2025年6月

Vol.23, No.6 Jun., 2025

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2025)06-0577-06

400~600 GHz 四次谐波混频器设计

张超群¹,陈润之^{1,2},贾定宏¹,邓建钦¹,李 钊¹,邹旭东¹,王 沫¹,王 琦¹,石先宝¹ (1.中电科思仪科技股份有限公司,山东 青岛 266555; 2.中国海洋大学,山东 青岛 266100)

摘 要:介绍了一款基于反向并联肖特基二极管对的太赫兹四次谐波混频器,其射频工作频率范围为400~600 GHz。该混频器在射频(RF)端采用多点接地设计,相比于传统的单点接地方式有效降低了射频端口的回波损耗;提出射频端一体化的设计方法,相比于传统设计方法,减少了设计过程中30%的匹配枝节数量,提高了设计效率。实测结果表明,本地振荡器(LO)功率在7~13 dBm 范围内时,混频器在整个工作频带内变频损耗的典型值为20 dB,最优值为14 dB。

关键词:四次谐波混频;宽带匹配;直流接地;太赫兹

中图分类号: TN733 文献标志码: A DOI: 10.11805/TKYDA2024370

Design of 400~600 GHz fourth harmonic mixer

ZHANG Chaoqun¹, CHEN Runzhi^{1,2}, JIA Dinghong¹, DENG Jianqin¹, LI Zhao¹, ZOU Xudong¹, WANG Mo¹, WANG Qi¹, SHI Xianbao¹

(1.Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao Shandong 266555, China; 2.Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100, China)

Abstract: A terahertz fourth harmonic mixer based on anti-parallel Schottky diode pair is introduced, and its Radio Frequency(RF) operating range covers 400 GHz to 600 GHz. The mixer use a multi-point ground structure at the RF ends, which effectively reduces the return loss of RF port compared to the traditional single point ground structure. By adopting an integrated RF-end design method, the number of matching branches is reduced by 30% during the design process compared to traditional methods, thereby enhancing design efficiency. The measured results show that the typical value of conversion loss is 20 dB and the optimal value is 14 dB in the whole working band when the Local Oscillator(LO) power is in the range of 7~13 dBm.

Keywords: fourth harmonic mixer; wideband matching; Direct Current(DC) grounding; terahertz

400~600 GHz 是太赫兹波谱中一段重要的交叉频段,包含丰富的发射和吸收谱线,对行星大气探测具有重要 意义^[1-2]。目前,针对该频率范围已提出多项行星勘测任务。例如,欧洲与美国联合提出的(Europa Jupiter System Mission, EJSM)项目计划通过太赫兹光谱仪探测 SO₂、SO、NaCl 等物质在此频段内产生的特定谱线,以观测天 体的物质组成^[3]。此外,欧洲提出的金星 Vesper 任务旨在通过观测行星的辐射特性深入了解大气环境,其计划使 用 440~590 GHz 频段的外差接收器^[4]。

针对上述频段在空间探测和气象遥感等方面的广泛测试需求,基于肖特基二极管的超外差接收机能够在无冷却的条件下实现所需灵敏度^[5]。此外,由于缺乏300 GHz以上的低噪声放大器,外差式太赫兹接收机通常采用谐波 混频方法,即利用太赫兹谐波混频器作为接收机的第一级进行信号频率变换。因此,太赫兹混频器的性能和可靠 性对整个系统的性能至关重要^[6-9]。目前,针对400~600 GHz宽带的太赫兹器件设计研究较少,传统的设计方法存 在设计效率低、射频端回波损耗待提升等问题,实现宽带、低变频损耗的混频器设计仍然具有挑战性。基于此,本文采用肖特基反并联二极管对(Anti-Parallel Diode Pair, APDP)设计并制造了一款400~600 GHz的谐波混频器。

收稿日期: 2024-08-01; 修回日期: 2024-10-17

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFF0715002)

引用格式:张超群,陈润之,贾定宏,等. 400~600 GHz四次谐波混频器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(6):577-582. DOI:10.11805/ TKYDA2024370.

Citation format: ZHANG Chaoqun, CHEN Runzhi, JIA Dinghong, et al. Design of 400~600 GHz fourth harmonic mixer[J]. Journal of . Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(6):577–582. DOI:10.11805/TKYDA2024370.

为实现全频段较低变频损耗,在射频(RF)端设计了两个直流接地点,以引入等效匹配电容和电感。通过仿真比较 多点接地与单点接地方式的射频端回波损耗,验证了该设计的有效性。同时,为实现宽频段内的阻抗匹配并提高 设计效率,提出射频端一体化的设计方法,直接在高频结构仿真器(High Frequency Structure Simulator, HFSS)中将 射频探针与二极管进行阻抗匹配,保证了射频端到二极管之间较低的传输损耗。

1 四次谐波混频器整体电路结构

根据文献理论^[10]研究,基于反并联二极管对(APDP)的混频相比于单管混频器,其输出信号中偶次混频分量 增加了1倍,谐波杂散分量被抑制了50%。因此,采用APDP结构的谐波混频具有较低的变频损耗和更高的混频 效率,适用于本文设计的400~600 GHz超宽射频工作范围。由于目前国内外220 GHz以上的倍频源模块输出功率 较小,在该频段下的基波或次谐波混频无法克服二极管势垒,因此难以实现良好的变频效果。然而,110~170 GHz频段已有成熟的产品可提供20 dBm的输出功率。基于此,本文选择四次谐波混频方案进行研制,将所需的 本振信号频率降低为射频信号频率的四分之一(即100~150 GHz),从而降低对本地振荡器(LO)源的需求。

图1展示了本文提出的混频器电路拓扑结构,主要包括以下五部分:波导到微带的过渡探针、二极管对、本振低通滤波器(Local Oscillator Low Pass Filter, LOLPF)、双工器、中频低通滤波器(Intermediate Frequency Low Pass Filter, IFLPF)、射频接地和若干匹配结构。其中,过渡探针与双工器将矩形波导中TE₁₀模式转换为微带电路准TEM模式。对射频端波导进行减高处理可优化宽带匹配性能。中频与本振低通滤波器均采用紧凑谐振单元结构设计,与高低阻抗形式的滤波器相比,在保持滤波性能的前提下显著减小了整体尺寸。射频端采用多点接地结构与一体化的设计方法,具体结构设计将在后面介绍。



图1 四次谐波混频器电路结构

2 混频器分部设计与优化

2.1 反并联二极管对模型的建立

混频二极管是谐波混频器的核心器件,其性能直接决定混频器的变频损耗、带宽等关键性能。本设计采用 的肖特基混频二极管结电容为1.4 fF,串联电阻为12~14 Ω,截止频率约为13 THz,完全满足本文的设计需求。

在太赫兹频段,由于二极管尺寸与太赫兹波长相近,其封装会产生显著的寄生效应,传统的二极管 SPICE参数模型在太赫兹频段仿真中存在缺陷。为此,需要建立更精确的三维电磁仿真模型。首先分析二极管的整体结构与各层材料,精确测量二极管对的阳极结、阴极及各介质层的形状尺寸。介质层主要包括砷化镓衬底、n+GaAs缓冲层、n-GaAs外延层、SiO₂钝化层及欧姆接触层。其次,在电磁仿真软件HFSS中按实际结构与测量尺寸建立 3D 仿真模型,并添加对应的波导端口。最后,对 3D 模型进行仿真得到 S 参数文件,再结合二极管具体参数在高级设计系统(Advanced Design System, ADS)中建立 SPICE 模型。通过联合仿真方法,可构建适用于太赫兹频段的肖特基二极管完整模型,图 2 为本设计采用的二极管对模型。







(b) stereo view of 3D model of Schottky diode pairs

(c) planar view of 3D model of Schottky diode pairs

(a) reverse parallel diode pairs

Fig.2 Model of diode pairs 图 2 二极管对模型

2.2 射频端一体化结构设计

射频端一体化结构具体包括射频探针、二极管对模型与射频接地设计,如图3所示。首先,射频探针需要将200 GHz的宽带输入信号从波导馈入悬置微带传输线,并保证较小的插入损耗。考虑到实际的加工条件,采用 *E*面探针结构,其介质面平行于波导传输方向,便于加工。所设计的探针仿真结果如图3所示,在400~600 GHz频率范围内,回波损耗小于-10 dB,插入损耗优于0.3 dB。将设计好的射频探针与此前建立的二极管对模型级联,并进行优化设计。由图4所示,射频端一体化结构在400~600 GHz频段内的回波损耗小于-10 dB,射频信号致二极管两管芯的传输损耗小于14 dB,且全频段无谐振点(其中*S*₃₁、*S*₄₁分别表示射频输入波导端口到二极管两管芯的传输参数)。



Fig.5 Double shorted grounds structure and S parameters 图5 双端接地结构与对比仿真结果

在射频端采用了两个直流接地结构,分别位于二极管及射频过渡处。通过多点接地结构引入等效匹配电容 和电感,实现从波导到悬置微带线、再到肖特基二极管结区的阻抗匹配,既能有效为混频产生的直流分量提供 接地途径,又能改善射频端口的回波损耗。参数优化的细节如图 5(b)所示,对比结果表明,采用多点接地结构后,回波损耗较单独使用A或B任一单个接地结构提升了 2~10 dB,从而提高了射频功率的利用率,并有利于实现更低的变频损耗。

传统的混频器设计方法在进行谐波平衡仿真时,通常在各端口之间加入多个匹配枝节以实现阻抗匹配。然 而,本设计中由于带宽高达200 GHz,且本振、射频、中频3个端口的阻抗在高频下存在相互影响的设计难点, 若采用传统方法需加入大量枝节,并反复在ADS与HFSS之间调用匹配数据,不仅匹配难度大,迭代复杂,还会 显著降低设计效率。为此,本设计采用射频端一体化设计方法,将设计好的射频探针与肖特基二极管对在HFSS 中直接进行阻抗匹配,以射频端口驻波比及插入损耗为优化目标调整匹配枝节参数。如图6所示,该方法使混频 器整体阻抗匹配所需的枝节数量减少了30%。





2.3 本振和中频滤波器设计

从图1的电路结构可看出,为了防止射频信号泄漏到本振端,需在双工器与二极管对之间添加本振低通滤波器,以确保射频信号充分馈入肖特基二极管对中。应用在太赫兹频段的微带低通滤波器,多为高低阻抗或紧 凑谐振单元(Compact Microstrip Resonant Cell, CMRC)结构。其中,高低阻抗滤波器结构简单,通过提高阶数可获得较好的矩形系数与带内平坦度,但其尺寸较大且传输损耗较高。相比之下,CMRC滤波器在相同带外抑制 要求下,整体长度显著小于高低阻抗滤波器。因此本文基于CMRC结构改进,实现了更为紧凑的滤波器设计。此外,由于本设计为四次谐波混频器(而非次谐波混频器),其本振低通滤波器既要防止射频信号的泄露,还要

抑制本振二次谐波,为此,设计了四单元的"工"字形 CMRC 滤波器,通过引入高等效电感与电容值拓展阻带 带宽。仿真结果如图 7 所示,该滤波器在射频频带 400~600 GHz 及本振二次谐波 200~300 GHz 范围内,抑制能力 大于 20 dB,表明其可有效阻断射频信号及大部分本振二次谐波。为避免本振信号泄露至中频端,设计了中频 低通滤波器以提高本振信号利用率,从而降低变频损耗。为控制混频器整体尺寸,中频滤波器同样采用 CMRC 结构设计,如图 8 所示,其在 100~150 GHz 频率范围内的本振信号抑制能力超过 25 dB,且在中频通带内插入损 耗小于 0.4 dB。



Fig.7 LO low-pass-filter structure and S parameters 图 7 本振低通滤波器结构与仿真结果



Fig.9 Picture of proposed mixer 图 9 混频器内部实拍图

3 整体仿真与测试结果

得到以上各部分无源结构仿真结果后,将各部分模型的 S参数导出为N端口散射参数文件(S-parameters for N Ports, SNP),在ADS中建立混频器整体电路模型,在射频端与本振 滤波器、本振滤波器与双工器、双工器与中频滤波器之间分 别加入匹配枝节,以混频器的带宽与变频损耗为目标,利用 ADS的谐波平衡仿真算法与HFSS进行联合优化设计,最终 得到混频器整体电路结构。仿真结果表明,在400~600 GHz 频率范围内,混频器变频损耗小于20 dB,带内平坦度小于 ±2 dB,最优处达到14 dB。

混频器由中电科思仪科技股份有限公司完成加工制造, 其实物如图9所示。测试系统由中电科思仪的两台信号发生 器、一台频谱分析仪、本振源模块和射频源模块组成测量的 装置,图10为构建的混频器测试系统,所有测试在室温下进行。



Fig.8 IF low-pass-filter structure and S parameters 图 8 中频低通滤波器结构与仿真结果



Fig.10 Test system of proposed mixer 图 10 混频器测试系统



Fig.11 Comparison between test and simulation results of conversion loss of proposed mixer 图 11 混频器变频损耗测试结果与仿真结果对比

图 11 为所设计混频器的测试与仿真结果对比数据,400~600 GHz 四次谐波混频器的变频损耗典型值为 20 dB,最大值为 24 dB。仿真与测试结果在频率低端吻合度较高,在高端的测试结果最大值大于 20 dB,与仿真 结果变化趋势一致,但比仿真结果恶化了较多。经分析主要因为仿真本振驱动功率为 10 dBm,实际测试使用的 本振源在高端功率(7~8 dBm)不足导致。

4 结论

本文提出了一种新颖的宽带低变频损耗四次谐波混频器设计。通过采用多端接地,改善了射频端口回波损耗,利于实现较低的变频损耗。创新性地提出射频端一体化设计,有效降低了宽带阻抗匹配的难度,实现了混频器超宽的射频工作范围。基于所提出的设计方法和电路结构制作了一款400~600 GHz四次谐波工作模式的混频器,搭建了混频器变频损耗的测试系统对其进行测量,实验结果表明所制作的混频器在400~600 GHz频率范围内变频损耗14~24 dB,达到了预期效果。

参考文献:

- GUO Kaizhe, CHAN Chihou. A 0.68-THz receiver with third-order subharmonic mixing in 65-nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2024,59(8):2469-2480. DOI:10.1109/JSSC.2024.3371162.
- [2] THOMAS B,SILES J,GILL J,et al. 560 GHz,664 GHz and 1.2 THz Schottky based MMIC sub-harmonic mixers for planetary atmospheric remote sensing and FMCW radar[C]// Twenty-second international symposium on space terahertz technology. Tucson:Nrao, 2011:2-5.
- [3] 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. DOI:10.1109/TTHZ.2024. 3430013.
- [4] HUI K,HESLER J L,CROWE T W. Broadband Schottky receivers for atmospheric studies[C]// 20th International Symposium on Space Terahertz Technology. Charlottesville:Virginia Diodes, Inc, 2009:139.
- [5] JI Guangyu, ZHANG Dehai, MENG Jin, et al. A novel 183 GHz solid-state sub-harmonic mixer[J]. Electronics, 2020,9(1):186. DOI:10.3390/electronics9010186.
- [6] ZHANG Chaoqun, DENG Jianqin, ZHANG Shengzhou, et al. A low conversion loss design method of F-band fundamental mixer[C]// 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT). Shanghai, China:IEEE, 2020: 1-3. DOI:10.1109/ICMMT49418.2020.9386644.
- [7] LI Yukun, ZHANG Yong, WU Chengkai, et al. A 16-QAM 45-Gbps 7-m wireless link using InP HEMT LNA and GaAs SBD mixers at 220-GHz-band[J]. China Communications, 2021,18(5):255-262. DOI:10.23919/JCC.2021.05.016.
- [8] 翁祎,刘晓宇,周静涛. 基于肖特基二极管的单片集成 560 GHz 混频器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(2):189-192.
 (WENG Yi, LIU Xiaoyu, ZHOU Jingtao. Design of 560 GHz monolithic integrated subharmonic mixer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(2):189-192.) DOI:10.11805/TKYDA2020153.
- [9] 蒋均,陆彬,何月,等. 140 GHz基于 CPWG 单平衡基波混频 GaAs 集成电路[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(3):369– 373. (JIANG Jun,LU Bin,HE Yue,et al. 140 GHz single-balance fundamental mixer design based on CPWG GaAs IC[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(3):369–373.) DOI:10.11805/TKYDA201803.0369.
- [10] COHN M, DEGENFORD J E, NEWMAN B A. Harmonic mixing with an anti-parallel diode pair[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1975,23(8):667-673. DOI:10.1109/TMTT.1975.1128646.

作者简介:

张超群(1990-),男,硕士,工程师,主要研究方向为太赫兹矢网扩频模块及核心部件的研发.email: zcqedu@163.com.

陈润之(2000-),男,在读硕士研究生,主要研究 方向为太赫兹核心部件的开发.

贾定宏(1990-),男,博士,高级工程师,主要研 究方向为太赫兹测试仪器核心部件的研发.

邓建钦(1981-),男,博士,研究员,主要研究方向为毫米波及太赫兹测试技术研究和测试仪器研发.

李 钊(1995-),男,硕士,工程师,主要研究方向为太赫兹矢网扩频模块及核心部件的研发.

邹旭东(1998-),男,学士,助理工程师,主要研 究方向为太赫兹矢网扩频模块及核心部件的研发.

王 沫(1990-),男,博士,工程师,主要研究方向为太赫兹测试仪器及核心部件的研发.

王琦(1987-),男,硕士,高级工程师,主要研 究方向为微波毫米波部组件的研发.

石先宝(1988-),男,博士,高级工程师,主要研 究方向为微波毫米波部组件的研发.