

一种高性能 InP 基谐振隧穿二极管的研制*

齐海涛^{1,2,†} 冯 震² 李亚丽² 张雄文² 商耀辉² 郭维廉^{1,2}

(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: 设计并用分子束外延技术生长了 InP 基 InGaAs/AlAs 体系 RTD 材料, 采用传统湿法腐蚀、光学接触式光刻、金属剥离、台面隔离和空气桥互连工艺, 研制出了具有优良负阻特性和较高阻性截止频率的 InP 基 RTD 单管. 器件正向 PVCR 为 17.5, 反向 PVCR 为 28, 峰值电流密度为 $56\text{kA}/\text{cm}^2$, 采用 RNC 电路模型进行数据拟合后得到阻性截止频率为 82.8GHz. 实验为今后更高性能 RTD 单管的研制, 以及 RTD 与其他高速高频三端器件单片集成电路的设计与研制奠定了基础.

关键词: 谐振隧穿二极管; InP; 负阻; 阻性截止频率
EEACC: 2550

中图分类号: TN312 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)12-1945-04

1 前言

谐振隧穿二极管(RTD)是利用量子谐振隧穿效应而构成的一种新型半导体纳电子器件. 构成 RTD 的核心结构是双势垒单势阱系统(DBS), 该系统由宽带隙化合物材料(如 AlAs 或 AlGaAs)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. 伴随谐振隧穿过程的出现和终止, RTD 的 $I-V$ 特性形成明显的负微分电阻区(即 RTD 的负阻特性). 谐振隧穿器件具有超高频、超高速、多功能、可简化电路结构和减少电路中器件数量的显著特点. RTD 的 f_{\max} 的理论预期值为 2.5THz, 开关时间已达 1.5ps ^[1,2]. 谐振隧穿器件是唯一进入到实际应用中的纳电子器件, 在微波振荡和高速数字电路等方面有着广阔的应用前景.

目前, 大多数 RTD 采用 GaAs 或 InP 衬底, 势垒层采用 AlGaAs 或 AlAs, 势阱层采用不掺杂的 GaAs, InGaAs 或 InAs. 除此之外, 还有采用 SiO_2/Si , AlN/GaN , $\text{GaSb}/\text{AlSb}/\text{InAs}$ 和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 等材料结构制作 RTD 的报道^[3,4]. 我们所见到过的报道, 在常温下, RTD 的电流峰谷比(PVCR)以 GaAs 为衬底可达到 6, 以 InP 为衬底可达到 30. 据了解, 国内多家单位正在开展 RTD 的研制工作, 多以 GaAs 衬底为主, 器件的 PVCR 最高达到 7.6, 振荡

频率最高为 54GHz^[5]. InP 基 RTD 也有少量报道, 发射极面积为 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 的 RTD, 其 PVCR 仅为 7.57, 阻性截止频率为 18.75GHz^[6].

本文中, 我们设计并用分子束外延(MBE)技术生长了 InP 基 InGaAs/AlAs 体系 RTD 材料结构, 研制出了较高 PVCR、峰值电流密度和阻性截止频率的 RTD 单管, 并对其特性进行了分析.

2 材料结构设计与分子束外延

用半绝缘 GaAs 作为衬底时, 其外延层中 InGaAs 的 In 组分一般不能超过 0.22, 否则引起晶格失配. 而用半绝缘 InP 作为衬底时, 其中 InGaAs 的 In 组分可以达到 0.53, 或更高. 在 InGaAs 材料中 In 的组分越大, 其载流子迁移率越高, RTD 的频率就越高, 开关速度就越快. 因此, 本次实验采用了 InP 衬底, 其目的在于提高器件的高频特性和电流峰谷比.

表 1 是设计的 RTD 材料结构, 势垒采用不掺杂的 AlAs, 势阱、上下隔离层、发射层、集电层、帽层和缓冲层均采用 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$. 发射层和集电层掺杂浓度为 $2 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, 帽层和缓冲层掺杂浓度为 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, 基本上不需合金就可形成欧姆接触.

材料的生长采用分子束外延技术. MBE 技术的最大优势在于对超薄层异质结外延生长的精确控制, 在异质界面的陡峭度和完整性方面具有

* 国防科技重点实验室基金(批准号:9140C060203060C0603)和中国博士后科学基金(批准号:20060400189)资助项目

† 通信作者. Email: tjuqht@163.com

2007-03-21 收到, 2007-07-06 定稿

表 1 RTD 的材料结构
Table 1 Material structure of RTD

材料	掺杂浓度 /cm ⁻³	厚度 /nm
n-InGaAs	5×10^{18}	100
n-InGaAs	2×10^{17}	10
i-InGaAs	---	1.5
i-AlAs	---	1.7
i-InGaAs	---	4
i-AlAs	---	1.7
i-InGaAs	---	1.5
n-InGaAs	2×10^{17}	10
n-InGaAs	5×10^{18}	500
SI InP substrate		

绝对优势.可以说,MBE 技术是实现 RTD 材料结构的最佳方法.生长采用的 MBE 设备是法国的 Ri-ber 32,衬底是“epi-ready”掺 Fe 半绝缘 InP(100)衬底,生长温度为 500℃.由于 RTD 的特性强烈依赖于双势垒单势阱系统(DBS)中各层的厚度和组分.在 RTD 材料的 MBE 生长中,为了实现多层纳米级薄膜的厚度和组分的精细控制,采用了双生长速率法和瞬态规避、束流拦截等一系列新技术.首先,生长室加配两个双温区 Ga 源炉,1 号 Ga 源对应的生长速率为 1μm/h,2 号 Ga 源对应的生长速率为 180nm/h.生长缓冲层和帽层时使用 1 号 Ga 源,生长超薄层精细结构时使用 2 号 Ga 源.其次,我们配合使用快门控制和源炉温度补偿技术,使各源炉的分子束在束流拦截过程中逐渐达到稳态,束流释放后再进行材料生长.这样就规避了瞬态,完全处于稳态生长,获得了良好的晶体质量和平整异质结界面,薄层的厚度偏差也进一步减小,同时纳米薄层的组分也实现了精确控制.

3 器件结构与工艺设计

在器件制作过程中,采用了传统湿法腐蚀、光学接触式光刻、金属剥离、台面隔离和空气桥互连工艺.具体器件工艺流程如下:首先,光刻发射极窗口,电子束蒸发 Ni/AuGeNi/Au,金属剥离.接着光刻小台面,以光刻胶作掩蔽膜湿法刻蚀小台面,腐蚀液选用 H₃PO₄:H₂O₂:H₂O 溶液,深度由台阶仪监控.然后光刻大台面,以光刻胶作掩蔽膜湿法刻蚀大台面,直至半绝缘衬底.接着光刻集电极、压焊点和外引线窗口,电子束蒸发 Ni/AuGeNi/Au,金属剥离,快速合金.最后,淀积氮化硅做隔离钝化,刻出发射极引线孔,光刻桥墩,蒸金,光刻桥面、电镀加厚,去胶,形成空气桥互连线.发射极设计为 5μm×5μm 方块形状,集电极设计为包围发射极的方环状,环宽 3μm,与发射极间距 3μm.

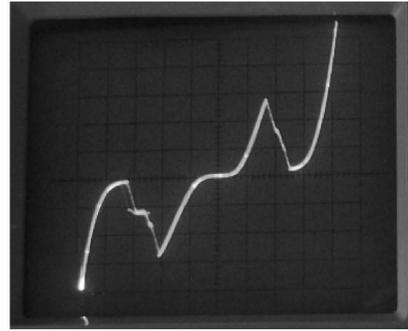


图 1 RTD 的正反向直流特性 x:0.5V/div y:5mA/div
Fig. 1 DC characteristic of RTD

4 实验结果与分析

RTD 的特性参数包括:峰值电流 I_p 、峰值电压 V_p 、谷值电流 I_v 、谷值电压 V_v 、电流峰谷比 PVCR、开启电压 V_T 、负阻阻值 R_N 、阻性截止频率 f_R 、最大振荡频率 f_{max} 、开关时间 τ_r 等. RTD 特性参数与性能之间的关系为:增大 I_p ,可增大器件驱动能力,提高开关速度和频率;提高 PVCR,有利于增大噪声容限,提高抗干扰能力,加大逻辑摆幅;降低 V_T ,有利于降低功耗;减小 R_N 的绝对值,有利于提高振荡频率和减小 τ_r ;降低 V_p ,有利于降低工作电压.根据对高频、高速和逻辑功能各方面的要求,理想的直流参数选择的原则是:尽可能大的 J_p 或 I_p 值,较小的 V_p 或 V_T 值,较小的 R_N 和 I_v 值,较大或适当的 PVCR;而理想的交流和瞬态参数应该是尽可能大的 f_R 或 f_{max} 和尽量小的 τ_r .

图 1 给出了用半导体特性图示仪测试的 RTD 的正反向直流特性.发射极接地,集电极接正偏压,为正向;集电极接地,发射极接正偏压,为反向.表 2 给出了各直流参数的具体值.由表 2 可以看出,无论正接还是反接,器件均在三个方面表现出出色的负阻特性.首先,正向 PVCR 为 17.5,反向 PVCR 为 28,明显高于国内已报道的水平(均在 10 以下);其次,器件具有高的峰值电流密度,正反向均为 56kA/cm²,而国内报道的其他 5μm×5μm 发射极面积 RTD(GaAs 基或 InP 基)的峰值电流密度基本在 20kA/cm² 以下;再次,器件的负阻阻值较低,正向为 38Ω,反向为 41Ω.由于 AlAs 与 In_{0.53}Ga_{0.47}As 之间存在着较大的 ΔE_c (导带不连续),这相当于

表 2 RTD 的正反向直流参数
Table 2 DC parameters of RTD

接法	I_p /mA	J_p /(kA/cm ²)	V_p /V	I_v /mA	J_v /(kA/cm ²)	V_v /V	V_T /V	R_N /Ω	PVCR
正向	14	56	0.8	0.8	3.2	1.3	0.3	38	17.5
反向	14	56	0.95	0.5	2.0	1.5	0.35	41	28

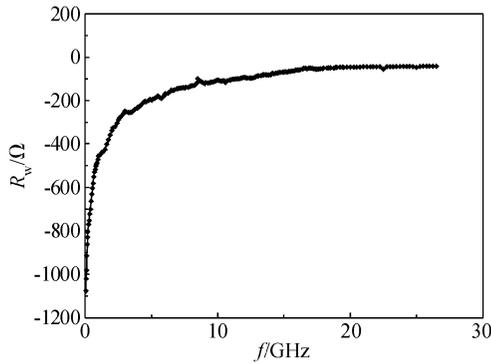


图 2 阻抗实部与频率的对应关系

Fig.2 Real impedance versus frequency

很大的势垒高度,故有效地抑制了电流中的非谐振隧穿电流成分(非弹性隧穿电流和热离子电流),降低了谷值电流,从而提高 PVCR. 由于采用了较薄的 AlAs 势垒(1.7nm),有利于提高谐振隧穿电流,所以 RTD 的峰值电流密度很高.

当然,器件还存在两点不足,一是开启电压较高,二是正反向特性非完全对称,PVCR, V_p 和 V_v 偏离较大.前者可以通过加大帽层和缓冲层的掺杂浓度或进行轻微的快速合金来消减.后者产生的原因可归结为:(1)材料结构的不完全对称,集电极位置受腐蚀深度控制;(2)在 MBE 进行过程中,上端和下端各层材料在高温环境下停留的时间不同;(3)发射极和集电极设计的尺寸和形状不相同;(4)由侧向腐蚀产生的 RTD 柱体直径不同而产生的扩展电阻效应等.应该说,大部分上下对称结构 RTD 均存在正反向特性非完全对称的情况.

利用网络分析测试仪,对 RTD 进行了高频小信号 S_{11} 参数测试,工作点选择在正向负阻区(集电极电压为 1.05V),然后由计算机将 S_{11} 参数转换成输入阻抗 Z_{in} ,阻抗实部与频率的对应关系见图 2 所示.阻抗实部为零时所对应的频率应为 RTD 的阻性截止频率 f_R ,因为阻抗实部为零意味着 RTD 器件负阻特性的消失^[7].但从图上看,在最大测试频率 26.5GHz 时阻抗实部依然未达到零,这说明器件的阻性截止频率高于 26.5GHz.为了获得器件的阻性截止频率,我们又采用了等效电路参量拟合法进行了估算,所采用的是 RNC 等效电路模型^[8],见图 3 所示.图中 L_s 和 R_s 分别为来自引线和电极接触的串联电感和串联电阻, R_N 和 C 分别为双势垒系统的负阻阻值和本征电容.由等效电路可以得到输入阻抗的计算公式如下:

$$Z_{in} = \left[R_s + \frac{-R_N}{1 + (\omega R_N C)^2} \right] + j \left[\omega L_s + \frac{-\omega C R_N^2}{1 + (C R_N)^2} \right]$$

其中 ω 为角频率, $f_R = 2\pi\omega$.

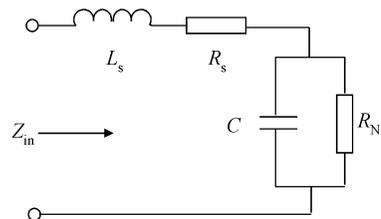


图 3 RTD 的 RNC 等效电路模型

Fig.3 RNC equivalent circuit of RTD

通过上述公式对阻抗实部和虚部进行拟合,提取出电路参数为: $R_s = 11\Omega$, $R_N = 39\Omega$, $C = 7.85 \times 10^{-14}F$. 根据公式 $f_R = (1/(2\pi R_N C)) (R_N/R_s - 1)^{1/2}$,最后计算出阻性截止频率为 82.8GHz.

可以看出,此次研制的 RTD 较以前国内报道的 GaAs 基和 InP 基 RTD 具有更高的阻性截止频率.这既有材料方面的原因,又有工艺方面的原因. InP 衬底可外延高 In 组分 InGaAs,电子迁移率提高.空气桥结构利用空气作为两层互连金属间的介质,减小了寄生电容.需说明的是,对于不同的 RTD 等效电路模型会得到不同的计算 f_R 的公式, f_R 会随等效电路模型的选择而改变.另外, f_R 还随负阻阻值而改变,不同工作点阻值不同,对应不同的工作点会有不同 f_R ,在 RTD 负阻区中部某一电压处负阻阻值最小,对应最大的阻性截止频率.

5 结论

设计并用分子束外延技术生长了 InP 基 In-GaAs/AlAs 体系 RTD 材料结构,采用传统湿法腐蚀、光学接触式光刻、金属剥离、台面隔离和空气桥互连工艺,研制出了具有优良负阻特性和较高阻性截止频率的 InP 基 RTD 单管.器件正向 PVCR 为 17.5,反向 PVCR 为 28.峰值电流密度为 56kA/cm²,采用 RNC 电路模型进行数据拟合后得到阻性截止频率为 82.8GHz.实验为今后更高性能 RTD 单管的研制,以及 RTD 与其他高速高频三端器件单片集成电路的设计与研制奠定了基础.

参考文献

- [1] Brow E R, Soderstrom J R, Parker C D, et al. Oscillations up to 712GHz InAs/AlSb resonant tunneling diode. Appl Phys Lett, 1991, 58(20): 2291
- [2] Shimizu N, Nagatsuma T, Waho T, et al. In_{0.53}Ga_{0.47}As/AlAs resonant tunneling diodes with switching time of 1.5ps. Electron Lett, 1995, 31(19): 1695
- [3] Kikuchi A, Bannai R, Kishino K, et al. AlN/GaN double-barrier resonant tunneling diodes grown by RF-plasma assisted molecular beam epitaxy. Appl Phys Lett, 2002, 81(9): 1729

- [4] Lunz U, Keim M, Reuscher G, et al. Resonant electron tunneling in ZnSe/BeTe double-barrier single quantum well heterostructures. *J Appl Phys*, 1996, 80(11): 6329
- [5] Wang Zhenkun, Liang Huilai, Guo Weilian, et al. Design and fabrication of resonant tunneling diode. *Micronanoelectronic Technology*, 2002, 39(7): 13 (in Chinese) [王振坤, 梁惠来, 郭维廉, 等. 共振隧穿二极管的设计和研制. *微纳电子技术*, 2002, 39(7): 13]
- [6] Ma Long, Huang Yinglong, Zhang Yang, et al. Fabrication of an AlAs/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InAs resonant tunneling diode on InP substrate for high-speed circuit applications. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(6): 959
- [7] Guo Weilian. AC small signal equivalent circuit model on RTD. *Micronanoelectronic Technology*, 2006, 43(12): 558 (in Chinese) [郭维廉. RTD 交流小信号等效电路模型. *微纳电子技术*, 2006, 43(12): 558]
- [8] Guo Weilian. Device parameters and measurement method of RTD. *Micronanoelectronic Technology*, 2006, 43(12): 564 (in Chinese) [郭维廉. RTD 器件参数和测量方法. *微纳电子技术*, 2006, 43(12): 564]

Fabrication of a High-Performance RTD on InP Substrate*

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

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

(2 The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: InGaAs/AlAs RTD material structure on InP substrate is designed and grown by molecular beam epitaxy. A device with good negative differential resistance characteristics and a higher resistive cutoff frequency is fabricated using mesa isolation, metal lift-off, wet chemical etch, and air bridge technologies. The forward bias peak-to-valley current ratio (PVCR) and reverse bias PVCR are about 17.5 and 28, respectively. The peak current density is 56kA/cm², and the data fitting resistive cutoff frequency using an RNC circuit model is 82.8GHz. The experiment lays a foundation for the design and fabrication of high-performance RTD and monolithic integration circuits of RTD and other high speed and high frequency three terminal devices.

Key words: resonant tunneling diode; InP; negative differential resistance; resistive cutoff frequency

EEACC: 2550

Article ID: 0253-4177(2007)12-1945-04

* Project supported by the Foundation of Key Laboratories for National Defense Science and Technology (No.9140C060203060C0603) and the Chinese Post-Doctoral Science Fund (No.20060400189)

† Corresponding author. Email: tjuqht@163.com

Received 21 March 2007, revised manuscript received 6 July 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics