

一种新型结构的 InGaP/GaAs 负阻异质结晶体管 *

郭维廉¹ 齐海涛¹ 张世林¹ 钟 鸣¹ 梁惠来¹ 毛陆虹¹
宋瑞良¹ 周均铭² 王文新² C. Jagadish³ 傅 岚³

(1 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

(2 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(3 澳大利亚国立大学, 堪培拉)

摘要: 利用硅双基区晶体管(DUBAT)产生负阻的原理,针对 HBT 器件结构和 MBE 材料结构的特点,设计并研制出一种基区刻断结构的负阻型 HBT(NDRHBT).经过特性和参数测试,证明此种 NDRHBT 具有显著的微分负阻效应,并发现负电流区负阻效应和光照可改变其 $I-V$ 特性,器件模拟结果和测试结果基本一致.

关键词: 异质结双极晶体管; 双基区晶体管; 三端负阻器件; 逻辑功能器件

EEACC: 2560J

中图分类号: TN313. 2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)09-1783-06

1 引言

自双基区晶体管(dual-base transistor, DUBAT)^[1]于 1980 年被提出以来,人们对它开展了多方面的研究,其中包括高频、大功率 DUBAT 的设计与研制^[2,3],DUBAT 的压控调频和光控调频效应^[4,5].进一步将它与光探测器件相结合,研制出光电双基区晶体管(PDUBAT)^[6],以及开展了 PDUBAT 的光控电流开关效应^[7]、光控脉冲振荡^[8]和光学双稳态^[9]的研究等.上述研究都是基于硅基 DUBAT 器件进行的,然而硅基 DUBAT 受到 Si 材料特性和器件结构的限制,难以将频率和速度提得很高,这就影响到该器件的推广应用.

本文将 DUBAT 的工作原理与化合物异质结晶体管(HBT)器件结构和 MBE 材料结构特点相结合,提出了一种能够产生负阻效应的新的器件结构——刻断基区结构(cut-off base structure),并利用这种结构设计研制成刻断基区异质结负阻晶体管(COBNDRHBT).COBNDRHBT 具有以下特点:(1)在结构和工艺上与常规 HBT 兼容,可与常规 HBT 实现单片化;(2)保持了 NDRHBT 高频、高

速、双稳、自锁和节省器件数目的特点;(3)具有“ ”型负阻特性,有很高的 PVCRR 值.这些特点为它将来广泛的应用奠定了基础.

2 DUBAT 的工作原理

图 1 给出了 DUBAT 的等效电路.从图可知,DUBAT 由一 npn 双极管和一 pnp 双极管相互连接构成,其中 pnp 管的集电极和基极分别与 npn 管的基极和集电极相连,而 npn 管的发射极,pnp 管的发射极和 npn 管的集电极分别构成 DUBAT 器件的发射极、基极和集电极.器件工作时,其发射极接地、基极接一固定正电压、集电极接一从零开始向正电压增长的偏压.开始时,B 点正电压高于 C 点,则 pnp 管发射结正偏,有空穴向其基区注入,pnp 管导通,便有集电极电流向 npn 管的基极注入,npn 管导通,出现集电极电流 I_C , I_C 随 V_{CE} 增大而增长,此过程对应正阻区.随着 V_{CE} 进一步增大,pnp 管发射极电压减小($V_{BC} = V_{BE} - V_{CE}$),pnp 管集电极电流便减小,即 npn 管基极电流减小,则最终 npn 管的集电极电流也减小,产生负微分电阻(NDR)效应,此即 DUBAT 的工作原理.

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号:2002CB311905)

郭维廉 男,1929 年出生,教授,IEEE 终身会员,研究方向为化合物高速器件 RTD,RTT,NDRHBT,RSTT 等.

2005-01-07 收到,2005-04-12 定稿

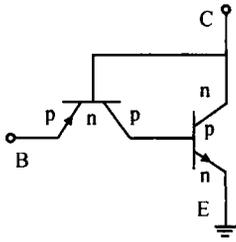


图 1 DUBAT 的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of DUBAT

3 COBNDRHBT 的材料结构、器件结构和制作工艺

3.1 材料结构

COBNDRHBT 的材料结构如图 2 所示,基本上与常规 HBT 相同. 采用 InGaP 作为发射区材料是因为 AlGaAs 材料存在 DX 中心等缺点,而 InGaP 则不存在这些问题.

n ⁺ GaAs	5 × 10 ¹⁸ cm ⁻³	100nm	cap1
n ⁻ GaAs	5 × 10 ¹⁷ cm ⁻³	100nm	cap2
n ⁻ InGaP	1 × 10 ¹⁷ cm ⁻³	80nm	emitter
i GaAs		5nm	spacer
p ⁺ GaAs	5 × 10 ¹⁸ cm ⁻³	60nm	base
i GaAs		5nm	spacer
n ⁻ GaAs	5 × 10 ¹⁶ cm ⁻³	500nm	collector
n ⁺ GaAs	5 × 10 ¹⁸ cm ⁻³	500nm	subcollector
SI GaAs substrate			

图 2 COBNDRHBT 材料结构

Fig. 2 Material structure of COBNDRHBT

3.2 器件结构

DUBAT 原来是生长在体硅衬底上,利用平面工艺制作的,而目前针对的是 n-InGaP/p⁺-GaAs/n⁻GaAs 分子束外延纵向分层衬底材料. 在此情况下,我们采用了图 3 所示的器件结构,将 ZnAu 基极金属仍然制备在 p⁺-GaAs 层的外侧,然后用光刻胶掩蔽,用湿法或干法腐蚀,将 p⁺-GaAs 层刻断,形成“刻断基区(cut-off base)”结构. 这种刻断基区结构与下面的 n 型集电区构成基区 1(base1)/集电区/基区 2(base2)的 pnp 横向晶体管,而且满足了 pnp 管基区与 npn 管集电区相连, pnp 管集电区与 npn 管基区相连(见图 1 DUBAT 的等效电路)的要求,巧妙地完成了 COBNDRHBT 的器件结构设计. 在

这种器件结构中,刻断槽的宽度 W_{COB} 是一个关键的工艺参数,它基本上等于 pnp 管的基区宽度. 如果 W_{COB} 小于空穴在 n 型集电区的扩散长度,则 pnp 管可看作为一双极晶体管;如果 W_{COB} 比空穴扩散长度大很多,则 pnp 结构只能被看作为一势垒注入渡越时间晶体管(BARITT)或电阻栅(resistive gate)结构^[10],该器件也将变成一电阻栅负阻异质结晶体管(RGNDRHBT)^[11].

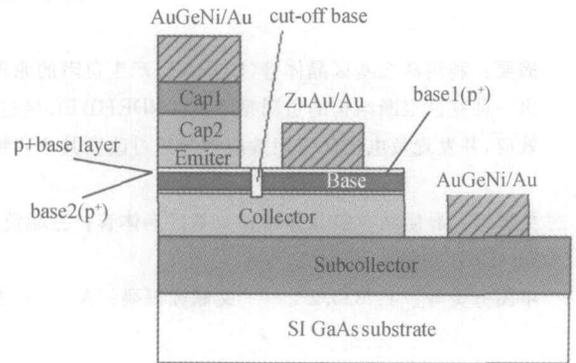


图 3 COBNDRHBT 器件结构

Fig. 3 Device structure of COBNDRHBT

3.3 器件制造工艺

COBNDRHBT 器件制作工艺基本上和常规 HBT 器件制作工艺相同,只是多一道基区刻断光刻和腐蚀刻断槽的工艺. 即在完成亚集电区接触电极剥离工艺后,利用基区刻断槽的光刻掩模版进行光刻,然后以光刻胶作为掩蔽,采用湿法或干法进行腐蚀,必须将 p⁺-GaAs 层腐蚀穿透到 n⁻GaAs 集电区停止,使 ZnAu 电极下面的 p⁺-GaAs 层与发射区下面的 p⁺-GaAs 层分离,形成图 3 所示的器件结构. 除此之外,其他工艺与常规 HBT 工艺相同.

4 实验结果

4.1 室温条件下恒压模式输出 I-V 特性

图 4 给出 COBNDRHBT 室温下恒定电压 ($V_{BE} = \text{常数}$) 模式的输出 $I-V$ 特性,与该图相应的负阻参数如表 1 所示. 由图 4 可见,COBNDRHBT 在室温下恒定 V_{BE} 模式的 $I-V$ 特性为“ λ ”型, $I_V < 1\mu A$. PVCN 的估计值大于 124. 图中显示的为第 3、第 4 条阶梯曲线(第 1、2 条没达到 V_{BE} 产生负阻的阈值故未显示出来),其他负阻参数如表 1 所示.

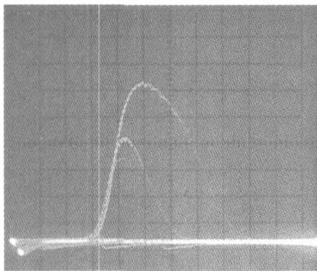


图 4 COBNDRHBT $I-V$ 特性 $x:0.2V/div; y:20\mu A/div$; 阶梯: $0.5V/step$

Fig. 4 $I-V$ characteristics of COBNDRHBT $x:0.2V/div; y:20\mu A/div$; step: $0.5V/step$

表 1 COBNDRHBT 的负阻参数

Table 1 NDR parameters of COBNDRHBT

V_{BE}/V	$I_P/\mu A$	$I_V/\mu A$	V_P/V	V_V/V	PVCR
1.5	84	< 1	0.86	1.3	> 84
2.0	124	< 1	1.00	1.76	> 124

4.2 光照效应和负电流区负阻现象

COBNDRHBT 和其他种 NDRHBT^[12] 相比, 具

有较明显的光照效应和负电流区负阻现象. 图 5 (a), (b), (c) 分别示出在无光照、光照和强光照情况下的 COBNDRHBT $I-V$ 特性. 从图可见, 对于一 h_{FE} 较小的 COBNDRHBT, 虽然 $I-V$ 特性沿 V_{CE} 有一些分散现象, 但仍可看出光照的影响. 每条相应的负阻曲线的峰值电流 I_P , 按 (a), (b), (c) 顺序依次变大, 说明峰值电流随光照强度的增大而增大. 此外可以发现: 图 5(a) 中第 3 和第 5 条曲线和图 5(b) 中第 3 条曲线负阻区电流下降, 延伸到零电流线以下, 即谷值电流 I_V 为负值(后面的器件模拟结果也证实这种现象的存在), 这是 NDR 器件很少见的现象. 作者尚未见到有关这种现象的报导. 仔细观察比较图 5(a), (b), (c) 三个图, 可以发现, 不仅 I_P 有随光强增大而增长的现象, 而且整个曲线族存在随光强增大有向上提升的现象. 例如图 5(a) 中第 3 根 $I-V$ 曲线起始于零电流线下方 - 3.0 格的位置; 图 5(b) 中第 3 根曲线起始于零电流线下方 - 2.5 格的位置; 而图 5(c) 中起始于 - 2.3 格处.

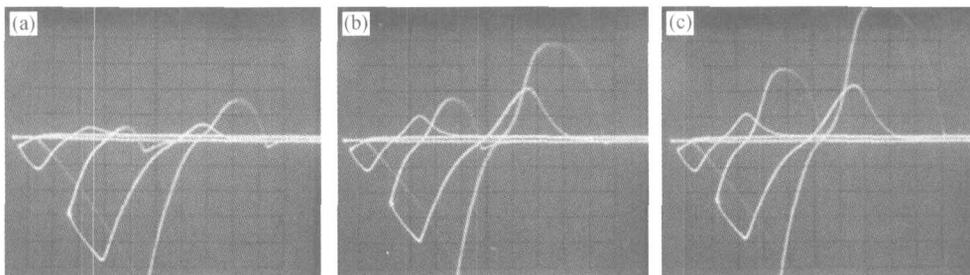


图 5 不同光强下的 COBNDRHBT $I-V$ 特性 $x:0.2V/div; y:20\mu A/div$; 阶梯: $0.5V/step$ (a) 无光照; (b) 光照; (c) 强光照

Fig. 5 $I-V$ characteristics of COBNDRHBT in different light intensity $x:0.2V/div; y:20\mu A/div$; step: $0.5V/step$

(a) In dark; (b) In illumination; (c) In a strong light illumination

5 器件模拟结果

本文利用 SILVACO 公司的 ATLAS 器件模拟软件对 COBNDRHBT 进行了器件模拟. 模拟中所采用的器件结构如图 6 所示, 为了便于器件模拟顺利进行, 在模拟中以 AlGaAs 代替了 InGaP, 基区厚度选用 200nm (这些变动不会影响模拟的主要结果和趋势). 模拟结果如图 7(a), (b) 所示. 从图 7(a) 可以看出刻断槽愈窄, I_P 愈大. 当槽较宽时负阻区下降到负电流区. 从图 7(b) 可以看出 V_{BE} 对 I_P 和 PVCR 的影响, V_{BE} 愈大, I_P 值愈大, $V_{BE} = 1.7V$ 时已不出现负阻. $V_{BE} = 1.9V$ 曲线的谷电流 I_V 已开始

进入负电流区. 由于在上述器件模拟时, 采取了一定的近似, 故模拟结果只能定性地说明特性变化的趋势, 难以与实验结果进行定量的对比, 仅供分析和讨论问题时参考.

6 分析和讨论

关于 COBNDRHBT 产生 NDR 效应的机制来自 DUBAT 的工作原理, 如前所述. 在此主要分析 COBNDRHBT 的光照效应和负电流区负阻特性.

6.1 光照效应

光照可以通过以下两种途径改变其 $I-V$ 特性:

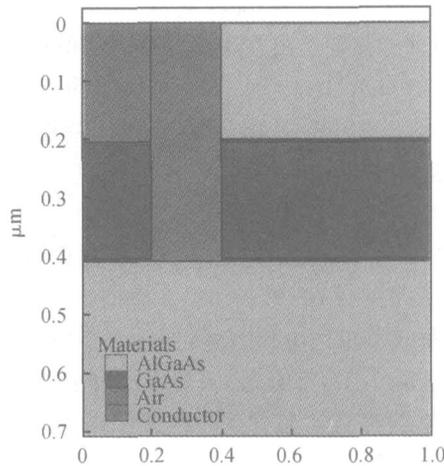


图 6 COBNDRHBT 器件模拟所用的器件简化结构

Fig. 6 Simplified device structure for COBNDRHBT device simulation

(1) 光照在 ZnAu 电极下 base1 (p^+)/collector (n) 结耗尽区产生光生电子和空穴, COBNDRHBT 在正阻区和峰值态附近工作时对应于 npn 管正向放大状态, 故其 p^+n 结为正偏, 即 p 区为正, n 区为负. 在这种条件下光生载流子电子趋向于 p 区, 空穴趋向 n 区, 进入 n 区的空穴有少部分通过扩散跨越到刻断槽左侧聚集到基区 base2 (p^+); (2) 光照在 base2 (p^+)/collector (n) 结下耗尽区产生电子空穴对, 由于此结在正常工作时为反偏, 即 n 区为正, p 区为负, 故光生电子被扫入集电极流向外电路, 空穴聚集在基区 base2 (p^+), 汇合 (1) 中注入到 base2 (p^+) 中的空穴, 使 npn 管发射结电子势垒降低. 电子从发射区向基区注入, 使 COBNDRHBT 中 npn 主管集电极电流增大, 类似于常规光电晶体管 (PT), 导致峰值电流 I_P 增大, 故上述两种作用都使 I_P 增大, 而途径 (2) 起主导作用.

6.2 负电流区的负阻效应

实验测试结果和器件模拟两方面的结果都证实负电流区域负阻现象的存在, 故其真实性是不应受到怀疑的. 负阻效应的本质是电流随电压增长而减小的现象. 它既可存在于正电流区 ($I > 0$), 也可以存在于负电流区 ($I < 0$). 启始电压 V_T 被定义为电流 $I = 0$ 时对应的电压. 如果器件的启始电压 $V_T = 0$, 电流只能存在于正电流区, 故产生负阻现象也只能在正电流区; 如果器件的启始电压 $V_T > 0$, 则在 $0 < V < V_T$ 的电压范围内, 电流只能存在于负电流

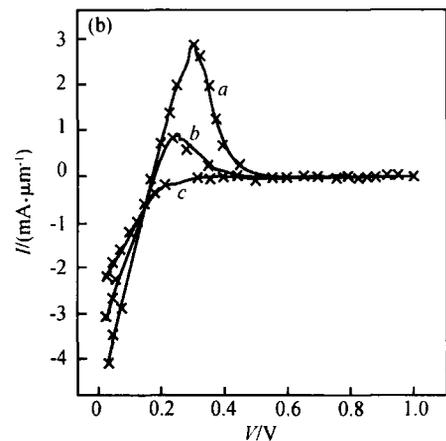
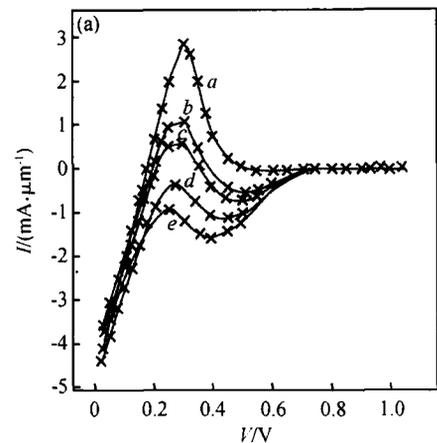


图 7 模拟的 COBNDRHBT $I-V$ 特性 (a) $V_{BE} = 2V$ 时, 刻断槽宽度 W_{COB} 为变化参数 a: $0.1\mu m$; b: $0.3\mu m$; c: $0.5\mu m$; d: $1.0\mu m$; e: $1.5\mu m$; (b) 以所加电压 V_{BE} 为参变数 a: $2V$; b: $1.9V$; c: $1.7V$

Fig. 7 COBNDRHBT $I-V$ characteristics by device simulation (a) $V_{BE} = 2V$ taking width of cut-off base (W_{COB}) as a parameter a: $0.1\mu m$; b: $0.3\mu m$; c: $0.5\mu m$; d: $1.0\mu m$; e: $1.5\mu m$; (b) Taking applied voltage V_{BE} as a parameter a: $2V$; b: $1.9V$; c: $1.7V$

区, $V > V_T$ 时电流才进入正电流区. 不同的负阻器件产生负阻的机制不同, 产生负阻的电压范围也不同. 多数负阻器件负阻产生的电压范围位于电压较大的区域, 即在大于 V_T 的区域, 表现为常见的正电流区负阻现象. 对少数的器件, 其产生负阻的电压范围位于电压较低的区域, 即 $0 < V < V_T$ 范围内, 表现为负电流区负阻现象.

COBNDRHBT 在负电流区产生负阻的现象与其产生负阻所对应的电压范围很低有关. 因为 npn 管在 $1V$ 左右的正电压下, 其发射结 ($p^+ GaAs/nGaAs$) 就可以正向导通. 而 COBNDRHBT 的 V_{CE}

从 0V 开始上升时就导致 pnp 管 V_{BE} 开始下降, 这也就是产生负阻机制的起始. 而 COBNDRHBT 基极固定在一定的正电压 V_{BE} , 当 $V_{CE} = 0$ 或 $V_{CE} < V_{BE}$ 时空穴从基极向集电极注入, 这时从基极流向集电极的空穴流大于从发射极注入被集电极收集的电子电流. 这时的集电极电流从负电流区的底部随 V_{CE} 增长而增长. 但如上述 V_{CE} 从 0V 开始上升时就已存在负阻发生的机制, 故极有可能在 I_C 还未达到零电流线以前负阻机制就已成为主导因素, 而使位于负电流区刚刚上升的 I_C 开始减小, 形成了负电流区中的负阻现象. 这里仅给出这种产生负电流区负阻现象的一种可能机制, 验证工作有待更进一步的研究.

7 结论

根据 DUBAT 产生负阻的原理, 结合 HBT 材料和器件结构的特点, 提出、设计并研制成功一种新型结构的 NDRHBT——刻断基区 NDRHBT. 此种 COBNDRHBT 不仅具有其他 NDRHBT 高频、高速、双稳、自锁、节省器件数目的特点, 而且还有很大的 PVCr 值和与常规 HBT 兼容的特点. 此外本文还对 COBNDRHBT 进行了初步的器件模拟, 并对此种结构 NDRHBT 出现的光照效应和负电流区负阻现象进行了初步的分析和解释. 预计这种 COBNDRHBT 可以应用于各种 HBT/NDRHBT 结构的高速数字电路, 具有很大的发展潜力.

参考文献

- [1] Wu Chungyu, Wu Chingyuan. Theoretical and experimental characterization of the dual-base transistor (DUBAT). *Solid-State Electron*, 1980, 23(11): 1113
- [2] Guo W L, Yu C H. The derivation on negative resistance parameters of DUBAT and the design and fabrication of power DUBAT. *Research & Progress of SSE*, 1992, 12(4): 306 (in Chinese) [郭维廉, 于彩虹. DUBAT 负阻参数的推导和功率 DUBAT 的设计与研制. *固体电子学研究进展*, 1992, 12(4): 306]
- [3] Guo W L, Zheng Y G, Hou Z Y, et al. The fabrication and application on power DUBAT. *Semiconductor Technology*, 1994, (1): 9 (in Chinese) [郭维廉, 郑云光, 侯增一, 等. 功率型双基区晶体管 (DUBAT) 的研制及其初步应用. *半导体技术*, 1994, (1): 9]
- [4] Guo W L, Hou Z Y, Zheng A L, et al. The voltage (current) controlled frequency modulation effect in DUBAT device. *Proceeding of IEEE TENCON, Hong Kong*, 1995: 391
- [5] Li S R, Guo W L, Zheng Y G, et al. Experimental study on photo-controlled frequency modulation effect. *Semiconductor Technology*, 1997, (1): 19 (in Chinese) [李树荣, 郭维廉, 郑云光, 等. 光控调频效应的实验研究. *半导体技术*, 1997, (1): 19]
- [6] Zheng Y G, Zhang S L, Guo W L, et al. The discussion on the physical model in photoelectric dual base transistor. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(8): 1123 (in Chinese) [郑云光, 张世林, 郭维廉, 等. 光电双基区晶体管 (PDUBAT) 物理模型探讨. *电子学报*, 2001, 29(8): 1123]
- [7] Guo W L, Zhang P N, Zheng Y G, et al. The photo-controlled current switching in the photoelectric dual base transistor. *Semiconductor Technology*, 2000, 25(1): 19 (in Chinese) [郭维廉, 张培宁, 郑云光, 等. 光电双基区晶体管中的光控电流开关效应. *半导体技术*, 2000, 25(1): 19]
- [8] Sha Y N, Li S R, Guo W L, et al. The experimental investigation into PDUBAT pulse oscillators. *Microelectronics*, 2000, 30(1): 11 (in Chinese) [沙亚男, 李树荣, 郭维廉, 等. 光电双基区晶体管光控脉冲振荡器的实验研究. *微电子学*, 2000, 30(1): 11]
- [9] Guo W L, Zhang S L, Zheng Y G, et al. Optical bistability based on organic/polymer light emitting devices and silicon photoelectronic negative resistance devices. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, 22(1): 18 (in Chinese) [郭维廉, 张世林, 郑云光, 等. 由 OLED 和 PDUBAT 构成的光学双稳态. *半导体光电*, 2001, 22(1): 18]
- [10] Wei Hougchi, Wang Yeongher, Houg Mauphon. N-shaped negative differential resistance in a transistor structure with a resistive gate. *IEEE Trans Electron Devices*, 1994, 41(8): 1327
- [11] Guo W L, Qi H T, Zhang S L, et al. The negative differential resistance heterojunction bipolar transistor with resistive gate structure. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(6): 1218 (in Chinese) [郭维廉, 齐海涛, 张世林, 等. 电阻栅结构负阻异质结双极晶体管. *半导体学报*, 2005, 26(6): 1218]
- [12] Liu Weichau, Wang Weichoa, Chen Jingyuh, et al. A novel Inp/InAlGaAs negative differential resistance heterojunction bipolar transistor (NDR-HBT) with interesting topee-shaped current-voltage characteristics. *IEEE Electron Device Lett*, 1999, 20(10): 510

An InGaP/GaAs Negative Differential Resistance Heterojunction Bipolar Transistor with a New Structure^{*}

Guo Weilian¹, Qi Haitao¹, Zhang Shilin¹, Zhong Ming¹, Liang Huilai¹, Mao Luhong¹,
Song Ruiliang¹, Zhou Junming², Wang Wenxin², C Jagadish³, and Fu Lan³

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

(2 Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

(3 Australian National University, Canberra 0200, Australia)

Abstract : By using the NDR operation principle of silicon dual base transistor (DUBAT), referring to the features on structure of HBT and MBE material, this paper proposes the design and fabrication of a novel NDRHBT with a cut-off base structure. The parameters and characteristics measured from the fabricated devices demonstrate that the NDRHBT has good NDR characteristics and good device performance. In addition, the NDR effect that occurs in the negative current region and a light radiation have an effect on I - V characteristics. The results of device simulation for COBNDRHBT are in agreement with the measured results.

Key words : HBT; DUBAT; three terminal NDR device; logic function devices

EEACC : 2560J

Article ID : 0253-4177(2005)09-1783-06

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2002CB311905)

Guo Weilian male, was born in 1929, professor, life member of IEEE. His research area is compound semiconductor high speed devices, such as RTD, RTT, NDRHBT, RSTT, etc.

Received 7 January 2005, revised manuscript received 12 April 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics