

文章编号: 2095-4980(2016)04-0487-05

D 波段固态放大器模块设计

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

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

摘 要: 重构了 Ommic 公司 CGY2191UH 芯片模型, 建立了一个精确 D 波段放大器模块模型; 并且设计和加工了一种 D 波段放大器模块验证了模型的准确性。D 波段放大器模块模型包括多节波导模型、共面波导-矩形波导过渡模型、金丝键合线等效电路模型以及 CGY2191UH 芯片模型。通过对模型的分析并基于目前国内成熟工艺, 设计和加工了一种 D 波段放大器模块。测试结果表明, 该模块在 110 GHz~140 GHz 增益大于 4.5 dB, 其中最大增益在 122 GHz 为 10 dB。增益测试曲线和模型仿真结果吻合, 证明了模型的有效性。

关键词: D 波段; 放大器模块; 太赫兹单片集成电路; D007IH 工艺; 石英微带电路

中图分类号: TN911

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201604.0487

Design of D-band amplifier module

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

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Microsystem and Terahertz Research Center,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The Ommic CGY2191UH chip model is reconstructed to establish a D-band amplifier module model. A D-band amplifier module is designed and fabricated to verify the accuracy of the model. The D-band amplifier module model consists of two waveguide models, two coplanar waveguide-rectangular waveguide transition models, two gold bonding wire models of the equivalent circuit model and a CGY2191UH chip. Based on current domestic technology, a D-band amplifier module is designed and fabricated. The test results show that the module would obtain a gain greater than 4.5 dB in 110 GHz-140 GHz, and the biggest gain at 122 GHz is 10 dB. Gain test curves agree with the model simulation results well, which validates the model.

Key words: D-band; amplifier module; Terahertz Monolithic Integrated Circuit; D007IH; quartz microstrip circuit

D 波段指的是 0.11 THz~0.17 THz 的电磁波, 是一个新的频段资源, 在雷达、通信、天文、医学诊断、环境科学、材料检测等领域都有广阔的发展前景^[1]。目前在该频段的研究重点之一就是固态集成放大器及模块^[2]。该频段虽然已经有商用放大器管芯, 如 Ommic 公司、HRL 公司以及 Teledyn 公司都有相应的放大器芯片, 但是管芯封装难度很大, 商用放大器模块价格依然非常昂贵。美国国防部先进研究计划署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)2012 年制定的 DAHI(Diverse Accessible Heterogeneous Integration)计划中, 已有相应的项目在开展封装这方面的研究^[2-7], 目标是降低封装中寄生参数影响。因此 D 波段放大器模块的设计需要建立准确的模块模型, 分析封装引入的寄生参数, 并在设计中降低其影响。

模块在封装分类中可以认为是三级封装, 包括了管芯、母板和腔体。目前对于 D 波段放大器模块一般实现的方案是“波导到平面电路板+金丝键合+管芯+金丝键合+波导到平面电路板”^[8-9]。因此模块模型包括了波导模型、共面波导-矩形波导过渡模型、金丝键合线等效电路模型以及管芯模型。本文选择 Ommic 公司 CGY2191UH 芯片作为管芯。CGY2191UH 采用的是 D007IH 工艺, 工作频率为 100 GHz~160 GHz, 带内增益为 20 dB, 采用共面波导(Coplanar Waveguide, CPW)设计。目前 Ommic 公司不提供 CGY2191UH 芯片模型。

本文重构了 Ommic 公司 CGY2191UH 芯片模型, 通过与测试结果比对, 验证模型的准确性。基于目前国内

成熟工艺构建了金丝键合线等效电路模型,讨论了键合线中寄生参量的影响。设计了具有宽带特性的多节波导、共面波导-矩形波导过渡电路和结构。根据模块模型,设计和加工了一种D波段放大器模块。

1 原理及方法

对于频率高于70 GHz的MMIC芯片封装,通常是将MMIC芯片中的微带传输线或共面波导模式转换为波导模式。波导组件互连比较便捷。D波段的芯片,可以采用一个分立的过渡电路(如波导探针)来实现波导变换,通常波导中是TE₁₀模式,一般采用E面探针来实现^[9]。

从CGY2191UH芯片的产品资料可知,芯片采用的是共面波导传输线;其在片测试时,芯片底部不直接接触载片台,而是用GaAs基片垫在芯片底部隔离开载片台,以避免传输线产生高阶模式。因此本文采用D波段放大器模块实现的方案是“波导到CPW+金丝键合+管芯+金丝键合+CPW到波导”,原理框图如图1所示。

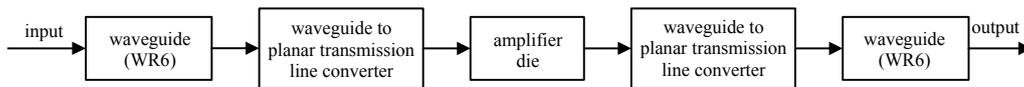


Fig.1 Schematic of D-band amplifier module
图1 D波段放大器模块原理图

2 Ommic公司CGY2191UH芯片模型重构

CGY2191UH芯片基于Ommic公司D007IH工艺设计和制作。D007IH工艺的GaAs MHEMT具有0.07 μm的沟道宽度,截止频率达到300 GHz。D007IH工艺提供in和be两层金属层,主要有2层介质,0.945 μm的SiO₂/SiN混合介质层以及100 μm的GaAs层,如图2(a)所示。通过电镜拍摄Ommic CGY2191UH的照片,如图2(b)所示。

因此,可以得到CGY2191UH芯片传输线、电阻、电容以及晶体管的大小等尺寸。由于D007IH的PDK主要针对的是毫米波,对于100 GHz以上的晶体管模型不准确。因此必须修正晶体管模型,通过实验G和D之间增加等效电容值减小6 fF后,芯片模型仿真结果与测试结果吻合。图3的S₂₁(测试)及S₂₂(测试)是芯片在探针平台上测试的结果,S₂₁(修正)及S₂₂(修正)是修正晶体管模型的仿真结果。

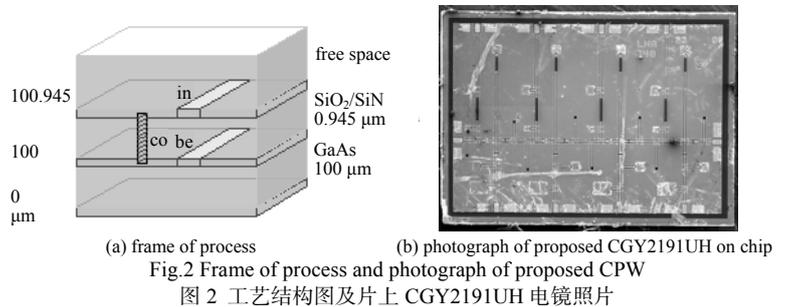


Fig.2 Frame of process and photograph of proposed CPW

图2 工艺结构图及片上CGY2191UH电镜照片

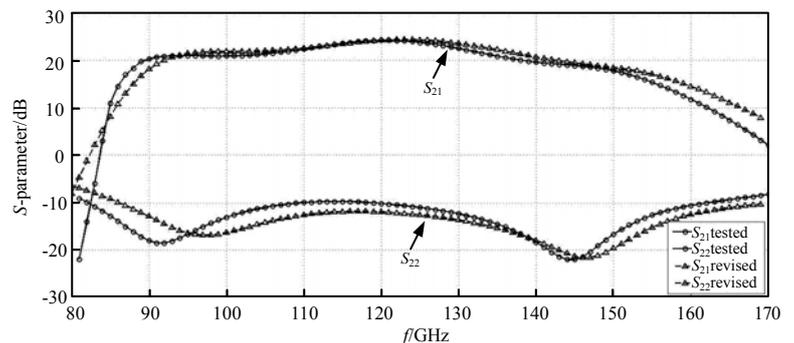


Fig.3 Measurement and simulation results

图3 仿真结果与测试结果对比

3 宽带波导-CPW变换器设计

波导-CPW变换器的一端是标准矩形波导,传输TE₁₀模;另一端是准平面传输线,传输横电磁波(Transverse Electro Magnetic, TEM)模,此类变换器可采用谱域方法进行分析。标准WR6波导的Z_{OV}为495.8 Ω,很难在较宽的工作频带内匹配到50 Ω。因此本文将波导-CPW变换器设计成多节波导-CPW变换器,利用多节波导结构将Z_{OV}降低为240.1 Ω,从而提高变换器的带宽。

3.1 多节波导结构设计

在D波段放大器模块的每一部分设计都要避免引入寄生参量。宽带输入输出能尽量减小寄生参量。多节波导结构由多个四分之一长度的波导构成,其原理是利用多个四分之一波长结构进行宽带阻抗变换,此类变换器可采用小反射理论进行计算^[10],可由式(1)表示。

$$\Gamma(\theta) = A \sum_{n=0}^N C_n^N e^{-2jn\theta} \tag{1}$$

式中： $\Gamma(\theta)$ 是总反射系数； $A = \frac{1}{2^{N+1}} \ln \frac{Z_L}{Z_0}$ 是常数， Z_0 和 Z_L 分别为输入、输出阻抗； $C_n^N = \frac{N!}{(N-n)!n!}$ 是二项式系数， N 为节数。如果定义 Γ_m 为设计通带内可容忍的反射系数最大值，根据二项式变换器的带宽定义：

$$\frac{\Delta f}{f} = 2 - \frac{4}{\pi} \arccos \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma_m}{|A|} \right)^{1-N} \right] \tag{2}$$

明确设计的带宽、最大反射系数、输入输出阻抗，通过式(1)和式(2)就能计算出 N ， A ，并最终得到每个节的阻抗值。本文设计多节波导结构的工作频率为110 GHz~170 GHz； Γ_m 为0.05(即 $S_{11} = -25$ dB)； Z_L 为240.1 Ω ， Z_0 为495.8 Ω 。因此可以得到多节波导模型的尺寸，如表1所示。

表1 多节波导模型的尺寸

Table1 Dimensions of multi-section waveguide model

$b_0/\mu\text{m}$	$b_1/\mu\text{m}$	$l_1/\mu\text{m}$	$b_2/\mu\text{m}$	$l_2/\mu\text{m}$	$b_3/\mu\text{m}$
0.4	0.48	0.535	0.69	0.535	0.826

3.2 波导-CPW 结构设计

波导-CPW 结构可采用经典的谱域分析法计算。CPW 输入阻抗可以表示为探针长度 d 、探针宽度 W 、短路面长度 L 。但是谱域分析法只能计算出初始值，还需要采用数值计算方法对尺寸进行优化。本文选用500 μm 厚的石英基片，金层厚度为4 μm ，优化得到多节波导模型的尺寸，如表2所示。其中 W_0 和 L_0 是高阻线的宽和长。

表2 波导-CPW 结构的尺寸

Table2 Dimensions of waveguide-CPW

$W/\mu\text{m}$	$L/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$W_c/\mu\text{m}$	$W_p/\mu\text{m}$	$g/\mu\text{m}$	$W_0/\mu\text{m}$	$L_0/\mu\text{m}$
300	550	350	0.69	80	11	38	54

3.3 宽带波导-CPW 变换器建模及仿真

图4(a)所示为宽带波导-CPW 变换器原理图。其由多节波导结构和波导-CPW 结构构成。仿真结果如图4(b)所示，在112 GHz~170 GHz， S_{11} 优于-20 dB。

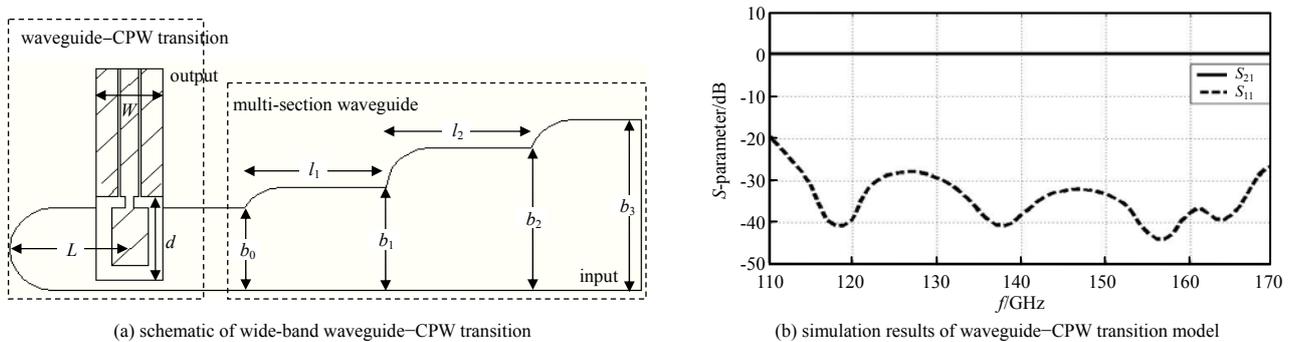


Fig.4 Schematic and simulation results of wide-band waveguide-CPW transition

图4 宽带波导-CPW 变换器原理图及仿真结果

4 金丝键合线等效电路建模

在封装工艺中，键合线、倒装芯片以及硅通孔(Through Silicon Via, TSV)技术是3种常见的电互连技术。而键合线性价比高且技术灵活，因此占据主导地位。从图5等效模型可以分析出，键合焊点等效出的寄生电容以及和金线等效出的寄生电感，形成了一个低通滤波响应，因此需要建模分析，设计键合工艺避开滤波响应的截止频率。

由于CGY2191UH芯片输入输出焊盘的宽度是30 μm ，因此基于目前国内工艺，键合线只能选择12.5 μm 直径金丝。由于宽带波导-CPW变换器的焊盘为80 μm ，等效的 C_1 很大，可以忽略不计。通过实验摸索，金线拱高小于10 μm ，拱距小于100 μm 时，金丝键合线低通滤波响应高于170 GHz，不会影响模块特性。

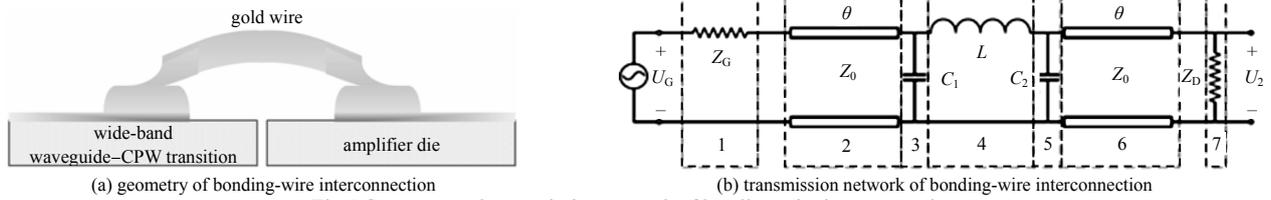


Fig.5 Geometry and transmission network of bonding-wire interconnection
图 5 金丝键合线的结构和电路模型

5 D 波段放大器模块设计及测试

基于构建的多节波导模型、共面波导-矩形波导过渡模型、金丝键合线等效电路模型以及 CGY2191UH 芯片模型, 本文使用高频结构仿真器(High Frequency Structure Simulator, HFSS)构建了模块的无源结构模型, 使用 ADS 构建了模块的有源结构模型, 并进行有源和无源模型的联合仿真。基于整体模型, 设计和加工了一种 D 波段放大器模块, 如图 6 所示。采用 D 波段矢量网络分析仪对模块进行测试, 测试结果如图 7 所示, 表明该模块在 110 GHz~140 GHz 增益大于 4.5 dB, 其中最大增益在 122 GHz 为 10 dB。

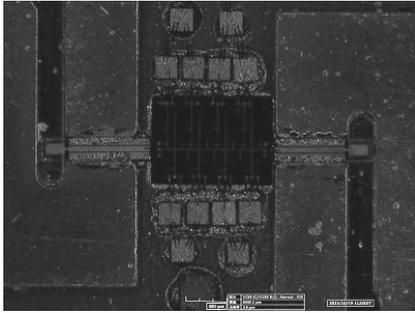


Fig.6 The inside photo of D-band amplifier module
图 6 放大器模块内部照片

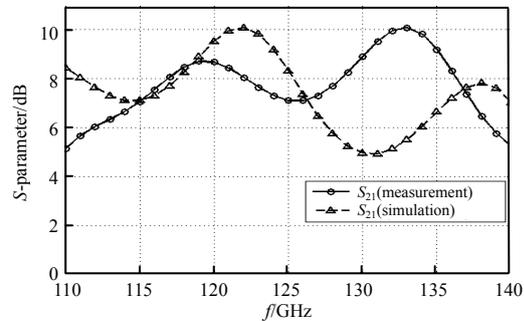


Fig.7 Simulation and measurement results of D-band amplifier module
图 7 放大器模块仿真及测试结果

仿真结果和测试结果表明, S_{21} 数据趋势吻合, 但与芯片增值指标相差较大。这是由于放大器模块在装配时, 采用人工装配, 芯片贴片的位置以及金丝线带来寄生参数的影响大, 破坏了芯片的端口阻抗匹配, 直接影响了输出增益。但总的来说, 增益测试曲线和模型仿真结果趋势吻合, 并实现模块的放大功能, 因此可以证明本文提出的设计方法的有效性。

6 结论

本文基于 Ommic 公司 CGY2191UH 芯片, 建立一个精确 D 波段放大器模块模型, 并依照模型设计和加工一种 D 波段放大器模块, 测试结果验证了模型的准确性。D 波段放大器模块实现的方案是“波导到 CPW+金丝键合+管芯+金丝键合+CPW 到波导”, 因此建立多节波导模型、共面波导-矩形波导过渡模型、金丝键合线等效电路模型以及 CGY2191UH 芯片模型, 并进行有源和无源模型的联合仿真。利用 D 波段矢量网络分析仪测试了加工的 D 波段放大器模块。测试结果表明, 该模块在 110 GHz~140 GHz 增益大于 4.5 dB, 其中最大增益在 122 GHz 为 10 dB。而且增益测试曲线和模型仿真结果吻合, 证明模型的有效性。但是由于采用人工装配, 与芯片的标称增益相差比较大, 这需要进一步对装配工艺进行研究。

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 Technology, 2014,12(1):1-13.)
- [2] SAMOSKA L. 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] 康小克,邓贤进,陈樟. 一种基于共面波导的 0.14 THz 低噪声放大器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(3):332-335. (KANG Xiaoke,DENG Xianjin,CHEN Zhang. Design of low-noise amplifier at 0.14 THz based on Co-Plane

Waveguide[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(3):332-335.)

[4] 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(CSICS). Monterey,CA:[IEEE], 2010:1-4.

[5] URTEAGA M,SEO M,HACKER J,et al. InP HBT integrated circuit technology for terahertz frequencies[J]. 2010 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). Monterey,CA:[IEEE], 2010:1-4.

[6] 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 Digest. Baltimore,MD:[IEEE], 2011:1-4.

[7] RADISIC V,DEAL W R,LEONG K M K H,et al. A 10 mW submillimeter-wave solid-state power-amplifier module[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2010,58(7):1903-1909.

[8] 张博. 基于硅基半导体技术的 130 GHz 10 Gbit/s 无线数据传输系统芯片关键电路研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011. (ZHANG Bo. Research on key circuits of 130 GHz 10 Gbit/s wireless data communication system chip by silicon-based technology[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2011.)

[9] DU S,GUO D,LUO X,et al. Design of 8 mm Ka-band broadband LNA[C]// IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics. Qingdao,China:[IEEE], 2013:266-269.

[10] WANG Y,YU W. Design and simulation of a W-band broadband Low Noise Amplifier[C]// IEEE International Conference on Microwave Technology & 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.

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.

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.

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.

第 11 届中国生物特征识别学术会议(四川成都)征文通知

中国生物特征识别学术会议(Chinese Conference on Biometric Recognition)是由中国人工智能学会(CAAI)主办,CAAI 模式识别专业委员会协办的国内生物特征识别领域的学术盛会。自 2000 年始,CCBR 已经在北京、杭州、西安、广州、济南、沈阳和天津等地成功举办了 10 届,为生物特征识别领域的学生、老师和工业界研究人员提供了一个活跃的学科互动和信息交流平台,有力促进了国内本领域的学术和技术发展。

2016 年中国生物特征识别学术会议(CCB2016)将于 2016 年 10 月 14-16 日在成都举行,由四川大智胜软件股份有限公司和四川大学联合承办。这是中国生物特征识别大会首次来到西南地区。本届会议将汇聚国内从事生物特征识别理论与应用研究的广大科研工作者,并邀请国际同行,共同分享我国生物特征识别研究的最新理论和技术成果,为大家提供精彩的学术盛宴。

现向广大科技工作者公开征集优秀学术论文(英文),大会录用的稿件将由 Springer 出版社的 Lecture Notes in Computer Sciences(LNCS)图书系列出版,并被 EI 和 ISTP 检索。欢迎学术界和工业界的同仁踊跃投稿、积极参会!有关本届大会的更多信息请参见大会网站: <http://www.wisesoft.com.cn/ccbr2016/>。