DOI: 10.13382/j.jemi.B2407336

宽阻带的人工表面等离子激元微带低通滤波器

许浩东[1,2] 年夫顺[1,2] 邓建钦[2] 张胜洲[2]
(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030051;2. 中电科思仪科技股份有限公司 青岛 266555)

摘 要:针对传统的人工表面等离子激元(SSPPs)微波滤波器的带外抑制水平较弱的问题,设计并制作了一款采用新颖蝶形结构的小型化 SSPPs 宽阻带微带低通滤波器。首先,通过将传统的微带滤波器中的扇形结构与 SSPPs 理论相结合,设计了蝴蝶形结构的 SSPPs 结构单元,实现了较宽的阻带。为了提升滤波器的带外抑制水平,引入了对向箭头形谐振贴片,抑制了所提出滤波器在阻带内 25 GHz 处的寄生通带。通过仿真模拟单元结构的色散特性,实现了对 SSPPs 单元的优化设计。设计了一个完整的 SSPPs 滤波器结构并仿真分析了关键参数对整个滤波器性能的影响。使用 F4B 板材制作了金属-介质-金属(MIM)结构的该滤波器并对其性能进行了测量。结果显示,该滤波器的 3-dB 截止频率为 10.08 GHz,阻带的最高频率可达 33 GHz;通带内回波损耗均高于 15 dB,插入损耗最高为 2.6 dB;阻带最小衰减在 11~35 GHz 的范围内最低为 22.98 dB,而回波损耗在 10~30 GHz 范围内基本优于 3 dB,且在 10~34 GHz 范围内最高为 4 dB。本设计的测试结果满足设计指标,带外抑制效果理想,可与混频器、信号发生器等器件集成以发挥更好的电路性能。

关键词:人工表面等离子激元;微带;低通滤波器;宽阻带
中图分类号:TN713+.4;TH89 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:510.1050

Spoof surface plasmon polaritionsmicrostrip low-pass filter with wide stopband

Xu Haodong[1,2] Nian Fushun[1,2] Deng Jianqin[2] Zhang Shengzhou[2]
(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. CETC Instruments Co., Ltd, Qingdao 266555, China)

Abstract: To address the issue of weak out-of-band suppression in traditional artificial surface plasmon (SSPPs) microwave filters, a miniaturized SSPPs wide-stopband microstrip low-pass filter featuring a novel butterfly structure is devised and fabricated. Firstly, by integrating the fan structure in the conventional microstrip filter with the SSPPs theory, the butterfly structure of SSPPs is designed to obtain a broader stopband. To enhance the out-of-band suppression level of the filter, an anti-directional arrowhead resonant patch is introduced to suppress the parasitic passband at 25 GHz within the stopband. The optimal design of the SSPPs unit is accomplished by simulating the dispersion characteristics of the unit structure. A complete SSPPs filter structure is designed, and the impact of key parameters on the performance of the filter is simulated. The metal-medium-metal (MIM) structure of the filter is fabricated using F4B substrate, and its performance is measured. The results indicate that the 3-dB cut-off frequency of the filter is 10.08 GHz, with the highest stopband frequency reaching 33 GHz. Return loss within the passband consistently exceeds 15 dB, while maximum insertion loss within this range is measured at 2.6 dB. Notably, minimum attenuation within the stopband measured at 22.98 dB between 11~35 GHz, with return loss generally exceeding 3 dB across the range of 10~30 GHz and peaking at 4 dB from 10~34 GHz. The test results of this design meet the design index, the out-of-band suppression effect is ideal, and it can be integrated with mixers, signal generators, and other devices to exert a superior circuit performance.

Keywords: spoof surface plasmon polaritions(SSPPs); microstrip; low-pass filter; wide-stopband

收稿日期: 2024-03-13 Received Date: 2024-03-13

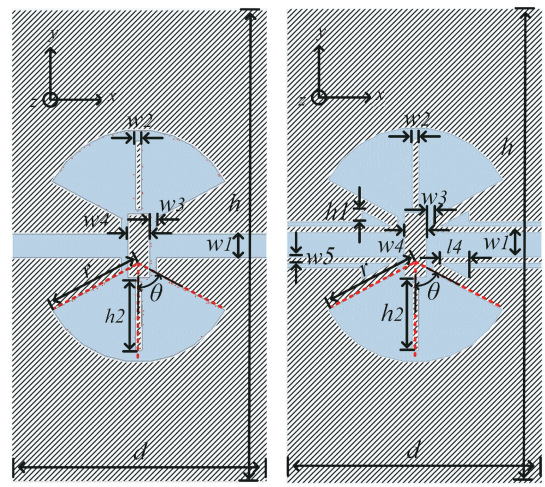
0　引　言

表面等离子激元(surface plasmon polaritions,SPPs)是一种由金属表面电子与光之间的共振相互作用激发,沿金属-电介质面传播的表面波[1]。其场强在表面处最大,并在垂直于表面方向上呈指数衰减[2]。在金属和电介质具有相反介电常数的必要条件下,可以通过改变金属的表面结构来定制 SPPs 的性能。然而,在太赫兹、微波和毫米波频段,由于金属被认为是完美的电导体(PEC),导致 SPPs 不能被激发[3]。2004 年,英国帝国理工大学的 Pendry 等发现通过在金属表面设计具有一定深度的孔阵列或者凹槽阵列,且阵列间距远小于波长时,可以在几乎任何频率范围激发 SPPs,由此引出了人工表面等离子激元(spoof surface plasmon polaritions,SSPPs)理论[4]。在此之后,国内的 Li 等[5]、Feng 等[6]、Zhang 等[7-8]研究团队以及国外研究团队[9-11]对基于 SSPPs 理论的相关结构开展了广泛的研究。2013 年,Ma 等[12]提出了一种超薄柔性共形表面等离子体结构。后来他们又推出了一种平面金属超薄超材料[13-14]。这些研究显著地推进了 SSPPs 在太赫兹、微波和毫米波频段的应用。SSPP 单元的低通特性和慢波色散特性[15],使得其在低通滤波器设计中的应用最为常见。根据调研发现,对 SSPPs 滤波器研究的创新点集中在设计新型的过渡结构或者新颖的单元结构两个方面。2019 年,西安理工大学的 Wang 等[16]提出了一种加载新型过渡结构的小型化 SSPPs 微带低通滤波器,有效地缩短了 SSPPs 滤波器的横向尺寸,但阻带较窄。东南大学的 Lu 等人提出了两款基于倾斜鱼骨结构的 SSPPs 微带低通滤波器[17],阻带可达一个倍频程。2023 年,印度的 Pathak 等[18]以及伊朗的 Moznebi 等[19]分别提出了一款基于 SSPPs 的低通滤波器。此后国内外对于 SSPPs 滤波器的研究大量出现[20-23],而上述滤波器均存在阻带较窄的问题。

本文提出了一款基于 SSPPs 的超宽阻带微带低通滤波器,其通带范围为 0~10 GHz,阻带带宽可达 10~34 GHz。首先,受启发于传统微带滤波器中的扇形结构,设计了一款蝶形结构的 SSPPs 单元,通过仿真模拟其色散特性,了解了其参数与渐近频率之间的关系。随后,将 5 个相同的 SSPPs 单元组合在一起,设计了一个完整的 SSPPs 滤波器结构。为了提升滤波器的带外抑制水平,引入了箭头形谐振贴片,抑制了所提出滤波器在阻带内 25 GHz 处的寄生通带。通过仿真分析了关键参数对整个滤波器性能的影响,确定了 SSPPs 低通滤波器的优化设计方案。最后,制作了超宽阻带的 SSPPs 微带低通滤波器并对其进行了测量。测量结果表明,在 0~10.08 GHz 的宽带范围内,插入损耗小于 3 dB,回波损耗大于 13 dB。该滤波器的最小衰减在 11~35 GHz 的范围内最低为 22.98 dB,而回波损耗在 10~30 GHz 范围内基本优于 3 dB,且在 10~34 GHz 范围内最高为 4 dB。

1　基于 SSPPs 的微带低通滤波器的色散曲线仿真与分析

本文所提出的基于 SSPPs 的宽阻带微带低通滤波器采用了改进型的蝴蝶形结构的单元设计,其结构由对称分布在微带线两边的扇形枝节及对向箭头结构组成。通过引入箭头形谐振贴片,抑制了所提出滤波器在阻带内 25 GHz 处的寄生通带。图 1 展示了所设计滤波器单元结构图,其中阴影部分为所使用的聚四氟乙烯玻璃布板(F4B)介质衬底,介电常数 $\varepsilon_r = 2.65$,损耗角正切为 0.001 5,厚度为 0.5 mm。实心部分为位于衬底上表面的金属铜微带,同时衬底下表面覆盖有铜箔,厚度均为 0.035 mm。虚线则是用以理解部分结构参数所做的辅助线。



(a) 无对向箭头的单元　(b) 有对向箭头的单元
(a) A cell without opposite arrows　(b) A cell with opposite arrows

图 1　不同结构的 SSPPs 单元示意图

Fig. 1　Schematics of SSPPs units with different structures

图 1(a)为将传统扇形枝节引入 SSPPs 的单元结构图,因传统的微带滤波器中扇形枝节相对于矩形枝节,其集总电容特性等效的频带宽度更宽,在滤波器里表现为寄生通带后移[24-25],因此可以将这一特性应用到 SSPP 单元的设计中。图 1(b)展示了本文所提出的基于 SSPPs 的宽阻带微带低通滤波器单元结构,其结构由对称分布在微带线两边的扇形枝节及对向箭头结构组成。在图 1(a)的基础上,通过引入对向箭头结构增强带外抑制来消除寄生通带。表 1 提供了图 1 中所标注的主要参数的取值以供参考。其中,θ 表示扇形枝节夹角取值的一半,其余参数则表示其所标注位置所对应结构的长度或宽度。

表 1　相关变量参考值

Table 1　Reference values of relevant variables

变量	数值/mm	变量	数值/mm	变量	数值/mm
θ	62°	$h2$	1.15	r	1.66
d	4.3	$h3$	0.92	$w1$	0.41
$d1$	0.53	$l1$	3.5	$w2$	0.1
$d2$	5.07	$l2$	6.72	$w3$	0.12
h	8	$l3$	21.5	$w4$	0.37
$h1$	0.19	$l4$	0.5	$w5$	0.1

使用电磁仿真软件 CST 微波工作室对图 1 中的 SSPPs 单元进行了色散曲线的仿真。在 CST 中按照图 1 所示的结构尺寸进行建模并设置好相关的材料参数,选择本征模求解器并设置周期边界条件和相位差,即可通过扫描相位差参数仿真色散曲线。色散曲线是 SSPPs 单元的重要属性,其表达式为:

$$f=\frac{ck_x}{2\pi}=\frac{c}{2d}\cdot\frac{kd}{\pi} \tag{1}$$

其中,k_x 为 SSPPs 在传播方向上的波矢,c 为光速,$c/2d$ 表示色散曲线的斜率。而 kd/π 为色散曲线图中横坐标轴的归一化表达形式。

图 2 为添加了箭头结构(如图 1(b)所示,对应 Unit B 曲线)与未添加箭头结构(如图 1(a)所示,对应于 Unit A 曲线)的两种 SSPPs 单元的色散曲线,其中黑色直线代表了周期间隔 $d=4.3$ mm 时光线的色散曲线。如图 2 所示,在添加箭头结果之后,SSPPs 单元色散曲线的渐进频率仅有 0.1 GHz 的微弱上升,其总体趋势基本一致,表明加入箭头型结构对 SSPPs 单元的色散特性影响微弱。

为了解所提出 SSPPs 单元结构的色散特性的影响因素,对周期间距 d、扇形分支半径 r、扇形分支半夹角 θ 以及中心微带线线宽 $w1$ 等几个关键参数的不同取值进行了色散曲线仿真。

图 3 为各单元之间的周期间隔 d 的不同取值对 SSPPs 单元色散曲线的渐进频率的影响。从图 3 中可以看出,周期间隔 $d=3.3$ mm 时,该单元结构的渐进频率为 11.49 GHz;而随着 d 的取值逐渐增大,SSPPs 的渐进频率呈现出明显的下降趋势,而当 $d=5.3$ mm 时,渐进频率下降到了 8.86 GHz。由此可见,各单元之间的周期间隔 d 对渐进频率有较大的影响,且周期间隔与渐进频率之间呈现负相关性。

图 4 为 SSPPs 单元结构中扇形分支的半径 r 的取值增加时渐进频率的变化趋势。当半径 $r=0.5$ mm 时,SSPPs 单元的色散曲线以相对微弱的斜率变化上升,渐渐远离光线的色散曲线并逐渐收敛于渐进频率 18.99 GHz。而当 r 的取值增加到 1.0 mm 甚至 2.0 mm 时,色散曲线的截止频率分别下降到了 14.15 GHz 与 8.73 GHz。随着 r 的取值逐渐增加,所设计 SSPPs 单元结构的有效槽深增加,其相对应传播常数增大,对表面波的束缚能力加强,从而导致了渐进频率的降低。

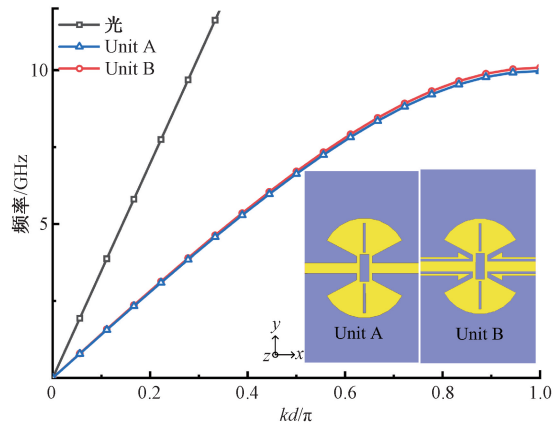


图 2　两种结构的 SSPPs 单元的色散曲线图

Fig. 2　Dispersion curves of SSPPs units with two structures

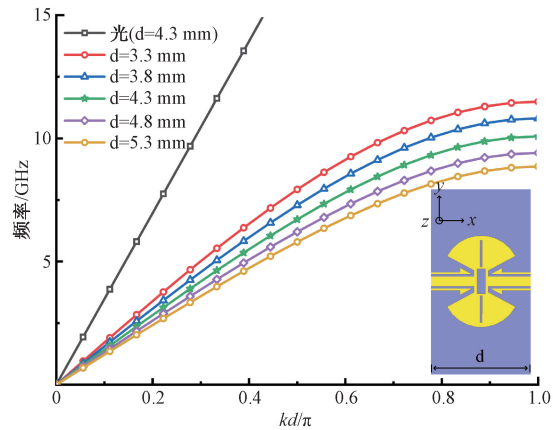


图 3　不同取值的周期间隔 d 的色散曲线对比图

Fig. 3　Dispersion curves for different values of period interval d

此外,也研究了扇形分支半夹角 θ 的变化所带来的影响。如图 5 所示,当 $\theta=20°$ 时,该单元的渐进频率为 12.64 GHz,而当 θ 逐渐增大到 80°时,渐进频率降低到了 9.71 GHz。同时,θ 以固定的 20°的角度差增大,而渐进频率的差距却逐渐变小。如果将所设计的蝴蝶型 SSPPs 单元类比到传统的 SSPPs 单元结构中,角度的增大则意味着单元结构中金属条的宽度变大,对应于两个单元结构之间的凹槽宽度变小。而在角度增大的过程中,因扇形分支的半径 r 并未发生变化,则其半径映射到传播方向 x 轴上的长度 $r\cdot\sin(\theta)$ 也会以 $r\cdot\cos(\theta)$ 的斜率逐渐增大。而斜率 $r\cdot\cos(\theta)$ 则随着 θ 的增大逐渐变小,从而导致了两单元间的凹槽宽度以越来越慢的速度减小。由文献[13]可知,两单元之间的凹槽宽度与波矢之间为正相关,从而导致了渐进频率的降低速度也变慢。

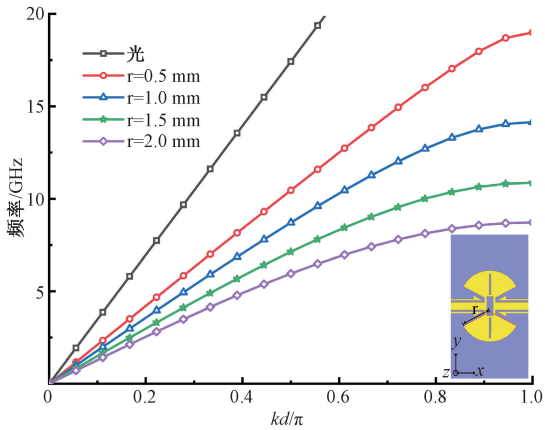


图4　不同取值的扇形分支的半径 r 的色散曲线

Fig. 4　Dispersion curves for radius r of sector branches with different values

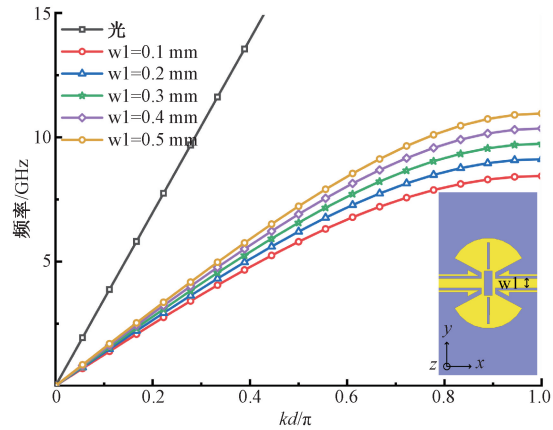


图6　不同取值的中心微带线的线宽 $w1$ 的色散曲线

Fig. 6　Dispersion curve for the width $w1$ of the central microstrip line with different values

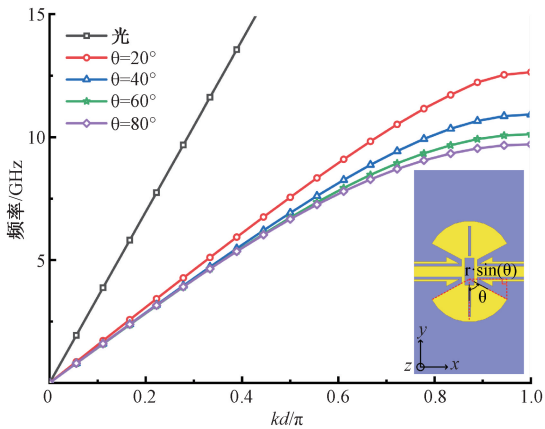


图5　不同取值的扇形分支的半夹角 θ 的色散曲线

Fig. 5　Dispersion curves for the half-angle θ of the sector branches with different values

同样地,也仿真了所提出的蝴蝶型 SSPPs 单元结构中心微带线线宽 $w1$ 的变化对单元色散曲线的渐进频率的影响。如图 6 所示,当微带线线宽的取值为 0.1 mm 时,色散曲线的渐进频率为 8.45 GHz,而当线宽以 0.1 mm 的间隔逐渐增加到 0.5 mm 时,该单元色散曲线的渐进频率则增加到了 10.96 GHz。因此,中心微带线线宽与渐进频率之间呈现正相关性。同时注意到随着 $w1$ 的取值以固定的频率增大,渐进频率的值也以相对均匀地速率增大,即可以通过微调微带线线宽的方式实现对渐进频率的细微调整。

2　基于 SSPPs 的微带低通滤波器的 S 参数仿真与分析

本文所设计的基于 SSPPs 的微带低通滤波器的结构如图 7 所示。该滤波器结构由 3 部分组成:区域 I 包括滤波器的输入和输出端口,用以实现准 TEM 模电磁波的传输。为了连接输入和输出端口时的阻抗匹配,此处微带线的宽度设计为 50 Ω。区域 II 是由微带和微带两侧的两个三角形组成的过渡结构。该区域有两个主要目的:实现阻抗匹配和模式转换(将准 TEM 模电磁波转换为 TM 模电磁波),以支持 SSPPs 的表面波的传输。区域 III 是滤波器的主要部分,SSPP 表面波在此区域传输。该区域由 5 个相同的单元组成,按周期距离 d 排列,如图 7 所示。阴影部分表示介电常数 ε_r = 2.65、损耗角正切 tan δ = 0.001 5 的介质衬底(F4B),实心部分表示衬底上部的金属铜微带。单元间周期间隔 d = 4.3 mm。

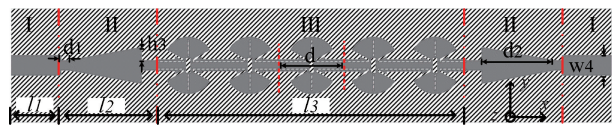


图7　完整结构的 SSPPs 滤波器示意图

Fig. 7　Schematic of the complete structure of the SSPPs filter

通过对带有箭头型谐振贴片和不带有箭头型谐振贴片的完整结构滤波器的散射参数进行仿真,研究了箭头型谐振贴片对带外抑制的影响,仿真结果的对比如图 8 所示。从图 8 中可以看出,在没有箭头型谐振贴片时,该滤波器在阻带的 24.7~27.5 GHz 处有一明显的寄生通带,且在此寄生通带内该滤波器的阻带最小衰减仅为 14.36 dB。而在加载了箭头型谐振贴片之后,此处的寄生通带受到了抑制,使得该滤波器在此处的最小衰减增加到了 20.8 dB。需要注意的是,尽管加载了箭头型谐振贴片后,S11 的曲线在 34 GHz 处出现了恶化,但是在设计指标要求的 30 GHz 的阻带范围内,S11 的波纹更平滑。

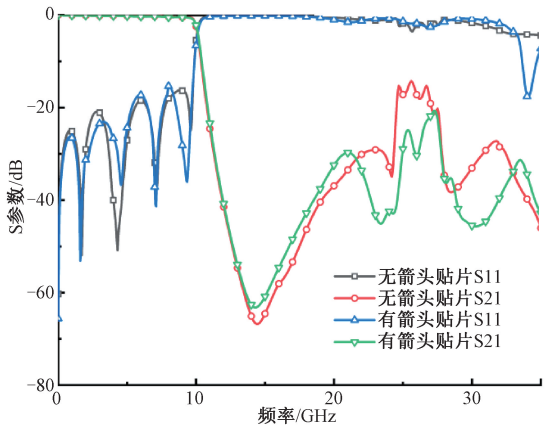


图 8　两种结构滤波器的 S 参数仿真结果

Fig. 8　Simulation results of S-parameters of filters with two structures

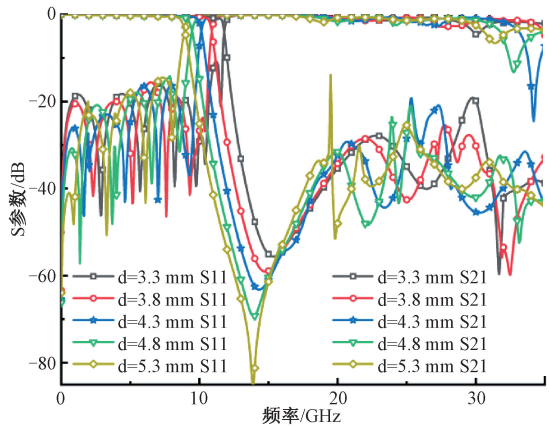


图 9　不同 d 的取值对应的 S 参数仿真结果

Fig. 9　Simulation results of S parameters corresponding to different values of d

为了验证第 3 节中得出的 SSPPs 单元结构参数与色散曲线渐进频率关系的结论，同样地对完整结构的滤波器的单元间周期间隔 d、扇形分支半径 r、扇形分支半夹角 θ 以及中心微带线线宽 $w1$ 等关键参数进行了散射参数的仿真。

图 9 为单元间周期间隔 d 的取值从 3.3 mm 增加到 5.3 mm 时，所设计的完整结构的滤波器的 S 参数仿真结果。从图 9 中可以看到，当 d = 3.3 mm 时，该滤波器的 3-dB 截止频率为 11.6 GHz（与此相对应的色散曲线渐进频率为 11.49 GHz）；而当周期间隔的取值增大到 d = 5.3 mm 时，该滤波器的 3-dB 截止频率下降到了 8.87 GHz（其相对应的色散曲线渐进频率为 8.85 GHz），所设计滤波器的截止频率及其变化趋势与上一节中得出的结论基本吻合。同时，图 9 中还显示了周期间隔 d 对于阻带的高频部分影响较大，而对带内的最大插入损耗及最小回波损耗的影响较小。

图 10 为所提出的 SSPPs 单元结构中扇形分支半径 r 的变化对 S 参数带来的影响。图 10(a)和(b)分别为半径 r 的取值从 0.5 mm 增加到 2.0 mm 时，完整结构的滤波器的 S11 及 S21 的仿真结果。当 r = 0.5 mm 时，整个单元的形状会发生严重变形，不再表现为传统微带滤波器中的扇形枝节的形状，导致滤波器滤波性能不理想，表现为在通带内的回波损耗小、插入损耗较大且波纹较差。当 r = 1.0 mm 时，该滤波器的 3-dB 截止频率为 14.2 GHz（其相对应的色散曲线渐进频率为 14.15 GHz）；随着 r 的取值增大到 1.5 mm 及 2.0 mm，滤波器的截止频率也分别下降到了 10.87 GHz 与 8.73 GHz，与所对应的渐进频率及变化趋势基本吻合。注意到，当扇形分支的半径增加时，滤波器通带内的回波损耗也随之增加，同时该滤波器的带外抑制得到了较为明显的改善；而当半径 r 从 1.5 mm 增加到 2.0 mm 时，通带内的回波损耗又出现了减小的趋势。因此，所设计 SSPPs 单元的扇形枝节半径 r 的取值的最优解应在 1.5 mm 附近。

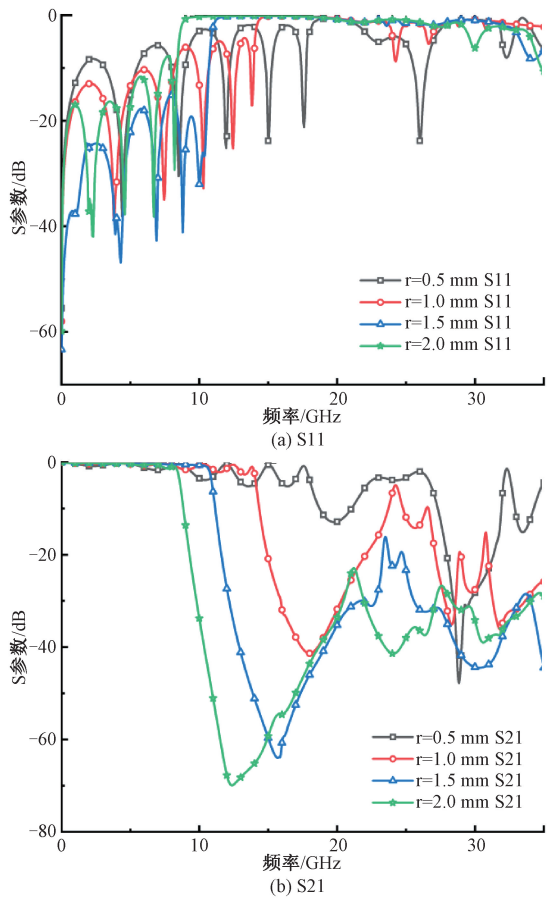


图 10　不同 r 的取值对应的 S 参数仿真结果

Fig. 10　Simulation results of S parameters corresponding to different values of r

使用同样的分析方法，也对 SSPPs 结构的扇形分支半夹角 θ 的不同取值对滤波器散射参数的影响进行了仿真与分析，仿真结果如图 11 所示。在通带以内，当扇形分支半夹角 θ 的取值为 20°时，S11 的曲线波峰较高，此时滤波器的最小回波损耗仅有 7.37 dB 且 3-dB 截止频率为 12.8 GHz；当扇形分支半夹角 θ 的取值增大到 60°时，S11 的曲线逐渐下降，此时滤波器的最小回波损耗为 16.4 dB，且截止频率为 10.21 GHz；而当扇形分支半夹角 θ 的取值再次增大到 80°时，通带内的最小回波损耗增大到 13.47 dB 且截止频率降低到了 9.7 GHz，其截止频率的变化趋势与渐进频率基本吻合。在通带以外的阻带范围，可以看到随着扇形分支半夹角 θ 的增大，该滤波器阻带的最小衰减也增大，而当扇形分支半夹角 θ=80°时，滤波器阻带的最小衰减减小到了 13.9 dB，且 S11 出现了明显的恶化。结合截止频率的仿真结果，扇形分支半夹角 θ 的取值应在 60°附近且略大于 60°。

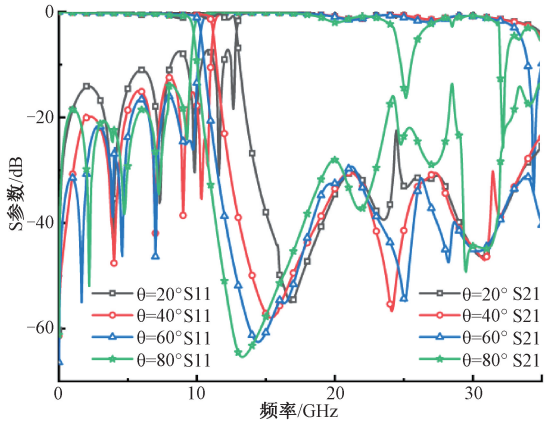


图 11　不同 θ 的取值对应的 S 参数仿真结果

Fig. 11　Simulation results of S parameters corresponding to different values of θ

在第 1 节中提到，通过改变 SSPPs 滤波器中心微带线线宽 $w1$ 的宽度可以对所设计滤波器的截止频率进行微调。因此，也仿真了不同取值的中心微带线线宽 $w1$ 对散射参数所带来的变化，仿真结果如图 12 所示。从图 12 中可以看到，当 $w1$ 的取值从 0.1 mm 等间隔增加到 0.4 mm 时，滤波器的 3-dB 截止频率以相对稳定的速率增高，且在 $w1$ = 0.4 mm 时的截止频率的仿真值为 10 GHz；而当 $w1$ 的取值继续增加时，该滤波器的截止频率则只出现细微的变化。同时，$w1$ 的取值变化对通带内的最小回波损耗基本没有造成明显的波动，但对位于阻带处 27 GHz 的寄生通带有较为明显的影响。

最后，本文还仿真了箭头型谐振贴片与中心微带线之间的间距 $w5$ 的变化对滤波器散射参数的影响，仿真结果如图 13 所示。可以看出，箭头型谐振贴片的位置对整个滤波器的性能的影响主要体现在寄生通带的抑制能力上，而对通带内的性能及截止频率的影响较弱。当 $w5$ 的取值为 2.0 mm 时，该滤波器在阻带的 25 GHz 处有一明显的寄生通带，此时该滤波器阻带的最小衰减仅为 5.6 dB；随着箭头型谐振贴片的位置向滤波器中心微带线靠近，$w5$ 的取值逐渐减小，该滤波器的带外抑制水平出现明显的提高，在此处的寄生通带得到了更好的抑制。而当 $w5$ 的取值从 0.1 mm 继续减小到 0.05 mm 时，带外抑制水平又出现了恶化。因此，箭头型谐振贴片与中心微带线之间的间距 $w5$ 的最优解应在 0.1 mm 附近。且通过分析箭头型谐振贴片的位置变化对带外抑制所带来的影响，也很好的解释了为何中心微带线的线宽 $w1$ 的变化会对寄生通带产生影响。即当箭头型谐振贴片的位置保持不变时，若中心微带线的线宽 $w1$ 发生变化，则谐振贴片相对于中心微带线的位置也发生了变化，也就意味着 $w5$ 的取值在变化。

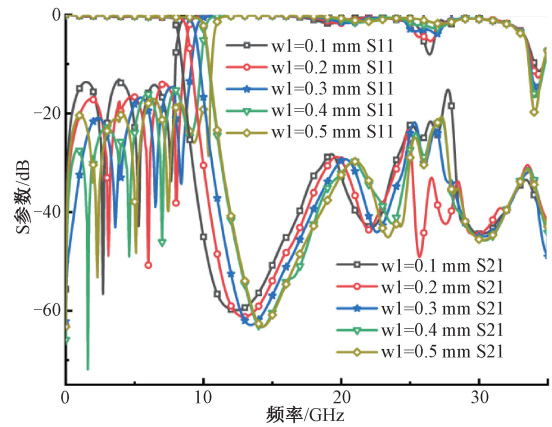


图 12　不同 $w1$ 的取值对应的 S 参数仿真结果

Fig. 12　Simulation results of S parameters corresponding to different values of $w1$

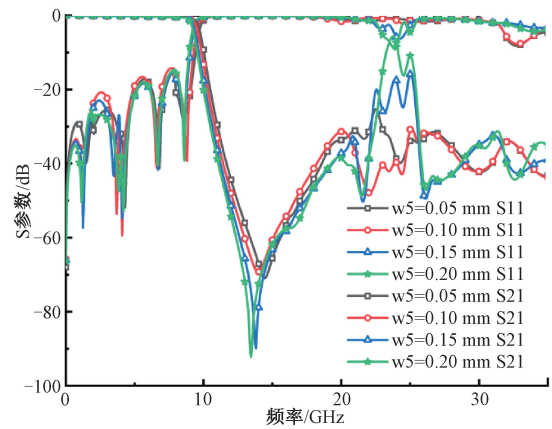
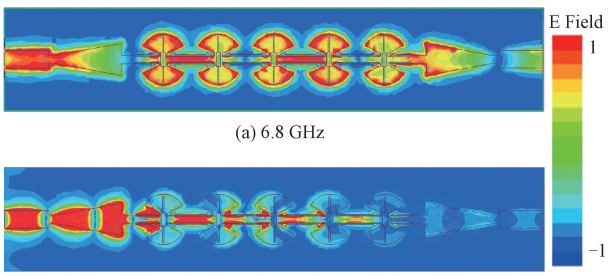


图 13　不同 $w5$ 的取值对应的 S 参数仿真结果

Fig. 13　Simulation results of S parameters corresponding to different values of $w5$

在对所提出的基于 SSPPs 的超宽阻带微带低通滤波器的主要结构参数进行仿真与讨论分析之后，其余结构参数的变化对整个滤波器的性能影响较小，在此便不多赘述。在上述基础上，本文通过对滤波器的结构参数进行微调与优化，最终确认各结构参数的取值如表 1 所示。

为了验证该滤波器的滤波性能，本文仿真了所设计的 SSPPs 超宽阻带微带低通滤波器在通带内（6.8 GHz）以及阻带内（27.2 GHz）的 xoy 面电场分布图，其中各结构参数取表 1 中的参考值，仿真结果如图 14 所示。从图 14 中可以看到，当信号以 6.8 GHz（图 14（a））的频率从左侧输入时，滤波器内部场强分布较为均匀，表明电磁波可以流畅地通过整个滤波器；而当信号以高于截止频率（10 GHz）且在寄生通带内的频率 27.2 GHz（图 14（b））输入时，滤波器输入端场强较大，而随着电磁波传播方向逐渐衰弱，直至最后截止。由此印证了所设计滤波器的通带及阻带范围。



(a) 6.8 GHz

(b) 27.2 GHz

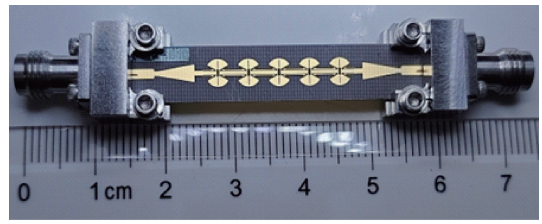
图 14　所提出滤波器在不同频率处的电场分布图

Fig. 14　The electric field distribution of the proposed filter at different frequencies

3　测量结果

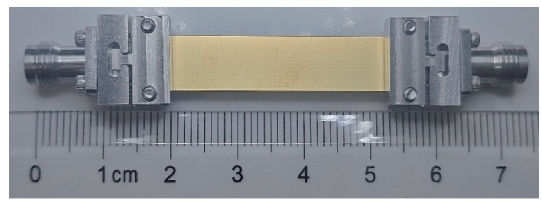
为了验证上述仿真结果，本文制作了基于 SSPPs 的微带低通滤波器（$\varepsilon_r = 2.65$，$\tan\delta = 0.001\ 5$，金属铜厚度为 0.035 mm）。其结构参数如表 1 所示。所制作的宽带低通滤波器的照片如图 15 所示，图 15（a）为俯视图，图 15（b）为底视图。图中的黄色部分为金属铜，黑色部分为 F4B 介电基板，其厚度为 0.5 mm。将两个压接型 SMA 连接器的中心针连接到滤波器两端的焊盘（区域Ⅰ，如图 7 所示）上，连接器的接地引脚压接到滤波器背面的金属层上。整体结构尺寸为 41.94 mm×8 mm。

图 16 为该滤波器的测量结果，滤波器的 3-dB 截止频率为 10.08 GHz，相较于仿真结果显示的 10.06 GHz 的截止频率基本吻合。该滤波器在 10 GHz 处插入损耗的仿真结果和测量结果分别为 2.2 dB 和 2.6 dB，均低于设计中所要求的 3 dB 通带内最高插损。同时，该滤波器仿真与测量结果的带内回波损耗均高于 15 dB。在阻带，仿真结果显示：该滤波器的最小衰减在 11～35 GHz 的范围内最低为 20.6 dB，而回波损耗在 11～32.8 GHz 内均优于 3 dB；测量结果显示：该滤波器的最小衰减在 11～35 GHz 的范围内最低为 22.98 dB，而回波损耗在 10～30 GHz 范围内基本优于 3 dB，且在 10～34 GHz 范围内最高为 4 dB。测量结果与仿真结果基本吻合。



(a) 俯视图

(a) Top view



(b) 底视图

(b) Bottom view

图 15　所提出滤波器的实物照片

Fig. 15　Photograph of the proposed filter

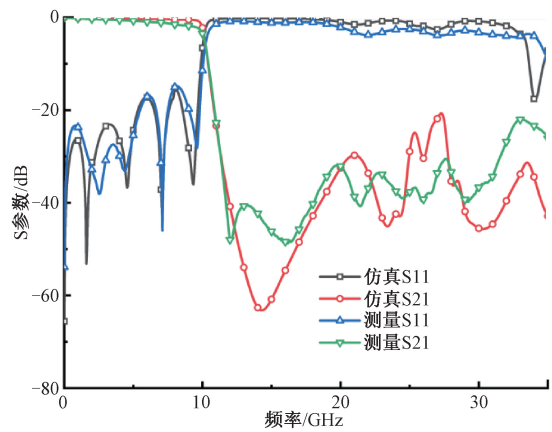


图 16　所提出滤波器的仿真与测量结果

Fig. 16　Simulation and measurement results of the proposed filter

为了更直观地展示本文所提出的超宽阻带微带低通滤波器的性能优势，令 $\tau = f_h/f_0$ 来表示滤波器宽阻带性能，其中 f_0 为滤波器工作的中心频率，f_h 表示滤波器阻带能达到的最高频率。从公式中可知，滤波器的阻带越宽，即 f_h 的取值越大，τ 的值便越大。因此可以通过 τ 的数值大小来简单判断滤波器的阻带水平。同时本章也提出了如式（2）所示的品质因数（FOM）作为宽阻带滤波器性能统一的衡量标准：

$$FOM = \frac{RL \times f_h}{f_0 \times IL \times \frac{S}{\lambda_0^2}} \tag{2}$$

式中:S 为滤波器的面积尺寸,λ_0 为滤波器工作的中心频率 f_0 对应的波长。IL 和 RL 分别表示 SSPPs 滤波器通带内的插入损耗和最小回波损耗。通过将面积与中心频率对应的波长相除,可以很好的消除不同频段的滤波器之间难以进行性能比较的障碍。更高的 FOM 结果表示更好的整体滤波器性能。表 2 显示了所设计的 SSPPs 滤波器和不同参考文献中描述的其他几个 SSPPs 滤波器的比较。通过计算,本章所提出的滤波器的 FOM 的值达 420.93。与已有的滤波器[16-19,26-27]相比,本文提出的基于 SSPPs 的超宽阻带微带低通滤波器在拥有紧凑的尺寸的同时具有更好的性能。

表 2　相关变量参考值

Table 2　Reference values of relevant variables

文献	f_0/GHz	Max. IL/dB	Min. RL/dB	面积/(λ0 × λ0)	τ	*FOM*
[16]	6.5	5	10	1.03×0.03	2.46	29.48
[17]	3.11	3	10	0.68×0.1	3.86	209.56
	4.65	3	10	0.87×0.15	2.58	66.29
[18]	3.5	3	10	1.16×0.16	4	69.95
[19]	5	3	13	0.37×1.38	2.9	20.65
[26]	2.42	3	10	0.76×0.1	3.31	140.74
[27]	2.765	3	19	0.5×0.16	4.33	343.58
本文	5	2.6	l5	0.7×0.13	6.8	420.93

4　结　论

本章提出了一款基于 SSPPs 的超宽阻带微带低通滤波器,采用了改进型的蝴蝶型结构的单元设计,其结构由对称分布在微带线两边的扇形枝节及对向箭头结构组成。通过引入箭头形谐振贴片,抑制了所提出滤波器在阻带内 25 GHz 处的寄生通带。其通带范围为 0~10 GHz,阻带带宽可达 10~33 GHz。首先,设计了一个蝴蝶型结构的 SSPPs 单元,通过对关键参数的不同取值的仿真,模拟其色散特性,了解了各关键参数与渐近频率之间的关系。随后,将 5 个相同的 SSPPs 单元组合在一起,设计了一个完整的 SSPPs 滤波器结构。通过仿真分析了关键参数对整个滤波器性能的影响,以此达到通过调整结构参数来实现对完整结构的滤波器的 S 参数进行优化的目的,确定了 SSPPs 低通滤波器的优化设计方案。最后,制作了超宽阻带的 SSPPs 微带低通滤波器并对其进行了测量。测量结果表明,在 0~10.08 GHz 的宽带范围内,插入损耗小于 3 dB,回波损耗大于 13 dB。该滤波器的最小衰减在 11~35 GHz 的范围内最低为 22.98 dB,而回波损耗在 10~30 GHz 范围内基本优于 3 dB,且在 10~34 GHz 范围内最高为 4 dB。

参考文献

[1] 王志爽, 张冠茂, 刘海瑞, 等. 基于表面等离子激元的口径耦合多功能非对称半圆腔滤波器设计[J]. 光子学报, 2018, 47(4): 88-95.
WANG ZH SH,ZHANG G M,LIU H R,et al. Design of the aperture coupled multi-functional asymmetric semi-circular cavity filter based on surface plasmon polaritons[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(4): 88-95.

[2] RAETHER H. Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1988.

[3] ZHU S S, WEN P, LIU Y H. A compact filter based on Spoof surface plasmon polariton waveguide for wide stopband suppression[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(9): 475-478.

[4] 崔雪琪. 人工表面等离子体激元的小型化微带滤波器的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
CUI X Q. Research on miniaturized microstrip filter of spoof surface plasmon polaritons [D]. Xi′an: Xi′an University of Technology, 2020.

[5] LI J X, XU K D, SHI J W, et al. Spoof surface plasmon polariton waveguide with switchable notched band[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(20): 1147-1150.

[6] FENG W J, FENG Y H, SHI Y R, et al. Novel differential bandpass filter using spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(6): 2083-2088.

[7] ZHANG D W, ZHANG K, WU Q, et al. High-efficiency surface plasmonic polariton waveguides with enhanced low-frequency performance in microwave frequencies[J]. Optics Express, 2017, 25(3): 2121.

[8] ZHANG D W, ZHANG K, WU Q, 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.

[9] KIANINEJAD A, CHEN Z N, QIU C W. Design and modeling of spoof surface plasmon modes-based microwave slow-wave transmission line [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(6): 1817-1825.

[10] GARCIA V F J, MARTÍN M 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] O'HARA J F, AVERITT R D, TAYLOR A J. Terahertz surface plasmon polariton coupling on metallic grating structures[J]. Springer Series in Chemical Physics, 2005, 79:696-698.

[12] MA H F, SHEN X, CHENG Q, et al. Broadband and high-efficiency conversion from guided waves to spoof surface plasmon polaritons: Broadband and high-efficiency conversion from guided waves to spoof surface plasmon polaritons[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(1): 146-151.

[13] SHEN X P, CUI T J, MARTIN C D, et al. Conformal surface plasmons propagating on ultrathin and flexible films[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(1): 40-45.

[14] NAGPAL P, LINDQUIST N C, OH S H, et al. Ultrasmooth patterned metals for plasmonics and metamaterials[J]. Science, 2009, 325(5940): 594-597.

[15] REN B P, QIN C H, GUAN X H, et al. Compact wideband filter with wide stopband using transition-free spoof surface plasmon polaritons[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2024, 57(3): 035101.

[16] WANG L L, CUI X Q, YANG H, et al. Miniaturized spoof surface plasmon polaritons low-pass filter with a novel transition structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(15): 1273-1276.

[17] LU S, XU K D, GUO Y J, et al. Compact spoof surface plasmon polariton waveguides with simple configurations and good performance[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(12): 3786-3792.

[18] PATHAK B B, KSHETRIMAYUM R S. Conformal and compact low pass filter based on SSPP for B5G NR FR1 radio stripe network application[C]. 2023 International Conference on Microwave, Optical, and Communication Engineering (ICMOCE) Bhubaneswar, India: IEEE, 2023: 1-4.

[19] MOZNEBI A R, AFROOZ K. Coplanar waveguide low-pass filter based on butterfly-shaped spoof surface plasmon polaritons with compact size and constant-width transition[J]. Wireless Personal Communications, 2023, 131(4): 2463-2476.

[20] 朱华利, 张勇, 叶龙芳. 基于人工表面等离子体激元高阶模式的带通滤波器[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 179-185.
ZHU H L,ZHANG Y, YE L F. Bandpass filter based on high-order mode of Spoof surface plasmon polaritons[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 179-185.

[21] 朱登玮, 曾瑞敏, 唐泽恬. 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): 245-251.
ZHU D W, ZENG R M, TANG Z T. Design of multiband filter based on spoof surface plasmon polaritons[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 245-251.

[22] 肖丙刚, 陈静, 孔胜. 基于人工表面等离子体激元带通滤波器的设计[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(2): 43-46.
XIAO B G, CHEN J, KONG SH. Design of bandpass filter based on spoof surface plasmon polaritons[J]. Electronic Components and Materials, 2016, 35(2): 43-46.

[23] 林宇聪, 肖丙刚. 基于人工表面等离子体激元和基片集成波导的带通滤波器设计[J]. 中国计量大学学报, 2021, 32(2): 225-230.
LIN Y C, XIAO B G. Bandpass filter based on spoof surface plasmon polaritonsand substrate integrated waveguide[J]. Journal of China University of Metrology, 2021, 32(2): 225-230.

[24] 傅世强,张佳琦,房少军. 一种超宽阻带微带低通滤波器的设计[J]. 微波学报,2018,34(5):41-43,48.
FU SH Q, ZHANG J Q, FANG SH J. Design of a microstrip low-pass filter with ultra-wide stopband[J]. Journal of Microwaves,2018,34(5):41-43,48.

[25] 黄晓东,冯张浩鹏,郭稼逸,等. 可精确综合的超宽阻带等波纹微带低通滤波器[J]. 微波学报,2023, 39(3): 47-50.
HUANG X D,FENG ZH H P,GUO J Y,et al. Synthesis design for microstrip lowpass filter having equiripple response and ultra-wide stopband[J]. Journal of Microwaves, 2023, 39(3): 47-50.

[26] ZHANG X W, SUN S N, YU Q M, et al. Novel high-efficiency and ultra-compact low-pass filter using double-layered spoof surface plasmon polaritons[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 64(6):

1056-1061.

[27] GAO ZH, LI X S, MAO M, et al. Ultra-compact low-pass spoof surface plasmon polariton filter based on interdigital structure[J]. Micromachines, 2023, 14(9): 1687.

作者简介

许浩东，2021年于青岛大学获得学士学位，现为中北大学硕士研究生，主要研究方向为微波毫米波电路及器件设计。

E-mail：China_xhd1999@163.com

Xu Haodong received his B. Sc. degree from Qingdao University in 2021. Now he is a M. Sc. Degree Candidatein North University of China. His main research interests include microwave millimeter wave circuit and device design.

年夫顺，1983年于西安交通大学获得学士学位，1989年于西安交通大学获得硕士学位，现任中国电子科技集团首席科学家，中北大学电子测试技术国家重点实验室主任，主要研究方向为微波毫米波测量技术及仪器。

E-mail：nfswxmnk825@163.com

Nian Fushun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi′an Jiaotong University in 1983 and M. Sc. degree from Xi′an Jiaotong University in 1989. Now he is the chief scientist of China Electronics Technology Group. He is the director of the State Key Laboratory of Electronic Testing Technology at North University of China. His main research interests include microwave and millimeter wave measurement technology and instruments.