

文章编号 1004-924X(2018)01-0142-08

## 低频带通与带阻自由切换的频率选择表面

徐 阳<sup>1,2</sup>, 高劲松<sup>1,2\*</sup>, 徐念喜<sup>1</sup>, 单冬至<sup>1</sup>, 宋乃涛<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所  
中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**为了在不同时域下获得兼具带通与带阻空间滤波功能的低频频率选择表面(FSS),提出了一种带通与带阻型 FSS 可自由切换的设计方法,即在基于卷曲技术设计的小型化 FSS 表面上贴装电控 PIN 二极管,并利用“场-路”协同仿真的方法进行建模与计算。其中,卷曲图案既是滤波结构,也是馈电导线。当 PIN 二极管导通时,卷曲图案缝隙处产生的电容  $C_1$  与金属贴片电感  $L_1$  构成并联 LC 回路,FSS 表现为带通滤波功能;反之,焊盘处缝隙及反偏 PIN 二极管产生的电容  $C_2$  与金属贴片电感  $L_2$  串联,FSS 切换为带阻滤波功能。采用印刷线路板及表面贴装工艺制作出了  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$  试验样件并采用自由空间法进行测试,仿真与测试结果表明:在  $2.45\text{ GHz}$  处,当 PIN 二极管导通时,FSS 表现为强透射性能,反之则表现出强反射效果。这种基于电控 PIN 二极管开关所实现的带通与带阻型 FSS 自由切换方法在通信、电磁屏蔽及雷达隐身等领域具有广阔的应用前景。

**关键词:**频率选择表面;“场-路”协同仿真;PIN 二极管;电桥网络

**中图分类号:** TN957; TN761 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182601.0142

## A frequency-selective surface structure arbitrarily switched between band-pass and band-stop responses at low frequency

XU Yang<sup>1,2</sup>, GAO Jin-song<sup>1,2\*</sup>, XU Nian-xi<sup>1</sup>, SHAN Dong-zhi<sup>1</sup>, SONG Nai-tao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,  
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

\* Corresponding author, E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

**Abstract:** To obtain a frequency-selective surface (FSS) structure with band-pass and band-stop spatial filtering functions at low frequency in different time domains, a design method for switching between band-pass and band-stop responses of the FSS was proposed. It was consisted of mounting PIN diodes on the miniaturized FSS, which was designed based on a convolution technique, and utilizing EM/Circuit Co-Simulation for calculations and analysis. It was noteworthy that the convoluted pattern was not only the filtering structure, but also serves as the feeder. When PIN diodes were in the ON-state, the parallel LC circuit constituted by the inductance  $L_1$  of the metallic

收稿日期:2016-10-25;修订日期:2016-11-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目((No. 61401424, No. 11604329))

patches and the capacitance  $C_1$  of the pattern slots represents the band-pass performance of the FSS. Conversely, the total capacitance  $C_2$  of the reversed PIN diodes and the gap between the pads in series with the inductance  $L_2$  of the metallic patches indicate the occurrence of band-stop performance for the FSS when the PIN diodes are in the OFF-state. Using a printed circuit board and surface mounting technology, a prototype of 400 mm $\times$ 400 mm was fabricated and measured by the free space method. The simulation and test results indicate that, for a frequency of 2.45 GHz, the FSS exhibits strong transmission when the PIN diodes are in the ON-state, whereas a strong reflection is obtained when the PIN diodes are in the OFF-state. With this method, arbitrary switching of the FSS between band-pass and band-stop responses is realized, based on electrically controlled PIN diodes, which has a broad range of prospective applications in the fields of telecommunication, electromagnetic shielding, and radar stealth.

**Key words:** frequency selective surface; EM/Circuit Co-Simulation; PIN diode; bridge network

## 1 引 言

频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, FSS)是由金属屏上周期性的开孔单元(孔径型或带通型)或介质基底上周期性的金属贴片单元(贴片型或带阻型)构成的一种二维周期阵列结构。当 FSS 图案谐振尺寸与工作波长一致时,贴片型 FSS 呈现反射,孔径型 FSS 呈现透射,其作为一种空间滤波器被广泛应用于通信、电磁屏蔽及雷达隐身领域<sup>[1-7]</sup>。

由于传统无源 FSS 对入射电磁波的透射与反射无法调控,限制了其在智能天线设计、可调控电磁屏蔽、多模复合制导隐身雷达罩等领域的应用。此外,谐振图案与工作波长一致的 FSS 滤波原理,导致 L 波段、S 波段等低频 FSS 单元尺寸较大,从而降低了其电磁性能指标。有源 FSS(又称主动 FSS 或可调谐 FSS)可以通过施加电信号、磁信号和光信号等对周期阵列表面阻抗进行调节,进而自由控制入射电磁波的透射与反射。有源 FSS 存在多种技术实现方法,例如,使用铁氧体材料<sup>[8]</sup>和液晶材料<sup>[9]</sup>等电可调谐材料充当 FSS 介质,在 FSS 表面贴装 PIN 二极管<sup>[10-12]</sup>、变容二极管<sup>[13-15]</sup>或 MEMS 等开关元件<sup>[16-17]</sup>,有源 FSS 光控技术<sup>[18]</sup>,以及通过物理操作改变 FSS 图案尺寸<sup>[19]</sup>等。PIN 二极管可以在高频频段呈开通和截止的两种不同状态,因此 PIN 二极管常常被用作微波频段的开关使用。由于 PIN 二极管发展较为成熟,成品器件的选择很多,本文利用 PIN 二极管的开关特性来实现带通与带阻型 FSS 的自由切换。另外,为实现 FSS 图案小型化提高

低频 FSS 电磁响应性能指标,对比目前存在的两种小型化 FSS 技术:电容性表面-耦合介质-电感性表面级联方法<sup>[20]</sup>与基于卷曲技术的 FSS 设计方法<sup>[21]</sup>,综合考虑 PIN 二极管的馈电网络以及制作工艺的复杂程度,本文采用卷曲技术来设计小型化 FSS。

在确定基于卷曲技术设计小型化 FSS,并通过表面贴装电控 PIN 二极管的方法来实现带通与带阻型 FSS 自由切换后,本文采用“场-路”协同仿真方法研究了滤波结构、电控 PIN 二极管与馈电网络的一体化建模,并数值分析了其对入射电磁波透射与反射的调控,研究了其工作时的物理机理,最后,采用印刷线路板及表面贴装工艺制作出了 400 mm $\times$ 400 mm 试验样件并采用自由空间法进行测试,测试与仿真结果均表明:在工作频点处,当 PIN 二极管导通时 FSS 表现出强透射性能;反之则表现为强反射效果,从而实现了基于电控的带通与带阻型 FSS 的自由切换。

## 2 建模与分析

为了在不同时域下获得兼具带通与带阻空间滤波功能的低频 FSS,本文提出了一种带通与带阻型 FSS 可自由切换的设计方法:第一步,利用卷曲技术设计小型化 FSS;第二步,利用“场-路”协同仿真的方法对滤波结构、电控 PIN 二极管与馈电网络进行一体化建模;第三步,采用“场-路”协同仿真的方法对表面贴装电控 PIN 二极管的 FSS 进行数值分析计算。

以无线局域网手机通信频段 2.45 GHz 为例,根据谐振图案尺寸与工作波长一致的 FSS 工

作原理,在频率 2.45 GHz(波长 122 mm)处实现带通与带阻型 FSS 的自由切换,谐振图案尺寸约为 120 mm,此类 FSS 既不适合在有限大小的空间里应用,也难以获得良好的工作带宽、插入损耗等性能指标。J. B. Pendry、D. R. Smith 等提出,当晶格尺寸小于  $0.25\lambda$  时,晶格点阵可以等效为一种均匀介质材料<sup>[22]</sup>。此时的 FSS 既拓宽了工作带宽也增强了二次辐射的能力,同时还提高了等效 LC 参数的准确性与精度。依据上述结论,本文采用卷曲技术对方环形 FSS 图案卷曲 3 次后获得图 1 所示的小型化 FSS 图案。

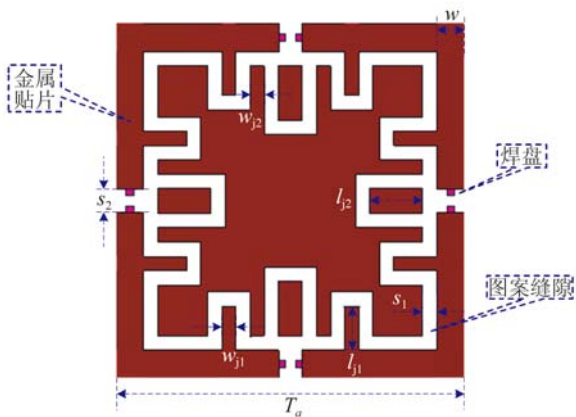


图 1 利用卷曲技术设计的一种小型化 FSS 图案  
Fig. 1 Miniaturized FSS pattern designed based on convolution technique

小型化 FSS 图案几何特征尺寸包括图案缝隙  $s_1$ 、焊盘处缝隙  $s_2$ 、金属贴片宽度  $w$ 、卷曲的金属线宽  $w_{j1}$ 、 $w_{j2}$  和金属线长  $l_{j1}$ 、 $l_{j2}$  以及方环边长  $T_a$ ，焊盘处缝隙是为 PIN 二极管预留设置,焊盘大小则由 PIN 二极管的封装尺寸决定。

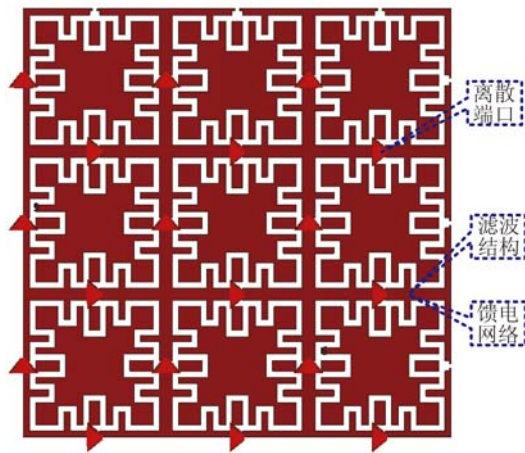


图 2 3×3 滤波结构与馈电网络模型  
Fig. 2 3×3 filtering structure and feeding network model

小型化 FSS 表面贴装 PIN 二极管后,需要确定 PIN 二极管的馈电网络及其等效 LC 参数。目前,馈电网络设计分为分离式与非分离式馈电网络两种形式。若将馈电网络设计为分离式的金属层,必然会对高频信号有响应。大面积的连通导线不仅会导致低频透过率降低,也会加重单元之间的耦合,因此,本文采用非分离式的馈电网络设计,即滤波结构不仅可以起到金属导线的作用来传导直流信号,还能够起到选频的作用。为了使得低频带阻与带通型 FSS 能够自由切换,需要对表面贴装 PIN 二极管的小型化 FSS 等效 LC 参数进行特殊设计,使其带阻工作频点与带通工作频点一致。基于此分析,本文采用“场-路”协同仿真的方法完成滤波结构、电控 PIN 二极管与馈电网络的一体化建模,该方法克服了以往只能在场分析软件中采用 PIN 二极管等效 LCR 参数方法设计有源 FSS 的难题,实现了 PIN 二极管、小型化 FSS、馈电网络全物理仿真精确分析与设计的目标。以 CST 软件中的微波工作室作为分析平台,首先在 CST 三维建模环境中建立如图 1 所示的小型化 FSS 图案;然后,在焊盘处引入离散端口,作为 PIN 二极管与滤波结构连接线,在 CST 建模窗口中显示的滤波结构、PIN 二极管与馈电网络模型如图 2 所示;最后,在微波工作室微波电路网络仿真环境中,将 PIN 二极管的 SPICE 模型导入六端口微波网络,从而完成表面贴装 PIN 二极管的小型化 FSS 一体化建模,如图 3 所示。

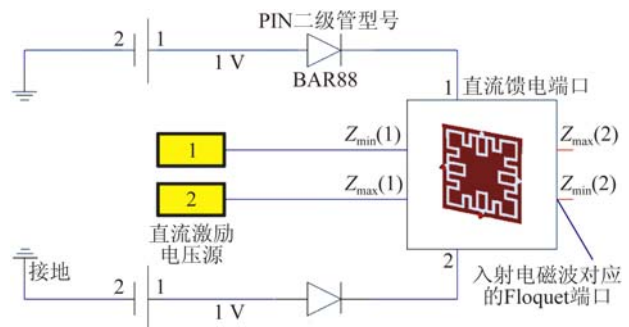


图 3 加载 PIN 二极管的小型化 FSS“场-路”协同仿真模型  
Fig. 3 EM/Circuit co-simulation model of miniaturized FSS loaded PIN diodes

同样以无线局域网手机通信频段 2.45 GHz 为例,采用英飞凌公司 BAR88 型号的 PIN 二极管,设计带通与带阻可自由切换的小型化 FSS。BAR88 型号的 PIN 二极管正向导通时用  $1.5 \Omega$  的正向导通电阻  $R_f$  表示,未导通时用  $0.28 \text{ pF}$  的

反偏电容  $C_r$  及  $1.5\text{ k}\Omega$  的反偏电阻  $R_r$  表示。为了使表面贴装 PIN 二极管的小型化 FSS 带阻工作频点与带通工作频点一致,首先要分别建立 PIN 二极管导通与未导通两种状态下的等效 LC 电路,如图 4 所示。当 PIN 二极管施加正向导通电压后,图案缝隙产生的电容  $C_1$  与金属贴片电感  $L_1$  将构成并联 LC 回路,此时 FSS 切换为带通滤波功能;当 PIN 二极管未导通时,等效传输线模型为焊盘处缝隙及反偏 PIN 二极管产生的电容  $C_2$  与金属贴片电感  $L_2$  串联后再与图案缝隙电容  $C_3$  的并联,其中串联的  $L_2C_2$  回路使得 FSS 具备了带阻滤波功能。当带阻工作频点与带通工作频

点同为  $2.45\text{ GHz}$  时,根据谐振图案尺寸与工作波长一致的 FSS 工作原理,图 1 所示的卷曲图案几何特征尺寸分别为:  $T_a = 25.3\text{ mm}$ ,  $s_1 = 1.1\text{ mm}$ ,  $s_2 = 1.9\text{ mm}$ ,  $w = 2.2\text{ mm}$ ,  $w_{j1} = 1.1\text{ mm}$ ,  $w_{j2} = 1.15\text{ mm}$ ,  $l_{j1} = 3.4\text{ mm}$ ,  $l_{j2} = 4.2\text{ mm}$ 。其中, FSS 图案支撑介质为  $0.0254\text{ mm}$  厚的聚酰亚胺膜,卷曲图案周期单元尺寸约为  $0.2\lambda$ , 满足了小型化 FSS 设计要求,小型化 FSS 等效 LC 参数分别为:  $C_1 = 0.564\text{ pF}$ ,  $L_1 = 7.761\text{ nH}$ ,  $C_2 = 0.549\text{ pF}$ ,  $L_2 = 7.495\text{ nH}$ ,  $C_3 = 0.729\text{ pF}$ , 利用图 3 所示的场-路协同仿真方法计算出的 FSS 表面电场与磁场分布如图 5 所示。

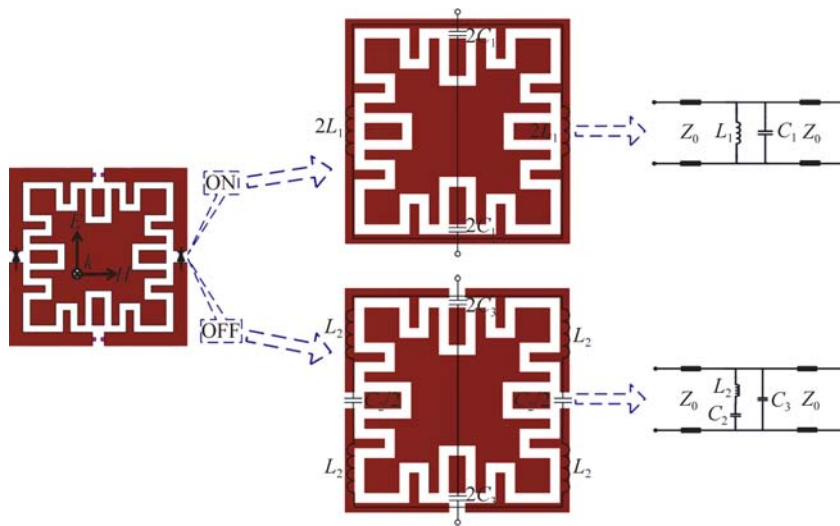


图 4 表面贴装 PIN 二极管的小型化 FSS 等效 LC 电路

Fig. 4 Equivalent LC circuits of miniaturized FSS mounted PIN diodes

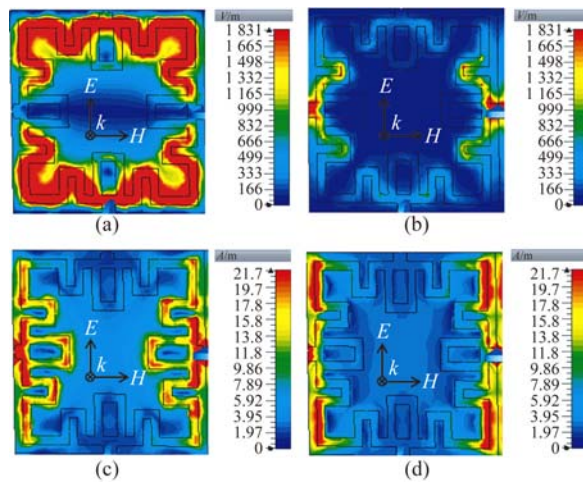


图 5 在  $2.45\text{ GHz}$  处 PIN 二极管导通与关闭时 FSS 表面电场 (a)(b) 与磁场 (c)(d) 分布

Fig. 5 Distribution of electric field (a)(b) and magnetic field (c)(d) at  $2.45\text{ GHz}$  when PIN diodes stay in ON and OFF states

由图 5 可知,在工作频点 2.45 GHz 处,当 PIN 二极管导通时,FSS 表面的激励电场主要集中在横向的环状缝隙处,而表面的激励磁场则分布在纵向的 PIN 二极管及其附近金属贴片区域,显然这样的电磁场分布意味着在 FSS 单元内形成了并联的 LC 谐振回路,因此 FSS 表现为强透射功能;当 PIN 二极管截止时,FSS 表面感应出的电场主要分布在纵向的 PIN 二极管处,而磁场同样分布在纵向的金属贴片区域,也就是说 PIN 二极管关闭时,在入射电磁波的激励下,FSS 单元内形成了串联的 LC 谐振回路,从而表现为强反射功能。通过“场-路”协同仿真方法计算出的 FSS 电磁响应特性结果如图 6 所示(彩图见期刊电子版)。

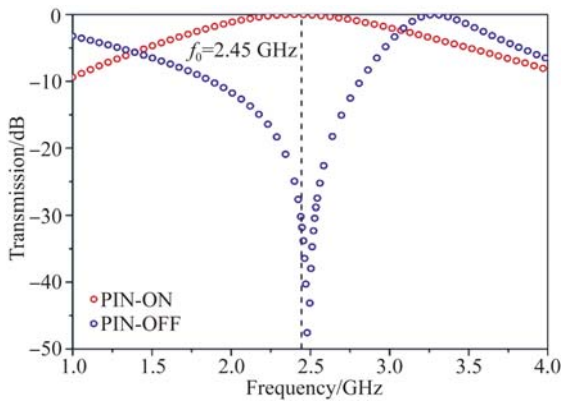
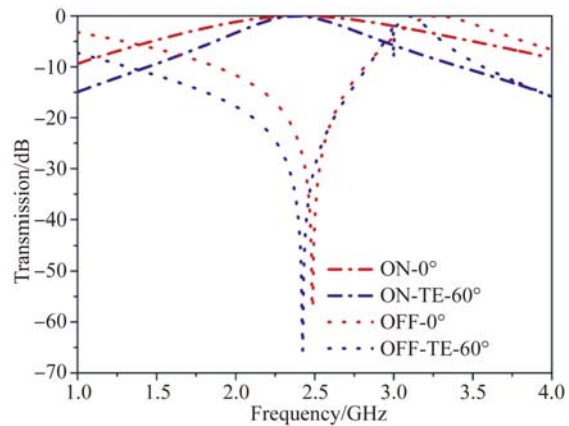


图 6 加载 PIN 二极管的小型化 FSS 表面在导通与关闭两种状态下的频率响应特性曲线

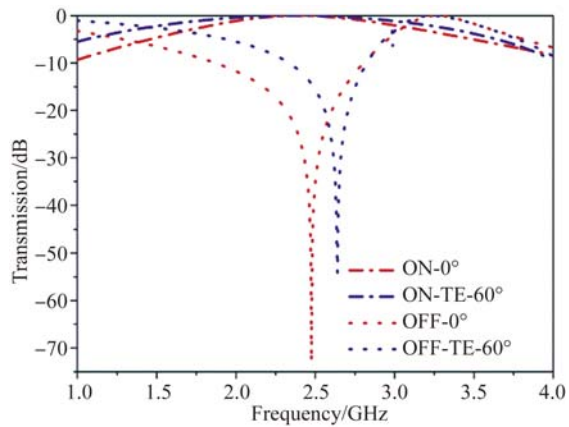
Fig. 6 Frequency-response curves of miniaturized FSS structure for PIN diodes staying in ON and OFF states

利用图 3 所示的场-路协同仿真方法,进一步分析图 5 所对应的带通与带阻自由切换的小型化型 FSS 角度稳定性与极化稳定性,在  $0^\circ \sim 60^\circ$  的扫描范围内,TE 与 TM 两种极化下,小型化 FSS 频率响应特性曲线如图 7 所示(彩图见期刊电子版)。

由图 6 和图 7 可知,小型化 FSS 表面贴装 BAR88 型号的 PIN 二极管后,通过控制 PIN 二极管的通与断,在  $(2.45 \pm 0.1)$  GHz 范围内,PIN 二极管导通时 FSS 全透射,未导通时 FSS 全反射,实现了带通与带阻型 FSS 的自由切换,与图 5 所示的场分布一致。相较于有源 FSS 其它技术实现途径,该方法采用了成熟的电控集总元件、非分离式的馈电网络,利用“场-路”协同仿真的方法,实现了小型化滤波结构、电控集总元件及馈电网络的一体化设计,并获得了良好的角度稳定性与极化稳定性。



(a)



(b)

图 7 在  $0^\circ \sim 60^\circ$  扫描范围内,TE(a)与 TM(b)两种极化下小型化 FSS 频率响应特性曲线

Fig. 7 Frequency-response curves of miniaturized FSS structure for TE(a) and TM(b) polarizations at sweep range from  $0^\circ$  to  $60^\circ$

### 3 试验测试

为了验证本文设计方法的准确性与可靠性,采用表面贴装工艺制作 2.45 GHz 处的带通与带阻可自由切换的 FSS 试验样件。根据自由空间测试系统中喇叭天线波束宽度以及测试角度范围,确定试验样件的尺寸为  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 。

由于本文采用滤波结构、PIN 二极管与馈电网络一体化设计的方法,卷曲图案既是滤波结构也是馈电导线,导致 PIN 二极管的电路形式既有串联也并联,在给定电压下,制作出的表面贴装 PIN 二极管的 FSS 不具有可拓展性,为克服这一问题,本文将卷曲图案连接的 PIN 二极管抽象为一个方形电桥组成的电桥网络形式,并按照等电势点的排布方式对方形电桥进行排布如图 8,在等电势线  $V_+$  与等电势线  $V_-$  之间,卷曲图案连接

的 PIN 二极管形成了一种方形电桥网络,沿着等电势线之间,方形电桥网络可以无限拓展,从而解决了给定电压下,表面贴装 PIN 二极管的 FSS 不具有可拓展性的难题。

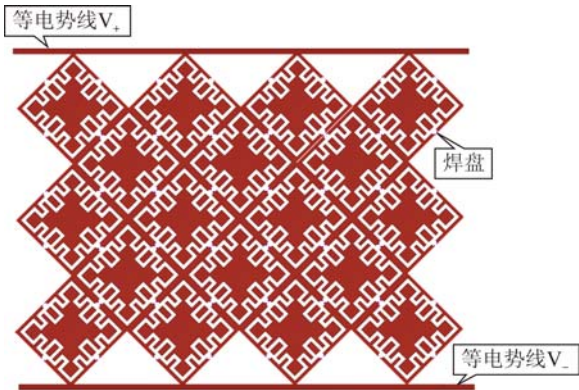


图 8 小型化 FSS 表面贴装的 PIN 二极管排布方式

Fig. 8 Arrangement of PIN diodes mounted on miniaturized FSS

采用印刷电路板工艺与表面贴装工艺制作出的 400 mm×400 mm 试验样件如图 9 所示,采用自由空间法进行测试,测试结果如图 10 所示(彩图见期刊电子版)。

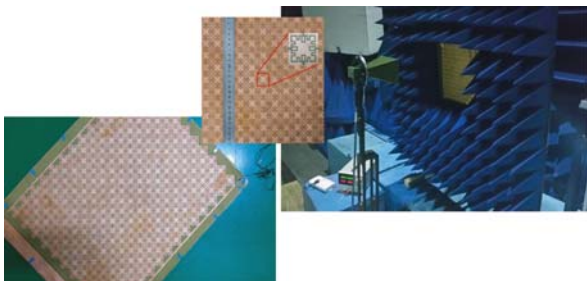
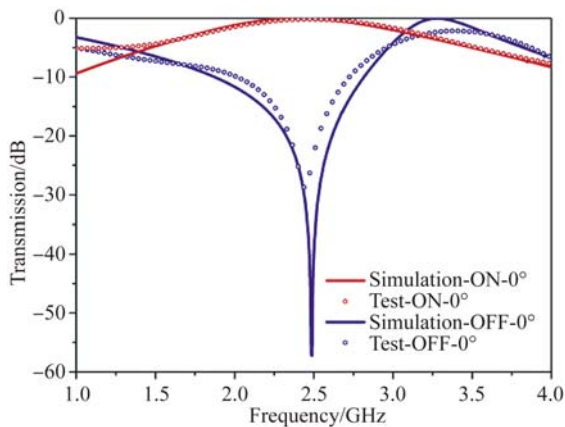
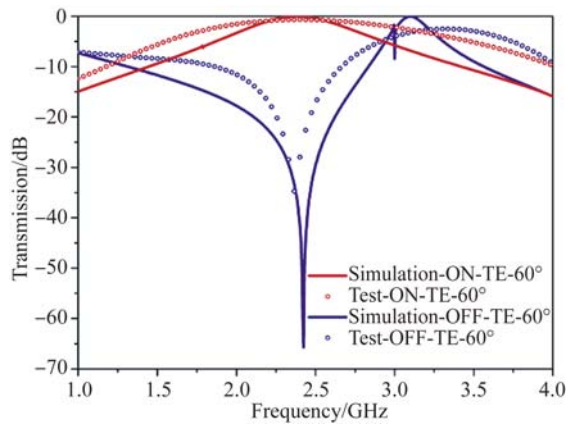


图 9 制作出的 400 mm×400 mm 试验样件及测试装置图

Fig. 9 Fabricated prototype of 400 mm×400 mm and testing system



(a)Simulation and test at 0°



(b)Simulation and test at 60°

图 10 PIN 二极管关闭(OFF)与导通(ON)时样件在 0° 与 60° TE 极化下的测试与仿真对比结果

Fig. 10 Simulation and test results for ON and OFF states at 0° and 60° incidence under TE polarizations

由图 10(a)可知,考虑实际 PIN 二极管隔离度加工误差,试验样件在正入射情况下的测试与仿真结果基本一致。而对于大角度入射,如图 10(b)所示,仿真结果和测试结果存在一定的偏差。无论 PIN 二极管是处于导通还是关闭状态,样件测试的透过率总是高于仿真结果。这主要是由于在大角度的情况下,样件的横截面积减小,电磁波作用区域的单元数减少,而仿真结果则是通过计算无限多的 FSS 单元而得到的。此外,随着样件截面积的减小,微波的绕射效应逐渐增强,同样会导致测试结果的偏大。虽然存在着一定的偏差,但在中心频点处,试验结果和仿真结果能够较好地吻合。因此,该试验不仅验证了本文提出的设计方法的可行性,而且还验证了“场-路”协同仿真方法的准确性与可靠性。

## 4 结 论

为了在不同时域下获得兼具带通与带阻空间滤波功能的低频 FSS,本文提出了一种带通与带阻可自由切换的 FSS 设计方法,具体实施分为三步:首先,利用卷曲技术设计小型化 FSS;然后,利用“场-路”协同仿真的方法对滤波结构、电控 PIN 二极管与馈电网络进行一体化建模;最后,采用“场-路”协同仿真的方法对表面贴装电控 PIN 二极管的 FSS 进行数值分析计算。利用该方法本文设计出了 2.45 GHz 处带通与带阻自由切换的小型化 FSS,周期单元尺寸为  $0.2\lambda$ ,获得了在  $0^\circ \sim$

60°范围内良好的角度稳定性与极化稳定性,设计出了一种非分离式的馈电网络,实现滤波结构、PIN 二极管与馈电网络一体化设计,采用电控 PIN 二极管排布方式,解决了 FSS 制作工艺上不

具有可拓展性的难题。本文方法可拓展应用到其它有源 FSS 其它技术实现途径,且该方法在智能天线,可调控电磁屏蔽及多模复合制导隐身雷达罩等领域具有潜在的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 王岩松,高劲松,陈新,等. 具有低空气隙敏感度的雪花单元频率选择表面 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 1949-1956.  
WANG Y S, GAO J S, CHEN X, *et al.*. Snow loop element frequency selective surface with low sensitivity to air gaps [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 1949-1956. (in Chinese)
- [2] 陈新,高劲松,王岩松,等. 叠加 Y 环单元频率选择表面的设计 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2043-2049.  
CHEN X, GAO J S, WANG Y S, *et al.*. Design of overlapping Y loop element FSS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2043-2049. (in Chinese)
- [3] 徐念喜,冯晓国,梁凤超,等. 对称双屏 Butterworth 型频率选择表面的设计 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1486-1494.  
XU N X, FENG X G, LIANG F CH, *et al.*. Design of symmetric dual Butterworth-type of frequency selective surfaces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1486-1494. (in Chinese)
- [4] 曹尚文,周永江,程海峰. 变换光学透镜天线研究进展 [J]. 中国光学, 2017, 10(2): 164-175.  
CAO S W, ZHOU Y J, CHENG H F. Research progress of transformation optics lens antenna [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 164-175. (in Chinese)
- [5] 李天佑,黄玲玲,王涌天. 超颖表面原理与研究进展 [J]. 中国光学, 2017, 10(5): 523-540.  
LI T Y, HUANG L L, WANG Y T. The principle and research progress of metasurfaces [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 523-540. (in Chinese)
- [6] 陈颢宇,田震. 石墨烯太赫兹波动态调制的研究进展 [J]. 中国光学, 2017, 10(1): 86-97.  
CHEN X Y, TIAN Z. Recent progress in terahertz dynamic modulation based on grapheme [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 86-97. (in Chinese)
- [7] 张磊,刘硕,崔铁军. 电磁编码超材料的理论与应用 [J]. 中国光学, 2017, 10(1): 1-12.  
ZHANG L, LIU S, CIU T J. Theory and application of coding metamaterials [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 1-12. (in Chinese)
- [8] POZARD M, SANCHEZ V. Magnetic tuning of a microstrip antenna on a ferrite substrate [J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(12): 729-731.
- [9] SHREKENHAMER D, CHEN W CH, PADILLA W J. Liquid crystal tunable metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(17): 177403.
- [10] MAHMOOD M S, DENIDNI T A. Pattern-reconfigurable antenna using a switchable frequency selective surface with improved bandwidth [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1148-1151.
- [11] LIANG B, SANZ-IZQUIERDO B, PARKER E A, *et al.*. Cylindrical slot FSS configuration for beam-switching applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(1): 166-173.
- [12] FABIAN-GONGORA H, MARTYNYUK A E, RODRIGUEZ-CUEVAS J, *et al.*. Active dual-band frequency selective surfaces with close band spacing based on switchable ring slots [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, 25(9): 606-608.
- [13] ZHANG L, YANG G H, WU Q, *et al.*. A novel active frequency selective surface with wideband tuning range for EMC purpose [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11): 4534-4537.
- [14] HUANG X G, SHEN Z, FENG Q Y, *et al.*. Tunable 3-D bandpass frequency-selective structure with wide tuning range [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(7): 3297-3301.
- [15] ROBERT S J, FORD K L, RIGELSFORD J M. Secure electromagnetic buildings using slow phase-switching frequency-selective surfaces [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(1): 251-261.
- [16] ZENDEJASJ M, GIANVITTORIO J P, RAHMAT-SAMII Y, *et al.*. Magnetic MEMS reconfigurable frequency-selective surfaces [J]. *Journal of Micro-*

- electromechanical Systems*, 2006, 15(3): 613-623.
- [17] SAFARI M, SHAFAI C, SHAFAI L. X-band tunable frequency selective surface using MEMS capacitive loads [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(3): 1014-1021.
- [18] VARDAXOGLU J C, LAU P Y, KEARNEY M. Frequency selective surface from optically excited semiconductor on a substrate [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(6): 570-571.
- [19] 焦健, 徐念喜, 冯晓国, 等. 基于十字单元的可调谐互补屏频率选择表面 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1430-1437.
- JIAO J, XU N X, FENG X G, *et al.*. Tunable complementary frequency selective surfaces based on cross-elements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1430-1437. (in Chinese)
- [20] XU N X, GAO J S, ZHAO J L, *et al.*. A novel wideband, low-profile and second-order miniaturized band-pass frequency selective surfaces [J]. *AIP Advances*, 2015, 5(7): 077157.
- [21] SHI Y R, ZHUANG W, TANG W CH, *et al.*. Modeling and analysis of miniaturized frequency-selective surface based on 2.5-dimensional closed loop with additional transmission pole [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(1): 346-351.
- [22] CALOZ C, ITOH T. *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications* [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

#### 作者简介:



徐 阳(1991—),男,河北邯郸人,博士研究生,2013年于南开大学获得学士学位,主要从事频率选择表面及功能性薄膜材料的研究。E-mail: nkxyang@126.com

#### 导师简介:



高劲松(1968—),男,吉林白城人,研究员,博士生导师,1989年于浙江大学获得学士学位,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学薄膜、红外金属网栅、频率选择表面等方面的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:秦 思)