

## 一种单端匹配式 PIN 单刀单掷功率开关芯片

贾玉伟<sup>1,2</sup>, 许春良<sup>1</sup>, 魏洪涛<sup>1</sup>, 喻梦霞<sup>2</sup>, 高学邦<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051; 2. 电子科技大学, 成都 610054)

**摘要:** 采用 PIN 二极管工艺技术, 设计、制作了一种微波单端匹配式 PIN 单刀单掷功率开关芯片, 并给出了详细测试曲线。该开关由四级 PIN 二极管组成, 采用单端匹配结构。工作频率 8 ~ 10 GHz, 整个带内插入损耗小于 0.7 dB, 输出端口驻波比小于 1.4:1, 输入端口开关态驻波比均小于 1.4:1, 在 9 GHz 点频下测得 1 dB 压缩点输入功率大于 31 dBm, 芯片内部集成偏置电路, 采用 +5 V/-5 V 供电, 在 +5 V 工作条件下, 电流 20 mA。该芯片面积为 2.0 mm × 1.4 mm。

**关键词:** 单端匹配; 功率; 微波单片集成电路; 单刀单掷; PIN 二极管; 插入损耗

**中图分类号:** TM56 2570K **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2009) 07-0704-04

### Single-Port Absorptive PIN SPST Power Switch MMIC

Jia Yuwei<sup>1,2</sup>, Xu Chunliang<sup>1</sup>, Wei Hongtao<sup>1</sup>, Yu Mengxia<sup>2</sup>, Gao Xuebang<sup>1</sup>

(1. The 13<sup>th</sup> Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China;

2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** A single-port absorptive PIN SPST power switch MMIC was designed, fabricated and tested. The switch incorporates four PIN diodes using a configure of single-port match. In the frequency range of 8 to 10 GHz, the insertion loss is less than 0.7 dB, VSWR of output port is less than 1.4:1, VSWR of input port is less than 1.4:1 in both on and off states. At 9 GHz, 1 dB compression input power is greater than 31 dBm. The switch is integrated of bias circuit, it can be directly driven by +5 V/-5 V supply, with a current of 20 mA under +5 V supply. The chip area is 2.0 mm × 1.4 mm.

**Key words:** single-port match; power; MMIC; single-port absorptive; PIN diode; insertion loss

**EEACC:** 2570K

## 0 引言

近年来, 基于 GaAs 材料的微波单片集成电路 (MMIC) 的发展取得了不小的进步, 小体积和低成本等特点进一步满足了通信系统、电子对抗和消费电子等系统的应用。

PIN 单片开关作为微波单片集成电路的重要组成部分也在发挥着越来越重要的作用, 单刀双掷开关 (SPDT) 和单刀多掷开关 (SPNT) 多应用于通路转换, 而单刀单掷开关 (SPST) 对改善通路的隔离能力具有显著效果。通信系统、电子对抗和消费电子等系统的应用要求开关器件应具有插入损耗

小、隔离度高、输入输出驻波小的特点, 并且在某些特殊的系统或结构中, 还应具有承受大功率微波信号的能力。开关器件所采用的器件主要有 PIN 管和场效应晶体管 (FET), 其中, PIN 二极管开关具有控制速度快、微波损耗小、可控功率容量大的特点<sup>[1]</sup>。

目前常见的 PIN 开关芯片多为反射式结构, 匹配式结构较少。反射式结构开关因在器件的关断状态下具有较大的反射, 往往不利于系统的稳定工作, 因此在某些特定的结构中不被采用; 而双端口匹配式结构开关因引入了匹配网络, 又会增加器件的插入损耗, 对开关的整体性能有一定程度的恶化。综合考虑这两种情况, 采用单端匹配式结构可解决此问题, 应用时将匹配端口接在对反射敏感的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助 (2009CB320200)

一端，既可使系统稳定工作，又避免了两端匹配式结构对器件性能的恶化。

## 1 开关基本原理及结构

PIN 二极管是开关电路的基本器件，其正向和反向等效电路如图 1 (a) 和图 1 (b) 所示。

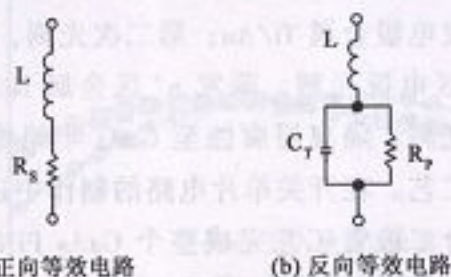


图 1 PIN 二极管等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of PIN diode

等效电路中的主要参数<sup>[2]</sup>为

$$R_s = W^2 / (\mu_n + \mu_p) I_f \tau \quad (1)$$

$$C_T = \epsilon A / W \quad (2)$$

式中： $R_s$  为二极管正向偏置等效电阻； $C_T$  为二极管反向偏置等效电容； $W$  为 I 层（本征层）厚度； $\mu_n$ 、 $\mu_p$  分别为电子和空穴的迁移率； $I_f$  为偏置电流； $\tau$  为少数载流子寿命； $\epsilon$  为介电常数； $A$  为二极管结面积。可见，正向偏置的 PIN 二极管是一个电流控制器件，其等效电阻正比于 I 层厚度  $W$  的平方，反比于偏置电流；反向偏置电路的等效电容正比于二极管的结面积，反比于 I 层厚度。

按照 PIN 管的联接方式，开关电路的基本结构主要有串联式、并联式和混合式三种。

串联结构开关的隔离能力依赖于 PIN 二极管的反向电容 ( $C_T$ )，插入损耗和功率处理能力取决于二极管正向偏置状态下的串联电阻 ( $R_s$ )。这种结构能够在宽带范围提供较低的插入损耗，但在多级串联管级联的情况下，需要较多的偏置电路，不仅使电路变得复杂，增加芯片面积，也会恶化电路性能，因此在本设计方案中没有被采用。

并联结构开关能够在较宽的频带范围内提供较高的隔离度，由于在传输线通路没有开关元器件，因而可以获得较小的插入损耗。并且，二极管一端连接在传输线上，另一端接地，这一结构使得器件相比于串联结构具有更强的功率处理能力。隔离度和承受功率依赖于等效串联电阻  $R_s$ ，插入损耗取决于等效电容  $C_T$ <sup>[2-3]</sup>。在多级 PIN 管级联的情况

下，并联结构开关只需要一个偏置电路，大大简化了电路结构，可有效减小芯片面积。

对于并联结构开关，给出设计方程<sup>[2]</sup>分别为

$$IL = 10 \lg |1 + (\pi \cdot f \cdot C_T \cdot Z_0)^2| \quad (3)$$

$$ISO = 20 \lg(1 + Z_0 / 2R_s) \quad (4)$$

$$P_D = 4R_s Z_0 / (Z_0 + 2R_s)^2 \cdot P_{av} \quad (5)$$

如  $Z_0 \gg R_s$ ，由式 (5) 可得

$$P_D = 4R_s / Z_0 \cdot P_{av} \quad (6)$$

式中： $IL$  为插入损耗； $f$  为工作频率； $Z_0$  为端口特性阻抗； $ISO$  为隔离度； $P_D$  为正向偏置状态下的耗散功率； $P_{av}$  为最大可用功率。

综合分析式 (1) ~ (4) 可知：对于并联结构开关，在材料和工作频率已定的情况下，增加 I 层厚度，可以减小器件的插入损耗，但同时会降低器件的隔离度；二极管结面积越小，器件插入损耗越小，同时也会降低器件的隔离度。

由式 (1) 和式 (6) 可知，增加 I 层厚度，可提高器件的功率处理能力。由文献 [2-5] 及实际测试发现，适当提高工作电压和工作电流，器件功率性能可得到进一步提高。

## 2 PIN 单片开关的设计与制作

### 2.1 PIN 单片开关的设计

根据以上的 PIN 单片开关设计原理，并针对需要实现的设计目标，选取四级 PIN 管结构的电路拓扑，图 2 给出了四级集总元件 PIN MMIC SPST 电路拓扑结构。

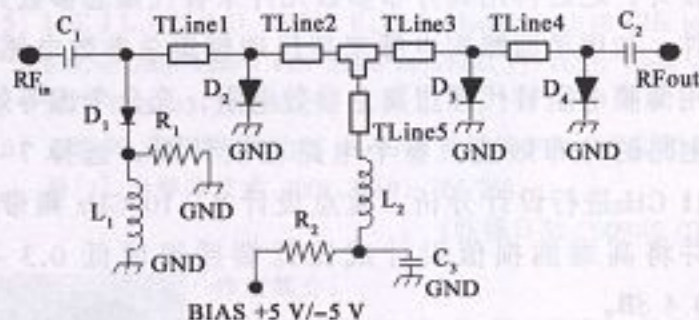


图 2 PIN MMIC SPST 电路拓扑

Fig.2 Topology of the PIN MMIC SPST

在图 2 所示电路拓扑中，为增加器件隔离度，共采用了四级 PIN 二极管，相对于传输通路均为并联结构。电容  $C_1$  和  $C_2$  为隔直电容， $C_3$  为滤波电容。 $R_1$  为匹配电阻， $R_2$  为偏置分压电阻。 $L_1$ 、 $L_2$

为扼流电感。微带传输线起到传输信号和阻抗匹配的作用。

在 PIN 管的选择上，通过上一节的分析，兼顾到插入损耗、隔离度和功率性能，选择了合适的 I 层厚度和结面积。在电路结构的选择上，考虑到开关的功率性能设计，偏置网络设计和芯片面积等因素，在传输通路中没有采用串联 PIN 二极管，均为并联结构。 $L_2$ 、 $R_2$  和  $C_3$  共同组成了偏置电路， $L_2$  为扼流电感，对微波信号形成一个高阻，抑制微波信号从此端口泄露，而对直流电压等效为低阻， $R_2$  为偏置分压电阻，因实际使用中系统提供电压多为 +5 V 和 -5 V，二极管正向导通电压与此相比要低很多，为方便系统应用，并将总电流控制在 20 mA 左右，通过欧姆定律  $R = U/I$  计算出分压电阻阻值  $R_2$ ，但在实际设计中应考虑电感等效电阻和带线等效电阻等，通过仿真与计算进行适当调整， $C_3$  为滤波电容，从此端口泄露的微波信号通过此电容到地，可避免对电源产生干扰。 $D_1$ 、 $R_1$  和  $L_1$  共同组成了端口匹配网络，当开关关断时，二极管  $D_1$  导通，对微波信号形成低阻， $L_1$  对微波信号形成高阻，从信号端口视入的阻抗主要为匹配电阻  $R_1$  和二极管  $D_1$  的串联阻抗，为使此端口在关断状态下与系统阻抗相匹配，选择  $R_1$  的初值为系统特性阻抗 50  $\Omega$ ，通过仿真与计算最后选定电阻值，因二极管  $D_1$  存在串联阻抗， $R_1$  的实际阻值小于系统特性阻抗。

在电路设计过程中，先用理想集总参数元件来设计，之后再用其分布参数元件来替代集总参数元件，如用平面螺旋电感来替代理想集总参数电感，用薄膜电阻替代理想集总参数电阻，充分考虑等效电路的分布效应。整个电路在设计时，选择 7 ~ 11 GHz 进行设计分析，重点设计 8 ~ 10 GHz 频带，并将高端插损值设计成比低端插损值低 0.3 ~ 0.4 dB。

为了保证设计结果准确，考虑了工艺制作公差的影响，元件的取值不能太临界，以避免实际电路中元器件参数值偏离最佳设计值时明显影响电路性能，同时考虑 T 型结、阶梯、微带线拐弯及微带线之间的耦合对电路的影响，并且对电路的物理版图做了二维电磁场仿真，通过分析电磁场仿真结果对

部分参数进行调整，对调整后的电路进行二次仿真，直到得到理想的结果。

## 2.2 PIN 单片开关制作

本开关单片是在 GaAs PIN MMIC 工艺线上制作完成的。制作该开关单片的关键工艺为 PIN 二极管的加工，主要工艺流程如下：首先进行 p+ 区光刻，蒸发电极金属 Ti/Au；第二次光刻，腐蚀至 n+ 区，n+ 区电极光刻，蒸发 n+ 区金属 Ni/AuGe/Au；第三次光刻，隔离层腐蚀至 GaAs 半绝缘衬底完成二极管工艺。在开关单片电路的制作中还要制作电容，结合二极管工艺完成整个 GaAs PIN 开关的工艺过程；最后进行背面减薄，背面通孔，电镀，完成整个工艺。在工艺加工过程中，对工艺中的版图尺寸进行严格的 CD 控制，以保证设计模型与工艺生产的对应性。背面通孔及 PIN 二极管、电阻、电容的连接示意图如图 3<sup>[6]</sup> 所示。

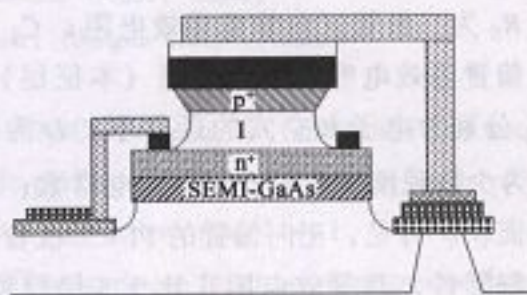


图 3 GaAs PIN 开关工艺结构图  
Fig.3 Configuration of GaAs PIN switch

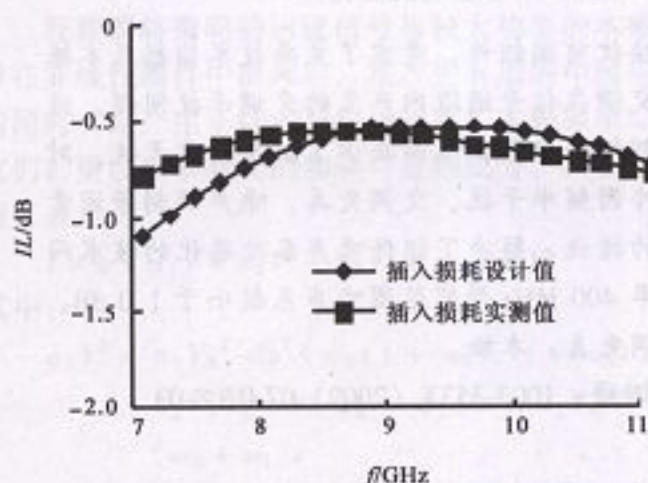
电路中电阻为薄膜电阻 (50  $\Omega/\square$ )，采用多层结构合金形成欧姆接触，电容为 MIM 电容，电感采用平面圆形螺旋电感，电感线圈间距为 7  $\mu\text{m}$ ，为减小热阻、便于背面通孔，芯片厚度减薄为 100  $\mu\text{m}$ 。从多方面进行工艺改进，提高了加工的精度和工艺稳定性，保证了同圆片的不同区域的一致性和不同批次的一致性。

## 3 测试结果

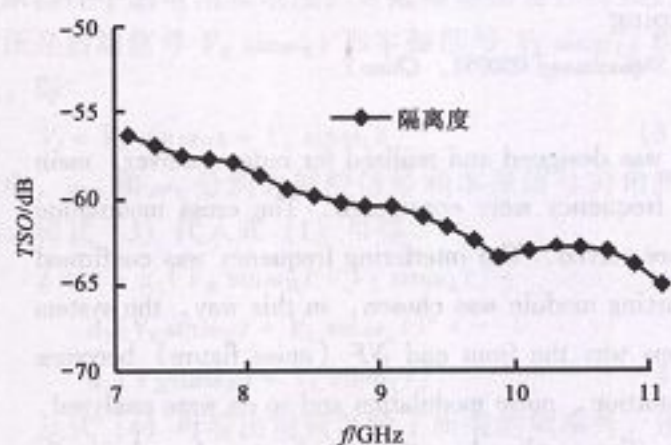
首先对 PIN 单刀单掷功率开关芯片进行了在片测试，得到了器件的 S 参数。测试结果与设计结果相吻合，其中开关关断时输入端口驻波也能匹配到 50  $\Omega$ ，进一步验证了输入端口匹配网络的合理性。工作电流为 20 mA (关断状态)，与设计一致。在片测试结果如图 4。

利用微波电磁场结构设计软件设计了开关测试盒体，将开关芯片装入测试盒体进行功率性能测

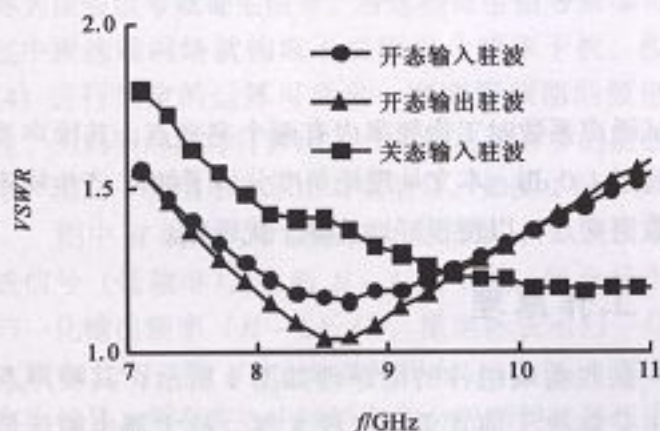
试,在 9 GHz 频点, -5 V 偏置条件下,测得 0.1 dB 压缩输入功率为 27 dBm, 1 dB 压缩输入功率为 31 dBm。将偏置电压提高到 -8、-10、-12 V 进行测试,器件的功率性能可得到显著提高。测试曲线如图 5。



(a) 插入损耗随频率变化曲线



(b) 隔离度随频率变化曲线



(c) 驻波随频率变化曲线

图 4 在片测试结果  
Fig.4 Test data on-wafer

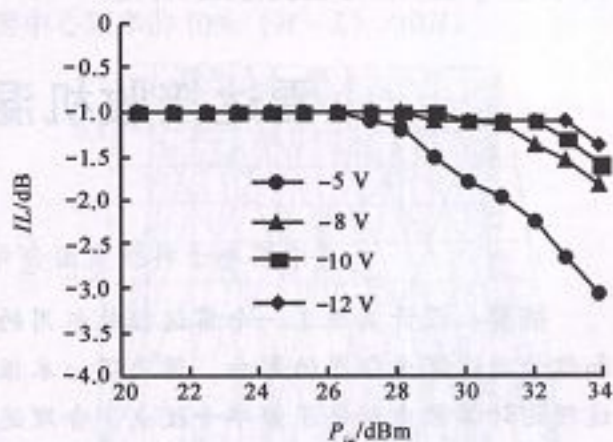


图 5 插入损耗随输入功率变化曲线  
Fig.5 Insertion loss vs power

## 4 结论

对单端匹配式 PIN 单刀单掷功率开关芯片的设计与制作进行了详细描述,讨论了 PIN 功率开关的设计理论,介绍了一种 PIN 开关电路的匹配式结构,采用 GaAs PIN 工艺技术,设计制作了一款单端匹配式 PIN 单刀单掷功率开关芯片,并给出了测试结果,包括 S 参数和功率特性。该款开关芯片插损小、隔离度高,能在较大功率条件下正常工作,具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 《中国集成电路大全》编委会.微波集成电路[K].北京:国防工业出版社,1995:372.
- [2] Microsemi Corp. The PIN diode circuit designers' handbook [K]. 1998.
- [3] Alpha Corp. Application note, design with PIN diodes [K]. 2002:1-10.
- [4] PAEK S W, KANG H N, JEON K L, et al. 1-26 GHz high power PIN diode switch [J]. IEEE MTT-S Digest, 2000 (1): 505-508.
- [5] LEE J L, ZYCH D, REESE E, et al. Monolithic 2-18 GHz low loss, on-chip biased PIN diode switches [J]. IEEE Trans on MTT, 1995, 43(2): 250-256.
- [6] 王静辉,魏洪涛,张力江. GaAs 垂直结构 PIN 二极管限幅器[J]. 半导体技术, 2008, 33(9): 766-768.

(收稿日期:2009-02-03)

## 作者简介:

贾玉伟(1982—),男,河北昌黎人,助理工程师,光信息科学与技术专业,电子科技大学在读工程硕士,主要从事微波单片及微波模块电路的研究开发工作;



喻梦霞(1972—),女,四川成都人,博士,副教授,毕业于电子科技大学,主要从事微波毫米波集成电路与系统的研究工作。