

RTD/HEMT 串联型 RTT 的设计与研制*

齐海涛^{1,2,†} 李亚丽² 张雄文² 冯震² 商耀辉² 郭维廉¹

(1 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

(2 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要: 依据 RTD/HEMT 串联型 RTT 的概念, 设计了 RTD/HEMT 单片集成材料结构, 该结构采用分子束外延技术生长. 采用湿法化学腐蚀、金属剥离、台面隔离和空气桥互连技术, 研制了 RTD/HEMT 串联型 RTT, 并对 RTT 及 RTT 中 RTD 和 HEMT 的直流特性进行了测试. 测试结果表明: 在室温下, 器件具有明显的栅控负阻特性, 正接型 RTT 的最大峰谷电流之比在 2.2 左右, 反接型 RTT 的最大峰谷电流之比在 4.6 左右. 实验为 RTD/HEMT 串联型 RTT 性能的优化和 RTD/HEMT 单片集成电路的研制奠定了基础.

关键词: 共振隧穿晶体管; 共振隧穿二极管; 高电子迁移率晶体管; 电流峰谷比
EEACC: 2550

中图分类号: TN705 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)07-1107-05

1 引言

谐振隧穿器件是利用量子谐振隧穿效应而构造的一种新型半导体器件, 包括谐振隧穿二极管 (RTD) 和谐振隧穿晶体管 (RTT) 两种. 构成 RTD 或 RTT 的核心结构是双势垒单阱系统 (DBS), 该系统由宽带隙化合物材料 (如 AlAs) 在导带中形成的两个势垒和夹在中间的由窄带隙材料 (如 GaAs 或 InGaAs) 构成的势阱组成, 一般情况下势垒和势阱的宽度都为几个纳米的量级. RTD 的 f_{\max} 理论预期值为 2.5THz, 开关时间已达到 1.5ps^[1]. RTD 具有负阻特性, 负阻特性可导致双稳态特性, 双稳态进一步产生自锁特性, 可以说一个 RTD 就相当于一个触发器电路, 应用于电路时可大量节省器件数量, 减小了电路复杂程度, 减小了芯片面积. 谐振隧穿器件在超高频微波、毫米波振荡和超高速数字电路几个方面有着广阔的应用前景, 当前已有的和潜在的应用领域包括: 数百 GHz 的超高频微波、毫米波振荡器、各种基础逻辑门、触发器、柔性逻辑、神经元、静态存储器、静态分频器、多值逻辑、可编程逻辑、相关器、加法器、量化器、时钟发生器、移位寄存器和 AD 转换器^[2~5]. RTD 虽然具有高频、高速、双稳、自锁等优点, 但它仍存在没有增益、扇出和驱动能力小、对 $I-V$ 特性没调制功能、输入和输出回路间不能隔离等缺点, 给电路设计带来了不便. 而具有控制端的三端谐振隧穿器件——谐振隧穿晶体管 (RTT) 则

可克服以上缺点, 增强了器件的功能和使用灵活性. 虽然 RTT 的频率不如 RTD 的频率高, 但一般为几十个 GHz 的量级, 在微波和高速数字集成电路中仍具有重要的应用价值.

本文结合 RTD 单管和 HEMT 单管的研究基础, 设计了 RTD/HEMT 复合材料结构, 该结构采用分子束外延 (MBE) 技术生长. 通过湿法化学腐蚀、金属剥离、台面隔离和空气桥互连技术, 研制了 RTD/HEMT 串联型 RTT, 测试了器件的直流特性并进行了分析.

2 器件结构设计

RTT 可以被定义为具有双势垒单势阱结构 (DBS) 而同时具有三个引出端的谐振隧穿器件. RTT 可分成两大类^[6]: (1) 栅型 RTT: 即在 RTD 的基础上设计制作一控制栅极, 以调控其 $I-V$ 特性; (2) 复合型 RTT: 由 DBS 结构与一个高频三端器件, 如 HEMT, HBT 相结合构成. RTD/HEMT 复合型 RTT 一般采用串联结构, 根据 RTD 与 HEMT 的结合方式, RTD/HEMT 串联型 RTT 又分为两种结构: 一种是 DBS 制作在 HEMT 的源极 (称为正接型 RTT), 一种是 DBS 制作在 HEMT 的漏极 (称为反接型 RTT). 分别如图 1 和 2 所示, 每种结构的等效电路在相应的图中给出. 将 DBS 制作在 HEMT 源极时可以认为先经过 RTD 产生负阻 $I-V$ 特性, 并经过源极输入给 HEMT, 经 HEMT 放大后

* 国防科技重点实验室基金 (批准号: 9140C0602030603) 和中国博士后科学基金 (批准号: 20060400189) 资助项目

† 通信作者. Email: tjquht@163.com

2007-01-24 收到, 2007-03-12 定稿

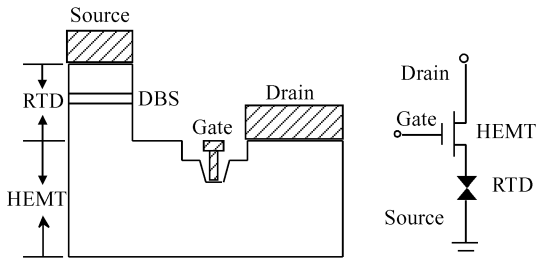


图 1 DBS 位于 HEMT 源端 RTT 器件结构与等效电路

Fig. 1 Device structure and equivalent circuit of RTT whose DBS is on the source of HEMT

在漏极输出. 当 DBS 制作在 HEMT 漏极时可以认为电流先从源极注入给 HEMT, 从漏极输出已经具有增益的电流, 再经 RTD 产生负阻特性. 从等效电路图中可以看出串联结构构成了一个反相器, 前者以 RTD 作为驱动器件而 HEMT 为负载器件, 后者是以 HEMT 作为驱动器件而 RTD 为负载器件.

3 材料结构设计

在 RTD/HEMT 串联型 RTT 中, 由于串联时流过两个器件的电流相等, 故在 RTT 材料结构设计中必须解决好 RTD 和 HEMT 电流的匹配问题. 从以往单管研制的经验看, 常规尺寸、常规材料结构的 RTD, 其电流为 $3 \sim 10\text{mA}$ 左右, 而常规尺寸 HEMT 的电流一般小于 3mA . 在此情况下, 若进一步减小 RTD 的尺寸, 则工艺难度增大. 较好的解决方法是设法在 RTD 材料设计中减小其峰值电流密度 J_p . 减小 J_p 的方法通常有两种: 一是采用预势垒结构或增加势垒厚度; 二是增大发射区平均掺杂浓度. 前者的缺点是增加串联电阻 R_s 和峰值电压 V_p , 后者则减小 R_s 和 V_p . V_p 的减小有利于降低电路的时钟电压幅度和功耗. 增加发射区平均掺杂浓度虽然使电流峰谷比 PVCR 有所降低, 但其值一般也都大于 2, 基本满足电路设计要求.

按照上述设计思想所设计的 RTD/HEMT 串联型 RTT 材料结构如表 1 所示, 该结构采用分子束

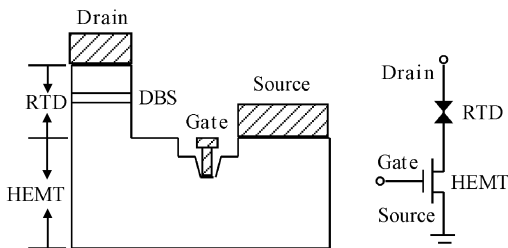


图 2 DBS 位于 HEMT 漏端 RTT 器件结构与等效电路

Fig. 2 Device structure and equivalent circuit of RTT whose DBS is on the drain of HEMT

表 1 RTD/HEMT 串联型 RTT 材料结构

Table 1 Material structure of series connection RTT

材料厚度/nm	材料类型	备注
500	n^+ -GaAs	发射区接触层
10	n-GaAs	发射区
5	i-GaAs	隔离层
5	i-In _{0.1} Ga _{0.9} As	垒前阱
0.5	i-GaAs	隔离层
1.7	i-AlAs	势垒层
0.5	i-GaAs	阱
4	i-In _{0.1} Ga _{0.9} As	子阱
0.5	i-GaAs	阱
1.7	i-AlAs	势垒层
0.5	i-GaAs	隔离层
5	i-In _{0.1} Ga _{0.9} As	垒后阱
5	i-GaAs	隔离层
10	n-GaAs	集电区
280	n^+ -GaAs	源漏接触层
27	i-AlGaAs	栅
δ -Si doping		$3 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$
4	i-AlGaAs	隔离层
20	i-In _{0.1} Ga _{0.9} As	沟道
500	i-GaAs	缓冲层
半绝缘 GaAs 衬底		

外延 (MBE) 技术生长. 其中, RTD 设计在上部, HEMT 设计在底部, 利用重掺杂 n^+ GaAs 层作为二者的连接, 同时也作为 HEMT 的源、漏层. RTD 的发射区和集电区的掺杂浓度为 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, 由不掺杂 InGaAs 作为子阱. 为进一步提高 RTD 的性能, 在 RTD 基本结构的基础上, 在发射区和集电区隔离层中各增加一层不掺杂 InGaAs, 其目的是在 E 区和势垒之间形成一个垒前阱, 该阱中也产生了分立能级, 这样就使原本由发射区电子与阱中分立能级间的共振隧穿转变为垒前阱中分立能级与阱中分立能级之间的二维对二维的共振隧穿. 由于受隧穿前后能量和横向动量守恒的限制, 会在 $I-V$ 曲线上形成一个十分尖锐的共振电流峰, 其结果是降低 V_p 、提高 PVCR.

4 器件工艺与版图

RTD/HEMT 串联型 RTT 的光刻版如图 3 所示, 其中 E 为 RTD 的发射极压焊点, 与之相连的是 RTD 发射极, RTD 的集电极与 HEMT 的源极 S 共用, D 是 HEMT 的漏极压焊点, G 是 HEMT 的栅极压焊点, 与之相连的窄细条即为 HEMT 的栅极. 以上是对应 RTD 位于源极中的情况, 如果 E 接正偏压, D 接地, 栅极不变则属于 RTD 位于 HEMT 漏极中的情况. 设计 RTD 的发射极面积为 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$. HEMT 栅极的栅长为 $0.5\mu\text{m}$, 栅宽为 $40\mu\text{m}$.

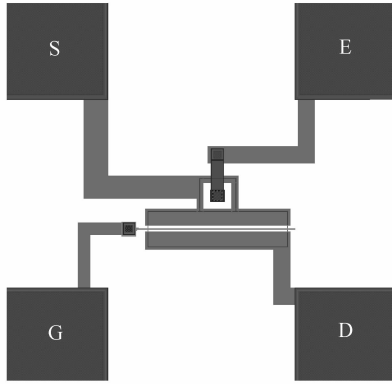


图 3 RTD/HEMT 串联型 RTT 的光刻版图设计

Fig. 3 Mask design of RTD/HEMT series connection RTT

图 4 给出了器件的详细工艺流程,采用了湿法化学腐蚀、台面隔离、金属剥离以及空气桥互连技

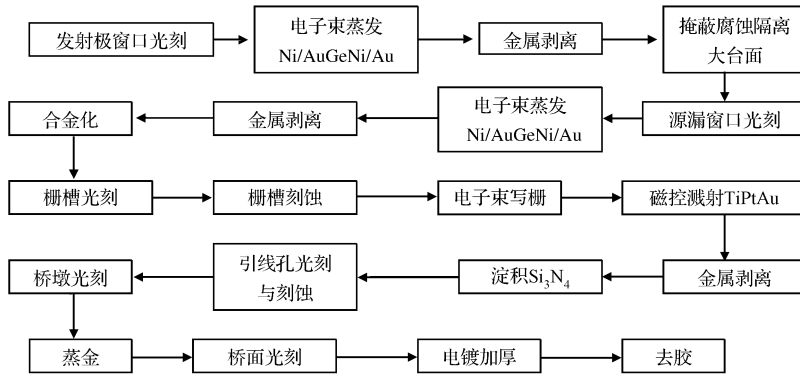


图 4 RTD/HEMT 串联型 RTT 的工艺流程设计

Fig. 4 Process flow of RTD/HEMT series connection RTT

术,九次光刻.由于未采用选择性腐蚀技术,所以设计了源漏监控电极,在腐蚀过程中,对两者间饱和电流进行实时检测.为了能够比较准确地达到电流控制目的,不至于过腐蚀而伤及 δ 掺杂层,破坏二维电子气,必须严格控制腐蚀时间.

5 直流参数测试

利用半导体特性图示仪对 RTT 及 RTT 中 RTD 与 HEMT 的特性分别进行了测试.

让探针分别扎在 S 和 E 上,此时测试结果为 RTD 的直流特性,当 E 接地,S 接正偏压时,测试结果为 RTD 的正接特性,见图 5(a);当 S 接地,E 接正偏压时,测试结果为 RTD 的反接特性,见图 5(b).正接时,RTD 的峰值电压 V_p 为 0.5V,峰值电流 I_p 为 1.4mA,谷值电压 V_v 为 0.81V,谷值电流 I_v 为 0.5mA,电流峰谷比 PVCR 为 2.8;反接时,

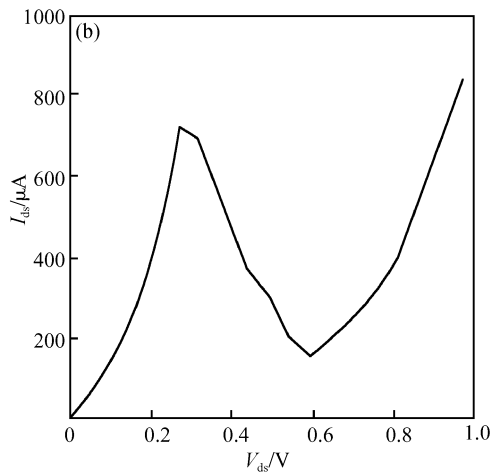
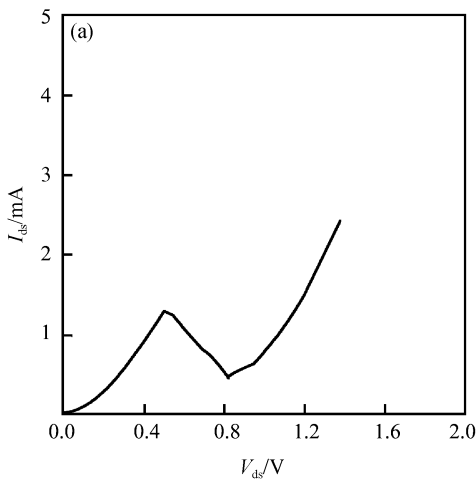
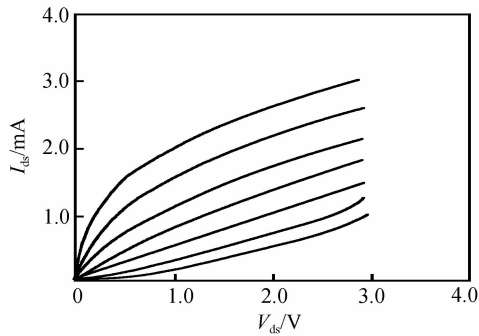


图 5 RTT 中 RTD 的正反接 I-V 特性

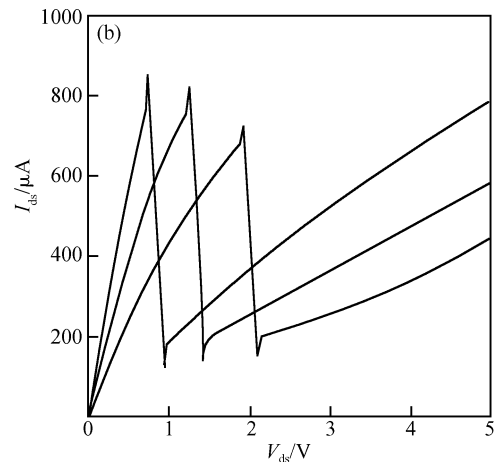
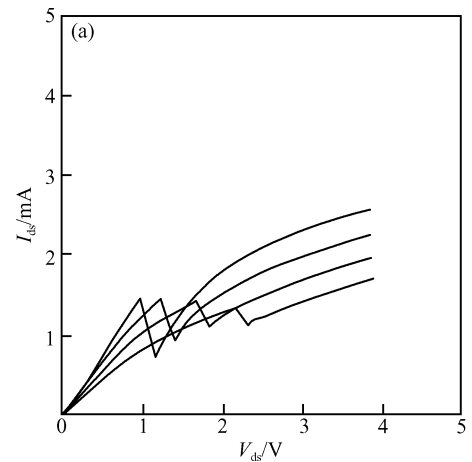
Fig. 5 Forward and backward direction I-V characteristics of RTD in RTT

图 6 RTT 中 HEMT 的 I - V 特性 (V_g step: -0.2 V)Fig. 6 I - V characteristic of HEMT in RTT

RTD 的峰值电压 V_p 为 0.3 V, 峰值电流 I_p 为 0.72 mA, 谷值电压 V_v 为 0.6 V, 谷值电流 I_v 为 0.15 mA, 电流峰谷比 PVCR 为 4.8 . 正、反接时特性的巨大出入与以下因素有关: (1) RTD/HEMT 单片集成外延材料结构复杂, 由 20 层厚薄不均材料构成, 很多层厚在 1 nm 左右, 层厚和组分的精确控制比较困难, 偏差不可避免; (2) 工艺过程中未采用选择性化学湿法终止腐蚀技术, RTD 非上下完全对称结构; (3) 发射极与集电极大小和形状不同.

图 6 给出了 RTT 中 HEMT 在源极接地、漏接正偏压时的直流特性, 由于版图中栅源、栅漏间距相同, 源漏相对于栅为对称结构, 所以源漏电极互换时 HEMT 的特性基本保持不变. HEMT 为耗尽型, 跨导为 46 mS/mm, 该结果明显低于同材料结构的非集成 HEMT (跨导为 $150 \sim 220$ mS/mm, 以前实验结果), 同时器件伴有很大泄漏电流. 上述结果的成因, 一是 RTD/HEMT 集成材料中上层 RTD 对下层 HEMT 的干扰, 影响了 HEMT 的沟道和二维电子气结构, 二是工艺过程中多步腐蚀误差累积造成挖栅深度难以精确监控.

图 7 为最终测得的 RTT 直流特性, 器件表现出明显的栅控负阻特性. 由于 RTD 正、反接时不同的 I - V 特性和 RTD/HEMT 串联方式的不同, 形成了 RTT 不同的正、反接 I - V 特性. 图 7(a) 和 (b) 分别对应正接和反接时 RTT 的测试结果. 从图 7(a) 可以看出, 正接 RTT 的峰值电流在 1.4 mA 左右, 最大峰谷电流比 PVCR 为 2.2 左右, 略低于正接 RTD 的 PVCR. 从图 7(b) 可以看出, 反接 RTT 的最大峰谷电流比为 4.6 , 与反接 RTD 的 PVCR 相当. 另外, 两种接法 RTT 的峰值电流均随负栅偏压的增大而减小, 谷值电流随负栅偏压的增大而增大, 但正接时增大更为明显. RTT 栅控负阻特性产生的原因可作如下解释: 不论 RTT 采用正接还是反接, 都等效为 RTD 与 HEMT 的串联. 当加在 RTT 源漏两端的电压开始逐渐增加时, RTD 谐振隧穿效应逐渐增大, 串联电路中的电流逐渐增大至 RTD 的

图 7 正反接型 RTT 的 I - V 特性曲线 (V_g step: -0.2 V)Fig. 7 Forward and backward direction connection I - V characteristics of RTT

峰值电流. 当电流大于 RTD 的峰值电流时, RTD 谐振隧穿效应截止, RTD 两端电压由峰值电压向谷值电压跳变, 电流由峰值电流向谷值电流跳变, 即电压异常增大而电流异常减小. 与此同时, HEMT 源漏间电压由于 RTD 分压增大而减小, 造成 HEMT 源漏电流减小, 从而 RTT 的源漏电流减小, 形成 RTT 的负阻区. 分析可知, RTD 的峰值谷值电压之差越大, HEMT 的跨导越大, RTT 的谷值电流越小, 其峰谷电流比越大, 具体的理论分析可参考文献 [6].

6 结论

本文研究了 RTD/PHEMT 串联型 RTT 的材料结构和制作工艺, 并制作了器件, 对 RTT 和 RTT 中的 RTD, HEMT 都进行了直流参数测试, 实验为 RTD/HEMT 串联型 RTT 性能的进一步优化和 RTD/HEMT 单片集成电路的研制奠定了基础. 在

室温下,器件具有明显栅控负阻特性,正接型 RTT 的最大峰谷电流比为 2.2 左右,反接型 RTT 的最大峰谷电流比为 4.6 左右.从实验结果看,RTT 的研制基本成功,但尚存在两个问题,一是进一步改善 RTD/HEMT 串联型 RTT 中 RTD 和 HEMT 的电流匹配问题;二是加强工艺监控,使 RTT 中 RTD 和 HEMT 的单管性能更为理想,减少泄漏电流的产生.

参考文献

- [1] Shimizu N, Nagatsuma T, Waho T M, et al. InGaAs/AlAs resonant tunneling diodes with switching time of 1.5ps. *Electron Lett*, 1995, 31(19):1695
- [2] Garrett S R, Mircea R S. Memory arrays based on molecular RTD devices. *Third IEEE Conference on Nanotechnology*, 2003:453
- [3] Matsuzaki H, Osaka J, Itoh T, et al. Monolithic integration of resonant tunneling diodes, Schottky barrier diodes and 0.1- μm -gate high electron mobility transistors for high-speed ICs. *Jpn J Appl Phys*, 2001, 40(4A):2186
- [4] Pacha C, Auer U, Burwick C, et al. Threshold logic circuit design of parallel adders using resonant tunneling devices. *IEEE Trans VLSI Systems*, 2000, 8(5):558
- [5] Kim H, Yeon S, Song S, et al. High-speed digital circuits using InP-based resonant tunneling diode and high electron mobility transistor heterostructure. *Jpn J Appl Phys, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 2006, 45(4B):3384
- [6] Guo Weilian, Liang Huilai, Song Ruiliang, et al. Design and fabrication of gate-type resonant tunneling transistors. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(11):1974 (in Chinese) [郭维廉, 梁惠来, 宋瑞良, 等. 栅型共振隧穿晶体管的设计与研制. *半导体学报*, 2006, 27(11):1974]

Design and Fabrication of RTD/HEMT Series Connection Resonant Tunneling Transistor*

Qi Haitao^{1,2,†}, Li Yali², Zhang Xiongwen², Feng Zhen², Shang Yaohui², and Guo Weilian¹

(1 School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Based on the conception of RTD/HEMT series connection resonant tunneling transistors, an RTD/HEMT monolithic integration material structure was designed and grown by molecular beam epitaxy. RTT was fabricated using wet chemical etching, metal lift-off, mass isolation, and air bridge technologies. The device has a distinct gate-controlled negative differential resistance. The maximal peak-to-valley current ratio (PVCR) of the forward direction connection RTT is about 2.2 and the maximal PVCR of the backward direction connection RTT is about 4.6. This experiment lays a foundation for the optimization of RTT and RTD/HEMT monolithic integration circuit development.

Key words: resonant tunneling transistor; resonant tunneling diode; high electron mobility transistor; PVCR

EEACC: 2550

Article ID: 0253-4177(2007)07-1107-05

* Project supported by the Defense Science and Technology Key Laboratory Foundation (No.9140C0602030603) and the Post-Doctoral Science Fund of China (No.20060400189)

† Corresponding author. Email: tjquht@163.com

Received 24 January 2007, revised manuscript received 12 March 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics