

一种高选择性和小通带比的三通带三维频率选择表面

于正永^{1,2}, 陆华丽², 唐万春²

(1.江苏电子信息职业学院计算机与通信学院,江苏 淮安 223003)

(2.南京师范大学物理科学与技术学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 基于微波滤波器电路拓扑设计了一种具有高选择性和小通带比的三通带三维频率选择表面(3D FSS). 该 3D FSS 的单元结构由空气方波导和介质方块组合而成,且介质方块上下端面均刻蚀 3 个同心方环. 由于单元结构上下端面谐振单元之间的电磁耦合作用,原有单一的谐振模式耦合分裂为奇模和偶模两种模式,产生了多个传输零点,形成了 3 个二阶通带和 3 个二阶阻带,且频率选择性得到了大幅提升. 通过 3 个尺寸十分接近的方环设计,实现了小通带比. 为了弄清该 3D FSS 的工作原理,对传输极点处的表面电流分布进行了研究. 同时,探讨了所提出的 3D FSS 的加工和测量方法. 通过文献对比发现,该 3D FSS 具有高选择性、小通带比、良好的角度稳定性、双极化以及无栅瓣产生等优势.

[关键词] 频率选择表面,三通带,频率选择性,通带比,三维,双极化

[中图分类号] O59 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2021)02-0018-06

A Tri-bandpass Three-Dimensional Frequency Selective Surface with High Selectivity and Small Band Ratios

Yu Zhengyong^{1,2}, Lu Huali², Tang Wanchun²

(1.School of Computer and Communication, Jiangsu Vocational College of Electronics and Information, Huai'an 223003, China)

(2.School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: A tri-passband three-dimensional frequency selective surface (3D FSS) with high selectivity and small band ratios is designed based on the topology of the microwave filter. The unit cell of the proposed 3D FSS consists of an air-filled square waveguide and a cuboid dielectric block, and three concentric square loops are printed on both the top and bottom layers. Due to electromagnetic coupling between the resonant elements on both the top and bottom layers, original single resonant mode will split into even- or odd-resonant modes, multiple transmission zeros/poles are introduced, three second-order passbands and stopbands are achieved, and its frequency selectivity is greatly improved. Square loops with very close sizes are designed to realize small band ratios. To understand the working principle of the proposed 3D FSS, the surface current distributions at the frequencies of transmission poles are investigated. Meanwhile, the fabrication and measurement methods of the proposed 3D FSS prototype are discussed. According to the literature comparison, the proposed 3D FSS has the advantages in high selectivity, small band ratios, good angular stability, dual polarizations and no grating lobes.

Key words: frequency selective surface (FSS), tri-passband, frequency selectivity, band ratios, three-dimensional (3D), dual polarizations

频率选择表面(frequency selective surface, FSS)可以应用于天线罩^[1]、天线副反射器^[2]、吸波体^[3]以及电磁屏蔽^[4]等领域. 与传统的滤波器相比^[5-7], FSS 是一种由具有特定形状的周期单元组成的二维阵列结

收稿日期:2020-09-24.

基金项目:江苏电子信息职业学院博士工作室资助项目、江苏高校“青蓝工程”(苏教师函[2020]10号)、射频集成电路与系统创新团队(JSEIYC2020002)、江苏省“333工程”科研资助项目(BRA2018315)、江苏省高等学校自然科学基金项目(19KJB510002)、江苏省“333高层次人才培养工程”培养对象(苏人才办[2018]26号)、国家自然科学基金面上项目(61571232)、淮安市软件测试技术重点实验室(HAP201904).

通讯作者:于正永,工学博士,副教授、高级工程师,研究方向:电磁理论与数值分析、频率选择表面设计、天线设计等. E-mail: yongly@sina.com

构,具有独特的空间滤波特性,可以实现带通或带阻滤波性能.在卫星通信系统中,为了增加多频天线的通信能力,要求 FSS 能够工作在相应的多个频段.同时,当 3 个通信通道工作在相近的频率时,此时需要设计具有小通带比的三通带 FSS.

为了满足上述的应用需求,一些三通带 FSS 被研究人员提出.通过集总元件加载^[8]、盘绕结构^[9]和互补结构^[10]等方式,提出了 3 种相似频率响应的三通带 FSS.但是,这 3 种 FSS 每个通带均为一阶响应,由于缺少传输零极点,存在通带不够平坦和带外抑制宽度较窄等不足.通过堆叠三层方环阵列,设计了一种具有高选择性和良好角度稳定性的三通带 FSS^[11].最近,研究人员通过将文献[11]中的方环替换为六边形环,拓宽了第二通带的工作带宽,降低了带内的插入损耗^[12].但是,这两种 FSS^[11-12]的第一通带仍为一阶响应;同时随着入射角度的增加,在高频段均出现了栅瓣效应.作为一种替换的方法,三维(three-dimensional, 3D)FSS 的概念被提出^[13-15].其中,文献[13]基于阶梯阻抗和均匀阻抗两种谐振结构,采用多层印刷电路板(printed circuit board, PCB)技术实现了一种具有二阶响应的三通带 FSS,但是,该 3D FSS 仅能够工作在单极化模式,而且带外没有任何传输零点,其频率选择性能一般.通过上下两层加载不同大小的圆形金属贴片,中间层加载圆形孔径,借助孔径电磁耦合,实现了一种双极化、二阶三通带 FSS^[16],不过,其带外也未引入任何传输零点,其频率选择性能需要进一步提升,同时由于单元结构的电尺寸很大,导致了其角度稳定性较差.此外,以上文献所提出的三通带 FSS 相邻通带的通带比多数较大,在一定程度上限制了其实际应用.

本文基于微波滤波器等效电路拓扑,设计了一种高选择性、小通带比的三通带 3D FSS.由于该 3D FSS 单元结构具有对称性,因此,很容易实现双极化功能.当以 0°、30°和 60°角度入射时,该 3D FSS 具有稳定的频率响应.

1 FSS 单元设计与仿真

1.1 微波滤波器等效电路拓扑

图 1 给出了一阶三通带微波滤波器的等效电路拓扑,该拓扑由电感 L_0 与三个并联的 $LC(L_1-C_1, L_2-C_2, L_3-C_3)$ 串联谐振器组成.

当电感 L_0 与 L_1-C_1 串联谐振器同时谐振时,会产生 1 个传输零点 f_{z1} 和一个传输极点 $f_{p1}(f_{z1} > f_{p1})$.如下:

$$f_{z1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}, \quad (1)$$

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1(L_0 + L_1)}}. \quad (2)$$

当 L_2-C_2 串联谐振器发生谐振时,可以产生第二个传输零点 $f_{z2}(f_{z2} > f_{z1})$.根据文献[17]可知,两个相邻 LC 串联支路的并联会在两个传输零点之间产生 1 个传输极点,由此产生了第二个传输极点 $f_{p2}(f_{z1} < f_{p2} < f_{z2})$.如下:

$$f_{z2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}, \quad (3)$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 (L_1 + L_2)}}. \quad (4)$$

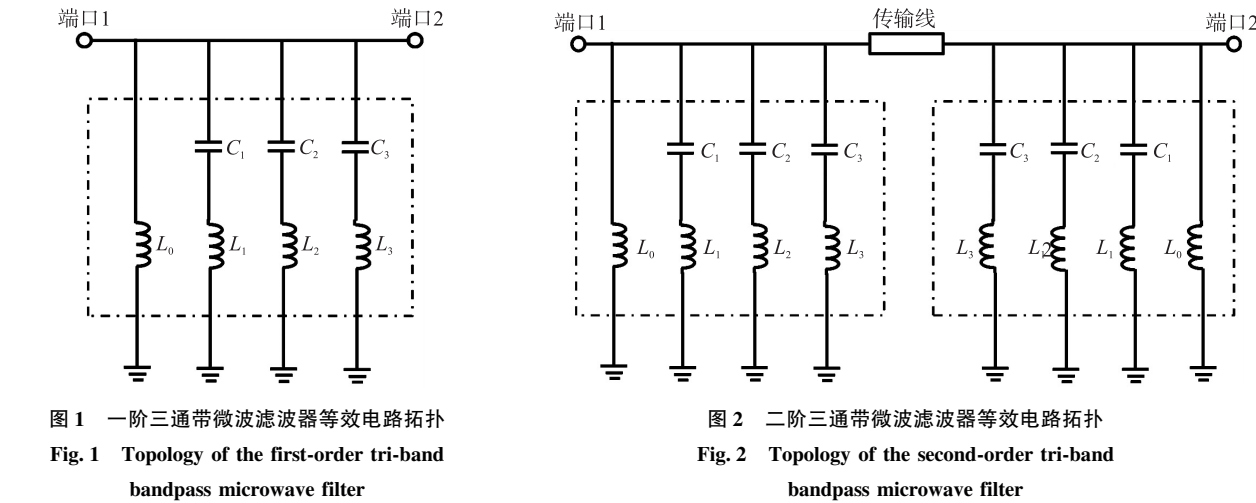
同理,当 L_3-C_3 串联谐振器发生谐振时,可以产生第三个传输零点 $f_{z3}(f_{z3} > f_{z2})$ 和第三个传输极点 $f_{p3}(f_{z2} < f_{p3} < f_{z3})$,分别如下:

$$f_{z3} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_3 C_3}}, \quad (5)$$

$$f_{p3} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_2 C_3 (L_2 + L_3)}}. \quad (6)$$

综上所述,当图 1 中所有谐振器同时工作时,可以在 f_{p1} 、 f_{p2} 、 f_{p3} 附近产生了 3 个通带,同时在 f_{z1} 、 f_{z2} 、

f_{z3} 附近产生了 3 个阻带. 但是,可以发现,每个通带仅包含 1 个传输极点,每个阻带仅包含 1 个传输零点,因此,很难形成平坦的通带和较宽的带外抑制. 针对这个问题,将图 1 的电路拓扑进行了双层堆叠,并使用传输线进行连接,构建二阶三通带微波滤波器等效电路拓扑,如图 2 所示. 此时,在电磁耦合作用下,原有单一的谐振模式(f_{p1} 、 f_{p2} 、 f_{p3} 、 f_{z1} 、 f_{z2} 、 f_{z3})耦合分裂为奇模和偶模两种模式,因此,该拓扑能实现 3 个二阶通带和 3 个二阶的阻带.



1.2 周期单元结构与滤波响应

众所周知,FSS 本质上是一种空间微波滤波器,因此,图 2 所示的二阶三通带微波滤波器等效电路拓扑可以用来设计二阶三通带 FSS. 依据文献[18–19]中等效电路分析可知,栅格结构可以等效为电感,方环阵列可以等效为 LC 串联谐振器,传输线用方波导传输线来代替,因此,得到了所设计的二阶三通带 3D FSS 的单元结构示意图如图 3 所示. 由图 3 可知,每个单元结构由 1 个空气方波导和 1 个上下端面均刻蚀 3 个同心方环的介质方块组合而成. 单元结构在 x 和 y 轴方向上周期尺寸均为 p ,栅格的宽度为 t ,从外到内 3 个方环的内边长和线宽分别为 l_1 和 w_1 、 l_2 和 w_2 、 l_3 和 w_3 ,FSS 的厚度为 h . 此外,介质方块的相对介电常数为 ϵ_r .

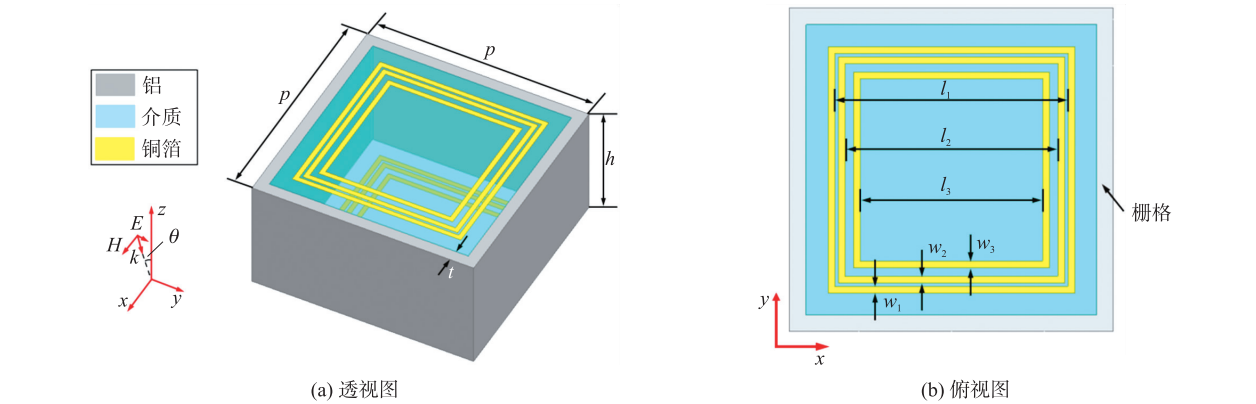


图 3 三通带 3D FSS 单元结构

Fig. 3 Unit cell of tri-passband 3D FSS

针对高选择性、小通带比、低插入损耗等 FSS 指标的设计目标,FSS 相应的物理尺寸可以通过多次优化设计后得到,如表 1 所示. 在此基础上,可以运用文献[18–19]中相关公式计算图 2 中各个电参数,但是由于单元结构中存在的电磁耦合较为复杂,因此,这些计算公式并不能给出电参数的准确值,只能给出电参数的初始值,电参数的最终值可以通过曲线拟合方法获得^[20].

表 1 三通带 3D FSS 的设计参数

Table 1 Design parameters of tri-passband 3D FSS

l_1	l_2	l_3	w_1	w_2	w_3	p	h	t	ϵ_r
6.9 mm	6.3 mm	5.4 mm	0.2 mm	0.2 mm	0.2 mm	9.6 mm	5.0 mm	0.5 mm	4.4

图4给出了设计参数如表1所示的三通带3D FSS的传输系数和反射系数的HFSS软件仿真结果. 由图可以看出,该3D FSS在 $f_1 = 6.03$ GHz, $f_2 = 6.82$ GHz, $f_3 = 7.845$ GHz中心频率处实现了3个二阶平坦通带,其中,第一通带包含6.1 GHz和6.16 GHz两个传输极点,第二通带包含6.79 GHz和6.87 GHz两个传输极点,第三通带包含7.71 GHz和7.98 GHz两个传输极点. 同时,在第一通带与第二通带之间引入了6.46 GHz和6.5 GHz两个传输零点,在第二通带与第三通带之间引入了7.09 GHz和7.21 GHz两个传输零点,此外在第三通带右侧带外引入了8.71 GHz和10.11 GHz两个传输零点,使得该FSS具有较好的频率选择性能. 此外,由于方波导腔的高 Q 值,其频率选择性能得到了进一步提高. 在第三通带右侧得到了1个工作带宽约为43%的宽阻带. 该FSS 3个通带的3dB带宽分别为0.5 GHz(5.78~6.28 GHz)、0.2 GHz(6.72~6.92 GHz)和0.51 GHz(7.59~8.1 GHz),对应的相对带宽分别为8.29%、3.32%和8.46%. 该3D FSS单元结构的电尺寸为 $0.19\lambda_0 \times 0.19\lambda_0 \times 0.1\lambda_0$,其中 λ_0 为第一通带中心频率 f_1 处自由空间波长. 由于3个尺寸十分接近的同心方环设计,使得该3D FSS相邻通带之间的间距很小,第二通带与第一通带、第三通带与第二通带之间的通带比分别仅为 $f_2/f_1 = 1.13$ 和 $f_3/f_2 = 1.15$.

1.3 传输极点处的表面电流分布

为了进一步弄清该3D FSS的工作原理,对传输极点处的表面电流分布进行了研究,如图5所示. 由图5(a)和5(b)可以看出,传输极点 f_{p1} 和 f_{p2} 处的表面电流主要分布在上下端面的最外层方环和栅格上,这表明 f_{p1} 和 f_{p2} 是由最外层方环和栅格共同影响的. 由图5(c)和5(d)可知,传输极点 f_{p3} 和 f_{p4} 的表面电流主要集中在上下端面的最外层方环和中间层方环上,这表明 f_{p3} 和 f_{p4} 是由这两个方环共同产生的. 如图5(e)和5(f)所示,传输极点 f_{p5} 和 f_{p6} 的表面电流主要分布在上下端面的中间层方环和最内层方环上,这表明 f_{p5} 和 f_{p6} 是由这两个方环共同提供的. 很显然,以上所得的分析结果与上述等效电路拓扑的传输极点产生机理是一致的.

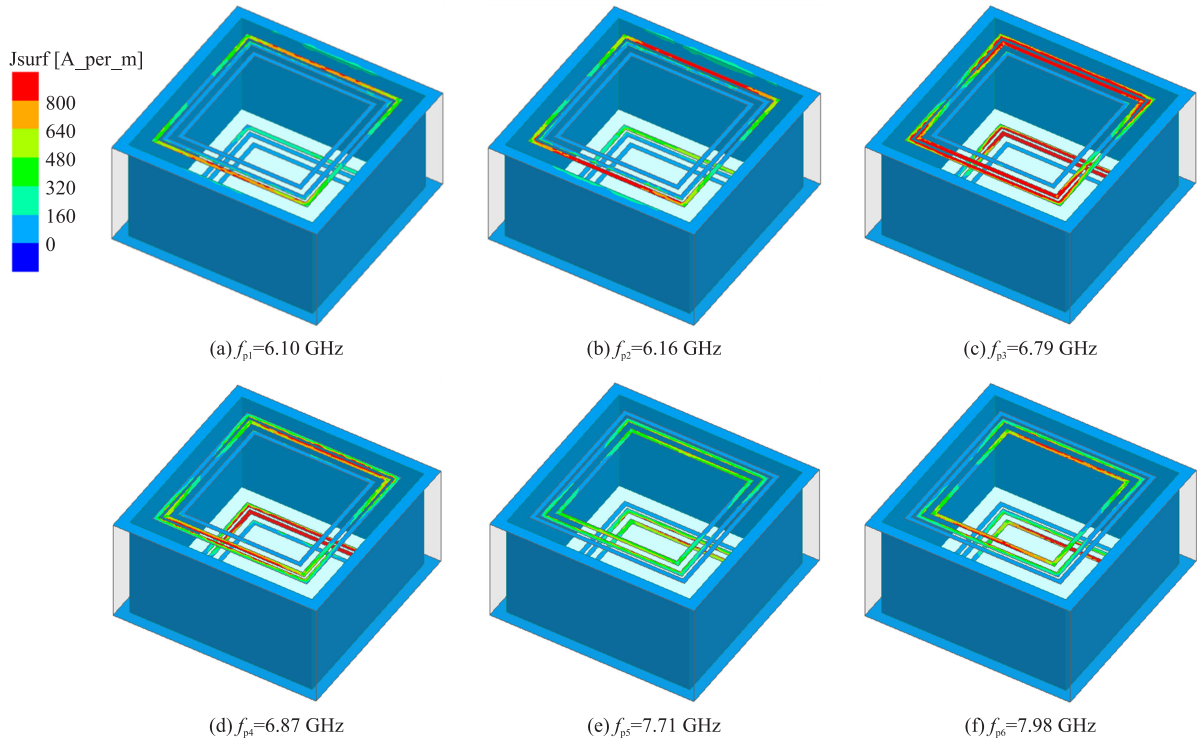


图5 传输极点处的表面电流分布

Fig. 5 Surface current distributions at transmission-pole frequencies

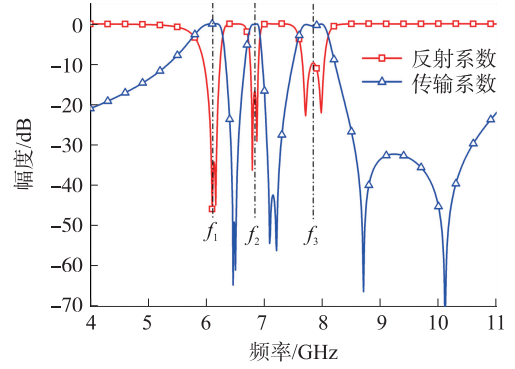


图4 三通带3D FSS传输系数和反射系数的HFSS软件仿真结果

Fig. 4 Simulated transmission and reflection coefficients of tri-passband 3D FSS by HFSS

2 FSS 极化独立性和角度稳定性

由于所设计的三通带 3D FSS 结构具有对称性,因此,该 FSS 可以实现双极化. 图 6 给出了该 FSS 在 TE 和 TM 两种极化模式下的频率响应,由图可以看出,在这两种极化模式下该 FSS 具有相同的频率响应,这充分说明该 FSS 具有双极化性能.

运用 HFSS 软件仿真得到了该 3D FSS 在不同极化模式和不同入射角度条件下的传输系数,如图 7 所示. 由图 7 可以发现,该 FSS 在 TE 和 TM 极化模式下以 0°,30°,60°角度入射时具有稳定的频率响应. 如图 7(a)所示,对于 TE 极化模式,随着入射角度的增加,3 个通带内的插入损耗随之增加,主要原因在于当入射角 θ 增大时,其端口的波阻抗 $Z_{TE}=Z_0/\cos\theta^{[21]}$ 将会随之增大. 此外,通常一个较大的波阻抗将会导致该 FSS 内的谐振器具有较高的品质因数,从而使得通带的带宽在 TE 极化工作模式下减小. 如图 7(b)所示,对于 TM 极化模式,当入射角 θ 增大时,其端口的波阻抗 $Z_{TM}=Z_0\cos\theta^{[21]}$ 将会随之减小,将会导致该 FSS 内的谐振器具有较低的品质因数,从而使得通带的带宽增大. 也可以看出,在 TM 极化模式下,通带的插入损耗受入射角度变化的影响不大.

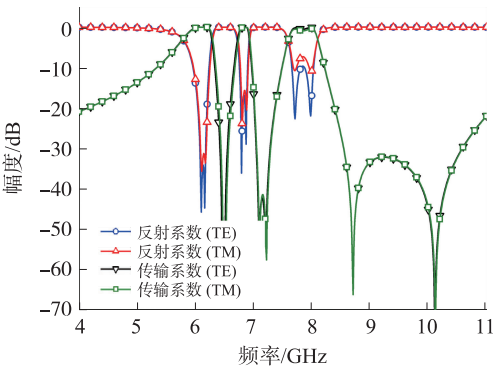


图 6 TE 和 TM 两种极化模式下该 3D FSS 的频率响应
Fig. 6 Frequency responses of the 3D FSS under TE and TM polarization modes

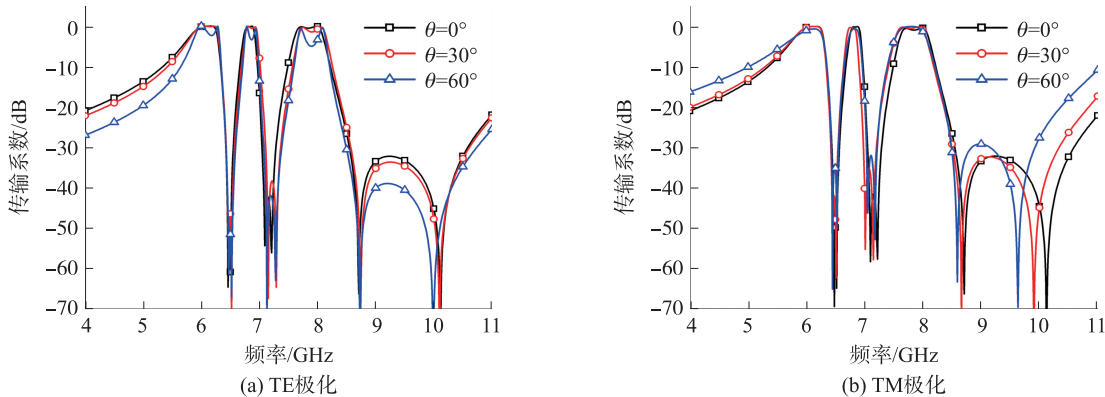


图 7 不同入射角度下该 3D FSS 传输系数仿真结果
Fig. 7 Simulated transmission coefficients of 3D FSS under oblique incidence for (a) TE polarization; (b) TM polarization

3 实物加工和测量方法

所提出的 3D FSS 实物可以通过机械加工线切割和 PCB 两种方法来实现. 以 4×4 (16 个) 周期单元 3D FSS 为例,其部件加工和组装的步骤如图 8 所示,具体来说:(1)采用线切割方法加工厚度为 $2t=1\text{ mm}$ 的长条型铝板,并在其表面周期性地开凿 5 个矩形方槽(宽度为 $2t=1\text{ mm}$,高度为 $h/2=2.5\text{ mm}$),从而形成

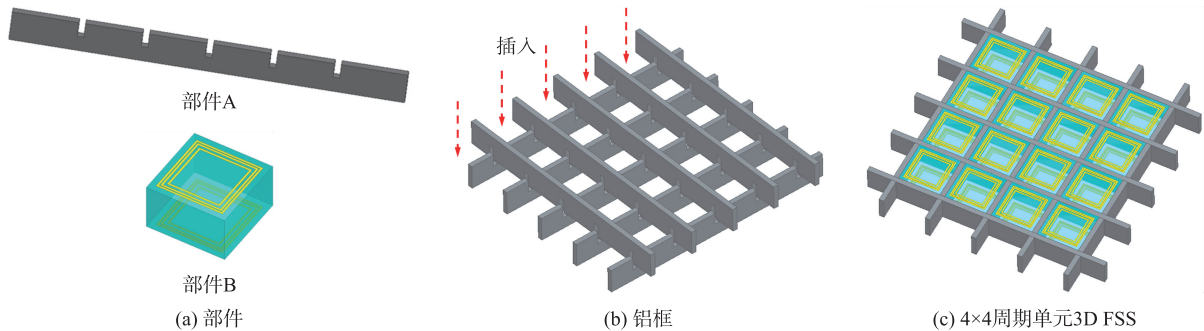


图 8 FSS 实物加工及组装
Fig. 8 Fabrication and assembly of the FSS prototype

部件 A;采用印刷电路 PCB 加工方法制作上下端面均刻蚀 3 个同心方环的介质方块,从而形成部件 B. 如图 8(a)所示. (2)将 10 个部件 A 通过交叉对插方式构成一个铝框,形成 16 个周期性的空气方波导结构,如图 8(b)所示. (3)将 16 个部件 B 逐一插入到铝框的 16 个方波导结构中,最终组合为所提出的 3D FSS 实物,如图 8(c)所示. 通常运用自由空间测量法^[22]对所制作的 3D FSS 实物进行实验测试. 首先测试出未放置 FSS 情况下的传输系数,以便去除传输损耗带来的影响,其次测试出放置 FSS 情况下的传输系数,然后再测试出 FSS 替换为相同尺寸的金属板时的传输系数,以便去除周围环境噪声带来的影响,最后,运用矢量网络分析仪的时域门函数对测量结果进行校准,以便考虑多路径传输带来的影响.

4 结果与讨论

表 2 给出了所提出的 3D FSS 与现有相似特性的 FSS 的性能对比. 从表不难看出,所提出的 3D FSS 具有高选择性、小通带比、良好的角度稳定性、双极化以及无栅瓣产生等优势.

表 2 与现有相似特性的 FSS 的对比

Table 2 Comparison of the FSS designs with similar characteristic

文献	单元尺寸和厚度	通带比 ($f_2/f_1, f_3/f_2$)	极点/零点 数量	极化方式	角度稳定性 (TE/TM)	是否存在 栅瓣
[5]	$0.087\lambda_0 \times 0.087\lambda_0 \times 0.005\lambda_0$	1.15, 1.34	3/2	双极化	$45^\circ/45^\circ$	否
[6]	$0.066\lambda_0 \times 0.066\lambda_0 \times 0.005\lambda_0$	1.28, 1.29	3/3	双极化	$60^\circ/60^\circ$	是
[7]	$0.121\lambda_0 \times 0.121\lambda_0 \times 0.009\lambda_0$	1.36, 1.2	3/2	双极化	$30^\circ/30^\circ$	否
[8]	$0.125\lambda_0 \times 0.125\lambda_0 \times 0.05\lambda_0$	1.66, 1.48	5/4	双极化	$60^\circ/60^\circ$	是
[9]	$0.173\lambda_0 \times 0.15\lambda_0 \times 0.032\lambda_0$	1.55, 1.5	5/4	双极化	$60^\circ/60^\circ$	是
[10]	$0.1\lambda_0 \times 0.08\lambda_0 \times 0.09\lambda_0$	1.7, 1.66	6/0	单极化	45°	否
[13]	$0.62\lambda_0 \times 0.62\lambda_0 \times 0.037\lambda_0$	1.21, 1.2	6/0	双极化	$30^\circ/30^\circ$	否
本文	$0.19\lambda_0 \times 0.19\lambda_0 \times 0.1\lambda_0$	1.13, 1.15	6/6	双极化	$60^\circ/60^\circ$	否

5 结论

从微波滤波器等效电路拓扑出发,提出了 1 种 FSS 设计方法,由此实现了 1 种具有高选择性和小通带比的二阶三通带 3D FSS. 借助上下端面谐振单元之间的电磁耦合,引入了多个传输零极点,提高了其频率选择性能,同时,方波导腔的高 Q 值进一步增强了频率选择性能. 通过 3 个尺寸十分接近的方环设计,实现了相邻通带之间的小通带比设计. 通过分析传输极点处的表面电流分布,阐明了该 FSS 的工作原理. 同时,阐述了所提出的 3D FSS 实物的加工和测量方法. 仿真结果表明:该 3D FSS 具有高选择性、小通带比、良好的角度稳定性、双极化以及无栅瓣产生等优势.

[参考文献]

- [1] OMAR A A, SHEN Z. Thin 3-D bandpass frequency-selective structure based on folded substrate for conformal radome applications[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2019, 67(1): 282–290.
- [2] CHAHARMIR M R, SHAKER J. Design of a multilayer X-/Ka-band frequency-selective surface-backed reflectarray for satellite applications[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63(4): 1255–1262.
- [3] OMAR A A, SHEN Z. Double-sided parallel-strip line resonator for dual-polarized 3-D frequency-selective structure and absorber[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2017, 65(10): 3744–3752.
- [4] LI D, LI T, LI E, et al. A 2.5-D angularly stable frequency selective surface using via-based structure for 5G EMI shielding[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2018, 60(3): 768–775.
- [5] 李举鹏. 具有光隔离功能的光纤梳状滤波器的理论分析[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(3): 101–104.
- [6] 于正永. 带状线 SIR 带通滤波器的等效电路分析方法[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(6): 90–92.
- [7] 于正永, 唐万春. 一种新颖的高低阻抗带状线低通滤波器分析方法[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(3): 90–94.
- [8] 许戎戎. 基于集总元件加载和分形结构的多频频率选择表面研究[D]. 南京理工大学, 2009: 69–72.
- [9] LIU N, SHENG X, ZHANG C, et al. A miniaturized triband frequency selective surface based on convoluted design[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2017, 16: 2384–2387.

(下转第 29 页)

- neural tissue engineering[J]. *Biomaterials*,2020,255:120164.
- [11] FINI M,MOTTA A,TORRICELLI P,et al. The healing of confined critical size cancellous defects in the presence of silk fibroin hydrogel[J]. *Biomaterials*,2005,26:3527–3536.
- [12] XU H L,CHEN P P,Zhuge D L,et al. Liposomes with silk fibroin hydrogel core to stabilize bfgf and promote the wound healing of mice with deep second-degree scald[J]. *Advanced healthcare materials*,2017,6(19):1700344.
- [13] LEE C,WEI X D,KYSAR J W,et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. *Science*,2008,321(5887):385–388.
- [14] BANO S,MAHMOOD A,KIM S J,et al. Graphene oxide modified polyamide nanofiltration membrane with improved flux and antifouling properties[J]. *Journal of materials chemistry A*,2015,3(5):1–1.
- [15] WANG J,CHENG Y,CHEN L,et al. In vitro and in vivo studies of electroactive reduced graphene oxide-modified nanofiber scaffolds for peripheral nerve regeneration[J]. *Acta biomaterialia*,2019,84:98–113.
- [16] XU M,ZHU J Q,WANG F F,et al. Improved in vitro and in vivo biocompatibility of graphene oxide through surface modification:poly(acrylic acid)-functionalization is superior to PEGylation[J]. *ACS nano*,2016,10:3267–3281.
- [17] IBRAHIM M M,PATEL P S,WU Z J,et al. Detection of flap tissue ischemia in a rat model:real-time monitoring of changes in oxygenation and perfusion through injectable biosensors[J]. *Surgery*,2020,168(5):926–934.
- [18] ZHANG X,YANG R,WANG C,et al. Cell biocompatibility of functionalized graphene oxide[J]. *Acta physico-chimica sinica*,2012,28:1520–1524.

[责任编辑:顾晓天]

(上接第 23 页)

- [10] LI H,CAO Q. Design and analysis of a controllable miniaturized tri-band frequency selective surface[J]. *Progress in electromagnetics research letters*,2015,52:105–112.
- [11] YAN M,WANG J,MA H,et al. A tri-band,highly selective,bandpass FSS using cascaded multilayer loop arrays[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*,2016,64(5):2046–2049.
- [12] YU Q,LIU S B,KONG X K,et al. A broadband miniaturized ultra-thin tri-band bandpass FSS with triangular layout[J]. *International journal of RF and microwave computer-aided engineering*,2019,29:e21738.
- [13] TAO K,LI B,TANG Y,et al. Multi-layer tri-band frequency selective surface using stepped- and uniform-impedance resonators[J]. *Electronics letters*,2016,52(8):583–585.
- [14] RASHID A K,LI B,SHEN Z. An overview of three-dimensional frequency-selective structures[J]. *IEEE antennas and propagation magazine*,2014,56(3):43–67.
- [15] RASHID A K,SHEN Z,LI B. An elliptical bandpass frequency selective structure based on microstrip lines[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*,2012,60(10):4661–4669.
- [16] ZHOU H,QU S,XU Z,et al. A triband second-order frequency selective surface[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*,2011,10:507–509.
- [17] LI B,SHEN Z. Synthesis of quasi-elliptic bandpass frequency-selective surface using cascaded loop arrays[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*,2013,61(6):3053–3059.
- [18] LANGLEY R J,PARKER E A. Double-square frequency-selective surfaces and their equivalent circuit[J]. *Electronics letters*,1983,19(17):675–677.
- [19] FERREIRA D,CALDEIRINHA R F S,CUIÑAS I,et al. Square loop and slot frequency selective surfaces study for equivalent circuit model optimization[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*,2015,63(9):3947–3955.
- [20] WANG D,CHE W,CHANG Y,et al. A low-profile frequency selective surface with controllable tri-band characteristics[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*,2013,12:468–471.
- [21] AL-JOUMAYLY M A,BEHDAD N. Low-profile,highly-selective,dual-band frequency selective surfaces with closely spaced bands of operation[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*,2010,58(12):4042–4050.
- [22] YU Z,TANG W,YANG X,et al. Dual-bandpass 3-D FSS with close band spacing based on multiple square coaxial waveguides[J]. *IEICE electronics express*,2019,16(15):20190374.

[责任编辑:顾晓天]