

# 三波段超材料宽带带通滤波器的设计及实验研究

王昊深, 韩 奎, 孙 威, 李海鹏, 王伟华, 付文悦, 沈晓鹏

中国矿业大学物理学院, 江苏 徐州 221116

**摘要** 基于多个圆环嵌套结构单元, 设计、加工与测试了一种对偏振无依赖以及大角度入射稳定的三波段超材料宽带带通滤波器(BPF)。仿真结果表明该滤波器存在三个通带, 中心频率分别为 7.22, 10.10, 14.46 GHz, 3 dB 相对带宽分别为 17.5%, 20.2% 和 17.4%, 中心频率处透射率分别为  $-0.85$  dB,  $-0.69$  dB 和  $-1.73$  dB。单元结构具有旋转对称性, 使得该滤波器对电磁波偏振不敏感, 并且在入射角达到  $40^\circ$  时, 三个波段依然维持较好的稳定性。通过监测谐振频点处的表面电流分布情况, 分析了三波段滤波的物理机理。这种带通滤波器具有多波段滤波、偏振无依赖以及大角度入射稳定等特性, 有望在多频谱成像技术、信息通信等领域发挥一定的作用。

**关键词** 光学器件; 带通滤波器; 超材料; 三波段

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0623001

## Design and Experimental Investigation of Triple-Band Metamaterial Broadband Bandpass Filter

Wang Haoshen, Han Kui, Sun Wei, Li Haipeng, Wang Weihua, Fu Wenyue, Shen Xiaopeng

*School of Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China*

**Abstract** A triple-band metamaterial broadband bandpass filter (BPF) which is independent to polarization and stable at wide-angle incidence is designed, fabricated and tested. Simulation results show that the designed BPF has three broadband passbands. The center frequencies are 7.22, 10.10, 14.46 GHz. 3 dB relative bandwidths are 17.5%, 20.2% and 17.4%. The transmission efficiencies at center frequency are  $-0.85$  dB,  $-0.69$  dB and  $-1.73$  dB, respectively. This BPF is insensitive to the electromagnetic wave polarization, because the structure is rotational symmetry. Additionally, three bands of the designed BPF can still keep stable performance, when incident angle reaches  $40^\circ$ . By monitoring the surface current distributions at resonant frequencies, the physical mechanism of the triple-band filtering is analyzed. The proposed triple-band metamaterial broadband BPF is hopeful to take part in multi-frequency imaging technology, information communications and other fields owing to its multi-band filtering, independent to polarization and stable at wide-angle incidence.

**Key words** optical devices; bandpass filter; metamaterials; triple-band

**OCIS codes** 230.7408; 160.3918; 300.6370

## 1 引 言

超材料具有天然材料所不具备的奇异物理性质, 通过合理地设计结构单元形状和尺寸, 可以实现对电磁波传输、反射、吸收等特性的灵活调控, 因此引起了科研人员的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。基于超材料的设计理念, 研究人员们在微波段、太赫兹波段甚至光波段设计出了许多新颖的电磁器件, 如超材料隐身斗篷、完美吸收器、超材料滤波器等器件<sup>[6-9]</sup>。超材料带通滤波器在成像技术、信息通信等领域具有广阔的应用前景<sup>[10-16]</sup>。天

收稿日期: 2017-01-03; 收到修改稿日期: 2017-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(61372048, 11504418)、中央高校基本科研业务费项目(2013QNA34, 2013QNA39)、大学生创新项目(DC201637)

作者简介: 王昊深(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事超材料滤波器方面的研究。E-mail: hswang\_cumt@163.com

导师简介: 韩 奎(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事超材料及非线性光学方面的研究。

E-mail: han6409@263.net(通信联系人)

津大学韩家广等<sup>[17]</sup>提出了一种基于金属-介质-金属(MDM)三明治结构的带通滤波器,通过在介质层两边镀上周期排列的开槽金属阵列,在太赫兹波段实现了相对带宽为 29.5%的超材料宽带带通滤波器。Yeh 等<sup>[18]</sup>提出了一种超材料带通滤波器,该滤波器采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。Turkmen 等<sup>[19]</sup>用三个 U 型嵌套结构设计出一种谐振器,通过调节结构参数可以灵活地实现三个频率的谐振,实验和仿真结果吻合得很好。Bai 等<sup>[20]</sup>提出了一种超材料窄带带通滤波器,通过巧妙地组合一个、两个以及三个相互嵌套的圆环实现了单、双和三波段窄带滤波。目前大多数带通滤波器局限于对单波段、双波段滤波以及如何提高带宽的研究,而对于多波段宽带滤波的研究相对较少。相比于单波段和双波段滤波器,多波段滤波器可以实现多频段滤波,在无线通信系统中有着很大的应用潜力。

本文设计了一种采用多圆环嵌套结构的三波段超材料宽带带通滤波器。基于传统的 MDM 结构,上下两层为相同的金属谐振结构。滤波器单元结构具有旋转对称性,使得其对电磁波偏振不敏感,大角度入射下三个通带依然维持较高的透射率。通过分析各个谐振频点处的表面电流分布情况,阐明了其物理机制。该滤波器具有三波段宽带滤波、大角度入射稳定、结构紧凑灵活等特点,可在多波段成像、信息通信等领域发挥作用。

## 2 滤波器设计

所设计的滤波器结构如图 1 所示。图 1(a)和(b)分别为滤波器结构单元透视图和实验样品图。该滤波器包括三层结构:上、下层均为扣掉 4 个嵌套环的铜板,中间为介质层。被挖掉的 4 个圆环槽外半径由外到内依次为  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , 圆环宽度由外到内依次为  $d_1, d_2, d_3, d_4$ , 铜板厚度为 0.018 mm, 介质层材料为 F4B, 介电常数和损耗正切分别为  $\epsilon = 2.65, \tan \delta = 0.001$ , 厚度为  $t$ , 单元结构周期为  $p$ 。

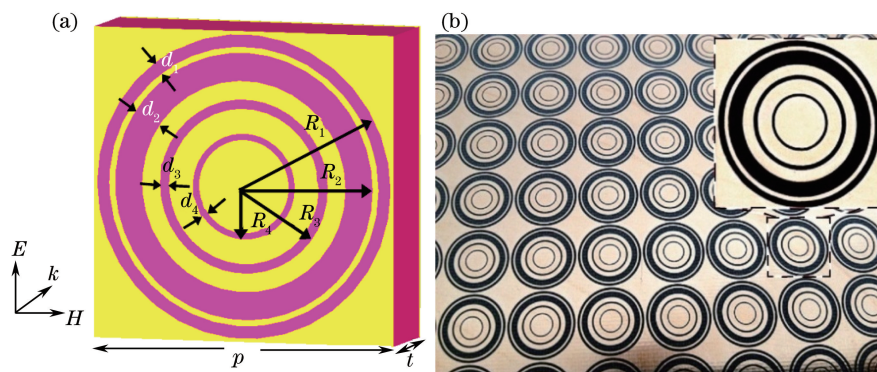


图 1 三波段超材料宽带带通滤波器。(a)结构模型及参数设置;(b)实验样品,插图为放大的结构单元  
Fig. 1 Triple-band metamaterial broadband bandpass filter. (a) Structure model and parameter setting; (b) experimental sample, the inset shows magnified structural unit

采用基于时域有限积分法的电磁仿真软件 CST Microwave Studio<sup>TM</sup>对图 1 中的滤波器结构单元进行参数优化,得到各项结构参数如下(单位为 mm): $R_1 = 4.9, R_2 = 4.3, R_3 = 2.8, R_4 = 1.7, d_1 = 0.4, d_2 = 0.9, d_3 = 0.3, d_4 = 0.2, t = 3, p = 10$ 。仿真得到的透射谱线如图 2(a)所示(实线),仿真结果表明该滤波器存在三个

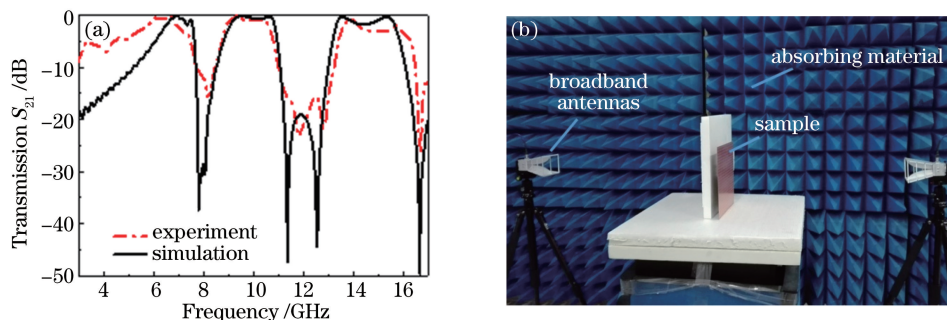


图 2 (a)仿真与实验得到的透射谱线;(b)实验装置图

Fig. 2 (a)Transmission spectra obtained by simulation and experiment, respectively; (b) experimental set-up

通带,中心频率分别为 7.22,10.10,14.46 GHz,3 dB 带宽分别为 1.26,2.04,2.52 GHz,相对带宽分别为 17.5%,20.2%和 17.4%,中心频率的传输效率分别为  $-0.85$  dB, $-0.69$  dB 和  $-1.73$  dB。

### 3 实验测试

为了验证多圆环嵌套结构的滤波特性,加工了样品并进行了实验测试。利用电路板刻蚀技术,在面积为  $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$  的 F4B 覆铜板的两面均刻蚀了 400 个单元结构,实物样品如图 1(b)所示。在微波暗室中,将样品放置于两个宽带双脊喇叭的正中间,两个喇叭分别连接到安捷伦矢量网络分析仪(5230D),作为发射源和接收器对样品进行测试。为了消除近场效应,喇叭和样品的距离保持在 1.5 m,这一距离大于消除近场效应所需的  $D^2/\lambda$  ( $D$  为天线的最大孔径),以保证远场的电磁波接近平面波。实验装置如图 2(b)所示,实验测得的透射谱线  $S_{21}$  如图 2(a)所示(虚线)。实验测得三个通带的中心频率分别为 6.93,9.95,14.43 GHz,3 dB 带宽分别为 1.18,1.92,2.48 GHz,相对带宽分别为 17.0%,19.3%和 17.2%。实验测试结果(虚线)与仿真结果(实线)吻合得比较好,证实了这种多圆环嵌套结构可以实现三波段宽带滤波。

进一步研究斜入射条件下滤波器三个通带随入射角的变化情况,结果如图 3 所示。图 3(a)为横向电场(TE)极化的电磁波入射角度依次为  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$  时透射谱线的仿真结果(其中  $0^\circ$  为垂直入射)。从图 3 中可以看到,对于不同的入射角,三个通带都有很好的滤波特性,在入射角为  $40^\circ$  时依然能够维持较高的透射率。实验测量时将中间样品旋转,测试其在不同角度电磁波入射下的透射谱线,实验结果如图 3(b)所示,结果表明当入射角度达到  $40^\circ$  时滤波器依然维持比较好的滤波特性。与仿真结果相比,三个通带没有发生明显的频移,只是通带的透射率有所下降。这是因为实际样品尺寸加工存在一定的误差以及所用材料的损耗与仿真参数设置有所区别。仿真和实验表明该滤波器结构具有良好的入射角稳定性,有利于在实际应用中发挥作用。

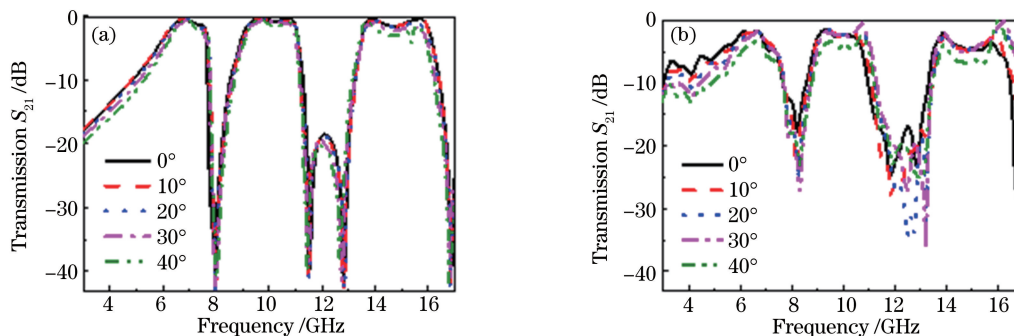


图 3 当 TE 极化的电磁波以不同入射角度入射时的透射谱线。(a)仿真结果;(b)实验结果

Fig. 3 Transmission spectra of electromagnetic wave at various incident angles for TE polarization. (a) Simulated result; (b) experimental result

### 4 滤波机理分析

为了直观地了解三个通带的形成机理,对滤波器结构进行了分离仿真的研究。将 MDM 结构拆分为以下三个子结构:第一波段透射结构(MDM-O),第二波段透射结构(MDM-M)和第三波段透射结构(MDM-I),结构模型如图 4(a)~(d)所示。分别仿真得到整体结构及各个子结构的透射谱,如图 4(e)所示,其中,黑色实线为整体结构的透射谱线,红色、绿色、蓝色虚线分别为 MDM-O,MDM-M,MDM-I 三个子结构的透射谱线。从图 4 可以看出,每个结构都可以作为一个独立的单波段带通滤波器,而且这三个单波段带通滤波器的组合正好实现了该三波段宽带带通滤波器,即 MDM-O 对应第一个通带,MDM-M 对应第二个通带,MDM-I 对应第三个通带。因此,可以通过优化各个子结构的滤波特性,然后将其组合以实现更多波段滤波的目的,这也为多波段滤波器的仿真设计与优化提供了一种便捷的思路。

图 5 为仿真得到的透射谱线  $S_{21}$ (实线)和反射谱线  $S_{11}$ (虚线)。可以看出,每个通带均包含两个显著的谐振频点,分别为  $f_{11}=6.91$  GHz, $f_{12}=7.54$  GHz, $f_{21}=9.54$  GHz, $f_{22}=10.66$  GHz, $f_{31}=13.55$  GHz, $f_{32} =$

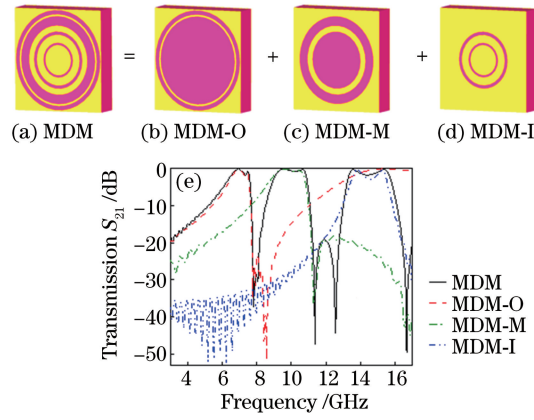


图 4 结构模型与透射谱线对比图。(a) MDM; (b) MDM-O; (c) MDM-M; (d) MDM-I; (e) 透射谱线

Fig. 4 Structural models and transmission spectra. (a) MDM; (b) MDM-O; (c) MDM-M; (d) MDM-I; (e) transmission spectra

15.36 GHz。为了进一步明确三波段宽带滤波的物理机制,监测了每一个谐振频率处的表面电流分布,如图 6 所示,(a)~(f)分别为  $f_{11} \sim f_{32}$  的表面电流分布图。如上述讨论,第一个通带由 MDM-O 结构产生。在图 6(a)中可以看出,每层中内环、外环电流流向方向相反,且上、下层电流流向模式一致,形成  $f_{11}$  处的束缚模式共振<sup>[18,21-22]</sup>。图 6(b)与(a)的形成机理相似,每层中内、外环上的电流流向方向相反,上、下两层的电流流向方向也相反,导致在稍高频率  $f_{12}$  处形成另一个束缚模式共振。 $f_{11}$  和  $f_{12}$  两种谐振模式的叠加形成了第一个通带。从表面电流分布的情况来看,第二、第三这两个通带形成的物理机理与第一通带相似,故不再赘述。

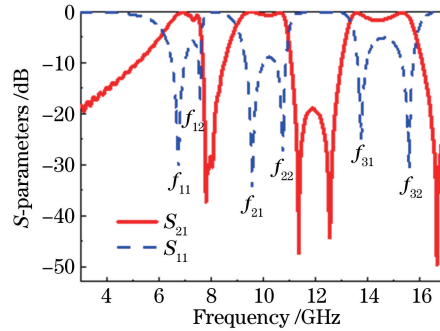


图 5 仿真得到的透射谱线(实线)和反射谱线(虚线)

Fig. 5 Transmission spectrum (solid line) and reflection spectrum (dash line) by simulation

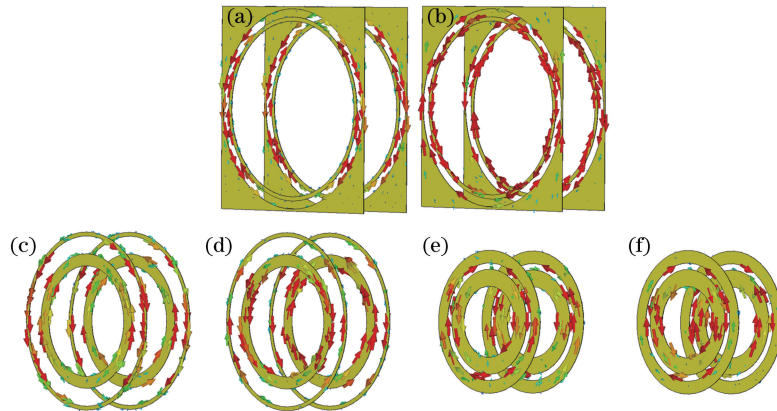


图 6 各谐振点的表面电流分布。(a)  $f_{11}$ ; (b)  $f_{12}$ ; (c)  $f_{21}$ ; (d)  $f_{22}$ ; (e)  $f_{31}$ ; (f)  $f_{32}$

Fig. 6 Surface current distributions at resonant points. (a)  $f_{11}$ ; (b)  $f_{12}$ ; (c)  $f_{21}$ ; (d)  $f_{22}$ ; (e)  $f_{31}$ ; (f)  $f_{32}$



## 5 结 论

研究了一种利用多圆环嵌套结构的三波段超材料宽带带通滤波器,实验和仿真结果吻合得比较好。由于结构单元具有旋转对称性,使得其对电磁波偏振模式不敏感。同时,研究发现当入射角度达到  $40^\circ$  时该滤波器依然保持良好的滤波特性。分离仿真结果表明,该滤波器可以优化单个子结构的滤波性能,然后采用不同数目子结构的组合,可以方便地实现单波段、双波段甚至更多波段宽带滤波的目的。这种结构紧凑、宽带、多波段、无偏振依赖性、大角度的超材料宽带带通滤波器有望在多频成像、信息通信等技术领域发挥重要的作用。

## 参 考 文 献

- [1] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [2] Mei Z L, Bai J, Cui T J. Gradient index metamaterials realized by drilling hole arrays[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(5): 055404.
- [3] Jin B B, Wu J B, Zhang C H, *et al.* Enhanced slow light in superconducting electromagnetically induced transparency metamaterials[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2013, 26(7): 074004.
- [4] Xu W, Sonkusale S. Microwave diode switchable metamaterial reflector/absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(3): 031902.
- [5] Han Hao, Wu Dongwei, Liu Jianjun, *et al.* A terahertz metamaterial analog of electromagnetically induced transparency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 423003.  
韩 昊, 吴东伟, 刘建军, 等. 一种太赫兹类电磁诱导透明超材料谐振器[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 423003.
- [6] Yang F, Mei Z L, Jin T Y, *et al.* DC electric invisibility cloak[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(5): 053902.
- [7] Huang L, Chowdhury D R, Ramani S, *et al.* Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 154-156.
- [8] Shen Xiaopeng, Cui Tiejun, Ye Jianxiang. Dual band metamaterial absorber in microwave regime[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 058101.  
沈晓鹏, 崔铁军, 叶建祥. 基于超材料的微波双波段吸收器[J]. *物理学报*, 2012, 61(5): 058101.
- [9] Sun Yaru, Shi Tonglu, Liu Jianjun, *et al.* Terahertz label-free bio-sensing with EIT-like metamaterials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 328001.  
孙雅茹, 史同璐, 刘建军, 等. 太赫兹超材料类 EIT 谐振无标记生物传感[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 328001.
- [10] Fu W, Han Y, Li J, *et al.* Polarization insensitive wide-angle triple-band metamaterial bandpass filter[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(28): 285110.
- [11] Zhu Y, Vegesna S, Zhao Y, *et al.* Tunable dual-band terahertz metamaterial bandpass filters[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2382-2384.
- [12] Lan F, Yang Z, Qi L, *et al.* Terahertz dual-resonance bandpass filter using bilayer reformative complementary metamaterial structures[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1709-1712.
- [13] Han B, Dong B, Nan J, *et al.* Tunable bandwidth of pass-band metamaterial filter based on coupling of localized surface plasmon resonance[J]. *Optical Materials*, 2015, 50: 162-166.
- [14] Khodae M, Banakermani M, Baghban H. GaN-based metamaterial terahertz bandpass filter design: tunability and ultra-broad passband attainment[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(29): 8617-8624.
- [15] Liang L, Jin B, Wu J, *et al.* A flexible wideband bandpass terahertz filter using multi-layer metamaterials[J]. *Applied Physics B*, 2013, 113(2): 285-290.
- [16] Zhou X, Yin X, Zhang T, *et al.* Ultrabroad terahertz bandpass filter by hyperbolic metamaterial waveguide[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11657-11664.
- [17] Han J G, Gu J Q, Lu X C, *et al.* Broadband resonant terahertz transmission in a composite metal-dielectric structure [J]. *Optics Express*, 2009, 17(19): 16527-16534.
- [18] 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.
- [19] Turkmen O, Ekmekci E, Turhan-Sayan G. Nested U-ring resonators: a novel multi-band metamaterial design in microwave region[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2012, 6(10): 1102-1108.
- [20] Bai Z Y, Zhang Q, Ju Y F, *et al.* Flexible metamaterial narrow-band-pass filter based on magnetic resonance coupling between ultra-thin bilayer frequency selective surfaces [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(6): 065002.
- [21] Papasimakis N, Fedotov V A, Zheludev N I. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(25): 253903.
- [22] Fedotov V A, Rose M, Prosvirnin S L, *et al.* Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(14): 147401.