

基于相变材料的多阶折射率薄膜平板透镜

盛小航^{1,2}, 周韶东¹, 席科磊¹, 程庆庆^{1*}, 王阳^{2**}¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;²中国科学院上海光学精密机械研究所微纳光电子功能材料实验室, 上海 201800

摘要 相变材料具备良好的光热稳定性和可擦写特征,其在相变前后存在光学参数的明显变化,通过施加不同参数的激光激励能够实现相变材料晶化状态的精确调控。由此,在相变材料不同晶化状态呈现不同光学参数的基础上,提出一种多阶折射率调制的薄膜平板透镜。以典型相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 作为光调制介质,对介质薄膜的晶化状态开展多阶和多区域的离散控制以满足理论上聚焦透镜所需的相位约束。完成具有多种数值孔径的平板透镜的设计,并通过有限差分方法方法和 Zemax 分别分析透镜聚焦的参数指标,检验了平板透镜的成像性能。

关键词 材料; 光存储材料; 衍射透镜; 折射率; 相位

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1916002

Multi-Order Refractive Index Thin-Film Flat Lens Based on Phase Change Materials

Sheng Xiaohang^{1,2}, Zhou Shaodong¹, Xi Kelei¹, Cheng Qingqing^{1*}, Wang Yang^{2**}¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;²Research Laboratory for High Density Optical Storage, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Phase change materials have good photothermal stability and are rewritable. As their optical properties change significantly after phase change, and the crystallization states of phase change materials can be precisely controlled by applying laser excitation with different parameters. Therefore, on the basis of different optical parameters of phase change materials in different crystallization states, a thin-film flat lens with a multi-order refractive index design is proposed. The typical phase change material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ is used as the optical modulation medium, and the crystallization state of the dielectric film is controlled discretely in multi-order and multi-region according to the phase constraints required by the focusing lens. Flat lenses with different numerical apertures are designed, and the focusing parameters of lenses are simulated by the finite-difference time-domain method and Zemax separately to verify the imaging performance of the lenses.

Key words materials; optical storage materials; diffractive lenses; refractive index; phase

1 引言

透镜作为成像系统中的关键元件,由光程累积原理加工的传统透镜有宏观的厚度,它不能满足小型化成像系统对透镜提出的更轻和更薄的目标需求。究其原因根本原因在于,为了获得足够大的相位覆盖以满足透镜在通光孔径和焦距的限制,需要有足够的透镜厚度来匹配连续分布的相位^[1]。然而,通过将连续相位分

布对 2π 相位进行多次折叠,可以将相位分布限制在 $[0, 2\pi]$ 的相位范围内,进而在打破透镜厚度限制的同时,也能满足透镜更轻的目标需求。近些年来,国际上由多位学者提出的亚波长尺度的超构表面提供了相位变化的新方式。2011年, Yu 等^[2]提出了共振相位设计概念,通过周期排布金属 V 形纳米结构获得了梯度分布的相位,证实了广义 Snell 定律。2012年, Huang 等^[3]提出了新的几何相位设计概念,即通过改变金属

收稿日期: 2022-02-25; 修回日期: 2022-03-11; 录用日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(61627826, 51672292, 11874266, 12174260)

通信作者: *qqcheng@usst.edu.cn; **ywang@siom.ac.cn

天线的旋转角度来达到对相位的控制。2015年, Arbabi等^[4]提出了传输相位设计概念,他们通过改变a-Si单元结构的几何参数实现了对传输光相位的精确调节。基于以上三种相位型超表面的设计方式,越来越多新型超透镜被设计出来,这些以透明光学介质或金属作为光调制材料的轻薄透镜具有比传统透镜更好的性能指标和自由调谐能力^[5-14]。此外,一种使用机器学习算法辅助设计的基于衍射原理的透镜也具有良好的成像性能。2016年, Wang等^[15]报道了一种使用二分搜索(DBS)算法辅助设计的多阶衍射透镜,通过对SC1827光刻胶进行灰度曝光的方法,根据分区域设计满足相位要求的薄膜厚度的原理,制备了一种可见光波长范围内消色差聚焦的一维多阶衍射透镜。2019年,他们进一步使用优化后的梯度下降搜索(GDABS)算法,设计了具有多种不同功能的新颖透镜^[16-18]。除了以上通过设计结构对光相位进行控制的方法外,人们还提出了通过改变调制介质的光学性能来调控相位的方法。

作为传统非易失性存储器(如可擦除相变光盘和相变随机存储器)的存储介质,相变材料如以Ge₂Sb₂Te₅(GST)为代表的Ge-Sb-Te体系具有良好的光热稳定性和可擦写特性^[19-21]。此外,相变材料经过不同激光激励时光学参数会发生显著改变,进而其可成为微纳光子器件领域实现可调谐/可重构功能的材料^[22]。2016年, Wang等^[23]使用ZnS-SiO₂/GST/ZnS-SiO₂三明治薄膜结构作为基底,通过调整相变材料的完全晶态和沉积态两种状态的分布,设计出了一种可擦重写的菲涅耳波带片。

相变材料不仅可以在完全晶态和沉积非晶态之间快速转换,它还可以获得稳定的中间态(部分晶化态)。2009年, Huang等^[24]在研究GST薄膜可逆相变的过程中发现其在高、低反射率态中都保持了部分晶化的特征。2013年, Liang等^[25]通过对薄膜单脉冲进行多次

曝光,分别记录了至少4阶中间态。之后, Wen等^[26]利用不同能量密度的皮秒激光对GST相变材料的部分晶化特性进行了详细研究,使用不同能量密度的激光脉冲对薄膜进行照射,获得了7阶及以上不同的晶化程度。相变材料的这种多阶折射率的调制能力为设计和制造新型相位型功能器件提供了新途径。因此,本文提出了一种基于相变材料的多阶折射率薄膜平板透镜设计方法,利用典型相变材料GST作为光调制介质,通过对GST晶化程度的分区多阶调控实现了对相位的覆盖。为了证实所提方法的有效性,设计了多种不同数值孔径(NA)的透镜,分别以有限差分域(FDTD)方法和Zemax探究了所设计的透镜的聚焦和成像性能。

2 原理与设计

图1(a)~(c)为多阶折射率薄膜平板透镜,通过对沉积于基板上的GST材料进行分区域的多阶晶态调控以实现相位分布的控制。GST材料沉积的非晶态和晶化态在部分波段的折射率(n_A 和 n_C)和消光系数(κ_A 和 κ_C)分别如图1(d)和图1(e)所示^[27-28]。要实现聚焦,透镜的相位分布应当遵循

$$\varphi(R, \lambda) = -\left[2\pi(\sqrt{R^2 + f^2} - f)\right] \frac{1}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为透镜上某点(x, y)与透镜中心之间的距离; f 为焦距; λ 为入射光波长。如图1(b)、(c)所示, GST薄膜上最小结构单元的宽度为 w 、厚度为 h 。需要注意的是,为了保证相位延迟能够覆盖整个 2π 范围, GST薄膜厚度应当满足 $h \geq 2\pi\lambda/(\Delta n - 1)$, 其中 Δn 表示薄膜不同晶化程度之间所能达到的最大折射率变化量。作为演示,在本文中所设计透镜的GST薄膜厚度均为 $h = 500$ nm, 并使用通信波长为 $\lambda = 1550$ nm作为主要工作波长。

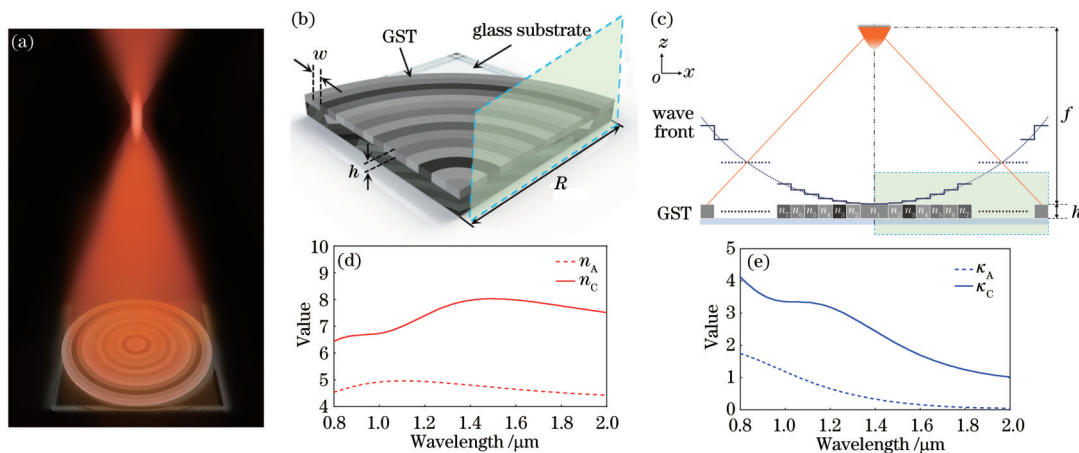


图1 基于相变材料的多阶折射率薄膜平板透镜。(a)透镜聚焦示意图;(b)透镜结构示意图;(c)透镜聚焦原理图;(d) GST材料在红外波段中的折射率;(e) GST材料在红外波段中的消光系数

Fig. 1 Multi-order refractive index thin-film flat lens based on phase change material. (a) Schematic diagram of lens focusing; (b) structural diagram of lens; (c) principle diagram of lens focusing; (d) refractive index of GST material in infrared band; (e) extinction coefficient of GST material in infrared band

表 1 不同晶化程度的 GST 材料对应的折射率和消光系数
Table 1 Refractive index and extinction coefficient of GST material with different crystallization degree

| Crystallization degree No. | Refractive index | Extinction coefficient |
|----------------------------|------------------|------------------------|
| 1 | 4.7 | 0.2 |
| 2 | 5.3 | 0.5 |
| 3 | 5.8 | 0.8 |
| 4 | 6.4 | 1.1 |
| 5 | 6.9 | 1.4 |
| 6 | 7.5 | 1.7 |
| 7 | 8.0 | 1.9 |

过去的工作已经广泛演示了激光诱导 GST 薄膜形成多阶晶化态,通过精密控制飞秒激光的脉冲数量,使得 GST 的中间晶化阶数可以达到 16 阶甚至更多^[29],理论上可以满足对 2π 相位的全覆盖。然而,阶数的增加意味着更高的工艺要求,如何选择晶化阶数对于本文所提的设计方法非常重要。在超构透镜的设计中已经证明,随着相位调制阶数的增加,聚焦性能逐步提高,当到达 6 阶及以上时,性能的提升效果逐渐下降^[30]。根据上述经验在非晶态和晶态折射率之间以相同间隔选取了 5 种可能的中间态,这 7 种不同晶化态对应工作波长的折射率参数如表 1 所示。在本文的最后,还将详细讨论使用不同晶化阶数对所设计的透镜

的性能的影响。此外需要强调的是,GST 薄膜实际相变程度及其对应的光学参数受到实验条件等多种因素影响,但具体数值或实部虚部对应关系的细微偏差并不会影响本文所提设计方法的有效性。

透镜的详细设计方法如下。首先,设计如图 1(c) 所示的二维结构,并假定独立单元对光的调制作用互不干扰。通过公式 $\varphi = 2\pi(n_i - 1)h/\lambda$ (n_i 为表 1 中不同晶化态的折射率)对不同单元的相位延迟数值进行计算,并根据式(1)计算得出理想相位分布曲线(2π 折叠后)甄选匹配当前单元位置最适合的晶化程度,从而完成对二维平面上相变材料晶化程度的初步排布。

随后,因为单元之间的串扰不可忽略,为了尽可能准确地匹配相位,需要进一步调整结构以减小单元互相串扰产生的影响。使用机器学习算法对结构排布进行优化,利用 FDTD 方法对初始结构出射面的实际相位分布进行计算,以此作为基准,使用 DBS 算法筛查每个结构,给每个单元的晶化阶段添加扰动。接着,再次使用 FDTD 方法重新计算新结构的相位分布,并以新曲线的相位分布曲线与理想相位曲线之间的均方差作为品质因子方程(FOM)。若新结构的 FOM 更小,则接受扰动,否则不接受扰动并对下一个单元添加扰动。通过多轮调整,进而不断优化获得最接近式(1)相位的结构分布,流程如图 2 所示。最后,通过将二维结构沿对称中心旋转即可得到三维设计,进而完成透镜的设计。

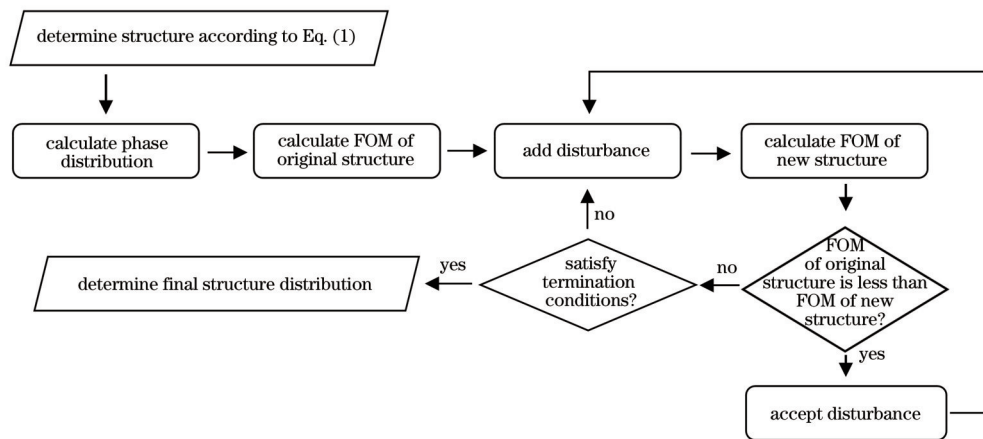


图 2 多阶折射率薄膜平板透镜设计流程图

Fig. 2 Flow chart of multi-order refractive index thin-film flat lens design

3 分析与讨论

为了验证所提方法的可行性,设计并演示了两种不同 NA 的多阶折射率薄膜平板透镜,分别使用 FDTD 方法计算了它们的聚焦场场强分布情况。图 3 (a)~(d)展示了 $NA=0.60$,设计焦距为 $f_d=1000\ \mu\text{m}$,单元宽度为 $w=1\ \mu\text{m}$ 时的聚焦场仿真计算结果。其中,聚焦场场强的分布和沿传播方向 z 的场强的分布曲线如图 3(c)和图 3(d)所示,仿真实际焦点 f_r 位于 $z=1005\ \mu\text{m}$ 处,与设计焦距存在 0.50% 的偏差。此外,还

设计了 $NA=0.53$,设计焦距为 $f_d=1200\ \mu\text{m}$,单元宽度 $w=1\ \mu\text{m}$ 的多阶折射率薄膜平板透镜,相应的仿真结果如图 3(e)~(h)所示。仿真结果表明,实际焦点 f_r 位于 $z=1207\ \mu\text{m}$,与设计结果存在 0.58% 的偏差。对于 $NA=0.60$ 和 $NA=0.53$ 的透镜,满足式(1)相位分布的理想透镜的半峰全宽(FWHM)分别为 $1.62\ \mu\text{m}$ 和 $1.86\ \mu\text{m}$,这与本文设计的结果十分接近。产生上述误差的原因主要是在设计阶段中,由于单元之间实际上存在串扰效应,加上单元的折射率分布是梯度的,故相位分布曲线实际上是呈现阶跃式变化的而非平滑的

线性变化,无法完美匹配理想相位,这就导致整体相位与理想相位存在偏差。因此,随着晶化阶数和单元数

量的增加,结构与相位分布的匹配将更准确,结构性误差造成的焦距偏移将会被减小。

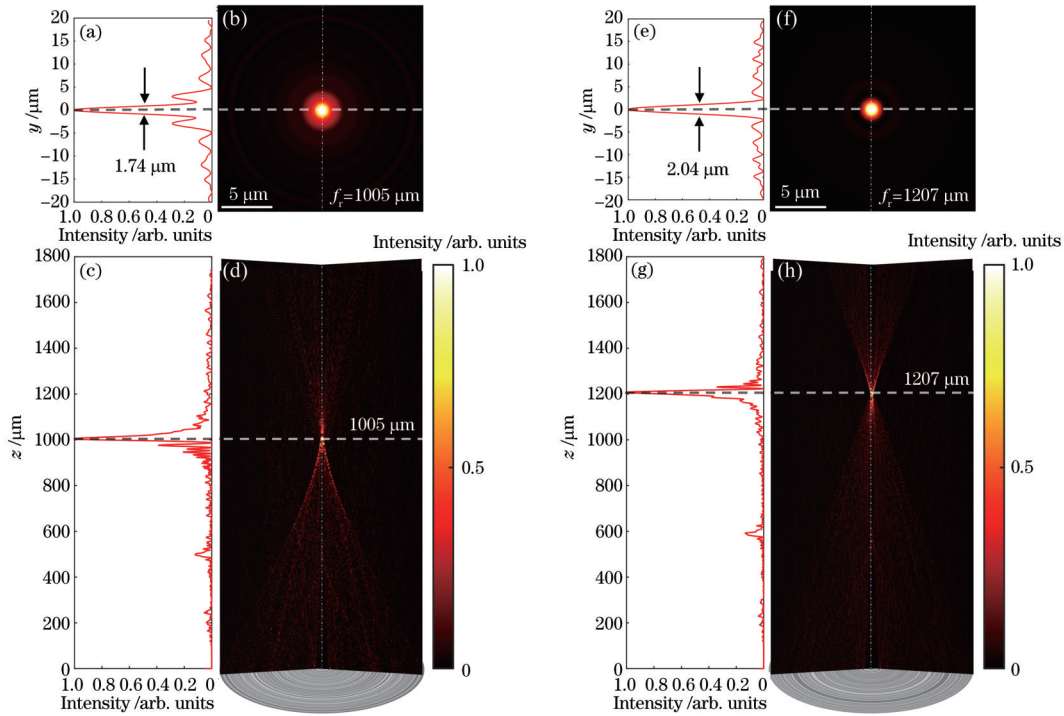


图 3 多阶折射率薄膜平板透镜聚焦特性的 FDTD 仿真结果。(a) $NA=0.60$ 时透镜焦平面的场强分布曲线; (b) $NA=0.60$ 时透镜焦平面的场强分布; (c) $NA=0.60$ 时沿法线方向的场强分布曲线; (d) $NA=0.60$ 时沿法线方向的场强分布; (e) $NA=0.53$ 时透镜焦平面的场强分布曲线; (f) $NA=0.53$ 时透镜焦平面的场强分布; (g) $NA=0.53$ 时沿法线方向的场强分布曲线; (h) $NA=0.53$ 时沿法线方向的场强分布

Fig. 3 FDTD simulation results of focusing properties of multi-order refractive index thin-film flat lens. (a) Field intensity distribution curve of focal plane of lens with $NA=0.60$; (b) field intensity distribution of focal plane of lens with $NA=0.60$; (c) field intensity distribution curve along normal direction when $NA=0.60$; (d) field intensity distribution along normal direction when $NA=0.60$; (e) field intensity distribution curve of focal plane of lens with $NA=0.53$; (f) field intensity distribution of focal plane of lens with $NA=0.53$; (g) field intensity distribution curve along normal direction when $NA=0.53$; (h) field intensity distribution along normal direction when $NA=0.53$

此外,还对透镜的成像能力进行了评估,使用 Zemax OpticStudio 商用软件对其成像性能进行了评估,成像物体选择标准分辨率板,经本文设计的薄膜平板透后,可获得两种数值孔径透镜的成像结果,成像光路如图 4(a) 所示。图 4(b) 为 $NA=0.60$ 时的多阶折射率薄膜平板透镜在 $z=1005 \mu\text{m}$ 处的成像结果,图 4(d) 为 $NA=0.53$ 时的多阶折射率薄膜平板透镜在 $z=1207 \mu\text{m}$ 处的成像结果。选取谷-峰比最接近 0.735 的线对计算透镜极限分辨率^[1],如图 4(c)、(e) 所示,其中虚线框内为所选线对的局部放大图,从其中心虚线位置截取数据。两种透镜的分辨率分别为 $4.18 \mu\text{m}$ 和 $6.32 \mu\text{m}$ 。

正如前文所述,本文使用具有 7 个不同晶化状态的 GST 材料作为光调制介质设计并演示了两种不同 NA 的聚焦透镜,这些透镜的性能都几乎达到了设计要求,充分证明了所提多级折射率薄膜平板透镜设计方法所设计的透镜具有良好的光学性能。然而,通过仿真结果也可以发现 GST 材料晶化阶数的不足限制了相位的匹配准确度,导致实际聚焦位置存在部分偏

差,成像也不能完全达到理论衍射极限。因此,本文认为可以通过继续增加晶化的阶数来更好地覆盖相位区间以减少这种设计误差。

为了验证上述设计思路,对比了使用 3, 5, 7, 16 阶不同折射率阶数设计的多阶折射率薄膜平板透镜的聚焦性能。透镜设计参数均设置为 $NA=0.60$, 焦距为 $f=1000 \mu\text{m}$, 单元宽度为 $w=1 \mu\text{m}$ 。不同折射率阶数设计的透镜仿真焦距与设计焦距的误差如图 5(a) 所示,在阶数为 3 和阶数为 16 时的误差分别为 $35.3 \mu\text{m}$ 和 $2.9 \mu\text{m}$,可见在阶数增加的过程中透镜的焦距在趋近理想焦距值。此外,也对比了使用不同折射率阶数所设计的透镜焦点的半峰全宽,其分布曲线如图 5(b) 所示,在阶数为 3 和阶数为 16 时的半峰全宽分别为 $2.12 \mu\text{m}$ 和 $1.69 \mu\text{m}$,由此可以得出,随着阶数的增加,焦斑的半峰全宽在变小,即聚焦效果趋于最佳。因此,随着相变材料折射率阶数的增加,透镜的焦距和焦点的半峰全宽等性能参数都获得了明显的改善,这与本文的预测结果相一致。

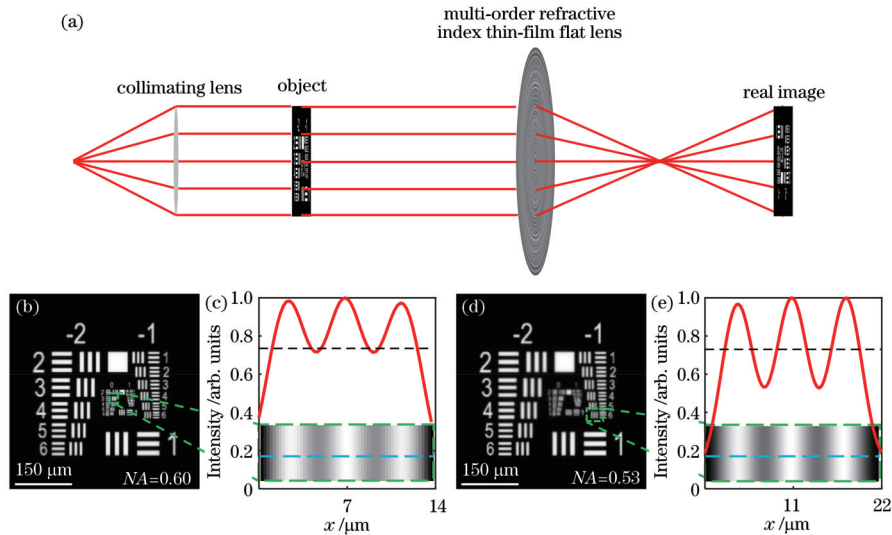


图 4 多阶折射率薄膜平板透镜成像结果。(a)成像光路示意图;(b) $NA=0.60$ 时的成像结果;(c) $NA=0.60$ 时可分辨出的最小线对及其归一化强度分布曲线;(d) $NA=0.53$ 时的成像结果;(e) $NA=0.53$ 时可分辨出的最小线对及其归一化强度分布曲线
 Fig. 4 Imaging results of multi-order refractive index thin-film flat lens. (a) Schematic diagram of imaging optical path; (b) imaging result of lens with $NA=0.60$; (c) discernible minimum line pairs and their normalized intensity distribution curves when $NA=0.60$; (d) imaging result of lens with $NA=0.53$; (e) discernible minimum line pairs and their normalized intensity distribution curves when $NA=0.53$

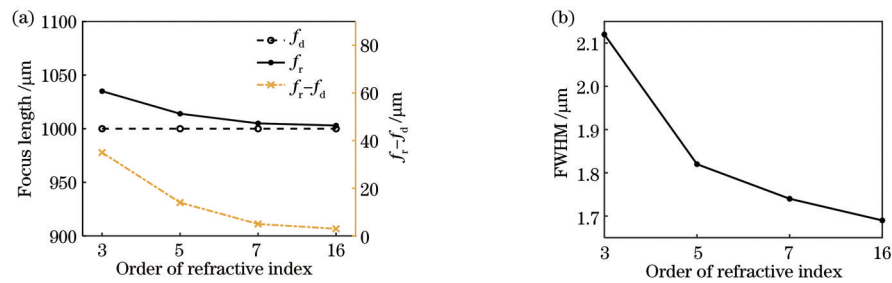


图 5 使用不同阶数折射率设计的透镜的聚焦性能对比。(a)仿真焦距与设计焦距的误差;(b)焦点的 FWHM
 Fig. 5 Comparison of focusing performance of lens designed with different refractive index orders. (a) Error between simulated and designed focal lengths; (b) FWHMs of focal points

4 结 论

将 GST 相变材料作为主要的光调制介质,提出一种利用相变材料多级折射率调控能力设计薄膜聚焦透镜的方法。通过独立控制不同区域的折射率满足透镜聚焦相位要求,并使用机器学习算法对结构进行优化调整。为验证所提设计方法的有效性,使用厚度为 500 nm 的 GST 薄膜,选择其 7 阶晶化状态,设计两种数值孔径的透镜:1) $NA=0.60, f_d=1000 \mu\text{m}$; 2) $NA=0.53, f_d=1200 \mu\text{m}$ 。分别对两个透镜的聚焦性能和成像能力进行验证,两种透镜的实际焦距分别为 $1005 \mu\text{m}$ 和 $1207 \mu\text{m}$,半峰全宽分别为 $1.74 \mu\text{m}$ 和 $2.04 \mu\text{m}$,成像分辨率分别为 $4.18 \mu\text{m}$ 和 $6.32 \mu\text{m}$ 。此外,还讨论使用不同晶化状态阶数对透镜设计产生的影响,证明阶数的增加有助于更好地提高透镜设计的准确性。这种通过调制薄膜相变材料不同分区晶化状态阶数来进行折射率控制的设计方法为后续新型光衍射元件的设计提供了新的材料选择和设计思路。

参 考 文 献

- [1] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
 Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [2] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [3] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. Nano letters, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [4] 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]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(11): 937-943.
- [5] 孙树林, 何琼, 郝加明, 等. 超构表面高效调控电磁波[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0123003.

- Sun S L, He Q, Hao J M, et al. High-efficiency manipulations on electromagnetic waves with metasurfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0123003.
- [6] 倪一博, 闻顺, 沈子程, 等. 基于超构表面的多维光场感知[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1918003.
- Ni Y B, Wen S, Shen Z C, et al. Multidimensional light field sensing based on metasurfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1918003.
- [7] 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]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937-943.
- [8] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [9] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 187.
- [10] Lin R J, Su V C, Wang S M, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 227-231.
- [11] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 220-226.
- [12] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [13] Fan Z B, Qiu H Y, Zhang H L, et al. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 67.
- [14] 赵峰, 陈向宁, 王得成. 正交圆偏振光同时聚焦的超透镜设计与仿真[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1024001.
- Zhao F, Chen X N, Wang D C. Metalens design and simulation for simultaneous focusing of orthogonal circularly polarized light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1024001.
- [15] Wang P, Mohammad N, Menon R. Chromatic-aberration-corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21545.
- [16] Meem M, Banerji S, Majumder A, et al. Broadband lightweight flat lenses for long-wave infrared imaging[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(43): 21375-21378.
- [17] Banerji S, Sensale-Rodriguez B. A computational design framework for efficient, fabrication error-tolerant, planar THz diffractive optical elements[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 5801.
- [18] Banerji S, Meem M, Majumder A, et al. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses? [J]. *Optica*, 2019, 6(6): 805-810.
- [19] Wuttig M, Yamada N. Phase-change materials for rewriteable data storage[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(11): 824-832.
- [20] Lankhorst M H R, Ketelaars B W S M M, Wolters R A M. Low-cost and nanoscale non-volatile memory concept for future silicon chips[J]. *Nature Materials*, 2005, 4(4): 347-352.
- [21] Wright C D, Hosseini P, Diosdado J A V. Beyond von-Neumann computing with nanoscale phase-change memory devices[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(18): 2248-2254.
- [22] 吕元帅, 汪成根, 袁伟, 等. 基于相变材料的可重构模式复用光波导开关[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1723001.
- Lü Y S, Wang C G, Yuan W, et al. Reconfigurable mode multiplexer waveguide switch based on phase change material[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1723001.
- [23] Wang Q, Rogers E T F, Gholipour B, et al. Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 60-65.
- [24] Huang H, Zuo F Y, Zhai F X, et al. Fast phase transition process of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ film induced by picosecond laser pulses with identical fluences[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(6): 063501.
- [25] Liang G F, Li S M, Huang H, et al. Comparison of optical transients during the picosecond laser pulse-induced crystallization of GeSbTe and AgInSbTe phase-change thin films: nucleation-driven versus growth-driven processes[J]. *Physica B*, 2013, 424: 1-7.
- [26] Wen S, Meng Y, Jiang M, et al. Multi-level coding-recoding by ultrafast phase transition on $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4979.
- [27] Julian M N, Williams C, Borg S, et al. Reversible optical tuning of GeSbTe phase-change metasurface spectral filters for mid-wave infrared imaging[J]. *Optica*, 2020, 7(7): 746-754.
- [28] Williams C, Hong N N, Julian M, et al. Tunable mid-wave infrared Fabry-Perot bandpass filters using phase-change GeSbTe [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10583-10594.
- [29] Ovshinsky S R. Ovonic chalcogenide non-binary electrical and optical devices[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5966: 596601.
- [30] Aieta F, Genevet P, Kats M, et al. Aberrations of flat lenses and aplanatic metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31530-31539.