

基于 InP HEMT 工艺的低噪声放大器模块 气密性封装

邓世河, 张 盟, 沈亚飞, 谢振超, 王文伟

(上海航天电子技术研究所, 上海 201100)

摘 要: 本文设计并实现了一款基于磷化铟高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)芯片的低插损、气密性低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)模块. 针对传统波导 E 面探针(E 代表波导的电场平面)封装结构在环境实验中容易受到水汽影响的缺陷, 提出具有气密性能的垂直波导-微带过渡设计, 提升了放大器模块在恶劣环境中的可靠性. 同时, 通过在波导短路区域周围引入周期性间隙波导结构, 有效抑制了石英基板中电磁波能量泄漏与高次模谐振. 仿真结果表明, 该波导-微带过渡结构在 87.5~90.5 GHz 内反射损耗小于 -25 dB, 插入损耗小于 0.3 dB. 通过补偿键合金丝自身引入的寄生电感, 带内反射性能由 -15 dB 改善至 -25 dB, 降低能量在传输过程的反射. 模块实测结果显示, 放大器模块在工作频段内增益大于 20 dB, 输入端反射损耗小于 -20 dB, 典型噪声系数值为 2.5 dB, 双边封装导致的损耗小于 1 dB. 整体性能与芯片手册数据吻合度较高, 验证了该设计的有效性.

关键词: 气密性; 低噪声放大器; 间隙波导; 低损耗封装; 毫米波

基金项目: 国家重点研发计划(No.2023YFB3905604)

中图分类号: TN454

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)10-3497-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250526

Hermetically Packaged Low-Noise Amplifier Module Based on InP HEMT Technology

DENG Shi-he, ZHANG Meng, SHEN Ya-fei, XIE Zhen-chao, WANG Wen-wei

(Shanghai Aerospace Electronics Technology Institute, Shanghai 201100, China)

Abstract: This paper presents the design and implementation of a low-insertion-loss, hermetic low-noise amplifier (LNA) module based on an indium phosphide high-electron-mobility transistor (InP HEMT) chip. To address the vulnerability of traditional E-plane probe waveguide packaging structures to moisture during environmental testing, a hermetic vertical waveguide-to-microstrip transition structure is proposed, enhancing the reliability of the amplifier module in harsh conditions. Furthermore, by introducing a periodic gap waveguide structure around the waveguide short-circuit region, energy leakage and higher-order mode resonance in the quartz substrate are effectively suppressed. Simulation results demonstrate that the proposed transition structure achieves a return loss better than -25 dB and an insertion loss below 0.3 dB across 87.5~90.5 GHz. Through compensation for the parasitic inductance introduced by bonding wires, the in-band return performance is improved from -15 dB to -25 dB, reducing energy reflection during transmission. Measured results indicate a gain greater than 20 dB, an input return loss below -20 dB, a typical noise figure of 2.5 dB, and a total loss induced by the bilateral packaging of less than 1 dB within the operating band. The overall performance shows good agreement with the chip datasheet, validating the effectiveness of the proposed design.

Key words: hermeticity; low-noise amplifier; gap waveguide; low-loss packaging; millimeter wave

Foundation Item(s): National Key Research and Development Program (No.2023YFB3905604)

1 引言

低噪声放大器 LNA (Low Noise Amplifier) 是射频

系统中的关键组件, 其主要功能是在放大微弱输入信号的同时尽可能降低自身引入的噪声. LNA 广泛应用

于接收系统的前端,涵盖无线通信、雷达以及射电天文等多个领域,对保证后续信号处理电路的精度和灵敏度有重要作用.随着射频技术不断向毫米波频段发展,合理的封装设计不仅关系到器件的机械与热稳定性,更直接影响关键电性能参数如增益、反射损耗与噪声系数等.金属矩形波导因具有低传输损耗,成为高频毫米波模块中最具优势的封装形式.然而,W频段(75~110 GHz) LNA模块中具有高气密性与低插损的封装设计仍相对匮乏^[1-3].

据此,本文提出了一种基于E面探针(E代表波导的电场平面)的气密性波导-微带垂直过渡结构,如图1所示.通过拓宽石英基板尺寸以完全覆盖波导口,有效隔离波导口与器件内部,实现整体气密性.然而,石英基板与金属波导之间存在复杂电磁耦合,基板中存在电磁波能量泄漏且容易激励谐振腔模式,导致插损增大且恶化阻抗匹配.针对上述问题,本文在纵向上的波导短路区域周围设计了周期性排列的间隙波导^[4],抑制了石英基板中的电磁波能量泄漏与腔体谐振,从而实现低插损传输.

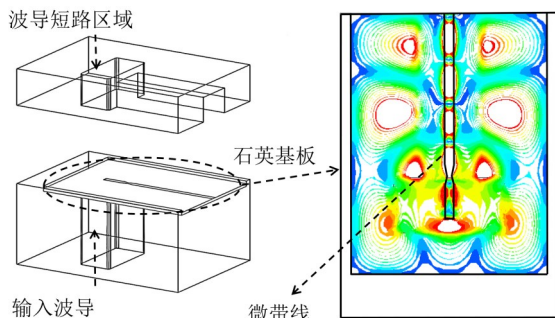


图1 气密性封装设计与电磁波能量泄露问题

2 低噪声放大器模块设计

该低噪声放大器模块的设计方案如图2所示.采用标准WR10波导作为输入/输出端口,对石英基板横向和纵向尺寸进行拓宽处理,使其完全覆盖波导口,从而避免波导口与器件内部的直接接触.在波导短路区域周围引入了间隙波导结构,用于抑制石英基板中的能量泄漏与谐振.采用金丝键合实现芯片pad与微带线之间的互连.为降低金丝引入的寄生电感影响,对微带线进行阻抗匹配设计^[5],以改善微带线与芯片pad之间的阻抗失配.此外,不同组件间的缝隙及螺纹孔等位置均进行焊接或胶封处理,确保波导腔体内部环境与外部完全隔离.

2.1 电磁波能量泄露抑制结构设计

在气密性波导-微带垂直过渡结构中,为实现可靠的粘接结构,石英基板的尺寸需比波导口大2~3 mm,以便利用环氧树脂将基板牢固粘连至波导腔体.然而,过

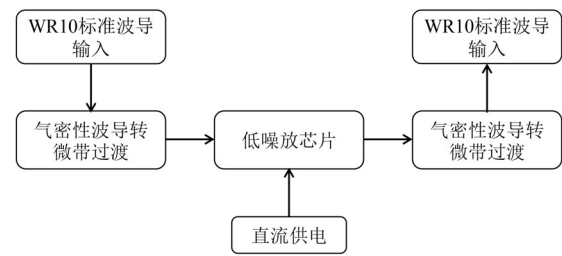


图2 LNA模块设计框图

大的基板尺寸会引发电磁波能量在波导与微带间耦合后的泄漏和谐振,影响过渡结构的阻抗匹配性能.为此,本文引入间隙波导结构解决该问题.

间隙波导是基于理想电导体(Perfect Electrical Conductor, PEC)与理想磁导体(Perfect Material Conductor, PMC)构成的平行板结构.当PEC与PMC之间的间距满足特定条件时,根据麦克斯韦方程组,该结构的间距之间在特定频段将不存在电磁传播模式,成为传播禁带^[6].图3所示为间隙波导结构的单个金属柱模型和周期性仿真结果,其PMC下表面与PEC(金属底板)之间的距离为 $d+e$,石英基板厚度为 e ,金属柱高度为 a ,柱间距为 b ,柱宽度为 c .在三维电磁仿真软件(Computer Simulation Technology, CST)中建立了该结构的电磁色散模型,仿真结果可知周期性排列的金属柱在70~110 GHz频段内无模式传输,形成电磁波传播禁带,可用于抑制石英基板上能量的泄漏与谐振^[7].

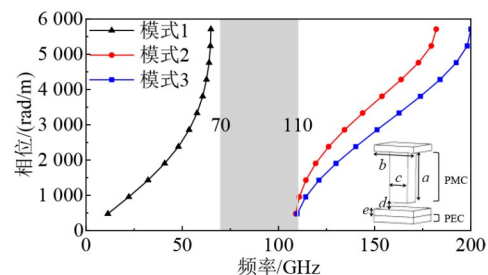


图3 周期性金属柱模型的色散曲线仿真结果

2.2 低插损气密性波导-微带过渡结构设计

实现波导与微带之间高效的模式能量转换是实现低插损封装的核心.目前主流方案包括探针过渡^[8]和鳍线过渡^[9],其中鳍线过渡结构虽具有较好电气性能,但通常需在基板上钻孔,难以满足气密性要求.而探针过渡结构不仅加工简便,且具备良好的带宽性能和耦合效率.本文基于E面探针设计了具备气密性能的波导-微带垂直过渡结构,图4(A)为单边过渡的仿真模型,图4(B)为波导短路区域,探针与高阻抗线、50微带线之间通过渐变线连接图4(C),以减小高阻抗段对整体匹配性能的不利影响.石英基板尺寸为7 mm × 5.78 mm × 0.1 mm,考虑到加工公差可能导致PMC结构

(金属柱)下表面与石英基板接触,为防止基板破裂,在波导模块中设计放置石英基板的凹槽,并预留 $100\ \mu\text{m}$ 的微小间隙,确保石英基板不与上腔体的任何表面直接接触。

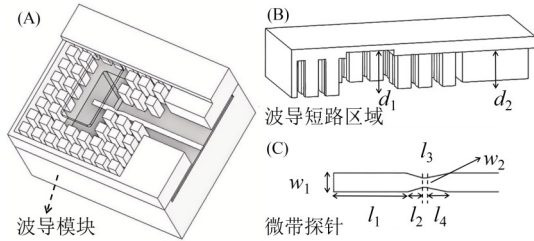


图4 气密性单边波导-微带过渡仿真模型

在三维电磁仿真软件(High Frequency Structure Simulator, HFSS)中对该结构进行仿真设计,输入为 WR10 波导,石英基板介电常数设置为 3.78,损耗角正切为 0.001,厚度为 $100\ \mu\text{m}$,放置基板的凹槽深度 $200\ \mu\text{m}$,微带线金层厚度为 $3\ \mu\text{m}$,金属柱初始参数如图 3 所示.初始探针长度(l_1)及波导短路区域(d_1)约为四分之一波长.优化过程中首先对金属柱尺寸进行微调,然后改变金属柱在波导短路区域的分布位置,避免不必要的谐振,最后对探针、渐变线和高阻抗线进行参数化扫描.图 5 展示了有无周期性金属柱结构下的电场强度分布对比及 S 参数仿真结果,可见引入间隙波导后明显抑制了石英基板上的电磁波能量泄漏和高次模的产生。

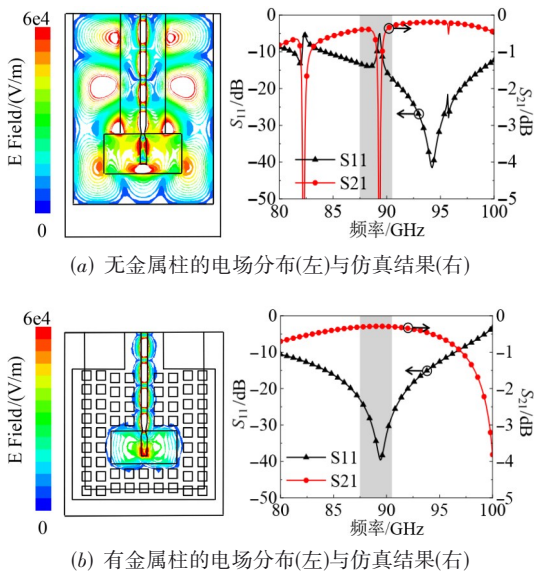


图5 电磁波能量泄露抑制与仿真结果对比

2.3 金丝寄生效应补偿结构设计

本模块采用金丝键合技术实现芯片 Pad 与微带线

之间互连,主要原因在于该工艺具备结构简单、成本低廉和工艺成熟等优势.然而,键合线在高频信号传输中会引入较强的电感特性,尤其当键合线长度较长时,其寄生电感将导致阻抗失配和传输损耗的增加^[10,11].为缓解金丝引入的电感效应,已有多种补偿方法被提出,包括金带键合、多线并联键合等技术手段,虽在一定程度上能改善高频性能,但仍需对金丝寄生效应进行精细建模与补偿设计,特别是在高频毫米波段.由文献[12]可知,金丝的寄生电感和特性阻抗计算公式如下:

$$Z = \frac{\eta_0}{4\pi} \times \ln \left(\frac{2h\sqrt{s^2+4h^2}}{sr} \right) \quad (1)$$

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \times \ln \left(\frac{2h\sqrt{s^2+4h^2}}{sr} \right) \quad (2)$$

其中, η_0 为真空中的波阻抗; μ_0 为真空磁导率; h 、 p 、 r 为键合线的高度、长度和半径; s 为两根键合线的间距.式(1)可知金丝为高特性阻抗线;式(2)可知为使金丝自带的寄生电感尽可能小,金丝应尽量保持短、平、粗;若条件允许,推荐采用金带以降低寄生参数.但由于毫米波段对金丝引入的寄生电感敏感性较低,且综合考虑成本因素,本设计仍选用金丝键合方式^[13].

为定量分析金丝寄生电感对 LNA 模块性能的影响,在 HFSS 中建立了“背靠背”波导-微带过渡仿真模型.由于金丝寄生特性主要与互连结构有关,而与芯片本体的电气特性关系较小,因此仿真中使用一段 $50\ \Omega$ 微带基板代替芯片,专注于建模金丝互连的寄生行为.金丝建模中定义了三项关键参数:键合点之间的水平距离 d_3 、键合高度 h_1 ,以及两条金丝之间的分裂角度 θ .依据实际装配工艺能力设定,键合线的直径为 $25\ \mu\text{m}$,保证金丝长度在 $200\sim 300\ \mu\text{m}$ 的同时, $d_3 = 130\ \mu\text{m}$, $h_1 = 60\ \mu\text{m}$, $\theta = 30^\circ$.

金丝键合线在连接两条特性阻抗相同的传输线(通常为 $50\ \Omega$)时,会引入串联寄生电感,如图 6(a)所示.该电感在高频下会呈现显著的感抗,导致阻抗失配和信号反射.为补偿这一效应,可将键合点下方的微带线局部加宽,如图 6(b)所示,使其特性阻抗低于 $50\ \Omega$.这段低阻抗微带线等效于一个并联到地的电容,与金丝的串联电感共同构成一个 L 型匹配网络.在特定的频率和结构尺寸下,该网络能够将失配的阻抗重新变换回系统的特征阻抗,如图 6(c)所示,从而在目标频率附近有效抑制反射,改善传输性能^[14,15].两根金丝引入的寄生电感等效为 L_1 和 L_2 ,微带线加宽的电容效应等效为 C_1 ,对微带线的 w_3 和 l_3 进行优化,即可实现理想阻抗匹配.低阻抗微带线优化尺寸为 $w_3 = 0.28\ \text{mm}$, $l_3 = 0.17\ \text{mm}$.如图 6(d)所示,金丝寄生效应补偿前后使得

工作带宽内的反射损耗从约-15 dB 提高到-25 dB 以下,有效降低能量的反射.

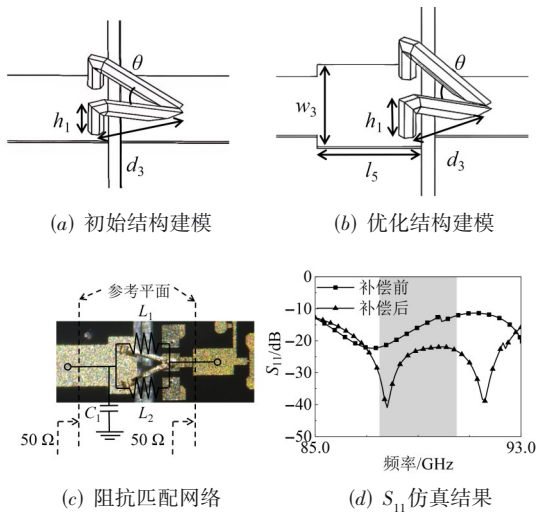


图6 金丝补偿结构建模和仿真结果对比

3 模块封装与测试结果

为验证所设计的封装结构,选用雄安太芯公司的一款工作频率覆盖 75~110 GHz 的低噪声放大器芯片(型号:TCC1906N)进行封装与测试.模块的金属腔体材质为黄铜,表面电镀金层,采用计算机铣削技术加工而成.图7为模块密封装配与整体仿真模型图,左边为间隙波导加工,右边为基板、芯片、电容和金丝键合.器件内部装配结构详见图8.图8(A)中石英基板和LNA芯片通过环氧胶与波导模块黏合固定;图8(B)为间隙

波导加工细节;图8(C)中芯片 pad 与微带线、芯片电容和玻璃绝缘子采用金丝进行键合;图8(D)为金丝寄生效应补偿结构的显微镜放大细节图.图9为模块组装图.测试平台由 ROHDE & SCHWARZ ZNA (10 MHz~67 GHz) 矢量网络分析仪、75~110 GHz 扩频模块及直流稳压电源搭建.

S 参数测试频率范围为 75~110 GHz,考虑模块实际应用中工作频段为 87.5~90.5 GHz,选取 80~100 GHz 区间测试结果进行对比分析.图10展示了模块 S 参数实测结果与芯片的增益曲线对比.在 87.5~90.5 GHz 工作频带内,模块增益 S21 保持在 20.7 dB 左右;对比芯片自身增益曲线(如图10灰色曲线为 21.5 dB 左右),可知双边封装损耗小于 1 dB.此外,该 LNA 模块工作频带内输入端反射损耗 S11 小于 -20 dB,输出端反射损耗 S22 小于 -10 dB.随着工作频率的升高,在 95~100 GHz 时,增益下降且反射损耗增强(如图10红色曲线所示),该现象与单边气密性波导-微带过渡结构设计有关,但在工作频段 87.5~90.5 GHz 该 LNA 性能良好,符合预期目标.

模块的噪声系数测量(黑色曲线)与芯片(红色曲线)对比结果如图11所示,在 87.5~90.5 GHz 频带内,其典型噪声系数为 2.5 dB 左右,与芯片高度吻合.但在 95~100 GHz 之后,噪声系数恶化,原因为该频段内增益下降,反射损耗增强,主要是单边过渡仿真模型中间隙波导结构与石英基板上的射频能量在 100 GHz 频率左右有较强谐振,在宽带应用中需要进一步优化设计.

基于实物测试验证,本文所设计的 W 频段 LNA 满足性能指标要求.噪声系数在 87.5~89.5 GHz 的目标频

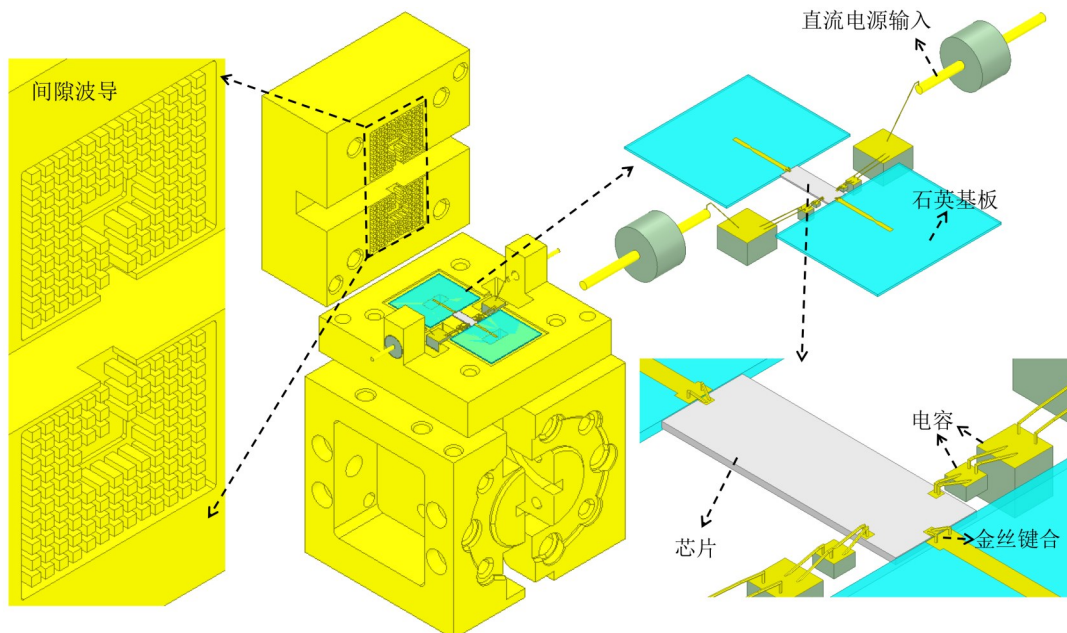


图7 LNA 密封装配与整体仿真模型

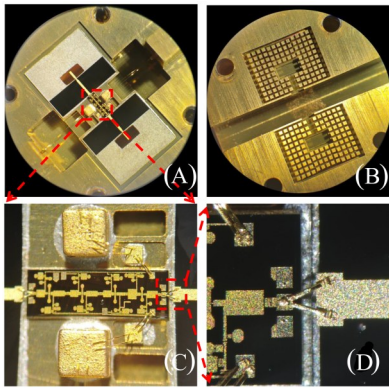


图 8 模块内部装配细节

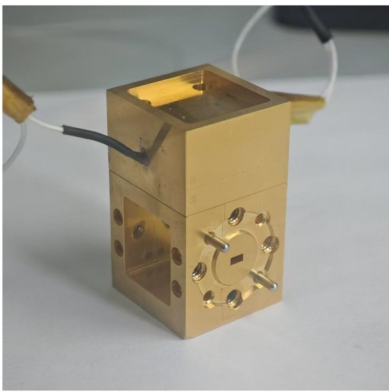


图 9 模块组装图

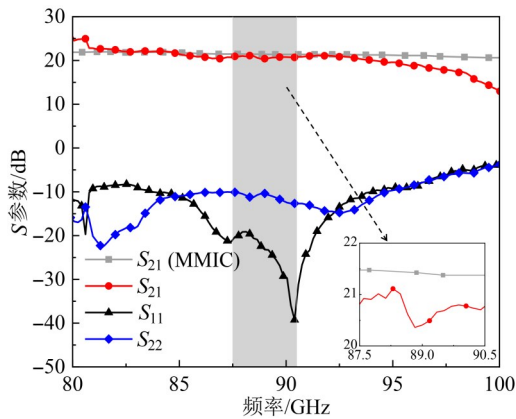


图 10 LNA 模块 S 参数测试结果与芯片增益对比

带内,实测值 2.5 dB 左右. 表 1 系统地对比了本文 LNA 与近年来相关文献报道的 W 频段 LNA 的性能指标. 尽管针对 W 频段 LNA 的封装解决方案已有较多研究(文献[16~19]均为 E 面探针不具备气密性,文献[20]具备气密性,但他是基于低温共烧陶瓷(Low-Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)基板上面的贴片天线将波导内的能量辐射到微带线当中,与文中结构完全不同,且本文提出的结构更易加工与安装). 本文所设计的气密性封装结构成功实现了低损耗的信号过渡. 与表 1 中所列的大多数文献方案相比,本器件的封装插损

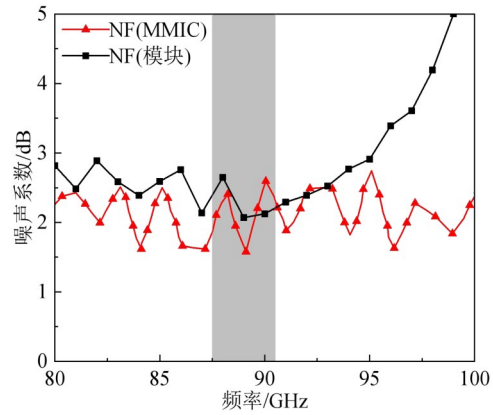


图 11 LNA 模块噪声系数测试结果与芯片对比

普遍更低,有效保障了 LNA 的增益和系统级联噪声性能. 其成功实践验证了该设计理念的可行性,为未来将其推广应用于太赫兹频段的低噪声放大器气密封装提供思路.

表 1 本文工作与近几年相关文献结果对比

参考文献	工作频率/ GHz	有无气密性能	封装插损/ dB	噪声系数/dB
文献[16]	70~116	无	1.4	2.7
文献[17]	88~100	无	2	3.2
文献[18]	87.5~90.5	无	1.2	2.4
文献[19]	85~100	无	2	3
文献[20]	90~100	有	2.2	3.5
本文	80~95	有	1	2.5

4 结论

本文设计并实现了一款工作于 87.5~90.5 GHz,具有气密性和低插损特点的低噪声放大器模块. 设计了新型气密性波导-微带垂直过渡结构,实现了器件内部环境与外部环境的有效隔离,并且引入间隙波导结构用于抑制微带基板中的电磁波能量泄露与谐振,有效提高了波导-微带过渡的阻抗匹配. 通过在芯片 Pad 与微带线之间引入低阻抗匹配段,补偿金丝键合引起的寄生电感,进一步降低了芯片与微带线互连处的阻抗失配. 模块的测试结果表明各项电性能指标在工作频段与芯片自身保持高度一致,验证了该设计在高频气密封装应用中的可行性.

参考文献

- [1] YU B, WANG Z G, LI O P, et al. A 200 GHz four-element phased-array receiver system-in-package using HTCC technology for sub-terahertz communications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2024, 72(7): 3920-3934.
- [2] KAI T, HIROKAWA J, ANDO M. A stepped post-wall

- waveguide with aperture interface to standard waveguide[C]//IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004. Piscataway: IEEE, 2004: 1527-1530.
- [3] GŁOGOWSKI R, ZÜRCHER J F, PEIXEIRO C, et al. Double resonance transition from rectangular waveguide to Substrate Integrated Waveguide[C]//2013 7th European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2013: 3353-3354.
- [4] ZARIFI D, ORAZI H. A V-band microstrip line to groove gap waveguide transition[C]//2016 16th Mediterranean Microwave Symposium. Piscataway: IEEE, 2017: 1-2.
- [5] SVEDIN J, PELLIKKA T and HUSS L G. A direct transition from microstrip to waveguide for millimeter-wave MMICs using LTCC[C]//Asia-Pacific Microwave Conference 2011. Piscataway: IEEE, 2011: 102-105.
- [6] DEUTSCHMANN B, JACOB A F. A full W-band waveguide-to-differential microstrip transition[C]//2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Piscataway: IEEE, 2019: 335-338.
- [7] SHI Y R, ZHANG J Z, ZENG S, et al. Novel W-band millimeter-wave transition from microstrip line to groove gap waveguide for MMIC integration and antenna application[C]//IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2018: 3172-3176.
- [8] ROOSEFID R, ALÓS E A, SCHÄFER T, et al. Compact microstrip line to gap waveguide transition suitable for beam steering antenna applications at K-band[C]//2025 19th European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2025: 1-4.
- [9] YE J X, WANG Y Q, MA K X. A low-loss hermetic packaging design for high-gain low-noise amplifier module with waveguide output[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2025, 35(10): 1610-1613.
- [10] GONG J H, CHEN X, HU A Y, et al. A V-band 8-element phased array radiometer front-end for passive millimeter wave imaging[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(21): 21057-21070.
- [11] JAIN S K, KUMAR A, CHAKRAVARTY R, et al. Ka-band low noise amplifier sub-system module for communication satellite payload[C]//2014 IEEE International Microwave and RF Conference. Piscataway: IEEE, 2015: 29-32.
- [12] FU M Y, JIANG N H, BORNEMANN J, et al. Design and packaging analysis of a ku band high gain GaAs MMIC LNA[C]//2025 IEEE 20th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics. Piscataway: IEEE, 2025: 140-143.
- [13] 郭庆, 陈雨庭, 段宗明, 等. 基于 65 nm CMOS 工艺的小型化高增益低噪声放大器设计[J]. 电子学报, 2023, 51(3): 593-600.
- GUO Q, CHEN Y T, DUAN Z M, et al. Design of miniaturized high-gain low noise amplifier based on 65 nm CMOS process[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(3): 593-600. (in Chinese)
- [14] 张博, 张勇, 江伟佳, 等. 太赫兹功率放大单片封装技术研究[J]. 电子学报, 2023, 51(10): 2724-2732.
- ZHANG B, ZHANG Y, JIANG W J, et al. Research on terahertz monolithic integrated power amplifier package[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(10): 2724-2732. (in Chinese)
- [15] 刘军, 于伟华, 吕昕. 太赫兹波导封装技术的研究与应用[J]. 电子学报, 2022, 50(8): 1859-1865.
- LIU J, YU W H, LÜ X. The study and application of terahertz waveguide package[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(8): 1859-1865. (in Chinese)
- [16] BRAZÁLEZ A A, RAJO-IGLESIAS E, KILDAL P S. Design of a transition from WR-15 to microstrip packaged by gap waveguide technology[C]//2014 International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings. Piscataway: IEEE, 2015: 235-236.
- [17] THOME F, LEUTHER A, GALLEGO J D, et al. 70~116 GHz LNAs in 35 nm and 50 nm gate-length metamorphic HEMT technologies for cryogenic and room-temperature operation[C]//IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. Piscataway: IEEE, 2018: 1495-1498.
- [18] KOBAYASHI K W, KUMAR V. A broadband 70~110 GHz E-/W-band LNA using a 90-nm T-gate GaN HEMT technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021, 31(7): 885-888.
- [19] CHEN Y, WANG W B, CHEN Z F, et al. An 88~100 GHz high-robustness low-noise amplifier with 3.0~3.5 dB noise figure using 0.1 μm GaN-on-SiC process[C]//2022 IEEE MTT-S International Wireless Symposium. Piscataway: IEEE, 2022: 1-3.
- [20] JOHN L, THOME F, WEBER R, et al. Low-noise amplifiers for the Arctic weather satellite[C]//2023 53rd European Microwave Conference. Piscataway: IEEE, 2023: 18-21.

作者简介



邓世河 男, 2000 年 11 月出生于重庆市. 2023 年毕业于苏州大学通信工程专业, 获学士学位. 现为上海航天技术研究院硕士研究生, 主修微波与天线技术. 主要研究方向为低温接收前端集成与测试, 毫米波/太赫兹集成电路设计与封装.

E-mail: dsh15826488821@163.com



张盟 男, 1993 年 5 月出生于辽宁省朝阳市. 2024 年毕业于德国杜伊斯堡埃森大学电子与电气工程专业, 获博士学位. 现为上海航天电子技术研究所高级工程师. 主要研究方向为太赫兹准光收发隔离网络设计, 共振隧穿二极管源和无线注入技术, 片上太赫兹天线测试系统设计, 深硅刻蚀和倒装等微纳加工及先进封装工艺等.

E-mail: meng.zhang-sast@out.com



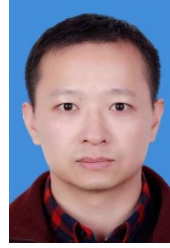
沈亚飞 男, 1990 年 3 月出生于江苏省泰州市. 现为上海航天电子技术研究所高级工程师. 主要研究方向为功率放大器和射频前端设计.

E-mail: shenyafei900914@163.com



谢振超 男, 1982 年 9 月出生于上海市. 现为上海航天电子技术研究所研究员、硕士生导师. 主要研究方向为卫星有效载荷.

E-mail: xiezheh@126.com



王文伟 男, 1982 年 9 月出生于湖南省永兴县. 现为上海航天电子技术研究所研究员、硕士生导师. 主要研究方向为微波辐射计接收机系统.

E-mail: www804@163.com