

# 隔离度大于 95dB 的 Ku 波段微带型开关

袁婷婷<sup>†</sup> 陈晓娟 陈中子 姚小江 李 滨 刘新宇

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘要:** 研究了具备高隔离度性能的 Ku 波段基于 PIN 二极管的微带型开关电路, 通过采用含有多个子单元电路的拓扑结构以及合理优化子单元电路参数, 解决了微带型开关在微波频段难以实现高隔离度的难题. 所研制的开关电路在 15.75~16.25GHz 频段范围内, 隔离度大于 95dB, 插入损耗小于 4dB, 输入端  $S_{11}$  均小于 -12dB, 输出端  $S_{22}$  均小于 -20dB, 电路体积仅为 34mm×11mm×5mm.

**关键词:** 微波开关; PIN 二极管; 高隔离度; Ku 波段

**PACC:** 7280E; 7850G **EEACC:** 1350F

**中图分类号:** TN015 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)10-2034-04

## 1 引言

在雷达收发机系统、卫星通信、各种通信导航电子战系统以及微波测量技术中, 广泛采用微波开关电路作为控制器件实现微波信号的通、断或转换. 其中基于 PIN 二极管的微带型开关电路因具有响应快、体积小、重量轻等优点而得到广泛应用, 因此设计出具有高隔离度以及低插入损耗的微波开关有着很好的现实意义. 虽然基于 PIN 二极管微带型开关电路的相关理论已经很成熟, 但应用于高频段时, 仅仅增加 PIN 二极管数量难以使开关电路具备高隔离度性能, 并且由于各种高频寄生效应, 其理论设计与实际调试的差距较大, 使得开关难以实现高隔离度性能. 作者根据相关理论以及实践经验, 对 Ku 波段微带型开关电路进行研制.

## 2 基于 PIN 二极管的开关原理

通常应用在开关中的 PIN 二极管正向导通与反向截止模型如图 1 所示<sup>[1]</sup>, 正向导通时二极管等效为电阻  $R_s$  与寄生电感  $L_s$  串联, 对微波信号呈低阻抗,  $R_s$  的大小以及开关电路所采用的结构决定了开关电路通路时的插入损耗; 反向截止时二极管等效为结电容  $C_T$ 、结电阻  $R_p$  与寄生电感  $L_s$  串联, 对微波信号呈高阻抗, 结电容  $C_T$  的大小以及开关电路所采用的结构决定了开关电路的隔离度. 设计开关电路首先需要根据其性能要求选取 PIN 二极管的正向导通电阻  $R_s$  以及反向截止结电容  $C_T$  这两个参数, 同时必须考虑模型中存在寄生电感  $L_s$ , 该寄生电感会导致开关电路插入损耗增大, 隔离度减小.

## 3 电路设计与分析

由 PIN 二极管构建的开关电路通常由两种基本结

构构成, 即串联结构和并联结构. 其中串联结构开关电路具有较宽的带宽, 但插入损耗比较大<sup>[2,3]</sup>; 并联结构开关电路插入损耗小, 可提供相对较高的隔离度, 功率容量大, 但由于 1/4 波长传输线的使用限制了其带宽<sup>[4,5]</sup>.

对于工作在 Ku 频段以上的开关电路来说, 采用 PIN 二极管串联结构难以实现高隔离度性能, 并且易引入较大损耗. 为了实现高隔离度的开关电路, 同时考虑到电路的带宽要求仅为 500MHz, 作者采用并联结构. 实验发现电路隔离度不等同于每个并联 PIN 二极管所能提供隔离度的线性叠加, 简单增加 PIN 二极管数目并不能够有效提高开关隔离度, 反而会使电路引入更多的损耗. 因此, 作者兼顾电路插入损耗性能以及尺寸要求, 以两管并联为基本子单元电路, 将 3 个子单元电路合理组合以实现高隔离度性能. 基本子单元电路示意图如图 2 所示.

图中  $C_1, C_2$  为隔直电容, 合理取值可有效减小电路的插入损耗<sup>[6]</sup>. 偏置网络采用 1/4 波长传输线  $L_0$  与电阻  $R$  串联, 防止微波信号从偏置网络中泄漏, 进一步

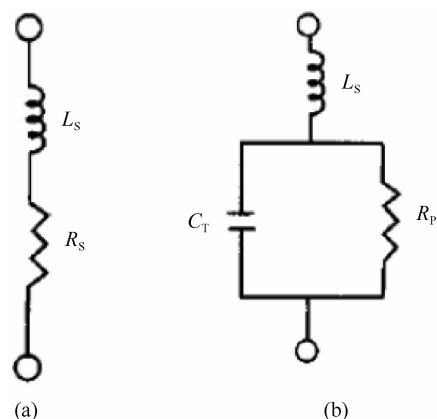


图 1 PIN 二极管射频信号模型 (a)正向导通模型; (b)反向截止模型  
Fig. 1 RF electrical modeling of PIN diode (a)Forward bias model; (b)Zero or reverse bias model

<sup>†</sup> 通信作者. Email: yuantt05@mail.gucas.ac.cn

2008-04-03 收到, 2008-05-29 定稿

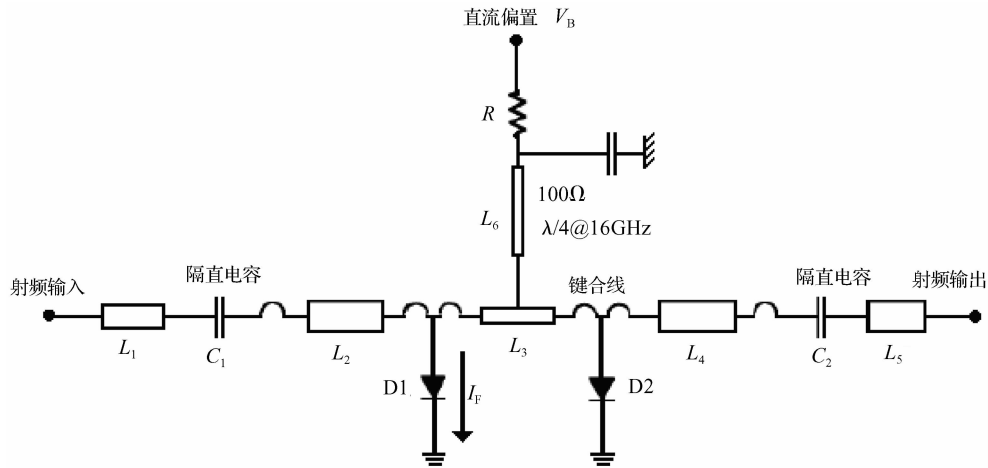


图 2 开关子单元电路结构示意图  
Fig.2 Schematic diagram of the unit cell circuit

改善了开关电路的插入损耗. 其中电阻  $R$  的取值与 PIN 二极管的偏置条件相关<sup>[6]</sup>, 阻值过高会导致流过 PIN 二极管的电流减小, 从而使二极管本身引入的插入损耗增大.  $D1, D2$  为并联 PIN 二极管,  $D1, D2$  截止时对微波信号呈断路, 开关子单元电路处于开态, 反之处于关态. 微带传输线  $L_1 \sim L_5$  为开关子单元电路的微波信号通道, 其中并联二极管之间的传输线  $L_3$  的参数优化是提高开关子单元隔离度的关键.

理论上传输线  $L_3$  长度应为  $1/4$  波长, 但在实际设计中, 考虑到 PIN 二极管的寄生效应以及传输线的高频模型<sup>[7]</sup>, 该传输线长度将偏离  $1/4$  波长, 需优化设计. 同时传输线线宽的选取将影响开关电路的插入损耗性能, 通过选取合适的阻抗, 该传输线能够对开关电路起到阻抗匹配作用, 从而改善开关电路的插入损耗<sup>[3]</sup>.

图 3 给出微带线  $L_3$  长度对开关电路性能的影响. 取并联二极管之间微带线的长度分别为 4, 3.5, 3, 2.5, 2, 1.5 及 1mm. 通过仿真结果可以看出, 开关电路隔离度随该微带线长度的减小而增大, 如图 3(a) 所示; 其插入损耗在所需频段范围 (15.75~16.25GHz) 受该微带线长度影响很小, 几乎不随该微带线长度的变化而变化, 即使在频率高端如 19GHz, 插入损耗只有 0.3dB 的变化, 如图 3(b) 所示. 在满足尺寸及装配要求条件下, 尽量缩短微带线长度, 以提高开关电路隔离度.

图 4 给出微带线  $L_3$  宽度对开关电路性能的影响. 取并联二极管之间微带线的宽度分别为 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4 及 0.2mm. 通过仿真结果可以看出, 开关电路隔离度随该微带线宽度的减小而增大, 如图 4(a) 所示; 但开关电路插入损耗将随该微带线宽度的减小而迅速恶化, 如图 4(b) 所示. 所以需要在隔离度与插入损耗间对该微带线宽度的选取进行折中考虑, 最大程度提高隔离度, 同时将插入损耗控制在合理范围内.

根据上述分析, 本文将微带线  $L_3$  的长度设置为 1.0mm, 宽度设置为 0.6mm. 子单元电路中 PIN 二极管采用 M/ACOM 公司产品 MA4GP022, 其模型参数由厂商提供. 制作微带线的印制版材料选用 Rogers 公司

的 RT5880, 厚度为 0.254mm, 介电常数为 2.2. 开关电路由 3 个子单元电路构成, 3 个子单元电路分布在具有专利技术的多个子腔体中, 有效避免电磁场间串扰, 进一步提高开关电路隔离度.

对开关电路进行 ADS 仿真. 仿真过程中注意以下两点: 一是要保证电路仿真中器件模型的准确性, 如必须考虑 PIN 开关二极管模型中存在寄生串连电感  $L_s$ <sup>[8]</sup>, 从实验结果可以看出, 加入寄生串联电感后的仿真结果与实际测试结果更加接近, 如图 5 所示. 二是要充分考虑到各种寄生效应, 并将这些寄生效应合理地转化为等效元器件加入到仿真中, 如键合线所引入的寄生效应.

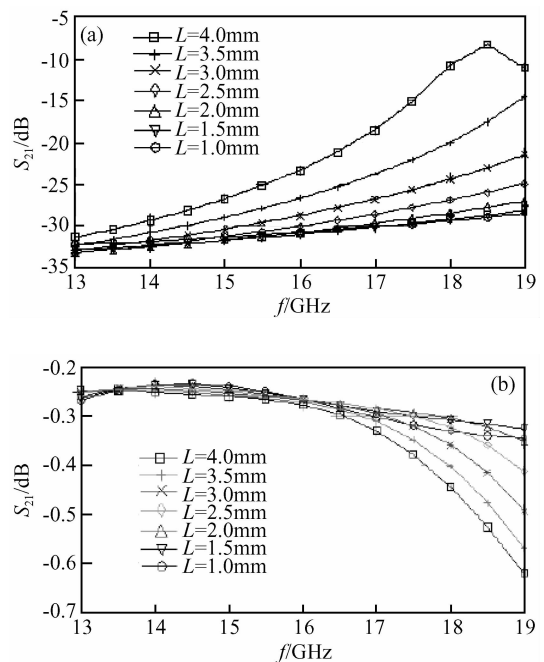


图 3 (a) 子单元电路隔离度随微带线长度的变化规律; (b) 子单元电路插入损耗随微带线长度的变化规律  
Fig.3 (a) Simulated isolation of the unit cell circuit as a function of length of the microstrip; (b) Simulated insertion loss of the unit cell circuit as a function of length of the microstrip

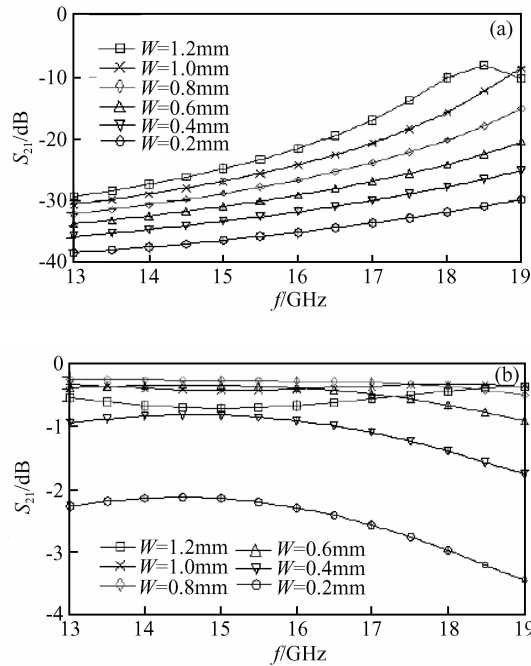


图 4 (a)子单元电路隔离度随微带线宽度的变化规律;(b)子单元电路插入损耗随微带线宽度的变化规律

Fig.4 (a) Simulated isolation of the unit cell circuit as a function of width of the microstrip;(b) Simulated insertion loss of the unit cell circuit as a function of width of the microstrip

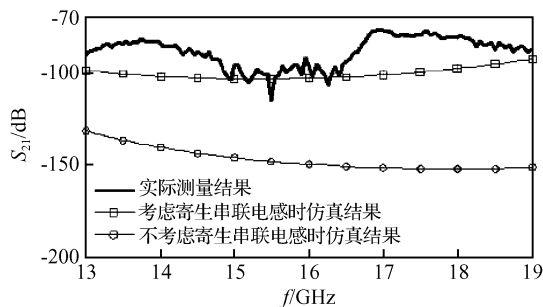


图 5 开关电路隔离度仿真结果与实际测量结果对比

Fig.5 Isolation of the proposed switch circuit;simulated versus measured

## 4 测试结果与分析

依据上述设计思想以及仿真原则,最终实现的微带型开关电路如图6所示.对该开关电路进行小信号测

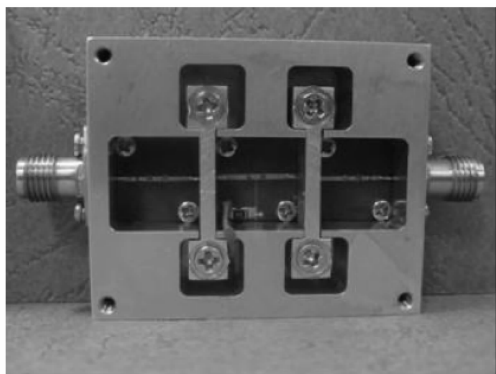


图 6 最终实现的开关电路

Fig.6 Diagram of the fabricated switch circuit

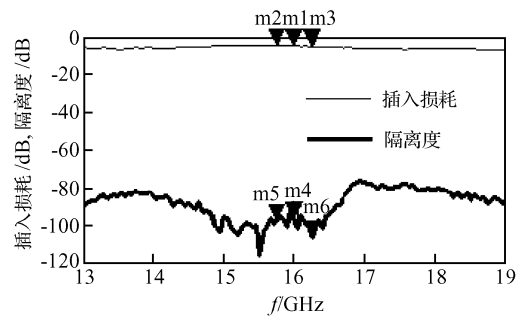


图 7 开关电路隔离度与插入损耗性能

Fig.7 Isolation and insertion loss of the fabricated switch circuit

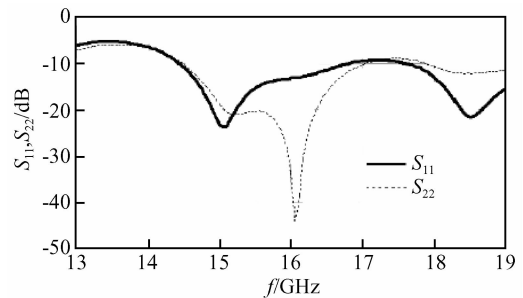


图 8 开关电路的驻波性能

Fig.8  $S_{11}$  and  $S_{22}$  of the fabricated switch circuit

试,测试仪器为 Agilent 8363B 型矢量网络分析仪.图 7、图 8 给出开关电路隔离度、插入损耗以及驻波性能.偏置电压  $V_B = 0V$  下,开关电路隔离度在 13~19GHz 的宽频范围内平均为 80dB 以上,在 15.75~16.25GHz 隔离度均大于 95dB;PIN 二极管的正向导通电流  $I_F = 20mA$  时,插入损耗在所需频段均小于 4dB,输入端  $S_{11}$  均小于 -12dB,输出端  $S_{22}$  均小于 -20dB.

## 5 结论

开关电路以两管并联为基本子单元电路,通过合理设计该子单元电路,并将多个基本子单元电路进行合理组合,有效提高开关隔离度.在所需的频段 15.75~16.25GHz 内,所设计开关电路隔离度大于 95dB,插入损耗小于 4dB,输入端  $S_{11}$  均小于 -12dB,输出端  $S_{22}$  均小于 -20dB.

## 参考文献

- [1] APN1002: Design with PIN diodes. Application note of Skyworks, 2005
- [2] Payne D, Bartle D C, Bandla S, et al. A GaAs monolithic pin SP-DT switch for 2~18GHz applications. Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium, 1989: 177
- [3] David D H, Dave J S, Donna Z. 100MHz to 20GHz monolithic single-pole, two-, three- and four-throw GaAs PIN diode switches. IEEE MTT-S Digest, 1991: 429
- [4] Garver R V. Microwave diode control devices. Artech House, 1976

- [ 5 ] Bellantoni J V, Bartle D C, Payne D, et al. A monolithic high power Ka band PIN switch. IEEE Microwave and Millimeter-wave Monolithic Circuits Symposium, 1989; 47
- [ 6 ] Lee Jar-Lon, Zych Donna, Reese Elias, et al. Monolithic 2~18GHz low loss, on-chip biased PIN diode switches. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1995, 43(2): 250
- [ 7 ] Tanaka Y, Uda H, Hayashi H, et al. A 76~77GHz high isolation GaAs PIN-diode switch MMIC. R&D Review of Toyota CRDL, 2002, 37(2): 19
- [ 8 ] Shigematsu T, Suematsu N, Takeuchi N, et al. A 16~18GHz 20W SPDT switch using shunt discrete PIN diodes. IEEE MTT-S Digest, 1997; 527

## A Microstrip Switch with Isolation Better than 95dB at Ku-Band

Yuan Tingting<sup>†</sup>, Chen Xiaojuan, Chen Zhongzi, Yao Xiaojiang, Li Bin, and Liu Xinyu

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

**Abstract:** This paper presents a microstrip switch using pin diodes for Ku-band applications. At high frequency, especially for millimeter-wave applications, it is hard to obtain a switch with high-isolation, so this paper makes an effort to develop isolation of the switch using a novel topology that contains multiple unit cells and optimizes parameters of the unit cell circuit. The isolation of the fabricated switch is better than 95dB from 15.75 to 16.25GHz, the insertion loss is less than 4dB,  $S_{11}$  is better than  $-12$ dB,  $S_{22}$  is better than  $-20$ dB, and the entire circuit size is only  $34\text{mm} \times 11\text{mm} \times 5\text{mm}$ .

**Key words:** microwave switch; pin-diode; high-isolation; Ku-band

**PACC:** 7280E; 7850G      **EEACC:** 1350F

**Article ID:** 0253-4177(2008)10-2034-04

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: yuantt05@mails.gucas.ac.cn

Received 3 April 2008, revised manuscript received 29 May 2008