

5 THz 混频二极管等效电路模型研究

王俊龙¹, 杨大宝², 邢东¹, 梁士雄¹, 张立森¹, 赵向阳², 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: 采用电磁场和电路联合仿真, 基于直流测试和三维电磁建模仿真技术, 建立了截止频率 5 THz 的混频肖特基二极管的等效电路模型。重点研究了二极管的非线性结模型和外围结构三维电磁全波仿真模型, 构建了考虑实际电路形式的四端口三维电磁全波仿真模型。该等效电路模型可用于太赫兹低频段混频模块设计, 该模型的建立方法也为更高频段模型的建立提供了一种参考。基于该模型设计了一款 220 GHz 分谐波混频器, 在 192~230 GHz 宽带范围内, 双边带变频损耗小于 10 dB, 测试结果与仿真结果较为一致。

关键词: 太赫兹; 混频; 肖特基二极管; 模型

中图分类号: TN313.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0925001

Equivalent circuit model study of mixing diode with cut-off frequency of 5 THz

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

(1. National Key Laboratory of ASIC, Shijiazhuang 050051, China;
2. The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: An equivalent circuit model of mixing Schottky diode with cut-off frequency of 5 THz was reported based on DC measurement and 3-D electromagnetic (EM) simulation combined of EM simulator and circuit simulator. The model of nonlinear Schottky junction and 3-D periphery structure full-wave simulation model was researched carefully, the four-ports model considered real circuit topology was established. The equivalent circuit model can be used for design of mixers worked at the lower end of terahertz band, the methodology of this diode model was a reference of much more higher terahertz frequency. A sub-harmonic 220 GHz wideband mixer was designed based on the model, the double sideband conversion loss was less than 10 dB in the range of 192 GHz to 230 GHz, the measured result was well with the simulated result.

Key words: terahertz; mixing; Schottky diode; model

收稿日期: 2016-01-10; 修订日期: 2016-02-15

作者简介: 王俊龙(1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事 THz 固态电子器件及模型方面的研究工作。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 GHz~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^[1-4]。

在太赫兹应用例如通信、雷达、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 基的肖特基二极管作为非线性下变频器件,用以实现将高频太赫兹波段换到中频频段。在微波毫米波混合集成电路设计中,当射频器件的物理尺寸小于工作波长的三十分之一时,射频器件可以使用集总参数等效电路模型来表征。在毫米波和太赫兹频段,射频器件的物理尺寸与电磁波长可比拟,尤其是进入太赫兹频段,射频器件分布效应十分明显。文中所研究的射频器件是肖特基二极管,在太赫兹频段,肖特基二极管的参数需要考虑频率的分布效应,尤其是寄生参量。肖特基二极管建模是毫米波以及太赫兹非线性器件先进设计方法的重要组成部分。目前国际上研究肖特基二极管模型主要有基于蒙特卡洛模型法^[5]以及基于三维电场场仿真的等效电路模型法^[6-9]。蒙特卡洛模型法建立的二极管模型相对等效电路更加精准,但是计算量以及计算方法较为复杂,国际上研究的较少,基于等效电路模型研究肖特基二极管,由于方法较为简单,计算量小,模型较为准确,受到了更为广泛的关注。

1998年,美国维吉尼亚大学 Hesler JL 在其博士论文^[6]中首次提出了基于微探针的二极管三维建模方法,并在此基础上设计了 585 GHz 基波混频器^[7-8],双边带变频损耗为 7.3 dB,噪声温度为 2 380 K。2005年,法国巴黎天文台 Thomas B 开展了反向并联二极管建模研究,并设计了 330 GHz 次谐波混频器^[9],其最小双边带变频损耗达到 5.7 dB。目前 Hesler JL 所在的 VDI 公司和 Thomas B 工作过的美国喷气实验室,均在毫米波及太赫兹非线性器件研制上处于世

界领先地位。

二极管模型是太赫兹频段次谐波混频器和倍频器仿真设计的核心问题,准确的二极管模型是模块设计的基本依据。文中基于肖特基二极管热电子发射模型以及真实的半导体物理结构分析,开展肖特基二极管建模研究,建立其在太赫兹频段的等效电路模型^[6]。

THz 频段应用的肖特基二极管,可以分为非线性肖特基结和二极管外围结构两个主要部分,肖特基二极管寄生参量的分布效应可以通过对三维电磁全波仿真模型进行仿真,提取寄生参数来表征。文中采用非线性结和线性寄生相结合的方法,针对研制的高截止频率肖特基混频肖特基二极管,建立其在太赫兹低频段的等效电路模型。

1 肖特基二极管模型建立

非线性肖特基结的物理尺寸通常在微米量级,远小于工作波长,肖特基结的高频效应主要集中在其串联电阻 R_s 上。Hesler 计算了 VDI 肖特基二极管的串联电阻的高频效应,结果显示在频率不太高的时候高频效应并不明显^[5](在直流测量时 $R_s=14 \Omega$,在高频 585 GHz 时候 $R_s=15.9+j3.5\Omega$)。因此在 100~500 GHz 太赫兹低端频率范围内,通过直流测试方法得到的二极管参数应该可以较好地表征肖特基结在高频下的特性。

文中非线性肖特基结使用集总等效电路模型进行表征。按照 Maas 的二极管理论,通过串联电阻 R_s 、理想化因子 n 、饱和电流 I_s 、开启电压 V_f 、零偏置结电容 C_0 五个参数,就可以建立肖特基结集总等效电路模型,这些参数可以从直流测试和简单计算而得出。

文中所建立的混频肖特基二极管模型采用设计制造的混频肖特基二极管,二极管结构形式为反向并联肖特基二极管对,该形式二极管可有效应用于太赫兹频段的谐波混频器,常用于太赫兹频段的分谐波混频器。

混频肖特基二极管采用典型的 N⁻/N⁺外延结构,肖特基阳极结为圆形,直径为 1.3 μm ,肖特基 N⁻外延层掺杂浓度为 $2\text{e}17 \text{ cm}^{-3}$,厚度为 100 nm, N⁺掺杂浓度为 $5\text{e}18 \text{ cm}^{-3}$,厚度为 2 μm 。

采用半导体参数测试仪对制作出的混频肖特基

二极管进行了直流参数提取,图 1 为混频肖特基二极管实测 $I-V$ 曲线。

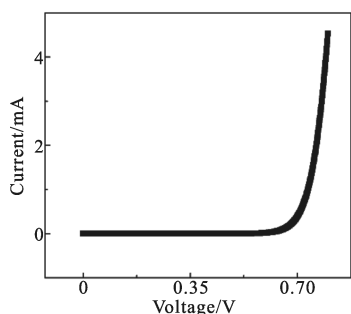


图 1 混频肖特基二极管 $I-V$ 测试曲线

Fig.1 Measured $I-V$ curves of mixing Schottky diode

肖特基二极管 $I-V$ 曲线采用电压扫描,记录流过二极管的电流获得,但是直接读取 $I-V$ 测试数据,会导致提取的肖特基结参数存在读取误差。为了得到肖特基结更为准确的数据,采用固定通过肖特基二极管的电流,记录肖特基二极管两端电压的方式来记录并计算二极管的非线性结参数。

肖特基结的开启电压 V_f ,定义为当流过二极管的正向电流为 $10\ \mu\text{A}$ 时,二极管两端的电压。实测数据显示,开启电压 V_f 为 $620\ \text{mV}$ 。

固定通过肖特基二极管的电流为 $10\ \mu\text{A}$ 和 $100\ \mu\text{A}$,通过计算两个电流下二极管两端的电压差,可以快速得到二极管的理想因子 n 。实际测试显示,当正向电流为 $100\ \mu\text{A}$ 时,两端电压为 $693\ \text{mV}$ 。根据公式(1)计算得到理想因子 $n=1.22$

$$n = \frac{V(100\ \mu\text{A}) - V(10\ \mu\text{A})}{70\ \text{mV}} \cdot 1.17 \quad (1)$$

描述肖特基结一般采用热电子发射模型进行描述,根据热电子发射模型,肖特基二极管两端电压和电流有以下关系:

$$I = I_s \left\{ \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{nKT}\right] - 1 \right\} \quad (2)$$

式中: I_s 是二极管的饱和电流; q 是电子电量; K 是玻耳兹曼常量; T 是二极管结温,室温下 $T=300\ \text{K}$ 。当流过二极管的电流为 $10\ \mu\text{A}$ 时,二极管两端电压为 $620\ \text{mV}$,可以根据公式(2)计算得到二极管的饱和电流 I_s ,由于电流较小,此时串联电阻引起的电压降可以忽略不计,通过计算,二极管的饱和电流为 $I_s=32.4\ \text{fA}$ 。

肖特基二极管的串联电阻 R_s 主要由 N-外延层中未耗尽的部分,扩展电阻以及欧姆接触电阻构成。串联电阻 R_s 与电流有关,文中串联电阻 R_s 的大小是在 $2\ \text{mA}$ 下提取,可以根据公式(3)计算得出:

$$R_s = \frac{V(2\ \text{mA}) - V(200\ \mu\text{A}) - \Delta V}{(2 - 0.2)\ \text{mA}} \quad (3)$$

其中肖特基二极管在 $200\ \mu\text{A}$ 和 $2\ \text{mA}$ 电流下,两端的电压分别为 $714\ \text{mV}$ 和 $797\ \text{mV}$,经计算可以得到串联电阻 $R_s=5.6\ \Omega$ 。

肖特基二极管结电容可等效为平板电容器,结电容由公式(4)计算得出:

$$C_{j0} = \frac{\epsilon_s A}{\omega_d} + 3 \frac{\epsilon_s A}{D} \quad (4)$$

式中: ϵ_s 代表 GaAs 材料的介电常数; A 代表肖特基结的结面积; D 代表肖特基结的直径; ω_d 代表耗尽层的宽度。由公式(5)计算得出:

$$\omega_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \psi_{bi}}{qN_d}} \quad (5)$$

式中: ψ_{bi} 是内建电势,文中取 $0.8\ \text{eV}$; N_d 是 N-外延层的掺杂浓度,文中耗尽层宽度 ω_d 为 $75\ \text{nm}$,结电容 $C_{j0}=2.5\ \text{fF}$ 。

表征肖特基二极管一个很重要的品质因子是截止频率 f_c ,截止频率 f_c 的定义为:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s C_t} \quad (6)$$

式中: C_t 是二极管在零偏下的总电容,总电容可由 C-V 测试仪在 $1\ \text{MHz}$ 频率下提取,二极管的总电容 $C_t=5.7\ \text{fF}$ 。肖特基二极管的截止频率 $f_c=5\ \text{THz}$,器件的最高工作频率一般可达到截止频率的十分之一,该混频二极管最高工作频率可达 $500\ \text{GHz}$ 。

详细的二极管非线性结参数如表 1 所示。

表 1 肖特基二极管结参数

Tab.1 Parameters of Schottky diode junction

| Series resistance R_s/Ω | Ideal factor n | Saturation current I_s/fA | Turn-on voltage V_f/V | Zero-bias capacitance C_{j0}/fF | Cut-off frequency f_c/THz |
|--------------------------------|------------------|------------------------------------|--------------------------------|--|------------------------------------|
| 5.6 | 1.22 | 32.4 | 0.62 | 2.5 | 5.0 |

在国产肖特基二极管制作出来之前,国内科研机构多是基于对国外器件的半导体层结构进行反演来建立混频二极管器件在太赫兹频段的三维电磁全波仿真模型。文中所描述的三维电磁模型根据器件的

设计版图,并考虑实际流片工艺,结合扫描电镜测试的方法对混频肖特基二极管进行了三维模型建立。

图 2 为建立的混频肖特基二极管三维电磁全波仿真模型。

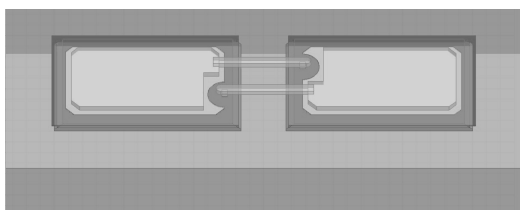
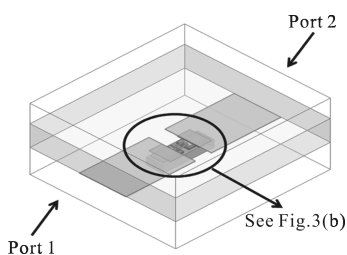


图 2 混频肖特基二极管三维电磁模型

Fig.2 3-D EM model of mixing Schottky diode

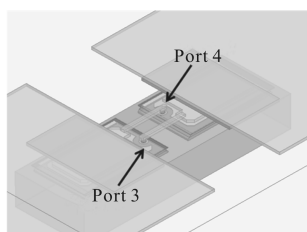
在建立三维电磁模型的过程中,对用于仿真的材料属性进行了近似,主要是针对二极管重掺杂 GaAs 层近似为理想导体材料,其余材料均按照真实材料进行材料分配。在电磁场仿真软件中,通过在肖特基结处设置同轴探针波端口,可以提取肖特基二极管外围结构的寄生参量 S 参数包。

建立的二极管三维电磁模型在用于电路设计时,需考虑实际的电路形式,图 3 给出了一种悬置微带电路模型,考虑了实际应用中需要焊接导电胶,建立的四端口三维电磁仿真模型如图 3 所示。



(a)四端口仿真三维电磁模型

(a) 3-D four ports EM model



(b)倒装肖特基混频二极管

(b) Flip-chipped mixing Schottky diode

图 3 二极管三维电磁模型

Fig.3 3D EM model of diodes

在电磁场仿真软件中,可以提取无源外围结构寄生参量的 S 参数包,通过将外围结构寄生参量 S 参数包导入电路设计软件,结合之前建立的二极管非线性结模型,最终在电路设计软件中建立起混频肖特基二极管的等效电路模型,如图 4 所示。

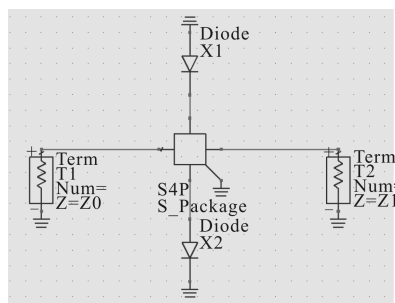


图 4 肖特基二极管等效电路模型

Fig.4 Equivalent circuit model of Schottky diode

2 讨论及分析

基于流片版图和实际工艺建立的三维电磁全波仿真模型是极为精准的,在应用模型时,需结合实际电路,合理设置同轴探针。建立模型并且正确使用模型,才能保证在太赫兹频段制作出高性能的混频模块。考虑到二极管的截止频率为 5 THz,因此模型的适用最高频率为 500 GHz,可有效应用的频率范围为 100~500 GHz。

基于该模型,设计了一款 220 GHz 宽带混频器,并对混频器进行了性能测试,在测试过程中,中频固定为 10 MHz 方式,测试结果如图 5 所示。测试结果显示混频器在 192~230 GHz 共 38 GHz 带宽内,DSB 变频损耗小于 10 dB,在 192~240 GHz,48 GHz 带宽

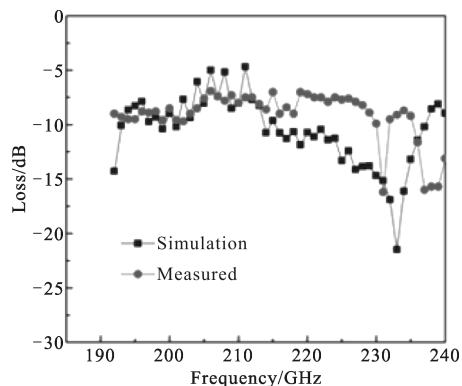


图 5 220 GHz 混频器实测与仿真曲线

Fig.5 Measured and stimulated curves of 220 GHz mixer

内,DSB 变频损耗小于 16 dB。仿真显示在 233 GHz 存在一个较大的谐振点,测试谐振点出现在 231 GHz,该谐振点是由于射频端口过度设计过程中引入的谐振。仿真过程中在 200 GHz 附近有较小谐振,是由于在整体仿真过程中匹配电路设计部分直接采用电路软件中模型,并未导入电磁场软件进行仿真导致。测试结果表明在 212~229 GHz 变频损耗均优于仿真结果,是由于在仿真过程中,本振功率设计较小,导致二极管开启效果不好,在测试过程中,本振功率较大,二极管完全开启。由于测试条件所限,并未对混频器的噪声性能进行测试。测试结果与仿真结果基本一致,证明模型是有效的。

3 结论

文中通过场路联合仿真的方法,结合实测数据,建立了混频肖特基二极管在太赫兹低频段的等效电路模型,该模型的建立可为太赫兹低频段的混频器设计提供模型保障,基于该混频肖特基二极管等效电路模型,有望在 100~500 GHz 频段内分段实现低变频损耗的混频器。

参考文献:

- [1] Siegel P H. Terahertz technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, 2002, 50(3): 910-928.
- [2] Liu Jia, Fan Wenhui. Investigation of various fabrics in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1537-1541.(in Chinese)
刘佳,范文慧. 常见服装面料的太赫兹光谱研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1537-1541.
- [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*, 2011, 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, 2011, 40(7): 1205-1208.
- [4] Li Hongguang, Yang Hongru, Xue Zhanli, et al. Terahertz Radiation detection of low temperature blackbody based on narrowband spectral filter method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1410-1416. (in Chinese)
李宏光,杨鸿儒,薛战理,等. 窄带光谱滤光法探测低温黑体太赫兹辐射[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1410-1416.
- [5] Lipsey R, Jones S, Jones J, et al. Monte Carlo harmonic-balance and drift-diffusion harmonic-balance analyses of 100-600 GHz Schottky barrier varactor frequency multipliers [J]. *IEEE, Electron Devices*, 1997, 40(11): 1843-1850.
- [6] Hesler J L. Planar Schottky diodes in submillimeter-wavelength wave-guide receivers [D]. Charlottesville: Vniveristy of Virginia, 1996.
- [7] Hesler J L, Hall W R, Crowe T W, et al. Fixed-tuned submillimeter wavelength waveguide mixers using planar schottky-barrier diodes [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, 45(5): 653-658.
- [8] Hui K, Hesler J L, Kurtz D S, et al. A micromachined 585 GHz Schottky mixer [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 2000, 10(9): 374-376.
- [9] Thomas B, Maestrini A, Beaudim G. A low-noise fixed-tuned 300-360 GHz sub-harmonic mixer using planar Schottky diodes [J]. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2005, 15(12): 865-867.