

## 激光与光电子学进展

## 基于激光诱导石墨烯的太赫兹超材料滤波器

张绪<sup>1</sup>, 宋瑞琦<sup>1</sup>, 宗顾卫<sup>1</sup>, 吴双悦<sup>1</sup>, 王磊<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>南京邮电大学电子与光学工程学院, 柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;<sup>2</sup>东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096;<sup>3</sup>南京大学固体微结构物理国家重点实验室, 江苏 南京 210093

**摘要** 设计并制备了一种基于激光诱导石墨烯(LIG)的太赫兹超材料滤波器。首先,研究了不同激光加工参数下生成LIG的电学特性,然后通过太赫兹时域光谱仪测得滤波器的透射性能。当结构单元周期为500  $\mu\text{m}$ 时,滤波器在0.55 THz处的透射率为74.2%。通过改变滤波器的结构周期,中心频率可增至0.65 THz。该滤波器同时具有振幅偏振相关特性,随着入射太赫兹波偏振方向与 $x$ 轴夹角 $\theta$ 的增加,其透射率逐渐降低。LIG法制备简单、成本低廉,有望用于制备各种太赫兹超材料器件,在太赫兹传感、探测和通信等领域有着一定的应用前景。

**关键词** 太赫兹; 超材料; 滤波器; 激光诱导石墨烯

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223227

## Terahertz Metamaterial Filter Based on Laser-Induced Graphene

Zhang Xu<sup>1</sup>, Song Ruiqi<sup>1</sup>, Zong Guwei<sup>1</sup>, Wu Shuangyue<sup>1</sup>, Wang Lei<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;<sup>2</sup>State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;<sup>3</sup>National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China

**Abstract** In this study, a terahertz metamaterial filter based on laser-induced graphene (LIG) is proposed. The electrical properties of the LIG under different laser parameters are investigated, and the transmission performance of the filter is measured using terahertz time-domain spectroscopy. The transmittance of the filter is 74.2% at 0.55 THz when the period of the filter unit is 500  $\mu\text{m}$ . By changing the period of the filter, the center frequency can be increased to 0.65 THz. Furthermore, the characteristic of the filter amplitude is polarization-dependent. As the angle  $\theta$  between the polarization direction of the incident terahertz waves and the  $x$ -axis increases, the transmittance of the filter decreases gradually. This simple and low-cost LIG method is expected to be used to prepare various terahertz metamaterial devices, which can be applied in many fields such as terahertz sensing, detection, and communication.

**Key words** terahertz; metamaterial; filter; laser-induced graphene

## 1 引言

太赫兹波是指频率在0.1~10 THz之间的电磁波,由于其具有通信容量大、光子能量低和穿透性好等特性,近些年来被广泛应用于高速通信、生物传感、无损探测等领域<sup>[1-4]</sup>。但目前尚无特别有效的材料来操控太赫兹波,一定程度上制约了太赫兹技术的发展。超材料<sup>[5-7]</sup>是一种新型人工复合材料,通过设计亚波长

微结构,理论上可以任意设计电磁参数,从而有效调控电磁波。近年来,基于太赫兹超材料的滤波器<sup>[8-10]</sup>、吸收器<sup>[11-12]</sup>以及透镜<sup>[13]</sup>等器件被纷纷提出,其中滤波器被广泛应用于成像<sup>[14-15]</sup>、传感<sup>[16-17]</sup>等领域而引起了众多学者的关注。2014年, Yang等<sup>[18]</sup>提出了基于石墨烯的可调太赫兹超材料滤波器,通过调节石墨烯的电导率实现滤波器的调频。2016年, Shin等<sup>[19]</sup>提出了基于 $\text{VO}_2$ 薄膜的电控太赫兹超材料滤波器,该滤波器通过

收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2022-12-07; 录用日期: 2022-12-19; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20211277)、固体微结构物理国家重点实验室开放课题(M35039)、毫米波国家重点实验室开放课题(K202226)

通信作者: \*wangl@njupt.edu.cn

控制电压来调节滤波器的透射率。太赫兹超材料滤波器在高速无线通信、传感领域有着一定的应用前景。但目前大部分太赫兹超材料滤波器方案<sup>[10,18-19]</sup>存在着制作成本高、加工工艺繁琐等缺陷。

2014年,激光诱导石墨烯(LIG)技术<sup>[20]</sup>被首次报道,该方案通过激光直接烧蚀聚酰亚胺(PI)薄膜,可在其表面直接生成三维多孔石墨烯。相比于传统的化学气相沉积法和机械剥离法<sup>[21-22]</sup>制备石墨烯,这是一种环境友好、成本低廉、可大面积生产图案化石墨烯的方法。通过计算机软件,控制激光生成图案化的石墨烯而无需掩模板,近年来,LIG法被广泛应用于超级电容<sup>[23-24]</sup>、传感<sup>[25-26]</sup>以及柔性电子<sup>[27-28]</sup>等多种领域。2020年,Wang等<sup>[29]</sup>第一次将LIG技术应用于太赫兹领域,使用波长为450 nm的紫外激光器,制作了太赫兹光栅和菲涅耳波带片。Zhang等<sup>[30]</sup>使用波长为10.6  $\mu\text{m}$ 的CO<sub>2</sub>激光器,基于LIG制作了一种超薄柔性太赫兹带阻滤波器,该方案中滤波器透射率不随器件弯折角度改变,具有良好的稳定性。Lan等<sup>[31]</sup>也基于LIG技术制造了一种太赫兹宽带吸收器,该方案中对PI重复3次激光诱导,生成了质量较好的石墨烯,实现了良好的太赫兹宽带吸收特性。综上,LIG技术在太赫兹超材料加工领域有着良好的应用前景。目前,基于LIG技术制作的太赫兹超材料带通滤波器还未见报道。

本文基于LIG技术,设计并制备了一种太赫兹超

材料滤波器。首先,研究了不同的激光参数下,生成LIG电导率的变化规律。其次,通过改变滤波器的周期尺寸 $U$ 来调节滤波器的中心频率。当中心频率为0.55 THz和0.65 THz时,滤波器的透射率分别为74.2%和62.1%。最后,该滤波器具有振幅偏振相关性,改变入射太赫兹线偏振方向与 $x$ 轴夹角 $\theta$ 可以调控太赫兹波的透射率。

## 2 样品制备

太赫兹超材料滤波器的制作过程如图1(a)所示,所用激光器是波长为10.6  $\mu\text{m}$ 的CO<sub>2</sub>激光器,其在焦点处的激光光斑直径约为50  $\mu\text{m}$ 。该激光器的功率从0.01~30 W内连续可调,扫描速度在1~1000 mm/s内可调,实验使用的PI薄膜厚度为50  $\mu\text{m}$ 。用计算机软件控制激光器可在PI表面加工出任意形状图案,采用先横向烧蚀再纵向烧蚀的方法加工如图1(a)所示,其中横向和纵向的周期均为 $U$ ,网格栅条宽度 $w$ 和厚度 $h$ 与激光参数有关。制作超材料滤波器的激光器功率和扫描速度分别设置为2.1 W和40 mm/s,LIG的拉曼光谱如图1(b)所示,LIG材料有3个特征峰分别为1350  $\text{cm}^{-1}$ (D),1580  $\text{cm}^{-1}$ (G)、2700  $\text{cm}^{-1}$ (2D)。一般来说,D峰是石墨烯的无序振动峰,表征石墨烯的结构缺陷;G峰是石墨烯的特征峰,由sp<sup>2</sup>碳原子面内振动引起。用 $I_D/I_G$ 来表征碳基材料的石墨化程度,比值越低

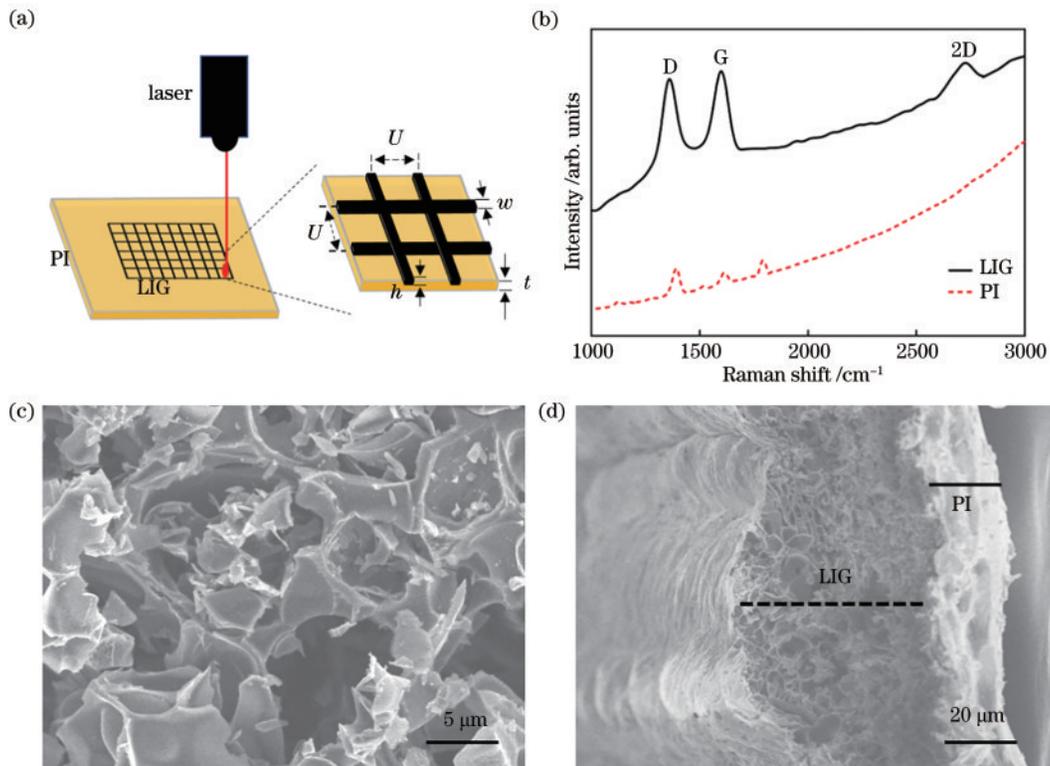


图1 LIG制备与表征。(a) LIG加工示意图;(b) LIG与PI的拉曼光谱图;(c) LIG表面扫描电子显微镜图;  
(d) LIG截面扫描电子显微镜图

Fig. 1 Fabrication and characterization of LIG. (a) Schematic of LIG fabrication; (b) Raman spectrograms of LIG and PI; (c) SEM image of the fabricated LIG; (d) cross-sectional SEM image of the fabricated LIG

结晶度越大,石墨化越大,用  $I_G/I_{2D}$  来判断石墨烯层数。LIG 表面扫描电子显微镜,如图 1(c)所示,由图 1(c)可知,LIG 内部呈多孔结构,这是激光的高温高压使 PI 内部的非碳原子如 H、N 等从 PI 膜内部以  $N_2$  和  $H_2$  等气体形式溢出形成的。通过对比 PI 的拉曼光谱以及扫描电子显微镜图证实使用 LIG 技术生成了三维多孔石墨烯<sup>[20]</sup>。LIG 的截面扫描电子显微镜如图 1(d)所示,大部分的 PI 膜被诱导形成了 LIG,其中生成的 LIG 最大厚度约为  $60\ \mu\text{m}$ ,剩余 PI 的厚度约为  $20\ \mu\text{m}$ ,同时激光扫描中心位置的 LIG 厚度最大。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 激光参数对 LIG 电导率的影响

LIG 的电导率会影响太赫兹波的传输,首先研究了不同的激光功率以及扫描速度下生成 LIG 的电导率,采用四探针法进行测量。如图 2(a)所示,当扫描速度为 30、40 mm/s 时,电导率随着激光功率的增大,先增大后减小。表明随着功率的增加,聚焦在 PI 上的能量在不断增大,使 PI 的碳化程度不断加强,从而 LIG 电导率随之增加;当能量进一步增加时,会破坏生成的 LIG,反而使电导率逐渐降低。当扫描速度为 50、60、70 mm/s 时,电导率随着激光功率的增大而单调递增。当激光功率低于 1.2 W 时,电导率为 0 S/m,这是

激光能量太低,PI 未碳化导致的。当激光功率超过 3 W 时,当扫描速度为 30~70 mm/s 时,激光功率都过高,会导致器件表面破坏严重而不能使用。如图 2(b)所示,当功率低于 1.8 W 时,电导率随着扫描速度的增加而降低。激光扫描速度增加,单位时间内作用于 PI 同一位置的激光脉冲次数减少,聚焦在 PI 上的激光能量较低,从而引起 LIG 碳化不完全。当功率高于 2.1 W 时,电导率随着扫描速度的增加,先增大后减小。其中,当扫描速度从 30 mm/s 增加到 40 mm/s 时,作用在 PI 表面的激光能量逐渐降低,LIG 内部结构被破坏程度减少。而当扫描速度为 40~70 mm/s 时,作用在 PI 表面激光能量进一步降低,导致 PI 碳化程度减弱,因此 LIG 电导率先增大后减小。综上,可采用激光能量密度  $\Phi$  来衡量作用在 PI 表面的激光能量<sup>[29]</sup>:

$$\Phi = \frac{P}{V \times d}, \quad (1)$$

式中: $P$  为激光功率; $V$  为激光扫描速度; $d$  为激光光斑直径。随着激光能量密度的增加,LIG 电导率随 PI 碳化程度逐渐加强;当超过某一阈值时,随着激光能量密度增加 LIG 内部被破坏程度增强,导致 LIG 电导率逐渐降低。与激光器高功率、高扫描速度生成的 LIG 相比,低功率、低扫描速度的加工过程更加稳定。由上述实验可得,当功率为 2.1 W、扫描速度为 40 mm/s 时,生成的 LIG 电导率特性较为优异。

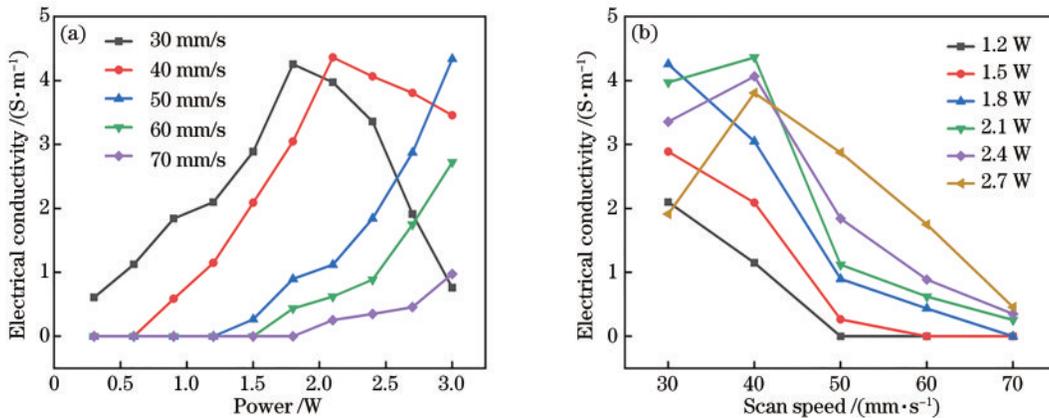


图2 激光加工参数与LIG电导率的关系。(a)激光功率对LIG电导率的影响;(b)扫描速度对LIG电导率的影响

Fig. 2 Relationship between laser processing parameters and LIG conductivity. (a) Laser-power-dependent electrical conductivity of the LIG at different laser scanning speeds; (b) laser-scanning-speed-dependent electrical conductivity of the LIG at different laser powers

#### 3.2 周期 $U$ 对太赫兹 LIG 超材料滤波器的影响

使用太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS, TAS7400 SP; Advantest Corporation) 测量太赫兹 LIG 超材料滤波器的透射性能,器件结构示意图如图 3(a)所示,其中,太赫兹波的线偏振方向沿  $x$  轴方向,传播方向沿  $z$  轴方向。使用厚度为  $50\ \mu\text{m}$  的 PI 作为基底,激光器的功率和扫描速度分别设置为 2.1 W 和 40 mm/s。通过仿真和实验研究了周期  $U$  对滤波器性能的影响,分别研究了  $U=300$ 、 $400$ 、 $500\ \mu\text{m}$  3 种情况。采用商用电磁

仿真软件 CST Microwave Studio 2019 进行模拟,其中 PI 膜为损耗介质,介电常数  $\epsilon = 3.23$ ,损耗角正切值  $\tan \delta = 0.0334$ 。LIG 是一种低损耗金属材料,电导率为 5 S/m,厚度  $h$  为  $60\ \mu\text{m}$  (可由上述扫描电子显微镜截面图得到)。滤波器的太赫兹透射性能如图 3(b)所示,当周期  $U=300\ \mu\text{m}$  时,滤波器的透射率较低,这是结构尺寸较小导致大部分的太赫兹入射到 LIG 表面被吸收或反射。当  $U=400\ \mu\text{m}$  时,滤波器的中心频率为 0.65 THz,其透射率为 62.1%。当  $U=500\ \mu\text{m}$  时,滤

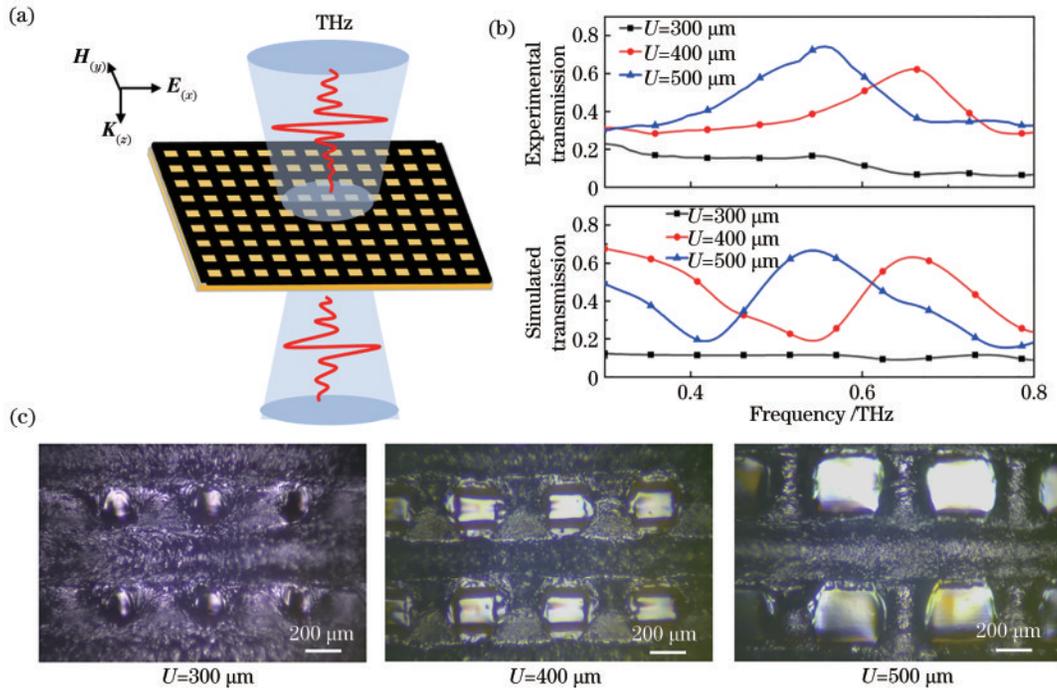


图3 太赫兹 LIG 超材料滤波器。(a)太赫兹 LIG 超材料滤波器结构示意图;(b)实验和仿真的太赫兹透射率( $U=300, 400, 500 \mu\text{m}$ ); (c)对应的光学显微图

Fig. 3 Terahertz LIG metamaterial filter. (a) Schematic diagram of terahertz LIG metamaterial filter structure; (b) experimental and simulated terahertz transmission spectra at  $U=300, 400$  and  $500 \mu\text{m}$ ; (c) corresponding optical micrographs

波器的中心频率为  $0.55 \text{ THz}$ , 其透射率为  $74.2\%$ 。实验和仿真的太赫兹透射率基本吻合, 但存在着一定的误差。激光波长较长以及加工过程热扩散效应导致制作的器件分辨率较低。设计的尺寸与实际加工的滤波器有一定的区别, 如图 3(c) 所示, 在仿真过程中滤波器的尺寸均由实际测量得到。当  $U=400 \mu\text{m}$  时, 滤波器的横向周期和纵向周期分别为  $480 \mu\text{m}$  和  $560 \mu\text{m}$ , 横向栅条的宽度和纵向栅条的宽度分别为  $260 \mu\text{m}$  和  $120 \mu\text{m}$ 。LIG 法制作超材料器件简单方便, 仅通过改变周期尺寸即可调节太赫兹 LIG 超材料滤波器的中心频率。

### 3.3 太赫兹 LIG 超材料滤波器的偏振特性

上述基于 LIG 技术制备的太赫兹超材料滤波器, 其横向栅条的宽度比纵向的宽度大, 具有一定的不对称性。其中, 当超材料周期为  $500 \mu\text{m}$  时, 滤波器的透射率最大, 选择该尺寸的超材料滤波器进一步研究其偏振特性。首先, 定义入射太赫兹线偏振方向与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ , 传播方向沿  $z$  轴。随后研究了不同  $\theta$  时滤波器的透射性能, 如图 4(a)、图 4(b) 所示, 实验和仿真研究表明, 在  $0.55 \text{ THz}$  处滤波器有着良好的滤波特性, 且滤波器透射率随着  $\theta$  从  $0^\circ \sim 90^\circ$  逐渐增加而单调递减, 滤波器的中心频率并未改变。在  $0.55 \text{ THz}$  处滤波器透射率与  $\theta$  的关系如图 4(c) 所示, 通过调节  $\theta$  来控制滤波器的透射率。为进一步研究滤波器振幅偏振相关, 用仿真软件研究超材料滤波器在  $0.55 \text{ THz}$  处的表

面电场分布情况。当  $\theta$  不同时, 超材料滤波器表面的电场分布不同, 电场分布强度较高的区域随着  $\theta$  逐渐变化, 太赫兹透射率的差异主要是滤波器结构引起的, 如图 4(d) 所示。在加工过程中, 激光先沿  $x$  轴加工, 再沿  $y$  轴加工, 由于激光的热扩散效应, 引起沿  $x$  轴方向栅条宽度变大, 使中间未加工的 PI 呈不规则的长方形。当  $\theta$  逐渐增加时, 入射太赫兹波线偏振方向相应的滤波器栅条宽度逐渐增大。当  $\theta=90^\circ$  时, 入射的太赫兹波大部分被吸收, 滤波器横向栅条表面电场最大; 当  $\theta=0^\circ$  时, 滤波器的滤波特性主要是谐振引起的。而  $\theta$  在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内, 滤波器对入射太赫兹波存在着部分吸收, 可以控制  $\theta$  来调节太赫兹波的透射率, 即通过旋转样品来调整滤波器的透射率。

前期基于 LIG 技术分别制备了太赫兹超材料带阻滤波器和太赫兹超材料吸收器, 与之前的方案相比, 本文采用低扫描速度和低激光加工功率相结合的方法, 生成的 LIG 有着不同的材料特性。同时, 该带通滤波器通过控制超材料的单元周期尺寸, 调节滤波器的中心频率。该滤波器具有振幅偏振相关特性, 通过控制入射太赫兹波的线偏振方向与  $x$  轴的夹角  $\theta$  调节滤波器的透射率。目前,  $\text{CO}_2$  激光器的波长较长, 以及加工过程热效应难以控制等原因, 导致加工分辨率较低, 生成 LIG 的导电性不够高。未来可通过更换激光光源以及对生成的 LIG 进行金属纳米粒子修饰等手段<sup>[32]</sup>, 进一步提高 LIG 样品精度和电导率等性能。

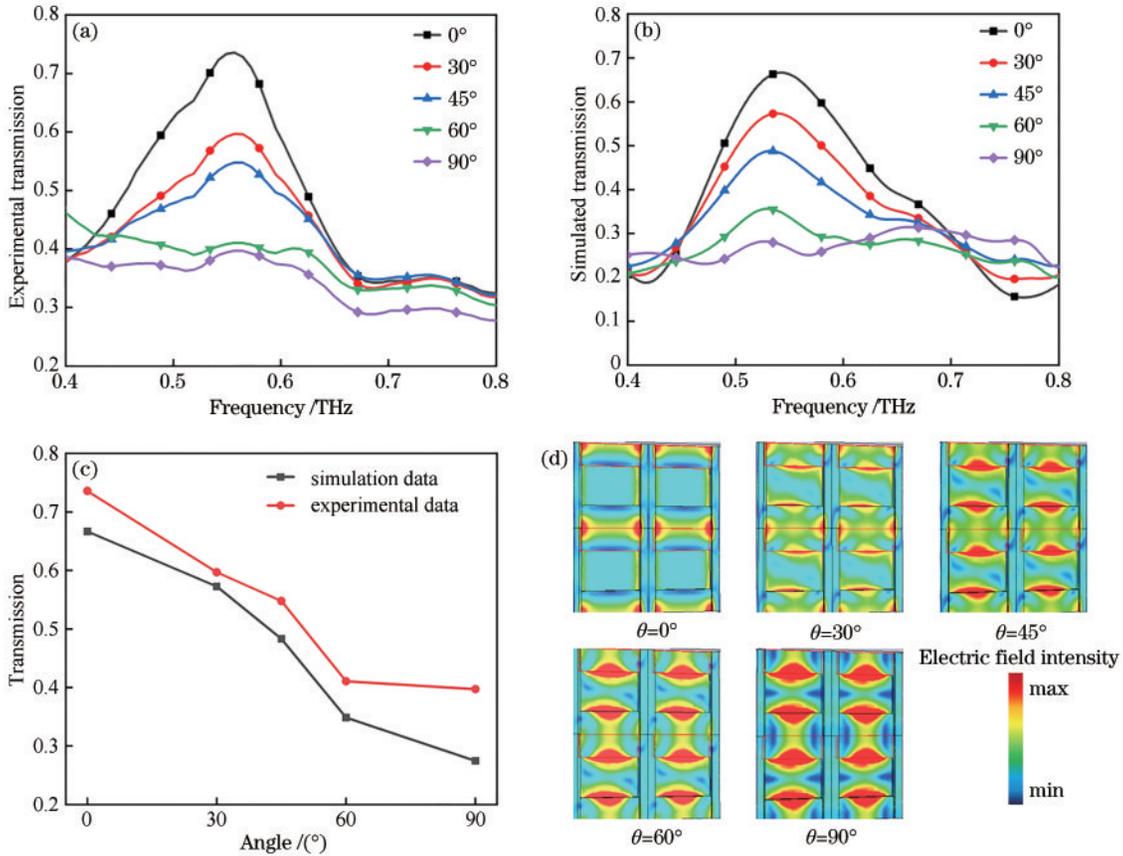


图 4 太赫兹 LIG 超材料滤波器的偏振特性。(a) 实验测试结果; (b) 仿真结果; (c) 在 0.55 THz 处、不同  $\theta$  下滤波器的透射率; (d) 相应超材料滤波器表面的电场分布

Fig. 4 Polarization characteristics of terahertz LIG metamaterial filter. (a) Experimental results; (b) simulation results; (c) filter transmission spectra under different  $\theta$  at 0.55 THz; (d) distribution of electric field on the surface of corresponding metamaterial filter

## 4 总 结

基于 LIG 技术,设计并制作了一种太赫兹超材料滤波器。首先,研究了不同激光功率和扫描速度下生成 LIG 的电导率特性。随后,研究了太赫兹超材料滤波器的透射特性,该滤波器在 0.55 THz 和 0.65 THz 的透射率分别为 74.2% 和 62.1%。最后,研究了中心频率为 0.55 THz 超材料滤波器的偏振特性, $\theta$  从  $0^\circ$  逐渐增加到  $90^\circ$ ,滤波器的透射率逐渐降低,实验和仿真吻合良好。基于 LIG 技术制作太赫兹超材料器件,是一种无掩模、低成本、高效率的方法。使用计算机软件控制可以生成具有任意图案化的 LIG,同时改变激光参数,也可以生成具有不同材料特性的 LIG。未来各种基于 LIG 技术的太赫兹超材料器件有望应用于太赫兹探测、传感以及通信等众多领域。

### 参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Federici J, Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(11): 111101.
- [3] Akyildiz I F, Jornet J M, Han C. Terahertz band: next frontier for wireless communications[J]. Physical Communication, 2014, 12: 16-32.
- [4] Fan K, Suen J Y, Liu X, et al. All-dielectric metasurface absorbers for uncooled terahertz imaging[J]. Optica, 2017, 4(6): 601-604.
- [5] Castaldi G, Pacheco-Peña V, Moccia M, et al. Exploiting space-time duality in the synthesis of impedance transformers via temporal metamaterials[J]. Nanophotonics, 2021, 10(14): 3687-3699.
- [6] Wang X C, Asadchy V S, Fan S H, et al. Space-time metasurfaces for power combining of waves[J]. ACS Photonics, 2021, 8(10): 3034-3041.
- [7] Zhang J, Wei X Z, Rukhlenko I D, et al. Electrically tunable metasurface with independent frequency and amplitude modulations[J]. ACS Photonics, 2020, 7(1): 265-271.
- [8] Li X J, Yin J, Liu J J, et al. Resonant transparency of a planar anapole metamaterial at terahertz frequencies[J]. Photonics Research, 2021, 9(2): 125-130.
- [9] Liu J J, Hong Z. Mechanically tunable dual frequency THz metamaterial filter[J]. Optics Communications, 2018, 426: 598-601.
- [10] Pitchappa P, Kumar A, Singh R, et al. Electromechanically tunable frequency-agile metamaterial bandpass filters for terahertz waves[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(2): 2101544.

- [11] Zheng C L, Li J, Liu L H, et al. Optically tunable terahertz metasurface absorber[J]. *Annalen Der Physik*, 2022, 534(5): 2200007.
- [12] Hu F R, Wang L, Quan B G, et al. Design of a polarization insensitive multiband terahertz metamaterial absorber[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(19): 195103.
- [13] Yao W, Tang L L, Wang J, et al. Spectrally and spatially tunable terahertz metasurface lens based on graphene surface plasmons[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 4800909.
- [14] Xu T, Wu Y K, Luo X G, et al. Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 59.
- [15] Stantchev R I, Sun B Q, Hornett S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector[J]. *Science Advances*, 2016, 2(6): 1600190.
- [16] Wang Y, Cui Z J, Zhang X J, et al. Excitation of surface plasmon resonance on multiwalled carbon nanotube metasurfaces for pesticide sensors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(46): 52082-52088.
- [17] Lin S J, Xu X L, Hu F R, et al. Using antibody modified terahertz metamaterial biosensor to detect concentration of carcinoembryonic antigen[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(4): 1-7.
- [18] Yang K, Liu S C, Arezoomandan S, et al. Graphene-based tunable metamaterial terahertz filters[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(9): 093105.
- [19] Shin J H, Park K H, Ryu H C. Electrically controllable terahertz square-loop metamaterial based on VO<sub>2</sub> thin film [J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(19): 195202.
- [20] Lin J, Peng Z W, Liu Y Y, et al. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5714.
- [21] Reina A, Jia X T, Ho J, et al. Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(1): 30-35.
- [22] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [23] Peng Z W, Lin J, Ye R Q, et al. Flexible and stackable laser-induced graphene supercapacitors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(5): 3414-3419.
- [24] Song W X, Zhu J X, Gan B H, et al. Flexible, stretchable, and transparent planar microsupercapacitors based on 3D porous laser-induced graphene[J]. *Small*, 2018, 14(1): 1702249.
- [25] Barber R, Cameron S, Devine A, et al. Laser induced graphene sensors for assessing pH: application to wound management[J]. *Electrochemistry Communications*, 2021, 123: 106914.
- [26] Wang W T, Lu L S, Li Z H, et al. Fingerprint-inspired strain sensor with balanced sensitivity and strain range using laser-induced graphene[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(1): 1315-1325.
- [27] Tao L Q, Tian H, Liu Y, et al. An intelligent artificial throat with sound-sensing ability based on laser induced graphene[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14579.
- [28] Huang L B, Xu S Y, Wang Z Y, et al. Self-reporting and photothermally enhanced rapid bacterial killing on a laser-induced graphene mask[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(9): 12045-12053.
- [29] Wang Z Y, Wang G C, Liu W G, et al. Patterned laser induced graphene for terahertz wave modulation[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 37(2): 546-551.
- [30] Zhang R X, Zong G W, Wu S Y, et al. Ultrathin flexible terahertz metamaterial bandstop filter based on laser-induced graphene[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(4): 1229-1232.
- [31] Lan J X, Zhang R X, Bai H, et al. Tunable broadband terahertz absorber based on laser-induced graphene[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(7): 073701.
- [32] Luo Y, He H, Li P, et al. Graphene-controlled FeSe nanoparticles embedded in carbon nanofibers for high-performance potassium-ion batteries[J]. *Science China Materials*, 2022, 65(7): 1751-1760.