

文章编号: 2095-4980(2016)05-0653-04

一种 D 波段低噪声放大器芯片设计

刘 杰^{a,b}, 蒋 均^{a,b}, 石向阳^{a,b}, 田遥岭^{a,b}

(中国工程物理研究院 a. 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999; b. 微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200)

摘 要: 提出了一种晶体管器件模型修正方法, 校准了Ommic公司D007IH工艺中D波段晶体管模型和D波段共面波导传输线电路模型。该校准方法中通过与共面波导(CPW)三维模型仿真结果的曲线拟合, 确定了D波段传输线电路模型的介电常数; 通过与CGY2191UH芯片的S参数测试结果拟合, 修正了晶体管器件模型。为了验证了设计方法的有效性, 基于修正模型设计了一款低噪声放大器芯片, 仿真结果表明, 工作频率为110 GHz~170 GHz, 增益大于29 dB, 噪声系数小于6 dB。

关键词: D波段; 低噪声放大器; 单片微波集成电路; 改变结构高电子迁移率晶体管(mHEMT); 参数提取; D007IH工艺

中图分类号: TN911

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0653

Design of D-band LNA chip

LIU Jie^{a,b}, JIANG Jun^{a,b}, SHI Xiangyang^{a,b}, TIAN Yaoling^{a,b}

(a. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

b. Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China)

Abstract: A novel method of modified transistor model is introduced. The D-band transistor models of OMMIC D007IH and D-band Coplanar Waveguide(CPW) model are modified. The method determines dielectric constant of CPW model by simulation curve fitting. The value of C_{GD} in the transistor models is modified by curve fitting of CGY2191UH chip S-parameter measurement. A D-band Low Noise Amplifier(LNA) die is designed by the modified transistor model. The simulation results show that the LNA obtains a gain more than 29 dB in 110 GHz~170 GHz range and the noise figure is lower than 6 dB. The results validate the proposed method.

Key words: D-band; Low Noise Amplifier; Monolithic Microwave Integrated Circuit; Metamorphic High Electron Mobility Transistor(mHEMT); parameters extraction; D007IH

D 波段(0.11 THz~0.17 THz)被认为是低频段的太赫兹波, 是新的频段资源, 在太赫兹雷达、通信、天文、医学诊断、环境科学和材料检测等领域都有广阔的发展前景。在太赫兹应用系统的研究中, 各类核心组件的研制是关键, 研究重点之一就是不同功用的固态集成放大器^[1]。随着半导体工艺技术的进步, 国内外开发出功能不同的固态集成放大器^[2-6], 其中大部分是太赫兹低噪声放大器(LNA)。这些芯片的设计方法和传统低频射频芯片的设计一样, 需要准确的电路模型。近年来, 半导体工艺突飞猛进, 晶体管器件的尺寸持续减小。晶体管器件模型的准确性问题也将显现。对于现有大部分芯片加工厂商所能提供的晶体管器件模型, 其有效性只能保证到 100 GHz 以下。如果直接采用芯片代工厂商提供的器件模型进行设计, 会使芯片实际性能严重偏离设计。一般的修正方法是, 通过制作晶体管器件测试单元, 进行测试与验证工作, 以此来确定晶体管器件模型的偏差度并对器件模型进行必要的修正。这种修正方法需要去除包括输入输出管脚、片上连接线、衬底在内的许多外部干扰。因此为了能够得到晶体管器件的本征参数, 需要高精确度的测试平台和复杂的测试流程。

本文提出了一种晶体管器件模型修正方法。该校准方法和传统修正方法不同, 无需高精确度的测试平台和复杂的测试流程, 具体方法是: 通过与 CGY2191UH 芯片的 S 参数测试结果拟合, 修正了晶体管器件模型。基于修正模型设计了一款低噪声放大器芯片来验证方法的可行性, 仿真结果表明: 工作频率为 110 GHz~170 GHz, 增益大于 20 dB, 噪声系数小于 6 dB。

1 原理及方法

目标大部分的 D 波段低噪声放大器都是基于磷化铟高电子迁移率晶体管、砷化镓调制掺杂异质结场效应晶体管和砷化镓改性高电子迁移率晶体管技术^[7-8]。这是因为 III-V 族具有较高的电子迁移率,因此在高频具有更好的增益和噪声特性。相比磷化铟高电子迁移率晶体管,砷化镓调制掺杂异质结场效应晶体管发展得更加成熟,但是它的特性不适合设计高频低噪声放大器。砷化镓改性高电子迁移率晶体管的噪声特性可以匹敌磷化铟高电子迁移率晶体管,而且价格便宜,工艺成熟。一般来说,晶体管器件的截止频率可以表示为:

$$f_t \approx \frac{V_{sat}}{2\pi L_g} \quad (1)$$

式中: f_t 是截止频率; V_{sat} 是最大电子迁移速度; L_g 是沟道宽度。由式(1)可知,沟道宽度越小,截止频率越高。如果考虑到制作工艺,也可以得出这样的结论,截止频率越高的晶体管沟道宽度越小,因此在芯片上连接到晶体管的传输之间的距离也越近,其等效的高频寄生电容也更加明显。这也是高频晶体管器件模型需要修正的原因。

OMMIC D007IH 工艺的 mHEMT 具有 $0.07 \mu\text{m}$ 沟道宽度,截止频率达到 300 GHz,具有很好的噪声特性,而且是商用工艺。因此本文基于 D007IH 进行低噪声放大器的设计。图 1 是 mHEMT 的等效电路图。

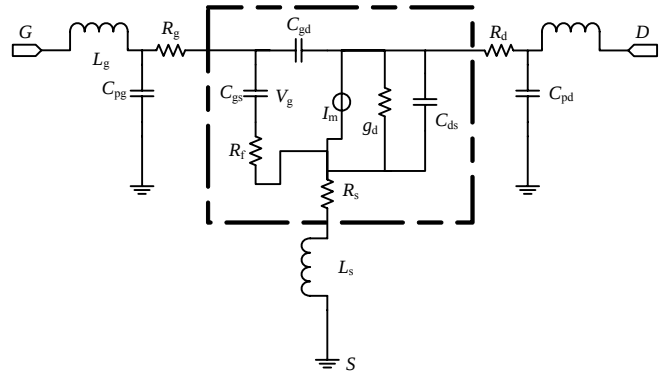


Fig.1 Small signal model of D007IH mHEMT
图 1 D007IH mHEMT 的小信号模型

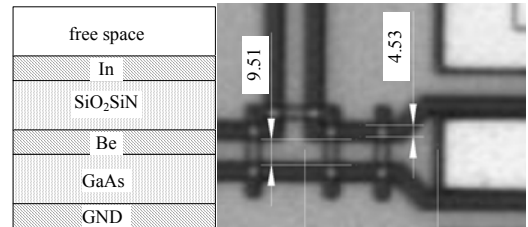
从小信号电路模型一般分为本征部分和非本征部分。虚线框内的电路是本征部分,虚线框外的电路是非本征部分。本征元件与直流偏置点相关,可以通过测量得到准确值。然而非本征部分的电路是和偏置点没有直接关系的,主要和芯片版图中晶体管连接结构有关。由于 D007IH mHEMT 管子结构小,因此在栅和漏之间会有一个耦合电容。这个耦合电容在高频时将严重影响模型的准确性。

本文所提出的修正方法就是通过增加晶体管栅极和漏极的耦合电容 C_{gd} 来修正 D007IH mHEMT 的小信号模型。具体的过程是:通过对 OMMIC 公司的 CGY2191UH 芯片进行反向建模,即通过电子显微镜测试出芯片传输线的尺寸,得到芯片无源电路版图,在 ADS 软件中建立芯片仿真模型,通过在管芯模型上增加 C_{gd} ,进行芯片整体仿真。将仿真结果和芯片的工厂测试结果比对,最终确定等效电容值。该方法无需高精度的测试平台和复杂的测试流程,而且避免了直接提参带来的不确定性,只要借助芯片的测试结果,能准确地修正 D007IH 70 nm mHEMT 在 D 波段晶体管的小信号模型。

2 共面波导模型修正

D007IH 工艺提供 In 和 Be 两层金属层,主要有 2 层介质: $0.945 \mu\text{m}$ 的 SiO_2SiN 混合介质层和 $100 \mu\text{m}$ 的 GaAs 层,见图 2(a)。通过电镜测量 Ommic CGY2191UH 的 CPW 传输线尺寸,见图 2(b),测量结果为 $W=9.5 \mu\text{m}$ 和 $G=4.5 \mu\text{m}$ 。基于有限元法构建 CPW 三维模型,仿真结果见图 3。

D007IH 工艺设计包中 CPW 的 D 波段传输线电路模型不准确,主要是因为 SiO_2SiN 混合介质层和 GaAs 层等效介电常数不准确。本文通过三维模型仿真结果和基于工



(a) frame of process (b) photograph of proposed CPW on chip
Fig.2 Frame of process and photograph of proposed CPW
图 2 工艺结构图及片上 CPW 电镜照片

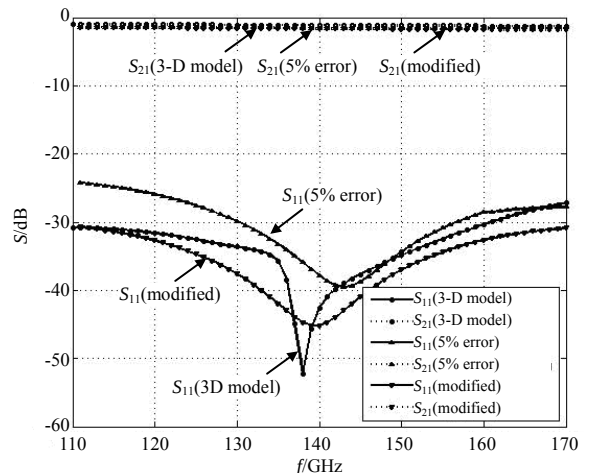


Fig.3 Simulation results of modified CPW model
图 3 修正后 CPW 电路的仿真结果

艺设计包的电路模型仿真结果进行比对,最后拟合出等效介电常数为 $7+(0.15 \times G \times 10^6)$ 。图3是三维模型仿真结果 $S_{11}(3D)$ 和 $S_{21}(3D)$, 工艺设计包修正后电路模型仿真结果 $S_{11}(\text{修正})$ 和 $S_{21}(\text{修正})$; 同时考虑到电镜下测量尺寸的误差,在三维模型加入 5% 的随机误差,仿真结果为 $S_{11}(5\% \text{测量误差})$ 和 $S_{21}(5\% \text{测量误差})$ 。通过对比可以看出 PDK 修正后电路模型仿真结果和三维模型仿真结果接近,尤其是谐振点位置都在 138 GHz 处,且测试尺寸的误差影响不大。

3 器件模型修正

CGY2191UH 是一款 Ommic 公司基于 D007IH 工艺研制的 LNA, 工作频率为 100 GHz~160 GHz。在探针平台上测试,得到了小信号 $S_{21}(\text{测试})$ 及 $S_{22}(\text{测试})$, 见图 4(b)。在电子显微镜下,可以得到 CGY2191UH 的结构尺寸。在 ADS 中可以建立 CGY2191UH 芯片模型,采用未修正晶体管模型进行仿真,得到了小信号 $S_{21}(\text{未修正})$ 及 $S_{22}(\text{未修正})$ 。与测试结果对比,可以看出未修正晶体管模型不能体现真实的特性,因此必须修正器件模型。将未修正晶体管模型当成“黑盒子”,在栅和漏之间增加等效电容 C_{gd} , 见图 4(a)。通过迭代仿真和对比,可以确定等效电容的值为 -6 fF。将修正后的 q 晶体管模型代入 CGY2191UH 芯片模型,得到了小信号 $S_{21}(\text{修正})$ 及 $S_{22}(\text{修正})$ 。比较修正后的仿真结果和测试结果,可以看出修正后晶体管模型基本可以体现晶体管真实的特性,因此可以用该修正后晶体管器件模型进行 D 波段低噪声放大器芯片的设计。

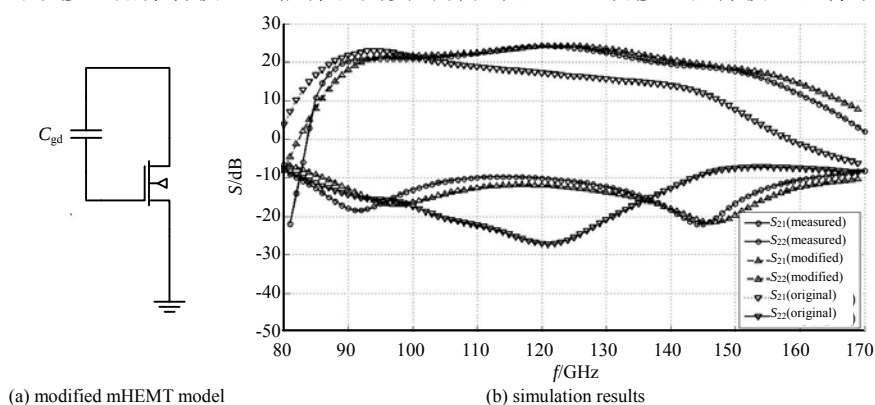


Fig.4 Modified mHEMT model and simulation results

图4 修正后 mHEMT 器件模型及仿真

4 D 波段低噪声放大器芯片设计

基于 D007IH 工艺,采用传统共源低噪放设计的方法,设计了一个 6 阶低噪放放大器芯片,见图 5,仿真结果见图 6。仿真结果表明: D 波段低噪声放大器芯片的 3 dB 工作频带为: 110 GHz~170 GHz,带内增益 ≥ 29 dB,带内噪声系数 ≤ 6 dB。

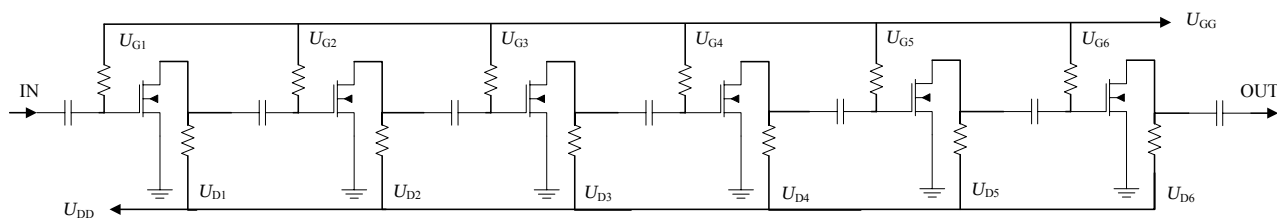


Fig.5 Schematic of D-band LNA

图5 D 波段 LNA 原理图

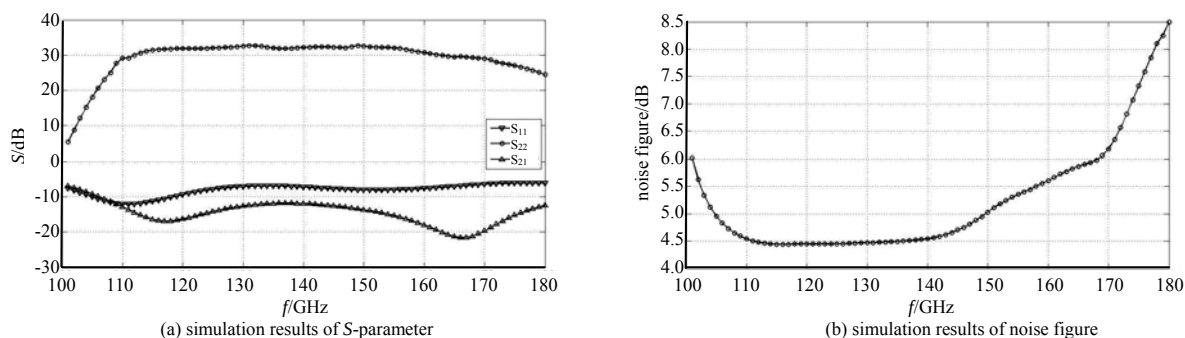


Fig.6 Simulation results of D-band LNA

图6 D 波段低噪声放大器仿真结果

5 结论

本文提出了一种晶体管器件模型修正方法,该校准方法和传统修正方法不同,无需高精度的测试平台和复杂的测试流程。该校准方法中通过与共面波导三维模型仿真结果的拟合,确定了D波段传输线电路模型的介电常数;通过与CGY2191UH的S参数测试结果拟合,修正了晶体管器件模型在D波段栅漏耦合电容值。为验证设计方法的有效性,基于修正模型设计了一款低噪声放大器芯片,仿真结果表明:工作频率为110 GHz~170 GHz,增益大于29 dB,噪声系数小于6 dB。

参考文献:

- [1] 张健,邓贤进,王成,等. 太赫兹高速无线通信:体制、技术与验证系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1):1-13. (ZHANG Jian,DENG Xianjin,WANG Cheng,et al. Terahertz high speed wireless communications: systems, techniques and demonstrations[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information, 2014,12(1):1-13.)
- [2] SAMOSKA L A. An overview of solid-state integrated circuit amplifiers in the submillimeter-wave and THz regime[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):9-24.
- [3] TESSMANN A,LEUTHER A,LOESCH R,et al. A metamorphic HEMT S-MMIC amplifier with 16.1 dB gain at 460 GHz[C]// 2010 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Monterey,CA,United States:IEEE, 2010:245-248.
- [4] URTEAGA M,SEO M,HACKER J,et al. InP HBT integrated circuit technology for terahertz frequencies[C]// 2010 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Monterey,CA,United states: IEEE, 2010:1-4.
- [5] SAMOSKA L,FUNG A,PUKALA D,et al. On-wafer measurements of S-MMIC amplifiers from 400-500 GHz[C]// 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium.Baltimore,MD: IEEE, 2011:1-4.
- [6] RADISIC V,DEAL W R,LEONG K M K H,et al. A 10 mW submillimeter wave solid state power amplifier module[J]. Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010,58(7):1903-1909.
- [7] DU Shunyong,GUO Deyong,LUO Xiaobin,et al. Design of 8 mm Ka-band broadband LNA[C]// 2013 IEEE International Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics. Qingdao,China: IEEE. 2013:266-269.
- [8] WANG Yawei,YU Weihua. Design and simulation of a W-band broadband Low Noise Amplifier[C]// 2013 IEEE International Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics. Qingdao,China: IEEE. 2013:119-122.

作者简介:



刘 杰(1981-),男,江西省全南县人,在读博士研究生,主要研究方向为太赫兹成像系统及组件.email:liujie2003_2006@163.com.

蒋 均(1987-),男,重庆市人,在读博士研究生,主要研究方向为太赫兹组件.

石向阳(1990-),男,河南省许昌市人,在读博士研究生,主要研究方向为太赫兹组件.

田遥岭(1991-),男,四川省简阳市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为太赫兹组件.