

# 光学学报

## 基于人工表面等离子体激元高阶模式的带通滤波器

朱华利<sup>1</sup>, 张勇<sup>1\*</sup>, 叶龙芳<sup>2,3</sup>, 黎雨坤<sup>1</sup>, 徐锐敏<sup>1</sup>, 延波<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>电子科技大学极高频复杂系统国防重点学科实验室, 四川 成都 611731;

<sup>2</sup>厦门大学电子科学与技术学院电磁声学研究院, 福建 厦门 361005;

<sup>3</sup>厦门大学深圳研究院, 广东 深圳 518057

**摘要** 基于人工表面等离子体激元(SSPPs)的一阶高次模,设计了一种具有优异带通性能的滤波器。所采用的SSPPs单元结构为类八木天线结构,该结构可以有效降低SSPPs的渐近频率。此外,通过改变SSPPs单元结构的几何参数,可独立控制其渐近频率和与自由空间中光线的交点频率。与具有低通特性的SSPPs基模相比,一阶高次模具有天然的带通特性,且不需要采用额外的阶梯渐变过渡结构。为了验证SSPPs高阶模式应用于带通滤波器设计的可行性,制作并测量了基于该方法的SSPPs滤波器。测试结果表明,该滤波器在6~9.9 GHz的通带频率范围内的插入损耗小于1 dB,带内回波损耗优于10 dB,实验结果与仿真结果具有良好的吻合度。

**关键词** 光学器件; 带通滤波器; 人工表面等离子体激元; 高阶模; 传输线

中图分类号 TN713+.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1523001

## Bandpass Filter Based on High-Order Mode of Spoof Surface Plasmon Polaritons

Zhu Huali<sup>1</sup>, Zhang Yong<sup>1\*</sup>, Ye Longfang<sup>2,3</sup>, Li Yukun<sup>1</sup>, Xu Ruimin<sup>1</sup>, Yan Bo<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Fundamental Science on EHF Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China;

<sup>2</sup>Institute of Electromagnetics and Acoustics, School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

<sup>3</sup>Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen 518057, Guangdong, China

**Abstract** A bandpass filter is proposed in this paper by utilizing the high-order mode of spoof surface plasmon polaritons (SSPPs). The adopted SSPPs unit cell is a Yagi-like antenna structure, which can effectively reduce the asymptotic frequency of the SSPPs. In addition, the asymptotic frequency of the mode 1 and the intersection frequency with the light line in free space can be manipulated by adjusting the geometric parameters of the SSPPs unit cell. Compared with the fundamental mode with low-pass characteristics, the mode 1 has inherent band-pass response and does not require an additional gradient transition structure for excitation. In order to verify the feasibility of proposed high-order mode based bandpass filter, a topology is fabricated and measured by the vector network analyzer. The measured results show that the insertion loss is less than 1 dB from the frequency range of 6 GHz to 9.9 GHz, and the in-band return loss is better than 10 dB, which is in agreement with the simulated ones.

**Key words** optical devices; bandpass filter; spoof surface plasmon polaritons; high-order mode; transmission line

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-01-19; 录用日期: 2022-02-11

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA0715304)

通信作者: \*yongzhang@uestc.edu.cn; \*\*yanbo@uestc.edu.cn;

# 1 引言

表面等离子体激元(SPPs)是一种沿导体表面在光频率范围内传播的独特的表面电磁波<sup>[1-2]</sup>,在亚波长区域内具有强光约束性且能够突破衍射极限,在高密度集成光学元件和电路设计中具有潜在的应用前景,并受到了越来越多的关注<sup>[3-8]</sup>。2004年,Pendry等<sup>[9-10]</sup>基于金属超构表面突破性地提出了人工表面等离子体激元(SSPPs),它与SPPs具有相似的独特性能且能工作在微波及太赫兹波段。SSPPs的表面电磁波具有强场约束性,可以将电磁能量束缚在亚波长范围内且使其沿周围呈指数衰减。此外,SSPPs的色散特性可以通过优化周期性单元结构的几何参数实现任意调整,具有通用性<sup>[11-13]</sup>。然而,SSPPs笨重的三维结构导致其很难与传统的微波和太赫兹平面电路集成。

近年来,崔铁军院士团队<sup>[14-16]</sup>提出了基于周期性锯齿结构金属超构表面的超薄SSPPs传输线,成功将SSPPs应用到微波及太赫兹平面电路中,大大推动了SSPPs技术的发展。此后,形状各异的SSPPs传输线被报道,如折叠型<sup>[17-18]</sup>、双面锯齿形<sup>[19]</sup>等。在此基础上,基于SSPPs传输线的功能器件也被大量研究,如传感器<sup>[20]</sup>、滤波器<sup>[21]</sup>、天线<sup>[22-23]</sup>、功分器<sup>[24]</sup>、分频器<sup>[25]</sup>等。

上述器件均是基于SSPPs的基模进行研究和设计的,SSPPs基模与空间导模模式的天然隔离,导致难以实现高效的直接激励<sup>[26]</sup>。因此,通常需要采用额外的阶梯渐变结构实现SSPPs的基模模式与传统传输线[如微带线(MS)、共面波导、矩形波导]之间的阻抗及模式匹配,但这种阶梯渐变结构将不可避免地带来额外的损耗和占用面积<sup>[27]</sup>。研究表明,当SSPPs的锯齿深度大于单元结构周期长度时,SSPPs传输线就可以工作在高阶模式状态下<sup>[28-29]</sup>,且这种高阶模式可以通过简单的梯形转换直接由微带线有效地激发,省去了阶梯渐变过渡结构带来的额外损耗<sup>[30-31]</sup>。然而,目前关于SSPPs的高阶模式应用方面的研究还相对较少,特别是对于具有天然带通效应的一阶高次模而言,这是非常具有研究价值的。

为此,本文提出了一种基于SSPPs一阶高次模的带通滤波器。首先对采用类八木天线结构SSPPs单元结构的基模和一阶高次模的色散特性进行了研究,与基模具有的低通特性不同的是,一阶高次模具有天然的带通响应。同时,通过简单的梯形转换,SSPPs的一阶高次模被有效地激发,从而产生具有良好传输特性的通带。

## 2 基于SSPPs高阶模式的带通滤波器

### 2.1 SSPPs的高阶模式研究

基于类八木天线结构的SSPPs单元结构如图1所示,与传统的锯齿形SSPPs单元结构不同的是,其通过在锯齿型SSPPs单元结构的基础上刻蚀出5个对称的凹槽而形成。两种金属结构的SSPPs单元均采用

电导率为 $5.8 \times 10^7$  S/m的铜材料,并刻蚀在厚度为0.508 mm的Rogers RT5880衬底材料上,其介电常数为2.2,正切损耗为0.0009。同时,为了提高SSPPs的场约束能力,基片的背面为连续的金属地结构。类八木天线SSPPs单元结构的周期长度 $d=7$  mm,整体长度 $h=8$  mm,整体宽度 $l=4$  mm,线条宽度 $W_1=2.3$  mm, $W_2=0.5$  mm。

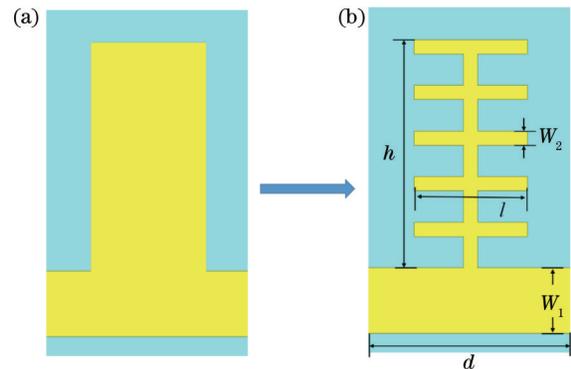


图1 SSPPs单元结构示意图。(a)传统锯齿型结构;(b)类八木天线结构

Fig. 1 Layouts of SSPPs unit structure. (a) Conventional groove structure; (b) proposed Yagi-like antenna structure

首先,采用商业电磁仿真软件CST Microwave Studio的本征仿真控件对上述两种SSPPs单元结构的基模和一阶高次模进行仿真。在色散曲线仿真过程中:首先在完成单元结构建模后将传播方向上的边界条件设置为周期性条件;然后将非周期方向上的边界往外延拓一定距离(一般取10倍周期长度)后设置电边界或磁边界;最后,将两周期性边界条件之间的固有相移设置为 $\phi$ ,并利用参数扫描功能获得不同相移状态下的模式频率。根据定义,固有相移值 $\phi$ 与传播方向上的传播常数 $k$ 具有如下换算关系<sup>[22]</sup>:

$$k = \phi\pi / (180d). \quad (1)$$

如图2所示,传统锯齿型SSPPs单元结构与类八木天线SSPPs单元结构的两种模式的色散曲线随着固有相移值的增大逐渐偏离光线,直到接近最大频率值即渐近频率。当色散曲线接近渐近频率时,SSPPs对场的束缚能力达到最强。值得注意的是,两种SSPPs单元的基模与一阶模均没有重叠部分,说明每个模式都可以实现单模传播,这是与传统的矩形波导不同的。从图2中可以看出,对于传统锯齿型SSPPs单元结构的色散曲线而言:其基模的渐近频率为5.20 GHz,具有低通特性;一阶高次模的起始频率为7.18 GHz,渐近频率为14.27 GHz,呈现出固有的带通滤波器。与此不同的是,类八木天线SSPPs单元结构的基模的渐近频率为3.57 GHz,一阶高次模的起始频率为5.29 GHz,渐近频率为10.20 GHz。这表明,在相同的占用面积下,采用类八木天线单元结构可以大大降低SSPPs的渐近频率;也就是说,在相同的渐近频率下,基于类八木天线单元结构的SSPPs具有更小

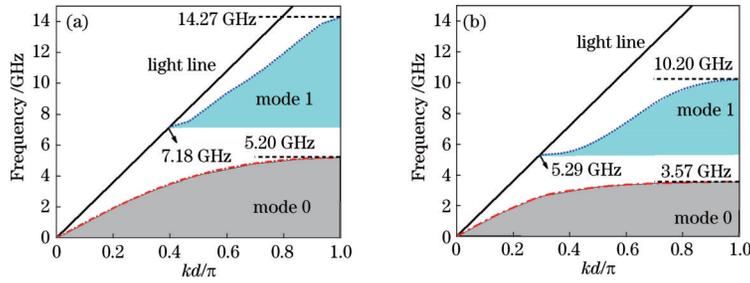


图 2 SSPPs 单元色散曲线仿真结果。(a)传统锯齿型; (b)类八木天线结构型

Fig. 2 Simulated dispersion curves of SSPPs unit. (a) Conventional groove structure; (b) proposed Yagi-like antenna structure

的占用面积。这是由于 SSPPs 的渐近频率主要是由锯齿深度决定的,而类八木天线 SSPPs 单元结构的正交凹槽增加了 SSPPs 的相对有效凹槽深度,进一步地降低了 SSPPs 的渐近频率。

为了更好地揭示两个不同模式下 SSPPs 单元结构的工作状态,对传统锯齿型 SSPPs 单元结构和类八木天线 SSPPs 单元结构的电场分布进行了仿真。如图 3(a)与图 3(c)所示,两种 SSPPs 单元结构的基模在纵向上没有共振,只具有慢波特性。而从图 3(b)与图

3(d)中可以看到,两种 SSPPs 单元结构的一阶高次模式中存在着纵向上的两个共振,即该模式下既存在慢波又存在快波。在高阶模态下,快波传播的截止频率较低,与带状线中的截止频率相同<sup>[27]</sup>。这可以理解为:在一阶高次模工作情况下,锯齿型和类八木天线型结构作为共面带状线,其表现为一个一端短路、一端开路的谐振器。因此,SSPPs 每个模式的工作频段可以分别对应于等效谐振器的每个共振状态,其信号的传播是通过对各锯齿谐振状态间的激励和耦合来实现的<sup>[25]</sup>。

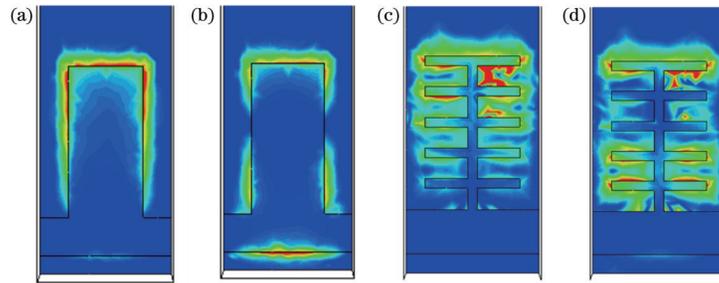


图 3 SSPPs 单元结构电场分布图。(a)传统锯齿型 SSPPs 单元结构的基模电场分布; (b)传统锯齿型 SSPPs 单元结构的一阶高次模电场分布; (c)类八木天线 SSPPs 单元结构的基模电场分布; (d)类八木天线 SSPPs 单元结构的一阶高次模电场分布

Fig. 3 Simulated electric field distributions of SSPPs unit. (a) Electric field distribution of conventional groove-based SSPPs unit for mode 0; (b) electric field distribution of conventional grooves-based SSPPs unit for mode 1; (c) electric field distribution of SSPPs unit of proposed Yagi-like antenna structure for mode 0; (d) electric field distribution of SSPPs unit of proposed Yagi-like antenna structure for mode 1

以往的研究工作表明,SSPPs 基模的渐近频率主要是由锯齿深度  $h$  决定,进一步地,研究一阶高次模与类八木天线 SSPPs 单元结构参数的关系也是非常重要的。如图 4(a)所示,当类八木天线 SSPPs 单元宽度

$l$  从 3 mm 增加到 5 mm 时:一阶高次模与光线的交点(即下截止频率)逐渐从 5.55 GHz 减小到 5.07 GHz;其渐近频率(即上截止频率)逐渐从 11.40 GHz 减小至 9.28 GHz。如图 4(b)所示,当类八木天线 SSPPs 单元

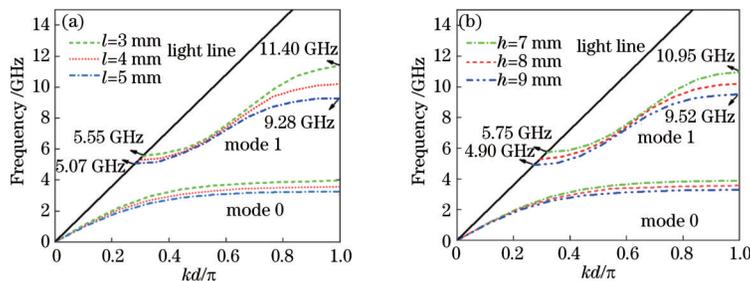


图 4 类八木天线 SSPPs 单元结构的色散曲线与结构尺寸的关系。(a)不同结构宽度  $l$  下; (b)不同结构长度  $h$  下

Fig. 4 Simulated dispersion curves of SSPPs unit of Yagi-like antenna structure varying with structure size under different structure parameters. (a) For different width  $l$ ; (b) for different length  $h$

长度  $h$  从 7 mm 增加到 9 mm 时:一阶高次模与光线的交点(即下截止频率)逐渐从 5.75 GHz 减小到 4.90 GHz;其渐近频率(即上截止频率)逐渐从 10.95 GHz 减小至 9.52 GHz。因此,一阶高次模所产生的通带频率范围可以由类八木天线的结构参数来控制,通过设置不同的结构尺寸即可灵活调节所需的通带。从图 4 中可以看出,一阶高次模的下截止频率受结构长度  $h$  的影响较大,而上截止频率对不同结构宽度  $l$  更敏感。

### 2.2 带通滤波器的实现

与具有低通特性的基模相比,一阶高次模具有固有的带通响应,且这种带通响应不需要添加额外的高通滤波和阶梯渐变过渡结构,仅需采用微带线直接进行馈电激励即可。因此,为了验证类八木天线 SSPPs

单元结构的带通特性,设计了一款工作在微波频段下的 SSPPs 高模传输线结构。如图 5 所示,SSPPs 高模传输线结构由三个部分组成:微带线、梯形过渡(Taper)和 4 个类八木天线结构 SSPPs 单元组成的阵列。微带线宽度  $W_0 = 1.55$  mm,特征阻抗为  $50 \Omega$ ,作为 SSPPs 的馈电结构;梯形过渡将微带线与 SSPPs 阵列无缝连接,且只需占用很小的空间。通过优化梯形结构的长度  $L_t$  可实现微带线与 SSPPs 阵列之间的阻抗和动量匹配,优化后的梯形长度  $L_t = 5.5$  mm。SSPPs 阵列是由 4 个相同的类八木天线 SSPPs 单元结构组成的,这些单元结构的尺寸与图 1(b)中的单元结构具有相同的参数。整体结构均刻蚀在厚度为 0.508 mm 的 Rogers RT5880 衬底上,衬底背面为连续的金属地面,整体长度  $L_{sub} = 49$  mm,宽度  $W_{sub} = 20$  mm。

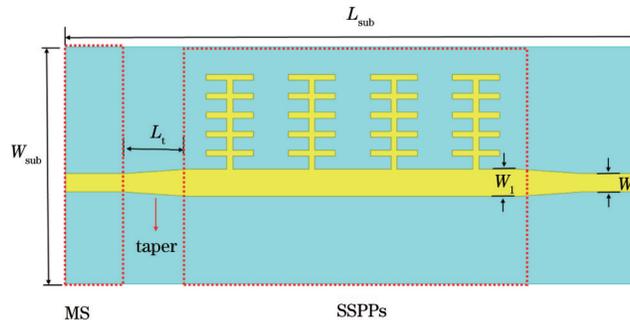


图 5 类八木天线 SSPPs 高模滤波器结构示意图

Fig. 5 Configuration of SSPPs high-order mode of Yagi-like antenna structure

基于类八木天线 SSPPs 结构的高模滤波器的仿真结果如图 6 所示,图中  $S_{21}$  为插入损耗,  $S_{11}$  为回波损耗。明显地,该滤波器的低通效应和带通效应分别对应于 SSPPs 单元结构的基模和一阶高次模。该带通滤波器的下截止频率和上截止频率分别为 5.54 GHz 和 10.11 GHz,这与类八木天线 SSPPs 单元结构的一阶高次模截止频率基本一致。其中,由基模产生的低通效应频段为  $0 \sim 3.6$  GHz,在设计中采用不添加传统的阶梯渐变 SSPPs 过渡结构的馈电方式,可有效地抑制基模的低通效应、提升一阶高次模的带通特性。仿真结果表明,在 5.92~9.88 GHz 的带通频率范围内,

插入损耗小于 1 dB,回波损耗优于 13 dB。与传统滤波器相比,本文设计的带通滤波器基于人工表面等离子体激元传输线一阶高次模式的固有特性,不需要采用额外的滤波结构(如高低阻抗线结构、谐振结构等),因此损耗更低,结构更加简单。此外,通过调节类八木天线结构的尺寸可实现对滤波器通带频率的控制,设计灵活度高。

接下来研究所提出的基于人工表面等离子体激元高阶模式的带通滤波器与线宽  $W_1$  的关系。如图 7 所示,当线宽  $W_1$  变窄为  $W_0$  时,滤波器仍表现出固有的带通特性,但带内回波损耗较优化值  $W_1 = 2.3$  mm 时略

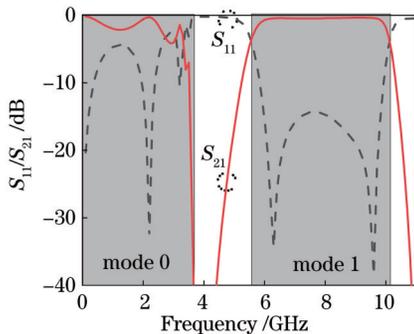


图 6 类八木天线 SSPPs 高模滤波器仿真结果

Fig. 6 Simulated results of proposed filter based on Yagi-like antenna structure SSPPs

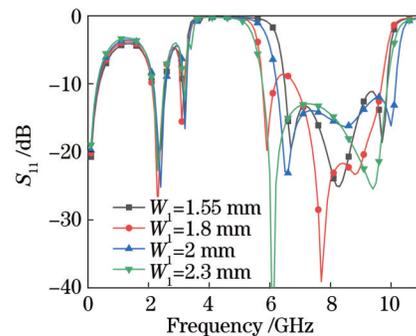


图 7 基于 SSPPs 高阶模式滤波器的回波损耗  $S_{11}$  与线宽  $W_1$  的关系

Fig. 7 Simulated return loss  $S_{11}$  of the proposed filter based on SSPPs high-order mode varying with line width  $W_1$

大。仿真结果表明,通过适当增加线宽  $W_1$ ,可利用梯形过渡结构实现  $50 \Omega$  标准微带线与 SSPPs 结构之间的阻抗匹配,这进一步降低带内回波损耗,提高带通性能。

本设计采用了 4 个类八木天线 SSPPs 单元阵列实现了较为陡峭的带通特性。接下来,将分析该滤波器在不同 SSPPs 单元阵列个数  $N$  下的传输特性。如图 8 所示,对 SSPPs 单元阵列个数从 1 逐渐增加到 4 时的滤波器插入损耗  $S_{21}$  进行了仿真。从仿真结果中可以明显看到,随着 SSPPs 单元个数的增加,带通滤波器的带通传输曲线越加陡峭,表现出更加优异的带通特性。这是由于:理想的 SSPPs 传输结构是由无数个周期阵列分布的 SSPPs 单元构成的,SSPPs 单元个数越多,其传输特性越接近理想状态,即表现出更加理想的带通性能。

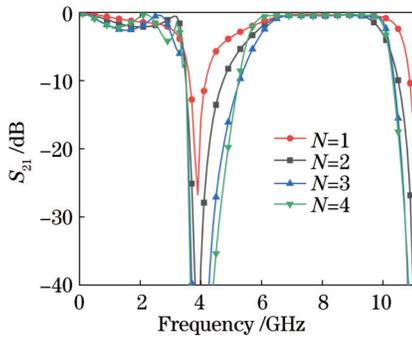


图 8 基于 SSPPs 高阶模式滤波器的插入损耗  $S_{21}$  与 SSPPs 阵列个数  $N$  的关系  
 Fig. 8 Simulated insertion loss  $S_{21}$  of proposed filter based on SSPPs high-order mode varying with array number  $N$  of SSPPs unit

为了进一步揭示基于类八木天线 SSPPs 结构的高模滤波器的工作原理,对其电场分布进行了仿真模拟。如图 9(a)所示,当工作频率为带外的 4 GHz 时,由微带线馈电的电场能量在经过第一个 SSPPs 单元后

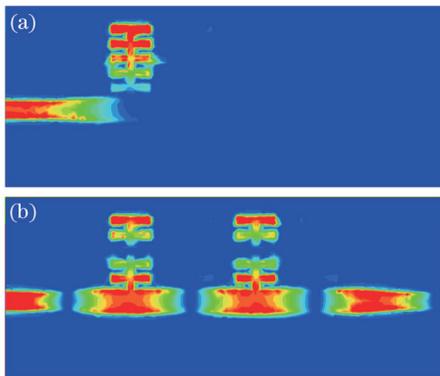


图 9 类八木天线 SSPPs 高模滤波器的电场分布图。  
 (a) 4 GHz; (b) 8 GHz  
 Fig. 9 Simulated electric field distributions of proposed filter based on Yagi-like antenna structure SSPPs. (a) 4 GHz; (b) 8 GHz

被截止,无法实现能量的传输。相反地,如图 9(b)所示,对于带内频点 8 GHz,电场能量在单个类八木天线 SSPPs 单元上存在两个对称的局域点,这与图 3(d)中描述的两个谐振点是相互验证的。此外,相邻两个 SSPPs 单元之间的电场极性相反,表现出慢波特性。

### 3 加工与测试

为了验证高模 SSPPs 带通滤波器的可行性,对类八木天线结构的 SSPPs 传输线进行了加工和测试。如图 10 所示,为了获得滤波器的插入损耗参数,将该滤波器固定在带有 2 个标准 2.92 K 接头的微波测试夹具上,并使用矢量网络分析仪对其进行测量。测量的插入损耗参数如图 11 所示,在 6.0 GHz 至 9.9 GHz 的通带内,插入损耗  $S_{21}$  小于 1 dB,回波损耗  $S_{11}$  优于 10 dB。测试结果与仿真结果具有较好的吻合度,两者之间的微小偏差主要是由滤波器与测试夹具之间的连接误差导致的。

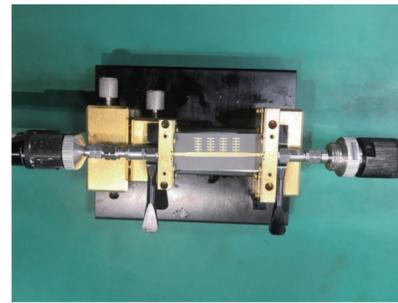


图 10 类八木天线 SSPPs 高模滤波器测试环境实物图  
 Fig. 10 Test environment of proposed filter based on Yagi-like antenna structure SSPPs

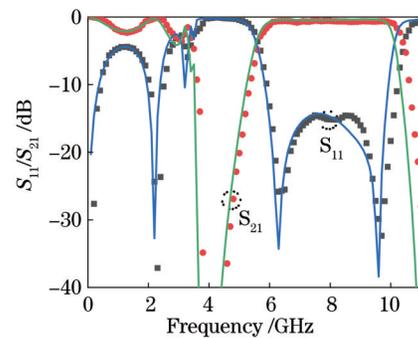


图 11 类八木天线 SSPPs 高模滤波器测试结果与仿真结果对比图  
 Fig. 11 Measured and simulated loss parameters of proposed filter based on Yagi-like antenna structure SSPPs

### 4 结 论

基于人工表面等离子体激元的高阶模式,设计了一种工作在微波频段的带通滤波器。首先采用类八木天线 SSPPs 单元结构,有效地降低 SSPPs 的渐近频率。通过对 SSPPs 单元结构色散曲线的仿真,分析了 SSPPs 基模和一阶高次模的产生机理以及影响截止频

率的主要参数。采用微带线馈电对基于类八木天线结构 SSPPs 高次模的带通滤波器进行了仿真和测试,仿真结果与实测结果吻合度较高,验证了该设计的可行性。该滤波器结构简单,设计方便,在等离子体器件和系统中具有潜在的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [2] Yin L L, Vlasko-Vlasov V K, Pearson J, et al. Subwavelength focusing and guiding of surface plasmons [J]. *Nano Letters*, 2005, 5(7): 1399-1402.
- [3] 张浩驰,何沛航,牛凌云,等.人工表面等离子体超材料[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0124001.  
Zhang H C, He P H, Niu L Y, et al. Spoof plasmonic metamaterials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0124001.
- [4] 刘濮鲲,黄铁军.太赫兹表面等离子体及其应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(2): 169-190.  
Liu P K, Huang T J. Terahertz surface plasmon polaritons and their applications[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(2): 169-190.
- [5] Yan X T, Tang W X, Liu J F, et al. Glide symmetry for mode control and significant suppression of coupling in dual-strip SSPP transmission lines[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(2): 026001.
- [6] 杨柳,蒋世磊,孙国斌,等.等离子体增强金属-硅组合微结构近红外吸收[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2124003.  
Yang L, Jiang S L, Sun G B, et al. Plasmonic enhanced near-infrared absorption of metal-silicon composite microstructure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2124003.
- [7] 朱登玮,曾瑞敏,唐泽恬,等.基于人工表面等离子体激元的多频带滤波器设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 172401.  
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.
- [8] 吴梦,梁西银,孙对兄,等.基于表面等离子体激元的非对称矩形环腔电可调滤波器设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1423001.  
Wu M, Liang X Y, Sun D X, et al. Design of asymmetric rectangular ring resonance cavity electrically adjustable filter based on surface plasmon polaritons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1423001.
- [9] Pendry J B, Martín-Moreno L, García-Vidal F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. *Science*, 2004, 305(5685): 847-848.
- [10] García-Vidal F J, Martín-Moreno L, Pendry J B. Surfaces with holes in them: new plasmonic metamaterials[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(2): S97-S101.
- [11] Fernández-Domínguez A I, Moreno E, Martín-Moreno L, et al. Terahertz wedge plasmon polaritons[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 2063-2065.
- [12] Jiang T, Shen L F, Wu J J, et al. Realization of tightly confined channel plasmon polaritons at low frequencies [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(26): 261103.
- [13] Yong J Z, Quan J, Tie J C. Bidirectional bending splitter of designer surface plasmons[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(11): 111904.
- [14] Shen X P, Cui T J, Martín-Cano D, et al. Conformal surface plasmons propagating on ultrathin and flexible films[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(1): 40-45.
- [15] Shen X P, Jun Cui T. Planar plasmonic metamaterial on a thin film with nearly zero thickness[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(21): 211909.
- [16] Ma H F, Shen X P, Cheng Q, et al. Broadband and high-efficiency conversion from guided waves to spoof surface plasmon polaritons[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(1): 146-151.
- [17] Ye L F, Xiao Y F, Liu N, et al. Plasmonic waveguide with folded stubs for highly confined terahertz propagation and concentration[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 898-906.
- [18] Ye L F, Zhang W, Ofori-Okai B K, et al. Super subwavelength guiding and rejecting of terahertz spoof SPPs enabled by planar plasmonic waveguides and notch filters based on spiral-shaped units[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(20): 4988-4994.
- [19] Ye L F, Xiao Y F, Liu Y H, et al. Strongly confined spoof surface plasmon polaritons waveguiding enabled by planar staggered plasmonic waveguides[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38528.
- [20] Guo Y J, Xu K D, Deng X J. Tunable enhanced sensing of ferrite film using meander-shaped spoof surface plasmon polariton waveguide[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(11): 115502.
- [21] Guo Y J, Xu K D, Deng X J, et al. Millimeter-wave on-chip bandpass filter based on spoof surface plasmon polaritons[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, 41 (8): 1165-1168.
- [22] 程爱粉,白育堃.基于人工表面等离子体激元的圆极化漏波天线[J]. *光通信研究*, 2020(3): 58-62.  
Cheng A F, Bai Y K. Circularly polarized leaky wave antenna based on spoof-surface-plasmon[J]. *Study on Optical Communications*, 2020(3): 58-62.
- [23] 白育堃,柴博,郑宏兴.基于人工表面等离子体激元的宽带漏波天线[J]. *光通信研究*, 2021(5): 67-72.  
Bai Y K, Chai B, Zheng H X. A wide-band leaky-wave antenna based on spoof surface plasmon polaritons[J]. *Study on Optical Communications*, 2021(5): 67-72.
- [24] Wang J, Zhao L, Hao Z C, et al. Splitting spoof surface plasmon polaritons to different directions with high efficiency in ultra-wideband frequencies[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(13): 3374-3377.
- [25] Han C, Wang Z H, Chu Y Y, et al. Compact flexible multifrequency splitter based on plasmonic graded

- metallic grating arc waveguide[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1898-1901.
- [26] 张浩驰. 人工表面等离激元的基本原理、器件综合及系统集成[D]. 南京: 东南大学, 2020.  
Zhang H C. Fundamental theory, device synthesis and system integration of spoof surface plasmon polaritons [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [27] Xu K D, Lu S, Guo Y J, et al. High-order mode of spoof surface plasmon polaritons and its application in bandpass filters[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(1): 269-275.
- [28] Jiang T, Shen L F, Zhang X F, et al. High-order modes of spoof surface plasmon polaritons on periodically corrugated metal surfaces[J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2009, 8: 91-102.
- [29] Liu X Y, Feng Y J, Zhu B, et al. High-order modes of spoof surface plasmonic wave transmission on thin metal film structure[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31155-31165.
- [30] Liu Y Q, Xu K D, Guo Y J, et al. High-order mode application of spoof surface plasmon polaritons in bandpass filter design[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(7): 362-365.
- [31] Yida, Wei X C, Yang R, et al. Modeling and analyzing high-order modes in periodic-stub-loaded stripline for wideband filter design[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, 62(2): 398-405.