

光学学报

基于人工表面等离激元的太赫兹低损耗传输线及带阻滤波器设计

朱华利¹, 张勇^{1*}, 叶龙芳^{2,3}, 黎雨坤¹, 党章¹, 陈阳¹, 徐锐敏¹, 延波¹

¹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;

²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;

³厦门大学深圳研究院, 广东 深圳 518057

摘要 提出了一种基于人工表面等离激元(SSPPs)的太赫兹低损耗传输线,并通过加载开口谐振环(SRR)实现了具有大抑制深度的太赫兹带阻滤波器。采用不规则阶梯渐变过渡结构对SSPPs传输线进行了优化,降低了其在太赫兹频段下的传输损耗及不平坦度。通过色散分析揭示了加载SRR和不加载SRR的SSPPs传输线的频段抑制机理。加载SRR的SSPPs传输线工作在基模和一阶高次模两种模式下,其基模具有低通特性,一阶高次模具有带通特性,实现了具有通带-阻带-通带-阻带的太赫兹滤波特性。通过调节SRR的几何参数,可控制SSPPs滤波器的阻带频率;通过增加SRR的加载数量,可增大SSPPs滤波器的抑制深度。为了验证设计的可行性,采用微纳加工技术分别制作了所提出的SSPPs传输线和滤波器,并进行了太赫兹在片测试。测试结果表明:在0.11~0.17 THz频带范围内,SSPPs传输线的插入损耗小于0.5 dB/mm,回波损耗优于10 dB;SSPPs滤波器在0.142~0.156 THz频率范围内的抑制深度大于10 dB,最大抑制深度为45 dB@0.148 THz;实验结果与仿真结果具有良好的吻合度。该研究对太赫兹等离激元集成系统研究具有重要意义。

关键词 表面光学; 人工表面等离激元; 传输线; 带阻滤波器; 太赫兹; 微纳加工

中图分类号 TN811+.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2024001

Design of Terahertz Low-Loss Transmission Line and Band-Stop Filter Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons

Zhu Huali¹, Zhang Yong^{1*}, Ye Longfang^{2,3}, Li Yukun¹, Dang Zhang¹, Chen Yang¹,
Xu Ruimin¹, Yan Bo¹

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

²Institute of Electromagnetics and Acoustics, Department of Electronic Science, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

³Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen 518057, Guangdong, China

Abstract In this paper, a terahertz low-loss transmission line based on spoof surface plasmon polaritons (SSPPs) is proposed, and a terahertz rejection filter with high isolation is demonstrated by loading split-ring resonators (SRRs). The SSPPs-based transmission line is optimized by an irregular gradient transition structure, and thus its transmission loss and unevenness in the terahertz frequency band are reduced. Then, the frequency band suppression mechanisms of the SSPPs-based transmission line loaded with SRRs and without SRRs are revealed through the dispersion analysis. When the SSPPs-based transmission line loaded with SRRs operates under the fundamental mode and the first-order high mode separately, its fundamental mode is characterized by low pass while its first-order high mode features bandpass, and thus the terahertz filtering characteristic of pass-stop-pass-stop is achieved. In addition, by adjusting the geometric parameters of SRRs, we can control the stop-band frequency of the SSPPs-based filter and improve the suppression depth of the SSPPs filter by increasing the number of loaded SRRs. To demonstrate the feasibility of the design, this study conducts terahertz on-wafer tests for the proposed SSPPs-based transmission line and filter prepared by micro-nano fabrication. The

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-04-13; 录用日期: 2022-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(61871072)

通信作者: *yongzhang@uestc.edu.cn

results reveal that in the frequency band of 0.11–0.17 THz, the insertion loss of the SSPPs-based transmission line is less than 0.5 dB/mm, and the return loss is better than 10 dB; in the frequency band of 0.142–0.156 THz, the suppression depth of the SSPPs-based filter is greater than 10 dB, and the maximum suppression depth is up to 45 dB at 0.148 THz. The experimental results are in good agreement with the simulated ones. The research is of great significance to the integrated system of terahertz plasmons.

Key words optics of surfaces; spoof surface plasmon polaritons; transmission line; band-stop filter; terahertz; micro-nano fabrication

1 引言

太赫兹 (THz) 波通常是指频率为 0.1~10 THz 的电磁波, 其处于宏观电子学向微观光子学的过渡阶段, 以其独特的性能受到了全世界的广泛关注, 并掀起了一股研究热潮, 在无线通信、无损检测、医学成像、电子对抗和精确制导等领域得到应用^[1-4]。太赫兹传输线 (TL) 及其功能器件是太赫兹信息系统实现信息感知、传输及探测的基础。以传统的平面 TL (微带线、共面波导、介质波导等) 为基本信息传输载体的太赫兹电路和功能器件, 存在着明显的路径损耗和电磁 (EM) 串扰; 随着频率的增加, 介质损耗和导体损耗急剧增加, 相邻 TL 之间的能量串扰愈发严重^[5-8]。为了从根本上解决该问题, 需要从物理底层改变传输模式所具有的空间场分布特征, 实现电磁能量被紧束缚于结构周围的传输模式。

2004 年, Pendry 等^[9-10] 基于金属超构表面突破性提出了人工表面等离子激元 (SSPPs), 它与表面等离子激元 (SPPs) 具有相似的独特性能且能工作在微波及太赫兹波段。SSPPs 具有独特的强场束缚和增强特性, 近年来在电磁学界引起了广泛关注, 有望成为太赫兹固态电路和系统进一步突破的解决方案^[11]。SSPPs TL 具有通过调整矩形槽的单元尺寸来人为控制色散的特性, 已被广泛用于微波信号传输^[12-14]。与基于传统平面 TL 的功能器件相比, 基于 SSPPs TL 的功能器件具有实现更小尺寸和更低串扰的潜力^[15-17]。其中, 平面滤波器作为功能器件的一个重要分支, 在系统的杂波抑制、降噪等方面起着重要的作用^[18-23]。在接收卫星抑制干扰和频率选择等应用中, 具有结构紧凑、抑制深度大等特性的带阻滤波器成为重要组成部分^[24-25]。通过在 SSPPs TL 上加载谐振结构, 可实现高效率 SSPPs 滤波器^[26-30]。但是, 目前对 SSPPs 滤波器的研究大多局限于微波频段, 太赫兹 SSPPs 滤波器的设计较为欠缺。因此, 基于 SSPPs TL 的紧凑型带阻滤波器的研究对于太赫兹等离子激元集成系统分析具有重要意义。

为此, 本文首先对太赫兹 SSPPs TL 进行了研究, 采用一种具有不规则阶梯渐变过渡结构的 SSPPs TL, 其相较于传统阶梯渐变过渡结构的 SSPPs TL, 大大降低了 SSPPs TL 的传输损耗, 提高了传输平坦度。在 SSPPs TL 的基础上, 通过在矩形槽中加载开口谐振环 (SRR) 引入了一段截止阻带, 通过调节 SRR 结构尺寸可对阻带频率进行调控, 且阻带抑制深度由

SRR 个数决定。最后采用微纳加工工艺对 SSPPs TL 和 SSPPs 滤波器进行了加工, 利用探针台对其进行了在片测试。测试结果与仿真结果具有较高的吻合度, 验证了该设计的可行性。

2 基于 SSPPs 的太赫兹 TL 及带阻滤波器设计

2.1 基于 SSPPs 的太赫兹低损耗 TL

SSPPs 的单元结构如图 1(a) 所示, 该结构为传统的金属矩形槽结构, 其中, 矩形槽深度 $h=200\ \mu\text{m}$, 周期长度 $p=200\ \mu\text{m}$, 线条宽度 $w_0=50\ \mu\text{m}$ 、 $w=50\ \mu\text{m}$ 。金属结构刻蚀在厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 的石英衬底材料上。采用商业电磁仿真软件 CST Microwave Studio 的本征模仿真控件对 SSPPs 单元结构的色散特性进行仿真。在色散曲线的仿真过程中, 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; 然后将非周期方向上的边界往外延拓一定距离 (一般取为 10 倍周期长度) 后设置为电边界或磁边界; 最后, 将两周期性边界条件之间的固有相移设置为参数 φ , 并利用参数扫描功能获得 $0^\circ\sim 180^\circ$ 相移状态下的模式频率。根据定义, 固有相移值 φ 与传播方向上的传播常数 k 具有如下换算关系:

$$k = \varphi\pi / (180p). \quad (1)$$

通过换算即可得到 SSPPs 单元结构的色散曲线。如图 1(b) 所示, 随着波矢的增加, SSPPs 单元结构的色散曲线缓慢偏离光线并趋于水平, 渐渐接近不同的截止频率, 表现出与天然 SPPs 相同的特性——具有低通特性的漫波。矩形槽 SSPPs 的色散特性主要由槽深度决定, 如图 1(b) 所示, 随着槽深度 h 的增加, SSPPs 的截止频率逐渐降低, 表现出更强的场束缚能力。通过改变矩形槽的深度可实现对 SSPPs 色散特性的灵活调控。

尽管 SSPPs 具有强场束缚的优异特性, 但由于横电磁模式与 SSPPs 模式之间存在固有的动量不匹配问题, 传统馈电方法很难激发出 SSPPs 模式。因此, SSPPs TL 的高效激励与转换是必须解决的首要问题^[5]。本文采用不规则阶梯渐变过渡结构, 大大提高了 SSPPs 的激励效率, 实现了低损耗的太赫兹 SSPPs 传输。如图 2 所示, 该 TL 由三个部分组成: 共面波导 (CPW)、模式转换 (Transition), 以及周期阵列分布的 SSPPs TL。TL 的整体尺寸为 $5540\ \mu\text{m}\times 800\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ 。CPW 作为 SSPPs 的馈电结构, 其特征阻抗为 $50\ \Omega$, 线宽与矩形槽 SSPPs 线宽 W_0 一致, 接地 pad 的

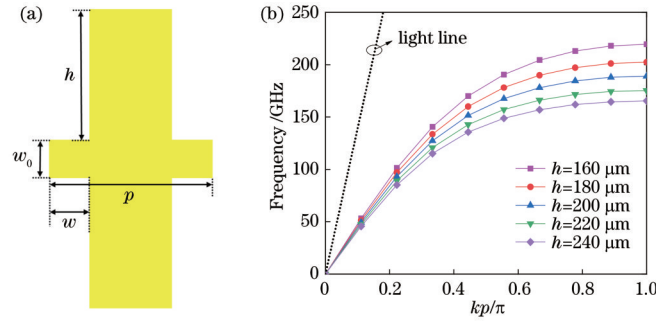


图 1 SSPPs 单元结构及色散曲线图。(a) 矩形槽 SSPPs 单元结构示意图; (b) 矩形槽 SSPPs 单元结构色散曲线仿真图

Fig. 1 SSPPs unit cell and dispersion curves. (a) Layout of SSPPs unit cell with rectangular grooves; (b) dispersion curves of SSPPs unit cell with rectangular grooves

宽度 $W_g = 365 \mu\text{m}$, 长度 $L_c = 200 \mu\text{m}$ 。模式转换作为馈电结构与 SSPPs 之间的阻抗和动量匹配, 其结构优化决定了整个 SSPPs TL 的性能。传统 transition 结构主要为阶梯渐变矩形槽结构, 其模式转换单元的线条宽度和周期长度均与 SSPPs 单元的线条宽度 w 和周期长度 p 相同, 仅将各转换单元的槽深度按固定步进依次递增, 以实现 CPW 与 SSPPs 之间的平滑过渡^[13, 26]。如图 2 所示, 为了增加优化变量, 本文采用不规则阶梯渐变矩形槽结构, 将前两级模式转换单元的

线条宽度设置为可优化变量 x_1 与 x_2 , 转换单元的周期长度以及后八级转换单元的线条宽度与 SSPPs 单元保持一致, 分别为 p 和 w 。图 2 中 W_{sub} 为基片宽度, W_t 为渐变的宽度, L_t 为过渡结构长度。转换单元的矩形槽深度逐渐从 $h_1 = 20 \mu\text{m}$ 增加至 $h = 200 \mu\text{m}$, 固定步进为 $20 \mu\text{m}$ 。SSPPs TL 部分由 7 个阵列分布的如图 1 所示的矩形槽 SSPPs 单元结构组成。优化后的 SSPPs TL 结构尺寸参数如表 1 所示。

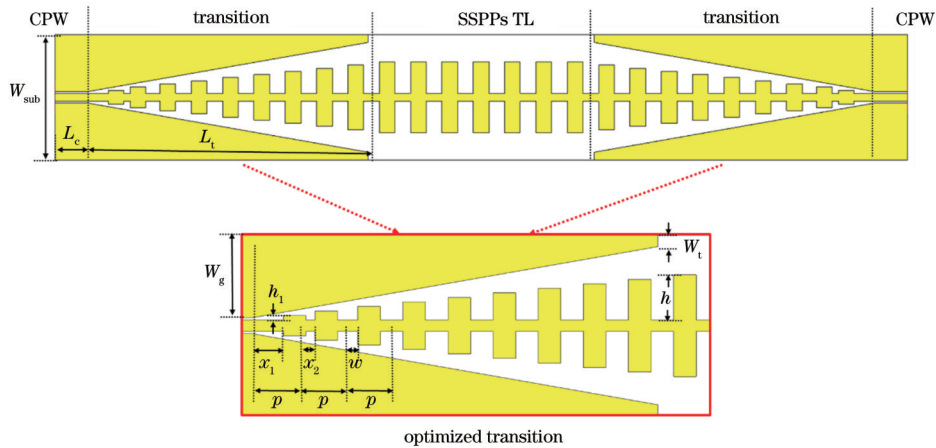


图 2 基于 SSPPs 的太赫兹低损耗 TL 结构示意图

Fig. 2 Schematic configuration of proposed terahertz low-loss TL based on SSPPs

表 1 SSPPs TL 的结构参数

Table 1 Structure parameters of proposed SSPPs transmission line

Parameter	w_0	L_t	W_g	W_t	W_{sub}	L_c
Value / μm	50	2000	365	50	800	200
Parameter	h	h_1	p	x_1	x_2	w
Value / μm	200	20	200	140	80	50

SSPPs TL 的仿真结果如图 3 所示, S_{11} 为回波损耗, S_{21} 为插入损耗。明显地, SSPPs TL 表现出低通滤波的特性, 这与矩形槽 SSPPs 单元结构的色散特性是一致的。通过对比传统阶梯渐变过渡 SSPPs TL 和优化后的采用不规则阶梯渐变过渡的 SSPPs TL, 可以

发现在整个通带范围内, 优化后的 SSPPs TL 具有更佳的传输效率, SSPPs TL 的回波损耗和插入损耗均得到了大幅降低, 且插入损耗的平坦度也得到了提升。在 $0.1 \sim 0.17 \text{ THz}$ 频率范围内, 传统的和优化后的 SSPPs TL 的回波损耗分别优于 8.8 dB 和 24.4 dB , 可见通过增加优化变量 x_1 与 x_2 , 使 SSPPs TL 的回波损耗降低了 15.6 dB 。在频带内, 传统 SSPPs TL 的插入损耗 S_{21} 在 0.7 dB 至 2.1 dB 的范围内波动, 而优化后的 SSPPs TL 的插入损耗 S_{21} 在 0.6 dB 至 1.4 dB 的范围内平缓下降。传统的和优化后的 SSPPs TL 的平均 S_{21} 分别为 1.4 dB 和 1 dB , 可见通过增加优化变量 x_1 与 x_2 , 使 SSPPs TL 的插入损耗降低了 0.4 dB 。从损耗参数对比情况可以看出, 通过增加两个优化变量 x_1 与

x_2 , 打破了模式转换部分所采用的传统阶梯渐变过渡的固有规律性, 这两个不规则的结构参数提升了 SSPPs TL 的可优化空间, 进而提升了 SSPPs TL 的传输性能, 且通过增加更多的可优化变量, 可进一步提升 SSPPs TL 的传输性能。

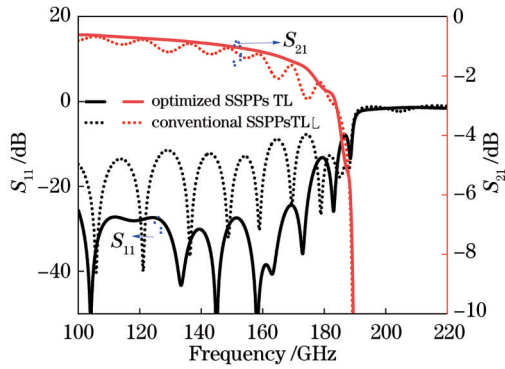


图 3 传统 SSPPs TL 与优化后的 SSPPs TL 的仿真结果
Fig. 3 Simulated results of conventional SSPPs TL and optimized SSPPs TL

2.2 基于 SSPPs TL 的太赫兹带阻滤波器

基于上述低损耗太赫兹 SSPPs TL, 本文通过在矩形槽中加载 SRR, 实现了单阻带的太赫兹 SSPPs 滤波器, 其单元结构如图 4(a) 所示。一组对称分布的 SRRs 对加载在矩形槽 SSPPs 单元结构的槽缝中,

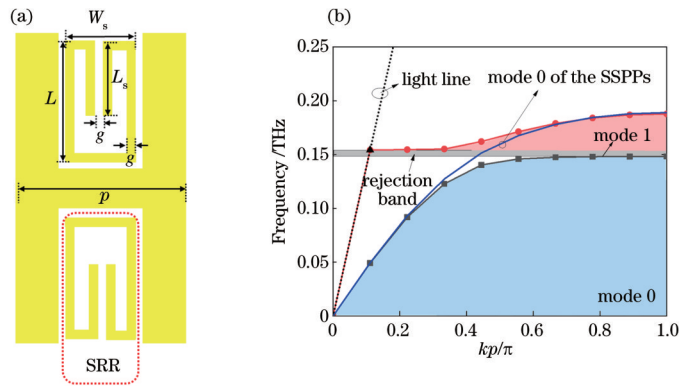


图 4 基于 SSPPs TL 的太赫兹 SSPPs 滤波器单元结构及色散曲线图。(a) 单元结构示意图; (b) 单元结构色散曲线图
Fig. 4 Schematic configuration and simulated dispersion results of terahertz SSPPs filter unit cell based on SSPPs TL. (a) Schematic configuration of terahertz SSPPs filter unit cell; (b) dispersion curves of unit cell

接下来分析了加载 SRR 的参数对 SSPPs 滤波性能的影响。图 5(a) 为 SRR 枝节长度 L_s 对 SSPPs 滤波性能的影响。明显地, 随着枝节长度逐渐从 $90 \mu\text{m}$ 增加至 $130 \mu\text{m}$, SSPPs 滤波器的带阻频率逐渐从 0.152 THz 减小至 0.135 THz 。因此, 通过调整 SRR 枝节长度 L_s 可实现对 SSPPs 滤波器工作频带的随意设置。此外分析了该滤波器在加载不同 SRR 个数 N 下的传输特性。对对称分布的 SRRs 对的个数 N 从 1 逐渐增加到 6 时的滤波器插入损耗 S_{21} 进行了仿真, 如图 5(b) 所示。从仿真结果中可以明显看出, 随着 SRRs 对个数的增加, SSPPs 滤波器的阻带抑制深度逐渐从 12 dB 增加至 90 dB , 表现出更加优异的带阻特

SRR 的长度 $L=180 \mu\text{m}$, 宽度 $W_s=80 \mu\text{m}$, SRR 枝节长度 $L_s=110 \mu\text{m}$, SRR 线宽及 SSPPs 单元结构的间距均为 $g=10 \mu\text{m}$ 。采用商业电磁仿真软件 CST Microwave Studio 的本征仿真控件对 SSPPs 滤波器单元结构的色散特性进行仿真。如图 4(b) 所示, 点线表示 SSPPs 滤波器单元结构的色散曲线, 实线表示不加载 SRRs 的矩形槽 SSPPs 的色散曲线。其中, 最下方阴影部分为 SSPPs 滤波器单元结构的基模 mode 0, 上方阴影部分为一阶高次模 mode 1。根据 SSPPs 的传输机理, 在光线右侧且在色散曲线截止频率以下的区域为 SSPPs 单元的传输通带。明显地, 在 mode 0 和 mode 1 之间的灰色区域是存在于两个传输模式之间的阻带(rejection band)。从图 4 中可以看出, SSPPs 滤波器单元结构的一阶高次模 mode 1 表现为固有的带通模式, 其通带范围从偏离光线的转折点开始直至渐近频率点, 且其渐近频率与不加载 SRRs 的矩形槽 SSPPs 的渐近频率相同。也就是说, 通过在矩形槽缝中加载 SRRs, 使不存在高次模的 SSPPs 单元中新增了一个一阶高次模, 实现了 SSPPs 单元的多模传输。这是由于: 通过加载 SRRs, 使得矩形槽 SSPPs 的等效槽深度 h 增加, 当等效槽深度 h 大于单元结构周期长度 p 时, 即会出现高次模, 且高次模数量会随着等效槽深度的增加而逐渐增加^[8]。因此, 通过加载 SRRs 使得 SSPPs 表现为通带-阻带-通带-阻带的滤波特性。

性。这是由于: 随着 SRRs 单元个数的增加, 其谐振特性相互叠加, 越多的单元个数可实现越大的抑制度。

为了验证加载 SRRs 的 SSPPs 的通带-阻带-通带-阻带的滤波特性, 对 SSPPs 滤波器进行了仿真设计。其中, 考虑到器件的小型化和加工工艺的简便化, 将对称的 SRRs 对的个数 N 设置为 6 个。如图 6 所示, 与 SSPPs TL 相似, 该滤波器由三部分组成: CPW 馈电部分, 模式转换部分, 以及核心的 SSPPs 滤波器部分。该 SSPPs 滤波器的整体结构除了将 6 组 SRRs 对加载在矩形槽缝中外, 其余部分与图 2 中所述的低损耗 SSPPs TL 是完全一致的, 其中 6 组 SRRs 的结构尺寸是相同的, 枝节长度 L_s 为 $100 \mu\text{m}$ 。

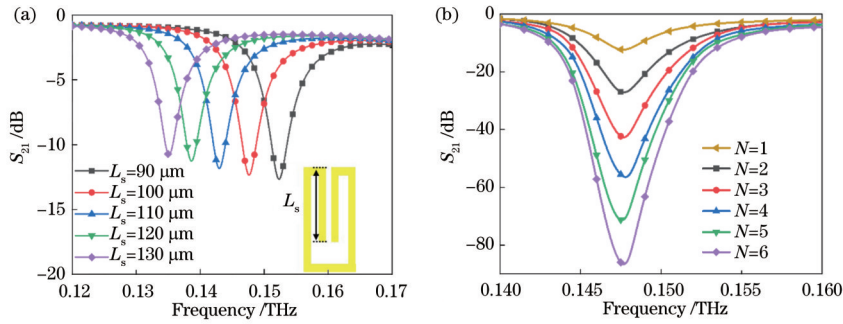


图 5 加载 SRR 的结构参数对 SSPPs 滤波器性能的影响。(a) SRR 枝节长度 L_s 对 SSPPs 滤波器性能的影响；(b) SRR 数量对 SSPPs 滤波性能的影响

Fig. 5 Influence of structural parameters of SRR on performance of SSPPs filter. (a) Influence of SRR branch length L_s on performance of SSPPs filter; (b) influence of number of SRRs on performance of SSPPs filter

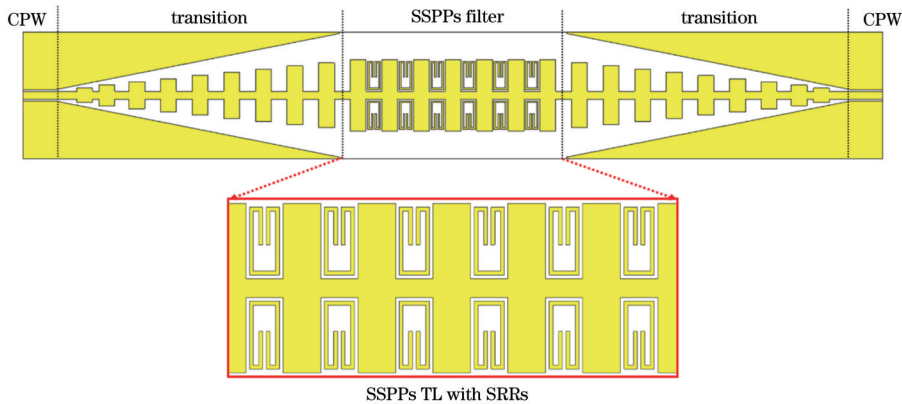


图 6 加载 SRRs 的太赫兹 SSPPs 带阻滤波器的结构示意图

Fig. 6 Schematic configuration of proposed terahertz SSPPs filter with rejection band based on loading SRRs

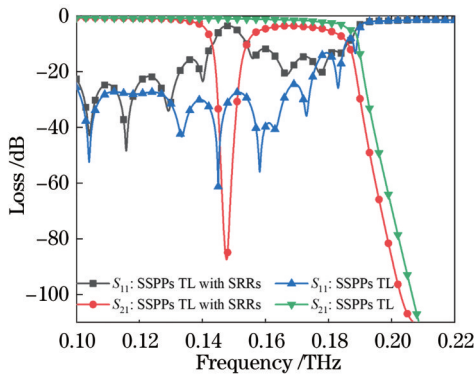


图 7 加载 SRRs 的太赫兹 SSPPs 带阻滤波器的仿真结果图
Fig. 7 Simulated results of proposed terahertz SSPPs filter with rejection band based on loading SRRs

仿真结果如图 7 所示,明显地,不加载 SRRs 的 SSPPs TL 与加载 SRRs 的 SSPPs 滤波器具有相近的上截止频率。但通过加载 6 组 SRRs,SSPPs 滤波器在低通频带内引入了一个阻带,表现出优异的通带-阻带-通带-阻带滤波特性,这与图 4 所示的单元结构色散特性相吻合。在 0.143~0.154 THz 频带范围内,SSPPs 滤波器的抑制深度大于 10 dB,其中,在 0.148 THz 达到了约 90 dB 的最大抑制深度。此外,通过调节 SRR 枝节长度可灵活调控滤波器的工作频率,

通过改变加载 SRR 的个数可实现对抑制深度的调控。

为了更好地得到通带-阻带-通带-阻带的滤波特性,在保持 SRRs 外形不变的情况下,也可同时加载多种不同枝节长度的 SRRs,以实现多阻带滤波。如图 8 所示,对加载枝节长度分别为 100 μm 和 130 μm 的 SRRs 进行了仿真设计。仿真结果表明,通过加载 3 组两种不同长度的 SRRs,在 0.135 THz 和 0.148 THz 实现了抑制深度约为 40 dB 的双频带带阻滤波特性, SRRs 产生的滤波频段与图 5(a) 相对应。因此,可借助不同尺寸的 SRRs 结构实现多频带带阻滤波器设计。

3 加工与测试

为验证上述基于 SSPPs 的太赫兹低损耗 TL 和带阻滤波器的可行性,采用微纳加工工艺制备了所提出的 SSPPs TL 和 SSPPs 滤波器,并进行了相应的实验测试。在制作过程中,首先在 0.5 mm 厚的石英衬底表面旋转涂覆光致抗蚀剂,然后采用电子束蒸发法依次沉积出 Ti/Al/Ti/Au (10 nm/150 nm/10 nm/2 μm) 金属薄膜,紧接着采用剥离工艺形成所需要的金属图形,即实现图形金属化。通过减薄工艺将石英衬底厚度减薄至 50 μm ,通过划片得到所设计的器件芯片。图 9(a) 和图 9(b) 所示分别为 SSPPs TL 和 SSPPs 滤

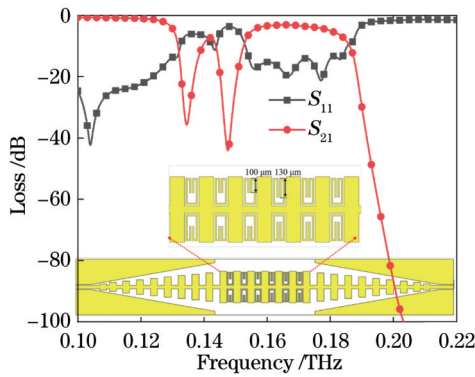


图 8 加载两种不同枝节长度(100 μm 和 130 μm)SRRs 的太赫兹 SSPPs 带阻滤波器的仿真结果图
 Fig. 8 Simulated results of proposed terahertz SSPPs filter with rejection band for loading two SRRs with branch lengths of 100 μm and 130 μm

波器在高分辨率电子显微镜下的照片。为测试所提出的 SSPPs 器件的传输性能,采用矢量网络分析仪在片测试其损耗参数。测试环境如图 10 所示,器件的输入与输出端口分别通过探针台上的两个探针与矢量网络分析仪相连接,并采用工作频段为 0.11~0.17 THz 的矢网扩频模块将矢量网络分析仪的可测频段提升至太赫兹频段。受实验设备的限制,实验中仅测试了 0.11~0.17 THz 频段下 SSPPs 器件的传输情况。

所提出的低损耗太赫兹 SSPPs TL 的测试结果如

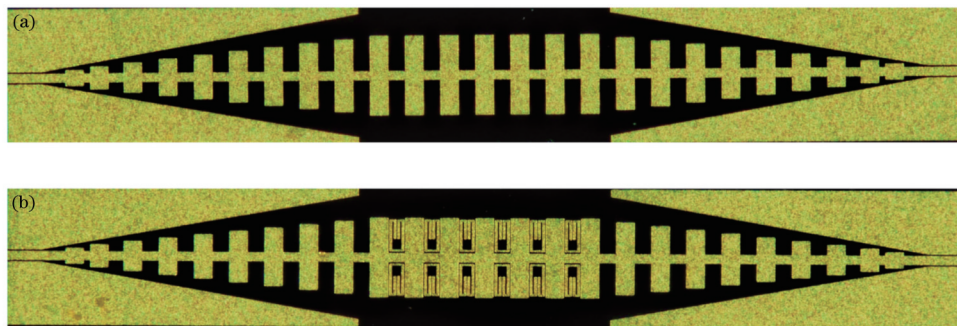


图 9 基于 SSPPs 的太赫兹低损耗 TL 及带阻滤波器实物图。(a) SSPPs TL;(b) SSPPs 滤波器
 Fig. 9 Terahertz low-loss TL based on SSPPs and SSPPs filter. (a) SSPPs TL; (b) SSPPs filter

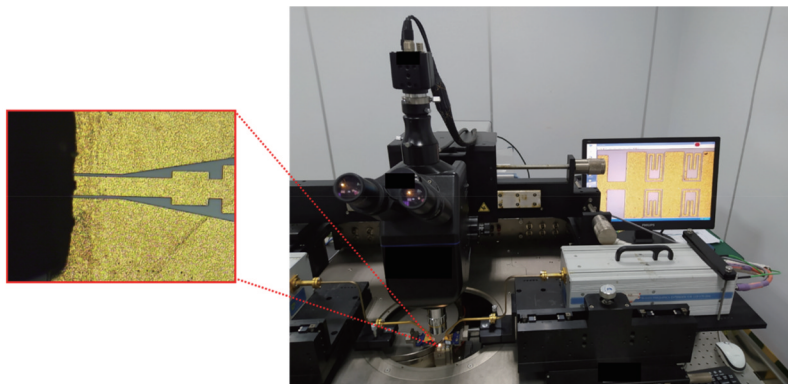


图 10 基于 SSPPs 的太赫兹低损耗 TL 及带阻滤波器测试环境实物图
 Fig. 10 Measurement setup of proposed terahertz low-loss TL based on SSPPs and SSPPs filter

图 11 所示,在 0.11~0.17 THz 频率范围内,SSPPs TL 的插入损耗优于 2.7 dB,即优于 0.5 dB/mm,回波损耗优于 10 dB。如图 12 所示,所提出的太赫兹 SSPPs 滤波器在 0.142~0.156 THz 频率范围内的抑制深度大于 10 dB,最大抑制深度为 45 dB@0.148 THz。SSPPs TL 与 SSPPs 滤波器的实验结果与仿真结果具有较好的吻合度,验证了该设计的可行性。测试结果相较于仿真结果较差,这主要是由微纳加工工艺误差、探针台在片测试接触不良等因素造成的。尽管测试结果存在一定的恶化,但 SSPPs TL 的传播损耗(优于 0.5 dB/mm)和回波损耗(优于 10 dB)仍处于尚可接收的范围,SSPPs 滤波器的带阻特性与仿真结果也较好地吻合,表明了该设计的可实用性。通过设计具有高容差率的 SSPPs 结构、提高微纳加工工艺精度,可进一步改进实测结果与仿真结果的吻合度。

接下来讨论了加工工艺容差对器件性能的影响。对 SSPPs TL 的关键结构参数进行仿真分析,结果如图 13 所示。可以看出,当前两级模式转换单元的线条宽度 x_1 与 x_2 的加工误差 $X(x_1)$ 和 $X(x_2)$ 逐渐从 $-10 \mu\text{m}$ 增加至 $10 \mu\text{m}$ 时,SSPPs TL 的回波损耗 S_{11} 出现了明显的波动,其中,插入损耗 S_{21} 在加工误差为 $-10 \mu\text{m}$ 时最差。对 SSPPs 滤波器中 SRR 结构参数的容差对器件的影响进行了分析,结果如图 14 所示。明显地,当 SRR 偏移量 $X(u)$ 逐渐从 $-10 \mu\text{m}$ 增加至 $10 \mu\text{m}$ 时,SSPPs 滤波器的回波损耗 S_{11} 和插入损耗 S_{21} 都出现了明显的波动,其中,在偏移量为 $10 \mu\text{m}$ 时,滤波性能最

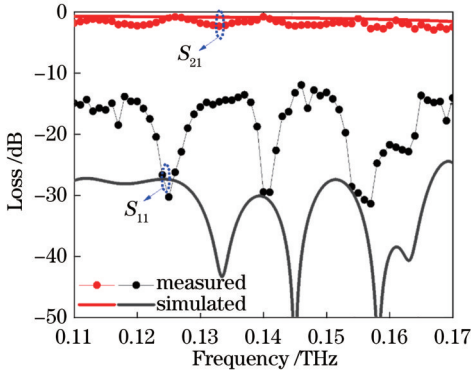


图 11 低损耗太赫兹 SSPPs TL 测试结果(点线)与仿真结果(实线)对比图。

Fig. 11 Measured (dashed line) and simulated (solid line) results of proposed low-loss terahertz SSPPs TL

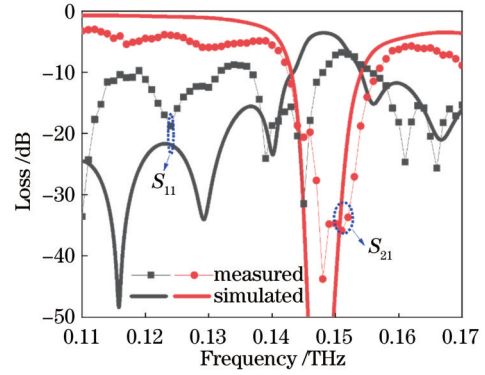


图 12 太赫兹 SSPPs 滤波器测试结果(点线)与仿真结果(实线)对比图

Fig. 12 Measured (dashed line) and simulated (solid line) results of proposed terahertz SSPPs filter

差。SRR 宽度 w_s 的加工误差 $X(w_s)$ 可影响滤波器的工作频率,如图 14(b)所示,随着加工误差 $X(w_s)$ 的增

加,SSPPs 滤波器的工作频率逐渐降低,且抑制深度也有略微的波动。

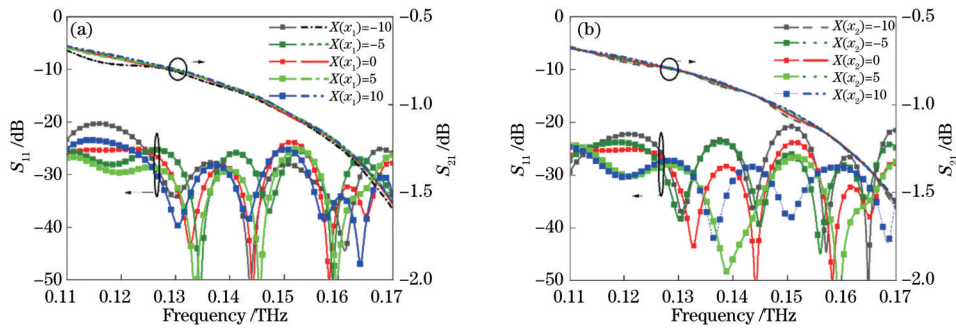


图 13 加工误差对 SSPPs TL 传输性能的影响。(a) x_1 加工误差 $X(x_1)$ 的影响;(b) x_2 加工误差 $X(x_2)$ 的影响

Fig. 13 Effect of fabrication error on transmission performance of SSPPs TL. (a) Effect of x_1 fabrication error $X(x_1)$; (b) effect of x_2 fabrication error $X(x_2)$

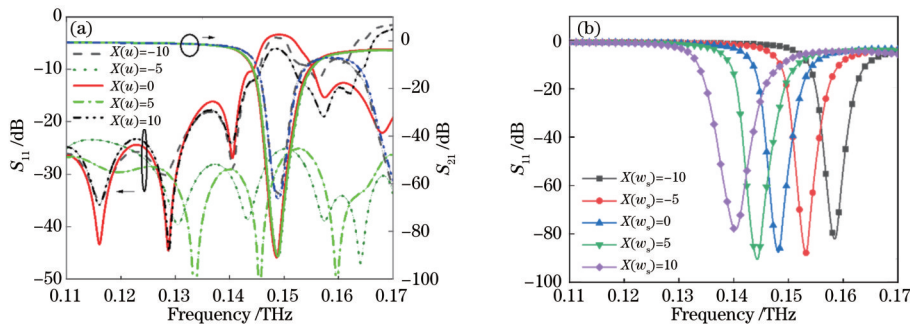


图 14 加工误差对 SSPPs 滤波性能的影响。(a) SRR 偏移加工误差 $X(u)$ 的影响;(b) w_s 加工误差 $X(w_s)$ 的影响

Fig. 14 Effect of fabrication error on transmission performance of SSPPs filter. (a) Effect of SRR offset fabrication error $X(u)$; (b) effect of w_s fabrication error $X(w_s)$

4 结 论

基于人工表面等离子体设计了一种具有低损耗的太赫兹 TL,在此基础上,通过加载 SRR 实现了太赫兹带阻滤波器。首先对 SSPPs TL 单元结构及 SSPPs 滤波器单元结构的色散曲线进行仿真,分析了影响 SSPPs 截止频率的主要参数以及加载 SRR 对 SSPPs 滤波器的影响。采用不规则阶梯渐变过渡结构大幅度

提升了 SSPPs 的激励效率,降低了 SSPPs TL 的损耗,提高了插入损耗平坦度。采用微纳加工工艺对 SSPPs TL 及 SSPPs 滤波器进行了加工,并利用探针台、矢量网络分析仪及其扩频模块对 SSPPs 器件进行了在片测试。实测结果与仿真结果吻合度较好,验证了该设计的可行性。所提出的太赫兹 SSPPs TL 和滤波器结构简单,设计方便,在太赫兹等离子体器件和系统中具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Urteaga M, Griffith Z, Seo M, et al. InP HBT technologies for THz integrated circuits[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(6): 1051-1067.
- [2] Moghadami S, Hajilou F, Agrawal P, et al. A 210 GHz fully-integrated OOK transceiver for short-range wireless chip-to-chip communication in 40 nm CMOS technology [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(5): 737-741.
- [3] Kim J, Jeon S, Kim M, et al. H-band power amplifier integrated circuits using 250-nm InP HBT technology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(2): 215-222.
- [4] Radisic V, Leong K M K H, Mei X B, et al. Power amplification at 0.65 THz using InP HEMTs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(3): 724-729.
- [5] 张浩驰, 何沛航, 牛凌云, 等. 人工表面等离子激元超材料[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.
- [6] 刘濮鲲, 黄铁军. 太赫兹表面等离子激元及其应用[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.
- [7] Ren Y, Zhang J J, Gao X X, et al. Active spoof plasmonics: from design to applications[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2021, 34(5): 053002.
- [8] 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.
- [9] Pendry J B, Martín-Moreno L, Garcia-Vidal F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. Science, 2004, 305(5685): 847-848.
- [10] Garcia-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] 杨柳, 蒋世磊, 孙国斌, 等. 等离子激元增强金属-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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 白育堃, 柴博, 郑宏兴. 基于人工表面等离子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.
- [16] 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.
- [17] 张浩驰. 人工表面等离子激元的基本原理、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.
- [18] 王岩, 陈哲, 崔琦. 基于二氧化钒的可调谐太赫兹宽带带通滤波器[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2023002.
Wang Y, Chen Z, Cui Q. Tunable terahertz broadband bandpass filter based on vanadium dioxide[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2023002.
- [19] 王昊深, 韩奎, 孙威, 等. 三波段超材料宽带带通滤波器的设计及实验研究[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0623001.
Wang H S, Han K, Sun W, et al. Design and experimental investigation of triple-band metamaterial broadband bandpass filter[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0623001.
- [20] 高万, 王建扬, 吴倩楠. 基于双金属环的超材料太赫兹宽频带通滤波器的设计与研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0516001.
Gao W, Wang J Y, Wu Q N. Design and investigation of a metamaterial terahertz broadband bandpass filter based on dual metallic rings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0516001.
- [21] 吴梦, 梁西银, 孙对兄, 等. 基于表面等离子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.
- [22] 杨宏艳, 陈昱澎, 肖功利, 等. 内嵌对称扇形金属谐振腔的MIM可调谐等离子体滤波器[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1124001.
Yang H Y, Chen Y P, Xiao G L, et al. MIM tunable plasmonic filter embedded with symmetrical sector metal resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1124001.
- [23] 罗昕, 邹喜华, 温坤华, 等. 双节MIM结构表面等离子体窄带光学滤波器[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1123003.
Luo X, Zou X H, Wen K H, et al. Narrow-band filter of surface plasmon based on dual-section metal-insulator-

- metal structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1123003.
- [24] 王俊林, 张斌珍, 段俊萍, 等. 柔性双阻带太赫兹超材料滤波器[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1016001.
Wang J L, Zhang B Z, Duan J P, et al. Flexible dual-stopband terahertz metamaterial filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1016001.
- [25] 赵静, 王加贤, 邱伟彬, 等. 基于石墨烯的表面等离子体带阻滤波器[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 012401.
Zhao J, Wang J X, Qiu W B, et al. Surface plasmonic polariton band-stop filters based on graphene[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 012401.
- [26] 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.
- [27] Ye L F, Chen Y, Wang Z Y, et al. Compact spoof surface plasmon polariton waveguides and Notch filters based on meander-strip units[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(3): 135-138.
- [28] Asad A, Yi F, Hang H P, et al. Spoof surface plasmon polariton beam splitters integrated with broadband rejection filtering function[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(33): 335105.
- [29] Mazdouri B, Honari M M, Mirzavand R. Miniaturized spoof SPPs filter based on multiple resonators or 5G applications[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 22557.
- [30] Zhang L Q, Chan C H. Spoof surface plasmon polariton filter with reconfigurable dual and non-linear notched characteristics[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, 68(8): 2815-2819.