

文章编号: 1002-2082 (2020) 03-0591-06

近红外偏振无关超透镜研究

蒲欣欣¹, 周 顺¹, 肖相国², 朱业传¹, 程 进¹, 刘卫国¹

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 基于微纳结构对光波调控实现聚焦与成像的超透镜是目前国际上竞相发展的前沿技术。本文针对目前已报道的近红外超透镜偏振相关、系统复杂以及透过率低等难题, 提出了一种偏振无关的近红外超透镜。以低折射率材料 SiO_2 为基底, 高折射率材料 Si 圆柱为相位调控单元, 设计波长为 $1.31 \mu\text{m}$ 。利用时域有限差分方法分析了近红外超透镜构建单元的光波调控特性, 构建了构建单元的相位延迟特性曲线, 探究了构建单元周期对光波透过率的影响规律, 实现了构建单元的优化设计, 并基于波前重构方程, 设计出偏振无关的近红外超透镜。数值仿真结果表明: 相位调控单元的相位延迟与透过率不仅取决于 Si 圆柱半径、高度, 而且与单元周期密切相关; 基于分析的构建单元光波调控特性, 设计的近红外偏振无关超透镜焦距仿真值为 $19 \mu\text{m}$, 与设计值较好吻合, 透镜透过率达到 65%。设计的超透镜不仅体积小、质量轻, 而且为平面透镜, 因此易于光学系统集成, 在激光雷达、激光夜视等技术中展现出广阔的应用前景。

关键词: 超透镜; 偏振无关; 近红外; 平面透镜

中图分类号: TN216; O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0305001

Research on near-infrared polarization-independent metalens

PU Xinxin¹, ZHOU Shun¹, XIAO Xiangguo², ZHU Yechuan¹, CHENG Jin¹, LIU Weiguo¹

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The metalens based on the micro-nano structure to achieve the focusing and imaging of the lightwave regulation is a front technology currently competing in international development. Aiming at the problems of near-infrared metalens polarization dependence, system complexity and low transmittance that had been reported, a near-infrared polarization-independent metalens was proposed. The low refractive index material SiO_2 was used as the basement, the high refractive index material Si cylinder was used as the phase control unit, and the designed wavelength was $1.31 \mu\text{m}$. The finite-difference time-domain method was used to analyze the lightwave regulation characteristics of the near-infrared metalens building unit, and the phase delay characteristic curve of the building unit was constructed. The influence law of the building unit period on the lightwave transmittance was discussed, the optimization design of the building unit was realized, and based on the wavefront reconstruction equation, the near-infrared polarization-independent metalens was designed. The numerical simulation results show that the phase delay and transmittance of the phase control unit are not only dependent on the radius and height of the Si cylinder, but also closely related to the unit period. Based on the analysis of the lightwave regulation characteristics for the building unit, the simulated focal length of the designed near-infrared polarization-independent metalens is $19 \mu\text{m}$, which is in good agreement with the designed value, and the lens transmittance reaches 65%. The designed metalens is not only small in size, light

收稿日期: 2019-09-04; 修回日期: 2019-10-29

基金项目: 国防基础科研项目 (JCKY2016208A002); 装备预先研究项目 (41423020111)

作者简介: 蒲欣欣 (1994-), 女, 硕士, 主要研究方向为先进光学制造。E-mail: 674703579@qq.com

通信作者: 周顺 (1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事先进光学制造方面的研究。E-mail: zsemail@126.com

in weight, but also is a plane lens. Therefore, it is easy to integrate the optical system, and it has broad application prospects in laser radar, laser night vision and other technologies.

Key words: metalens; polarization-independent; near-infrared; plane lens

引言

作为聚焦与成像器件,透镜及其光学系统在显微成像、深空探测、微纳制造等诸多技术中具有广泛应用,同时也是对地观测国家重大专项等诸多领域的核心器件。然而,传统折射式透镜因为体积大、质量重、曲面加工困难、难以突破衍射极限等缺陷,不适用于先进成像系统微型化、轻量化、集成化、高分辨率等发展需求。利用微纳结构对光的调控成为国际上竞相发展的前沿技术,基于微纳结构的超薄平面透镜为解决传统透镜存在的难题提供了一种全新的实现方案^[1]。由许多亚波长结构单元按照一定功能排列的超表面则很好地弥补了传统透镜的不足,通过对光波振幅、相位及偏振的精准调控,可实现多种光学功能,如光学聚焦、异常反射^[2]等。根据结构、材料、设计思想的不同,超表面可以被分为不同的类别,但不同超表面对光束的调控本质是一样的^[3-4],通过改变微结构的几何参数获得不同的光学响应,再根据所需相位进行排列便可以实现电磁波的调控。超表面优异的光学性能和超强的波前调控能力,使得各种超薄器件得到了更广泛的发展,在成像、显微术和光谱学领域中展现出独特的优势,现已成为研究最广泛的高集成、微型化光学元件之一^[5-6]。

国内外对不同波段下的超表面具有广泛的研究,在可见光波段,斯坦福大学通过改变天线的旋转角度控制圆偏振光的相位,实现了半波片、透镜等光学器件功能。在该波段下受到偏振片的影响,光束强度与第一级衍射级相比非常低^[7]。Capasso 课题组设计了高性能超表面透镜,透镜由二氧化钛介质棒和玻璃基底组成,解决了可见光频段材料的选择问题,但由于受到几何相位调控的限制必须使用圆偏振入射光^[8]。针对近红外波段,2018 年, Gianluca Ruffato 基于几何相位,在 1.31 μm 工作波长下设计了基底和相位调控单元都为硅的硅矩形超透镜,基底具有较大反射率,导致能量损失严重^[9]。武汉大学的郑国兴团队、东南大学崔一平小组等利用几何相位实现了不同波长下的聚焦^[10],但几何型相位超表面器件受到光束偏振态的限制,单元结构的几何参数只在某一特定偏振方向发生变化,相位调控单元也只在偏振光作用下

产生对应的相位延迟,偏振片的加入导致入射光能量被削减,能量损失较大,因此器件的能量利用率较低^[11-13]。

本文为解决在引入超透镜设计时偏振片会导致能量损失和器件整体利用率低下这一问题,由于圆柱形单元结构不具有手性,因此相同的单元结构所产生的传输相位不受偏振方向的影响,具有偏振无关性。基于此特性,在近红外 1.31 μm 工作波长下,构建了一种硅圆柱调控单元。通过时域有限差分法 (finite-difference time-domain, FDTD) 仿真了不同硅圆柱半径、不同周期的相位延迟,得到了能够完整覆盖一个周期的硅圆柱直径范围、周期大小对透过率的影响以及周期和波长的关系,基于仿真优化的单元结构完成圆形超透镜的设计,实现聚焦功能。在解决偏振片导致效率低下问题的同时,针对大部分成像目标都是偏振无关的,所设计的偏振无关超透镜在近红外成像领域中具有广阔的应用前景,如近红外摄影仪。

1 相位调控单元设计

光波的 3 个基本物理参量是实现电磁波调控的关键,实现对这些物理参量的精准控制,就可以实现对光束的灵活操控,获得所需的功能^[14-16],所构建的超表面单元结构如图 1 所示。整个单元结构由两层构成,选择具有高透过率、低折射率的 SiO_2 材料作为基底,高折射率、低吸收率的 Si 作为相位调控单元,其中 P 为单元结构周期, h 为调控单元高度, d 为调控单元直径。

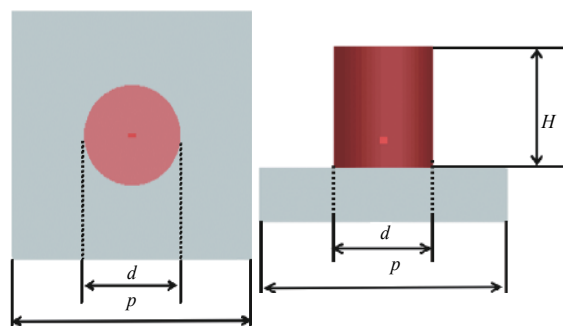


图 1 超表面单元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metasurface unit structure

利用 FDTD 对所构建的相位调控单元进行分析。相位随着调控单元高度 H 、直径 d 以及单元结构周期 P 的变化而变化, 在调控单元高度 h 和周期 P 不变的情况下, 通过改变调控单元直径达到调控的目的。直径越大, 相位延迟越大; 反之, 相位延迟越小。获得不同直径硅圆柱的相位延迟差分布图, 创建相位延迟差关于半径的拟合函数。

超表面的不同位置处所存在的微结构参数不同, 当光波经过相位调控单元, 不同位置处的相位延迟也不相同, 从而引起出射光波阵面的改变, 使入射光经该平面后具有会聚功能。平面微结构所造成的相位延迟差 $\Delta\phi$ 应满足波前重构方程, 公式如下:

$$\Delta\phi = \frac{2(f - \sqrt{x^2 + f^2})}{\lambda} + 2m\pi \tag{1}$$

式中: f 为焦距; x 为位置坐标; λ 为工作波长。通过理论计算得到的相位延迟差和每一位置处硅圆柱直径相匹配, 通过对不同直径的硅圆柱进行排列, 使出射光在所设计的焦距处实现聚焦功能。

2 相位延迟分析

硅圆柱相位调控单元的半径 r 、高度 H 、单元结构周期 P 是 3 个影响相位延迟和透过率的基本参数, 本文研究了不同参数条件下的相位延迟分布。通过 FDTD 进行仿真计算, 对单元结构参数进行优化, 得到可完整覆盖一个周期的直径范围、高度 H 和周期 P , 验证了所设计的单元结构对相位可进行精准调控。

2.1 调控单元半径 r 对相位延迟的影响

在相位调控单元高度 H 为 $0.9\text{ }\mu\text{m}$ 、单元结构周期为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的条件下, 改变硅圆柱半径, 得到不同直径所对应的相位延迟分布差, 如表 1 所示。

表 1 不同硅圆柱半径对应的相位延迟差
Table 1 Phase delay difference corresponding to different radius of silicon cylinder

硅圆柱半径 $r/\mu\text{m}$	$\Delta\phi/\pi$	硅圆柱半径 $r/\mu\text{m}$	$\Delta\phi/\pi$
0.1	-2.061 76	0.16	-0.888 38
0.11	-1.942 13	0.18	-0.431 29
0.12	-1.781 7	0.2	-0.187 88
0.14	-1.316 78	0.22	0

表 1 所示的是不同直径硅圆柱所对应的相位延迟差大小, 当硅圆柱半径为 $0.1\text{ }\mu\text{m}\sim 0.22\text{ }\mu\text{m}$, 相位延迟差实现了 $0\sim 2\pi$ 的相位覆盖, 说明相位调控

单元直径的变化可对光波进行有效调控, 确定了相位调控单元的取值范围, 该硅圆柱半径所对应的相位延迟差分布图如图 2 所示。

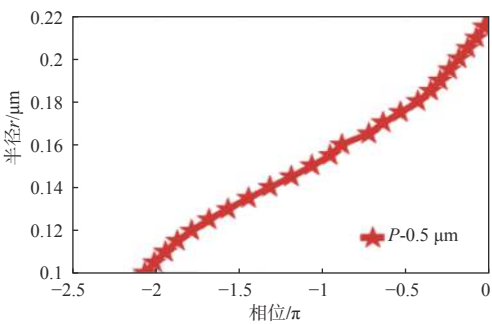


图 2 不同半径对应的相位延迟差分布图

Fig. 2 Distribution of phase delay difference corresponding to different radius

如图 2 所示, 横坐标为相位延迟大小, 纵坐标为硅圆柱半径, 随着半径 r 的变化, 相位也发生着变化, 在所设计的半径范围内, 相位延迟完整覆盖了一个周期。单元结构周期、高度任意一个发生改变都会使相位延迟发生变化, 相位延迟随着硅圆柱高度的增大而增大, 当硅圆柱直径改变时, 有效折射率的变化引起所对应相位发生变化, 从而使不同直径的硅圆柱相位延迟不同。硅圆柱高度的增大会使单元结构的深宽比增大, 从而增加加工难度, 同时, 硅圆柱高度越大, 所设计的单元结构的失效点也会增多, 使该直径所对应的相位调控单元失去相位调控的能力, 无法实现完整周期的相位调控。

2.2 调控单元高度 H 对相位延迟的影响

相位调控单元的硅圆柱半径 r 为 $0.1\text{ }\mu\text{m}\sim 0.22\text{ }\mu\text{m}$ 、单元结构周期 P 为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的条件下, 选取硅圆柱高度为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.9\text{ }\mu\text{m}$ 这 3 组数据进行仿真, 得到不同高度所对应的相位延迟分布, 如表 2 所示。

表 2 不同高度对应的相位延迟差
Table 2 Phase delay difference corresponding to different heights

硅圆柱高度 $H/\mu\text{m}$	半径 $r/\mu\text{m}$	相位延迟差 π
0.8	0.1~0.22	-1.711 51
0.85	0.1~0.22	-1.959 14
0.9	0.1~0.22	-2.061 76

从表 2 可以看出, 为获得完整的相位延迟覆盖, 在硅圆柱半径 r 、单元结构周期 P 一定的条件

下,适当地增加硅圆柱高度,达到可实现 $0\sim 2\pi$ 完整周期相位覆盖的目的。改变硅圆柱的高度可以对相位进行调控,不同的高度值对应不同的相位延迟,但考虑到加工问题,高度的变化会增加加工难度,不利于器件的批量化生产。将高度作为恒定值,只通过硅圆柱半径 r 改变来调控相位,对 3 组硅圆柱高度所得到的相位分布进行对比分析,选择 $0.9\ \mu\text{m}$ 作为最优的高度值。

2.3 单元结构周期 P 对相位延迟和透过率的影响

为保证超透镜具有良好的透过率和聚焦效果,研究了不同周期对相位延迟和透过率的影响。在硅圆柱高度 H 和半径 r 保持不变的情况下,选取单元结构周期分别为 $0.8\ \mu\text{m}$ 、 $0.6\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$, 3 组不同周期条件下的相位延迟分布如图 3 所示。

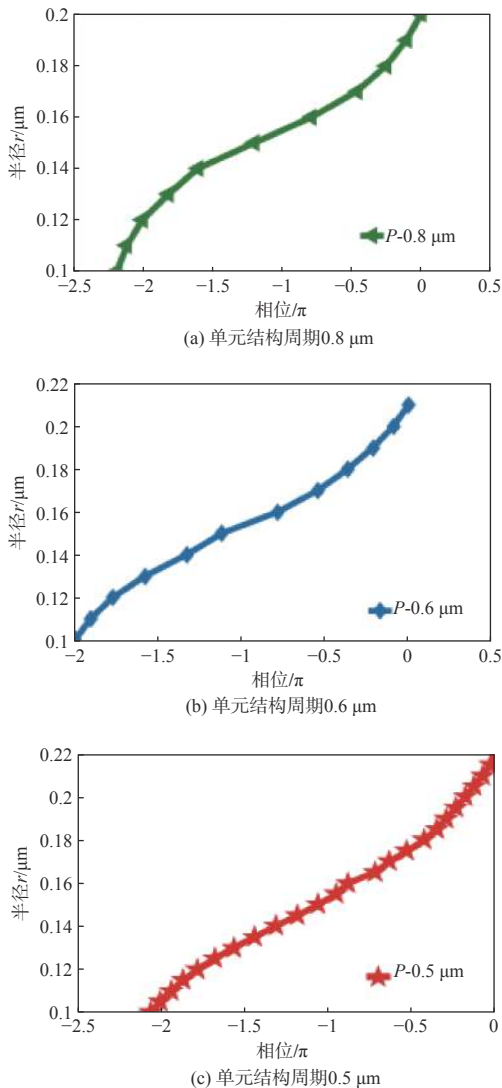


图 3 不同周期对应的相位延迟差分布

Fig. 3 Distribution of phase delay difference corresponding to different periods

由图 3 可以看出,相位延迟差随着硅圆柱半径的增大而增大,且都实现了 $0\sim 2\pi$ 的相位覆盖,但是不同周期所对应的硅圆柱半径范围不同,周期的减小导致硅圆柱半径取值范围增大。图 3 中曲线出现了不平滑节点,这是由于当周期为定值时,2 个硅圆柱之间的距离会影响硅圆柱的相位延迟,当相邻硅圆柱之间的距离过大时,光波进入微结构会直接融空隙中透射,使硅圆柱无法进行相位调控。当相邻硅圆柱之间的距离过小时,易受到光场之间的相互作用,无法获得所需要的相位延迟,最终影响超透镜的聚焦效果和透镜整体的透过率。因此,根据不同单元结构周期所形成的超透镜的透过率来选择合适的周期大小,在保证良好透过率的前提下得到最优周期值。

表 3 所示为根据时域有限差分法计算得到的几组不同周期对应的透过率大小及波长和周期的比值。通过 3 组数据的对比可以发现,在深宽比和完整周期相位调控的条件下,单元结构的周期越小,超透镜的整体透过率越高。超透镜工作波长不同,周期的大小也不一样,当单元结构过大,接近于一个波长的时候,入射光将直接从硅圆柱之间出射,所设计的硅圆柱结构失去相位调控的能力,无法对光波进行调控改变其出射光波前。当波长和周期的比值越大时,单元结构周期越小,所选取的硅圆柱直径也越小,只能通过增加硅圆柱的高度达到一个完整周期的相位调控,过大的高度值和较小的硅圆柱直径使得深宽比增大,加工工艺受到限制。

表 3 不同周期对应的透过率

Table 3 Transmittance corresponding to different periods

单元结构周期 $P/\mu\text{m}$	λ/P	透过率 $T/\%$
0.8	1.637 5	58
0.6	2.183 3	61.6
0.5	2.62	65

3 透镜设计及聚焦性能

通过对硅圆柱半径、高度和单元结构周期的优化,得到硅圆柱单元结构的最优参数值,基于最终的优化参数对半径 r 和相位延迟差进行拟合,如图 4 所示。图 4 中黄色、绿色、紫色 3 条曲线分别为对相位延迟差进行二次、三次、四次拟合得到的半径 r 关于相位延迟差的拟合方程。通过

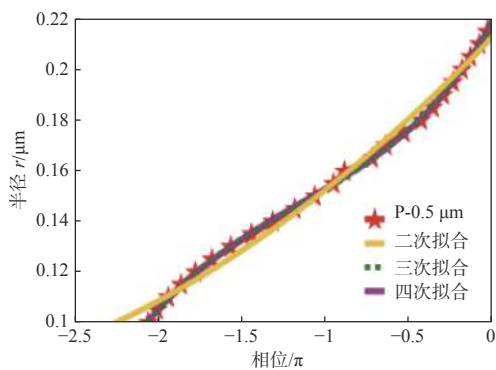


图 4 相位延迟差关于半径 r 的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of phase delay difference with respect to radius r

对比, 选择四次拟合的结果作为最优拟合参数, 拟合方程为

$$y = 0.0025x^4 + 0.028x^3 + 0.076x^2 + 0.12x + 0.22 \quad (2)$$

根据(2)式可计算得到相位延迟差所对应的硅圆柱半径 r , 其中 y 为硅圆柱的半径, x 为理论计算的相位延迟差。对硅圆柱半径和相位延迟差进行分析, 结合公式(1)得到每一位置处所需相位延迟差的大小和半径, 从而完成超透镜的设计。

所设计的超透镜整体示意图如图 5 所示。透镜半径为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 焦距为 $20\text{ }\mu\text{m}$, 对半径不同的硅圆柱进行排列, 获得实现聚焦功能所需要的微结构阵列。当平面波垂直入射至基底, 经过微结构后发现出射光在 $19\text{ }\mu\text{m}$ 处发生了会聚现象, 如图 5 所示。

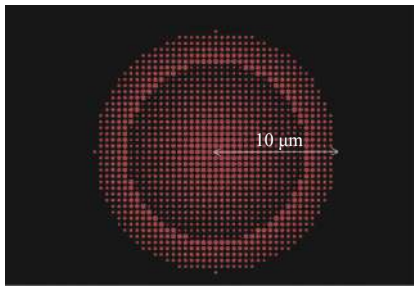
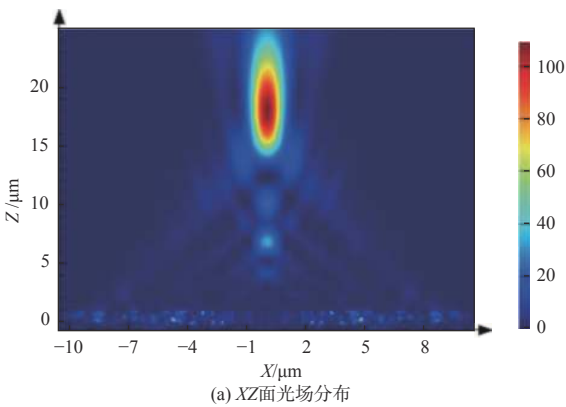


图 5 超透镜整体示意图

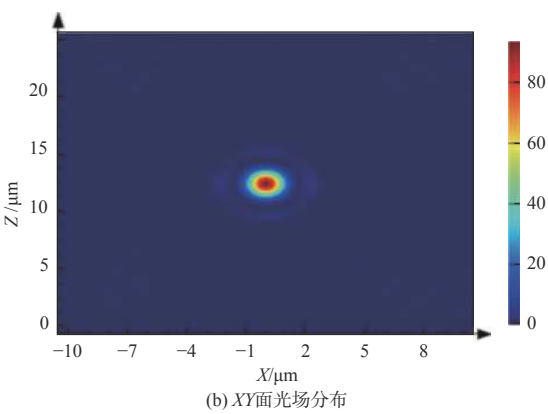
Fig. 5 Overall schematic diagram of metalens

图 6 为模拟圆形超透镜的聚焦示意图。图 6(a) 为 XZ 面的光场分布情况, 可以看到所设计的超透镜实现了聚焦, 焦距为 $19\text{ }\mu\text{m}$, 与设计的焦距未完全匹配, 这是因为相邻柱子之间耦合作用导致焦移现象发生。图 6(b) 为 XY 面的光场分布情况, 入射光经过硅圆柱结构后会聚到一点, 实现了聚焦功能, 焦点半高宽 $\text{FWHM}=1.4$, 超透镜的整体透过率达到 65%。由图 6 可以看出所设计的单元结

构不受偏振光的影响, 极大地增加了器件的利用率。



(a) XZ 面光场分布



(b) XY 面光场分布

图 6 仿真聚焦示意图

Fig. 6 Schematic diagram of simulation focusing

4 结论

基于有效折射率理论, 利用圆柱形单元结构对偏振不敏感, 设计了一种偏振无关的硅圆柱超透镜, 其工作波长为近红外 $1.31\text{ }\mu\text{m}$, 通过仿真计算, 对硅圆柱半径、高度和单元结构周期进行了优化。从仿真结果可以看出, 在不考虑偏振光的情况下, 所设计的单元结构实现了光波的有效调控, 对于垂直入射的平面波, 硅圆柱单元组成的超表面结构在透射场中实现聚焦, 且透过率达到 65%。本文所设计的偏振无关超透镜不仅实现了光的会聚, 而且不受偏振态的影响, 使器件的利用效率有所提高。根据所设计的器件的工作波长, 其在精细激光束、激光雷达以及激光夜视仪等领域也具有重要应用。

参考文献:

[1] LEE S H. Diffractive and miniaturized optic [M]. San

- Diego, California: Society of Photo Optical, 1994.
- [2] YU N, 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] AIETA F, GENEVET P, KATS M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [4] LI Xiong, MA Xiaoliang, LUO Xiangang. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 255-275.
李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, 44(3): 255-275.
- [5] HUANG Xinchao, FU Quanhong, ZHANG Fuli. Research advances of metasurface[J]. *Aero Weaponry*, 2016(1): 28-34.
黄新朝, 付全红, 张富利. 超表面研究进展[J]. *航空兵器*, 2016(1): 28-34.
- [6] FAN Qingbin, XU Ting. Research progress of imaging technologies based on electromagnetic metasurfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(14): 121-132.
范庆斌, 徐挺. 基于电磁超表面的透镜成像技术研究进展[J]. *物理学报*, 2017, 66(14): 121-132.
- [7] LIN D, FAN P, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [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] RUFFATO G, CAPALDO P, MASSARI M, et al. Pancharatnam–berry optical elements for spin and orbital angular momentum division demultiplexing[J]. *Photonics*, 2018, 5(4): 46.
- [10] ZHENG Guoxing, Lyu Liangyu, LI Song, et al. Accurate controlling of optical phase based on metasurfaces[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(2): 153-158.
郑国兴, 吕良宇, 李松, 等. 基于超表面材料的光波相位精密操控新技术[J]. *应用光学*, 2017, 38(2): 153-158.
- [11] MAGUID E, YULEVICH I, YANNAI M, et al. Multifunctional interleaved geometric-phase dielectric metasurfaces[J]. *Light, Science & Applications*, 2017, 6(8): e17027.
- [12] PU Mingbo, LI Xiong, MA Xiaoliang, et al. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, 1(9): e1500396.
- [13] LUO Xiangang, PU Mingbo, LI Xiong, et al. Broadband spin Hall effect of light in single nanoapertures[J]. *Light, Science & Applications*, 2017, 6(6): e16276.
- [14] DONG D S, YANG J, CHENG Q, et al. Terahertz broadband low - reflection metasurface by controlling phase distributions[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(10): 1405-1410.
- [15] WU P C, ZHU W M, SHEN Z X, et al. Microfluidic metasurfaces: broadband wide - angle multifunctional polarization converter via liquid - metal - based metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(7): 1600938.
- [16] SONG E Y, LEE G Y, PARK H, et al. Compact generation of airy beams with C - aperture metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(10): 1601028.