

异质结界面电荷对突变 InP/InGaAs 异质结双极晶体管热场发射影响研究*

周守利[†] 李伽 任宏亮 温浩 彭银生

(浙江工业大学信息学院, 310023 杭州)

(2013年3月25日收到; 2013年5月22日收到修改稿)

异质结界面电荷的存在改变了异质结的内建势, 这引起了界面势垒尖峰高度和形状的扰动, 从而使异质结界面载流子的输运产生相应的变化, 最终导致异质结双极晶体管 (HBT) 性能的改变. 基于热场发射-扩散模型, 对异质结界面电荷对 InP/InGaAs HBT 性能的改变做了研究, 得出结论是正极性的界面电荷有利于 InP/InGaAs HBT 的直流和高频特性的改善, 而负极性的界面电荷则使器件的直流和高频特性变差.

关键词: InP/InGaAs 异质结双极晶体管, 界面电荷, 内建势, 热场发射

PACS: 85.30.Pq, 85.30.De

DOI: 10.7498/aps.62.178501

1 引言

突变异质结在导带和价带上具有不连续性, 这种不连续性造成突变异质结界面上存在势垒尖峰, 载流子在势垒尖峰上的输运可由热场发射模型来描述, 这种模型的载流子输运机理包含两部分, 1) 能量较高的载流子直接越过势垒的热发射, 相应的电流为热发射电流; 2) 量子力学效应引起的穿透势垒尖峰的隧道效应, 相应的电流为隧道电流. 异质结双极晶体管 (HBT) 外延材料设计过程中, 通常为了防止重掺杂的基区和低掺杂的发射区造成的异质结界面的移位而在突变交界面生长一超薄的 δ 缓冲层^[1-3], 这种 δ 缓冲层可以人为的掺杂一些电荷, 掺杂电荷将使异质结界面势垒的形状和高度发生变化, 导致热发射电流和隧道电流发生改变, 从而影响器件的直流和高频性能^[3,4].

迄今为止, 器件氧化物表面面电荷对 HBT 器件性能影响研究有不少^[5-7], 但对异质结交界面存在的面电荷对 HBT 器件性能的改变的研究并不多, Fuente 对异质结界面电荷对 GaAs 基 HBT 器件性

能影响问题有过研究, 但并没有结合载流子输运机理方面去分析, 且只局限于器件的直流特性方面^[8].

本文基于热场发射-扩散模型, 研究了异质结界面电荷对 InP/InGaAs HBT 器件直流和高频特性的影响.

2 热场发射-扩散模型

在突变异质结界面处 ($x = x_j$), 载流子输运的热场发射模型给出突变界面电流方程为^[9]

$$J_{n,i} = -q \frac{V_n}{4} \left[n_E(x_n) \exp\left(-\frac{qV_N}{kT}\right) - n_B(x_p) \exp\left(\frac{qV_P}{kT}\right) \right] \cdot (1 + \delta_n), \quad (1)$$

上式中 V_n, V_p 的表达式分别为

$$V_n = \frac{N_A \epsilon_B (V_{bi} - V_{BE})}{N_A \epsilon_B + N_D \epsilon_E}, \quad (2)$$

$$V_p = \frac{N_D \epsilon_E (V_{bi} - V_{BE})}{N_A \epsilon_B + N_D \epsilon_E}. \quad (3)$$

* 浙江省自然科学基金 (批准号: LY12F04003) 和信息功能材料国家重点实验室 2009 开放基金 (批准号: FMI2009-08) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhoushl@zjut.edu.cn

隧穿因子 δ_n 为

$$\delta_n = \frac{\exp\left(\frac{E_c(x_j^-)}{kT}\right)}{kT} \int_{E_{\min}}^{E_c(x_j^-)} \exp\left(-\frac{E_x}{kT}\right) \cdot \exp\left(-\frac{4\pi}{h} \int_{x_E}^{x_j} \{2m_n^*[E_c(x) - E_x]\}^{1/2} dx\right) \times dE_x. \quad (4)$$

图 1 给出了突变 HBT 的典型能带图, 可以看出 qV_N 即为载流子热发射需要克服的势垒高度, 其体现在电流计算 (1) 式的指数项中, 因此热发射电流与内建势成指数变化关系, 而体现隧道电流的隧穿因子 δ_n 则在电流计算 (1) 式的系数项上.

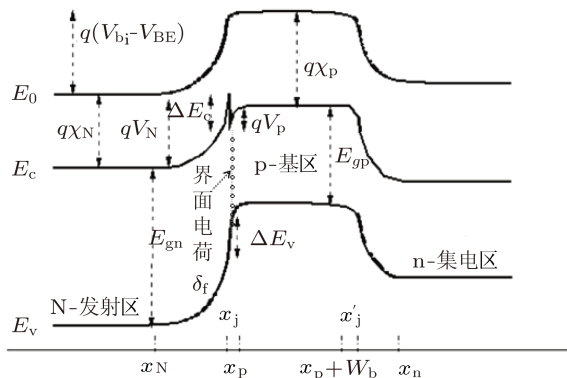


图 1 突变 HBT 典型能带图

在准中性体区域内由扩散模型确定的电子电流为

$$J_n = -q\mu_n n \nabla \Phi_n. \quad (5)$$

文献 [10] 利用上述热场发射-扩散载流子输运模型推导出了 HBT 发射区电流 J_e , 基区电流 J_b 和集电区电流 J_c 计算公式, 文献 [11] 验证了该计算模型对于 InP 基 HBT 的准确性, 在异质结界面存在面电荷下, 计算模型需要考虑电位移矢量 D 不再连续的边界条件

$$\epsilon_E \frac{d\phi}{dx} \Big|_{x=x_j^-} - \epsilon_B \frac{d\phi}{dx} \Big|_{x=x_j^+} = \delta_f. \quad (6)$$

计算中考虑了基区重掺杂的载流子 Fermi-Dirac 统计和禁带变窄效应 (BGN)^[12], 对于 BGN, 采用的是 Jain-Roulston 模型^[13].

3 模拟结果与讨论

HBT 器件材料外延生长和工艺制备过程中, 由于应变、位错或者杂质等因素可以使异质交界

面存在的面电荷数量级最大范围在 $10^{11} - 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 内^[8,14-16], 因此计算中考虑 EB 异质结界面处面电荷数量分别为 $\delta_f = -3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 0 , $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 三种不同情况. 模拟计算用的突变 InP/InGaAs HBT 器件结构是这样的: 发射区 InP 厚度 150 nm, 掺杂 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; 基区 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 厚度 100 nm, 掺杂 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; 集电区 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 厚度 500 nm, 掺杂 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

从表 1 可以看出, 异质结界面电荷 $\delta_f = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 HBT 内建势 V_{bi} 有所减少, 而 $\delta_f = -3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 HBT 内建势 V_{bi} 有所增大, 这是由于正极性界面电荷等效的偶极子形成的电场与异质结自建电场方向相反, 而负极性界面电荷等效的偶极子电场与异质结自建电场方向相同^[14]. 从图 2 可以看出, 异质结界面电荷 $\delta_f = -3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 HBT 隧穿因子最大, 而 $\delta_f = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 HBT 隧穿因子最小.

表 1 异质结不同界面电荷下的 V_{bi}

界面电荷 δ_f/cm^{-2}	内建势 V_{bi}/V
3×10^{12}	0.9140
0	1.0266
-3×10^{12}	1.1494

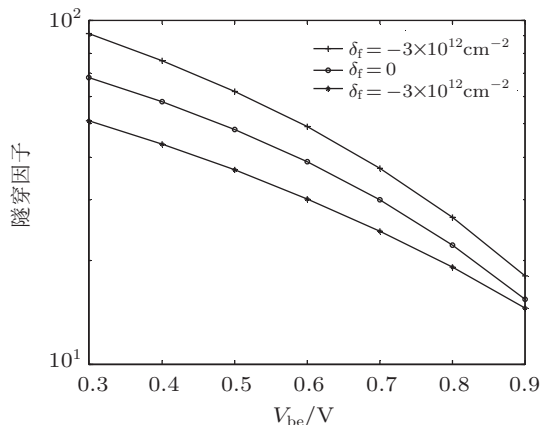


图 2 异质结不同界面电荷下隧穿因子 δ_n 随偏压 V_{be} 的变化关系

图 3 给出了异质结界面电荷 $\delta_f = -3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 0 , $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 三种情况下的 InP/InGaAs HBT 的 Gummel 特性, 可以看出, 具有正极性界面电荷的 HBT 的 J_b , J_c 电流最高, 具有负极性界面电荷的 HBT 的 J_b , J_c 最低, 这是由于: $\delta_f = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的内建势 V_{bi} 有所降低, 因此热发射电子需要克服的势垒高度 qV_N 下降了, 从而

有更多数量的电子通过热发射方式进入基区; 同样 $\delta_f = -3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 内建势 V_{bi} 有所增大, 因此热发射电子需要克服的势垒高度 qV_N 提高了, 从而有更少数量的电子通过热发射方式进入基区. 虽然势垒高度 qV_N 提高的同时隧道效应发生区域也在增大, 因而 $\delta_f = -3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 情况下有最大的隧穿因子, 但电流特性却是最差的, 这是由于内建势的变化引起势垒高度的改变对热发射电流的影响反映在指数项, 而隧道电流的影响则在系数项上. 正是由于正极性界面电荷 $\delta_f = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 HBT 热发射电流的增大量远大于隧道电流的减少量, 因而有更高的输出电流. 由于低的 V_{be} 偏压下, 体现热发射电流的指数因子比较大, 因而在较低的 V_{be} 偏压下, 这种差异达到近 2 个数量级, 随着 V_{be} 偏压不断接近内建势, 势垒高度越来越平坦, 差异越来越小. 同样, 图 4 可以看出正极性异质结界面电荷 $\delta_f = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 InP/InGaAs HBT 的共射输出特性最好; 而负极性界面电荷 $\delta_f = -3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 InP/InGaAs HBT 的共射输出特性最差.

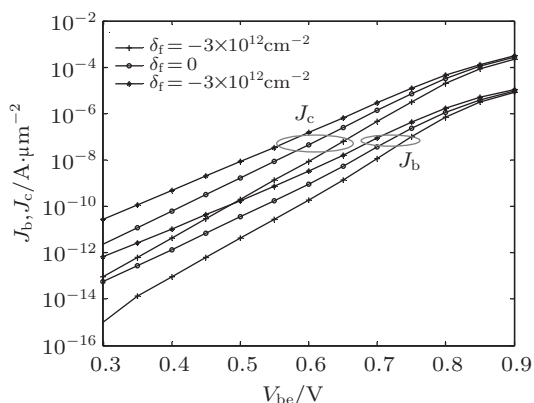


图3 异质结不同界面电荷下突变 InP/InGaAs HBT 的 Gummel 图

由于热发射载流子速度更快, 因此具有更多数量的热发射电子的正极性界面电荷 $\delta_f = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 HBT 高频特性最好, 而热发射电流少的 $\delta_f = -3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 HBT 高频特性最差,

图 5 的 HBT 截止频率计算结果表明了这点.

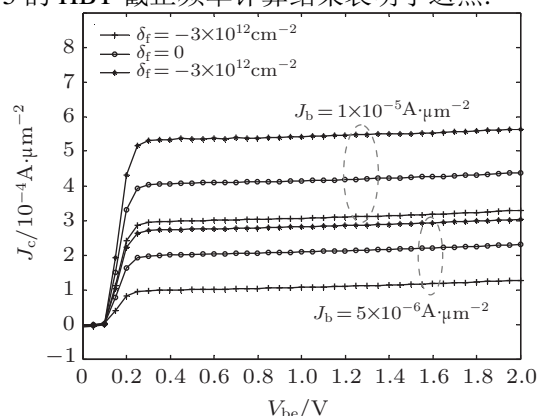


图4 异质结不同界面电荷下突变 InP/InGaAs HBT 共射输出特性

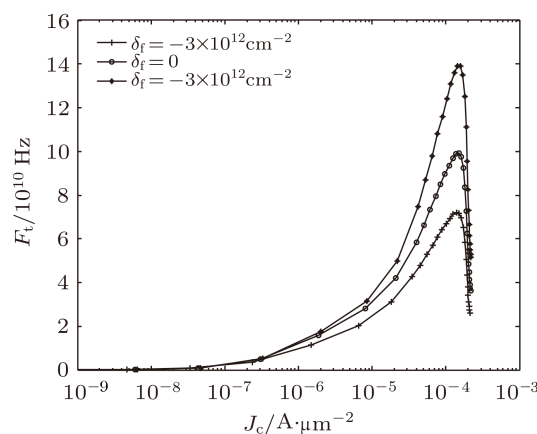


图5 异质结不同界面电荷下突变 InP/InGaAs HBT 高频特性

4 结论

异质结界面电荷使载流子热发射和隧道贯穿的能力均发生了变化, 从而引起了突变 HBT 直流和 高频特性的改变, 结论表明: 由于异质结界面电荷正负极性的不同对于自建电场的影响不一样, 因此界面电荷极性的不同引起性能变化存在很大的差异, 正极性电荷可使突变 N_{pn} HBT 的直流和 高频特性均得到改善, 而负极性电荷则使器件的性能 变差. 文中得到的结论对于器件外延生长和优化设计 具有较重要的意义和应用价值.

[1] Cui H L, Ren X M, Huang H 2012 *Journal of Optoelectronics Laser* **23** 1067 (in Chinese) [崔海林, 任晓敏, 黄辉 2012 光电子·激光 **23** 1067]
 [2] Xu A H, Zou L, Chen X J, Qi M 2004 *Chinese Journal of Rare Metals* **28** 516 (in Chinese) [徐安怀, 邹璐, 陈晓杰, 齐鸣 2004 稀有金属 **28** 516]
 [3] Jung H T, Wen S L, Chao Y T, Ye S S, Ma Y C, Zhou J C, Wu Y R,

Ouyang J J 2012 *Thin Solid Films* **521** 172
 [4] Liu H G, Jin Z, Su Y B, Wang X T, Chang H D, Zhou L, Liu X Y, Wu D X 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 058502
 [5] Chen T P, Lee C J, Chen L Y, Tsai T H, Liu Y J, Huang C C, Chen T Y, Cheng S Y, Liu W C 2009 *Superlattices and Microstructures* **46** 715
 [6] Eladl S M 2008 *Microelectronics Journal* **39** 1649
 [7] Gourab D, Sukla B 2012 *Journal of semiconductors* **33** 054002

- [8] Fuente J G, Viktor K 2002 *Solid-State Electronics* **46** 1273
- [9] Yang K, East J R, Haddad G I 1994 *IEEE Trans Electron Devices* **41** 138
- [10] Zhou S L, Ren X M 2008 *Journal of Semiconductors* **29** 741 (in Chinese) [周守利, 任晓敏 2008 半导体学报 **29** 741]
- [11] Zhou S L, Yang W C, Ren H L, Li J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 128501 (in Chinese) [周守利, 杨万春, 任宏亮, 李伽 2012 物理学报 **61** 128501]
- [12] Zhang Y R, Zhang B, Li Z J, Deng X C 2010 *Chin. Phys. B* **19** 067102
- [13] Jain S C, Roulston D J 1991 *Solid-State Electronics* **34** 453
- [14] Leeor K, Yoram S 1999 *Surface Science Reports* **37** 1
- [15] Se W K, Kang S R, Seung H S, Kwan Y K, Gu C K, Lee S Y, Chang M C, So R P, Jun H P, Ki C C, Song K J, Kim D H, Dong M K 2008 *Microelectronics Reliability* **48** 382
- [16] Kaipa P K, Amitava D 1998 *Solid-State Electronics* **42** 1779

The impact of interface charges at the heterojunction on the carriers transport in abrupt InP/InGaAs heterojunction bipolar transistor*

Zhou Shou-Li[†] Li Jia Ren Hong-Liang Wen Hao Peng Yin-Sheng

(College of information engineering, Zhejiang Univ. of Technology, Hangzhou 310023, China)

(Received 25 March 2013; revised manuscript received 22 May 2013)

Abstract

The carriers transport at the base-emitter interface of abrupt heterojunction bipolar transistors (HBTs) is controlled by thermionic emission and tunneling, which depends on the form and height of the energy barriers. The interface charges at the heterojunction disturb the energy barriers, thus bringing about the change of the electrical characteristics of HBT. Based on thermionic-field-diffusion model which combines the drift-diffusion transport in the bulk of the transistor with the thermionic emission and tunneling at the interface, a conclusion can be drawn that the positive interface charges can improve the electrical characteristics of abrupt InP/InGaAs HBT, while the negative interface charges deteriorate the devices.

Keywords: InP/InGaAs HBT, interface charges, built-in potential, thermionic emission and tunneling

PACS: 85.30.Pq, 85.30.De

DOI: 10.7498/aps.62.178501

* Project supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LY12F04003), and the Open Fund of State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. FMI2009-08).

[†] Corresponding author. E-mail: zhoushl@zjut.edu.cn