

# 基于 CMOS 的新型人工表面等离子激元滤波器设计

吴杰民<sup>1,2</sup>, 陆 恺<sup>1,2</sup>, 汪江鹏<sup>1,2</sup>, 高 昊<sup>3</sup>, 段宗明<sup>4</sup>, 崔铁军<sup>1,2</sup>, 鲍 迪<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学电磁空间研究院, 江苏南京 210096; 2. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096;  
3. 奥地利国家半导体实验室, 奥地利林茨 4020; 4. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

**摘 要:** 本文基于 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺提出了一种新型微波人工表面等离子激元(Spoof Surface Plasmon Polariton, SSPP)耦合式滤波器结构并进行加工和测量,同时设计了一种太赫兹 SSPP 四边形滤波器并进行了全波仿真. 新型微波 SSPP 耦合式滤波器通带为 11~12.3 GHz ( $S_{11}<-10$  dB,  $S_{21}>-3.5$  dB), 结构紧凑, 电尺寸仅为  $0.0184\lambda_g \times 0.0084\lambda_g$ , 远小于其他基于集成电路工艺设计的无源滤波器. 通过优化与调整, 可以将新型微波 SSPP 耦合式滤波器的性能进一步优化到要求范围内. 太赫兹 SSPP 四边形滤波器通带为 210.8~241.3 GHz ( $S_{11}<-10$  dB,  $S_{21}>-4.7$  dB), 带内插入损耗仅为 2.7 dB, 带外抑制良好. 两种 SSPP 滤波器均采用非接触式电磁耦合的新型能量传递方式, 结构设计新颖, 并且微波段 SSPP 耦合式滤波器小型化优势明显, 电尺寸仅为  $0.019\lambda_g \times 0.009\lambda_g$ , 易于芯片集成. 本文提出的两种 SSPP 滤波器经过等比例缩放, 可工作在微波、毫米波以及太赫兹频段, 为新型片上无源滤波器的研究设计提供参考和借鉴.

**关键词:** 人工表面等离子激元; 太赫兹; 耦合结构; 滤波器; 小型化; CMOS

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.62288101); 国家重点研发计划项目(No.2017YFA0700201, No.2017YFA0700202, No.2017YFA0700203); 高等学校学科创新引智计划项目(No.111-2-05); 江苏省前沿领先技术基础研究项目(No.BK20212002); 国家科学技术部资助项目(No.G2021016011L)

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)10-2708-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221260

## Design of Novel CMOS Coupled Filters Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons

WU Jie-min<sup>1,2</sup>, LU Kai<sup>1,2</sup>, WANG Jiang-peng<sup>1,2</sup>, GAO Hao<sup>3</sup>, DUAN Zong-ming<sup>4</sup>, CUI Tie-jun<sup>1,2</sup>, BAO Di<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Electromagnetic Space, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

3. Silicon Austria Labs, Linz 4020, Austria;

4. The 38th Institution of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei, Anhui 230088, China)

**Abstract:** In this paper, a novel SSPP (Spoof Surface Plasmon Polariton) filter is proposed, fabricated and measured based on 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS technology. Meanwhile an extra terahertz SSPP filter is designed and its full-wave simulations are provided to prove feasibility in THz band. This novel SSPP filter has a passband of 11~12.3 GHz ( $S_{11}<-10$  dB,  $S_{21}>-3.5$  dB), and its size is compact with only  $0.0184\lambda_g \times 0.0084\lambda_g$  in electrical size, making it much smaller than other passive filters designed in IC technology. A designed terahertz frequency band SSPP filter, with a full EM simulated passband of 210.8~241.3 GHz ( $S_{11}<-10$  dB,  $S_{21}>-4.7$  dB), possesses an in-band insertion loss less than 2.7 dB and an superior out-of-band suppression. Both types of SSPP filters adopt a new energy transfer method of non-contact electromagnetic coupling, with a novel structural design. Moreover, the miniaturization advantage of the microwave section SSPP coupled filter is obvious, with an electrical size of only  $0.019\lambda_g \times 0.009\lambda_g$ , easy to integrate with chips. Equally scaled novel filters proposed in this work can work in microwave, millimeter wave and terahertz frequency band, which could be a reference for the research of on-chip filters in the future.

**Key words:** spoof surface plasmon polaritons; terahertz; coupling structure; filter; miniaturization; CMOS

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.62288101); National Key Research and Development Program of China (No.2017YFA0700201, No.2017YFA0700202, No.2017YFA0700203); Discipline Innovation

and Talent Introduction Program in Higher Education Institutions (No.111-2-05); Jiangsu Province Frontier Leading Technology Basic Research Project (No.BK20212002); National Science and Technology Department of China grant (No.G2021016011L)

## 1 引言

表面等离子体极化子 (Surface Plasmon Polariton, SPP) 是一种由自由电子和光子在金属和介质分界面区域相互作用形成的电磁波传输模式<sup>[1]</sup>. SPP 将电磁场能量束缚在亚波长区域内传播, 能够突破衍射极限, 因此被广泛应用于纳米光子学与光电子学<sup>[2-4]</sup>. 然而自然界的表面等离子体极化子仅存在于光波段, 为了在较低频段 (太赫兹、微波、毫米波) 实现表面等离子体极化子, 人工表面等离子体极化子 (Spoof Surface Plasmon Polariton, SSPP)<sup>[5,6]</sup> 应运而生. 如今 SSPP 凭借其结构紧凑、电尺寸小等优良性能被应用到不同的器件设计中, 包括滤波器<sup>[7-11]</sup>、传感器<sup>[12]</sup>、功分器<sup>[13]</sup>等. 上述器件大多数在微波频段内通过标准印刷电路板工艺制作而成. 然而在毫米波以及太赫兹等频率更高的频段内, 利用集成电路工艺 (如 CMOS, GaAs 等) 进行 SSPP 的相关研究却很少. 随着深入研究, 人们发现片上 SSPP 具有许多独特的优势. 文献[14]中片上 SSPP 传输线的测试结果表明, 在 220~325 GHz 范围内 SSPP 传输线的反射与串扰明显优于传统传输线, 尤其是串扰比传统传输线平均降低了 19 dB, 展现了 SSPP 传输线在 CMOS 工艺中实现高密度片上亚太赫兹通信的巨大潜力. 文献[15]基于 65 nm CMOS 工艺, 在传统金属传输线上设置周期性 SSPP 单元, 从而使顶层金属表面产生强局域电磁波, 有效降低了系统内电磁耦合, 与传统传输线相比提高了传输效率, 降低了损耗和串扰. 文献[16]提出了一种基于 GaAs 工艺的 SSPP 半模基片集成波导, 文中指出 SSPP 的强场束缚特性对产生的耦合干扰信号有良好的抑制作用. 文献[17]提出了一种基于 BiCMOS 工艺的片上亚太赫兹低损耗 SSPP 传输线, 体现了片上亚太赫兹低损耗 SSPP 传输线良好的传输特性. SSPP 在毫米波以及太赫兹波段在器件小型化、电路信号完整性、信道干扰抑制等方面具有良好的性能, 但是因为 SSPP 是一种新的技术, 在通信系统等工程领域的应用研究不够充分, 因此亟需进行大量的研究与探索.

滤波器是通信系统的重要组成部分. 传统片上滤波器通常使用微带线技术, 然而微带线容易受到辐射损耗、串扰和电磁耦合的影响, 从而降低滤波器的性能. SSPP 由于强场束缚特性, 可以将电磁场能量束缚在亚波长区域内传播, 能够有效降低损耗、串扰等影响. 文献[18]提出了一种基于砷化镓工艺的 SSPP 滤波器, 实现了 SSPP 波导与馈电微带线的直接连接, 简化了设计, 且中心频率和带宽可以通过 SSPP 单元的结构参数

进行调整, 但是电尺寸达到了  $0.542 \lambda_g \times 0.102 \lambda_g$  ( $\lambda_g$  为中心频率对应的波导波长), 不利于小型化集成.

本文基于 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺针对 SSPP 传输线变形提出了一种新型微波 SSPP 耦合式滤波器, 同时设计了一种太赫兹 SSPP 四边形滤波器并进行了全波仿真. 两种 SSPP 滤波器均采用非接触式电磁耦合的新型能量传递方式, 结构设计新颖. 新型微波 SSPP 耦合式滤波器结构紧凑, 电尺寸仅为  $0.019 \lambda_g \times 0.009 \lambda_g$ , 远小于其他基于集成电路工艺设计的片上无源滤波器.

## 2 新型微波人工表面等离子体耦合式滤波器设计

### 2.1 人工表面等离子体传输线

人工表面等离子体通过在金属表面设置周期性结构, 模拟光波段表面等离子体的强场束缚特性. 本文提出的 SSPP 传输线与横截面电场分布如图 1(a) 和 (b) 所示, 同时设置了一条相同长度的微带线, 微带线与横截面电场分布如图 1(c) 和 (d) 所示. SSPP 传输线结构长  $L_s=1\ 039.6 \mu\text{m}$ , 宽  $W_s=250 \mu\text{m}$ ; H 型 SSPP 单元结构齿长  $L_c=20 \mu\text{m}$ , 宽  $W_c=15.3 \mu\text{m}$ . 由 SSPP 传输线与微带线的横截面电场分布比较可知, SSPP 将大部分电场能量集中于传输线金属表面附近, 体现了 SSPP 的强场束缚特性.

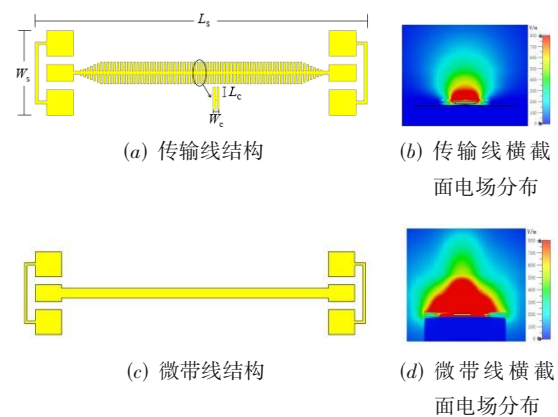


图 1 SSPP 传输线与微带线比较

### 2.2 新型微波人工表面等离子体耦合式滤波器

本节基于前文所述 SSPP 传输线的强场束缚特性设计了一种新型微波 SSPP 耦合式滤波器. 此滤波器结构设计新颖, 由上下两条厚度不同的 SSPP 传输线弯折变形构成, 其结构如图 2 所示. 该新型微波 SSPP 耦合式滤

波器总结构长  $L=702\ \mu\text{m}$ , 宽  $W=250\ \mu\text{m}$ ; 除去焊盘结构后, 滤波器长  $L_1=476\ \mu\text{m}$ , 宽  $W_1=216\ \mu\text{m}$ . 电尺寸为  $0.0184\lambda_g \times 0.0084\lambda_g$ . 两条 SSPP 传输线弯折成类八边形结构, 其中每一边边长  $L_0=72.9\ \mu\text{m}$ , 齿长  $L_c=20\ \mu\text{m}$ ; 类八边形外部七边每一边并排连接 8 个齿, 内部七边每一边并排连接 5 个齿. 单个类八边形结构宽  $W_2=216\ \mu\text{m}$ , 长  $L_2=235.6\ \mu\text{m}$ ; 类八边形结构在馈线连接端设置有一狭缝, 便于与信号焊盘及地焊盘分别连接在一起. 信号焊盘通过长  $L_3=150\ \mu\text{m}$  的渐变微带线连接到类八边形结构狭缝一端, 再由类八边形结构狭缝另一端连接到另一段渐变微带线, 通过折线过渡连接到地焊盘. 地焊盘长  $L_4=80\ \mu\text{m}$ , 宽  $W_3=75\ \mu\text{m}$ , 信号焊盘长  $L_4=80\ \mu\text{m}$ , 宽  $W_4=50\ \mu\text{m}$ , 地焊盘与信号焊盘左右两边呈对称分布.

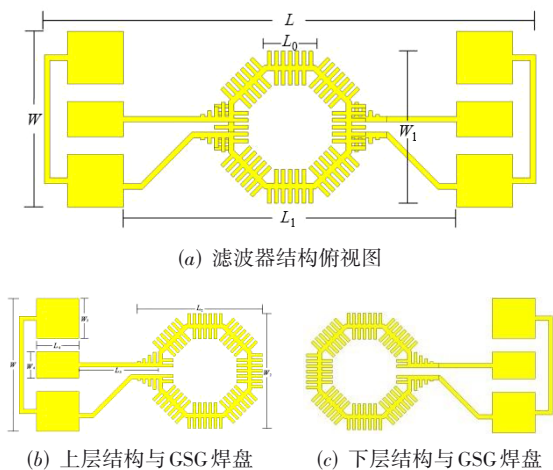


图2 新型微波 SSPP 耦合式滤波器结构

### 2.3 新型微波人工表面等离子元耦合式滤波器实物加工与测试

本文提出的新型微波 SSPP 耦合式滤波器采用  $0.18\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺, 工艺截面图如图 3 所示. 图中, 黄色为金属, 衬底为硅基, IMD 为电介质层 (其中每层的介电常数各不相同). 新型微波 SSPP 耦合式滤波器设置在 M5 和 M6 两层金属上, M1 为金属地, 各层金属可通过金属通孔 via 相互连接, 其中 M1 至 M5 层金属厚度皆为  $0.53\ \mu\text{m}$ , M6 层厚度为  $4.6\ \mu\text{m}$ .

基于  $0.18\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺的新型微波 SSPP 耦合式

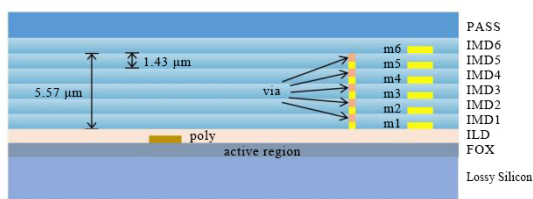


图3  $0.18\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺截面图

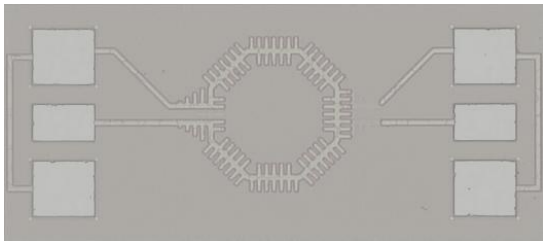
滤波器如图 4(a) 所示. 新型微波 SSPP 耦合式滤波器仿真与测试的  $S$  参数对比如图 4(b) 所示. 其中, 黑色虚线为仿真  $S_{11}$ , 黑色实线为仿真  $S_{21}$ , 红色虚线为测试  $S_{11}$ , 红色实线为测试  $S_{21}$ . 仿真结果表明, 新型微波 SSPP 耦合式滤波器工作在 X 波段 ( $11\sim 12.3\ \text{GHz}$ ), 中心频率为  $11.6\ \text{GHz}$ , 通带内插入损耗为  $3.5\ \text{dB}$ , 回波损耗大于  $10\ \text{dB}$ . 测试结果表明, 新型微波 SSPP 耦合式滤波器中心频率为  $13\ \text{GHz}$ , 通带为  $12.5\sim 13.8\ \text{GHz}$ , 通带内插入损耗为  $5.8\ \text{dB}$ , 回波损耗为  $9.3\ \text{dB}$ . 测试结果与仿真结果相比, 插入损耗增加了  $2.3\ \text{dB}$ , 中心频率存在  $1.4\ \text{GHz}$  的偏移. 由于微波段 SSPP 耦合式滤波器采用上下层非接触式电磁耦合的新型能量传递方式, 同时因 CMOS 加工工艺限制导致电磁泄漏以及介质损耗等, 这些客观条件造成了滤波器性能并不理想. 未来可以通过采用砷化镓、磷化铟等新型工艺解决 CMOS 工艺的这些限制, 并且工艺形状设计有更大自由度, 这将有效提高滤波器的性能. 微波段耦合式 SSPP 滤波器经过等比例缩放可工作在太赫兹波段, 然而加工时由于材料特性的限制性能会产生一定的偏差, 因此需要进行工艺调整与优化设计.

为了进一步分析新型微波 SSPP 耦合式滤波器的性能, 图 4(c) 给出了此滤波器在中心频率  $11.6\ \text{GHz}$  处的电场  $E_z$  分量近场分布. 如图中所示电磁波可以高效通过新型微波 SSPP 耦合式滤波器结构, 体现了新型微波 SSPP 耦合式滤波器良好的传输特性.

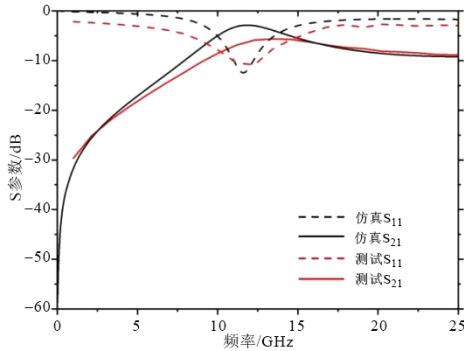
表 1 给出了本文提出的新型微波 SSPP 耦合式滤波器性能与其他文献中基于 CMOS 工艺的片上滤波器设计的比较结果. 可以看出, 新型微波 SSPP 耦合式滤波器结构紧凑, 电尺寸大大缩小, 这为未来小型化片上无源滤波器的研究与探索提供了参考方向. 但是由于微波 SSPP 耦合式滤波器采用上下层非接触式电磁耦合的新型能量传递方式, 同时 CMOS 工艺接地性能较差并且有形状设计限制, 加工工艺限制导致电磁泄漏以及介质损耗等, 这些客观条件使得新型微波 SSPP 耦合式滤波器在带内插损和带外抑制等性能上存在一定的优化空间.

### 3 太赫兹人工表面等离子元四边形滤波器设计

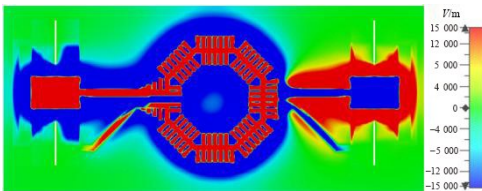
本节在第 2 节新型微波 SSPP 耦合式滤波器的基础上将工作频率提高到太赫兹波段, 设计了一种基于  $0.18\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺的太赫兹 SSPP 四边形滤波器. 滤波器由微带线、阻抗匹配枝节、四边形谐振器、测试焊盘组成, 滤波器结构俯视图如图 5 所示. 其中, 四边形谐振器由谐振金属齿与四边形金属环构成, 谐振金属齿连接在四边形金属环上并向内延伸一段距离, 且长



(a) 滤波器实物俯视图



(b) 仿真与测试 S 参数对比



(c) 11.6 GHz 处  $E_z$  分量近场分布

图 4 新型微波 SSPP 耦合式滤波器实物、S 参数与近场分布

度由中间向两侧递减. 该滤波器结构长  $L=670 \mu\text{m}$ , 宽  $W=250 \mu\text{m}$ , 电尺寸为  $0.504\lambda_g \times 0.188\lambda_g$ . 四边形谐振器为边长  $L_1=126 \mu\text{m}$  的正方形, 微带线长  $L_2=150 \mu\text{m}$ , 阻抗匹配枝节长  $W_1=41 \mu\text{m}$ , 耦合间距  $g=4 \mu\text{m}$ . 接地焊盘长  $L_3=80 \mu\text{m}$ , 宽  $W_2=75 \mu\text{m}$ , 信号焊盘长  $L_3=80 \mu\text{m}$ , 宽  $W_3=50 \mu\text{m}$ .

四边形 SSPP 结构由图 6 插图所示的周期性 SSPP 单元组成, SSPP 单元金属齿的长度由中间向两侧递减. 为了研究 SSPP 单元的传播特性, 使用 CST 模拟了一个 SSPP 单元的色散曲线如图 6 所示. 由图 6 中可以观察

到, SSPP 单元的色散曲线是典型的 SSPP 结构的色散曲线, 表明 SSPP 单元对表面电磁波具有很强的束缚能力.

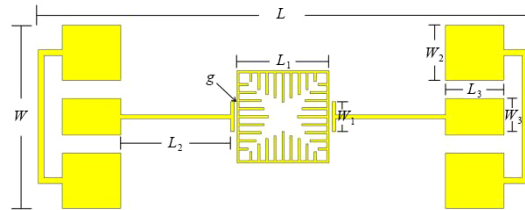


图 5 太赫兹 SSPP 四边形滤波器结构俯视图

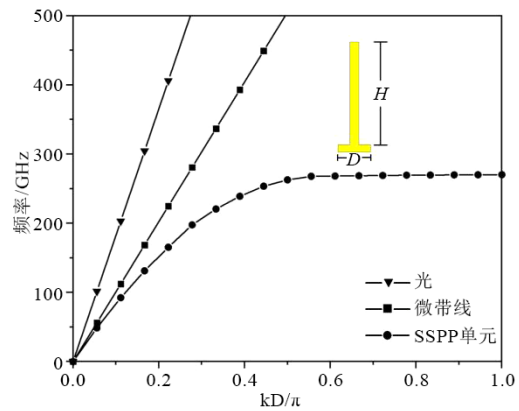


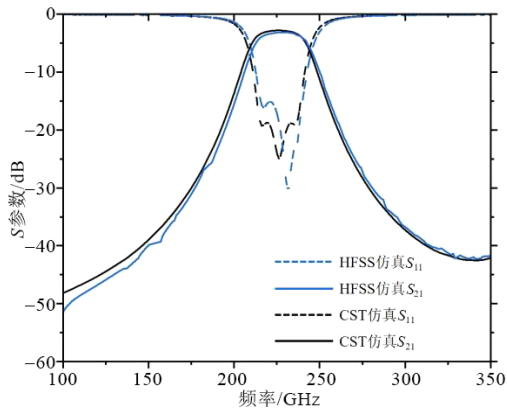
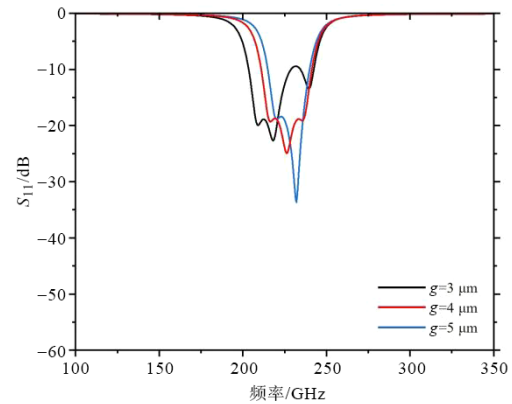
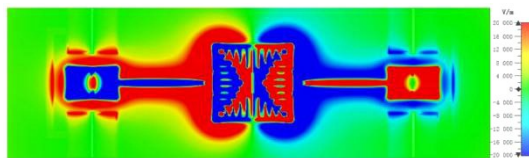
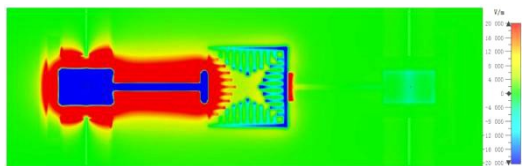
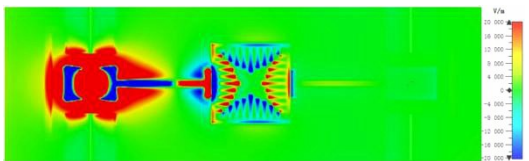
图 6 SSPP 单元色散曲线

本设计通过三维电磁场仿真软件 CST 与 HFSS 分别分析计算了太赫兹 SSPP 四边形滤波器的 S 参数曲线, 两者仿真曲线较为吻合, 如图 7 所示. 其中,  $S_{11}$  为反射系数,  $S_{21}$  为传输系数. 该 SSPP 四边形滤波器通带为 210.8~241.3 GHz ( $S_{11} < -10 \text{ dB}$ ,  $S_{21} > -4.7 \text{ dB}$ ), 通带内插入损耗为 2.7 dB, 回波损耗大于 10 dB. 在距离中心频率 100 GHz 处, 传输系数  $S_{21}$  下降了 40 dB 以上, 并且保持下降的趋势, 带外抑制效果明显.

图 8 给出了 SSPP 四边形滤波器在 226 GHz, 126 GHz, 326 GHz 处的  $E_z$  分量近场分布, 从图中可以更直观地分析出此滤波器在通带内的传输性能. 由图可知, 在 226 GHz 处滤波器处于通带的状态; 在 126 GHz 与 326 GHz 处滤波器处于阻带的状态, 电磁波的传输被很好地抑制.

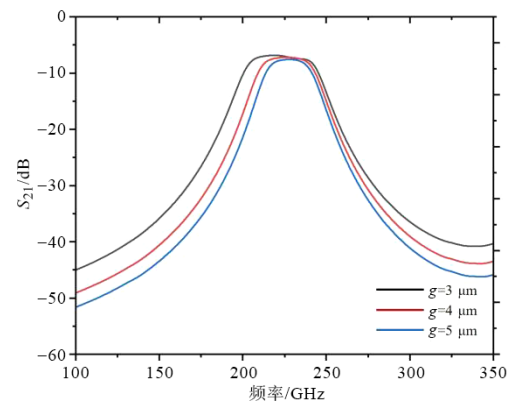
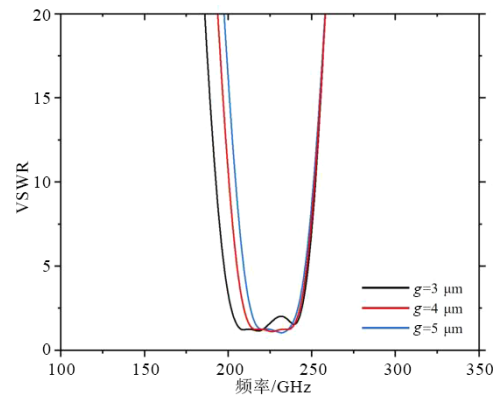
表 1 基于 CMOS 工艺的片上滤波器比较

| 参考文献   | 工艺                         | 中心频率/GHz | 物理尺寸/ $\text{mm}^2$  | 电尺寸/ $\lambda_g^2$   | 插损/dB | 相对带宽/% |
|--------|----------------------------|----------|----------------------|----------------------|-------|--------|
| 文献[19] | 0.15 $\mu\text{m}$ GaAs    | 67.5     | 1.600 $\times$ 0.367 | 0.360 $\times$ 0.083 | 1.70  | 35.3   |
| 文献[20] | 0.18 $\mu\text{m}$ CMOS    | 11.5     | 0.880 $\times$ 0.540 | 0.034 $\times$ 0.021 | 2.78  | 36.5   |
| 文献[21] | 0.13 $\mu\text{m}$ Bi-CMOS | 60.0     | 0.744 $\times$ 0.386 | 0.149 $\times$ 0.077 | 4.10  | 17.0   |
| 文献[22] | 0.13 $\mu\text{m}$ Bi-CMOS | 18.0     | 0.318 $\times$ 0.392 | 0.019 $\times$ 0.024 | 2.90  | 66.7   |
| 文献[23] | 0.13 $\mu\text{m}$ CMOS    | 34.5     | 0.264 $\times$ 0.124 | 0.030 $\times$ 0.014 | 1.60  | 61.2   |
| 文献[24] | 0.18 $\mu\text{m}$ Bi-CMOS | 30.0     | 0.382 $\times$ 0.428 | 0.038 $\times$ 0.043 | 1.99  | 133.3  |
| 本文     | 0.18 $\mu\text{m}$ CMOS    | 11.6     | 0.476 $\times$ 0.216 | 0.019 $\times$ 0.009 | 3.50  | 11.0   |

图7 太赫兹 SSPP 四边形滤波器仿真  $S$  参数(a)  $S_{11}$  变化趋势(a) 226 GHz 处  $E_z$  分量近场电场分布(b) 126 GHz 处  $E_z$  分量近场电场分布(c) 326 GHz 处  $E_z$  分量近场电场分布图8 太赫兹 SSPP 四边形滤波器的  $E_z$  分量近场电场分布图

为了进一步探究 SSPP 四边形滤波器的特性,利用三维电磁场仿真软件 CST 对此滤波器进行了不同物理尺寸的仿真. 仿真发现,随着阻抗匹配枝节与谐振器之间的耦合间距  $g$  的改变,反射系数  $S_{11}$ 、传输系数  $S_{21}$  与驻波比会随之发生变化,变化情况如图9所示.

从图9(a)和(b)可以看出,在其他结构参数均不改变的情况下,滤波器通带范围随着耦合间距  $g$  的增大而减小. 随着耦合间距的增大,通带低频截止频率增大. 当  $g=3 \mu\text{m}$  时,滤波器通带为 203.4~242.3 GHz ( $S_{11}<-10 \text{ dB}$ ,  $S_{21}>-4.2 \text{ dB}$ ); 当  $g=4 \mu\text{m}$  时波形为该 SSPP 四边形滤波器的设计原型,此时滤波器通带为 210.8~241.3 GHz ( $S_{11}<-10 \text{ dB}$ ,  $S_{21}>-4.7 \text{ dB}$ ); 当  $g=5 \mu\text{m}$  时,滤波器通带为 214.8~239.8 GHz ( $S_{11}<-10 \text{ dB}$ ,  $S_{21}>-5.1 \text{ dB}$ ). 因此可灵活调整滤波器的低通特性,以适应不同工作条件的需要.

(b)  $S_{21}$  变化趋势

(c) 驻波比变化趋势

图9  $S$  参数与驻波比随耦合间距  $g$  的变化趋势

为了验证太赫兹 SSPP 四边形滤波器良好的传输效率,本文观察了滤波器在通带内的驻波比 (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR). 驻波比是用来衡量滤波器的回波损耗的一个物理量,通常指传输线波腹电压幅值与波谷电压幅度之比. 在全匹配的理想状态下,驻波比等于1,此时回波损耗为负无穷大. 驻波比越小,反射功率越小,传输效率越高. 驻波比 VSWR 与反射功率  $K$  计算公式分别为

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{\sqrt{\text{RL}} + 1}{\sqrt{\text{RL}} - 1}, K = \left( \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1} \right)^2$$

其中,  $\Gamma$  为反射系数, RL 为回波损耗. 由图 9(c) 可知, 随着耦合间距  $g$  的增大, 通带低频截止频率增大, 驻波比低频向右产生偏移. 当  $g=4 \mu\text{m}$  时, 滤波器驻波比在 211.7~237.3 GHz 的通带范围内小于 1.4, 并且在频率中心 226 GHz 处驻波比达到 1.1. 当  $g=5 \mu\text{m}$  时, 滤波器在 232 GHz 处驻波比达到 1.04. 由驻波比与反射功率的关系可知, 反射功率最低可达 0.04%, 能量传输效率良好. 因此, SSPP 四边形滤波器通过耦合的方式可以很好地将能量从入射端传输到接收端.

#### 4 结语

本文提出了一种新型微波 SSPP 耦合式滤波器的概念并进行加工和测量, 同时, 设计了一种太赫兹 SSPP 四边形滤波器并进行了全波仿真. 两种 SSPP 滤波器均采用非接触式电磁耦合的新型能量传递方式, 结构设计新颖. 新型微波 SSPP 耦合式滤波器结构紧凑, 电尺寸仅为  $0.0184 \lambda_g \times 0.0084 \lambda_g$ , 太赫兹 SSPP 四边形滤波器带内插入损耗仅为 2.7 dB, 带外抑制良好, 驻波比较小. 本文设计的滤波器可为新型片上无源滤波器的研究设计提供参考和借鉴.

#### 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] GRAMOTNEV D K, BOZHEVOLNYI S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 83-91.
- [3] EBBESEN T W, GENET C, BOZHEVOLNYI S I. Surface-plasmon circuitry[J]. *Physics Today*, 2008, 61(5): 44-50.
- [4] OZBAY E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, 311(5758): 189-193.
- [5] PENDRY J B, MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 847-848.
- [6] SHEN X P, CUI T J, MARTIN-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.
- [7] GUO Y J, XU K D, LIU Y H, et al. Novel surface plasmon polariton waveguides with enhanced field confinement for microwave-frequency ultra-wideband bandpass filters[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 10249-10256.
- [8] GUO Y J, XU K D, TANG X H. Spoof plasmonic waveguide developed from coplanar stripline for strongly confined terahertz propagation and its application in microwave filters[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10589.
- [9] XU K D, GUO Y J, DENG X J. Terahertz broadband spoof surface plasmon polaritons using high-order mode developed from ultra-compact split-ring grooves[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4354.
- [10] LI J X, SHI J W, XU K D, et al. Spoof surface plasmon polaritons developed from coplanar waveguides in microwave frequencies[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(22): 1431-1434.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] LIANG Y, YU H, WEN J C, et al. On-chip sub-terahertz surface plasmon polariton transmission lines with mode converter in CMOS[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30063.
- [15] LIANG Y, YU H, FENG G Y, et al. An energy-efficient and low-crosstalk sub-THz I/O by surface plasmonic polariton interconnect in CMOS[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(8): 2762-2774.
- [16] GUO Y J, XU K D, DENG X J, et al. GaAs spoof surface plasmon polariton half-mode substrate integrated waveguide[C]//2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). Piscataway: IEEE, 2021: 1-3.
- [17] QI Z H, LI X P, ZHU H A. Low-loss BiCMOS spoof surface plasmon polariton transmission line in sub-THz regime[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, 12(2): 254-258.
- [18] XU K D, GUO Y J, YANG Q, et al. On-chip GaAs-based spoof surface plasmon polaritons at millimeter-wave regime[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33 (5): 255-258.
- [19] 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.

- [20] YANG C L, SHU S Y, CHIANG Y C. Analysis and design of a chip filter with low insertion loss and two adjustable transmission zeros using 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(1): 176-184.
- [21] FRANC A L, PISTONO E, GLORIA D, et al. High-performance shielded coplanar waveguides for the design of CMOS 60-GHz bandpass filters[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, 59(5): 1219-1226.
- [22] XU K D, ZHU X, YANG Y, et al. A broadband on-chip bandpass filter using shunt dual-layer meander-line resonators[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(11): 1617-1620.
- [23] GE Z Y, CHEN L, GÓMEZ-GARCÍA R, et al. Millimeter-wave wide-band bandpass filter in CMOS technology using a two-layered highpass-type approach with embedded upper stopband[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(5): 1586-1590.
- [24] XU J, LIU F, JI S Y, et al. An on-chip ultra-wideband bandpass filter in 0.18- $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS technology[J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43(7): 1009-1012.

#### 作者简介



**吴杰民** 男, 1998 年出生, 江苏苏州人. 2021 年获河海大学工学学士学位. 现为东南大学集成电路工程专业硕士研究生. 主要研究方向为人工表面等离子体在毫米波、太赫兹频段集成电路应用设计.

E-mail: wjm1436435167@163.com



**陆 恺** 男, 1997 年出生, 江苏无锡人. 2020 年获苏州大学工学学士学位. 现为东南大学硕士研究生. 主要研究方向为人工表面等离子体在毫米波、太赫兹频段集成电路应用设计.

E-mail: 230238236@seu.edu.cn



**汪江鹏** 男, 1998 年出生, 湖北黄冈人. 2020 年获东南大学工学学士学位, 现为东南大学硕士研究生. 主要研究方向为人工表面等离子体毫米波应用、超材料研究.

E-mail: jiangp\_w@outlook.com



**高 昊** 男, 1984 年出生, 江苏盐城人. 荷兰埃因霍温理工大学集成电路专业科学博士、信息化技术工程博士. 东南大学 2012 协同创新中心兼职教授. 主要研究方向为太赫兹、毫米波射频集成电路.

E-mail: h.gao@ieee.org



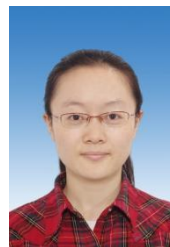
**段宗明** 男, 1983 年出生, 安徽安庆人. 博士. 现任中国电子科技集团公司第三十八研究所研究员. 主要研究方向为射频与毫米波集成电路设计.

E-mail: duanzongm@163.com



**崔铁军** 男, 1965 年出生, 河北承德人. 2019 年 11 月当选中国科学院院士. 主要研究方向为新型人工电磁材料(电磁超材料)的理论、实验及应用, 计算电磁学及其快速算法, 目标特性与目标识别等.

E-mail: tjcui@seu.edu.cn



**鲍 迪(通讯作者)** 女, 1983 年出生, 江苏徐州人. 2006 年和 2009 年分别获得东南大学无线电工程学士学位和硕士学位, 2012 年获英国伦敦大学博士学位. 现为东南大学信息科学与工程学院副教授. 主要研究方向为超材料、人工表面等离子体和太赫兹芯片.

E-mail: dibao@seu.edu.cn