

电阻栅结构负阻异质结双极晶体管*

郭维廉^{1,2} 齐海涛¹ 张世林¹ 钟 鸣¹ 梁惠来¹
毛陆虹¹ 宋瑞良¹ 胡海洋²

(1 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

(2 天津工业大学信息与通信学院, 天津 300160)

摘要: 设计并研制成功了具有电阻栅结构的 $n\text{-InGaP/p-GaAs/n-GaAs}$ 负阻异质结双极晶体管. 研制出的器件 $I\text{-}V$ 特性优于相关文献的报导; 得到了恒定电压和恒定电流两种模式的负阻特性曲线; 对两种模式负阻特性产生的物理机制进行了解释; 最后对此器件的应用前景进行了预测.

关键词: 异质结双极晶体管; 负阻器件; 电阻栅

EEACC: 2560J

中图分类号: TN313.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)06-1218-06

1 引言

用化合物半导体材料通过 MBE 或 MOCVD 技术研制的异质结双极晶体管 (HBT) 是目前高频高速器件的一个重要组成部分, 具有很大的发展潜力. 很早就发现了 HBT 因功率耗散温度升高产生的负阻效应. 然而这种温度变化产生的负阻效应是难以控制而加以利用的, 后来在 HBT 中也发现了非热效应的负阻特性^[1], 利用这些负阻特性可研制出特性可控的负阻型 HBT^[2~4]. 负阻型 HBT 既有 HBT 高频、高速的优点, 又具有负阻器件双稳、自锁、可大量节省器件数目的优点. 从该角度看, 其功能类似于共振隧穿晶体管 (RTT).

本文选用负阻异质结双极晶体管 (NDRHBT) 电阻栅结构^[3], 在 $n\text{-InGaP/p-GaAs/n-GaAs}$ 分子束外延 (MBE) 材料基片上, 研制出 NDRHBT. 经过测试, 其 $I\text{-}V$ 特性优于文献^[3]的报导; 而且除了该文献报导的恒定电压模式负阻特性外, 还发现了恒定电流模式的负阻特性; 对两种模式的负阻产生机制进行了解释; 最后还预测了此种器件在高速数字电路中的应用前景.

2 电阻栅负阻异质结双极晶体管 (RGNDRHBT) 结构及其工作原理

如图 1 所示, 通常在常规 HBT 器件制造工艺中形成发射极接触电极 (相当图中的阴极 K) 后, 以此金属电极为保护层将台面腐蚀到 p^+ 型的 GaAs

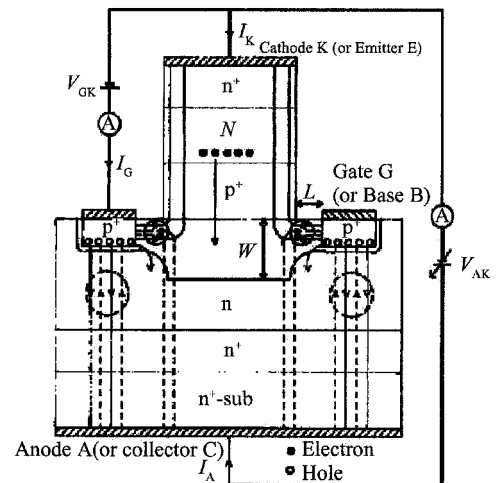


图 1 RGNDRHBT 结构和原理图

Fig. 1 Device structure and operating principle of RGNDRHBT

* 国家重点基础研究发展规划资助项目 (批准号: 2002CB11905)

2004-09-04 收到, 2004-10-27 定稿

层停止,在 p^+ GaAs 层上沉积 ZnAu 合金制造基极欧姆接触电极. 如果现在将台面进行过腐蚀,即腐蚀到了 p^+ GaAs 下面的 n^- GaAs 集电区内,经过合金工艺便在 ZnAu 下面形成 p^+ GaAs 层. 如图所示,此极我们可称之为栅极(G)或者称之为基极(B),但此基极与常规 HBT 中的基极已完全不同. 前者的基极和器件中间部分的 p^+ GaAs 层直接相连,而现在栅极与器件中间 p^+ GaAs 层之间形成了一 ZnAu/ p^+ GaAs/ n^- GaAs/ p^+ GaAs 结构. 对此结构本文采用文献[3]的势垒注入渡越时间(BARITT)结构模型^[5]来处理. 该模型认为当 G 极端相对于内部的 p^+ GaAs 层加以正向电压(也为正电压)时,G 极和 p^+ GaAs 层的下面都会发生施主电离后带正电的空间电荷层. 随着 G 极正向电压的增大, p^+ GaAs 层下的空间电荷层扩展(因处于反偏)最后发生穿通(reach through),G 极与 p^+ GaAs 层间的有效距离 W 愈大,则穿通对应的电压 V_{RT} 也愈大,穿通后从 G 极向 p^+ GaAs 层注入越过势垒的热空穴电流,其电流密度可表示为:

$$J_P = A_P^* T^2 e^{-q(V_{BP} + V_{bi})/kT} (e^{qV_1/kT} - 1) \quad (1)$$

式中 A_P^* 为空穴的有效理查逊常数; T 为绝对温度; V_{BP} 为空穴势垒高度; V_{bi} 为内建电势; V_1 为所加的正向电压; q 和 k 为电子电量和玻尔兹曼常数. 从(1)式可知:从 G 极注入到 p^+ GaAs 本征基区层的空穴电流(也即 HBT 的基极电流)随 G 极正向电压 V_{GA} 或 V_{BC} (对应(1)式中的 V_1)的增长, J_P 作指数性的增长.

现在利用上述模型结合图 1 中所示的结构,说明 RGNDRHBT 产生负阻特性的原理. 如图, K(即 E)极接地, G(B)极接一定的正电压, A(C)极从零电压起逐渐增大其正电压的过程. 如果起始的 V_{GK} 足够大,当 $V_{AK} = 0$ 时,使 $V_{GA} = V_{GK}$ 大于 V_{RT} (W 愈小则 V_{RT} 愈小),这时便有空穴电流从 G 极向 HBT 的基极 p^+ GaAs 层注入,形成 npn 型 HBT 的基极电流,于是 HBT 导通;随着 A 极正电压不断增大,集电极(A)对从 K 极注入的电子收集能力相应增大, HBT 的集电极电流 I_C (即 I_A) 也随之增大,此即 HBT 的 $I-V$ 特性的正阻段;当 V_{AK} (或 V_{CE}) 进一步增大时,由于 V_{GK} (V_{BE}) 固定在一定的正电压,则 G 极对 A 极的电压 $V_{GA} = V_{GK} - V_{AK}$ 便会减少. 按照(1)式,从 G 极向 p^+ GaAs 注入的空穴电流减小,也即 HBT 的基极电流减小,最后导致 HBT 的集电极电流 I_C (或 I_A) 减小,而使 HBT 的输出特性出现

负阻区.

3 RGNDRHBT 的设计与研制

3.1 材料结构设计

RGNDRHBT MBE 材料结构与常规 HBT 的材料结构基本相同,如图 2 所示. 其中采用 n^+ In_{0.5}Ga_{0.5}As 的 cap 层是为了得到较低的发射极接触电阻. 采用 n^- InGaP 渐变层作发射极是为了避免 AlGaAs 引入 DX 中心等带来的缺点和较大的 InGaP/GaAs 之间腐蚀速率差异,选用渐变层有利于提高 h_{FE} 值. 材料结构的整体设计与常规 HBT 相近是为了将常规 HBT 和 RGNDRHBT 制作在同一芯片上,为进一步研制含负阻的 HBT 高速数字电路提供条件. 共设计了光刻版 7 块,由于是实验性器件研制,最大器件发射极面积为 $150\mu m \times 150\mu m$.

n^+	Si-In _{0.5} Ga _{0.5} As	$5 \times 10^{18} cm^{-3}$	100nm
Graded	Si-In _x Ga _{1-x} As($x:0.5-0$)	$5 \times 10^{18} cm^{-3}$	50nm
n^+	Si-GaAs	$5 \times 10^{17} cm^{-3}$	100nm
n	Si-InGaP	$1 \times 10^{17} cm^{-3}$	80nm
undoped	GaAs		5nm
p^+	Be-GaAs	$5 \times 10^{18} cm^{-3}$	60nm
undoped	GaAs		5nm
n	Si-GaAs	$5 \times 10^{16} cm^{-3}$	500nm
n^+	Si-GaAs	$5 \times 10^{18} cm^{-3}$	500nm
SI GaAs substrate(100)			

图 2 RGNDRHBT MBE 材料结构

Fig. 2 MBE material structure of RGNDRHBT

3.2 器件制造工艺

RGNDRHBT 器件制造工艺基本上和常规 HBT 相同,其中发射极、基极、集电极接触和金属引线都用剥离工艺制作,小台面、大台面和引线孔都用湿法腐蚀. 惟一不同处就是腐蚀基区台面时,实行过腐蚀,将 p^+ GaAs 层腐蚀掉,终止在 n^- GaAs 集电区层内,在此 n^- GaAs 层上沉积 ZnAu 合金. 为了降低 BARITT 的穿通电压 V_{RT} ,减小从 ZnAu 电极到器件中部 p^+ GaAs 层间的有效距离 W ,应在纵向上使 n^- GaAs 表面紧靠 p^+ GaAs 层(即刚刚进入 n^- GaAs 层),在横向上应尽量减小图 1 中的间距 L .

4 RGNDRHBT 的 I-V 特性和参数测量

4.1 I-V 负阻特性

4.1.1 恒定电压模式负阻特性

图 3(a), (b) 分别给出本文恒压模式“N”型和“ ”型负阻特性, (c) 为文献 [3] 中的负阻特性. 从图可

见, 本文的 I-V 负阻特性优于文献 [3] 的负阻特性. 主要表现在: (1) 文献 [3] 中的负阻特性曲线, 不同的栅极电压沿 $V_{AK} (V_{CE})$ 存在较大的分散现象, 这不利于今后在电路中的应用. 本文的负阻曲线不存在此问题. (2) 本文的负阻曲线正阻段对不同的 V_{BE} 都共线, 而且每条曲线的峰值点都靠近此正阻段曲线. (3) 峰值点的 I-V 特性呈“尖”峰状, 进入负阻区后, 曲线很快变为凹状.

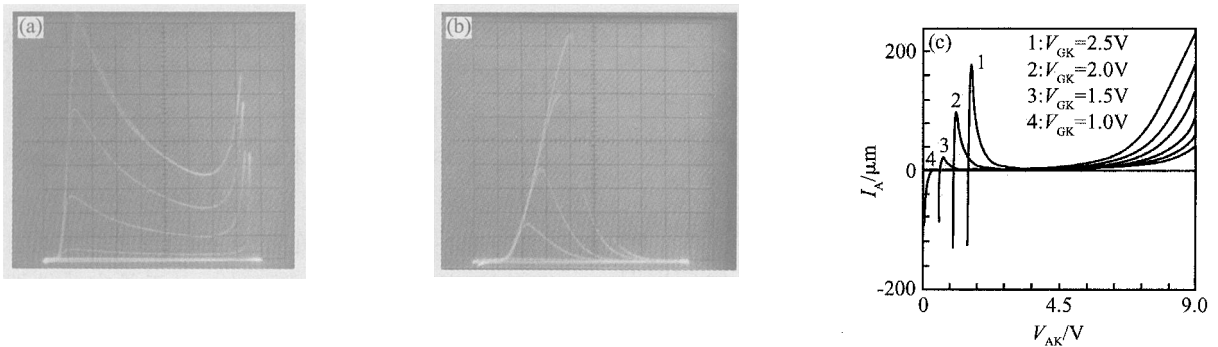


图 3 RGNDRHBT 恒压模式负阻特性 (a) “N”型: X 轴 1V/div, Y 轴 0.5mA/div, 阶梯 0.16V/step; (b) “ ”型: X 轴 0.5V/div, Y 轴 0.5mA/div, 阶梯 0.32V/step; (c) 文献 [3] “ ”型负阻: X 轴 1V/div, Y 轴 40μA/div, 阶梯 0.5V/step
Fig. 3 NDR characteristics on RGNDRHBT for constant voltage V_{BE} (a) “N” type: X 1V/div, Y 0.5mA/div, 0.16V/step; (b) “ ” type: X 0.5V/div, Y 0.5mA/div, 0.32V/step; (c) “ ” type from Ref. [3]: X 1V/div, Y 40μA/div, 0.5V/step

4.1.2 恒定电流模式负阻特性

前面的恒定电压模式负阻特性, 其中每条曲线是以恒定 V_{BE} 条件测量的, 而现在恒定电流模式负阻特性是在恒定 I_B 条件下测量的. 文献 [3] 只给出了恒定电压模式负阻, 没有给出恒定电流模式负阻特性. 图 4 是本文测得的 RGNDRHBT 电流模式负阻特性. 与恒压模式相比, 其特点是: (1) 能产生负阻的 I_B 存在一阈值, 当 I_B 小于此阈值 I_{BCr} 时不发生负阻效应, 图中的 $I_{BCr} = 20\mu A$; (2) 负阻区电压范围较

小, 且只存在于峰值电压 V_P 右侧很窄的电压区域内; (3) 不同 I_B 的负阻曲线谷值点很近, 几乎相交于一点. 负阻区曲线变宽是发生振荡所致.

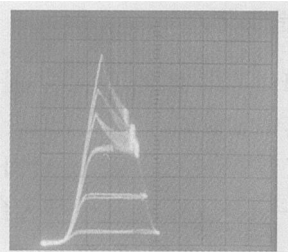


图 4 RGNDRHBT 电流模式负阻特性 X 轴: 0.5V/div, Y 轴: 1mA/div, 阶梯: 10μA/step
Fig. 4 NDR characteristics of RGNDRHBT for constant current mode X: 0.5V/div, Y: 1mA/div, 10μA/step

4.2 RGNDRHBT 参数测量

4.2.1 恒压模式负阻参数

从图 3(a) 和 (b) 测得的负阻参数随 V_{BE} 的变化如图 5(a), (b) 所示. 从图 5(a) 可见 I_P 随 V_{BE} 变化显著, 而 V_P 和 V_v 随 V_{BE} 变化缓慢. 反映 V_{BE} 对峰值电流调制能力的参量峰电流跨导 I_P / V_{BE} 在 7 ~ 17.8ms 范围内, PVCR 在 2 ~ 3.3 范围内变化, 产生负阻的阈值电压约为 0.16V; 从图 5(b) 可见 V_P, V_v 基本上随 V_{BE} 呈线性增长的变化. I_P 随 V_{BE} 变化显著, I_P / V_{BE} 在 3.6 ~ 5ms 范围内变化. 产生负阻的阈值电压 $V_{BEcr} = 0.32V$. I_v 一般小于 0.3μA, PVCR 一般大于 6000.

4.2.2 恒流模式负阻参数

从图 4 可以得到恒定电流模式的负阻参数随 I_B 变化的关系, 列于表 1 中. 如果对负阻特性, 以 I_P 代替 I_C , 则估算出的 $h_{FE} (= I_C / I_B)$ 为 166. I_P / I_B 可反映控制参数 I_B 对 I_P 的调控能力. 其值与 HBT

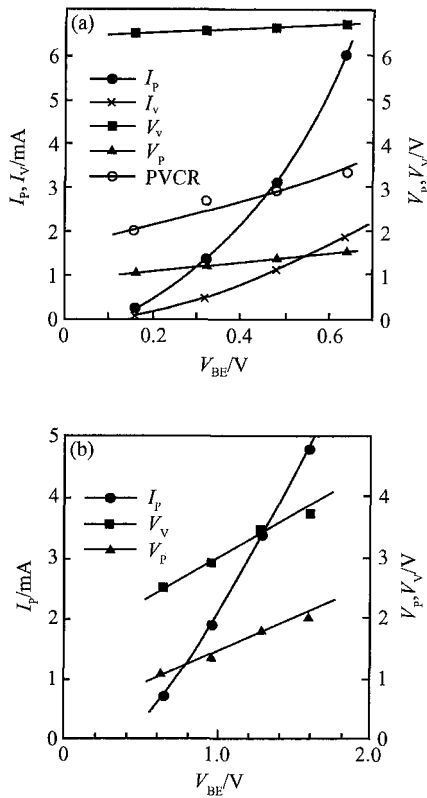


图 5 RGNDRHBT 负阻参数随 V_{BE} 的变化 (a)“N”型; (b) “型”

Fig. 5 RGNDRHBT NDR parameters as a function of V_{BE} (a)“N” type; (b) “型”

的 h_{FE} 相对应. 经测量无负阻时为 200, 大于负阻时的 150, 说明 I_P 实际上小于相同 I_B 下的饱和集电极电流, 这反映峰值电流是在集电极电流还未增大到最大时, 电流减小的趋势已超过电流增大的趋势, 使集电极电流下降造成的. 当 $I_B = 20\mu A$ 时无负阻现象, 故阈值 $I_B (I_{BCr})$ 为 $20\mu A$. 表 1 还说明恒流模式的 PVCR 小于恒压模式的 PVCR.

表 1 RGNDRHBT 恒流模式负阻参数与 I_B 的关系

Table 1 Constant current mode NDR parameters of RGNDRHBT as a function of I_B

$I_B/\mu A$	I_P/mA	I_V/mA	V_P/V	V_V/V	PVCR	$I_P/I_B (h_{FE})$
10	无	无	无	无	无	150
20	无	无	无	无	无	200
30	5.7	4.5	1.2	~2	1.27	150
40	6.8	4.9	1.25	~2	1.39	150
50	8.3	5.4	1.32	~2	1.54	150

5 对负阻特性和参数的讨论

5.1 对本文 F-V 负阻特性优于文献[3]的解释

本文所研制的 RGNDRHBT F-V 负阻特性优于文献[3]的负阻特性表现在以下三点: (1) 文献[3]的负阻特性随 V_{CE} (或 V_{AK}) 有分散现象; (2) 负阻阈值电压 V_{BECr} 较高, 约为 1.2V. 而本文的 V_{BECr} 为 0.32V; (3) 本文的峰值电流 (I_P) 跨导为 3.6~5ms, 而文献[3]的峰电流跨导为 0.156ms, 即 V_{BE} 对 I_P 的调控能力较弱.

根据文献[3], 其器件是用 AlGaAs 作为 HBT 发射极的, 掺 Si 的 AlGaAs 中含有大量的 DX 中心, 此外用 InGaP 代替 AlGaAs 还具有表面复合速度低, E_v 大等优点, 又加上文献[3]设计的基区厚度较大 (200nm). 故该器件的 $h_{FE} (=4)$ 较小, 性能较差. 负阻特性曲线沿 V_{CE} 轴的分散现象就是 h_{FE} 较小的表现. 如前所述当 G 极固定于一定正电压, 而 V_{AK} 从零开始时, 初始阶段 G 极正电压大于 A (即 C) 极电压, 则有空穴从 G (p^+) 极向 C (n^-) 极注入, 这股流向 C 极的正电流与从发射极向基极注入电子经放大后被集电极收集的电子电流方向相反. V_{AK} (即 V_{CE}) 从零开始时, 空穴从 G 极流向 C (或 A) 极形成的电流占主导地位, 出现小于零的负电流部分; 当 V_{AK} 逐渐增大时, 集电极收集电子的能力增强, 经放大流向集电极的电子流增大变成主要成分, 则总合电流便从负电流经零变成正电流. 零电流点是这两部分电流相等的结果. G 极所加的正电压愈大, 则从 G 极向 A 极注入的空穴流愈大, 则抵消此空穴流所需的电子电流也应增大, 为了提高对电子的收集能力相应的 V_{AK} 也应提高, 这就是负阻特性向右偏移引起分散现象的原因. 如果 HBT 的 h_{FE} 很大, 则对应一定的 V_{GK} 变化, 就有较大的电子电流增长, 故只需较小的 V_{AK} 变化就可以补偿空穴电流向 A 极注入的增大, 于是对应于负阻特性的右移很小, 没有出现明显的分散现象, 本文在图 3 (a) 和 (b) 中给出的特性就属于这一类. 本文 RGNDRHBT 的峰电流跨导较文献[3]中的大, 而产生负阻的阈值电压较文献[3]中的小, 这也和本文的器件 h_{FE} 较大有关.

5.2 对恒定电流模式负阻特性的解释

产生恒定电压 ($V_{BE} = \text{常数}$) 条件下负阻特性的

原因在本文第 2 部分中已经给予说明,但文献[3]并未报道恒定电流($I_B = \text{常数}$)条件下的负阻特性,当然也就谈不到对恒流模式负阻特性的解释.本文认为恒流模式负阻特性是恒压模式负阻在 HBT 存在基极串连电阻时的另一种体现,即恒压模式负阻是 RGNDRHBT 产生负阻的根本原因,而恒流模式负阻是派生的、第二性的.从本文和文献[3]都可看出恒压模式负阻存在一个阈值电压 V_{BEcr} . 本文的 $V_{BEcr} = 0.32V$,文献[3]的 $V_{BEcr} = 1.2V$. 另一方面电阻栅结构中必然存在基区电阻,此电阻包括从 G 极电极到 p^+ -GaAs 层之间的非本征基极电阻和薄 p^+ -GaAs 层中的本征基区电阻两部分.当恒流模式的 I_B 流过这两部分电阻时必然产生电压降,若 I_B 足够大,此电压降等于或超过 V_{BEcr} 时则会产生负阻效应,这就是恒流模式产生负阻的物理机制.如图 4 所示,存在的阈值电流 $I_{Bcr} = 20\mu A$. 如上述模型成立,则所对应的基极串连电阻约为: $0.32V/20\mu A = 16k$,即 $V_{BEcr} = I_{Bcr} \times R_B$ 关系应该成立.关于恒流模式负阻只存在于峰值点右很窄电压范围的问题,可以作如下的解释:某一条负阻曲线在负阻区随 V_{CE} 增长而下降时,下降到 I_{Bcr} 处若再下降则不满足产生负阻条件而自动停止,如此,不同的负阻曲线近似地相交于同一谷值点.从图 4 可以观察到这一现象.降到谷值点的 $I-V$ 曲线可以因击穿或其他原因再次随 V_{CE} 增大而增长,形成第二正阻区.由于这种原因,其谷值电流必然大于恒压模式,故恒流模式负阻特性的 PVCR 值都小于恒压模式负阻的 PVCR 值.

6 RGNDRHBT 在电路应用中的探讨

RGNDRHBT 属于一种三端高速负阻器件,与共振隧穿三极管和由共振隧穿二极管(RTD)和高电子迁移率场效应晶体管(HEMT)并联组合单元等很相似.因此目前由 RTT 或 RTD/HEMT,以及 RTD/HBT 构成的高速数字电路都可以用 RGNDRHBT 来代替.这些电路包括单-双稳转换逻辑单

元(MOBILE)、神经元、多值逻辑单元、多态存储、量化器、A/D 转换、分频器和加法器等.特别值得提到的是 RGNDRHBT 可以和常规 HBT 兼容作在同一芯片上,即在电路中需要在制作 RGNDRHBT 处,另加一块光刻版图,进行基区台面的过腐蚀,腐蚀到 n^- GaAs 集电层,其他工艺不作任何改变即可.

7 结论

本文设计并研制成功了 RGNDRHBT,经过测试,其负阻 $I-V$ 特性优于文献[3]所报道的 $I-V$ 曲线,无特性曲线分散现象,器件负阻参数也优于文献[3].此外,还观察到恒流模式负阻特性,对以上现象都给予了初步分析和解释,并对该器件在电路中的应用,进行了预测和讨论.

致谢 对中国科学院物理所和澳大利亚国立大学(ANU)为本项研究提供化合物外延材料衷心地表示感谢.

参考文献

- [1] Lee T W, Houston P A. New nonthermal mechanism for negative differential resistance in heterojunction bipolar transistors. *Appl Phys Lett*, 1993, 62(15): 1777
- [2] Lu S S, Wang Y J. A GSMBE grown GaInP/ GaAs narrow base DHB T exhibiting N-shape negative differential resistance with variable peak-to-valley current ratio up to 1×10^7 at room temperature. *IEEE Electron Device Lett*, 1994, 15(2): 60
- [3] Wei H C, Wang Y H, Houg M P. N-shaped negative differential resistance in a transistor structure with a resistive gate. *IEEE Trans Electron Devices*, 1994, 41(8): 1327
- [4] Liu W C, Wang W C, Chen J Y, et al. A novel InP/ InAlGaAs negative-differential-resistance heterojunction bipolar transistor (NOR-HBT) with interesting topee-shaped current-voltage characteristics. *IEEE Electron Device Lett*, 1999, 20(10): 510
- [5] Sze S M. *Physics of semiconductor devices*. 2nd edition. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1981: 613

Negative Differential Resistance Heterojunction Bipolar Transistor with Resistive Gate Structure *

Guo Weilian^{1,2}, Qi Haitao¹, Zhang Shilin¹, Zhong Ming¹, Liang Huilai¹,
Mao Luhong¹, Song Ruiliang¹, and Hu Haiyang²

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

(2 School of Information and Communication Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract: The n -InGaP/ p -GaAs/ n -GaAs negative differential resistance heterojunction bipolar transistor with resistive gate structure (RGNDRHBT) is designed and fabricated successfully. The I - V characteristics of the fabricated device are better than those in Ref. [3]. Both modes on negative differential resistance characteristics for constant voltage and constant current are found, and the physical mechanism of both modes on negative differential resistance characteristics are explained. Finally, the application prospect of this device is expected.

Key words: heterojunction bipolar transistor; negative differential resistance device; resistive gate

EEACC: 2560J

Article ID: 0253-4177(2005)06-1218-06

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2002CB11905)

Received 4 September 2004, revised manuscript received 27 October 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics