

一种 DC-6 GHz 的 GaAs PHEMT 宽带 低插入损耗单刀双掷开关

刘宇轍,梁晓新,万 晶,阎跃鹏

(中国科学院 微电子研究所,北京 100029)

摘 要: 利用稳态 $0.5\ \mu\text{m}$ GaAs PHEMT 工艺设计了一款宽带低插入损耗的单刀双掷 (SPDT) 开关芯片. 该开关在传统串并联结构的基础上,考虑了封装引入的键合线电感效应,并利用键合线电感,优化了开关的射频性能. 同时分析了串并联结构开关的功率容量与偏置点的关系,把开关偏置在最佳偏置点,能显著提升功率容量. 所设计的开关,在 DC-6 GHz 范围内,插入损耗小于 0.55 dB,隔离度大于 24 dB. 在 $(-7.5\ \text{V}/7.5\ \text{V})$ 控制电压下,输入 1 dB 压缩点大于 34 dBm,可用于 6 GHz 频率范围内的各种应用. 提出的利用键合线提升开关射频性能的思想,可用于指导开关及其封装的设计.

关键词: 射频开关;单刀双掷 (SPDT);PHEMT;低插入损耗

中图分类号: TN710.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)03-0001-05

A DC-6 GHz GaAs PHEMT Wideband Low Insertion Loss SPDT RF Switch

LIU Yu-zhe, LIANG Xiao-xin, WAN Jing, YAN Yue-peng

(Institution of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper presents a wideband low insertion loss single pole double throw switch using Win $0.5\ \mu\text{m}$ GaAs PHEMT process. This switch adopts traditional series-shunt configuration, and take advantage of bonding wire inductor to improve the performance of the switch. Then analyze the relationship between the power capacity and the bias point. With proper bias point, the power capacity of the switch can be enhanced. The designed switch shows good measured performance: in the DC-6 GHz frequency range, the insertion loss is less than 0.55 dB, the isolation is better than 24 dB. when the switch is biased under $-7.5\ \text{V}/7.5\ \text{V}$ condition, the input 1 dB compression point is 34 dBm. The designed switch may be used under 6 GHz application. The concept of taking advantage of bonding wire to enhance the performance of the switch may be applied to switch and package design.

Key words: radio frequency switch; SPDT; PHEMT; low insertion loss

1 引言

近年来,随着移动互联网技术的兴起,人们对无线通信技术的要求越来越高,推动着各种无线通信技术不断发展. 小型化、低成本、高性能成为的射频器件发展的趋势. 当前的民用射频技术中,如 GSM, WCDMA, TD-SCDMA, TD-LTE, WLAN 等,主要集中在

在 6 GHz 以下. 射频开关是在无线通信中起着控制射频系统收发信号的作用,开关的射频性能对整个通信系统有着决定性的影响. 开关的插入损耗每增加 1 dB,会损耗掉功率放大器 20% 的输出功率;开关的隔离度决定泄露到关断的支路中信号的大小,会对系统造成干扰;开关的线性度直接决定了整个系统的线性度.

PIN 二极管器件、MEMS 器件、CMOS 器件、PHEMT 器件都被广泛应用于单刀双掷 (SPDT) 开关的设计。PIN 二极管消耗较大的直流功耗^[1], MEMS 和 CMOS 工艺制造的开关功率容量有限^[2,3], PHEMT 以其近乎于零的直流功耗、较大的功率容量、快速的切换速度, 成为设计便携式宽带无线通信开关的首选^[4]。

利用 GaAs PHEMT 工艺设计的射频开关已经有诸多报道^[5-7], 在减少插入损耗上, 主要集中在以下方面: 在开关管两端并联传输线电感^[8], 采用传输线与并联管寄生电容构成工传输线^[9], 在较低的频率采用传输线做电感会导致占用较大的芯片面积, 而且这些设计没有考虑利用键合线电感来改进开关指标。

针对上面提到的问题, 本文在传统的串并联开关设计的基础上, 考虑了封装引入的寄生键合线效应, 并利用寄生的键合线电感来提升开关的射频性能。并分析了开关功率容量的限制因素, 提出了开关的最佳偏置点, 相对常规的偏置点, 有效提升了开关的功率容量。

2 SPDT 开关设计

2.1 稳态 PHEMT PD50 工艺

本文设计的单刀双掷开关采用稳态 PHEMT PD50 工艺实现^[10]。PHEMT 工艺中管子的最小沟道长度为 $0.5 \mu\text{m}$, 同时集成了增强型和耗尽型管。稳态对耗尽型的管子针对开关设计做了专门的优化, 耗尽型管子的主要特征参数如表 1 所示。其中 R_{on} 和 C_{off} 是开关设计中最关注的两个特征参数, R_{on} 和 C_{off} 越小, 所设计的电路的插入损耗和隔离度越好。PD50 工艺可以集成 TFR 电阻、Mesa 电阻、MIM 电容、层叠电容、圆形螺旋电感、方形螺旋电感、二极管等原件。

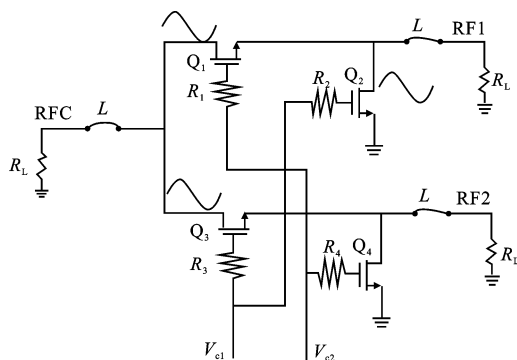
表 1 耗尽型 PHEMT 特征参数

参数	数值	参数	数值
I_{dss}	235 mA/mm	R_{on}	1.6 Ω/mm
I_{max}	375 mA/mm	C_{off}	170 fF/mm
V_{p}	-1.0 V	G_{max}	330 mS/mm
BV_{GD}	-16 V	$F_t @ G_{\text{max}}$	32 GHz

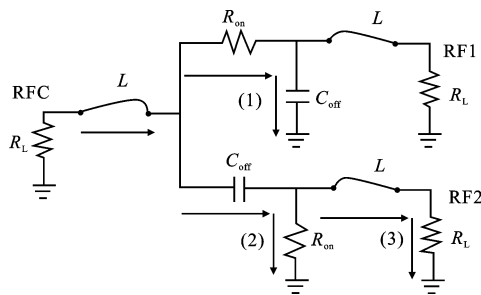
2.2 电感补偿分析

传统的利用 D-mode 的管子设计的单刀双掷开关采用串并联结构设计^[6], 要么没有进行封装, 即使进行了封装, 也未考虑到键合线对开关性能的提升作用。

本文提出了基于键合线感性补偿的射频开关结构, 考虑到输入端和输出端的键合线对开关的影响相同, 以 L 表示, 整体电路图如图 1(a) 所示。当 V_{c1} 为低电平, V_{c2} 为高电平的时候, RFC 到 RF1 支路导通, 在其支路上的 Q_1 导通, Q_2 截止; RFC 到 RF2 支路截止, 在其支路上的 Q_3 截止, Q_4 导通。作为开关管的 SPDT 开关, 在其导通状态情况下, 可以等效成为一个电阻记为 R_{on} , 在夹断情况下, 可以等效为一个电容, 记为 C_{off} 。其等效电路如图 1(b) 所示。



(a) 键合线电感补偿的串并联 SPDT 开关原理图



(b) 等效电路

图 1 键合线补偿的 SPDT 开关结构及其等效电路

下面分析键合线电感对 SPDT 开关性能的改善作用。为了便于叙述, 假设 RFC 到 RF1 处于导通状态, RFC 到 RF2 处于截止状态。当不考虑键合线补偿作用时, 信号从 RFC 端进入, 信号在 RFC 到 RF1 支路中, 由于 Q_2 截止, 等效为一电容, 随着频率升高, 电容的容抗减少呈现低阻抗状态, 信号通过路径 (1) 泄露到地, 导致插入损耗增加; 对于 RFC 到 RF2 支路, 由于 Q_3 处于截止状态, 等效为一电容, 随着频率升高, 通过 (2) 路径泄露到地, 插入损耗升高; 通过 (3) 路径泄露到输出端口, 从而导致隔离度恶化。

本文利用键合线的寄生电感效应来提升开关的性能, 选择合适的键合线长度 L_1 , 可以并联谐振掉 RFC 到 RF2 的寄生电容, 在谐振点的时候, 从射频端口看过来的阻抗有最大值, 等效为一带阻电路, 此

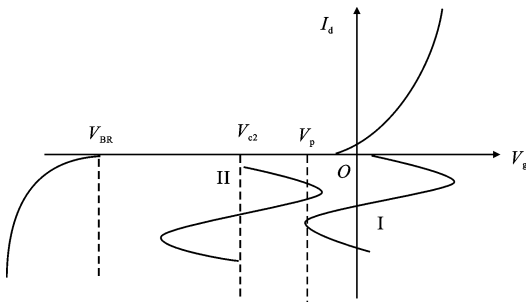


图3 开关的电压波形分析

电压为负值,即为图1(a)中管子 Q_2, Q_3 的状态.随着射频信号的增大, V_{gs} 的正半周期信号超过 V_p 夹断信号,处于截止状态的开关管将导通,造成信号泄露到地和RF2输出端口,同时也恶化了隔离度;对于导通状态的开关管,其栅端的偏置电压常为正电压或者电压为零,随着信号的增大, V_{gs} 的负半周期信号超过 V_p ,处于导通状态的开关管会被夹断,造成信号被阻隔.影响开关的功率容量和线性度.开关的最优负压偏置点位于 $\frac{1}{2}(V_{BR} - V_p)$,最优的正偏压

点位于 $\frac{3}{2}V_p - \frac{1}{2}V_{BR}$,开关管不论在开启还是导通状态下,都具有不失真的电压摆幅.此时开关管能达到的最大输出功率为

$$P_{\max} = \frac{1}{8Z_L} (V_{BR} - V_p)^2 \quad (7)$$

在具体的设计过程中,注意考察是电流受限还是电压受限,从而合理选择管子的尺寸和偏置点,在实际的设计过程中,通过调节偏置电压,可以达到开关最大的输出功率和最优的线性状态.

2.4 设计过程

在实际设计过程中,首先考虑开关要求的功率容量,根据式(1)计算管子所需要的 I_{dss} ,确定串联管的沟栅指长度和栅指的数目,从而根据工艺库确定管子的可选择空间,并根据功率容量计算出此时射频信号的电压摆幅,偏置电压的设计参考图3,保证电压波形不发生失真.在管子的可选择空间内,选择合适的电路尺寸,调节键合线长度,以达到电路的最佳性能.本文中,设计指标的要求如表2所示.

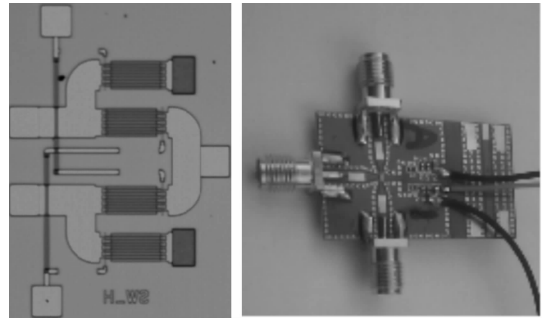
电路结构原理图如图1(a)所示,最终经过优化的管子尺寸和参数为:所有管子均为8个栅指,每个栅指长度为 $125 \mu\text{m}$,栅端射频隔离电阻为 $10 \text{ k}\Omega$ 用于减少信号泄露到栅端.输入输出端口的键合线长 1.2 mm .芯片面积为 $0.55 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$.

表2 开关设计指标

参数	指标要求
插入损耗	小于 0.6 dB
隔离度	大于 24 dB
回波损耗	大于 12 dB
输入 1 dB 压缩点	大于 30 dBm

3 测试结果

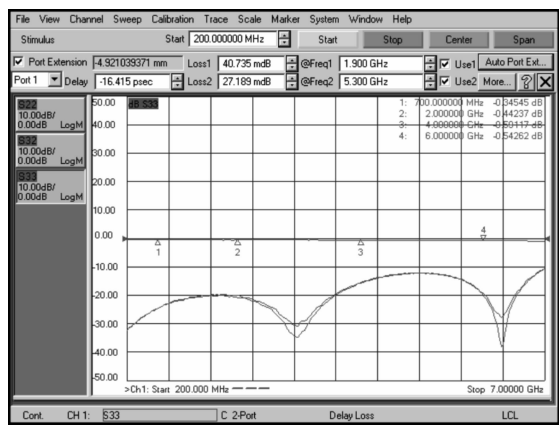
所设计的芯片用稳懋 PD50 工艺进行了流片,图4(a)、(b)分别为电路的芯片照片和测试 PCB 板照片.开关芯片布局对称,RFC端,RF1端和RF2端相互隔离.芯片通过导电银胶焊接在PCB板上,然后通过金丝键合线把芯片PAD与PCB板连接起来进行测试.S参数的测量通过矢量网络分析仪N5230测试得到.



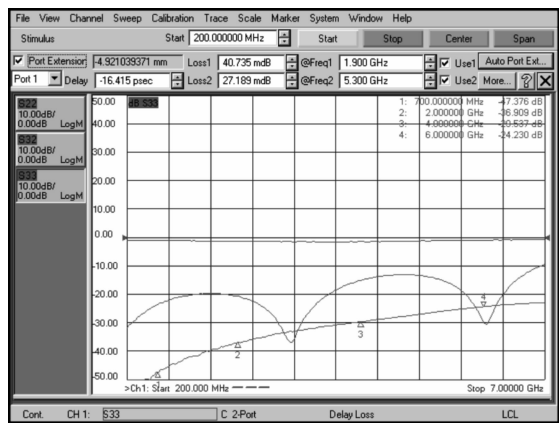
(a) 开关芯片 (b) 开关测试电路图

图4 开关照片和测试电路板

S参数测试结果如图5所示,在整个频段范围内,插入损耗小于 0.55 dB ,隔离度大于 24 dB ,回波损耗大于 12 dB ,小信号指标满足设计要求.同时测量了开关的大信号参数.开关大信号测试平台如图6所示.由于驱动功放频率的限制,只测量了 2 GHz 频率点处的 1 dB 压缩点.并且比较了在不同偏置电压下插入损耗随输入功率变化的对比,如图7所示.采用 $(-3 \text{ V}/0 \text{ V})$, $(-5 \text{ V}/0 \text{ V})$, $(-7.5 \text{ V}/0 \text{ V})$ 情况下,开关的输入 1 dB 压缩点分别为 26.5 dBm , 31 dBm 和 32.7 dBm ; $(-3 \text{ V}/3 \text{ V})$, $(-5 \text{ V}/5 \text{ V})$, $(-7.5 \text{ V}/7.5 \text{ V})$ 情况下,开关的输入 1 dB 压缩点为 31.7 dBm , 33.8 dBm , 34 dBm .可以看出开关的输出功率不仅与管子尺寸有关,还与偏置电压有关,在 $(-7.5 \text{ V}/7.5 \text{ V})$ 偏置电压下,此时射频开关有最大的输出 1 dB 压缩点 34 dBm .不同偏置电压下射频开关的插入损耗对比如图7所示.



(a) 插入损耗与回波损耗



(b) 隔离度测试

图5 S参数测试结果

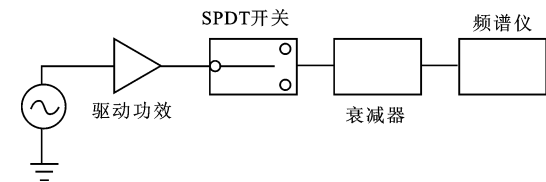


图6 大信号测试平台原理图

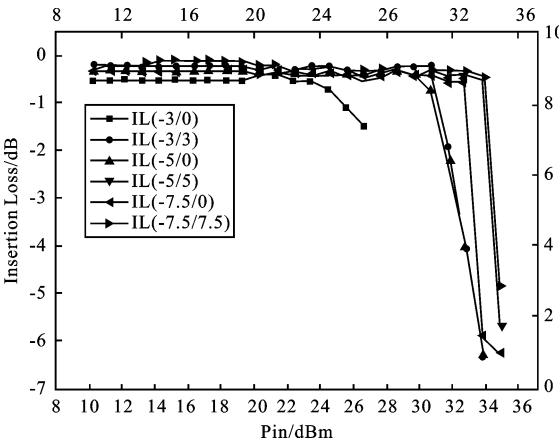


图7 不同偏置点下射频开关的插入损耗对比

4 结束语

本文利用稳态的PD50工艺,设计了一款工作于DC-6 GHz的单刀双掷射频开关.射频开关采用串并联结构,并考虑了封装中的键合线电感效应,利用键合线电感来提升串并联开关结构的性能.同时分析了开关功率容量与管子尺寸、偏置点的关系,通过实际的测量验证了分析的正确性.开关通过流片,并通过了COB测试,实际测试结果为在DC-6 GHz频带范围内,开关的插入损耗小于0.55 dB,隔离度大于24 dB,导通情况的的输入输出回波损耗大于12 dB,在2 GHz频率下,当偏置为在(-3 V/3 V)控制电压下,输入1 dB压缩点大于31 dBm,当偏置为(-7.5 V/7.5 V)偏置情况下,开关的1 dB压缩点为34 dBm.本文提出的利用键合线提升开关射频性能的思想,可用于指导开关及其封装的设计.

参考文献:

[1] Jung Gil J, Kyoung-hoon Y. High-linearity K-band absorptive-type MMIC switch using GaN PIN-diodes [J]. Micro-wave and Wireless Components Letters, 2013,23(1):37-39.

[2] Donghyup S, Dong-Woo K, Rebeiz G M. A 0.01-8-GHz (12.5 Gb/s) 4X4 CMOS switch matrix [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2012, 60(2):381-386.

[3] Shi C, Rantakari P, Malmqvist R, et al. Switched beam antenna based on RF MEMS SPDT wwitch on quartz substrate[J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8(3): 383-386.

[4] Zeji G, Johnson D, Belletete S, et al. Low insertion loss and high linearity PHEMT SPDT and SP3T switch ICs for WLAN 802.11 a/b/g applications[C]// Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium. USA,IEEE, 2004: 505-508.

[5] Schindler M J, Morris A. DC-40 GHz and 20 ~ 40 GHz MMIC SPDT switches [J]. IEEE Transactions on Electron Devices,1987, 34(12): 2595-2602.

[6] 黎明,张海英,徐静波,等. GaAs基E/D PHEMT技术单片集成微波开关及其逻辑控制电路[J]. 半导体学报,2008,29(9):1823-1826.

[7] Wang Xiaoying, Peng Yangyang, Sui Wenquan. GaAs pHEMT multi-band multi-mode SP9T switch for quad-band GSM and UMTS handsets applications[J]. Journal of Zhejiang University-Science C:Computers & Electronics,2011,12(4): 317-322.

(下转第10页)

技术规范而言,无疑是最好的选择。

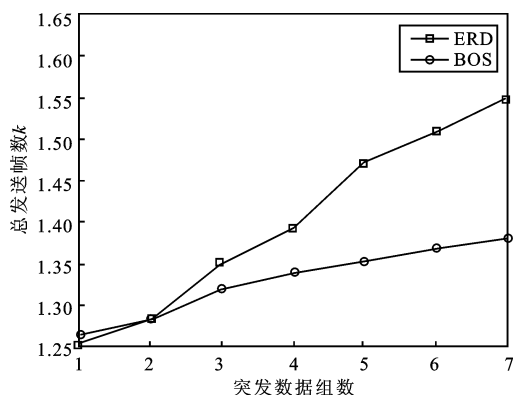


图6 两种路由方式总发送帧数

5 结束语

本文提出了一种面向频谱感知的 WSN 宽频带监测系统设计方案,该方案采用分频段协作感知和感知结果融合的处理机制,可以实现多频段频谱的同步和宽频带感知.同时,设计了频谱感知节点和汇聚节点,改进了 LEACH 分簇路由协议^[9]并进行了进行对应的能耗的分析.NS2 仿真实验结果表明,频谱感知无线传感器网络通过节点之间的自动组网和协同工作,可以对目标区域实施有效的宽频带频谱监测,在簇内选择合适的感知节点进行频谱感知并将感知结果发送给簇首进行判决,可以使得系统能耗达到均衡,并有效地延长系统的生命周期。

参考文献:

[1] Glisic S G. 高级无线网络 4G 技术[M]. 陶小峰,田

辉,崔琪楣,等译,北京:人民邮电出版社,2013.

- [2] Yucek T, Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 116-130.
- [3] Duan D L, Yang L Q, Principe J C. Cooperative diversity of spectrum sensing for cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(6): 3218-3227.
- [4] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. Computer networks, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [5] 许毅. 无线传感网原理及方法[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [6] 张建照,姚富强,柳永祥,等. 面向宽频段频谱感知的 WSN 架构及其分簇算法[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2013, 14(1): 12-18.
- [7] Chen Guo, Tao Peng, Xu Shaoyi. Cooperative spectrum sensing with cluster-based architecture in cognitive radio networks[C]// Proceedings of the 69th IEEE on Vehicular Technology Conference. Spain, Barcelona, 2009.
- [8] 李鑫,张霞,于宏毅. 一种电磁传感器网络的群规模约束分群算法[J]. 电路与系统学报,2013, 18(2): 457-465.
- [9] 冉鹏. 网络路由协议性能研究与算法优化[D]. 上海:同济大学,2007.

作者简介:

王景琿 男,(1969-),博士研究生,高级工程师.研究方向为电磁频谱监测、无线传感器网络、移动通信系统.

E-mail: wjinghui@sina.com.

(上接第5页)

- [8] McLevige W V, Sokolov V. Microwave switching with parallel-resonated GaAs FETS[J]. Electron Device Letters, 1980, 1(8): 156-158.
- [9] Hong-Yeh C, Ching-Yan C. A low loss high isolation DC-60 GHz SPDT traveling-wave switch with a body bias technique in 90 nm CMOS process[J]. Microwave and Wireless Components Letters, 2010, 20(2): 82-84.
- [10] Hsien-Chin C, Chia-Shih C, Yuan J, et al. Enhancement and depletion-mode InGaP/InGaAs pHEMTs on 6-inch GaAs substrate [C]// Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. China, Suzhou: IEEE, 2005: 1-4.

作者简介:

刘宇轹 男,(1985-),博士研究生.研究方向为射频集成电路设计. E-mail: liuyuzheucas@126.com.

梁晓新 女,(1979-),博士,副研究员.研究方向为射频与微波集成电路设计.

万晶 女,(1986-),硕士,助理研究员.研究方向为射频与微波集成电路设计.

阎跃鹏 男,(1963-),博士,研究员.研究方向为射频与微波集成电路与系统.