

文章编号 1004-924X(2018)12-2917-06

应用于微型成像的氮化镓超透镜设计

金鑫^{1,2}, 王森², 周桃飞², 曹冰¹, 张桂菊^{1*}

(1. 苏州大学 光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;

2. 中国科学院 苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215215)

摘要: 为了实现可见光入射时亚波长尺度内的聚焦, 设计了以氮化镓(GaN)纳米柱为基本晶胞的超透镜, 该透镜能够改进传统成像系统的笨重低效, 可应用于微型成像系统。超透镜表面由宽度渐变高度不变的 GaN 纳米柱阵列构成, 分析 GaN 在亚波长尺度内对相位的调控能力和机理, 并基于时域有限差分法模拟仿真了在蓝光波长为 460 nm 入射时透射场的高效率聚焦, 对比超透镜尺寸为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ 、 $6.75 \mu\text{m} \times 6.75 \mu\text{m}$ 、 $8.75 \mu\text{m} \times 8.75 \mu\text{m}$ 、 $10.75 \mu\text{m} \times 10.75 \mu\text{m}$ 时超透镜的聚焦能力, 得出聚焦后透射场焦点处的半峰全宽分别为 1, 0.8, 0.5, 0.3 μm , 给出了强度分布、聚焦光斑等仿真模拟结果, 发现实际焦距与设计值存在偏差, 且随超透镜尺寸的变化而变化。文中所设计的超透镜能够在微米级别实现聚焦, 有效降低了传统成像系统的复杂度。

关键词: 超透镜; 亚波长聚焦; GaN; 时域有限差分仿真

中图分类号: O436.1; TH74 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182612.2917

GaN based metalens for micro imaging

JIN Xin^{1,2}, WANG Miao², ZHOU Tao-fei², CAO Bing¹, ZHANG Gui-ju^{1*}

(1. School of Optoelectronic Information Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215125, China)

* Corresponding author, E-mail: gjzhang@suda.edu.cn

Abstract: A metalens consisting of GaN nanopillars as basic cells was designed for subwavelength focusing at visible wavelengths, which provided an improvement over bulky and low-efficiency conventional imaging systems, and the possibility of its application to micro imaging. The metalens is composed of a GaN nanopillar array, which maintains the same height but gradually varying width. An analysis of the capacity and reasons for GaN nanopillars controlling the phase of incoming light was performed. In addition, based on FDTD methods, a simulation of 460 nm wavelength focusing in the transmission mode was performed. Subsequently, full width at half maximum (FWHM) are shown when the sizes of metalens are $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$, $6.75 \mu\text{m} \times 6.75 \mu\text{m}$, $8.75 \mu\text{m} \times 8.75 \mu\text{m}$, and $10.75 \mu\text{m} \times 10.75 \mu\text{m}$, and the results are 1, 0.8, 0.5, and 0.3 μm , respectively. The other focusing results, such as intensity distribution and focus spots, were also discussed. As a result, there are differences between designed focal length and simulated focal length, which changes under the different sizes of

收稿日期: 2018-06-21; **修订日期:** 2018-07-25.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFB0403002); 江苏省自然科学基金资助项目(No. BK20150308); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 国家自然科学基金资助项目(No. 61574097)

metalens. In conclusion, the designed GaN based metalens can focus in micron dimension effectively, which reduces the complexity of traditional imaging systems.

Key words: metalens; subwavelength focusing; GaN; finite-difference time-domain simulation

1 引言

第一代光学元件利用曲面构造和材料折射率的差异对入射光相位进行调制,实现光波的聚焦、成像、分色等功能,其尺寸通常为工作波长的几百倍、上千倍,体积质量大,功能单一,且球差以及色差较为明显。20 世纪 60 年代以来,微电子加工技术的发展使衍射光学元件得以推广,在一定程度上实现了光学器件的平面化,减小了光学元件的厚度^[1],但成像等方面仍然受衍射极限的限制。为了进一步减小光学成像系统的体积,实现纳米级别成像,超表面器件应运而生。

超表面通过亚波长几何结构在二维平面内调控电磁波的相位、振幅、偏振状态等参数,突破传统电磁定律的限制,实现异常折射、异常反射、聚焦成像、偏振态选择、完美吸收等功能^[2]。近年来,超表面相关器件的设计、计算和工艺制备都有显著的进展,涌现出不同材料功能各异的超表面器件。2005 年出现了一类基于超表面等离子体(Surface Plasmon, SP)局域相位调制效应的新型光学超表面器件^[3]。利用金属狭缝中 SP 传播常数随狭缝宽度变化的特性,可实现灵活的局域相位调节,并基于此建立了超表面辅助的折反射定律,也称为广义折反射定律^[4-6]。2011 年,哈佛大学 Capasso 团队虞南方等人利用 V 形线结构构建了一种新型的超表面,进一步明确了广义折反射定律这一概念,掀起了国际上超表面的研究热潮^[7]。上海复旦大学周磊教授课题组采用 H 形结构实现了反射型相位梯度超表面^[8]。空军工程大学理学院李勇峰教授利用超表面实现了 $f=16$ GHz 圆极化电磁波反射聚焦^[9]。2015 年,哈佛大学 Francesco Aieta 等人提出了双条形介质耦合结构,并利用此结构实现了近红外波段上超表面的会聚功能^[10]。基于广义折反射定律设计的超表面器件被认为是继第一代折反射光学元件和第二代衍射元件之后的第三代新型光学器件^[11]。

超透镜即聚焦成像的超表面,在亚波长尺度内对入射光的相位进行调控从而在透射场或者反

射场实现聚焦成像。在材料的选择上,早期超透镜大多基于金属材料设计,利用 SPP 效应实现聚焦成像。但是,由于金属材料本身有很强的吸收损耗和欧姆损耗,金属超透镜的效率很低。因此,研究者们开始使用半导体材料作为金属材料的替代品。硅(Si)材料由于成熟的制备工艺以及较宽的带宽,成为超透镜在半导体材料领域的首选。Si 基超透镜在近红外中红外波段有比较好的表现^[12],但由于其自身带宽的局限仍然无法在可见光波段高效地聚焦。为了实现超透镜在可见光波段的应用,基于二氧化钛(TiO₂)材料的超透镜被提出,它在可见光波段的聚焦效果和工作效率较 Si 基超透镜器件有较大的提升^[13],但是 TiO₂ 材料本身复杂的制备工艺却阻碍了其器件的进一步发展。因此,超透镜材料不仅要使器件在可见光波段高效率地工作,还要制备工艺简单。近年来, GaN 材料被用作超透镜材料。国立台湾大学 BH Chen 等人设计制备了全彩色像素级成像 GaN 超透镜,不同颜色光束同时入射可获得同一平面上的不同焦点^[14]。南京大学 Shuming Wang 等人设计制备了可见光波段焦距为百微米量级的消色差 GaN 超透镜^[15]。但上述研究并未分析超透镜尺寸对聚焦效果的影响以及焦距较小(十微米量级)时焦距产生的偏差。

本文采用 GaN 作为超透镜材料,并模拟仿真了波长为 460 nm 的平面线偏光源垂直入射时不同尺寸下超透镜的聚焦结果。除此之外,还讨论了超透镜尺寸对焦距的影响,得出了焦距的设计值与模拟计算值的偏差随结构尺寸而变化且最终饱和的结论。

2 结构设计

2.1 设计原理

基于 Pancharatnam-Berry 相位原理,本文超透镜设计利用改变表面几何体的几何参数如长、宽、高等对入射光在亚波长尺度内进行相位调控,需要调控的相位可利用平面入射光从超透镜器件表面各点至焦点的光程差求得,满足:

$$\Phi(x, y) = \Phi(0, 0) + \frac{2\pi}{\lambda} [f - \sqrt{f^2 + x^2 + y^2}], \quad (1)$$

其中: λ 为入射光波长, f 为焦距, $\Phi(0, 0)$ 为焦点在超透镜表面投影处的相位, $\Phi(x, y)$ 就是超透镜表面任意一点 (x, y) 所需要的出射相位。在计算中, 将超透镜表面分成若干个周期, 为简化计算, 每个周期内只取中心点的位置代入式(1)计算相位值。因此, 模拟计算会产生误差。在接下来的计算中, 超透镜表面被分成不同的周期数, 通过对比来讨论误差与周期之间的关系。

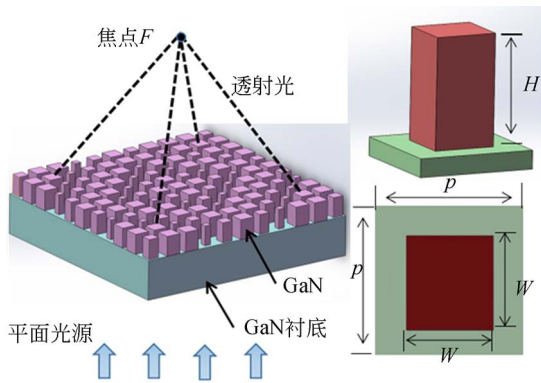


图 1 GaN 超透镜结构示意图

Fig. 1 Schematic of GaN metalens with square lattices

本文所设计的 GaN 超透镜由底面为正方形的周期性 GaN 纳米柱阵列和半无限的 GaN 材料衬底组成(图 1), 纳米柱晶胞的周期为 P , 纳米柱高度为 H , 纳米柱底面边长为 W 。相位调控即通过改变底面为正方形的 GaN 纳米柱的底边长获得不同的出射相位, 并经过一定的顺序排列, 使出射光发生偏折会聚(图 2), 当相位调控范围达到 2π 时, 超透镜就能实现波长为 460 nm 的平面光入射的透射场聚焦。

2.2 结构参数

在本文的模拟仿真中, 所有算法都基于时域有限差分法 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD), 选取晶胞周期 $P=250 \text{ nm}$, 纳米柱高度 $H=400 \text{ nm}$, 焦距设置为 $6 \mu\text{m}$, 入射光波长为 460 nm 。为了超透镜晶胞的相位调控范围可以达到完整的 2π 相位, 令纳米柱边长 W 的取值为 $10\sim 188 \text{ nm}$ (图 3), 等间隔取 30 个边长值。在此基础上, 分别模拟计算了超透镜尺寸分别为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$, $6.75 \mu\text{m} \times 6.75 \mu\text{m}$, $8.75 \mu\text{m} \times 8.75 \mu\text{m}$, $10.75 \mu\text{m} \times 10.75 \mu\text{m}$, 即超透镜表面

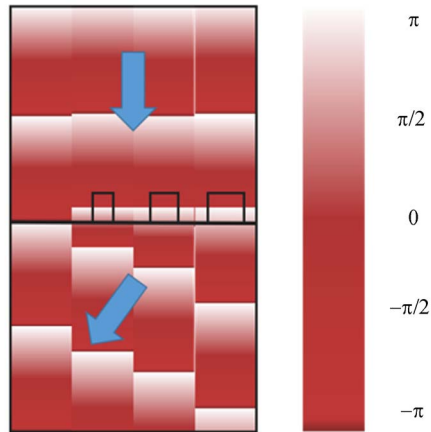


图 2 改变纳米柱边长可以实现相位调控

Fig. 2 Phase control by changing width of nanopillars

被分成 15×15 , 27×27 , 35×35 , 43×43 个周期时透射场的强度分布, 即取每边的周期个数为 n , n 的取值为 $15, 27, 35, 43$, 对 4 种尺寸的超透镜的聚焦结果进行对比, 观察超透镜尺寸对聚焦质量的影响。

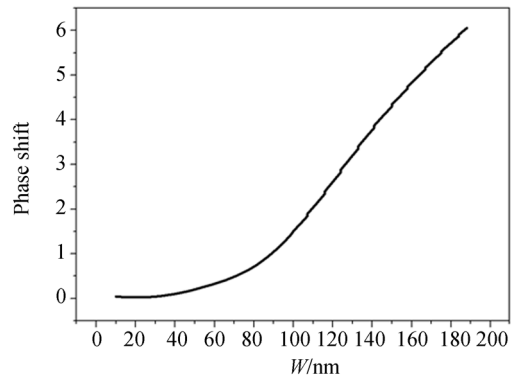


图 3 纳米柱边长 W 与出射相位的关系曲线

Fig. 3 Phase shift as a function of width W

3 结果讨论

如图 4 所示, 当表面被分成 15×15 个周期即 $n=15$ 时, 透射场的聚焦效果并不理想, 聚焦光斑比较大, 呈发散状态, 光斑中心强度较弱, 半峰全宽约为 $1 \mu\text{m}$, 实际焦点约为 $5.07 \mu\text{m}$, 而设计聚焦为 $6 \mu\text{m}$, 误差为 15.5% 。由此可见, 当超透镜尺寸较小时, 每个晶胞周期所占的面积比较大, 而此时将每个周期所需相位都按中心点来取值, 误差比较大。

如图 5 所示, 当 $n=27$ 时超透镜表面出现环

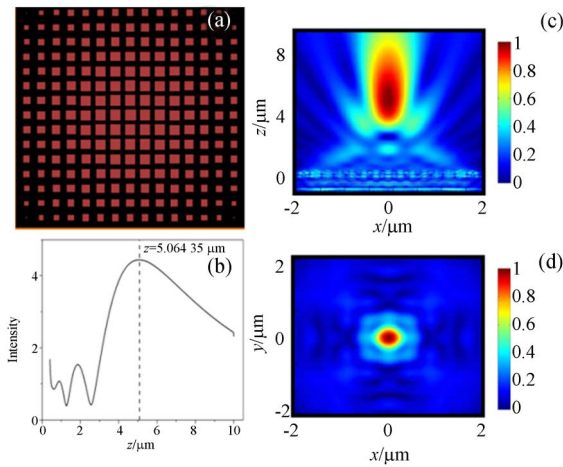


图 4 (a) $n=15$ 时的光栅结构俯视图; (b) 中心点强度随 z 的变化曲线; (c) 透射场截面图 ($y=0 \mu\text{m}$); (d) 透射场焦平面截面图

Fig. 4 (a) Top view of GaN grating when $n=15$; (b) Intensity distribution ($x=0 \mu\text{m}$, $y=0 \mu\text{m}$); (c) Cross section of intensity ($y=0 \mu\text{m}$); (d) Cross section of focal plane

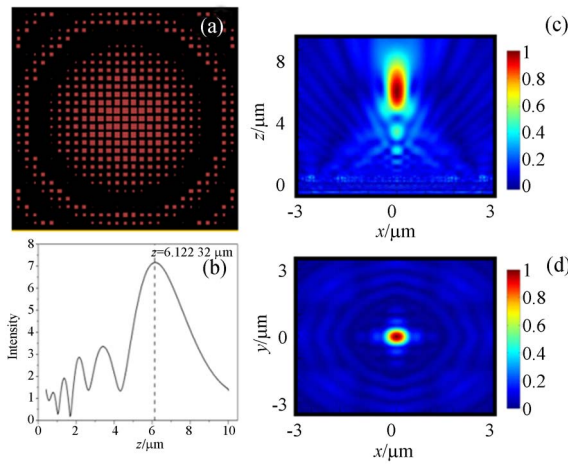


图 5 (a) $n=27$ 时的光栅结构俯视图; (b) 中心点强度随 z 的变化曲线; (c) 透射场截面图 ($y=0 \mu\text{m}$); (d) 透射场焦平面截面图

Fig. 5 (a) Top view of GaN grating when $n=27$; (b) Intensity distribution ($x=0 \mu\text{m}$, $y=0 \mu\text{m}$); (c) Cross section of intensity ($y=0 \mu\text{m}$); (d) Cross section of focal plane

状结构,分析原因为相位的周期性变化导致纳米柱边长的周期性变化。透射场的聚焦结果有较为明显的改善,聚焦光斑的中心强度增大,面积减小,此时半峰全宽约为 $0.8 \mu\text{m}$,实际焦距约为 $6.12 \mu\text{m}$,误差为 2% ,对比 $n=15$ 时的结果,聚焦

效果有明显的改善。

如图 6 所示,当 $n=35$ 时环数变多,聚焦结果进一步改善,光斑面积继续减小,强度继续增大,半峰全宽约为 $0.5 \mu\text{m}$,此时实际焦距约为 $6.21 \mu\text{m}$,误差为 3.5% 。

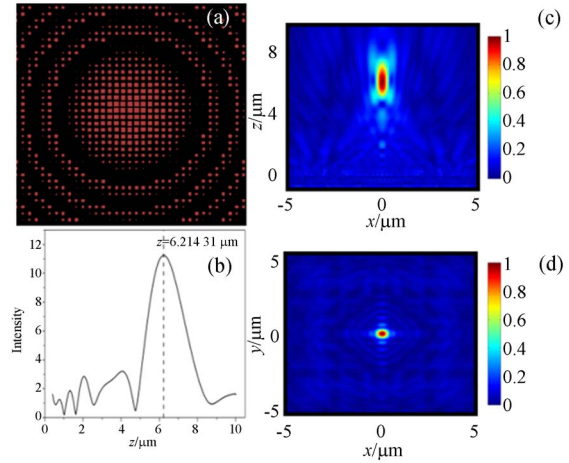


图 6 (a) $n=35$ 时的光栅结构俯视图; (b) 中心点强度随 z 的变化曲线; (c) 透射场截面图 ($y=0 \mu\text{m}$); (d) 透射场焦平面截面图

Fig. 6 (a) Top view of GaN grating when $n=35$; (b) Intensity distribution ($x=0 \mu\text{m}$, $y=0 \mu\text{m}$); (c) Cross section of intensity ($y=0 \mu\text{m}$); (d) Cross section of focal plane

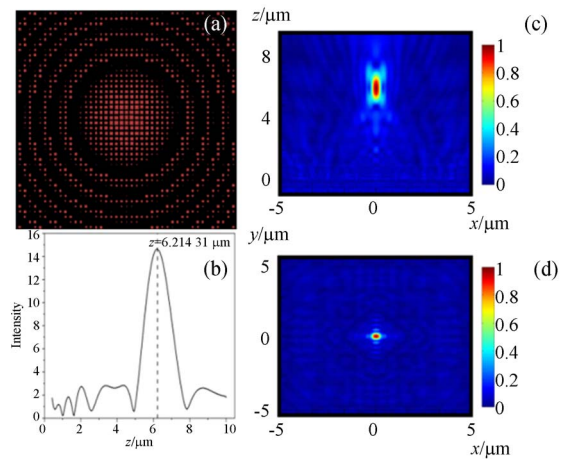


图 7 (a) $n=43$ 时的光栅结构俯视图; (b) 中心点强度随 z 的变化曲线; (c) 透射场截面图 ($y=0 \mu\text{m}$); (d) 透射场焦平面截面图

Fig. 7 (a) Top view of GaN grating when $n=43$; (b) Intensity distribution ($x=0 \mu\text{m}$, $y=0 \mu\text{m}$); (c) Cross section of intensity ($y=0 \mu\text{m}$); (d) Cross section of focal plane

如图 7 所示,当 $n=43$ 时,聚焦光斑趋向于一点,光斑中心强度增大,半峰全宽约为 $0.3 \mu\text{m}$,实际焦距约为 $6.21 \mu\text{m}$,误差为 3.5% 。

对比 4 组计算结果可以发现,在一定范围内,随着超透镜尺寸的增大,其聚焦结果有明显的改善,体现在聚焦光斑的面积、中心强度、半峰全宽等数据上。同时,焦距的设计值与模拟仿真值的偏差量也在一定范围内趋向饱和。这是因为在模拟计算时将超透镜表面分成若干周期,每个周期只取周期中心点代入式(1)得到所需调控的相位值。因此,超透镜表面分成的周期数越多,取点代入公式(1)得到的相位值越准确,从而聚焦结果越好,焦距的偏差值变化也越小。但由于计算方法的原因,偏差值始终存在,无法完全消除。随着尺寸的进一步增大,聚焦结果的改善变得缓慢,即效率变低。因此当超透镜尺寸增大到一定程度时,聚焦光斑趋于稳定,继续增大超透镜尺寸的意义

不大,这也满足超透镜设计是为了减小光学器件体积的初衷。

4 结 论

本文基于 GaN 材料设计了宽度调制的纳米柱阵列超透镜,实现了蓝光波长为 460 nm 的平面光入射时的透射场聚焦,并讨论了不同尺寸下的聚焦结果,得到在一定范围内增大超透镜尺寸可以获得更好的聚焦效果。在本文的计算中,当超透镜尺寸从 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ 增大到 $10.75 \mu\text{m} \times 10.75 \mu\text{m}$ 时,中心强度增强近 4 倍,聚焦光斑的半峰全宽从 $0.8 \mu\text{m}$ 减小到 $0.3 \mu\text{m}$,聚焦结果有显著提升。本文所设计的 GaN 超透镜实现了可见光入射时的透射场聚焦,近平面的结构,轻量化的体积,紧凑的设计为 GaN 超透镜应用于微型成像系统奠定了基础。

参考文献:

- [1] 张岩,叶佳声. 超表面材料与器件的应用前景[J]. 新材料产业, 2014, 16(10): 30-34.
ZHANG Y, YE J SH. Application prospect of meta-surface materials and devices[J]. *Advanced Materials Industry*, 2014, 16(10):30-34. (in Chinese)
- [2] YU N, CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nat. Mater.*, 2014, 13(2):139-150.
- [3] LUO X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(9): 594201.
- [4] 赵泽宇,蒲明博,王彦钦,等. 广义折反射定律[J]. 光电工程, 2017, 44(2):129-139.
ZHAO Z Y, PU M B, WANG Y Q, *et al.*. The generalized laws of refraction and reflection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(2): 129-139. (in Chinese)
- [5] 罗先刚,徐挺,杜春雷,等. 一种包含纳米缝的金属膜透镜:中国, CN101158727[P]. 2008-04-09.
LUO X G, XU T, DU CH L, *et al.*. Metal membrane lens including Nano seam; Chinese Patent, CN101158727[P]. 2008-04-09. (in Chinese)
- [6] XU T, WANG C T, DU CH L, *et al.*. Plasmonic beam deflector[J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4753-4759.
- [7] 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.
- [8] SUN S, HE Q, XIAO S, *et al.*. Gradient-index metasurface as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426-431.
- [9] 李勇峰,张介秋,屈绍波,等. 圆极化波反射聚焦超表面[J]. 物理学报, 2015, 64(12): 124102.
LI Y F, ZHANG J Q, QU SH B, *et al.*. Circularly polarized wave reflection focusing metasurfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 124102. (in Chinese)
- [10] AIETA F, KATES M A, GENEVET P, *et al.*. Multi-wavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [11] WANG D CH, ZHANG L CH, GU Y H, *et al.*. Switchable ultra thin quarter-wave plate in terahertz using active phase-change metasurface[J].

- Scientific Reports*, 2015, 5: 15020.
- [12] DUAN X, ZHANG M, HUANG Y, *et al.*. Polarization-independent focusing reflectors using two-dimensional SWG[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(2): 209-212.
- [13] KHORASANINEJAD M, SHI Z, ZHU A, *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.
- [14] CHEN B H, WU P C, SU V C, *et al.*. GaN metalens for pixel-level full-color routing at visible light[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6345-6352.
- [15] WANG S, WU P C, SU V C, *et al.*. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13: 227-232.

作者简介:

金鑫(1994—),男,江苏盐城人,硕士研究生,2016年于苏州大学获得学士学位,主要从事微纳结构的研究。E-mail:1207990662@qq.com

导师简介:

张桂菊(1977—),女,江西上饶人,副研究员,硕士生导师,2000年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2005年于大连理工大学获得博士学位,主要从事微纳光子学器件理论及应用等方面的研究。E-mail: gjzhang@suda.edu.cn