文章编号：2095-4980(2021)02-0189-04

基于肖特基二极管的单片集成 560 GHz 混频器

翁　祎[1,2]，刘晓宇[2]，周静涛[2]

(1.中国科学院大学，北京 100049；2.中国科学院 微电子研究所，北京 100029)

摘　要：介绍了一款基于InP材料的肖特基二极管的单片集成混频器，其工作频率为560 GHz。该混频器采用了一种新型薄膜混合传输结构，基于某聚合物材料的无源结构的传输损耗降至14.4–15.5 Np/m。相比于基于传统石英介质基片和半导体介质基片的传输线，传输损耗降低了一半以上。同时为了降低高频损耗，提高电路效率，二极管需采用亚微米结构，结半径为0.5 μm，结电容为1.5 fF。无源结构和有源结构的同时优化使得该倍频器在540~580 GHz的工作频带内，变频损耗优于–8 dB，回波损耗优于10 dB。并且由于无源部分均采用创新的混合传输结构，在保证单模传输的条件下增大了混频器电路整体的物理尺寸，降低了腔体加工的工艺难度，使得今后大于1 THz信号低损耗平面传输成为可能。

关键词：肖特基势垒二极管；单片集成混频器；混合传输结构

中图分类号：TN773　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA2020153

Design of 560 GHz monolithic integrated subharmonic mixer

WENG Yi[1,2]，LIU Xiaoyu[2]，ZHOU Jingtao[2]

(1.University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，China；
2.Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100029，China)

Abstract： A monolithic integrated mixer based on InP material Schottky diodes is introduced, and its operating frequency is 560 GHz. The mixer uses a new type of thin-film hybrid transmission structure, and the transmission loss of a passive structure based on a polymer material is reduced to 14.4–15.5 Np/m. Compared with the transmission line based on traditional quartz dielectric substrate and semiconductor dielectric substrate, the transmission loss is reduced by more than half. At the same time, in order to reduce high-frequency losses and improve circuit efficiency, the diode needs to use a sub-micron structure with a junction radius of 0.5 μm and a junction capacitance of 1.5 fF. The simultaneous optimization of the passive structure and the active structure makes the frequency multiplier operating in the 540–580 GHz band, with the conversion loss better than –8 dB, and the return loss better than 10 dB. And because the passive part adopts an innovative hybrid transmission structure, the overall physical size of the mixer circuit is increased under the condition of ensuring single-mode transmission, and the process difficulty of cavity processing is reduced, which makes the low loss plane transmission of THz signal above 1THz becomes possible in the future.

Keywords： Schottky barrier diode；monolithic integrated mixer；hybrid transmission structure

太赫兹(THz)波指频率为 0.1~10 THz 的电磁波，太赫兹波在电磁波频谱中处于电磁波和红外之间，具有穿透性好、光子能量低、宽带特性和指纹特性等很多独特优点。因此，太赫兹技术在天文观测、行星科学、医疗成像、安全检查等领域得到飞速的发展，同时给技术创新、国民经济发展和国家安全提供了一个非常诱人的机遇[1]。国外在太赫兹二极管，太赫兹倍频、混频、检波器等太赫兹关键技术取得了巨大成就[2]，目前的商用倍频器的工作频段可到 3 THz，混频器的工作频段可达 2.2 THz，太赫兹收发组件的工作频段达到 1.1 THz[3]。混频器作为太赫兹收发前端中最重要的器件，其性能的好坏很大程度上决定了系统的整体性能[4]。在国家的重视和各高校研究所机构的共同努力下，近年来太赫兹技术得到了飞速的发展，不断有新性能的器件问世[5]。交流情况下趋肤效应的

收稿日期：2020-04-14；**修回日期：**2020-07-11
作者简介：翁　祎(1996–)，女，在读硕士研究生，研究方向：固态太赫兹技术。email:18292889534@163.com

出现使导体的阻抗增大，损耗功率增加。同时，随着频率的升高，器件尺寸的减小，对于工艺容差度的减小，导体表面的粗糙度也会加剧导体损耗。并且交流电场下介质中电偶极子极化方向不断变化，也加大了传输能量的损耗，由于阻抗不连续，反射也会导致 THz 频段传输的信号损失部分能量。因此采用高 Q 值(品质因子或 Q 因子是物理及工程中的无量纲参数，是表征振子阻尼性质的物理量)、低插损、大容量的无源结构对于实现高性能的混频器至关重要，本设计的创新之一就是使用了波导和悬置微带线相结合的混合传输结构，该传输结构在大幅减小传输线损耗的同时保证了腔体的尺寸，减小了加工难度。提供了一种当前工艺可实现的工程可参考的低损耗传输线结构。本文采用分谐波混频的方式，本振频率只需对应基波混频的一半，这就很大程度地减小了本振源的实现难度[3]。总体设计围绕分谐波混频技术展开，从器件物理机理入手，对混频二极管建模开展了深入的理论研究。在此基础上，完成了一个 560 GHz 二次分谐波混频器的电路优化。具体研究工作包括：560 GHz 二次分谐波混频器设计，560 GHz 二次分谐波混频器总体及无源结构分部仿真。

1 560 GHz 二次分谐波混频器设计

560 GHz 太赫兹分谐波混频器整体设计见图 1,大体上由四部分组成：肖特基势垒二极管的设计，射频输入探针和本振输入探针的设计，中频和中频低通滤波器的设计以及混合传输线等无源结构的设计[3]。射频信号和本振信号均采用矩形波导输入，经波导减高、波导-混合传输线探针过渡、匹配电路的结构馈入。并且从物理结构出发对肖特基二极管进行了设计。本设计的传输线和无源滤波器部分均采用基于某聚合物的新型薄膜混合传输结构，实现了本振、射频和中频信号的独立和隔离，避免了本振大信号对于射频和中频小信号的影响。

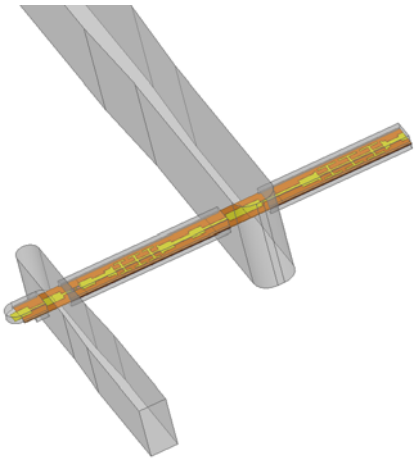

Fig.1 Overall structure of the mixer
图 1 混频器整体结构

1.1 肖特基势垒二极管分部设计

平面肖特基二极管是用于构建工作于 150 GHz 以上太赫兹器件的最受欢迎的器件。与其他平方率元件相比，带宽大、可靠性高以及其可重复性是肖特基二极管能够广泛应用的原因[5]。同时在可用于构建射电天文学和航空航天的 THz 和次 THz 相干接收机的各种不同技术中，平面肖特基二极管技术起着至关重要的作用[6]。几乎所有的应用都源于其简单性，就 THz 频率操作而言，这种简单性意味着可以将二极管的有源区域的尺寸减小到平方微米的一小部分[7]，从而将结电容减小到毫微微法拉。然而在实际的 THz 平面倍频器中准确建模肖特基二极管的行为是一项艰巨的任务。除了肖特基势垒的物理建模，还必须考虑具有多种材料的完整二极管三维拓扑结构。就二极管的电磁性能而言，经典方法是先在高频电磁场仿真软件中对其线性寄生参数进行仿真，将电磁场求解器计算的 S 参数包导入到 ADS 的电路仿真器中，结合肖特基二极管的非线性本征参数进行谐波仿真[2,6]。图 2 是肖特基二极管的本征等效结构示意图，结电阻 R_j 是用于频率转换的非线性元件。结电容 C_j 可用于平行板电容器进行建模。串联电阻 R_s 属于耗散功率的非寄生元件，总寄生电容 C_p 取决于肖特基势垒二极管的材料和几何形状。

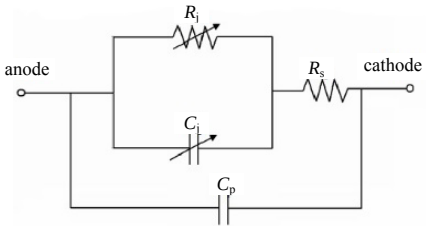

Fig.2 Intrinsic model of Schottky diode
图 2 肖特基二极管本征模型

图 3 是在三维电磁仿真软件 HFSS 中仿真的肖特基二极管结构，该二极管采用了 InP 衬底和 InGaAs 外延结构。因为 InP 基肖特基势垒二极管比 GaAs 基具有更小的势垒，这使 InP 基肖特基势垒二极管的导通电压非常低。同时基于 InP 的肖特基势垒二极管的低正向导通电压为混频器提供零偏置操作能力，从而提高了噪声性能。并且 N 型 InP 基的允许掺杂浓度远高于 N 型 GaAs 的允许掺杂浓度，所以在重掺杂的 N 型 InGaAs 层上可以形成极低的欧姆接触电阻。本设计中的肖特基二极管串联电阻为 7 Ω，零偏置结电容为 1.5 fF，截止频率高达 15.2 THz，远超二极管工作频率[2]。归功于这些突出的优点，基于 InP 的肖特基势垒二极管非常适合应用于太赫兹混频器。

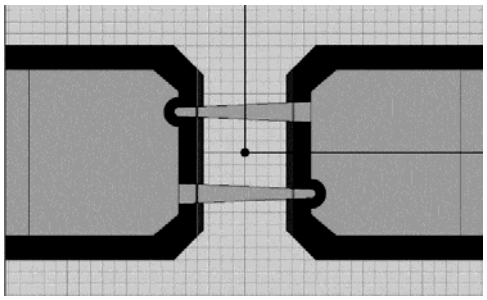

Fig.3 Three-dimensional structure of Schottky diode
图 3 肖特基二极管三维结构

1.2 传输线结构设计

针对 THz 频段传统传输结构传输损耗大，加工精确度需求高的问题，提出一种新型薄膜混合传输结构见图 4。金属薄膜厚度为 1 μm，聚合物介质厚度为 3 μm，两侧支撑金属的厚度均为 3 μm。现分别对衬底采用石英、InP 和聚合物材料的三种传输结构进行仿真，在保证单模传输且腔体尺寸均为 160 μm×140 μm 的前提下，在特性阻抗为 100 Ω 时，石英衬底的损耗为 41.7~45.5 Np/m，InP 衬底的损耗为 102~109.5 Np/m，采用聚合物材料的新型薄膜混合传输结构的损耗为 20.8~25.6 Np/m，基于三种材料的结构损耗仿真情况见图 5。该结构在腔体过小、损耗增加和腔体增大、出现高次模之间取得了折衷，在保证单次模传输的同时大幅度减薄了衬底厚度，减小了传输损耗，并且尽可能地增大了腔体尺寸，降低了腔体加工的工艺难度，使得大于 1 THz 信号低损耗平面传输成为可能。

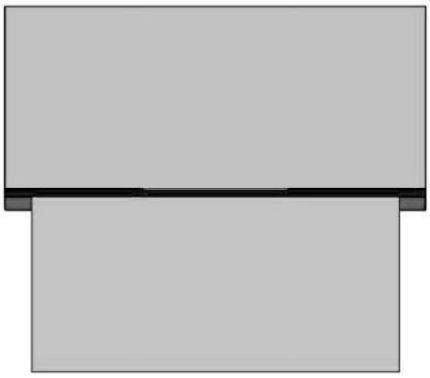

Fig.4 Polymer-based hybrid transmission structure
图 4 基于聚合物的混合传输结构

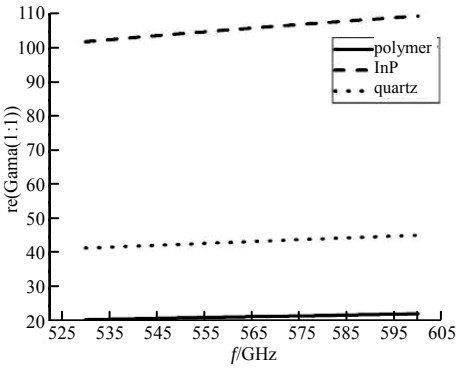

Fig.5 Loss simulation based on three kind of material transmission structures
图 5 基于三种材料传输结构的损耗仿真

1.3 中频和中频低通滤波器设计

本振输入是一个 3 mW 的大信号，而中频信号输出功率最大仅为 0.1 mW。为了避免大本振信号对中频小信号的干扰，必须在本振中频之间加上低通滤波器，同时由于本振未达到射频端波导的截止频率，自然实现了射频信号和本振信号的隔离，为避免射频对本振干扰的因素，在本振和射频之间也应加上滤波器，只允许本振通过。该混频器采用的是新型的 CMRC 宽带低通滤波器，见图 6，与传统的高低阻抗滤波器相比，滤波器的尺寸大大减小了，这对于射频波段器件尺寸的缩小和单片微波集成技术的发展具有重要意义[3]。并且本文的滤波器也采用新型薄膜混合传输结构，具有低损耗、大容量、射频范围内的整体抑制度较大的优点，对于混频器的整体优化设计十分重要[2]。图 7 在 250~625 GHz 频段内，回波损耗小于 0.04，插损大于 12.5 dB，在 280 GHz 和 580 GHz 频点处的回波小于 0.2，插损大于 25 dB，很好地做到了本振、射频对中频信号的隔离。

Fig.6 CMRC broadband low-pass filter
图 6 CMRC 宽带低通滤波器

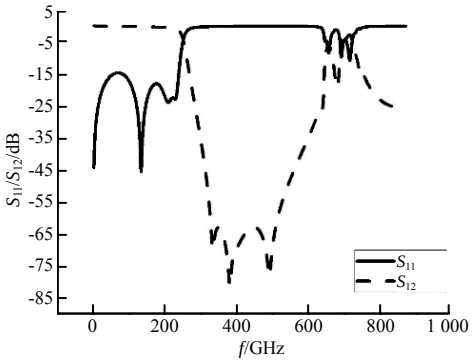

Fig.7 *S*-parameter simulation of low-pass filter
图 7 低通滤波器 *S* 参数仿真

1.4 本振和射频端输入探针设计

本振双工器由本振探针过渡、本振低通滤波器和中频低通滤波器等部分构成。本振经过 WR-3.4 接口输入，采用波导到探针过渡的结构[4]，为使本振信号具有更好的传输特性，将上述两个滤波器连入本振的两个输出端口，其 HFSS 原理见图 8，仿真结果见图 9。从图中可见输入端口 1 到两输出端口 2 和 3 的回波损耗大于 10 dB，而插入损耗小于 3.5 dB。在中心频点 280 GHz 回波损耗大于 15 dB，插入损耗小于 3 dB，很好地实现了本振信号的传输。

射频信号由 WR-1.9 标准矩形波导输入，经波导减高、波导-混合传输线探针过渡结构、射频匹配电路馈入二极管。同样

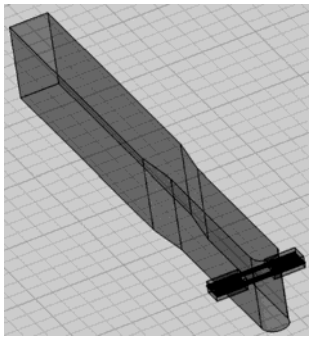

Fig.8 LO probe structure
图 8 本振探针结构

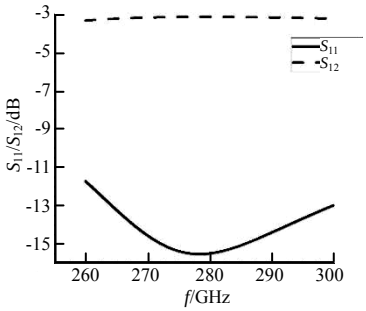

Fig.9 *S* parameter simulation of local oscillator port
图 9 本振端口 *S* 参数仿真

也采用矩形波导到探针过渡的结构，其 HFSS 原理见图 10，仿真结果见图 11。从结果图可以看出 RF 端的插入损耗低于 0.2 dB，而回波损耗则超过 10 dB，在中心频点 560 GHz 处回波损耗大于 45 dB，插入损耗小于 0.1dB，很好地实现了射频信号的传输特性。

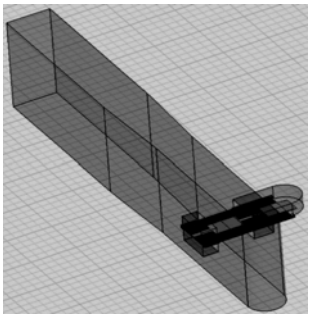

Fig.10 RF probe structure
图 10 射频探针结构

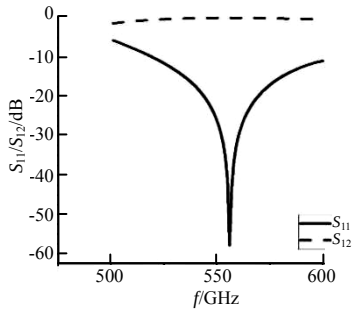

Fig.11 *S* parameter simulation of RF port
图 11 射频端口 *S* 参数仿真

2 结果

基于肖特基势垒二极管设计了一款新型单片集成的 560 GHz 太赫兹二次谐波混频器，创新点在该混频器的传输部分采用基于某聚合物的薄膜混合传输结构，降低了腔体加工的工艺难度，减小了传输损耗，同时提出的 CMRC 滤波器减少了整个电路的尺寸，实现了本振中频、射频之间良好的隔离度。560 GHz 太赫兹二次谐波混频器的本振驱动功率是 3 mW，中频功率为 0.1 mW，固定中频频率 1 GHz，对本振频率进行扫描，仿真结果见图 12，变频损耗优于 8 dB。后期工作将完成 560 GHz 太赫兹分谐波混频器的腔体设计加工及测试工作。

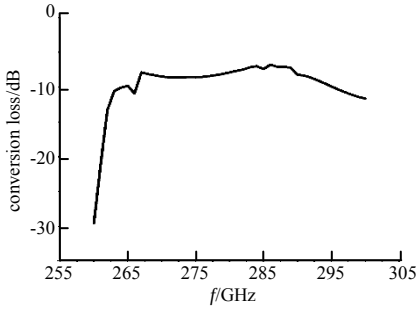

Fig.12 Frequency conversion loss
图 12 变频损耗

3 结论

本文进行了混频器件的研究与建模，设计一款基于 InP 材料的肖特基二极管的单片集成混频器，结论如下：a) 本设计采用的新型薄膜混合传输结构使得无源部分的传输损耗相比于传统结构减少了一半以上，并且大大降低了工艺加工难度；b) 基于该无源结构的混频器性能也得到了很大的提高，在本振驱动功率 3 mW 的情况下，540~580 GHz 的工作频带内，变频损耗优于−8 dB，最小变频损耗−7.121 dB@286 GHz。对于太赫兹高频段分谐波混频器等器件的集成化和小型化研究，本论文的工作具有重要意义。

参考文献：

[1] 卢秋全. 0.22 THz 固态倍频技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010. (LU Qiuquan. Research on 0.22 THz solid-state frequency doubling technology[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology, 2010.)

[2] 崔建行,刘晓宇,黎雨坤,等. 一种新型 220 GHz 太赫兹分谐波混频器设计[J]. 微波学报, 2018,34(s1):255–258. (CUI Jianxing,LIU Xiaoyu,LI Yukun,et al. Design of a new type of 220 GHz terahertz sub-harmonic mixer[J]. Journal of Microwaves, 2018,34(s1):255–258.)

[3] 郑鹏辉. 基于肖特基势垒二极管的 600 GHz 检波器研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017. (ZHENG Penghui. Research on 600 GHz detector based on Schottky barrier diode[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology, 2017.)

[4] MAESTRINI Alain,THOMAS Bertrand,WANG Hui,et al. Schottky diode-based terahertz frequency multipliers and mixers[J]. Comptes Rendus Physique, 2010,11(7/8):480–495.

[5] MAESTRINI Alain,WARD John S,GILL John J,et al. A frequency-multiplied source with more than 1 mW of power across the 840–900 GHz band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010,58(7):1925–1929.

[6] 夏德娇,张勇. 330 GHz 太赫兹次谐波混频器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(3):378–382. (XIA Dejiao, ZHANG Yong. Design of a 330 GHz terahertz subharmonic mixer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(3):378–382.)

[7] 韩鹏,张勇,王云飞. 220 GHz次谐波混频器设计[J]. 微波学报, 2014,30(s1):536–539. (HAN Peng,ZHANG Yong,WANG Yunfei. Design of 220 GHz subharmonic mixer[J]. Journal of Microwaves, 2014,30(s1):536–539.)