

0.22 THz 宽带混频电路研究

王俊龙¹, 杨大宝², 邢东¹, 梁士雄¹, 张立森¹, 赵向阳², 徐鹏², 冯志红¹

- (1. 专用集成电路重点实验室, 河北 石家庄 050051;
2. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要: 基于中国电子科技集团公司第十三研究所的反向并联肖特基二极管, 采用电磁场和电路软件联合仿真, 完成了 0.22 THz 分谐波混频电路设计。在固定中频输出频率 10 MHz 的条件下测试了混频电路的变频损耗, 在 175~235 GHz 共 60 GHz 带宽内双边带变频损耗小于 15 dB, 在 196 GHz 处最佳变频损耗为 8.5 dB。测试结果与仿真结果趋势吻合良好。基于冷热负载, 测试了分谐波混频电路的噪声温度, 当本振功率为 5.7 mW 时, 在 216 GHz 处双边带噪声温度为 1 200 K。

关键词: 太赫兹; 混频; 肖特基二极管; 模型

中图分类号: TN45 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.1125003

Research of 0.22 THz wide-band mixing circuit

Wang Junlong¹, Yang Dabao², Xing Dong¹, Liang Shixiong¹, Zhang Lisen¹, Zhao Xiangyang²,
Xu Peng², Feng Zhihong¹

- (1. National Key Laboratory of Application Specific Integrated Circuit, Shijiazhuang 050051, China;
2. The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: The design of a 0.22 THz sub-harmonically pumped mixer circuit was demonstrated. The circuit was based on anti-parallel pair of planar Schottky diodes from the CETC 13 with the co-simulation of electromagnetic (EM) software and circuit software. The conversion loss was measured at the fixed intermediate frequency (IF) of 10 MHz. The double sideband (DSB) conversion loss is less than 15 dB in the range of 175 GHz to 235 GHz, the bandwidth is 60 GHz. The best DSB conversion loss is 8.5 dB at 196 GHz. The measured result was well with the simulated result. The DSB equivalent noise temperature of is 1 200 K at 216 GHz with the local oscillator(LO) power of 5.7 mW.

Key words: terahertz; mixing; Schottky diode; model

收稿日期: 2017-03-05; 修订日期: 2017-04-03

作者简介: 王俊龙(1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事太赫兹固态电子器件及模型方面的研究。Email: tjwangjunlong@126.com

通讯作者: 冯志红(1973-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事宽禁带半导体与太赫兹固态电子器件方面的研究。Email: ga917vv@163.com

0 引言

太赫兹(Terahertz, THz)从广义范围上来讲是指 100~10 THz 之间的一段电磁频率,太赫兹也是人类在电磁频谱上开发的最后一块电磁频率。它在长波段与毫米波(亚毫米波)相重合,而在短波段与红外线相重合。THz 波在电磁波频谱中占有很特殊的位置,THz 技术是国际科技界公认的一个非常重要的交叉前沿领域^[1-3]。

在太赫兹应用例如通信、测量等系统中,首先需要解决的就是太赫兹频段的上下变频问题。在太赫兹频段的低端频率,主要是 100 GHz~1 THz,目前国际上主流的是采用 GaAs 基平面肖特基二极管作为非线性下变频器件,用以实现将太赫兹波变换到易于处理的中频频段。基于肖特基二极管的混频接收技术体积小,室温工作,非常适合集成于紧凑系统,并且可以长效工作,成为国内外的研究热点。在太赫兹低端频率,有几个大气窗口具有潜在的应用,其中 0.22 THz 是其中的一个大气窗口。由于具有较低的自由空间传输损耗,有望应用于短距离高速无线通信。在太赫兹频段,由于缺乏低噪声放大器,混频器成为接收端的第一级,对系统性能有很大的影响。

在太赫兹低端频率接收机,通常采用分谐波混频技术,分谐波混频将本振频率降低至射频的二分之一,相较于基波混频,本振更加容易实现。

早在 1993 年,美国 Peter H. Siegel 博士报道了一款基于平面 GaAs 肖特基二极管的 215 GHz 分谐波混频器,在本振功率 5.7 mW 时,单边带变频损耗为 8.7 dB,噪声温度为 1 590 K^[4]。2005 年,法国 B. Thomas 博士报道了 340 GHz 分谐波混频器,最低变频损耗为 6.3 dB,双边带噪声温度小于 900 K^[5]。

2012 年,国内电子科技大学张波使用国外器件,也制作出了可以工作在 0.22 THz 的分谐波混频器,本振功率为 5 mW 时,在 210~230 GHz 频带范围内,单边带变频损耗小于 10 dB^[6]。2015 年,该团队介绍了 380 GHz 谐波混频器,最佳变频损耗为 9 dB,等效噪声温度为 2 000 K^[7]。

虽然国内外对混频展开了广泛的研究,但更多的报道是基于国外的太赫兹肖特基二极管器件,主要原因是因为前几年国内缺乏相应的太赫兹器件。

随着工艺技术的提高,国内已经掌握了二极管的制作技术,并构建了自主模型^[8],目前基于国产器件的混频电路鲜有报道,因此研究基于国产器件的混频器具有重要的意义。

文中给出了一种 0.22 THz 分谐波混频混合集成电路,肖特基二极管采用国产器件,未来有望应用于短距离的高速无线通信系统。

1 0.22 THz 分谐波混频电路设计

分谐波混频电路基于传统的 E-面探针分离波导结构^[9],具体的电路结构如图 1 所示。由于工作频段的升高,电路对腔体和基片加工精度要求随之提升,尺寸的变化对电路性能的影响更为显著。在亚毫米波及太赫兹频段石英基片有更小的损耗,相对介电常数较高,材质适合构成悬置微带,且加工精度高,文中采用石英作为混频电路的基板。

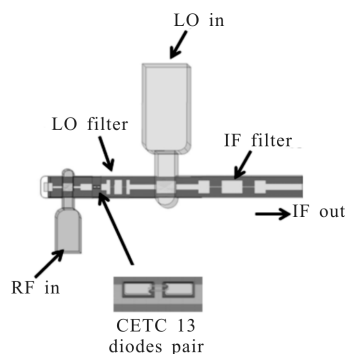


图 1 0.22 THz 混频电路结构图

Fig.1 Architecture of 0.22 THz mixing circuit

电路由反向并联混频二极管对、射频端口波导-微带过渡、本振中频双工(包括本振端口波导-微带过渡、本振低通滤波器和中频滤波器)三部分组成,电路图形制作在 76 μm 厚的石英上。电路本振和射频端口到二极管传输线采用悬置微带的形式,可有效减小微带线及基片对信号的损耗,同时中频采用微带线形式实现中频端口到 K 接头的连接。由于石英基片的质地较脆,与腔体直接接触可能导致其发生断裂,所以让石英基片上的导带通过导电胶和腔体接触,实现良好接地。

射频端口过渡是保证混频整体性能的关键之一,其要求就是要在尽可能大的带宽内实现良好的匹配和低损耗。为了提升过渡性能采取了波导增高

的措施,其并不会影响波导中主模信号的传输,同时悬置微带的屏蔽腔尺寸选择时也考虑了保证单模工作的要求。

滤波器包括本振低通和中频低通滤波器。由于石英基片的加工精度远高于软基片的加工精度,高阻线的最小宽度可达 0.01 mm,为了保证电路整体尺寸尽可能小以及滤波器性能尽可能好的前提下,将本振滤波器的阶数设为 5 阶,中频滤波器的阶数定为 5 阶。本振中频双工由本振端口过渡和中频滤波器组合构成,实现对本振信号和中频信号的隔离以及本振信号到二极管端口的传输。

在分谐波混频中,THz 肖特基混频二极管采用倒装焊(Flip chip)焊接于石英基片悬置微带电路上。为了实现较低的变频损耗,需要对肖特基二极管对进行精确建模。在 THz 频段,二极管的物理尺寸已经和工作波长相比拟,它的封装已然影响到电场分

布,在仿真中不能忽略不计。此外二极管的安装形式和实际位置都必须考虑在二极管的建模中。

肖特基二极管基于该实验室现有工艺技术制作,具有较低的寄生电容和串联电阻。具体的二极管结非线性参数如表 1 所示。

表 1 肖特基二极管结参数

Tab.1 Schottky diode junction parameter

Series resistance R_s/Ω	Ideality factor n	Saturation current I_s/fA	Threshold voltage V_f/V	Zero bias junction capacitance C_{j0}/fF
14	1.22	50	0.66	1

二极管的非线性特性采用电路设计软件中的标准二极管模型,混频电路整体仿真基于场路结合的联合仿真。其中无源部分的仿真在电磁场仿真软件中完成,整体优化和仿真在电路设计软件中完成。整体电路的拓扑结构如图 2 所示。

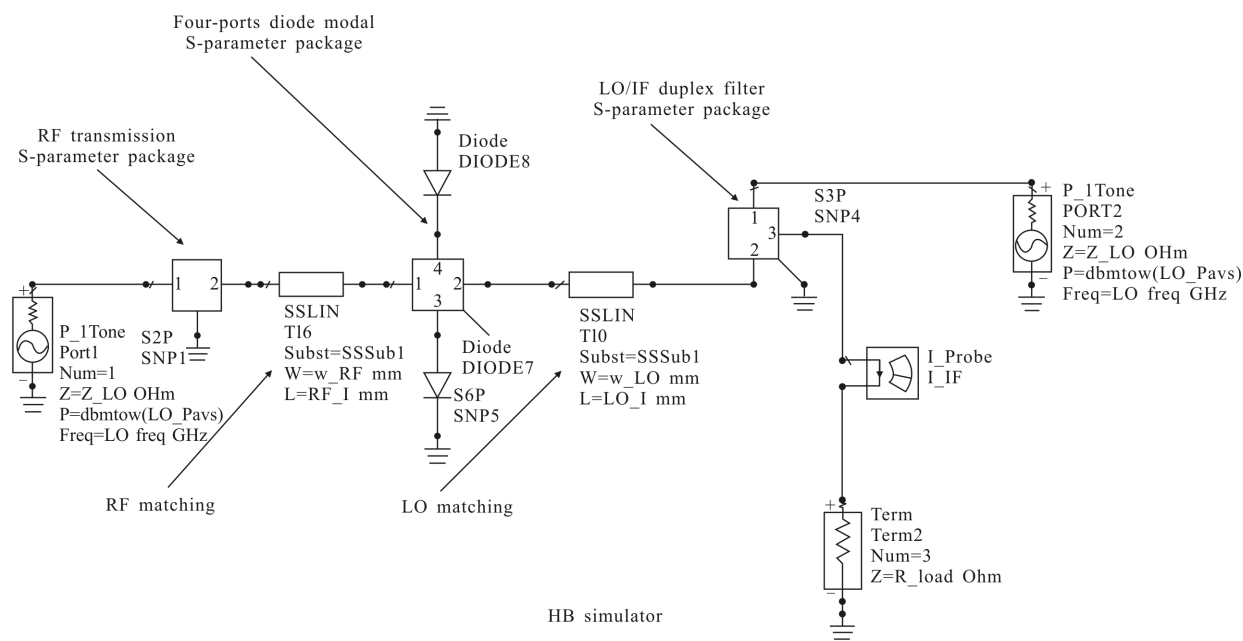


图 2 0.22 THz 混频电路整体仿真

Fig.2 Whole simulation of 0.22 THz mixing circuit

为了得到变频损耗,射频传输端的 S 参数和本振中频双工端口的 S 参数以及二极管寄生参数包导入电路设计软件中。采用谐波平衡的方式进行仿真分析,其中本振固定输入功率为 5 mW,射频输入功率固定为 0.1 mW,中频端采用固定中频,频率固定为 10 MHz,得到双边带的变频损耗。

2 0.22 THz 分谐波混频电路测试

仿真结果显示,在 175~235 GHz 范围内,DSB 变频损耗小于 13 dB。在实际测试中,固定中频输出 10 MHz,本振功率在 4~10 mW,保证可以开启二极管,测试了混频电路的变频损耗。测试结果表明,混

频电路在 175~235 GHz 共 60 GHz 带宽内,DSB 变频损耗小于 15 dB,在 196 GHz 处取得最佳变频损耗为 8.5 dB,具体的测试曲线如图 3 所示。测试结果与仿真结果趋势较为吻合,但是测试结果较仿真结果约有 3 dB 左右的差距。主要有以下几点导致:(1) 工艺装配问题。肖特基二极管采用人工倒装焊接工艺,肖特基二极管在石英电路中的位置与仿真模型不一致;(2) 模型问题。肖特基二极管三维电磁模型中边缘整齐,而实际肖特基二极管边缘有毛刺,在模型中并未体现;(3) 石英电路。石英电路加工的线条与设计尺寸约有 1 μm 误差。以上三个问题直接导致了肖特基二极管在本振和射频端口的阻抗失配。下一步将通过优化设计,尽量增加对人工装配以及电路加工工艺的误差容忍度,优化二极管的阻抗匹配,实现更大带宽内具有更低的变频损耗。

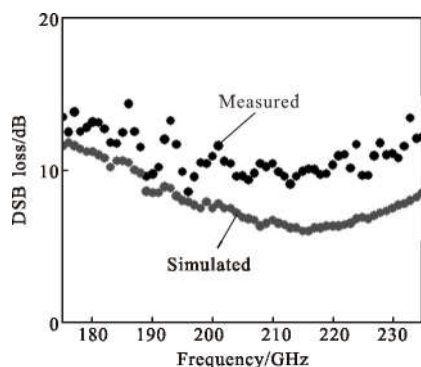


图 3 0.22 THz 混频电路变频损耗实测及仿真曲线

Fig.3 Measured and simulated frequency conversion loss curves of 0.22 THz mixing circuit

对于混频电路来讲,噪声温度是一个很重要的指标。基于冷热负载,对混频电路,测试了其在 216 GHz 的噪声温度,在本振功率为 5.7 mW 时,噪声温度 $T_{\text{DSB}}=1\ 200\ \text{K}$ 。

3 结 论

基于国产混频二极管,设计并实现了一款 0.22 THz 宽带混频电路,并对混频电路的变频损耗进行了测试,工作带宽 60 GHz 可有效工作于大气窗口频率 0.22 THz,双边带最佳变频损耗在 196 GHz 为 8.5 dB,变频指标和噪声指标可满足未来的无线高速通信系统。该混频电路的成功研制,也验证了国产太赫兹器件的优良性能。

参 考 文 献:

- [1] Siegel P H. Terahertz technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, 2002, 50(3): 910-928.
- [2] Wu Bin, Liu Zhiming, Wang Hengfei. Terahertz generation and transmission in CaAs waveguide structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3903-3906. (in Chinese) 吴斌, 刘志明, 王恒飞. 太赫兹波在砷化镉波导中的产生与传输[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 3903-3906.
- [3] Li Fan, Shi Yanli, Zhao Lusheng, et al. Simulation and calculation of I-V characteristics of GaAs MESFET in THz detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 40(7): 1205-1208. (in Chinese) 李凡, 史衍丽, 赵鲁生, 等. 太赫兹探测用 GaAs MESFET I-V 特性模拟计算[J]. *红外与激光工程*, 2013, 40(7): 1205-1208.
- [4] Peter H Siegel, Robert J Dingle, John E Oswald, et al. Measurements on a 215 -GHz subharmonically pumped waveguide mixer using planar back-to-back air-bridge schottky diodes [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1993, 41(11): 1913-1921.
- [5] Bertrand T, Alain M, Gerard B. A low-noise fixed tuned 300 -360 GHz sub-harmonic mixer using planar schottky diodes [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2005, 15(12): 865-867.
- [6] Zhang Bo, Chen Zhe, Fan Yong. 220 GHz sub-harmonic mixer [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2012, 41(3): 397-400. (in Chinese) 张波, 陈哲, 樊勇. 220 GHz 分谐波混频器研究[J]. *电子科技大学学报*, 2012, 41(3): 397-400.
- [7] Zhang Bo, Liu Ge, Yang Xiaofan, et al. Research on the front-end of 380 GHz radiometer[J]. *Journal of Microwaves*, 2015, 31(S1): 26-29. (in Chinese) 张波, 刘戈, 杨晓帆, 等. 380 GHz 辐射计前端关键技术研究[J]. *微波学报*, 2015, 31(S1): 26-29.
- [8] Wang Junlong, Yang Dabao, Xing Dong, et al. Equivalent circuit model study of mixing diode with cut-off frequency of 5 THz[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0925001. (in Chinese) 王俊龙, 杨大宝, 邢东, 等. 5 THz 混频二极管等效电路模型研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0925001.
- [9] Räisänen A V, Choudhury D, Dengler R J, et al. A novel split-waveguide mount design for millimeter and submillimeter-wave frequency multipliers and harmonic mixers [J]. *IEEE Micro Guided Wave Lett*, 1993, 3(10): 369-371.