

太赫兹超材料仿真设计与制备研究

王晨阳, 贺训军, 姜久兴, 孙晨光
(哈尔滨理工大学 理学院, 哈尔滨 150080)

摘要:设计了一种在近红外太赫兹波段产生电磁响应的超材料器件,该器件单元结构是由全对称的金属四开口谐振环与本征硅衬底组成。通过仿真模拟设计出合理的结构与尺寸的金属谐振环,达到想要的谐振效果。分析了表面电场强度与表面电流流向,以便了解电磁响应机理。通过光刻剥离工艺制备出四开口超材料谐振环,并基于光泵浦探测系统研究了太赫兹光谱透射实验样品后的光频谱响应特征。结果表明:当入射的太赫兹波电场矢量电场与超材料衬底同一条边平行或垂直时,太赫兹都在1THz附近,且响应特征相似。这说明了该全对称结构对于入射太赫兹波的极化并不敏感。此设计在隐身技术、光电器件、传感器和宽带通信等领域具有潜在的应用前景。

关键词:超材料;光刻;太赫兹;极化

DOI:10.15938/j.jhust.2022.01.015

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2022)01-0115-06

Simulation Design and Fabrication of Terahertz Metamaterials

WANG Chen-yang, HE Xun-jun, JIANG Jiu-xing, SUN Chen-guang
(School of Sciences, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: We have designed a metamaterial device which can generate electromagnetic response in near-infrared terahertz band. The device unit structure is composed of a fully symmetrical metal four split resonant ring and an intrinsic silicon substrate. The reasonable structure and size of metal resonant ring are designed by simulation to achieve the desired resonance effect. In order to understand the electromagnetic response mechanism, the surface electric field strength and the surface current direction were analyzed. We have fabricated a four-opening metamaterial resonant ring by photolithography, and studied the electromagnetic response characteristics of terahertz transmission samples by optical pumping detection system. The results show that when the incident terahertz wave electric field vector field is parallel or perpendicular to the same edge of the metamaterial substrate, the terahertz is near 1thz, and the response characteristics are similar. This shows that the fully symmetric structure is not sensitive to the polarization of incident terahertz wave. Our design has potential applications in stealth technology, optoelectronic devices, sensors and broadband communications.

Keywords: metamaterials; photolithography; terahertz; polarization

收稿日期: 2020-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(62075052).

作者简介: 贺训军(1977—),男,教授,博士研究生导师;

姜久兴(1963—),男,教授,博士研究生导师.

通信作者: 王晨阳(1996—),男,硕士研究生,高级工程师, E-mail: 642699377@qq.com.

0 引言

近几年来科研中,许多学者都致力于太赫兹电磁波领域的研究。由于其特有的电磁特性,太赫兹在未来通讯领域、医疗领域、安检领域等有着非常重要的科研意义,并且对生产有着非常重要的应用价值^[1]。由于太赫兹所处频段,在科研领域称之为“太赫兹空隙”。随着近些年超短脉冲激光的发展,太赫兹脉冲辐射研究逐渐成熟,这对于研究太赫兹电磁效应提供了很大的帮助^[2]。然而自然界中对太赫兹脉冲响应的天然物质很少,而超材料对于太赫兹却有很强的电磁响应能力。超材料是一种人工设计的亚波长复合结构,由于其负折射率与磁导率等特性得到广泛关注^[3]。大多超材料由金属开口谐振环(SSR)单元和衬底组成,所以金属开口谐振环成为研究超材料的主要模型。新加坡南洋理工大学课题组设计出一种镜像的 TARs(非对称的金属谐振器阵列),研究了其非对称性下产生的 Fano 共振的特性,但是该器件对于入射波的极化方向有局限性^[4]。山东科技大学课题组研究出一种基于石墨烯宽带超材料吸收器,该吸收器对于不同偏振角度的入射波并不敏感,在较宽频带的吸波特性相似,该课题组只是做了仿真模拟实验,并没有做出实验测试样品^[5]。

设计了一个全对称的四开口圆形金属谐振环,通过仿真研究其太赫兹透射的电磁特性,并利用 lift-off 光刻剥离工艺制备出实验样品进行实验测试。结果表明:当太赫兹电磁波的电场矢量平行于或垂直于同一条超材料衬底边时,太赫兹透射过超材料样品的电磁响应没有明显变化,这种全对称结构对于电磁极化并不敏感^[6]。

1 实验

1.1 仿真设计研究

图1为本文设计的基于硅底的四开口圆形金属谐振环周期结构。衬底为高阻硅材料,厚度为 500 μm ,顶层的开口金属环为金材料,厚度为 0.2 μm 。

由于入射电磁场的影响,顶层金属谐振环会在金属臂产生持续振荡的电流。在这里,可以将金属谐振环看做是 LC 的谐振电路,金属开口处可以看做是电容,金属臂可以看做是电感。谐振频率公式可表示为:

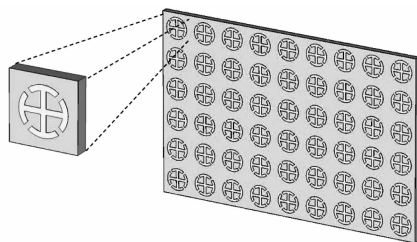


图1 超材料金属谐振环单元与周期结构

Fig. 1 metamaterial metal resonant ring element and periodic structure

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (1)$$

式中: ω_0 为金属环谐振频率; L 为等效电感; C 为等效电容。

C 为金属开口处等效电容, L 为金属臂的等效电感。可以通过设计不同结构参数去改变超材料的本征谐振频率。该四开口圆形金属谐振环结构为全对称结构,这个结构对于入射电磁场的极化并不敏感^[7]。如图2所示,圆圈散点曲线为入射电磁波电场极化方向为 0° 时,太赫兹透射样品后的传输曲线;三角散点曲线为入射电磁波电场极化方向为 90° 时,太赫兹透射样品后的传输曲线。从图中可以看出,当电场极化方向在 0° 的 TE 波入射时,谐振频率在 1 THz 附近,当电场极化方向在 90° 的 TM 波入射时,谐振频率在 1 THz 附近。两种极化方向垂直的电磁波会产生相同的谐振效应,这说明了该金属谐振器结构对于这两种垂直的极化方向并不敏感^[8]。结果表明,该全对称谐振器可以在入射波相互垂直两种极化方向,产生相同的谐振效应。

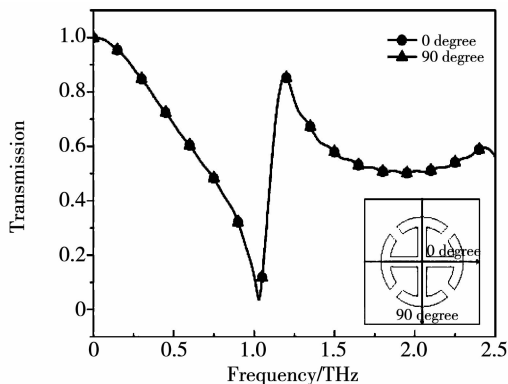


图2 太赫兹透射仿真传输曲线

Fig. 2 terahertz transmission simulation transmission curve

在谐振峰 1.05 THz 处监测了金属谐振环的电场强度分布,如图3所示,当 TE 波入射时,电场极

化方向在 0° , 金属表面电荷由于入射电磁场的影响, 沿着横向金属臂运动, 产生了沿横向金属臂的振荡电流。金属表面电荷在金属开口处聚集, 在金属开口处形成等效电容^[9]。当 TM 波入射时, 电场极化方向 90° , 表面电荷沿纵向金属臂运动, 产生沿纵向金属臂的振荡电流。金属表面电荷在金属开口处聚集, 在四个开口处形成等效电容。由于该结构的全对称性, 对于 TE 波和 TM 波的极化方式并不敏感, 产生了相同的谐振效应。

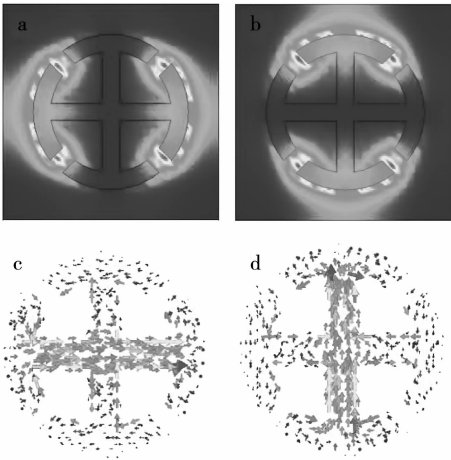
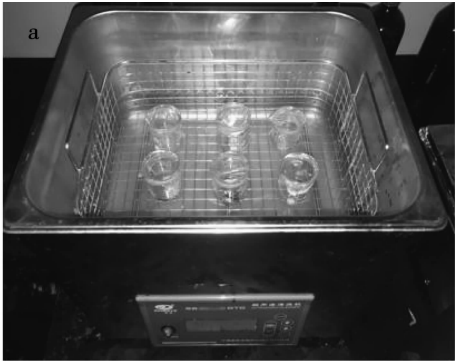


图 3 表面电场强度与表面电荷分布图
Fig. 3 surface electric field intensity and surface charge distribution diagram

1.2 制备工艺

采用剥离性光刻工艺去制备超材料样品^[10]。由于超材料样品要进行太赫兹性能测试, 我们需要使用本征高阻硅片作为衬底。将高阻硅片切成 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的正方形硅片。使用无水乙醇将硅片表面油脂残留物擦拭去除, 分别使用丙酮, 无水酒精, 去离子水超声清洗 10 min。丙酮将硅片表面附着残留的有机物超声震荡去除, 酒精和去离子水分别去除表面上一步清洗残留的丙酮与无水乙醇。将超声清洗过的高阻硅片用镊子取出, 并用等离子水冲洗, 充分去除硅片表面残留的杂质。由于用加热板直接将硅片表面蒸干, 会有水印留在硅片上, 所以在冲洗完毕后, 使用鼓风球将表面残留的去离子水吹出硅片表面。

将清洗好的硅片放入等离子清洗机, 在硅片表面进行充分打氧, 目的是为了增强硅片表面的液体流动性。在接下来的匀胶的过程中, 旋涂出更加均匀致密的薄膜。图 4 为超声清洗机与等离子刻蚀机。



(a) 超声清洗机



(b) 等离子刻蚀机

图 4 超声清洗机与等离子刻蚀机
Fig. 4 ultrasonic cleaning machine and plasma etching machine

在这里, 使用负性光刻胶 SUN-lift1303, 该光刻胶具有较高的分辨率、对比度、宽容度等特性, 最高分辨率可达 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。旋涂曲线如图 5 所示。实验过程中使用了三段转速分别为 500 r/min 、 $4\text{ }000\text{ r/min}$ 、 500 r/min , 理想状态下光刻胶的膜厚为 $2.36\text{ }\mu\text{m}$ ^[11]。首先, 将硅片放入 100°C 的加热板上进行预烘处理, 又称脱水烘焙。由于光刻胶是疏水性质, 为了增强光刻胶的附着力, 需要将硅片表面的水分蒸干。将脱水烘焙后的硅片放上台, 利用真空泵, 通过大气压将硅片压在转台上, 涂胶的时候可以采用 2 种方法, 第一种为在旋涂前将光刻胶缓慢滴至表面均匀, 第二种为在达到一定转速时, 将光刻胶滴至硅片上。这里我们采用第一种甩胶方法。使用针管将光刻胶缓慢抽出, 在抽取光刻胶的过程中, 不能抽取过快, 否则容易进入空气。这样在滴胶的过程会引入气泡, 气泡的作用与杂质微粒相似, 会形成光刻胶的表面缺陷。滴胶的过程中, 需要均匀滴入光刻胶, 从中心向周围缓慢滴下, 并静置 $1\sim 2\text{ min}$, 使得光刻胶在表面扩散均匀。光刻胶的膜厚与匀胶转速和光刻胶本身黏着性有很大关系, 当转速越快时, 光刻胶旋转

出的薄膜更加均匀致密,但是如果转速过高,容易使得硅片中心不稳,造成硅片甩出的情况^[12]。由于没有前烘的光刻胶还具有一定的黏性,容易黏附空气中的微粒,所以所有的实验操作都是在超净的环境下进行^[13]。

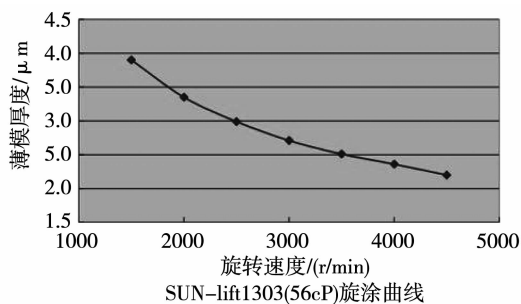


图5 光刻胶旋涂工艺曲线

Fig. 5 process curve of photoresist spin coating

匀胶结束后,将涂好光刻胶的硅片放在加热板上进行前烘处理,前烘又称软烤。在本文实验中,采用的前烘温度为 110°C ,前烘时间为 90 s 。光刻胶中的溶剂占 $60\% \sim 80\%$,旋涂过后,虽然光刻胶成为固态薄膜,但是光刻胶中的溶剂还会剩 $10\% \sim 30\%$ ^[14]。所以前烘作用是将光刻胶的溶剂挥发处理,并使得光刻胶的黏性降低,不易附着灰尘中微粒,并且不会在接下来的光刻中,出现黏附在掩模板上的情况。显影速度受到光刻胶中溶剂含量的影响,如果光刻胶中溶剂含量比较高,显影时光刻胶的溶解速度就比较快。若前烘处理不好,则会导致曝光区域和非曝光区域都会被溶解。前烘温度过低,光刻胶中含有较多溶剂,导致曝光精确度不够。前烘温度过高,黏附性降低,并且感光剂会发生反应,在曝光时光刻胶的敏感度降低^[15]。因此,前烘是光刻工艺中比较重要的环节。在本文实验中,采用的前烘温度为 110°C ,前烘时间为 90 s 。

前烘完成后,进行 10 s 曝光,实验中使用的光刻机曝光功率在 $8 \sim 12\text{ mW}/\text{cm}^2$,所以曝光能量在 $80 \sim 120\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。掩模版有图形的区域将不会受到光照,由于采用的是负性光刻胶,曝光区域的光刻胶不会溶于显影液,而非曝光区域将会溶于显影液^[16]。需要注意的是曝光能量过高会影响图形的转移,曝光能量过低不能达到阈值曝光能量,无法转移图形。曝光过后需要进行后烘,又称曝光后烘焙^[17]。后烘目的是使得曝光区域充分发生反应,在显影过程中得到更清楚的图形。本实验采用后烘温度为 110°C ,后烘时间为 90 s 。后烘结束后,静置 2 min ,然后将硅片放入显影液中浸泡 60 s 取出,在

等离子水中上下晃动 10 s ,去除硅片表面残留的显影液^[18]。从等离子水中取出后,用鼓风球快速吹去硅片表面的等离子水,否则会留下水印。需要注意的是,在显影的浸泡过程中不能晃动硅片,否则会加快显影速度,控制不好显影的时间,导致光刻图形变大,不能精确转移图形。

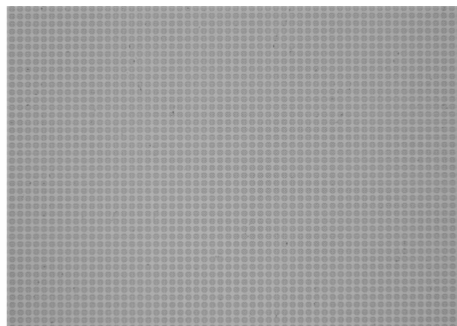


图6 光学显微镜下显影后的光刻图形

Fig. 6 lithography pattern after development under optical microscope

将显影过后的硅片放入等离子清洗机中进行打氧,目的是为了去除硅片图形处没有被显影液去除的薄的一层光刻胶。打氧完毕后,将硅片用蒸镀机在硅片表面蒸上一层 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 左右的金,放入丙酮中浸泡 $1 \sim 2\text{ h}$,换二次丙酮并用超声清洗机振荡 10 min ,然后换乙醇振荡 10 min ,最后用去离子水清洗表面,剥离掉蒸金后图形以外的光刻胶,留下原本图形处的金属^[19]。图7为光学显微镜下镀金前后的对比图。

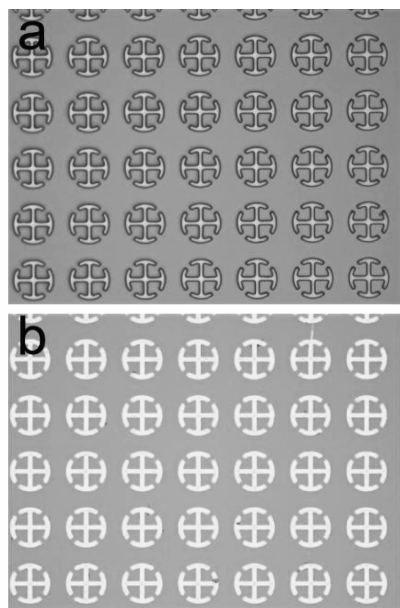


图7 光学显微镜下镀金前后的对比图

Fig. 7 Comparison of gold plating under optical microscope

1.3 光泵浦探测系统测试

图 8 为光泵浦探测系统示意图。采用光泵浦探测系统测试,入射信号分别为采样信号、泵浦信号、激发 THz 信号。泵浦信号先入射激发测试样品, Δt 后,入射用于激发 THz 波的信号,在信号通过发射器后,产生 THz 脉冲信号,入射到样品上,通过采样信号,对透射过后的 THz 波信号在锁相放大器内进行记录^[20]。

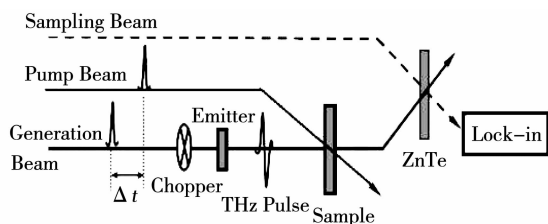
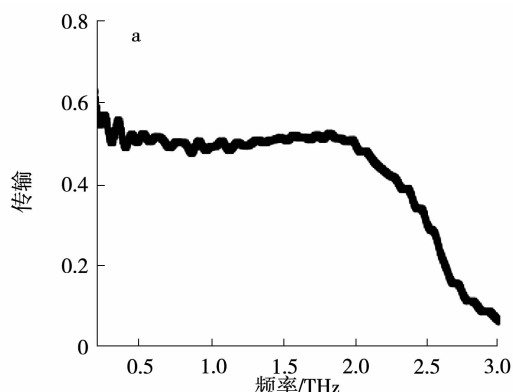
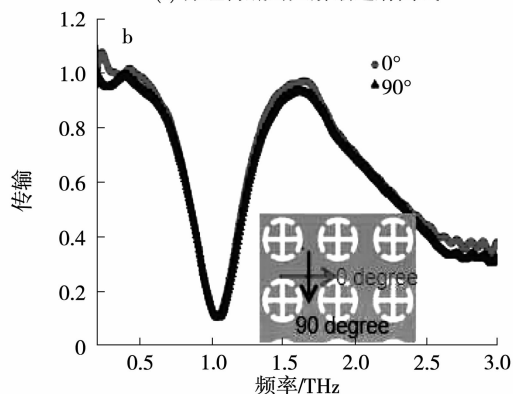


图 8 光泵浦探测系统示意图

Fig. 8 schematic diagram of optical pump detection system



(a) 裸硅衬底的太赫兹透射曲线



(b) 超材料样品太赫兹透射曲线

图 9 太赫兹透射传输曲线

Fig. 9 terahertz transmission curve

如图 9(a) 所示,对裸高阻硅衬底进行光泵浦探测系统测试,发现 THz 信号在 1 ~ 2.5 THz 范围内没有产生谐振,透射能量在 0.6 附近。如图 9(b) 对于

沉积金属谐振环的高阻硅衬底进行光泵浦激发,发现透射的 THz 信号在 1.0 THz 处产生谐振峰,并对电场极化垂直的 TE 波与 TM 波进行探测,发现两种极化方式不同的 THz 信号产生了在 1 THz 相同的谐振。所以可以知道,人工设计的金属谐振环可以对 THz 信号产生谐振的电磁响应,而且本文设计的全对称四开口金属谐振环结构对于 TE 波与 TM 波的极化影响并不敏感,会产生相同的电磁效应。而非对称的金属谐振结构入射电磁场的角度非常敏感,不同极化的角度会产生不同的电磁谐振。这对 THz 滤波器件的研究有很大的推进作用。

2 结 论

综上所述,我们提出一种全对称的太赫兹超材料器件,并且仿真模拟研究了不同极化电场下的 TE 波与 TM 波,通过该样品时产生的透射曲线谐振都在 1 THz 附近,这是由于设计金属谐振环具有全对称性的特点,表明该器件对于不同偏振角度入射的 THz 信号并不敏感。通过 lift-off 光刻剥离光刻工艺制备出了超材料样品,该工艺下图形转移准确,工艺简便。基于光泵浦太赫兹探测系统,对实验样品进行了测试。对比裸硅衬底,通过实验证明超材料可以对 THz 信号产生电磁响应,透射峰的谐振也是产生在 1 THz 附近,实验测试结果与仿真结果基本吻合。这对于太赫兹调制器件发展具有很大的推进作用。设计的谐振器在微波领域会有许多潜在的应用,例如光电器件、宽带通信、传感器和隐形技术等。

参 考 文 献:

- [1] SONG, HAN, GUPTA E, et al. Toroidal and Magnetic Fano Resonances in Planar THz Metamaterials [J]. Journal of Applied Physics, 2017(4):259.
- [2] ZHANG Yan, LI Yi, CAO Ye, et al. Graphene Induced Tunable and Polarization-insensitive Broadband Metamaterial Absorber[J]. Optics Communications, 2017(3):465.
- [3] XU Tao, XU Ruijia, LIN Yusheng. Tunable Terahertz Metamaterial Using Electrostatically Electric Split-ring Resonator[J]. Results in Physics, 2020, 19.
- [4] MORADI A. Electrostatic Waves in Photonic hypercrystals [J]. Physics Letters A, 2021, 387.
- [5] 刘德明,王静辉. KrF 光刻工艺技术[J]. 半导体技术, 2006(8):569.
- [6] LIU Deming, WANG Jinghui. KrFLithography Process Technology [J]. Semiconductor Technology, 2006(8):569.
- [6] CAO Li, RICHARDS J, 梁春广. 用于剥离工艺的高分辨率双层

- 光刻胶结构[J]. 半导体情报, 1981(4):61.
- CAO Li, RICHARDS J, LIANG Chunguang. High-resolution Double-layer Photoresist Structure for Stripping Process[J]. Semiconductor Information, 1981(4):61.
- [7] 樊继武. 应用于 MEMS 器件的光刻胶剥离技术关键工艺研究[D]. 天津大学学报, 2016, 12(3):45.
- [8] 杜海波. 光刻胶剥离工艺 IPA 消减方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010:63.
- [9] 程钰洋. 基于太赫兹超材料的多模式电磁感应透明的调控[D]. 青岛: 青岛大学, 2020:15.
- [10] 刘婧, 沈京玲, 张存林, 等. 光调制超材料及其传感应用(英文)[J]. 红外与毫米波学报, 2020, (4):430.
- LIU Jing, SHEN Jingling, ZHANG Cunlin, et al. Light-modulated Metamaterials and Their Sensing Applications[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, (4):430.
- [11] 霍红, 延凤平, 王伟, 等. 基于超材料的太赫兹高灵敏度传感器的设计[J]. 中国激光, 2020, (8):330.
- HUO Hong, YAN Fengping, WANG Wei, et al. Design of High-sensitivity Terahertz Sensor based on metamaterials[J]. China Laser, 2020, (8):330.
- [12] 李禹蓉, 曹斌照, 费宏明, 等. 双频段太赫兹超材料吸波体的设计及传感特性研究[J]. 微波学报, 2020, (4):63.
- LI Yurong, CAO Binzhao, FEI Hongming, et al. Design and Sensing Characteristics of Dual-band Terahertz Metamaterial Absorbers[J]. Journal of Microwaves, 2020, (4):63.
- [13] 张雅雯, 亓丽梅, 刘畅, 等. 超材料非对称传输器件研究[J]. 量子电子学报, 2018, 22(3):385.
- ZHANG Yawen, QI Limei, LIU Chang, et al. Research on Metamaterial Asymmetric Transmission Device[J]. Journal of Quantum Electronics, 2018, 22(3):385.
- [14] 潘武, 沈大俊, 闫彦君. 太赫兹超材料极化转换器设计及其特性分析[J]. 半导体光电, 2018:317.
- PAN Wu, SHEN Dajun, YAN Yanjun. Terahertz Metamaterial Polarization Converter Design and Characteristic Analysis[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018:317.
- [15] 朱超挺, 徐步光, 张远明, 等. 基于气溶胶喷墨打印的太赫兹超材料结构仿真与制备研究[J]. 科学技术创新, 2021:191.
- ZHU Chaoting, XU Buguang, ZHANG Yuanming, et al. Research on Structure Simulation and Preparation of Terahertz Metamaterials Based on Aerosol Inkjet Printing[J]. Science and Technology Innovation, 2021:191.
- [16] 赵振宇, 刘海文, 陈智娇, 等. 基于超材料角反射面的高增益高效率双圆极化 Fabry-Perot 天线设计[J/OL]. 物理学, 2018, 15(1):12.
- ZHAO Zhenyu, LIU Haiwen, CHEN Zhijiao, et al. Design of High-gain and High-efficiency Dual Circularly Polarized Fabry-Perot Antenna based on Metamaterial Corner Reflectors[J/OL]. Acta Physica Sinica, 2018, 15(1):12.
- [17] 张鑫, 戴银所, 房建国, 等. 基于电阻膜的双层宽频电磁超材料吸波器仿真及分析[J]. 电子技术与软件工程, 2021(21):59.
- ZHANG Xin, DAI Yinsuo, FANG Jianguo, et al. Simulation and Analysis of Double-layer Broadband Electromagnetic Metamaterial Absorber based on Resistive Film[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2021(21):59.
- [18] 聂星河, 范逸风, 孙永志, 等. 一种毫米波超材料反射面天线设计[J]. 航天电子对抗, 2021, (5):53.
- NIE Xinghe, FAN Yifeng, SUN Yongzhi, et al. Design of a Millimeter Wave Metamaterial Reflector Antenna[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021, 7(5):53.
- [19] 张晗, 张婷, 张泽奎, 等. 基于各向异性介质的宽频吸波超材料结构设计与研究[J]. 化工新型材料, 2020, (1):131.
- ZHANG Han, ZHANG Ting, ZHANG Zekui, et al. Structural Design and Research of Broadband Absorbing Metamaterials based on Anisotropic Media[J]. New Chemical Materials, 2020(1):131.
- [20] 孙明娟, 刘光炬, 张淑媛, 等. 耐腐蚀吸波超材料的制备及应用[J]. 材料导报, 2019(S2):613.
- SUN Mingjuan, LIU Guangheng, ZHANG Shuyuan, et al. Preparation and Application of Corrosion-resistant and Microwave-absorbing Metamaterials[J]. Materials Review, 2019(S2):613.

(编辑:温泽宇)