Design of Achromatic Terahertz Metalens Based on Hybrid Modulation Mechanism*

SHEN Xiaoqi[1], LI Liguang[2], ZHANG Quansheng[1], CHEN Zhaofu[1], BAI Ningfeng[1]*
(1.School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189, China;
2.Unit 93160 of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100086, China)

Abstract: In optical systems, depth of focus determines both the longitudinal resolution capability and out-of-focus tolerance of imaging. Extended depth of focus techniques enable simultaneous acquisition of information at different depths within a single imaging session through light field modulation. Compared to microwaves, terahertz waves combine high-frequency bandwidth with low photon energy, making them highly valuable for applications in biomedical monitoring and non-destructive imaging. However, research on extended depth-of-field achromatic metasurfaces for terahertz windows remains limited. A fully dielectric extended-depth-of-focus achromatic metasurface operating within the 300 GHz-380 GHz bandwidth is designed. Electromagnetic simulation and performance analysis of the designed metasurface are conducted by using the finite difference time domain (FDTD) method. The results demonstrate that the designed metalens exhibits minimal focal length shift across the target frequency range while extending depth of focus to 6 mm. Featuring a simple structure that is easy to fabricate and integrate, this metalens holds promise for applications in terahertz imaging, spatial optical communication, and precision detection.

Key words: metalens; extended depth of field; achromatic; Terahertz window
EEACC: 7260 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.011

基于混合相位调控机制的太赫兹超透镜消色差研究*

沈小琪[1], 李立广[2], 张全盛[1], 陈昭福[1], 柏宁丰[1]*
(1.东南大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 211189; 2.中国人民解放军 93160 部队, 北京 100086)

摘 要: 太赫兹波兼具高频带宽与低光子能量特性, 在生物医学监测和无损成像等领域具有重要应用价值。太赫兹频段的单层长焦深消色差超透镜仍是一个亟待解决的问题。针对太赫兹窗口的扩展焦深消色差超透镜开展了研究, 基于混合相位调控机制, 在 300 GHz~380 GHz 带宽内设计了全介质长焦深消色差超透镜。结合时域有限差分法(FDTD)对所设计的超透镜进行电磁仿真与性能分析, 结果表明, 所设计的超透镜在设计频段下, 焦深扩展至 6 mm, 焦距偏移小于 0.6 mm。该超透镜结构设计简单、易于加工和集成, 可应用于太赫兹成像、空间光通信与精密检测等领域。

关键词: 超透镜; 扩展焦深; 消色差; 太赫兹窗口
中图分类号: TN27 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0789-05

因传统透镜具有色散显著、体积庞大等固有限制, 已难以满足现代集成化、小型化的需求。近年来, 随着微纳制造技术的飞速发展, 平面光子器件已成为现代光学系统小型化、集成化的重要发展方向[1]。超透镜是利用超表面结构实现平面透镜性能的典型应用, 能够通过亚波长尺度的结构对电磁波的相位、振幅和偏振进行精确控制[2]。太赫兹超透镜为太赫兹波前调控提供了新思路, 其中扩展焦深和消色差技术成为近年来的研究热点[3]。然而, 目前太赫兹波段研究的介电材料较为有限, 且波长较长导致单元结构尺寸较大, 使相位调控自由度受到限制。虽然多层结构设计和波导耦合等方法在特定波段内取得了一定的进展[4], 但这些方案往往伴随着效率下降和工艺复杂化的问题。

在光学研究领域, 哈佛大学 Capasso 团队利用 TiO_2 nm 鳍的几何相位和传输相位混合调制, 首次在可见光波段 470 nm~670 nm 实现了消色差超透镜[5], 焦距为 63 μm, 数值孔径为 0.2。Fan 等[6]通过设计氮化硅纳米孔结构实现零有效色散, 成功研制出可见光波段(430 nm~780 nm)偏振不敏感宽带消色差超透镜阵列, 并实验演示了全彩色积分成像应用。Wang 等[7]采用高折射率、低损耗的二氧化钛材料, 设计了四种对称性结构实现偏振不敏感设计, 在生物成像窗口(650 nm~1 000 nm)实现了高

项目来源: 微波电真空器件国家级重点实验室开放基金项目(6142807220207)
收稿日期: 2026-04-16 **修改日期**: 2026-05-13

聚焦效率消色差超透镜。南京大学李涛团队通过引入“相位色散空间”的概念,从理论层面揭示了离散与宽带消色差设计的本质差异[8],通过数值模拟证实,针对 450 nm 和 650 nm 设计的双波长消色差超透镜,其平均聚焦效率可达 75%,高于等效带宽设计的 18%。Chen 等[9]采用硅纳米柱结构,设计出在 1 000 nm~1 200 nm 波段内焦深达 120λ 且 92%焦深范围内无色差的超透镜,其焦深为传统透镜的 3.2 倍。

尽管消色差技术取得显著进展,但在太赫兹波段,受限于波长较长导致的单元尺寸大、相位自由度低,以及扩展焦深与宽带消色差协同调控的难度,超透镜仍面临着严峻的物理挑战。[10]。现有 EDOF 超表面多集中于单波长工作,难以满足宽带成像需求。因此,设计太赫兹频段的单层长焦深消色差超透镜仍是一个亟待解决的问题。

本文提出了一种基于混合相位调控机制的太赫兹超透镜设计方案。由矩形和不同参数的椭圆形硅柱作为单元结构,通过利用几何相位和传输相位的特性,并结合粒子群优化算法进行相位补偿设计,实现了在 300 GHz~380 GHz 频段内的宽带消色差功能。该方法通过优化单元结构的色散特性,有效扩展了焦深范围,结构简单,利于加工,为太赫兹光学系统的小型化和多功能提供了新的技术路径。

1 设计原理

1.1 宽带消色差超透镜设计原理

消色差超透镜的相位分布设计基于传统的相位调制原理,其公式为:

$$\varphi(r,\lambda)=-\frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{r^2+f^2}-f) \tag{1}$$

式中:$r=\sqrt{x^2+y^2}$ 表示超透镜上任意结构到透镜中心的距离,λ 是工作波长,f 为设计焦距。当入射波长带宽为(λ_{min},λ_{max})时,由于不同波长的光在介质中的传播速度不同,因此不能产生相同的相位延迟,即不能聚焦到同一个位置,从而产生色散[11]。将相位分布函数表示为下式:

$$\varphi(R,\lambda)=\varphi(R,\lambda_{max})+\Delta\varphi(R,\lambda) \tag{2}$$

式中:

$$\Delta\varphi(R,\lambda)=-[2\pi(\sqrt{R^2+f^2}-f)]\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda_{max}}\right) \tag{3}$$

该式表明相位函数被分为两个部分,其中 $\varphi(R,\lambda_{max})$ 作为参考相位,仅与最大波长有关,因此可以用几何相位调控方式来提供这一基础相位。而 $\Delta\varphi(R,\lambda)$ 与 $1/\lambda$ 线性相关[12],表示不同波长内的相位差,可以通过设计不同单元结构的传输相位响应来补偿。因此引入一个额外的优化因子 $C(\lambda)$,消色差超透镜相位分布改写为:

$$\varphi(R,\lambda)=\varphi(R,\lambda_{max})+\Delta\varphi(R,\lambda)+C(\lambda) \tag{4}$$

在消色差超透镜的设计过程中,理想相位分布是根据目标参数计算而来,而实际相位调制效果依赖于单元结构对入射光波的电磁响应特性。因此需建立调制性能数据库,并从中筛选出符合预期相位调制要求的优化单元结构。

扩展焦深超透镜的相位轮廓为:

$$\varphi(r)=\frac{k\cdot r^2}{2[f+(\Delta f\cdot r^2/R^2)]} \tag{5}$$

式中:Δf 代表超透镜的焦深。为了打破几何相位的自旋锁定特性,研究人员在结构设计中引入另外一个相位$-\varphi(r)$,使左旋与右旋圆偏振太赫兹波同时获得聚焦与散焦相位,其相位分布可表示为:

$$\varphi(r)=\arg[\exp(\mathrm{i}\varphi(r))+\exp(-\mathrm{i}\varphi(r))] \tag{6}$$

当入射太赫兹波为线偏振时,可聚焦成一个同偏振态的长焦深焦点[13]。本研究提出混合相位协同色散调控的方法,从消色差波前调控原理出发,在宽带内利用 PB 相位提供基本的长焦聚焦,并结合传输相位对所设计的消色差超透镜进行对应的相位补偿。

1.2 单元结构设计

本文设计的超透镜参数如下:焦距为 11.5 mm,焦深为 6 mm,半径为 8.5 mm,衬底为二氧化硅。单元结构采取矩形硅柱,其长度 $L=0.2$ mm,宽度 $W=0.16$ mm,周期 $P=0.24$ mm,高度 $H=0.6$ mm。首先,基于几何相位与长焦超透镜相位分布公式,仅用两种旋转角度的硅柱即可实现基本的长焦聚焦功能,并通过计算把相位不同位置处的单元结构进行替换。为了进一步补偿相位,建立了高度同为 0.6 mm 的椭圆硅柱长短轴参数扫描数据库,用于替代部分单元结构、超透镜的部分结构示意如图 1 所示。

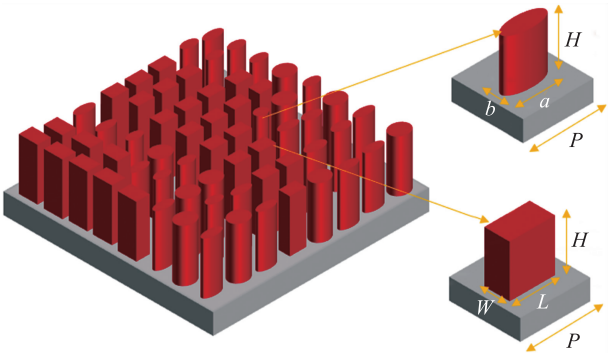

图 1 超透镜部分结构示意图

2　仿真及分析

2.1　粒子群优化算法

在 1.1 中提到,要完美匹配每个波长的理想相位和超透镜的实际相位,需要引入 $C(\lambda)$,随着计算机技术的飞速发展,多种智能优化算法被提出并应用于复杂问题的求解。粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization,PSO)作为一种模拟鸟群社会行为的全局优化算法,以其实现简单、全局搜索能力较强等优点受到广泛关注。本文选取 PSO 算法,用于搜索波相差的极小值[14]。PSO 中整个优化迭代过程中粒子速度和位置变化可以表示为:

$$v_i = w\times v_i + c_1\times\text{rand}\times(p_i - x_i) + c_2\times\text{rand}\times(p_{\text{gbest}} - x_i) \quad (7)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_i \quad (8)$$

式中:w 表示粒子的惯性因子,rand 表示在(0,1)内的随机数,c_1 和 c_2 是加速因子,p_{gbest} 是最佳适应度函数。$c_1\times\text{rand}\times(p_i - x_i)$ 表示粒子与自身历史适应度的比较,$c_2\times\text{rand}\times(p_{\text{gbest}} - x_i)$ 表示粒子群落之间信息共享。而位置矢量 x_i 就是本文中的 $C(\lambda)$。

2.2　消色差优化

用粒子群优化算法对超透镜的相位分布和单元结构排布进行优化,其具体流程如图 2 所示。首先,对单元结构进行扫参,构建单元结构相位、透射率随波长变化的数据库,初始化相位和粒子群速度及位置,将实际相位分布 $\varphi_{\text{real}}(R,\lambda)$ 和每种波长下的理想相位 $\varphi_{\text{ideal}}(R,\lambda)$ 的差的绝对值作为适应度函数。通过不断迭代,使得各个位置上的波相差总和达到最小,从而得到每个位置处最优的单元结构以达到消色差的目的。

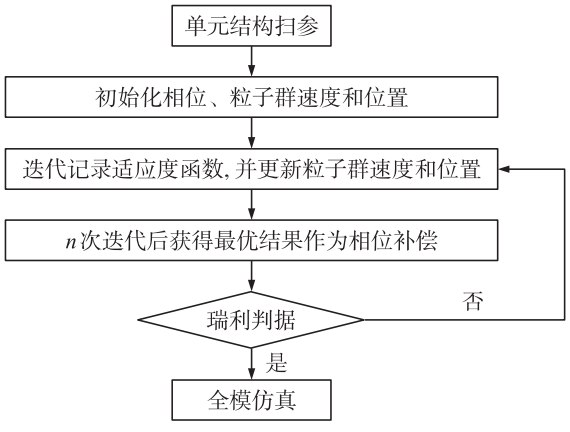

图 2　粒子群优化算法流程图

获得椭圆单元结构相位和透射率参数数据库后,利用粒子群优化算法进行逆向设计,考虑到计算资源与优化效率的平衡,最大迭代次数设置为 500 次,以避免因无限叠加迭代次数而导致计算成本过高,加速常数 c_1 与 c_2 均设置为 1.49。优化过程中,以波相差 $\Delta\varphi(R,\lambda) = |\varphi_{\text{real}}(R,\lambda) - \varphi_{\text{ideal}}(R,\lambda)|$ 作为适应度函数。图 3 显示随着迭代次数的增加,总的波相差在不断减小,呈现持续下降的趋势并收敛,此时优化所得的超透镜单元结构参数组合即可满足预设的设计目标。

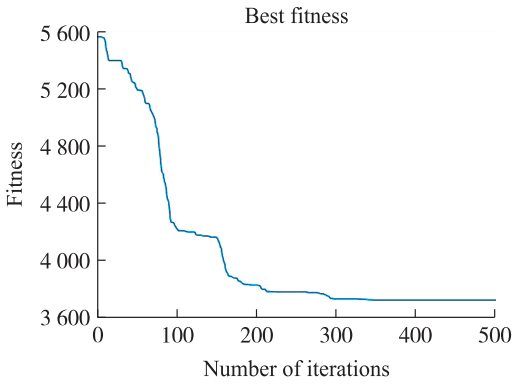

图 3　PSO 收敛曲线

迭代完成后得到 9 个优化因子 $C(\lambda)$,这些因子反映了在不同频率下为平衡相位延迟所必须的补偿量,由此布置整个单元结构,优化因子具体参数如表 1 所示。

表 1　不同波长对应的最优的优化因子

Wavelength/mm	$C(\lambda)$
0.789	4.811 01
0.810	6.283 19
0.833	2.810 28
0.857	5.381 36
0.882	1.768 18
0.908	4.695 59
0.934	1.512 06
0.967	4.775 07
0.999	1.904 76

2.3　结果分析

通过以上优化,获得优化因子,如表 1 所示。采用时域有限差分法对超透镜进行数值仿真,将入射光源设定为 X 极化平面波,为了验证所设计的超透镜在宽带内的连续消色差特性,在工作频率范围内以 10 GHz 为步长均匀选取 9 个频率点,光源从超透镜的衬底一侧垂直入射,在各个方向上均采用完美匹配层边界条件。计算得到焦平面上的电场分布,在设定频率范围内艾里斑形态完整且能量比较集中,聚焦效果较好。

为了突显本研究设计的超透镜在色差校正方面的优势，进一步对比了消色差和普通色差超透镜的焦距随频率变化的特性，如图 4 所示，无消色差透镜焦距在 300 GHz~380 GHz 范围内剧烈波动，表现出强烈的色散特性，相比之下本文设计的超透镜稳定性较好，相对于中心频率 340 GHz，最大的焦距偏移量仅为约 0.6 mm。图 5 反映了 9 个频点下，x-z 平面内的归一化电场强度分布，仿真结果显示焦点位置都在预设焦距附近，并无明显偏移，表明在工作频段内色差得到了很好的校正。

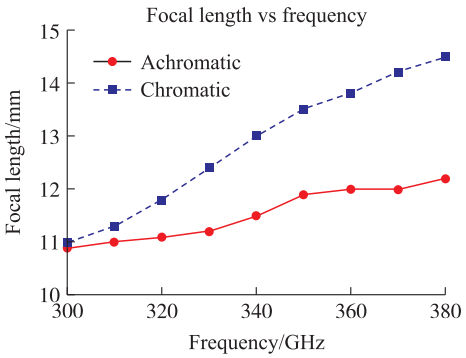

图 4 消色差与色差超透镜焦距变化对比

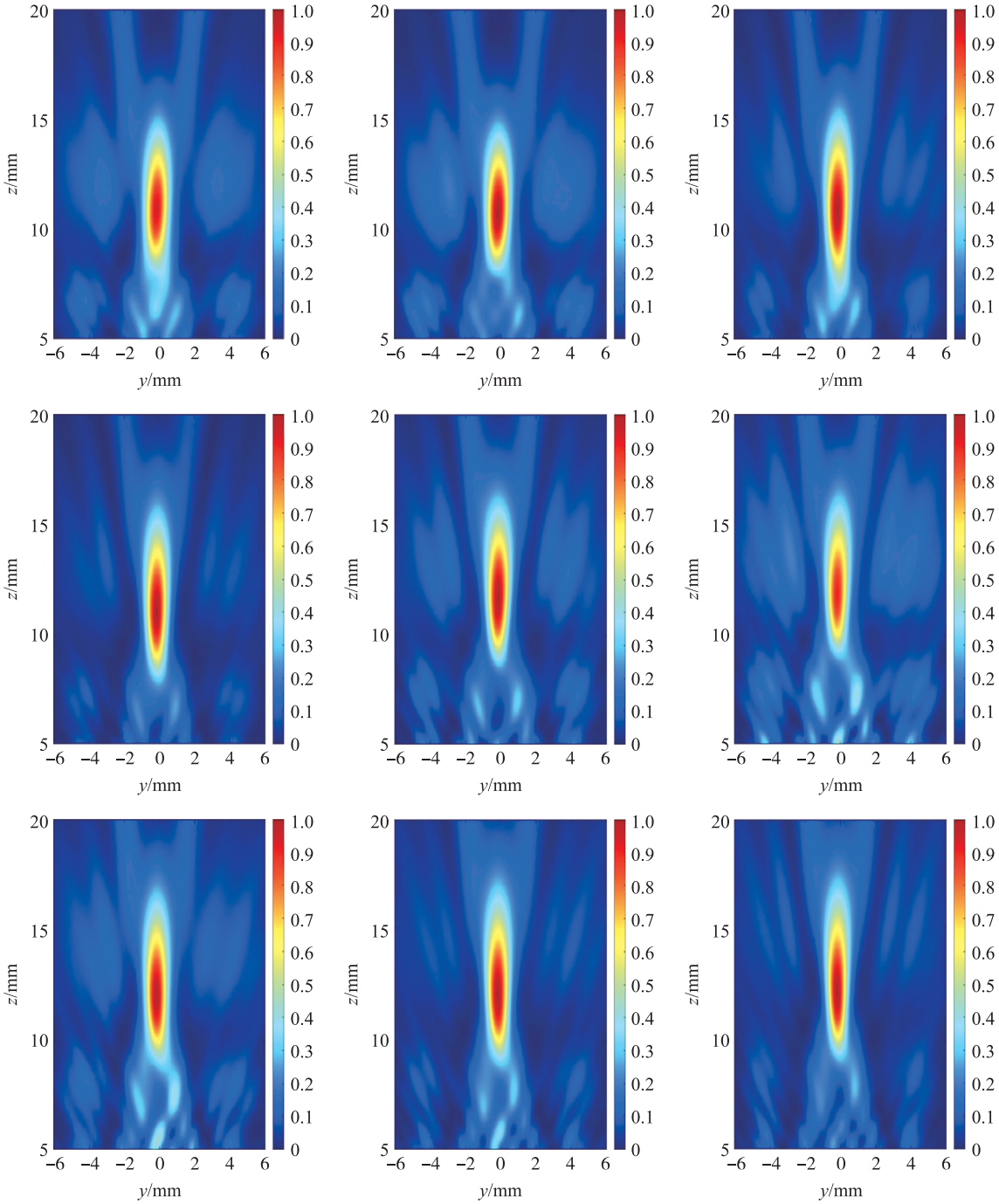

图 5 x-z 平面上模拟的电场强度分布

3　结论

综上所述,本文提出了一种在太赫兹窗口内工作的长焦型消色差超透镜设计方案。通过采用两种结构简单、易于加工的单元结构,并结合粒子群优化算法,实现了 300 GHz~380 GHz 带宽内的色散补偿。相比于 Chen 等提出的扩展焦深宽带消色差超透镜(1 000 nm~1 200 nm)有一定的提升。尽管本文通过 PB 相位与传输相位的协同调控,成功实现了 80 GHz 频带内的长焦消色差聚焦,但未来仍有优化空间:一方面可以提升几何自由度以拓宽工作带宽;另一方面,可探索将 PSO 算法与深度学习等先进模型结合,以更低的时间成本快速寻找复杂超表面阵列的全局最优解。

参考文献:

[1] Zhang P S,Yan L H,Liang H W,et al. RGB Achromatic Metalens for Neural Network-Enhanced High Resolution Digital Imaging[J]. Laser & Photonics Reviews,2025,19(18):e00460.

[2] Wu H,Yi Y T,Zhang N,et al. Inverse Design Broadband Achromatic Metasurfaces for Longwave Infrared [J]. Optical Materials,2024,148:114923.

[3] Moon S W,Heo H,Oh D K,et al. Design of a Bilayer Metalens for Red,Green,and Blue-Achromatic Imaging with Wide Field of View[J]. Advanced Photonics Research,2025,6(11):202500107.

[4] Avayu O,Almeida E,Prior Y,et al. Composite Functional Metasurfaces for Multispectral Achromatic Optics[J]. Nature Communications,2017,8(1):14992.

[5] 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.

[6] Fan Z B,Qiu H Y,Zhang H L,et al. A Broadband Achromatic Metalens Array for Integral Imaging in the Visible [J]. Light:Science & Applications,2019,8(1):67.

[7] Wang Y J,Chen Q M,Yang W H,et al. High-Efficiency Broadband Achromatic Metalens for Near-IR Biological Imaging Window[J]. Nature Communications,2021,12(1):5560.

[8] 肖行健,祝世宁,李涛. 离散波长消色差超构透镜的性能分析[J]. 中国光学,2021,14(4):823-830.

[9] Chen J,Guan Z H,Tang F,et al. Metalens Design with Broadband Achromatic and Longitudinal High-Tolerance Imaging[J]. Optics Communications,2025,577:131389.

[10] Liu Y Q,Sun J H,Zhang Y Y,et al. A Hybrid Achromatic Plasmonic Metalens[J]. Laser & Photonics Reviews,2025,19(23):e00719.

[11] Zheng Y,Zhu W Q,Xia L P,et al. Achromatic Metalens in Visible Band Based on Nano Double Trapezoid Structures[J]. Optical Materials,2025,161:116801.

[12] Wang S M,Wu P C,Su V C,et al. Broadband Achromatic Optical Metasurface Devices[J]. Nature Communications,2017,8(1):187.

[13] Zhang Q S,Guo D,Shen C S,et al. Millimeter-Wave Metalens with Extended Depth of Focal on the Short Focal Length[J]. Physica Scripta,2023,99(1):015516.

[14] 申益佳,谢鑫,蒲明博,等. 基于传输相位和几何相位协同调控的消色差超透镜[J]. 光电工程,2020,47(10):108-116.

沈小琪(2002—),女,汉族,东南大学电子科学与工程学院硕士研究生,研究方向为太赫兹超透镜,220241896@seu.edu.cn;

柏宁丰(1978—),男,汉族,东南大学电子科学与工程学院教授,主要研究方向为电磁超材料设计、电真空与光子器件设计,bnfeng@seu.edu.cn。