

InP 基 PIN 开关二极管结构设计及制备

赵艺丹^{1,2} 孙浩¹ 张祁莲¹ 孙晓玮¹

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050; 2. 上海科技大学 上海 201210)

摘要: 开关二极管是微波控制电路中的一种应用最普遍的控制器件,它可以实现近似短路和开路的功能。I层厚度对 PIN 二极管的器件特性具有重要的影响。利用 Silvaco TCAD 软件对 InP 基 PIN 开关二极管器件结构进行建模仿真,分析不同 I 区厚度对二极管的电流电压特性的影响,得出最优值。利用化合物半导体材料外延与器件工艺平台,制备出 InP 基 PIN 开关二极管器件,直流特性测试结果表明, PIN 开关二极管的开启电压为 0.525 V,反向击穿电压大于 12 V。为进一步实现毫米波开关电路奠定了基础。

关键词: PIN; 开关二极管; InP; IV 特性; 物理模型

中图分类号: TN313 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1035

Structural design and fabrication of InP-based PIN switching diode

Zhao Yidan^{1,2} Sun Hao¹ Zhang Qilian¹ Sun Xiaowei¹

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China;

2. Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: Switching diodes are a kind of the most widely used in microwave control circuits of control devices, and it can obtain the good performance of short circuit and open circuit. The thickness of I region has an important effect on the characteristics of PIN diodes device. In this paper, the structure of InP-base PIN switching diode device is modeled by Silvaco TCAD software, and then analyze the influence of different I region thickness on the current and voltage characteristics of the diode and obtain the optimal value. Using compound semiconductor materials epitaxy and device technology platform, InP-base PIN switching diode device is prepared, and the test results of DC characteristics show that, the turn on voltage of PIN switching diode is 0.525 V, and the reverse breakdown voltage is larger than 12 V, which has laid a foundation for further realizing the millimeter wave switching circuits.

Keywords: PIN; switching diode; InP; IV characteristics; physics-based model

0 引言

射频开关是微波控制电路的重要部件,被广泛应用于通信、雷达和电子对抗系统中。PIN 二极管作为常用的控制器之一,它具有可控功率大、损耗小、速度快,开路和短路特性好等优点,因此被广泛应用于移相器、调制器、限幅器、衰减器及各种微波与毫米波控制电路中^[1-7]。

由于 InGaAs 材料的高电子迁移率及窄带材料特性, InP/InGaAs PIN 二极管与 GaAs/AlGaAs 结构 PIN 二极管相比具有低导通电阻和插入损耗、高开关截止频率和低功耗等优点^[8-10],成为近年来研究热点。本文利用 Silvaco TCAD 软件建立 PIN 开关二极管模型,对 I 层不同厚度进行仿真和参数优化,通过对比二极管的 IV 仿真结果,选取最优结构值,利用化合物半导体材料外延与器件工

艺平台,制备出 PIN 开关二极管,通过测试与分析其 IV 特性,仿真结果与测试结果能很好的吻合,为下一步制备微波毫米波开关电路奠定了基础。

1 PIN 二极管工作原理

1.1 PIN 二极管结构

PIN 二极管是一种 pn 结器件,它在 P 型和 N 型接触区之间有一极小的掺杂,或本征区,即 I 区(图 1)。I 区的存在使二极管间电容减小,击穿电压提高,宽的本征区具有低的近乎为常量的电容,和反向偏置时高的击穿电压。

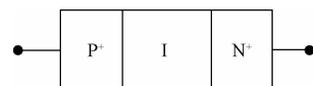


图 1 PIN 二极管结构

PIN 二极管内 P 型和 N 型半导体载流子由于相互扩散在 I 层内形成 PN 结。无外加电压时,PN 结内载流子的漂移和扩散达到平衡^[11-12]。

1.2 PIN 二极管工作原理

在正向偏置状态时,外电场使扩散运动加剧,漂移运动减弱,PN 结的势垒高度降低,载流子空穴和电子分别从 P 区和 N 区大注入到本征区 I 区,近似认为 I 层中电子浓度和空穴浓度相等,即 $n = p$, 则 $np \gg n_i^2$ 。大注入的电子空穴在 I 区发生复合,形成较大电流,即形成通过 PN 结的正向电流,根据间接复合理论,净复合率 U 为:

$$U_{\max} = \frac{n_i}{2\tau_0} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (1)$$

则通过 I 区的电流密度为:

$$J_r = \int_0^W qU dx = \frac{qW n_i}{2\tau_0} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2)$$

式中: V 为加在 PIN 上的电压, τ_0 为 I 层载流子的有效寿命, W 为 I 层厚度。

由式(2)可知,正向电流与正向电压之间有指数函数的关系,且与 I 层厚度有关。当正向电流达到某一数值时认为二极管导通,则此时二极管外加正向电压为导通电压 V_F , 二极管导通电压 V_F 与 I 层厚度 W 有关。

在反向偏置下,PN 结内多子扩散减弱,少子漂移加剧,势垒高度增大,电场增强, I 层中载流子减少,此时 $np \ll n_i^2$, 复合中心产生载流子,形成 PN 结电流。最大产生率为:

$$U_{\max} = \frac{n_i}{2\tau_0} \quad (3)$$

则 PN 结的反向电流密度为:

$$J_g = qU_{\max} W = \frac{qW n_i}{2\tau_0} \quad (4)$$

由式(4)可知, I 区的产生电流与 I 层厚度 W 有关,受少子浓度限制,此时轻掺杂的本征区完全耗尽,反向电流较小且趋于不变,势垒区内最大电场强度 E_m 恒定,则击穿电压可近似为:

$$V_{BD} \approx E_m W \quad (5)$$

则击穿电压 V_{BD} 与内建电场强度和 I 区厚度 W 有关,随着 W 增加, V_{BD} 增加^[12]。

2 PIN 二极管结构设计

本文利用 SilvacoTCAD 软件^[13-15]对 PIN 二极管进行建模仿真,如图 2, PIN 二极管采用垂直结构, P 层和 N 层材料为重掺杂, I 层为非故意掺杂。建立 PIN 二极管物理模型,通过仿真优化确认二极管 P 层和 N 层的厚度和浓度,各层参数设置如表 1 所示。在仿真设计过程中认为杂质分布是突变的,不考虑制备过程中的杂质扩散等的影响。

I 层的厚度对 PIN 开关二极管的导通电压和击穿电压有重要的作用,分别选取 I 层的不同厚度(0.5、0.7、0.9、

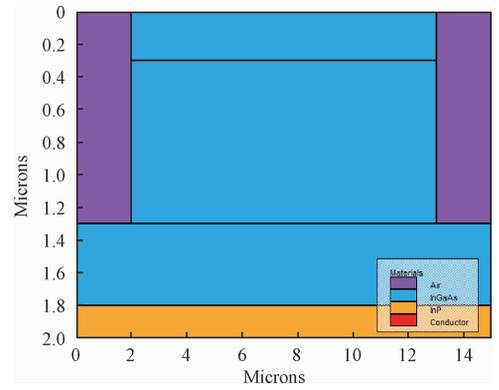


图 2 InP 基 PIN 二极管器件 TCAD 仿真结构

表 1 PIN 二极管浓度和厚度

	浓度/ cm^{-3}	厚度/nm
P	3.8×10^{19}	200
I	2.6×10^{13}	*
N	3×10^{19}	500

1.0、1.1、1.3 μm)对 PIN 二极管的 I-V 特性进行仿真。在对 PIN 开关二极管的击穿特性进行仿真时,使用碰撞电离模型,采用限制电流的方法对二极管仿真。当二极管的反向电流达到一定数值(100 μA)时认为二极管击穿,此时 PIN 二极管所加的电压为击穿电压。仿真结果如图 3 所示。

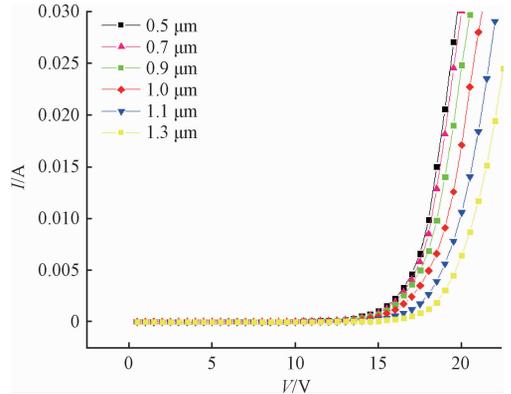


图 3 PIN 二极管击穿特性曲线

从图 3 可以看出,随着 I 区厚度的增加,反向击穿电压增加。在 $W = 1.3 \mu\text{m}$ 时,击穿电压最大, $V_{BD} = 15 \text{ V}$, 此时二极管器件可允许大功率的信号

同理,采用限制电流的方法对正向导通特性仿真,当电流 $I_F = 100 \mu\text{A}$ 时,认为 PIN 二极管导通,此时二极管两端电压则为其导通电压,图 4 为正向导通电压仿真结果图,由仿真结果可知当 $W = 0.5 \mu\text{m}$ 时,导通电压最小, $V_F = 0.51 \text{ V}$ 。由 $P_{\text{loss}} = I_F V_F$ 知,此时二极管的损耗最小。

综合考虑不同 I 层厚度 W 时的 V_{BD} 和 V_F , 优化设计选取 $W = 1.0 \mu\text{m}$ 作为最终 I 层厚度值,可知当 I 区厚度

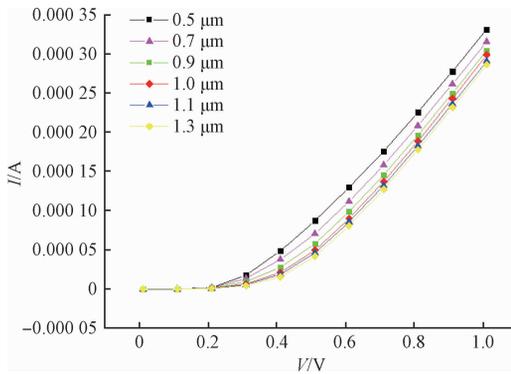


图4 PIN开关二极管正向导通电压

$W = 1.0 \mu\text{m}$ 时,开启电压 $V_F = 0.62 \text{ V}$,击穿电压 $V_{BD} = -13.5 \text{ V}$ 。

3 PIN二极管工艺加工验证

利用本所化合物半导体材料外延与器件工艺平台,制备了优化设计的InP基PIN开关二极管器件,如图5所示。在InP半绝缘衬底上,采用气态分子束外延设备(gas source molecular beam epitaxy, GSMBE)分别生长了优化的结构材料,其中碳掺杂P型InGaAs和硅掺杂InGaAs材料分别为PIN开关二极管的P层和N层,不掺杂InGaAs材料为I层。在器件工艺制备中,电子束蒸发沉积Ti/Pt/Au和GeAuNiAu分别作为P层和N层欧姆接触电极,采用剥离方法制备,采用磷酸双氧水腐蚀溶液湿法腐蚀形成器件台面。图6所示为PIN开关二极管扫描电子显微镜(SEM)图。

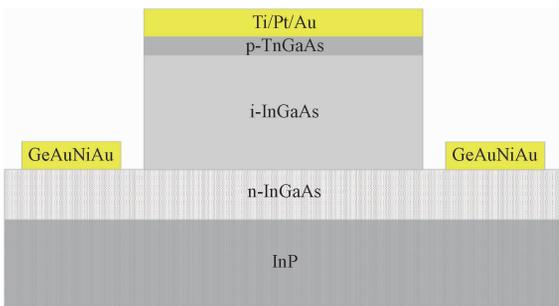


图5 InP基PIN开关二极管器件结构

4 性能测试

最终制备完成的PIN开关二极管器件尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ 。用半导体参数分析仪Agilent 4156A对多个PIN开关二极管器件进行I-V特性测试,测试结果如图7所示。

从图中可得到,电流为 $100 \mu\text{A}$ 时,PIN开关二极管导通,导通电压 $V_F = 0.525 \text{ V}$ 。当PIN二极管的反向电流达到 $100 \mu\text{A}$ 时,二极管击穿,击穿电压大于 12 V 。表明器件

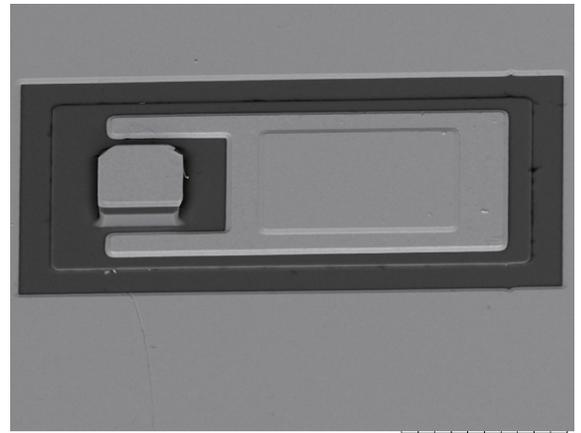


图6 PIN开关二极管SEM图

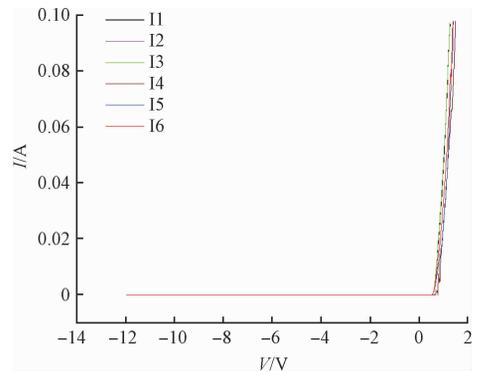


图7 PIN二极管VI特性测试

特性与仿真结果接近。

5 结论

本文利用SilvacoTCAD软件对PIN二极管结构建模仿真,通过研究不同I层厚度对器件直流特性的影响,设计出优化的器件材料结构,得出理论值为开启电压 $V_F = 0.62 \text{ V}$,击穿电压 $V_{BD} = 13.5 \text{ V}$ 。通过材料外延与器件工艺制备出所设计的结构材料,通过直流特性测试,其开启电压 $V_F = 0.525 \text{ V}$,击穿电压大于 12 V 。实验数值与理论仿真结果相符合,获得具有低开启电压和高的反向击穿电压的InGaAs PIN二极管,为实现低损耗和高可控功率的微波毫米波开关奠定了基础。

参考文献

- [1] 王琦. 射频与微波开关系统的设计与应用[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5): 12-14.
- [2] 马增强, 谷朝健, 李延忠, 等. 改进型共振解调器在轴承故障诊断中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1925-1932.
- [3] 李胜寅, 刘祖深, 赵颖. 基于ADS的微波限幅器设

- 计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(11): 38-40.
- [4] 姚志红, 宋寿鹏, 胡晓婷. 基于 STM32 的光功率计的设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11): 126-130.
- [5] 张良浩, 谢红云, 赵彦晓, 等. 采用 PIN 二极管反馈的射频可变增益放大器[J]. 电子学报, 2014, 44(1): 206-210.
- [6] CHAOUCHÉ Y B, BOUTTOUT F, MESSAOUD-ENE I, et al. Design of reconfigurable fractal antenna using pin diode switch for wireless applications[C]. 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), IEEE, 2016: 1-4.
- [7] GU L, CHE W, LIU D. Design investigation of a compact broadband reflection-type PIN phase shifter[C]. International Workshop on Antenna Technology (iWAT), IEEE, 2011: 328-331.
- [8] ARSHAD T S M, OTHMAN M A, YASIN N Y M, et al. Comparison on IV characteristics analysis between Silicon and InGaAs PIN photodiode[C]. 3rd International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME), IEEE, 2013: 70-75.
- [9] YANG J G, YANG K. Broadband InGaAs PIN traveling-wave switch using a BCB-based thin-film microstrip line structure[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(10): 647-649.
- [10] YANG J G, KIM M, YANG K. An InGaAs PIN-diode based broadband travelingwave switch with high-isolation characteristics[C]. IEEE International Conference on Indium Phosphide & Related Materials, 2009: 207-209.
- [11] 尹帅. 基于 PIN 管的大功率射频开关研制[J]. 计算机与数字工程, 2012, 40(3): 121-123.
- [12] SHUHAIMI N I, MOHAMAD M, JUBADI W M, et al. Comparison on IV performances of Silicon PIN diode towards width variations[C]. IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE), 2010: 12-14.
- [13] 朱筠. 利用 SILVACO TCAD 软件改进集成电路实践教学的研究[J]. 数字技术与应用, 2012(7): 114-116.
- [14] WANG P, TIAN D, WANG S, et al. Research on the structure of ultrathin Si PIN detector[C]. 8th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2013: 629-632.
- [15] SAHA N, GANGULY A, PANDA S, et al. Comparative study of IV-characteristics of PIN diode at different doping concentrations for different semiconductor materials using TCAD[J]. International Journal of Electronics and Communication Engineering (IASSET), 2015, 4(6): 1-8.

作者简介

赵艺丹, 1991 年出生, 硕士研究生, 研究方向为射频毫米波集成电路设计。

E-mail: zhaoyd@shanghaitech.edu.cn

孙浩, 1981 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为毫米波太赫兹固体电子学器件与电路。

E-mail: sh@mail.sim.ac.cn

张祁莲 1989 年出生, 本科, 工程师, 研究方向为半导体工艺器件。

E-mail: qlzhang@mail.sim.ac.cn

孙晓玮, 1958 年出生, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波毫米波器件单片集成电路及其相关毫米波集成系统。

E-mail: xwsun@mail.sim.ac.cn