

面向空间探测应用的 550 GHz 频段 砷化镓薄膜集成混频器技术*

丁江乔¹ 陈思佳¹ 朱皓天²

1(南京信息工程大学电子与信息工程学院 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044)

2(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

摘要 太赫兹固态肖特基谐波混频技术是空间天文、行星、大气探测的重要手段, 显然研究太赫兹单片集成谐波混频器具有重要意义. 本文克服了传统混合集成方法 (即将分立的肖特基二极管与石英匹配电路胶接而成) 存在的装配难、热效应不平衡、可靠性差等系列问题, 基于全自主国产砷化镓流片工艺线, 完成了 550 GHz 频段单片集成谐波混频器的研制与验证. 二极管设计方面, 建立精确的肖特基变阻管非线性和 3D 模型; 匹配电路方面, 采用典型的减高波导、高低阻抗悬置微带线 (实现 RF 与 LO 信号的隔离)、矩形探针等结构, 结合场路分析方法, 实现最简化匹配电路设计; 整体电路含二极管对集成在 3 μm 厚的 GaAs (Gallium Arsenide) 薄膜上, 并通过两侧的梁氏引线实现与腔体的固定安装. 测试结果表明: 混频器模块在 548~572 GHz 单边带变频损耗优于 13.4 dB, 并基于此结果实现了设计的反馈仿真研究.

关键词 太赫兹, 单片集成, 谐波混频器, 肖特基二极管, 砷化镓 (GaAs) 薄膜

中图分类号 P356

550 GHz Band GaAs Thin-film Integrated Mixer Technology for Space Exploration Applications

DING Jiangqiao¹ CHEN Sijia¹ ZHU Haotian²

1(*Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*)

2(*Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

Abstract The Terahertz (THz) frequency band offers unique application prospects in cutting-edge fields such as space exploration, planetary atmospheres, radio astronomy, and inter-satellite communications. THz solid-state Schottky harmonic mixing technology is a crucial technique that can down-convert THz signals to the microwave band for high-speed signal processing. It is evident that research on

* 民用航天预先研究项目 (D010203) 和国家自然科学基金项目 (12003011, 62171432) 共同资助

2024-11-15 收到原稿, 2025-04-03 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

THz monolithic integrated harmonic mixers holds significant importance, as it effectively overcomes the inherent limitations of conventional hybrid integration approaches (*e.g.*, epoxy-bonded discrete Schottky diodes with quartz matching circuits), including assembly complexity, thermal imbalance effects, and compromised reliability. Alternatively, the 550 GHz spectral band, as a molecular fingerprint region for water, plays an indispensable role in space-based detection applications. In this paper, the development and verification of a 550 GHz-band monolithic integrated harmonic mixer has been successfully completed based on a fully domestic GaAs foundry process line. The main technical contributions include: For diode design, building upon planar Schottky diode architectures developed by Jet Propulsion Laboratory (JPL) and France's LERMA laboratory, the accurate nonlinear and 3D models of Schottky varactor diodes tailored to domestic fabrication processes are established. For matching circuit, it employs a canonical reduced-height waveguide coupled with high-low impedance suspended microstrip lines (for RF-LO isolation) and rectangular probe structures, achieving an optimized matching network through field-circuit co-simulation methodology. For monolithic integration, the complete frequency multiplier circuit, comprising diode pairs, matching networks, and probe structures, is monolithically integrated on a 3- μm -thick GaAs membrane with beam-lead interconnects on both sides, enabling robust cavity mounting. Test results demonstrate that the mixer module achieves a Single-Sideband (SSB) conversion loss of 11.7~13 dB across the 548~572 GHz RF frequency range, with a LO drive power of approximately 5 mW. Based on experimental characterization, this work systematically investigates the influence of series resistance R_s and zero-bias junction capacitance C_{j0} variations on mixer performance, establishing a design feedback loop through correlated simulation-experimental analysis.

Key words Terahertz, Monolithic integrated, Harmonic mixer, Schottky diode, GaAs thin film

0 引言

太赫兹 (THz) 频段一般是指频率为 0.1~10 THz, 并介于毫米波与远红外波段之间的电磁波窗口频段^[1], 具有电子学及光子学交叉领域特点^[2]. 相比远红外波段, 太赫兹波段对于 H_2O , CO , O_2 , O_3 和 H_2O_2 等气体具有更大的灵敏度^[3], 在空间探测、行星大气、射电天文、星间通信等前沿领域具有独特应用前景. 其中太赫兹相干探测, 即外差接收机是重要技术手段, 能够同时探测到信号的幅度和相位; 而外差接收机系统中, 基于砷化镓 (GaAs) 肖特基二极管 (SBD) 的次谐波混频器则是核心, 其性能直接关系到整个探测系统性能的优越性, 甚至系统的可靠性. 空间应用通常需要工作在较高的频率范围, 以实现更高的数据传输速率和更宽的带宽. 因此, 面向空间应用的混频器需要具备优异的高频性能, 且对器件的尺寸、重量和功耗有严格限制, 砷化镓单片集成技术为满足这些需求提供了理想的解决方案. 与传统的硅基器件相比, 砷化镓器件具有更高的电子迁移率、更低的噪声系数和更高的工作频率. 砷化镓单片集成技术能够将混频器的核心电路集成在同一芯片上, 从而显著减小

器件尺寸, 这种高集成度的设计不仅能够满足空间应用对小型化和轻量化的要求, 还能在高频率下保证优异的性能, 为空间遥感探测系统提供高效的解决方案. 因此, 研究重要太赫兹空间应用窗口频段 (550 GHz 频段)、高性能的、常温工作的单片集成肖特基谐波混频器技术, 并自主掌控其流片工艺具有重要意义.

在太赫兹固态肖特基谐波混频器方面, 法国巴黎天文台 LERMA、美国 JPL、英国 RAL 等实验室, 及美国 VDI、德国 ACST、英国 Teratech 等公司处于国际绝对领先地位, 不仅掌握极高频段平面肖特基二极管的前沿设计、核心技术和制备工艺, 而且在高频段、高效率、低噪声等主流发展趋势方面均有报道最新研究成果. 典型的研究成果包括: LERMA 实验室 2016 年报道的 520~620 GHz 混频器^[4], 平均双边带变频损耗 5.7 dB; 2023 年推出的 1200 GHz 混频器^[5], 在 150 K 温度环境下进行测试, 在全频带范围内平均噪声温度为 1950 K, 应用于德国马克斯普朗克太阳系研究所领导的木星及其冰卫星探测计划, 即 JUICE (JUpiter ICy moons Explorer) 研究项目; 2024 年 JPL 推出的 2 THz 混频器^[6], 在室温下, 双边带噪声

温度小于 7000 K.

中国对太赫兹固态肖特基谐波混频器也开展了相关研究,中国工程物理研究院、中国科学院国家空间中心等具有多年肖特基非线性器件的研制经验.谐波混频器领域主要集中在使用商用肖特基二极管与石英匹配电路胶接的混合集成方面.典型的谐波混频器包括:2015 年 Zhao 等^[7]基于分立二极管设计的 450 GHz 次谐波混频器,单边带变频损耗小于 17 dB;2016 年 Jiang 等^[8]设计的 670 GHz 次谐波混频器,在 665~715 GHz 范围内,混频器的双边带变频损耗优于 16 dB.混合集成混频器由于受人工装配的随机误差影响,实测性能并不十分理想.因此随着近年来中国电子科技集团公司第十三研究所、中国电子科技集团公司第五十五研究所等单位在半导体器件工艺领域的进步,中国对太赫兹频段的单片集成混频器开展了研究.文献^[9]基于 25 μm 厚的砷化镓基板研制了一款 220~330 GHz 的太赫兹宽带分谐波混频器,单边带变频损耗在射频范围内优于 12 dB;文献^[10]推出了中心频率在 0.825 THz 的砷化镓单片集成混频器,最佳单边带变频损耗为 28 dB.

本文主要聚焦 550 GHz 频段(空间行星大气成分中关键水分子的 557 GHz 指纹谱)谐波混频技术研究,基于全国产自主砷化镓流片工艺线,完成单片电路薄膜集成设计与实现,极大地提高了空间应用混频器的可靠性.主要包括:结合美国 JPL 和法国 LERMA 实验室砷化镓肖特基二极管设计经验及砷化镓薄膜流片工艺特点,构建高性能肖特基变阻管模型;基于场路分析方法,完成薄膜简化电路优化设计;完成 3 μm 厚砷化镓薄膜电路装配与验证以及实测结果的反馈研究.

1 肖特基二极管设计

应用于太赫兹频率范围的肖特基二极管主要分为两种结构:触须接触式二极管和平面型二极管^[11].尽管触须接触式肖特基二极管具有较小的寄生参量,但其在工艺方面存在难以重复制造的问题;而平面型肖特基二极管具有较好的稳定性,且相对简单的电路结构.近年来随着半导体工艺的发展,催生出单片集成二极管电路技术.这一技术可有效克服导电胶涂敷和管芯定位时引入的人工装配误差,从而提高电路的

可靠性.

目前太赫兹混频器大多采用平面肖特基二极管进行设计.本文参考的美国 JPL 和法国 LERMA 实验室发展平面肖特基二极管结构如图 1 所示.二极管整体结构生长在砷化镓衬底基片上,对整体结构起支撑作用;衬底上为一层较厚的、掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的缓冲层(GaAs N++, mesa 结构),在建模过程中,由于该层掺杂浓度高而呈现高导电性,在模型中将其材料视作理想金属 PEC;缓冲层上是一层较薄的低掺杂的外延层(GaAs N+),掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,在模型中将其材料设置为理想 GaAs;金属阳极与低掺杂的外延层接触,形成肖特基接触;金属阴极通过欧姆层与高掺杂层接触,形成欧姆接触^[12].本文 550 GHz 混频器设计的二极管特性参数列于表 1,其对应阳极直径约为 0.8 μm.

2 二次谐波混频器设计

为进一步降低太赫兹高频段电路中的基底效应,基于全国产自主砷化镓流片工艺线完成 3 μm 厚单片薄膜集成.采用综合设计法,以最基础的传输线单元及波导单元搭建混频器电路,完成电路设计.以下给出了整体电路的设计思路.

与石英基片的介电常数相比,砷化镓基片的介电常数更高,因此相对石英电路来说,单片集成电路能

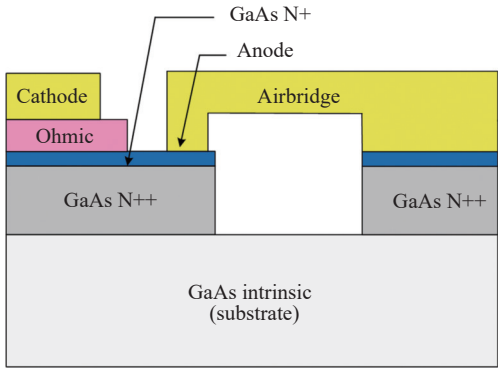


图 1 二极管物理结构

Fig. 1 Physical structure of diode

表 1 550 GHz 频段混频电路肖特基二极管器件参数
Table 1 Parameters of Schottky diode in the 550 GHz mixer

C_{j0}/fF	R_s/Ω	n	I_s/A	V_j/V
1.2	16	1.28	3×10^{-14}	0.85

够实现更小的尺寸^[13]. 砷化镓薄膜集成工艺可以确保加工得到的衬底厚度精度更好, 但砷化镓基片属于软基片, 极易发生卷翘, 这对电路的紧凑性提出了更高的要求. 通常采用分部设计法或者综合设计法来完成混频器电路部分的设计. 分部设计方法着重于先独立设计性能良好的单元电路, 然后再通过匹配网络, 将单元电路合成, 但匹配枝节过多会增加电路尺寸, 匹配枝节过少又难以达到理想结果. 综合以上考虑, 本文采用综合设计法, 以基础的传输线单元及波导单元搭建混频器电路, 实现最简化匹配电路设计, 确保电路结构的紧凑性. 具体分解如图 2 所示.

整体电路含反并二极管对集成在 $3\ \mu\text{m}$ 厚的砷化镓薄膜上, 表面金属微带线的厚度为 $1\ \mu\text{m}$, 两侧

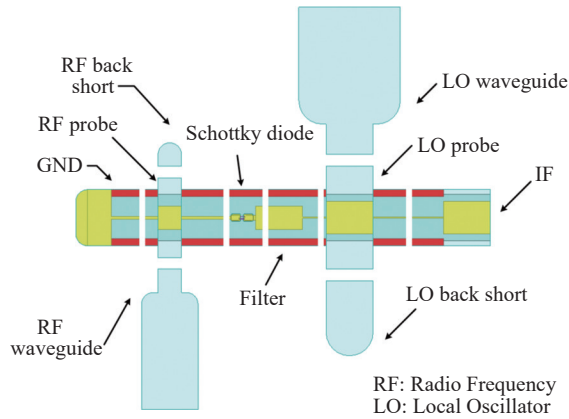


图 2 混频器电路分解

Fig. 2 Mixer circuit decomposition

的梁氏引线起支撑作用. 由于肖特基结并非完全对称, 在高频条件下会产生直流分量, 因此在电路的一端设置了直流地. 射频信号经过 WR1.9 波导 ($0.483\ \text{mm} \times 0.241\ \text{mm}$) 输入, 本振信号通过 WR3.4 波导 ($0.864\ \text{mm} \times 0.432\ \text{mm}$) 输入, 通过矩形探针结构将输入波导中的电场能量耦合到金属微带线上, 使电场模式从波导的 TE_{10} 模向准 TEM 模进行转变. 反向并联二极管对直接生长在砷化镓薄膜单片上, 避免了管芯定位及导电胶涂敷带来的随机装配误差.

就本文所设计的混频器工作频率而言, 基波和二次谐波之间的频率间隔较宽. 因此对本振滤波器的要求不高, 不需要非常陡峭的滤波特性. 采用传统的高低阻抗线形式完成本振滤波单元的设计, 并在 ADS 中进行电路的搭建, 使该模型在整体电路中作为滤波结构的同时, 也起到匹配作用, 不再额外设计匹配电路, 节约了设计时间. 本振滤波 (LO) 单元设计电路如图 3 所示.

采取场路结合的分析方法, 将混频器整体电路拆分成基础的传输线单元及波导单元. 基于三维电磁仿真软件 (HFSS), 对建立完成的传输线模型进行仿真, 提取其特性参数, 并将其代入 ADS 中的理想传输线模型, 以表征悬置微带线的实际传输性能. 对阻抗阶跃变换产生的不连续性, 在 HFSS 中对相应的端口做去嵌设置, 提取其电磁特性, 以 SNP 文件形式代入 ADS 中, 对不连续面进行表征. 通过 ADS 软件, 完成砷化镓薄膜集成次谐波混频器的整体电路搭建, 使用

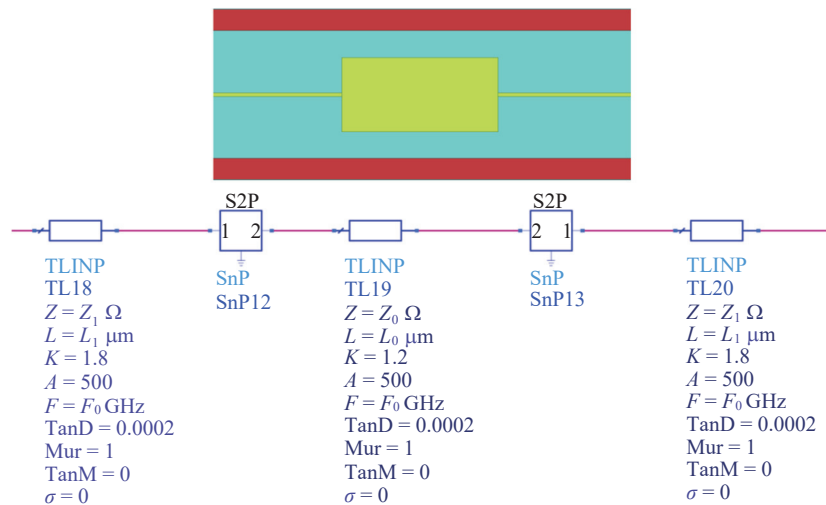


图 3 本振滤波单元

Fig. 3 Local Oscillator (LO) filter unit

谐波平衡法 (HB) 对混频器进行全局性优化, 以减小设计优化周期. 在混频器的设计过程中, 既要关注阻抗匹配网络的优化, 又要兼顾目前国内工艺能够达到的加工精度. 完成设计后, 由仿真结果得到的砷化镓薄膜集成次谐波混频器单边带变频损耗如图 4 所示, 在本振功率 4 mW 条件下, 设计的 550 GHz 次谐波混频器的变频损耗为 8.7~10.1 dB.

3 加工与测试

混频器的整体电路含二极管对集成在 3 μm 厚的砷化镓薄膜单片上, 电路结构简单, 易于加工. 砷化镓薄膜集成电路的工艺流程主要步骤如下.

步骤 1 经过沉积、光刻、湿法腐蚀等方法完成二极管元件及集成电路的表面加工.

步骤 2 对其进行封蜡处理, 将蓝宝石作为临时载片进行键合.

步骤 3 采用干湿结合刻蚀的方法移除砷化镓衬底.

步骤 4 完成电路背面异形基板的刻蚀, 实现金属悬空.

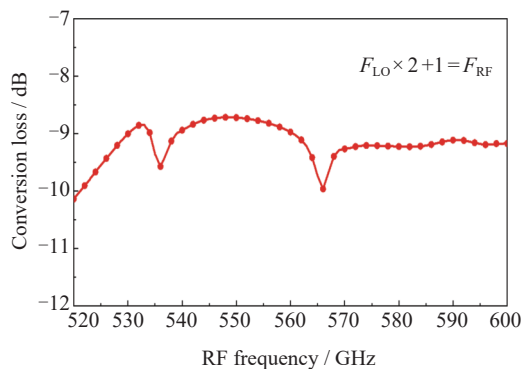


图 4 550 GHz 次谐波混频器仿真结果

Fig. 4 Simulated results of the 550 GHz sub-harmonic mixer

步骤 5 去除蜡及临时载片, 完成砷化镓薄膜芯片制备^[14].

采用 CNC 数控技术对混频器腔体进行铣削加工, 通过 E 面剖分的方法, 将电路腔体分为上下两部分. 加工过程中使用的最小钻头半径为 0.05 mm, 上下腔体之间通过两颗销钉实现定位, 通过周围六颗螺钉固定. 腔体材料为黄铜, 表面镀金处理. 射频以及本振波导的法兰尺寸均采用标准 UG387 规格. 腔体大小为 24 mm×10 mm×19.1 mm. 完成腔体和砷化镓薄膜单片的加工之后, 对混频器的电路进行装配. 与传统的胶黏方式不同, 二极管直接生长在电路基板上. 装配前对单片集成混频器芯片进行等离子清洗, 去除表面氧化物和污染物, 确保贴装和键合可靠性. 基片两侧的梁氏引线起到支撑作用, 延长的梁氏引线采用金金热压键合的方式固定在下腔体上, 实现电路的无银胶封装, 降低了装配难度, 也减小了在装配过程中涂抹导电胶引入的不确定因素. 中频输出至同轴端口的过渡部分采用 50 μm 厚度的石英基板. 采用纳米银烧结工艺将过渡基板贴装至下腔体, 通过金带实现与混频电路的相连. 图 5 为混频器芯片装配情况.

搭建的测试平台如图 6 所示, 提供射频信号和本振信号对混频器单边带变频损耗进行测试. 搭建的实

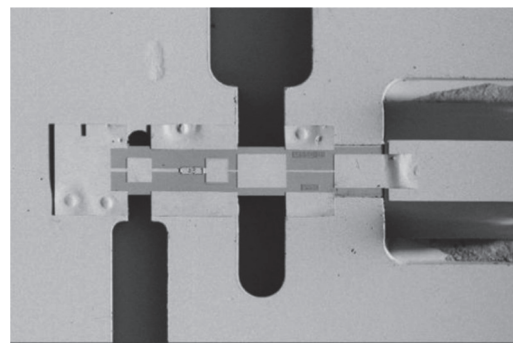


图 5 混频器芯片装配情况

Fig. 5 Assembly diagram of frequency mixing chip

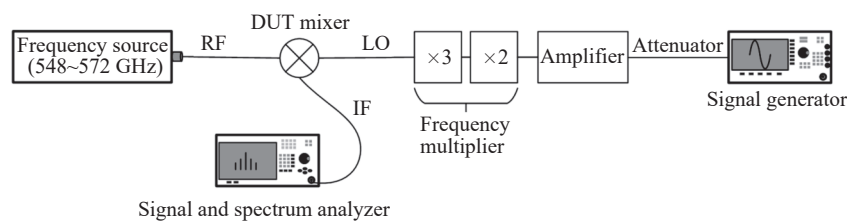


图 6 混频器测试平台

Fig. 6 Mixer test platform

验平台主要可以分为射频信号源、本振信号源及中频接收三大部分。首先,将射频信号源连接到待测混频器的射频端口,将倍频后得到的本振信号连接到混频器的本振端口,实现信号的输入,然后使用频谱仪对下变频得到的中频信号进行记录。固定中频频率为1 GHz时,通过频谱仪监测并记录该550 GHz次谐波混频器的中频输出功率,经由数据处理后得到待测混频器的单边带变频损耗。在本振功率约为5 mW的条件下,在548~572 GHz射频范围内,混频器模块的单边带变频损耗为11.7~13 dB。测试结果如图7(c)所示。

与仿真结果相比,混频器模块实测得到的变频损耗出现了一定程度的恶化,其原因分析如下。第一,腔体的加工误差以及薄膜单片装配时的人工误差会影响混频器的性能,例如电路基片装配的偏移会导致混频器的损耗增大或者频偏等问题。第二,集成二极管的制作工艺也会对混频器的性能产生影响,包括二极管的表面粗糙度、结电容、级联电阻等。图7(a)(b)给出了次谐波混频器在不同级联电阻及零偏结电容下的单边带变频损耗。与预测一致,级联电阻 R_s 及零偏结电容 C_{j0} 的增大会加剧混频器变频损耗的恶化。考虑到腔体的加工误差,对实际加工后的混频器腔体尺寸进行了精确测量,同时根据团队之前的流片工作经验^[15],对肖特基二极管在ADS中的SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)模型进行了改进,图7(c)为进一步考虑了实际情况后反演出的模型的仿真结果,与实测一致性良好。

表2给出了近年来国内外设计的相近频段的次谐波混频器性能及其设计方法。文献[7]、文献[8]均基于分立二极管完成了混频器的设计,但装配过程中涂抹导电胶引入的不确定因素,导致实测性能与仿真相均有较大幅度的恶化。文献[16]采用了30 μm 厚的石英基板,结合波导滤波器完成了混合集成混频器的设计。尽管性能优越,但石英基底难以实现小型化设计,并不适合应用于空间遥感探测系统。本文设计的砷化镓单片集成混频器克服了导电胶引入的随机误差,使用综合设计方法,以基础的传输线单元及波导单元搭建混频器电路,实现最简化匹配电路。与文献[17]中使用的半整体方法相比,在不考虑保留单元电路可移植性的条件下,增强了匹配变量的优化能力,实现了电路的最简化设计。本文设计的混频器在

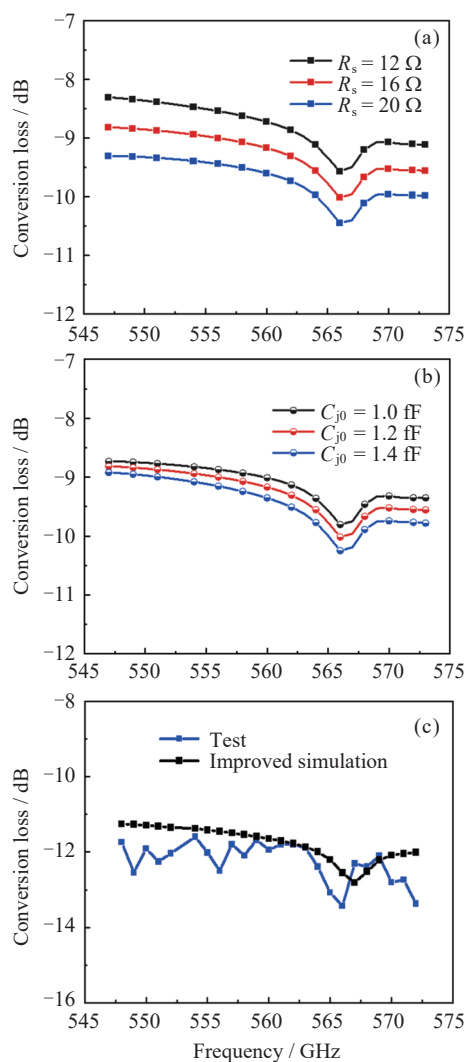


图7 混频器测试结果及分析

Fig. 7 Test results and analysis of mixer

实际性能测试下,仿真与实测一致性较好,性能优越,不亚于国内同类型的砷化镓单片集成混频器^[18]。对比国外设计的混频器^[4,19],同样采用单片集成设计方法,在室温下测得的变频损耗相当。本文设计的550 GHz次谐波混频器结构简单,带宽和变频损耗性能优越,同时又因为单片集成而具有极强的可靠性,是550 GHz频段谐波混频器同级别中的佼佼者,达到了国际先进水平,且在国内处于领先地位。

4 结论

提出了一种面向空间探测应用的550 GHz频段砷化镓薄膜集成混频器,基于全自主国产砷化镓流片工艺线完成设计和制备。实测结果表明,在548~

表 2 太赫兹混频器性能对比
Table 2 Performance comparison of Terahertz mixers

Ref.	Frequency/GHz	CL/dB	Technology
[4]	557	5.3~6.7 (DSB)	Monolithic integrated
[7]	433~451	14~17 (SSB)	Hybrid integrated
[8]	665~715	<16 (DSB)	Hybrid integrated
[16]	480~520	10.1~11.5 (DSB)	Hybrid integrated
[17]	540~580	7.5~9.5 (DSB)	Hybrid integrated
[18]	654~675	9~11 (DSB)	Monolithic integrated
[19]	520~590	8~9.5 (DSB)	Monolithic integrated
This work	548~572	11.7~13.4 (SSB)	Monolithic integrated

注 SSB (Single Sideband)为单边带变频损耗, DSB (Double Sideband)为双边带变频损耗.

572 GHz 频段内, 单边带变频损耗优于 13.4 dB, 达到相关研究的最好水平. 通过反馈模型仿真, 与实测结果一致性较好, 显示了混频器设计过程中, 二极管模型的准确性以及砷化镓薄膜电路优化设计方法的正确性. 此外, 该混频芯片设计结构简单, 易于设计及流片, 能够进一步拓展至更高频. 实验结果表明, 该混频器在测试环境下的性能表现优异, 能够满足空间探测系统对混频器高频率、低噪声、高可靠等性能要求, 且结构紧凑. 该工作不仅加快了我国高频段单片集成混频芯片的自主化, 还为太赫兹空间探测应用提供了关键技术基础.

致谢 砷化镓工艺线由南京电子器件研究所提供.

参考文献

[1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3): 910-928

[2] RECK T, JUNG-KUBIAK C, SILES J V, *et al.* A silicon micromachined eight-pixel transceiver array for submillimeter-wave radar[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, **5**(2): 197-206

[3] WANG Zhenzhan, WANG Wenyu, DONG Xiaolong, *et al.* Martian atmosphere study using THz limb sounder[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(5): 778-786 (王振占, 王文煜, 董晓龙, 等. 太赫兹火星大气临边探测仿真研究 [J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(5): 778-786)

[4] TREUTTEL J, GATILOVA L, MAESTRINI A, *et al.* A 520-620-GHz Schottky receiver front-end for planetary science and remote sensing with 1070 K-1500 K DSB noise temperature at room temperature[J]. *IEEE Transactions*

on Terahertz Science and Technology, 2016, **6**(1): 148-155

[5] TREUTTEL J, GATILOVA L, CAROOPEN S, *et al.* 1200 GHz high spectral resolution receiver front-end of submillimeter wave instrument for JUPITER ICy moon explorer: part I-RF performance optimization for cryogenic operation[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2023, **13**(4): 324-336

[6] SILES J V, MAESTRINI A E, LEE C, *et al.* First demonstration of an all-solid-state room temperature 2-THz front end viable for space applications[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2024, **14**(5): 607-612

[7] ZHAO Xin, JIANG Changhong, ZHANG Dehai, *et al.* Design of the 450 GHz sub-harmonic mixer based on Schottky diode[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, **34**(3): 301-306 (赵鑫, 蒋长宏, 张德海, 等. 基于肖特基二极管的 450 GHz 二次谐波混频器 [J]. *红外与毫米波学报*, 2015, **34**(3): 301-306)

[8] JIANG Jun, HE Yue, WANG Cheng, *et al.* 0.67 THz sub-harmonic mixer based on Schottky diode and hammer-head filter[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, **35**(4): 418-424 (蒋均, 何月, 王成, 等. 基于 Schottky 二极管和 Hammer-Head 滤波器 0.67 THz 二次谐波混频器 [J]. *红外与毫米波学报*, 2016, **35**(4): 418-424)

[9] JI Dongfeng, DAI Kunpeng, WANG Weibo, *et al.* A 220 GHz~330 GHz sub-harmonic mixer based on planar Schottky diode[J]. *Space Electronic Technology*, 2024, **21**(4): 71-76 (纪东峰, 代鲲鹏, 王维波, 等. 基于平面肖特基二极管的 220 GHz~330 GHz 分谐波混频器 [J]. *空间电子技术*, 2024, **21**(4): 71-76)

[10] LIU Siyu, ZHANG Dehai, MENG Jin, *et al.* 0.825 THz GaAs monolithic integrated sub-harmonic mixer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, **40**(6): 749-753 (刘锬钰, 张德海, 孟进, 等. 0.825 THz 砷化镓单片集成二次谐波混频器 (英文)[J]. *红外与毫米波学报*, 2021, **40**(6): 749-753)

- [11] MAESTRINI A, THOMAS B, WANG H, *et al.* Schottky diode-based terahertz frequency multipliers and mixers[J]. *Comptes rendus - Physique* 2010, **11**(7-8): 480-495
- [12] LIU Yi, ZHANG Bo, ZHANG Lisen, *et al.* 330 GHz GaAs monolithic integrated sub-harmonic mixer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, **36**(2): 252-256 (刘戈, 张波, 张立森, 等. 330 GHz 砷化镓单片集成分谐波混频器 [J]. 红外与毫米波学报, 2017, **36**(2): 252-256)
- [13] YANG Dabao, ZHAO Xiangyang, LIU Bo, *et al.* 220 GHz GaAs monolithic integrated sub-harmonic mixer[J]. *Semiconductor Technology*, 2022, **47**(11): 886-890 (杨大宝, 赵向阳, 刘波, 等. 220 GHz GaAs 单片集成分谐波混频器 [J]. 半导体技术, 2022, **47**(11): 886-890)
- [14] MENG Jin, ZHANG Dehai, NIU Bin, *et al.* Design of a 1030 GHz mixer and a 750-1100 GHz tripler based on thin-film technology[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, **41**(5): 871-878 (孟进, 张德海, 牛斌, 等. 基于薄膜工艺的 1030 GHz 混频器和 750~1100 GHz 倍频器研制 [J]. 红外与毫米波学报, 2022, **41**(5): 871-878)
- [15] DING J Q, MAESTRINI A, GATILOVA L, *et al.* High efficiency and wideband 300 GHz frequency doubler based on six Schottky diodes[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2017, **38**(11): 1331-1341
- [16] CUI J H, ZHANG Y, LI Y, *et al.* 500-GHz sub-harmonic mixer with integrated waveguide filters[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, **124**: 104215
- [17] ZHANG B, ZHANG Y, PAN L C, *et al.* A 560 GHz sub-harmonic mixer using half-global design method[J]. *Electronics*, 2021, **10**(3): 234
- [18] NIU Bin, QIAN Jun, FAN Daoyu, *et al.* 664 GHz sub harmonic mixer based on “T” anode GaAs SBD membrane circuit[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, **40**(5): 634-637 (牛斌, 钱骏, 范道雨, 等. 基于 T 形阳极 GaAs 肖特基二极管薄膜集成电路工艺的 664 GHz 次谐波混频器 [J]. 红外与毫米波学报, 2021, **40**(5): 634-637)
- [19] SCHLECHT E T, GILL J J, LIN R H, *et al.* A 520-590 GHz crossbar balanced fundamental Schottky mixer[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2010, **20**(7): 387-389

作者简介



丁江乔 男, 1987 年出生于江苏省泰兴市, 现为南京信息工程大学电子与信息工程学院副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为亚毫米波/太赫兹器件与技术, 固态有源收发电路, 空间探测技术等。

E-mail: jqding@nuist.edu.cn



陈思佳 女, 1998 年出生于江苏省苏州市, 现为南京信息工程大学电子与信息工程学院硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹器件、固态电路。

E-mail: xiliu2333@163.com



朱皓天 (通信作者) 男, 1989 年 10 月出生于江苏省南京市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹科学与技术, 从事太赫兹星载辐射计系统及其关键技术研究。

E-mail: zhuhaotian@nssc.ac.cn