

# RTD 与 HEMT 在 InP 衬底上的单片集成\*

马 龙<sup>†</sup> 张 杨 戴 扬 杨富华 曾一平 王良臣

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 在半绝缘的 50mm InP 衬底上采用分子束外延的方法生长了 RTD 与 HEMT 的集成材料结构. RTD 室温下峰谷电流比最高达到 18.39, 阻性截止频率大于 20.05GHz. 栅长为 1 $\mu$ m 的 HEMT 截止频率为 19.8GHz, 最大跨导为 237mS/mm. 由多个 RTD 串联形成的多峰值逻辑以及 HEMT 栅压调节 RTD 电流的特性也得以验证.

关键词: 共振隧穿二极管; 高电子迁移率晶体管; 磷化铟; 单片集成  
EEACC: 2530C; 2560S; 2520M

中图分类号: T313<sup>\*</sup>.2 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)S0-0414-04

## 1 引言

共振隧穿二极管 (RTD) 作为率先实用化以及当前发展最成熟的纳米电子器件, 是目前在室温下工作速度最快的固态电子器件. 由于它的高速度与低功耗以及其特有的微分负阻特性可以简化电路的复杂性, 受到人们的广泛关注, 目前已有 GaAs 基、InP 基、Si 基以及 GaN 基等多种材料体系的结构得到应用<sup>[1~6]</sup>. 综合考虑器件的性能以及电路的兼容性问题, 采用 InP 衬底 InGaAs/AlAs 结构组成的电路无疑具有较明显的优势.

由于 RTD 属于两端器件, 不能实现电流的自我调制, 因此在形成电路时需要与三端器件相结合. 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 作为 III-V 族化合物半导体高速器件, 由于具有高的电子迁移率和良好的抗噪声能力, 在微波毫米波范围内得到广泛应用. 将基于量子隧穿效应的 RTD 和 HEMT 在 InP 衬底上集成起来形成的电路, 不仅保持了高频、低噪声和低功耗的特点, 而且比实现相同功能的其他器件电路所需的元件数要少得多, 可以大大简化电路结构, 减小芯片面积, 提高集成度, 在数字以及混合电路中有着重重要的应用<sup>[7,8]</sup>.

## 2 材料生长与制备

在 50mm 半绝缘的 InP 衬底上, 采用分子束外延的方法依次生长 HEMT 与 RTD 结构, HEMT 结构包括: 200nm 的 In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 缓冲层, 15nm 的 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 沟道, 3nm 的 In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 隔离层,

硅平面掺杂层 ( $4 \times 12 \text{cm}^{-2}$ ), 15nm 的 In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 势垒, 2nm 的 AlAs 选择性阻挡层以及重掺杂的 In-GaAs 帽层. RTD 采用典型的“双垒一阱”结构, 以 AlAs 为势垒, 在 InGaAs 阱中添加 InAs 量子阱降低共振能级, 减小峰值电压. In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As, In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As, AlAs 和 InAs 的生长速率依次为 0.307, 0.343, 0.165 和 0.169nm/s. 衬底温度 480 $^{\circ}$ C, 在生长 InAs 量子阱时降为 420 $^{\circ}$ C.

集成器件的工艺流程, 首先以 RTD 发射极金属为掩蔽, 采用非选择性的硫酸基溶液 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 1 : 38) 腐蚀形成 RTD 的台面. 然后光刻隔离区, 腐蚀实现器件隔离. 采用电子束蒸发 AuGeNi 金属形成 HEMT 的源、漏电极, 高温下合金. 光刻栅槽, 采用具有选择性的腐蚀液腐蚀, 停止于 AlAs 阻挡层上, 腐蚀液对 InGaAs 和 AlAs 的选择比大于 50. 用盐酸去除 AlAs 层, 光刻, 蒸发 Ti-PtAu, 剥离形成栅电极. 最后蒸发厚的 TiAlTiAu 金属实现引线互连, 器件最终的台面结构剖面如图 1 所示.

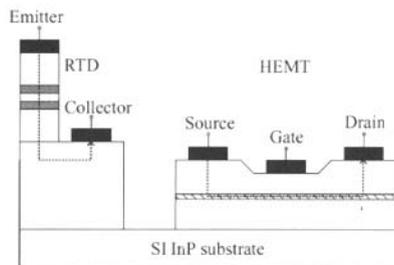


图 1 集成的 RTD 和 HEMT 台面结构剖面图

Fig. 1 Cross-section of the RTD/HEMT mesa structure

\* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2003AA302750)

<sup>†</sup> 通信作者. Email: malong@semi.ac.cn

2006-11-21 收到, 2006-12-09 定稿

实验证明 AlAs 阻挡层的引入可以获得较平整的 HEMT 表面,有益于提高 HEMT 阈值电压以及跨导的一致性,这在大规模集成中尤为重要.

### 3 分立器件特性

势垒层的选择对 RTD 的性能有重大影响. 电子的量子隧穿是与势垒厚度紧密相关的,随着势垒厚度的增加,量子隧穿几率呈指数下降. 隧穿几率与势垒厚度满足如下关系:

$$v \propto \exp\left(-\sqrt{\frac{8m^*V}{\eta^2 L_B}}\right) \quad (1)$$

其中  $L_B$  为势垒厚度;  $V$  为高度;  $m^*$  为电子有效质量. 采用四种不同厚度的 AlAs 势垒的器件的峰值电流密度 ( $J_p$ ) 与峰谷电流比 (PVCr) 的关系如图 2 所示. 其中,当  $L_B = 2.9\text{nm}$  时,得到室温下最大的峰谷电流比,为 18.39,对应的峰值电流密度为  $3\text{kA/cm}^2$ . 可以看出,  $J_p$  与 PVCr 分别与  $L_B$  呈指数性反比和线性正比关系,二者不可兼得.

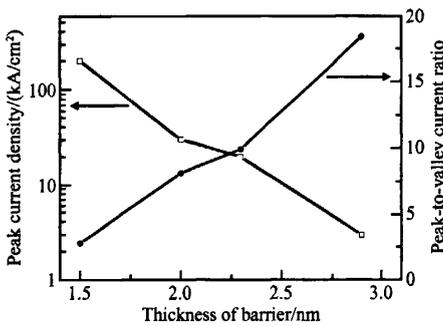


图 2 势垒层厚度对峰值电流密度和峰谷电流比的影响  
Fig.2 Impact of the barrier thickness on the peak current density and the peak-to-valley current ratio

RTD 的高频小信号  $S$  参数测试结果如图 3(a) 所示,测试设备为 HP-8720D 网络分析仪. 测量的频率范围从 50MHz 到 20.05GHz,器件加直流偏置于负阻区. 转换得到的输入阻抗如图 3(b) 所示,在未考虑压焊点以及引线等寄生参数影响的条件下,器件的阻性截止频率大于 20.05GHz.

所制备的 HEMT 为耗尽型器件. 在未去嵌的情况下,栅长为  $1\mu\text{m}$  的 HEMT 截止频率  $f_T = 19.8\text{GHz}$ ,最大振荡频率  $f_{max} = 21.0\text{GHz}$ ,如图 4 (a) 所示. 当栅压  $V_{gs} = -0.7\text{V}$  时,得到最大跨导  $g_m = 237\text{mS/mm}$ ,跨导和源漏电流  $I_{sd}$  随栅压的变化关系如图 4(b) 所示,源漏电压  $V_{ds}$  固定为  $1.5\text{V}$ .

### 4 集成结构特性

当  $n$  个 RTD 管相串联时,在电流-电压曲线上

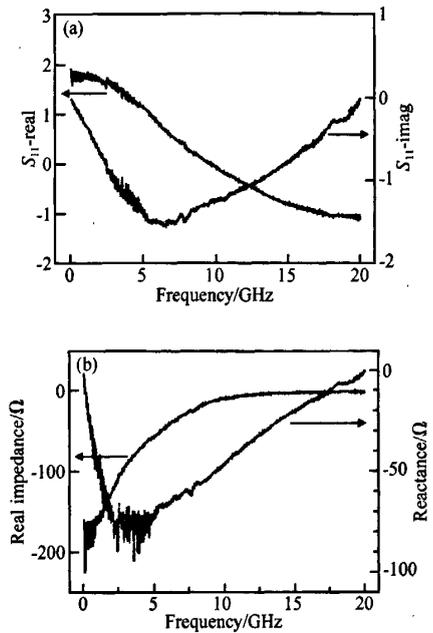


图 3 (a) RTD 小信号  $S$  参数;(b) 转化阻抗  
Fig.3 (a) RTD small signal  $S$ -parameter;(b) Corresponding impedance

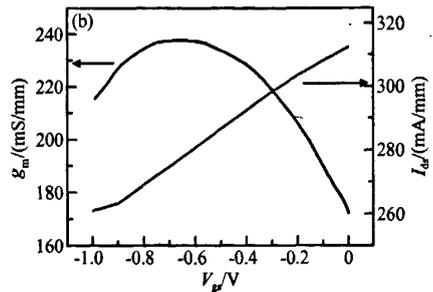
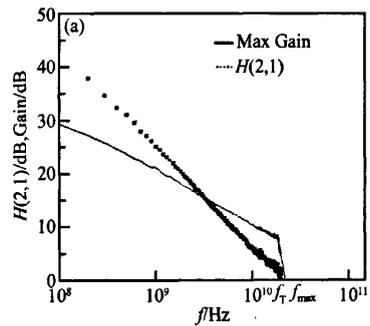


图 4 (a) 栅长为  $1\mu\text{m}$  的 HEMT 频率特性;(b) 跨导和电流与栅压的变化关系  
Fig.4 (a) HEMT frequency characteristics;(b) Impact of the gate voltage on the transconductance and the source-to-drain current

就有  $n$  个峰值点, 对应  $n+1$  个稳定的状态, 这也是多值逻辑电路应用的前提. 图 5 是由 6 个不同尺寸的 RTD 串联形成的特性曲线, 对应 6 个不同的峰值, 它们之前的电流差:

$$\Delta I = J_p \Delta A \quad (2)$$

其中  $\Delta A$  为管子的发射极面积差. 当流过 RTD 的电流超过其峰值电流的时候, 管子便由低阻的导通态转变为高阻的关断态. 因此, 峰值电流 (即发射极面积) 最小的 RTD 最先发生转换, 依次类推, 形成图 5 所示的特征曲线.

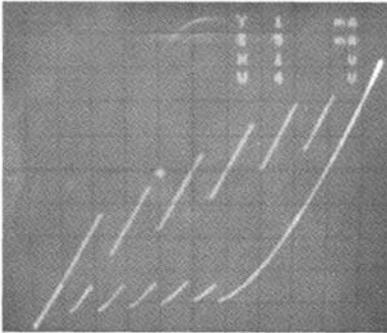


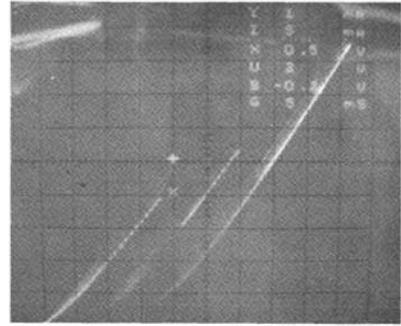
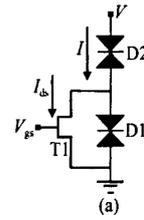
图 5 多个 RTD 串联的特性曲线

Fig. 5  $I$ - $V$  characteristics of multiple RTDs connected in series

图 6(a) 是两个 RTD (D1, D2) 与一个 HEMT (T1) 相并联的示意图, 其中  $I$  为流过 T1 和 D1 的总电流,  $I_{ds}$  为 T1 的源漏电流. 总电流  $I$  随加在两个串联的 RTD 两端的电压  $V$  变化的曲线如图 6(b) 所示, 其中栅压  $V_{gs}$  从 0V 变化到 -1.0V, 间隔为 -0.2V. 由于  $V_{gs}$  可以调节  $I_{ds}$  的大小, 因此总的电流  $I$  也随着  $V_{gs}$  绝对值的增加而减小.

## 5 总结

在 50mm 半绝缘的 InP 衬底上采用分子束外延的方法制备了 HEMT 与 RTD 的集成结构, 发展并完善了可重复的单片集成工艺流程. 验证了由多个 RTD 相串联所形成的多峰值逻辑. 同时, HEMT 与 RTD 相并联, 以栅压来调制 RTD 电流的特性也得以验证, 为下一步 RTD 基集成电路的制作打下了基础.



(b)

图 6 (a) RTD 与 HEMT 集成结构; (b) 相应的电流-电压曲线  
Fig. 6 (a) RTD/HEMT integration schematic; (b) Corresponding  $I$ - $V$  characteristics

## 参考文献

- [1] Brown E R, Soderstrom J R, Parker C D, et al. Oscillations up to 712GHz in InAs/AlSb resonant tunneling diodes. *Appl Phys Lett*, 1991, 58(20): 2291
- [2] Wang J L, Wang L C, Zeng Y P, et al. Design and realization of resonant tunneling diodes on a new material structure. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(1): 1
- [3] Shimizu N, Nagatsuma T, Waho T, et al. In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/AlAs resonant tunneling diodes with switching time of 1.5ps. *Electron Lett*, 1995, 31(19): 1695
- [4] Chung S Y, Yu R H, Jin N, et al. Si/SiGe resonant interband tunnel diode with  $f_{0.2}$  20.2GHz and peak current density 218 kA/cm<sup>2</sup> for K-band mixed-signal applications. *IEEE Electron Device Lett*, 2006, 27(5): 364
- [5] Wang C R, Bierkandt M, Paprotta S. CaF<sub>2</sub>/Si/CaF<sub>2</sub> resonant tunneling diodes grown by B surfactant-mediated epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2005, 86: 033111
- [6] Kikuchi A, Bannai R, Kishino K. AlN/GaN double-barrier resonant tunneling diodes grown by RF-plasma-assisted molecular-beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(9): 1729
- [7] Fay P, Jiang L, Xu Y, et al. Fabrication of monolithically-integrated InAlAs/InGaAs/InP HEMTs and InAs/AlSb/GaSb resonant interband tunneling diodes. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(6): 1282
- [8] Gonzalez A, Mazumder P. Comparison of bistable circuits based on resonant-tunneling diodes. *Proceedings of the 16th International Conference on VLSI Design*, 2003: 493

## Monolithic Integration of Resonant Tunneling Diodes and High Electron Mobility Transistors on InP Substrates\*

Ma Long<sup>†</sup>, Zhang Yang, Dai Yang, Yang Fuhua, Zeng Yiping, and Wang Liangchen

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** The integrated structures of InGaAs/AlAs resonant tunneling diode (RTD) and InGaAs/InAlAs high electron mobility transistor (HEMT) are epitaxially grown by molecular beam epitaxy on semi-insulating InP substrates. The maximum peak-to-valley current ratio (PVCR) of the fabricated RTD is 18.39 at room temperature and the resistive cutoff frequency is larger than 20.05GHz. The cutoff frequency and the maximum transconductance for the 1mm gate length HEMT are 19.8GHz and 237mS/mm, respectively. The multiple value logic which consists of multiple RTDs connected in series, and the characteristics that HEMT and RTD are in parallel connection are also demonstrated.

**Key words:** resonant tunneling diode; high electron mobility transistor; InP; monolithic integration

**EEACC:** 2530C; 2560S; 2520M

**Article ID:** 0253-4177(2007)S0-0414-04

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2003AA302750)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: malong@semi.ac.cn

Received 21 November 2006, revised manuscript received 9 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics