

AlGaIn/GaN 基 HBTs 的高频特性模拟*

冉军学 王晓亮 王翠梅 王军喜 曾一平 李晋闽

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 对 n-p-n 型 AlGaIn/GaN 基 HBTs 的高频特性进行了模拟计算, 分析了发射区、基区、集电区的一些材料参数对 n-p-n 型 AlGaIn/GaN 基 HBTs 的高频特性的影响. 发现基区的设计对频率性能影响很大, 减小基区厚度、增大空穴浓度和迁移率将有效提高 HBTs 的频率性能.

关键词: HBTs; AlGaIn/GaN; 截止频率; 最高振荡频率

EEACC: 2530B; 2560J; 2520D

中图分类号: TN325+.3 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0147-04

1 引言

异质结双极晶体管 (heterojunction bipolar transistors, HBTs) 是一种非常重要的大功率高频器件, 它和场效应晶体管相比有许多优点, 比如线性好、阈值均匀性高、功率密度大, 噪音低等, 因此 SiGe 等材料体系的 HBTs 得到广泛深入的研究^[1,2]. 近几年来, 人们对 GaN 基 HBTs 的模拟和制作做了很多努力^[3~7], 由于在材料生长、器件制作等方面存在很多困难, GaN 基 HBTs 的研究仍处于起步阶段. 宽禁带半导体材料 GaN 自身拥有许多优点, 在制作高温高频大功率 HBTs 器件有很大潜力, 因此值得深入研究.

本文采用典型的 n-p-n 型 AlGaIn/GaN HBTs 结构, 对其高频特性进行了模拟计算, 并对器件结构、材料性能对 HBTs 器件性能的影响作了预测和分析; 通过计算和分析, 对 n-p-n 型 AlGaIn/GaN HBTs 的器件设计和具体实验有一定的指导作用.

2 器件结构与计算公式

采用的器件为 n-p-n 型 AlGaIn/GaN 结构, 其中发射区采用 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$, 电子浓度为 2×10^{18}

cm^{-3} , 发射区帽层电子浓度为 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 的 n^+ -GaIn, 两者的厚度分别为 150nm 和 100nm; 基区 p-GaN 厚 100nm, 空穴浓度为 $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$; 集电区和次集电区分别采用电子浓度为 3×10^{16} 和 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、厚度均为 1000nm 的 GaIn, 在一些情况下某些参数为变量. 发射极、集电区接触电极宽度均为 $2 \mu\text{m}$, 基极电极宽度为 $1 \mu\text{m}$, 与发射极、集电区接触电极的垂直距离分别为 $0.2 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$, 电极长度均为 $20 \mu\text{m}$. 电流增益截至频率 f_T 由电子在各区中渡越时间来决定^[8,9],

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}} \quad (1)$$

τ_{ec} 表示电子从发射区到集电区的渡越时间,

$$\tau_{ec} = \frac{\eta kT}{qI_C} (C_{je} + C_{jc}) + \frac{X_B^2}{\nu D_{nB}} + \frac{X_{depC}}{2v_{sat}} + (R_E + R_C)C_{jc}$$

其中 C_{je} 表示发射结电容; C_{jc} 表示集电结电容; X_B 表示基区厚度; ν 表示基区渡越系数; D_{nB} 表示电子在基区的扩散系数; X_{depC} 表示集电区耗尽层厚度; R_E 表示发射区总电阻; R_C 表示集电区总电阻. 最高振荡频率

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_B C_{jc}}} \quad (2)$$

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: G20000683, 2002CB311903) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2002AA305304) 资助项目

冉军学 男, 1975 年出生, 博士研究生, 目前从事 GaIn 基材料与器件研究.

王晓亮 男, 1963 年出生, 博士, 研究员, 博士生导师, 目前主要从事氮化物材料、物理与器件研究.

2004-09-06 收到, 2004-12-18 定稿

其中 R_B 表示基区总电阻. 在计算时, 三元合金的带宽、介电常数和有效质量采用 Vegard 定律得出; 电子在 n^+ 发射区和 p^- 型基区中的迁移率分别取值为 800 和 $400\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; 空穴迁移率为 $10\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$; GaN/AlGaN 异质结的带偏比 Q_C 取值为 0.7 ; 欧姆接触电阻率取值为 $5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$.

3 分析与讨论

由公式(1)得知电流增益截止频率与电子从发射区到集电区的渡越时间 τ_{ec} 成反比, 采用前面所述的结构, 计算得出电子在发射区的渡越时间约为 0.67ps , 在基区的渡越时间为 4.2ps , 集电区电容的充电时间为 0.4ps , 在集电区的渡越时间为 1.2ps , 从以上数据得出电子在基区的渡越时间占整个渡越时间的 60% 以上, 因此减小电子在基区渡越时间是提高截止频率关键因素. 图 1(a) 是基区厚度与截止频率的关系曲线, 基区厚度取 50nm 时, 截止频率 f_T 约为 47GHz , 当基区厚度增大到 150nm 时, f_T 减少到 12GHz , 基区厚度对截止频率的影响很大.

图 1(b) 是集电区厚度与截止频率的关系曲线, 厚度增大将增大集电区电容的充电时间, 使截止频率变小; 集电区厚度取 50nm 时, 截止频率 f_T 约为 24GHz , 厚度增大到 1750nm 时, f_T 减少到 21GHz , 影响较小. 从图 1(b) 中还得出, 当基极-集电极偏压由 3V 变为 10V 时, 集电区厚度对截止频率的影响变小. 因此集电区厚度应由集电结击穿电压的要求决定.

图 2(a) 是发射区掺杂浓度与截止频率的关系曲线, 提高掺杂浓度将降低发射区电阻, 从而减少电子在集电区的渡越时间; 同时掺杂浓度增大将增大发射结电容, 从而增大了电子在集电区的渡越时间, 两者相互作用总体上使 f_T 随掺杂浓度的增大而缓慢降低; 发射区掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 时, f_T 约为 23GHz , 掺杂浓度增大到 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 时, f_T 减小为 20GHz . 图 2(b) 是集电区掺杂浓度与截止频率的关系曲线, 集电区掺杂浓度的变化主要对集电区电阻 R_C 、基集结电容 C_{jC} 和集电区耗尽层厚度 X_{depC} 等有影响; 集电区掺杂浓度增大, 电子渡越集电区的时间减少, 同时由于集电结电容增大将增大电子在发射区的渡越时间和集电区电容的充电时间, 共同作用的结果使集电区掺杂浓度从 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 增大到 1

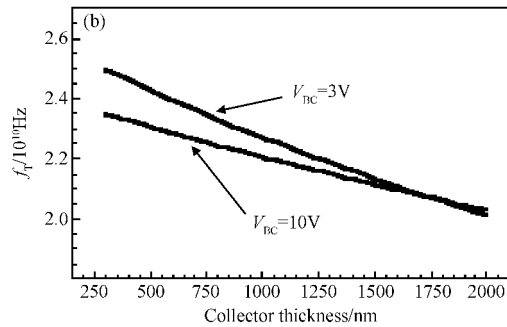
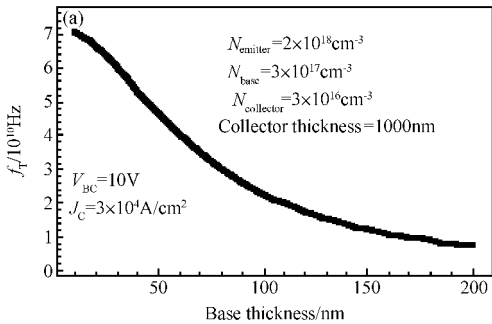


图 1 截止频率与基区厚度、集电区厚度的关系曲线

Fig. 1 Cutoff frequency f_T as functions of base thickness (a) and collector thickness (b)

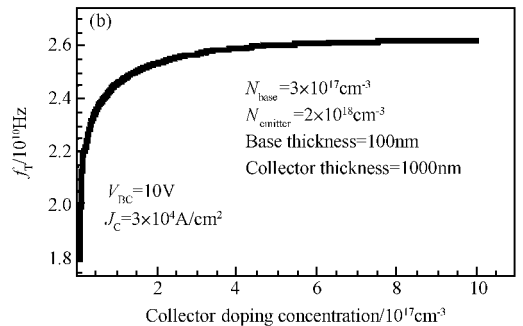
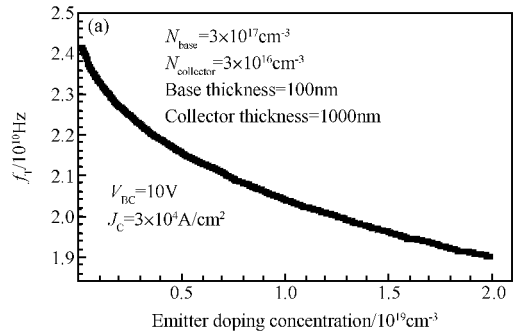


图 2 截止频率与发射区、集电区掺杂浓度的关系曲线

Fig. 2 Cutoff frequency f_T as functions of emitter (a) and collector (b) doping concentration

$\times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,截止频率 f_T 仅从约 22GHz 增大到 25GHz,可看出集电区掺杂浓度对截止频率的影响很小。

图 3(a)是基区厚度与最高振荡频率 f_{MAX} 的关系曲线,图中 f_{MAX} 曲线出现了一个峰值,说明基区太薄或太厚都将降低最高振荡频率特性。在峰值以前,随着基区厚度的增大,因 R_B 减小造成 f_{MAX} 增大的程度大于因 f_T 减小造成 f_{MAX} 减小的程度,因此 f_{MAX} 随基区厚度的增大而增大;在峰值以后则相反,随着基区厚度的增大,因 R_B 减小造成 f_{MAX} 增大的程度小于因 f_T 减小造成的 f_{MAX} 减小的程度,因此 f_{MAX} 随基区厚度的增大而减小。据计算,基区厚度约为 20nm 时, f_{MAX} 约为 1.3GHz;基区厚度约为 70nm 时, f_{MAX} 达到最大值约为 2.1GHz;基区厚度约为 500nm 时, f_{MAX} 约为 0.9GHz。基区中空穴浓度对最高振荡频率也有非常显著的影响,它通过影响基区电阻而影响 f_{MAX} 。图 3(b)是基区空穴浓度与最高振荡频率的关系曲线, f_{MAX} 随着空穴浓度的增大而增大,当空穴浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时, f_{MAX} 约为 0.95GHz;当空穴浓度增加到 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, f_{MAX} 增大到 3.6GHz。从计算中还得出,当空穴浓度增加到 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 迁移率提高到 $30 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 时,

f_{MAX} 可达到 15GHz 左右。因此提高 p 型基区受主 Mg 原子的激活率和增大空穴迁移率对提高大功率器件的频率性能有重要意义。

4 结论

采用典型的 n-p-n 型 AlGaIn/GaN HBTs 结构,对此结构的高频特性进行了模拟计算,分析了各层材料性能对 n-p-n 型 AlGaIn/GaN 基 HBTs 的高频特性的影响,基区厚度对截止频率的影响非常显著,基区厚度取 50nm 时,截止频率 f_T 约为 47GHz,当基区厚度增大到 150nm 时, f_T 减少到 12GHz;截止频率随发射区掺杂浓度的增大而降低,随着集电区厚度的增大而缓慢减小,随集电区掺杂浓度的增大而缓慢增大;基区太薄或太厚都将降低最高振荡频率特性,随着空穴浓度和迁移率的增大最高振荡频率也将增大。

参考文献

- [1] Schroter M, Tran H, Kraus W. Germanium profile design options for SiGe LEC HBTs. *Solid-State Electron*, 2004, 48: 1133
- [2] Zhao Lixin, Shen Guangdi. Analyze and simulation of high frequency performance of SiGe HBTs. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(6): 468 (in Chinese) [赵立新, 沈光地. SiGe HBTs 高频特性模拟分析. *半导体学报*, 1999, 20(6): 468]
- [3] Pulfrey D L, Fathpour S. Performance predictions for n-p-n $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ HBTs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48: 597
- [4] Lee K P, Ren F, Pearton S J, et al. Effects of base structure on performance of GaN-based heterojunction bipolar transistors. *Solid-State Electron*, 2003, 47: 1031
- [5] Han J, Baca A G, Shul R J, et al. Growth and fabrication of GaN/AlGaIn heterojunction bipolar transistor. *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 2702
- [6] Ren F, Han J, Hickman R, et al. GaN/AlGaIn HBT fabrication. *Solid-State Electron*, 2000, 44: 239
- [7] Makimoto T, Kumakura K, Kobayashi N. High current gain (>2000) of GaN/InGaIn double heterojunction bipolar transistors using base regrowth of p-InGaIn. *Appl Phys Lett*, 2003, 83: 1036
- [8] Liu W. *Handbook of III-V heterojunction bipolar transistors*. New York, John Wiley & Sons, 1998
- [9] Yuan J S. *SiGe, GaAs, and InP heterojunction bipolar transistors*. New York, John Wiley & Sons, 1999

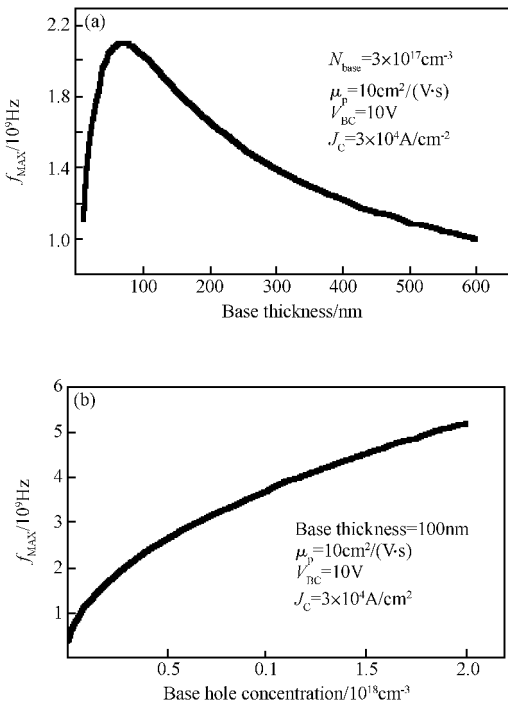


图 3 基区厚度和空穴浓度对最高振荡频率的影响

Fig. 3 Effects of base thickness (a) and base hole concentration (b) on maximum oscillation frequency f_{MAX}

Simulation on High-Frequency Performance of AlGaIn/GaN HBTs*

Ran Junxue, Wang Xiaoliang, Wang Cuimei, Wang Junxi, Zeng Yiping, and Li Jinmin

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The frequency performance of n-p-n AlGaIn/GaN heterojunction bipolar transistors (HBTs) is calculated. The effects of some material parameters of the emitter, base and collector on the frequency performances of n-p-n AlGaIn/GaN HBTs are also investigated. It indicates that the frequency characters are mainly influenced by base designs. The frequency will be effectively improved by reducing the resistivity, increasing the hole concentration and mobility of the base.

Key words: heterojunction bipolar transistors; AlGaIn/GaN; cutoff frequency; maximum oscillation frequency

PACC: 2530B; 2560J; 2520D

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0147-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Nos. G20000683, 2002CB311903) and the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA305304)

Ran Junxue male, was born in 1975, PhD candidate. His research interests focus on GaN materials and related devices.

Wang Xiaoliang male, was born in 1963, PhD, professor. His research interests focus on nitride materials, physics, and related devices.

Received 6 September 2004, revised manuscript received 18 December 12

©2005 Chinese Institute of Electronics