3.79 \mu\text{m}$ ,  $3.82 \mu\text{m}$  和  $2.68 \mu\text{m}$ ,  $W = 1.34 \mu\text{m}$ ,  $1.28 \mu\text{m}$ ,  $1.2 \mu\text{m}$ ,  $1.14 \mu\text{m}$ ,  $1.0 \mu\text{m}$ ,  $0.83 \mu\text{m}$ ,  $0.8 \mu\text{m}$  和  $1.41 \mu\text{m}$

Fig. 2 (a, b) Schematic illustrations of unit cells at different views. (c, d) Simulated phase responses and cross-polarized coefficients of eight unit cells for circularly polarized light at the wavelength of 10.6  $\mu\text{m}$ . The materials of nanofins and substrate are GSST and Si, respectively. Constant parameters:  $H = 6 \mu\text{m}$ ,  $P = 4 \mu\text{m}$ . The length ( $L$ ) and width ( $W$ ) of eight unit cells are  $L = 2.9, 3.0, 3.3, 3.2, 3.5, 3.79, 3.82$  and  $2.68 \mu\text{m}$ ,  $W = 1.34, 1.28, 1.2, 1.14, 1.0, 0.83, 0.8$  and  $1.41 \mu\text{m}$

### 3 成像功能分析设计与验证

为了实现可切换边缘检测与聚焦成像单片超表面, 下面对两者原理进行简单分析。首先, 对于聚焦成像, 相位分布  $\psi$  与坐标  $x$  和  $y$  之间的关系为

$$\psi_i(x, y) = (2\pi/\lambda) \left[ \sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f \right], \quad (1)$$

其中:  $\lambda$  是入射光波长;  $f$  是焦距。

与聚焦成像相比, 边缘检测的机理更为复杂。为了方便起见, 先对一维边缘成像的工作原理进行分析。在携带物体信息的线偏振光的照射下, 具有几何相位梯度分布的超表面投射出具有对称折射的 LCP 和 RCP 光, 导致 LCP 和 RCP 图像分别发生横向偏移  $\pm l$ 。因此电场可表示为

$$\mathbf{E}(x, y) = \mathbf{E}_0[(x-l), y] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} + \mathbf{E}_0[(x+l), y] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当  $l$  远小于成像尺寸时, LCP 光和 RCP 光在同一点上的相位可视为是相等的。因此, LCP 和 RCP 图像的重叠区域将会保持入射时的偏振态, 用正交线性偏振器进行滤波, 最终的电场可以改写为

$$\mathbf{E}_{\text{edge}}(x, y) = (\mathbf{E}_0[(x+l), y] - \mathbf{E}_0[(x-l), y]) \begin{bmatrix} 0 \\ i \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由于与整个成像相比,  $l$  可以忽略。因此,  $\mathbf{E}_{\text{edge}}(x, y)$  与入射电场  $\mathbf{E}_0(x, y)$  的一阶空间微分近似成正比:

$$\mathbf{E}_{\text{edge}}(x, y) \approx 2l \frac{d\mathbf{E}_0(x, y)}{d(x)}. \quad (4)$$

因此, 边缘检测的关键过程就简单地分为成像、分离和过滤三个步骤<sup>[48]</sup>。为了同时实现成像和分离, 两相分布应表示为

$$\psi_e(x, y) = (2\pi/\lambda) \left[ \sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f + \sigma(x/n) \right], \quad (5)$$

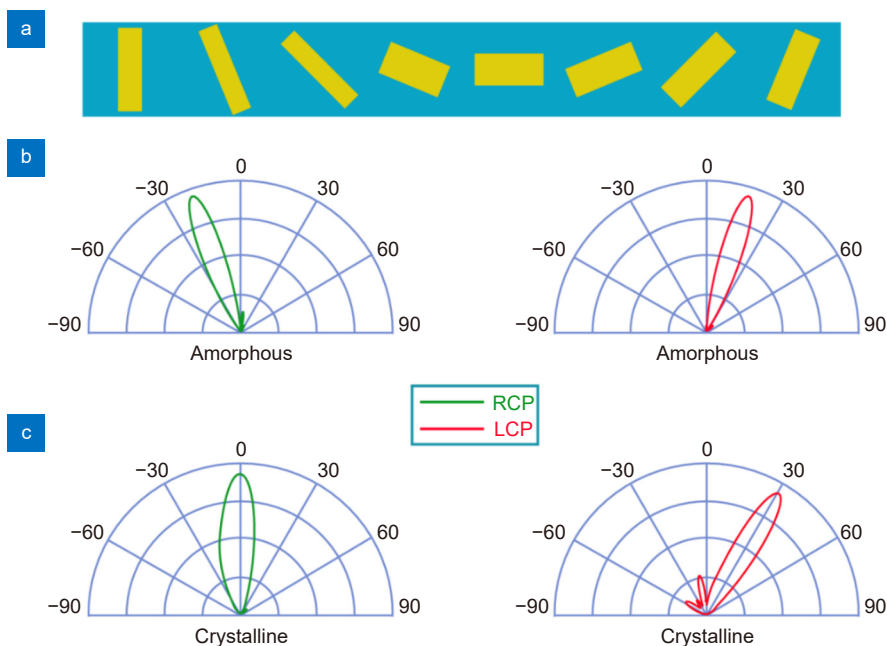


图 3 (a) 可调谐异常透射梯度超表面周期结构示意图; (b) a-GSST 下的模拟交叉偏振远场分布; (c) c-GSST 下的模拟交叉偏振远场分布

Fig. 3 (a) Schematic illustration of a periodic gradient metasurface for tunable anomalous transmission; (b) The simulated cross-polarized far-field distributions when GSST is amorphous; (c) The simulated cross-polarized far-field distributions when GSST is crystalline

其中:  $\lambda$  是入射波长;  $f$  是焦距;  $\sigma = \pm 1$  (对于 LCP 和 RCP 光,  $\sigma$  分别等于 +1 和 -1);  $n$  是一个控制 LCP 和 RCP 图像分离程度的变量实数,  $n$  的大小与分离程度成反比。因此, 边缘宽度取决于选定的  $n$  值和所设计超表面的衍射极限。对于二维边缘检测, 分离过程拓展为 LCP 和 RCP 图像沿着径向等比例缩小和放大, 利用正交线性偏振器进行滤波。因此, 同时进行成像、分离是实现边缘检测的重点。通过分析和优化, 单元结构在 c-GSST 的传输相位和偏转角分布设计如下:

$$\varphi_c(x, y) = (2\pi/\lambda) \left[ \sqrt{x^2 + y^2 + f_1^2} - f_1 \right], \quad (6)$$

$$\theta(x, y) = (\pi/\lambda) \left[ \sqrt{x^2 + y^2 + f_2^2} - f_2 \right], \quad (7)$$

$$(r_{\max}^2 - \lambda^2)/2\lambda \leq f_2, \quad (8)$$

其中:  $\varphi_c(x, y)$  是晶态下的  $(x, y)$  坐标处相位,  $\theta(x, y)$  为对应坐标处单元结构旋转角度,  $r_{\max}$  是圆形超表面的半径,  $f_1$  和  $f_2$  分别是边缘检测和聚焦成像的焦距。采用这种设计方法, 在 a-GSST 下, 超表面对 LCP 和 RCP 透射光赋予的总相位由相同的传输相位和相反的几何相位组成, 因此 LCP 光会获得聚焦相位, RCP 光会获得相反的发散相位, 因而利用 LCP 光可

实现焦距为  $f_2$  聚焦成像。在 c-GSST 下, 超表面的传输相位为聚焦相位, 几何相位会分别在该聚焦相位的基础上叠加一个聚焦相位和发散相位, 当  $f_2$  满足式 (8) 时, 该叠加相位可以将 LCP 和 RCP 图像沿着径向等比例缩小和放大, 从而实现焦距为  $f_1$  的边缘检测。

最后, 为验证式 (6) 和式 (7) 分布设计的可行性, 建立了相应的超表面模型。超表面由  $30 \times 30$  个单元结构组成, 尺寸为  $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ , 相关参数分别为  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ,  $r_{\max} = 60 \mu\text{m}$ ,  $f_1 = 100 \mu\text{m}$ ,  $f_2 = 1000 \mu\text{m}$ ; c-GSST 和 a-GSST 的折射率  $n$  分别为 4.16 和 3.18, 底层材料硅 (Si) 的折射率  $n = 3.42$ ; GSST 方柱高度  $H = 6 \mu\text{m}$ 。在 CST 微波工作室时域求解器中使用有限积分技术进行了模拟仿真。模拟仿真目标分布应为圆环形 (焦点边缘) 和圆点形 (聚焦焦点) 分布, 模拟仿真结果如图 4 所示。从图 4(a) 和 4(b) 可以看出 c-GSST 下 RCP 和 LCP 图像以及中心虚线部分归一化强度分布沿径向实现了一定程度的分离, 与设计一致。图 4(c) 和 4(d) 分别显示了经偏振滤波之后的像面强度分布和聚焦的中心强度分布, 其中图 4(c) 为 LCP 和 RCP 两部分叠加后, 经正交偏振滤波之后的像面

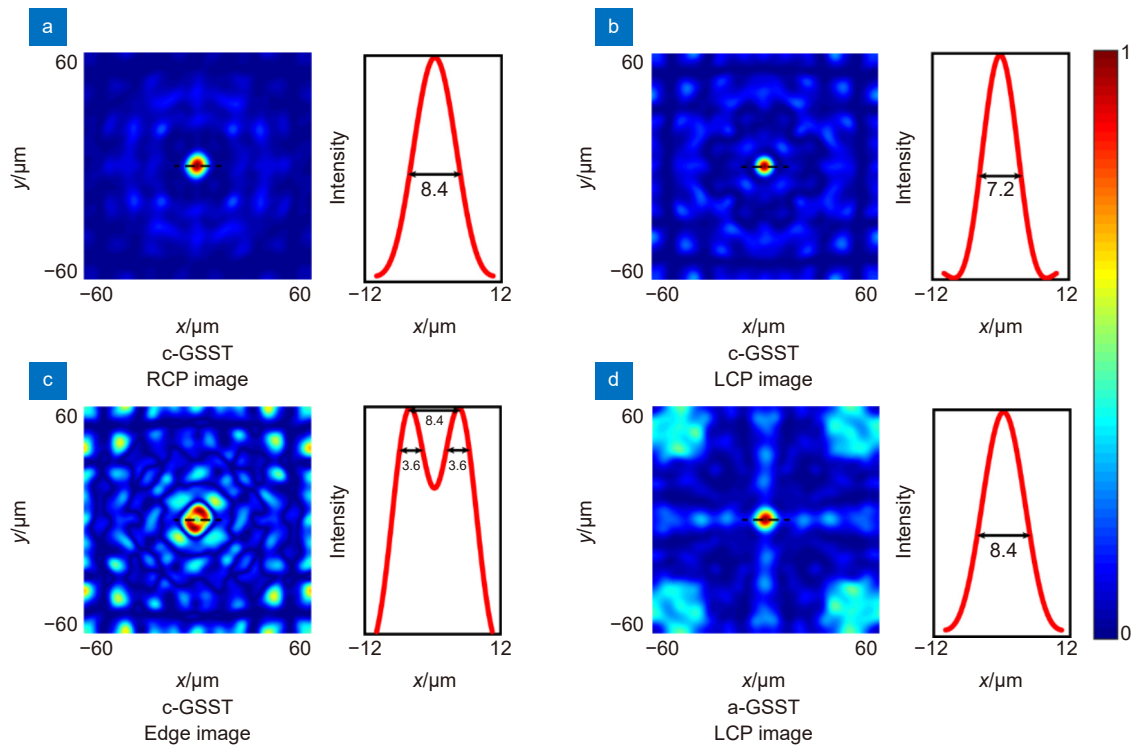


图 4 入射光为  $10.6 \mu\text{m}$  时 GSST 不同态下像面强度分布。(a) c-GSST 下,  $z=100 \mu\text{m}$  时模拟 RCP 成像强度分布和中心虚线部分归一化强度分布; (b) c-GSST 下,  $z=100 \mu\text{m}$  时模拟 LCP 成像强度分布和中心虚线部分归一化强度分布; (c) c-GSST 下,  $z=100 \mu\text{m}$  时模拟偏振滤波后的像面强度分布和中心虚线部分归一化强度分布; (d) a-GSST 下,  $z=1000 \mu\text{m}$  时模拟聚焦成像强度分布和中心虚线部分归一化强度分布

Fig. 4 The simulated image intensity distributions of different states under the  $10.6 \mu\text{m}$  incident beam. (a) The simulated RCP image intensity distributions and normalized intensity distributions of the dotted line on  $z=100 \mu\text{m}$  plane when GSST is crystalline; (b) The simulated LCP image intensity distributions and normalized intensity distributions of the dotted line on  $z=100 \mu\text{m}$  plane when GSST is crystalline; (c) The simulated edge image intensity distribution and normalized intensity distributions of the dotted line on  $z=100 \mu\text{m}$  plane when GSST is crystalline; (d) The simulated LCP image intensity distribution and normalized intensity distributions of the dotted line on  $z=1000 \mu\text{m}$  plane when GSST is amorphous

强度分布。同时各强度分布均存在大小不同的背景噪声。图 4(a)、4(b) 和 4(d) 中存在的杂散光与仿真模型大小、网格划分大小以及各单元交叉偏振系数分布不均有关。模拟仿真结果中较强的杂散光主要体现在图 4(c) 中, 由于过滤后中心部位强度降低, 周围的噪声相对强度有所上升, 通过对比图 4(c) 与图 4(a) 和图 4(b) 中的背景噪声可以加以验证。图 4(c) 和 4(d) 中的圆环形边缘能量效率和圆点形焦点能量效率分别为 25.4% 和 31.6%, 这里的能量效率为相对能量效率是像面上有效部分能量与像面总能量之比。通过观察不难发现图 4(c) 和 4(d) 中经偏振滤波之后的像面强度分布和中心强度分布分别为圆环形和圆点形, 其中中心虚线部分归一化强度分布也呈现出对称双峰和聚焦单峰的形态验证了该设计的可行性。但同时也发现像面强度分布图像存在强度分布不均匀从而导致的边缘

检测效果欠佳的问题, 经分析该问题主要源于计算能力限制下仿真模型较小和网格设置不足, 通过增加仿真模型体积和进一步细化网格还可以进一步提高边缘检测效果。为了验证上述分析, 在 Matlab 中进行了理论模拟计算以验证式 (6) 和式 (7) 相位分布下实现边缘检测与聚焦成像的可行性, 设定参数为:  $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ ,  $r_{\text{max}}=600 \mu\text{m}$ ,  $f_1=600 \mu\text{m}$ ,  $f_2=15000 \mu\text{m}$ 。图 5(a) 和 5(b) 分别显示了以“SICNU”字母和太阳神鸟为成像物体时在焦平面的成像效果。从图中可以看出聚焦成像与边缘检测效果良好, 验证了上述分析, 并证明了该相位设计的可行性。最后, 图 5(c) 是用于边缘检测的成像系统示意图。与其他同类图像处理系统相比, 该设计摆脱了 4f 成像系统, 进一步实现了小型化和高集成化。

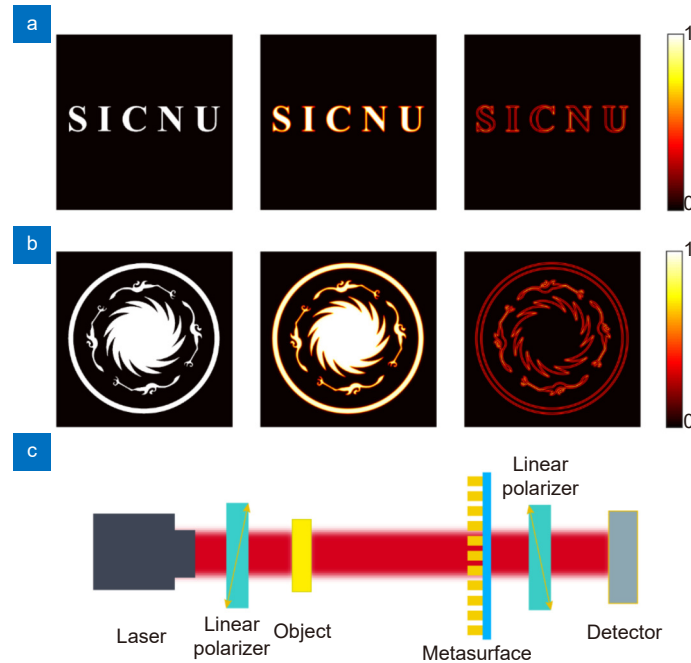


图 5 (a) 理论模拟计算成像物体为“S I C N U”字母时, 从左到右依次为: 物体图像, 聚焦成像, 边缘检测成像; (b) 理论模拟计算成像物体为太阳神鸟时, 从左到右依次为: 物体图像, 聚焦成像, 边缘检测成像; (c) 图像处理系统示意图

Fig. 5 (a) The calculation results when the object is "S I C N U", from left to right: object image, imaging, edge detection imaging; (b) The calculation results when the object is the sun and immortal birds, from left to right: object image, imaging, and edge detection imaging; (c) Schematic illustration of the system for image processing

## 4 结 论

综上所述, 本文提出了一种可切换聚焦成像与边缘检测的单片超表面, 超表面由基于 GSST 相变材料的单元结构组成。基于 GSST 的单元结构通过 GSST 的结晶态转换实现了可切换光子 SOIs。并通过利用可切换光子 SOIs 的特性设计了可切换边缘检测与聚焦成像超表面。最后通过模拟仿真和理论计算验证了该设计的可行性。本文提出的超表面无需 4f 成像系统的辅助, 进一步提高了超表面应用的集成度, 为有源元器件的设计提供了新的思路, 在生物医学成像和缺陷检测等领域有潜在应用价值。

## 参考文献

- [1] Kwon H, Sounas D, Cordaro A, et al. Nonlocal metasurfaces for optical signal processing[J]. *Phys Rev Lett*, 2018, **121**(17): 173004.
- [2] Davis T J, Eftekhari F, Gómez D E, et al. Metasurfaces with asymmetric optical transfer functions for optical signal processing[J]. *Phys Rev Lett*, 2019, **123**(1): 013901.
- [3] Solli D R, Jalali B. Analog optical computing[J]. *Nat Photonics*, 2015, **9**(11): 704–706.
- [4] Zhu T F, Lou Y J, Zhou Y H, et al. Generalized spatial differentiation from the spin hall effect of light and its application in image processing of edge detection[J]. *Phys Rev Appl*, 2019, **11**(3): 034043.
- [5] Mueller J P B, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Phys Rev Lett*, 2017, **118**(11): 113901.
- [6] Chen W T, Zhu A Y, Capasso F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces[J]. *Nat Rev Mater*, 2020, **5**(8): 604–620.
- [7] Huang Y J, Xiao T X, Xie Z W, et al. Single-layered phase-change metasurfaces achieving efficient wavefront manipulation and reversible chiral transmission[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(2): 1337–1350.
- [8] Huang Y J, Xiao T X, Xie Z W, et al. Multistate nonvolatile metamirrors with tunable optical chirality[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(38): 45890–45897.
- [9] Huang Y J, Xiao T X, Xie Z W, et al. Single-layered reflective metasurface achieving simultaneous spin-selective perfect absorption and efficient wavefront manipulation[J]. *Adv Opt Mater*, 2021, **9**(5): 2001663.
- [10] Zhang Y X, Pu M B, Jin J J, et al. Crosstalk-free achromatic full Stokes imaging polarimetry metasurface enabled by polarization-dependent phase optimization[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(11): 220058.
- [11] Li J T, Wang G C, Yue Z, et al. Dynamic phase assembled terahertz metalens for reversible conversion between linear polarization and arbitrary circular polarization[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(1): 210062.
- [12] Wang Y L, Fan Q B, Xu T. Design of high efficiency achromatic metalens with large operation bandwidth using bilayer architecture[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(1): 200008.
- [13] Yue Z, Li J T, Li J, et al. Terahertz metasurface zone plates



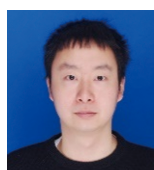
- with arbitrary polarizations to a fixed polarization conversion[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, **1**(3): 210014.
- [14] Lan X, Deng Q R, Zhang W T, et al. Efficient chiral absorber based on twisted catenary structure[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220157.  
蓝翔, 邓钦荣, 张汶婷, 等. 基于扭转悬链线结构的高效手性吸波器[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220157.
- [15] Yang R, Yu Q Q, Pan Y W, et al. Directional-multiplexing holography by on-chip metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220177.  
杨睿, 于千茜, 潘一苇, 等. 基于片上超表面的多路方向复用全息术[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220177.
- [16] Huang Y J, Xiao T X, Chen S, et al. All-optical controlled-NOT logic gate achieving directional asymmetric transmission based on metasurface doublet[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**: 220073.
- [17] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, **10**(4): 308–312.
- [18] Li X, Chen L W, Li Y, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Sci Adv*, 2016, **2**(11): e1601102.
- [19] Xie X, Liu K P, Pu M B, et al. All-metallic geometric metasurfaces for broadband and high-efficiency wavefront manipulation[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(10): 3209–3215.
- [20] Tang Z Y, Li L, Zhang H C, et al. Multifunctional Janus metasurfaces achieving arbitrary wavefront manipulation at dual frequency[J]. *Mater Des*, 2022, **223**: 111264.
- [21] Xu K, Wang X E, Fan X H, et al. Meta-holography: from concept to realization[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220183.  
许可, 王星儿, 范旭浩, 等. 超表面全息术: 从概念到实现[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220183.
- [22] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light[J]. *Science*, 2017, **358**(6365): 896–901.
- [23] Li Q T, Dong F L, Wang B, et al. Free-space optical beam tapping with an all-silica metasurface[J]. *ACS Photonics*, 2017, **4**(10): 2544–2549.
- [24] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nat Nanotechnol*, 2018, **13**(3): 220–226.
- [25] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nat Nanotechnol*, 2018, **13**(3): 227–232.
- [26] Cai W S, Chettiar U K, Kildishev A V, et al. Optical cloaking with metamaterials[J]. *Nat Photonics*, 2007, **1**(4): 224–227.
- [27] Xie X, Li X, Pu M B, et al. Plasmonic metasurfaces for simultaneous thermal infrared invisibility and holographic illusion[J]. *Adv Funct Mater*, 2018, **28**(14): 1706673.
- [28] Zhou Y, Wu W H, Chen R, et al. Analog optical spatial differentiators based on dielectric metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(4): 1901523.
- [29] Cordaro A, Kwon H, Sounas D, et al. High-index dielectric metasurfaces performing mathematical operations[J]. *Nano Lett*, 2019, **19**(12): 8418–8423.
- [30] Dong Z W, Si J N, Yu X Y, et al. Optical spatial differentiator based on subwavelength high-contrast gratings[J]. *Appl Phys Lett*, 2018, **112**(18): 181102.
- [31] Zhou Y, Zheng H Y, Kravchenko I I, et al. Flat optics for image differentiation[J]. *Nat Photonics*, 2020, **14**(5): 316–323.
- [32] Wan L, Pan D P, Yang S F, et al. Optical analog computing of spatial differentiation and edge detection with dielectric metasurfaces[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(7): 2070–2073.
- [33] Huo P C, Zhang C, Zhu W Q, et al. Photonic spin-multiplexing metasurface for switchable spiral phase contrast imaging[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(4): 2791–2798.
- [34] He Q, Zhang F, Pu M B, et al. Monolithic metasurface spatial differentiator enabled by asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Nanophotonics*, 2021, **10**(1): 741–748.
- [35] Shaltout A M, Shalaei V M, Brongersma M L. Spatiotemporal light control with active metasurfaces[J]. *Science*, 2019, **364**(6441): eaat3100.
- [36] Chang C M, Chu C H, Tseng M L, et al. Local electrical characterization of laser-recorded phase-change marks on amorphous Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> thin films[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(10): 9492–9504.
- [37] Chen Y G, Kao T S, Ng B, et al. Hybrid phase-change plasmonic crystals for active tuning of lattice resonances[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(11): 13691–13698.
- [38] Yamada N. Origin, secret, and application of the ideal phase-change material GeSbTe[J]. *Phys Status Solidi*, 2012, **249**(10): 1837–1842.
- [39] Loke D, Lee T H, Wang W J, et al. Breaking the speed limits of phase-change memory[J]. *Science*, 2012, **336**(6088): 1566–1569.
- [40] Michel A K U, Zalden P, Chigrin D N, et al. Reversible optical switching of infrared antenna resonances with ultrathin phase-change layers using femtosecond laser pulses[J]. *ACS Photonics*, 2014, **1**(9): 833–839.
- [41] Wang Q, Rogers E T F, Gholipour B, et al. Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials[J]. *Nat Photonics*, 2016, **10**(1): 60–65.
- [42] Du K K, Li Q, Lyu Y B, et al. Control over emissivity of zero-static-power thermal emitters based on phase-changing material GST[J]. *Light Sci Appl*, 2017, **6**(1): e16194.
- [43] Zhang Y F, Chou J B, Li J Y, et al. Broadband transparent optical phase change materials for high-performance nonvolatile photonics[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 4279.
- [44] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, **10**(11): 937–943.
- [45] Bliokh K Y, Rodríguez-Fortuño F J, Nori F, et al. Spin-orbit interactions of light[J]. *Nat Photonics*, 2015, **9**(12): 796–808.
- [46] Zhang F, Pu M B, Luo J, et al. Symmetry breaking of photonic spin-orbit interactions in metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(3): 319–325.
- [47] Yang H, Xie Z W, He H R, et al. Switchable imaging between edge-enhanced and bright-field based on a phase-change metasurface[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(15): 3741–3744.
- [48] Zhou J X, Qian H L, Chen C F, et al. Optical edge detection based on high-efficiency dielectric metasurface[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, **116**(23): 11137–11140.

## 作者简介



胡杰 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事相变超表面设计研究。

E-mail: [hujie19981022@foxmail.com](mailto:hujie19981022@foxmail.com)



【通信作者】黄奕嘉 (1993-), 男, 博士研究生, 副研究员, 2015 年本科毕业于天津大学应用物理系, 2020 年 7 月获得中国科学院大学测试计量技术及仪器专业博士学位。2020 年 7 月开始在四川师范大学物理与电子工程学院任职, 主要研究方向为亚波长电磁学、微纳光学与等离子体光学。

E-mail: [bradbiubiu@sicnu.edu.cn](mailto:bradbiubiu@sicnu.edu.cn)



【通信作者】李玲 (1970-), 女, 研究员, 硕士生导师, 毕业于中国科学院物理研究所, 现任四川师范大学微纳光学实验室主任。主要研究方向为超材料/超表面结构的微纳光学器件设计、加工和应用。

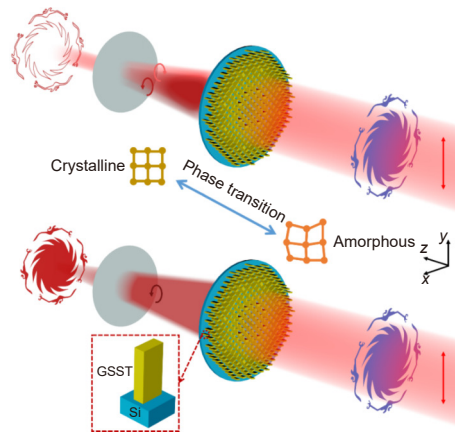
E-mail: [lingli70@aliyun.com](mailto:lingli70@aliyun.com)



扫描二维码, 获取PDF全文

# Switchable edge detection and imaging based on a phase-change metasurface with $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$

Hu Jie, Tang Ziyi, Lan Xiang, Deng Qinrong, Zhang Wenting, Huang Yijia\*, Li Ling\*



Schematic of the metasurface platform enable dynamic switching between edge detection and imaging

**Overview:** This paper is devoted to the research of switchable edge detection and imaging metasurface without a 4f system. Edge detection and imaging both are important parts of modern imaging processing, which are widely applied in the fields of robot vision, modern artificial intelligence, and medical imaging operation. The method of processing images based on mathematical operations usually has low operational speed and high-power consumption. Therefore, optical analog computation is suggested to operate image processing performs by manipulating optical signal carrying image information. Optical analog computation based on the traditional optical system needs bulky configurations which is improper in highly integrated modern optical systems. Therefore, this paper analyzes and designs the phase distribution which enable switchable edge detection and imaging and proved the feasibility of the design by operating simulation and theoretical calculation with the proposed metasurface. The switchable ability relies on the switchable photonic spin-orbit interactions (SOIs). Therefore, firstly this paper described and analyzed SOIs. And then we utilize two optical properties of GSST in crystalline and amorphous states to design eight unit cells which have different phases when GSST is in different states. In order to prove that the switchable SOIs can be realized by using the free combination of the proposed eight unit cells, the gradient metasurface consists of unit cells designed to perform symmetric photonic SOIs when GSST is in the amorphous state, resulting in symmetric refractive angles  $-17.1^\circ$  and  $17.1^\circ$  for LCP and RCP incidence. While the designed gradient metasurface performs asymmetric photonic SOIs when GSST is in the crystalline state, resulting in refractive angles of  $0^\circ$  and  $32^\circ$  for LCP and RCP incidence. The simulated refractive angles are approximately  $-19.5^\circ$ ,  $17.7^\circ$  and  $0^\circ$ ,  $31.2^\circ$  in the amorphous and crystalline state. The highly consistent results between simulation and theoretical calculation prove the feasibility of this design. Then the principle of imaging and edge detection is analyzed theoretically, and by analyzing and optimizing legitimately, designed the propagation phase at the crystalline state and orientation angle for the unit cells. Employing this design method, when GSST is in the amorphous state the phase of transmitted LCP light fulfills the focusing phase. When GSST is in the crystalline state, the transmitted wavefronts of LCP and RCP can match the phase distributions of edge detection. Further, in order to prove the feasibility of the designed metasurface, a metasurface model is created to operate edge detection and imaging in CST Microwave Studio. The edge imaging of the object and the object imaging in simulated results proved the feasibility of the designed metasurface. Finally, at the same time, the letters "S I C N U" and the sun and immortal birds are chosen as objects for calculating the imaging of complex objects theoretically under the above-mentioned phase distributions. The theoretic edge imaging and imaging of the letters "S I C N U" and the sun and immortal birds proved that designed two-phase distributions can realize edge detection and bright-field imaging well. To sum up, the metasurface designed in this paper can provide a kind of design without a 4f system to realize switchable edge detection and imaging.

Hu J, Tang Z Y, Lan X, et al. Switchable edge detection and imaging based on a phase-change metasurface with  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ [J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 220284; DOI: 10.12086/oe.2023.220284

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (62105228), and Natural Science Foundation of Sichuan Province (2022NSFSC2000)

Laboratory of Micro-Nano Optics, College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610101, China

\* E-mail: lingli70@aliyun.com; lingli70@aliyun.com