

文章编号: 2095-4980(2019)02-0348-04

12~18 GHz GaAs MMIC 低噪声放大器设计

孙博文, 王磊, 陈庆, 方堃, 杨漫菲

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 采用 GaAs 工艺设计了一个 12~18 GHz 毫米波单片集成电路(MMIC)低噪声放大器(LNA)。采用三级单电源供电放大结构, 运用最小噪声匹配设计、共轭匹配技术和负反馈结构, 同时满足了噪声系数、增益平坦度和输出功率等要求。仿真表明: 在 12~18 GHz 的工作频带内, 噪声系数为 1.15~1.41 dB, 增益为 27.9~29.1 dB, 输出 1 dB 压缩点达到 15 dBm, 输入、输出电压驻波比(VSWR)系数小于 1.72。

关键词: Ku 波段; 毫米波单片集成电路; 低噪声放大器; GaAs 工艺

中图分类号: TN722.3

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0348

Design of 12–18 GHz MMIC Low Noise Amplifier in GaAs pHEMT process

SUN Bowen, WANG Lei, CHEN Qing, FANG Kun, YANG Manfei

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: This paper presents a 12–18 GHz Low Noise Amplifier(LNA) Monolithic Microwave Integrated Circuit(MMIC) in GaAs process, and the design of this LNA layout is verified in ADS EM simulation. This LNA circuit uses single DC power supply. In the design of matching network, the minimum noise matching design, conjugate matching technology and the negative feedback structure are utilized to meet the requirement of low noise, gain flatness and power output. The simulation indicates that in the band of 12–18 GHz, the Noise Figure(NF) of LNA varies from 1.15 dB to 1.41 dB, and power transmission gain is 27.9–29.1 dB, the 1 dB compression power point is 15 dBm, and the Voltage Standing Wave Ratio(VSWR) of input and output is less than 1.72.

Keywords: Ku band; Monolithic Microwave Integrated Circuit; Low Noise Amplifier; GaAs process

近些年来, 微波、毫米波电路技术的发展十分迅速, 越来越多的军、民设备用于毫米波频段, 这对毫米波单片集成电路(MMIC)提出了大量的需求。MMIC 具有可靠性高, 成本低, 频带宽, 尺寸小等优点, 是毫米波电路的重要发展方向。毫米波频段, 假型高电子迁移率晶体管(pseudomorphic High Electron Mobility Transistor, pHEMT)工艺的单片集成电路占据重要地位, 使多功能芯片电路或多单片组件电路的系统集成度更高, 成本更低, 体积更小^[1-3]。低噪声放大器作为毫米波接收前端系统的关键单元, 位于接收机的第一级, 与天线相连接, 它的噪声特性将直接影响整个系统的噪声特性。同时, 天线接收下来的信号一般很弱, 低噪声放大器本身具有的噪声特性所引起的灵敏度将影响到系统是否能正确接收信号, 并把有用信号完整地传输到下一级^[4-5]。因此, 在设计低噪声放大器时, 要在最小噪声匹配和最佳功率传输匹配之间权衡。通常情况下, 如果选择最小噪声匹配, 会导致低噪声放大器的输入阻抗匹配实现困难, 因此输入输出匹配是低噪声放大器设计的难点。

1 器件选择

在有源器件的设计上, Foundry 提供设计自由度有单指栅极宽度和栅极的栅指数目。不同的栅宽和栅指数目具有不同的阻抗、噪声、功率和增益特性等, 需要根据设计的实际情况进行选择。本文对不同栅宽的器件进行仿真验证, 选取 OMMIC 公司 0.15 μm GaAs 工艺 3 种尺寸的晶体管器件: $2\times 50 \mu\text{m}$, $6\times 20 \mu\text{m}$, $6\times 50 \mu\text{m}$, 功率密度为 500 mW/mm, 在相同的偏置条件下($U_{ds}=5 \text{ V}$), 最小噪声系数如图 1 所示。

可见，在 12~18 GHz 频率范围内，最小噪声系数具有随频率的增加而增加的趋势，并且均小于 1。但由于 LNA 还要满足增益、功率等其他指标要求，因此需要牺牲噪声性能来达到其他要求。

2 低噪声放大器设计

低噪声放大器的设计要综合考虑许多指标^[6-10]，如：噪声、增益、功耗、稳定性、回波损耗等，在满足一定功耗条件下，必须提供优秀的噪声性能、足够的增益和良好的输入输出匹配。好的噪声特性决定了整个接收机的灵敏度，足够的增益又可以抑制后级放大器或接收机后续模块对噪声的影响。本文低噪声放大器设计采用 OMMIC 公司的 0.15 μm GaAs 工艺设计。主要指标设计为：工作频段在 12~18 GHz；增益大于 25 dB；噪声系数小于 1.3 dB；输入输出驻波系数为 1.5，增益平坦度为 ± 1 dB。

本文设计的低噪声放大器要求单电源供电，如果要在晶体管的栅极和源极产生足够的偏压，则需要在源极引入适当的电阻，以产生合适的栅源电压。根据经验，低噪声放大器直流工作状态一般都选择大约在饱和漏源电流的 15%~20%^[1,3]。

为了提供足够的增益，所设计的低噪声放大器采用三级放大结构。噪声系数 N_F 与输入端和输出端的信噪比有关，表示信噪比下降的倍数^[3]。在电路实际设计中，为了达到某一较大的增益，经常需要几个晶体管级联在一起，从多级放大器噪声系数的表达式^[9]： $N_F = N_{F1} + (N_{F2} - 1)/G_1 + (N_{F3} - 1)/G_1 G_2 + \dots$ (其中， G_n 指的是第 n 级放大电路的增益) 可以看到，前级放大器的噪声对整个放大器的噪声影响最为显著，并且后级放大器增益大小也会影响整体放大器噪声性能。所以在设计低噪声放大器时，第一级输入匹配采用最佳噪声源匹配，以保证整体低噪声放大器良好的噪声性能；第二级放大器在满足噪声要求的同时需要保证足够的增益，以减小对后级噪声的影响；第三级放大器需使整体低噪声放大器有足够的功率输出，并采用负反馈结构，以满足增益平坦度要求^[6]。

不同于接收机中的其他电路模块，LNA 与外界有直接联系，因此，LNA 必须在任何频率下都保持稳定。LNA 若在其他频率下开始振荡，线性度会很差，产生增益尖峰，电路无法正常工作。因此，放大电路的稳定性也是仿真设计的重要参数。

低噪声放大器设计中，为使第一级放大器的噪声足够低，在设计第一级放大电路时采用零栅压设计^[2]，并且在晶体管源级采用源级负反馈结构。此举增加了电路稳定性且使放大器的增益圆和噪声圆圆心靠近，使其达到低噪声的同时拥有足够的增益^[10]。值得注意的是，放大器增益随频率上升会出现滚降的现象，因此在设计每一级放大器时需要注意增益补偿，从而使整个放大电路的增益平坦度达到要求。每一级增益随频率变化如图 2 所示。

经过以上分析可以得到完整的电路原理图。单偏置 LNA 电路省去了栅极偏置电路，减小了整个电路的复杂度。通过改变源极阻抗可以得到任意比例的 I_{ds} 。在源级采用串联高阻抗微带线实现源级负反馈，提高高频稳定性并且使阻抗匹配点接近最小噪声或共轭匹配阻抗点。在源级电阻旁并联旁路电容形成射频通路，避免射频信号流过电阻造成损耗。

在完成电路原理图的仿真之后，进行芯片版图设计。本文中低噪声放大器的设计版图如图 3 所示，实际版图尺寸大小为 2.0 mm \times 1.5 mm。

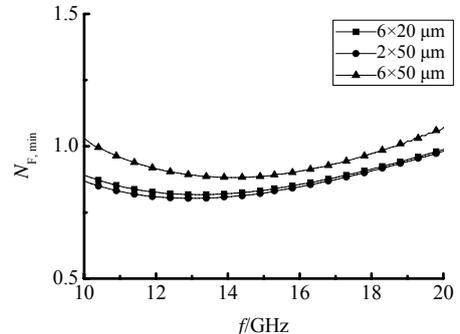


Fig.1 Minimum noise factor of each amplifier stage
图 1 各级放大电路最小噪声系数

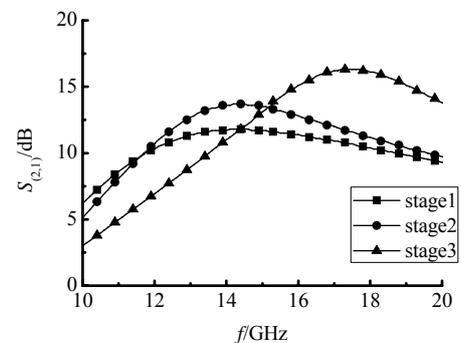


Fig.2 Gain of each amplifier stage
图 2 各级放大电路增益

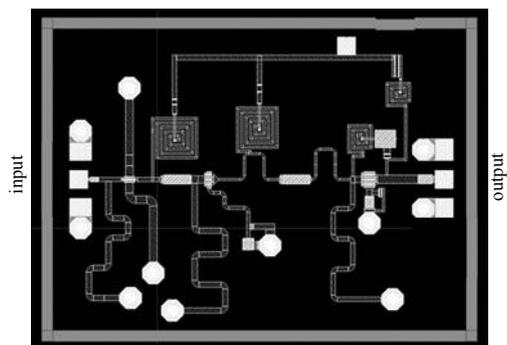


Fig.3 Overall layout
图 3 整体版图

3 低噪声放大器主要仿真结果

图 4~图 7 分别为低噪声放大器芯片稳定性系数、增益、噪声系数和端口驻波系数仿真结果。可以看到,在 12~18 GHz 频段内,该低噪声放大器在处于稳定状态,增益为 27.9~29.1 dB,增益平坦度在 ± 1 dB 以内,噪声系数为 1.15~1.41 dB,输入输出驻波系数均在 1.72 以下。

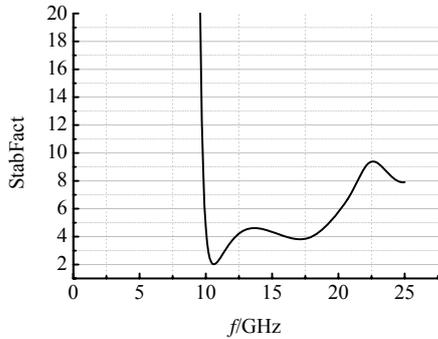


Fig.4 Coefficient of stability
图 4 稳定性系数

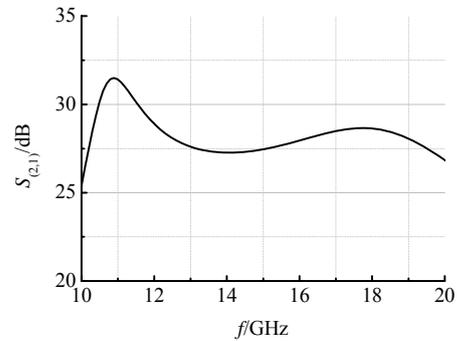


Fig.5 Gain of small signal
图 5 小信号增益

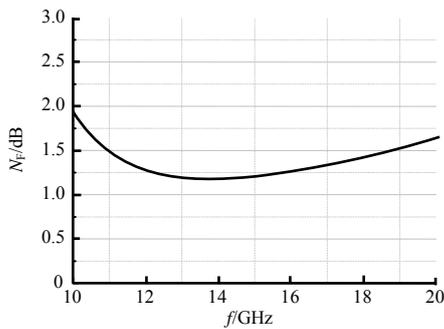


Fig.6 Noise
图 6 噪声

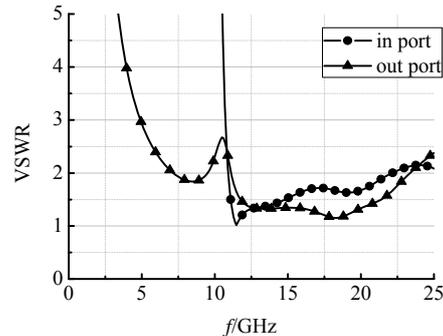


Fig.7 VSWR of input and output
图 7 输入、输出驻波系数

源级负反馈结构的高阻抗微带线对电路稳定性影响很大,合适的源级微带线是高频段稳定的关键。源级负反馈对于噪声和增益均有影响,此时需要权衡多项指标,折中选择合适的微带线。第三级放大电路,需使整个电路达到输出功率的要求,并需要解决增益随频率增加的滚降问题。因此,需要选择合适的电阻、电感、电容(RLC)负反馈回路,以达到增益平坦度的要求。

4 结论

本文设计了一个自偏置结构 12~18 GHz 低噪声放大器芯片,降低了电路复杂度,电路采用 3 级级联结构,源级串联微带线负反馈结构,改善了稳定性、噪声性能和输入输出驻波的综合性能;并在第三级放大电路采用负反馈电路结构,提高了增益平坦度性能,最终获得了良好的仿真结果。

参考文献:

- [1] 杨自强. Ka 频段接收机部件单元单片集成电路设计[D]. 成都:电子科技大学, 2008. (YANG Ziqiang. Design of Ka-band receiver components monolithic integrated circuits[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2008.)
- [2] AKGIRAY A H,WEINREB S,LEBLANC R,et al. Noise measurements of discrete HEMT transistors and application to wideband very low-noise amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2013,61(61):3285-3297.
- [3] 张姗姗. K 波段 MMIC 低噪声放大器与双向混频器的研究设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (ZHANG Shanshan. A study and design of low noise amplifier and bidirectional mixer MMIC in K-band[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2014.)

- [4] 韩玉鹏. T/R 组件的 MMIC 设计技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (HAN Yupeng. Research on a T/R module based on MMIC[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2014.)
- [5] 李俊生,蒙林,张德智. X 波段高功率 T/R 组件的设计与制作[J]. 现代电子技术, 2009,32(19):59-61. (LI Junsheng, MENG Lin,ZHANG Dezhi. Design and manufacture techniques of X-band high power T/R module[J]. Modern Electronic Technology, 2009,32(19):59-61.)
- [6] 杨光. 微波毫米波超宽带低噪声放大单片技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009. (YANG Guang. Research on microwave and millimeter wave ultra broadband low noise amplification monolithic technology[D]. Chengdu,China: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [7] 段磊. 宽带单片微波低噪声放大器的设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013. (DUAN Lei. Design of broadband monolithic LNA[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2013.)
- [8] TESSMANN A,LEUTHER A,MASSLER H,et al. Metamorphic H-band low-noise amplifier MMICs[C]// 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu,HI,USA:IEEE, 2007:353-356.
- [9] KAWASAKI S,SEITA H,KAWASHIMA M,et al. A high-gain and low-noise MMIC amplifier module for a Ku-band compact active integrated antenna[C]// 2010 Asia-Pacific Microwave Conference. Yokohama,Japan:IEEE, 2010:1497-1500.
- [10] UCHIDA H,TAKATSU S,NAKAHARA K,et al. Ka-band multistage MMIC low-noise amplifier using source inductors with different values for each stage[J]. IEEE Microwave & Guided Wave Letters, 1999,9(2):71-72.

作者简介:



孙博文(1992-), 男, 北京市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波毫米波集成电路芯片.email:939885781@qq.com.

方堃(1991-), 男, 成都市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波毫米波集成电路芯片.

王磊(1979-), 男, 成都市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为微波毫米波集成电路芯片开发.

陈庆(1992-), 男, 成都市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波毫米波集成电路芯片.

杨漫菲(1993-), 女, 广东省江门市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波毫米波集成电路芯片.