

毫米波 GaAs pin 单刀单掷开关单片

陈新宇[†] 蒋幼泉 许正荣 黄子乾 李拂晓

(南京电子器件研究所, 南京 210016)

摘要: 采用 GaAs pin 二极管, 完成了 15~40GHz 的单刀单掷开关单片的设计、制作. GaAs pin 二极管 SPST 开关单片具有低插损、高隔离、高功率的特点, 在 15~20GHz 带内插损 0.6dB, 驻波优于 1.5, 隔离度大于 40dB; 在 20~40GHz 带内插损小于 1.1dB, 驻波优于 1.35, 隔离度大于 35dB. pin 二极管 SPST 开关单片的 1dB 功率压缩点 P_{-1} 大于 2W. GaAs pin 二极管开关单片采用 MOCVD 生长的 GaAs 纵向 pin 二极管材料结构, $\phi 76\text{mm}$ GaAs 圆片工艺加工制作.

关键词: 毫米波; GaAs; pin 二极管; 单刀单掷; 开关; 单片

EEACC: 1350H; 2520D; 2570

中图分类号: TN43

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)12-2163-04

1 引言

在毫米波通信系统中, 宽带开关具有广泛的应用. 目前毫米波开关通常采用 PHEMT 管和 pin 二极管两种器件形式, 其中 PHEMT 开关单片易于集成, 但承受功率低, 工艺要求高, 至少采用 $0.25\mu\text{m}$ 工艺. 和 PHEMT 的宽带开关 MMIC 相比, 采用硅 pin 二极管的开关具有插损小、功率大的优点, 但不易集成, 频率特性不佳. 特别是采用分立 pin 二极管, 在实现毫米波开关电路时, 由于器件的寄生参数、电路装配等因素, 大大影响了开关的微波性能. GaAs pin 二极管具有低的导通电阻, 小的结电容, 高击穿电压, 易于集成等特点, 因此采用 GaAs pin MMIC 的结构, 能有效减小器件的寄生参数, 保证参数的一致性, 提高电路的微波参数性能. 因此 GaAs pin 二极管的毫米波宽带单片开关, 具有插损小, 频带宽, 体积小, 功率大等优点, 受到广泛重视和应用.

本文介绍了采用 GaAs pin 二极管的宽带毫米波单片开关的设计和制作, 毫米波 SPST 单片开关在 15~20GHz 频带内, 插损小于 0.6dB, 隔离度大于 40dB; 在频率 20~40GHz, 隔离度大于 35dB. GaAs pin 的单刀单掷开关单片的 1dB 功率压缩点 P_{-1} 大于 2W.

2 开关 pin 二极管设计

在 p 型半导体和 n 型半导体之间插入一个未掺

杂的本征层(i 层)就构成 pin 二极管, 材料结构如图 1 所示. 当 pin 二极管正向偏置时, 电子和空穴分别从 n, p 层注入到 i 层, 由于 i 区电荷的存在, 产生了微波电导率, 对微波信号呈现低阻抗. 因此在微波频率下, pin 二极管成为一个电流控制的可变电阻, 利用此特性可以实现 pin 管开关的电路功能.

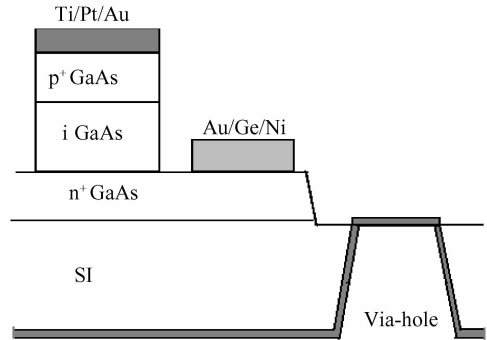


图 1 GaAs pin 管 SPST 开关的结构

Fig. 1 Cross section view of GaAs pin diode

材料设计是毫米波 pin 二极管单片设计的基础. p^+ 和 n^+ GaAs 层的浓度及厚度的设计影响器件欧姆接触的性能, i 层的厚度取决于器件的反向击穿电压和导通电阻的平衡, 增大 i 层的厚度, 可以提高 pin 二极管的反向击穿电压, 减小结电容, 但对导通电阻有影响. 根据毫米波单片的性能要求, 分配 pin 二极管的反向击穿电压、结电容和导通电阻等参数, 最终确定了 pin 材料的基本结构参数. 其中 p^+ , n^+ 和 i 层的 GaAs 浓度分别选取: $>1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $>2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $<8 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$.

[†] 通信作者. Email: NJCXY@163.com

2006-05-26 收到, 2006-08-10 定稿

3 毫米波开关单片设计

毫米波 pin 管开关单片的设计中必须充分考虑器件的本征参数、寄生参数以及开关的电路结构等因素. 在 pin 二极管器件的选取中, 我们分析了器件、材料、工艺、电路的相关性, 并由此建立 pin 管器件的参数模型.

根据 pin 二极管的物理结构, 首先建立 pin 二极管物理模型, 并通过对 pin 器件的微波探针测试和计算机拟合, 建立简化的电路模型. 图 2(a) 是线性 pin 二极管本征模型的等效电路, R_s , L_s 分别为寄生的串联电阻和电感, R_i 和 C_i 是二极管本征层的电阻和结电容, R_j 和 C_j 是二极管耗尽层的电阻和结电容.

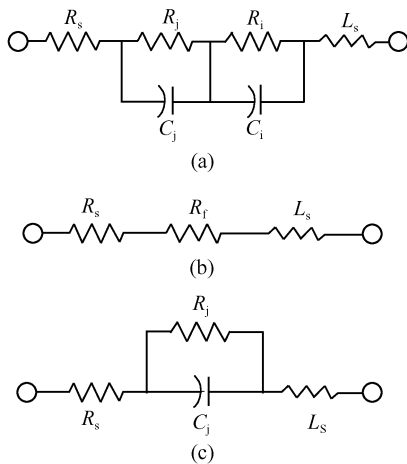


图 2 (a) pin 二极管的等效电路图; (b) 正向偏置模型; (c) 反向偏置模型

Fig. 2 (a) Electrical equivalent model of pin diode; (b) Forward bias model; (c) Reverse bias model

为了计算方便, 采用了 pin 二极管的简化等效电路. 当二极管正向偏置时, 电子和空穴注入到本征层 i 层, i 层阻抗降低, 随着偏置电流的增加, 电阻逐渐减小. pin 二极管模型简化为图 2(b), 模型中, R_i 是正向的 i 层电阻.

$$R_i = \frac{W^2}{(\mu_n + \mu_p) I_0 \tau} \quad (1)$$

式中 W 是本征层的厚度; I_0 是正向的偏置电流; τ 是载流子寿命; μ_n 和 μ_p 分别是电子和空穴的迁移率.

当二极管反向偏置时, i 层中电子和空穴被抽出, 因此 pin 二极管模型简化为图 2(c). 由于二极管 i 层耗尽, 其结电容 C_j 近似为一个恒定值. R_j 是耗尽层的电阻.

$$C_j = \frac{\epsilon A}{W} \quad (2)$$

式中 A 是 pin 二极管的结面积; W 是本征层的厚度; ϵ 是 GaAs 材料的介电常数.

在毫米波 pin 单片设计中, 二极管器件模型采用简化的 pin 二极管电路模型, 器件材料结构设计根据工艺和电路要求综合考虑. pin 二极管的器件模型中选取正向电阻 2Ω , 反向结电容是 0.06pF . 毫米波单片开关电路采用 2 个并联的 pin 二极管, 和微带线一起构成滤波器拓扑. 通过 ADS 软件的计算机模拟, 计算微带线 $L1, L2$ 和 $L3$ 的长度和宽度. 优化微带线 $L2$ 的长度, 在毫米波下获得高的隔离度. 为方便使用, 开关单片中内置偏置电路, V_c 是控制端, 通过 $1/4\lambda$ 微带线提供直流偏置. SPST 开关电路 DC 的隔直电容加在输入输出端. 图 3 是毫米波 pin SPST 开关的电路拓扑图.

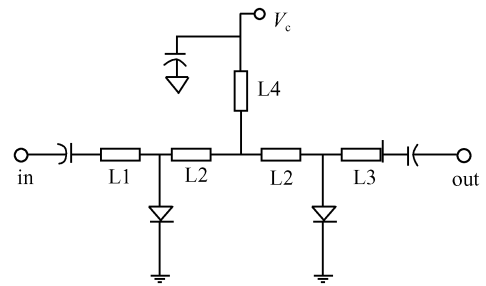


图 3 pin 二极管 SPST 单片的电路拓扑图
Fig. 3 Topological circuit of pin SPST MMIC

4 毫米波 SPST 单片性能

GaAs pin 二极管材料采用 MOCVD 外延生长技术, 其材料的层结构见图 1. 在单片的工艺设计和版图设计中, 充分考虑了各种寄生参数. 为了减小 pin 二极管的寄生参数, 对 pin 器件的材料结构、版图布局、工艺流程进行了优化设计, 在工艺中着重优化了隔离、欧姆接触、空气桥、钝化保护等工艺步骤.

毫米波 pin 单片利用 75mm GaAs 单片技术加工, 工艺中采用多种工艺监控技术, 提高 GaAs pin 二极管开关单片的工艺稳定性. 采用化学腐蚀工艺完成器件的台面结构, Ti/Pt/Au 和 Au/Ge/Ni 分别用于 p 型欧姆接触和 n 型欧姆接触, 电镀加厚内部连线及微带线, PECVD 生长的 SiN 介质膜做为 GaAs 表面的钝化保护. 正面工艺完成后, 单片减薄至 $100\mu\text{m}$, 并通过干法刻蚀及背面金属化, 完成单片的通孔接地, 减小器件的串联电感.

在 DC 测试中, GaAs pin 二极管的反向击穿电压大于 35V . 图 4 是 GaAs pin SPST 开关电路的芯片图. 单片的面积为 $1220\mu\text{m} \times 670\mu\text{m}$, 芯片厚度为 $100\mu\text{m}$.

采用微波在片技术测试 GaAs pin 二极管 SPST

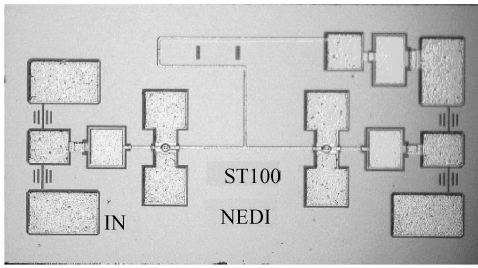


图 4 GaAs SPST 开关单片
Fig. 4 Photo of SPST switch MMIC

开关单片的小信号微波参数,通过软件控制 CASCADE 微波探针台和 AGLIENT N5230A 网络分析仪,自动测试开关的微波参数,SPST 开关电路导通态时反向偏置电压 0V,隔离态时偏置电流 10mA.图 5 和图 6 分别是毫米波 GaAs pin SPST 开关单片的小信号插损、隔离度和输入输出驻波特性的测试曲线。

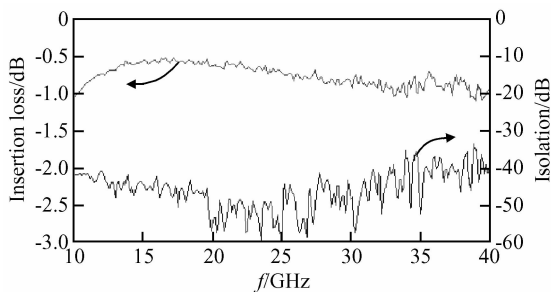


图 5 GaAs SPST 开关单片的插损和隔离度
Fig. 5 Insertion loss and isolation of GaAs SPST switch MMIC

毫米波 GaAs pin SPST 开关单片在 15~20GHz 频带,小信号插损带内小于 0.6dB,驻波优于 1.5,隔离度大于 40dB;在频率 20~40GHz,开关单片小信号插损带内小于 1.1dB,驻波优于 1.35,隔离度大于 35dB.在频率 16GHz 处,测试了单片的

功率和时间特性,反向偏置电压加 -10V 时, P_{-1} 为 33dBm. 开关时间为 30ns.

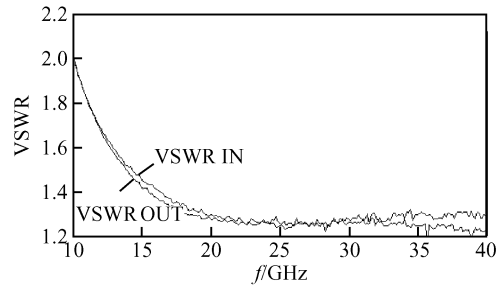


图 6 GaAs SPST 开关单片的驻波特性
Fig. 6 VSWR of GaAs SPST switch MMIC

5 结论

利用南京电子器件研究所的 $\phi 76\text{mm}$ GaAs 标准工艺线,通过对 pin 二极管器件的材料结构、版图布局、工艺流程的优化设计,开发了 GaAs pin SPST 宽带开关电路,在 15~20GHz 频带,开关单片小信号插损带内小于 0.6dB,驻波优于 1.5,隔离度大于 40dB;在频率 20~40GHz,开关单片小信号插损带内小于 1.1dB,驻波优于 1.35,隔离度大于 35dB. SPST 开关单片的 1dB 功率压缩点 P_{-1} 大于 2W. 毫米波 GaAs pin SPST 开关单片电路的研制成功,为 GaAs pin 二极管进一步应用打下了基础。

参考文献

- [1] White J F. Semiconductor control. Artech House, 1977
- [2] Peak S W, Kang H I, Jeon K I, et al. 1~26GHz high power pin diode switch. IEEE MTT-S Digest, 2000:505
- [3] Takasu H, Sasaki F, Kawano M. Ka-band low loss and high power handling GaAs PIN diode MMIC phase shifter for reflected type phased array systems. IEEE MTT-S Digest, 1999:467
- [4] Watson H A. Microwave semiconductor devices and their circuit applications. McGraw-Hill Book Co, 1969

A Millimeter-Wave GaAs pin Diode SPST Switch MMIC

Chen Xinyu[†], Jiang Youquan, Xu Zhengrong, Huang Ziqian, and Li Fuxiao

(*Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China*)

Abstract: A millimeter-wave band GaAs pin diode SPST switch MMIC is presented. It is ideal for low loss, high isolation, and high power applications. In the 15~20GHz frequency range, its insertion loss is less than 0.6dB, its VSWR is better than 1.5, and its isolation is better than 40dB. In the 20~40GHz frequency range, its insertion loss is less than 1.1dB, its VSWR is better than 1.35, and its isolation is better than 35dB. The output power of the pin SPST MMIC at 1dB compression is 2W. These results are obtained using a vertical GaAs pin diode process on MOCVD material.

Key words: millimeter-wave; GaAs; pin diode; SPST; switch; MMIC

EEACC: 1350H; 2520D; 2570

Article ID: 0253-4177(2006)12-2163-04

[†] Corresponding author. Email: NJCXY@163.com

Received 26 May 2006, revised manuscript received 10 August 2006