

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413251

基于 GaAs/Sb₂Se₃ 相变可调谐线性偏振器*

邓思珩, 石磊东, 陈 洋, 祝连庆, 鹿利单

(北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100096)

摘要: 偏振超表面是一种新型光学器件, 通过设计微纳米结构和选用适当的材料, 能够精确控制光的偏振状态、相位和振幅。现有的大多偏振片由于固定的物理结构及材料特性使得功能较为单一且体积较大, 难以满足现代光学系统对小型化和多功能化的需求。研究了一种基于全介电 GaAs/Sb₂Se₃ 结构的可调谐相变偏振超表面, 工作于近红外波段(780~1 100 nm)。通过集成偏振转换元原子和相位转换元原子, 设计出具有高透射率(99.625%)、高消光比(32.8 dB)及可控偏振角的线性偏振器件。特别地, 通过引入相变材料硒化锑, 实现了偏振片在不同相态下的动态调谐, 使其在不同波段的偏振态控制上具有显著优势。通过理论分析和时域有限差分法仿真验证了设计的有效性, 展现了该超表面在红外探测、成像和通信等领域的广泛应用潜力。该研究为光学系统的小型化和多功能化提供了创新解决方案, 为未来材料优化和新应用探索奠定了基础。

关键词: 超表面; 相变材料; 偏振调控; 近红外。

中图分类号: TH741

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.20

A tunable linear polarizer based on phase-change material using GaAs/Sb₂Se₃

Deng Siheng, Shi Leidong, Chen Yang, Zhu Lianqing, Lu Lidan

(College of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100096, China)

Abstract: Polarization metasurfaces are innovative optical devices that can precisely control the polarization state, phase, and amplitude of light by designing micro-nano structures of different materials. Most existing polarizers have limited functionality and larger sizes due to their fixed physical structures and material properties, making it difficult to meet the demands for miniaturization and multifunctionality in modern optical systems. This article investigates a tunable phase-change polarization metasurface based on an all-dielectric GaAs/Sb₂Se₃ structure operating in the near-infrared wavelength range (780~1 100 nm). By integrating polarization conversion meta-atoms and phase-switching meta-atoms, a linear polarization device with high transmittance (99.625%), high extinction ratio (32.8 dB), and controllable polarization angle is designed. Notably, the introduction of the phase-change material Sb₂Se₃ enables dynamic tuning of the polarizer under different phase states, offering significant advantages for controlling the polarization state across various wavelength ranges. The effectiveness of the design is evaluated through theoretical analysis and finite-difference time-domain simulations, demonstrating the broad application potential of this metasurface in infrared detection, imaging, and communication. This research provides an innovative solution for the miniaturization and multifunctionality of optical systems and lays the foundation for future material optimization and exploration of new applications.

Keywords: metasurface; phase change material; polarization control; near-infrared.

0 引言

自然材料的介电常数和磁导率受限于其固有的原子

结构, 这限制了它们在电磁波调控方面的性能。相较之下, 超构材料通过精心设计的单元结构, 能够实现更为强大的光学调控能力^[1-2]。然而, 这类材料往往具有复杂的三维结构, 制造难度高且损耗较大, 这限制了它

们的广泛应用。光学超表面作为超构材料的一种扩展概念,通过在微纳米尺度上设计周期性或准周期性的纳米结构,从而实现对光的相位、振幅和偏振的精准调控。由于其平面结构、制造简便、低损耗以及高自由度调控的特点,光学超表面近年来获得了广泛关注^[3]。其理论基础源自界面相位突变,这一现象突破了经典斯涅尔定律,引发了许多新的光学现象。这些进展推动了器件的微型化和多功能化,使得单一器件能够实现多种光学任务。

在成像、导航和探测等应用中,光的偏振信息非常关键,因为它能够增加光的信息维度,提供更多的细节^[4]。近红外偏振技术凭借其独特的光学特性,在各种应用场景中展现了显著的检测、成像和通信能力,因此在科学研究和实际应用中扮演了不可或缺的角色^[5-8]。传统的偏振器件通常体积较大,这对系统的小型化构成了障碍,而超表面由于其紧凑设计和高效的调控性能,成为了理想的替代选择。例如,利用表面等离子体效应的亚波长金属光栅结构能够实现高消光比的偏振滤光片,但金属的高光学损耗导致其透过率普遍较低。与此相比,全电介质超表面通过 Mie 共振效应实现高效的偏振调控,且光学损耗较小,因此是更优的选择^[9-10]。SiO 和 GaAs 在近红外波段表现出的优异光学性能,使它们成为设计偏振器件的理想材料^[11]。随着光学系统向小型化发展,基于超表面的设计为集成多种光学功能提供了新思路,尤其在信息加密和防伪识别领域展示了巨大的应用潜力^[12]。

尽管众多研究者使用现有技术设计了各种偏振片,但大多数偏振片在其结构确定后,其工作模式便固定不变^[13-15]。随着应用场景的复杂性和多样性增加,能够动态调节的偏振片越来越受到关注。在成像、通信和传感等领域,能够实时调整光偏振态的器件将显著提升系统的灵活性和功能性。为应对这一需求,相变材料的引入提供了新的解决方案。相变材料具有独特的可逆特性,其相态可以通过外部条件(如温度、电场或光照)进行调节,从而实现不同相态之间的转换,这一过程通常伴随显著的光学性质变化^[16-18]。Sb₂Se₃ 在不同相态下表现出明显的光学常数变化,尤其是在近红外波段,这使其成为设计可调偏振片的理想选择^[19-20]。利用这种特性,偏振片不仅可以实现动态的偏振态调节,还能适应多样的工作环境和需求,为光学系统的小型化和多功能化提供了新的可能性。

提出了一种基于全介电 GaAs/Sb₂Se₃ 结构的可调谐相变偏振超表面,该超表面工作于近红外波段(780~1100 nm)。通过在单个晶胞中集成偏振转换元原子(polarization conversion meta-atom, PCM)和相位转换元原子(phase shift meta-atom, PSM),成功实现了高透

率、高消光比且偏振角可控的线性偏振器件。通过改变 PSM 的半径,能够实现偏振功能的灵活转换。此外,引入相变材料 Sb₂Se₃,使得偏振片的响应工作波长能够动态调谐,从而进一步提升了该器件在不同应用场景中的适用性。这一设计为光学系统的小型化和多功能化提供了创新的解决方案。

1 理论分析

在之前的研究中可知^[21-22],双原子超表面的琼斯矩阵可表示为:

$$\mathbf{M}_{UC} = \mathbf{M}_{PSM} + \mathbf{M}_{PCM} = 2 |t_{xx_PSM}| e^{i\varphi_{xx_PSM}} \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{pmatrix}$$

其中, $\mathbf{M}$ 为对应元原子组成的光学器件的传递矩阵; $|t_{xx_PSM}|$ 和 φ_{xx_PSM} 分别表示 PSM 沿 x 轴偏振的光的传输振幅和相位; α 表示对结构施加一个相对于 x 轴的旋转角,即 PCM 的短轴与水平方向的夹角。

偏振光的调制过程可以记为:

$$\mathbf{J}_{out} = \mathbf{M}_{UC} \mathbf{J}_{in} = 2 |t_{xx_PSM}| e^{i\varphi_{xx_PSM}} (A_{ox} e^{i\varphi_{ox}} \cos \alpha + A_{oy} e^{i\varphi_{oy}} \sin \alpha) \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix}$$

这里的 $\mathbf{J}_{in}$ 表示入射的椭圆偏振光的琼斯矩阵,而 $\mathbf{J}_{out}$ 表示经过双原子超表面调制后的线偏振光。

由上式 $\mathbf{M}_{UC}$ 和 $\mathbf{J}_{out}$ 可以得出结论,合适的 PSM 和 PCM 组合可以等效为偏振角等于 PCM 方位角的线偏振器。

将 PCM 旋转 90° 至角度为 α_2 , 其中 $\alpha_2 = \alpha + 90^\circ$, 可以得到 $\mathbf{M}_{UC2}$ 的琼斯矩阵:

$$\mathbf{M}_{UC\alpha_2} = 2 |t_{xx_PSM}| e^{i\varphi_{xx_PSM}} \begin{pmatrix} \sin^2 \alpha & -\sin \alpha \cos \alpha \\ -\sin \alpha \cos \alpha & \cos^2 \alpha \end{pmatrix}$$

如果在此处考虑设计一个新的 PSM₂, 通过改变 PSM₂ 的半径或者引入相变材料提供不同的相位梯度,可以使得设计的 PSM₂ 和 PSM 存在:

$$|t_{xx_PSM_2}| = |t_{xx_PSM}| = |t_{xx_PCM}|$$

$$\varphi_{xx_PSM_2} = \varphi_{xx_PCM} + \pi = \varphi_{yy_PCM} = \varphi_{xx_PSM} + \pi$$

不同 PSM 半径的双原子超表面的琼斯矩阵为:

$$\mathbf{M}_{UC_2} = \mathbf{M}_{PSM_2} + \mathbf{M}_{PCM_2} = 2 |t_{xx_PSM}| e^{i(\varphi_{xx_PSM} + \pi)} \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{pmatrix}$$

由式中的 $\mathbf{M}_{UC\alpha_2}$ 和 $\mathbf{M}_{UC_2}$ 可以得出结论,具有不同半径 PSM 的 2 个超表面线偏振器也可以实现传输相位相差 π , 在功能上实现偏振角差值 90° 的偏振转换。

2 实验验证

2.1 实验环境

为了验证所提出的全介电双原子超表面设计, 本研究采用了时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 方法进行模拟和评估。X 和 Y 方向上采用周期性边界条件以模拟周期性超表面结构, 在 Z 轴方向上设置完美匹配层以吸收所有入射场, 而不产生反射。实验环境的详细设定如下:

材料选择: 元原子材料选用砷化镓 (GaAs), 其上覆盖了一层碲硒化物 (Sb₂Se₃), 以构建相变材料层。玻璃衬底作为基底支持整个结构。

结构参数: 超表面的晶胞周期设定为 500 nm, 厚度 H 为 500 nm。元件的中心间距 S 为 353.55 nm, PCM 相变材料的尺寸为 200 nm × 125 nm, PSM 半径设定为 80 nm。实验中使用的入射光源波长范围为 780 ~ 1 100 nm。

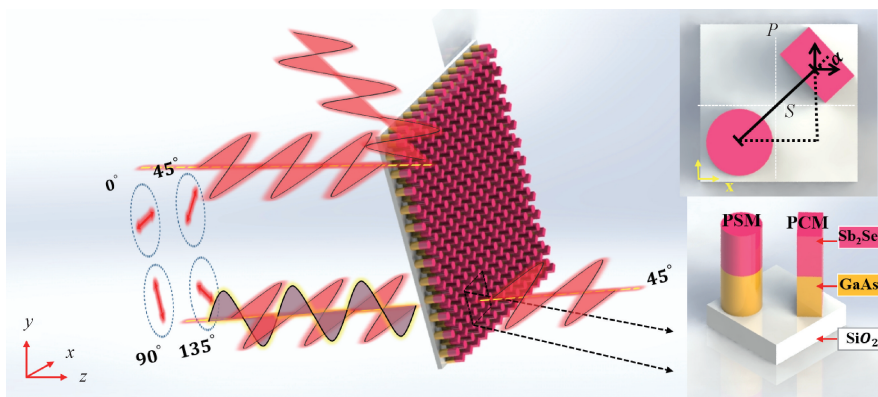


图 1 用于线性极化的全介电双原子超表面

Fig. 1 Diagram of an all-dielectric diatomic metasurface for linear polarization

2.3 实验数据分析

不同波长下偏振超表面对不同角度的偏振光的调制效果如图 2 所示。通过对图 2 中 4 种不同 PCM 方位角的透射率曲线进行对比分析, 可以得出以下结论: 不同的 PCM 角度对设计的线偏振器的入射偏振角 θ_{in} 的调制效果有显著影响。尤其是当 PCM 的取向角 α 为 45° 和 135° 时, 超表面线偏振器的最小透射率达到了 10^{-6} 数量级, 显示出极佳的消光性能。以图 2(b) 中 PCM 取向角 α 为 0° 的情况为例, 当光源的偏振角度分别为 0° 和 90° 时, 线偏振器的透射率分别达到了最大值和最小值, 这表明其类似于水平线偏振器的功能。这一结果与之前的理论预测高度一致。

此外, 还注意到, 在约 891 nm 的波长范围内, 随着光源偏振角的变化, 透射率的对比度显著提高。因此, 在接

光源设置: 入射光源的方向相对于 PCM 的长轴被定义为 P 光 (光源偏振方向 // PCM 长轴, 透过率最大) 和 S 光 (光源偏振方向 $\perp$ PCM 长轴, 透过率最小)。

该设置旨在系统地研究不同条件下超表面的光学性能, 以验证设计的有效性。

2.2 实验方法

超表面设计与构建: 使用 FDTD 方法模拟全介电双原子超表面的光学响应。GaAs 和 Sb₂Se₃ 的材料特性用于建立模型。根据不同 PCM 角度 (0°, 45°, 90°, 135°), 设计了 4 种不同的波片结构。

光学测试: 在模拟中引入了光源的偏振角度, 分析不同波长下超表面的透射率。特别关注 891 nm 的波长范围, 对光源的偏振角进行变化, 评估透射率与 PCM 角度的关系。

相变材料引入: 在 GaAs 减半后上设计 250 nm 厚的 Sb₂Se₃, 模拟相变前后的光学性能变化。研究相变 (200°C) 前后的透射率和消光比的变化, 并观察工作波长变化。双原子相变超表面如图 1 所示。

下来的研究中, 将优先选择这一波长作为入射光源, 进一步优化设计出更高性能的线偏振器。根据先前的理论分析, PSM 的半径不仅对超表面线偏振器的偏振性能产生调控作用, 还显著影响超表面的相位变化。在接下来的实验中, 基于之前的实验参数, 选择 PCM 取向角为 45° 和 135° 的情况, 深入研究在 891 nm 波长下, PSM 半径对超表面性能的具体影响。

如图 3(a)、(b) 所示, 观察到随着 PSM 半径的增加, 线偏振器的功能发生了反转。例如, 一个原本为 45° 的线偏振器随着 PSM 半径的增大逐渐变为 135° 的线偏振器。图 3(b) 显示了类似的结果。这与之前的理论推导结果一致。

重点分析不同 PSM 半径下的透射率曲线, 如图 4(a) 和 (b) 所示, 展示了 PCM 取向角为 45° 和 135° 时

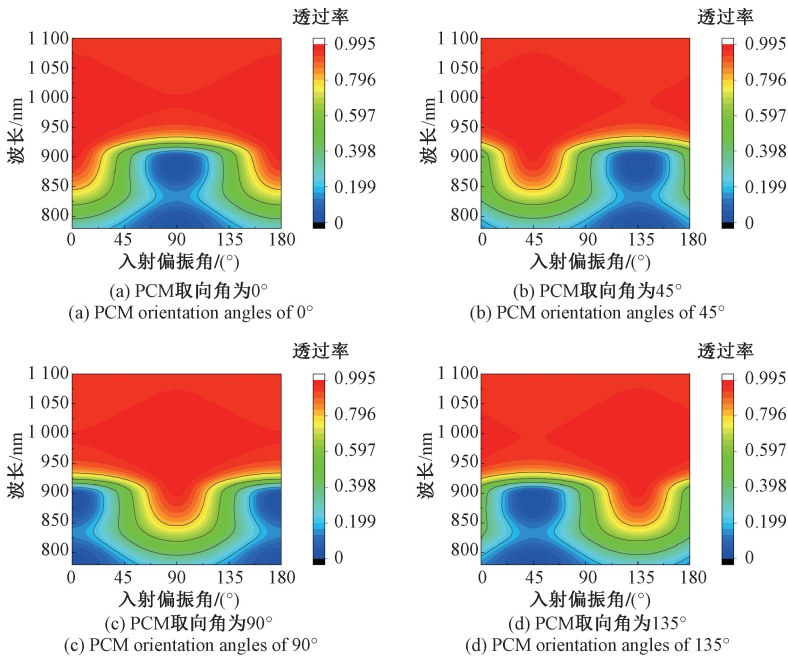


图 2 不同波长下,不同 PCM 取向角下与光源偏振角对超表面透射率的影响

Fig. 2 Effect of the source polarization angle on the metasurface transmittance at different wavelengths and PCM orientation angles

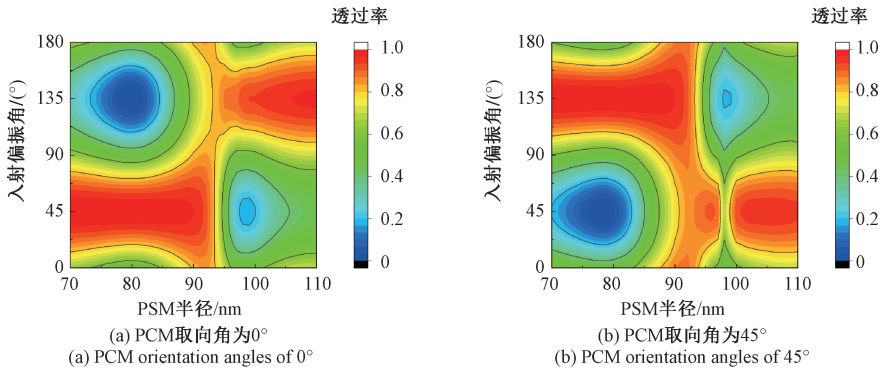


图 3 不同 PCM 取向角透射率随光源偏振角度和 PSM 半径变化

Fig. 3 Transmittance variation with source polarization angle and PSM radius for different PCM orientation angles

不同 PSM 半径下透射率随入射偏振角的变化情况;图 4(c)和(d)则呈现了超表面线偏振器透过率和消光比随 PSM 半径变化的函数关系图,消光比由 $ER = 10 \times \lg(\max/\min)$ 计算得出,整体曲线规律符合马吕斯定律 ($I = I(0) \cos^2 \theta$)。根据图示,当 PCM 取向角为 45° 时,PSM 半径为 80 nm 时,最大透过率达到 99.625%,消光比为 32.8 dB;当 PCM 取向角为 135° 时,PSM 半径为 78 nm,最大透过率为 99.627%,消光比为 30.3 dB。当 PCM 取向角为 45° (135°) 时,PSM 半径大于 94 nm (93 nm) 时,超表面线偏振器的性能较差。特别是当 PSM 半径超过这些值时,取得最小透过率的入射偏振角出现了与 PSM 半径低于这些值时相反的变化,导致消光比变为负数。这一现象为本文提供了设计可调谐

偏振片的思路 and 可能性。

从上述研究中可以看出,通过简单调整超表面的特征尺寸,可以实现对偏振超表面传输相位的调制。然而,在实际应用中,需要具备动态调控功能的设备,以便能够根据环境变化和用户需求实时调整其操作参数,从而提高效率和适应性。为了解决波片结构一旦固定后其工作模式被限制的问题,在仿真中引入了相变材料。在 PCM 为 45° 的 GaAs 偏振片的基础上,为了保持器件的整体偏振性能,将 GaAs 的材料厚度减半,并在 GaAs 的顶部镀上一层 250 nm 厚的相变材料 Sb_2Se_3 ,相变材料的折射率和消光系数如图 5 所示。在此基础上,研究了 PCM 取向角为 45° 和 135° 相变前后 (200 $^\circ\text{C}$ 相变) 偏振片的功能变化,如图 6 所示。

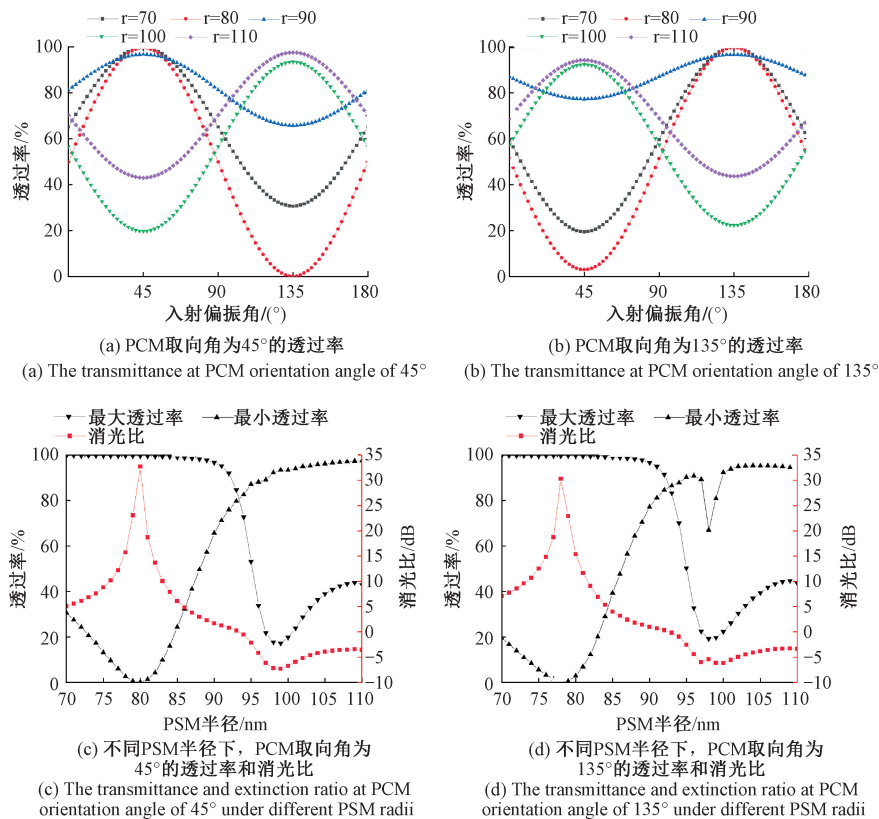


图 4 不同 PCM 取向角下,不同 PSM 半径下,透射率随入射偏振角变化

Fig. 4 Transmission as a function of incident polarization angle for different PCM orientation angles and various PSM radii

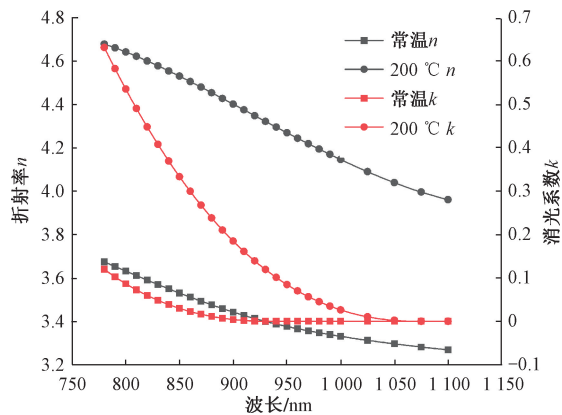


图 5 相变前后 Sb₂Se₃ 的折射率和消光系数。

Fig. 5 The refractive index and extinction coefficient of Sb₂Se₃ before and after the phase transition.

从图 6 中可以看出,引入相变材料的超表面偏振片在偏振调制效果上没有显著下降,但值得注意的是,工作中心波长从 850 nm 红移至约 1 000 nm。这种红移现象反映了相变材料对光学路径长度和谐振条件的影响。从图 5 中可以看出相变后 Sb₂Se₃ 的折射率实部 n 显著增大,Sb₂Se₃ 在相变后具有更高的折射率,使光在材料中的

传播速度减慢,从而增加了光的光学路径长度,导致谐振波长向长波方向偏移。此外温度的变化对材料的性能也有影响,过改变温度引起红移现象主要与材料的能带结构、晶格常数的变化有关。当温度升高时,晶体材料中的原子振动加剧,导致晶格常数增大,带隙变小。这种能带间隙的缩小会使电子跃迁时所需的能量减少,从而导致光谱或发射光谱向较长波长方向移动。尽管工作波长发生了红移,但这一现象未显著影响偏振片的整体调制效果,表明器件在相变前后的偏振功能转换具有良好的稳定性。

Sb₂Se₃ 相变前后,PCM 取向角为 45° 和 135° 不同入射偏振角下不同波长偏振超表面的透射率和消光比如图 7 所示。以 PCM 为 45° 为例可以看出在相变前,偏振片在 886 nm 处仍然表现出优异的性能,最大透过率达到 96.5%,最小透过率为 0.238%,消光比为 26.1 dB。而在相变后,偏振片在 993 nm 处的最大透过率为 94.8%,最小透过率为 2.11%,消光比为 16.5 dB。此外,值得注意的是,相变后在 928 nm 处,偏振片的最大透过率达到 53.4%,最小透过率仅为 0.003 09%,消光比高达 42.4 dB。在此处最大透过率的减小可以用消光系数解释,消光系数表示材料对光的吸收和散射能力,数值越

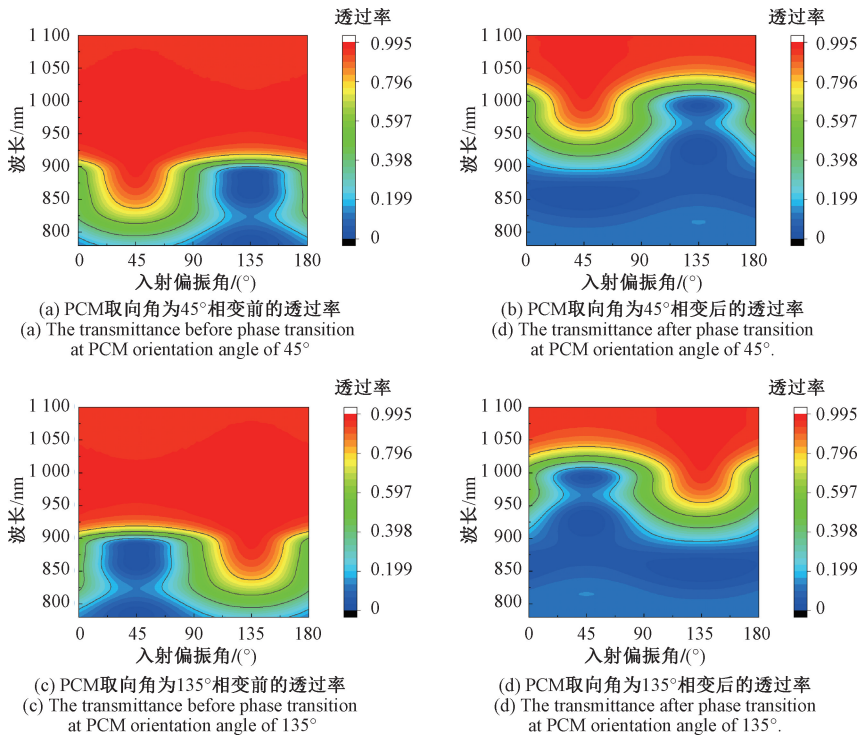


图6 不同入射偏振角下,不同 PCM 取向角下, Sb_2Se_3 相变前和相变后偏振超表面对不同波长下的响应

Fig. 6 The response of the polarization metasurface to different wavelengths before and after the phase transition of Sb_2Se_3 , under various PCM orientation angles and incident polarization angles

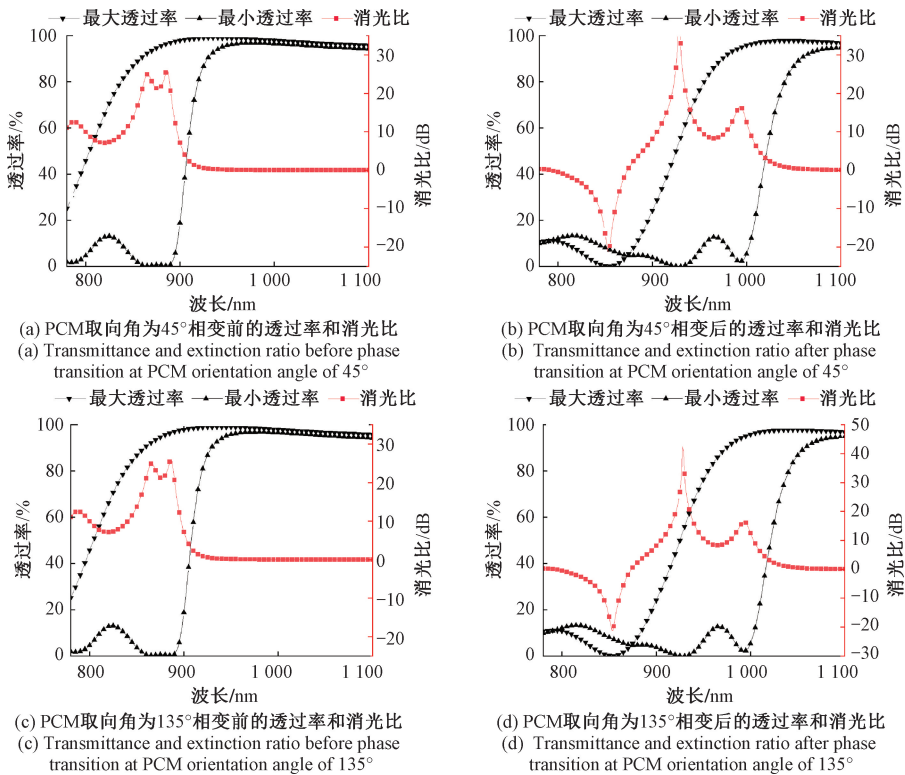


图7 不同 PCM 取向角下,不同入射偏振角下, Sb_2Se_3 相变前后不同波长偏振超表面的透射率和消光比

Fig. 7 Transmittance and extinction ratio of the polarization metasurface at different wavelengths before and after the phase transition of Sb_2Se_3 , under various PCM orientation angles and incident polarization angles

大,材料吸收或散射的光能越多。消光系数主要与材料的复数折射率有关,定义为材料吸收光能的程度。当光通过材料时,光强会随着传播距离的增加而逐渐减弱。从图 5 可以看出工作波长大于 993 nm 时,相变前后的消光系数趋于一致。因此在此工作波长下偏振片的光学损耗差异不明显,导致最大透过率趋于一致。而小于 993 nm 工作波长时,相变后消光系数显著增大这导致偏振片的透过率逐渐减小,这也是最大透过率和最小透过率从 993 nm 时的 90% 以上的透过率减小到 50% 附近的原因,而相应地最小透过率从 0.238% 减小到 0.003 09%。这种最小透过率的倍数式减小,导致消光比显著地增大。这表明,在 GaAs 基础上引入相变材料在某些工作波长下降低了透过率,但也相应的显著地增大了消光比。然而这种相变偏振超表面的分析也不能仅仅地简单的分析消光系数而得出精确的结论。这种折射率、消光系数、偏振效应、半导体材料与相变材料温度变化之间的协同作用机制好像并没有更深入的研究。这也是后期可以开展的重点研究。

基于上述研究成果,采用相变材料与超表面偏振片的结合,为未来动态调控偏振光的光学器件设计提供了全新的解决思路。这种设计不仅在理论上实现了高效的偏振光调控,并且由于相变材料具有快速响应的特性,通过对相变材料的精确控制,可以实现对偏振态的动态切换。如实验中图 7 所示,在波长 867 nm 附近,45°偏振光在相变前后实现了最大透过率与最小透过率的动态切换,并且消光比从正变为了负数。而在 1 000 nm 附近,135°偏振光表现出类似的效果。通过这种设计,能够实现 1 位的相位控制(状态“0”和“1”分别对应最大和最小透过率),这种具备 1 位相位偏振调制能力的超表面有望用于实现操控偏振光的数字编码超表面。此外,本实验方法有望解决基于电和磁 Mie 型共振的介电纳米结构表面构建的超表面器件普遍存在的工作带宽窄的问题^[23]。通过引入相变材料,无需改变器件的复杂结构,在不改变原有器件结构的基础上即可有效扩展其工作波长^[24-25]。未来的研究还可以进一步探索如何优化相变材料与超表面结构的相互作用、不同相变材料对超表面性能的影响和不同的相变调控方式(电场、温度、光学刺激),实现更大自由度的偏振调控功能^[26-28]。

3 结 论

对基于 GaAs/Sb₂Se₃ 的可调谐相变偏振超表面进行了研究,探讨了不同 GaAs 材料构型下的偏振性能,并设计了一种在近红外波段工作的线性偏振片,其最大透过率达到 99.625%,消光比为 32.8 dB。通过结合 GaAs 的高折射率和 Sb₂Se₃ 的相变特性,实现了一种具有高效偏

振调制能力的介电超表面结构。结果表明,该超表面能够在保持最大透过率 94.8%,最小透过率为 2.11%,消光比为 16.5 dB 的条件下使得器件工作波长实现 150 nm 的红移,并且相变后在 928 nm 处,偏振片的最大透过率达到 53.4%,最小透过率仅为 0.003 09%,消光比高达 42.4 dB。证明了利用 Sb₂Se₃ 的相变状态,可以对不同波段的偏振态进行精准控制。这种超表面在近红外偏振探测、调节器件工作波长和数字编码超表面等领域展现了广泛的应用潜力。未来的研究将重点放在进一步优化材料结构、探索不同的相变调控方式,并探索其在其他光电领域中的应用前景。

参考文献

- [1] ZHELUDEV N I, KIVSHAR Y S. From metamaterials to metadevices[J]. *Nature materials*, 2012, 11(11): 917-924.
- [2] LIU Y M, ZHANG X. Metamaterials: A new frontier of science and technology[J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40(5): 2494-2507.
- [3] HU J, BANDYOPADHYAY S, LIU Y H, et al. A review on metasurface: From principle to smart metadevices[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 8: 586087.
- [4] 吕鑫,王道档,阮旸,等. 用于瞬态微观轮廓检测的 Mirau 偏振干涉显微镜[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(2): 92-99.
LYU X, WANG D D, RUAN Y, et al. Polarization Mirau interference microscope for transient microscopic testing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(2): 92-99.
- [5] 管今哥,马森. 基于插值处理的散射介质中偏振成像实验研究[J]. *国外电子测量技术*, 2024, 43(4): 117-123.
GUAN J G, MA M. Experimental investigation on polarization imaging in scattering media based on interpolation[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2024, 43(4): 117-123.
- [6] 杨长虎,袁东,张健,等. 基于偏振特征与强度信息融合的工件目标检测[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(24): 188-196.
YANG CH H, YUAN D, ZHANG J, et al. Workpiece target detection based on fusion of polarization features and intensity information[J]. *Electronic measurement Technology*, 2023, 46(24): 188-196.
- [7] 董祉宇,杨澍,郭仁杰,等. 空间调制型偏振成像的滤波器带宽优化方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(8): 207-217.
DONG ZH X, YANG SH, GUO R J, et al. Optimization

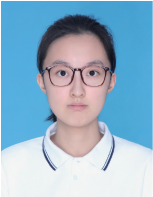
- of optimal filter bandwidth for spatially modulated full polarization imaging [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(8): 207-217.
- [8] 陈广秋, 尹文卿, 温奇璋, 等. 基于双重注意力机制生成对抗网络的偏振图像融合[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(4): 140-150.
- CHENG G Q, YIN W Q, WEN Q ZH, et al. Polarization image fusion based on dual attention mechanism for generating adversarial networks[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(4): 140-150.
- [9] 徐新龙, 史明坚, 黄媛媛, 等. 基于超材料的太赫兹波辐射特性与增强研究[J]. *光学仪器*, 2024, 46(3): 1-8, 17.
- XU X L, SHI M J, HUANG Y Y, et al. Terahertz wave radiation characteristics and enhancement based on metamaterials[J]. *Optical Instruments*, 2024, 46(3): 1-8, 17.
- [10] 朱阳, 臧小飞. 长焦深与偏振可控的太赫兹超构表面透镜[J]. *光学仪器*, 2022, 44(6): 23-28, 35.
- ZHU Y, ZANG X F. Terahertz metalens with extended focal depth and polarization controllable [J]. *Optical Instruments*, 2022, 44(6): 23-28, 35.
- [11] DADKHAHFARD S. Circular to circular wide-band polarization conversion using GaAs layer [J]. *Optik*, 2021, 232: 166487.
- [12] GAO S, ZHOU CH Y, YUE W J, et al. Efficient all-dielectric diatomic metasurface for linear polarization generation and 1-bit phase control [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(12): 14497-14506.
- [13] CHENG Y, DONG Y D. A high-efficiency electrically reconfigurable circular polarizer and its array application[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(12): 2314-2318.
- [14] MENG F T, CHU J K, HAN ZH T, et al. The design of the sub-wavelength wire-grid polarizer [C]. 7th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE NANO), 2007: 946-950.
- [15] RUIZ J L P, NABKI F, MENARD M. Silicon nitride TM-pass polarizer using inverse design [J]. *Optics Express*, 2023, 31(23): 37892-37899.
- [16] DUTILY, ROUSSE D R, SALAH N B, et al. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 112-130.
- [17] SHARMA A, TYAGI V V, CHEN C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(2): 318-345.
- [18] ZHANG D Q, SHU F ZH, JIAO ZH W, et al. Tunable wave plates based on phase-change metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7494-7503.
- [19] BOLZAN M A. Characterization of the effects of thickness and composition in current induced phase change in Sb₂Se₃ and Sb₂S₃[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2024.
- [20] ANANDAN R, XAVIER T P, PIRAVIPERUMAL M. Selenization-induced [001]-oriented Sb₂Se₃ film formation and its photo-sensing characteristics [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2024, 322: 129571.
- [21] SHI L D, LU L D, CHEN G, et al. GaAs linear polarizer with a high extinction ratio for extended short-wave infrared detection [C]. *Photonics*, 2023, 10(5): 489.
- [22] SHI L D, LU L D, CHEN W Q, et al. Si-based polarizer and 1-Bit phase-controlled non-polarizing beam splitter-based integrated metasurface for extended shortwave infrared[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(18): 2592.
- [23] KRUK S, HOPKINS B, KRAVCHENKO I I, et al. Invited article: Broadband highly efficient dielectric metadevices for polarization control[J]. *Apl Photonics*, 2016, 1(3): 4949007.
- [24] 张磊, 陈晓晴, 郑熠宁, 等. 电磁超表面与信息超表面[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(6): 817-828.
- ZHANG L, CHENG X Q, ZHENG Y N, et al. Electromagnetic metasurfaces and information metasurfaces [J]. *Chinese journal of radio science*, 2021, 36(6): 817-828.
- [25] 唐小燕, 柯友煌, 井绪峰, 等. 基于透射型几何相位编码超表面的太赫兹波束自由操控[J]. *光子学报*, 2021, 50(1): 150-163.
- TANG X Y, KE Y H, JING X F, et al. Free manipulation of terahertz wave based on the transmission type geometric phase coding metasurface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(1): 150-163.
- [26] SAUTTER J, STAUDE I, DECKER M, et al. Active tuning of all-dielectric metasurfaces [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4308-4315.
- [27] 蒋卫祥, 田翰闰, 宋超, 等. 数字编码超表面: 迈向电磁功能的可编程与智能调控[J]. *雷达学报*, 2022, 11(6): 1003-1019.
- JIANG W X, TIAN H W, SONG CH, et al. Digital coding metasurfaces: Toward programmable and smart manipulations of electromagnetic functions[J]. *Journal of*

Radars, 2022, 11(6): 1003-1019.

[28] 胡孟霞, 王志强, 李向平, 等. 超表面偏振信息编码[J]. 中国激光, 2023, 50(18): 148-164.

HU M X, WANG ZH Q, LI X P, et al. Metasurface polarization information encoding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(18): 148-164.

作者简介



邓思珩,北京信息科技大学本科在读,主要研究方向为偏振光学超表面、多光谱红外超表面。

E-mail:1626509890@qq.com

Deng Siheng is currently an undergraduate at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include polarization optical metasurfaces and multispectral infrared metasurfaces.



石磊东,2017 年于蚌埠学院获得学士学位,现为北京信息科技大学在读博士研究生,主要研究方向为二类超晶格红外探测器、偏振光学超表面、多光谱红外超表面。

E-mail:sld1799@163.com

Shi Leidong received his B.Sc. degree from Bengbu University in 2017. He is currently a Ph.D. candidate at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include type-II superlattice infrared detectors, polarization optical metasurfaces, and multispectral infrared metasurfaces.



陈洋,2019 年于商丘学院获得学士学位,2022 年于山西大同大学获得硕士学位,现为北京信息科技大学在读博士生,主要研究方向为超表面微纳光学。

E-mail:cycsy0306@qq.com

Chen Yang received his B.Sc. degree from Shangqiu University in 2019, and received his M.Sc. degree from Shanxi Datong University in 2022. He is currently a Ph.D. candidate at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include metasurface micro-nano optics and multispectral infrared metasurfaces.



祝连庆,1989 年于合肥工业大学获得硕士学位,2013 于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为北京信息科技大学教授和博士生导师,主要研究方向为光纤传感技术和光学测量。

E-mail:zhulianqing@sina.com

Zhu Lianqing received his M.Sc. degree from Hefei University of Technology in 1989, and received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber optic sensing technology and optical measurement.



鹿利单(通信作者),2017 年于北京信息科技大学获得硕士学位,2021 年于天津大学获得博士学位,现为北京信息科技大学副教授,主要研究方向为红外探测器、光子芯片。

E-mail:lldan_dido@bistu.edu.cn

Lu Lidan (Corresponding author) received her M.Sc. degree from Beijing Information Science and Technology in 2017, and received her Ph.D. degree from Tianjin University in 2021. She is currently an associate professor at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include infrared detectors and photonic chips.