

# 基于戟形人工表面等离激元的紧凑型 宽带外抑制带通滤波器\*

孙淑鹏<sup>1)</sup> 程用志<sup>1)†</sup> 罗辉<sup>1)</sup> 陈浮<sup>1)</sup> 李享成<sup>2)</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)

(2022年12月1日收到; 2022年12月27日收到修改稿)

提出了一种基于戟形人工表面等离激元 (spoof surface plasmon polaritons, SSPPs) 的具有宽频带外抑制特性的紧凑型宽带带通滤波器. 设计的滤波结构是通过在基板底层蚀刻周期性的戟形槽和在顶层加载带有月牙形贴片的微带到槽线过渡结构实现的. 与传统的 I 形 SSPPs 相比, 戟形 SSPPs 具有更好的慢波特性, 基于戟形 SSPPs 设计的带通滤波器可以实现更紧凑的结构. 设计的滤波器通带的上下截止频率可以分别通过调整 SSPPs 结构和微带到槽线过渡结构来调节. 仿真结果表明, 宽带带通滤波器中心频率为 2.85 GHz, 相对带宽为 130%, 通带内的回波损耗优于 -10 dB, 在 5.6—20.0 GHz 之间具有极强的 -40 dB 带外抑制. 设计的宽带带通滤波器结构尺寸紧凑, 仅为  $1.08\lambda_g \times 0.39\lambda_g$ , 其中  $\lambda_g$  是中心频率处的波长. 为了验证宽带带通滤波器的有效性, 采用传统的印刷电路板技术加工了宽带带通滤波器. 测量结果与仿真结果吻合较好, 验证了设计的可行性. 本文所提出的宽带带通滤波器显示了在微波频率下开发 SSPPs 功能器件和电路的良好前景.

**关键词:** 人工表面等离激元, 宽带带通滤波器, 微带到槽线过渡结构

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

**DOI:** 10.7498/aps.72.20222291

## 1 引言

带通滤波器是射频和微波系统中的重要组成部分. 在无线发射器和接收器等实际应用中, 带通滤波器的功能是允许特定范围的频率通过并抑制其他频率. 依据不同的规范和要求, 可以通过多种方法实现带通滤波器的设计. 迄今为止, 已经报道了许多关于带通滤波器的研究<sup>[1-3]</sup>. 例如, Noura 等<sup>[1]</sup>提出了一种缺陷地结构的带通滤波器, 在 5.97—7.5 GHz 的频率内实现了优异的带通特性. Shen 等<sup>[2]</sup>提出使用砷化镓工艺制备了宽带带通滤波器, 频率范围为 24.2—29.7 GHz, 实现了宽通带特性. 虽然以上这些带通滤波器具有效率高, 通带可控的优

点, 但是其结构设计相对复杂, 限制了其在微波电路中的实际应用.

人工表面等离激元 (spoof surface plasmon polaritons, SSPPs) 作为一种特殊的人工周期结构, 可以模拟自然 SPP 在金属-介质界面传播的能力, 在太赫兹和低频微波区域呈指数衰减<sup>[4]</sup>. 与传统技术相比, SSPPs 具有宽带、低交叉耦合、低成本、低损耗等明显优势<sup>[5]</sup>. 此外, 这些 SSPPs 结构还具有强场限制的优点, 表现出与自然 SPPs 相同的色散特性, 可以通过调节凹槽的形状和尺寸来改变其截止频率. 由于这些良好的特性, SSPPs 可以广泛应用于不同功能的光电器件中, 如滤波器<sup>[6-9]</sup>、功分器<sup>[10]</sup>、传输线<sup>[11]</sup>和天线<sup>[12]</sup>. 通过将周期性 SSPP 结构与传统传输线相结合, 例如基片集

\* 湖北省自然科学基金创新群体项目 (批准号: 2020CFA038) 和湖北省重点研发计划 (批准号: 2020BAA028) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chengyz@wust.edu.cn

成波导 (substrate integrated waveguide, SIW)、共面波导 (coplanar waveguide, CPW)、微带线<sup>[13–18]</sup>等带通滤波器被广泛提出. 例如, Wang 等<sup>[13]</sup>于 2019 年通过将 SSPP 波导和 CPW 耦合结构与开口环谐振器相结合, 构建了一个通带可调的带通滤波器. Guan 等<sup>[14]</sup>通过结合 SSPP 的低通特性和 SIW 的高通特性, 设计了一个具有低辐射损耗的宽带带通滤波器, 频率范围为 16.1–25.4 GHz. 尽管此类设计可以实现相对较宽的带宽, 但是带外抑制水平仍然有很大的改善空间. 近年来, 研究者们提出了几种具有宽阻带的 SSPP 带通滤波器<sup>[19,20]</sup>. 例如, Liu 等<sup>[19]</sup>通过设计微带到槽线和槽线到 SSPP 的过渡结构, 制作了一种宽带差分带通滤波器, -40 dB 处带外抑制频率范围接近 14 GHz. 虽然此类设计都具有较宽的带外抑制水平, 但尺寸过大, 难以集成到微波电路系统中.

本文提出了一种基于戟形 SSPP 的宽频带外抑制特性的紧凑型宽带带通滤波器. 滤波结构是通过在基板底部金属层蚀刻周期性的戟形槽和在顶部加载带有月牙形贴片的微带到槽线过渡结构实现的. 第一, 对比了戟形 SSPP 单元与传统的矩形和 I 形 SSPP 单元的色散特性, 戟形 SSPP 单元表现出更好的慢波特性和慢波特性, 有助于实现更紧凑的设计. 第二, 设计了 4 种不同 SSPP 单元数量的带通滤波器, 研究 SSPP 单元阵列长度对宽带滤波特性的影响. 第三, 分析了宽带带通滤波器的电场分布, 说明了传输机理. 第四, 设计了宽带带通滤波器的 LC 等效电路模型, 电路仿真结果与电磁仿真结果高度吻合. 第五, 研究了结构几何参数对宽带带通滤波器色散特性和传输特性的影响. 最后, 加工出

宽带滤波器样品, 实物测量结果与仿真结果吻合较好, 验证了良好的宽带滤波性能. 该宽带带通滤波器展现出在微波和太赫兹器件的开发中广阔的应用前景.

## 2 戟形 SSPP 结构的色散特性

通常的 SSPP 单元由金属膜图案和介质基板构成的双层结构, 图 1(a) 和图 1(b) 给出了传统的 SSPP 单元结构: 矩形和 I 形单元. 本文提出的戟形单元如图 1(c) 所示. 蓝色部分是 FR-4 介质基板, 介电常数为  $4.3 \times (1 + 0.025j)$ , 厚度 0.508 mm. 黄色部分为铜, 电导率为  $5.8 \times 10^7$  S/m, 厚度 0.035 mm. 初始参数  $w = 0.14$  mm,  $h_1 = 3.8$  mm,  $l_3 = 1.6$  mm,  $r_1 = 1$  mm,  $r_2 = 0.5$  mm,  $p = 3.3$  mm,  $s = 0.5$  mm. 其中  $w$  表示中心开槽线的宽度,  $h_1$  表示戟形槽的深度,  $l_3$  表示 I 形槽顶部的宽度,  $r_1$  表示圆的半径,  $r_2$  表示由圆形到月牙形之间的距离,  $p$  表示单元结构的周期,  $s$  表示垂直开槽线的宽度.

为了说明其传播机理和滤波结构的有效性, 基于标准的时域有限差分 (FDTD) 方法对其进行了全波仿真. 将电磁波传播方向 ( $z$  方向) 上的开放界设置为外部区域的边界条件,  $x$  方向和  $y$  方向上的边界条件设置为完美电导体 (PECs). 为了探究基于 SSPPs 的滤波器结构的传播特性, 首先研究了单元结构的色散特性. SSPP 在金属凹槽中传播的色散曲线可以表示为

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

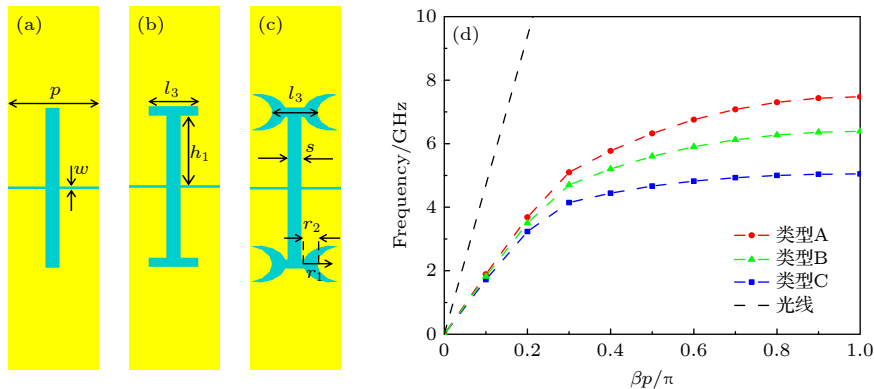


图 1 (a) 矩形 SSPP 单元; (b) I 形 SSPP 单元; (c) 戟形 SSPP 单元; (d) 色散曲线的比较

Fig. 1. (a) Rectangular-shaped SSPP unit cell; (b) I-shaped SSPP unit cell; (c) halberd-shaped SSPP unit cell; (d) comparison of dispersion curves.

其中,  $\beta_0$  是电磁波在自由空间中的相位常数,  $p$  是单元结构的周期,  $s$  和  $h$  分别是凹槽的宽度和深度. 本文首先建立垂直开槽线的宽度为  $s$ , 并固定单元结构的周期为  $p$ .

为了比较不同单元结构的色散特性, 将矩形 SSPPs、I 形 SSPPs 和戟形 SSPPs 单元结构分别定义为类型 A、类型 B 和类型 C, 3 种单元结构的色散曲线如图 1(d) 所示. 类型 A 和类型 B 单元结构的色散曲线明显偏离光线, 渐近频率分别为 7.48 GHz 和 6.39 GHz, 表明类型 A 和类型 B 单元结构能将电磁波限制在金属表面. 而类型 C 单元结构与光线的偏差更加明显, 渐近频率仅为 5.04 GHz. 另外, 在相同的频率下, 戟形结构的波矢量最大, 具有更强的表面波约束能力. 也就意味着相较于传统矩形 SSPPs 和 I 形 SSPPs 单元结构, 在传统的矩形槽上引入戟形槽的设计, 使单元结构具有更好的慢波特性, 可以设计出小型化强约束性的器件.

### 3 SSPP 带通滤波器的分析和设计

基于戟形 SSPP 单元结构设计的宽带带通滤波器如图 2 所示. 宽带带通滤波器底层由微带到槽线的过渡结构和戟形 SSPP 单元阵列组成. 带有月牙形贴片的微带线作为输入输出端口加载在介质基板顶层. 由于微带线支持准 TEM 波传输, 表面等离子体波导支持 SSPPs 波传播, 如果微带线直接馈入 SSPP 波导, 会造成动量不匹配和较大的反射损耗. 因此设计了从槽线到 SSPP 波导的过渡结构. 其中戟形槽的深度从  $h_4$  到  $h_1$  过渡, 实现宽频带内 SSPP 波导与槽线之间的动量匹配, 将准 TEM 模式转换为支持表面波传输的 SSPP 模式. 图 2 中的  $l_1$  代表微带线的长度,  $l_0$  代表微带线的宽度,  $r$  表示圆形贴片的半径,  $r_s$  表示由圆形贴片移动为月牙形贴片的距离,  $r_0$  表示圆形槽的半径,  $r_d$  表示由圆形槽移动为月牙槽的距离,  $l_2$  表示微带线到基板边缘的距离. 初始变量的大小设置为:  $r = 4 \text{ mm}$ ,  $r_s = 3.7 \text{ mm}$ ,  $l_0 = 0.93 \text{ mm}$ ,  $l_1 = 11.12 \text{ mm}$ ,  $r_d = 3.1 \text{ mm}$ ,  $r_0 = 3.7 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 8.3 \text{ mm}$ .

为研究 SSPP 单元数量  $N$  对宽带带通滤波器性能的影响, 如图 3(a) 所示, 设计了 4 种不同数量的 SSPP 单元的带通滤波器. SSPP 的单元数量依

次为  $N = 4, N = 3, N = 2, N = 1$ . 图 3(b) 中显示了不同 SSPP 单元数量的带通滤波器的  $S$  参数. 不难看出, 随着  $N$  从 1 增至 4, 通带的低频特性基本上没有变化, 但是可以获得更好的高频特性, 即发射信号在终端频率下的衰减程度 (矩形系数) 存在显著差异. 矩形系数的定义如下:

$$n_{SF} = \frac{f_{BW, k \text{ dB}}}{f_{BW, 3 \text{ dB}}} = \frac{f_{k \text{ dB}}^U - f_{k \text{ dB}}^L}{f_{3 \text{ dB}}^U - f_{3 \text{ dB}}^L}, \quad (2)$$

其中,  $f_{BW, k \text{ dB}}$  和  $f_{BW, 3 \text{ dB}}$  分别是宽带带通滤波器  $k \text{ dB}$  和  $-3 \text{ dB}$  的绝对带宽.  $f_{k \text{ dB}}^U$  和  $f_{k \text{ dB}}^L$  分别是  $k \text{ dB}$

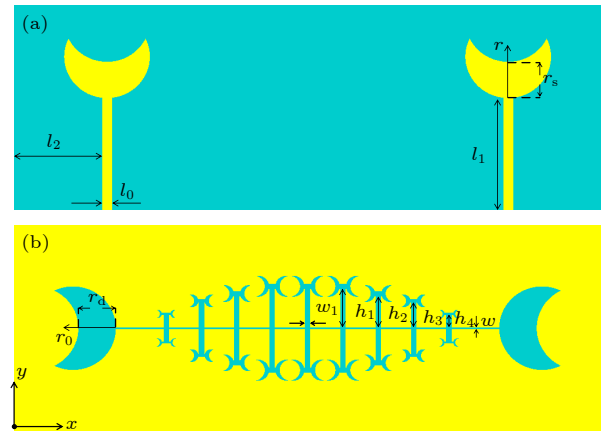


图 2 宽带带通滤波器的示意图 (a) 顶视图; (b) 底视图  
Fig. 2. Schematic of broadband bandpass filter: (a) Top view; (b) bottom view.

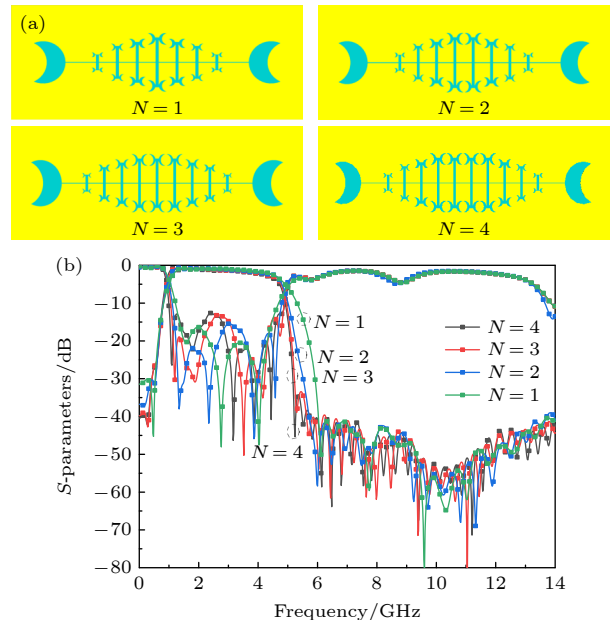


图 3 (a) 宽带带通滤波器的示意图 ( $N = 1, 2, 3, 4$ ); (b) 不同 SSPP 单元数量下的宽带带通滤波器的  $S$  参数

Fig. 3. (a) Schematic of broadband bandpass filter ( $N = 1, 2, 3, 4$ ); (b)  $S$ -parameters of broadband bandpass filters with different SSPP element numbers.

带宽的上下截止频率,  $f_{3\text{dB}}^{\text{U}}$  和  $f_{3\text{dB}}^{\text{L}}$  分别是-3 dB 带宽的上下截止频率. 当  $k = -30$  时,  $N = 1, 2, 3, 4$  的带通滤波器的矩形系数  $n_{\text{SF}}$  分别为 1.52, 1.42, 1.39, 1.38. 不难看出, 随着 SSPP 单元数量从  $N = 3$  增至 4 时, 对矩形系数的改善有限, 而回波损耗持续增大. 因此, 为了平衡矩形系数, 阻抗匹配的性能以及宽带带通滤波器的整体尺寸, 最终选择 SSPP 的单元数量  $N = 3$ .

为了进一步研究宽带带通滤波器的传输特性, 给出了滤波器在 0.5, 3.0 和 7.0 GHz 处  $z$  分量的电场分布. 如图 4(b) 所示, 当入射电磁波在 3.0 GHz 沿  $x$  轴正方向传播时,  $z$  分量电场在整个滤波器上分布均匀, 表明在通带频率范围内, 电磁波能够有效通过宽带带通滤波器. 这也意味着微带线支持的准 TEM 波可以平滑地转换为支持表面波传输的 SSPP 模式, 从而产生具有良好传输性能的通带. 如图 4(a) 所示, 在 0.5 GHz 处, 大部分  $z$  分量电场集中在基板顶部的微带线上, 因为滤波器结构是从微带线跳跃到槽线, 所以 0.5 GHz 处的信号无法通过 SSPP 传播. 不难看出, 当工作频率位于 7.0 GHz 时, 如图 4(c) 所示. 表面电磁波沿月牙形 SSPP 结构方向传播, 由于其频率大于滤波器的截止频率, 电磁能量在月牙形 SSPP 结构处反射回来, 无法通过整个滤波器.

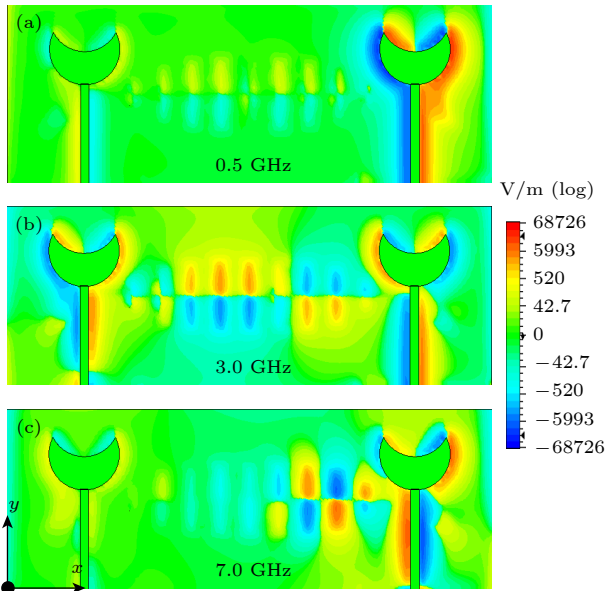


图 4 模拟了 (a) 0.5 GHz, (b) 3.0 GHz 和 (c) 7.0 GHz 处的宽带带通滤波器  $z$  分量电场分布

Fig. 4. Simulated  $z$ -component electric field distributions of the broadband bandpass filter at (a) 0.5 GHz, (b) 3.0 GHz, and (c) 7.0 GHz.

为了进一步理解宽带带通滤波器的物理特性, 构建了其简化的等效 LC 电路模型, 如图 5(a) 所示.  $p_1, p_2$  分别表示端口 1 和端口 2, 带有月牙形贴片的微带用  $L_1$  表示, 通过  $C_1$  耦合到 SSPP 上, 其相互耦合电容用  $C_0$  表示.  $L_3, C_3$  表示戟形 SSPP 单元电感和电容, 过渡段的戟形槽用并联的电感和电容用  $L_2$  和  $C_2$  表示. 带有月牙槽的开槽线用电感和电容  $L_4$  和  $C_4$  的并联结构表示. 使用 ADS 仿真软件对等效 LC 电路模型进行了仿真和优化. 由电磁仿真和等效 LC 电路仿真得到的宽带带通滤波器的  $S$  参数如图 5(b) 所示, 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. 另外, 仿真结果与电磁仿真结果出现偏差, 是由于等效 LC 电路仿真忽略了实际结构之间的耦合作用. 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. 优化后等效 LC 电路的参数为:  $L_1 = 1.5324$  nH,  $C_1 = 0.2406$  pF,  $L_2 = 0.2183$  nH,  $C_2 = 0.0623$  pF,  $L_3 = 0.4283$  nH,  $C_3 = 0.3323$  pF,  $L_4 = 1.4283$  nH,  $C_4 = 0.0323$  pF.

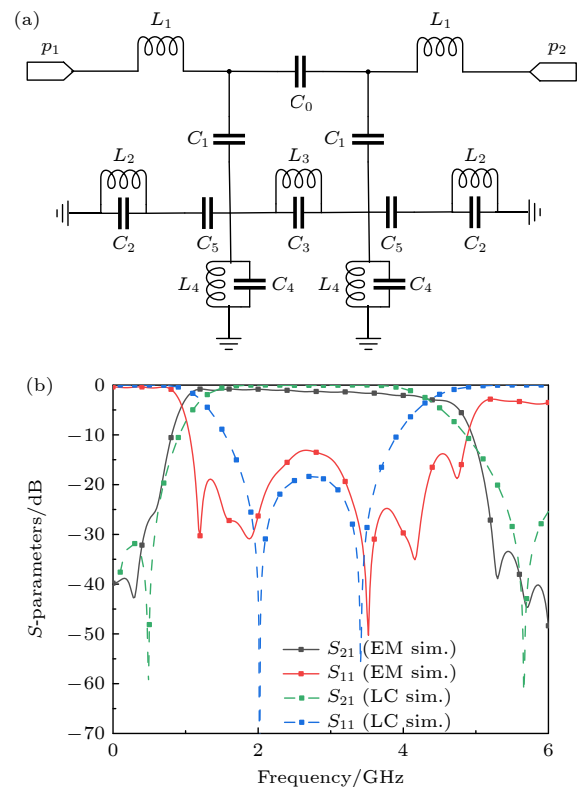


图 5 (a) 宽带带通滤波器的等效 LC 电路; (b) 电磁仿真和等效 LC 电路  $S$  参数的对比曲线

Fig. 5. (a) Equivalent LC circuit of broadband bandpass filter; (b) comparison of electromagnetic simulation and equivalent LC circuit  $S$ -parameters.

由于所提出的宽带带通滤波器的上、下截止频率分别由 SSPP 结构和微带到槽线的过渡结构决定. 因此, 通过调整这两种结构的几何参数可以改变宽带带通滤波器的传输特性. 为验证这种调谐能力, 对  $h_1$  和  $w$  进行参数扫描, 其他尺寸保持与图 2 一致. 如图 6(a) 所示, 首先分析了不同槽深度下载形 SSPP 单元的色散特性. 当戟形槽的深度  $h_1$  从 3.1 mm 增至 5.2 mm 时, 色散曲线的渐近频率从 5.56 GHz 降低到 4.27 GHz. 因为随着戟形槽深度的增大, 单元结构可以限制更多的电磁能量, 从而降低截止频率. 图 6(b) 显示随着戟形槽深度  $h_1$  的增大, 通带的高截止频率红移, 低截止频率保持不变, 与图 6(a) 中色散曲线的变化一致.

随后分析了开槽线的宽度对宽带带通滤波器传输特性的影响. 图 7(a) 给出了不同  $w$  下载形 SSPP 单元的色散曲线, 随着开槽线的宽度  $w$  从

0.1 mm 增至 0.22 mm, 色散曲线的渐近频率从 4.86 GHz 增至 5.22 GHz, 开槽线的宽度  $w$  与渐近频率呈正相关. 图 7(b) 给出了开槽线的宽度对宽带带通滤波器传输特性的影响. 随着  $w$  的增大, 通带的高频边缘蓝移, 与图 7(a) 中色散曲线的变化一致. 验证了在不增大电路尺寸的情况下, 通过调整  $h_1$  和  $w$  的值可以灵活控制宽带带通滤波器的上截止频率.

低频边缘则由微带线到开槽线的过渡结构决定. 图 8 给出了宽带带通滤波器的传输系数随开槽线连接的月牙槽大小的变化. 宽带带通滤波器的低频边缘随着  $r_d$  的增大而减小. 通过调整  $r_d$ , 可以在一定的频率范围内调整宽带带通滤波器的下截止频率. 以上分析表明, 宽带带通滤波器的上下截止频率可以单独控制, 通带范围具有灵活可控的特点.

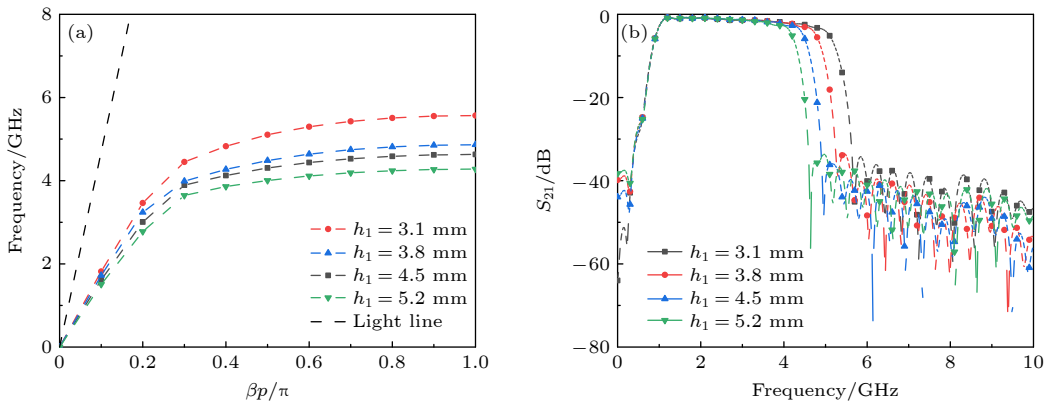


图 6 (a) 不同戟形槽深度下载形 SSPP 的色散曲线; (b) 不同戟形槽深度下宽带带通滤波器的透射系数 ( $S_{21}$ )

Fig. 6. (a) Dispersion curves of halberd-shaped SSPP at different depth of halberd grooves; (b) transmission coefficient ( $S_{21}$ ) of broadband bandpass filter at different depth of halberd grooves.

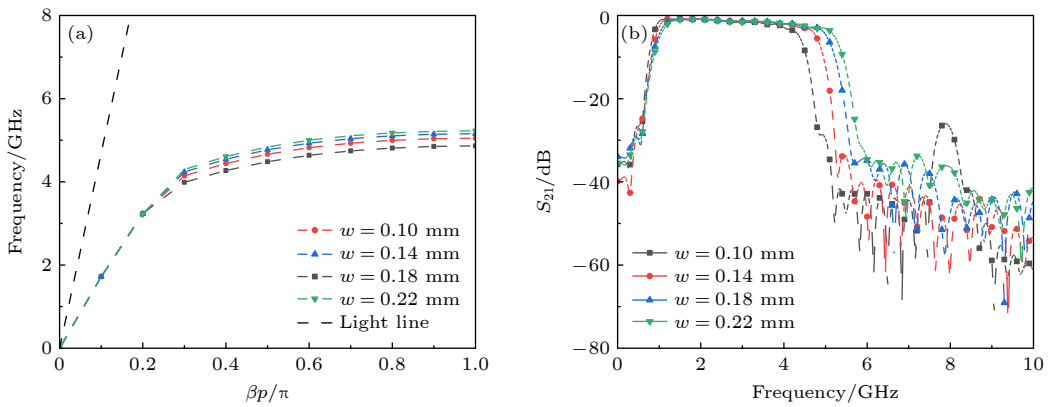


图 7 (a) 不同开槽线宽度下载形 SSPP 的色散曲线; (b) 不同开槽线宽度下宽带带通滤波器的透射系数 ( $S_{21}$ )

Fig. 7. (a) Dispersion curves of halberd-shaped SSPP at different slotline widths; (b) transmission coefficients ( $S_{21}$ ) of broadband bandpass filters at different slotline widths.

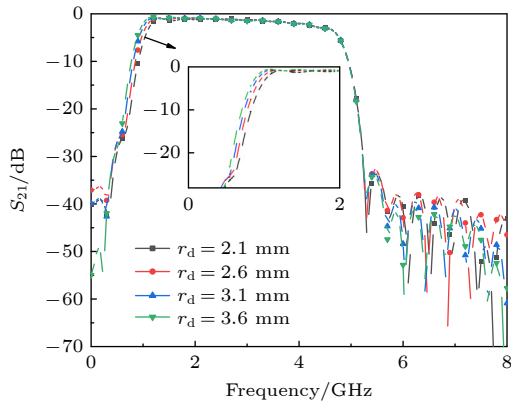


图 8 模拟了不同月牙槽  $r_d$  下宽带带通滤波器的透射系数 ( $S_{21}$ )

Fig. 8. Transmission coefficient ( $S_{21}$ ) of broadband band-pass filter under different crescent  $r_d$ .

### 4 实验验证与结果分析

为了进一步验证设计的宽带带通滤波器的性能,进行了微波实验. 首先,根据优化后的仿真结果,采用传统的 PCB(印刷电路板)工艺制备了宽带带通滤波器的原型. 制备的宽带带通滤波器的物理参数如下:  $w = 0.14$  mm,  $r = 4$  mm,  $r_s = 3.7$  mm,  $l_0 = 0.93$  mm,  $r_0 = 3.7$  mm,  $l_2 = 8.3$  mm. 然后,将两个 SMA 连接器焊接在滤波器的输入和输出端口上. 图 9(a) 和图 9(b) 为尺寸为  $55$  mm  $\times$   $20$  mm  $\times$   $5.43$  mm 的宽带带通滤波器的正反面照片. 使用矢量网络分析仪 (Ceyear 3656D) 测量了宽带带通滤波器的传输特性. 图 9(c) 给出了实测的  $S$  参数 ( $S_{11}$  和  $S_{21}$ ), 除了一些微小的差异外,与仿真结果基本一致. 阻带范围内存在的差异是合理的,因为当带外抑制小于  $-40$  dB 时,信号的传输能量已经非常弱,此时的测量结果对设备的噪声非常敏感. 测试结果表明,滤波器在  $1.0$ — $4.7$  GHz 范围内有 130% 的  $-3$  dB 带宽,通带内的回波损耗优于

$-10$  dB, 在  $5.6$ — $20.0$  GHz 之间具有极宽的  $-40$  dB 的带外抑制. 表 1 列出了与现有滤波器相比,该宽带带通滤波器的特性. 由于戟形单元结构的慢波特性和微带到槽线的过渡结构,该带通滤波器不用设计过长的阻抗匹配部分,实现了更紧凑尺寸的同时还具有更强的带外抑制特性.

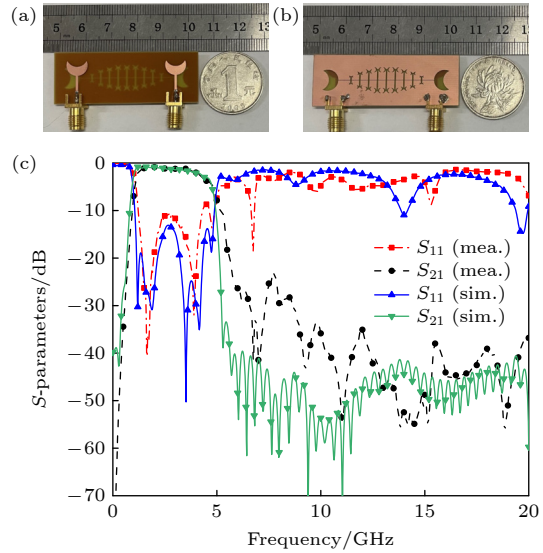


图 9 (a), (b) 制备的宽带带通滤波器的正面和背面视图; (c) 模拟和实测的  $S$  参数的对比曲线

Fig. 9. (a), (b) Top view and bottom view of the broadband bandpass filter; (c) comparison of simulated and measured  $S$ -parameters.

由以上的仿真与实验结果可知,本研究中使用的是成本较低、损耗比较大的 FR-4 介质基板 (介电常数为 4.3 和损耗角正切为 0.025), 在宽带范围内有较大的插入损耗. 若采用介电常数为 2.2, 损耗角正切为 0.0009 的低损耗 Rogers RT5880 介质基板,所制得的宽带带通滤波器的性能可以得到进一步的改善. 如图 10 所示,当采用损耗角正切值更小的 Rogers RT5880 介质基板时,可以有效增大通带的带宽并且显著降低插入损耗.

表 1 与参考文献中带通滤波器的性能对比 (FBW, 分数带宽)

Table 1. Comparison of our proposed bandpass filters with bandpass filters in references (FBW, fractional bandwidth).

参考文献	频率范围	FBW/%	带外抑制	尺寸( $\lambda_g \times \lambda_g$ )
[8]	7.3—11.2	42.2	$-40$ dB@11.8—19.8 GHz	$2.85 \times 0.67$
[15]	1.18—6.18	135.8	$-31$ dB@6.9—18.0 GHz	$1.83 \times 0.46$
[17]	8—16	67.0	$-7$ dB@16.2—17.0 GHz	$2.64 \times 0.29$
[18]	8.0—13.5	51.0	$-40$ dB@14.0—19.5 GHz	$1.87 \times 0.63$
[19]	2.1—8.0	16.8	$-30$ dB@8.9—20.0 GHz	$1.47 \times 0.42$
[20]	1.1—7.3	147.6	$-30$ dB@7.5—20.0 GHz	$2.95 \times 0.89$
本文	1.0—4.7	130.0	$-40$ dB@5.6—20.0 GHz	$1.08 \times 0.39$

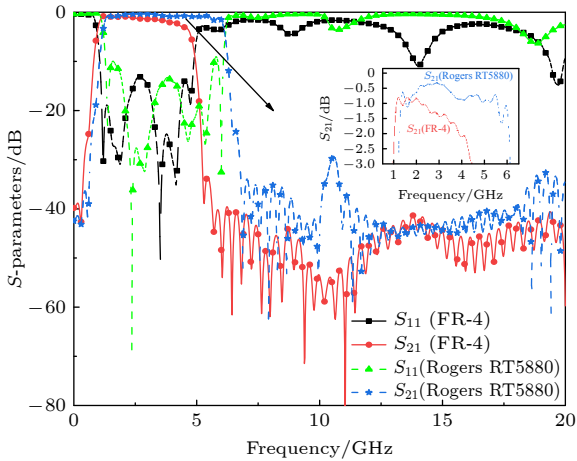


图 10 模拟了不同介质基板下宽带带通滤波器的  $S$  参数 ( $S_{21}$  和  $S_{11}$ )。

Fig. 10. Simulated  $S$ -parameters ( $S_{21}$  and  $S_{11}$ ) of wideband bandpass filters on different dielectric substrates.

## 5 结论

综上所述, 本文提出了一种基于戟形 SSPP 单元的具有宽带外抑制特性的紧凑型宽带带通滤波器. 设计的宽频带滤波结构是通过在基板底部蚀刻周期性的戟形槽和带有月牙形贴片的微带线到槽线过渡实现的. 利用 FDTD 算法对宽带带通滤波器的色散特性和传输特性进行了数值分析. 结果表明, 戟形 SSPP 单元相较于传统的矩形、I 形 SSPP 单元具有更好的慢波特性. 通过改变 SSPP 结构和微带到槽线的过渡结构的几何参数可以灵活地调节宽带带通滤波器的上下截止频率. 仿真结果表明, 宽带带通滤波器在 1.0—4.7 GHz 内有 130% 的  $-3$  dB 带宽, 通带内的回波损耗优于  $-10$  dB, 5.6—20.0 GHz 之间具有极宽的  $-40$  dB 的带外抑制. 滤波器的尺寸为  $1.08\lambda_g \times 0.39\lambda_g$ . 为了验证了设计的有效性, 采用传统的 PCB 技术加工了宽带带通滤波器实物, 实测结果与仿真结果高度吻合. 本文所

提出的宽带带通滤波器凭借其紧凑的尺寸和极宽的带外抑制, 将在微波和太赫兹系统中具有广阔的应用前景.

## 参考文献

- [1] Noura A, Benaissa M, Abri M, Badaoui H, Vuong T H, Tao J 2019 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **61** 1473
- [2] Shen G X, Che W Q, Feng W J, Shi Y R, Shen Y M, Xu F 2021 *IEEE Trans. Circuits Syst. II* **68** 1778
- [3] Lan F, Gao X, Qi L M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104209 (in Chinese) [兰峰, 高喜, 齐丽梅 2014 物理学报 **63** 104209]
- [4] Pendry J B, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J 2004 *Science* **305** 847
- [5] Liao Z, Zhao J, Pan B C, Shen X P, Cui T J 2014 *J. Phys. D* **47** 315103
- [6] 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]
- [7] Sheng S W, Li K, Kong F M, Yue Q Y, Zhuang H W, Zhao J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 108402 (in Chinese) [盛世威, 李康, 孔繁敏, 岳庆扬, 庄华伟, 赵佳 2015 物理学报 **64** 108402]
- [8] Chen P, Li L P, Yang K, Chen Q 2018 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **28** 984
- [9] Sun S P, Cheng Y Z, Luo H, Chen F, Li X C 2023 *Plasmonics* **18** 165
- [10] Wang J, Zhao L, Hao Z C, Shen X, Cui T J 2019 *Opt. Lett.* **44** 3374
- [11] Kianinejad A, Chen Z N, Qiu C W 2015 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **63** 1817
- [12] Yin J Y, Ren J, Zhang Q, Zhang H C, Liu Y Q, Li Y B, Cui T J 2016 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **64** 5181
- [13] Wang J, Zhao L, Hao Z C 2019 *IEEE Access* **7** 35089
- [14] Guan D F, You P, Zhang Q F, Xiao K, Yong S W 2017 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **65** 4925
- [15] Moznebi A R, Afrooz K, Arsanjani A 2022 *Int. J. Electron. Commun.* **145** 154084
- [16] Luo Y X, Yu J W, Cheng Y Z, Chen F, Luo H 2022 *Appl. Phys. A* **128** 1
- [17] Guan D F, You P, Zhang Q F, Yang Z B, Liu H W, Yong S W 2018 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **66** 2946
- [18] Sangam R S, Kshetrimayum R S 2021 *IET Microw. Antennas Propag.* **15** 289
- [19] Liu H, Wang Z B, Zhang Q F, Ma H F, Ren B P, Wen P 2019 *IEEE Access* **7** 44212
- [20] Guo Y J, Xu K D, Liu Y H, Tang X H 2018 *IEEE Access* **6** 10249

# Compact broadband bandpass filter with wide stopband based on halberd-shaped spoof surface plasmon polariton\*

Sun Shu-Peng<sup>1)</sup> Cheng Yong-Zhi<sup>1)†</sup> Luo Hui<sup>1)</sup>  
Chen Fu<sup>1)</sup> Li Xiang-Cheng<sup>2)</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*)

( Received 1 December 2022; revised manuscript received 27 December 2022 )

## Abstract

In this paper, a compact broadband bandpass filter with wide out-of-band rejection characteristics based on halberd-shaped spoof surface plasmon polariton (SSPP) is proposed. The filtering structure is achieved by etching a periodic halberd-shaped groove at the bottom of the substrate and a microstrip-to-slot line transition with a crescent-shaped patch at the top. Compared with the traditional dumbbell-shaped SSPP, the halberd-shaped SSPP has good slow-wave property, and the designed bandpass filter based on halberd-shaped SSPP can achieve a more compact size. The upper cutoff frequency and lower cutoff frequency of the passband can be adjusted by regulating the SSPP structure and the transition structure from microstrip-to-slot line, respectively. The simulation results show that the center frequency of broadband bandpass filter is 2.85 GHz, with the relative bandwidth of 130%, and the return loss in the passband is better than  $-10$  dB, and the extreme strong out-of-band rejection of  $-40$  dB from 5.6 GHz to 20.0 GHz. The size of the broadband bandpass filter is compact, only  $1.08\lambda_g \times 0.39\lambda_g$ , where  $\lambda_g$  is the wavelength at the center frequency. In order to verify the effectiveness of the wideband bandpass filter, the traditional printed circuit board technology is used to fabricate the wideband bandpass filter. The measurement results are in good agreement with the simulation results, verifying the feasibility of the design. The proposed broadband bandpass filter shows promising prospects for developing SSPP functional devices and circuits at microwave frequencies.

**Keywords:** spoof surface plasmon polariton, broadband bandpass filter, microstrip-to-slotline transition structure

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

**DOI:** 10.7498/aps.72.20222291

\* Project supported by the Natural Science Foundation Innovation Group Project of Hubei Province, China (Grant No. 2020CFA038) and the Key R&D Project of Hubei Province, China (Grant No. 2020BAA028).

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



## 基于戟形人工表面等离子激元的紧凑型宽带外抑制带通滤波器

孙淑鹏 程用志 罗辉 陈浮 李享成

## Compact broadband bandpass filter with wide stopband based on halberd-shaped spoof surface plasmon polariton

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 064101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222291

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222291>

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

#### 基于人工表面等离子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>

#### 基于人工表面等离子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>

#### 基于人工表面等离子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>

#### 基于人工表面等离子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>

#### 金属基底上光学偶极纳米天线的自发辐射宽带增强: 表面等离子激元直观模型

Broadband enhancement of spontaneous emission by optical dipole nanoantenna on metallic substrate: An intuitive model of surface plasmon polariton

物理学报. 2022, 71(11): 118101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212290>

#### 拓扑表面等离子激元

Topological surface plasmon polaritons

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