

文章编号: 2095-4980(2017)05-0855-06

子阱及非对称势垒对 GaN RTD 电学特性的影响

苏娟¹, 谭为¹, 高博²

(1.中国工程物理研究院 微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610299;

2.四川大学 物理科学与技术学院, 四川 成都 610065)

摘要: 利用 Silvaco 软件对 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ 共振隧穿二极管(RTD)进行仿真, 重点研究了 InGaN 子量子阱结构及相应非对称势垒结构设计对其电流特性的影响。对比分析了子量子阱结构中 InGaN 的 In 组分和子阱厚度对 RTD 微分负阻(NDR)特性的影响, 得出了提升器件性能的最佳参数范围。为了克服 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ RTD 势垒低对器件电流峰谷比(PVCR)的影响, 在子量子阱结构的基础上引入了非对称势垒结构设计, 通过改变收集区侧势垒的高度和厚度, 将 AlGaIn/GaN 的 I_p 和 PVCR 由基本结构的 0.42 A 和 1.25, 提高到了 0.583 A 和 5.01, 实现了器件性能的优化, 并为今后的器件研制提供了设计思路。

关键词: 共振隧穿二极管; AlGaIn/GaN 异质结; InGaN 子阱; 非对称势垒

中图分类号: TN313⁺.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0855

Influence of sub-quantum-well and asymmetric quantum-barrier structures on the electrical characteristics of GaN RTD

SU Juan¹, TAN Wei¹, GAO Bo²

(1.Institute of Electronic Engineering & Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610299, China; 2.College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: The influence of InGaN sub-quantum-well and asymmetric quantum-barrier structures on $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ Resonant Tunneling Diodes(RTD) are studied based on Silvaco simulator. Theoretical investigation reveals that there are appropriate ranges of the In composition and thickness for InGaN sub-quantum-well which can obviously improve the Negative Differential Resistance(NDR) characteristics of RTD. It is also found that by introducing asymmetric quantum-barrier structures in the sub-quantum-well GaN RTD, the $I-U$ characteristic of Peak-to-Valley Current Ratio(PVCR) can be further improved. Numerical simulation shows that RTD with both InGaN sub-quantum-well and asymmetric quantum-barrier structures exhibits the peak current (I_p) and PVCR of 0.583 A and 5.01 respectively, superior to that of the conventional $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ RTD without sub-quantum-well having I_p of 0.42 A and PVCR of 1.25. The introducing of improved new quantum structures for the low Al composition AlGaIn/GaN RTD has provided one of the solutions to solve the contradiction between the device electrical properties and its actual manufacture for the future terahertz applications.

Keywords: Resonant Tunneling Diode; AlGaIn/GaN heterojunction; InGaN sub-quantum-well; asymmetric quantum-barrier

太赫兹波(0.1~10 THz)处于电子学毫米波和光学远红外交叠的特殊频段, 具有小的光子能量、强的非金属和非极性材料穿透性等特性, 且覆盖大量星际分子、生物有机大分子的特征频率范围, 从而在太赫兹雷达、通信、天文、医学诊断、环境科学、材料检测等领域引起了科学家的广泛关注。在太赫兹应用系统的研究中, 关键在于各类核心组件的研制, 研究重点之一就是大功率、高效率的室温太赫兹源。目前, 研究人员采用光学或电学的方法开发了多种太赫兹源。鉴于自由电子激光器、量子级联激光器、远红外气体激光器、微波-毫米波真

收稿日期: 2016-12-07; 修回日期: 2017-03-08

基金项目: 科学挑战专题资助项目(TZ2017003); 中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心专项资助项目(MT2015-11-08); 中国工程物理研究院—四川大学协同创新联合基金资助项目(CX2014005)

空电子器件、光电导等太赫兹源的庞大体积和昂贵价格,采用电子学原理产生太赫兹波成为很多研究机构优先发展的技术方案,室温工作、相干连续、小体积、低功耗,且高输出功率的太赫兹固态源开发,成为推动太赫兹系统集成化应用的核心。其中,共振隧穿二极管(RTD)利用量子隧穿效应产生的负微分电阻(NDR)来产生太赫兹振荡输出,是目前工作频率最高的固体电子器件,具有体积小、易集成、高速、低功耗、双稳及用少量器件完成多种逻辑功能等特性,对于太赫兹微系统的开发意义重大。

目前,较成熟的太赫兹 RTD 技术主要基于 GaAs 材料,单管室温频率已达 1.92 THz^[1],但受限于材料特性,功率只有纳瓦/微瓦量级^[1-2]。相较而言,GaN 体系材料具有宽禁带、高电子饱和速度、良好的热稳定性及抗辐照等特性,理论上 GaN RTD 可实现毫瓦量级的功率输出^[3]。自 2001 年上智大学 Kikuchi 首次观测到 GaN RTD 的共振隧穿现象以来^[4-5],许多国内外的器件和材料类研究组对其展开了研究^[6-15]。然而,GaN RTD 一直存在着电流峰谷比(PVCR)低、性能退化及迟滞严重等问题,目前仍未实现基于 GaN RTD 的太赫兹振荡器,这主要归因于氮化物材料界面的强极化效应,以及材料生长制备技术不成熟产生的高密度缺陷导致的电荷积累效应。因此,西北大学^[6-9]、诺丁汉大学^[10-11]、巴黎第十一大学^[12-13]、日本产业技术综合研究所^[14-15]等机构从改进材料生长技术层面,通过非对称外延结构设计、氮化物非极性外延生长等方法来减弱极化效应的影响,或选择低缺陷密度衬底、缩小结区面积、降低 Al 组分等方式降低有源区材料缺陷密度,来改善器件的可重复性。

在目前实验技术不成熟的条件下,通过理论仿真进行 RTD 有源区的新结构和工作模式设计,如子阱^[16]、多周期级联势阱^[17]、非对称量子结构^[18-19]等,来探索器件性能的提升,成为国内外深入探索引起器件性能退化的负面因素及获得高性能器件结构的研究途径。其中,发射区量子阱的结构设计是提升 RTD 负阻特性的有效方法之一。子阱结构将隧穿模式由双势垒单势阱的 3D-2D-3D(发射区-势阱-集电区)变为 2D-2D(子阱-主阱),两量子阱中分立能级对准引起的共振隧穿,会在器件 NDR 区域呈现出尖锐的共振电流峰,并提升 PVCR。西安电子科技大学研究组理论上在近晶格匹配的 InAlN/GaN RTD 中引入窄带隙 InGaN 量子阱,实现了器件关键电学参数的提升^[16]。对于低 Al 组分($x=0.2\sim 0.4$)AlGaIn/GaN RTD,其材料生长相对成熟,缺陷密度相对较低,器件可重复性提升,是目前最有潜力实现应用的器件结构。但由于势垒高度低及强极化造成的能带畸变影响,其峰值电流(I_p)、峰值电压(U_p)、PVCR 等直流特性并不理想,因此通过引入子阱结构来提升低 Al 组分 AlGaIn/GaN RTD 性能有重要的实际意义,目前相关理论研究较少。同时,氮化物异质界面的强极化效应与子阱共同作用,会引起集电区端势垒能带弯曲加剧,进而破坏共振态时的双势垒能带结构对称性,影响器件性能。西安电子科技大学杨林安研究组提出的非对称量子结构设计,可实现弯曲能带的极化调平,进而提升 GaN RTD 性能^[19]。因此,将非对称势垒结合子阱结构设计,有可能实现低 Al 组分 AlGaIn/GaN RTD 性能的综合提升。

本文中,在低 Al 组分(0.2)AlGaIn/GaN RTD 的发射端引入窄带隙 InGaIn 量子阱,采用 Silvaco 软件的 Atlas 模块研究了 InGaIn 子阱结构变化对器件电流特性的影响,并为了改进器件性能,引入非对称势垒结构,并研究其对子阱 RTD 负阻特性的影响。

1 器件结构和参数

GaN RTD 仿真中采用的器件结构如图 1 所示。其量子区由 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (x 是 Al 组分)双势垒单势阱结构组成,位于两端 100 nm 厚的 n 型 GaN 欧姆接触区之间,分别是集电区和发射区,掺杂浓度为 $1\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$,并通过 5 nm 的 GaN 隔离区将量子区与集电区和发射区分开以防止杂质扩散。RTD 的结区面积为 $20\text{ }\mu\text{m}^2$,仿真过程中主要以 1.5/1/1.5 nm 的 AlGaIn/GaN/AlGaIn 量子结构为基本结构展开研究。

对于子阱结构仿真,在发射区一侧的势垒前加入窄带隙 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$,其中 y 是 In 组分,研究 y 在 0.01~0.1 及子阱厚度在 1~2.5 nm 范围内变化时,子阱对 RTD 电流特性的影响。基于此,增加靠近收集区一侧 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒的高度,即增加 x (0.3~0.4),同时调整势垒厚度,研究非对称势垒结构对子阱结构 RTD 器件性能的影响。本文仿真中的网格大小为 0.01 nm,基本材料参数为:GaN,AlN 和 InN 的有效质量分别为 $0.228m_0$, $0.3m_0$ 和 $0.11m_0$,其中 m_0 是自由电子质量,用线性插值法得到 InGaIn 和 AlGaIn 的电子有效质量;GaN,AlN 和 InN 的禁带宽度分别为 3.42 eV,6.28 eV 和 0.7 eV,采用经验公式 $E_g=6.28x+3.42(1-x)-x(1-x)$ 和 $E_g=0.7y+3.42(1-y)-1.67y(1-y)$,分别计算 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 和 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 的禁带宽度^[20]。

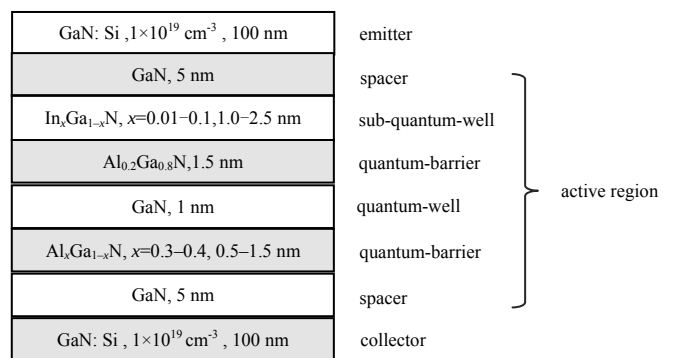


Fig.1 Schematic diagram of GaN RTD

图 1 GaN RTD 结构示意图

2 计算结果和分析讨论

2.1 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ RTD 的直流特性

对具有 $1.5/1.5\text{ nm}$ $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子结构的 RTD 进行正向和负向电压扫描, 得到器件的 NDR 特性和导带结构, 如图 2 所示。图 2(a) 是 RTD 的 $I-U$ 特性, 其中对于正偏压, $I_p=0.42\text{ A}$, $U_p=0.54\text{ V}$, $\text{PVCR}=1.25$; 对于负偏压, $I_p=-2.14\text{ A}$, $U_p=-1.28\text{ V}$, $\text{PVCR}=1.53$, PVCR 是正向的 1.2 倍, 而 I_p 是正向的 5 倍。通过对比正反偏压的能带结构图, 如图 2(b) 和 2(c) 所示, 得出造成正反偏压不对称的原因: 一是由于氮化物材料压电和自发极化的存在, 产生了二维电子气和内建电场, 导致能带弯曲, 使得器件量子区的能带结构严重不对称; 二是导带弯曲在集电区形成了一个局部的三角势阱, 如图 2(c) 所示, 因此在负偏压的情况下, 电子需经过该三角势阱进入量子区, 其作用类似于一个小的子量子阱, 从而提升了峰值电流和 PVCR 。然而, 由于该三角阱相对较小且极化方向不同导致能带偏转方向差异, 使得负偏压下器件的峰值电压非常高, 不利于器件功耗的降低, 由此考虑在发射区中引入 InGaN 子量子阱, 期望在不过分增加器件功耗的条件下, 提升 I_p 和 PVCR 。

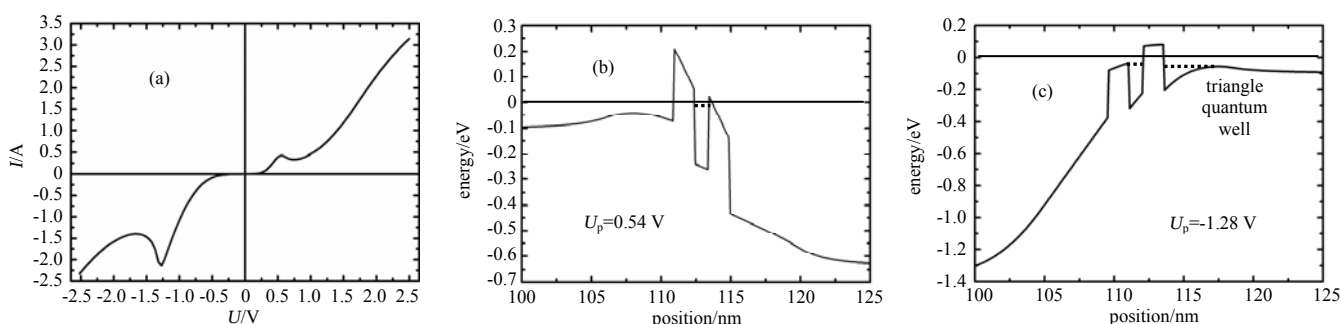


Fig.2 (a) $I-U$ characteristics, and energy band profiles under (b) positive peak voltage and (c) negative peak voltage of $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ RTD

图 2 对于 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ RTD, (a) 为 $I-U$ 特性图, (b) 为正偏压下峰值电压时的导带图, (c) 为负偏压下峰值电压时的导带图

2.2 子阱结构 GaN RTD 的直流特性

以上述基本结构为基础, 在发射区势垒的前端, 加入了 1.5 nm 厚的 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 子量子阱, 如图 1 所示。对该器件结构进行正向电压扫描, 获得其能带结构和 NDR 特性, 如图 3 所示。由于 InGaN 的禁带宽度低于 GaN , 因此在 InGaN/GaN 和 GaN/AlGaN 异质界面产生带阶, 在 AlGaN 势垒前形成一个局域子量子阱, 其导带结构如图 3(a) 所示。在未加电压时, 子阱中的分立能级位置低于主量子阱中的能级。随着电压的增加, 导带向低能量方向移动, 当 2 个量子阱中的分立能级对准时发生共振, 发射区电子经过对准的分立能级直接隧穿到集电区, 提升了 I_p 和 U_p 。这可从图 3(b) 中子阱结构 RTD 和基本结构 RTD 的 $I-U$ 曲线对比看到, 此时 $I_p=0.616\text{ A}$, $U_p=0.62\text{ V}$, $\text{PVCR}=4.05$, I_p 和 PVCR 明显增加。原因是隧穿模式改变后, 电子在子量子阱的能量分布降低, 由于接近导带低的电子数量多, 因此共振时隧穿进入主量子阱的电子数量增加, 导致峰值电流增大。在材料生长过程中, InGaN 中 In 组分易受到生长条件的影响, 因此本文研究了 In 组分变化对器件 NDR 性能的影响。在上述子阱结构的基础上, 研究了 In 组分为 $0.01, 0.04, 0.05, 0.06, 0.09$ 及 0.1 时, 相应器件的 $I-U$ 特性, 如图 4 所示。

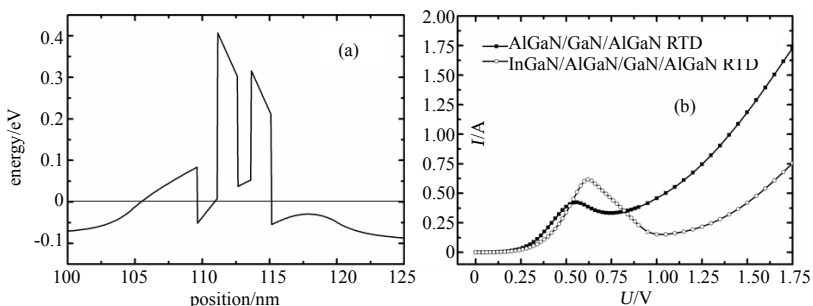


Fig.3 (a) Energy band profile of RTD with InGaN sub-quantum-well at static-state, and

(b) $I-U$ characteristics of $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ RTD with and without sub-quantum-well

图 3 InGaN 子阱结构 RTD (a) 零偏压时的导带图; (b) 与双势垒基本结构 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ RTD 的 $I-U$ 特性对比图

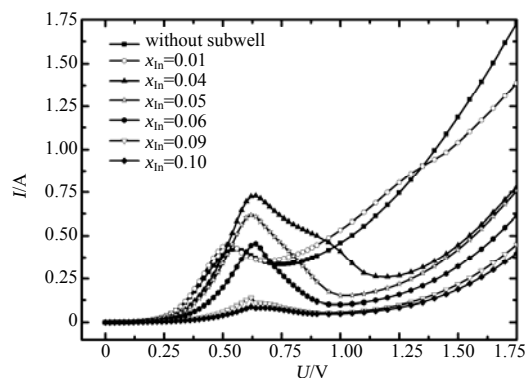


Fig.4 Dependence of $I-U$ characteristics of InGaN sub-quantum-well RTD on the In composition varying between 0.01 and 0.1

图 4 InGaN 子阱结构 RTD 不同 In 组分 ($0.01 \sim 0.1$) 的 $I-U$ 特性对比

由图 4 可见,随着 In 组分的增加, I_p 出现了先增加后减少的变化,即存在着最佳的 In 组分范围。其原因为:当 In 组分从 0.01 到 0.04 变化时,InGa_N/Ga_N 界面的极化和带阶增加,使得子阱中的分立能级降低,使得双阱中分立能级对准的位置降低并靠近导带底部,由于导带低的电子数量多,引起 I_p 的增加;当组分从 0.05 到 0.1 变化时,此时子量子阱中的分立能级进一步降低,当共振时,对准的分立能级逐渐位于发射极导带以下,此时注入的电子数量不断减少,且 U_p 是出现在子阱分立能级和发射极导带底对准时而不是 2 个分立能级完全对准时,故而 I_p 开始显著降低。由此,In 组分在 0.04~0.05 范围内存在最佳状态。

通过上述分析可见,子阱中分立能级的位置与 NDR 特性有直接关系,子阱宽度也会直接影响器件性能。以 In 组分 0.05 子量子阱结构为基础,研究不同子阱厚度(1 nm,1.5 nm,2 nm,2.5 nm)对器件 NDR 特性的影响,如图 5 所示。可见,随着子阱厚度的增加, I_p 逐渐降低。当子阱厚度很窄时,见图中 1 nm 对应 $I-U$ 曲线,其分立能级并未限制在子阱中,导致子阱只起到了降低发射区势垒高度从而增加 I_p 的作用,隧穿模式并未改变,因此虽然 I_p 很大,但 PVCR 的改变不明显;当子阱厚度过大,子阱中分立能级的位置接近发射极导带底以下,情况类似 In 组分很大的情况,故而 I_p 降低。由上可见,子阱结构可以提升 RTD 的电流特性,且存在最佳的 In 组分和子阱厚度范围。

2.3 非对称势垒 GaN RTD 的直流特性

对于上述子阱结构 RTD,由于 Al_{0.2}Ga_{0.8}N 势垒高度低,因此随着电压持续增加,由于极化效应引起的能带弯曲,使得收集区一侧势垒很快失去阻挡作用而使共振隧穿变为了发射端的单势垒隧穿,阻碍了 PVCR 的进一步提升。为解决这一问题,引入了非对称势垒结构,即通过提高 Al 组分来增加收集区一侧势垒的高度来提升 PVCR。图 6 给出了 Al 组分从 0.3 到 0.4 变化对器件 NDR 特性的影响,可见相较于对称势垒(PVCR=4.05),增加势垒高度使得 PVCR 增加到了 8.62(Al 组分 0.4)。然而,势垒高度并不是越高越好,由于势垒越高对电子阻挡作用越强,会引起 U_p 升高和 I_p 降低。

为了能够减弱势垒高度变化对 I_p 的影响,进一步研究了势垒厚度对上述非对称势垒结构 RTD 性能的影响,目的是通过减小势垒厚度,增加隧穿电流密度,从而使器件在有最佳 PVCR 特性的基础上能够提升 I_p 。图 7 中对比了势垒厚度从 0.5 nm 到 1.5 nm 变化时的 $I-U$ 曲线,可见当势垒厚度为 1 nm 时, $I_p=0.583$ A, $U_p=0.74$ V,PVCR=5.01,相较于子阱结构 RTD($I_p=0.616$ A, $U_p=0.62$ V,PVCR=4.05),实现了 I_p 和 PVCR 的折中优化;而相较于未加子阱的 RTD($I_p=0.42$ A, $U_p=0.54$ V,PVCR=1.25), I_p 和 PVCR 都得到了显著提升。需要注意的是势垒厚度并不是越薄越好,由图可见当势垒厚度为 0.5 nm 时, I_p 和 PVCR 开始下降,这是由于过薄的势垒无法起到阻挡作用进而影响器件的共振隧穿。因此,合理地选取非对称势垒的高度(Al 组分大小)和厚度对于优化子阱结构 RTD 的性能尤为重要。

3 结论

本文研究了 InGa_N 子阱结构及相应非对称势垒结构设计对低势垒 Al_{0.2}Ga_{0.8}N/Ga_N RTD 电流特性的影响。

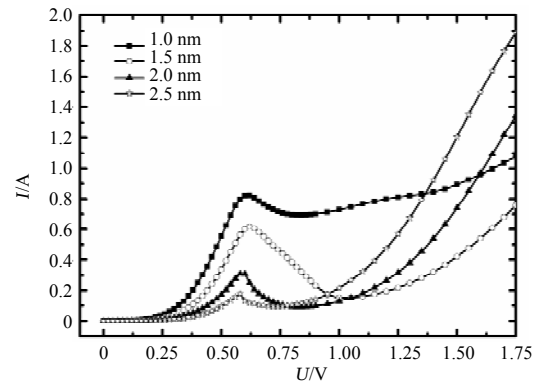


Fig.5 Dependence of $I-U$ characteristics of InGa_N sub-quantum-well RTD on the thickness of sub-quantum-well varies between 1.5 nm and 2.5 nm
图 5 InGa_N 子阱结构 RTD 不同子阱厚度(1.5~2.5 nm)的 $I-U$ 特性对比

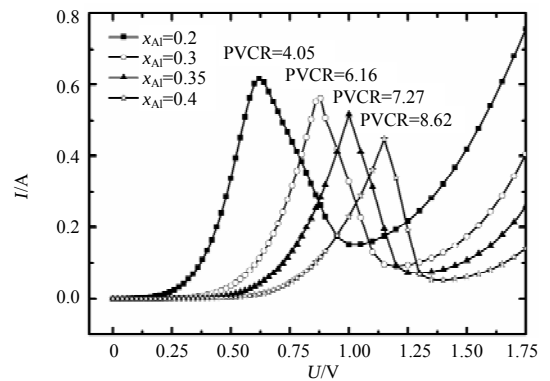


Fig.6 Dependence of $I-U$ characteristics of InGa_N sub-quantum-well RTD on the Al composition of collector barrier ranging from 0.3 to 0.4
图 6 InGa_N 子阱结构 RTD 收集区侧势垒不同 Al 组分(0.3~0.4)的 $I-U$ 特性对比

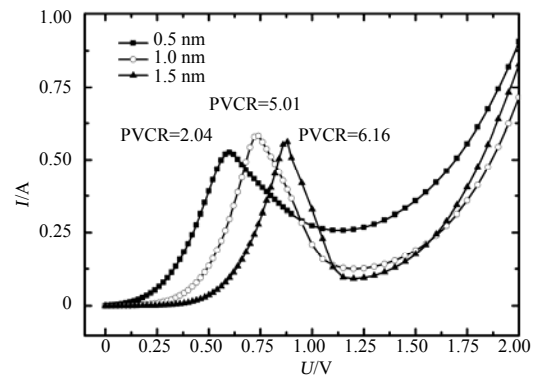


Fig.7 Dependence of $I-U$ characteristics of InGa_N sub-quantum-well RTD on the thickness of collector barrier varying between 0.5 nm and 1.5 nm
图 7 InGa_N 子阱结构 RTD 收集区侧势垒不同厚度(0.5~1.5 nm)的 $I-U$ 特性对比

通过对比分析 RTD 中 InGa_N 子阱的 In 组分和厚度变化对 NDR 特性的影响,得到了提升器件性能的最佳参数范围。为了克服 Al_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN RTD 势垒低对器件 PVCR 和 I_p 的影响,在量子阱结构的基础上引入了非对称势垒结构设计,通过改变收集区侧势垒的高度和厚度,最终,将 AlGa_N/GaN 的 I_p 和 PVCR 由基本结构的 0.42 和 1.25,提高到了 0.583 和 5.01,实现了器件性能优化。由此可见,通过量子阱结构和非对称势垒结构相结合的设计,可以显著改善 GaN RTD 的性能,为今后的器件研制提供了设计思路。

参考文献:

- [1] MAEKAWA T,KANAYA H,SUZUKI S,et al. Oscillation up to 1.92 THz in resonant tunneling diode by reduced conduction loss[J]. Applied Physics Express, 2016,9(2):024101-1-024101-4.
- [2] TERANISHI A,SHIZUNO K,SUZUKI S,et al. Fundamental oscillation up to 1.08 THz in resonant tunneling diodes with high-indium-composition transit layers for reduction of transit delay[J]. IEICE Electronics Express, 2012,9(5):385-390.
- [3] GOLKA S,PFLUGL C,SCHRENK W,et al. Negative differential resistance in dislocation-free GaN/AlGa_N double-barrier diodes grown on bulk GaN[J]. Applied Physics Letters, 2006,88(17):172106-1-172106-3.
- [4] KIKUCHI A,BANNAI R,KISHINO K. AlGa_N resonant tunneling diodes grown by rf-MBE[J]. Physica Status Solidi (A), 2001,188(1):187-190.
- [5] KIKUCHI A,BANNAI R,KISHINO K,et al. AlN/GaN double-barrier resonant tunneling diodes grown by rf-plasma-assisted molecular-beam epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 2002,81(9):1729-1731.
- [6] BAYRAM C,VASHAEI Z,RAZEGHI M. AlN/GaN double-barrier resonant tunneling diodes grown by metal-organic chemical vapor deposition[J]. Applied Physics Letters, 2010,96(4):042103-1-042103-3.
- [7] VASHAEI Z, BAYRAM C, RAZEGHI M. Demonstration of negative differential resistance in GaN/AlN resonant tunneling diodes at room temperature[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(8):083505-1-5.
- [8] BAYRAM C,VASHAEI Z,RAZEGHI M. Room temperature negative differential resistance characteristics of polar III-nitride resonant tunneling diodes[J]. Applied Physics Letters, 2010,97(9):092104-1-3.
- [9] BAYRAM C,VASHAEI Z,RAZEGHI M. Reliability in room-temperature negative differential resistance characteristics of low-aluminum content AlGa_N/GaN double-barrier resonant tunneling diodes[J]. Applied Physics Letters, 2010,97(18):181109-1-3.
- [10] BELYAEV A E,MAKAROVSKY O,WALKER D J,et al. Resonance and current instabilities in AlN/GaN resonant tunnelling diodes[J]. Physica E: low-dimensional systems and nanostructures, 2004,21(2):752-755.
- [11] ZAINAL N,NOVIKOV S V,MELLOR C J,et al. Current-voltage characteristics of zinc-blende (cubic) Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN double barrier resonant tunneling diodes[J]. Applied Physics Letters, 2010,97(11):2102-1-3.
- [12] SAKR S,WARDE E,TCHERNYCHEVA M,et al. Origin of the electrical instabilities in GaN/AlGa_N double-barrier structure[J]. Applied Physics Letters, 2011,99(14):142103-1-3.
- [13] SAKR S,KOTSAR Y,TCHERNYCHEVA M,et al. Resonant tunneling transport in a GaN/AlN multiple-quantum-well structure[J]. Applied Physics Express, 2012,5(5):052203-1-3.
- [14] NAGASE M, TOKIZAKI T. Bistability characteristics of GaN/AlN resonant tunneling diodes caused by intersubband transition and electron accumulation in quantum well[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014,61(5):1321-1326.
- [15] NAGASE M,TAKAHASHI T,SHIMIZU M. Investigating the bistability characteristics of GaN/AlN resonant tunneling diodes for ultrafast nonvolatile memory[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015,54(3):034201-1-8.
- [16] CHEN Haoran,HAO Yue. Influence of InGa_N sub-quantum-well on performance of InAlN/GaN/InAlN resonant tunneling diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2014,116(7):074510-1-7.
- [17] WARDE E,SAKR S,TCHERNYCHEVA M,et al. Vertical transport in GaN/AlGa_N resonant tunneling diodes and super lattices[J]. Journal of Electronic Materials, 2012,41(5):965-970.
- [18] BHOURI A,RACHED A,LAZZARI J L. Resonant tunneling transport in Al_xGa_{1-x}N/In_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N quantum structures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015,48(38):385102.
- [19] YANG Lin'an,LI Yue,WANG Ying, et al. Asymmetric quantum-well structures for AlGa_N/GaN/AlGa_N resonant tunneling diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2016,119(16):164501-1-9.
- [20] AMBACHER O. Polarization Effects in Semiconductors: From Ab Initio Theory to Device Applications[M]. New York: Springer Science and Business Media, LLC, 2008:35-62.

作者简介:



苏娟(1984-),女,内蒙古自治区鄂尔多斯市人,博士,助理研究员,主要研究方向为基于半导体的太赫兹直接产生方法.email: sjbounce@163.com.

谭为(1985-),男,长沙市人,博士,副研究员,主要研究方向为基于微纳结构的电磁波调控、光子晶体-超晶格、半导体器件及器件物理等.

高博(1975-),男,四川省攀枝花市人,博士,副教授,主要研究方向为化合物半导体器件设计.

第八届世界雷达博览会 第九届军民两用电子信息技术展览会

第八届世界雷达博览会暨第九届军民两用电子信息技术展览会邀请函

为贯彻实施军民融合发展国家战略,推动军民融合深入发展,增进国内外雷达领域设计研发和产品制造技术的交流与合作,促进先进雷达技术在增强国防实力、加速军队信息化建设和国民经济建设中的应用,拓展我国雷达系统、装备和技术的出口范围,第八届世界雷达博览会暨第九届军民两用电子信息技术展览会将于2018年6月14日-16日在南京国际展览中心举行。

世界雷达博览会2001年成功举办首届,此后每两年举办一届,影响和展出规模逐届增大,专业观众数量及专业关联度逐届提高,已成为雷达行业国际化科技交流合作与产品展示的重要平台。中国国际军民两用电子信息技术展览会2002年举办,此后每两年举办一届,至今已成功举办了八届。去年在第八届展会中,同期举办了雷达探测技术军民融合创新发展论坛、军民两用电子信息与数据处理技术创新发展论坛等交流活动,获得了业界的良好反响。第八届世界雷达博览会暨第九届军民两用电子信息技术展览会将秉承和发扬历届荣誉传统,精心策划筹备,打造会展优质品牌。

第八届世界雷达博览会暨第九届军民两用电子信息技术展览会拟由中国雷达行业协会,中国电子科技集团公司、中国电子信息产业集团有限公司共同主办。并邀请国内外相关领域有影响力的组织机构和知名厂商参与协办或支持,带来国内外的新型产品与先进技术在本次展览会中与专业观众见面。

诚邀国内相关领域单位报名参展、观展、举办会议和洽谈展会的商务合作。

联系人: 闫瑞华(中国雷达行业协会)

手机: 13801174492 电话/传真: 010-68652457

电子邮箱: 13801174492@sina.com

第八届世界雷达博览会暨第九届军民两用电子信息技术展览会

二〇一七年八月二十八日