

传输特性动态可切换的人工表面等离子激元传输线设计

陈俊凡¹, 张大维^{1, 2}, 王宇宙¹, 孙亚秀¹, 姜 弢¹, 吴 群³, 张 狂³

(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨, 150001; 2. 毫米波国家重点实验室, 南京, 210096;
3. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 哈尔滨, 150001)

摘要 设计了一种传输特性电控可调的人工表面等离子激元传输线。通过介质块等效模型分析了 SSPP 单元结构在二极管通断状态下的色散曲线, 并分析了不同单元结构参数对色散特性的影响。在此基础上, 对 SSPP 传输线进行了设计、仿真与实测, 并观察了频点处的场分布图。仿真与实测结果表明: 通过同步控制 PIN 二极管的通断状态可实现传输线在带通与带阻传输特性之间的动态切换。其中, 二极管导通状态下为带通传输特性, 实测反射率低于 -10 dB 的通带范围为 $2.67 \sim 9.47$ GHz。二极管截止状态下为带阻传输特性, 实测带外抑制优于 -20 dB 的阻带范围为 $4.04 \sim 5.54$ GHz, 实测结果与仿真结果吻合情况良好。文中所做工作对于 SSPPs 的动态传输调控具有重大意义, 也将极大地促进有源 SSPP 电路与器件的发展。

关键词 动态调控; 超材料; 人工表面等离子激元; PIN 二极管

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.06.003

中图分类号 TB822; TN61 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)06-0023-06

A Design of Dynamically Switchable Spoof Surface Plasmon Transmission Lines with Variable Transmission Characteristics

CHEN Junfan¹, ZHANG Dawei^{1, 2}, WANG Yuzhou¹, SUN Yaxiu¹, JIANG Tao¹, WU Qun³, ZHANG Kuang³

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China;
3. Department of Microwave Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract An electronically controllable spoof surface plasmon polaritons (SSPPs) transmission line with variable transmission characteristics is designed. The dispersion curves of the SSPP unit structure in a state of on- and off of a diode are analyzed by using an equivalent model based on a dielectric block, and the influence of different unit structure parameters on the dispersion characteristics is also examined. On the basis of these analyses, a SSPP transmission line is designed, simulated, and experimentally measured. The simulation and measurement results show that dynamic switching between passband and stop-band transmission characteristics can be achieved by synchronously controlling the on- and off state of a PIN diode. Specifically, in the on state of a diode, the passband transmission characteristics are observed with a measured S_{11} below -10 dB in the frequency range of 2.74 GHz to 9.47 GHz. In the off state of a

收稿日期: 2023-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(62201169); 黑龙江省自然科学基金(LH2021F014); 毫米波国家重点实验室开放基金(K202331); 哈尔滨工程大学高水平科研引导专项(3072022QBZ0804)

作者简介: 陈俊凡(1999—), 男, 天津人, 硕士生, 研究方向为人工表面等离子激元。E-mail: chenjunfan@hrbeu.edu.cn

通信作者: 张大维(1988—), 男, 黑龙江大庆人, 讲师, 研究方向为人工表面等离子激元超材料。E-mail: zdw@hrbeu.edu.cn

引用格式: 陈俊凡, 张大维, 王宇宙, 等. 传输特性动态可切换的人工表面等离子激元传输线设计[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(6): 23-28.
CHEN Junfan, ZHANG Dawei, WANG Yuzhou, et al. Design of Dynamically Switchable Spoof Surface Plasmon Transmission Lines with Variable Transmission Characteristics[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(6): 23-28.

diode, the stopband transmission characteristics are observed, with a measured rejection level being prior to -20 dB in the frequency range of 4.04 GHz to 5.54 GHz. The experimental results and the simulated results are identical. This work is of great significance for the dynamic control of SSPPs transmission and will greatly promote the development of active SSPP circuits and devices.

Key words dynamic controlling; meta-material; spoof surface plasmon polariton; PIN diode

表面等离子激元(surface plasmon polaritons, SPPs)是一种存在于金属-电介质界面上的光波段段的表面电磁波。它的电磁能量沿着分界面切线方向传播,而在法线方向呈指数衰减。由于其独特的场约束特性,SPPs可以显著增强表面电磁波与传播界面之间的相互作用。但是,在微波和太赫兹频段,金属的导体特性使得SPPs不再具有良好的场约束能力^[1]。为了解决这个问题,学者们提出了一种由孔和凹槽阵列形成的等离子体超材料,被称为人工表面等离子激元(spoof surface plasmon polaritons, SSPPs)^[2]。它是一种人工设计的周期性金属结构,可以在微波频段继承光波频段的表面等离子激元特征,并具有强场束缚、低损耗、可调控、小型化、易集成等优点。通过在空间波导模式和SSPP之间采用高效模式转换^[3-7],人工等离子体超材料可以在传统的微波平面电路中用作SSPP传输线。在无源器件方面,研究主要集中在滤波器和天线的设计上。人工表面等离子激元的高频抑制特性为通带、阻带等滤波器的设计提供了多种可能性^[8-10]。此外,还可以通过将SSPPs转变为定向辐射波来设计天线^[11-14]。

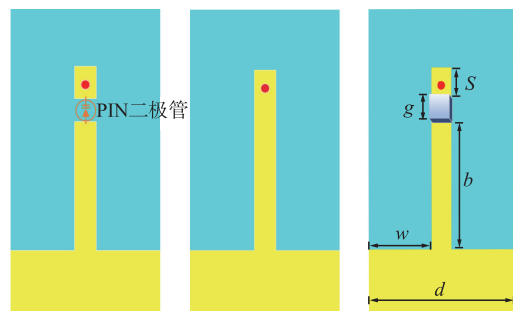
相比于无源器件,引入可调谐元件的有源器件的设计实现了更灵活的功能,并且不再受固有结构的限制。由此,基于SSPPs的可调谐器件和系统由于其灵活性和功能多样性已成为最先进的无线通信技术之一。具有代表性的如耦合器和隔离器,通过与变容二极管集成的SSPP可重构耦合器可以在正向和反向模式之间切换状态^[15-16]。此外,通过使用隔离器的非互易设备,集成电子器件的小型化研究已经发展^[17]。因此,基于SSPPs的有源器件和系统具有广泛的应用前景。

本文提出了一种传输特性动态可切换的人工表面等离子激元传输线的设计方法。通过在短路枝节中加载PIN二极管构造SSPP单元,实现了对SSPPs模式的实时调控。通过改变PIN二极管的位置构造SSPP传输线的过渡结构,实现了传输线在带通与带阻传输特性之间的动态切换,为后续应用研究提供新的思路 and 选择。

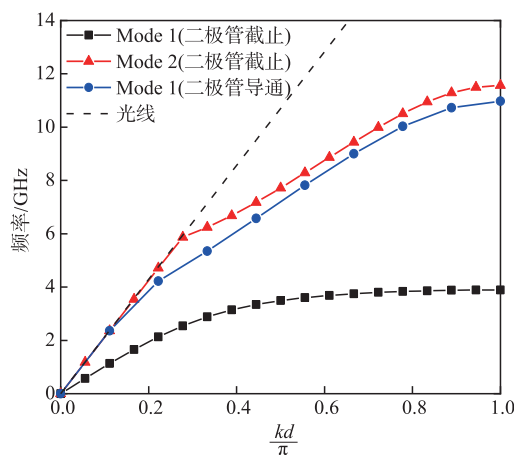
1 单元设计与分析

为使单元结构能够具有动态可调特性的功能,

设计了一种由微带线及垂直与它的加载PIN二极管的金属短截线的单元,结构为表层金属(加载二极管)—介质板—金属地板。其中介质板采用正切损耗小且成本低廉的F4B介质($\epsilon_r = 2.65$, $\tan\delta = 0.003$),厚度为1 mm,表层金属结构为倒T型。表层金属和金属地板的材料为铜,厚度为0.035 mm,电导率为 5.8×10^7 S/m。表层金属中的短截线由两部分组成,中间被一个间隙隔开。为了对单元结构进行色散曲线仿真,在间隙处,使用有限体积介电模型来模拟处于关断状态的PIN二极管(导通状态的PIN二极管由金属薄片代替)^[18-19]。短截线的上部通过金属过孔与金属地板相连。金属部分以黄色显示,而电介质部分以蓝色显示。通过仿真优化得到单元中各参数长度为: $s = 1$ mm, $b = 5.6$ mm, $w = 3$ mm, $d = 7$ mm, $g = 1$ mm。如图1所示。



(a) 单元模型示意图 (b) 短路等效模型 (c) 开路等效模型



(d) 2种状态下的单元结构色散曲线

图1 设计单元结构的模式分析

图1(d)展示了所提出的SSPP单元结构的色散曲线图。通过对相位差实现从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的扫参即可得到微带倒T型SSPP单元的色散曲线图。从图中可以看出随着波数的增加,其表面波的色散曲线明

显偏离光线,并逐渐趋近于一个渐进频率。根据上述方法,完美电导体(PEC)和无损电介质(相对介电常数 $\epsilon_r=85$)分别用于表示二极管的导通和截止状态。2种模式的渐进频率在截止状态下分别为 3.98 GHz 和 11.61 GHz,在导通状态下为 10.90 GHz。

PIN 二极管选择 SMP1320-040LF SOD-882,对应 2 种状态的二极管等效电路如图 2 所示^[20]。在 CST 微波工作室中,可以通过 2 个并联的集总元件来表示这一等效模型。然而对单元求解的本征模求解器存在一定的局限性,无法对集总元件进行计算。因此,根据二极管的实际封装设计了尺寸为 $1.65\text{ mm} \times 1.35\text{ mm} \times 1.05\text{ mm}$ 的无损介质块,通过模拟,其相对介电常数 ϵ_r 为 85 时与集总元件模型的参数最拟合。

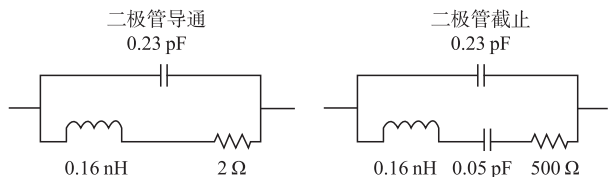
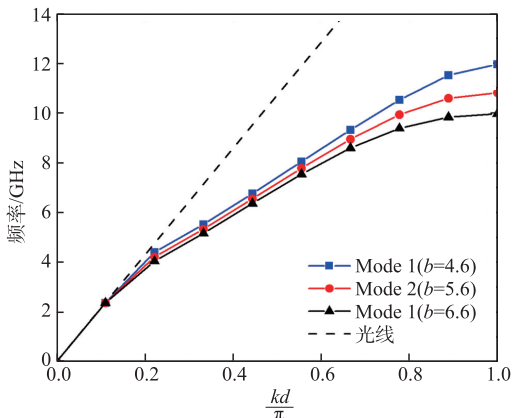


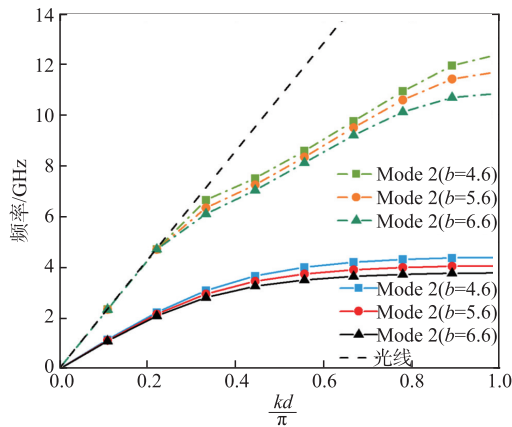
图2 PIN 二极管等效电路图

可以看到,SSPPs 的强场约束特性使得无论二极管处于哪种状态,色散曲线都会不同程度偏离光线。当研究可调带通 SSPP 传输线时,可以通过观察模式 1(导通状态)的渐进频率来获得相应 S_{21} 曲线的上截止频率,而当研究可调带阻 SSPP 传输线时则对应截止状态下的 2 个模式的渐进频率。二极管处于截止状态下的 2 个模式的色散曲线的渐进频率可以用来获得对应传输线的带宽。因此,我们可以通过分析色散曲线来预测 2 种情况下传输线的带宽和截止频率。

此外,枝节长度和单元周期宽度也会对色散曲线的渐进频率产生影响。随着枝节长度的增加,SSPP 单元的色散曲线偏离光线程度也逐渐增加,如图 3 所示。而随着单元周期宽度增加,也有同样的结果,如图 4 所示。

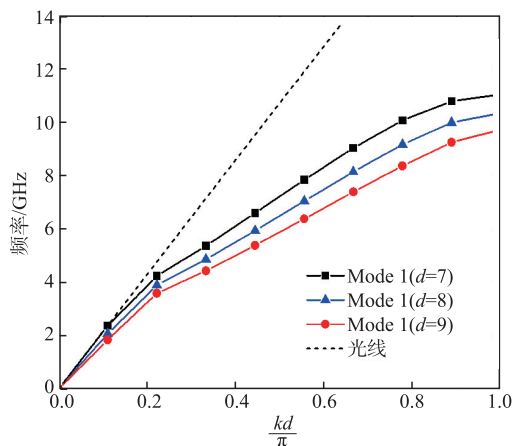


(a)导通时模式 1 的色散曲线

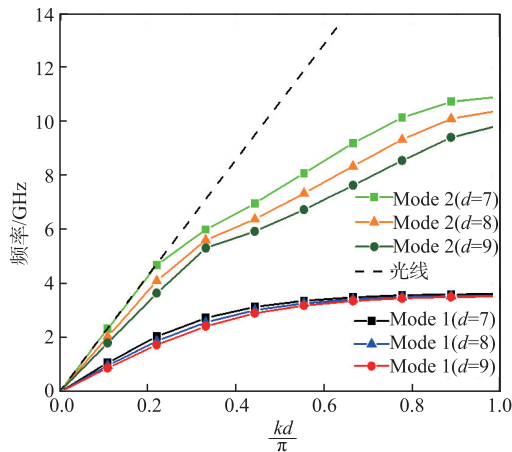


(b)截止时双模式色散曲线

图3 二极管在不同状态下枝节长度对色散曲线影响



(a)导通时模式 1 的色散曲线



(b)截止时双模式色散曲线

图4 二极管在不同状态下周期宽度对色散曲线影响

综上所述,当人工表面等离子元单元结构中的枝节长度和单元周期宽度发生变化时,其等离子元共振条件也会随之发生改变,进而影响其色散曲线。当枝节长度增加时,单元内的等离子元场会在结构中更加强烈地相互耦合,导致共振频率下降,从而使得色散曲线整体向低频方向平移。而当单元周期宽度增加时,单元内的等离子元场会在结构中呈现出更强的空间周期性,导致等离子元共振频率进一步下降,从而使得色散曲线更加向低频方向倾斜。

2 SSPP 传输线设计与仿真结果

基于上述设计的 SSPP 单元结构具有良好的场抑制能力,以及依靠二极管通断改变特性的能力,本文设计了一种基于上述单元的 SSPP 传输线结构。

与扫描单元结构相位时的所用的电介质块相比,在仿真传输特性时,时域求解器不再限制集总元件的使用,通常可以用更接近实际性能的集总等效模型来表示二极管。图 5(a)为所设计出的传输线结构的整体示意图。传输线由 11 个带 PIN 二极管的级联单元组成。电介质基板的总体尺寸设定 $W = 28.8 \text{ mm}$, $L = 119 \text{ mm}$ 。图 5(b)为过渡段的设计。过渡短截线的长度 $L_1 = 2.6 \text{ mm}$, $L_2 = 3.6 \text{ mm}$, $L_3 = 4.6 \text{ mm}$ 。图 5(c)为周期性结构,条带宽度为 2.8 mm 。从第 1 个金属短截线到边缘的距离 $T = 10 \text{ mm}$ 。其他参数与图 1 所示单元结构参数相同。文中所提出传输线的仿真 S 参数如图 6 所示。

为了获得短路结构的 S 参数,应该将 2 个串联集总元件的参数调整为二极管导通时的参数,从而使得表面金属可以与金属地连接。在图 6(a)中,当二极管处于导通状态时,传输特性显示为通带,仿真 S_{11} 低于 -10 dB 的通带范围为 $2.74 \sim 9.50 \text{ GHz}$ 。同时,当二极管处于断开状态时,阻带特性曲线如图 6(b)所示。带外抑制优于 -20 dB 的阻带范围为 $3.21 \sim 6.57 \text{ GHz}$ 。

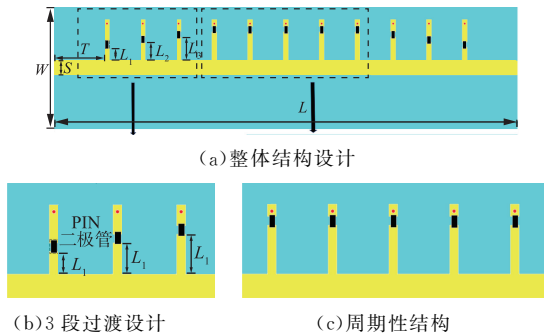


图 5 负载 PIN 二极管的传输线设计

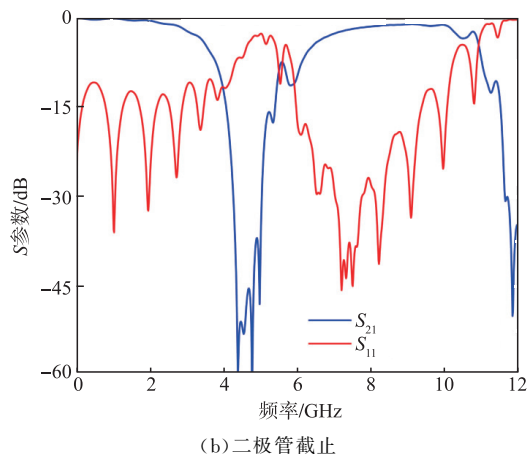
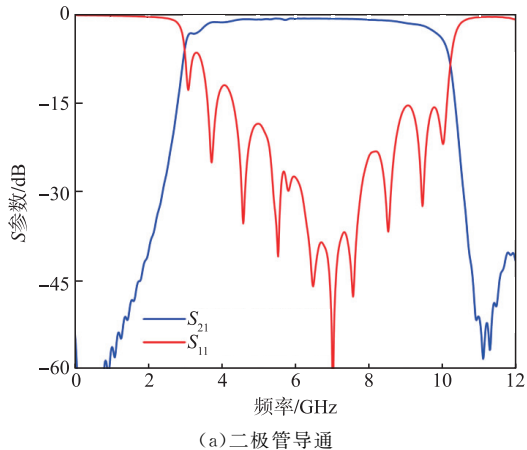


图 6 二极管在不同状态下传输线仿真 S 参数曲线

为了更直观地观察通带切换效果,在模型仿真过程中于 2 GHz 、 5 GHz 、 8 GHz 3 个频点处添加场监视器,从而观察对应的近场分布,如图 7 所示。

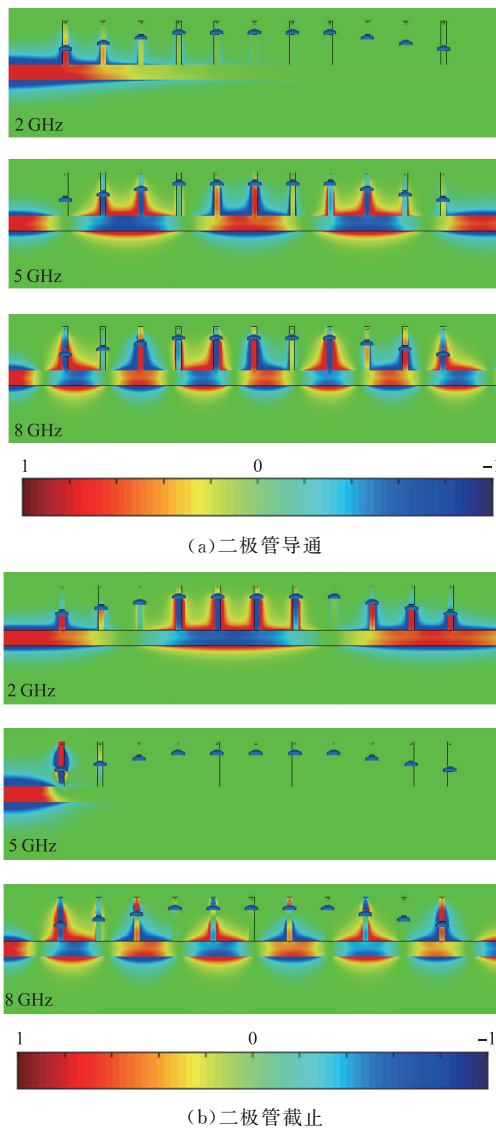


图 7 二极管在不同状态下传输线场分布

根据二极管导通时的仿真 S 参数结果,通带范围是 $2.91 \sim 10.24 \text{ GHz}$,而从图 7(a)~(c)的场分布图中可以看出, 2 GHz 频点处为阻带,传输线右

端口没有电磁信号传出,而 5 GHz 与 8 GHz 处于通带内,有明显的信号能量传播。同理二极管截止时的 3 个频率点处的场分布图也能与 S 参数体现的双通带对应。

综上所述,通过 S 参数曲线可以观察到通过二极管的动态控制,实现了通带与阻带两种传输特性的切换,且通带具有较宽的频率范围。场分布图也可较好地映照上述通带与阻带效果。阻带特性对应的截止频率可以和色散曲线的渐近频率较好的吻合。

3 实测结果分析与讨论

为了验证本文提出的设计方法以及分析该传输线结构的实际性能,我们对其进行了样品加工及测试。样品实物图如图 8 所示。通过将测试结果与仿真结果进行比较,可得图 9 所示的对比结果。

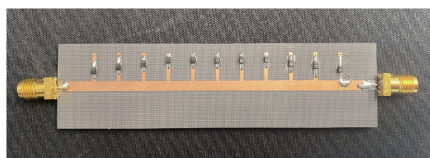
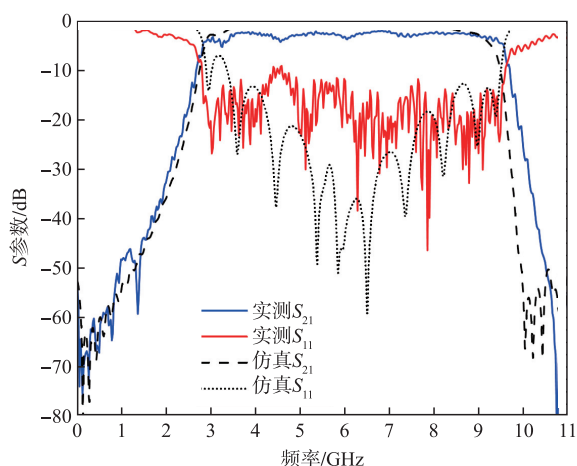
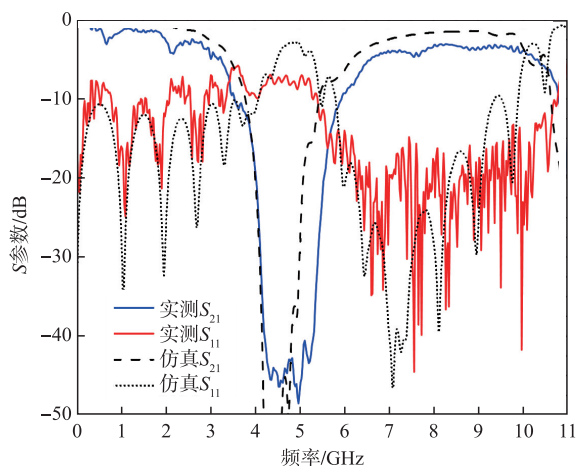


图 8 加工实物图



(a) 二极管导通



(b) 二极管截止

图 9 二极管在不同状态下传输线实测 S 参数曲线

在实验过程中,通过外置电源时 PIN 二极管施加偏置电压,从而实现对二极管通断的同步控制,最终获取了 S 参数曲线数据。

从 S 参数图中可以看出,实测结果与仿真结果呈现的趋势具有较好的一致性。由于加工误差以及二极管器件的寄生电阻的影响,使得实际测试中产生了轻微的阻抗失配以及插入损耗的增大(仿真过程中忽略了金属损耗以及二极管器件的影响)。虽然存在微小频偏,但在误差范围影响内所设计的可切换通带功能很好的达到了预期,验证了本文方法的有效性。在未来的工作中,一方面对仿真模型进行优化,充分考虑二极管寄生电阻对 S 参数的影响,进而提高仿真与实测结果的拟合程度;另一方面从优化设计结构角度降低二极管的寄生电阻,从而改善插入损耗性能,如采用双二极管并联的方式加载器件^[21]。

4 结语

本文通过加载周期性 PIN 二极管来实现传输特性动态可调的 SSPP 传输线。当二极管分别处于导通和截止 2 种状态时,单元结构等效为在短路和开路 2 种不同状态下工作,从而实现了 SSPPs 模式的动态调控。在此基础上,所提出的 SSPP 传输线可以在 2 种传输特性之间动态切换,即带通和带阻特性。当二极管导通时对应带通特性,实测 S_{11} 低于 -10 dB 的频带范围为 2.67~9.47 GHz。当二极管截止时对应带阻特性,实测带外抑制优于 -20 dB 的阻带可从 4.04~5.54 GHz。通过比较,实测与仿真结果的趋势吻合良好。同时, S_{21} 曲线中的上、下截止频率也与色散曲线基本保持一致。本文工作在基于 SSPPs 的可重构微波器件领域具有良好应用前景。

参考文献

- [1] 张浩驰,何沛航,牛凌云,等.人工表面等激元超材[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 372-391.
- [2] PENDRY J B, MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J. Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces [J]. Science, 2004, 305 (5685): 847-848.
- [3] ZHANG D W, SUN Y X, ZHANG K, et al. Short-Circuited Stub-Loaded Spoof Surface Plasmon Polariton Transmission Lines with Flexibly Controllable Lower Out-of-Band Rejections [J]. Optics Letters, 2021, 46(17): 4354-4357.
- [4] ZHANG D W, SUN Y X, ZHANG K, et al. High-

- Efficiency Surface Plasmonic Polariton Waveguides with Enhanced Low-Frequency Performance in Microwave Frequencies [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2121-2129.
- [5] ZHANG D W, SUN Y X, ZHANG K, et al. High-Efficiency Broadband Excitation and Propagation of Second-Mode Spoof Surface Plasmon Polaritons by a Complementary Structure [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2766-2769.
- [6] ZHANG D W, SUN Y X, ZHANG K, et al. Broadband high-Order Mode of Spoof Surface Plasmon Polaritons Supported by Compact Complementary Structure with High Efficiency [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(13): 3176-3179.
- [7] ZHANG D W, LIU X, SUN Y X, et al. Compact Transition Enabled Broadband Propagation of Spoof Surface Plasmon Polaritons Based on the Equivalent Circuit Model [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55: 165101.
- [8] ZHANG D W, ZHANG K, WU Q, et al. Efficient Propagation of Spoof Surface Plasmon Polaritons Supported by Substrate Integrated Waveguide with Band-pass Features [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53: 425104.
- [9] ZHU D W, ZENG R M, TANG Z T, et al. Design of Multiband Filter Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 172401.
- [10] ZHANG H C, HE P H, GAO X X, et al. Pass-Band Reconfigurable Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2018, 30: 134004.
- [11] WANG M, MA H F, TANG W X, et al. Leaky-Wave Radiations with Arbitrarily Customizable Polarizations Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12: 014036.
- [12] WANG M, WANG H C, TIAN S C, et al. Spatial Multi-Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68 (12): 8168-8173.
- [13] HAO R Z, BIAN W, TAO S. Beam Manipulation of Antenna With Large Frequency-Scanning Angle Based on Field Confinement of Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(4): 3022-3027.
- [14] ZHANG Q L, CHEN B J, CHAN K F, et al. Terahertz Circularly and Linearly Polarized Leaky-Wave Antennas Based on Spin-Orbit Interaction of Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69 (8): 4347-4358.
- [15] LIU X Y, LEI Y, ZHENG X, et al. Reconfigurable Spoof Plasmonic Coupler for Dynamic Switching Between Forward and Backward Propagations [J]. *Advanced Materials Technology*, 2022, 7: 220129.
- [16] CHEN H Y, MA H, WANG J F, et al. Broadband Spoof Surface Plasmon Polariton Couplers Based on Transmissive Phase Gradient Metasurface [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50: 375104.
- [17] GAO X X, ZHANG J J, MA Q, et al. Nonmagnetic Spoof Plasmonic Isolator Based on Parametric Amplification [J]. *Laser Photonics Reviews*, 2022, 16: 2100578.
- [18] ZHANG H C, HE P H, GAO X X, et al. Pass-Band Reconfigurable Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2018, 30: 134004.
- [19] ZHANG H C, CUI T J, LUO Y, et al. Active Digital Spoof Plasmonics [J]. *National Science Review*, 2022, 7: 261-269.
- [20] LUSTRAC A, RATNI B, PIAU G P, et al. Tri-State Metasurface-Based Electromagnetic Screen with Switchable Reflection, Transmission, and Absorption Functionalities [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3 (3): 1184-1190.
- [21] HE P H, FAN Y, NIU L Y, et al. Analysis, Reduction, and Utilization of Loss in Reconfigurable Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, 71 (3): 945-955.

(编辑:徐楠楠)