

类H型结构的太赫兹带阻滤波器

陈祥雪 付子亲 王凤超 陈进 杨晶

Terahertz band-stop filter with H-type structure

CHEN Xiang-xue, FU Zi-qin, WANG Feng-chao, CHEN Jin, YANG Jing

引用本文:

陈祥雪, 付子亲, 王凤超, 陈进, 杨晶. 类H型结构的太赫兹带阻滤波器[J]. *中国光学*, 2024, 17(4): 757-763. doi: 10.37188/CO.2023-0179

CHEN Xiang-xue, FU Zi-qin, WANG Feng-chao, CHEN Jin, YANG Jing. Terahertz band-stop filter with H-type structure[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 757-763. doi: 10.37188/CO.2023-0179

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0179>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

带宽可调谐的太赫兹超构材料半波片器件

Bandwidth-tunable terahertz metamaterial half-wave plate component

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 701 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0198>

基于二氧化钒宽、窄带可切换的双功能超材料吸收器研究

Wide and narrow band switchable bi-functional metamaterial absorber based on vanadium dioxide

中国光学 (中英文). 2022, 15(2): 387 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0174>

黑砷磷室温太赫兹探测器

Room-temperature terahertz photodetectors based on black arsenic-phosphorus

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 182 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0175>

基于介质超表面角度复用的太赫兹增强吸收谱

Enhancement of terahertz absorption spectrum based on the angle multiplexing of the dielectric metasurface

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 731 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0197>

太赫兹超分辨率成像研究进展

Research progress of terahertz super-resolution imaging

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 405 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0198>

基于柔性基底动态调焦石墨烯超表面聚焦反射镜的仿真研究

Simulation on tunable graphene metasurface focusing mirror based on flexible substrate

中国光学 (中英文). 2021, 14(4): 1019 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0171>

文章编号 2097-1842(2024)04-0757-07

类 H 型结构的太赫兹带阻滤波器

陈祥雪, 付子亲, 王凤超, 陈进, 杨晶*
(上海应用技术大学理学院, 上海 201418)

摘要: 本文基于对称的类 H 型结构设计了一种超材料太赫兹带阻滤波器, 这种 H 型结构的连续金属臂可以流通电流。利用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 2021 研究了该滤波器的滤波特性。通过改变 H 型双臂间距臂长、周期长度、双 H 间距离等, 确定了滤波器的几何参数。结果表明, 该结构可实现偏振选择的功能, 在 y 偏振条件下, 滤波器在 0.2~2.3 THz 范围内没有明显的谐振峰, 但透过率范围在 -15 到 -3 dB 之间。而在 x 偏振条件下, 在中心频率 1.34 THz 处可获得 FWHM 带宽为 0.15 THz 的一个阻带, 传输参数约为 -30 dB。最后, 采用微加工工艺制备了超材料滤波器样品以验证仿真结果, 使用透射式太赫兹时域光谱系统对样品进行测试, 测试结果与仿真结果吻合较好。

关键词: 太赫兹; 超材料; 类 H 型结构; 带阻滤波器

中图分类号: TN248 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0179

Terahertz band-stop filter with H-type structure

CHEN Xiang-xue, FU Zi-qin, WANG Feng-chao, CHEN Jin, YANG Jing*
(College of Sciences, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

* Corresponding author, E-mail: yangjingxqq@sit.edu.cn

Abstract: In this paper, a terahertz band-stop filter based on a symmetrical H-type structure was designed, the continuous metal arms of which can flow current. By using electromagnetic simulation software CST Microwave Studio 2021, the filtering characteristics of the filter were studied, and the geometric parameters of the filter were determined by changing the arm length, period length and gap of double H. The results show that the filter can realize the tunable polarization properties. Under the y -polarization condition, the transmission spectrum has no obvious resonance peak in the range of 0.2–2.3 THz, but the intensity ranges from -15 dB to -3 dB. Under the x -polarization condition, a remarkably sharp dipole resonance valley occurs at 1.34 THz in the transmission spectrum, and the bandwidth and intensity are 0.15 THz and -30 dB, respectively. In order to verify the simulation results, the designed metamaterial filter was fabricated using micromachining technology, and the sample was tested by transmitted-terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system. The experiment results are in good agreement with the simulation results, which verifies the

收稿日期: 2023-10-11; 修订日期: 2023-11-06

基金项目: 上海应用技术大学协同创新基金 (No. XTCX2020-12); 上海应用技术大学中青年科技人才发展基金 (No. ZQ2022-6, No. ZQ2024-12)

Supported by Collaborative Innovation Fund, Shanghai Institute of Technology (No. XTCX2020-12); Youth Science and Technology Talent Development Fund, Shanghai Institute of Technology (No. ZQ2022-6, No. ZQ2024-12)

feasibility of this method.

Key words: terahertz; metamaterial; H-type structure; band-stop filter

1 引言

太赫兹波通常是指频率范围为 0.1~10 THz 的电磁波,其具有穿透性较强、分辨率较高、光子能量较低的特点^[1-3],被广泛应用于通信^[4-6]、生物医学^[7]、安保^[8]等领域。与此同时,太赫兹功能器件受到了广泛关注,人工电磁超材料的出现丰富了电磁响应特性,极大地促进了太赫兹功能器件的发展。

电磁超材料是一种具有特殊结构和性质的人工合成材料,通过精密排列的微观结构单元,能够实现电磁波的有效控制和调控。近年来,基于超材料的太赫兹器件已经得到了快速发展,涌现了如太赫兹吸波器^[9-11]、太赫兹调制器^[12]、太赫兹偏振器^[13]等,以及各种各样的太赫兹系统,如太赫兹探测器^[14]、超宽带太赫兹发射机^[15]、太赫兹成像系统^[16]等。其中,能够进行频率选择的滤波器在太赫兹信号的传输和调制中起着至关重要的作用,因此受到了广泛的关注和研究。2012年, Yeh 等提出了一种超材料带通滤波器^[17]。该滤波器使用耶路撒冷十字结构,实现了 3 dB 相对带宽达 82.2% 的超材料宽带带通滤波器。但是该结构不具有频率选择性,而且结构相对复杂。2015年, Zhu 等人研究了基于分裂环谐振器超材料的偏振不敏感宽带截止滤波器^[18],结果发现,对于 0.42 THz 频率范围内的阻带,传输电平保持在 12% 以下。2017年,王俊林等人提出了一种基于单层超材料结构的柔性双阻带太赫兹滤波器^[19],该滤波器由顶层的周期性对称金属谐振结构阵列和底层的柔性 PDMS 基底组成。结果表明,在 0.131 THz 和 0.182 THz 处获得了 3 dB 带宽分别为 15 GHz 和 10 GHz 的 2 个阻带,具有多频段的特性。2020年, Kumar 等人提出了通过使用双环超材料为太赫兹区域提供双阻带的滤波器^[20]。2021年,高万等人设计提出一种太赫兹宽带带通滤波器^[21],该滤波器是由在柔性聚酰亚胺介质衬底上镶嵌两个不同半径大小的金属圆环实现的。上述文献中单位结构具有对称性,使得结构对电磁波偏振不敏感,并且所报道的超材料中使用的

结构都是分离的,它们不传递电信号,只激发等离子体共振,这限制了它们在电子器件(如电子光学传感器)中的应用。因此,2022年, Huang 等人设计了基于 H 型结构的宽带阻滤波器^[22],该滤波器中心频率为 0.65 THz,具有一个 458 GHz 的 -10 dB 的带宽,实验结果表明,该滤波器可以通过改变线宽来灵活地调整带宽和中心频率。在 H 型结构基础上,很多研究者在许多领域都进行了应用,2019年, Tang 等提出了一种利用局部共振特性进行声学聚焦的方法^[23],构建了具有相同尺寸单元的 H 型声学结构。2020年, Wang 等人提出了一种基于 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的嵌入式超材料太赫兹波自由空间调制器^[24]。其通过在两个金属触点之间施加电压来控制钙钛矿量子点中自由载流子运动的方向,从而调制深度。

本文提出了一种基于对称类 H 型结构的太赫兹带阻滤波器。该 H 型结构的双臂长度不等,其中外侧臂比内侧臂长且外侧臂处于联通状态,便于流通电流。基于 CST 2021 软件对该超材料滤波器进行数值模拟,得到透射谱,证实了该结构具有偏振敏感特性,接着,讨论了该结构的几何参数对谐振峰中心频率和传输频谱的影响。采用 MEMS 工艺制备了滤波器样品,使用太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 系统测试滤波器样品的太赫兹透射信号。

2 太赫兹滤波器结构与仿真

类 H 型滤波器的单元结构如图 1(彩图见期刊电子版)所示。该单元结构由介质基底及金属超材料两层组成。基底材料采用介电常数 ϵ_r 为 3.84 的二氧化硅,金属结构选用电导率 σ 为 4.09×10^7 S/m 的金。从图中可以看出,周期单元为 p , H 型内侧臂长度为 b , H 型双臂间距为 l , 双 H 间距离为 s , 金属条宽度为 w 。

采用基于有限积分法的商用软件 CST Microwave Studio 2021 对滤波器结构进行仿真。在仿真过程中,结构平面的 x 和 y 方向的边界条件分别为电场 E 和磁场 H。单元结构具体的几何参

数设置如下: H 型内侧臂长度 $b=44 \mu\text{m}$, H 型双臂间距 $l=13 \mu\text{m}$, 双 H 间距离 $s=4 \mu\text{m}$, 金属条宽度 $w=4 \mu\text{m}$, 单元周期 $p=50 \mu\text{m}$ 。图 2(a)(彩图见期刊电子版) 为类 H 型滤波器的透射系数仿真曲线。从图 2 中可以发现, 当入射太赫兹波的偏振方向沿着 y 轴方向时, 滤波器在 $0.2\sim 2.3 \text{ THz}$ 范围内没有明显谐振峰, 但透过率范围在 -15 到 -3 dB 之间。而当入射太赫兹波的偏振方向沿着 x 轴方向时,

在滤波器中心频率 1.34 THz 处可获得 FWHM 带宽为 0.15 THz 的一个阻带, 传输参数约为 -30 dB 。图 2(b)(彩图见期刊电子版) 为入射波偏振方向沿 x 轴, 谐振峰位置处的电流分布图。可以观察到电流主要集中在横向金属条附近, 表明它们之间存在强耦合。在入射电场的作用下, 横向金属条上的电荷积累导致了透射峰的出现。

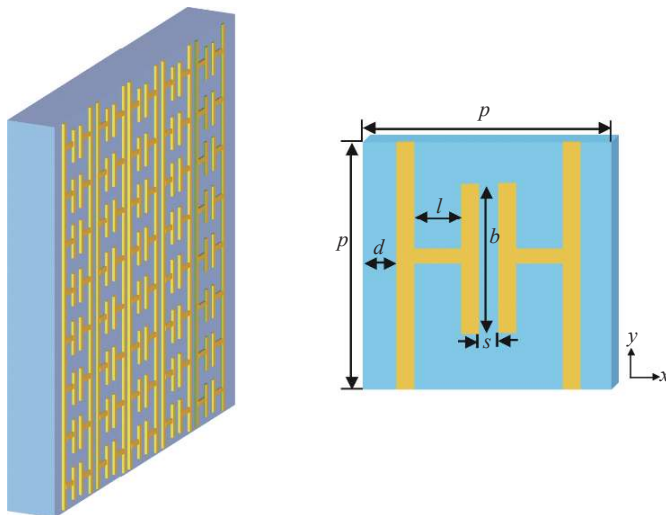


图 1 太赫兹滤波器结构设计示意图

Fig. 1 Structural diagram of the designed THz filter

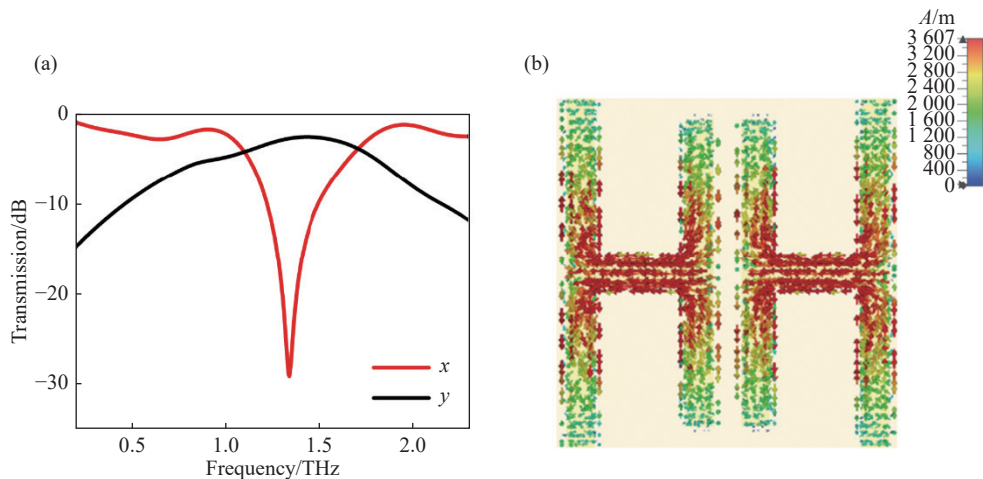


图 2 (a) 透射系数仿真图; (b) 入射波沿 x 轴偏转位置和透射共振峰位置 ($f=1.34 \text{ THz}$) 处的电流分布

Fig. 2 (a) Transmission coefficient simulation; (b) the current distribution of the incident wave at the x -axis deflection position and the transmission formant position ($f=1.34 \text{ THz}$)

3 滤波器性能分析与讨论

为了分析滤波器的调谐性能, 研究了超材料单元结构尺寸变化对阻带谐振峰的影响。通过改

变该结构的宽度 w 发现, 随着 w 从 $3 \mu\text{m}$ 增加到 $6 \mu\text{m}$, 透射信号的强度和共振峰位置都有一定的变化, 但是整体来看调制幅度不大, 基于此, 本文选择结构宽度为 $4 \mu\text{m}$ 开展一系列的研究工作。首先, 在保持其余各个参数不变的情况下, 分析了

H 型内侧臂长度 b 对太赫兹滤波器性能的影响, 结果如图 3(a)(彩图见期刊电子版) 所示。图 3(a) 为 b 从 $36 \mu\text{m}$ 增加到 $50 \mu\text{m}$ 对应的一系列透过率曲线。可以看出, 随着内侧臂长度 b 的不断增加, 滤波器的中心频率发生红移, 从 1.4 THz 逐渐

偏移到 1.3 THz , 且阻带深度没有发生显著改变, 带宽也没有发生很大变化。这些结果表明, 通过改变 H 型内侧臂长度, 可以实现带阻滤波器的中心频率的调谐。

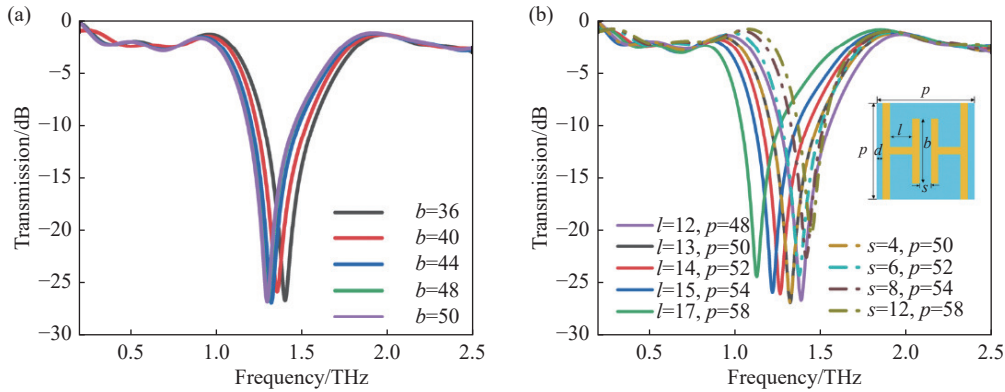


图 3 (a) 模拟不同内侧臂长度 b 下的传输特性; (b) 实线: 模拟不同双臂间距 l 和周期长度 p 下的传输特性; 虚线: 模拟不同双 H 间距距离 s 和周期长度 p 下的传输特性

Fig. 3 (a) Simulated transmission characteristics at different d ; (b) solid line: simulated transmission characteristics under different arms spacing l and length p ; dotted line: simulated transmission characteristics under different double H spacing distance s and length p

进一步, 研究了超材料单元结构周期变化对阻带谐振峰的影响。如图 3(b)(彩图见期刊电子版) 插图所示, H 型双臂间距 l , 双 H 间距离 s 及 H 型外侧臂与结构边缘之间的距离 d 这三种尺寸的变化均会引起单元周期 p 的变化。首先, 在保持 H 型外侧臂与结构边缘之间的距离 d 和双 H 间距离 s 不变的情况下, 通过改变 H 型双臂间距 l 调整单元周期 p , 如图 3(b) 中实线所示, 随着单元周期 p 从 $50 \mu\text{m}$ 增加到 $58 \mu\text{m}$, 滤波器谐振峰的中心频率发生红移, 且抑制效果逐渐减弱。其次, 在保持 H 型外侧臂与结构边缘之间的距离 d 和 H 型双臂间距 l 不变的情况下, 通过改变双 H 间距离 s 调整单元周期 p , 如图 3(b) 中虚线所示。可见, 随着单元周期 p 从 $50 \mu\text{m}$ 增加到 $58 \mu\text{m}$ 滤波器谐振峰的中心频率发生蓝移, 且抑制效果逐渐减弱。这些结果表明, 引起单元周期变化的原因不同, 产生的效果也不同, 当 p 都是从 $50 \mu\text{m}$ 增加到 $58 \mu\text{m}$ 时, 一种因为双臂间隔 l 变化向低频方向移动, 而另一个因为双 H 间距离 s 变化向高频方向偏移。通过改变超材料单元结构周期, 可以实现带阻滤波器的中心频率和传输频谱的调谐。综上所述, 在设计太赫兹滤波器时, 单元结构

尺寸和周期的变化都会对滤波器性能产生重要影响。

综上所述, 在 x 偏振条件下, 改变内侧臂长度 b , 可以实现带阻滤波器中心频率可调。改变该结构的周期长度, 在保持 H 型外侧臂与结构边缘之间的距离 d 和双 H 间距离 s 不变的情况下, 通过改变 H 型双臂间距 l 调整单元周期 p , 滤波器谐振峰的中心频率发生红移。其次, 在保持 H 型外侧臂与结构边缘之间的距离 d 和 H 型双臂间距 l 不变的情况下, 通过改变双 H 间距离 s 调整单元周期 p , 滤波器谐振峰的中心频率发生蓝移, 且抑制效果逐渐减弱。而在 y 偏振条件下, 参数改变时, 由于该情况下无特征峰, 故只是透射强度发生了轻微的变化。

4 样品制备与测试

为了验证所设计的超材料滤波器的仿真传输特性, 选择结构尺寸如下: H 型内侧臂长度 $b=44 \mu\text{m}$, H 型双臂间距 $l=13 \mu\text{m}$, 双 H 间距离 $s=4 \mu\text{m}$, 金属条宽度 $w=4 \mu\text{m}$, 单元周期 $p=50 \mu\text{m}$ 的滤波器进行加工。加工方案涉及到 MEMS 工艺

中的光刻技术。加工样品使用的基底为石英晶圆, 双面抛光, 直径为 4 英寸, 厚度为 $500\ \mu\text{m}$ 。超材料样品的大小为 $0.75\ \text{cm}\times 0.75\ \text{cm}$, 每块样品的

实际结构面积为 $0.65\ \text{cm}\times 0.65\ \text{cm}$, 各边缘均有 $0.5\ \text{mm}$ 的留白。制得的滤波器样品的显微镜照片如图 4(a) 所示。

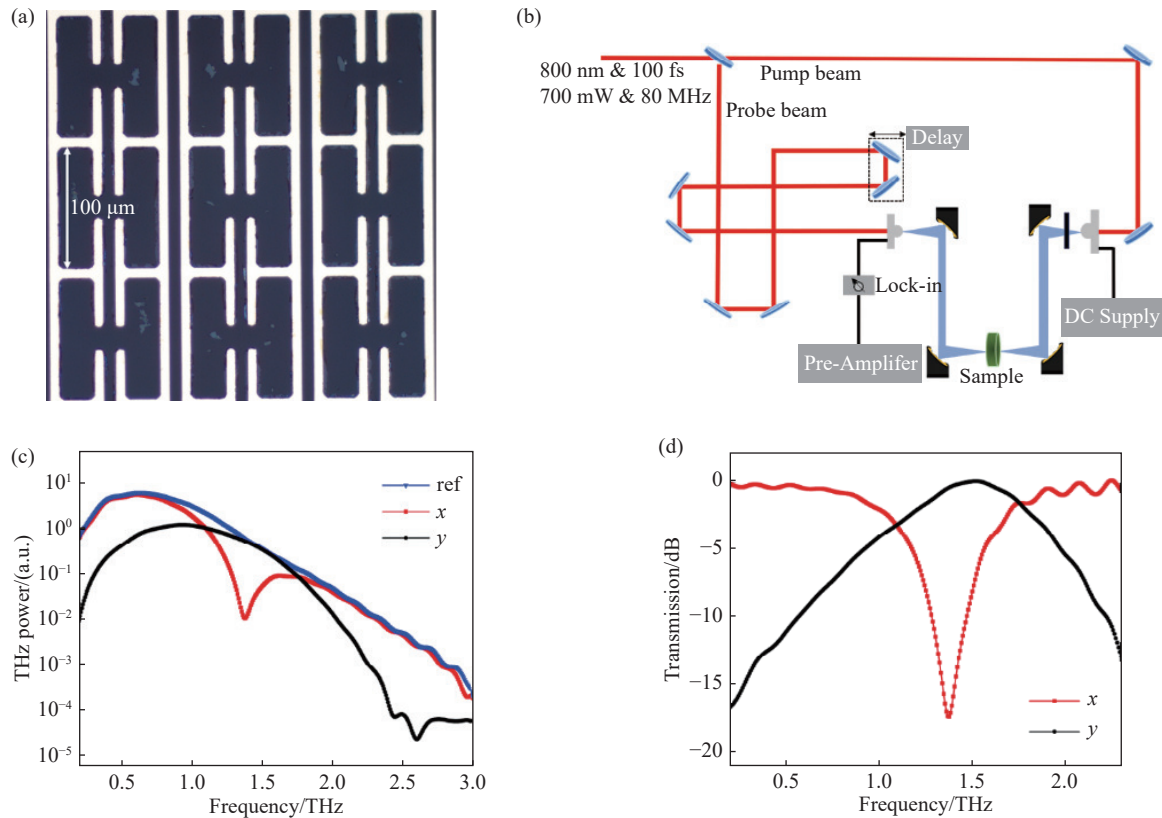


图 4 (a) 滤波器样品显微镜照片; (b) 透射式 THz-TDS 系统示意图; (c) 太赫兹透射频域信号; (d) 相对透过率谱线

Fig. 4 (a) Microscope photo of filter sample; (b) schematic diagram of the transmission THz-TDS system; (c) terahertz transmission frequency domain signal; (d) relative transmittance spectra

为了验证仿真结果的正确性及样品制备的精确性, 采用透射式 THz-TDS 系统 (图 4(b)) 对制备的滤波器样品的传输特性进行测试^[25-26]。如图 4(c) 所示, 红色和黑色曲线分别对应滤波器样品在两种不同偏振条件下的太赫兹频率信号, 蓝色曲线为石英基底的太赫兹频率信号, 可以看出, 当入射波沿 x 轴方向偏振时, 透射谱存在明显的谐振峰, 而当入射波沿 y 轴方向偏振时, 透射谱没有明显的特征峰但透射强度明显低于参考信号。定义样品的透过率为 $T(\text{dB}) = 10\lg(P_{\text{sam}}/P_{\text{ref}})$, 其中, P_{ref} 和 P_{sam} 分别为参考和样品的太赫兹透射功率谱, 利用上述公式即可得到滤波器样品的太赫兹透过率谱线, 如图 4(d) 所示。可见当入射波沿 x 轴方向偏振时, 在 $1.37\ \text{THz}$ 处可获得 FWHM 带宽为 $0.184\ \text{THz}$ 的一个阻带, 传输参数约为 $-19\ \text{dB}$, 而当入射波沿 y 轴方向偏振时, 没有明显

的谐振峰, 但透过率范围在 -17 到 $-1\ \text{dB}$ 之间。对比图 4(d) 和图 2(a) 可以看出, 实验和模拟结果趋势一致, 但在数值上有轻微差异, 这跟样品加工及测试环境的误差有关。

5 结 论

基于类 H 型结构提出了一种太赫兹带阻滤波器。该 H 型结构的双臂长度不等, 其中外侧臂比内侧臂更长且外侧臂处于联通状态。仿真结果表明, 该结构具有偏振敏感特性, 在 y 偏振条件下, 可实现高透的效果, 而在 x 偏振条件下, 在中心频率 $1.34\ \text{THz}$ 处可获得 $3\ \text{dB}$ 带宽为 $0.696\ \text{THz}$ 的一个阻带, 传输参数约为 $-30\ \text{dB}$ 。利用电磁仿真软件对该滤波器的各个参数进行了电磁仿真测试, 并对透射参数进行分析, 探究了各参数对太赫

兹滤波器性能的影响,发现通过改变双臂间距 l 、内侧臂长度 b 、周期结构长度 p 有望实现滤波器的中心频率可调。采用微加工工艺的光刻技术制备了超材料滤波器样品,并采用 THz-TDS 系统对

该滤波器样品的传输特性进行测试,在误差范围内,实验与仿真效果比较吻合。该滤波器结构较简单、加工成本较低,而且可以流通电流,有望在电子领域有更广阔的应用。

参考文献:

- [1] 潘学聪,姚泽瀚,徐新龙,等. 太赫兹波段超材料的制作、设计及应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 283-296.
PAN X C, YAO Z H, XU X L, *et al.*. Fabrication, design and application of THz metamaterials[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 283-296. (in Chinese).
- [2] 姚建铨,路洋,张百钢,等. THz 辐射的研究和应用新进展[J]. 光电子·激光, 2005, 16(4): 503-510.
YAO J Q, LU Y, ZHANG B G, *et al.*. New research progress of THz radiation[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2005, 16(4): 503-510. (in Chinese).
- [3] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [4] LU X Y, VENKATESH S, SAEIDI H. A review on applications of integrated terahertz systems[J]. *China Communications*, 2021, 18(5): 175-201.
- [5] WILLIAMS G P. Filling the THz gap—high power sources and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2006, 69(2): 301-326.
- [6] 闫海涛,邓朝,郭澜涛,等. 太赫兹远距离快速扫描成像系统的设计[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 183-186.
YAN H T, DENG CH, GUO L T, *et al.*. Design of terahertz rapid standoff imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 183-186. (in Chinese).
- [7] GONG A P, QIU Y T, CHEN X W, *et al.*. Biomedical applications of terahertz technology[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2020, 55(5): 418-438.
- [8] 胡其枫,蔡健. 基于深度学习的太赫兹时域光谱识别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(1): 94-99.
HU Q F, CAI J. Research of terahertz time-domain spectral identification based on deep learning[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(1): 94-99. (in Chinese).
- [9] FANG X M, JIANG X W, WU H. Dual-wavelength narrow-bandwidth dielectric metamaterial absorber[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1327-1340.
- [10] 张若雅,朱巧芬,张岩. 可调谐太赫兹超材料吸波器研究进展[J]. 量子电子学报, 2023, 40(3): 301-318.
ZHANG R Y, ZHU Q F, ZHANG Y. Research progress of tunable terahertz metamaterial absorbers[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2023, 40(3): 301-318. (in Chinese).
- [11] CHEN ZH, CAI P G, WEN Q Y, *et al.*. Graphene multi-frequency broadband and ultra-broadband terahertz absorber based on surface plasmon resonance[J]. *Electronics*, 2023(12): 2655.
- [12] 凌芳,孟庆龙,黄人帅,等. 温控太赫兹调制器多频带调制特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(5): 1334-1338.
LING F, MENG Q L, HUANG R SH, *et al.*. The characteristics of thermally tunable multi-bands terahertz modulator[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(5): 1334-1338. (in Chinese).
- [13] KYOUNG J, JANG E Y, LIMA M D, *et al.*. A reel-wound carbon nanotube polarizer for terahertz frequencies[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(10): 4227-4231.
- [14] 董卓,陈捷,朱一帆,等. 黑砷磷室温太赫兹探测器(英文)[J]. 中国光学, 2021, 14(1): 182-195.
DONG ZH, CHEN J, ZHU Y F, *et al.*. Room-temperature terahertz photodetectors based on black arsenic-phosphorus[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(1): 182-195. (in Chinese).
- [15] 肖尚辉,刘简,胡波,等. 基于低采样率数模转换器和模数转换器的太赫兹发射机线性化[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 718-724.
XIAO SH H, LIU J, HU B, *et al.*. Linearization of terahertz transmitter based on low sampling rate DAC and ADC[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(2): 718-724. (in Chinese).
- [16] VALUŠIS G, LISAUŠKAS A, YUAN H, *et al.*. Roadmap of terahertz imaging 2021[J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 4092.
- [17] YEH T T, GENOVESI S, MONORCHIO A, *et al.*. Ultra-broad and sharp-transition bandpass terahertz filters by hybridizing multiple resonances mode in monolithic metamaterials[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7580-7589.
- [18] ZHU M, LEE C. A design of terahertz broadband filters and its effect in eliminating asymmetric characteristics in device

- structures[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(15): 3280-3285.
- [19] 王俊林, 张斌珍, 段俊萍, 等. 柔性双阻带太赫兹超材料滤波器[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1016001.
WANG J L, ZHANG B ZH, DUAN J P, *et al.*. Flexible dual-stopband terahertz metamaterial filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1016001. (in Chinese).
- [20] KUMAR D, JAIN R, SHAHJAHAN, *et al.*. Bandwidth enhancement of planar terahertz metasurfaces via overlapping of dipolar modes[J]. *Plasmonics*, 2020, 15(6): 1925-1934.
- [21] 高万, 王建扬, 吴倩楠. 基于双金属环的超材料太赫兹宽频带通滤波器的设计与研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0516001.
GAO W, WANG J Y, WU Q N. Design and investigation of a metamaterial terahertz broadband bandpass filter based on dual metallic ring[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0516001. (in Chinese).
- [22] HUANG Y, OKATANI T, KANAMORI Y. Broadband stop filters for THz waves using H-shaped metamaterials with dual electronic-plasmonic functionality[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, 61(SD): SD1007.
- [23] TANG SH, HAN J N. Acoustic transmission characteristics based on H-type metamaterials[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 96125-96131.
- [24] WANG K H, LI J SH, YAO J Q. Sensitive terahertz free space modulator using CsPbBr₃ perovskite quantum dots-embedded metamaterial[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, 41(5): 557-567.
- [25] TANG CH, YANG J, WANG Y D, *et al.*. Integrating terahertz metamaterial and water nanodroplets for ultrasensitive detection of amyloid β aggregates in liquids[J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 2021, 329: 129113.
- [26] YANG J, TANG CH, WANG Y D, *et al.*. The terahertz dynamics interfaces to ion-lipid interaction confined in phospholipid reverse micelles[J]. *Chemical Communications*, 2019, 55(100): 15141-15144.

作者简介:



杨晶(1990—), 女, 江苏淮安人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事太赫兹时域光谱技术、太赫兹超材料器件及太赫兹生物学等领域方面的研究。E-mail: yangjingxqq@sit.edu.cn