

## 具备多模式可切换功能的超材料结构

王哲飞<sup>1</sup>, 黄佳俊<sup>1</sup>, 吴杰<sup>1</sup>, 杜骅<sup>1</sup>, 吴慧芳<sup>2</sup>, 葛俊祥<sup>1</sup>, 万发雨<sup>1</sup>, 傅佳辉<sup>3</sup>, 曾庆生<sup>4\*</sup>, Tayeb A. Denidni<sup>5</sup><sup>1</sup>南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;<sup>2</sup>海南大学应用科技学院, 海南 儋州 571737;<sup>3</sup>哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;<sup>4</sup>南京航空航天大学航天学院, 江苏 南京 210016;<sup>5</sup>加拿大国立科学研究院, 加拿大 蒙特利尔 H5A1K6

**摘要** 提出了一种新型的多功能超材料滤波器/屏蔽器, 其具有双频段极化独立控制、多模式可切换等特点。与传统器件不同的是, 所提出的设计能够独立控制横电(TE)或横磁(TM)极化波在不同频段的透射和反射, 并且通过设置不同的二极管偏置电压, 可以实现 4 种不同的工作模式。该结构基于等效电路模型, 采用多层滤波结构设计, 通过在顶层和底层加载 PIN 二极管实现 TE 和 TM 极化波在低频段和高频段的独立控制。在传输模式下, TE 和 TM 波分别在 3.6 GHz 和 4.6 GHz 附近得以传输; 在屏蔽模式下, 该结构可以有效地阻挡入射极化波。每种模式都有非常稳定的工作状态, 不会受到其他工作模式的影响。此外, 该设计在  $0^\circ \sim 45^\circ$  入射范围内具有良好的角度稳定性。这种多模式超材料结构可以应用于天线罩等领域, 天线传输信号时能满足对特定极化信号的需求, 待机时可以屏蔽信号以减少干扰。

**关键词** 材料; 超材料; 多模式可切换超材料; 极化可独立调控结构; 天线罩

中图分类号 O441.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230997

## 1 引言

频率选择表面(FSS)又称为人工电磁超材料, 是一种人工设计的周期性排列结构, 可以实现对电磁波的选择性传输和反射。近年来, FSS 优异的空间滤波性能已经引起了众多领域学者的关注<sup>[1-2]</sup>, 尤其是在吸收器<sup>[3-4]</sup>、天线隐身屏蔽<sup>[5]</sup>、电磁兼容<sup>[6]</sup>等方面。目前, 具有各种优势特性如超宽带<sup>[7-8]</sup>、双频<sup>[9-10]</sup>、极化不敏感<sup>[11-12]</sup>等的 FSS 设计已经被学者们广泛研究。然而, 大多数传统的无源 FSS 器件具有对电磁波不可改变的滤波特性, 该类设计在现代复杂通信环境中的应用受到限制。因此, 从实际应用的角度出发, 具备多种功能的超材料器件具有更加广阔的应用前景。其中可调、可切换、可重构的有源超材料(AFSS)结构是近些年的研究热点, 也是未来 FSS 设计的发展趋势之一<sup>[13]</sup>。

目前, 大多数 AFSS 都是通过安置 PIN 二极管<sup>[14-15]</sup>、变容二极管<sup>[16]</sup>等技术手段实现了工作模式可切换、工作频带可调、极化状态可重构等功能。2018 年 Bakshi 等<sup>[17]</sup>基于 LC 并联谐振电路原理, 通过在底层加载 PIN 二极管, 设计了一种可重构的吸透一体的

AFSS 结构, 实现了 2.88 GHz 传输带的可切换功能。然而, 这项研究和已报道的多数可重构研究类似, 并不能单独控制不同极化的工作状态。2020 年 Shah 团队<sup>[18]</sup>设计了一种具有双频段极化选择的 2 bit 可切换结构, 该结构在介质两侧设计了正交的 FSS 结构, 同时使用 PIN 二极管调控横电(TE)和横磁(TM)极化, 具备一定的角稳定性。尽管该设计已经可以独立调控不同极化的工作状态, 但是其双通带中仅低频 2.3 GHz 处的传输带可以实现开启/关闭的切换功能, 而高频 5.3 GHz 处的传输带并不能被有效调控。因此, 该设计在每个工作模式下都存在透射现象, 并不能实现完全屏蔽的功能。后续, 该团队在此基础上进一步设计了一种 4 bit 双频多模式 AFSS 结构<sup>[19]</sup>; 值得一提的是, 该结构可以实现 7 种工作模式, 但是它的两个工作频段并不能同时开启, 这使得它不适合需要两个频带同时工作的通信系统。上述这些可切换 AFSS 设计与传统固定电磁滤波特性的无源 FSS 器件相比, 已经具备了很大的优势, 在实际应用中具有更大的灵活性, 对提高无线通信中的频谱利用效率具有重要作用。然而, 这些设计依旧存在的一些问题导致了其在特定应用环境中的局限性。

收稿日期: 2023-05-17; 修回日期: 2023-07-27; 录用日期: 2023-09-06; 网络首发日期: 2023-09-16

基金项目: 中国博士后科学基金(2023M732027)、江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB510011)、江苏省高层次创新创业人才引进计划(JSSCB20210476)、南京信息工程大学人才启动经费(2021r080)

通信作者: \*qingshengzeng@nuaa.edu.cn

本文针对此类可切换设计的不足之处,提出了一种极化可独立控制的具有 4 种不同工作模式的双频带 AFSS 结构,该结构可以实现双极化透射/单极化透射/屏蔽、全屏蔽功能,这些模式之间可相互切换。多层 FSS 结构可获得预期的对 TE、TM 波独立的滤波特性,在低频段和高频段分别获得了一种极化的传输窗口;该结构采用正交的顶层和顶层 FSS 结构分别控制 TE 波和 TM 波,使用 PIN 二极管控制获得可切换性,并且通过不同的偏置电压组合实现 4 种可切换的工作模式。为了便于研究,本文建立不同入射极化下的等效电路,分析了所设计结构的工作机理。在传输模式下,AFSS 结构中的 TE 波在低频段具有较高的传输效率,而 TM 波则可以在较高频段有效传输。在屏蔽模式下,TE 波和 TM 波都不能穿透该 FSS 结构。最后,通过电路计算仿真、全波仿真,得到了与预期结果相符合的结果。

## 2 单元结构与设计方法

为了实现预期的 TE、TM 极化波独立滤波特性,本文提出的 FSS 结构采用贴片-栅格-贴片结构,如图 1 所示。单元结构顶层和底层的贴片 FSS 结构分别沿着 +y 轴(TE 极化)方向和 +x 轴(TM 极化)方向用 PIN 二极管(型号 SMP1331-079LF)连接。当 TE 极化

波入射时,单元结构的对应等效电路如图 2(a) 所示,等效电路从左往右依次代表顶层、中间层、底层结构。从图 2(a)中可以看出:顶层 FSS 结构可以等效为电感和二极管串联的支路;中间层只考虑沿 TE 极化方向的有效结构,可以简单等效为一个电感的支路;而底层的二极管是沿 TM 极化方向排列,在 TE 波入射情况下可以被忽略,因此底层 FSS 结构等效为一个电容和电感串联的支路。当顶层 PIN 二极管处于截止状态时,顶层和中间层 FSS 结构共同作用后产生一个 TE 极化的传输窗口,而底层 FSS 结构由于其排列方向和 TE 极化正交而对 TE 波几乎不具备调控能力。当顶层二极管导通时,沿着 y 轴方向相邻的顶层 FSS 结构被连通,顶层相当于条栅形金属结构,同方向入射的 TE 极化波被反射,传输窗口消失,切换为 TE 极化屏蔽模式。同理,当 TM 极化波入射时,等效电路对应图 2(b),因为入射极化方向的改变,顶层和底层等效电路发生了变化,而中间层因为是对称结构而保持不变。当二极管截止时,中间层和底层 FSS 结构在较高频段处产生一个 TM 极化的传输窗口;当二极管状态切换为导通时,TM 极化波穿透不了所设计的结构。通过顶层和底层 PIN 二极管不同工作状态的组合可以实现不同极化不同传输、反射模式之间的切换,以应对不同的工作环境。

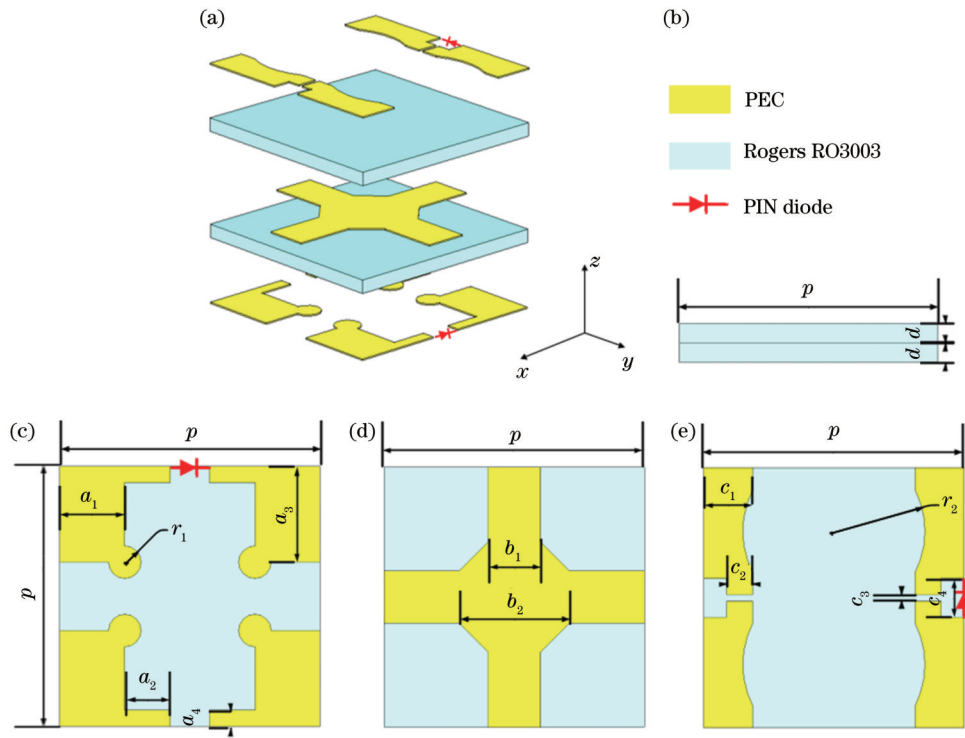


图 1 所提出的单元结构。(a)整体结构;(b)侧视图;(c)底层 FSS;(d)中间层 FSS;(e)顶层 FSS  
Fig. 1 Proposed unit structure. (a) Overall structure; (b) side view; (c) bottom FSS; (d) middle FSS; (e) top FSS

本文所提出的多模式可切换 FSS 单元结构如图 1 所示,沿 +y(TE)和 +x(TM)方向呈周期性排布。该结构由三层 PEC(polyelectrolyte complex)金属材料的

FSS 结构和两个 Rogers RO3003 材料的介质层组成,其中 PIN 二极管建模由其等效电路器件替代。经过仿真拟合优化后,各层结构参数如下:单元结构周期

$p=8\text{ mm}$ , 介质层厚度  $d=0.127\text{ mm}$ , 介电常数为 3,  $a_1=2\text{ mm}$ ,  $a_2=1.4\text{ mm}$ ,  $a_3=2.95\text{ mm}$ ,  $a_4=0.5\text{ mm}$ ,  $b_1=1.6\text{ mm}$ ,  $b_2=3.4\text{ mm}$ ,  $c_1=1.8\text{ mm}$ ,  $c_2=0.8\text{ mm}$ ,  $c_3=0.2\text{ mm}$ ,  $c_4=1.2\text{ mm}$ ,  $r_1=0.5\text{ mm}$ ,  $r_2=2.8\text{ mm}$ 。

为了便于分析所提出的可切换结构的工作机理, 建立与单元结构对应的等效电路模型 (ECM) 进行分

析。顶层和底层上 FSS 结构和加载的二极管是正交排列的, 分别对应不同的极化形式, 而等效电路模型并不能区分电磁波极化方向, 所以需要建立两种极化情况下的电路分别进行分析, 如图 2 所示,  $L_1\sim L_5$  为电感,  $C_1, C_2$  为电容,  $Z_0$  为阻抗,  $L_{\text{Diode}}$  为二极管的电感,  $C_{\text{Diode}}$  为二极管的电容,  $R_{\text{Diode}}$  为二极管的电阻。

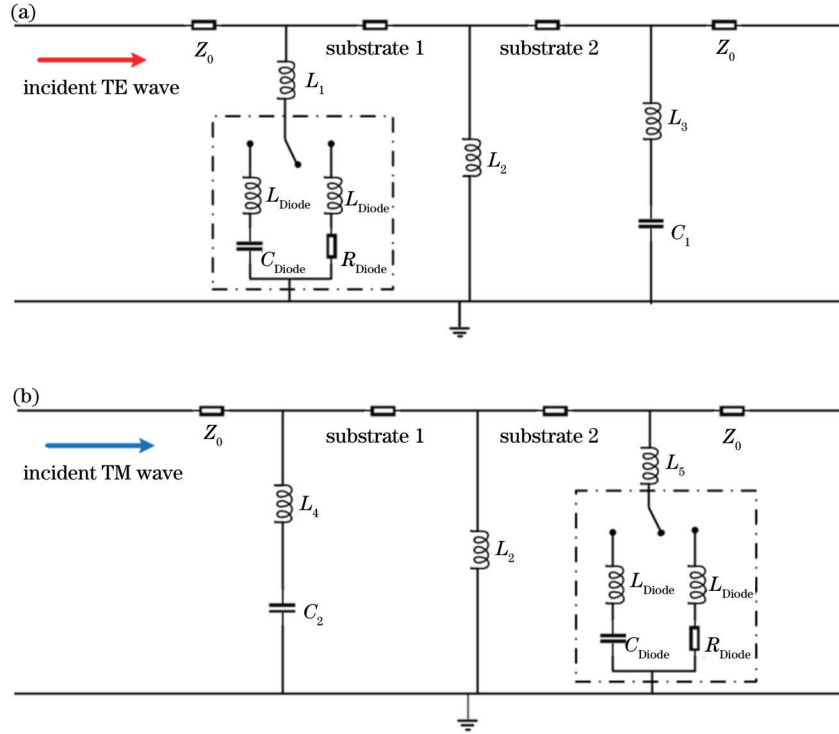


图 2 等效电路模型。(a)TE 极化; (b)TM 极化  
Fig. 2 ECMs. (a) TE polarization; (b) TM polarization

电容  $C$ 、电感  $L$  的估算公式<sup>[20]</sup>分别为

$$L = \mu_0 \mu_1 \frac{p}{2\pi} \ln \left[ \frac{1}{\sin(l\pi/2p)} \right], \quad (1)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_1 \frac{2p}{\pi} \ln \left[ \frac{1}{\sin(w\pi/2p)} \right], \quad (2)$$

式中:  $\mu_0$  是真空磁导率;  $\epsilon_0$  是真空介电常数;  $\mu_1$  是介质材料的磁导率;  $\epsilon_1$  是介质材料的介电常数;  $l$  是 FSS 结构长度;  $w$  是 FSS 结构之间的宽度。

使用仿真软件 Advanced Design System 2020 (ADS) 进行模拟、拟合、优化后, 最终等效电路各元器件参数为:  $L_1=0.27\text{ nH}$ ,  $L_2=1.81\text{ nH}$ ,  $L_3=0.57\text{ nH}$ ,  $L_4=2.75\text{ nH}$ ,  $L_5=0.12\text{ nH}$ ,  $C_1=0.69\text{ pF}$ ,  $C_2=0.87\text{ pF}$ 。根据 SKYWORKS 公司提供的 PIN 二极管 (型号 SMP1331-079LF) 的具体参数, 内置  $C_{\text{Diode}}=0.18\text{ pF}$ 、 $L_{\text{Diode}}=0.7\text{ nH}$ 、 $R_{\text{Diode}}=1.7\text{ }\Omega$ ,  $L_{\text{Diode}}C_{\text{Diode}}$  为截止状态,  $L_{\text{Diode}}R_{\text{Diode}}$  为导通状态。

### 3 分析与讨论

基于上述设计思路, 仿真软件 ADS 的等效电路

仿真结果如图 3 所示。图 3 中“T”表示 TE、TM 极化的传输模式, “R”表示反射模式。当 TE 极化波入射、PIN 二极管截止时,  $L_1, L_{\text{Diode}}, C_{\text{Diode}}$  和  $L_2$  发生谐振, 整体结构表现为一个带通滤波器, 低频处会产生一个传输窗口, 其他频段处 TE 波被完全反射, 相当于一个传统的屏蔽器。当 PIN 二极管切换为导通状态时, 电路 PIN 二极管部分切换为  $L_{\text{Diode}}, R_{\text{Diode}}$ , 与第二层等效电路  $L_2$  共同工作时, 整体结构就像是一个完美的 TE 波反射器, 原先频段处的传输窗口消失, 该结构切换为 TE 极化屏蔽模式。如图 3(a) 所示, 在 PIN 二极管截止状态下, 对于 TE 极化入射波, 结构的等效电路在低频点 3.6 GHz 处产生传输窗口。同理, 对于 TM 极化波入射的情况, 根据 PIN 二极管不同的偏置状态, 整体结构在另一频段 4.6 GHz 处形成一个可以打开或关闭的传输窗口, 对应 TM 传输或屏蔽模式。当 PIN 二极管导通时, 仿真结果对应图 3(a)、(b) 中的“R”模式, 两种极化都被反射, 不能穿透该结构, 具有很好的屏蔽性能。基于上述不同极化的不同工作模式, 本设计可以实现极化独立控制的多模式可切换功能。



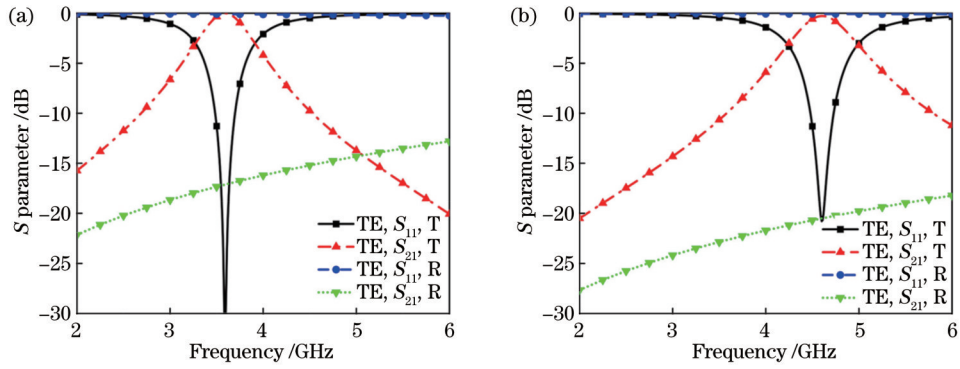


图 3 等效电路模型的仿真结果。(a)TE 极化;(b)TM 极化  
Fig. 3 Simulation results of ECM. (a) TE polarization; (b) TM polarization

为了更好地分析传输窗口的形成,图 4 展示了所设计结构在传输和屏蔽模式下输入阻抗  $Z_{11}$  和输出阻抗  $Z_{21}$  实部虚部在工作频段范围内的变化结果。对于输入阻抗  $Z_{11}$  而言,当实部虚部与空气阻抗相匹配时,极化波可以高效地传输,如图 4(a) 所示,TE 极化波在 3.3~3.8 GHz 范围内, TM 极化波在 4.4~4.9 GHz 范围内,两者输入阻抗  $Z_{11}$  实部接近 377  $\Omega$ ,虚部接近 0,表示这两个频段处会形成传输窗口。同时,从图 4(b) 可以看到,在上述两个频段传输阻抗  $Z_{21}$  虚部趋于无穷大,实部趋于零,表示传输窗口的插入

损耗非常小<sup>[21]</sup>。在屏蔽模式下,图 4(c) 中传输阻抗  $Z_{21}$  实部和虚部在 2~6 GHz 范围内和空气阻抗不匹配,说明 TE 和 TM 极化在整个工作频段被反射,几乎不会存在漏波现象,该结构整体作为一个屏蔽器工作。从图 4(d) 也可以看出,两种极化的传输阻抗  $Z_{21}$  实部远大于 0,具有非常大的损耗,不具备窗口形成的条件。综上,本文所提出的 AFSS 结构在传输模式下可以在 3.3~3.8 GHz 和 4.4~4.9 GHz 分别形成 TE 和 TM 极化波的传输窗口,在屏蔽模式下有效地阻挡了两种极化的透射。

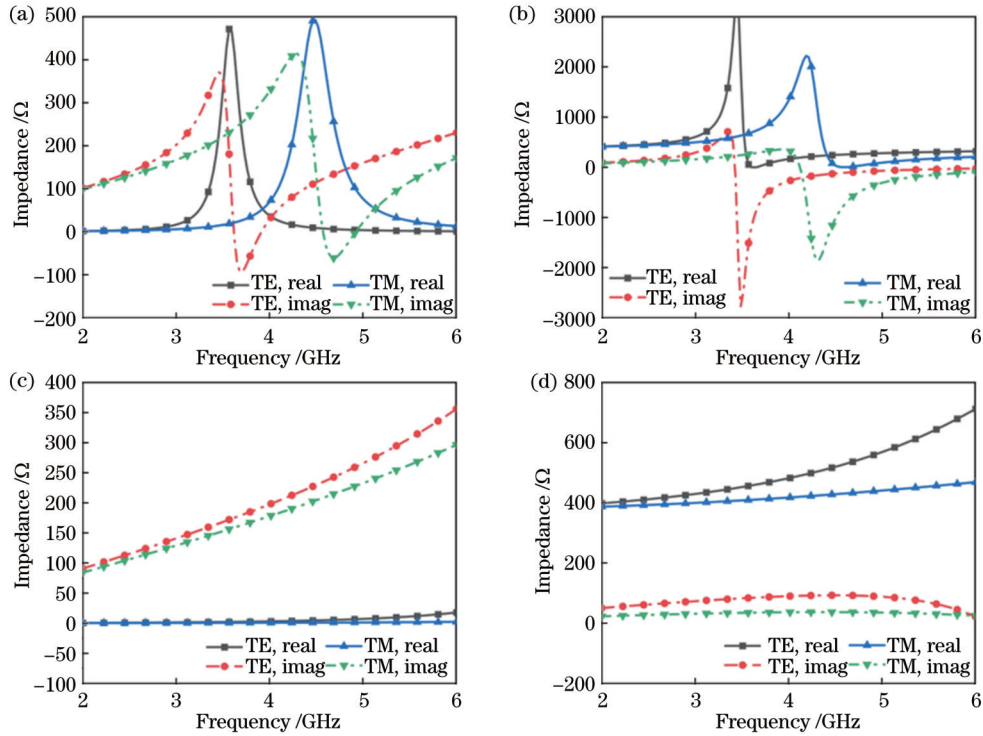


图 4 阻抗实部和虚部。传输模式(a)输入阻抗  $Z_{11}$  和(b)传输阻抗  $Z_{21}$ ;屏蔽模式(c)输入阻抗  $Z_{11}$  和(d)传输阻抗  $Z_{21}$

Fig. 4 Real part and imaginary part of impedance. (a) Input impedance  $Z_{11}$  and (b) transmission impedance  $Z_{21}$  of transmission mode; (c) input impedance  $Z_{11}$  and (d) transmission impedance  $Z_{21}$  of shielding mode

所提出的可切换单元结构通过 CST STUDIO SUITE 2022(CST)软件中的微波工作环境下的周期结构进行全波仿真,各模式仿真结果如图 5 所示,其中

左侧和右侧分别为 TE 和 TM 极化的传输、反射结果。从图 5 中可以清晰地看到该结构可以实现 A、B、C、D 4 种工作模式,同时通过调整电感、电容、电阻参数分别

设置 PIN 二极管不同的工作状态,进一步实现各模式间的切换功能。

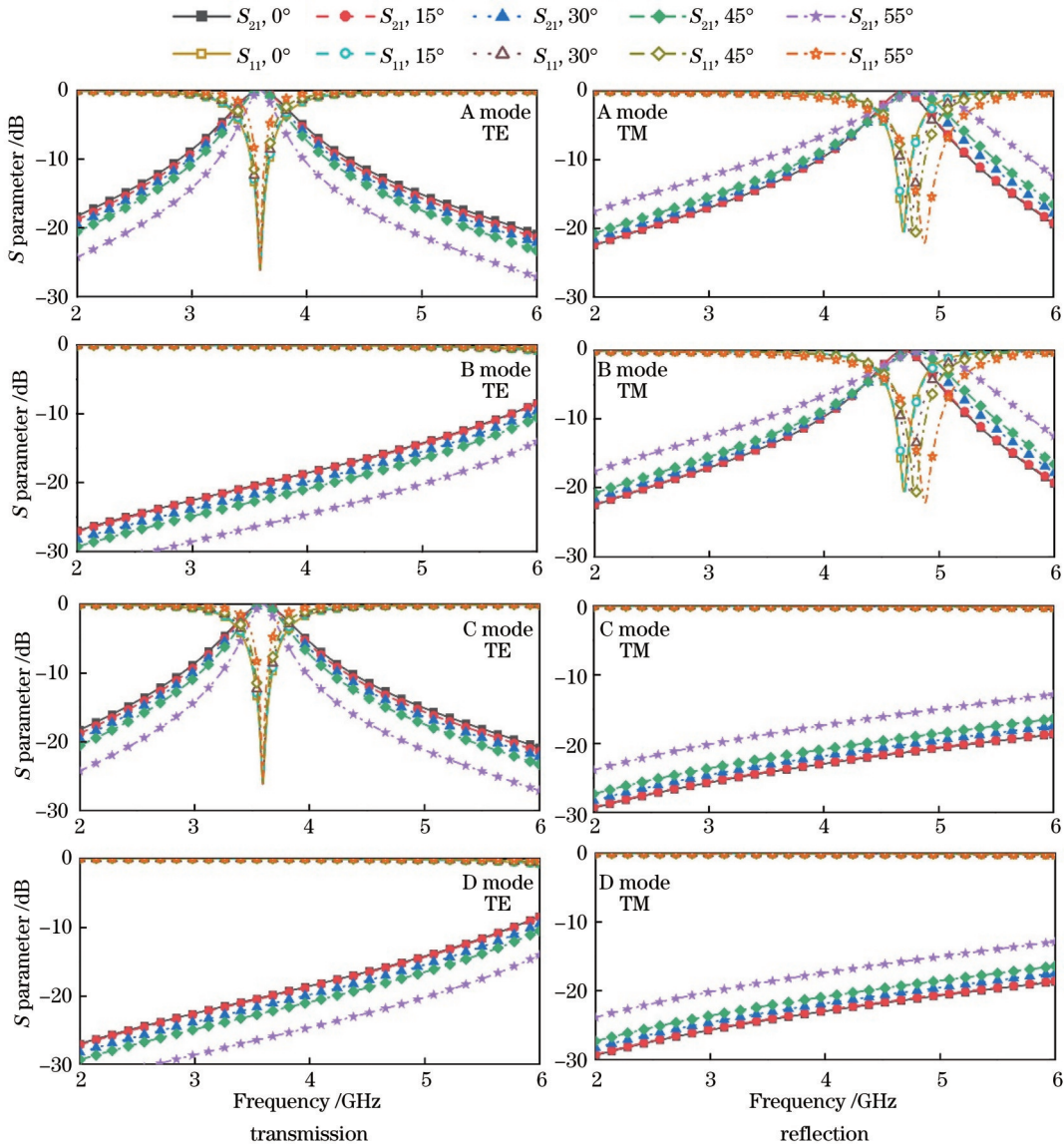


图 5 各模式下 TE 波和 TM 波传输/反射结果

Fig. 5 Transmission/reflection results of TE and TM waves in different modes

在 A 工作模式下 TE 和 TM 波都为传输状态,此时该 FSS 结构上顶层和底层加载的二极管均未导通,TE 极化波在中心频点 3.6 GHz 处形成一个传输窗口,几乎没有插入损耗,TM 极化波在中心频点 4.6 GHz 处形成一个传输窗口,插入损耗仅为 0.008 dB,两种极化波的传输性能都非常优异。仅导通顶层二极管将工作模式切换为 B 模式,该工作模式下结构切换为屏蔽 TE 极化波的功能,从图 5 中 B 模式可以看到 3.6 GHz 处的传输窗口消失,表示 TE 波全部被该结构反射。同时,该模式下 TM 波工作状态不受 TE 波传输状态改变的影响,依旧可以维持住 4.6 GHz 处的传输窗口。同理,C 工作模式仅导通底部的二极管,切换 TM 波工作状态而不影响 TE 波的工作状态。而在 D 工作模式下,该 FSS 设计完全等效于一个屏蔽器,无

论是 TE 波还是 TM 波都无法穿透该结构。在实际应用中,由于入射波通常是斜入射至 FSS 结构,因此设计时角稳定性也是一个重要的考虑因素。从图 5 中可以看到,随着入射角的增大,该结构 TE 极化传输带会逐渐变窄,而 TM 极化的传输带反而逐渐变宽,但通带会产生偏移。综合考虑每个模式的稳定性,在 0°~45° 入射角范围内,结构的传输模式可以维持较为稳定的带宽和高峰值,屏蔽模式性能则几乎不受影响。

为了进一步说明所提出的多模式切换极化独立控制的概念,图 6 展示了传输窗口中心频点在入射波方向(-z 轴)的电场分布。结果表明,该结构在 A 模式和 D 模式下分别具有双通带和全频段屏蔽特性。在 B 和 C 模式下,TE 和 TM 极化波在可切换工作频带内具有相反的传输或反射响应,而在其他频带内则被屏蔽。

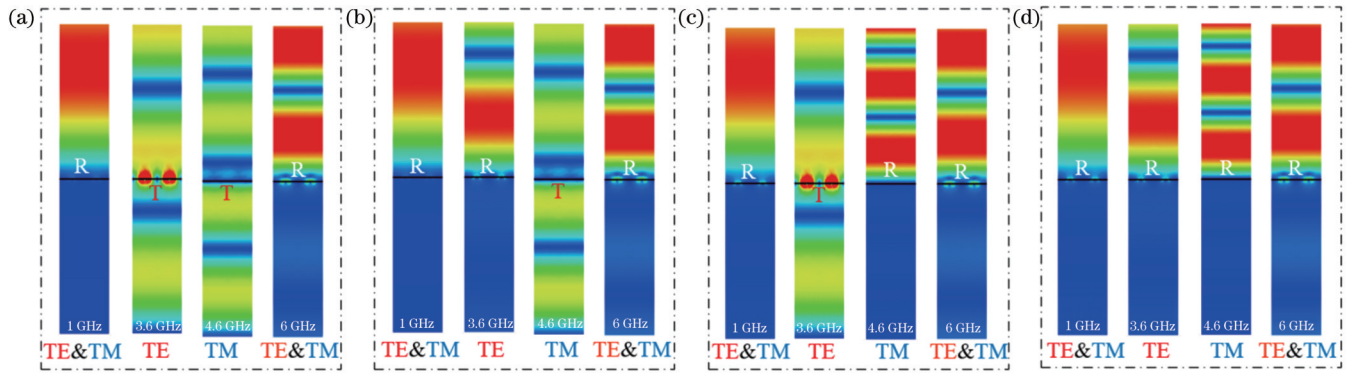


图 6 入射波传播方向平面上的电场分布。(a)A 模式;(b)B 模式;(c)C 模式;(d)D 模式

Fig. 6 Electric-field distributions on plane of propagation direction of incident wave. (a) A mode; (b) B mode; (c) C mode; (d) D mode

在透射状态下,如图 6(a)中 3.6 GHz 和 4.6 GHz 处,电磁波穿过该结构前后的电磁能量基本一致,表明实现了高透射。相反,在屏蔽状态下,如图 6(d)中 4 个频点处,电磁波在该结构前的能量更强,几乎没有任何能量可以穿透结构,电场在该结构前的分布有明显的驻波现象,表明绝大部分的能量被反射。图 6 中传输频带中心频点的电场分布结果和各模式的全波仿真结果相

符合,更加直观地展示了本文所设计结构的不同工作模式。

表 1 为本文结构和近年来已报道的可切换 AFSS 结构的性能比较。相对而言,本文所设计结构实现了双频段极化独立调控功能,具有更多的可切换模式,可以满足更复杂的应用场景。同时,该结构具备较好的角稳定性,对入射角度具有不错的抗干扰性。

表 1 性能比较

Table 1 Performance comparison

Ref. No	Switchable transmission band / GHz	Mode number	Polarization	Angular stability
[22]	3.5—4.8	2	Single polarization	30°
[23]	9.8	2	Polarization-insensitive	N/A
[17]	2.88	2	Polarization-sensitive	30°
[24]	3.03 & 4.33	4	Polarization-insensitive	40°
This work	3.6 & 4.6	4	Independent control of different polarizations	45°

## 4 结 论

提出了一种新型的极化独立控制多模式可切换的频率选择表面滤波器/屏蔽器。该结构基于等效电路模型,采用多层 FSS 结构设计,通过在顶层和底层加载 PIN 二极管实现 TE 和 TM 波的独立控制。通过设置二极管的不同偏置电压控制 TE 和 TM 波的透射或反射,实现 4 种工作模式之间可切换的功能。在 TE 和 TM 波都透射的模式下,该结构在中心频点 3.6 GHz 和 4.6 GHz 处各形成一个低插入损耗的传输窗口;在全屏蔽的模式下,该结构可以有效地防止电磁波穿透该结构。在 0°~45° 入射角范围内,每种模式的性能都较为稳定,且每种极化波的工作状态不会受到其他工作模式的影响。

### 参 考 文 献

- [1] Liang J W, Cao Q S, Wang Y, et al. A multifunctional and miniaturized flexible active frequency selective surface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(12): 2549-2553.
- [2] Yan L P, Xu L L, Gao R X K, et al. Angularly independent frequency selective surface with good ventilation for millimeter wave EM shielding[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(1): 251-254.
- [3] Zheng L, Yang X Z, Gong W, et al. Ultralow thickness-bandwidth ratio magnetic absorber with printed FSS for S&C bands[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(3): 576-580.
- [4] 马栎敏, 徐哈, 刘禹煌, 等. 基于石墨烯超材料的宽频带太赫兹吸收器[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0923001.
- [5] Ma L M, Xu H, Liu Y H, et al. Broadband terahertz absorber based on graphene metamaterial[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0923001.
- [6] Dey S, Dey S. Conformal multifunction FSS with enhanced capacitance loading for high angle stable stopband filtering and microwave absorption[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(2): 315-326.
- [7] Ashvanth B, Partibane B, Alsath M G N. An ultraminiaturized frequency selective surface with angular and polarization stability [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(1): 114-118.
- [8] Jiang Z N, Wang Z X, Nie L Y, et al. A low-profile ultrawideband slotted dipole antenna based on artificial magnetic conductor[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(1): 114-118.



- 2022, 21(4): 671-675.
- [8] Xue K, Zhai H Q. A compact ultrawideband frequency selective rasorber with hybrid 2-D and 3-D structure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(9): 1872-1876.
- [9] Venkatesh G, Thottappan M, Singh S P. Highly angularly stable dual-band stop FSS for blocking satellite downlink frequencies[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(6): 2055-2059.
- [10] Xie J M, Li B, Zhu L. Dual-band circular polarizers with versatile polarization conversions based on aperture-coupled patch resonators[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(7): 5584-5596.
- [11] Sun G, Wang J J, Feng D J, et al. A flexible multifunctional active frequency selective surface with angular and polarization stability for curved surface conformal[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(12): 11752-11760.
- [12] Zhu M, Yuan H, Li H Y, et al. Switchable polarization insensitivity radar absorber/reflector based on active frequency selective surface[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(6): 2005-2014.
- [13] 朱华利, 张勇, 叶龙芳, 等. 基于石墨烯-二氧化钒的太赫兹双控可调宽带吸收器[J]. *光学学报*, 2022, 42(14): 1423002.
- Zhu H L, Zhang Y, Ye L F, et al. Terahertz dual-control adjustable broadband absorber based on graphene-vanadium dioxide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1423002.
- [14] Jiang S L, Kong X K, Kong L Q, et al. Switchable polarization-insensitive frequency-selective surface reflector/absorber with low profile by using magnetic material[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(10): 2078-2082.
- [15] Kong X K, Wang X M, Jin X, et al. Liquid based wideband and switchable 3-D frequency-selective rasorber[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2023, 65(1): 88-95.
- [16] Xue Z, Zhong S M, Ma Y G. Graphene-FSS hybrid absorptive structure with amplitude/frequency dual-modulated passband[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(9): 1711-1715.
- [17] Bakshi S C, Mitra D, Ghosh S. A frequency selective surface based reconfigurable rasorber with switchable transmission/reflection band[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(1): 29-33.
- [18] Shah G, Cao Q S, Abidin Z U, et al. A 2 b dual-band multifunction frequency selective surface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(6): 954-958.
- [19] Shah G, Cao Q S, Abidin Z U, et al. A 4-bit multistate frequency-selective surface with dual-band multifunction response [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(10): 1844-1848.
- [20] Ebrahimi A, Shen Z X, Withayachumnankul W, et al. Varactor-tunable second-order bandpass frequency-selective surface with embedded bias network[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(5): 1672-1680.
- [21] Han Y, Che W Q, Xiu X, et al. Switchable low-profile broadband frequency-selective rasorber/absorber based on slot arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(12): 6998-7008.
- [22] Li R M, Tian J, Jiang B X, et al. A switchable frequency selective rasorber with wide passband[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(8): 1567-1571.
- [23] Liao W J, Chen Y F, Liao C L, et al. Reconfigurable frequency selective surfaces with complementary reflection and transmission responses using duality theorem-based elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(10): 9406-9414.
- [24] Jiang B X, Hu H Q, Tian J, et al. A polarization-insensitive dual-band FSS with high selectivity and independently switchable characteristics[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(1): 14-18.

## Metamaterial Structure Featuring Multi-Mode Switchable Functionality

Wang Zhefei<sup>1</sup>, Huang Jiajun<sup>1</sup>, Wu Jie<sup>1</sup>, Du Hua<sup>1</sup>, Wu Huifang<sup>2</sup>, Ge Junxiang<sup>1</sup>, Wan Fayu<sup>1</sup>,  
Fu Jiahui<sup>3</sup>, Zeng Qingsheng<sup>4\*</sup>, Tayeb A. Denidni<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

<sup>2</sup>*School of Applied Science and Technology, Hainan University, Danzhou 571737, Hainan, China;*

<sup>3</sup>*School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China;*

<sup>4</sup>*College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*

<sup>5</sup>*Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec, Montreal H5A1K6, Canada*

### Abstract

**Objective** Known as frequency-selective surfaces (FSSs), artificial electromagnetic metamaterials are periodic structures that selectively transmit or reflect electromagnetic waves. However, traditional passive FSSs with fixed electromagnetic filtering characteristics have limitations in complex modern environments. To this end, active frequency-selective surfaces (AFSSs) with switchable, reconfigurable, and tunable functionalities have caught attention for their flexible electromagnetic wave control capabilities. Although many researchers have devoted considerable efforts to developing AFSS structures with various advantageous features, limited attention has been paid to independent control of different polarizations. To satisfy the demand for polarization independent control in various applications, we propose a novel AFSS structure with four operating modes. The design allows independent modulation of transmission and reflection for

TE or TM polarized wave at different frequency bands, providing dual-polarization transmission, TE or TM single-polarization transmission, and full-polarization shielding functionalities. Furthermore, the AFSS structure demonstrates excellent angular stability, ensuring almost consistent performance within an incidence range of  $0^{\circ}$ – $45^{\circ}$  for all operating modes. This characteristic is vital for practical applications that require stable functionality under varying incident angles. Finally, the presented polarization independent multi-mode AFSS structure exhibits promising potential in spatial filtering and radome applications that require specific polarization control.

**Methods** We propose a novel multi-mode switchable AFSS structure with polarization independent control capability and excellent angular stability. The design involves a multi-layer filtering structure that enables the desired polarization independent control functionality. Specifically, we carefully design orthogonal top and bottom FSS structures to independently control TE and TM polarizations. Meanwhile, by integrating PIN diodes between adjacent unit cells in the top and bottom layers, we achieve the capability to switch among different operating modes. To enhance the understanding of the structure's working mechanism, we build TE and TM equivalent circuit models of the unit cell for analysis, with various polarized incident waves considered. Subsequently, we investigate the changes in the real and imaginary parts of the impedance for both transmission and shielding modes, providing valuable insights into transmission window generation. Furthermore, we present detailed TE and TM polarized transmission and reflection results for each operating mode at various incident angles. Additionally, we visualize the corresponding electric field distribution to effectively illustrate the working states. This comprehensive analysis highlights the versatility and adaptability of the proposed structure. Finally, to emphasize its advantages, we compare the proposed AFSS structure with some recent similar designs. The comparison demonstrates the unique strengths and benefits of our approach, making it a promising candidate for diverse applications requiring independent polarization control.

**Results and Discussions** The proposed structure provides multi-mode switchability and polarization independent control, enabling four operating modes including dual-polarization transmission, TE polarization transmission and TM polarization reflection, TE polarization reflection and TM polarization transmission, and full-polarization shielding. In the transmission mode, the real parts of the TE and TM polarized input impedance of the structure closely match  $377 \Omega$  at 3.6 GHz and 4.6 GHz respectively, with their imaginary parts approaching zero. Both of them effectively match the air impedance, and consequently efficient transmission of both polarizations is achieved at these frequencies (Fig. 4). The structure achieves mode switching by adjusting the bias states of the top and bottom PIN diodes, ensuring that each mode exhibits highly stable performance independent of the others. Additionally, the structure demonstrates sound angular stability within an incidence range of  $0^{\circ}$ – $45^{\circ}$  (Fig. 5). Based on these functionalities, the proposed structure has great application prospect in spatial filtering, antenna enclosures, and other relevant fields.

**Conclusions** We present a novel polarization independent control multi-mode switchable frequency-selective surface filter/shield. The structure is designed based on the equivalent circuit model with a multi-layer FSS architecture, where PIN diodes are loaded on the top and bottom layers to achieve independent control of TE and TM waves. By setting different bias voltages on the diodes, the structure can switch among the four operating modes, enabling transmission or reflection control of TE and TM waves. In the transmission mode, the structure forms low-insertion-loss transmission windows at center frequencies of 3.6 GHz and 4.6 GHz for TE and TM waves respectively. In the shielding mode, electromagnetic waves are prevented from penetrating the structure. Within the incident angle range of  $0^{\circ}$ – $45^{\circ}$ , each mode exhibits stable performance, and the working states of different polarizations are not affected by other modes. In conclusion, the multi-mode reconfigurable AFSS design has promising application potential in wireless communication systems.

**Key words** materials; metamaterials; multi-mode switchable metamaterials; polarization independent control structure; radome