

光学学报

基于 InP 工艺的小型化亚太赫兹人工表面 等离子体激元传输线设计

朱华利¹, 张勇^{1*}, 黎雨坤^{1**}, 叶龙芳^{2,3}, 魏浩森¹, 刘晓宇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子体激元(SSPPs)的亚太赫兹片上传输线,并在InP工艺基础上对其进行了结构设计和实物加工。为减小传统矩形槽SSPPs结构的占地面积,提出了一种折叠型SSPPs结构,在相同的渐近频率下,该结构的占地面积缩小了57.2%。利用接地共面波导(GCPW)和阶梯渐变结构,实现了对SSPPs传输线的高效激励。利用太赫兹在片测试系统对该传输线进行了测试。测试结果表明,在110~170 GHz频带范围内,SSPPs传输线的插入损耗小于3 dB/mm,回波损耗优于12.5 dB,且实验结果与仿真结果具有较好的吻合度。

关键词 表面光学; 人工表面等离子体激元; 传输线; InP工艺; 太赫兹; 在片测试

中图分类号 TN811+.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2124001

Design of Compact Sub-Terahertz Spoof Surface Plasmon Polariton Transmission Line Based on InP Technology

Zhu Huali¹, Zhang Yong^{1*}, Li Yukun^{1**}, Ye Longfang^{2,3}, Wei Haomiao¹, Liu Xiaoyu¹,
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, School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University,
Xiamen 361005, Fujian, China;

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

Abstract A sub-terahertz on-chip transmission line based on spoof surface plasmon polaritons (SSPPs) is proposed, and its structure is designed and processed by InP technology. In order to reduce the area occupied by the SSPPs structure with the conventional rectangular grooves, a folded SSPPs structure is proposed. With the same asymptotic frequency, the area occupied by the proposed structure is reduced by 57.2%. In addition, the efficient excitation of the folded SSPPs transmission line is realized by the grounded coplanar waveguide (GCPW) and a gradient transition structure. The SSPPs transmission line is measured by a terahertz on-chip test system. Test results show that the insertion loss of the SSPPs transmission line is less than 3 dB/mm with the frequency band ranging from 110 to 170 GHz, and the return loss is better than 12.5 dB, which is in good agreement with the simulated ones.

Key words optics at surfaces; spoof surface plasmon polaritons; transmission line; InP technology; terahertz; on-chip test

1 引言

近年来,随着半导体晶体管技术的成熟,太赫兹(100 GHz~10 THz)单片集成电路(TMIC)得到了迅

速发展,并掀起了一股研究热潮,其在无线通信、无损检测、医学成像、电子对抗和精确制导等领域中已经进入了实际应用阶段^[1-4]。太赫兹片上传输线是太赫兹单片集成电路实现信息感知、传输和探测的基础。以传统

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-04-18; 录用日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(61871072)

通信作者: *yongzhang@uestc.edu.cn; **kunyuleeee@gmail.com

的片上传输线(微带线、共面波导和接地共面波导等)为基本信息传输载体的太赫兹集成电路存在着明显的路径损耗和电磁(EM)串扰,进而相邻传输线之间的能量串扰很严重^[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,以实现电磁能量被紧束缚于结构周围的传输模式中。

表面等离子体激元(SPPs)是电磁波与自由电子在金属-介质分界面上相互作用而产生的表面波。SPPs因其独特的亚波长束缚和场增强特性,已被广泛应用于超分辨率成像、传感、检测和微型化光子电路等领域中^[9-12]。典型的SPPs只产生于可见光或红外光区域,而Pendry等^[13-14]于2004年基于金属超构表面突破性发现了可工作在微波和太赫兹频段的SPPs。由于Pendry等发现的SPPs的色散特性与典型的SPPs相似,并可由结构表面的几何参数灵活控制,故被称为人工SPPs(SSPPs)。SSPPs具有独特的强场束缚传输模态,在电磁学界引起了广泛的关注,并有望成为微波和太赫兹集成电路与系统进一步突破的解决方案。基于此,研究者们设计和提出了许多不同结构的SSPPs传输线,如金属沟槽阵列、孔阵列和环形波纹阵列等^[15-16]。然而,上述三维结构传输线尺寸较大且难以与平面电路相结合。近年来,为了实现器件的小型化和更好的集成化,学者们提出并研究了具有平面矩形槽结构的超薄SSPPs传输线,并基于该传输线实现了多种微波平面集成等离子体器件,如滤波器、分频器、天线、放大器和倍频器等^[17-28]。

首先,本文对应用于太赫兹单片集成电路的磷化铟(InP)工艺进行了分析,并结合该半导体工艺提出了折叠型的小型化SSPPs传输线。然后,对SSPPs单元的色散曲线进行了分析,在相同的渐近频率下,折叠型SSPPs单元结构的占地面积较传统矩形槽SSPPs结构降低了57.2%。接着,采用阶梯渐变过渡结构实现了SSPPs传输线与接地共面波导(GCPW)之间的阻抗匹配和模式转换。最后,利用太赫兹在片测试系统对所提传输线进行了测试,测试结果与仿真结果吻合度较好,验证了该设计的可行性。

2 基于 InP 工艺的小型化亚太赫兹 SSPPs 传输线设计

InP 技术不仅具有带隙宽、导热系数高和电子饱和率高等特点,还具有优异的频率和功率性能,进而非常适用于太赫兹单片集成电路的设计。本文采用的 InP 技术的工艺分层示意图如图 1 所示,所有电路结构均设计在一个由金属化通孔互连的三层金属薄膜上,整个金属薄膜生长在 50~100 μm 厚的 InP 衬底上。将顶层金属 metal 3 和中间层金属 metal 2 (厚度分别为 2000 nm 和 500 nm) 作为太赫兹信号的传输层,将厚度为 400 nm 的底层金属 metal 1 作为接地层。采用两层相对介电常数为 2.7 的苯并环丁烯(BCB)材料对金属层进行分离,BCB 层厚度分别为 1400 nm(BCB 1)和 2000 nm(BCB 2)。在本设计中,将具有大电流能力的

顶层金属 metal 3 作为信号传输层,并忽略中间层金属 metal 2 和金属-绝缘-金属(MIM) SiN 电容器。

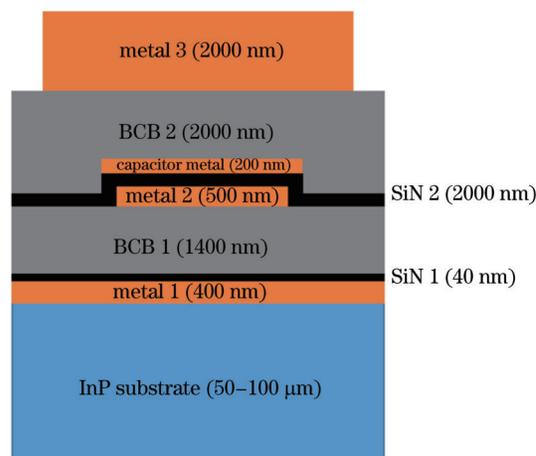


图 1 InP 工艺的层分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of layer distribution for InP technology

在 InP 工艺的顶层金属 metal 3 上刻蚀出 SSPPs 的单元结构。图 2(a)和图 2(b)分别为传统的金属矩形槽 SSPPs 结构和所提的金属折叠型 SSPPs 结构。其中,矩形槽深度为 $h=84 \mu\text{m}$,周期长度为 $p=64 \mu\text{m}$,折叠线长度为 $L=16 \mu\text{m}$,线条宽度为 $w_0=8 \mu\text{m}$ 和 $w=6 \mu\text{m}$ 。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。从图 2(c) 可以发现,随着波数 k 的增加,两种 SSPPs 单元结构的色散曲线均缓慢偏离光线并趋于水平,逐渐接近相近的截止频率,表现出与天然 SPPs 相同的特性——具有低通特性的漫波。明显地,在相近的渐近频率下,矩形槽 SSPPs 单元结构的占地面积为 $168 \mu\text{m} \times 64 \mu\text{m}$,而折叠型 SSPPs 单元结构的占地面积仅为 $72 \mu\text{m} \times 64 \mu\text{m}$,尺寸缩小了 57.2%。SSPPs 的色散特性主要由其槽深度决定,槽深度越深,SSPPs 的渐近频率就越低,对场的束缚能力就越强,线间串扰就越低^[22]。采用折叠型 SSPPs 结构可增加等效矩形槽深度,进而可降低占地面积,实现 SSPPs 传输线的小型化。

此外,对折叠线长度 L 与 SSPPs 色散特性之间的关系展开了分析。从图 3 可以发现:当折叠线长度 L 逐渐从 $12 \mu\text{m}$ 增加至 $20 \mu\text{m}$ 时,SSPPs 的截止频率逐渐从 700 GHz 降低至 370 GHz;截止频率越低,SSPPs 的场束缚能力越强。因此,通过改变折叠线的长度 L 可实现对折叠型 SSPPs 色散特性的灵活调控。

在上述对 InP 半导体工艺布局和折叠型 SSPPs 单元结构色散特性分析的基础上,本文对小型化亚太赫兹 SSPPs 片上传输线进行了设计。如图 4 所示,该传输线由三个部分组成,即 GCPW、模式转换(Transition)和周期阵列分布的 SSPPs 单元结构(SSPPs TL),传输线整体尺寸为 $1984 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, W_{sub} 为传输线的宽度。GCPW 作为 SSPPs 的馈电结

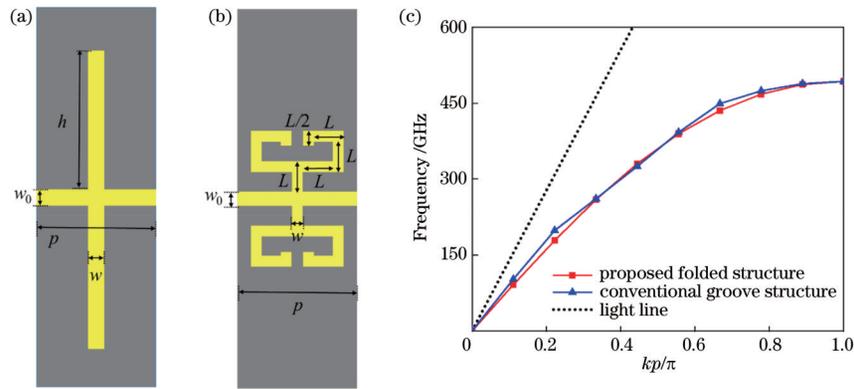


图 2 SSPPs 单元结构和色散曲线图。(a) 矩形槽 SSPPs 单元结构示意图；(b) 折叠型 SSPPs 单元结构示意图；(c) 矩形槽 SSPPs 与折叠型 SSPPs 单元结构的色散曲线仿真对比图

Fig. 2 Layout and dispersion curves of SSPPs unit cells. (a) Layout of unit cell of SSPPs with groove structure; (b) layout of unit cell of SSPPs with folded structure; (c) comparison of dispersion curves of unit cell of SSPPs with groove structure and unit cell of SSPPs with folded structure

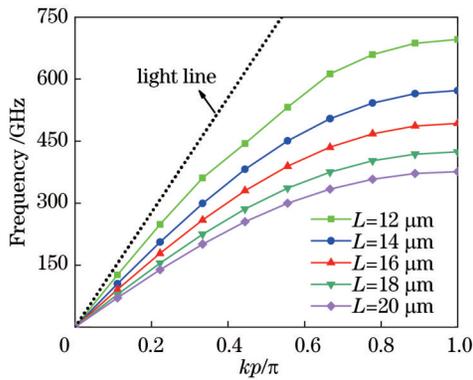


图 3 折叠型 SSPPs 单元结构的色散特性与折叠线长度 L 的关系
Fig. 3 Dispersion characteristic of unit cell of SSPPs with folded structure varying with length of folded line L

构,其特征阻抗为 50Ω ,线宽与矩形槽 SSPPs 线宽 w_0 一致,缝隙宽度为 $g=6 \mu\text{m}$,长度为 $L_g=64 \mu\text{m}$ 。其中,GCPW 的接地是通过矩形金属化通孔连接顶层金属 metal 3 与底层金属 metal 1 实现的。为高效率地激励起 SSPPs 的工作模式,需对模式转换部分进行精心设计,以实现 GCPW 与 SSPPs TL 之间的阻抗与动量匹配。如图 4 中 Transition 部分所示,本文设计的转换单元采用阶梯渐变的折叠型 SSPPs 单元结构,其周期长度与折叠型 SSPPs TL 的周期长度 p 相同,纵向和横向上的折叠线长度分别逐渐从 0 增加至 L ,步进固定为 $L/2$ 。整个模式转换部分由 10 个阶梯渐变的单元组成,整体长度为 $L_t=640 \mu\text{m}$ 。SSPPs 传输线部分由 9 个阵列分布的如图 2(b) 所示的折叠型 SSPPs 单元结构组成,整体长度为 $L_s=576 \mu\text{m}$ 。

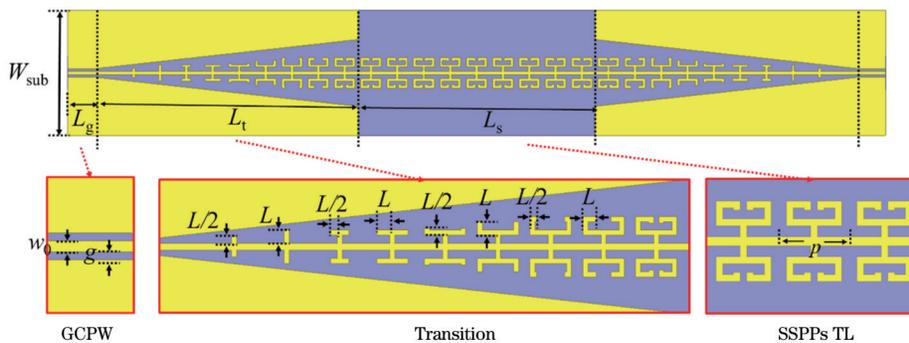


图 4 基于 SSPPs 的太赫兹片上传输线结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of proposed terahertz on-chip transmission line based on SSPPs

在相同的工艺、GCPW 和阶梯渐变模式转换方式的基础上,对传统的矩形槽 SSPPs 传输线进行了设计,如图 5(a) 所示。Transition 部分采用阶梯渐变的矩形槽 SSPPs 单元结构,其周期为 p ,槽深度逐渐从 0 增加至 h ,固定步进为 $h/10$ 。在相同馈电方式的基础上对 SSPPs 主传输线部分进行了比较,如图 5(b) 所示。可以发现:矩形槽 SSPPs 与折叠型 SSPPs 的主传输线均为 9 个阵列分布的周期单元结构,具有相同的长度;

矩形槽 SSPPs 的宽度为 $168 \mu\text{m}$,折叠型 SSPPs 的宽度为 $72 \mu\text{m}$,即折叠型 SSPPs 的总占地面积较矩形槽 SSPPs 缩小了 57.2%。

利用有限积分法仿真软件研究了所提折叠型 SSPPs 传输线的 S 参数,主要包括插入损耗 S_{21} 和回波损耗 S_{11} 。在仿真中,通过指定的激励波导端口将太赫兹信号直接馈入到 GCPW 中,并在除背地面以外的所有方向上应用开放边界来模拟真实测试空间环境。矩

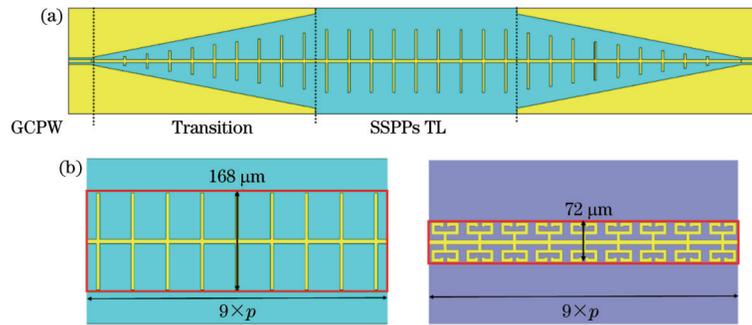


图 5 矩形槽 SSPPs 传输线与折叠型 SSPPs 传输线的结构对比图。(a) 矩形槽 SSPPs 传输线结构示意图；(b) 矩形槽 SSPPs 与折叠型 SSPPs 的结构对比图

Fig. 5 Structural comparison diagram of SSPPs transmission line with groove structure and transmission line with folded SSPPs. (a) Structural diagram of SSPPs transmission line with groove structure; (b) structural comparison between SSPPs with groove structure and SSPPs with folded SSPPs

形槽 SSPPs 传输线与折叠型 SSPPs 传输线的仿真结果如图 6 所示。可以发现：SSPPs 传输线表现出与其色散特性一致的低通滤波特性；矩形槽 SSPPs 传输线与折叠型 SSPPs 传输线具有相同的插入损耗 S_{21} (输出功率) 和相似的回波损耗 S_{11} ，这验证了在相同的传输条件下，折叠型 SSPPs 具有尺寸缩小的特性。

为了进一步分析太赫兹波在 SSPPs 中的传播特性，对通带内 200 GHz 工作频率和阻带内 500 GHz 工作频率时的电场分布情况进行了仿真。从图 7 可以发现：200 GHz 时的电场在整个结构中不会被截止，通过 GCPW 馈电的太赫兹信号经过模式转换部分后，被平滑地过渡至 SSPPs 传输线中，最后经过模式转换部分过渡至 GCPW 中，并输出太赫兹信号；500 GHz 时的电场在整个结构中衰减较大，当传输至 SSPPs 传输线部分时被完全截止。通过对电场分布情况的分析，进

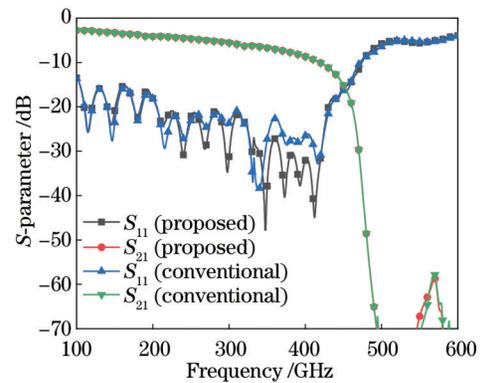


图 6 基于 SSPPs 的亚太赫兹片上传输线的仿真结果
Fig. 6 Simulated results of proposed sub-terahertz on-chip transmission line based on SSPPs

一步验证了 SSPPs 的固有低通截止特性。

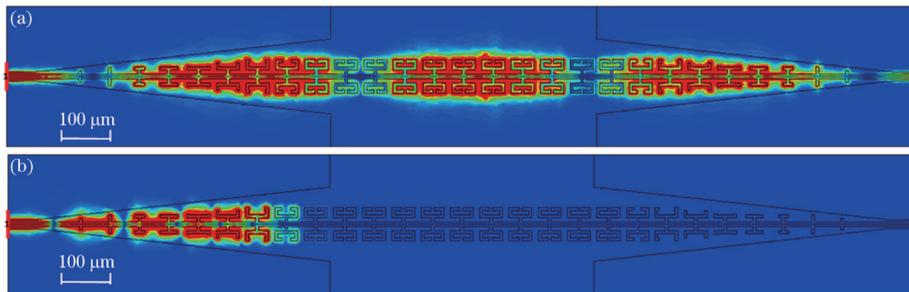


图 7 不同工作频率下基于 SSPPs 的亚太赫兹片上传输线电场分布图。(a) 200 GHz；(b) 500 GHz

Fig. 7 Simulated electric field distribution of proposed sub-terahertz on-chip transmission line based on SSPPs under different operating frequencies. (a) 200 GHz; (b) 500 GHz

3 加工与测试

为验证所提的基于 SSPPs 的亚太赫兹小型化片上传输线的可行性，采用 InP 工艺制备了所提的 SSPPs 传输线，并进行了相应的实验测试。图 8(a)~(c) 分别为 SSPPs 传输线的太赫兹在片测试环境图、在片测试 GSG 探针图 and SSPPs 传输线实物图。主要的测试设备为 Agilent N5247A 矢量网络分析仪，并配

置频率范围为 110~170 GHz 的扩频模块将可测量频率范围提升至亚太赫兹频段，再利用在片测试 GSG 探针连接 SSPPs 传输线的输入与输出端。由于在测试中是直接 GSG 探针扎在 SSPPs 传输线中 GCPW 对应的 GSG Pad 上的，故无需进行去嵌操作。受到实验设备的限制，在实验中仅测试了 110~170 GHz 频段下 SSPPs 器件的传输情况。在测试中，为了消除扩频模块的误差，基于 LRRM (line-reflect-reflect-

match)校准对太赫兹在片测试系统进行了搭建。其中,校准件使用的是 Cascade 公司的陶瓷(氧化铝)基板商用校准片,开路校准件是通过将测试探针抬起而

使之悬空实现的。校准后测得的传输性能即为 GSG 探针两端之间器件的传输性能,但扩频模块的误差不包括在内。

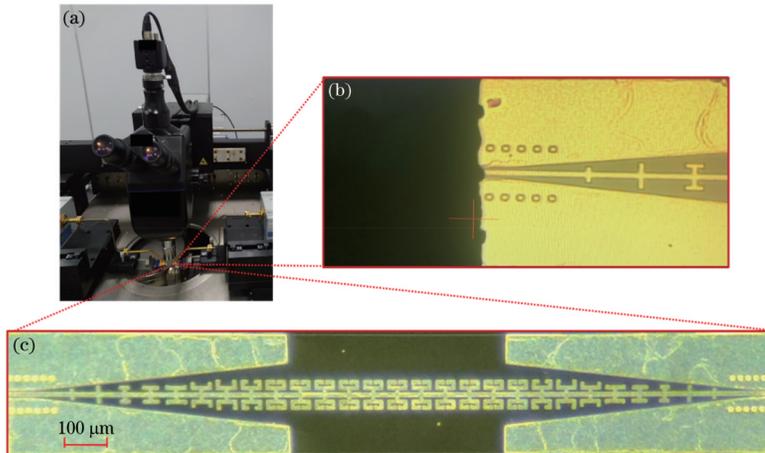


图 8 基于 SSPPs 的亚太赫兹片上传输线测试环境和实物图。(a)在片测试环境;(b)在片测试 GSG 探针;(c)SSPPs 传输线实物图
Fig. 8 Test setup and physical picture of proposed sub-terahertz on-chip transmission line based on SSPPs. (a) On-chip test setup; (b) GSG probe for on-chip test; (c) physical picture of SSPPs transmission line

所提亚太赫兹片上 SSPPs 传输线的测试结果和仿真结果对比图如图 9 所示,其中仿真的 S_{21} 和 S_{11} 由实线表示,实测的 S_{21} 和 S_{11} 由点线表示。明显地, S_{11} 曲线为波浪形, S_{21} 曲线为线形,这是传输线本身的特性引起传输曲线为波浪形造成的。然而,由于绝大部分能量是从输入端口传输至输出端口的, S_{21} 远大于 S_{11} ,通过对二者进行对数处理后, S_{11} 曲线的量值相对于 S_{21} 而言更大,因此波浪形状被相对放大,形成 S_{11} 曲线为波浪形而 S_{21} 曲线为线形的现状。在 110~170 GHz 频率范围内, SSPPs 传输线的实测插入损耗小于 6 dB,即小于 3 dB/mm,回波损耗优于 12.5 dB,而 SSPPs 传输线的仿真插入损耗小于 3.7 dB,即小于 1.85 dB/mm,回波损耗优于 15 dB。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存在一定的性能恶化,这主要是 InP 加工工艺误差、探针台在片测试接触不良等因素造成的。在实验数据中具有较多的振荡,这是矢量网络分析仪自

身信号频率的波动引起的,这种波动主要受仪器内部器件的噪声影响,如信号源的相位噪声等。

4 结 论

基于 InP 半导体工艺设计了一款结构紧凑的小型化亚太赫兹 SSPPs 片上传输线。与传统矩形槽 SSPPs 单元结构相比,所提折叠型 SSPPs 单元结构在保证相近渐近频率的条件下,可将占地面积缩小 57.2%。采用 GCPW 作为 SSPPs 传输线的馈电端口,并利用阶梯渐变过渡结构实现了两者之间的模式转换和阻抗匹配。采用 InP 半导体加工工艺对 SSPPs 传输线进行了加工,并利用探针台、矢量网络分析仪及其扩频模块对 SSPPs 晶元进行了在片测试。实测结果与仿真结果吻合度较高,验证了该设计的可行性。所提亚太赫兹 SSPPs 传输线结构紧凑、设计方便,在亚太赫兹等离子体半导体集成电路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.

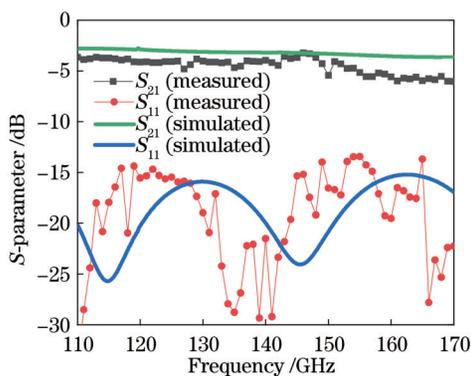


图 9 亚太赫兹片上 SSPPs 传输线测试结果与仿真结果的对比
Fig. 9 Comparison between measured result and simulated result of proposed sub-terahertz on-chip transmission line based on SSPPs

- [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] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Pendry J B, Martín-Moreno L, Garcia-Vidal F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. Science, 2004, 305(5685): 847-848.
- [14] 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.
- [15] Maier S A, Andrews S R, Martín-Moreno L, et al. Terahertz surface plasmon-polariton propagation and focusing on periodically corrugated metal wires[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(17): 176805.
- [16] Martín-Cano D, Nesterov M L, Fernandez-Dominguez A I, et al. Domino plasmons for subwavelength terahertz circuitry[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 754-764.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Aziz A, Fan Y, He P H, 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.
- [25] 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.
- [26] 赵静, 王加贤, 邱伟彬, 等. 基于石墨烯的表面等离子激元带阻滤波器[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.
- [27] Mazdouri B, Honari M M, Mirzavand R. Miniaturized spoof SPPs filter based on multiple resonators or 5G applications[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 22557.
- [28] Le Zhang 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.