

# 基于人工表面等离激元的小型化 电可调缺口带滤波器\*

孙淑鹏<sup>1)</sup> 程用志<sup>1)4)†</sup> 罗辉<sup>1)4)</sup> 陈浮<sup>1)4)</sup> 杨玲玲<sup>3)</sup> 李享成<sup>2)4)‡</sup>

1) (武汉科技大学信息科学与工程学院, 武汉 430081)

2) (武汉科技大学, 耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081)

3) (武汉软件工程职业学院电子工程学院, 武汉 430205)

4) (湖北隆中实验室, 襄阳 441000)

(2023 年 9 月 6 日收到; 2023 年 10 月 15 日收到修改稿)

具有小型化的缺口带滤波器在微波集成系统中具有广泛的应用前景. 本文基于倒山形单元的人工表面等离激元 (spoof surface plasmon polariton, SSPP) 提出了一种新型小型化电可调缺口带滤波器. 与相同横向尺寸的传统 SSPP 单元相比, 所提出的倒山形单元的色散曲线表现出更好的慢波特性和渐近频率降低至原来的 55%. 缺口带的频率可通过调整变容二极管两端的偏置电压来动态控制. 随着偏置电压从 0.5 V 增至 30 V, 缺口带频率从 2.1 GHz 移动到 2.3 GHz, 实现动态调节. 仿真结果表明, 缺口带滤波器通带内实现了较低的插入损耗 ( $S_{21} < -1$  dB) 和良好的回波损耗 ( $S_{11} > -10$  dB), 并且具有小型化的优势, 尺寸仅为  $0.78\lambda_g \times 0.35\lambda_g$ ,  $\lambda_g$  是中心频率处的波长. 采用印刷电路板技术实际加工了缺口带滤波器. 实物测量和仿真结果吻合较好, 验证了设计的可靠性.

**关键词:** 人工表面等离激元, 电子控制, 缺口带滤波器, 谐振器

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs, 84.30.Vn, 84.32.-y

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231447

## 1 引言

由于微波滤波器具有尺寸紧凑、体积小、易于加工的特点, 近年来广泛应用于无线通信系统中. 为了适用于不同的应用场景, 各种不同性能的微波滤波器被相继提出. 如低通、带通、高通滤波器. 缺口带滤波器凭借其可以消除通带中的频率干扰, 噪声等不必要的信号的特性, 在通信系统中同样发挥着重要的作用. 例如, Bi 等<sup>[1]</sup> 基于新型的 T 形谐振器设计了一款缺口带滤波器, 具有可控的隔离带

宽和固定的外通带边缘. 但其相对复杂的设计限制了其在微波电路中的应用.

利用人工表面等离激元 (spoof surface plasmon polariton, SSPP) 实现缺口带滤波器是目前国内外研究的热点. SSPP 是一种特殊的表面电磁波, 它在介质-金属表面上呈现指数衰减<sup>[2]</sup>. 与传统技术相比, SSPPs 具有支持弯曲结构、较低的传输损耗和加工成本的优点<sup>[3-5]</sup>, 在各种光电器件中得到了广泛应用. 如滤波器<sup>[6-11]</sup>、功分器<sup>[12]</sup>、传输线<sup>[13]</sup>和天线<sup>[14]</sup>. 通过对 SSPP 结构几何参数的调整, 可以灵活地改变器件的性能. 例如, Wang 等<sup>[15]</sup> 将

\* 国家自然科学基金 (批准号: 52304410, 51972242)、湖北省自然科学基金创新群体项目 (批准号: 2020CFA038)、湖北省重点研发计划 (批准号: 2020BAA028)、湖北省重大项目 (批准号: 2023BAA003) 和湖北省青年拔尖人才培养计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chengyz@wust.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: lixiangcheng@wust.edu.cn

SSPP 波导与环形谐振器相结合, 通过调整 SSPP 的几何参数来改变滤波器的缺口带频率. Ye 等<sup>[16]</sup>通过改变加载在 SSPP 结构中的反对称 C 形环的参数, 可以灵活地改变缺口带的数量. 然而, 仅凭借调整结构的几何参数来改变滤波器性能并不能满足复杂系统的要求. 因此, 加载变容二极管设计的电可调 SSPP 器件有着更广泛的应用. 例如, Xu 等<sup>[17]</sup>通过在超材料谐振器结构中引入变容二极管, 实现了频谱可控的 SSPP. 但是通带的插入损耗过大, 且超过 -5 dB. Zhang 等<sup>[18]</sup>提出了一种通带可重构的 SSPP 滤波器, 但由于结构中集成了较多的变容器, 影响了滤波器的传输效率.

本文提出了一种新型倒山形单元周期阵列的 SSPP 电可调缺口带滤波器, 由于单元结构的形状形似汉字“山”倒置, 故在文中以倒山形命名. 该滤波器主要由四部分组成: 微带传输线、过渡结构、倒山形人工表面等离激元和分裂环谐振器. 在不增大电路尺寸的情况下, 可以实现缺口带的连续可调. 本文首先通过数值仿真分析了倒山形 SSPP 单元的色散特性, 与传统 SSPP 单元相比, 该结构表现出更低的截止频率, 更紧凑的结构. 接着在倒山形 SSPP 单元构成的低通滤波器上加载分裂环谐振器, 实现了缺口带, 并提出对应的 LC 等效电路模型, 电路仿真结果与电磁仿真结果高度吻合. 在谐振器上加载变容二极管, 研究其等效电容对缺口带位置的影响. 同时, 通过对比分析缺口带滤波器的电场分布, 进一步验证了微波信号在新型结构中传输机制. 最后, 实物加工了结构紧凑的电可调缺口带滤波器, 测量结果与仿真结果吻合较好, 且通过改变变容二极管的电容值可以实现缺口带频率的连续可调, 从而有效抑制特定干扰频段.

## 2 倒山形 SSPP 结构的色散特性

如图 1 所示, SSPP 有多种单元结构, 如矩形、T 形等, 本文提出的新型 SSPP 单元结构形似倒立“山”字, 相比 T 形结构, 两侧的枝节增加了更多的可调变量, 自由度更高. 图 1 中红色区域是厚度为 0.508 mm 的 FR-4 介质基板, 介电常数为  $4.3 \times (1 + 0.025j)$ , 黄色部分是厚度为 0.035 mm 的铜, 电导率为  $5.8 \times 10^7$  S/m. 其他几何参数设置如下:  $p = 1.58$  mm,  $h_1 = 5.5$  mm,  $s = 1$  mm. 设计的 SSPP 在金属凹槽中传播的色散曲线可以表示为<sup>[19,20]</sup>

$$\beta = \beta_0 \sqrt{1 + (s^2/p^2) \tan^2(\beta_0 h_1)}, \quad (1)$$

其中  $\beta_0$  是电磁波在自由空间中的相位常数,  $p$  表示单元结构的周期,  $h_1$  和  $s$  分别表示倒山形 SSPP 中间金属条的长度和宽度.

为了与矩形、T 形及开口环形 SSPP 单元的色散特性作比较, 图 1(b) 为相同高度  $h_1$  下 4 种单元结构的色散曲线. 4 种类型的色散曲线均明显偏离光线, 传统矩形 SSPPs, T 形 SSPPs 单元及开口环形 SSPPs 单元结构的渐近频率分别为 7.37 GHz, 6.56 GHz 和 6.25 GHz, 而本文所提出的倒山形 SSPPs 渐近频率显著降低至 4.05 GHz. 相较于传统矩形 SSPPs、T 形 SSPPs 和开口环形 SSPPs 单元结构, 倒山形单元结构的设计具有更好的慢波特性和, 在相同渐近频率下, 有助于设计出小型化强约束性的微波器件.

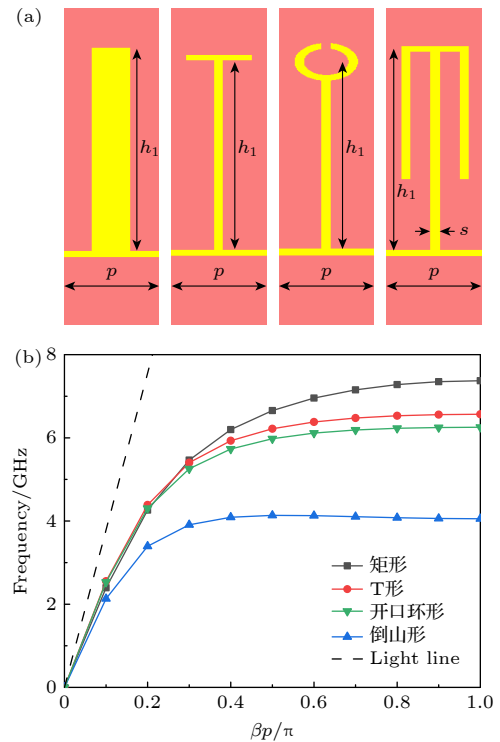


图 1 (a) 矩形、T 形、开口环形和倒山形 SSPP 结构; (b) 色散曲线的比较

Fig. 1. (a) Rectangular, T-shaped, split-ring shaped, inverted “山”-shaped SSPP structure; (b) comparison of dispersion curves.

## 3 电可调缺口带滤波器的分析和设计

基于倒山形 SSPP 单元结构设计的 SSPP 波导如图 2(a) 所示. 该结构可以划分为 3 个区域: 区

域 I 是微带线结构, 长度  $l_0 = 5$  mm, 宽度  $w_0$  取值 0.95 mm 可以实现  $50\ \Omega$  的阻抗匹配, 该区域为准 TEM 模式传输; 区域 II 是设计的过渡结构, 实现动量匹配; 区域 III 是倒山形 SSPP 单元组成的阵列, 实现 SSPP 模式的传输, 连接各 SSPP 单元结构的中间微带线宽度  $w_1 = 0.34$  mm. 为了进一步理解 SSPP 波导的物理特性, 构建了其简化的等效 LC 电路模型, 如图 2(b) 所示, 忽略介质基板的损耗, 微带线等效为电感. 区域 II 的 SSPP 波导过渡结构等效为电感和电容组成的谐振器. 区域 III 倒山形 SSPP 单元等效为电感和电容组成的谐振器. 并使用 ADS 仿真软件对等效 LC 电路模型进行仿真和优化. 由电磁仿真和等效 LC 电路仿真得到的 SSPP 波导的  $S$  参数如图 2(c) 所示, 新型

SSPP 波导结构可以实现截止频率低至 4.1 GHz 的低通特性, 与倒山形单元结构色散曲线的截止频率相一致, 印证了单元结构设计的有效性. 此外, 该结构还具有很好的带内特性, 插入损耗小于 1 dB, 回波损耗优于 -10 dB. 等效 LC 电路的仿真结果与电磁仿真结果基本吻合, 验证了设计的预期性能. 优化后等效 LC 电路的参数为  $L_1 = 1.206$  nH,  $C_1 = 1.624$  pF,  $L_2 = 0.658$  nH,  $C_2 = 0.398$  pF,  $L_3 = 1.863$  nH,  $C_3 = 0.279$  pF,  $L_4 = 0.012$  nH,  $C_4 = 0.016$  pF,  $L_5 = 1.856$  nH,  $C_5 = 1.026$  pF,  $L_6 = 3.453$  nH,  $C_6 = 0.042$  pF.

为了动态控制缺口带的工作频率, 在 SSPP 波导上加载分裂环谐振器, 并在谐振器的狭缝上安装变容二极管. 分裂环谐振器与 SSPP 波导之间存在强耦合作用, 控制 SSPP 在通带内的传播和抑制. 如图 3(a) 所示, 分裂环谐振器的初始尺寸设置为  $d_1 = 1.71$  mm,  $g_2 = 0.15$  mm,  $c = 5.41$  mm. 采用型号为 SMV1405 的变容二极管构建了其简化的等效 LC 电路模型, 同样为了简化分析过程, 忽略介质基板的损耗, 微带线等效为电感  $L_1$ ,  $L_2$  和  $L_3$ . 区域 II 的 SSPP 波导过渡结构等效为电感  $L_7$  和电容  $C_4$  组成的谐振器. 区域 III 倒山形 SSPP 单元等效为电感  $L_8$  和电容  $C_5$  组成的谐振器. 该原理图可用于了解系统的电路性能, 并作为未来设计的有用工具. 并使用 ADS 仿真软件对等效 LC 电路模型进行了仿真和优化. 优化后等效 LC 电路的参数为  $L_1 = 0.163$  nH,  $C_1 = 1.489$  pF,  $L_2 = 0.325$  nH,  $C_2 = 0.567$  pF,  $L_3 = 0.817$  nH,  $C_3 = 0.966$  pF,  $L_4 = 1.029$  nH,  $C_4 = 2.406$  pF,  $L_5 = 0.287$  nH,  $C_5 = 0.567$  pF,  $L_6 = 0.103$  nH,  $C_6 = 1.314$  pF,  $L_7 = 1.552$  nH,  $L_8 = 1.012$  nH,  $C_7 = 1.489$  pF. 由电磁仿真和等效 LC 电路仿真得到的缺口带滤波器的  $S$  参数幅值对比曲线如图 3(c) 所示. 从图 3(c) 可以很清楚看出, 电磁仿真和等效 LC 电路仿真结果基本吻合. 电磁仿真得到在谐振频点 2.27 GHz 处的透射系数  $S_{21}$  为 -23.5 dB, 对应的反射系数  $S_{11}$  为 -1 dB, 表明设计的加载开口环结构的 SSPP 滤波器呈现明显的带阻特性. 从图 3(d) 可以很清楚看出, 在谐振频点 2.27 GHz, 反射系数和透射系数相位近似为 0, 表明在该频点电磁波在该滤波器结构中处于纯驻波状态, 无法进行电磁波能量的有效传输.

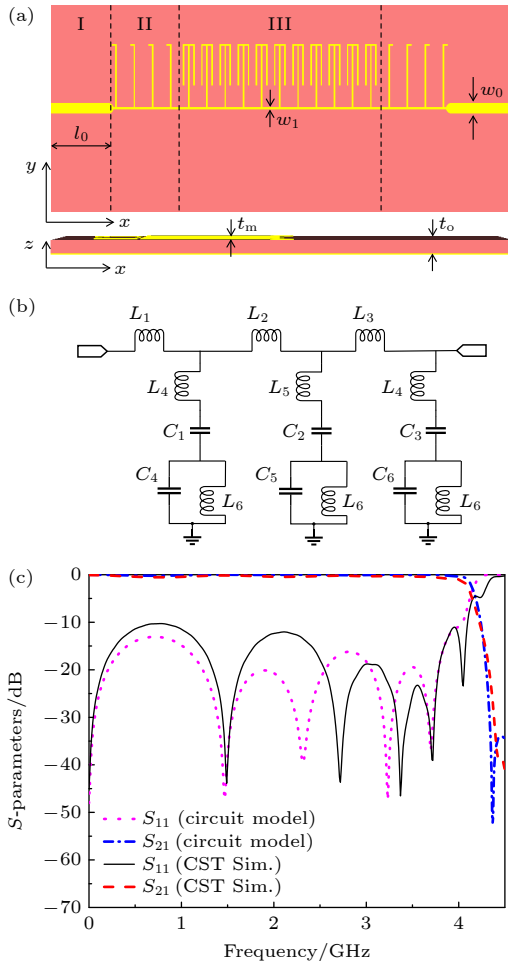


图 2 (a) SSPP 波导示意图; (b) 对应的等效 LC 电路; (c) 电磁和等效 LC 电路仿真  $S$  参数 ( $S_{11}$  和  $S_{21}$ )

Fig. 2. (a) Schematic of the SSPP waveguide; (b) the corresponding equivalent LC circuit model; (c) the comparisons of  $S$ -parameters ( $S_{11}$  and  $S_{21}$ ) from EM and equivalent LC circuit simulations.

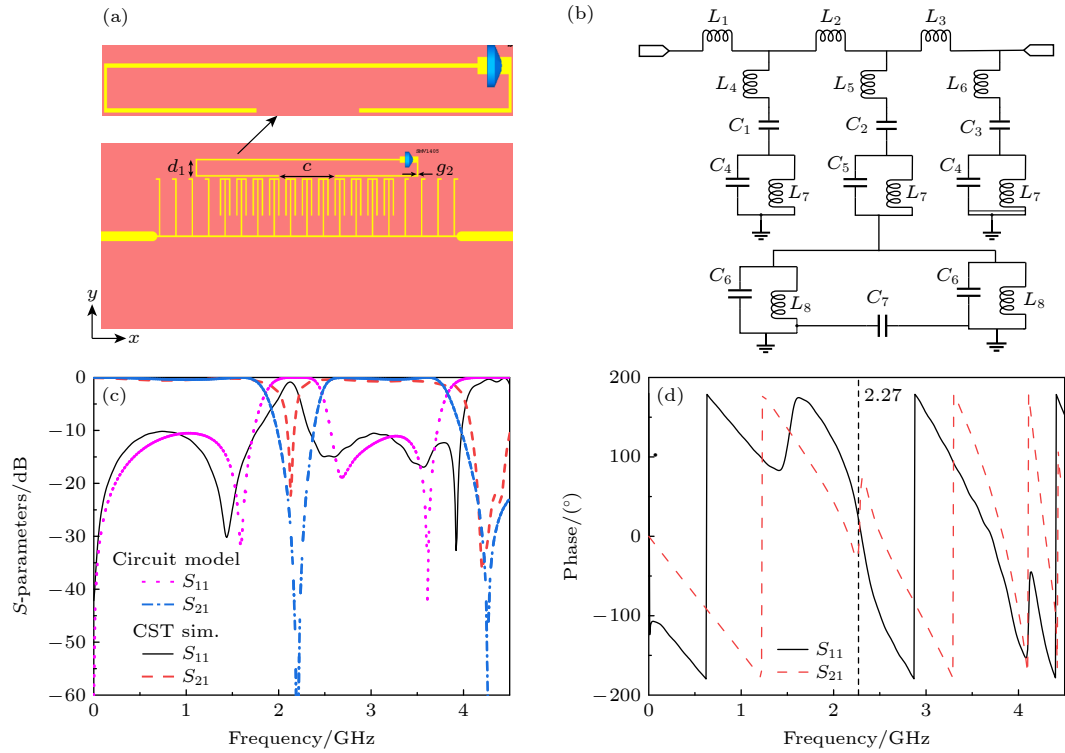


图 3 (a) 电可调缺口带滤波器示意图; (b) 对应的等效 LC 电路; (c) 电磁和等效 LC 电路仿真得到的  $S$  参数 ( $S_{11}$  和  $S_{21}$ ); (d) 电磁仿真得到的  $S$  参数 ( $S_{11}$  和  $S_{21}$ ) 相位

Fig. 3. (a) Schematic diagram of an electrically adjustable notched band filter; (b) the corresponding equivalent LC circuit model; (c) comparisons of  $S$ -parameters ( $S_{11}$  and  $S_{21}$ ) from EM and equivalent LC circuit simulations; (d) the phases of  $S$ -parameters ( $S_{11}$  and  $S_{21}$ ) from EM simulation.

通过改变变容二极管两侧的偏置电压, 其等效电容可以随之而改变, 从而可以灵活控制缺口带的位置. 如图 4 所示, 当等效电容  $C$  从 0.4 pF 增至 2.2 pF 时, 缺口带的频率从 2.4 GHz 移至 2.1 GHz 附近, 传输系数幅值也随之增大. 值得注意的是, 改变等效电容时, 缺口带的传输系数始终小于 -15 dB, 显示出了优越的带阻性能.

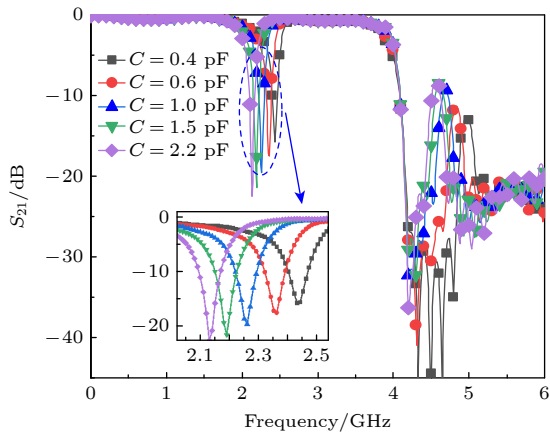


图 4 缺口带滤波器的 LC 等效电路传输系数随等效电容的变化

Fig. 4. Transmission coefficient of the notched band filter as a function of equivalent capacitance.

为进一步研究缺口带滤波器的传输特性, 图 5 展示了二极管的等效电容为 1 pF 时, 缺口带滤波器在 1.5 GHz, 2.25 GHz 和 5.0 GHz 处  $z$  分量的电场分布. 频率 1.5 GHz 在通带频率范围内, 微带线传输的准 TEM 波可以平稳地过渡到倒山形

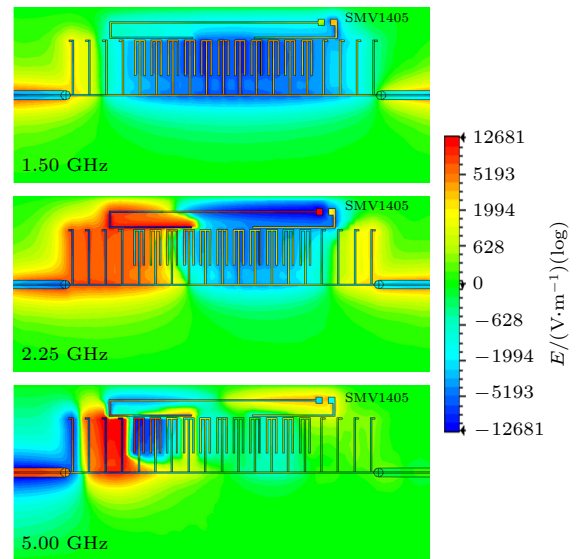


图 5 1.5 GHz, 2.25 GHz 和 5.0 GHz 处的  $z$  分量电场分布

Fig. 5.  $z$ -component electric field distribution at 1.5 GHz, 2.25 GHz and 5.0 GHz.



SSPP 区域转变成表面电磁波, 形成良好的通带特性. 在缺口带频率 2.25 GHz 处, 入射的大部分电磁波能量被耦合在分裂环谐振器中, 无法通过整个缺口带滤波器. 当工作频率位于 5.0 GHz 时, 表面电磁波沿倒山形 SSPP 结构方向传播, 此时频率大于缺口带滤波器的截止频率, 电磁能量不能通过低通滤波器, 在倒山形 SSPP 处被反射回来.

#### 4 实验验证与结果分析

为了实际验证上述电子可控缺口带滤波器的性能, 采用印刷电路板工艺制备了对应的测试样品, 整体尺寸大小仅为  $0.78\lambda_g \times 0.35\lambda_g$ , 其中  $\lambda_g$  是中心频率处的波长, 滤波器实物如图 6(a) 所示. 在电子可调缺口带滤波器的两端分别焊接一个 SMA 连接器, 使用矢量网络分析仪 (Ceyear 3656D) 对实物样品的性能进行测试. 图 6(b)—(d) 展示了变容二极管两端加载 0.5 V, 2 V 和 30 V 电压下滤波器实测和仿真的对照结果. 实物测量得到的  $S$  参数曲线与仿真结果基本吻合, 缺口带的频率变化基本

一致. 由于仿真使用的是理想电容, 没有考虑串联的寄生电阻和电感, 同时受介质基板损耗的影响, 滤波器实际测试的插入损耗相对于仿真结果略有增大.

为了进一步阐明我们所设计的缺口带滤波器的优越性能, 表 1 列出了该滤波器与现有滤波器性能参数对比结果. 通过对比, 本文所设计的电可调缺口带滤波器具有更小的插入损耗, 更紧凑的尺寸仅有  $0.78\lambda_g \times 0.35\lambda_g$ . 同时滤波器的缺口带位置有电子可调的特性.

表 1 与参考文献中滤波器的性能对比  
Table 1. Comparison with filters in references.

参考文献	频率范围	插入损耗	电可调	尺寸( $\lambda_g \times \lambda_g$ )
[5]	0—12.5	0.9	否	$0.98 \times 0.17$
[8]	7.3—11.2	2	否	$2.85 \times 0.67$
[9]	1.49—3.63	2.5	否	$1.17 \times 0.64$
[10]	0—7.1	3	否	$2.45 \times 0.47$
[11]	8—13.5	2	否	$1.87 \times 0.63$
[17]	6.4—10.2	1.5	是	$3.70 \times 0.94$
本文	0—3.7	1	是	$0.78 \times 0.35$

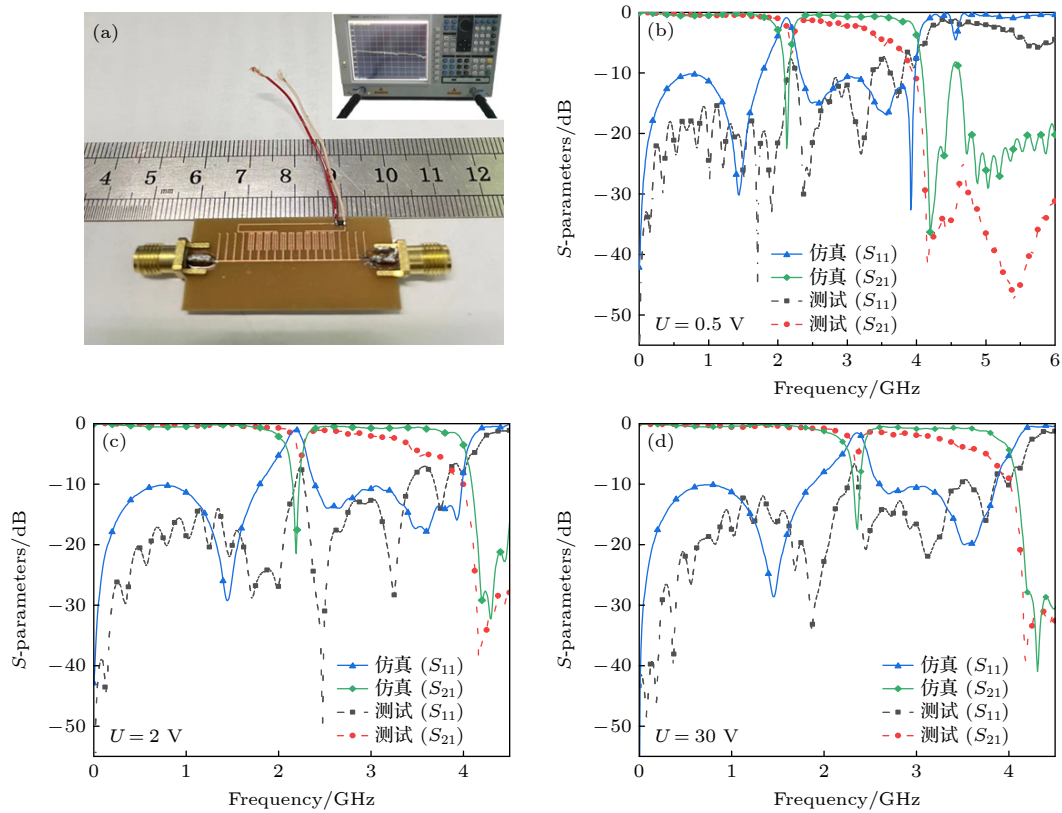


图 6 (a) 电可调缺口带滤波器的实物图; (b)—(d) 模拟和实测的  $S$  参数对比曲线.

Fig. 6. (a) Physical plot of electrically adjustable notched band filter; (b)–(d) the comparison curves of simulated and measured  $S$ -parameters.

## 5 结 论

综上所述, 本文提出了一款基于倒山形 SSPP 单元的电子可控的缺口带滤波器. 该滤波结构由一个 SSPP 低通滤波器加载分裂环谐振器组成. 倒山形 SSPP 单元具有更低的插入损耗和更好的慢波特性; 此外, 通过在分裂环谐振器的狭缝切口上加载变容二极管, 可以实现滤波器缺口带位置的连续调节. 结果表明, 随着变容二极管的偏置电压从 0.5 V 增至 30 V, 缺口带频率从 2.1 GHz 移动到 2.3 GHz. 电子可调缺口带滤波器的尺寸实现了小型化, 仅为  $0.78\lambda_g \times 0.35\lambda_g$ . 加工的电子可调缺口带滤波器的实物测试结果与仿真结果基本吻合, 验证了设计的有效性. 该新型倒山形电子可调滤波器集成度更高, 且能有效抑制干扰频段, 由此表明提出的电子可调缺口带带滤波器在可调微波频率集成电路中具有广阔的应用前景.

## 参考文献

- [1] Bi X K, Zhang X, Huang G L, Yuan T 2019 *IEEE Access* **7** 49169
- [2] Pendry J B, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J 2004 *Science* **305** 847
- [3] Liao Z, Zhao J, Pan B C 2014 *Appl. Phys.* **47** 315103
- [4] Sun S P, Cheng Y Z, Luo H, Chen F, Li X C 2023 *Plasmonics* **18** 165
- [5] Li X P, Zhang J X, Yang H L, Xi X L 2022 *J. Electron. Inf. Technol.* **44** 1327 [李绪平, 张佳翔, 杨海龙, 席晓莉 2022 电子与信息学报 **44** 1327]
- [6] Sun S P, Cheng Y Z, Luo H, Chen F, Li X C 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 064101 (in Chinese) [孙淑鹏, 程用志, 罗辉, 陈浮, 李享成 2023 物理学报 **72** 064101]
- [7] Zhu H L, Zhang Y, Ye L F 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 1523001 (in Chinese) [朱华利, 张勇, 叶龙芳 2022 光学学报 **42** 1523001]
- [8] Chen P, Li L, Yang K, Chen Q 2018 *IEEE Microw. Wirel. Co.* **28** 984
- [9] Luo Y X, Cheng Y Z, Chen F, Luo H, Li X C 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 044101 (in Chinese) [罗宇轩, 程用志, 陈浮, 罗辉, 李享成 2023 物理学报 **72** 044101]
- [10] Zhu D W, Zeng R M, Tang Z T, Ding Z, Yang C 2020 *Laser Optoelectron. Prog.* **57** 172401 (in Chinese) [朱登玮, 曾瑞敏, 唐泽恬, 丁召, 杨晨 2020 激光与光电子学进展 **57** 172401]
- [11] Sangam R S, Kshetrimayum R S 2021 *IET Microw. Antennas Propag.* **15** 289
- [12] Wang J, Zhao L, Hao Z C, Shen X P, Cui T J 2019 *Optics Letters* **44** 3374
- [13] Kianinejad A, Chen Z N, Qiu C W 2015 *IEEE T. Microw. Theory.* **63** 1817
- [14] Yin J Y, Ren J, Zhang Q, Zhang H C, Liu Y Q, Li Y B, Wan X, Cui T J 2016 *IEEE T. Antenn. Propag.* **64** 5181
- [15] Wang Z X, Zhang H C, Lu J Y 2019 *J. Phys. D Appl. Phys.* **52** 025107
- [16] Ye L F, Chen Z K, Zhang Y 2022 *IEEE T. Circuits-II* **70** 1445
- [17] Xu J, Zhang H C, Tang W X 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 191906
- [18] Lin H, Yu J B, Xiao B G 2023 *J. Phys. B* **56** 075401
- [19] Liu H, Wang Z, Zhang Q, Ma H 2019 *IEEE Access* **7** 44212
- [20] Jiang T, Shen L, Zhang X 2009 *Prog. Electromagn. Res.* **8** 91

# Miniaturized electronically controlled notched band filter based on spoof surface plasmon polaritons<sup>\*</sup>

Sun Shu-Peng<sup>1)</sup> Cheng Yong-Zhi<sup>1)4)†</sup> Luo Hui<sup>1)4)</sup> Chen Fu<sup>1)4)</sup>

Yang Ling-Ling<sup>3)</sup> Li Xiang-Cheng<sup>2)4)‡</sup>

1) (School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

2) (State Key Laboratory of Refractory Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

3) (School of Electronic Engineering, Wuhan Software Engineering Vocational College, Wuhan 430205, China)

4) (Hubei Longzhong Laboratory, Xiangyang 441000, China)

( Received 6 September 2023; revised manuscript received 15 October 2023 )

## Abstract

In this paper, a novel miniaturized electronic controlled notch band filter based on spoof surface plasmon polaritons (SSPPs) with inverted “山”-shaped unit is designed and experimentally demonstrated. The notch band filter is mainly composed of four parts: microstrip transmission line, transition structure, inverted “山”-shaped SSPPs, and split ring resonator (SRR) structure, and a varactor diode is embedded in the slit notch of the SRR structure to realize electronic control. Comparing with the traditional SSPP unit with the same lateral size, the dispersion curve of the proposed inverted “山”-shaped unit shows better slow wave characteristics, and the asymptotic frequency is reduced to 55%. The frequency of the notch band can be dynamically controlled by adjusting the external bias voltage at both ends of the varactor diode. As the external bias voltage increases from 0.5 V to 30 V, the notch band frequency can be changed from 2.1 GHz to 2.3 GHz and achieve easily electronic regulation. The simulation results show that the notched band filter achieves low insertion loss ( $S_{21} < -1$  dB) and great return loss ( $S_{11} > -10$  dB) in the pass band, which has the advantage of miniaturization with the size only  $0.78\lambda_g \times 0.35\lambda_g$ . It is worth noting that when the equivalent capacitance of the slit notch is changed, the transmission coefficient of the notched band is always less than  $-15$  dB, showing superior band-stop performance. At the same time, by comparing and analyzing the electric field distribution of notch band filter, the transmission mechanism of microwave signal is further verified. In order to verify the its effectiveness, the traditional printed circuit board technology is used to fabricate notch band filter. The measurement results are in good agreement with the simulation ones, verifying the feasibility of the design. The electronically controlled notch band filter has higher integration and can effectively suppress the interference frequency band.

**Keywords:** spoof surface plasmon polaritons, electronic control, notch band filter, resonator

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs, 84.30.Vn, 84.32.-y

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231447

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52304410, 51972242), the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of Hubei Province, China (Grant No. 2020CFA038), the Key Research and Development Project of Hubei Province, China (Grant No. 2020BAA028), the Major Program of Hubei Province, China (Grant No. 2023BAA003), and the Young Top-notch Talent Cultivation Program of Hubei Province, China.

† Corresponding author. E-mail: [chengyz@wust.edu.cn](mailto:chengyz@wust.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [lixiangcheng@wust.edu.cn](mailto:lixiangcheng@wust.edu.cn)

## 基于人工表面等离激元的小型化电可调缺口带滤波器

孙淑鹏 程用志 罗辉 陈浮 杨玲玲 李享成

## Miniaturized electronically controlled notched band filter based on spoof surface plasmon polaritons

Sun Shu-Peng Cheng Yong-Zhi Luo Hui Chen Fu Yang Ling-Ling Li Xiang-Cheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 034101 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231447

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231447>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于人工表面等离激元的双通带频率选择结构设计

Design of dual-band-pass frequency selective structure based on spoof surface plasmon polariton

物理学报. 2018, 67(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180696>

#### 基于人工表面等离激元探针实现太赫兹波的紧聚焦和场增强

Tight focus and field enhancement of terahertz waves using a probe based on spoof surface plasmons

物理学报. 2020, 69(5): 054201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191531>

#### 基于人工表面等离激元结构的全向隐身

Omnidirectional cloaking based on spoof surface plasmonic structure

物理学报. 2019, 68(15): 154101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190283>

#### 拓扑表面等离激元

Topological surface plasmon polaritons

物理学报. 2019, 68(22): 224101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191085>

#### 基于人工表面等离激元结构的超表面磁镜

Magnetic mirror metasurfaces based on spoof surface plasmonic structures

物理学报. 2020, 69(23): 234101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200514>

#### 表面等离极化激元的散射及波前调控

Scatterings and wavefront manipulations of surface plasmon polaritons

物理学报. 2020, 69(15): 157804 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200614>