

基于相变材料 GST 与孔径共享 宽带宽消色差透镜的设计

吕淑媛, 孟飞, 罗文峰, 白雨池, 王荣

(西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:提出了在超构透镜结构上采用孔径共享协同操作的方法,根据散单元输出相位与频率呈线性关系,再结合调控相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 晶化率 m 值,在设定的波段内合理选择散射单元的尺寸,不同波长入射光经过超表面后能产生符合统一焦距要求的相位分布,从而使消色差超透镜的带宽得到相应拓宽,设计了 $9.5\sim 13\ \mu\text{m}$ 连续波段内的偏振不敏感消色差超表面透镜。仿真结果表明,消色差超表面在工作波段内的焦距变化为 $3.57\ \mu\text{m}$,与设定焦距的误差约为 4.3% ,并且各波长入射下的焦点半峰全宽均达到了衍射极限,聚焦效率超过 60% 。提出的消色差超表面透镜,为消色差超表面的设计提供了新的思路,促进了相变材料在宽带消色差超表面方面的研究。

关 键 词:消色差超构透镜;相变材料;晶化率;孔径共享

中图分类号:TN256

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2023)06-1229-06

光学超表面作为一种人工制造的亚波长二维材料开始出现在人们的视野当中。因其体积微小、易集成、损耗低等优越性引起了众多科学学者的广泛关注。通过调节超表面亚波长散射单元的结构尺寸、旋转角度或者散射单元在超表面的空间排列形式,可以灵活有效调控超表面电磁波的偏振、振幅、相位、极化方式及传播模式^[1-5]等特性,这些特性使研究人员能够设计出透射型和反射型超表面器件。目前报道的超表面器件包括涡旋光束发生器^[6-8]、超构透镜^[9-11]、全息图像^[12-13]、光束偏折器^[14-15]等。虽然超表面具有广泛的应用前景,但是由于超表面结构共振相位不同,并且不同波长下超表面所表现出的折射率不同等因素,导致超构透镜具有色散现象,同时基于此的光学器件成像质量下降。科学界对解决超构透镜中出现的色散现象不论是在材料选取上还是超表面谐振单元排列方式上都做了大量的实验,但是对于设计实现宽带宽的消色差超构透镜仍然存在诸多挑战。

为了解决色差问题,2018 年,Sajan 团队^[16]为了能在一个宽波段范围内设计实现单焦点消色差,采

用 TiO_2 散射单元构建了一个由 3 组纳米柱散射单元组成的超表面,通过提供不同的相位色散,在近红外连续波段内设计实现消色差超构透镜。该团队使用了一个相位色散超结构,证明了这一拓宽消色差超构透镜带宽方法的可行性。这一创新型方法已实现了在连续域和宽带宽的紧凑成像系统中的色差校正。2020 年,郭忠义课题组^[17]提出一种新的基于相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST),通过调控 GST 晶化率 m 值来进行色差补偿的方案。通过改变 GST 纳米单元的晶化率 m 调节 GST 单元折射率,目的是给超表面谐振单元阵列提供一个新的相位自由度。设计了消色差超构透镜和消色差偏折器,在连续工作波段 $8\sim 11\ \mu\text{m}$ 内,消色差超构透镜焦距稳定在 $36\ \mu\text{m}$,消色差偏折器角度稳定在 19° 。2022 年,Sun 等^[18]提出了一种孔径共享协同操作的方法来设计一种由 2 个同心透镜组成的高效宽带消色差超构透镜,工作波段在 $450\sim 1\ 400\ \text{nm}$ 的可见光和近红外范围,在 $600\sim 1\ 400\ \text{nm}$ 的波长范围内聚焦效率超过 70% 。本文在结构上将孔径共享协同操作的方法与相位随频率变化的斜率 γ 作为补偿相位的方法相结合,设

收稿日期:2023-01-09

作者简介:吕淑媛(1976—),西安邮电大学副教授,主要从事微纳光子器件研究。e-mail:1159955131@qq.com

计了一种由 2 个不同焦距的同心超构透镜组成的高效宽带消色差超构透镜,这 2 种相位分布结合形成目标超构透镜的波前,最后通过调节相变材料 GST 晶化率 m 缩小消色差超构透镜在工作波段内焦距误差。仿真结果表明目标超构透镜焦距 $F=85\text{ }\mu\text{m}$ 、直径 $D=227.7\text{ }\mu\text{m}$,数值孔径 $b_{\text{NA}}=0.801\text{ }3$,聚焦效率超过 60%。

1 基本结构单元和设计原理

1.1 基本结构单元

相变材料 GST 在晶态和非晶态具有不同的光学性质,通过改变相变材料 GST 的晶化率 m 来改变相变材料 GST 的折射率,折射率变化范围在 4.27~6.3 之间。本文通过相变材料 GST 设计了透射式的消色差超构透镜,工作波段是 9.5~13 μm ,超表面结构单元如图 1 所示,由空心圆柱和实心圆柱 2 类组成。图 1a)是基本散射单元结构侧视图。顶部散射单元是具有高折射率、低损耗、对光激励反应快等优点的相变材料 GST,折射率范围是 4.27~6.3。衬底是具有低折射率、低损耗的 CaF_2 材料,折射率为 1.34。这种高折射率的单元结构与周围环境之间形成的强烈对比是为了提高对入射光的操控。图 1a)中 P 是单元周期,在本文中周期 P 满足奈奎斯特抽样定律 $P < \frac{\lambda}{2b_{\text{NA}}}$,其中 λ 是波长, b_{NA} 是数值孔径。本文将结构单元周期 P 设置为 2.3 μm 。图 1b)是基本单元的俯视图。图 1c)是孔径共享超表面结构侧视图,超表面设计分成 2 个区域,内环 Z_1 ,外环 Z_2 。其中内环 Z_1 和外环 Z_2 的散射单元分别按照不同焦距超构透镜要求的相位进行选取。

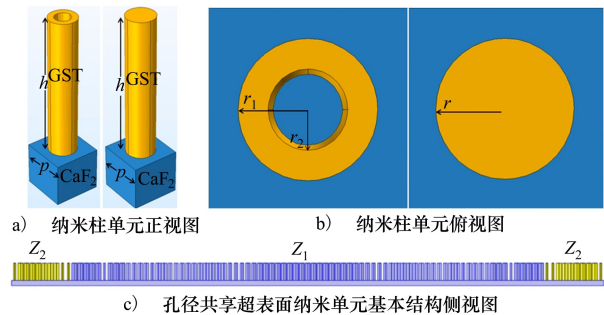


图 1 基本单元结构

1.2 理论与方法

本文使用相变材料 GST 作为散射单元结构,在 9.5~13 μm 连续波段内设计了消色差超表面透镜。由于保持相同焦距的各波长的相位分布是完全独立的,所以每个相变材料 GST 纳米柱应提供与波长一一对应的相位响应,因此通过改变纳米柱的几何参数来单独设计散射单元。为了将入射平面波的光聚焦到同一焦平面,设计的消色差超构透镜可以分为两部分。第一部分是基本相位分布,由最小波长相位分布得到,只与位置有关。第二部分与波长有关,称为补偿相位,相位补偿是由散射单元提供的相位差随波长变化的函数。

$$\phi(r,f)=-\frac{2\pi f}{c}(\sqrt{r^2+F^2}-F) \tag{1}$$

式中, $r=\sqrt{(x\pm d)^2+y^2}$ 是超构透镜上任意位置 (x,y) 到中心(假定超构透镜位于 $z=0$ 的平面)的距离, λ 是入射波长, F 是焦距, $2d$ 是 2 个焦点沿 x 轴的距离, f 是频率($f=c/\lambda$)。然而对于消色差超构透镜,焦距 F 需要在工作波段内保持恒定。将 $\lambda_{\text{max}}=\frac{c}{f_{\text{min}}}$, $\lambda_{\text{min}}=\frac{c}{f_{\text{max}}}$ 分别引入(1)式,得到一个宽带消色差透镜相位分布的表达式

$$\frac{2\pi}{c}(\sqrt{r^2+F^2}-F)=\frac{\phi(r,f_{\text{min}},F)-\phi(r,f_{\text{max}},F)}{f_{\text{min}}-f_{\text{max}}} \tag{2}$$

$$\phi(r,f,F)=\frac{\phi(r,f_{\text{min}},F)-\phi(r,f_{\text{max}},F)}{f_{\text{min}}-f_{\text{max}}}\cdot f \tag{3}$$

根据(2)~(3)式,可以直观地看出相位分布和频率 f 呈线性关系。另外,简化(3)式后得到

$$\phi(r,f,F)=\gamma\cdot f \tag{4}$$

$$\gamma=\frac{\phi(r,f_{\text{min}},F)-\phi(r,f_{\text{max}},F)}{f_{\text{min}}-f_{\text{max}}} \tag{5}$$

(4)~(5)式揭示了消色差超构透镜的相位分布对频率 f 的线性依赖。一般来说,其他波长的色差采用相位随频率变化的斜率 γ 补偿。然而,由于材料固有的色散特性,单元天线的相位相对于波长来说通常是非线性的,本文为了方便在仿真实验中选取散射单元,对散射单元的实际相位引入了一个相移,使相位轮廓整体平移一个常量 g ,得到(6)式。

$$\phi(r,f,F)=-\frac{2\pi f}{c}(\sqrt{r^2+F^2}-F)+g \tag{6}$$

本文提出了一种孔径共享协同操作的方法,如

图 2 所示。超构透镜由 2 个孔径共享的子超构透镜组成,黑色实线是同心圆内环 Z_1 部分(焦距 F_2) 对应的相位分布,蓝色虚线是同心圆外环 Z_2 部分(焦距 F_3) 对应的相位分布,焦距 F_2 和焦距 F_3 之间的橙色实线是对应的整体相位轮廓(焦距 F_1)。这 2 个区域分别产生的相位位移组合形成相位补偿使得整体焦距在所设定的带宽范围内几乎保持不变,这就是孔径共享协同操作消色差理论。

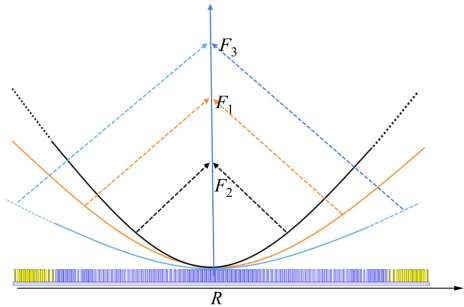


图 2 孔径共享宽带消色差相位分布示意图

基于上述方法,本文主要设计了 2 种消色差超构透镜。第一种在超表面结构上采用共享孔径协同操作的方法,在相位补偿上采用所选散射单元斜率 γ 沿 x 轴正方向上递增排列,用斜率 γ 作为补偿相位相结合的方法设计了工作波段在 $9.5 \sim 13 \mu\text{m}$ 的消色差超构透镜。第二种消色差超构透镜是在第一种方法的基础之上通过调节相变材料 GST 的晶化率 m 改善第一种消色差透镜工作波段内焦距不稳定现象。

2 基于孔径共享结构的消色差超构透镜的设计与仿真

2.1 孔径共享与斜率相结合消色差超构透镜仿真分析

首先以最小波长 $9.5 \mu\text{m}$ 为基准,通过 comsol 参数化扫描最小波长下相位分布,依照理论公式得出的相位选取符合最小波长条件下散射单元。其次对这些散射单元用 comsol 重新进行波长参数化扫描,波长扫描范围是 $9.5 \sim 13 \mu\text{m}$,通过扫描得到工作波段范围内对应波长下的散射单元相位,找到符合斜率递增关系的散射单元,这一组散射单元要同时满足以上 2 个条件。分别设计了一个焦距 $F_1 = 80 \mu\text{m}$ 的超构透镜与一个焦距 $F_2 = 100 \mu\text{m}$ 的超构透镜,且 2 个超构透镜工作波长均为 $9.5 \mu\text{m}$,同时

选取超构透镜 F_1 的 79 个天线作为设计的孔径共享协同操作的超构透镜内环组成部分,选取超构透镜 F_2 的 20 个天线作为超构透镜的外环组成部分,新的超构透镜焦距为 $85 \mu\text{m}$ 。图 3 为仅通过孔径共享协同操作方法设计出的超构透镜的 x 线偏振光(XLP)入射时 x - z 平面电场强度分布示意图。图 3 焦点存在非常明显的色散现象,焦点随着波长的增大而逐渐降低并且伴生焦点越来越多。

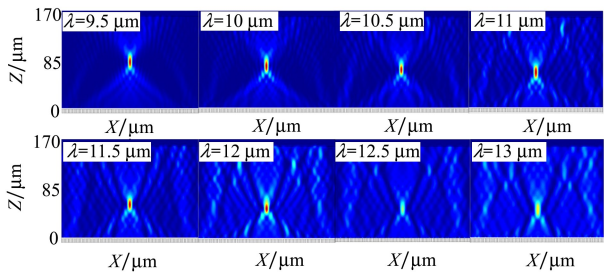


图 3 有色差超构透镜的 x - z 平面电场强度分布情况

将上述斜率 γ 作为补偿相位,在工作波段 $9.5 \sim 13 \mu\text{m}$ 内,以最小波长 $9.5 \mu\text{m}$ 为基准,分别找出内环 Z_1 和外环 Z_2 能满足最小波长与最大波长相位差的散射单元,设计出消色差超构透镜系统。通过仿真计算,结果如图 4 所示。

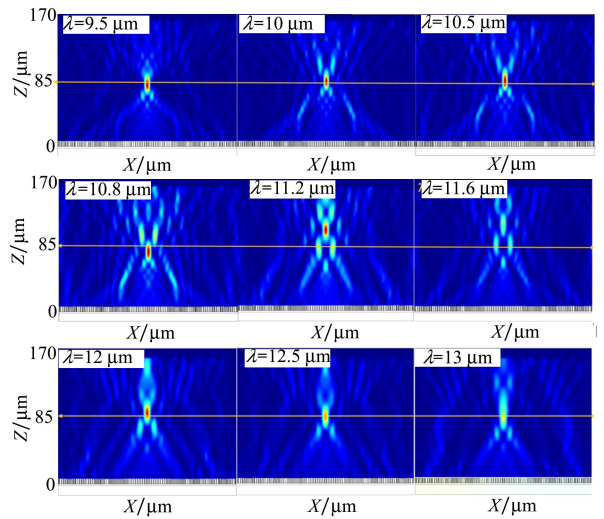


图 4 孔径共享消色差超构透镜的 x - z 平面电场强度分布情况

图 4 中黄色实线为 $85 \mu\text{m}$ 处的焦距基准线,在 $9.5 \sim 10.5 \mu\text{m}$ 和 $12 \sim 13 \mu\text{m}$ 波段范围内焦距在设定值 $85 \mu\text{m}$ 处几乎不变,而 $10.8 \sim 11.6 \mu\text{m}$ 波段范围内焦点产生较大波动并出现大量伴生焦点,严重影

响了所设计的消色差超构透镜成像性能。这是由于在寻找纳米天线时存在一定误差或者受到相邻散射单元之间耦合现象的影响,造成工作波段 9.5 ~ 13 μm 内出现小波段 10 ~ 12.5 μm 范围内焦距不稳定现象。

2.2 调节晶化率改善消色差超构透镜仿真分析

为了实现对上节所设计的孔径共享协同操作消色差透镜的优化,本节针对色差补偿引入了一种基于相变材料的色差补偿方案,通过调控相变材料 GST 的晶化率 m 值,改善孔径共享消色差超构透镜在工作波段内焦距误差较大的问题。相变材料 GST 在不同晶化率下的介电常数可以通过有效介质理论计算得到,采用 Lorentz-Lorenz 表达式定义相变材料的晶化率为

$$\frac{\varepsilon_{\text{eff}}(\lambda) - 1}{\varepsilon_{\text{eff}}(\lambda) + 2} = m \frac{\varepsilon_{\text{cGST}}(\lambda) - 1}{\varepsilon_{\text{cGST}}(\lambda) + 2} + (1 - m) \frac{\varepsilon_{\text{aGST}}(\lambda) - 1}{\varepsilon_{\text{aGST}}(\lambda) + 2} \quad (7)$$

式中, $\varepsilon_{\text{aGST}}$ 和 $\varepsilon_{\text{cGST}}$ 分别是晶体和非晶体 GST 频率相关的介电常数,由相关实验数据得到。 m 为晶化率,其取值范围为 0 ~ 1,当 $m = 0$ 时,处于晶态,当 $m = 1$,则处于非晶态^[19]。本文通过改变相变材料 GST 结晶分数 m 值来改变相变材料 GST 折射率,以此获得新的相位自由度,可以使焦点于工作波段聚焦在同一位置。这种通过简单调整相变材料晶化率作为消色差补偿相位的方法将对消色差超表面透镜的研究进展产生一定的影响。

通过仿真计算,当 X 线偏振光 XLP 入射时 x - z 平面电场强度分布如图 5 所示。焦距在工作波段 9.5 ~ 13 μm 内保持稳定,图中黄色实线为 85 μm 处的基准线,可以看出焦距在 85 μm 几乎保持不变,说明了所设计的消色差超构透镜的可行性,通过调节相变材料晶化率 m 抑制 10.8 ~ 11.6 μm 波段内消色差超构透镜焦距不稳定现象,设计了 9.5 ~ 13 μm 连续宽波段内消色差超构透镜,结果符合设计预期。

如图 6a) 所示,在工作波段内定量地描述了焦距的变化,消色差透镜的焦距变化为 3.57 μm (与设定焦距的误差约为 4.3%)。为了进一步分析设计的孔径共享消色差透镜的聚焦性能,通过仿真计算了 9.5, 10, 10.5, 10.8, 11.2, 11.6, 12, 12.5, 13 μm 波长下的半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 和聚焦效率,FWHM 分别是 11.02, 11.43, 11.21, 12.03, 12.96, 13.26, 13.96, 14.32, 15.28 μm。设计的

消色差超构透镜的 FWHM 在工作波段内均接近衍射极限。聚焦效率等于以焦点为中心 3 倍的 FWHM 区域内的能量除以总入射能量的比值。如图 6b) 所示,仿真得到的不同波长下聚焦效率分别是 62.6%, 63.5%, 66.2%, 65.3%, 63.8%, 64.3%, 61.3%, 59.1%, 58.3%, 说明了本文设计的消色差超构透镜在成像性能方面表现良好。

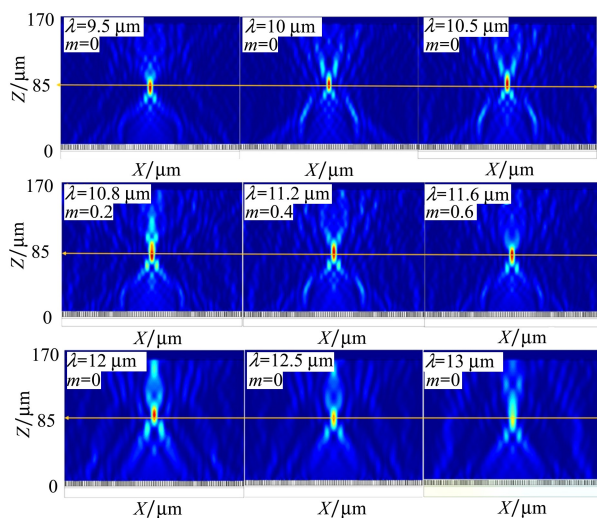


图 5 孔径共享结合调控 GST 晶化率 m 消色差超构透镜的 x - z 平面电场强度分布情况

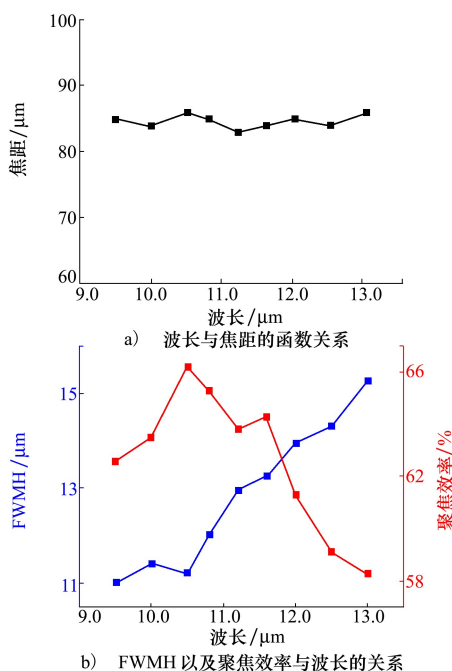


图 6 孔径共享结合调控 GST 晶化率 m 消色差超构透镜

3 结 论

本文主要提出在超表面结构上采用孔径共享协同操作的方法,同时在散射单元尺寸选择上依赖斜率 γ 作为补偿相位,设计了工作波段为 $9.5 \sim 13 \mu\text{m}$, 焦距为 $85 \mu\text{m}$ 的消色差超构透镜,仿真结果表明在两端连续波段($9.5 \sim 10.5 \mu\text{m}$ 和 $12 \sim 13 \mu\text{m}$) 消色差超构透镜焦距保持稳定,而对于中间波段 $10.8 \sim 11.6 \mu\text{m}$ 波段内出现焦距不稳定波动现象,这是由于在选择纳米天线尺寸时虽然近似地满足了最大波长

和最小波长的相位轮廓的要求,但是由于误差的存在以及纳米天线之间的耦合现象导致在中间波段焦距不稳定。为了改善 $10.8 \sim 11.6 \mu\text{m}$ 连续波段内焦距不稳定的问题,在此基础之上引入了调节相变材料 GST 晶化率 m ,为超表面相位分布提供了新的自由度,仿真结果表明在工作波段 $9.5 \sim 13 \mu\text{m}$ 内焦距基本稳定。此外,对超表面消色差透镜进行仿真计算,结果表明半高全宽 FWHM 接近衍射极限,证明了该透镜的聚焦能力较好。本文设计了宽带宽、消色差超构透镜,这种多种调控手段结合的方法为消色差超构透镜的设计提供了新的思路。

参考文献:

- [1] DING Fei, CHEN Yiting, SERGEY I B. Gap-surface plasmon metasurfaces for linear-polarization conversion, focusing, and beam splitting[J]. Photonics Research, 2020, 8(5): 707-714
- [2] ARBABI E, ARBABI A, KAMALI S M, et al. High efficiency double-wavelength dielectric metasurface lenses with dichroic bi-refractive meta-atoms[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18468-18477
- [3] ZHANG Qing, LI Maozhong, LIAO Tingdi, et al Design of beam deflector, splitters, wave plates and metalens using photonic elements with dielectric metasurface[J]. Optics Communications, 2018, 411: 93-100
- [4] CHEN Shuqi, LIU Wenwei, LI Zhancheng, et al. Metasurface-empowered optical multiplexing and multifunction[J]. Advanced Materials, 2020, 32(3): 1805912
- [5] ZHANG Yuhui, YANG Bowei, LIU Zhiying, et al. Polarization controlled dual functional reflective planar metalens in near infrared regime[J]. Coatings, 2020, 10(4): 389
- [6] NI Xingjie, WONG Zijing, MREJEN Michael, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. Science, 2015, 349(6254): 1310-1314
- [7] HUANG L, MÜHLENBERND H, LI X, et al. Broadband hybrid holographic multiplexing with geometric metasurfaces[J]. Advanced Materials, 2015, 27(41): 6444-6449
- [8] WANG L, KRUK S, TANG H, et al. Grayscale transparent metasurface holograms[J]. Optica, 2016, 3(12): 1504
- [9] YIN Xinghui, STEINLE Tobias, HUANG Lingling, et al. Beam switching and bifocal zoom lensing using active plasmonic metasurfaces[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(7): 17016
- [10] FAN Zhibin, QIU Haoyang, ZHANG Hanle, et al. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 1-10
- [11] WANG Yilin, FAN Qingbin, XU Ting. Design of high efficiency achromatic metalens with large operation bandwidth using bilayer architecture[J]. Opto-Electronic Advances, 2021, 4(1): 29-35
- [12] NDAO Abdoulaye, HSU Liyi, HA Jeongho, et al. Octave bandwidth photonic fishnet-achromatic-metalens[J/OL] (2020-06-25) [2022-12-28]. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17015-9>
- [13] LIN Li, QUAN Yuan, RUN Chen, et al. Chromatic dispersion manipulation based on metasurface devices in the mid-infrared region[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(8): 69-75
- [14] WANG Wei, ZHAO Ruikang, CHANG Shilong, et al. High-efficiency spin-related vortex metalenses[J]. Nanomaterials, 2021, 11(6): 1485
- [15] HYEONGJU C, DAEIK K, ASHWINI S, et al. Generation of e-band metasurface-based vortex beam with reduced divergence angle[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 8289-8297
- [16] SAJAN Shrestha, OVERVIG A C, LU M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 85

- [17] DING Xiya, KANG Qianlong, GUO Kai, et al. Tunable GST metasurfaces for chromatic aberration compensation in the mid-infrared[J]. *Optical Materials*, 2020, 109: 110284
- [18] SUN Peng, ZHANG Mengdie, DONG Fengliang, et al. Broadband achromatic polarization insensitive metalens over 950 nm bandwidth in the visible and near-infrared[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1):013601
- [19] KOSTIANTYN Shportko, STEPHAN Kremers, MICHAEL Woda, et al. Resonant bonding in crystalline phase-change materials[J]. *Nature Materials*, 2008, 7(8): 653-658

Design of a wide bandwidth achromatic metalens based on phase change material GST with aperture sharing

LYU Shuyuan, MENG Fei, LUO Wenfeng, BAI Yuchi, WANG Rong

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: This paper proposes the use of aperture sharing synergistic operation in the structure of the metalens, together with the rational selection of the scattering unit size according to the linear relationship between the output phase and frequency of the scattering unit, and the selection of the slope of the phase variation with frequency, combined with the modulation of the phase change material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ crystallization rate m value, in the set wavelength band, for different wavelengths of incident light through the metasurface can produce a uniform phase distribution. The method is used to achieve a polarization-insensitive achromatic metalens in the 9.5-13 μm continuous wavelength band by adjusting the m value of the phase transition material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ crystallization rate and producing a phase distribution with a uniform focal length for different wavelengths of incident light passing through the metasurface. The simulation results show that the focal length of the achromatic metasurface varies by 3.57 μm in the working band, with an error of about 4.3% from the set focal length, and the full width of the half-peak of the focal point at all wavelengths of incidence reaches the diffraction limit, and the focusing efficiency exceeds 60%. The achromatic metalens proposed in this paper provides a new idea for the design of achromatic metasurfaces and promotes the research of phase change materials in broadband achromatic metasurfaces.

Keywords: achromatic metalens; phase change materials; crystallization rate; aperture sharing

引用格式: 吕淑媛, 孟飞, 罗文峰, 等. 基于相变材料 GST 与孔径共享宽带宽消色差透镜的设计[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(6): 1229-1234

LYU Shuyuan, MENG Fei, LUO Wenfeng, et al. Design of a wide bandwidth achromatic metalens based on phase change material GST with aperture sharing[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2023, 41(6): 1229-1234 (in Chinese)