

基于超构表面的太赫兹广角反射器

陈薇竹^{1,2,3}, 张翠玲^{1,2,3}, 邵麟杰^{1,2,3}, 何敬锁^{1,2,3}, 张岩^{1,2,3*}¹首都师范大学物理系北京市超材料与器件重点实验室, 北京 100048;²首都师范大学太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048;³首都师范大学北京市成像理论与技术创新中心, 北京 100048

摘要 随着太赫兹技术的发展以及全球对 6G 通信的研究和期望, 太赫兹通信技术获得了广泛的关注。但是太赫兹波具有很强的方向性, 常常进行端对端的传播, 且传播过程中容易被障碍物阻挡, 太赫兹通信中的广角和定向传播成为技术难点。设计一种新的广角反射超构表面, 其可将入射角为 $5^\circ\sim 45^\circ$ 的太赫兹波反射聚焦在同一位置, 该位置距离样品 600 mm, 方向为 13° 。采用共振相位调制原理设计单元结构, 利用透镜聚焦原理和相位补偿原理对单元结构进行排布并进行加工。在 220 GHz 工作频率下进行实验验证, 实验结果证实了该器件的功能。所提方案为解决太赫兹 6G 通信难题提供了一个有效途径, 具有一定的应用前景。

关键词 6G 通信; 太赫兹; 超构表面; 广角; 聚焦

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230447

Wide-Angle Reflector for Terahertz Waves Based on Metasurfaces

Chen Weizhu^{1,2,3}, Zhang Cuiling^{1,2,3}, Shao Linjie^{1,2,3}, He Jingsuo^{1,2,3}, Zhang Yan^{1,2,3*}¹Beijing Key Laboratory for Metamaterials and Devices, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;²Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China;³Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract With the development of terahertz technology, the global research and anticipation regarding 6G communication based on terahertz waves has gained considerable research attention. However, the transmission of terahertz waves is directional, involves end-to-end propagation, and is often blocked by obstacles. Therefore, realizing wide angle and directional transmission of terahertz waves for communication is technically difficult. Herein, a new metasurface was designed and verified to realize the wide angle and directional reflection of terahertz waves. To realize the focusing function of metasurface and control the phase of light field, the transmission phase modulation principle was adopted in designing the unit structure. This unit structure was arranged based on the lens focusing principle and phase compensation principle. Simulations and experiments were conducted at a working frequency of 220 GHz. Our findings verified that the proposed metasurface can reflect the terahertz waves over a wide angle range of $5^\circ\sim 45^\circ$ and focus it with a focal length of 600 mm along the direction of 13° . The design scheme proposed provides an effective approach to solve the problems associated with 6G communication based on terahertz waves and has a certain application prospect.

Key words 6G communication; terahertz; metasurface; wide angle; focusing

1 引言

随着第五代通信技术在世界范围内得到不断发

展, 全球 5G 通信网络用户规模已超过 4 亿。为了满足未来业务对超高数据速率、极低延迟等需求, 研究者们已经开始了关于下一代无线通信技术的相关研究, 其

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-03-02; 录用日期: 2023-03-15; 网络首发日期: 2023-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(12174270, 12174271, 62175168, 62275175)

通信作者: *yzhang@cnu.edu.cn

中太赫兹频段中绝对带宽资源是利用太赫兹频率进行无线通信最显著的优势,使得太赫兹通信具有极大的应用潜力^[1-3]。6G 通信技术的一个难题是太赫兹波具有很强的方向性,往往是端对端的传输,且太赫兹信号的传播路径很容易被室内障碍物阻挡^[4-5],因此绕过障碍物定向地传输给同一用户,且传输更多的信息成为研究的一个重点。超构表面是一种人造平面超构材料,由亚波长间距天线阵列组成,可以同时操纵光的振幅、相位和偏振^[6-8]。研究人员通过对透射光/反射光的相位控制,实现了超构表面在集成光学^[9-10]、光通信^[11-12]、全息^[13-14]等方面的应用。

近年来,研究者基于超构表面的调制功能在广角方向上进行了一系列的研究。2016 年 Arbabi 等^[15]通过消色差校正斜入射聚焦,实现了具有 $0^\circ\sim 30^\circ$ 范围固定焦距的广角聚焦功能超构表面。2020 年 Song 等^[16]通过将相位和偏振信息编码到像素化超构表面,改变像素块的排列方式,实现任意输出偏振波前整形的方法,该方法实现了广角成像功能。2022 年 Chen 等^[17]通过独立优化每个超构透镜的聚焦和成像性能,在拼接处理后实现高质量的广角图像。近年来的大多数研究在实现广角功能时多采用可见光波段或毫米波段,本文采用太赫兹波段;同时绝大多数研究采用单输入广角输出的模式,多用于成像,本文采用广角输入与定向输出的模式,应用于通信方面,目标为提高太赫兹通信的安全性、准确性等。

本文设计了一种十字形的单元结构,通过适当改变单元结构的几何参数,可以实现相对入射光相位为 $0^\circ\sim 360^\circ$ 的相移。用特殊顺序排布一系列结构尺寸改变的单元结构,实现对入射光的调制,可以将入射角为 $5^\circ\sim 45^\circ$ 、频率为 220 GHz 的太赫兹波定向聚焦在方向为 13° 、焦距为 600 mm 的一点。实验结果验证了所提器件的功能。这种方式可以实现太赫兹通信传播方向的可控,太赫兹波可以绕过阻碍进行定向传输,并且广角的入射可以获取更多的信息。这一功能使得太赫兹 6G 通信过程更加准确,更具有安全性,且能容纳更多的信息。

2 单元结构设计

超构表面中相位调控的原理可以列为几种:传输相位型调控^[18]、局域共振相位调控^[19]、基于 Pancharatnam-Berry (PB) 效应的几何型相位调控^[20]、多种相位融合型调控^[6]。所提方法基于局域共振型调控,通过改变金属单元结构的尺寸,发生的局域共振效应对太赫兹波的相位和幅值起到一定的调控作用。

为通过仿真得到更准确的相位调控和更高效、稳定的反射率单元结构,使用时域有限差分(FDTD)方法,在商业软件(FDTD Solutions, Lumerical 公司)中参数化扫描“十”字结构的长和宽,得到不同结构带来

的共振相位和反射率。图 1 为该反射超构表面的单元结构示意图,选用偏振无关的“十”字形结构。单元结构周期 L 为 $650\ \mu\text{m}$,金属“十”字位于中心,金属厚度 A 为 $35\ \mu\text{m}$,基底选用电路板 FR-4 材料,厚度 H 为 $500\ \mu\text{m}$,在 220 GHz 处的折射率为 1.89。

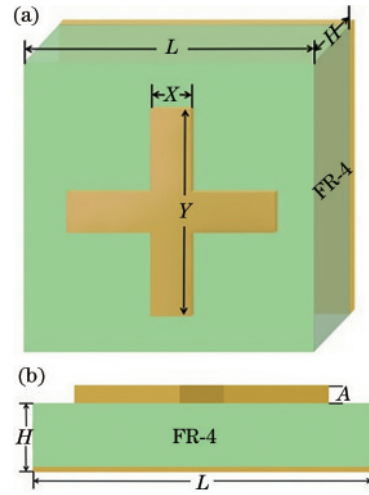


图 1 金属“十”字形单元结构示意图。(a) 正视图;(b) 侧视图
Fig. 1 Schematic of metal “十”-typed structure. (a) Front view; (b) side view

将仿真区域的 X-Y 方向设置为周期性(periodic)边界条件,Z 方向设置为完美匹配层(PML)边界条件,扫描金属“十”字结构的长 Y 范围为 $150\sim 580\ \mu\text{m}$,宽 X 范围为 $80\sim 280\ \mu\text{m}$,步长分别为 $4.3\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 。图 2 展示了通过仿真获得的单元结构的反射率和相位。由图 2 可以看出,选取的 8 组单元结构的相位覆盖范围可以达 360° ,且每组单元之间的相位差为 45° ,同时选取

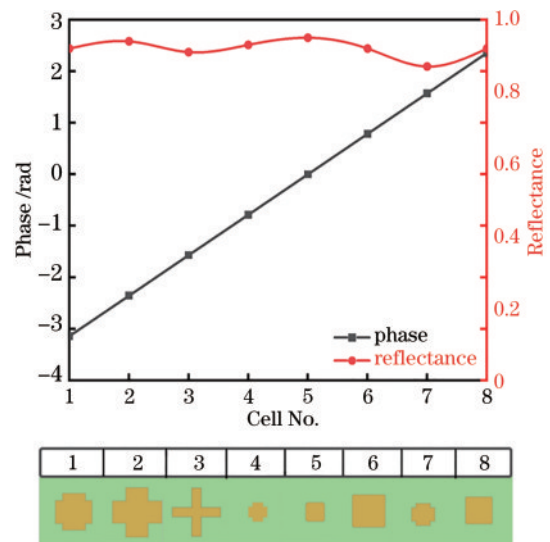


图 2 工作频率为 220 GHz 时各单元结构的反射率和相位调制

Fig. 2 Reflectance and phase modulation of each unit structure at an operating frequency of 220 GHz

的单元结构所对应的反射率均较高且稳定。

3 基本原理

3.1 聚焦原理

为实现 220 GHz 工作频率下超构表面的聚焦功能,根据等光程原理,不同位置超构表面上的单元结构对应的相位分布应满足

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

式中: $\sqrt{x^2 + y^2}$ 为超构表面上的任意一点离原点的距离; λ 为波长, 为 1360 μm ; f 为设置的焦距, 为 600 mm。为实现对斜入射情况下的光的聚焦和反射波束的转向, 引入补偿相位对波束进行调制, 补偿相位的公式为

$$\varphi_{in} = \frac{2\pi}{\lambda} l, \quad (2)$$

式中: l 为光程差。对透镜相位 (φ_l)、补偿入射相位 (φ_{in})、出射波束转向相位 (φ_{out}) 进行叠加:

$$\varphi = \varphi_l + \varphi_{in} + \varphi_{out}, \quad (3)$$

分别实现聚焦、补偿斜入射及波束转向功能。

基于式(1)~(3), 分别得到 4 组入射角为 9°、15°、30°、45°, 反射波束聚焦在 13° 位置的超构表面相位分布, 这 4 组超构表面均有 230 × 230 个十字单元, 且单元周期为 1300 μm 。将这 4 组相位分布通过棋盘格的方式排布在一起, 如图 3 所示。此时得到的相位分布为最终超构表面相位分布结果, 该超构表面共有 460 × 460 个单元, 且每个单元周期为 650 μm , 对 9°、15°、30°、45° 四个角度的入射光均有一定的反射和聚焦功能。

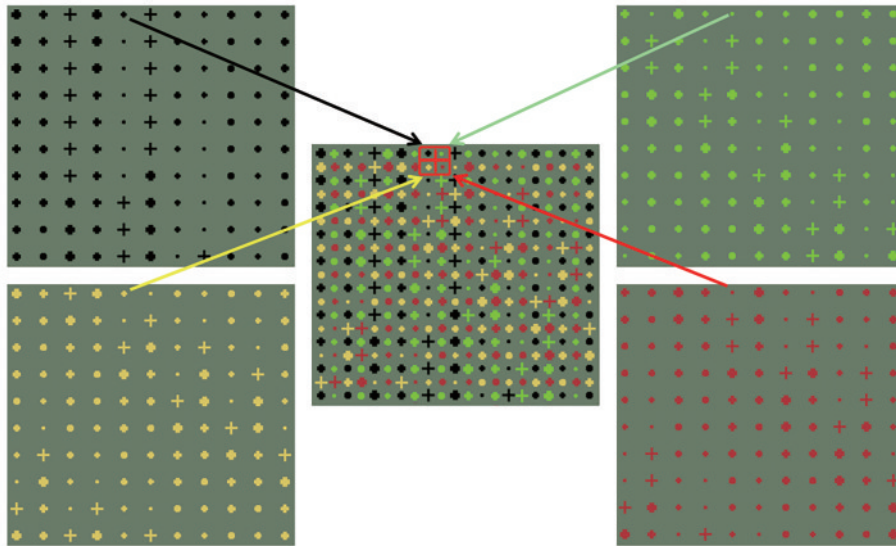


图 3 超构表面的棋盘格组合方式

Fig. 3 Checkerboard combination of metasurfaces

3.2 模拟结果

对最终相位分布进行模拟, 获得 4 组不同入射角对应的模拟结果。图 4(a)~(d) 分别是入射角为 45°、30°、15°、9° 时超构表面反射聚焦的结果。图中方框的位置为设定的焦距为 600 mm、方向为 13° 的位置, 由图 4 可以看出, 在这些位置有明确的聚焦现象。可见该反射超构表面可以在不同角度入射的情况下, 在所设计的位置实现聚焦。由于棋盘格的排列方式, 剩余 3 组不同的相位补偿也将会在其他位置发生聚焦现象。

4 实验表征

基于以上的设计目标和模拟结果, 对该反射超构表面样品进行实验表征。首先根据计算所得的相位分布对超构表面进行加工, 样品如图 5(a) 所示。实验设备有激光器、信号发射器及信号接收器, 实验过程中信号发射器的频率为 220 GHz, 信号接收器放置于距离

样品 600 mm 的位置。样品图和实验设施示意图如图 5(b) 所示。CNITET 公司的信号发射器由 220~330 GHz 上下变频组件、磁吸底座与俯仰位移台组成, 可以为实验提供所需的 220 GHz 环境; 信号接收器同样由这 3 部分组成, 并连接 NI 公司的矢量信号收发仪 (PXIe-5841), 在此可读取反射信号的功率等信息。

首先保持信号接收端位于焦距为 600 mm、角度为 13° 的位置不变, 调整信号发射端的角度, 将其从与中心夹角 5° 扫描到 60°, 每隔 5° 读取一次接收端的信号功率数据。图 6 为接收端的信号功率曲线图, 其中虚线的位置代表噪声。由图 6 可以看出, 在设计的信号接收器入射角度为 9°、15°、30°、45° 时, 接收端确有信号, 且较强, 而其余角度入射时信号明显减弱, 当入射角大于 45° 时, 信号不断减弱直至被噪声吞没。对比 5°~45° 范围内的功率和大于 45° 的功率, 可以看出在 5°~45° 范围内, 接收端均有较强信号, 因此可以认为在 5°~45° 广角范围内, 该超构表面均可以实现将光反射到同一

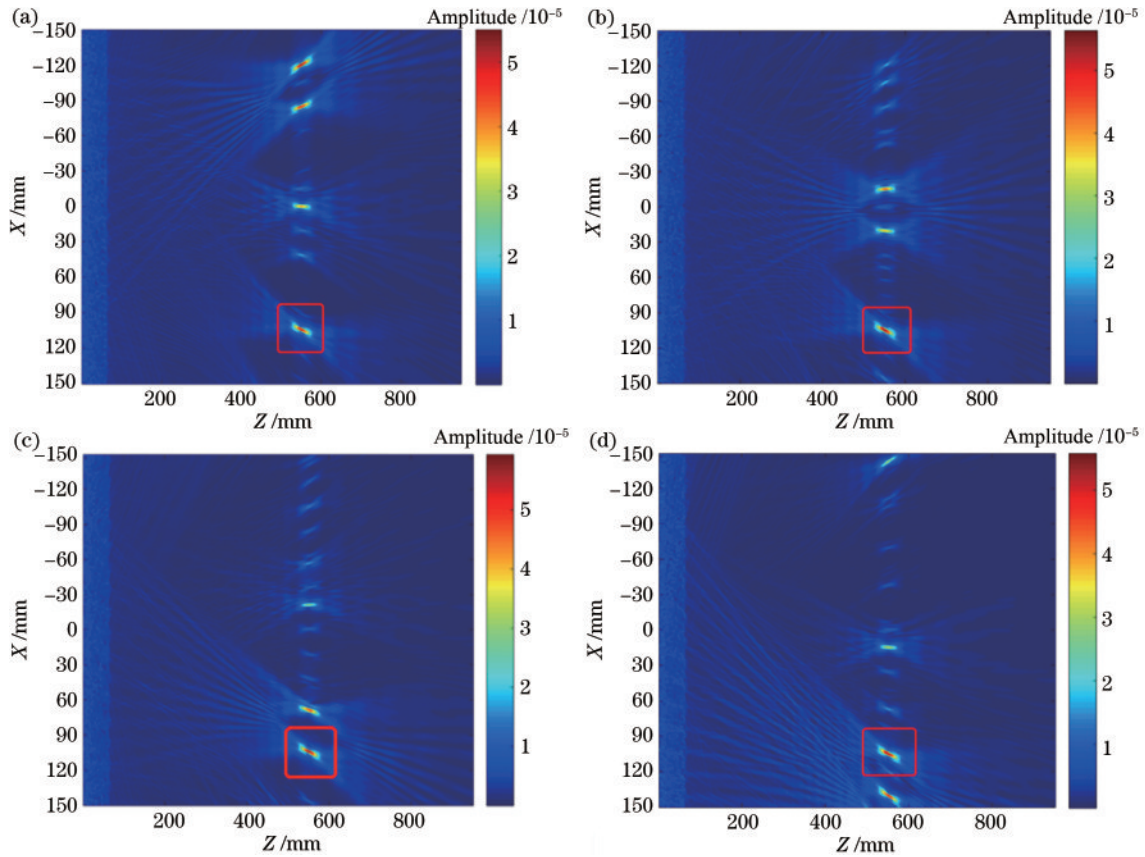


图 4 超构表面聚焦模拟结果。(a)~(d)太赫兹波入射角分别为 45°、30°、15°和 9°时的结果

Fig. 4 Simulation results of hyperstructured surface focusing. (a)~(d) Results under incidence angles of terahertz waves of 45°, 30°, 15°, and 9°, respectively

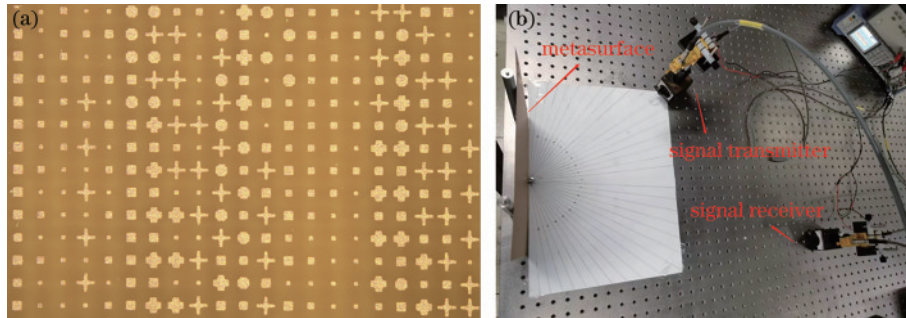


图 5 超构表面样品。(a)超构表面样品的局部图像;(b)实验设施

Fig. 5 Hyperstructured surface sample. (a) Local image of the hyperstructured surface sample; (b) experimental facility diagram

位置的效果。

以上结果证实了在一个广角的范围内设定位置确有信号的结论。为了验证这一位置是否出现聚焦现象,保持信号发射器的角度不变,改变信号接收器角度进行测试,以设置的 13°方向为中心,分别向顺时针和逆时针方向每隔 2°读取一次信号功率数据,分别读取 5 组数据,图 7 给出了相应的功率曲线图。由图 7 可以看出,在设计 13°方向信号最强,而随着接收端向周围移动,信号强度不断减弱,直至完全被噪声吞没,因此可以证实在所设计的位置确实有聚焦现象的结论。

在实验过程中,信号发射器和信号接收器直连时信号功率为 -62.28 dB,测得的信号功率为 -70.2 dB,衰减信号与功率之间的关系为

$$Q = 10 \lg \frac{E_{out}}{E_{in}}, \quad (4)$$

式中:Q为衰减信号,单位为 dB; E_{out} 为超构表面反射后的信号功率; E_{in} 为原始信号功率。根据测试,所得到的信号衰减为 -7.92 dB,可以计算出这一过程的 E_{out}/E_{in} 约为 16.2%,而模拟过程中得出的 E_{out}/E_{in} 应为 25%。这一衰减可能是加工时产生的误差和设备不够稳固造成的。

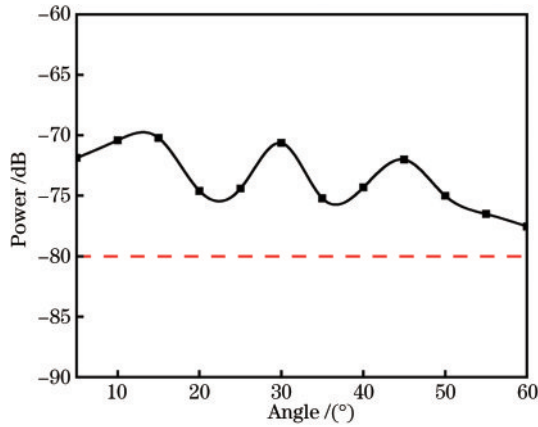


图6 不同太赫兹波入射角时对应的聚焦信号功率

Fig. 6 Focusing signal power corresponding to different terahertz wave incidence angles

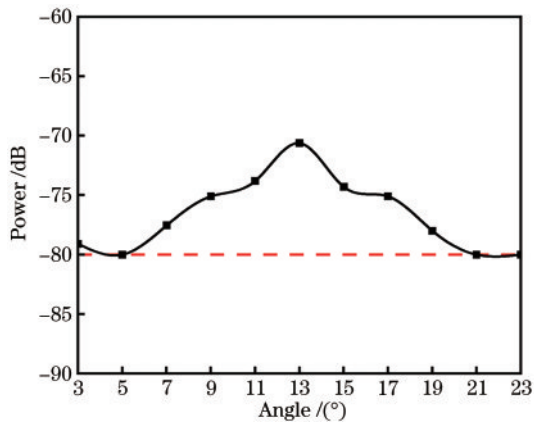


图7 信号接收端不同位置对应的信号功率

Fig. 7 Signal power corresponding to different positions of the signal receiving end

5 结 论

设计了一种广角反射式超构表面器件,利用共振相位的调控原理,结合特殊排列的单元结构,实现了对广角入射光的调控。使用商业 FDTD 仿真软件对单元结构的几何参数进行扫描,获取了十字单元结构的几何参数与其相位、振幅的对应关系。通过透镜聚焦原理和相位补偿原理获得了 4 组超构表面的相位分布,利用棋盘格方式将分散的超构表面组合成完整的超构表面。仿真结果和实验结果验证了该器件的功能,该器件能对 $5^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 范围内入射光进行反射并聚焦在焦距 600 mm 的同一位置,仿真聚焦效率为 25%,实验聚焦效率为 16.2%。这种广角反射式超构表面所具有的定向传输和广角接收信号的功能为太赫兹 6G 通信关键技术提供了一个有效的解决方案,在提升太赫兹 6G 通信的准确性、安全性和容量等方面具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 李丽, 葛宏义, 蒋玉英, 等. 太赫兹波在 6G 通信网络中的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1300007.
Li L, Ge H Y, Jiang Y Y, et al. Research progress of terahertz wave in 6G communication network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1300007.
- [2] Imoize A L, Adedeji O, Tandiya N, et al. 6G enabled smart infrastructure for sustainable society: opportunities, challenges, and research roadmap[J]. Sensors, 2021, 21(5): 1709.
- [3] Boulogeorgos A A A, Jornet J M, Alexiou A. Directional terahertz communication systems for 6G: fact check[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021, 16(4): 68-77.
- [4] Polese M, Jornet J M, Melodia T, et al. Toward end-to-end, full-stack 6G terahertz networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(11): 48-54.
- [5] Yang F Y, Pitchappa P, Wang N. Terahertz reconfigurable intelligent surfaces (RISs) for 6G communication links[J]. Micromachines, 2022, 13(2): 285.
- [6] 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.
- [7] Ni X J, Ishii S, Kildishev A V, et al. Ultra-thin, planar, babinet-inverted plasmonic metalenses[J]. Light: Science & Applications, 2013, 2(4): e72.
- [8] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission [J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(11): 937-943.
- [9] Park J S, Zhang S Y, She A L, et al. All-glass, large metalens at visible wavelength using deep-ultraviolet projection lithography[J]. Nano Letters, 2019, 19(12): 8673-8682.
- [10] Wu X, Lu H X, Sengupta K. Programmable terahertz chip-scale sensing interface with direct digital reconfiguration at sub-wavelength scales[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1-13.
- [11] Tao J, You Q, Li Z L, et al. Mass-manufactured beam-steering metasurfaces for high-speed full-duplex optical wireless-broadcasting communications[J]. Advanced Materials, 2022, 34(6): 2106080.
- [12] Zheng Y L, Chen K, Xu Z Y, et al. Metasurface-assisted wireless communication with physical-level information encryption[J]. Advanced Science, 2022, 9(34): e2204558.
- [13] Huang L L, Zhang S, Zentgraf T. Metasurface holography: from fundamentals to applications[J]. Nanophotonics, 2018, 7(6): 1169-1190.
- [14] Zhao R Z, Huang L L, Wang Y T. Recent advances in multi-dimensional metasurface holographic technologies [J]. Photonix, 2020, 1(1): 1-24.

- [15] Arbabi A, Arbabi E, Kamali S M, et al. A miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 1-9.
- [16] Song Q H, Baroni A, Sawant R, et al. Ptychography retrieval of fully polarized holograms from geometric-phase metasurfaces[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-8.
- [17] Chen J, Ye X, Gao S L, et al. Planar wide-angle-imaging camera enabled by a metalens array[J]. Optica, 2022, 9(4): 431-437.
- [18] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carnes C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths [J]. Nano Letters, 2016, 16(11): 7229-7234.
- [19] Daniel R, Deta L, Davide J, et al. Mid-infrared plasmonic biosensing with graphene[J]. Science, 2015, 349(6244): 165-168.
- [20] Chen X Z, Huang L L, Mühlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. Nature Communications, 2012, 3(1): 1-6.