

普通台面工艺制作新型超薄基区负阻HBT

齐海涛^{1,2}, 郭维廉¹, 张世林¹

(1. 天津大学电子信息工程学院 天津 南开区 300072; 2. 中国电子科技集团公司第十三研究所 石家庄 050051)

【摘要】负阻型HBT既保持了原HBT高频、高速的特点,同时又具有负阻、双稳、自锁等特性,是一种极具研究价值的新型负阻器件。该文从Early效应造成超薄基区穿通,器件由双极工作状态向体势垒管工作状态转变而形成负阻特性的思路出发,通过对材料结构的特殊设计,采用普通台面工艺研制出了基区厚度为8 nm的负阻型HBT。该器件具有独特且显著的可变电压控制型负阻特性,其电流峰谷比大于1 000,并伴有电流控制型负阻。

关键词 异质结双极晶体管; 负阻; 超薄基区; 体势垒晶体管

中图分类号 TN321

文献标识码 A

Novel Ultra-Thin Base NDR HBT Fabricated by Common Mesa Process

QI Hai-tao^{1,2}, GUO Wei-lian¹, ZHANG Shi-lin¹

(1. School of Electronic Information Engineering, Tianjin University Nankai Tianjin 300072;

2. The 13th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation Shijiazhuang 050051)

Abstract Negative Differential Resistance (NDR) Heterojunction Bipolar Transistor (HBT) holds high speed, high frequency characteristics of HBT and bistability, self-latching characteristics derived from NDR, is compatible with HBT manufacture technique, and has good research and application value. Based on the thought that Early effect causes very thin base reach-through, bipolar operation mode changes to barrier transistor operation mode and NDR appears, a novel 8 nm base NDR HBT has been fabricated through special design of device structure and common HBT mesa process, which has distinct and special variable voltage-controlled NDR characteristic and current-controlled NDR characteristic. The Peak to Valley Current Ratio(PVCR)voltage-controlled NDR character is higher than 1 000. All of phenomena are reported for the first time.

Key words heterojunction bipolar transistor; negative differential resistance; ultra-thin base; barrier transistor

近十余年,共振隧穿二极管^[1]、实空间转移晶体管^[2]等高速、高频负阻器件成为微电子学研究的重点领域之一,并广泛应用于多值逻辑电路和各种功能器件中,它不但大幅度提高了电路性能,而且大大减化了电路所需器件数目。异质结双极晶体管(Heterojunction Bipolar Transistor, HBT)是一种高速双极型器件,它解决了发射效率和基区电阻间在基区掺杂问题上呈现出的矛盾。发射结的发射效率可以通过筛选异质材料加以调制,而不受发射区和基区掺杂比的限制,从而提高了器件性能,使双极器件的发展向前推进了一大步。如能实现HBT与负阻的结合,即研制负阻型HBT,则既保持了原HBT高频、高速的特点,同时又具有负阻器件特有的双稳、

自锁等特性,将成为极具应用前景的一种新型半导体器件。基于此,本文研制作出一种具有独特且显著的可变电压控制型负阻特性和电流控制型负阻特性8 nm基区HBT。

1 负阻产生机理分析

逐渐增大HBT集电极偏压,集电结耗尽区向基区和集电区两侧扩展,造成有效中性基区变窄,称为Early效应。一般的HBT因基区宽度在40 nm以上,且基区为高掺杂,Early效应对器件性能影响不大。当基区宽度设计为10 nm以下时,对应特定的基区-集电区掺杂比,会出现Early效应的极限形式。在高集电结偏压时集电结耗尽区与发射结耗尽区相接,

收稿日期:2005-11-20

基金项目:国家重点基础研究计划项目(973)(2002CB311905);中国博士后科学基金

作者简介:齐海涛(1975-),男,博士后,讲师,主要从事新型半导体器件与集成技术方面的研究。

中性基区完全消失,发生穿通,器件从双极晶体管过渡到体势垒管^[3],体势垒管的电学性能与材料选择和各区掺杂浓度比有很大关系。

图1是在某大学SUN工作站上利用atlas器件模拟软件模拟的不同掺杂浓度条件下体势垒管的直流特性。该管为 n^- InGaP发射极($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)/ p^+ GaAs基区/ n^- InGaP集电极($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)三层结构。基区厚度设为8 nm,基区偏压为1 V,在此条件下中性基区均完全耗尽穿通。图中曲线‘a’代表基区掺杂为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$;曲线‘b’为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;曲线‘c’为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;曲线‘d’为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。可以看出,随基区掺杂增大,基区势垒增高,集电极电流开启电压增大,当基区掺杂大于 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 后,开启电压大于15 V。按照一般HBT的材料设计原则,基区掺杂选择在 $5 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 之间。所以在基区穿通状态下,开启电压将会很大,在未开启之前的集电极电流将会远低于正常HBT的饱和区和线性放大区电流。由于基极电压使发射结和集电结正偏,基极电压的作用与集电极正好相反,可向发射层和集电层两个方向扩展中性基区,从而对中性基区的有、无、大、小有调控作用。通过合理选择材料结构、掺杂浓度,可以使超薄基区HBT在恒定基极电压下,由低集电极电压时的双极管工作状态转变为高集电极电压时的体势垒工作状态,从而形成负阻。

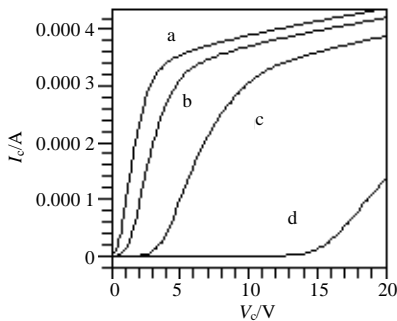


图1 体势垒管共射极直流特性

2 材料结构设计与工艺制作

器件设计为双异质结结构,材料采用MBE方法生长。在半绝缘GaAs衬底上依次生长500 nm n^+ GaAs($5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)亚集电层、300 nm n^- InGaP($5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)集电层、5 nm未掺杂GaAs隔离层、8 nm p^+ GaAs($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)基区层、5 nm未掺杂GaAs隔离层、60 nm n^- InGaP($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)发射层、200 nm n^- GaAs($5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)欧姆接触层和200 nm n^+ GaAs($5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)欧姆接触层。发射区和集电区为Si掺杂,基区为Be掺杂。基区厚度误差在 $\pm 1\%$ 左右,

各区掺杂浓度均为均匀分布,误差在 $\pm 5\%$ 左右。

由于器件的基区厚度在纳米数量级范围,精确控制腐蚀深度和制作良好的基极欧姆接触成为工艺中的难点。国外制作薄基区HBT(10~30 nm)一般采用V型槽或离子注入引出基极的技术^[4-5],但工艺较复杂且不好控制,对实验条件要求较高。本文选用InGaP/GaAs材料体系,即以InGaP作为发射区和集电区,GaAs作为基区。从材料角度看,该体系具有低DX中心、低表面复合速度及高导带断续/价带断续比的优点;从工艺角度看,该体系可以采用高选择比的湿法刻蚀工艺精确处理基区。

工艺制作中采用普通接触式曝光、金属剥离、金属掩蔽腐蚀及台面腐蚀隔离等技术,整个工艺流程包括7次光刻^[6],具体工艺过程如图2所示。GaAs层用低配比 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 溶液进行腐蚀,InGaP层用高配比 $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ 溶液进行腐蚀。由于前者对InGaP/GaAs的选择比高达1:300,后者对GaAs基本无腐蚀作用,所以可较好地控制腐蚀至各层上方。发射极和集电极金属为磁控溅射AuGeNi/Au,基极金属为真空蒸发ZnAu/Au,制作完成后一起合金。合金温度从200 逐渐升温到360 ,时间为5 min,各电极面积相同,均为 $20 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 。整个器件的剖面图如图3所示。

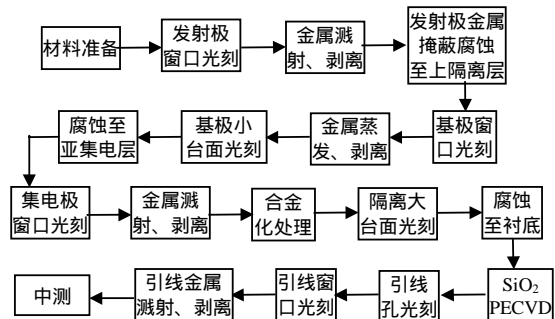


图2 负阻HBT工艺流程

尽管采用了双向选择湿法腐蚀方法,但为了在工艺进行中同步监控各层腐蚀是否到位和各电极金属溅射或蒸发的质量,在版图上设计了监控图形。在每次光刻电极窗口的同时光刻间距为 $20 \mu\text{m}$ 、面积为 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ 的两个正方形窗口,溅射或蒸发金属后进行剥离,形成两个可用探针直接扎取的监控电极。通过测试两电极间的直流特性就可估知金属所在位置及腐蚀情况,图4给出了不同监控电极和不同腐蚀程度时的实测电学曲线。图4a中,曲线‘a’表示未腐蚀至 P^+ 层或半绝缘衬底;曲线‘b’表示已腐蚀至 P^+ 层或半绝缘衬底。图4b中,曲线‘a’表示ZnAu/Au位于 P^+ 上,腐蚀基本到位;曲线‘b’表示

ZnAu/Au位于n⁻上,可能腐蚀不到位或过腐蚀。实践证明,设置监控电极比台阶仪直接测定腐蚀深度效果更好,更方便。

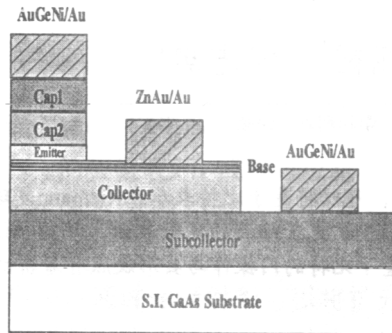


图3 负阻HBT剖面图

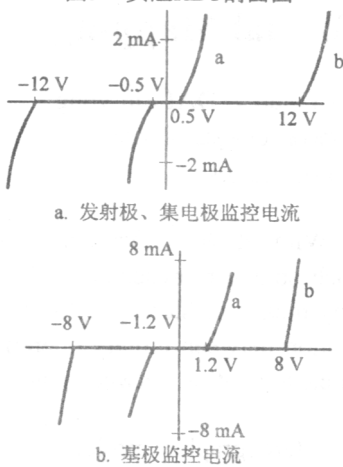


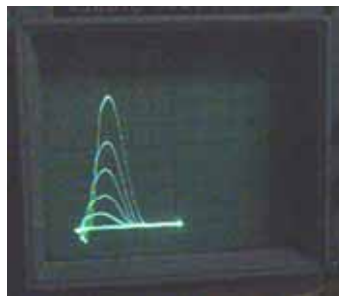
图4 监控电极的直流特性

3 器件直流特性

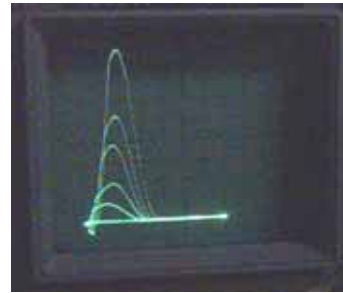
用 XJ2810 半导体管特性图示仪测量了器件的共发射极直流特性,结果如图 5 所示。



a. 低集电极电压



b. 较高集电极电压

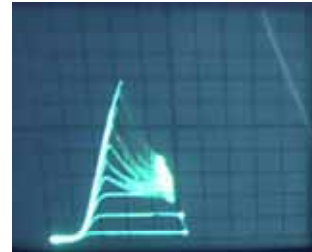


c. 高集电极电压

X:2 V/div Y:0.5 mA/div V_b step:1 V

图5 超薄基区HBT的可变电压控制型负阻特性

相同流水工艺制作的多批器件均表现出明显的电压控制型 N 形负阻特性,工艺可重复性好。器件在基极恒压时的 I_c-V_c 特性曲线明显分为四个区域:(1) 正阻区(对应 HBT 特性的饱和区);(2) 负阻区(对应 HBT 与体势垒管特性转换区);(3) 谷电流区(对应体势垒管特性区);(4) 击穿区(图中未显示)。由于负阻的谷值电流已低于图示仪的测量范围(1 μ A),所以具体数值未测量,但可估知负阻的峰谷比(PVCR)应大于 1 000。另外,对比图 5a、5b、5c,可以发现,随集电极电压增大,器件电流呈现奇特的成长现象,集电极的峰值电流不断增大,峰谷比不断增加,增长幅度很大,该现象明显有别于其他类型负阻器件。其原因是:该器件的负阻特性是由于集电极电压增大致使超薄基区贯通,HBT 特性向体势垒管特性转化造成的,转换点的位置是由基极电压和集电极电压共同控制的。当基区很薄,在较小集电极电压时,贯通就在 HBT 特性的饱和区发生,直接转化为体势垒管特性,未经过 HBT 的线性放大区,其特性表现为尖峰状。由于处于饱和区,集电极电流会随集电极电压增加而增大,致使转换点稍稍后移,峰值电流增大。当转换点位于 HBT 特性的线性放大区时,由于集电极电流已经达到饱和,峰值电流就不会随集电极电压增加而增大,其特性表现为稳定的台阶状。由分析可知,通过选择基区厚度和各层掺杂浓度,可灵活控制超薄基区 HBT 的负阻表现形式。



X:0.5 V/div Y:2 mA/div I_b step:10 μ A

图6 超薄基区HBT的电流控制型负阻特性

(下转第136页)

OTDR曲线;中线为多次测量的反斯托克斯OTDR曲线的重叠;下线为APD主放大器降低一倍时其中一次反斯托克斯OTDR曲线。表1列出了一组式(5)和式(8)解调测温实验数据。由此可见:式(5)解调测温精度达到 ± 1.5 ;式(8)解调测温精度达 ± 0.1 ,与理论分析一致。

表1 测温实验数据

序号	式(5)解调温度/(%)	式(6)解调温度/(%)
1	45.02	45.02
2	45.58	45.11
3	45.49	44.87
4	44.78	45.09
5	45.69	44.92
6	44.36	45.02
7	44.12	45.09
8	46.23	45.04
9	46.57	44.97
10	46.43	44.78
平均值	45.427	45.002
不确定值	2.35	0.13

3 结论

分布光纤喇曼温度传感器系统是光机电和计算机一体化的测量系统,本文改进了传统的解调方法,消除了系统的背景噪声,抑制了温漂噪声积累,瑞利背向散射光窜扰反斯托克斯背向散射光,提高了系统的灵敏度、测温精度和稳定性。传感器的处理电路的好坏是影响传感器测温精度的一个重要因素,采取了多种技术措施使最后的信噪比在25 dB以上才能保证测温精度。

参考文献

- [1] 张利勋, 欧中华, 刘永智, 等. 分布式光纤喇曼温度传感器的循环解调法[J]. 光子学报, 2005, 34(8): 1176-1178.
- [2] 张在宣, 沈为民, 郭宁, 等. 分布光纤喇曼光子传感器系统的一种解调方法[J]. 光子学报, 1998, 27(5): 467-471.
- [3] LEES G P. Advances in optical fiber distributed temperature sensing using the Landau-Placzek ratio[J]. IEEE Photonics Technology, 1998, 10(1): 126-128.

编辑 漆蓉

(上接第131页)

除电压控制型共发射极直流特性外,还测量了器件在恒定基极电流时的共发射极直流特性。由图6可以看到,依然存在明显的负阻特征。在基极电流较低时,器件特性与HBT相似,增益为130左右;当基极电流增大到一定值时,负阻开始变化明显,并且随基极电流增大,负阻的峰值和谷值电流均增大,但峰谷比较小。该现象的成因与超薄基区有关,但与电压控制型负阻有所不同。在电流控制条件下,当集电极电压增大时,有效基区宽度减小,基区串联电阻增大,消耗在基区串联电阻上的电压增加,发射结上所加偏压减少,从而造成发射极电流减小,继而集电极电流减小,形成负阻。在较低基极电流时,基区串联电阻的影响不大,负阻不明显;在较高基极电流时,基区串联电阻造成的电压降很大,负阻显著。由于基极电流一直保持恒定,所以此过程中器件的基区基本上处于未穿通状态,所以集电极电流的峰谷比较小。

4 结论

本文通过双向选择湿法腐蚀与监控电极相结合的简单台面工艺成功设计并制作了8 nm超薄基区HBT。该器件具有独特的高峰谷比的可变电压控制型负阻特性,并伴有低峰谷比的电流控制型负阻特

性。由于该器件在HBT基础上发展而来,所以与HBT在工艺上兼容,同时可预期该器件兼有HBT高频、高速、三端工作、有电流增益的特点和负阻器件特有的双稳、自锁的特点(待进一步实验证明),它的应用既可提高电路性能,又将大量节省器件用量,将成为一种具有实用价值的新型器件。

参考文献

- [1] SCHULMAN J N, De Los Santos H J, CHOW D H. Physics-based RTD current-voltage equation[J]. IEEE Electron Device Letters, 1996, 17(5): 220-222.
- [2] 齐海涛, 张之圣, 郭维廉. 实空间转移晶体管研究进展[J]. 固体电子学研究与进展, 2004, 24(4): 243-248.
- [3] YARN K F, WANG Y H, CHANG C Y. Characterization of a GaAs current-controlled bipolar-unipolar transition negative differential resistance transistor[J]. Appl Phys Lett, 1990, 57: 777-779.
- [4] CHANG C Y, WANG Y H, LIU W C, et al. MBE grown $n^+i-(p^+)-i-n^+$ GaAs V-groove barrier transistor[J]. IEEE Electron Device Letters, 1985, 6(3): 123-125.
- [5] IKOSI-ANASTASIOU K, EZIS A, EVANS K R, et al. Low-temperature characterization of high-current-gain graded-emitter AlGaAs/GaAs narrow base heterojunction bipolar transistor[J]. IEEE Electron Device Letters, 1992, 13(8): 414-417.
- [6] 施敏. 现代半导体器件物理[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 31-40.

编辑 漆蓉