

文章编号: 1005-5630(2022)03-0037-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.03.006

消色差超构表面复合透镜

张 敏, 陆咏诤, 彭 嘉, 文 静

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 超构表面因其体积轻薄易于集成化, 有望在某些特定场合取代传统透镜实现多功能光学器件。超构表面的光束偏转角随波长的增加而增大, 与传统折射透镜相比产生相反的色散, 这种色散又被称为“异常色散”或“负色散”。理论上利用超构表面的负色散和传统折射光学器件的正色散相抵消, 可以完全矫正光学系统的色差。由此出发, 设计了一种基于光刻胶材料, 由 Pancharatnam-Berry (PB) 相位型超构表面作为第一透镜, 传统球面透镜作为第二透镜的消色差超构表面复合透镜, 利用时域有限差分数值模拟软件 FDTD Solutions 探索了该透镜在 780~980 nm 波段的聚焦性能, 证明了消色差光刻胶超构表面复合透镜优异的消色差效果。相对传统的消色差超构表面通过相位补偿来消色差的方法, 这种消色差设计简单且高效, 为特定波段内的消色差成像提供了一定的借鉴意义。

关键词: 光刻胶; 超构表面; 消色差

中图分类号: O 436.1 **文献标志码:** A

Achromatic metalens compound lens

ZHANG Min, LU Yongzheng, PENG Jia, WEN Jing

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Metalens has the prospective to replace the traditional lens for multifunctional sub-wavelength imaging due to its thinness and ease of integration. The beam deflection angle of the metalens increases with the increase of wavelength and produces opposite dispersion compared to the traditional refractive lens. This form of dispersion is also called "abnormal dispersion" or "negative dispersion". Theoretically, the negative dispersion of the metalens and the positive dispersion of traditional refractive optical devices can be used to fully offset the chromatic aberration of the optical system. Consequently, this study demonstrates the design of an achromatic metalens compound lens based on photoresist material by employing Pancharatmane-Berry (PB) phase metalens as the first lens and traditional spherical lens as the second lens, through finite difference time domain method. The focusing characteristics of the lens at $\lambda = 780 \sim 980$ nm are

收稿日期: 2021-10-08

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0701800); 国家自然科学基金(62175153、61775140)

作者简介: 张 敏 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为超构表面。E-mail: 949369394@qq.com

通信作者: 文 静 (1985—), 女, 副教授, 研究方向为超构表面、光场调控、超分辨成像。

E-mail: 28163122@qq.com

investigated by FDTD Solutions (a numerical simulation software) and an exceptional achromatic effect of photoresist metalens compound lens is realized. Compared with the traditional achromatic metalens, the achromatic design is simple and efficient which provides a certain significance for achromatic imaging in the specified bandwidth.

Keywords: photoresist; metalens; achromatic

引 言

传统光学器件因体积笨重等缺点无法满足现代光学设备对光学系统集成化的要求,随着超构表面的迅速发展,新一代微型光学系统的出现成为可能。超构表面是一种由人工设计的亚波长微纳结构阵列,可对入射光的振幅、相位、偏振等进行调控^[1-3],已经实现了某些传统光学器件的功能。例如光镊^[4-5]、光束分束器^[6]、平面波片^[7]、全息成像^[8-12]和无衍射光束发生器^[13-14]等。其中平面聚焦透镜的色差问题不可避免,因此,设计高效的在宽波段工作的超构表面尤为重要。近年来,许多研究工作致力于超构表面的宽带消色差,多个科研团队已经实现并报道了多种不同的消色差超构表面及其调控机理^[15-19],例如基于传播相位和几何相位相结合对光场进行调控,进而实现消色差。传统球面聚焦透镜无法实现单透镜消色差,只能通过级联多个透镜组合实现色差矫正。本文设计了一种基于光刻胶材料的 Pancharatmane-Berry(PB)相位型超构表面^[20]与传统微透镜相结合的消色差超构表面复合透镜,通过 FDTD Solutions 软件对该透镜在 780~980 nm 工作波段进行仿真模拟,探索其聚焦性能及消色差效果。

1 原理与设计

传统透镜的焦距取决于透镜的曲率半径和材料的折射率,当半径确定后,焦距随折射率变化而变化。同一种材料,波长越短折射率越大,焦距越短,这种成像色差差异被称为位置色差,也叫轴向色差,单透镜本身不能消色差,所以传统透镜系统完全矫正色差需要不同材料的多个透镜组合,且对材料要求苛刻,加工难度大。

超构表面根据广义斯涅耳定律^[21],通过设计亚波长单元结构的几何特征和空间排列,在两种介质的界面上引入一个突变的相位,产生相位梯度,通过控制界面上的相位梯度可以对出射光的角度进行任意调控。PB 相位型超构表面基于以上原理,通过控制亚波长单元结构的旋转角度使入射的圆极化光产生一个额外的 PB 相位,从而实现对外射光的调制。超构表面因其结构色散和相位响应模式引起的光限制,色差同样不可避免。宽带消色差超构表面的研究吸引了众多相关科研工作者,在已报道的成果中,大多数调控机理都是通过对光场相位的控制实现超构表面宽带消色差。诸如通过算法优化超构表面结构参数,耦合不同波长响应的纳米天线,级联针对不同波长工作的超构透镜等,最值得一提的是,祝世宁院士与蔡定平教授通过结合波长无关的几何相位与波长相关的传播相位或共振相位,将波长无关的相位作为基础相位满足超构表面器件功能所需相位分布,波长有关的相位作为补偿相位矫正不同波长之间的色差^[15,17]。与上述原理不同,本文设计的超构表面与球面透镜相结合的消色差超构表面复合透镜利用两者相反的色散机制实现宽带消色差。

如图 1(a)所示,超构表面上的单元结构可以充当相移器的作用,在满足奈奎斯特采样定理的基础上,用离散相位分布来代替传统透镜的连续相位分布。如图 1(b)所示,以超构表面圆心为原点 $O(0,0,0)$,超构表面所在平面上任意一纳米鳍所在位置为 $P(x,y,0)$,设计焦距为 f , P 点到设计波前的距离为 L ,则

$$L = \sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f \quad (1)$$

假设 O 点设计相位为 0, P 点设计相位为 $\varphi(x,y)$,则超构表面的相位轮廓为

$$\varphi(x,y) = -\frac{2\pi}{\lambda}L = \frac{2\pi}{\lambda}(f - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}) \quad (2)$$

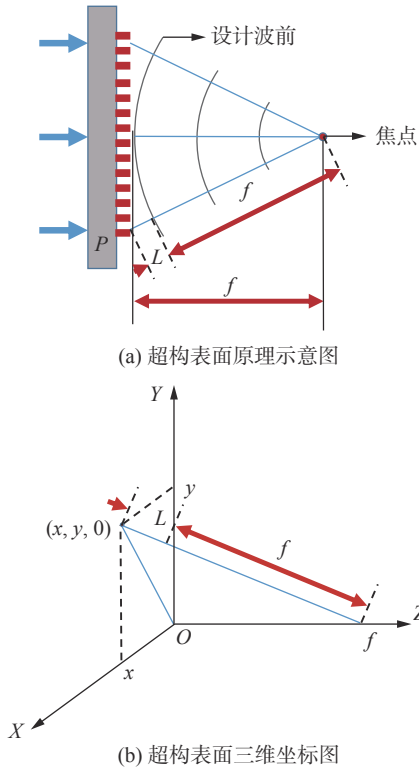


图1 超构表面
Fig.1 Metalens

式中: λ 为设计波长; f 为设计焦距。通过给定坐标 (x,y) 上的纳米鳍一个旋转角度 $\theta_{rot}(x,y)$, 实现目标相位轮廓, 得到 PB 相位型超构表面。这种方法利用单个纳米鳍的形状特征产生双折射, 从而可以充当半波片的功能将空间变化的相位轮廓 $\varphi(x,y)$ 施加给透射光, $\varphi(x,y) = 2\theta_{rot}(x,y)$ 。由式 (2) 可知, 在超构表面工作范围内, 超构表面的结构色散满足

$$\Delta\varphi(x,y) = \left[2\pi(f - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}) \right] \left(\frac{1}{\lambda_d} - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (3)$$

式中 λ_d 是工作波长。由式 (3) 可知, 超构表面的色散与传统曲面透镜的色散相反, 波长越短, 焦距越长。因此, 超构表面的这种色散又称为“异常色散”或“负色散”, 理论上利用超构表面的负色散和传统折射光学器件的正色散相抵消, 可以完全矫正光学系统的色差。

本文设计了由超构表面作为第一透镜, 传统球面透镜作为第二透镜的消色差超构表面复合透镜, 复合透镜示意图如图 2(a) 所示。目前最先进的超构表面需要通过一系列高难度的加工程序

进行制造, 通常包括介质的沉积、刻蚀等, 如 TiO_2 、 GaN 、 Si 等介质超表面。最近有一种安全且高效的超表面制造方法被提出, 它是通过电子束曝光负性光刻胶, 准确打印程序中已经设计好的 3D 图案, 固化, 显影, 从而形成设计好的几何形体。本文设计的消色差超构表面复合透镜中, 第一透镜和第二透镜材料都选用光刻胶材料, 其折射率参数如图 2(b) 所示^[22-23]。

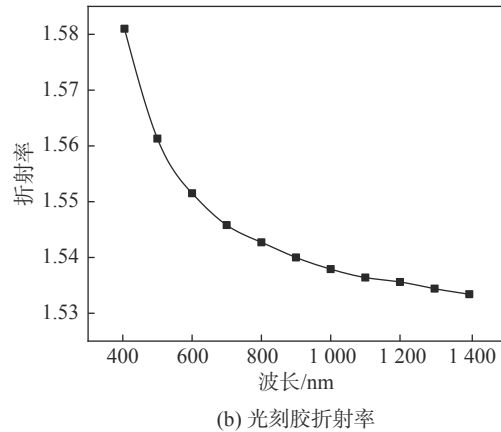
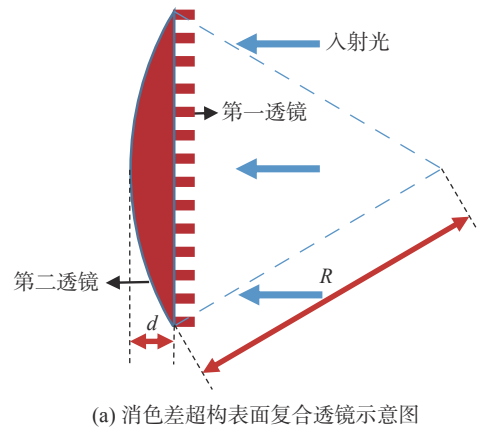


图2 消色差超构表面复合透镜

Fig.2 Achromatic metalens compound lens

超构表面的单元结构如图 3(a) 所示, 它是由二氧化硅基底上的光刻胶材料聚合而成的纳米鳍。单个纳米鳍结构长 (l)、宽 (w)、高 (h) 和旋转角度 θ_{rot} 分别为 620 nm、280 nm、5000 nm 和 $\theta_{rot}(x,y)$, 单元周期 P 为 980 nm。偏振转换效率定义为与入射圆极化光相反的出射光功率与总入射圆极化光功率的比值, 如图 3(b) 所示, 旋转角度为零的单个结构偏振转换效率高达 95%。

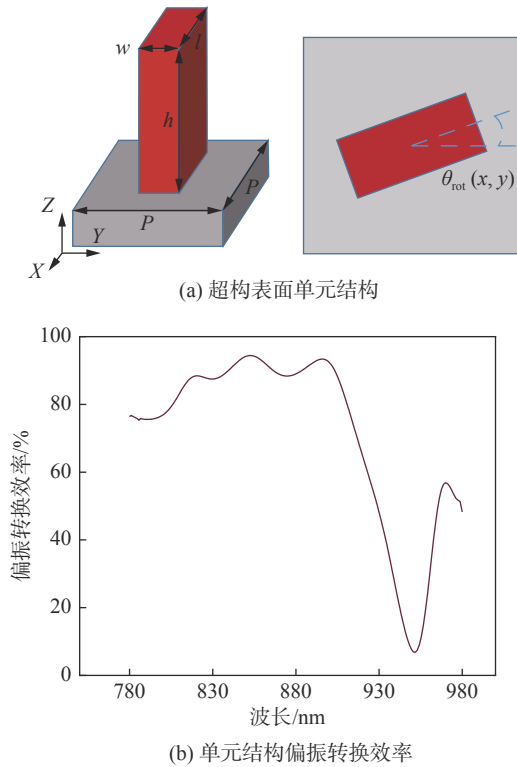


图 3 超构表面单元结构
Fig. 3 Metalelens element structure

2 仿真与结果分析

遵循上述原理，本文设计了基于光刻胶材料的消色差超构表面复合透镜，并利用时域有限差分数值模拟软件 FDTD Solutions 进行模拟，该透镜组工作波长为 780~980 nm，数值孔径 $NA = 0.5$ 。

为了获得红外波段超构表面的优化参数，采用平面内周期边界条件进行时域有限差分方法 (FDTD) 模拟，分析了单个结构单元的偏振转换效率与纳米鳍参数(长 l 、宽 w 、高 h)与晶格常数 P 的函数。如图 4 所示，设定长 620 nm，宽 280 nm，周期 980 nm 的情况下改变纳米鳍的高度，在设计波段内，超构表面的聚焦效率随纳米鳍的高度增加而增大。因此，本实验应在满足工艺参数的条件下，在可获得的最大高宽比 (h/w) 范围内尽可能最大化纳米鳍的高度 H 。现有资料数据表明，可获得的单元结构最大高宽比可达 20^[23]，本文设计中的结构单元最大高宽比为 18。

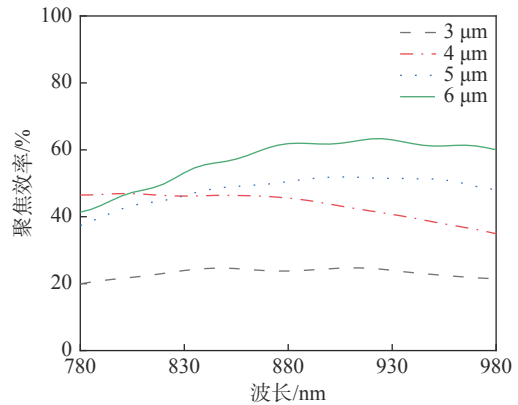


图 4 聚焦效率
Fig. 4 Focusing efficiency

基于 PB 相位原理，采用上述单元结构参数设计模拟了直径 40 μm ，设计波长 980 nm 的红外超构表面作为第一透镜，仿真结果表明在设计波长附近超构表面拥有稳定高效率的良好聚焦效果。在此基础上通过 FDTD Solutions 数值仿真软件改变球面透镜的曲率 R 及中心高度 d (见图 2(a))，分析消色差结果优化得到微球面透镜的曲率半径为 39.2 μm ，中心高度为 5.4 μm 。

仿真实验结果表明，在设计波段内，消色差超构表面复合透镜能矫正色差。非消色差超构表面和消色差超构表面复合透镜在 XZ 平面上的归一化光场分布如图 5 所示。图 5(a) 为设计波长为 980 nm， $NA = 0.2$ 的非消色差超构表面在工作波长为 780~980 nm 时 XZ 平面的光场分布，其焦点在 84~103 μm 范围内波动。图 5(b) 为 $NA = 0.2$ 的超构透镜添加了第二透镜微球面透镜后的超构表面复合透镜 $NA = 0.5$ ，在同一工作波段焦距范围为 40~40.7 μm 。

如图 6(a) 所示，消色差超构表面复合微透镜在工作波长为 780 nm 至 880 nm 时焦距变化仅 0.7 μm ，而设计参数相同的非消色差超构表面在同一工作波段的焦距变化为 19 μm ，远大于消色差超构表面复合透镜。如图 6(b) 所示，从模拟结果中得到了 $NA = 0.5$ 的消色差超构表面复合透镜在设计波段内焦平面的聚焦光场半高全宽 (FWHM)， $\lambda = 980 \text{ nm}$ 时聚焦光场 FWHM 为 1.08 μm ，接近衍射极限 0.98 μm ($d = \lambda / (2NA)$)。

如图 7 所示，本文对比了非消色差超构表面和消色差超构表面复合透镜的聚焦效率的模拟结果。图 7(a) 为非消色差超构表面在入射波长为

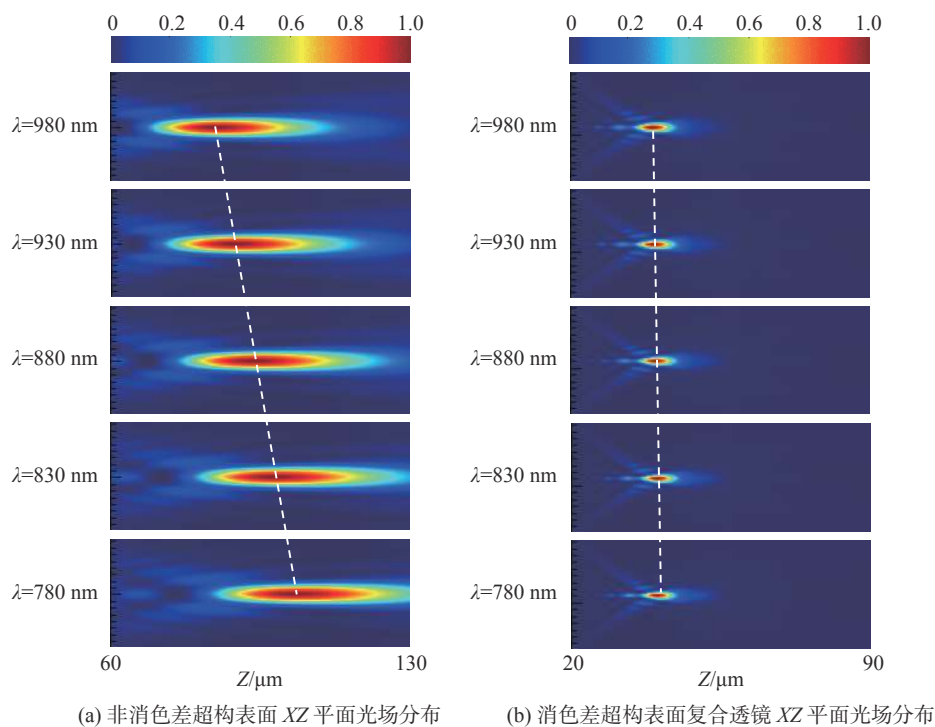
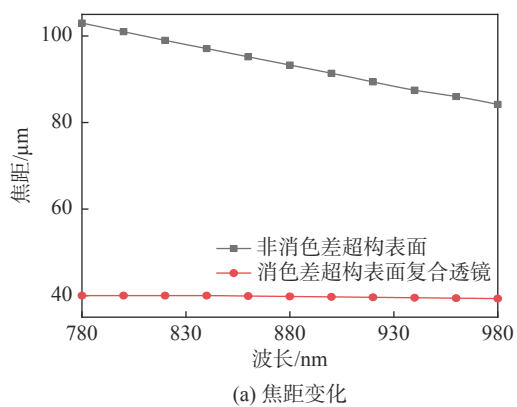
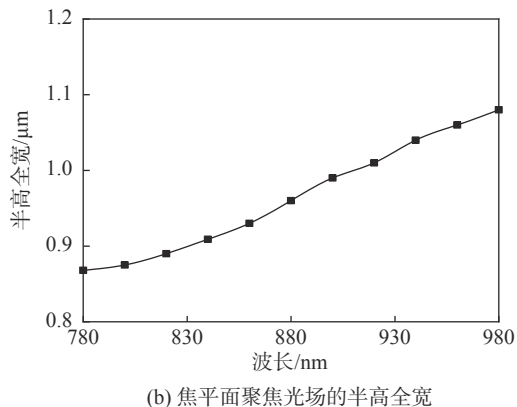


图 5 XZ 平面光场分布

Fig. 5 XZ plane optical field distribution



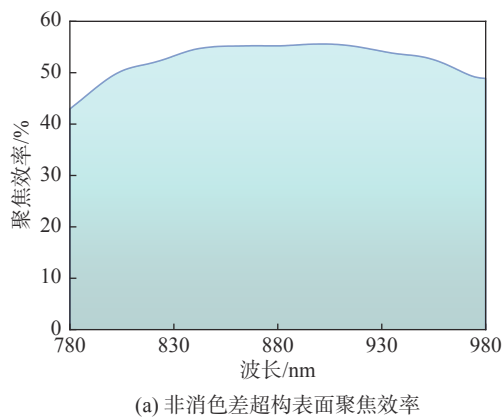
(a) 焦距变化



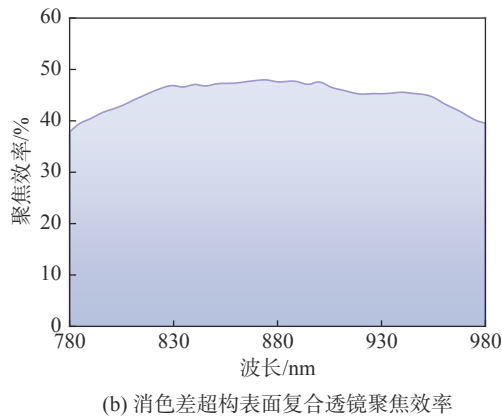
(b) 焦平面聚焦光场的半高全宽

图 6 焦距变化和焦平面聚焦光场半高全宽

Fig. 6 The focal length change and the FWHM of focused light field from focal plane



(a) 非消色差超构表面聚焦效率



(b) 消色差超构表面复合透镜聚焦效率

图 7 聚焦效率

Fig. 7 Focusing efficiency

780~980 nm 范围内的聚焦效率, 峰值效率为 55%, 图 7(b) 为消色差超构表面复合透镜在同一工作波段内的聚焦效率, 峰值效率为 48%。由模拟结果可知, 相对非消色差超构表面, 消色差超构表面复合透镜的聚焦效率未有显著降低, 在工作波段内依然具有稳定且较高的效率。

3 结 论

本文在新型超构表面材料光刻胶超构表面优越聚焦性能的基础上, 探讨了由该材料设计组成的消色差超构表面复合透镜在近红外波段的消色差效果。通过 FDTD 算法对工作波段为 780~980 nm, $NA = 0.5$ 的消色差超构表面复合透镜的优异消色差性能进行了验证, 仿真实验结果表明, 该消色差超构表面复合透镜能够很好地矫正光学系统的轴向色差。相对传统的超构表面消色差通过相位补偿来消色差的方法, 这种消色差设计简单且高效, 将为特定波段内的消色差成像提供一定的借鉴意义, 为未来超构表面的研究拓展出了更广阔的发展空间。

参考文献:

- [1] SU V C, CHU C H, SUN G, et al. Advances in optical metasurfaces: fabrication and applications [Invited][J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13148 – 13182.
- [2] YU N F, CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139 – 150.
- [3] KILDISHEV A V, BOLTASSEVA A, SHALAEV V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [4] MARKOVICH H, SHISHKIN I I, HENDLER N, et al. Optical manipulation along an optical axis with a polarization sensitive meta-lens[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(8): 5024 – 5029.
- [5] TKACHENKO G, STELLINGA D, RUSKUC A, et al. Optical trapping with planar silicon metalenses[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3224 – 3227.
- [6] 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]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(11): 113901.
- [7] 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): 030801.
- [8] ZHENG G X, MÜHLENBERND H, KENNEY M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308 – 312.
- [9] WEN D D, YUE F Y, LI G X, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8241.
- [10] WAN W W, GAO J, YANG X D. Full-color plasmonic metasurface holograms[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 10671 – 10680.
- [11] DEVLIN R C, KHORASANINEJAD M, CHEN W T, et al. Broadband high-efficiency dielectric metasurfaces for the visible spectrum[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(38): 10473 – 10478.
- [12] DENG Z L, DENG J H, ZHUANG X, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2885 – 2892.
- [13] CHEN W T, KHORASANINEJAD M, ZHU A Y, et al. Generation of wavelength-independent subwavelength Bessel beams using metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(5): e16259.
- [14] WEN J, CHEN L, YU B B, et al. All-dielectric synthetic-phase metasurfaces generating practical Airy beams[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(1): 1030 – 1038.
- [15] 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.
- [16] CHEN W T, ZHU A Y, SISLER J, et al. A broadband achromatic polarization-insensitive metalens consisting of anisotropic nanostructures[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 355.
- [17] WANG S M, WU P C, SU V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227 – 232.
- [18] KHORASANINEJAD M, SHI Z, ZHU A Y, et al. Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(3): 1819 – 1824.
- [19] KHORASANINEJAD M, AIETA F, KANHAIYA P, et al. Achromatic metasurface lens at telecommunication wavelengths[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 5358 – 5362.

- [20] BERRY M V. The adiabatic phase and pancharatnam's phase for polarized light[J]. *Journal of Modern Optics*, 1987, 34(11): 1401 – 1407.
- [21] 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.
- [22] SCHMID M, LUDESCHER D, GIESSEN H. Optical properties of photoresists for femtosecond 3D printing: refractive index, extinction, luminescence-dose dependence, aging, heat treatment and comparison between 1-photon and 2-photon exposure[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(12): 4564 – 4577.
- [23] ANDRÉN D, MARTÍNEZ-LLINÀS J, TASSIN P, et al. Large-scale metasurfaces made by an exposed resist[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(4): 885 – 892.

(编辑: 张磊)