

# 重掺杂能带结构的变化对突变 HBT 电流影响\*

周守利<sup>†</sup> 崔海林 黄永清 任晓敏

(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 基于禁带变容量在导带和价带之间的分布比例与掺杂浓度相关的 Jain-Roulston 模型, 研究了重掺杂能带结构的变化对突变异质结 HBT 电流影响. 研究表明: 禁带变容量在导、价带间分布模型选用的不同, 计算结果之间有明显的差别, 基于 Jain-Roulston 分布模型的结果同实验测量符合很好. 因此对于突变 HBT 性能分析, 必须精确考虑重掺杂禁带变容量在能带上的具体分布.

关键词: HBT; 重掺杂效应; 禁带变窄; Jain-Roulston 模型

EEACC: 2560

中图分类号: TN302

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)01-0110-05

## 1 引言

由于异质结双极晶体管 (HBT) 采用宽带隙的发射区、窄带隙的基区, 因而在保持较高发射结注入效率的前提下允许高浓度的基区掺杂, 这不仅使得基区的串联电阻减少, 而且可使基区做得较薄, 从而大大改善器件的直流和高频特性.

高浓度掺杂的基区将发生禁带变窄效应 (BGN), 这不仅使基区带隙变窄, 而且也使异质结界面能带断续量  $E_c$  和  $E_v$  发生变化, 进而对突变异质结 HBT 电流传输特性产生重要影响. 虽然有关重掺杂禁带变窄效应对 HBT 电流特性影响的研究不少, 但这些研究中很少有精确考虑禁带变容量在导、价带间的具体分布, 即使价格昂贵的商业软件也存在着这种不足, 而这种精确考虑对于 HBT 性能分析是非常重要的<sup>[1]</sup>.

本文基于热场发射-扩散 (thermionic-field-diffusion) 载流子运输模型, 应用 Jain-Roulston 能带模型, 对包含自加热效应的基区重掺杂突变异质结 AlGaAs/GaAs HBT 的电流输出特性做了详细的分析, 并同实验结果作了比较. 由于禁带变窄在导、价带间怎样分布对于输出特性的计算很重要, 因此本文也探讨和比较了模拟软件中常用的三种近似分布模型情况下的输出特性计算结果.

## 2 器件物理模型

由于突变异质结界面附近导带边不连续所形成的势垒尖峰阻碍了异质结两边载流子的交换, 使载流子注入机制发生了变化. 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的载流子注入起决定作用. 关于导带势垒尖峰对载流子运输影响的问题, 过去一直是令人感兴趣的课题<sup>[2]</sup>. 本文对于载流子的运输, 在突变界面处采用热场发射模型, 而对除去突变界面外的区域采用漂移-扩散模型.

在体区域内由漂移-扩散模型确定的电子、空穴电流为:

$$J_n = -q\mu_n n \nabla_n \quad (1)$$

$$J_p = -q\mu_p p \nabla_p \quad (2)$$

其中  $n, p$  分别为电子与空穴的准费米势, 计算中采用 Fermi-Dirac 统计以考虑载流子的简并效应.

在突变异质结界面处 ( $x = x_j$ ), 载流子运输采用热场发射模型. 此模型考虑了热电子发射和隧道效应; 空穴隧道效应可忽略, 只考虑热发射. 则由 WKB 近似方法可得到作为边界条件的突变面电流方程为:

$$J_{n,i} = -q \frac{n}{4} [n(x_j^-) - n(x_j^+) \exp(-\frac{E}{kT})] (1 + n) \quad (3)$$

\* 国家重点基础研究发展规划资助项目 (批准号: 2003CB314901)

<sup>†</sup> 通信作者. Email: zhoushl@163.com

2005-06-21 收到, 2005-07-30 定稿

$$J_{p,i} = q \frac{p}{4} [p(x_j^-) - p(x_j^+) \exp(-\frac{E_x}{kT})] \quad (4)$$

其中  $n$  和  $p$  分别是电子和空穴平均热运动速度； $\alpha_n$  为隧穿因子,体现 Npn 晶体管电子隧道效应对电子电流的贡献<sup>[3]</sup>. 突变异质结 HBT 典型能带图如图 1 所示.

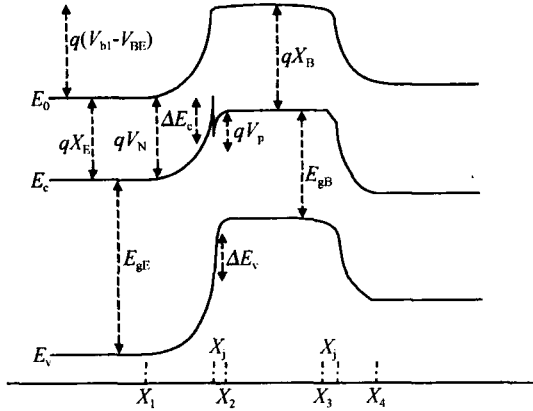


图 1 突变异质结 HBT 典型能带图

Fig. 1 Energy band diagram of abrupt HBT

在正常偏置条件下,由于 GaAs 材料的热导率非常低,器件散热缓慢,使得 HBT 器件本征部分的温度远远高于环境温度,因而本文考虑自加热效应下的 AlGaAs/GaAs HBT 电流输出特性,以便于同实验结果比较.

受自加热效应的影响,器件晶格温度  $T$  与环境温度  $T_0$  之间的关系为:

$$T = T_0 + P_s R_{th} \quad (5)$$

其中  $P_s$  为 HBT 散热功率; $R_{th}$  为半绝缘衬底热阻,计算时假定器件完全通过半绝缘衬底散热<sup>[4]</sup>.

复合考虑三种机制: Shockley-Read-Hall (SRH) 复合, Auger 复合和辐射复合<sup>[5]</sup>.

### 3 重掺杂禁带变窄效应

许多文献中,对重掺杂引起器件性能改变的分析主要反映在禁带变窄引起本征载流子浓度变化这一点上. 对于突变异质结 HBT,这种描述是不充分的,因为重掺杂引起禁带变窄 ( $E_g - E_g^{bgn}$ ),这也导致突变异质结界面能带断续量  $E_c$  和  $E_v$  的扰动,进而引起热场发射机制的改变,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很大变化,即对器件的电学特性产生重要的影响.

对因重掺杂引起器件能带结构的变化,本文采用 Jain-Roulston 给出的计算模型,该模型唯象考虑了导致价带、导带边界随掺杂浓度增大而收缩的四种不同的主要机制:(1) 由于多子的库仑斥力引起的多子带边收缩;(2) 由于电子和空穴相互作用引起的

少子带边收缩;(3) 由于载流子与杂质之间的相互作用引起的多子带边收缩;(4) 由于载流子与杂质之间的相互作用引起的少子带边收缩. 这些收缩导致<sup>[6,7]</sup>:

$$E_v^{bgn} = A_1 [\frac{N}{10^{18}}]^{1/2} + A_2 [\frac{N}{10^{18}}]^{1/2} \quad (6)$$

$$E_c^{bgn} = A_3 [\frac{N}{10^{18}}]^{1/2} + A_4 [\frac{N}{10^{18}}]^{1/2} \quad (7)$$

$$E_g^{bgn} = E_c^{bgn} - E_v^{bgn} = A_1 (\frac{N}{10^{18}})^{1/2} + A_3 (\frac{N}{10^{18}})^{1/2} + (A_2 + A_4) (\frac{N}{10^{18}})^{1/2} \quad (8)$$

具体参量见表 1,其中  $m_{dev}$ ,  $m_{dh}$  分别是电子、空穴态密度有效质量; $m_{hh}$ ,  $m_{hl}$  分别是重空穴、轻空穴有效质量; $\epsilon_r$  为相对介电常数; $N_{bn}$ ,  $N_{bp}$  分别为电子、空穴简并因子; $\alpha$  为考虑能带非对称校正系数. 计算中参量的具体取值同原文献<sup>[6,8]</sup>.

表 1 Jain-Roulston 模型公式 (6), (7), (8) 中参数

Table 1 Parameters in expressions (6), (7), and (8) of Jain-Roulston's model

Type		$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
n	4 3	$\frac{0.36307 m_{dev}^{0.25}}{1.25}$	$\frac{0.00843 (m_{hh} + m_{hl})}{N_{bn}^{0.5} m_{dev}^{1.5}}$	$\frac{0.2126}{N_{bn}^{1/3}}$	$\frac{0.01686}{N_{bn} (m_{dev})^{0.5}}$
p	3 4	$\frac{0.2126}{N_{bp}^{1/3}}$	$\frac{0.01686}{N_{bp} (m_{dh})^{0.5}}$	$\frac{0.36307 m_{dh}^{0.25}}{1.25}$	$\frac{0.01686 m_{dev}}{N_{bp}^{0.5} m_{dh}^{1.5}}$

实验表明, Jain-Roulston 模型用于 p 型掺杂 GaAs 是非常精确的<sup>[6,8-10]</sup>, 计算得到的 p-GaAs 重掺杂禁带变窄及其在导带和价带上的分配比例与掺杂浓度的关系如图 2 所示.

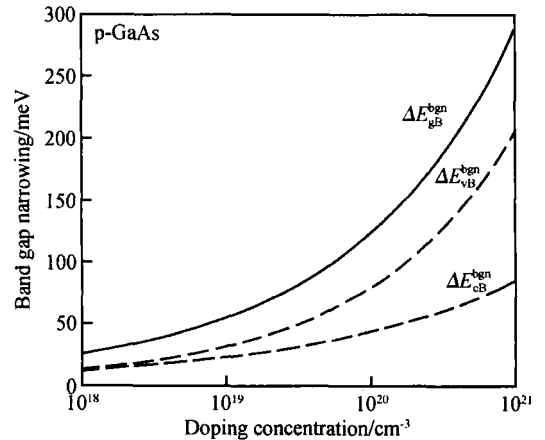


图 2 p-GaAs 禁带变窄及其在能带上的分布与掺杂浓度关系  
Fig. 2 Band gap narrowing  $E_g^{bgn}$  and their distribution between conduction  $E_c^{bgn}$  and valence band  $E_v^{bgn}$  in p-GaAs

考虑基区重掺杂禁带变窄效应后,异质结界面能带断续量  $E_c$ ,  $E_v$  和基区带隙  $E_{gB}$  应分别表示为:

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

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

$$E_{gB} = E_{gB0} - E_{gB}^{bgn} \quad (11)$$

其中  $E_{c0}$ ,  $E_{v0}$  和  $E_{gB0}$  分别是低掺杂浓度下的异质结界面导带、价带断续量和基区带隙。

而在除去突变界面的基区区域内,BGN 对电流运输的影响体现在本征载流子浓度的变化上<sup>[6]</sup>:

$$n_i^2 = pn = n_0^2 \cdot e^{\frac{E_g}{kT}} \cdot e^{\frac{(E_c - E_v)/kT}{2}} \cdot F_{1/2}\left(\frac{E_F - E_v}{kT}\right) \quad (12)$$

其中  $n_0$  为没有考虑重掺杂效应时基区本征载流子浓度值。

此外,在较大电流密度处,需考虑准中性体区域内由于体电阻存在而分配一定的偏压,这时 BE 和 BC 结偏压应分别表示为:

$$V_{BE,j} = V_{BE} - r_E I_E - r_B I_B \quad (13)$$

$$V_{BC,j} = V_{BC} - r_C I_C - r_B I_B \quad (14)$$

其中  $V_{BE}$  和  $V_{BC}$  分别为 BE 和 BC 结实际所加的外偏压; $V_{BE,j}$  和  $V_{BC,j}$  分别为 BE 和 BC 结所分配到的偏压; $r_E, r_B$  和  $r_C$  是与准中性体区域相关的电阻。

### 4 模拟结果与讨论

为了验证上面所给出的一维分析模型,计算了一个与 Schneider<sup>[11]</sup> 实验测量具有相同掺杂分布和类似结构的突变异质结 AlGaAs/GaAs npn 型 HBT,器件结构具体参数见表 2。

为了体现精确考虑禁带变窄在导带和价带间具体分布的重要性,本文还采用其他模拟软件常用的三种近似的禁带变窄量分布模型进行了计算,以作为比较:(1)只考虑多子带边收缩情况<sup>[12]</sup>,即对于 p-GaAs,考虑禁带变窄量全部贡献于价带突变量  $E_v$  情况;(2)多子、少子带边收缩比 1:1<sup>[13]</sup>,即考虑禁带变窄量平均分配于  $E_c, E_v$  情况;(3)只考虑少子带边收缩<sup>[14]</sup>,即对于 p-GaAs,考虑禁带变窄量全部贡献于导带突变量  $E_c$  情况。

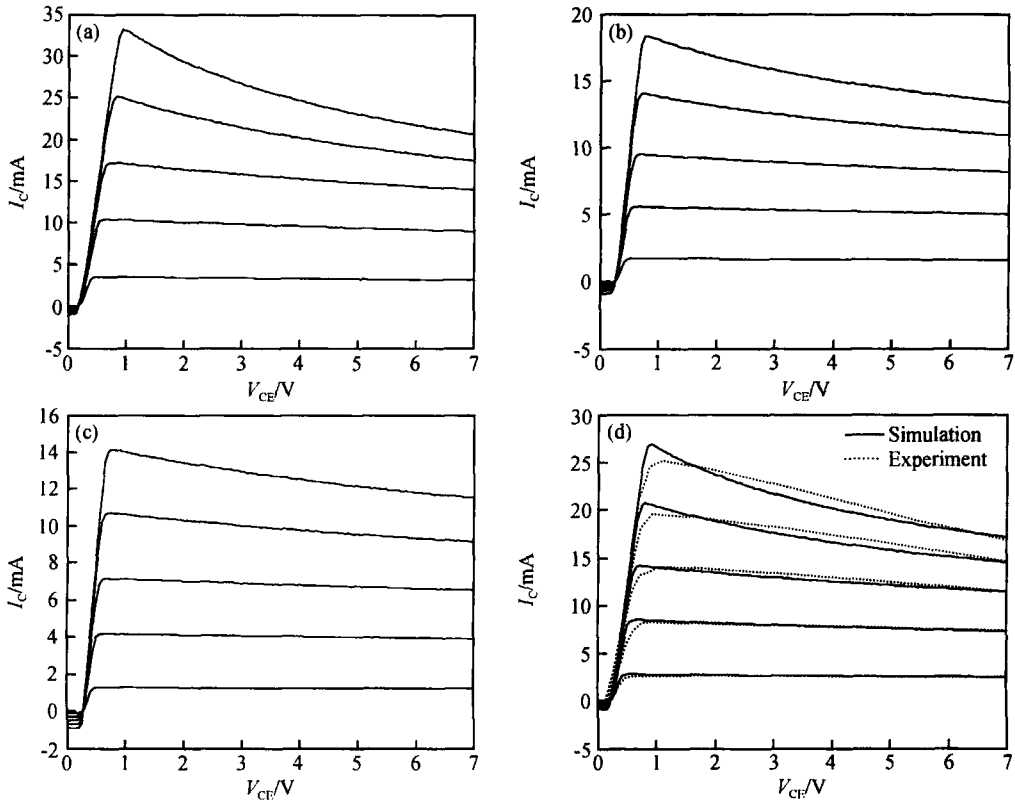


图 3 包含自热效应下突变 AlGaAs/GaAs HBT 共射极直流输出特性 ( $J_B: 100 \sim 900 \mu A$ , 阶跃为  $200 \mu A/step$ )

(a) 只考虑价带收缩;(b) 价带、导带等同收缩;(c) 只考虑导带收缩;(d) Joul-Roulston 模型

Fig. 3 common-emitter  $FV$  characteristics of AlGaAs/GaAs HBT including self-heating effect, with stepped base current from  $100 \mu A$  to  $900 \mu A$  ( $J_B = 200 \mu A/step$ ) (a) Only valence bands shifted;(b) A 50:50 shift between bands;(c) Only conduction bands shifted;(d) Energy bands shifted according to Joul-Roulston model

表 2 AlGaAs/ GaAs HBT 器件结构参数

Table 2 Device structure parameters of AlGaAs/ GaAs HBT

	Emitter	Base	Collector	Subcollector
Length/ nm	200	100	1000	500
Doping/ $\text{cm}^{-3}$	$2 \times 10^{17}$	$5 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{18}$
Size/ $\mu\text{m}^2$	$2 \times 10$	—	$5 \times 20$	—

500 $\mu\text{m}$  of GaAs semi-insulating substrate

利用四种不同的禁带变窄在导价带间的分布模型所得的共射极直流输出特性计算结果如图 3 所示. 可以看出, 四种不同情况下突变异质结 AlGaAs/ GaAs HBT 输出电流差距是明显的, 图 3(d) 还给出了 Schneider<sup>[11]</sup> 实验测量的结果, 如图中的虚线所示. 可以看出的是基于 Jain-Roulston 禁带变窄分布模型下的计算结果, 同实验测量结果吻合得很好. 因此为了更准确描述电流传输的特性, 不仅要考虑重掺杂引起禁带变窄、简并等因素, 还必须考虑禁带变窄量在导、价带上分配比例随掺杂浓度的变化情况.

### 5 结论

重掺杂引起导、价带收缩, 这不仅使带隙变窄, 而且使异质结界面能带断续量  $E_c$  和  $E_v$  也产生扰动. 在突变异质结 HBT 中,  $E_c$  和  $E_v$  的变化影响着异质结界面载流子输运机制, 进而对电流传输特性产生重要的影响. 利用不同的禁带变窄量在导带和价带之间的分布模型所得到的电流计算结果差异是明显的, 因此在器件性能分析上必须精确考虑禁带变窄量在导、价带间的具体分布.

因此, 得出的结论是重掺杂能带结构的变化对器件电学特性的影响很重要; 为了精确地模拟计算与优化设计, 对于突变 HBT, 需具体考虑重掺杂禁带变窄量在导、价带间分配比例随掺杂浓度的不同而变化的情况.

### 参考文献

[ 1 ] Shi Y, Niu G, Cressler J D. On the consistent modeling of

band-gap narrowing for accurate device-level simulation of scaled SiGe HBTs. IEEE Trans Electron Devices, 2003, 50 (5) :1370

[ 2 ] Garcia-Salva P, Lopez-Gonzalez J P, Prat L. A comparison between Monte Carlo and extended drift-diffusion models for abrupt InP/ InGaAs HBTs. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(6) :1045

[ 3 ] Grinberg A A, Shur M S, Fischer R J, et al. An investigation of the effect of graded layers and tunneling on the performance of AlGaAs/ GaAs heterojunction bipolar transistors. IEEE Trans Electron Devices, 1984, 31(12) :1758

[ 4 ] Liou J J, Liou L L, Huang C I. A physics-based, analytical heterojunction bipolar transistor model including thermal and high-current effects. IEEE Trans Electron Devices, 1993, 40 (9) :1570

[ 5 ] Searles S, Pulfrey D L. An analysis of space-charge-region recombination in HBT's. IEEE Trans Electron Devices, 1994, 41(4) :476

[ 6 ] Jain S C, Roulston D J. A simple expression for bandgap narrowing (BGN) in heavily-doped Si, Ge, GaAs, and  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  strained layers. Solid-State Electron, 1991, 34(5) :453

[ 7 ] Lopez-Gonzalez J M, Garcia-Salva P, Prat L. Analytical model for abrupt HBTs with application to InP/ InGaAs type. Solid-State Electron, 1997, 41(9) :1277

[ 8 ] Jain S C, Mc Gregor J M, Roulston D J. Band-gap narrowing in novel - semiconductors. J Appl Phys, 1990, 68(7) :3747

[ 9 ] Palankovski V, Grujin G K, Selberherr S. Study of dopant-dependent band gap narrowing in compound semiconductor devices. Mater Sci Eng, 1999, B66 :46

[ 10 ] Zheng H Q, Wang H, Zhang P H. Band gap narrowing effect in Be-doped  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  studied by photoluminescence spectroscopy. Solid-State Electron, 2000, 44 :37

[ 11 ] Schneider J, Koenig E, Erben U. Thermionic diffusion model for abrupt HBTs Including self-heating inside the multilayer nonplanar device structure. Solid-State Electron, 1996, 39 (3) :377

[ 12 ] Basore P A. PC-1D's Manual, Version 5.0. Iowa State Univ. Research Foundation, Ames, 1997

[ 13 ] DESSIS User's Manual, Version 7.0. ISE Integrated System Engineering AG, Zurich, Switzerland, 2001

[ 14 ] MEDICI User's Manual, Version 4.0. Avant! Fremont, CA, 2001

## Effects of Bandgap Narrowing Induced by heavy Doping in Abrupt HBTs on Their Currents<sup>\*</sup>

Zhou Shouli<sup>†</sup>, Cui Hailin, Huang Yongqing, and Ren Xiaomin

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract :** The bandgap narrowing is distributed between the conduction and valence bands ,according to the Jain-Roulston model ,and its effects on the currents of abrupt AlGaAs/ GaAs HBTs including the self-heating effect ,are analyzed.By comparison experimental results with the results of other distribution models of BGN commonly used in commercial software ,it can be concluded that using an accurate dopant-dependent BGN distribution model between bands is very important.

**Key words :** HBT; heavy doping effects; bandgap narrowing; Jain-Roulston model

**EEACC :** 2560

**Article ID :** 0253-4177(2006)01-0110-05

---

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(No. 2003CB314901)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email :zhoushl @163.com

Received 21 June 2005 ,revised manuscript received 30 July 2005