

# 基区重掺杂突变 HBT 带阶的扰动对电流影响研究 \*

周守利<sup>1)</sup> 黄 辉<sup>2)</sup> 黄永清<sup>2)</sup> 任晓敏<sup>2)</sup>

1) 浙江工业大学信息学院, 杭州 310014)

2) 北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876)

(2006 年 8 月 17 日收到 2006 年 9 月 29 日收到修改稿)

重掺杂禁带变窄效应引起异质结导带、价带带阶的扰动, 从而使突变 HBT 异质结界面势垒的形状和高度发生了变化。这将对电流传输特性产生重要的影响。基于热场发射-扩散模型, 对这一现象进行了深入的研究。得到的结论是: 异质结界面势垒的扰动引起内建势的变化对电流影响的重要性远大于其引起隧道效应发生区域的变化, 这是由于内建势的变化对电流的影响反映在指数项。因此对于突变 HBT, 精确考虑禁带变窄在导带与价带之间的分布对于器件性能的分析是非常重要的。

关键词: HBT, 能带带阶, 内建势, 隧穿因子

PACC: 7280E, 7340L, 7360L

## 1. 引言

异质结界面能带突变量, 即导带带阶  $\Delta E_c$  和价带带阶  $\Delta E_v$ , 是表征异质结性质的重要物理量, 对异质结的应用有着很重大的影响<sup>[1,2]</sup>。对于异质结双极晶体管(HBT)的设计, 为了改善器件的高频性能, 基区通常重掺杂, 而重掺杂必然引起导带、价带的收缩, 从而发生器件的禁带变窄效应(band gap narrowing, BGN), 因而这导致  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$  产生相应的扰动。在突变 HBT 中,  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$  的变化影响着异质结界面的载流子输运机理, 进而对电流传输特性产生重要的影响。

虽然国内外对重掺杂 BGN 效应引起突变 HBT 性能改变的研究有不少, 但绝大部分只反映在 BGN 引起体内本征载流子浓度参数( $n_i$ )变化这一点上, 而牵涉到 BGN 效应引起  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$  的扰动从而对电流产生影响的研究却不多, 并且价格昂贵的商业软件的 BGN 模型也存在着这种不足<sup>[3,4]</sup>。

本文基于热场发射-扩散(thermionic-field-diffusion)载流子输运模型, 对基区重掺杂 AlGaAs/GaAs HBT 的 BGN 效应引起  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$  的变化对电流传输影响的重要性进行了深入地研究。

## 2. 热场发射-扩散输运模型

在突变异质结中, 由于界面处存在势垒尖峰, 此时势垒处热载流子发射过程和穿透势垒尖峰的隧道效应对突变异质结界面处的载流子注入起决定作用。因此, 本文对于载流子的输运, 在突变界面处采用热场发射模型, 而对除去突变界面的体区域内采用漂移-扩散模型。

根据热场发射-扩散模型, 在突变异质结界面处( $x = x_j^-$ ), 考虑热电子发射和穿透势垒尖峰的隧道效应, 则作为边界条件的界面电子电流可以表示成为<sup>[5]</sup>

$$J_{n,i} = -q \frac{v_n}{4} \left[ n(x_j^-) - n(x_j^+) \right] \exp\left(-\frac{\Delta E_c}{kT}\right) \cdot (1 + \delta_n), \quad (1)$$

其中  $v_n$  是电子平均热运动速度;  $\delta_n$  为隧穿因子, 体现 Npn 晶体管隧道效应对电子电流的贡献, 其表达式为

$$\delta_n = \frac{\exp\left(\frac{E_c(x_j^-)}{kT}\right)}{kT} \int_{E_{min}}^{E_c(x_j^-)} \exp\left(-\frac{E_x}{kT}\right)$$

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(批准号 2003CB314901)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号 20020013010)资助的课题。

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

式中  $m_n^*$  为电子有效质量,  $E_x$  是  $x = x_E$  ( $x_N \leq x_E \leq x_j$ ) 位置处导带能量值,

$$E_{\min} = \max[E_c(x_N), E_c(x_j^+)].$$

$n(x_j^-)$  和  $n(x_j^+)$  是紧邻界面( $x_j$ )两侧的电子浓度, 分别为

$$n(x_j^-) = n_E(x_N) \exp\left(-\frac{qV_N}{kT}\right), \quad (3)$$

$$n(x_j^+) = n_B(x_p) \exp\left(\frac{qV_p}{kT}\right). \quad (4)$$

(3)(4) 式中  $V_N$  和  $V_p$  的表达式为

$$V_N = (1 - \xi)(V_{bi} - V_{BE}), \quad (5)$$

$$V_p = \xi(V_{bi} - V_{BE}), \quad (6)$$

其中  $\xi = \frac{N_D \epsilon_E}{N_A \epsilon_B + N_D \epsilon_E}$ ,  $V_{bi}$  为 EB 结耗尽层内建势,

其值可表示为<sup>[6]</sup>

$$V_{bi} = \frac{E_{gB} + \Delta E_c - \psi_N - \psi_p}{q}, \quad (7)$$

而  $\psi_N$ ,  $\psi_p$  分别为 n 掺杂、p 掺杂的半导体在中性区域内的准费密能级与导带底、价带顶的间距。

从(1)式可以看出,  $V_{bi}$  对电流的影响表现在指数项上,  $\delta_n$  则在系数上。

电子在准中性体区域内的电流由漂移-扩散模型确定, 为

$$J_n = -q\mu_n n \nabla \Phi_n, \quad (8)$$

其中  $\Phi_n$  为电子准费密势, 计算中采用 Fermi-Dirac 统计以考虑载流子的简并效应。

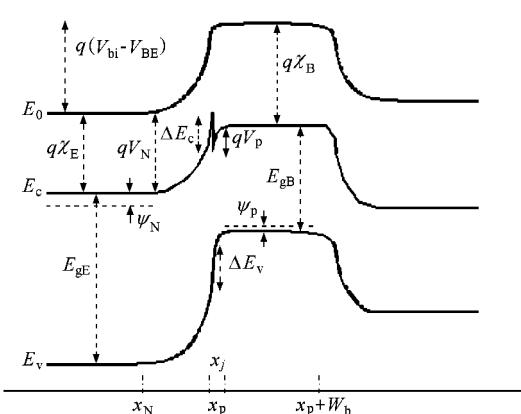


图 1 突变 HBT 典型能带图

穴隧道效应可忽略, 只考虑热发射。

图 1 给出了突变 HBT 的典型能带图。

### 3. 基区重掺杂对载流子传输的影响

对于基区重掺杂 Npn 突变 AlGaAs/GaAs HBT, BGN 引起带阶  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$  的扰动, 这必然使突变界面势垒形状及高度发生了改变, 进而使热电子发射、隧道效应发生的大小受到影响, 最终引起电流输运特性的变化。

#### 3.1. 基区重掺杂对 $\Delta E_c$ , $\Delta E_v$ 和 $n_i$ 的修正

考虑基区重掺杂 BGN 效应后, 异质结界面能带带阶  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$  应分别表示为

$$\Delta E_c = E_c(x_j^-) - E_c(x_j^+) = \Delta E_{c0} + \Delta E_{cB}^{bgn}, \quad (9)$$

$$\Delta E_v = E_v(x_j^-) - E_v(x_j^+) = \Delta E_{v0} + \Delta E_{vB}^{bgn}, \quad (10)$$

其中  $\Delta E_{c0}$  和  $\Delta E_{v0}$  分别是轻掺杂浓度下的导带带阶和价带带阶,  $\Delta E_{cB}^{bgn}$  和  $\Delta E_{vB}^{bgn}$  分别是 BGN 效应引起的导带带边和价带带边相应的收缩量。

显然重掺杂的基区总禁带变窄量为

$$\Delta E_{gB}^{bgn} = \Delta E_{cB}^{bgn} + \Delta E_{vB}^{bgn}. \quad (11)$$

对于 p-GaAs 重掺杂禁带变窄  $\Delta E_{gB}^{bgn}$  及其在导带、价带上的分配  $\Delta E_{cB}^{bgn}$ ,  $\Delta E_{vB}^{bgn}$  与掺杂浓度的关系采用的是 Jain-Roulston 模型<sup>[7]</sup>, 该模型与实验测验非常符合<sup>[7-10]</sup> 结果如图 2 所示。

在考虑 BGN 效应后, 基区本征载流子浓度应表示为<sup>[7]</sup>

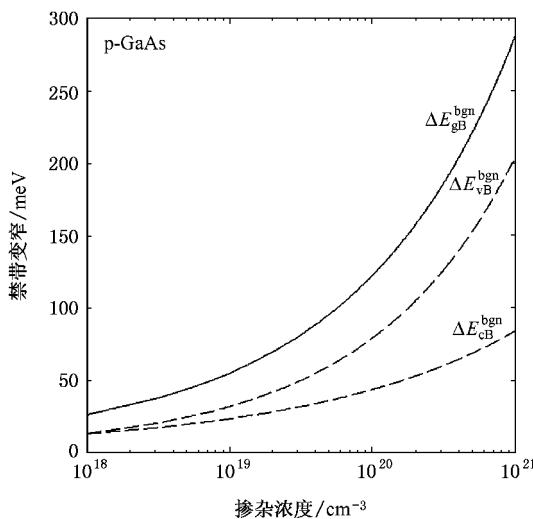
$$n_{iB}^2 = pn = n_{i0}^2 \cdot e^{\frac{\Delta E_{gB}^{bgn}}{kT}} \cdot \frac{F_{1/2}\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right)}{\exp(E_v - E_F/kT)}, \quad (12)$$

其中  $n_{i0}$  为没有考虑重掺杂时基区本征载流子浓度值, 最后一项计入了 Fermi-Dirac 统计以考虑载流子的简并效应。

#### 3.2. 带阶 $\Delta E_c$ 和 $\Delta E_v$ 的扰动对热场发射的影响

为了证明 BGN 引起  $\Delta E_c$  和  $\Delta E_v$  的扰动对电流影响的重要性, 除了 BGN 在能带上精确分布的 Jain-Roulston 模型外, 我们还考虑了其他三种商业软件常用的 BGN 的近似分布模型的计算, 以作为比较。1) 只考虑多子带边收缩情况<sup>[11]</sup>; 即对于 p-GaAs, 考虑禁带变窄量全部贡献于价带突变量  $\Delta E_v$  情况。2) 多

空穴的电流表达式可类似表出, 所不同的是空

图 2 p-GaAs 基区禁带变窄  $\Delta E_{\text{BGN}}^{\text{bgn}}$  及其在导带、价带中的分布 $\Delta E_{\text{cBGN}}^{\text{bgn}}$ 、 $\Delta E_{\text{vBGN}}^{\text{bgn}}$  与掺杂浓度的关系

子、少子带边收缩比  $1:1^{[12]}$ , 即考虑禁带变窄量平均分配于  $\Delta E_c$ 、 $\Delta E_v$  情况。<sup>3</sup>)只考虑少子带边收缩<sup>[13]</sup>; 即对于 p-GaAs, 考虑禁带变窄量全部贡献于导带突变量  $\Delta E_c$  情况。

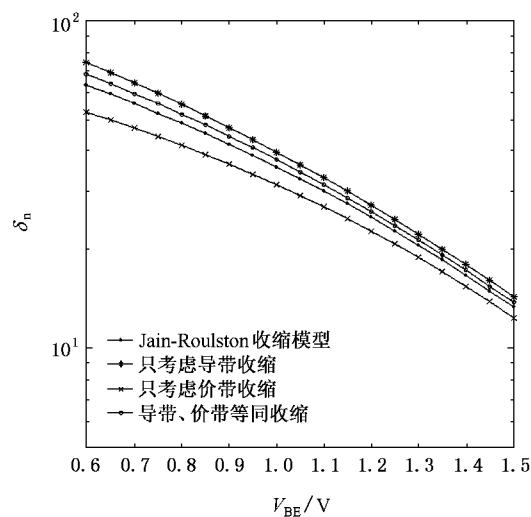
对于器件结构如表 1 所示的突变 AlGaAs/GaAs Npn 型 HBT, 四种 BGN 分布模型情况下的内建势  $V_{\text{bi}}$  的计算结果如表 2 所示。隧穿因子  $\delta_n$  随 EB 结偏压的变化关系如图 3 所示; 由于 BGN 效应引起基区能带边的收缩, 隧道贯穿区域的改变, 可以看出这四种情况下内建势的大小和隧穿因子随偏压的变化关系并不一致。

表 1 AlGaAs/GaAs HBT 器件结构参数

	发射区	基区	集电区
厚度/nm	150	100	500
掺杂浓度/cm⁻³	$2 \times 10^{17}$	$3 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{16}$

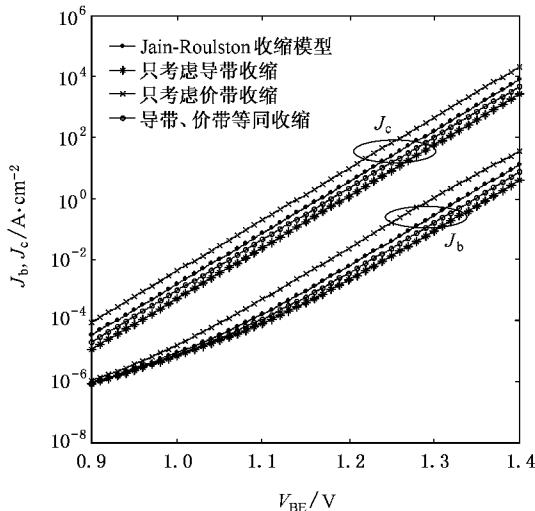
表 2 BGN 不同分布模型下的  $V_{\text{bi}}$ 

BGN 在能带上的分布模型	内建势 $V_{\text{bi}}$ /V
Jain-Roulston 分布模型	1.5910
只考虑导带收缩的分布模型	1.6212
只考虑价带收缩的分布模型	1.5629
多子、少子带边等同收缩的分布模型	1.6048

图 3 BGN 不同分布模型下隧穿因子  $\delta_n$  随偏压  $V_{\text{be}}$  的变化关系

布模型下的 Gummel 图和共射输出特性图的计算结果之间的比较分别如图 4 和图 5 所示, 从中可以看出在都考虑了 BGN 效果的情况下, 虽然带隙收缩总量保持一定, 但不同 BGN 分布模型下的电流计算结果有较明显的差异。在所讨论的四种不同 BGN 分布模型中, 从图 4、图 5 与图 3 的比较中可以看出, 隧穿因子  $\delta_n$  越高的电流反而越小, 例如只考虑导带收缩和只考虑价带收缩的情况下分别有最大和最小  $\delta_n$ , 但相应的电流却分别是最大和最小。

显然, 不同的 BGN 分布模型下带阶  $\Delta E_c$  的数值有差异, 因而内建势  $V_{\text{bi}}$  也就有所不同, 但与隧穿因子  $\delta_n$  对电流的影响不同,  $V_{\text{bi}}$  对电流的影响表现在指数项上, 因而  $V_{\text{bi}}$  的略微变化将会使通过突变异质

图 4 突变 AlGaAs/GaAsHBT 的  $J_c$ 、 $J_b$  Gummel 图

## 4. 结果与讨论

表 1 器件结构的 HBT 在表 2 四种不同 BGN 分

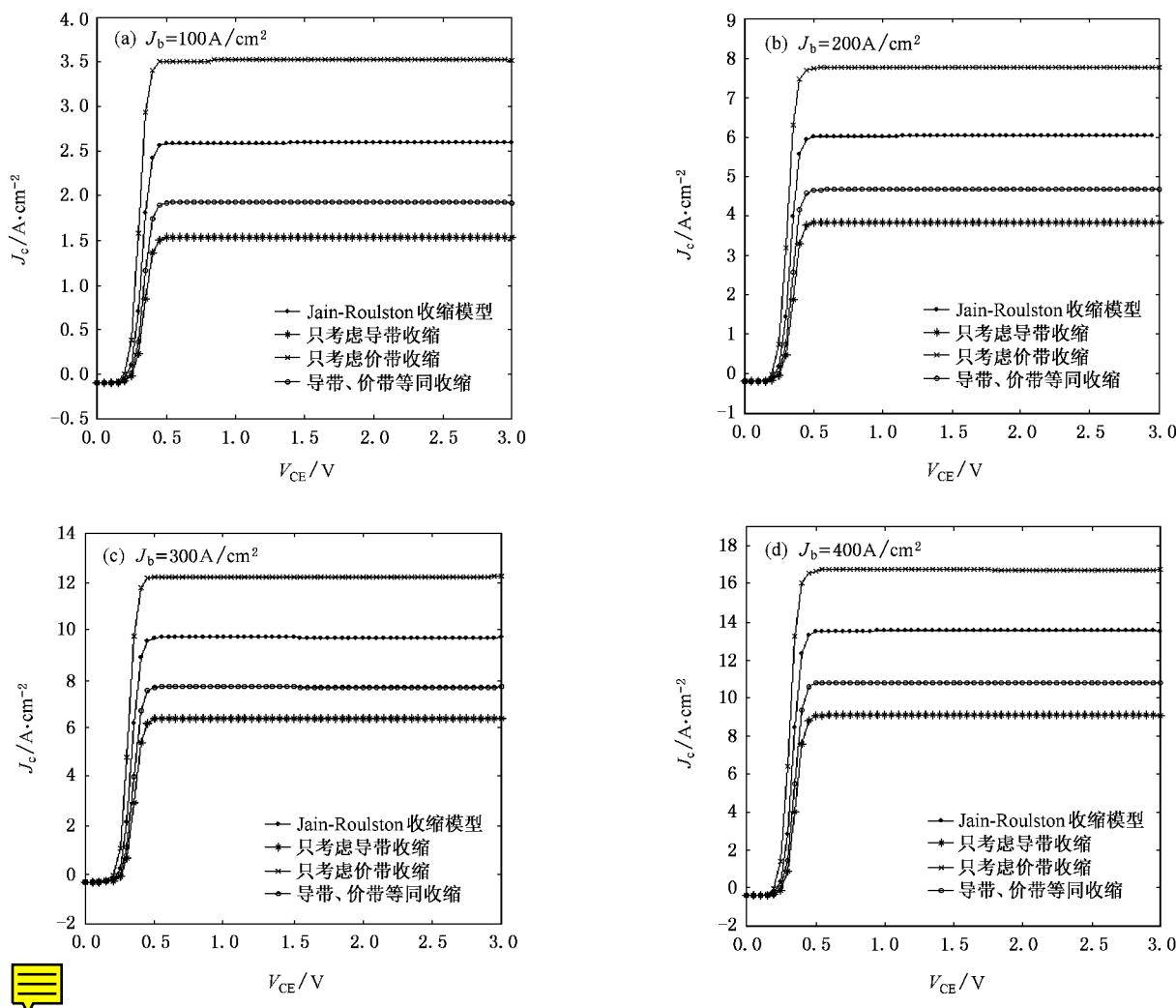


图 5 不同 BGN 分布模型的突变 AlGaAs/GaAs HBT 在不同基极电流下的共射输出特性 (a)  $J_b = 100 \text{ A/cm}^2$  (b)  $J_b = 200 \text{ A/cm}^2$  (c)  $J_b = 300 \text{ A/cm}^2$  (d)  $J_b = 400 \text{ A/cm}^2$

结界面的载流子数目发生较明显的变化。这本质的物理原因是因为电流基于热电子发射机理产生的部分是与内建势  $V_{bi}$  成指数变化关系的,  $V_{bi}$  越低意味着热电子发射需要克服的势垒  $qV_N$  越低, 而势垒  $qV_N$  越低, 热发射载流子数目就越多, 因而也就有更大的电流。由于只考虑导带收缩和只考虑价带收缩情况下分别有最高和最低的内建势, 故这两种情况下相应的异质结界面载流子热发射需要克服的势垒  $qV_N$  也分别是最高和最低, 因而在文中所讨论过的四种不同禁带变窄分布模型中, 只考虑导带收缩和只考虑价带收缩情况下的电流分别是最小和最大。

因此可以得到的结论是重掺杂对突变异质结界面势垒的扰动所引起的隧道贯穿效应发生区域的变化导致电流的改变是次要的, 而重掺杂对突变异质

结界面势垒的扰动所引起的内建势变化导致电流的改变则是主要的。

## 5. 结 论

以上从热场发射-扩散模型出发, 即在异质结突变界面处考虑热电子发射和隧道效应、准中性体区域内考虑漂移扩散, 对基区重掺杂突变 AlGaAs/GaAs HBT 带阶的扰动对电流影响做了分析。重掺杂 BGN 效应引起带阶的扰动使内建势发生了变化, 计算结果表明这对突变 HBT 电学特性产生了很重要的影响。因此为了精确的器件模拟计算与优化设计, 对于 BGN 效应, 必需具体考虑禁带变窄在导带、价带上的分配比例随掺杂浓度的不同而变化的情况。

- [ 1 ] Quan Z J , Sun L Z , Ye Z H et al 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 3611  
 ( in Chinese )[ 全知觉、孙立忠、叶振华等 2006 物理学报 **55**  
 3611 ]
- [ 2 ] Li S P , Wang R Z , Zheng Y M et al 2000 *Acta Phys . Sin .* **49**  
 1441( in Chinese )[ 李书平、王仁智、郑永梅等 2000 物理学报  
**49** 1441 ]
- [ 3 ] Lopez-Gonzalez J M , Prat L 1997 *IEEE Trans . Electron Devices* **44**  
 1046.
- [ 4 ] Shi Y , Niu G , Cressler J D , David L H 2003 *IEEE Trans .  
 Electron Devices* **50** 1370
- [ 5 ] Grinberg A A , Shur M S , Fischer R J , Morkoc H 1984 *IEEE  
 Trans . Electron Devices* **31** 1758
- [ 6 ] Liu W 1999 *Fundamentals of III-V Devices : HBTs ,MESFETs ,  
 and HFETs/HEMTs* ( JOHN WILEY&SONS , USA ) p78
- [ 7 ] Jain S C , Roulston D J 1991 *Solid-State Electronics* **34** 453
- [ 8 ] Jain S C , McGregor J M , Roulston D J 1990 *J . Appl . Phys .* **68**  
 3747
- [ 9 ] Palankovski V , Grujin G K , Selberherr S 1999 *Materials Science  
 and Engineer B* **66** 46
- [ 10 ] Zheng H Q , Wang H , Zhang P H , Zeng Z , Radahakrishnan K ,  
 Yoon S F , Ng G I 2000 *Solid-State Electronics* **44** 37
- [ 11 ] Basore P A PC-1D ' s Manual , Version5.0 , 1997 , Iowa State Univ .  
 Research Foundation , Ames .
- [ 12 ] ISE Integrated Systems Engineering AG 2001 *DESSIS User ' s  
 Manual* ( ISE TCAD Release 7.0 , Zurich , Switzerland )
- [ 13 ] Avant ! Corporation 2001 *MEDICI User ' s Manual* ( Avant ! TCAD  
 Release 4.0 , Fremont , CA )

## Investigation of the impact of band offset perturbations on the performance of abrupt HBT with heavily doped base<sup>\*</sup>

Zhou Shou-Li<sup>1)</sup> Huang Hui<sup>2)</sup> Huang Yong-Qing<sup>2)</sup> Ren Xiao-Min<sup>2)</sup>

1) College of Information Engineering , Zhejiang University of Technology , Hangzhou 310014 , China )

2)( School of Telecommunication Engineering , Beijing University of Posts and Telecommunications , Beijing 100876 , China )

( Received 17 August 2006 ; revised manuscript received 29 September 2006 )

### Abstract

Heavy impurity doping leads to bandgap narrowing ( BGN ) and this causes perturbations to the value of the band offsets at the hetero-interface. As a result , the form and height of energy barriers in abrupt HBT is disturbed , which changes the value of the current flowing through its interfaces . The analysis is based on the thermionic field-diffusion model which combines the drift-diffusion transport in the bulk of the transistor with the thermionic emission and tunneling at the base-emitter interface . The calculations reveal a more important role to the transport of carriers played by the modification of the built-in potential than that of the range of barrier energies available for tunneling because the impact of the built-in potential on the current is exponential . Therefore , it is important for a better description of the currents to use an accurate dopant-dependent BGN distribution model between bands .

**Keywords :** HBT , band offsets , built-in potential , tunneling factor

**PACC :** 7280E , 7340L , 7360L

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China( Grant No. 2003CB314901 ) , the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China ( Grant No. 20020013010 ).