



基于纳米印刷技术的双螺旋太赫兹可调超表面

于博 庄书磊 王正心 王曼诗 郭兰军 李鑫煜 郭文瑞 苏文明 龚诚 刘伟伟

Nano-printing technology based double-spiral terahertz tunable metasurface

Yu Bo Zhuang Shu-Lei Wang Zheng-Xin Wang Man-Shi Guo Lan-Jun Li Xin-Yu Guo Wen-Rui
Su Wen-Ming Gong Cheng Liu Wei-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 117801 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212408

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212408>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生

Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings

物理学报. 2019, 68(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure

物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

基于二氧化钒的太赫兹编码超表面

Terahertz coding metasurface based vanadium dioxide

物理学报. 2020, 69(22): 228101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200891>

基于太赫兹石墨烯等离激元的多参数相位可调谐结构及其应用

Multi-parameter tunable phase transition based terahertz graphene plasmons and its application

物理学报. 2021, 70(22): 224202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210445>

基于相变材料超表面的光学调控

Tunable metasurfaces based on phase-change materials

物理学报. 2020, 69(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200453>

基于纳米印刷技术的双螺旋太赫兹可调超表面*

于博¹⁾ 庄书磊¹⁾ 王正心¹⁾ 王曼诗¹⁾ 郭兰军¹⁾ 李鑫煜¹⁾
郭文瑞²⁾ 苏文明^{2)†} 龚诚^{1)‡} 刘伟伟¹⁾

1) (南开大学现代光学研究所, 天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350)

2) (中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 苏州 215123)

(2021年12月28日收到; 2022年2月9日收到修改稿)

由人工构造超表面所制成的电磁器件能够实现太赫兹频段的滤波、调控、传感、探测等功能, 对太赫兹波在通信、成像领域的应用至关重要. 基于纳米印刷技术设计制备了一种柔性透明双螺旋超表面, 并利用该超表面构建了一款太赫兹旋转可调滤波器, 通过旋转超表面实现太赫兹波透射率的有规律调谐. 在旋转 90° 后, 0.52 THz处的透射率由8%增至67%, 而0.92 THz处的透射率由68%降至3%, 实现调制深度大于88%的主动调控. 并且, 所提出的纳米印刷超表面具有超薄、柔性、可见光透明的优良性质, 有利于太赫兹可调器件的小型化、轻量化及大面积制备.

关键词: 纳米印刷, 超表面, 太赫兹, 旋转调谐, 可见光透明

PACS: 78.67.Pt, 87.50.U

DOI: 10.7498/aps.71.20212408

1 引言

太赫兹波指频率处于0.1—10 THz范围, 波长介于 $30\ \mu\text{m}$ —3 mm之间的电磁波, 属于远红外和亚毫米波范畴^[1]. 因为具有低光子能量、大带宽、可穿透非极性材料等优良特性, 太赫兹在宽带通信^[2–4]、医学成像^[5–7]、无损检测^[8–10]等领域有着巨大应用价值. 超表面作为一种集成化的人工周期阵列结构, 其电磁特性可以通过结构单元的几何设计和材料选择进行定制, 从而实现自然界不具备的电磁特性, 突破了太赫兹器件的设计局限, 推动了太赫兹科学的飞速发展. 通过超表面技术在太赫兹频段已经实现了完美吸收器^[11,12]、超透镜^[13,14]与超波导^[15,16]等高性能器件.

近年来, 能够实现主动控制的可调超表面逐渐

被学界所重视, 而不依赖于复杂调控设备的旋转调谐是实现器件简单化、轻量化的重要方式之一. 2016年, Yachin等^[17]研发了一种交叉金属带状结构的超表面, 可通过旋转在22—38 GHz频段实现滤波. 2017年, 一种旋转重构的超表面天线被Prasanna Kumar团队所设计, 可用于无人驾驶飞行器^[18]. 同年, Chen等^[19]设计了一种H型超表面, 通过旋转可激发大范围、可控的梯度色散特性. 同年, Sun等^[20]提出了旋转中产生“超表面混响室”的理论概念. 2019年, 对于一种非线性方形超表面旋转时产生的复频效应, Tournat团队^[21]做了相关的理论解释. 2020年, 程进等^[22]基于可调超表面提出了激光散斑抑制方法及激光抑制器, 可降低对比度至2.63%. 2021年, 于洋等^[23]基于旋转超表面产生了贝塞尔光束, 并具备宽带调制的特点. 夏雨等^[24]利用机械旋转的可重构超表面设计了一款电磁开

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB0504400) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wmsu2008@sinano.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: gongcheng@nankai.edu.cn

关, 在 5.8 GHz 处增益提高 2.7 dBi.

但是, 大多数太赫兹可调超表面对可见光不透明, 限制了特定环境下的应用, 也不利于光路搭建、光学对准等环节, 并且目前仍旧缺少能够大面积规模制造的技术方案. 因此, 本文采用一种纳米银颗粒印刷技术制备出超薄、柔性、可见光透明的太赫兹超表面, 并基于其构建了一款旋转可调滤波器. 通过三维全波电磁仿真发现, 固定太赫兹波入射方向, 每隔 15° 旋转双螺旋超表面一次, 其太赫兹透射率规律变化. 通过等效阻抗理论分析及太赫兹时域光谱实验验证得到: 旋转 90° 后, 该滤波器在 0.52 THz 处的透射率由 8% 增至 67%, 调制深度 88%; 在 0.92 THz 处的透射率由 68% 降至 3%, 调制深度 96%.

2 原理与制备

不同于电子束曝光^[25]、离子束刻蚀^[26]、激光加工^[27]等常见超表面制备方法, 将镍模具电镀与纳米银颗粒印刷相结合, 提出了图 1(a) 所示的用于制备柔性超表面的印刷术. 首先, 基于光致抗蚀结构^[28]的电镀方法, 得到步骤 (I) 中用于印制超表面几何图形的镍模具; 再将镍磨具压印在 200 μm 厚的 PET(polyethylene glycol terephthalate) 基底与 10 μm 厚的 UV(ultraviolet rays) 胶图层上, 得到如步骤 (II) 所示的结构; 随后, 将纳米银颗粒填入沟槽内, 并在 150 $^\circ\text{C}$ 下烧结 15 min, 得到步骤 (III) 中的双层镶嵌结构, 初步制备出超表面样品; 最后经过抛光打磨, 得到步骤 (IV) 所示的超表面结构. 该印刷技术的优点是可大面积制备透明、柔性的高精度样品.

本文所制备的超表面样品如图 1(b) 所示, 样品的单层厚度约为 200 μm , 相当于两张普通 A4 纸的厚度. 超薄的特性让样品的单位面积质量很轻, 一片 10 cm \times 10 cm 的样品质量仅为 4.7 g, 有助于太赫兹器件的轻量化. 样品也具有有良好的柔性, 可轻易实现大幅度弯曲, 这为共形应用奠定了基础. 此外, 由于金属结构线条宽度仅有 10 μm , 远小于线条之间的间隔, 因此可见光能够良好透过. 如 (1) 式所示, 通过单个微结构内线条面积占总面积的比例, 可计算出超表面的可见光透过率 T_{visible} 超过 70%:

$$T_{\text{visible}} = (A_{\text{total}} - A_{\text{line}}) / A_{\text{total}}, \quad (1)$$

其中, A_{total} 是超表面结构单元的总面积, A_{line} 是超表面结构单元中金属线条的所占面积.

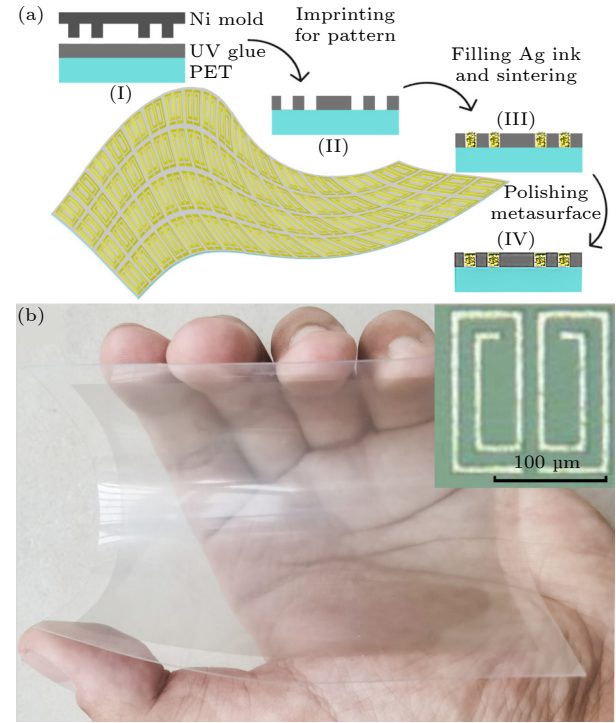


图 1 纳米银印刷超表面 (a) 制备过程; (b) 样品

Fig. 1. Nano-printing metasurface: (a) Preparation process; (b) sample.

可调超表面的调谐方式通常采用光^[29]、磁^[30]或温度^[31]激励, 这些激励往往需要较复杂的调谐程序和控制设备. 为了简化调谐手段, 设计了一种双螺旋对称结构, 图 2(a) 则展示了 3×3 的超表面单元阵列. 如图 2(b) 所示, 其螺旋结构的外层长为 156 μm , 宽为 69 μm , 内层长为 116 μm , 宽为 28 μm , UV 胶图层与金属镶嵌结构厚 10 μm , PET 材料厚 200 μm . 设计成此种形式的一个重要原因就是双螺旋结构能够形成特定透射区域. 随着超表面的旋转, 双螺旋结构相对入射光偏振方向的有效间隙改变, 透射特性也随之改变. 因此, 通过结构的优化设计, 这种超表面材料可通过旋转实现太赫兹透射强度调控.

接下来基于该双螺旋超表面设计了一款旋转可调滤波器. 如图 2(c) 为滤波器设计示意图, 首先采用三维设计软件设计了超表面的双层夹持套圈和刻度底板; 然后将超表面夹持并固定在套圈上; 最后将夹持有超表面的套圈插入可滑动刻度底板, 实现旋转可调功能. 考虑到 3D 打印技术的灵活性和高精度, 夹持套圈和刻度底板都由 3D 打印完成,

采用的打印设备为 Snapmaker A250, 打印精度 0.1 mm. 图 2(d) 展示了由 3D 打印技术制造出来的实物, 将超表面固定后, 参照内部套圈上每隔 15° 所标注的刻度, 可以固定太赫兹波入射方向, 对超表面样品进行定量的旋转, 从而实现太赫兹波的调制.

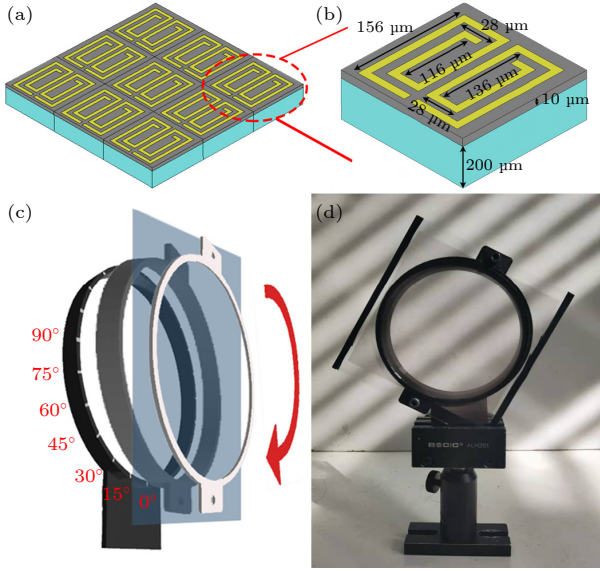


图 2 双螺旋结构与旋转可调滤波器 (a) 3×3 单元阵列示意图; (b) 单元尺寸; (c) 滤波器示意图; (d) 滤波器实物图
Fig. 2. Double-spiral structure and rotating tunable filter: (a) 3×3 cell array; (b) cell size; (c) schematic diagram of the filter; (d) picture of the filter.

3 仿真与分析

由于超表面的结构相较于一般的微结构更为复杂, 其电磁响应特性难以用常规的理论计算进行解析. 而随着物理场模拟算法的发展, CST MICROWAVE STUDIO (CST), COMSOL 等仿真软件已经可以实现对于超表面电磁响应特性的精确仿真. 本文通过三维电磁仿真软件 CST, 模拟线偏振太赫兹波透射超表面的过程, 由水平方向入射与出射偏振组合下的 S 参数求解电磁响应并分析调制性能, 即通过代表透射传输系数的 S 参数 S_{21} , 求得超表面在太赫兹频段的透射率 $T_{\text{simulation}}$:

$$T_{\text{simulation}} = |S_{21}|^2. \quad (2)$$

考虑这种结构的左右对称性, 旋转角度超过 90° 后将会产生周期重复结果, 因此仅在 0°—90° 范围内进行旋转. 在图 3(a) 中, 展示了 0°—90° 的旋转区间内, 随着超表面结构旋转角度的增大, 每隔

15° 的透射率曲线变化规律, 即随着 90° 的旋转, 透射谱线出现大幅度变化. 在图 3(b) 中, 展示了 0° 与 90° 的透射率: 0.46 THz 处透射率从 68% 降低到 37%, 0.56 THz 处透射率从 1% 增大到 29%, 0.92 THz 处透射率从 72% 降低至 9%. 由此可见, 该类型超表面具有旋转可调的特性, 能够通过简单的旋转来实现对太赫兹透射率的有效调控.

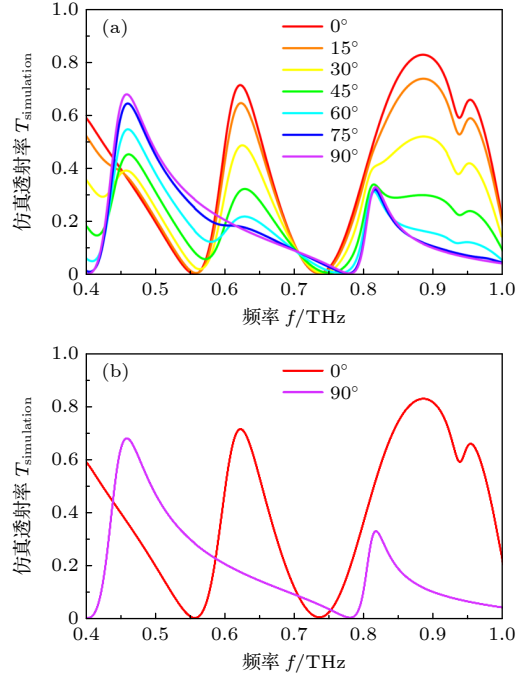


图 3 旋转仿真结果 (a) 0°—90°; (b) 0° 与 90°
Fig. 3. The simulation results of rotations: (a) 0°—90°; (b) 0° and 90°.

此外, 偏振转换率 (polarization conversion efficiency, PCR), 通常用于描述偏振转换的转换效率, 可定义为

$$\text{PCR} = t_{yx}^2 / (t_{yx}^2 + t_{xx}^2), \quad (3)$$

其中, t_{yx} 表示交叉极化透射系数, t_{xx} 表示同极化透射系数. 图 4(a) 展示了通过仿真得到的该双螺旋超表面同极化率透射系数 t_{yy} 与交叉极化率透射系数 t_{xx} , 故可根据 t_{yx} 与 t_{xx} 计算出其 PCR, 如图 4(b) 所示. 由于双螺旋超表面的 PCR 在该频段接近于 0, 因此在水平方向线偏振太赫兹波透射过程中, 其偏振态不发生变化.

超表面的圆二色性是指其左旋圆极化、右旋圆极化透射率的差别. 通过在 CST 中添加远场监视器并将远场结果设置为圆极化模式, 可以对螺旋结构所具备的圆二色性进行分析, 如图 5 所示. 图 5(a) 展示了双螺旋结构处于 0° 时对于 0.92 THz 的左

旋、右旋极坐标曲线, 可以发现上图的左旋曲线与下图右旋曲线相一致, 说明其不具有圆二色性. 图 5(b) 展示了双螺旋结构处于 90° 时对于 0.92 THz 的左旋、右旋极坐标曲线, 可以发现上图的左旋曲线与下图右旋曲线相一致, 说明其不具有圆二色性.

图 5(c) 则展示了单螺旋结构对于 0.92 THz 的左旋、右旋极坐标曲线, 可以发现上图的左旋曲线与下图右旋曲线不同, 说明其具有圆二色性. 因此, 单螺旋结构具有一定的圆二色性, 双螺旋结构因其对称性而不具有圆二色性.

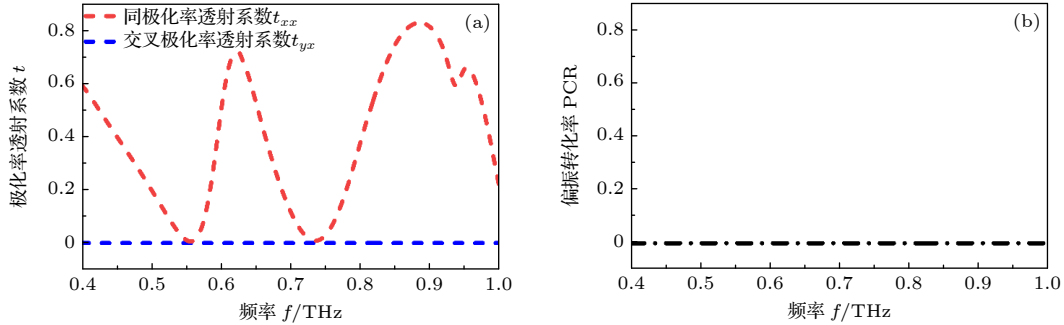


图 4 偏振仿真结果 (a) 透射系数; (b) 偏振转化率

Fig. 4. The simulation results of polarization: (a) Transmission coefficient; (b) polarization conversion efficiency.

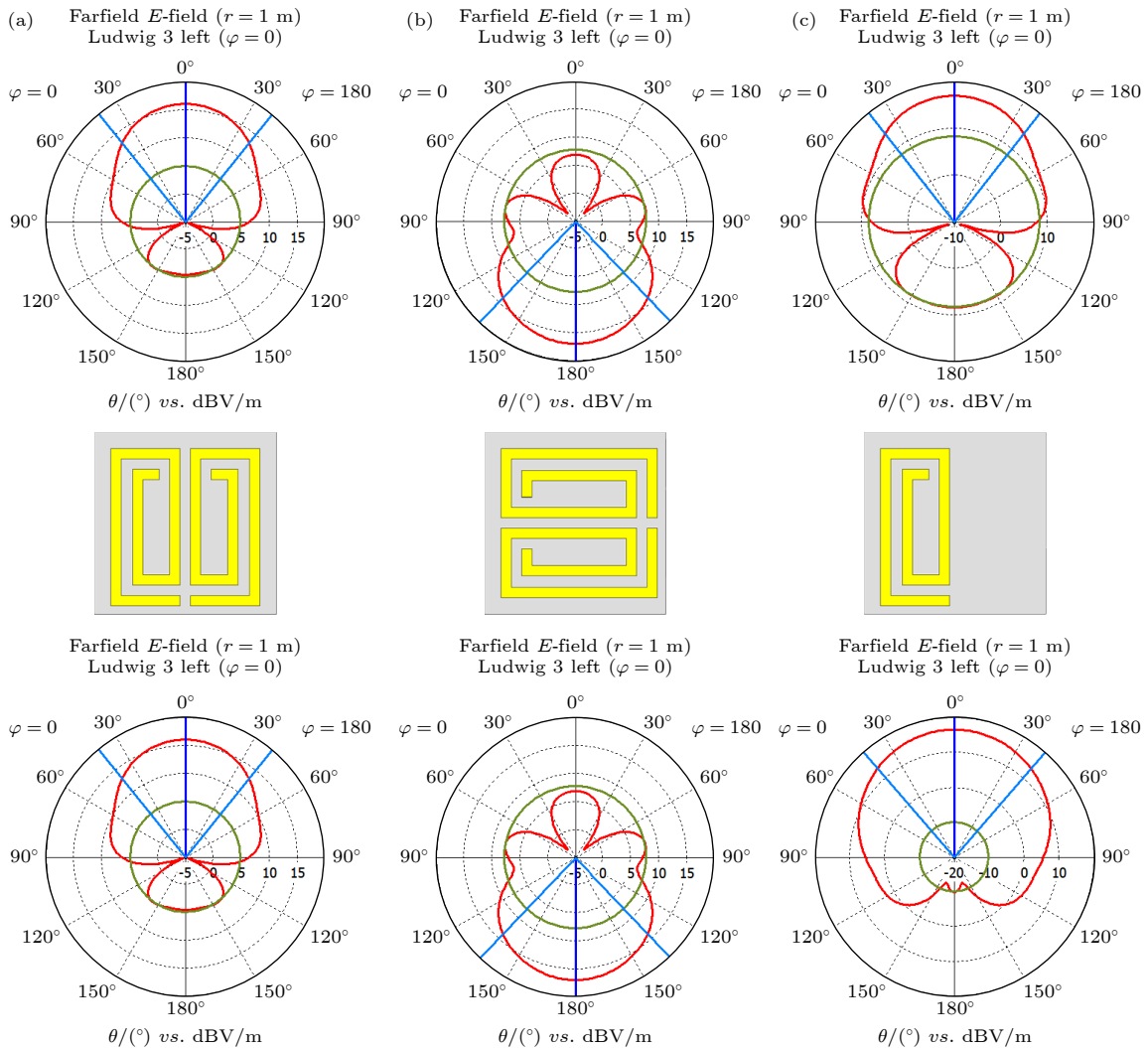


图 5 螺旋结构圆二色性 (a) 0° ; (b) 90° ; (c) 单螺旋

Fig. 5. Circular dichroism of spiral structure: (a) 0° ; (b) 90° ; (c) single spiral.

4 实验与分析

利用太赫兹时域光谱系统 THz-TDS(THz time domain spectroscopy) 对基于双螺旋超表面的可调滤波器进行验证, 通过调节夹持套圈对准底板刻度对超表面结构在不同旋转角度时的太赫兹透射率进行测量, 图 6 为太赫兹时域光谱系统及旋转滤波器的示意图. 飞秒激光器通过太赫兹辐射天线发射的太赫兹波, 被一个离轴抛物镜反射到过滤器上. 太赫兹辐射在通过过滤器后, 被第二个离轴抛物镜反射并聚焦到接收端的天线上. 系统通过一组反射镜向远处移动而产生的延时, 得到时域光谱, 再通过傅里叶变换得到频域光谱. 首先测量通过空气的太赫兹强度, 固定太赫兹波入射方向, 将滤波器每 15° 旋转一次, 测量通过不同旋转角度滤波器的太赫兹波强度, 二者相比即是太赫兹波对于双螺旋超表面结构的透射率 $T_{\text{measurement}}$.

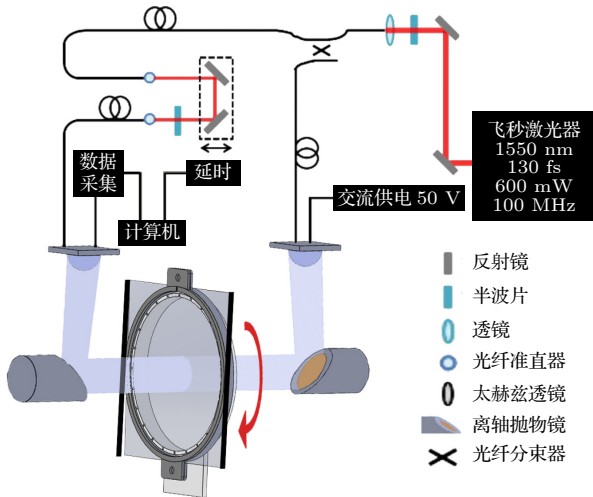


图 6 THz-TDS 系统验证旋转可调滤波器示意图

Fig. 6. Schematic diagram of verifying the rotating tunable filter by THz-TDS.

考虑到超表面样品中所含有的 10 μm 厚的亲水性 UV 胶图层, 而水分子对于太赫兹波具有较强吸收 [32]. 根据水在太赫兹波段的光学常数 [33], 通过比尔·朗伯定律对测量结果进行了补偿, 最终的结果与 CST 仿真结果基本一致. 如图 7(a) 所示, 随着旋转角度的增大, 可以清晰地观察到调谐的变化规律. 其中 0.46 THz 处透射率从 79% 降低到 60%, 0.56 THz 处透射率从 14% 增长到 54%, 0.92 THz 处透射率从 68% 降低至 3%. 如图 7(b) 所示, 旋

转 90° 后太赫兹波在 0.52 THz 与 0.92 THz 处的调制深度较高: 0.52 THz 处透射率由 8% 增至 67%, 调制深度 88%, 而 0.92 THz 处的调制深度 96%.

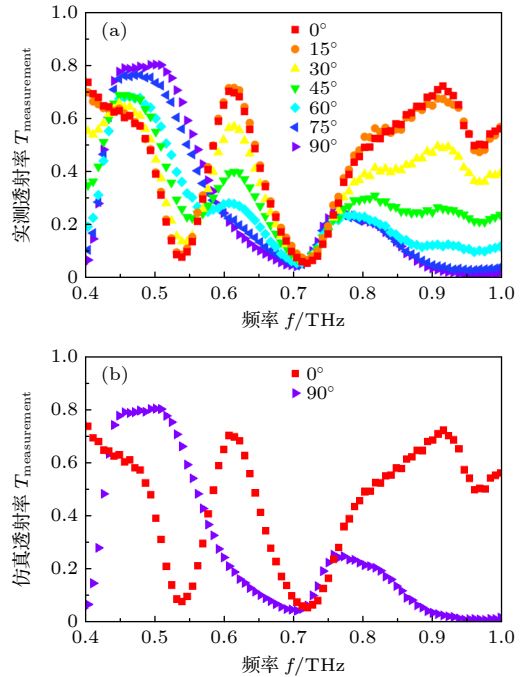


图 7 THz-TDS 系统测量结果 (a) 0°—90°; (b) 0°与 90°

Fig. 7. THz-TDS system measurement results: (a) 0°—90°; (b) 0° and 90°.

将 0° 与 90° 的测量结果与 CST 仿真结果图 3 对比, 可以发现两者吻合较好, 虽然稍有频移误差和强度误差, 但变化趋势基本一致. 造成误差的主要原因是: 1) 超表面样品制备加工的精度; 2) 环境中的水蒸汽对于太赫兹波传输的损耗.

接下来重点分析旋转滤波器在 0° 与 90° 时透射率变化的原因. 考虑到超表面对于太赫兹波透射率的高低可以通过等效阻抗进行验证 [34]. 因此, 可根据 S 参数反演法基于等效模型的传输矩阵求解双螺旋超表面结构的等效阻抗 Z :

$$Z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (4)$$

(4) 式所得到的等效阻抗是具有实部和虚部的复阻抗. 当实部 $\text{Re}(Z)$ 接近于 1, 且虚部 $\text{Im}(Z)$ 接近于 0 时, 与自由空间的复阻抗 $Z_0 = 1 + 0j$ 接近, 使得入射的太赫兹波与超表面结构形成良好的阻抗匹配, 故该频率处透射率较高. 反之, 当复阻抗的实部 $\text{Re}(Z)$ 趋近于 0 抑或远大于 1 时, 当虚部 $\text{Im}(Z)$ 远离于 0 时, 阻抗不匹配, 太赫兹波被大幅度反射,

超表面对该频率太赫兹波的透射率较低。

如图 8 所示, 采用 CST 仿真得到 0° 与 90° 时的参数 S_{11} 和 S_{21} . 在超表面处于 0° 时, 0.55 THz 附近处 $S_{11} > S_{21}$, 0.9 THz 附近处 $S_{21} > S_{11}$. 在超表面处于 90° 时, 0.45 THz 附近处 $S_{21} > S_{11}$, 0.9 THz 附近处 $S_{11} > S_{21}$. 可以发现, 经过 90° 的旋转后, 0.5 THz 与 0.9 THz 附近 S_{11} 和 S_{21} 曲线的高低相对位置互换, 故导致了旋转 90° 后两处透射率的大幅变化. 接下来, 由 (4) 式通过 0° 与 90° 时的两组 S_{11} 与 S_{21} 计算该超表面结构的等效阻抗, 以解释旋转 90° 后的透射率变化.

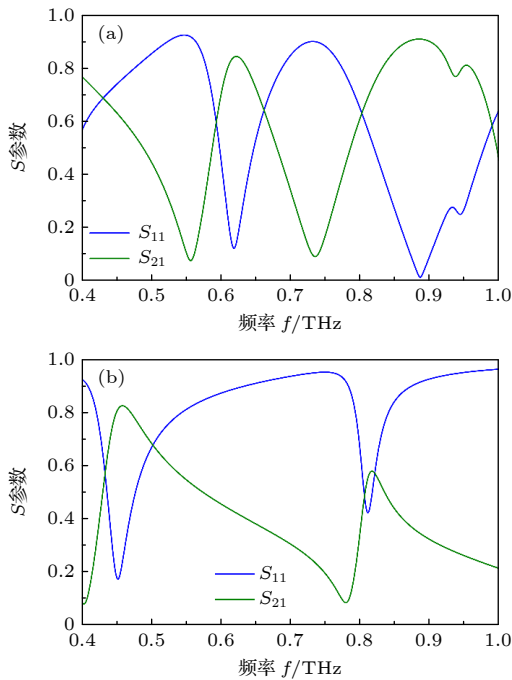


图 8 超表面的 S 参数 (a) 0° ; (b) 90°

Fig. 8. S parameter of the metasurface: (a) 0° ; (b) 90° .

图 9 展示了根据 (4) 式计算得到的双螺旋超表面结构在 0° 与 90° 时对于 0.4 — 1.0 THz 频段太赫兹波的等效阻抗曲线. 0° 时如图 9(a) 所示, 超表面等效复阻抗在 0.56 THz 处实部趋近于 0, 故透射率较低; 在 0.92 THz 处实部接近于 1 且虚部接近于 0, 故透射率较高. 90° 时如图 9(b) 所示, 超表面等效复阻抗在 0.46 THz 处实部接近于 1 且虚部趋近于 0, 故透射率较高; 在 0.92 THz 处实部趋近于 0, 故透射率较低. 由于超表面结构 90° 的改变, 其对太赫兹波的透射特性发生了变化, 促使在 0° 与 90° 时出现透射率急剧上升或降低的现象, 进一步验证了仿真及实验的正确性.

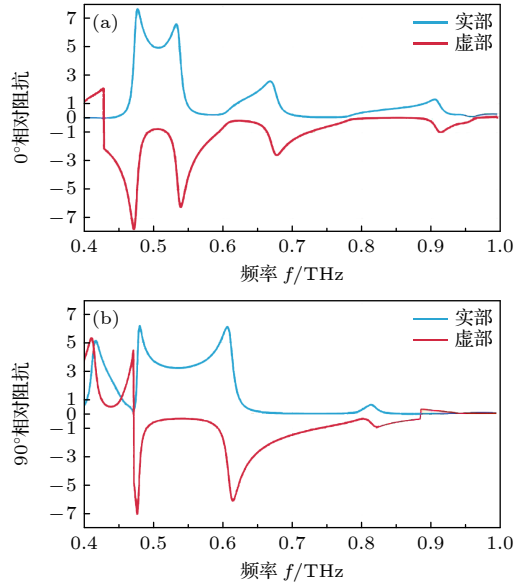


图 9 超表面的等效阻抗 (a) 0° ; (b) 90°

Fig. 9. Equivalent impedance of the metasurface: (a) 0° ; (b) 90° .

5 结 论

本文采用银纳米颗粒印刷技术制备出一种超薄、柔性、透明的双螺旋结构太赫兹超表面, 并基于其构建了一款旋转可调滤波器, 整体厚度在 $200 \mu\text{m}$ 左右, 可见光透过率超过 70%. 在固定太赫兹波入射方向后, 旋转该超表面结构, 太赫兹透射率规则变化. 在旋转 90° 后, 太赫兹波对于超表面样品的透射率在 0.52 THz 处由 8% 增至 67%, 调制深度 88%; 在 0.92 THz 处由 68% 降至 3%, 调制深度 96%. 基于此超表面构建的旋转调谐滤波器调谐方式极为简便, 无需额外的复杂调控设备. 我们相信该超表面结构在太赫兹波的调制、滤波与开关等方面将具有良好的应用前景; 而纳米印刷技术所带来的超薄、柔性、可见光透明等特殊性质将为特定场合的使用带来便利, 有利于太赫兹器件的小型化、轻量化及大面积制备.

参考文献

- [1] Zhang Z W, Cui W L, Zhang Y, Zhang C L 2006 *J. Infrared Millim. Waves* **25** 217 (in Chinese) [张振伟, 崔伟丽, 张岩, 张存林 2006 *红外与毫米波学报* **25** 217]
- [2] Song H J, Ajito K, Muramoto Y, Wakatsuki A, Nagatsuma T, Kukutsu N 2012 *Electron. Lett.* **48** 953
- [3] Harter T, Fullner C, Kwmal J N, Ummethala S, Steinmann J L, Brosi M, Hesler J L, Brundermann E, Muller A S, Freude W 2020 *Nat. Photonics* **14** 601
- [4] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C 2016 *Nat.*

Photonics **10** 371

- [5] Lu M H, Shen J L, Li N, Zhang Y, Zhang C L, Liang L S, Xu X Y 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 103
- [6] Li Q, Zhou Y, Yang Y F, Chen G H 2016 *J. Opt. Soc. Am. A* **33** 637
- [7] Pickwell E, Wallace V P 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 418
- [8] Yan B, Wang Z G, Zhan X, Lin L, Wang X L, Gong C, Liu W W 2020 *Sci. Rep.* **10** 20876
- [9] Yu T, Zuo X, Liu W W, Gong C 2020 *Opt. Commun.* **459** 124896
- [10] Li S, Zhang Y, Gao X, Zhan T, Zhao D L, Gong C, Liu W W 2019 *J. Infrared Millim. Waves* **38** 68 (in Chinese) [李帅, 张岩, 高翔, 占涛, 赵得龙, 龚诚, 刘伟伟 2019 *红外与毫米波学报* **38** 68]
- [11] Gong C, Zhan M Z, Yang J, Wang Z G, Liu H T, Zhao Y J, Liu W W 2016 *Sci. Rep.* **6** 32466
- [12] Wang H, Yan B, Jin H Z, Wang Z G, Guo L J, Li B Y, Yu B, Gong C 2021 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54** 225105
- [13] Arbabi A, Horie Y, Ball A J, Bagheri M B, Faraon A 2015 *Nat. Commun.* **6** 7069
- [14] Xing T L, Bai T R, Tang Y, Lu Z Y, Huang Y L, Balmakou A, Wang J C 2020 *Opt. Express* **28** 20334
- [15] Wang Z G, Jin H Z, Sun X F, Li X, Xu Y, Liu G, Gong C 2020 *Opt. Commun.* **474** 126172
- [16] Yan B, Yu B, Xu J F, Li Y K, Wang Z G, Wang Z X, Yu B, Ma H Y, Gong C 2021 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54** 465102
- [17] Yachin V, Ivzhenko L, Polevoy S, Tarapov S 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 221905
- [18] Kumar P P, Sreelakshmi K, Sangeetha B, Narayan S 2017 *International Conference on Communication and Signal Processing* Melmaruvathur, Inida, February 8–10, 2017 p2081
- [19] Chen H, Lu W B, Liu Z G, Zhang J, Huang B H 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 7383
- [20] Sun H Y, Li Z, Gu C Q, Xu Q, Chen X L, Sun Y H, Lu S C, Martin F 2018 *Sci. Rep.* **8** 076401
- [21] Guo X X, Goussev V, Tournat V, Paulson J A 2019 *Phys. Rev. E* **99** 052209
- [22] Cheng J, Zhou S, Sun X P, Pu X X, Sun Q L, Xu Y S, Liu W G 2020 *ACTA Photonica Sin.* **49** 0724001 (in Chinese) [程进, 周顺, 孙雪平, 蒲欣欣, 孙其梁, 徐英舜, 刘卫国 2020 *光子学报* **49** 0724001]
- [23] Yu Y, Zhong F, Jiang X, Chu Q Q, Zhu S N, Liu H 2021 *Chin. Opt. Lett.* **14** 927 (in Chinese) [于洋, 肿帆, 江西, 褚琼琼, 祝世宁, 刘辉 2021 *中国光学* **14** 927]
- [24] Xia Y, Wang Y, Cao Q S. 2021 *J. Microwaves* **37** 68 (in Chinese) [夏雨, 王毅, 曹群生 2021 *微波学报* **37** 68]
- [25] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [26] Ni X, Kildishev A V, Shalaev V M 2013 *Nat. Commun.* **4** 1
- [27] Dai Z J, Su Q, Wang Y F, Qi P F, Wang X L, Liu W W 2019 *Laser Phys.* **29** 065301
- [28] Meng L, Xu N 2014 *J. Jilin Ins. Chem. Technol.* **31** 75 (in Chinese) [孟磊, 徐娜 2014 *吉林化工学院学报* **31** 75]
- [29] Bai L, Zhang X G, Jiang W X, Cui T J 2021 *J. Radars* **10** 240 (in Chinese) [柏林, 张信歌, 蒋卫祥, 崔铁军 2021 *雷达学报* **10** 240]
- [30] Wang J, Wang X C, Gao X, Ning R X 2021 *J. Measure. Sci. Instru.* **12** 362
- [31] Sautter J, Staude I, Decker M, Rusak E, Neshev D N, Brener I, Kivshar Y S 2015 *ACS Nano* **9** 4308
- [32] Li G H 2010 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [李国华 2010 博士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [33] Li Y H, Deng L W, Luo H, He L H, He J, Xu Y C, Huang S X 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 095201 (in Chinese) [李宇涵, 邓联文, 罗衡, 贺龙辉, 贺君, 徐运超, 黄生祥 2019 *物理学报* **68** 095201]
- [34] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 0036617

Nano-printing technology based double-spiral terahertz tunable metasurface^{*}

Yu Bo¹⁾ Zhuang Shu-Lei¹⁾ Wang Zheng-Xin¹⁾ Wang Man-Shi¹⁾
Guo Lan-Jun¹⁾ Li Xin-Yu¹⁾ Guo Wen-Rui²⁾ Su Wen-Ming^{2)†}
Gong Cheng^{1)‡} Liu Wei-Wei¹⁾

¹⁾ (*Tianjin Key Laboratory of Micro-scale Optical Information Science and Technology,
Institute of Modern Optics of Nankai University, Tianjin 300350, China*)

²⁾ (*Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics (SINANO), Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China*)

(Received 28 December 2021; revised manuscript received 9 February 2022)

Abstract

Electromagnetic devices made of artificially constructed metasurfaces can achieve filtering, modulation, sensing, and detection functions in the terahertz frequency band, which is essential for the applications of terahertz waves in the fields of communication and imaging. We design and prepare a flexible and transparent double spiral metasurface based on nano-printing technology, and use the metasurface to construct a rotating tunable filter, which can achieve regular tuning of the terahertz wave transmittance by rotating the metasurface. After rotating 90°, the transmittance at 0.52 THz increases from 8% to 67%, and the transmittance at 0.92 THz decreases from 68% to 3%, thus realizing active tuning with modulation depth greater than 88%. Moreover, the proposed nano-printing metasurfaces have excellent properties of ultra-thinness, flexibility, and visible light transparency, which are conducive to the miniaturization, light-weight and large-area preparation of terahertz tunable devices.

Keywords: nano-printing, metasurfaces, terahertz, rotary tuning, visible light transparency

PACS: 78.67.Pt, 87.50.U

DOI: 10.7498/aps.71.20212408

* Project supported by the National Key Research and Development Program, China (Grant No. 2018YFB0504400).

† Corresponding author. E-mail: wmsu2008@sinano.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: gongcheng@nankai.edu.cn