

# 60GHz 高增益宽带单片集成低噪声放大器\*

侯 阳<sup>1,2</sup> 张 健<sup>1</sup> 李凌云<sup>1</sup> 孙晓玮<sup>1,†</sup>

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 基于 0.15 $\mu\text{m}$  GaAs pHEMT 工艺, 设计和制作了一款宽带单片集成低噪声放大器. 放大器设计采用四级级联的拓扑结构以获得高增益. 芯片尺寸 2mm $\times$ 1mm. 实测性能指标为: 工作频段 45~65GHz, 增益 18 $\pm$ 1.5dB, 输入驻波比小于 3, 输出驻波比小于 2.3, 直流功耗 96mW. 在增益、带宽和功耗上达到国际现有产品指标. 该芯片可被应用于 60GHz 宽带无线通信系统.

**关键词:** 匹配高电子迁移率晶体管; 单片微波集成电路; 低噪声放大器; 60GHz

**PACC:** 7340J EEACC: 2570

**中图分类号:** TN43 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)07-1373-04

## 1 引言

在无线通信领域, 越来越高的数据量传输对无线信道的容量提出了更高的要求, 因此需要研究在更高频段的无线通信技术<sup>[1]</sup>. 无线电领域中, 毫米波段具有 3 个基本特点: 波长短、大气传播衰减大、频带宽. 因此, 理论上利用毫米波通信可以获得通信设备体积小、相邻设备干扰小、信道容量高等特点. 在整个毫米波波段, 大气衰减的峰值出现在 60, 119 和 183GHz 处, 其中 60GHz 对应于氧分子第一谐振吸收, 是目前最适宜被用作短距离无线通信的频段<sup>[2]</sup>. 国际上 60GHz 频点处可被使用的频段如图 1 所示, 在欧洲, 62~63GHz 和 65~66GHz 被分配给移动多频系统(MBS), 59~62GHz 被分配给无线本地局域网(WLAN); 在美国, FCC 开放了 59~64GHz 频段; 日本也开放了 59~66GHz 高速数字通信系统. 可见, 目前至少有 3GHz(59~62GHz)的带宽是国际通用的, 这是迄今为止所分配的最大连续无线频段, 而且发射功率限制很小<sup>[3]</sup>. 处在实验阶段的 60GHz 通信系统已经可以做到 5Gbps 的信道容量, 而这还远远没达到它的上限. 国际上对 60GHz 频段配套芯片的研发已经日趋成熟, 而在我国, 对 60GHz 这个领域的研究还刚刚起步.

宽带低噪声放大器(LNA)是毫米波集成前端的核心组件, 其增益和噪声指标直接影响系统的接收性能. 国际上毫米波 LNA 芯片设计一般采用 HEMT, CMOS, BiMOS 等工艺<sup>[4,5]</sup>, 由于 MOS 管固有的一些特性, 使其在噪声和功率容量上与 HEMT 管有较大差距, 距离实际应用还有一定阶段<sup>[6]</sup>. 因此, 本文设计了一款基于 0.15 $\mu\text{m}$  匹配高电子迁移率晶体管(pHEMT)工艺的低噪声放大器单芯片微波集成电路(MMIC), 工作频段为 45~65GHz, 其高端部分覆盖了 60GHz 通信用

频段, 低端部分覆盖了整个 V 频段(45~56GHz), 并具备了带内增益较平坦, 功耗低等特点. 除适用于 60GHz 室内宽带无线通信系统外, 还可以应用于 V 波段星间通信系统等.

## 2 电路设计

在毫米波通信系统中, 为了提高接收微弱信号的能力和保证良好的通信质量, 接收机必须有良好的噪声特性. 低噪声放大器(LNA)作为最靠近接收天线的电路, 其噪声系数对接收机的性能影响最大. 放大器的噪声系数可以表示为

$$NF = NF_{\min} + \frac{4R_n |\Gamma_s - \Gamma_{\text{opt}}|^2}{(1 - |\Gamma_s|^2) |1 + \Gamma_{\text{opt}}|^2} \quad (1)$$

其中  $NF_{\min}$  为最佳噪声系数;  $\Gamma_s$  为任意源反射系数;  $\Gamma_{\text{opt}}$  为最佳源反射系数;  $R_n$  为器件的等效噪声电阻. 在 Smith 圆图上, 若源反射系数越靠近最佳源反射系数, 则噪声系数越小. 一般情况下, pHEMT 管的最佳噪声源反射系数和共轭匹配源反射系数相差较大, 即低噪声和高增益是相互矛盾的, 所以在实际设计中, 需要折衷考虑每一级所采取的匹配方式.

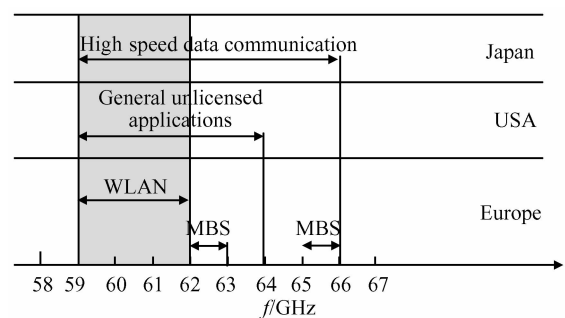


图 1 60GHz 附近可用频段

Fig. 1 Available spectrum around 60GHz

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号:0707RGJA1001)

† 通信作者. Email: xwsun@mail.sim.ac.cn

2007-11-09 收到, 2008-02-18 定稿

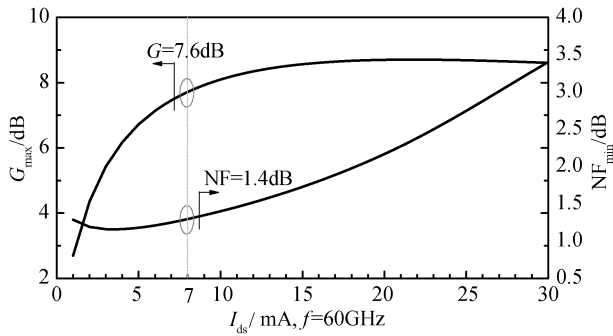


图 2 噪声系数、资用增益和偏置电流的关系

Fig.2 Noise figure and associated gain versus current

为了满足高增益的要求,本文采用了四级放大的拓扑结构,四级放大器的总噪声系数定义如下:

$$[NF]_{\text{tot}} = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{NF_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} \quad (2)$$

$G_n, NF_n$  分别为第  $n$  级的增益和噪声系数,放大器的总噪声系数主要取决于前两级的噪声.因此,本文的设计中前两级侧重于最佳噪声匹配,后两级侧重于共轭匹配以获得更大增益.

本文采用栅长为  $0.15\mu\text{m}$  的 pHEMT 低噪声管,其栅宽  $w$  在一定范围内可以任意取值.  $w$  取值大可以获得较高的功率容量和低频增益,但是特征频率将下降.在  $60\text{GHz}$  频段,通过对不同栅宽管子的仿真对比,在增益、噪声与功率容量间做折衷考虑后,四级放大均选择了  $4 \times 20\mu\text{m}$  的管子.

选定管子后,通过扫描在不同偏置电流下单管的最小噪声和最大资用功率,来确定管子的最终工作点.图 2 是噪声系数与增益随电流变化曲线,本文选取偏置电流为  $7\text{mA}$ ,可以获得较好的噪声与增益.偏置点具体数值为:  $I_{\text{ds}} = 7\text{mA}, V_{\text{ds}} = 2.5\text{V}$ .

在确定管子的偏置后,需要根据前面所分析的噪声与增益的关系来确定各级的匹配方式,以及各级增益与噪声的分配,以此指导电路的整体设计.图 3 在 Smith 圆图上给出了在  $60\text{GHz}$  频点上,不同的源阻抗可以获得的噪声和资用增益.可以看出,当源阻抗向等噪声圆内部移动时可以获得较好的噪声特性,当源阻抗向等增益圆内部移动时可以获得较高的增益.考虑到工艺容差的影响,源阻抗尽量避免选择在等噪声圆或等增益圆较密的区域(高梯度区域).因此折衷考虑各种因素,将四级放大的源阻抗分别选择在图上所示的 4 个点上,第一级最靠近最小噪声,随后的几级逐渐靠近最大增益.

为了便于折衷前两级放大的噪声和输入匹配,在前两级 pHEMT 管芯的源级和地之间串联了一段微带线,在毫米波段这段微带线可以等效一个串联电感,这个电感使得最佳噪声源阻抗和输入阻抗的共轭在 Smith 圆上靠近,便于同时对噪声和匹配进行优化,同时电感引入负反馈也提高了放大器的稳定性;电路的输入和输出均采用开路进行匹配,由于带宽很宽,输入级采用了两段开路线,增加了一个极点用于展宽带宽;级间隔

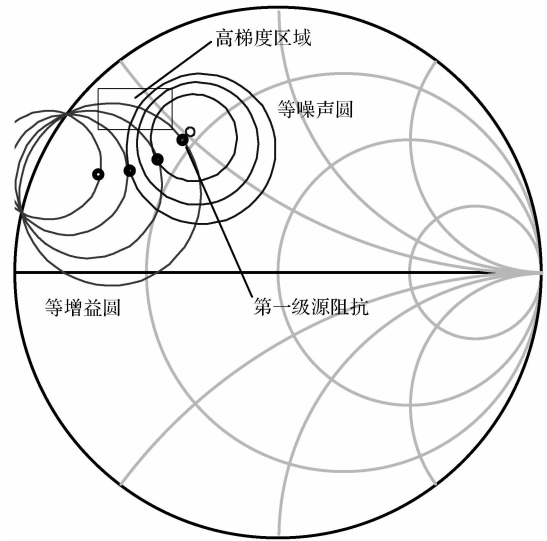


图 3 等增益圆和等噪声圆

Fig.3 Circles for constant noise figure and gain

直采用较小的 pF 电容,目的是为了减少寄生参数;偏置部分通过  $1/4$  波长短路线加入到电路中,利用电容接地来做射频短路,在毫米波段,电容和接地孔的寄生参数影响很大,很难做到彻底的射频短路,对于后面的偏置电路,同样要考虑其对匹配的影响,通过仿真,部分短路线小于  $1/4$  波长.整个电路的原理图如图 4 所示,为了简便,省略了部分串联的微带传输线.

漏极偏置电路中加入了串联电阻并联电容接地的低通结构,目的是吸收电路在低频的增益,防止电路在低频处自激振荡,电阻和电容分别选为  $40\Omega$  和  $1\text{pF}$ .在栅极上加电阻同样用于提高电路稳定性,在后两级的栅极上增加电阻可以有效降低低频增益,这种方法不适用于前级,因为会显著地加大噪声<sup>[7]</sup>.

### 3 仿真与测试

芯片设计中的仿真包括集总元件的建模和微带线的场仿真两部分.本文设计的芯片在仿真过程中直接调用了工艺线厂商提供的集总元件电路模型,对于低噪声放大器,选用了 pHEMT 管的小信号噪声模型,该模型在  $2\sim 60\text{GHz}$  范围内能与测试结果很好地吻合.

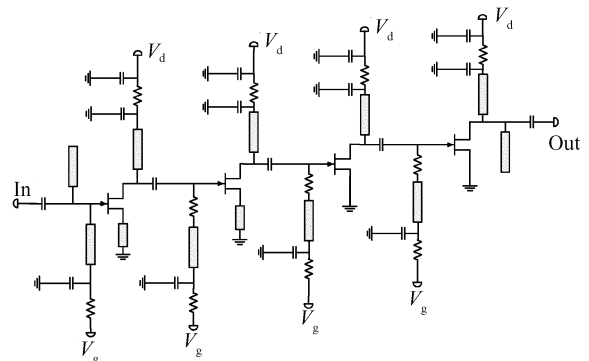


图 4 低噪声放大器的电路原理图

Fig.4 Schematic circuit diagram of LNA

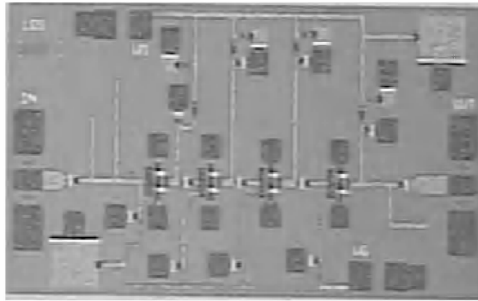


图 5 低噪声放大器显微照片  
Fig.5 Microscope photo of LNA MMIC

电路中部分微带线采用 Agilent ADS 软件中的 Momentum 工具,采用矩量法对平面电路进行仿真,由于不考虑垂直方向的不均匀场分布,仿真速度较快,适用于绝大部分微带结构. 电路中还包括复杂的微带结构,例如输入输出的共面波导-微带转换,靠近接地孔的微带线等等,这部分的结构采用 Ansoft HFSS 软件进行仿真, HFSS 是利用有限元法对三维结构进行仿真,能反映出垂直方向的场分布特性,精度较高.

芯片在 0.15 $\mu\text{m}$  的 pHEMT 工艺上实现,图 5 为芯片实物的显微照片,芯片尺寸为 2mm $\times$ 1mm $\times$ 0.1mm. 图 6 为测试结果和仿真结果的对比,其中短划线是仿真曲线,实线是测试曲线. 芯片的设计频段在 45~65GHz,增益大于 17dB,驻波比小于 2.5,噪声系数小于 4dB. 可以看出,仿真结果很好地预测了实际测试结果. 由于在毫米波波带,工艺误差对芯片的参数有较明显的影响,所以出现了增益在高端有较大偏移,驻波在高端有所恶化的现象. 由于在芯片设计时利用工艺线提供的工艺容差进行过 Monte Carlo 和 Yield 分析<sup>[8]</sup>,预测到了在工艺容差下所能得到的各种结果,所以最终的结果较好地满足了设计时的要求. 由于没有联系到国外合适的 60GHz 频段的噪声测试设备,故只给出噪声系数仿真曲线.

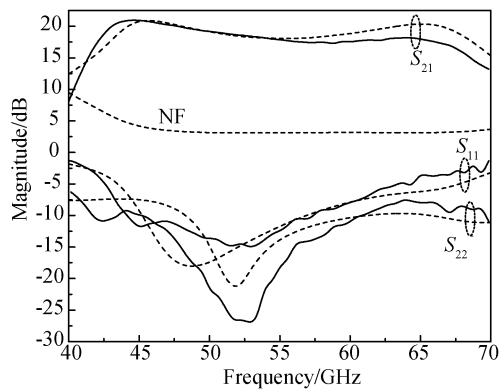


图 6 低噪声放大器仿真参数和测量参数对比  $V_d = 3\text{V}$ ;  $I_d = 32\text{mA}$   
Fig.6 Simulated(dash line) and measured parameters of LNA  
 $V_d = 3\text{V}$ ;  $I_d = 32\text{mA}$

表 1 几种低噪声放大器芯片参数的对比

Table 1 Comparisons between several LNA MMIC

参数	本文	芯片 A	芯片 B
频段/GHz	45~65	57~65	50~65
增益/dB	18 $\pm$ 1.5	12 $\pm$ 2	16 $\pm$ 1
功耗/mW	96	123	<100

## 4 结论

采用先进的 0.15 $\mu\text{m}$  pHEMT 工艺,设计流片完成了一款 45~65GHz 宽带单片集成低噪声放大器. 文中给出了仿真结果和芯片测试结果,两者一致性较好,达到了预期指标,反映出设计方法和仿真方法的正确性. 表 1 列出了该芯片与国际上两款采用相同拓扑低噪声放大器芯片的参数对比. 芯片 A 是 Triquint 公司的 TGA4600-EPU,芯片 B 是 Agilent 60GHz 演示系统中的 LNA 芯片,两款都为三级放大芯片. 可以看出,作者设计的芯片可以达到同类产品的指标,在增益和平坦度上还需要进一步提高.

**致谢** 感谢英国皇后大学(Queen's University)王闯博士为本文的芯片设计提供有益的建议,并帮助完成小信号 S 参数测试.

## 参考文献

- [1] Howarth J A, Lauterbach A P. 60GHz radios: enabling next-generation wireless applications. Tencon 2005 IEEE Region 10 Conference, 2005
- [2] Richardson A J, Watson P A. Use of the 55~65GHz oxygen absorption band for short-range broadband radio networks with minimal regulatory control. Proc Inst Electr Eng, 1990, 137: 233
- [3] Smulders P F M. 60GHz radio: prospects and future directions. Proceedings of IEEE Benelux Chapter Symposium on Communications and Vehicular Technology, 2003
- [4] Razavi B. A 60GHz direct-conversion CMOS receiver. ISSCC 2005/Session 21/TD; RF Trends; Above-IC Integration and mm-Wave/21.6, 2005
- [5] Reynolds S, Floyd B, Pfeiffer U, et al. 60GHz transceiver circuits in SiGe bipolar technology. ISSCC 2004/Session 24/TD; Wireless Trends; Low-Power and 60GHz/24.5, 2004
- [6] Gunnarsson S E, Karnfelt C, Zirath H, et al. Highly integrated 60GHz transmitter and receiver MMICs in a GaAs pHEMT technology. IEEE J Solid-State Circuit, 2005, 40(11): 2174
- [7] Gu Jianzhong, Zhang Jian, Yu Xiaojing, et al. 32GHz MMIC power amplifier using 0.25 $\mu\text{m}$  GaAs pHEMT. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(12): 2160 (in Chinese) [顾建忠, 张健, 喻筱静, 等. 基于 0.25 $\mu\text{m}$  GaAs pHEMT 工艺的 32GHz 毫米波单片功率放大器. 半导体学报, 2006, 27(12): 2160]
- [8] Wang Chuang, Qian Rong, Sun Xiaowei, et al. S-band monolithic low noise amplifier with high gain. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(4): 786 (in Chinese) [王闯, 钱蓉, 孙晓玮, 等. 高增益自偏 S 波段 MMIC 低噪声放大器. 半导体学报, 2005, 26(4): 786]

## 60GHz Wideband LNA MMIC with High Gain<sup>\*</sup>

Hou Yang<sup>1,2</sup>, Zhang Jian<sup>1</sup>, Li Lingyun<sup>1</sup>, and Sun Xiaowei<sup>1,†</sup>

(1 *Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

(2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** A wideband low noise amplifier (LNA) MMIC was designed and fabricated with 0.15 $\mu\text{m}$  GaAs pHEMT process. It obtains high gain by means of adopting four stages topology. The chip size is 2mm $\times$ 1mm. Covering 45~65GHz, it achieves a maximum 20.5dB gain and low VSWR. It has the advantages of higher gain, wider bandwidth and lower power consuming. This chip can be widely applied in 60GHz wideband wireless communication system.

**Key words:** pHEMT; MMIC; LNA; 60GHz

**PACC:** 7340J      **EEACC:** 2570

**Article ID:** 0253-4177(2008)07-1373-04

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No.0707RGJA1001)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: xwsun@mail.sim.ac.cn

Received 9 November 2007, revised manuscript received 18 February 2008