

共振隧穿二极管的设计、研制和特性分析

张 磊^{1,†} 杨瑞霞¹ 武一宾² 商耀辉² 高金环¹

(1 河北工业大学, 天津 300130)

(2 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要: 用分子束外延技术在半绝缘 GaAs 衬底上生长制备了不同结构的 AlAs/GaAs/InGaAs 两垒一阱 RTD 单管. 经过材料生长设计和工艺的改进, 测得室温下器件的最高 PVCR 为 2.4, 峰值电流密度达到 36.8 kA/cm^2 . 进行直流参数测试, 得到 RTD 的 $I-V$ 特性曲线, 对量子阱宽度和帽层厚度对 $I-V$ 特性的影响进行了分析.

关键词: 共振隧穿二极管; $I-V$ 特性曲线; 峰谷电流比; 负微分电阻

PACC: 7360L **EACC:** 2560Z

中图分类号: TN312+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)05-0737-04

1 引言

随着电子技术的进步, 电子器件的尺寸日益减小, 正趋近于其经典极限. 为适应时代发展的需要, 纳米电子器件应运而生. 共振隧穿二极管(RTD)是当前纳米电子学中最有希望的器件, 它是一种基于量子隧穿效应的两端负阻器件. 从江崎和朱兆祥观测到双势垒量子阱结构的共振隧穿效应^[1,2]以来, 对 RTD 的研究已持续 20 多年. 因为它具有速度快、频率高、低压低功耗的特点, 特别是在完成同等功能时, 所需器件数大幅度下降, 有利于减小芯片面积, 使得它在微波振荡和高速数字电路等方面有着广阔的应用前景.

本研究中, 我们采用分子束外延技术在半绝缘 GaAs 衬底上生长 RTD 材料结构, 在实验过程中改进生长工艺, 引入双速生长法和生长中止法以提高材料质量. 用传统工艺制备出 RTD 单管, 进行室温下的 $I-V$ 特性测试, 根据测试结果定性分析 RTD 材料结构中量子阱宽度和帽层厚度等结构参数对器件直流参数的影响, 并对 $I-V$ 曲线中的“弛豫回线”的形成原因进行了总结.

2 实验

RTD 设计的核心问题是器件结构参数与器件特性参数之间的关系. RTD 的直流特性参数包括: (1)峰值电流 I_P ; (2)峰值电压 V_P ; (3)电流峰谷比 PVCR; (4)开启电压 V_T ; (5)负阻阻值 R_N .

RTD 材料生长设计的主要内容包括构成 RTD

所有层的材料成分、厚度和掺杂浓度等. 一般而言, RTD 是由下列材料层组成: (1)E 区电极接触区. 此层的主要作用是形成欧姆接触减少器件的串联电阻; (2)发射区层, 图 1 中的 I 层. 实行重掺杂使 E_F 位于 E_C 之上, 具体掺杂浓度影响 V_T 和 V_P 值, 此外 E 区的掺杂从上到下掺杂浓度逐渐降低, 这样做主要目的是为了防止杂质渗透到两垒一阱区, 影响器件特性; (3)隔离层, 图 1 中的 II 层. 该层的主要作用是隔离掺杂发射区中的杂质在高温下向势垒和势阱区扩散; (4)势垒层, 图 1 中的 IV 层. 势垒层是双垒单势阱系统中的关键部分, 该层应选择禁带宽度大的材料制作, 一般不掺杂, 该层宽度减小有利于提高 J_{RT} ^[3]; (5)势阱层, 图 1 中的 V 层和 VI 层. 势阱层也是关键层之一, 一般不掺杂, 阱区宽度增大, 阱中分立能级降低, 有利于减小 V_P 、提高 PVCR. 然而 L_w 大时, J_{RT} 也变小^[4], 故采用子阱结构, 如图 1 中 VI 层; (6)为进一步提高 RTD 的性能, 我们在 RTD 基本结构的基础上, 在 E 区和 C 区隔离层中各增加一层 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 如图 1 中 III 层. 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 E 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, 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. 此后各层的顺序与上述顺序是完全对称的, 直到 SI GaAs 衬底.

本研究中, RTD 纵向层结构如图 1 所示, 其核心为 AlAs/GaAs/ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 的双势垒单势阱结构.

† 通信作者. Email: zhangleibai@126.com

2006-10-11 收到, 2007-01-17 定稿

Layer	Doping	Thickness			
n ⁺ -GaAs	3×10 ¹⁸ cm ⁻³	Cap layer	I	←	3"
n ⁺ -GaAs	1×10 ¹⁷ cm ⁻³	10nm	I	←	180"
GaAs	NA	5nm	II	←	180"
In _{0.1} Ga _{0.9} As	NA	5nm	III		
GaAs	NA	0.5nm			
AlAs	NA	1.7nm	IV	←	180"
GaAs	NA	0.5nm	V	←	180"
In _{0.1} Ga _{0.9} As	NA	sub-well	VI		
GaAs	NA	0.5nm	V	←	180"
AlAs	NA	1.7nm	IV		
GaAs	NA	0.5nm			
In _{0.1} Ga _{0.9} As	NA	5nm	III	←	180"
GaAs	NA	5nm	II		
n ⁺ -GaAs	1×10 ¹⁷ cm ⁻³	10nm	I	←	3"
n ⁺ -GaAs	3×10 ¹⁸ cm ⁻³	100nm	I		
SI-GaAs sub					

设备快门的开关和
中止时间由计算机控制

图 1 GaAs 基 RTD 的结构

Fig.1 Schematic cross-section RTD layer structure

本研究利用分子束外延(MBE)方法在 50mm SI-GaAs(100)衬底上生长了三种 RTD 结构,分别记为 201, 203 和 209. 其中 201 和 203 的子阱宽度不同,分别是 4nm 和 3.4nm; 201 和 209 的高掺帽层厚度不同,分别为 300nm 和 500nm.

实验设备为法国 RIBER 公司的 MBE-32P 系统. 衬底由德国的 Friberger 公司提供. 在 MBE 系统材料生长的过程中,首先对衬底片进行高温热处理,分别设定好 Ga, As, Al, In, Si 等的各源炉温度,

由此可通过温度控制束流变化达到设计所需的各层生长速率和组分,由于势阱层较薄,而缓冲层和盖帽层较厚,故采用两个 Ga 源炉进行双速生长. 此外,为了提高异质结界面质量,引入中止法,中止时间由图 1 所示. 生长程序由计算机控制,生长过程用 V-15C10 型红外光学高温计监控生长温度,并用反射高能电子衍射(RHEED)在线监控生长状态. 201, 203 和 209 样品的 RTD 材料生长的实验条件如表 1 所示.

表 1 RTD 的生长条件

Table 1 Experiment data of RTD

样品	热处理温度 /°C	生长温度 /°C	As 束流 /Pa	III/V 束流比	AlAs	生长时间/s	
						In _{0.1} Ga _{0.9} As 子阱	E 区 n ⁺ -GaAs 高掺层
201	616	565	1.16×10 ⁻⁵	30	30	64	
203	611	570	1.6×10 ⁻⁴	20	30	55	
209	600	540	1.47×10 ⁻⁴	20	30	64	

实验中制作的 RTD 使用台面结构,如图 2(a) 示. 器件制备用传统的湿法刻蚀和剥离工艺. 先通过光刻掩模版用 NH₄OH:H₂O₂:H₂O(3:1:6) 的腐蚀液刻出集电极台面,接着刻出 RTD 的 E 电极和 C 电极,通过 Ni/AuGe/Au 合金的溅射和剥离制作出两个电极,发射极面积为 5μm×5μm. 最后用 PECVD 法沉积 SiO₂, 在 E 和 C 极刻出引线孔,蒸

发 CrAu, 光刻, 快速合金.

3 参数测试与分析

室温下用 GH4812 半导体晶体管特性图示仪对器件的 I-V 特性进行测试, 201, 203, 209 的测试结果如图 2 和表 2 所示.

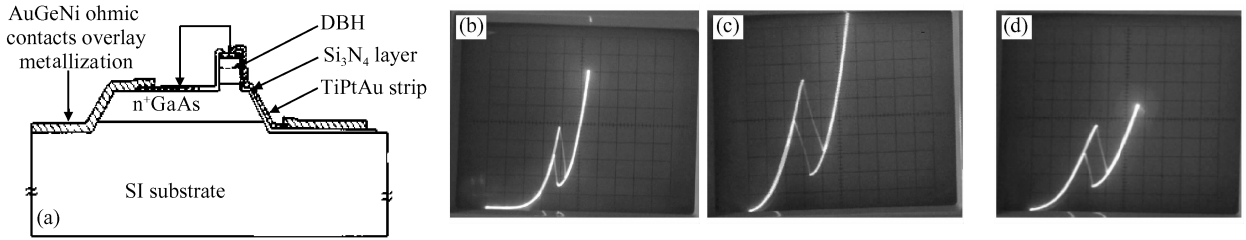


图 2 RTD 的示意图和 $I-V$ 特性 (a)RTD 台面结构示意图;(b)201, $x:0.5\text{mA}/\text{每格}, y:0.25\text{V}/\text{每格}$;(c)203, $x:2\text{mA}/\text{每格}, y:0.5\text{V}/\text{每格}$;(d)209, $x:2\text{mA}/\text{每格}, y:0.5\text{V}/\text{每格}$

Fig.2 RTD mesa structure and $I-V$ characteristics of the RTD

表 2 RTD 直流参数

Table 2 DC characteristic data for the RTD at room temperature

Material	V_p/V	I_p/mA	V_v/V	I_v/mA	R_N/Ω	PVCR	PVVR	$J_p/(\text{kA}/\text{cm}^2)$
201	0.95	2.4	1.1	1	-107.14	2.4	0.86	9.6
203	1.5	14	2	6.4	-65.79	2.2	0.75	56
209	1.7	9.2	2	8	-250	1.15	0.85	36.8

对测试结果的分析:

(1) 量子阱宽度对 V_p 和 J_p 的影响

由 201 和 203 的直流特性测试结果可以看出, 201 的峰值电压 V_p 低于 203 的, 这是因为前者的量子阱(4nm)比后者(3.4nm)宽, 而随着阱宽的增大, 阱中的量子阱能级降低, 造成 RTD 的峰值电压下降. 一般而言, 量子阱的增宽还会引起共振电流 J_{RT} (J_p 的主要成分)的减小, 但由于在本实验的 RTD 结构设计中加入了 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 子阱, 从而避免了这一状况.

(2) Cap 高掺杂层厚度对 J_p, I_v 和 PVCR 的影响

由 201 和 209 的直流特性测试结果可以看出, 201 的谷值电流 I_v 低于 209 的, 这是因为前者的高掺杂 ($3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 盖帽层厚度(300nm)比后者(500nm)薄, 杂质粒子向双势垒单势阱区扩散(其引起的过剩电流是 I_v 的主要成分)越容易, 故 I_v 越大, 使 PVCR 有所减小.

(3) $I-V$ 曲线中“弛豫回线”的解释

图 2(b), (c), (d) 的 $I-V$ 曲线中有明显的回扫线(在有些文献中被称为弛豫回线), 关于这一现象目前还没有统一的解释, 主要有三种观点: (1) 由外围测试电路引起^[5]; (2) 由发射区量子阱中入射和反射电子波间的干涉引起^[6]; (3) 由主量子阱中的能级与发射区势阱中的能级间的耦合作用, 以及主量子阱中的能级与发射区导带底的耦合^[7]引起.

事实上, 在 RTD 的电子隧穿过程中, 有多种物理因素起作用, 其中较重要的因素是入射和反射电子波间的干涉. 这一干涉形成了发射(E)区量子阱, 主量子阱与 E 区量子阱中能级的耦合, 以及主量子阱和导带边缘或发射区三维状态的耦合. 这些因素的相互影响将决定共振隧穿结构 $I-V$ 特性曲线的

形式.

发射区量子阱和主量子阱间能级的耦合导致了 $I-V$ 曲线中的“平台效应”, 耦合的强度决定 $I-V$ 曲线平台区域的平均斜率. 发射区量子阱和主量子阱能级间的耦合, 主量子阱中能级与导带边缘或发射区三维状态间的耦合, 发射区电子的积累和分布都可引起 $I-V$ 曲线的“磁滞现象”.

4 结论

引入双速生长法和生长中止法优化生长工艺, 用 MBE 技术生长了 GaAs 衬底的 RTD 材料结构, 并在 RTD 典型双势垒单势阱结构中加入子阱和垒前阱结构, 以提高器件性能. 室温下 $I-V$ 特性的测试结果表明了良好的负阻和双稳特性, 最大负阻的绝对值达 107.14Ω , 最高峰谷电流比为 2.4, 峰值电流密度达到 $36.8\text{kA}/\text{cm}^2$.

参考文献

[1] Tsu R, Esaki L. Tunneling in a finite superlattice. Appl Phys Lett, 1973, 22: 562
 [2] Chang L L, Tsu R, Esaki L. Resonant tunneling in semiconductor double barriers “superlattice”. Appl Phys Lett, 1974, 24(12): 539
 [3] Liu Qingmin. Unified AC model for the resonant tunneling diode. IEEE Trans Electron Devices, 2004, 51(5): 653
 [4] Lippens D, Barbier E, Mounaix P. Fabrication of high-performance $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ resonant tunneling diodes using a microwave-compatible technology. IEEE Electron Device Lett, 1991, 12(3): 114
 [5] Miyamoto Y, Tobita H. Barrier thickness dependence of peak current density in $\text{GaInAs}/\text{AlAs}/\text{InP}$ resonant tunneling diode. Solid-State Electron, 1999, 43: 1395

- [6] Zhao Peiji, Cui Hongliang. Equivalent circuit parameters of resonant tunneling diodes extracted from self-consistent Wigner-Poisson simulation. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(4):614
- [7] Zhao Peiji, Cui H L. Equivalent circuit parameters of resonant tunneling diodes extracted from self-consistent Wigner-Poisson simulation. *International Journal of Modern Physics B*, 2000, 14(4):411

Design, Fabrication, and Analysis of a Resonant Tunneling Diode

Zhang Lei^{1,†}, Yang Ruixia¹, Wu Yibin², Shang Yaohui², and Gao Jinhuan¹

(1 *HeiBei University of Technology, Tianjin 300130, China*)

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

Abstract: AlAs/GaAs/InGaAs double barrier-single well structures are grown on semi-insulating GaAs substrates by molecular beam epitaxy. By improving on material growth design and process design, the maximum PVCR of the RTD has reached 2.4, and the density of the peak current has reached 36.8 kA/cm^2 . The parameters and I - V characteristics of the RTD have been measured, and the effects of quantum well width and thickness of the cap layer on the RTD I - V characteristics are analyzed.

Key words: resonant tunneling diode; I - V characteristics; peak to valley current ratio; negative differential resistance

PACC: 7360L **EACC:** 2560Z

Article ID: 0253-4177(2007)05-0737-04

† Corresponding author. Email: zhangleibai@126.com

Received 11 October 2006, revised manuscript received 17 January 2007