

AlGaInP/GaAs HBT 发射结空间电荷区复合电流的研究*

顾伟东 夏冠群 冯先根 吴 强

(中国科学院上海冶金研究所 上海 200050)

P. A. Houston

(University of Sheffield, Sheffield, U. K.)

摘要 本文采用深能级瞬态谱(DLTS)方法直接对 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.22}\text{In}_{0.45}\text{P}/\text{GaAs}$ 异质结双极型晶体管(HBT)的发射结(N-p⁺结)进行了测试,得到了N型AlGaInP发射区中的深能级的位置、俘获截面以及缺陷浓度。利用这些数据通过单一能级复合的 Shockley-Read-Hall 公式,计算了发射结空间电荷区(SCR)中的复合电流,探讨了深能级中心对 HBT 器件特性的影响。本文的理论分析方法可为研制高性能 HBT 器件所需的材料质量提高提供参考依据。

EEACC: 2560J, 2530B

1 引言

异质结双极型晶体管(HBT),由于它具有比同质结双极型晶体管更高的高频特性(f_{\max} 已超过 200GHz^[1]),比 GaAs MESFET 更高的功率密度(可超过 5W/mm)而成为当今微波固态功率器件研究领域的一个重要课题。最近 Houston 等人报道了工作温度超过 600K 的四元系 $\text{Al}_x\text{Ga}_{0.52-x}\text{In}_{0.48}\text{P}/\text{GaAs}$ HBT^[2]。它是目前所有与 GaAs 晶格匹配的Ⅲ-V 族化合物半导体材料中具有最大的禁带差,可提供很大的价带不连续(ΔE_v 约从 0.27eV 到 0.62eV^[3]),能有效地抑制基区空穴的反向注入,改善器件的高温特性。预计,AlGaInP/GaAs HBT 是很有前途的微波功率器件。众所周知,存在于 HBTE-B 结空间电荷区的深能级对自由载流子有复合作用,会造成发射结的载流子注入效率的下降,影响器件的性能。因此,直接测定 HBT 中 E-B 结空间电荷区的深能级中心,探讨深能级中心对 HBT 器件特性

* 国家自然科学基金资助项目

顾伟东 男,1971 年生,硕士,研学员,目前从事 AlGaAs/GaAs、GaInP/GaAs 和 AlGaInP/GaAs HBT 的研究

夏冠群 男,1941 年生,研究员,博士生导师,目前主要从事 GaAs 及其化合物半导体物理与器件物理的研究

P. A. Houston Lecturer in Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Sheffield, U. K. His current research interests cover a wide range of Ⅲ-V materials systems, HBT and HEMT device fabrication and modeling, ballistic transport effects and piezoelectric strained layers.

1996 年 7 月 11 日收到初稿,1997 年 6 月 1 日收到修改稿

影响的研究工作很重要。本文根据 AlGaInP/GaAs HBT 器件结构为 Np^+n 的特点, 使用深能级瞬态谱(DLTS)方法直接在 HBT 器件中测出 N 型 AlGaInP 层的深能级位置、浓度、俘获截面等参数, 进一步利用 Shockley-Read-Hall 公式计算了深能级中心引起的空间电荷区复合电流, 讨论了 N 型 AlGaInP 层中深能级中心对 HBT 器件特性的影响。本文还测量了低 β 值的 AlGaAs/GaAs HBT 中 N 型 AlGaAs 层的深能级中心。

2 实验与结果

实验所用的 AlGaInP/GaAs HBT 材料由低压 MOCVD 方法生长。N 型 AlGaInP 层、 p^+ 型 GaAs 基区的生长温度分别是 700℃、600℃。详细的 HBT 多层结构材料参数见表 1。

表 1 AlGaInP/GaAs HBT 多层结构材料参数

层次	材料	Al(x)组分	Ga(y)组分	厚度/nm	掺杂	浓度/cm ⁻³
顶层	n ⁺ -GaAs			1000	Si	5×10^{18}
	n-Ga(y)InP		0.52	500	Si	2×10^{18}
缓变层	n-Al(x)Ga(y)InP	0.07→0.3	0.45→0.22	200	Si	8×10^{17}
发射区	n-Al(x)Ga(y)InP	0.3	0.22	2500	Si	7×10^{17}
缓变区	n-Al(x)Ga(y)InP	0.3→0.07	0.22→0.45	200	Si	5×10^{17}
基区	P ⁺ -GaAs			800	C	5×10^{19}
集电区	n-GaAs			4000	Si	1×10^{17}
缓冲层	n ⁺ -GaAs			5000	Si	5×10^{18}
衬底	Si-GaAs					

AlGaInP/GaAs HBT 采用双台面结构。发射极面积为 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$, 周长/面积比为 0.04; 发射极被基极包围, 间距为 $10\mu\text{m}$; 发射极和收集极欧姆接触金属均采用 AuGeNi/Au, 基极欧姆接触金属采用 Cr/Au。芯片经划片、装架、热压引线制成 HBT 测试样品。AlGaInP/GaAs HBT 样品属于 Np^+n 结构, 宽发射结基区中 p^+ 浓度可比发射区 N 浓度约高两个数量级, 根据 DLTS 原理^[4], 只要结电容合适, 可直接从 HBT 样品测出 N 型掺 Si AlGaInP 层中的深能级中心, 也就是说, 由同一个 HBT 样品, 既可测得 HBT 电学特性, 又可获得 N 型 AlGaInP 层中的深能级中心。

使用 HP4145B 晶体管参数分析仪测量 AlGaInP/GaAs HBT 的输出特性曲线和集电极电流 I_c 和基极电流 I_b 随发射极-基极电压 V_{be} 的关系曲线, 即 Gummel 图。使用带有 IBM-PC 机作为数据采集和处理系统的匈牙利 Semitrap 公司生产的深能级瞬态谱仪 DLTS-82E 进行 DLTS 研究, 分别利用多数载流子和少数载流子注入测量 HBT 中的深能级。DLTS 测量的温度范围为 77~410K, 测量的灵敏度为 $\Delta C/C \sim 10^{-5}$ 。采用温度和频率扫描两种途径, 并通过 Arrhenius plot 验证有关深能级位置, 而能级的俘获截面则通过改变样品上所加的脉冲宽度来获得。图 1 给出了 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.22}\text{In}_{0.48}\text{P}/\text{GaAs}$ HBT 输出特性曲线, 从中可以求出电流放大倍数 $\beta=20$ 。

图 2 为由 AlGaInP/GaAs HBT N-p⁺ 发射结实例得到的 DLTS 谱。深能级的能级位置、浓度和俘获截面列于表 2 中。

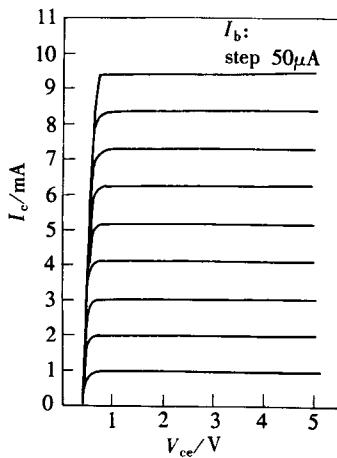


图 1 AlGaInP/GaAs HBT 的直流传输特性 ($\beta \sim 20$)

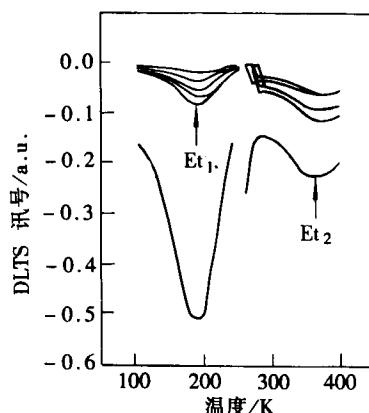


图 2 AlGaInP/GaAs HBT 中 $p^+ - N$ 发射结的 DLTS 谱

表 2 AlGaInP/GaAs N-p⁺ 结中的深能级参数

缺陷能级	能级位置/eV	浓度/cm ⁻³	电子俘获截面/cm ²
E _{t1}	$E_c - 0.36$	$0.18N_D$	6.2×10^{-16}
E _{t2}	$E_c - 0.82$	$1.0 \times 10^{-2}N_D$	7.8×10^{-15}

由图 2、表 1 可见，在 AlGaInP/GaAs HBT 中 N 型掺 SiAl_{0.3}Ga_{0.22}In_{0.48}P 层里存在两个缺陷能级 E_{t1} 、 E_{t2} . E_{t1} 为类 DX 中心，可能与 Si 掺杂有关； E_{t2} 为深电子陷阱，可能与氧有关^[5,6]. 由于 DLTS 测试条件的限制，没有得到空穴的俘获截面.

3 理论分析

3.1 Np⁺n 结构 HBT 载流子输运

图 3 给出了 Np⁺n 结构 HBT 器件的电流传输示意图. 其中 I_n 为越过导带势垒由发射区注入到基区导带中成为少子的电子电流； I_p 为基区空穴越过价带势垒注入发射区形成的空穴电流； I_{rscr} 为异质结空间电荷区中的复合电流； I_{rb} 为体基区复合电流； I_{ri} 为异质结界面处的复合电流； I_{rs} 为基区表面复合电流.

从图 3 可得 HBT 的发射极电流 $I_e = I_n + I_p$ ，基极电流 $I_b = I_p + I_{rscr} + I_{ri} + I_{rs} + I_{rb}$ ，集电极电流 $I_c = I_n - I_{rscr} - I_{ri} - I_{rs} - I_{rb}$ ，则 HBT 共发射极直流放大系数 β 可由下式表示：

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{I_n - I_{rscr} - I_{ri} - I_{rb}}{I_p + I_{rscr} + I_{ri} + I_{rs} + I_{rb}} \quad (1)$$

若忽略 I_{rscr} 、 I_{ri} 、 I_{rs} 和 I_{rb} 的影响，晶体管的放大倍数可简化为 $\beta = I_c/I_b \approx I_n/I_p$ ，对于缓变异质结晶体管，有 $\beta = I_c/I_b \approx I_n/I_p \propto N_{De}/N_{Ab} \exp(\Delta E_g/kT)$ ，其中 N_{De} 为发射区掺杂浓度、 N_{Ab} 是基区掺杂浓度， ΔE_g 为异质结禁带差. 只要 ΔE_g 比 kT 大若干倍， β 将主要由指数因子决定. 可实现在基区浓度大大高于发射区浓度的情况下获得高 β 值. 理论上 β 值可高于 10^3 量级，而实际制得的 HBT 的 β 值只有几十至几百，远小于理论值，其原因是理论计算忽略

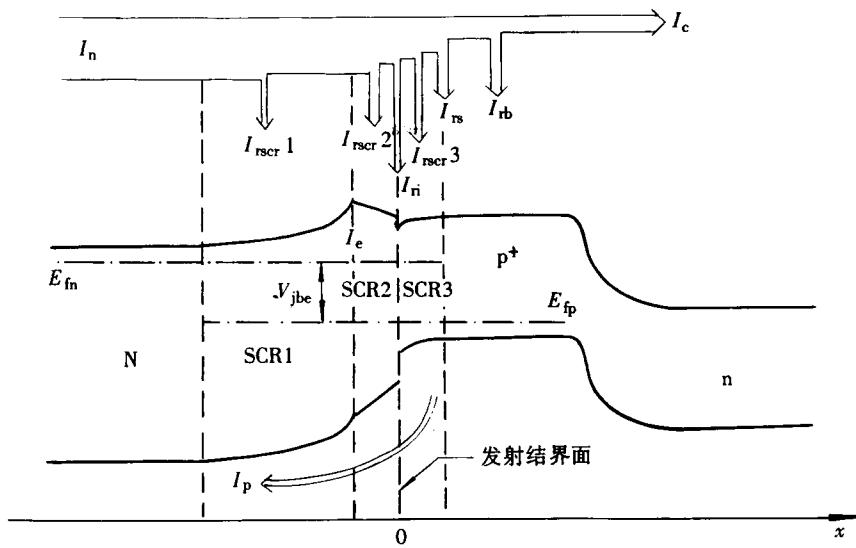


图 3 AlGaInP/GaAs HBT 非平衡状态下能带及直流成分示意图

了载流子在异质结空间电荷区、界面、基区内和表面的复合影响。本文考察了实际发射结空间电荷区复合电流对其直流放大特性的影响。

3.2 空间电荷区复合电流密度 J_{rscr} 的分析

存在发射结空间电荷区禁带中部的深能级复合中心对势垒区中的自由载流子有复合作用,使电子从发射区注入到基区之前,有一部分复合转化为复合电流 I_{rscr} ,这电流传输不到集电极而成为基极电流的一部分,降低了发射结的注入效率。给出 I_{rscr} 的定量计算公式很重要,但很困难。为了简化分析,我们作下列假设:

1. 垂直于多层材料的一维及直流稳态情况。
2. 在空间电荷区中假设空穴费米能级和电子费米能级均不变。
3. 空间电荷区中复合率采用 Shockley-Read-Hall 统计^[7]。
4. 在空间电荷区中空穴寿命 τ_p 和电子寿命 τ_n 不变。
5. N_c, N_v 与位置 x 无关,而 n_i 随 x 而有变化。
6. 在发射区中的深能级位置相对导带底不变^[8]。

由稳态情况的电流连续性方程可得空间电荷区复合电流密度 J_{rscr} ^[8],

$$\begin{aligned} J_{rscr} &= -q \int_{SCR} U(x) dx \\ &= -q \int_{SCR1} U(x) dx - q \int_{SCR2} U(x) dx - q \int_{SCR3} U(x) dx \\ &= J_{rscr1} + J_{rscr2} + J_{rscr3} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $J_{rscr1}, J_{rscr2}, J_{rscr3}$ 分别代表 AlGaInP/GaAs HBT 中 N 型 AlGaInP 势垒区 SCR1、AlGaInP 至 GaAs 缓变层 SCR2 以及 p+型 GaAs 势垒区 SCR3 中的复合电流密度。式(2)中 $U(x)$ 为 Shockley-Read-Hall 复合率^[7]。

$$U(x) = \frac{p(x)n(x) - n_i^2(x)}{\tau_p[n(x) + n_1(x)] + \tau_p[p(x) + p_1(x)]} \quad (3)$$

其中 $p(x)、n(x)$ 分别为空穴、电子浓度; $n_i(x)$ 为本征载流子浓度; $n_1(x)、p_1(x)$ 为费米能

级正好位于缺陷能级上时的平衡态电子、空穴浓度; τ_p 、 τ_n 分别为空穴、电子的寿命.

由式(4)可求出电子寿命和空穴寿命 τ_p ^[9].

$$\begin{cases} \tau_n = \frac{1}{N_i r_n}, & r_n = \sigma_n \sqrt{\frac{3kT}{m_n^*}} \\ \tau_p = \frac{1}{N_i r_p}, & r_p = \sigma_p \sqrt{\frac{3kT}{m_p^*}} \end{cases} \quad (4)$$

其中 N_i 为深能级浓度; σ_n 、 σ_p 为缺陷能级对电子和空穴的俘获截面; m_n^* 、 m_p^* 分别为电子、空穴的有效质量.

通过对 AlGaInP/GaAs HBT 发射结空间电荷区求解泊松方程, 可获得 $n(x)$ 、 $p(x)$ 、 $n_i(x)$ 、 $n_1(x)$ 、 $p_1(x)$ 的表达式. 这样, 只要测得空间电荷区的深能级中心参数, 就可以计算出复合电流. 根据以上分析, 我们编制了可以在微机上运行的空间电荷区复合电流密度的计算程序.

4 数值计算结果与讨论

将 AlGaInP/GaAs HBT 中 Np^+ 宽发射结参数和由表 2 列出的 N 型掺 Si AlGaInP 层中的深能级数据(并作 $\sigma_p \approx \sigma_n$ 假定)输入计算机程序中, 分别计算了在不同发射极-基极正向偏压 V_{be} 下单个深能级中心在空间电荷区中造成的复合电流密度 J_{rscr} 和各种区域内的复合电流密度 J_{rscr1} 、 J_{rscr2} 、 J_{rscr3} .

计算结果表明深能级中心造成的复合电流密度均随着偏压增加而增大, E_{t1} 、 E_{t2} 造成的复合电流密度在高端十分接近, 在低端 $J_{rscr} E_{t2}$ 稍大于 $J_{rscr} E_{t1}$ (图略). 图 4 给出了由 E_{t2} 造成的复合电流 J_{rscr1} 、 J_{rscr2} 和 J_{rscr3} 与正向偏压 V_{be} 的函数关系. 从图中可见, 在固定 V_{be} 条件下, J_{rscr2} 大于 J_{rscr3} , 而 J_{rscr1} 大大小于 J_{rscr2} 和 J_{rscr3} . 这说明靠近禁带中央的深能级是有效复合中心, 复合主要发生在 Np^+ 结中心附近的空间电荷区, 特别在 AlGaInP 到 GaAs 的缓变区中.

图 5 中给出 AlGaInP/GaAs HBT 实测得到的 Gummel 图以及计算得到空间电荷区复合电流 I_{rscr} 、 E_{t2} , 同时在图 5 中画出了基区表面复合电流 I_s 的计算值. 从图中可以清楚看到 I_{rscr} 、 E_{t2} 比 I_s 要小三个数量级, 比 I_b 也小很多. 这表示性能优良的 AlGaInP/GaAs HBT 由深能级造成的空间电荷区的复合电流可以忽略不计.

本文同时还对小 β 值 AlGaAs/GaAs HBT 样品开展了研究. 表 3 给出了由 DLTS 测得的 N 型掺 Si AlGaAs 层里的深能级参数. 采用同样的理论分析和计算方法, 求得了 AlGaAs/GaAs Np^+ 发射结空间电荷区的复合电流, 结果表明 AlGaAs/GaAs HBT 发射结空间电荷区的复合电流很大, 与基极电流相当, 与 AlGaInP/GaAs HBT 相比要高出四个以上数量级(见图 6). 这说明发射结空间电荷区的深能级中心造成的复合电流偏大是导致这批 AlGaAs/GaAs HBT 样品 β 值偏小的原因之一.

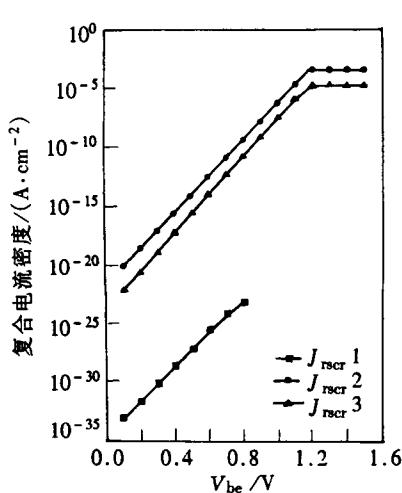


图 4 AlGaInP/GaAs HBT 发射结空间电荷区复合电流密度 J_{rscr} 、 E_{12} 的组成

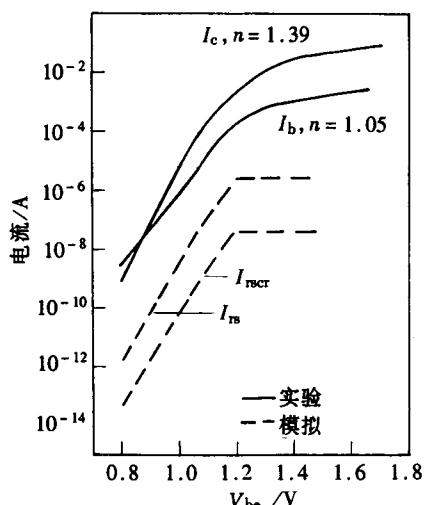


图 5 AlGaInP/GaAs HBT Gummel 曲线与理论计算的 SCR 复合电流 I_{rscr} 和基区表面复合电流 I_r

表 3 AlGaAs/GaAs Np⁺ 结中的深能级参数

缺陷能级	能级位置/eV	浓度/cm ⁻³	电子俘获截面/cm ²
E_{t3}	$E_c - 0.40$	$0.64N_D$	2.5×10^{-17}
E_{t4}	$E_c - 0.78$	$0.1N_D$	5.2×10^{-15}
E_{t5}	$E_c - 0.90$	$0.14N_D$	3.0×10^{-16}

5 结论

直流特性优良的 AlGaInP/GaAs HBT 中的空间电荷区复合电流很小, 它对器件性能的影响可以忽略不计。低 β 值 AlGaAs/GaAs HBT 发射结空间电荷区中的深能级中心造成的复合电流很大, 是导致器件放大倍数偏小的可能原因。

采用 DLTS 方法直接通过对 Np⁺n 结构的 HBT 样品测量, 可获得 N 型发射区层内的深能级中心参数。

本文提出的理论分析方法可得出 HBT 中用实验测量无法加以区分的多种电流成分之一的空间电荷区复合电流, 为研制高性能 HBT 器件所需的材料提供参考依据。

致谢 本文中的 DLTS 测试得到卢励吾、封松林和胡雨生等老师的大力帮助, 在此表示感谢。

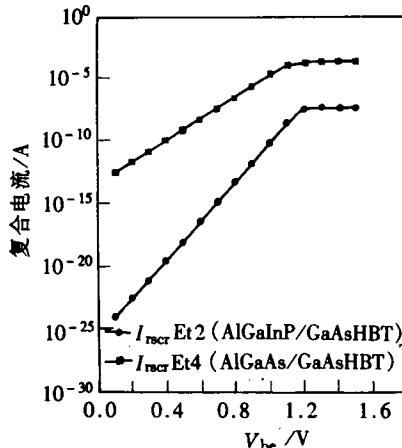


图 6 AlGaAs/GaAs HBT 和 AlGaInP/GaAs HBT 的发射结空间电荷区复合电流的比较

参 考 文 献

- [1] P. M. Asbeck, M-C. F. Chang, J. A. Higgins *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1989, **36**: 2032.
- [2] Ho-Kwang Yow, Peter A. Houston *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1996, **43**: 2.
- [3] M. O. Watanabe and Y. Ohba, Appl. Phys. Lett., 1987, **50**: 906.
- [4] D. V. Lang, J. Appl. Phys. 1974, **45**: 3024.
- [5] P. K. Bhattacharya, T. Matsumoto and S. Subramanian, J. Cryst. Growth, 1984, **68**: 301.
- [6] S. Nojima, H. Tanaka and H. Asahi, J. Appl. Phys., 1986, **59**: 3489.
- [7] W. Shockley and W. T. Read, Phys. Rev., 1952, **87**: 835.
- [8] Chetan D. Parikh and Fredrik A. Lindholm, IEEE Trans. on Electron Devices, 1992, **39**(10): 2197.
- [9] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生, 等, 半导体物理学, 国防工业出版社, 1989 年, 第五章.

Study on AlGaInP Heterojunction Bipolar Transistor Emitter Space-Charge-Region Recombination Current

Gu Weidong, Xia Guanqun, Feng Xiangeng and Wu Qiang

(Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

P. A. Houston

(Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Sheffield, U.K.)

Received 23 May 1996, revised manuscript received 5 December 1996

Abstract Large-scale Heterojunction Bipolar Transistor (HBT) samples were fabricated by using $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.22}\text{In}_{0.48}\text{P}/\text{GaAs}$ HBT material grown by MOVPE. Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) tests were applied to the HBTs' emitter junction (Np^+ junction). We then applied DLTS data (Defect Energy Level, Capture Cross Sections, Defect Density) into Shockley-Read-Hall model to calculate the recombination currents in HBTs' emitter Space-Charge-Region (SCR). The results show that the influence of SCR recombination current introduced by defects in high-quality HBT materials to devices' D. C. characteristics can be neglected. The same method was applied to a $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ HBT with an abnormally small current gain and the results show that defects in it introduce too large SCR recombination current to give a proper D. C. current gain.

EEACC: 2560J, 2530B