

文章编号: 2095-4980(2015)04-0540-04

0.45 THz 次谐波混频器优化设计

蒋长宏^{a,b}, 张德海^{a,b}, 赵鑫^{a,b}

(中国科学院 a.微波遥感技术重点实验室; b.空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

摘要: 采用 ACST 公司准垂直结构混频二极管对 0.45 THz 次谐波混频器进行优化设计。提出一种电路拓扑结构, 使得电路结构紧凑且易于匹配。在对二极管结构分析与建模的基础上, 利用射频电路仿真软件 ADS 及电磁场仿真软件 HFSS 对混频器电路及结构进行整体优化设计, 得到理想情况下单边带变频损耗最小值 6 dB, 三分贝带宽大于 30 GHz, 所需本振驱动功率 3.8 mW。仿真结果表明, 该电路拓扑结构适用于采用反向并联肖特基二极管对实现次谐波混频器设计。

关键词: 太赫兹; 混频器; 优化设计

中图分类号: TN454

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201504.0540

Optimization and design of a sub-harmonic 0.45 THz mixer

JIANG Changhong^{a,b}, ZHANG Dehai^{a,b}, ZHAO Xin^{a,b}(a.Microwave Remote Sensing Technology Laboratory; b.Space Science and Applied Research Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A sub-harmonic 0.45 THz mixer is optimized and designed with quasi-vertical Schottky mixer diodes of ACST. A circuit topology which is compact and easily to be matched is proposed. Based on the diode structure analysis and modeling, the mixer circuits and structure are optimized as a whole by using an RF circuits simulation software(ADS) and an electromagnetic field simulation software(HFSS). The simulation results reveal that minimum Single Side Band(SSB) conversion loss is about 6 dB with 3.8 mW of local oscillator power, and -3 dB bandwidth is more than 30 GHz. The circuit topology is suitable for the use of anti-parallel Schottky diodes to achieve sub-harmonic mixer designs.

Key words: terahertz; mixer; optimization and design

毫米波/亚毫米波技术最先在射电天文观测领域得到应用。随着技术的发展, 探测频率不断爬升, 最新研究表明, 宇宙射线主要能量谱集中在太赫兹频段(0.1 THz~10 THz)。大气中的水分子、氧气以及温室气体等气体分子对电磁波的谐振衰减使得太赫兹波可用于大气遥感。太赫兹波具有波长短及易获得大瞬时带宽等特点, 可用于超宽带通信、超分辨率雷达等领域。

超外差式接收机具有较高的室温下信号检测灵敏度, 其关键器件是混频器, 用于将射频信号变换到射频信号。超外差式接收机的灵敏度主要取决于第一级部件, 通常为低噪声放大器。在太赫兹频段尤其是 200 GHz 以上, 目前还没有商用的低噪声放大器可供选择, 因此, 工作在此频段的超外差式接收机第一级部件通常是混频器, 它的性能直接决定了接收机的灵敏度。

混频器利用肖特基二极管的非线性区间进行频率变换, 非线性器件的分析是比较复杂的, 借助于射频仿真软件 ADS 的谐波平衡仿真器可方便地对非线性器件进行分析。太赫兹频段波长短, 器件的几何尺寸已经与工作波长相近, 因此需要对混频管芯进行精确建模。利用电磁场仿真软件对管芯及混频器无源部分进行建模提取 S 参数, 然后导入 ADS 进行优化。次谐波混频器主要有两种实现方式: 一种是采用反向串联肖特基二极管对^[1]; 另一种是采用反向并联肖特基二极管对^[2]。受器件限制, 国内 300 GHz 以上混频器报道较少, 文献[3]采用了英国卢瑟福阿普尔顿实验室(Rutherford Appleton Laboratory, RAL)一款反向并联肖特基二极管对设计 380 GHz 次谐波混频器。本文采用 ACST 公司反向并联肖特基二极管优化设计工作频率为 0.45 THz 的次谐波混频器。

1 直流参数分析

混频管选用 ACST 公司的 2MAF1p5, 厂家提供的直流参数为: 等效串联电阻 $R_s \approx 9.8 \Omega \sim 11.7 \Omega$; 理想因子 $n \approx 1.21$; $1 \mu\text{A}$ 压降 $U@1\mu\text{A} \approx 732 \text{ mV} \sim 743 \text{ mV}$; 总电容 $C_T \approx 6.2 \text{ fF} \sim 6.8 \text{ fF}$, 在 ADS 二极管模型 SPICE 参数中还缺少反向饱和电流 I_s , 禁带宽度 E_g , 内建电势 U_j 等参数。根据肖特基结的材质由 GaAs 组成确定 $E_g = 1.43 \text{ eV}$, $U_j \approx 0.74 \text{ V}$, 反向饱和电流可由公式(1)计算得出:

$$I_s = I(U) \exp(-U / (nU_T)) \quad (1)$$

式中: $I(U)$ 在 $I-U$ 曲线 $1 \mu\text{A} \sim 10 \mu\text{A}$ 范围选取, 这里选 $1 \mu\text{A}$ 对应电压值 $U \approx 740 \text{ mV}$; n 为理想因子; U_T 为肖特基结热电压, 室温下约为 25.8 mV 。根据厂家提供的参数计算得 $I_s \approx 5 \times 10^{-17} \text{ A}$ 。

2 理想性能预估

由于在太赫兹频段很难获取较大功率, 因此 0.45 THz 混频器拟采用二次谐波混频的电路结构, 本振频率只需要基波混频频率的一半即 0.225 THz , 降低本振链路的研制难度, 电路结构如图 1 所示。

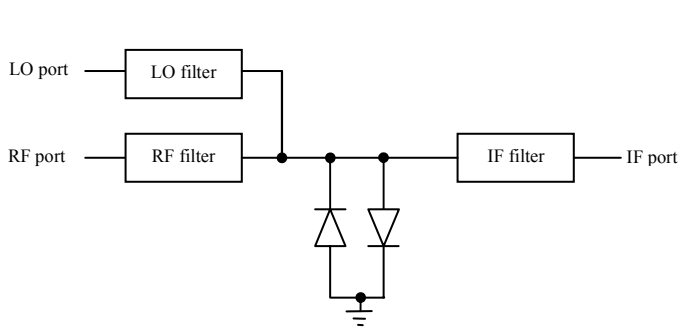


Fig.1 Circuit of sub-harmonic mixer
图 1 二次谐波混频器电路结构

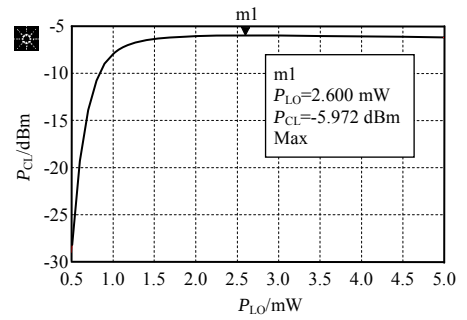


Fig.2 Ideal conversion loss of mixer and optimum local oscillator drive power
图 2 理想情况下混频器变频损耗及最优本振驱动功率

按照图 1 在 ADS 中建立电路模型, 二极管模型 SPICE 参数设置为: $R_s = 10.5 \Omega$, $n = 1.21$, $C_{j0} = 2.2 \text{ fF}$, $I_s = 5 \times 10^{-17} \text{ A}$, $E_g = 1.43 \text{ eV}$, $U_j = 0.74 \text{ V}$, 利用谐波平衡仿真器仿真, 初步得到理想情况下混频器的性能如图 2 所示。同时得到本振功率为 2.6 mW 时管芯对本振频率呈现的阻抗 $Z_{LO} = (56 - j109) \Omega$, 对射频频率呈现阻抗 $Z_{RF} = (35 - j42) \Omega$, 其中, j 为复数中的虚数单位。

3 管芯建模

早期的亚毫米波及太赫兹肖特基二极管是晶须接触结构的, 可靠性较差。美国 VDI 公司与喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 最先将肖特基二极管设计为平面结构, 提高了可靠性并且易于集成。此后英国卢瑟福阿普尔顿实验室 (RAL)、法国光子与纳米结构技术实验室 (Laboratory for Photonics and Nanostructures, LPN)^[4] 等也先后开展基于平面结构的太赫兹肖特基二极管。与 VDI 等平面结构不同, ACST 公司的混频管是基于准垂直结构的, Oleg Cojocari^[5] 详细描述了准垂直结构肖特基结 (见图 3)。

显微镜下观察混频管照片如图 4(a) 所示, 厂家给出管芯本体尺寸为 $70 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$, 在电磁场仿真软件 HFSS 里建立管芯的仿真模型, 见图 4(b)。

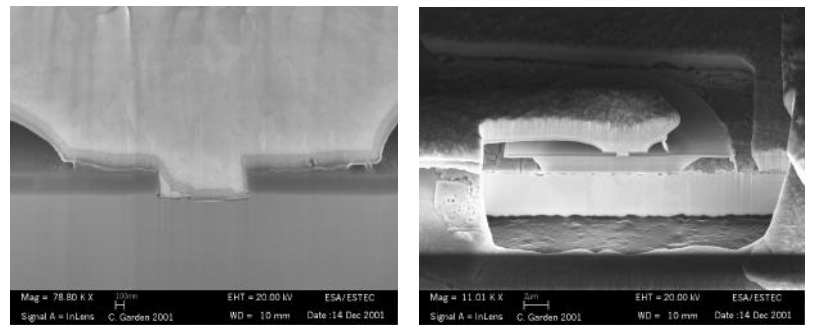
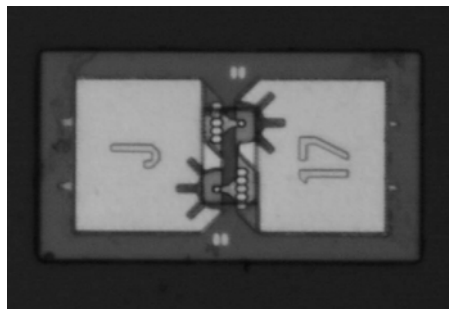
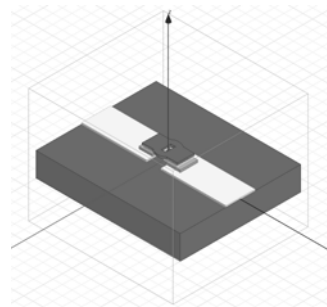


Fig.3 Quasi-vertical Schottky junction
图 3 准垂直结构肖特基结



(a) optical picture



(b) HFSS model

Fig.4 Mixer diode 2MAF1p5
图 4 混频管 2MAF1p5

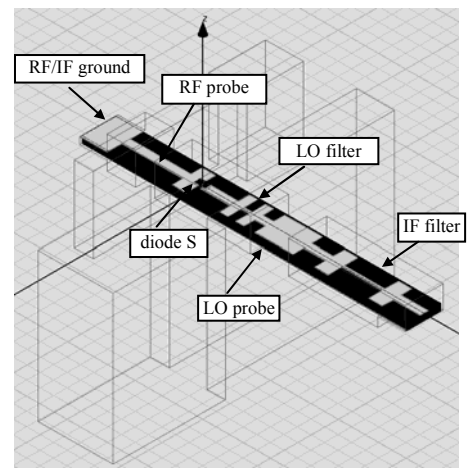
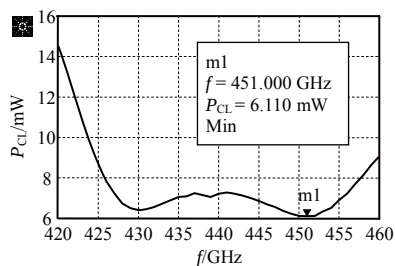
4 整体仿真优化

首先根据工作频率选定射频端口波导型号 WR2.2、本振端口波导型号 WR4.3, 中间沟道选取的原则是截止频率大于最高工作频率, 这里设为 0.5 THz。电路基板选为介电常数小、温度稳定性高的石英基板, 为尽量避免激励起高次模引起额外损耗, 石英基板减薄到 50 μm 厚。

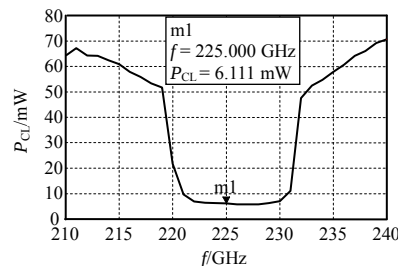
混频器是典型的非线性器件, 射频电路仿真软件 ADS 的谐波平衡仿真器可以方便地分析非线性电路, 因此将混频器分为两部分, 即: 非线性部分和线性部分。非线性部分是指肖特基结, 线性部分是指除肖特基 PN 结以外的所有部分。借助于电磁场仿真软件 HFSS, 可以很容易得到任意无源结构(即线性部分)的 S 参数。

姚常飞^[6]及 Steve Marsh^[7]详细介绍了利用 CAD 软件进行二次谐波混频器设计流程, Peter Sobis^[8]讨论了若干电路优化方法。在此基础上, 提出一种电路拓扑结构, 参见图 5, 混频器分为: 中频滤波器、本振滤波器、本振耦合、射频耦合、射频/中频接地及混频管等部分。混频管射频端焊盘采用一段低阻抗线, 射频探针到 RF/IF 地微带线长度、射频探针到混频管低阻焊盘长度、混频管本振端焊盘到本振滤波器微带线长度、射频减高波导短路面到微带线腔体长度以及射频减高波导过渡面到微带线腔体长度等作为混频管射频阻抗匹配的优化参数。本振探针到本振滤波器微带线长度、本振探针到中频滤波器微带线长度、本振减高波导短路面到微带线腔体长度以及本振减高波导过渡到微带线腔体长度作为混频管本振阻抗匹配的优化参数。

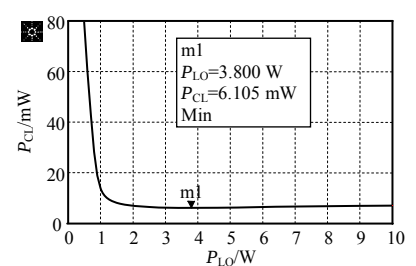
在 HFSS 仿真模型里, 射频波导口、本振波导口及中频微带输出端设置波端口(wave port), 在两 PN 结处设置集总端口(lumped port), 仿真得到五端口 S 参数包, 然后导入 ADS 预估混频器性能。最终仿真得到的混频器性能见图 6, 其中图 6(a)是射频端口频率特性, 图 6(b)是本振端口频率特性, 图 6(c)是最优本振功率。由图 6 可以看出本振在 225 GHz@3.8 mW 时, 射频端口单边带最小变频损耗大约 6 dB, -3 dB 带宽大于 30 GHz, 达到预期目标。

Fig.5 Simulation model of mixer
图 5 混频器整体仿真模型

(a) RF port performance



(b) LO port performance



(c) optimum LO power

Fig.6 Mixer performance prediction
图 6 混频器性能预估

5 结论

通过对 0.45 THz 次谐波混频器的优化设计, 验证了该电路拓扑结构可用于反向并联肖特基二极管对实现次谐波混频器, 达到了电路结构紧凑、易于匹配的目的。借助 CAD 软件可以快速地对二次谐波混频器进行优化设计与仿真。为了进行快速的仿真, 模型里所有金属材料均设置为完美导体(PEC), 如果设为实际金属材料还会增加欧姆损耗。此外, 粘接二极管的导电胶阻抗、射频/中频接地导电胶阻抗也会带来一定的损耗。因此, 实际混频器变频损耗将比仿真结果恶化。

参考文献:

- [1] ZHANG Bo, Alderman Byron, CHEN Zhe, et al. The design of a 200–240-GHz sub-harmonic mixer based on RAL's planar Schottky diodes[J]. Terahertz Science and Technology, 2011, 4(3):90–94.
- [2] Peter J Sobis, Anders Emrich, Jan Stake. A low VSWR 2SB Schottky receiver[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(2):403–411.
- [3] YANG Xiaofan, WANG Guoyu, WANG Liandong, et al. 380 GHz sub-harmonically pumped mixer based on anti-parallel planar Schottky diode[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2014, 46:1–6.
- [4] 唐海林. 太赫兹肖特基二极管技术研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6):847–852. (TANG Hailin. Research progress of terahertz Schottky diodes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(6):847–852.)
- [5] Cojocari O, Mottet B, Rodriguez-Girones M, et al. Whisker-device-based optimization of fabrication process for planar THz Schottky diodes[R]. Helsinki:European Space Agency(ESA), 2003.
- [6] YAO Changfei, ZHOU Ming, LUO Yunsheng, et al. Millimeter-wave fixed tuned sub harmonic mixers with Planar Schottky diodes[J]. Journal of Semiconductors, 2012, 33(11):115007-1–115007-5.
- [7] Steve Marsh, Byron Alderman, Dave Matheson, et al. CAD techniques for 183 GHz fixed tuned sub-harmonic mixer using foundry diodes[C]// The 1st:European Microwave Integrated Circuits Conference. Manchester:IEEE, 2006:91–94.
- [8] Sobis P, Stake J, Emrich A. Optimization and design of a suspended sub-harmonic 340 GHz Schottky diode mixer[C]// The Joint 31st International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics. Shanghai, China:IEEE, 2006:193.

作者简介:



蒋长宏(1975–), 男, 北京市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波遥感技术及高分辨率成像.email:jiangchanghong@mirslab.cn.

张德海(1968–), 男, 吉林市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波遥感理论及太赫兹技术.

赵鑫(1983–), 男, 湖北省黄梅县人, 博士, 工程师, 主要研究方向为毫米波天线、混频器等前端技术.