



24~30 GHz GaN HEMT 单片集成单刀双掷开关

摘要

本文研究了一种基于 100 nm 氮化镓(GaN)高电子迁移率晶体管(HEMT)工艺设计的 24~30 GHz 单片集成单刀双掷(SPDT)开关.该开关采用 1/4 波长微带线并联 HEMT 开关器件的结构,通过采用两级并联 HEMT 实现低插入损耗同时获得更好的隔离度.测试结果显示,在 24~30 GHz 的 5G 毫米波频段内以及 0/-5 V 的控制电压下,该开关的插入损耗低于 1.5 dB,隔离度优于 28 dB,输入功率 1 dB 压缩点大于 27 dBm.测试结果能够很好地验证仿真结果.

关键词

GaN HEMT;单片微波集成电路;单刀双掷开关

中图分类号 TN43

文献标志码 A

收稿日期 2021-07-03

资助项目 国家重点研发计划(2018YFB1802002);广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2017ZT07X032)

作者简介

曾丁元,男,硕士生,主要从事毫米波微波集成电路的研究.eed_yuen@mail.scut.edu.cn

朱浩慎(通信作者),男,博士,副教授,主要研究方向为微波毫米波器件与集成电路.zhuhs@scut.edu.cn

1 华南理工大学 电子与信息学院/广东省毫米波与太赫兹重点实验室,广州,510641

2 琶洲实验室 智能感知与无线传输中心,广州,510330

3 南京理工大学 电子工程与光电技术学院,南京,210094

0 引言

由于 5G 移动通信技术的快速发展,Sub-6 GHz 频段拥挤的频谱资源已难以满足 5G 无线通信的超高数据速率需求.毫米波频段具有丰富的频谱,是 5G 技术发展的必然选择.3GPP 已经明确 n257(28 GHz)和 n258(26 GHz)频段为 5G 毫米波的优先部署频段.因此,近年来在上述频段开展了较多的研究工作^[1-2],也得到非常多的关注.

在时分双工通信系统中,单刀双掷开关(Single-Pole Double-Throw, SPDT)控制发射和接收信号链路,通常置于天线与功率放大器和低噪声放大器之间作为连接模块,是收发系统中的关键模块之一.对于接收链路而言,开关的插入损耗直接影响整个系统的噪声性能,而对于发射链路则主要影响输出的功率以及功率附加效率^[3].毫米波频段前端模组中的开关,需要低的插入损耗来减小开关对整体系统性能的恶化.在传统射频前端中,开关与功率放大器和低噪声放大器通过封装实现互连往往引入额外的损耗与失配,尤其在毫米波频段,对性能恶化尤为显著.因此,对于毫米波前端电路,各模块采用同种工艺实现并单片集成有利于降低损耗,提升集成度.

过去,工作在毫米波频段的单刀双掷开关多使用 CMOS、GaAs 等工艺实现^[4-5].CMOS 开关以其成熟的工艺技术,可以做到易集成、低成本但是其器件的击穿电压低,功率容量受限.GaAs 开关拥有较低的插入损耗以及隔离性能,但相较于近年来发展起来的 GaN 开关技术,其衬底的热导率以及击穿电压较低,导致功率密度不及 GaN 开关.由于宽禁带半导体 GaN 在大功率射频功放的功率密度以及效率等方面具有显著优势,成为近年来的研究热点.随着 5G 毫米波技术的发展,研究大功率高效率毫米波集成前端具有广阔的应用前景.近期研究表明,GaN 开关也可实现良好的插入损耗和隔离度性能.因此,利用 GaN 单片微波集成电路技术(MMIC)实现射频开关并与 GaN 功率放大器和低噪声放大器实现单片集成,可在大功率毫米波前端方面获得更优的性能^[6].2015 年中国电子科技集团公司第十三研究所的郭丰强等^[7]设计出了工作在 Ku 波段的 GaN 大功率单刀双掷开关,其插入损耗小于 0.9 dB,隔离度大于 27 dB,可承受 10 W 的连续波输入功率;2015 年北京理工大学的郭德淳教授团队在第 16 届通信技术国际会议上发表了 Ka 波段的宽带 GaN 开关,采用 1/4 波长转换并联结构,且并联晶体管采用两个对称并联形式以增大隔离度,设计的开关在

30~40 GHz 频带内插入损耗小于 2 dB,隔离度优于 25 dB,回波损耗优于 18 dB,输入功率 1 dB 压缩点可达 39 dBm^[8];2019 年罗马第二大学的 Polli 等^[9]采用 100 nm GaN 工艺设计出了一款应用于空载卫星的 Ka 波段单刀双掷开关,不同于传统并联开关结构,该开关使用串联晶体管感性谐振结构,33~39 GHz 频带内实现了插入损耗为 1.1 dB,隔离度为 22 dB,以及 39 dBm 的输入功率 1 dB 压缩性能;2019 年德国弗莱堡应用固体物理研究所的 Thome 等^[10]采用 100 nm GaN 工艺设计了一款 28~51 GHz 的单刀双掷开关,采用 1/4 波长转换并联结构,插入损耗为 1.4~2 dB,隔离度为 23.5~27 dB.

本文基于硅基 GaN 工艺设计了一款工作在 24~30 GHz 的单刀双掷开关,可同时覆盖 5G 毫米波的 n257 和 n258 频段.该开关通过采用 1/4 波长转换并联结构来兼顾插入损耗和隔离度性能,输入输出端口均串联 MIM 电容隔离直流成分并参与匹配.测试结果显示所设计的开关插入损耗在 24~30 GHz 内,插入损耗低于 1.5 dB,隔离度优于 28 dB,输入功率 1 dB 压缩点大于 27 dBm(-5 V 栅极偏置下),电路面积为 1.08 mm².

1 SPDT 开关电路设计

本文研究的 GaN 开关采用 OMMIC 的 100 nm 的硅基 GaN 工艺(D01GH)适合微波和毫米波应用,其工艺截面如图 1 所示,包含空气桥,使用两层互联金属 IN 和 MET1,可以实现绕线电感和微带传输线.有高低密度两种类型的电容以及两种类型的电阻,高阻值电阻使用 GaN 有源层实现,铬镍金属电阻阻值较低但精度高,通孔穿过 100 μm 的高电阻率硅基

板减少对地寄生电感.采用 AlGaIn/GaN 异质结高电子迁移率晶体管 (HEMT) 作为开关器件,具有 100 nm 栅长的蘑菇型栅极,使用再生长的欧姆接触减小源极接触电阻,特征频率(f_t)和最大振荡频率(f_{max})分别为 110 GHz 和 160 GHz.30 GHz 测试的功率密度为 3.3 W/mm,击穿电压为 40 V^[11].HEMT 作为开关器件时的导通电阻(R_{on})和关断电容(C_{off})分别为 1.4 Ω·mm 和 0.45 pF/mm.

对于开关电路设计,通常由 HEMT 器件的栅极电压控制信号导通或者关闭.毫米波频段的寄生效应严重,而开关器件的导通电阻和关断电容直接决定了开关的插入损耗和隔离度性能,需仔细考虑开关的尺寸以获得满足要求的性能.一般而言,当 HEMT 器件栅极电压 V_g 大于其截止电压时,HEMT 器件导通,可简单等效为导通电阻 R_{on} .而 HEMT 栅极电压低于截止电压时,HEMT 器件截止,可简单等效为关闭电容 C_{off} . R_{on} 与 C_{off} 的值越小则会获得越好的开关性能.如图 2 所示:随着 HEMT 器件栅宽增大, R_{on} 减小, C_{off} 增大;HEMT 器件栅宽减小,则 R_{on} 增大, C_{off} 减小.当栅宽为 200 μm 的时候,开关器件的 R_{on} 约为 6.8 Ω, C_{off} 约为 91 fF,此时可获得较好的插入损耗和隔离度性能.若使用单级 HEMT 器件并联开关电路,则整体开关电路的隔离度为 20 dB 左右,不满足设计需求.而为保证较低的插入损耗,HEMT 器件栅宽不能增大以减小 R_{on} 来优化隔离度性能.故需使用两级并联的开关电路,第二级选择较小栅宽的 HEMT 器件,如 100 μm 栅宽,以获得较小的 C_{off} 值,避免开关电路插入损耗性能恶化,同时两级并联结构又能获得较好的开关隔离度.

本文设计的 SPDT 开关为 1/4 波长转换并联结

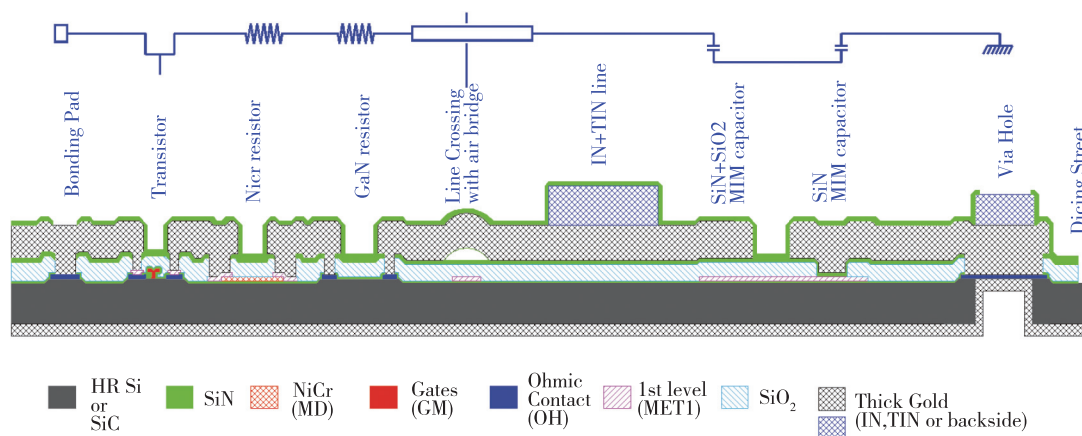


图 1 OMMIC D01GH 工艺截面

Fig. 1 The cross section of OMMIC D01GH process

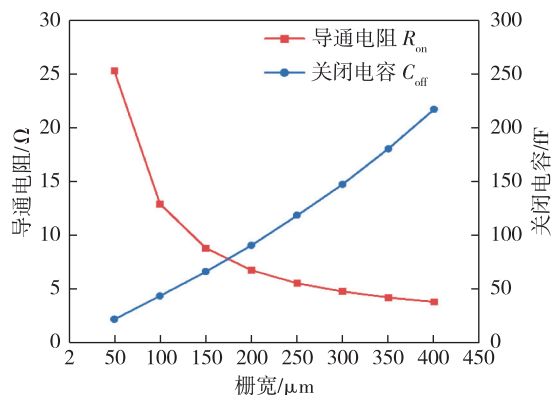


图2 不同栅宽开关器件的导通电阻和关断电容

Fig. 2 R_{on} and C_{off} of the HEMT with different gate widths

构,两条支路为对称结构,每条支路使用两级 HEMT 器件并联的拓扑以获得较大的隔离度.图 3 为设计的开关电路的拓扑结构.TL1 和 TL2 为微带传输线,理论上长度为 $1/4$ 波长时可以获得良好的隔离度,但一般只适用于频带较窄的设计.因此,在本文的设计中,需要适当调节其长度.此外,当 M1 和 M3 关闭时,该条支路导通,TL2 与 M1 和 M2 关闭状态下的等效电容 C_{off1} 和 C_{off2} 组成 π 型电路,并与 TL1 完成阻抗变换. C_1 和 C_2 均为 MIM 电容参与电路的输入和输出匹配,并可隔离直流成分.

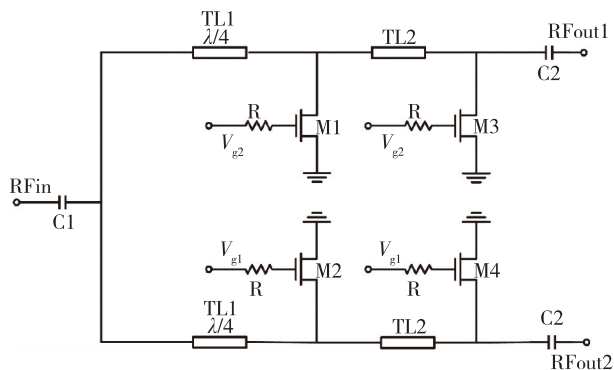


图3 SPDT 开关拓扑结构

Fig. 3 Topology of the proposed SPDT switch

利用电磁仿真工具 ADS 进行优化仿真,第一级 HEMT 器件 M1 和 M2 需选取较大尺寸以降低导通电阻增大隔离度,而第二级 HEMT 器件 M3、M4 尺寸较小,减小关断电容降低插入损耗.最终优化后选取 M1 和 M2 的栅宽为 $200 \mu\text{m}$,M3 和 M4 的栅宽为 $100 \mu\text{m}$. C_1 为 180 fF , C_2 为 700 fF .该工艺 50Ω 特性阻抗线宽为 $83 \mu\text{m}$ 左右,不利于电路版图布局.故电路中微带线宽度均为 $40 \mu\text{m}$,其特性阻抗约为 67Ω ,与电路中其他元件互连并参与匹配.栅极电阻 R 用以隔

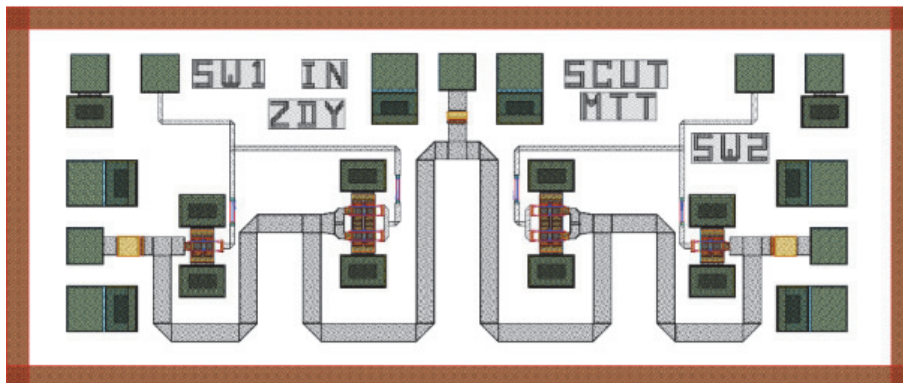
离泄漏至栅极的射频信号,此处栅极电阻 R 的值为 $4 \text{ k}\Omega$.电路整体控制电压使用两个 PAD,控制电压为 0 V 和 -5 V .

2 仿真与测试结果

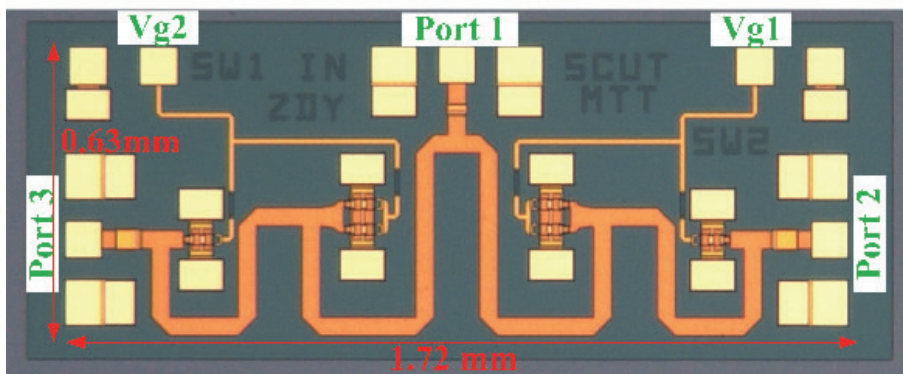
基于 100 nm GaN 工艺实现 $24 \sim 30 \text{ GHz}$ 的 SPDT 开关,电路版图如图 4a 所示,电路加工实物照片如图 4b 所示,电路尺寸为 $630 \mu\text{m} \times 1720 \mu\text{m}$.开关的测试方案如图 5 所示,使用 R&S $\text{\textcircled{R}}$ ZVA67 矢量网络分析仪进行测试.采用在片的短路、开路、负载、馈通校准方案(SOLT)对电路 3 个端口进行校准.如图 5b 所示,由于网络分析仪输出的信号功率有限,故大信号 S 参数测试时在待测开关的输入端口加入了驱动放大器来增大网络分析仪输入开关的信号功率,并在开关导通支路的输出端加入衰减器,衰减进入网络分析仪的信号功率.

SPDT 开关电路经在片测试,得到图 6 所示的仿真与测试结果.测试时,如图 4b 所示,一条支路的控制电压 V_{g2} 为 0 V ,该支路断开;另一支路控制电压 V_{g1} 为 -5 V ,该支路导通.图 6a 为开关的输入输出回波损耗曲线, S_{11} 和 S_{22} 为导通支路输入端口 1 和输出端口 2 的回波损耗, $24 \sim 30 \text{ GHz}$ 频带内测试的输入回波损耗大于 15 dB ,输出回波损耗大于 12 dB ,均优于仿真结果.图 6b 为开关的插入损耗(S_{21})和隔离度(S_{31} 、 S_{23})曲线, $24 \sim 30 \text{ GHz}$ 频带内,测试的插入损耗低于 1.5 dB (最低为 1.18 dB),基本符合仿真结果;测试的关断支路的端口 3 至公共端口 1 之间的隔离度为 $28.8 \sim 30.8 \text{ dB}$,导通支路的端口 2 至关断支路的端口 3 之间的隔离度为 $29 \sim 30 \text{ dB}$,均优于仿真结果 $2 \sim 3 \text{ dB}$,说明实际 HEMT 晶体管的寄生参数与仿真模型稍有差别.

图 7 是 SPDT 开关的大信号仿真结果.由图 7a 可以看出开关在 $24 \sim 30 \text{ GHz}$ 频带内的输入 1 dB 功率压缩点大于 30 dBm .经过对电路的简单测试,得到大信号 S 参数的测试结果如图 7b 所示, X_{cp} 表示插入损耗压缩曲线, S_{21} 为大信号输入下的插入损耗性能曲线, P_{in} 为测试时的输入功率.当输入功率为 27 dBm 时,插入损耗还未压缩至 1 dB ,可知此开关的输入功率 1 dB 压缩点大于 27 dBm .测试时的开关电路输入端接入了驱动放大器,导通支路输出端接了衰减器,与后仿真的电路环境有所区别,引入了一定的损耗,故测试的输入 1 dB 压缩点与后仿真结果有一定差距.表 1 对比了已发表的一些毫米波频段的



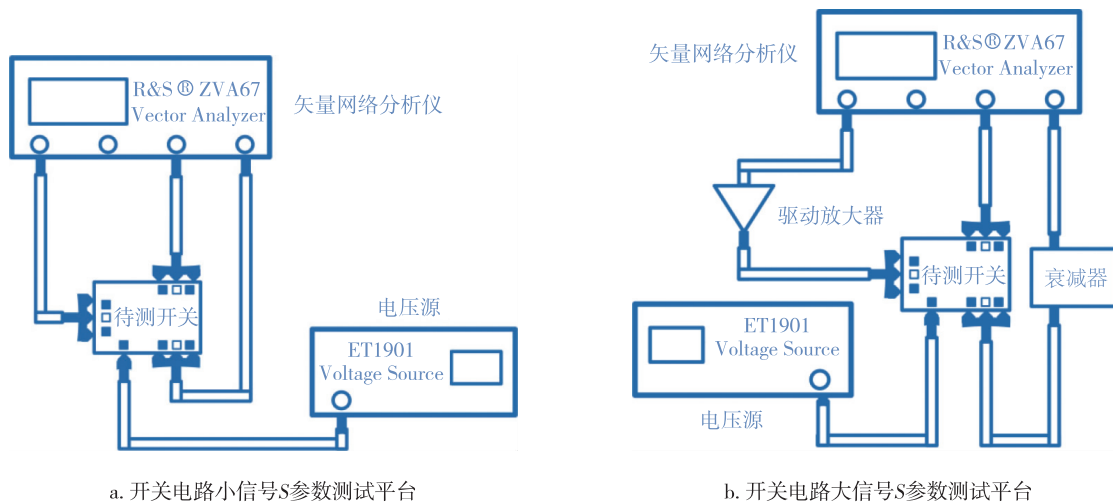
a. SPDT开关版图



b. SPDT开关实物照片

图4 SPDT 开关电路版图和实物显微照片

Fig. 4 Layout (a) and micrograph (b) of the SPDT switch



a. 开关电路小信号S参数测试平台

b. 开关电路大信号S参数测试平台

图5 开关电路测试平台搭建

Fig. 5 Measurement setup of the SPDT switch a.small signal;b.large signal

GaN 单刀双掷开关的工作,可以看到本文基于 GaN 的开关电路在 28 GHz 毫米波频段拥有优异的插入损耗以及隔离度性能,有利于集成高性能 GaN 毫米波前端。

3 结束语

本文基于 1/4 波长转换并联的两级开关拓扑结构,采用硅基 100 nm GaN 工艺设计并实现了一种毫米波 SPDT 开关.电路测试结果表明该 SPDT 开关在

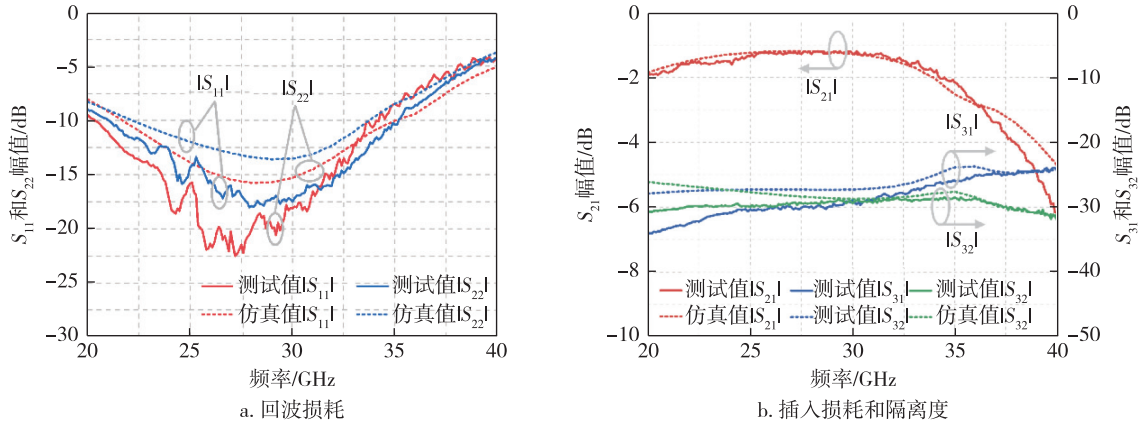


图 6 SPDT 开关仿真与测试结果

Fig. 6 Simulation and measurement results of the SPDT switch a.return loss;b.insertion loss and isolation

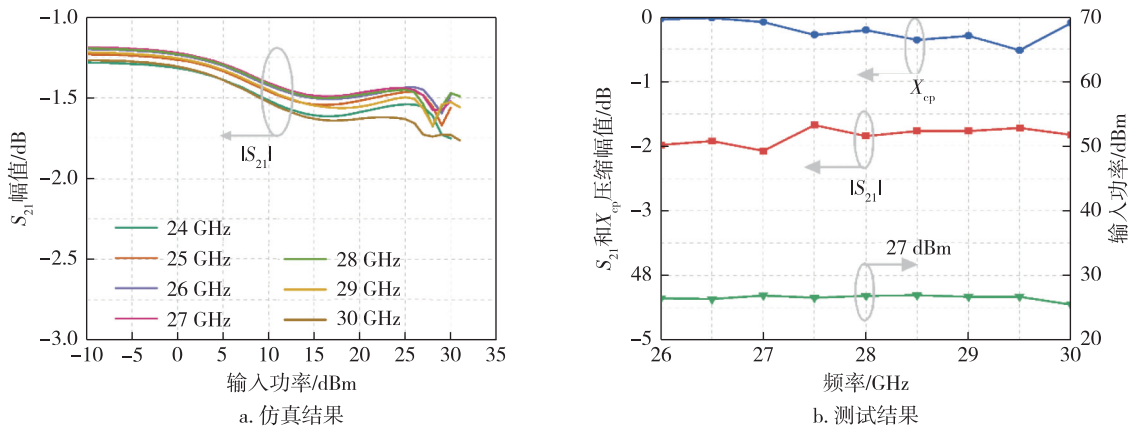


图 7 SPDT 开关大信号 S 参数(S_{21})仿真与测试结果

Fig. 7 Simulation (a) and measurement (b) results of the large signal S-parameter (S_{21}) for the SPDT switch

表 1 与已有文献的性能比较

Table 1 Performance comparison with prior arts

	工艺	带宽/GHz	插入损耗/dB	隔离度/dB	IP1dB/dBm	面积/mm ²
文献[8]	0.15 μm GaN/SiC	30~40	1.86(最小值)	27	39	
文献[9]	0.1 μm GaN/Si	33~39	1.1(最小值)	22	39	4.5
文献[10]	0.1 μm GaN/SiC	28~51	1.4~2	23.5~27		1.25
本文	0.1 μm GaN/Si	24~30	1.2~1.5	28.8~30.8	>27	1.08

24~30 GHz 的范围内实现了 1.2~1.5 dB 的插入损耗,隔离度为 28.8~30.8 dB,输入功率 1 dB 压缩点大于 27 dBm,在插入损耗、隔离度和功率容量上都表现出了优良的性能,适用于单片集成的 GaN 毫米波前端组件,在 5G 毫米波相控阵系统上具有较好的应用前景.

参考文献

References

[1] Lee K H, Choi S, Kim C Y. A 25-30 GHz asymmetric

SPDT switch for 5G applications in 65-nm triple-well CMOS [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(6) : 391-393
 [2] Kim H T, Park B S, Song S S, et al. A 28-GHz CMOS direct conversion transceiver with packaged antenna array for 5G cellular system [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(5) : 1245-1259
 [3] Thome F, Leuther A, Ambacher O. Low-loss millimeter-wave SPDT switch MMICs in a metamorphic HEMT technology [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(2) : 197-200
 [4] Uzunkol M, Rebeiz G. A low-loss 50-70 GHz SPDT switch in 90 nm CMOS [J]. IEEE Journal of Solid-State

- Circuits, 2010, 45(10): 2003-2007
- [5] Zhang L, Cheng X, Deng X J, et al. Design of K/Ka-band passive HEMT SPDT switches with high isolation [C] // 2017 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), 2017: 1-3
- [6] Campbell C F, Dumka D C. Wideband high power GaN on SiC SPDT switch MMICs [C] // 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2010: 145-148
- [7] 郭丰强, 要志宏. Ku 波段 GaN 大功率单刀双掷开关设计 [J]. 半导体技术, 2015, 40(11): 835-839
GUO Fengqiang, YAO Zhihong. Design of a Ku-band GaN high power single-pole double-throw switch [J]. Semiconductor Technology, 2015, 40(11): 835-839
- [8] Guo D C, Qiao T, Luo X B, et al. Design of a Ka-band broadband SPDT switch MMIC based on GaN HEMTs [C] // 2015 IEEE 16th International Conference on Communication Technology (ICCT), 2015: 241-243
- [9] Polli G, Longhi P E, Colangeli S, et al. GaN/Si Ka-band SPDT for observation payloads [C] // 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2019: 288-290
- [10] Thome F, Brückner P, Quay R, et al. Millimeter-wave single-pole double-throw switches based on a 100-nm gate-length AlGaIn/GaN-HEMT technology [C] // 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2019: 1403-1406
- [11] Gasmi A, Kaamouchi M E, Poulain J, et al. 10 W power amplifier and 3 W transmit/receive module with 3 dB NF in Ka band using a 100 nm GaN/Si process [C] // 2017 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2017: 1-4

A 24–30 GHz GaN HEMT SPDT switch MMIC

ZENG Dingyuan¹ ZHU Haoshen^{1,2} FENG Wenjie^{2,3} CHE Wenquan^{1,2} XUE Quan^{1,2}

1 School of Electronic and Information Engineering/Guangdong Provincial Key Laboratory of Millimeter-Wave and Terahertz, South China University of Technology, Guangzhou 510641

2 Intelligent Sensing and Wireless Transmission Center, Pazhou Laboratory, Guangzhou 510330

3 School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094

Abstract A 24–30 GHz monolithic integrated Single-Pole Double-Throw (SPDT) switch based on 100 nm Gallium Nitride (GaN) High Electron Mobility Transistor (HEMT) process is presented in this paper. This switch adopts a quarter-wavelength microstrip line with parallel HEMT devices topology. By using two-stage parallel HEMT design, the SPDT achieves greater isolation while maintaining good Insertion Loss (IL). With a control voltage of 0/–5 V, the measured IL of this SPDT is less than 1.5 dB, the isolation is greater than 28 dB, and the input power 1 dB compression point is greater than 27 dBm within 24–30 GHz 5G millimeter-wave frequency bands. The measurement results well verify the simulations.

Key words GaN HEMT; monolithic microwave integrated circuit (MMIC); SPDT switch