

激光与光电子学进展

基于双金属环的超材料太赫兹宽频带通滤波器
的设计与研究高万¹, 王建扬¹, 吴倩楠^{1,2,3,4*}¹中北大学理学院物理系, 山西 太原 030051;²中北大学南通智能光机电研究院, 江苏 南通 226000;³中北大学微系统集成研究中心, 山西 太原 030051;⁴中北大学前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051

摘要 本文提出了一种基于双金属环的超材料太赫兹宽频带通滤波器, 为太赫兹滤波器插入损耗和带宽问题的解决提供了可行方案。利用频域有限差分法构建双金属环超材料的理论模型, 通过改变双金属环间距、半径以及聚酰亚胺衬底厚度, 确定了宽频、高透射率太赫兹滤波器的几何参数。结果表明: 该滤波器在 0.1~1.2 THz 内可实现 0.54 THz 的通带带宽, 且在通带内的太赫兹波透射率高达 93%, 有效改善了太赫兹宽频滤波器的整体性能。

关键词 材料; 超材料; 太赫兹; 宽频滤波器

中图分类号 O43

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0516001

Design and Investigation of a Metamaterial Terahertz Broadband
Bandpass Filter Based on Dual Metallic RingsGao Wan¹, Wang Jianyang¹, Wu Qiannan^{1,2,3,4*}¹Department of Physics, College of Science, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;²Nantong Institute of Intelligent Opto-Mechatronics of North University of China, Nantong, Jiangsu 226000, China;³Center for Microsystem Integration, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;⁴Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract In this paper, we propose a metamaterial terahertz broadband bandpass filter based on dual metallic rings and the filter provides feasible solution for the insertion loss and bandwidth problems of a terahertz filter. A theoretical model of the dual metallic rings metamaterial can be constructed using a frequency-domain finite-difference method. By changing the distance between the two rings, the radii of two rings, and the thickness of the polyimide substrate, we can determine the geometric parameters of a broadband and high-transmittance terahertz filter. The results show that the filter can achieve a passband bandwidth of 0.54 THz at 0.1~1.2 THz and that the terahertz-wave transmittance in the passband can be as high as 93%, effectively improving the overall performance of the terahertz broadband filter.

Key words materials; metamaterial; terahertz; broadband filter

OCIS codes 160.3918; 300.6495; 250.5403

收稿日期: 2020-05-30; 修回日期: 2020-08-12; 录用日期: 2020-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61705200)、中北大学青年学术带头人项目(QX201905)、山西省研究生创新项目(2020SY385)

*E-mail: qiannanwoo@nuc.edu.cn

1 引言

人们通常将频率范围在 0.1~10 THz 的电磁波称为太赫兹波,它是一种波长在毫米波与红外光之间的电磁波,也被称为亚毫米波^[1-3]。因为亚毫米波段的频率较毫米波段(5G 通信使用的波段)高 10^3 倍以上,资源丰富且系统容量大,因此 6G 技术将频率选在该波段,以实现传输速率更快的通信^[4-6]。由此可见,太赫兹技术将为新一代通信技术的发展提供至关重要的技术支持。

事实上,早在 20 世纪 70 年代,研究人员就对太赫兹波进行了深入研究,并研发出了很多太赫兹器件,如太赫兹吸波器^[7-9]、太赫兹天线^[10]、太赫兹反射器^[11]等,以及各种各样的太赫兹系统,如太赫兹安检仪^[12]、超宽带太赫兹发射机^[13]、太赫兹成像系统^[14]等,它们可应用于安检、通信^[15-17]、生物医学^[18]等诸多领域。滤波器作为太赫兹通信技术中用量最大的关键器件之一^[19],引起了很多研究学者的密切关注。2014 年, Lan 等^[20]采用二维方格形金属光子晶体平板结构制作的波导带通滤波器在亚太赫兹波段实现了滤波效果,并通过调整该结构中多层波导的参数和晶格常数,使其 3 dB 带宽达到了 0.0052 THz 左右;但是该结构过于复杂,影响参数较多,不易加工制备。2020 年, Sun 等^[21]采用互补谐振结构的超材料,设计了一种偏振不敏感的宽频太赫兹带通滤波器。该滤波器能够对不同入射偏振状态下的太赫兹波实现相同的滤波效果,在工作频段内的最大 3 dB 带宽可达到 0.405 THz,而且该滤波器的结构简单,易于制备;但其在工作频段内的透射系数较低,从而导致电磁波损耗较高。2019 年, Kumar 等^[22]同样利用耦合互补超材料结构研制出了一种太赫兹滤波器,其在太赫兹波段的 3 dB 带宽宽度为 0.39 THz。2020 年,马宏宇等^[23]利用科赫曲线分形结构滤波器模型进行仿真分析,获得了中心频率为 0.715 THz、3 dB 带宽宽度为 0.021 THz 的太赫兹滤波器,但该滤波器的科赫曲线分形结构过于复杂,且 3 dB 带宽较窄。

虽然到目前为止太赫兹宽频滤波器的研究工作已被大量报道,但根据以上的文献分析可以发现,目前的太赫兹宽频滤波器仍存在结构复杂、带宽较窄、透射率较低、损耗较高等问题。鉴于此,本文设计了一种新型的双金属环电磁超材料太赫兹宽频带通滤波器,然后通过仿真优化了该滤波器结构参数对太赫兹波的电磁响应,使其同

时具有宽频带和高透射率特征。该滤波器的结构简单,易于加工,为太赫兹滤波技术提供了一种新颖的设计方案。

2 太赫兹滤波器的结构设计

本文设计的太赫兹滤波器谐振单元由两层结构组成,如图 1 所示,衬底材料为柔性聚酰亚胺薄膜,其介电常数 ϵ 和磁导率 μ 分别为 3.5 和 1,衬底形状为长方体,其周期长度为 a ,厚度为 b 。衬底的上表面镶嵌着两个大小不同的圆环,其中:小圆环的内径为 r ,圆环宽度为 d ,圆环的厚度为 h ;大圆环内径为 R ,圆环宽度为 D ,厚度为 H 。圆环材料为铜。

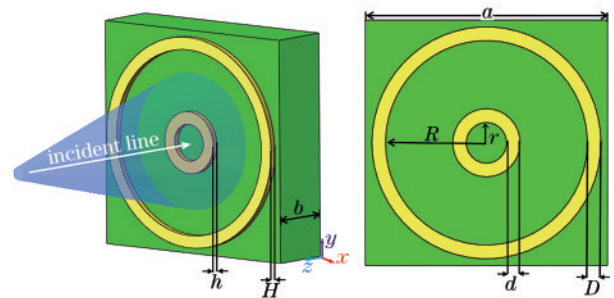


图 1 仿真单元的 3D 结构和参数(左)以及谐振单元的正视图结构(右)

Fig. 1 3D structure and parameters of the simulation unit (left) and front view structure of the resonance unit (right)

本文所涉及的单层太赫兹滤波器的设计结构是一种人工合成超材料的理论模型,此模型结构在太赫兹频段的一定频带内实现滤波特性的机理是该模型表面构成了 FSS(频率选择表面),FSS 对入射电磁波具有选频效果。本文采用频域有限差分软件进行仿真实验,太赫兹波垂直入射到滤波器表面,超材料结构在不同的频率点处具有不同的电磁响应特性。透射系数在谐振频率点处迅速减小,而在其他非谐振频率点处将保持较大的值,从而导致透射系数在谐振频率点附近形成非常明显的波谷。在谐振频率点处,太赫兹波几乎不能通过,但在非谐振频率点处,大量太赫兹波能够实现完美透射。以上是超材料结构能够形成带通滤波器的原理。通常来说,采用超材料制作的太赫兹滤波器参数一旦被确定下来,滤波器就只能在某段固定频率内工作。对滤波器的各个参数进行仿真并互相组合,可以得到性能最好的宽频带通滤波器。

3 太赫兹滤波器的性能分析

3.1 内环半径 r 对太赫兹滤波器性能的影响

首先研究该滤波器结构的内环半径 r 对其滤波性能的影响情况。内环半径 r 分别选取 10, 20, 30, 40, 50 μm 。其余结构参数设定如下:周期长度 $a=180 \mu\text{m}$, 衬底高度 $b=50 \mu\text{m}$, 外环半径 $R=80 \mu\text{m}$, 外环环宽 $D=5 \mu\text{m}$, 外环厚度 $H=4 \mu\text{m}$, 内环宽度 $d=5 \mu\text{m}$, 内环厚度 $h=4 \mu\text{m}$ 。

在 0~1.2 THz 频率内, 对该结构谐振环内环半

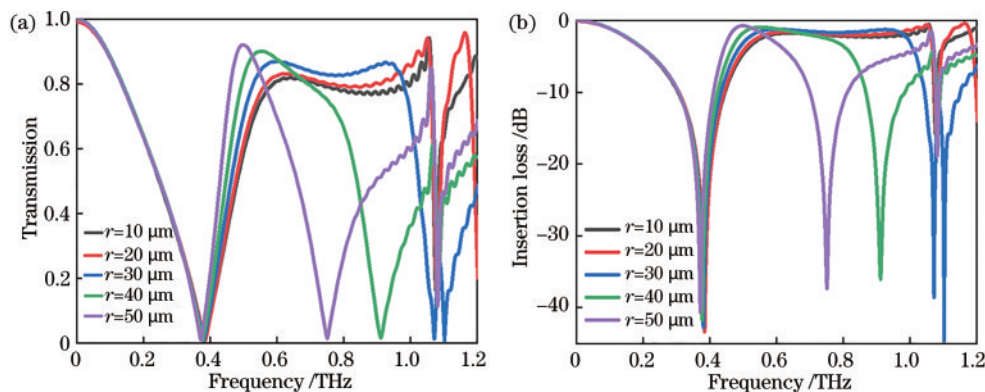


图 2 不同内环半径下太赫兹滤波器的透射系数和插入损耗。(a)透射系数;(b)插入损耗

Fig. 2 Transmission coefficient and insertion loss of terahertz filter at different inner diameters. (a) Transmission coefficient; (b) insertion loss

3.2 外环半径 R 对太赫兹滤波器性能的影响

通过对上述结构参数进行仿真模拟发现,对滤波器表面圆环状谐振结构的参数进行调整可以有效改变其滤波性能。因此,在设定内环半径 r 为 20 μm , 并保持其他结构参数不变的情况下,改变外环半径 R 的数值(分别为 40, 50, 60, 70, 80 μm)进行

r 变化时滤波器的性能分别进行仿真计算,得到了滤波器的仿真结果(S_{21} 参数),如图 2 所示。图 2(a)反映的是透射系数,图 2(b)反映的是插入损耗。可以看出:在 0~1.2 THz 频率内,滤波器的工作中心频率随着内环半径 r 的增大而向低频方向移动;当内环半径 r 在 10~30 μm 区间时,3 dB 带宽宽度较大,且太赫兹波滤波器在其工作频段内也具有较高的透射系数;当内环半径 $r=20 \mu\text{m}$ 时,3 dB 带宽达到了最大值,滤波器能够获得较大的工作带宽。对仿真结果进行对比后,本文选取内环半径 r 为 20 μm 。

仿真。仿真结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出:随着外环半径 R 逐渐增加,滤波器中心频率 f_0 从高频方向向低频方向移动,其 3 dB 带宽宽度 (B_W^{3dB}) 大幅度增加,由 0.12 THz 增至 0.53 THz。这说明,在保持其他结构参数不变的情况下,增大外环半径 R ,可以显著提升太赫兹滤波器

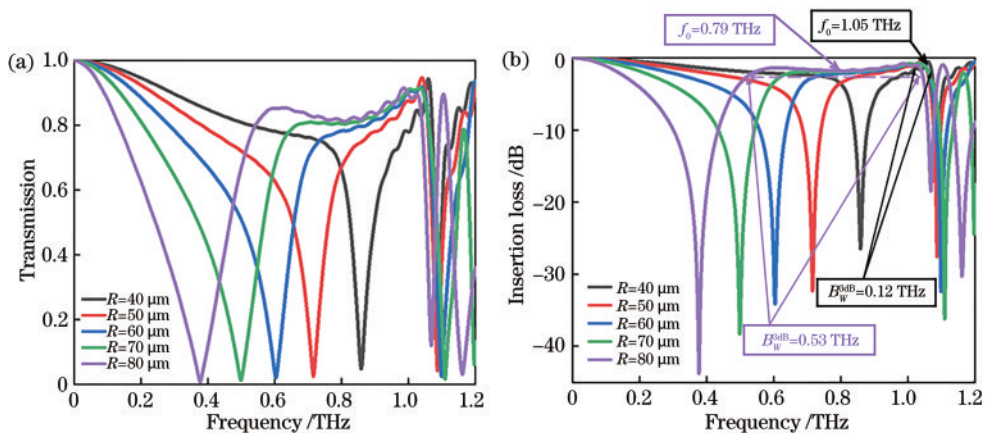


图 3 不同外环半径下太赫兹滤波器的透射系数和插入损耗。(a)透射系数;(b)插入损耗

Fig. 3 Transmission coefficient and insertion loss of terahertz filter at different outer diameters. (a) Transmission coefficient; (b) insertion loss

的通带性能。但是,外环半径 R 的大小需要与整体滤波器的结构参数匹配,持续增大外环半径会导致滤波器的整体性能遭到破坏。经过对比分析,本文选择 $R=80\ \mu\text{m}$ 为最优结构参数。

3.3 外环宽度 D 对太赫兹滤波器性能的影响

为了详细分析表面环形谐振结构在该太赫兹滤波器整体结构中的作用,本文进一步讨论了最外侧环形结构的宽度对滤波器整体性能的影响。在设定外环半径 $R=80\ \mu\text{m}$ 和其他结构参数不变的情况下,选取外环宽度 D 分别为 $0, 10, 20, 30, 40\ \mu\text{m}$ 进

行仿真模拟,得到如图 4 所示的结果。图 4 中展示了不同外环宽度 D 下超材料单元的透射参数。可以看出,该太赫兹滤波器中心频率 f_0 随着外环宽度 D 的增加从 $0.715\ \text{THz}$ 转移到 $1.1\ \text{THz}$, 中心频率逐渐增大, $3\ \text{dB}$ 带宽宽度随着外环宽度 D 的增大而减小。在 D 取 $0\ \mu\text{m}$ 的情况下,太赫兹滤波器的透射系数最大, $3\ \text{dB}$ 带宽同时也达到最大值。 D 取 $0\ \mu\text{m}$ 时可以达到理想状态下的最佳滤波效果,但是考虑到后期加工的工艺条件,本文尽可能取 D 为较小值,这里取 D 为 $5\ \mu\text{m}$ 。

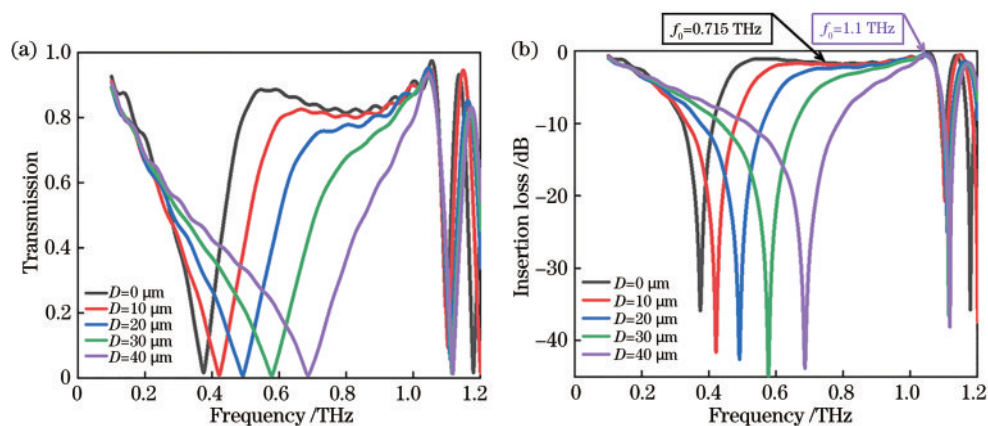


图 4 不同外环宽度下太赫兹滤波器的透射系数和插入损耗。(a)透射系数;(b)插入损耗

Fig. 4 Transmission coefficient and insertion loss of terahertz filter at different outer ring widths. (a) Transmission coefficient; (b) insertion loss

3.4 内环宽度 d 对太赫兹滤波器性能的影响

小圆环对于谐振结构在滤波器的整体滤波效果中也起到了重要作用,因此本文对内环宽度进行了仿真优化。设置其余结构参数不变,内环宽度 d 分别为 $0, 2.5, 5, 7.5, 10\ \mu\text{m}$, 对应的太赫兹滤波器的透射系数如图 5 所示。

由图 5 可以看出,随着内环宽度从 $0\ \mu\text{m}$ 增加到 $10\ \mu\text{m}$, 太赫兹波的透射效果几乎一致。由此可见,内环宽度在 $0\sim 10\ \mu\text{m}$ 范围内的变化对整个滤波器性能的影响不大。为了减轻该太赫兹滤波器的加工难度,可选择与外环宽度 D 相同的结构参数,即 $d=D=5\ \mu\text{m}$ 。

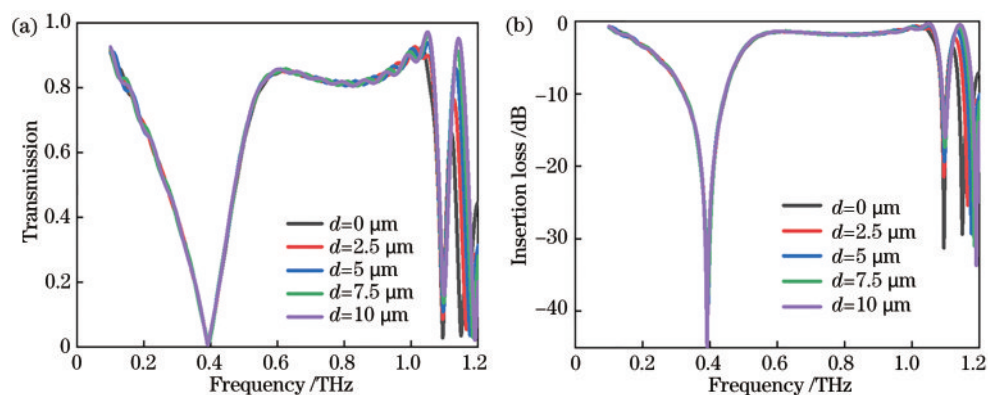


图 5 不同内环宽度下太赫兹滤波器的透射系数和插入损耗。(a)透射系数;(b)插入损耗

Fig. 5 Transmission coefficient and insertion loss of terahertz filter at different inner ring widths. (a) Transmission coefficient; (b) insertion loss

3.5 周期长度 a 对太赫兹滤波器性能的影响

这一小节将分析该太赫兹滤波器结构单元的周期长度 a 对滤波器整体性能的影响。在保持上述

圆环谐振结构及其他结构参数不变的情况下,改变太赫兹滤波器结构单元的周期长度(选取 a 分别为 180, 200, 220, 240, 260 μm), 所得结果如图 6 所示。

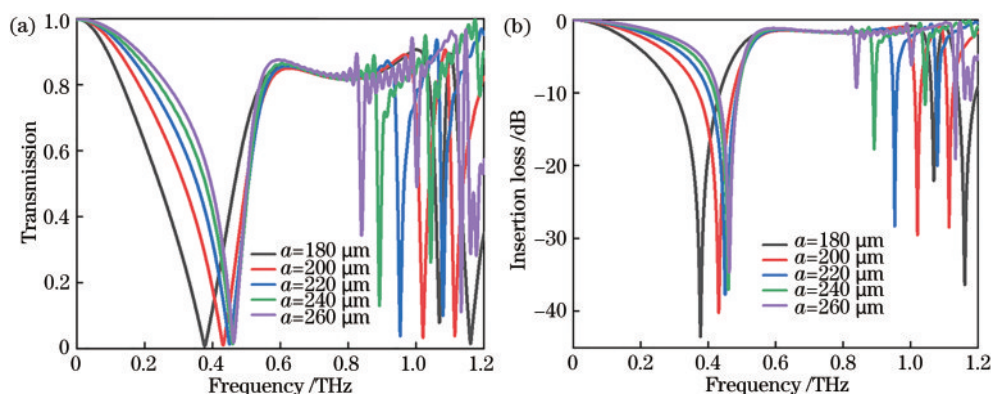


图 6 不同周期长度下太赫兹滤波器的透射系数和插入损耗。(a)透射系数;(b)插入损耗

Fig. 6 Transmission coefficient and insertion loss of terahertz filter at different substrate side lengths. (a) Transmission coefficient; (b) insertion loss

在图 6 中可以看出,该结构单元周期长度的增加对滤波器在低频处的低阶谐振无明显影响,但是会改变其在高频处的高阶谐振,高阶谐振频率随着周期长度的增加从 1.18 THz 移动到 0.82 THz,从而导致 3 dB 带宽宽度减小。为了保证滤波器具有较高的 3 dB 带宽,本文选择结构单元的周期长度 a 为 180 μm ,以使其具有较好的滤波性能。

3.6 衬底厚度 b 对太赫兹滤波器性能的影响

该太赫兹滤波器的衬底选用的是聚酰亚胺柔性材料,其厚度会直接影响到该器件在后期使用时能否易与其他结构共形。因此,在保证上述结构参数不变的情况下,本文在改变衬底厚度 b 的情况下

进行仿真模拟(衬底厚度 b 分别为 20, 40, 60, 80, 100 μm)。图 7 展示了衬底厚度 b 变化时超材料单元的透射参数。在图 7 中可以看出,衬底厚度在 20~40 μm 时,滤波器具有较好的滤波性能,随着衬底厚度继续增加,滤波器带内波纹波动得越发明显,3 dB 带宽宽度也会逐渐减小,持续增加滤波器衬底厚度对其滤波性能没有任何改善。因此,本文选择的衬底厚度为 40 μm ,该厚度可以在保证滤波器具有较好滤波性能和稳定机械结构的同时获得更加柔性的整体结构,使其能够完美地附着在卫星、航天器、无人机等复杂结构的表面,从而拓宽了它的实际应用价值。

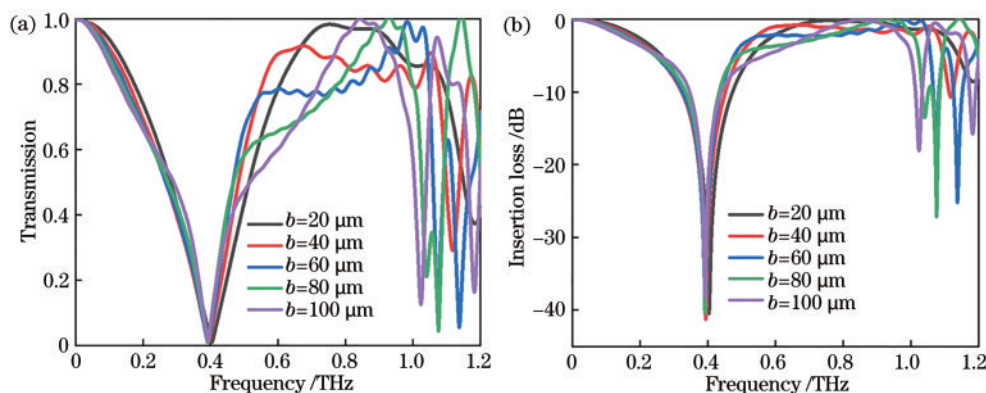


图 7 不同衬底厚度下太赫兹滤波器的透射系数和插入损耗。(a)透射系数;(b)插入损耗

Fig. 7 Transmission coefficient and insertion loss of terahertz filter at different substrate thicknesses. (a) Transmission coefficient; (b) insertion loss

3.7 太赫兹滤波器整体结构参数分析

综上,得到了太赫兹滤波器的具体参数,如表 1

所示。

根据表 1 所示的滤波器的具体参数值,采用频

域有限差分仿真软件进行仿真,得到了太赫兹滤波器的透射系数和插入损耗,如图 8 所示。

表 1 太赫兹滤波器的设计尺寸
Table 1 Design size of terahertz filter

Parameter	Value/ μm
Substrate side length a	180
Substrate thickness b	40
Outer ring radius R	80
Outer ring width D	5
Inner ring radius r	20
Inner ring width d	5
Ring height $h(H)$	4

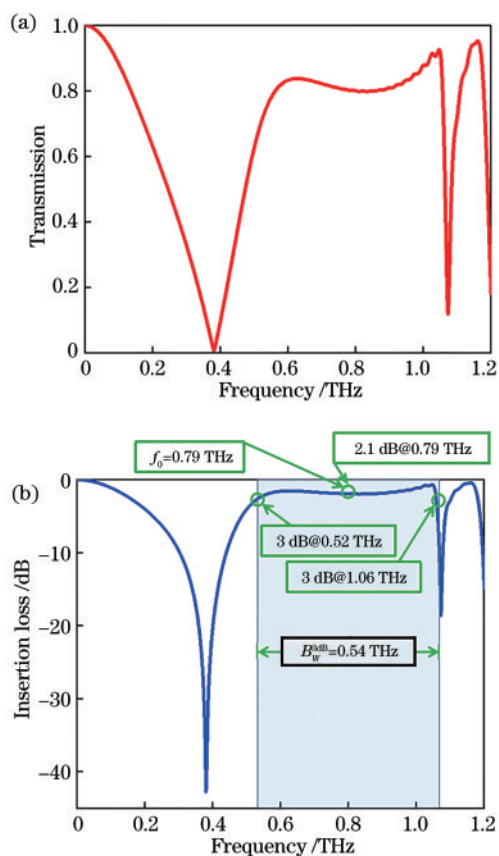


图 8 太赫兹滤波器的透射系数和插入损耗。(a)透射系数; (b)插入损耗

Fig. 8 Transmission coefficient and insertion loss of terahertz filter. (a) Transmission coefficient; (b) insertion loss

在图 8 中能够看出,该滤波器的中心频率为 0.79 THz,通带为 0.52~1.06 THz,3 dB 带宽为 0.54 THz,相对带宽达到了 68.3%,带内插入损耗小于 2.1 dB。图 9 和图 10 分别为仿真得到的该太赫兹滤波器在中心频率为 0.79 THz 时的电场分布图以及在 0.37,0.79,1.06 THz 处的表面电流分布

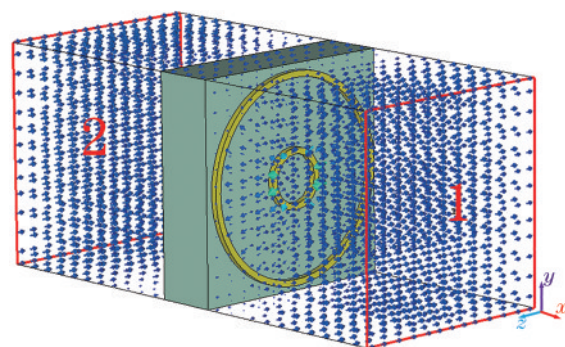


图 9 0.79 THz 时太赫兹滤波器附近的电场分布图
Fig. 9 Electric field distribution near the filter at 0.79 THz

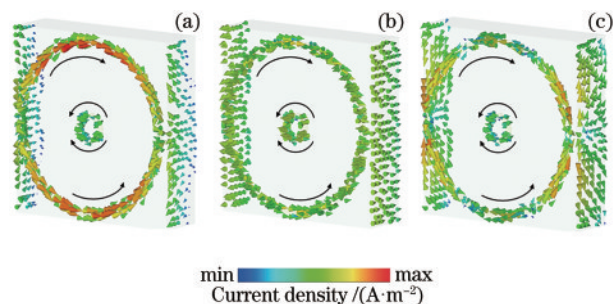


图 10 太赫兹滤波器在不同频率处的表面电流图。
(a)0.37 THz; (b)0.79 THz; (c)1.06 THz

Fig. 10 Surface current graphs of terahertz filter at different frequencies. (a) 0.37 THz; (b) 0.79 THz; (c) 1.06 THz

图。通过分析滤波器在中心频率附近的电场分布图可以发现,太赫兹波从端口 1(x 轴正方向)到达端口 2(x 轴负方向)时,滤波器前后两侧的电场分布大致相同,滤波器后侧电场强度相对于前侧没有明显衰减,表明此时滤波器具有良好的通带特性,且在通带内太赫兹波实现了低损耗传输。

为了更好地了解该太赫兹滤波器的工作机制,本文分别选取该太赫兹滤波器在低阶谐振频率($f=0.37$ THz)、中心频率($f=0.79$ THz)和高阶谐振频率($f=1.06$ THz)处的表面电流分布进行分析。通过观察 $f=0.37$ THz 处的表面电流分布可以发现:在外环处,电流从外环中轴线的左侧出发后分为上下两部分,同时流经上半环和下半环到达外环中轴线的右侧,且当电流经过上下半环顶点附近时,电流强度持续增大;在内环处,电流从内环中轴线右侧出发,同时流经内环上下两部分,到达内环中轴线左侧,其电流分布规律正好与外环相反。正是由于内环和外环具有相反的电流流向,滤波器表面中轴线上下才产生了两组较强的 LC(电感电容)谐振,从而导致该滤波器在 0.37 THz 时产生了一个低阶谐振。同理,在 $f=1.06$ THz 时,该滤波器表面与

低阶谐振($f=0.37$ THz)时有着相同的电流分布,但其电流强度明显弱于低阶谐振时的电流强度,导致高阶谐振的透射谱的衰减程度较低。继续分析该滤波器在中心频率($f=0.79$ THz)时的表面电流分布,可以发现,虽然此时表面电流的整体分布与低阶谐振、高阶谐振处的电流分布无明显差异,但电流强度明显弱于前两个频率处的电流强度,从而使得滤波器在工作频段内具有较低的谐振强度,能够获得较高的通带特性。

进一步分析可知该双环谐振结构可以在 0~1.2 THz 范围内产生一个低阶谐振和一个高阶谐振,且两谐振频率相距较远,在谐振频率处可以获得衰减程度较高的透射谱,从而使滤波器可以获得较宽的工作带宽和较好的带外抑制。同时,在滤波器工作频段内,该结构的谐振响应较小,保证了滤波器在通带内具有较高的透射谱。

最近几年太赫兹滤波器已有成果与本文结果的对比如表 2 所示。

表 2 太赫兹滤波器的研究成果
Table 2 Research results of terahertz filter

Reference	Working frequency/THz	Central frequency/THz	3 dB bandwidth/THz	Insertion loss/dB	Transmittance/%
[20](2014)	0.10-0.16	0.145	0.0052	≤ 0.95	—
[21](2020)	0.1-0.6	0.42	0.16	—	≤ 78.0
[24](2019)	0.3-1.1	0.56	0.29	—	≤ 81.7
[22](2019)	0.2-2.0	0.69	0.39	—	≤ 98.0
[24](2019)	0.2-1.8	0.66	0.15	—	≤ 84.4
[23](2020)	—	0.715	0.021	—	≤ 92.0
This paper	0-1.2	0.79	0.54	≤ 2.1	≤ 93.0

4 结 论

本文设计了双圆环结构的超材料太赫兹滤波器,然后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,并对透射参数进行了分析,探究了谐振环各参数和衬底各参数对太赫兹滤波器性能的影响。通过比较各参数下的透射参数,总结出了基于圆形谐振环的宽带通滤波器的最佳设计方案,使其突破了以往太赫兹滤波器通带带宽较窄的限制,获得了约 0.54 THz 的 3 dB 带宽宽度。此外,本文设计的太赫兹滤波器具有结构简单、加工成本低、易与其他结构共形的特点,可应用到隐形战机、新型通信设备和精密仪器等领域。

参 考 文 献

- [1] Liu S G. Recent development of terahertz science and technology [J]. China Basic Science, 2006, 8(1): 7-12.
刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7-12.
- [2] 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.
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.
- [3] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J].

Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.

- [4] Dong N Y. Analysis on the key technology of 6G communication system [J]. Scientific and Technological Innovation, 2020, 5(10): 54-55.
- [5] Strinati E C, Barbarossa S, Gonzalez-Jimenez J L, et al. 6G: the next frontier [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 42-50.
- [6] Zhang Z Q, Xiao Y, Ma Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 28-41.
- [7] Yi Z, Liang C P, Chen X F, et al. Dual-band plasmonic perfect absorber based on graphene metamaterials for refractive index sensing application [J]. Micromachines, 2019, 10(7): E443.
- [8] Chen X Y, Tian Z, Lu Y C, et al. Electrically tunable perfect terahertz absorber based on a graphene salisbury screen hybrid metasurface [J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(3): 1900660.
- [9] Zou H J, Cheng Y Z. A thermally tunable terahertz three-dimensional perfect metamaterial absorber for temperature sensing application [J]. Modern Physics Letters B, 2020, 34(18): 2050207.
- [10] Ullah S, Ruan C J, Haq T U, et al. High performance THz patch antenna using photonic band gap and defected ground structure [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2019, 33(15): 1943-1954.

- [11] Wang J Y, Wu Q N. Metamaterial terahertz broadband reflector with double-layer grid[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0614002.
王建扬, 吴倩楠. 基于双层格栅的超材料太赫兹宽频反射器[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0614002.
- [12] Ren L M. Application of terahertz technology in railway security checks [J]. Electronic Test, 2014 (18): 118-120.
任林茂. 太赫兹技术在铁路安检中的应用[J]. 电子测试, 2014(18): 118-120.
- [13] Tiodor N, Aladdin A, Michael I, et al. Sub-terahertz low power UWB communication link for WPAN [J]. Network & Complex Systems, 2012, 2(4): 45-49.
- [14] Chan W L, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(12): 121105.
- [15] Ferguson B, Zhang X C, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology [J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [16] Williams G P. Filling the THz gap-high power sources and applications [J]. Reports on Progress in Physics, 2006, 69(2): 301-326.
- [17] Yan H T, Deng C, Guo L T, et al. Design of terahertz rapid standoff imaging system [J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 183-186.
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.
- [18] Yoshida H, Ogawa Y, Kawai Y, et al. Terahertz sensing method for protein detection using a thin metallic mesh [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(25): 253901.
- [19] Li J S. Terahertz wave narrow bandpass filter based on photonic crystal [J]. Optics Communications, 2010, 283(13): 2647-2650.
- [20] Lan F, Yang Z Q, Qi L M, et al. Compact waveguide bandpass filter employing two-dimensional metallic photonic crystals for millimeter to terahertz frequencies [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(4): 040401.
- [21] Sun D D, Qi L M, Liu Z Y. Terahertz broadband filter and electromagnetically induced transparency structure with complementary metasurface [J]. Results in Physics, 2020, 16: 102887.
- [22] Kumar D, Kumar R, Chowdhury D R. Complementary metamaterials based broadband bandpass terahertz filter [C]//2019 Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP), December 13-14, 2019, Guwahati, India. New York: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [23] Ma H Y, Li J S. Terahertz bandpass filter based on Koch curve fractal structure [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(3): 733-737.
马宏宇, 李九生. 基于科赫曲线分形结构太赫兹带通滤波器 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(3): 733-737.
- [24] Zhao S, Hu F R, Xu X L, et al. Electrically triggered dual-band tunable terahertz metamaterial band-pass filter based on $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-VO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ sandwich [J]. Chinese Physics B, 2019, 28(5): 115-120.
- [25] Jiang M Z, Hu F R, Qian Y X, et al. Tunable terahertz band-pass filter based on MEMS reconfigurable metamaterials [J]. Journal of Physics D, 2020, 53(6): 065107.