

# 基于微组装工艺SPDT开关研究与设计

彭宇, 刘宁川, 程林, 张洪

中原电子集团有限公司研发三所, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年3月8日; 录用日期: 2022年4月8日; 发布日期: 2022年4月15日

## 摘要

随着通信技术的发展, 要求通信设备向小型化发展, 而微组装工艺技术是目前设备小型化的重要手段。本文详细设计了基于微组装的SPDT开关, 利用HFSS和ADS仿真工具对SPDT开关进行优化仿真, 仿真结果较好, 插损小于0.15 dB, 隔离度大于49 dB。从理论上验证了基于微组装SPDT开关设计方法的正确性, 具有一定指导意义。

## 关键词

微组装, SPDT开关, 共仿真

# Research and Design of SPDT Switch Based on Micro-Assembly Process

Yu Peng, Ningchuan Liu, Lin Cheng, Hong Zhang

The Third R & D Institutes, Zhongyuan Electronics Group Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Mar. 8<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 8<sup>th</sup>, 2022; published: Apr. 15<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

With the development of communication technology, communication equipment is required to develop for miniaturization, and micro-assembly process technology is an important means of equipment miniaturization. In this paper, the SPDT switch based on micro-assembly is designed in detail, and the SPDT switch is optimized and simulated by HFSS and ADS simulation tools, and the simulation results are good, the insertion loss is less than 0.15 dB, and the isolation is greater than 49 dB. Theoretically, the correctness of the design method based on the micro-assembled SPDT switch is verified, which has certain guiding significance.

## Keywords

### Microassembly, SPDT Switch, Co-Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自 20 世纪 70 年代至今, 在卫星、广播、雷达、通信系统中都需要对电路参量进行控制, 例如控制电路的通断、相移量、衰减量等等。基于微组装工艺的微波开关因体积小、用途多等优点成为微波控制电路中的重要组成部分。PIN 二极管由于开路 and 短路特性好、控制速度快、微波损耗小、可控功率容量大、具有比较理想的开关特性, 所以是微波开关首选器件[1]。而同时把 PIN 二极管、微波固体器件和微带电路通过多功能芯片技术、多层复合基板技术和多芯片组装技术集成的微波组件[2], 其结构紧凑、可靠性高易于系统集成, 且由于相关工艺上的不断完善, 由安装而引入的寄生参量, 如引线电感、管壳电容等的影响都非常小, 因而进一步改善了微波组件控制电路的电性能。

基于微组装工艺的微波开关则选用裸芯片 PIN 二极管、芯片电容等器件, 通过基板烧结/粘接、芯片共晶/粘接、金丝键合等微组装工艺来实现的。微组装关键工艺技术主要是粘接/烧结工艺技术和微型焊接工艺技术, 它是微组装工艺技术中的重要和基础技术。微型焊接工艺技术包括芯片的粘接/共晶工艺技术, 金丝楔/球键合工艺技术[3] [4]。

目前国内外的战术通信宽带设备正在向小型化、轻量化、高工作频率、多功能、高可靠和低成本等方向发展[5], 微波开关作为战术通信宽带设备的重要组成部分其性能、功率、效率、成本、体积等是组件设计的关键点[6]。基于微组装工艺实现的微波开关引入的寄生参量更小, 因此具有插损小、体积小、散热好和更高的工作频率等优点, 完全符合目前战术通信宽带设备的发展方向。通过研究并突破基于微组装工艺的微波开关研制技术, 能够为未来实现宽带战术通信设备小型化、高可靠性和低功耗打下坚实的技术基础。

## 2. 开关电路设计

### 2.1. 基本原理

#### 2.1.1. 开关工作原理

PIN 管开关的基本电路结构形式有串联、并联、串并联和串并串四种, 其中, 串联形式下, 开关具有较小的插损和较宽的工作带宽, 但是隔离度不高; 并联形式下, 开关的隔离度较高且能够处理较大的功率, 但是由于  $1/4$  波长线的引入, 使得其带宽较窄, 尺寸也偏大; 串并联的形式则综合了前两种形式的优点。

1) 对于串联型结构形式的 PIN 二极管开关, 影响开关插入损耗的主要因数是 PIN 二极管正向偏置时的等效串联电阻参数  $R_s$ , 而影响开关隔离度的主要因数是 PIN 二极管零偏或反偏时的等效结电容参数  $C_T$ ;

2) 对于并联型结构形式的 PIN 二极管开关来说, 情形则正好相反, 影响开关插入损耗的主要因数是 PIN 二极管零偏或反偏时的等效结电容参数  $C_T$ , 而影响开关隔离度的主要因数是 PIN 二极管正向偏置时

的等效串联电阻参数  $R_s$ ;

3) 对于串并联型和串并串联型这两种结构形式的 PIN 二极管开关来说, 影响开关插入损耗的主要因素是处于串联支路上的 PIN 二极管正向偏置时的串联等效电阻参数  $R_s$ , 以及处于并联支路上的 PIN 二极管零偏或反向偏置时的等效结电容参数  $C_T$ 。

总之, PIN 二极管正向偏置时的串联等效电阻  $R_s$  和它在零偏及反向偏置时的并联等效结电容  $C_T$  越小, 开关的插入损耗和隔离度性能越好, 同时, PIN 二极管在零偏及反向偏置时的并联等效结电容  $C_T$  越小, 开关的高频工作特性越好。

单级 PIN 管并联的形式有隔离度较高, 体积要小的特点, 如图 1 中所示。

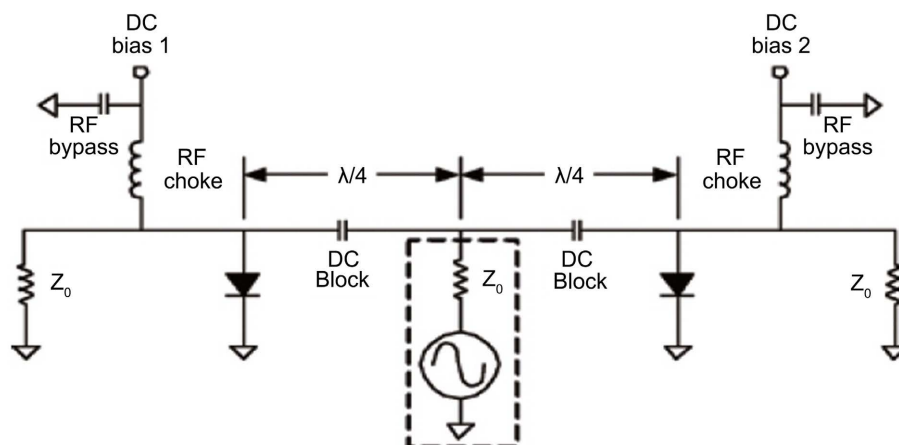


Figure 1. SPDT switch of a single-stage PIN diode parallel structure [7]

图 1. 单级 PIN 管并联 SPDT 开关[7]

两只 PIN 管分别并联于左右两条信号通路中, 且均位于距离公共端口  $1/4$  波长处。当左 PIN 管为负压偏置时, 左信号通路导通, 而此时右 PIN 管为正压偏置, 被短路到地, 由于  $1/4$  波长传输线的作用, 使得此时从公共端口看向右端口的阻抗为无穷大, 因而右信号通路被开路。

同理, 右信号通路导通时, 右 PIN 管截止, 而左 PIN 管导通, 左信号通路的输入阻抗为无穷大, 因而被隔离。

### 2.1.2. 金丝键合原理

基于微组装工艺技术的微波开关设计中, 金丝互连技术是实现开关设计的关键, 键合互连的拱高、跨距、和金丝的根数对微波特性有很大影响。因此, 在设计仿真时需充分考虑金丝的各项参数对微波特性的影响。

金丝互连模型可以用等效串联电阻  $R_s$ 、串联电感  $L_s$  和并联电容  $C_1$  和  $C_2$  构成的低通滤波网络来表示, 如图 2 所示:

目前, 关于金丝互连的研究多是用三维电磁场分析软件 HFSS 对其进行建模分析和仿真优化。得出的结论基本一致: 单根金丝互连时对微波特性有较大影响, 采用两根或三根金丝键合互连的性能大大优于单根金丝; 采用两根金丝时, 增加金丝之间的间距能有效减少寄生电感; 在键合时应尽量采用低拱高、小跨距以提高微波性能。

## 2.2. 器件选型

基于微组装的微波开关设计, PIN 管芯的参数指标决定了开关电路设能否满足设计指标要求。

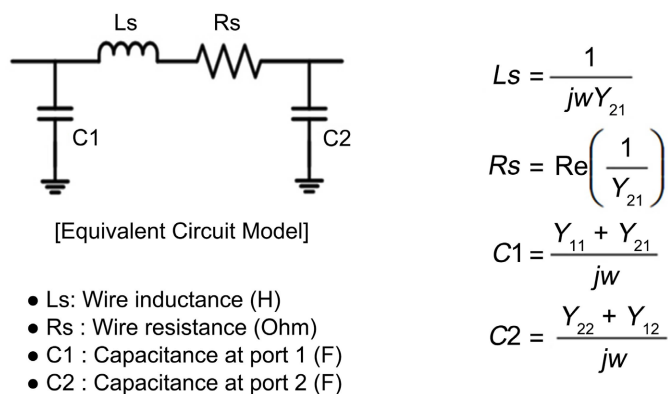


Figure 2. Gold bondwire equivalent circuit [8]

图 2. 金丝等效电路[8]

通过改变 I 区宽度和二极管面积，可以构造出具有相同  $R_s$  和  $C_t$  特性，但尺寸不同的 PIN 二极管，这些元器件可能具有相同的小信号特性；比如具有较厚 I 区的 PIN 管具有更大的击穿电压和更好的失真性能，较薄的 I 区具有更快的开关速度。以并联型电路结构为例，开关工作带宽小于 10%。根据所需开关技术指标要求，综合分析考虑 PIN 管各个参数对指标的影响，本文选用 MACOM 公司的 MA4P303-134 进行分析和仿真设计，如图 3 为管芯结构。

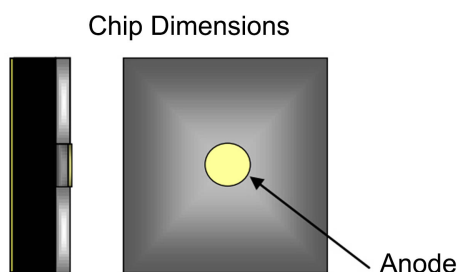


Figure 3. MACOM MA4P303-134 die [9]

图 3. MACOM MA4P303-134 管芯[9]

根据 MA4P303-134 的参数分析，见表 1：

Table 1. MACOM MA4P303-134 die parameters

表 1. MACOM 公司的 MA4P303-134 管芯参数

管芯型号	频率范围	$V_{BR}$	$C_j$ @-50V	CW P <sub>diss</sub>	$R_s$ @10mA	$\tau$	W	Theta
	GHz	V	pF	W	$\Omega$	ns	$\mu\text{m}$	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
MA4P303-134	0.02~18	200	0.15	5	1.5	300	20	30

1) 工作频率范围为 0.02~18 GHz。满足开关工作频率范围要求。

2) 反偏结电容  $C_j$  为 0.15 pF。通过并联结构电路插损计算公式计算可知，在中心频率 8.05 GHz 时，由单个 PIN 管结电容引入的插损在 0.16 dB 以内。

3) 正向导通电阻为  $1.5\Omega@10\text{mA}$ 。此时单个 PIN 管隔离度理论值为  $>24\text{ dB}$ ，通过适当调整导通电流，可以进一步改善电路隔离度。

4) 热阻为  $30^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。假设电路插损为 1 dB, 则电路最大损耗功率为 2.06 W, 同时假设损耗功率 PIN 管吸收, 则该 PIN 管在 10 W 连续波工作时温升为  $62^{\circ}\text{C}$ ,  $62^{\circ}\text{C} + 65^{\circ}\text{C} < 175^{\circ}\text{C}$ (管子工作的最大结温), 因此可以保证 PIN 管不会损坏。

5) 最大反向击穿电压为 200 V。在极限条件下最大射频峰值电压为 64 V, 而 PIN 管此时内建直流电压为 10 V, 为保证 PIN 管稳定工作, 可将 PIN 管反向直流偏置电压设为 20 V, 此时  $64\text{ V} + 20\text{ V} < 200\text{ V}$ , 因此可以保证 PIN 管不会反向击穿。

## 2.3. 电路仿真

基于微组装工艺的微波开关原理仿真包括 PIN 管模型建模、键合金丝建模以及电路仿真优化设计。

### 2.3.1. 金丝键合仿真

金丝键合模型用 HFSS 仿真工具进行仿真[10]。金带键合互连的微波特性随拱高、跨距、金带宽度和金带厚度的不同而变化, 并且具有如下特点:

1) 在同一金带、同跨距情况下, 键合金带的拱高越低对微波传输特性影响越小, 以平直为最佳。但是腔体、电路、芯片间的热膨胀系数不同, 平直键合金带在高、低温冲击中会因热失配而失效: 平直键合金带所受应力集中, 受到温度冲击或振动时容易发生断裂; 从键合工艺的特点来看, 平直键合金带的焊接稳定性很难保证。因此为兼顾微波特性和可靠性, 必须保持适当的拱高。

2) 在同一金带、同拱高情况下, 键合金带的跨距越短对微波传输特性影响越小。

3) 在同跨距、同拱高、同金带厚度情况下, 金带越宽对微波传输特性的影响越小。

根据 MA4P303-134 芯片焊区尺和文献中给出的金丝参数[11], 初步确定采用两根金丝做键合, 金丝间距  $200\ \mu\text{m}$ , 金丝直径  $12.5\ \mu\text{m}$ , 跨距为  $500\ \mu\text{m}$  时, 拱高  $100\ \mu\text{m}$ 。利用仿真工具 HFSS 对其进行建模仿真, 如图 4。

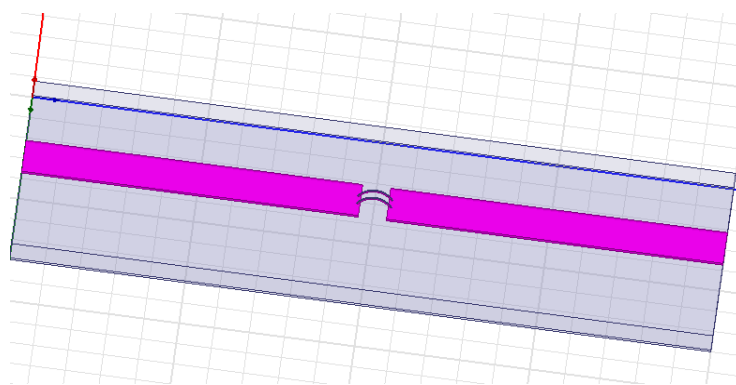


Figure 4. Simulation model of gold wire bonding

图 4. 金丝键合仿真模型

从图 5 可以看出在 7.725~8.025 GHz 内  $S_{21}$  小于  $-0.1\ \text{dB}$ 。 $S_{11}$  和  $S_{22}$  小于  $-18\ \text{dB}$ 。仿真结果较好, 说明该设置的金丝键合参数比较合理。可以用于后续射频开关的仿真。

### 2.3.2. 微波开关仿真

基于微组装工艺的微波开关原理仿真包括 PIN 管模型建模、键合金丝建模以及电路仿真优化设计。本案方案利用 ADS 仿真工具对开关电路进行仿真, 其中键合金丝的参数是采用上章节 HFSS 仿真结果为依据。

在原理仿真中采用 ADS 中的 PIN 二极管模型 PIN\_diode, 输入其相关参数进行原理仿真。

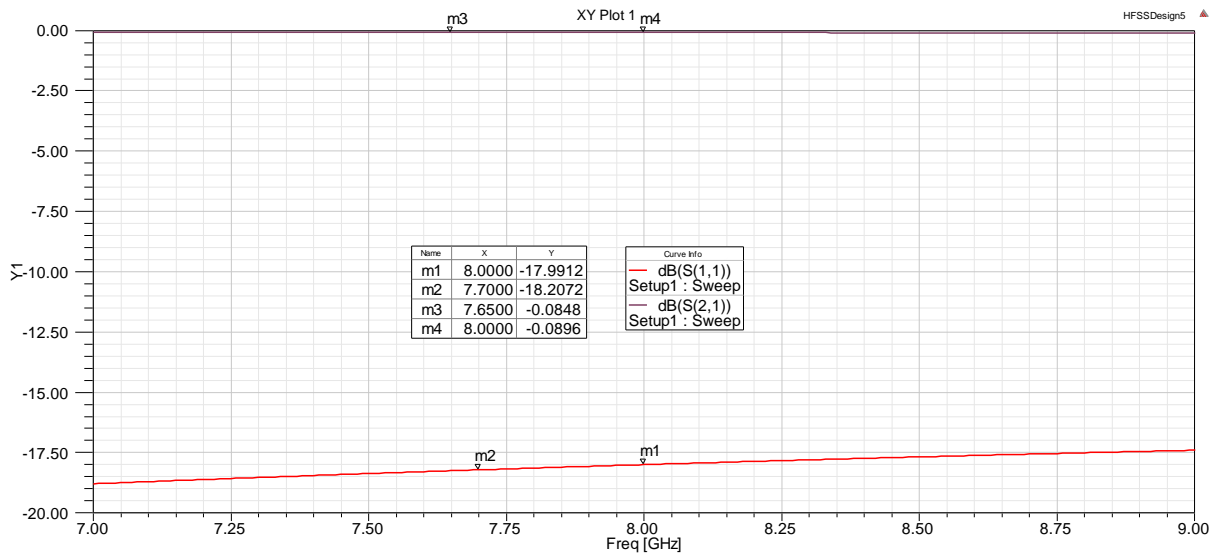


Figure 5. Simulation results of S-parameter of gold wire bonding transmission line  
图 5. 金丝键合传输线的 S 参数仿真结果

将 HFSS 中仿真的金丝参数代入到 ADS 中的金丝模型 BONDW\_shape 对键合金丝的拱高、跨距等参数进行设定，利用 BONDW2 对线间参数进行设定。相关参数设定后进行开关原理仿真及优化，仿真结果如图 6 所示。

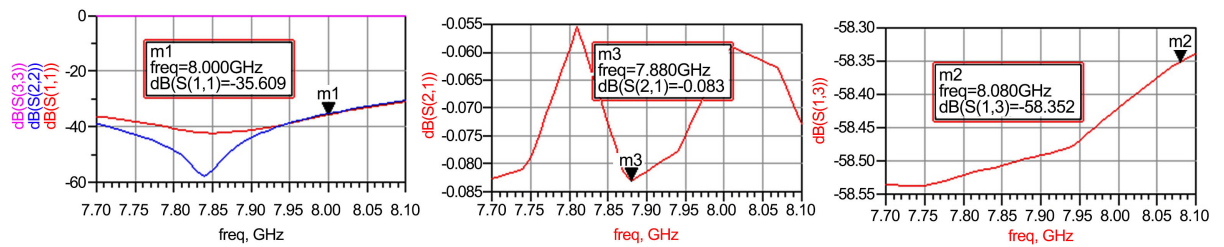


Figure 6. Simulation results of the SPDT switch schematic  
图 6. 开关原理图仿真结果

从仿真结果可以看出：在频段 7.725~8.025 GHz 内驻波 S11、S22 都小于 -35 dB，插损 S21 小于 0.08 dB，隔离度 S13 大于 58 dB。仿真结果较好，可以利用其参数进行有限地共仿真。

原理图中 BONDW 在版图中用 JEDEC Bondwire 代替，设置 JEDEC Bondwire 半径 12.5 μm；跨距 500 μm；拱高 100 μm。

如图 7~9 所示为 ADS 中生成的版图，PIN 管管芯键合点采用铜箔替代。

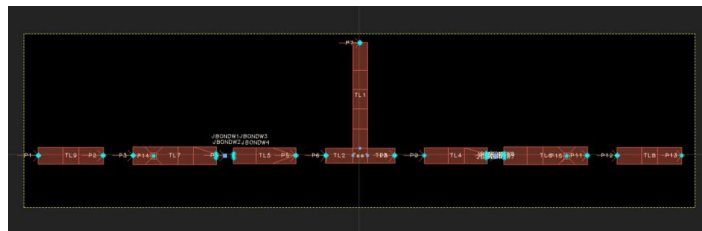


Figure 7. The layout generated in ADS  
图 7. ADS 中生成的版图

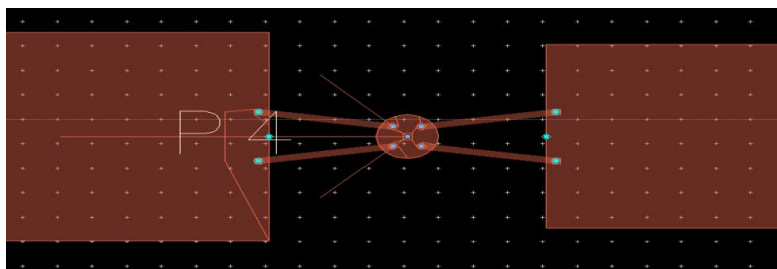


Figure 8. Layout of ADS wire bonding

图 8. ADS 金丝键合的版图

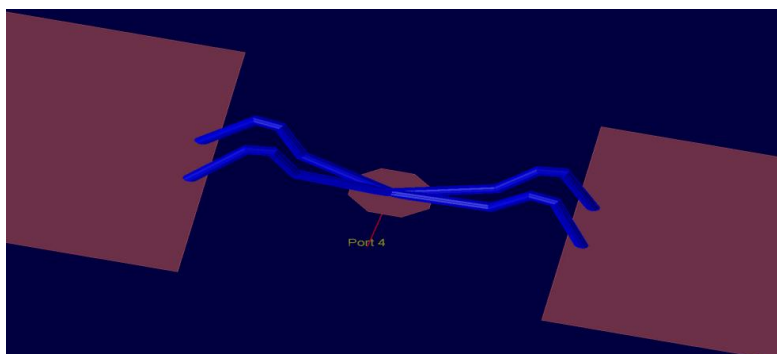


Figure 9. 3D view of bonding points

图 9. 键合点三维视图

设置完成后，对版图进行 MOMENTUM 仿真，仿真完成后进行共仿真，共仿真电路图见图 10：

从图 11 的仿真结果可以看出：在频段 7.725~8.025 GHz 内驻波 S11、S22 都小于 -25 dB，插损 S21 小于 0.15 dB，隔离度 S13 大于 49 dB。仿真结果较好。

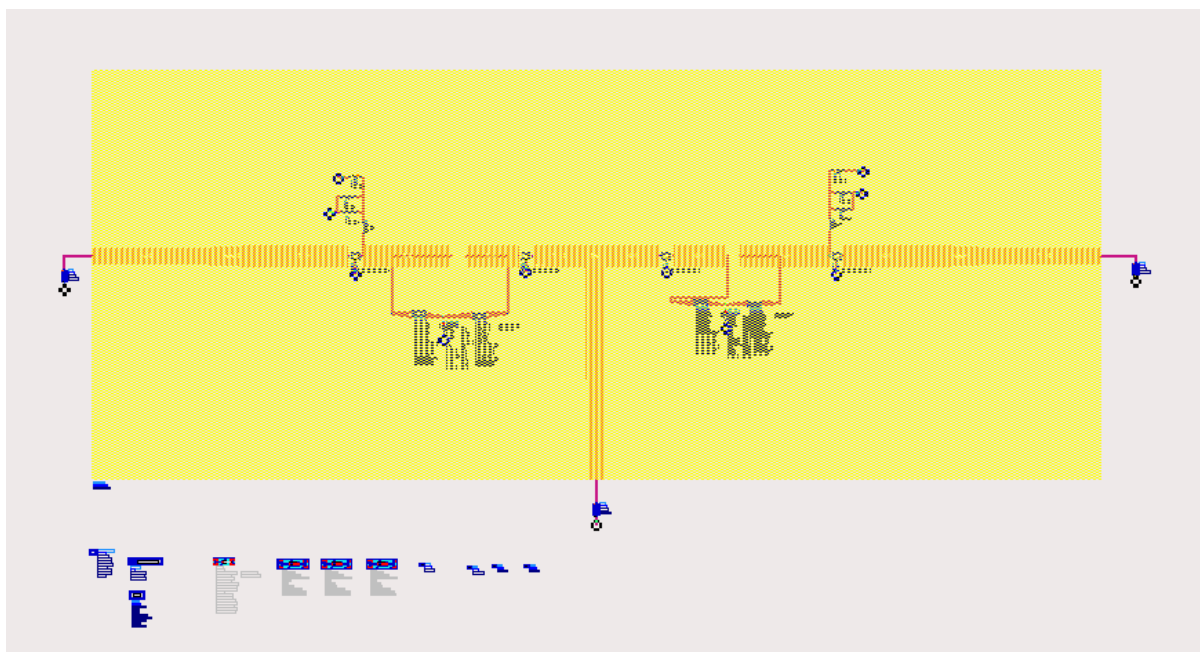


Figure 10. Co-simulation schematic with limited reference

图 10. 参考有限的联合仿真图

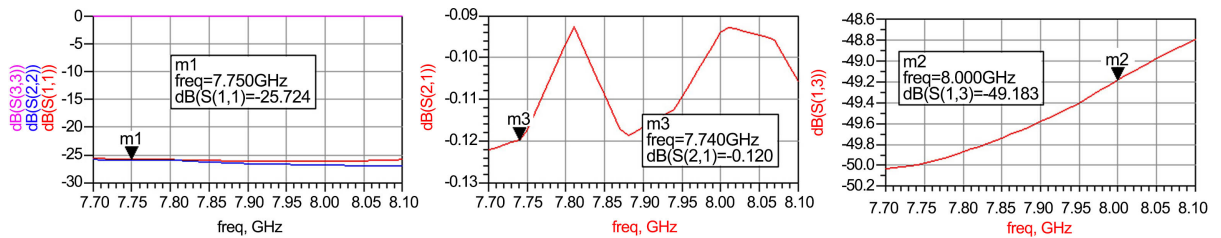


Figure 11. Co-simulation results with limited reference

图 11. 参考有限的仿真结果

### 3. 结语

本文研究了基于 SPDT 开关的微组装工艺流程和要求；并利用 HFSS 和 ADS 软件对微组装开关进行了仿真，仿真结果表明驻波 S11、S22 都小于 -25 dB，插损 S21 小于 0.15 dB，隔离度 S13 大于 49 dB，仿真结果较好。为实物设计提供了参数依据。本文在基于微组装工艺和仿真工具的使用进行了详细说明，具有一定指导意义。

### 参考文献

- [1] 朱艳. 5G 通信基站大功率射频开关设计[J]. 通信电源技术, 2021, 38(5): 3 p.
- [2] 肖宁, 秦立峰, 张选, 等. X 波段氮化镓小型化 T/R 组件的设计与实现[J]. 无线电工程, 2017, 47(11): 63-66.
- [3] 侯一雪, 乔海灵, 廖智利. 混合电路板与外壳的共晶焊技术[J]. 电子与封装, 2007, 7(8): 9-11.
- [4] 胡永芳, 韩宗杰. 大功率微波芯片共晶焊接工艺技术[J]. 电子机械工程, 2020, 36(5): 51-54.
- [5] 金明. 一种 X 波段多通道 T/R 组件设计[J]. 雷达与对抗, 2019, 39(3): 54-57.
- [6] 雷素茵, 朱焯, 王家波. Ku 波段 T/R 组件的设计[J]. 现代信息科技, 2017, 1(1): 73-75.
- [7] [https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/1-100/Design\\_With\\_PIN\\_Diodes\\_200312E.pdf](https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/1-100/Design_With_PIN_Diodes_200312E.pdf)
- [8] <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-59>
- [9] [https://cdn.macom.com/datasheets/GaAs\\_pindiodechips.pdf](https://cdn.macom.com/datasheets/GaAs_pindiodechips.pdf)
- [10] 王世辉. S 波段高功率 T/R 组件的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [11] 张琦, 苏东林, 张德智. 基于 LTCC 多层基板的 X 波段 T/R 组件小型化设计[J]. 现代电子技术, 2017, 30(1): 55-57.