

面向近红外成像超透镜的设计与仿真

王 杰¹, 黎相孟^{1,2}, 吉卓琪¹, 祝锡晶¹

(1. 中北大学 先进制造技术山西省重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要:由亚波长单元结构组成的超表面是近年来平面光学透镜的重点研究对象,而由超表面组成的平面超透镜与传统透镜相比,在相位调控、偏振操控、全息成像、负折射率隐身等领域有显著优势。鉴于平面超透镜的微型化、轻量化和易集成化等方面的优势,而传输型相位调控原理更加适于近红外波段的应用,且对入射光偏振态无特殊要求,本文采用时域有限差分方法(FDTD)设计并优化了一种硅基的近红外波段的超透镜。所设计的超透镜焦距为15 μm ,直径为20 μm ,所达到的数值孔径(NA)为0.56,聚焦效率为68.3%,适用于所有入射偏振且在目标波长为700 nm范围内聚焦性能优良。本文研究结果为实现近红外超透镜轻薄化和平整化提供了新思路,有望优化红外探测器镜头的设计,提高红外探测的效率。

关键词:超透镜;成像;高效;红外探测

中图分类号:TN214 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.01.018

Design and simulation of metalens for the NIR imaging

WANG Jie¹, LI Xiang-meng^{1,2}, JI Zhuo-qi¹, ZHU Xi-jing¹

(1. Shanxi Provincial Key Laboratory of Advanced Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University of China, Xi'an 710049, China)

Abstract: Metasurface composed of sub-wavelength metastructures have been the focus of research on plane optical lens in recent years, while plane metalens composed of metasurfaces has significant advantages in phase regulation, polarization control, holographic imaging, and stealth with negative refractive index. In view of the advantages of miniaturization, lightweight and easy integration of planar metalens, and the transmission-based phase regulation principle is more suitable for the application of the near-infrared band, and there is no special requirement for the incident light polarization state. In this paper, a silicon-based metalens for the near-infrared band is designed and optimized using the finite difference time domain method (FDTD). The designed metalens has a focal length of 15 μm , a diameter of 20 μm , a numerical aperture (NA) of 0.56, and a focusing efficiency of 68.3%, which is suitable for all incident polarizations and has excellent focusing performance within the target wavelength range of 700 nm. The results of this paper provide new ideas for the thinning and flattening near-infrared metalens, which are expected to optimize the design of infrared detector lens and improve the efficiency of infrared detection.

Keywords: metalens; imaging; high-efficiency; infrared detection

作者简介:王 杰(1999-),硕士研究生,主要从事光学超表面方面的研究。E-mail:wj1458643531@163.com

通讯作者:黎相孟(1985-),博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为微纳米制造及其应用。E-mail:xmli123@nuc.edu.cn

收稿日期:2022-07-05

1 引言

由超构表面组成的平面光学透镜是近些年来研究的热门课题之一。超构表面是由亚波长尺寸的单元结构按一定规律排列组成^[1-4],此结构通过更改相关参数可以实现对光波的精准调控。而由超构表面组成的平面超透镜更是在相位调控,偏振操控,全息成像,负折射率隐身等多方面展示出极大的发展潜力^[5-9]。超透镜的优点在于实现多种调控的同时,也达到了轻量化、微型化、易集成等特点,这意味着其投入在实际应用中变得越来越成熟。哈佛大学 Capasso 团队设计出基于二氧化钛的消色差超表面透镜,针对可见光波段聚焦效率最高达 86%,但基于几何相位调控原理只能实现圆偏振态的入射光聚焦^[10]。加州理工学院 Faraon 课题组提出 MEMS 可调节超透镜实现了 40° 视场调控的三维成像^[11],并利用偏振相位可调的亚波长空间分辨率全息图谱使光学传输效率从 72% 提高到 97%^[12]。新加坡国立大学报道了超材料红外光谱仪,通过集成超表面光源、传感器、滤波器和探测器件,实现了便携式环境监测及生物传感器^[13]。武汉大学郑兴国教授设计了一种光学超材料的表面织构设计、制造与应用表征,实现了光学防伪和全息成像等功能^[14]。上述研究充分表明,超表面透镜在光学元件设计领域具有广泛研究前景。

近红外成像技术是当今社会快速发展的一项高新技术,通过比较待检测对象与背景面板之间的光线强度的差异,来实现对目标的探测识别和轨迹跟踪。近红外成像技术在军事防务、生物医疗、成分检测等领域发挥着不可替代的作用。但是在器件的理论设计与实际制备过程中一直存在差异性。针对器件设计应具备轻量化、低成本、易集成的发展趋势,结合硅基超透镜微型、可集成并且支持 CMOS 工艺可批量生产的特点,本文设计了一款近红外波段的偏振不敏感超透镜。利用有限元数值仿真软件 FDTD Solution 对超表面单元结构的参数进行优化扫描,并分析得出最优解。由具有最优参数的单元结构形成的超透镜实现聚焦效率为 68.3%,数值孔径(NA)为 0.56。研究结果为近红外波段超透镜的高效平面化提供了一定的理论依据。

2 设计原理

在超构透镜的设计中,目前成熟且主流的相位调控原理有传输型相位调控和几何型相位调控,尽管几何相位型在可见光波段的消色差、相位调控能力出众,但由于其对圆偏振态入射光的要求,故本文选择在短波红外应用成熟且对入射光偏振态无特殊要求的传输型相位调控原理。

传输型相位调控超表面对光波的相位调控是通过光波在其中传播时所产生的光程差来实现的,具体方式是通过调节各周期内单元结构体的占空比来改变结构体的等效折射率,从而达到相位调控的目的^[15-17]。光波在传输过程中积累的相位差 ϕ 满足以下表达式:

$$\phi = k_0 n d \quad (1)$$

其中, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 表示自由空间的波矢量; λ 为入射波在真空中的波长; n 为介质的等效折射率; d 为传播距离。传统光学透镜通过增加 d 来扩大相位调控范围,其使用曲面外形既增加了加工难度也不利于集成制造。而超透镜在不改变透镜厚度 d 的基础上通过调节等效折射率 n 来实现相位调控,这使得透镜制作实现平面化、批量化成为可能。

结合短波红外波段对材料的要求,本文选择基底材料为高折射率且加工技术成熟的非晶硅,衬底材料为低折射率高透过率的二氧化硅。图 1 为超透

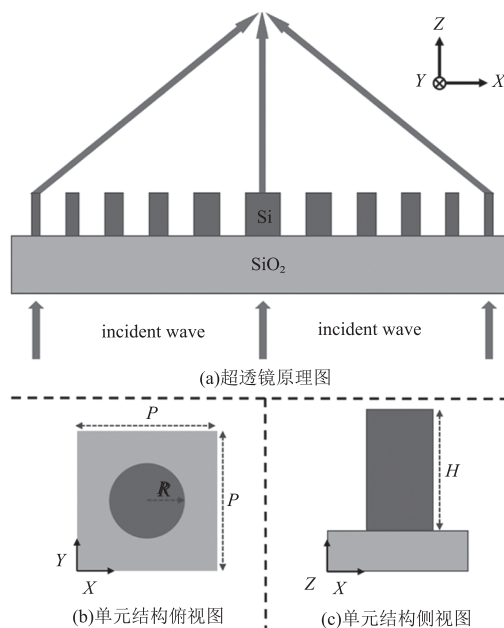


图1 超透镜工作原理图

Fig. 1 The working principle of the metalens

镜工作原理图及单元结构参数示意图。图 1 中(a)所示,超透镜表面由若干单元结构按照一定规律排列而成,入射的平面波沿 Z 轴由衬底位置射入,经过基底材料时发生相位突变,平面波变为球面波最终实现焦点处汇聚。图 1 中(b)和(c)分别为单元结构的俯视图和侧视图。为实现偏正不敏感透镜设计,单元结构应采用对称结构,本文对非晶硅采用加工方式简单、易高效制造的柱状结构;对衬底结构选用易编程操控的方形结构。单元结构的周期为 P ,纳米硅柱的半径为 R ,高度为 H ,这三个参数是影响单元结构相位突变和透过率的主要因素,接下来会经过仿真得到最优参数范围。

3 仿真设计

本文以下仿真步骤和参数获取均基于加拿大公司开发的光学仿真模拟软件 FDTD Solution,其分析精度高,界面美观简单,是业内公认的专业光学模拟软件。仿真分为单元结构优化和超透镜整体设计两部分。

3.1 单元结构的设计与优化

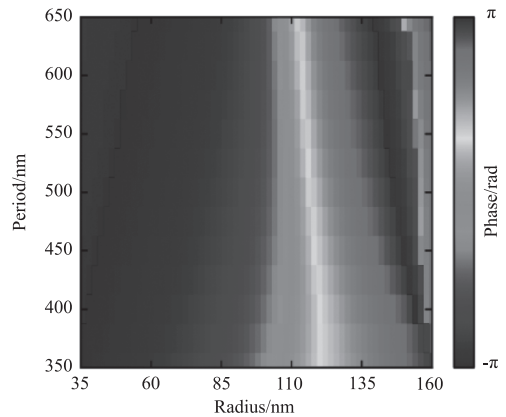
在软件中建立三维单元结构仿真模型,添加光源并设置入射平面光波长为 $1\mu\text{m}$,入射方向为沿 z 轴正方向,偏振方向为 x 方向,入射角度和起始相位均设置为 0,幅值为 1,平面波类型选择周期波;添加网格精度为六的仿真区域并设置各边界条件,为提高仿真效率 x 方向选择反对称条件, y 方向选择对称条件, z 方向选择吸收电磁波的完美匹配层(PML);添加点监视器作为单元结构的相位监视器;添加 $x-y$ 面监视器来获取透过率的数据。

首先在预定半径范围内采用固定单元结构的高度 H 寻找周期 P 的最佳值,然后利用所得最优 P 值重新扫描高度 H ,得到高度的最佳值。初始扫描时设置 $H = 0.5\lambda = 500\text{ nm}$,半径 R 扫描范围 $35 \sim 160\text{ nm}$ 。由奈奎斯特采样定律可知周期 P 需要满足下式:

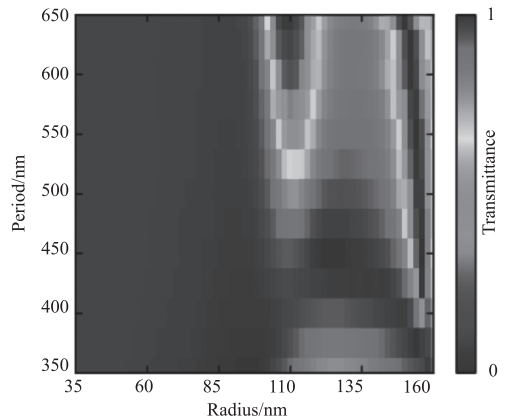
$$\frac{\lambda}{2 \times n_{\text{substrate}}} < P < \frac{\lambda}{n_{\text{substrate}}} \quad (2)$$

其中, λ 为目标波长; $n_{\text{substrate}}$ 为衬底材料的折射率,故仿真周期 P 的扫描范围设置成 $350 \sim 650\text{ nm}$,每 25 nm 取一个扫描点,共十三个扫描点。扫描所得相位变化图谱和透过率图谱如图 2(a)和(b)。从

相位图(a)中观察可知, $H = 500\text{ nm}$ 时,在规定半径变化范围内,随着周期的增大,均能实现 $0 \sim 2\pi$ 的全相位调控,但能实现全相位调控的有效半径范围在减小;从透过率图(b)中可以看出,在 $P > 500\text{ nm}$ 时会有光栅衍射级次出现外,在 $350\text{ nm} < P < 500\text{ nm}$ 且 R 为有效范围内时,单元结构的透过率均满足要求。 P 值越大加工难度越小,但透过率越差,同时在排列超表面时由于间隔较宽实际聚焦效果相对较差,综合考虑本文选定最佳周期 $P = 400\text{ nm}$ 。接下来,设定单元结构的周期为最优值,即在 $P = 500\text{ nm}$ 情况下,扫描纳米柱高度的最佳值,根据尽量降低深宽比的要求,设定 H 初始扫描范围在 $350 \sim 700\text{ nm}$,每 25 nm 取一个扫描点,共十五个扫描点。扫描结果如图 2(c)和(d),由相位图(c)可知,在预设半径变化范围内, $H > 400\text{ nm}$ 均可实现 $0 \sim 2\pi$ 全相位全相位调控,但 $H > 475\text{ nm}$ 时存在相位不稳定越变情况,由透过率图(d)可以看出, $H < 425\text{ nm}$ 时存在光栅衍射级次情况。 H 值越大,固定半径变化范围得情况下透镜的深宽比越高,加工难度越大,综合考虑最终选定 $H = 450\text{ nm}$ 。



(a)半径-周期-相位



(b)半径-周期-透过率

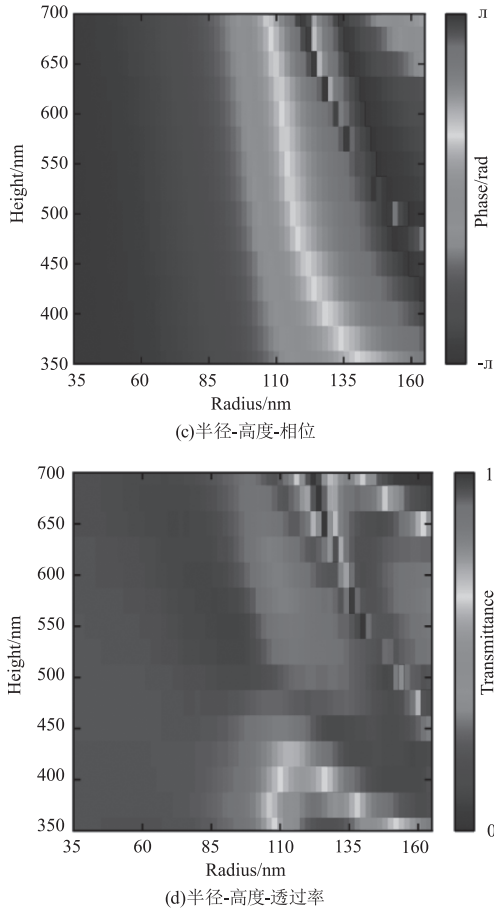


图2 相位透过率变化图

Fig. 2 Phase transmittance change diagram

经过优化单元结构的参数变化范围如图3所示,在周期 $P = 400$ nm、高度 $H = 450$ nm,半径 $R = 35 \sim 155$ nm时就可以实现 $0 \sim 2\pi$ 的相位变化,对应参数下的单元结构平均透过率为 95.69 %,最大深宽比为 6.4。

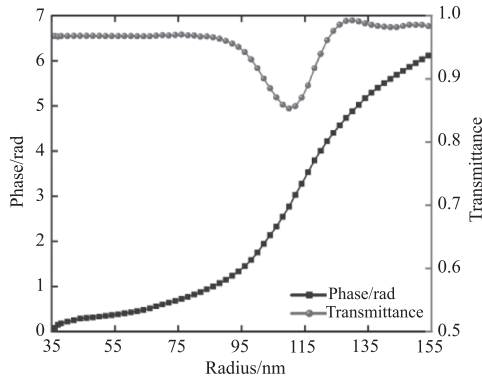


图3 单元结构优化结果

Fig. 3 Results of cell optimization structure

3.2 超透镜的设计与仿真

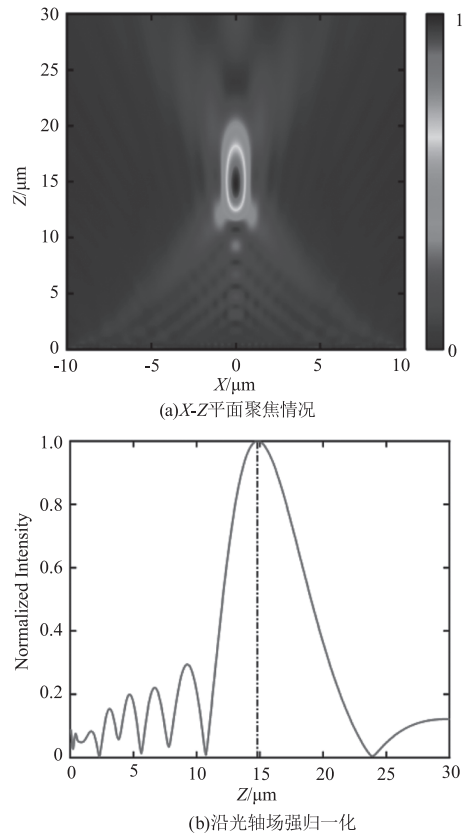
超透镜表面任意位置的相位分布函数 $\phi(x, y)$ 满足下式:

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f) \quad (3)$$

式中, λ 表示超透镜的工作波长; f 表示焦距; 本次设计超透镜焦距为 $15 \mu\text{m}$, 透镜直径为 $20 \mu\text{m}$, 数值孔径 0.56, 通过 $\phi(x, y)$ 求得目标相位, 再由图3中相位数据拟合出纳米柱半径与相位的关系式。在 FDTD Solution 中编写程序对半径不同的硅纳米柱进行排列, 获得可以实现聚焦功能的超透镜模型。在衬底侧设置 x 方向偏振的全场散射光源沿 Z 轴正向射入, 仿真区域边界设置 $x_{\min}$ 和 $y_{\min}$ 为 PML, $x_{\max}$ 选择对称条件, $y_{\max}$ 选择反对称条件, z 方向设置为 PML。

4 讨论与分析

所设计超透镜聚焦结果如图4所示, 图4(a)所示为 $y = 0$ 时 $x-z$ 面的能流分布情况, 图4(b)为沿光轴方向的能流归一化分布图, 可以看到实际焦距为 $14.85 \mu\text{m}$, 比设计焦距相差 $0.15 \mu\text{m}$, 焦点偏移率为 1 %。产生偏移的原因有两点: 一是模拟设计超透镜相位的离散分布与理想透镜相位的连续分布; 二是相邻单元结构之间存在的耦合作用。图4(c)所示为焦平面内能流分布情况, 图4(d)为焦平面上 $y = 0$ 处沿 x 轴的能流归一化分布图。焦点的半高全宽 FWHM 为 $0.996 \mu\text{m}$ 。



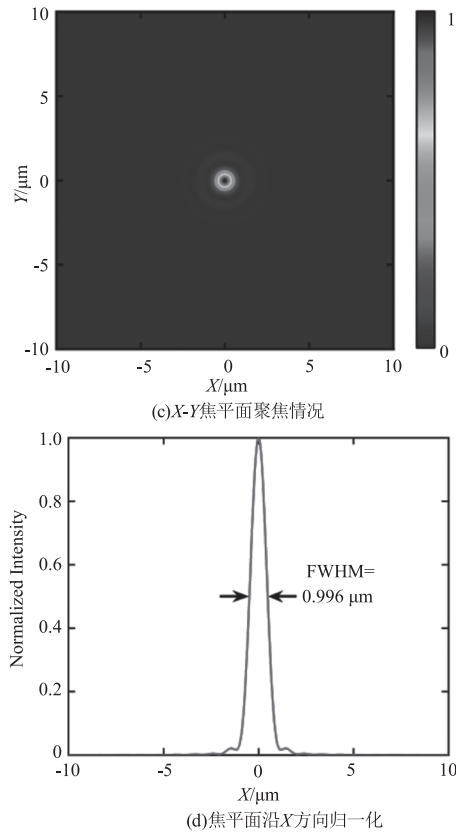
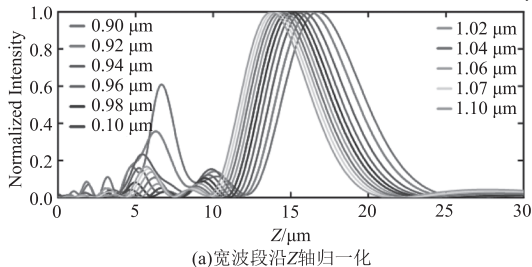


图4 超透镜聚焦场强分布图

Fig. 4 Metalens focused field strength distribution diagram

对超透镜聚焦效率的定义为在焦平面上以焦点为中心,三倍半高全宽为直径的圆形区域内能量与总入射能量的比值,通过计算超透镜的聚焦效率为68.3%。

本文同时研究了所设计超透镜对宽窄波段入射光的聚焦情况如图5所示,图5(a)展示了超透镜在宽波段0.9~1.1 μm工作时能流沿Z轴方向的归一化分布图,可以看出除个别低波段(0.9 μm、0.92 μm)外,其余波段均聚焦正常,并由此得到各波段的焦点位置情况如图5(b)所示。可以看出入射光波长与焦距呈负相关,且随着入射光波长的增加,焦距呈递减趋势,焦点位置均在±2 μm内波动。图5(c)和(d)分别为超透镜在窄波段0.95~1.05 μm工作时能流分布图和焦点位置情况。显然超透镜在窄波段聚焦效果很好,焦点位置波动范围仅为±0.7 μm。



(a)宽波段沿Z轴归一化

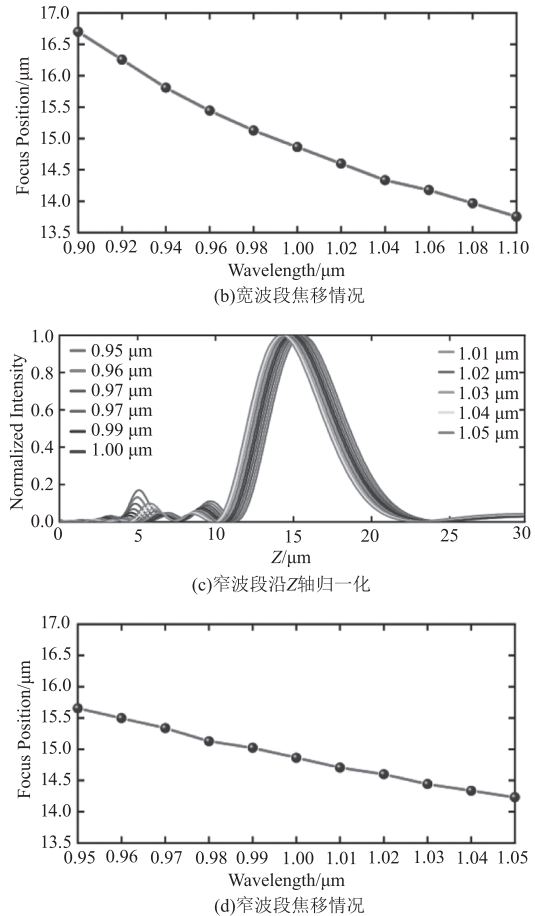


图5 超透镜在宽窄波段的聚焦特性

Fig. 5 Focus characteristics of the metalens in a wide and narrow band

5 结论

本文理论研究并数值模拟了一种硅基偏振不敏感近红外超透镜,通过对单元结构的周期 P 、纳米柱高度 H 、半径 R 参数的扫描优化,分析得出其对光波相位、透过率的影响并寻得最优解。工作波长为1 μm的超透镜焦距为15 μm,直径为20 μm,数值孔径(NA)为0.56,聚焦效率为68.3%。通过对超透镜在目标波长±700 nm的色散特性研究,发现所设计透镜具有负相关散射特性,也验证在该波段范围内具有良好的聚焦效果。接下来将针对超透镜的聚焦效率、宽带消色差等问题进一步研究,为红外超透镜实现高效聚焦平面化进一步探索。

参考文献:

- [1] Meng C, Thrane PCV, Ding F, et al. Dynamic piezoelectric MEMS-based optical metasurfaces[J]. Science Advance, 2021, 7(26): 5639.
- [2] 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.
- [3] Zhao R, Sain B, Wei Q, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 95.
- [4] Zhao M, Chen M K, Zhuang Z-P, et al. Phase characterisation of metalenses[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 52.
- [5] Xie Y-Y, Ni P-N, Wang Q-H, et al. Metasurface-integrated vertical cavity surface-emitting lasers for programmable directional lasing emissions[J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(2): 125 – 130.
- [6] Dorrah A H, Rubin N A, Zaidi A, et al. Metasurface optics for on-demand polarization transformations along the optical path[J]. Nature Photonics, 2021, 15(4): 287 – 296.
- [7] Bouchal P, Dvůřák P, Babocký J, et al. High-resolution quantitative phase imaging of plasmonic metasurfaces with sensitivity down to a single nanoantenna[J]. Nano Letters, 2019, 19(2): 1242 – 1250.
- [8] Moon S W, Kim Y, Yoon G, et al. Recent progress on ultrathin metalenses for flat optics[J]. iScience, 2020, 23(12): 101877.
- [9] Joo W J, Kyoung J, Esfandyarpour M, et al. Metasurface-driven OLED displays beyond 10,000 pixels per inch[J]. Science, 2020, 370(6515): 459 – 463.
- [10] Wei Ting Chen, Alexander Y. Zhu, et al. Flat optics with dispersion engineered metasurfaces[J]. Nature Reviews, 2020, 5(8): 604 – 620.
- [11] Ehsan Arbabi, Amir Arbabi, Seyedeh Mahsa Kamali, et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. Nature Communications, 2018, 9: 812.
- [12] Amir Arbabi, Yu Horie, Mahmood Bagheri, 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.
- [13] Jinxuan Wei, Zhihao Ren, Chengkuo Lee. Metamaterial technologies for miniaturized infrared spectroscopy: light sources, sensors, filters, detectors, and integration[J]. J. Appl. Phys., 2020, 128: 240901.
- [14] Guoxing Zheng, Holger Muehlenbernd, Mitchell Kenney, et al. Metasurface holograms reaching 80 % efficiency [J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308 – 312.
- [15] Dong Yuan, Zhong Qize, Zheng Yongjian, et al. Progress in wafer-level metasurface-based flat optics(invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10): 1024002. (in Chinese)
董渊, 钟其泽, 郑勇剑, 等. 晶圆级超构表面平面光学研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(10): 1024002.
- [16] Jung C, Kim G, Jeong M, et al. Metasurface-driven optically variable devices [J]. Chem. Rev., 2021, 121(21): 13013 – 13050.
- [17] Deng Sanyong, Yue Song, Zhang Dongliang, et al. Design of solid immersion infrared metalens[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(3): 20210360. (in Chinese)
邓三泳, 岳嵩, 张东亮, 等. 固体浸没式红外超表面透镜设计[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 20210360.