材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023071801

基于半嵌入结构的超透镜共聚焦特性

肖功利[1]，陈佳宇[1]，杨宏艳[2*]，赖子凡[1]，周嗣童[1]，李海鸥[1]，刘兴鹏[1]，陈赞辉[1]

（桂林电子科技大学 1. 信息与通信学院 微电子器件与集成电路重点实验室；2. 光电工程学院，广西 桂林 541004）

摘　要： 设计了一种1∶1比例的半嵌入全介质超透镜，该透镜能够实现不同窄波段的共聚焦特性。采用时域有限差分法对不同高度和晶格常数下纳米单元的相移进行了数值分析。基于惠更斯-菲涅耳原理，构建了1环（半径为7.7 μm）和3环（半径为13.5 μm）的超透镜，并对比分析了它们的聚焦特性。在3环设计下，当波长为600 nm、线偏振光时，超透镜的焦距离设计目标偏差约为2.2%，焦点半高全宽为1.1 μm，聚焦效率达到68.28%。此外，还对650～490 nm波段内的超透镜色散进行了分析，并得到了650～550 nm波段内100 nm带宽和550～490 nm波段内60 nm带宽的恒定共聚焦焦点，这是由于焦深的存在所导致的。所设计的超透镜结构具有偏振不敏感、亚衍射极限聚焦、变焦和窄波段共聚焦的特性，在超分辨率、光路复用、彩色成像等领域具有潜在的应用价值。

关键词： 超表面；超透镜；共聚焦；传输相位；偏振不敏感；光路复用

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0889－06

Confocal Properties of Metalens Based on Semi-embedded Structure

XIAO Gongli[1], CHEN Jiayu[1], YANG Hongyan[2], LAI Zifan[1],
ZHOU Sitong[1], LI Haiou[1], LIU Xingpeng[1], CHEN Zanhui[1]

（1. Key Laboratory of Microelectronic Devices and Integrated Circuits, School of Information and Communication;
2. School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, CHN）

Abstract: In this paper, a 1∶1 semi-embedded all-medium metalens was designed, which could realize confocal characteristics of different narrow bands. The time domain finite difference method was used to analyze the phase shift of nanocrystals at different heights and lattice constants. Based on Huygens-Fresnel principle, 1-ring (7.7 μm radius) and 3-rings (13.5 μm radius) metalens were constructed and their confocal properties were compared and analyzed. Under the 3-ring design, when the wavelength was 600 nm and the light was linearly polarized, the design target deviation of the focal distance of the metalens was about 2.2%, the full width at half maximum of the focal was 1.1 μm, and the focusing efficiency reached 68.28%. In addition, the dispersion of the metalens in the band 650～490 nm was analyzed, and a constant confocal focus of 100 nm bandwidth in the band 650～550 nm and 60 nm bandwidth in the band 550～490 nm was obtained, which was caused by the presence of focal depth. The designed metalens structure has the characteristics of polarization insensitivity, sub-diffraction-limited focusing, zoom and narrow band confocal, which has potential application value in the fields of super resolution, optical multiplexing and color imaging.

收稿日期：2023－07－18.

基金项目：国家自然科学基金项目(62165004,61805053)；广西自然科学基金项目(2023GXNSFAA026108)；桂林电子科技大学研究生创新项目(2022YCXS047,2021YCXS040).

* **通信作者：**杨宏艳　**E-mail：** hyyang@guet.edu.cn

Key words: metasurfaces; metalens; confocal properties; propagation phase; polarization insensitivity; optical multiplexing

0 引言

传统的光学透镜虽然在一定程度上可以调整入射光的相位,但是其聚焦分辨率受限且尺寸较大,无法满足现代科技的需求。为了解决这个问题,研究人员开始探索利用人工亚波长单元结构进行波前调控的光学器件[1]。其中,光学超透镜具有超薄厚度、易于集成和全域光场可控等优点[2]。2011 年,Yu 等[3]首次提出了由 V 形纳米天线组成的超表面。通过改变天线的开口方向,成功实现了对圆偏振光的调制,并提出了广义斯涅尔定律来解释这一现象。随后,许多研究团队开始进一步探索和改进超表面结构,以实现更加精确和高效的波前调控。光学超透镜的应用潜力巨大,在显微成像方面,它可以提供更高分辨率和更清晰的图像;在全息光学领域,它可以实现更加真实和逼真的三维重建;在消色差方面,它可以有效地纠正色差问题,使得图像更加准确和自然[4-6]。

近年来,科学家们开始研究更加复杂和多样化的纳米结构,以进一步扩展光学超透镜的应用领域。2017 年,Khorasanineja 等[7]提出并通过实验证明了由二氧化钛(TiO_2)纳米柱和介质层制成的消色差超透镜,在可见光波段连续 60 nm 带宽上显示出恒定焦距,整个带宽内最大聚焦效率不足 22%。同年,Yang 等[8]提出了一种反射式超透镜,通过激发金表面等离子体来实现亚衍射极限聚焦。然而,由于金作为光反射材料具有非常高的金属损耗,设计的光学器件效率低。2021 年,Zhang 等[9]提出了一种基于全介质超表面的多焦点超透镜,利用超表面复用构建多个焦点,且单元结构最大深宽比为 12∶1。虽然上述超透镜已经实现了窄波段共聚焦、亚衍射极限聚焦和多焦点特性,但聚焦效率较低,并且多焦点复用和大深宽比结构的设计对实际生产是一个巨大的挑战[10]。此外,基于光偏振态控制的纵向双焦点设计[11]中加入偏振器会使系统变得复杂,不利于大规模集成。

本文提出了一种全介质 1∶1 半嵌入结构单元超透镜设计。半嵌入单元是指纳米圆柱的一半浸没在衬底中,另一半突出在空气中。根据惠更斯-菲涅耳原理[12-13],设计了 1 环(半径为 7.7 μm)和 3 环(半径为 13.5 μm)的超透镜,并对比分析了不同环数下超透镜的焦点聚焦特性,同时探究了环数对焦距的影响。通过权衡制作难度和聚焦准确性,选择了最优的构建方法。采用时域有限差分法(FDTD)分析表明:当线偏振光以 600 nm 波长入射时,3 环超透镜的透射率达到 95%,聚焦效率为 68.28%,半高全宽(FWHM)为 1.1 μm,约等于 $0.477\lambda/NA$(其中 λ 为波长,NA 为数值孔径),实现亚衍射极限聚焦[14]。在 650~490 nm 波段内,由于高阶衍射效应,超透镜在两个不同窄波段中呈现不同的焦点。然而,由于焦深(DOF)的存在,窄波段内的所有焦点都能够聚焦在一个恒定点上,从而实现共聚焦特性。此外,所设计的单元结构是各向同性的纳米圆柱,对光源偏振不敏感[15]。因此,本设计的超透镜具有窄带共聚焦[16]、偏振不敏感和亚衍射极限聚焦等特点,在光学器件领域具有重要的研究意义。

1 超透镜结构设计

1.1 设计原理

惠更斯-菲涅耳原理引入了相位梯度的概念[17],通过改变结构单元有效折射率来改变光在远场中的传播路径。在电磁场传播理论中,如果介质纳米结构的有效折射率为 n_{eff},高度为 H,入射波长为 λ,则光在均匀介质高度 H 上传播积累的相位 φ 可表示为:

$$\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}\times n_{\text{eff}}\times H \tag{1}$$

此外,超透镜在位置(x,y)处的补偿相位可表示为[18]:

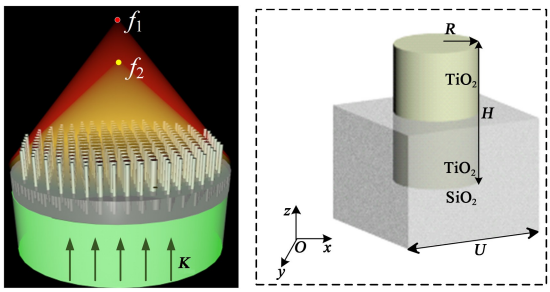
$$\varphi(x,y)=\frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{x^2+y^2+f^2}-f) \tag{2}$$

式中,x 和 y 表示纳米结构的坐标,f 表示预设焦距,λ 表示自由空间波长。为了实现有效的聚焦,需要精心设计超表面纳米柱阵列的半径来补偿多余的相位。此外,亚波长超表面可以实现远场超衍射极限聚焦。超振荡理论指出,当空间低频分量的电磁辐射波进行相干叠加时,通过合理调控各个空间频率的复振幅分布,在焦平面一定区域内可以产生快速的光场振荡。这种振荡频率可以远大于参与相干的最高空间频率分量,因此,在局部空间会产生一个

最小特征尺寸小于瑞利判据下衍射极限光斑[19-20]。

1.2　结构设计

本文构建了一种全介质超透镜，采用 SiO_2 衬底和 TiO_2 半嵌入结构单元，实现可见光波段的透射相位调制[21]。超透镜聚焦示意图如图 1(a)所示，图中红色光线波长为 650～550 nm，绿色光线波长为 550～490 nm，f_1，f_2 是各自窄波段内的共聚焦焦点。光源(绿色区域)从基底入射，波矢 $\boldsymbol{K}$ 如绿色箭头所示垂直向上。结构单元如图 1(b)所示，TiO_2 纳米柱单元按照 1∶1 半嵌入到衬底中。



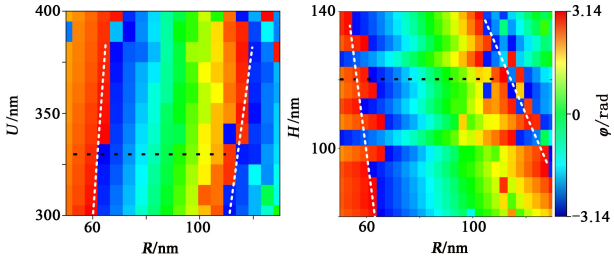
(a) 超透镜聚焦示意图　　(b) 结构单元

图 1　超透镜聚焦及结构单元示意图

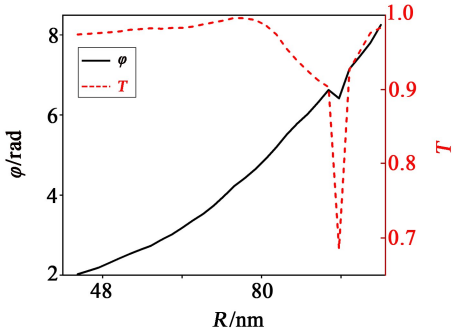
1.3　参数选择

为了获得满足 2π 相移结构单元的几何参数，本文在不同高度 H 和晶格常数 U 下扫描了结构单元的传输相位(Phase)。如图 2(a)所示，随着晶格常数的增大，能够实现覆盖 2π 相位的单元半径区间变大，如白色虚线所示。根据式(1)，当晶格常数增大时，在相同半径下，隔离波导的等效折射率变小，对突变相位的贡献也变小，因此需要更大的半径区间来实现 2π 相位覆盖。此外，随着高度的增加，电磁场在圆柱中传播时间更长，相位累积更多，从而实现 2π 相位覆盖的半径区间减小，如图 2(b)白色虚线所示。在这里选择晶格常数小、单元结构高度低、可满足 2π 相位覆盖且相位变化缓慢的结构参数 $U=330$ nm，$H=120$ nm，如图 2(a)和(b)中黑色虚线所示。综上所述，通过优化结构参数可以提高加工容错度并降低工艺要求。

在分析纳米柱结构单元的相移和透射率随着纳米柱半径变化时，本文考虑了入射波长为 600 nm 的情况。如图 2(c)所示，在半径范围为 0.043～0.104 μm 内，相移明显可以达到 2π 的相位覆盖，并且相位变化平缓，这对于实际制作非常有利。当半径为 95 nm 时，结构单元之间发生谐振，透射率 T 变为 68%。在生产制造中，纳米柱的高度与最小直径的比值越低越容易加工。



(a) 不同晶格常数下的相移　　(b) 不同高度下的相移



(c) 不同单元结构半径下的相移与透射率关系图

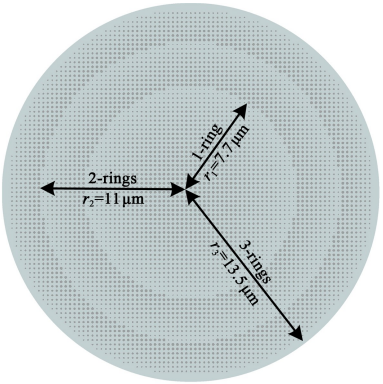
图 2　不同参数下的相移与透射率

2　结果与讨论

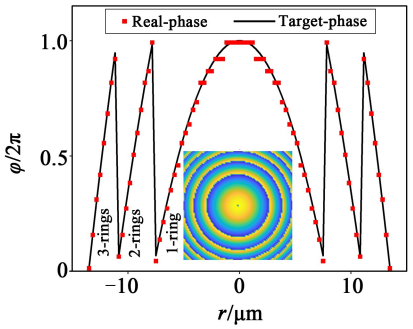
2.1　超透镜环数的选择

超透镜的俯视图如图 3(a)所示，此处环数描述的是超透镜对于实现 0～2π 相位覆盖的次数。在一个 2π 相位覆盖下，1 环超透镜半径 r_1 为 7.7 μm，以此类推，2 环超透镜半径 r_2 为 11 μm，3 环超透镜半径 r_3 为 13.5 μm。随着半径的增大，覆盖 2π 的环半径越来越小，相位变化越来越陡峭。根据公式(2)，透镜在不同位置所需的相位补偿如图 3(b)所示。曲线表示补偿相位，点表示根据单元数据库在不同位置上构建的实际相位。绝大多数实际相位点都在期望的相位曲线上，只有少数点落在实线之外。这是造成设计焦距与实际数值分析焦距有差异的原因之一。超透镜在 z 轴上的电场强度分布如图 3(c)所示，1 环超透镜的实际焦距离设计焦距目标 50 μm 相差约 10 μm，偏差太大。这是因为过少的结构单元对光的传播控制减弱和透镜尺寸太小引起的边缘衍射效应造成的。三环超透镜的仿真结果表明，焦点在 $z=48.89$ μm 处，沿 z 轴的最大电场强度距离设计目标相差 2.2%。可以发现，超透镜的环数即对应的结构单元数对设计目标有非常重要影响。过少的结构单元离设计目标偏差较大，而大量的结构单元虽然可以使设计目标准确，但却使生产制作变得困难。综合考虑，本文选择满足 3 个 2π 目

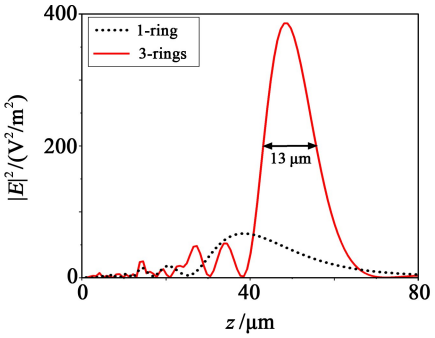
标相位，半径 $r_3=13.5\ \mu m$ 来构建超透镜，并对其色散特性进行分析。超透镜的焦深(DOF)定义为沿 z 轴电场强度峰高一半处的宽度，三环超透镜 DOF 为 13 μm。



(a) 不同环数对应的超透镜半径



(b) 实际相位与目标相位



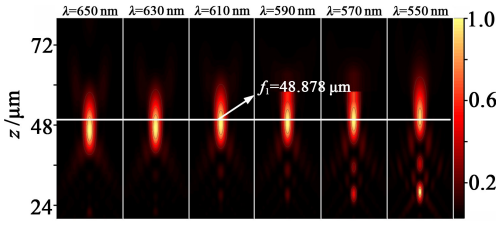
(c) 沿 z 轴的电场强度分布

图 3 不同半径下的超透镜补偿相位和电场强度分布

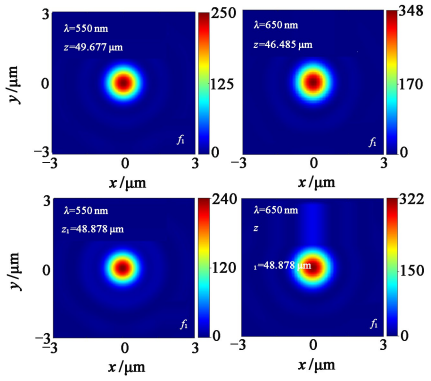
2.2 超透镜色散分析

为了研究半嵌入结构单元超透镜的色散特性，本文分析了超透镜在不同入射波长条件下 x-z 平面和 x-y 平面的电场强度分布。由于色散的存在，不同波长的光线在透镜中的折射角度不同，从而导致不同波长的光线在透镜后的聚焦位置也不同。因此，超透镜的焦距会随着波长的变化而发生变化，即焦距与波长之间存在一定的关系。具体而言，超透镜的焦距随波长的增大而减小，即焦距与波长呈反比关系。总体而言，超透镜的色散主要由两个方面原因引起。一方面是不同波长复振幅在超表面亚波长结构引起的响应造成的色散[22]；另一方面是离开超表面后光波在空间中由于随着波长改变而产生的传播波矢造成的色散。要消除色散通常需要通过结构和材料的互补色散来实现[23]。然而，由于不同波长在空间中以不同的波矢传播，超透镜的色散无法完全消除。由于焦点深度(DOF)的存在，在各自窄波段内，超透镜可以将光聚焦到恒定焦距位置，这被视为窄波段的共聚焦特性。需要注意的是，超透镜的色散与常规透镜有所不同。常规透镜的色散一般是正的，即波长较长的光线聚焦位置较远，波长较短的光线聚焦位置较近；而超透镜的色散是负的，即波长较长的光线聚焦位置较近，波长较短的光线聚焦位置较远。如图 4(a)和(c)所示，在各自窄波段内，焦距随着波长增加而减小。

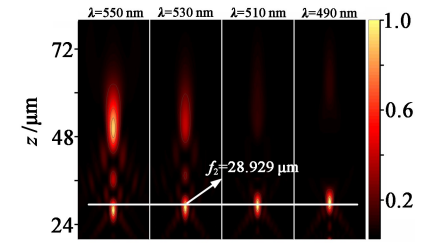
此外，为了表征在整个焦深范围内焦点都具有良好共聚焦特性，如图 4(b)和(d)所示，本文分析了各自窄波段二端波长处实际焦距(上行)和恒定焦距(下行)处焦点的 x-y 平面电场强度分布。超透镜在窄波段二端波长实际焦距和恒定焦距处焦点的 x-y 平面电场强度分布基本上没有太大变化，并且焦点强度对称，具有良好的分辨率。在波长为 650～550 nm 的窄波段中，所有焦点都可以在 $f_1=48.87\ \mu m$($\lambda=600$nm时的焦距)处检测到，并且焦



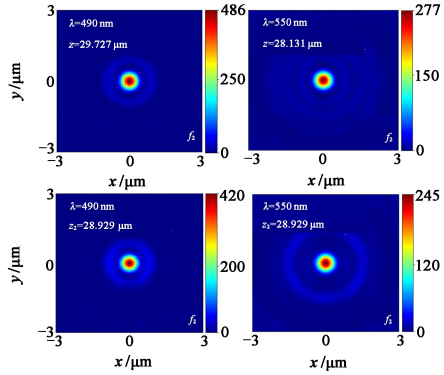
(a) 波长 650～550 nm 处 x-z 平面电场强度



(b) f_1 实际焦距(上行)和恒定焦距(下行)处焦点的 x-y 平面电场强度



(c) 波长 550～490 nm 处 x-z 平面电场强度



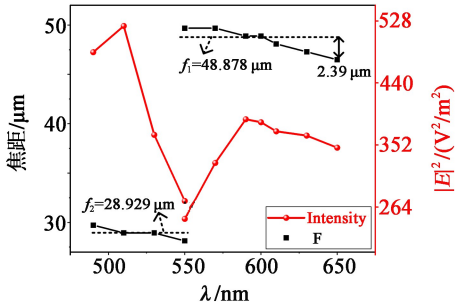
(d) f_2 实际焦距(上行)和恒定焦距(下行)处焦点的 x-y 平面电场强度

图 4　不同波长下的电场强度分布

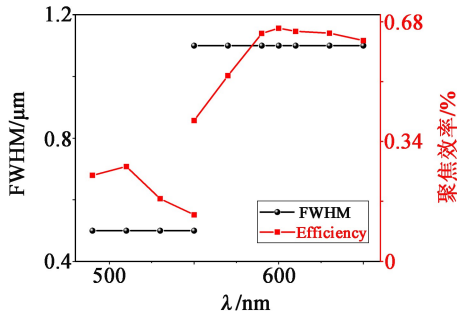
点特性良好。当入射波长为 550 nm 时，可以清晰地看到两个纵向双焦点。在波长为 550～490 nm 的窄波段内，所有焦点都可以在 $f_2=28.929\ \mu m$ ($\lambda=530$ nm 时的焦距)处检测到，并且 FWHM 约为 $0.413\lambda/NA$，实现亚衍射极限聚焦特性。这里，光斑大小的变化是由于不同焦深导致数值孔径改变所引起的。在光学通信中，可以利用超透镜的色散特性来实现波分复用，即将不同波长的光信号分别聚焦到不同位置，从而实现多路复用。

2.3　超透镜聚焦特性

如图 5(a)所示，在波长为 650～550 nm 的波段内，实际焦距值与恒定焦距值(波长 600 nm 时，$f_1=48.878\ \mu m$)最大偏离 2.39 μm。焦点处的电场强度值如红色曲线所示，在波长 510 nm 处，焦点电场强度值最大。这是因为波长越小，即频率越高，电场强度也越大。透镜在波长 590～650 nm 的波段内，场强变化缓慢，具有较好的窄波段共聚焦特性。从图 5(b)可以看出，各个焦点的 FWHM 在窄波段内保持恒定。在波长 650～550 nm 的范围内，FWHM 为 1.1 μm，约为 $0.477\lambda/NA$，根据瑞利准则[14]，其值为 $0.61\lambda/NA$，表明该超透镜具有亚衍射极限聚焦特性。在波长 550～490 nm 的范围内，FWHM 为 0.5 μm，约为 $0.413\lambda/NA$。这表明超透镜具有较大的数值孔径和更高的分辨率，但其聚焦效率稍显不足。聚焦效率定义为焦点功率(直径为 3 倍 FWHM 圆内的功率)与入射功率之比。超透镜在波长 600 nm 处的聚焦效率为 68.28%，在整个窄波段中是最高的。



(a) 焦距和焦点处的电场强度



(b) FWHM 和聚焦效率

图 5　不同波长下的聚焦特性

3　结论

基于传输相位原理，本文提出了一种全介质半嵌入单元结构。该结构采用不同半径的 TiO_2 纳米柱来实现电磁波相位调控。使用 FDTD 数值仿真证明了这种设计具有亚衍射极限聚焦、偏振无关和窄波段共聚焦特性。此外，还从理论上分析了该结构单元数对超透镜聚焦特性的影响，选择了 3 环半径来构建该超透镜。仿真结果表明，在波长 650～550 nm 波段之间，所有焦点都可以聚焦到 $f_1=48.878\ \mu m$ 位置，焦点的 FWHM 为 1.1 μm，约 $0.477\lambda/NA$。由于高阶衍射，超透镜在波长 550～490 nm 波段之间，所有焦点都可以聚焦到 $f_2=28.929\ \mu m$ 位置，FWHM 仅为 0.5 μm，约 $0.413\lambda/NA$。所设计的超透镜在光学显微镜、光学成像、光学多路复用等领域具有巨大的应用潜力。

参考文献：

[1] Marqués R, Martel J, Mesa F, et al. A new 2D isotropic left-handed metamaterial design: Theory and experiment [J]. Microwave and Optical Technol. Lett., 2002, 35(5): 405-

408.

[2] 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.

[3] Fan Z B, Qiu H Y, Zhang H L, et al. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible [J]. Light Sci. Appl., 2019, 67: 31666943.

[4] Balli F, Sultan M A, Ozdemir A, et al. An ultrabroadband 3D achromatic metalens[J]. Nanophotonics, 2021, 10(4): 1259-1264.

[5] Wu Y F, Wang S M. Research on broadband achromatic metalenses [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2022, 52(6): 221-264.

[6] 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): 320-333.

[7] Khorasanineja 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 Lett., 2017, 17(3): 1819-1824.

[8] Yang H, Li G, Su X, et al. Reflective metalens with sub-diffraction-limited and multifunctional focusing[J]. Scientific Reports, 2017, 16(1): 13579-13584.

[9] Zhang X Y, Guan C, Wang K, et al. Multi-focus optical fiber lens based on all-dielectric metasurface [J]. Chinese Opt. Lett., 2021, 19(5): 050601.

[10] Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(3): 21.

[11] Zhao P J, Liu S, Luo Y, et al. Design of metasurface lens with two focal spots based on polarization response[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9): 63-70.

[12] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultra-thin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces [J]. Nano Lett., 2012, 12(9): 4932.

[13] Schonbrun E, Seo K, Crozier K B, et al. Reconfigurable imaging systems using elliptical nanowires[J]. Nano Lett., 2011, 11(10): 4299-4305.

[14] Zheng Y, Qin F, Li X, et al. Advances in the sub-diffraction limited light modulation by supercritical lens (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(5): 0551310.

[15] Zhang Y H, Yang B W, Li Y T, et al. Design of polarization-independent reflective metalens in near infrared waveband[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(6): 20200048.

[16] Xu P, Li X C, Xiao Y F, et al. Design and research of long-infrared dual-wavelength confocal metalens[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(1): 014208.1-014208.8.

[17] Wang W, Guo Z Y, Li R Z, et al. Plasmonics metalens independent from the incident polarizations [J]. Optics Express, 2015, 23(13): 16782-16791.

[18] Vo S, Fattal D, Sorin W V, et al. Sub-wavelength grating lenses with a twist[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(13): 1375-1378.

[19] Berry M V, Popescu S. Evolution of quantum superoscillations and optical superresolution without evanescent waves[J]. J. Phys. A: General Phys., 2006, 39(22): 6965.

[20] Wang J, Fei Q, Zhang D H, et al. Subwavelength superfocusing with a dipole-wave-reciprocal binary zone plate [J]. Appl. Phys. Lett., 2013, 102(6): 3844-3847.

[21] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carmes C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths[J]. Nano Lett., 2016, 16(11): 7229-7234.

[22] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation [J]. Science, 2015, 347: 1342-1345.

[23] Li Y, Li X, Pu M, et al. Achromatic flat optical components via compensation between structure and material dispersions [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 19885.

作者简介：

肖功利(1975—)，男，博士，研究员，硕士生导师，主要从事微纳光电子方面的研究；

杨宏艳(1972—)，女，博士，研究员，硕士生导师，主要从事超材料与超表面方面的研究。