

垂直发射极镇流电阻在 HBT 中的发射极电流集边效应中的作用*

常玉春¹ 崔洪峰¹ 王金忠¹ 宋俊峰¹ Hailin Luo² Y. Wang² 杜国同¹

(1 吉林大学电子科学和工程学院, 集成光电子国家重点实验室吉林大学实验区, 长春 130023)

(2 香港科技大学物理系, 香港)

摘要: 在异质结双极晶体管(HBT)功率器件中可以引入外延生长的发射极镇流电阻, 以改善其热稳定性。通过理论计算和实验表明这种低掺杂的外延层不仅能作为镇流电阻, 而且在功率 HBT 器件中还能非常有效地降低发射极电流集边效应。

关键词: 异质结双极晶体管 (HBT); 镇流电阻; 电流集边效应

EEACC: 5275R; 8160C

中图分类号: TN 322⁺. 8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)06-0624-04

子扩散导致其它的可靠性问题。

本文将说明在多单元功率异质结双极晶体管中, 外延的低掺杂层不仅能作为镇流电阻, 节省芯片面积, 还能非常有效地降低发射极电流集边效应。当引入垂直镇流电阻时, 发射极边缘的镇流电阻上将有较大的压降, 会导致那里的电流密度按指数规律衰减。因此, 这种负反馈会非常有效地降低电流集边效应。我们首先进行理论分析, 然后给出了实验结果。

1 引言

当多单元功率 HBT 器件工作在大功率情况下, 由于电流密度很高, 热不稳定现象十分严重, 它可能造成发射结陷落和雪崩击穿^[1]。这种不稳定性起因于双极型器件的正热-电反馈特性。为了提高电流的可控制能力并改善热稳定性, 最普遍的方法是引入镇流电阻来连接一系列器件单元中的每一个发射极条。为了节省芯片的面积, 可以在功率 HBT 中引入外延生长的发射极镇流电阻^[2,3]。另外, 在双极型晶体管中, 由于发射结处横向电势差的存在, 使得发射极外围发生发射极电流集边效应, 并因此导致局部发热和在高电流密度下的热问题。石林初等^[4,5]曾给出一般情况下发射极电流集边效应的计算机分析, 对应用于高频领域的异质结晶体管同样也应该是适用的。Liu 和 Harris^[6]曾经给出对于 npn 型 HBT, 尽管可以对基区高掺杂, 其发射极电流集边效应仍然不能被忽略。此外, 高掺杂的基区在其掺杂浓度高于 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时, 将会由于空隙中的 Be 原

2 理论计算及结果

为定量地研究此直观论点, 我们对以 100nm 厚的 Be 掺杂($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)层为基区的典型 AlGaAs/GaAs HBT 器件进行了计算机模拟。器件结构如图 1 所示, 引入一个低的硅掺杂 GaAs 薄层形成垂直发射极镇流电阻。适当地选择此层的掺杂浓度和厚度, 可以将其看作一个条形电阻, 其阻值每 $4\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 的发射极单元为 5Ω , 相当于发射极电流密度为 $5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时对应为 $8kT/qI_E$ 。

* 国家自然科学基金(批准号: 60077021)和国家重大基础研究(No. G2000036605)资助项目

常玉春 男, 1973 年出生, 博士研究生, 主要研究领域有半导体激光器、MBE 生长及化合物器件、新型硅光电探测器等。

2001-09-21 收到, 2001-12-03 定稿

©2002 中国电子学会

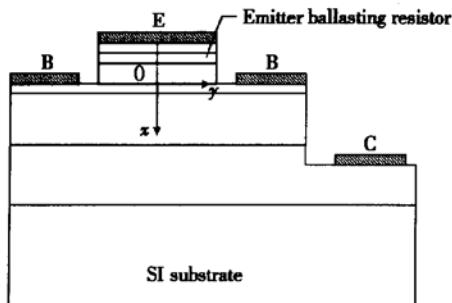


图 1 具有 n 型轻掺杂的 GaAs 层作发射极镇流电阻的 Al-GaAs/GaAs HBT 结构

Fig. 1 Side view of AlGaAs/GaAs abrupt HBT structure with a lightly doped n-type GaAs layer as emitter ballast resistor

按图 1 所示方向, 我们用 $V_B(y)$ 和 $I_B(y)$ 来表示基区电势和电流分布, $V_E(y)$ 和 $J_E(y)$ 来表示发射区电势和电流密度分布, V_{E0} 来表示发射基接触电势(令为 0 电位). 对于没有镇流电阻的晶体管, $V_E(y)$ 与 V_{E0} 近似相等, 则发射结电压降为:

$$V_{BE}(y) = V_B(y) - V_{E0} = V_B(y) \quad (1)$$

下面是讨论电流集边效应用的微分电阻模型.

$$dV_B(y) = I_B \rho_b / W_E dy \quad (2)$$

$$dI_B = J_0 \exp[V_{BE}(y)/V_T] W_E (1 - \alpha) dy \quad (3)$$

式中 W_E 为发射极条宽; ρ_b 为基区平均体电阻率; J_0 为微分晶体管发射结反向饱和电流密度; α 为电流放大倍数; $V_T = kT/q$. 当引入垂直镇流电阻后, $V_E(y)$ 与 V_{E0} 将不再相等, 有:

$$\Delta V_E(y) = V_E(y) - V_{E0} = J_E(y) \Delta S R_e \quad (4)$$

其中 ΔS 是发射极单元面积.

然后, 将方程(2)两边微分后带入(3)式, 同时考虑到 $V_{BE}(y)$ 用 $V_B(y)$ 和 $\Delta V_E(y)$ 改写, 则有:

$$d^2V_B(y)/dy^2 = \rho_b (1 - \alpha) / W_E J_E(y) \quad (5)$$

$$J_E(y) = J_0 \exp\{[V_B(y) - J_E(y) \Delta S R_e]/V_T\} \quad (6)$$

此处 R_e 为镇流电阻阻值.

两种情况下的方程都由数值方法来求解. 事实上, 利用近似的方法来给出无镇流电阻情况下的解析表达式并无太大的意义, 而用逐次逼近的方法很容易得到上述两种情况下的数值解. 图 2 为不同电流增益时, 有和无镇流电阻的情况下, 边缘与中央的发射结电压降与平均电流密度的关系, 其中发射结电压降已经用 V_T 进行了归一化. 由于局部电流密度与局部电压呈指数依赖关系, 一个 V_T 的压降会

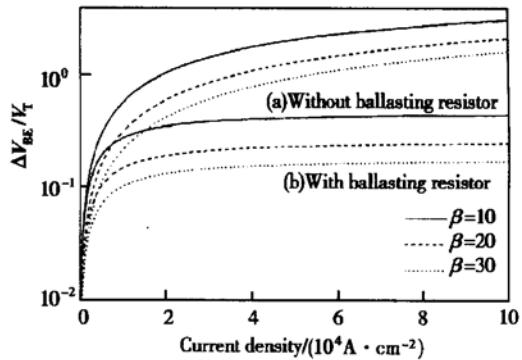


图 2 不同增益情况下, V_{BE}/V_T 与发射极平均电流密度的关系 (a) 无镇流电阻; (b) 有镇流电阻

Fig. 2 Ratio of V_{BE} and V_T as function of average emitter current density for various values of current gain without and with ballasting resistor

导致电流密度下降 60% 以上. 从图中显而易见, 镇流电阻对降低电流集合效应的作用是非常有效的. 在计算机模拟中, 电流增益分别假定为 10, 20 和 30. 而在实际的器件中, 尤其当器件工作在高频条件下时, 电流增益更小, 它会使电流集边效应对晶体管的性能产生极为严重的影响. 这就使得镇流电阻所起的作用(使电流分布沿着发射极条宽能够相对地保持一致)更为重要, 如图 3 所示. 由图中可见, 在有垂直镇流电阻时, 即使发射极平均电流密度高达 $5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时, 沿着发射极条宽的电流分布的变化仍能保持着相对平缓, 而没有镇流电阻时的电流分布很陡.

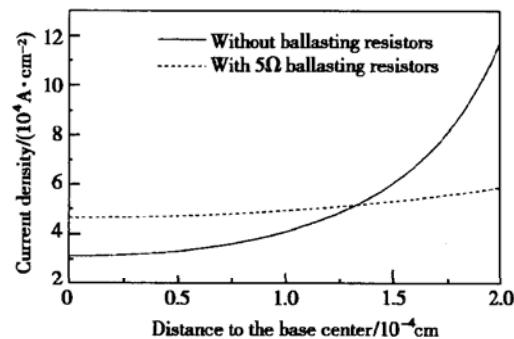


图 3 发射极电流密度为 $5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时, 镇流电阻对发射结横向电流密度的影响

Fig. 3 Emitter current density along emitter width with and without ballasting resistor R_e at a current density of $5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$

3 实验结果

为进一步证实计算机模拟的结果, 我们用 Riber 32 MBE 系统生长了两种结构 AlGaAs/GaAs HBT 的外延片, 其中一个有低掺杂(大约 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$) 的镇流电阻层, 另一个没有。电阻层的厚度按 $R_0 = 8kT/qI_{EO}$ 的标准决定, 此处 R_0 为电阻的阻值, I_{EO} 是电流密度为 $4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时经过发射极的电流。基区掺杂浓度选择为 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 。两种结构的集电区的掺杂浓度都低于 $10^{16}/\text{cm}^3$ (大约为 $8 \times 10^{15}/\text{cm}^3$), 从而可以利用 Kirk 效应来观察在较高电流强度下的电流集边效应的强度。另外, 让 Al 组分的含量占 15%, 使直流电流增益足够低, 从而得以观察电流集边效应。器件由标准的湿法腐蚀工艺制成, 其发射极条宽为 $6\mu\text{m}$ 。然后, 对电流增益和它与集电极电流密度的关系进行测量。测量结果如图 4 所示, 结果已经进行了归一化。器件的直流电流增益为 25 左右。为避免温度效应对电流增益的影响,

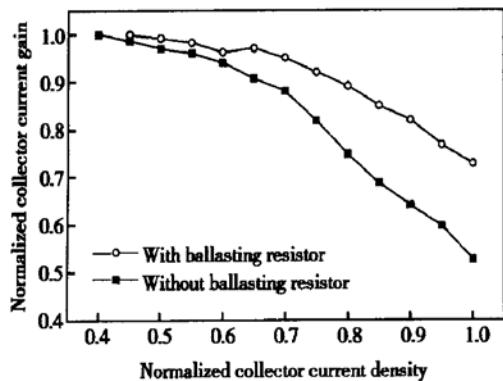


图 4 测量得到的电流增益与集电极电流密度的关系

Fig. 4 Measured current gains vs collector current density

我们用占空比为 1% 的脉冲进行测量。其结果显示: 同有镇流电阻的晶体管相比, 没有镇流电阻的晶体管的电流增益在相对较低的集电极电流密度下就开始下降了。以上现象可作如下解释: 对于没有镇流电阻的晶体管, 其发射极边界的电流集边效应要比有

镇流电阻的晶体管严重得多。因此, 在相对较低的集电极电流密度下就开始发生了 Kirk 效应, 发射极边缘下的基极扩展效应导致了电流增益的下降。

4 结论

综上所述, 我们提出并论证了一个同时解决热不稳定性和发射极电流集边效应的独到方法。计算机模拟和实验结果都表明: 通过 MBE 法生长的垂直镇流电阻层不仅有着镇流电阻的作用, 还能明显降低发射极电流集边效应, 这就使得 HBT 器件能更可靠地应用于微波功率领域。

参考文献

- [1] Liu W, Khatibzadeh A. The collapse of current gain in multi-finger heterojunction bipolar transistors: its substrate temperature dependence, instability criteria, and modeling. IEEE Trans Electron Devices, 1994, 41(10): 1698
- [2] Gao G B, Unlu M S, Morkoc H, et al. Emitter ballasting resistor design for, and current handling capacity of AlGaAs/GaAs power heterojunction bipolar transistors. IEEE Trans Electron Devices, 1991, 38(2): 185
- [3] Chen Mary, Nguyen Chanh, Liu Takyiu. High-performance AlInAs/GaInAs/InP DHBT X-band power cell with InP emitter ballast resistor. Proceedings: IEEE/Cornell Conference on Advanced Concepts in High Speed Semiconductor Devices and Circuits, 1995: 573
- [4] Shi Linchu. Discussion on the physical meaning of the edge-crowding-effect of emitter current in a transistor. Semiconductor Technology, 1999, 24: 14(in Chinese)[石林初. 晶体管发射极电流集边效应物理意义之探讨. 半导体技术, 1999, 24: 14]
- [5] Shi Linchu, Du Xingyao, Lu Wensheng, et al. Verification on theory of edge-crowding-effect of emitter current with SPICE simulation. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21: 1139 (in Chinese)[石林初, 杜行尧, 吕文生, 等. 发射极电流集边效应理论的 SPICE 模拟验证. 半导体学报, 2000, 21: 1139]
- [6] Liu W, Harris J S Jr. Dependence of base crowding effect on base doping and thickness for npn AlGaAs/GaAs HBTs. Electronics Lett, 1991, 27(22): 2048

Effect of Vertical Emitter Ballasting Resistors on the Emitter Current Crowding Effect in Heterojunction Bipolar Transistors^{*}

Chang Yuchun¹, Cui Hongfeng¹, Wang Jinzhong¹, Song Junfeng¹,
Hailin Luo², Y. Wang² and Du Guotong¹

(1 School of Electronic Science & Engineering, Jilin University, Jilin University Region,
State Key Laboratory on Optoelectronics, Changchun 130023, China)

(2 Department of Physics, Hong Kong University of Science & Technology, Hong Kong, China)

Abstract: Epitaxial emitter ballasting resistors are incorporated into power heterojunction bipolar transistors (HBTs) to improve thermal stability. It is proposed that this lightly-doped layer can not only function as ballasting resistors used in multi-finger power HBT cells, but also reduce the emitter current crowding effect very efficiently.

Key words: heterojunction bipolar transistors; ballasting resistors; current crowding effect

EEACC: 5275R; 8160C

Article ID: 0253-4177(2002)06-0624-04

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60077021), National Key Basic Research Plan of China (No. G2000036605)

Chang Yuchun male, was born in 1973, PhD candidate. His research interests focus on semiconductor lasers, MBE growth, compound semiconductor devices, and novel silicon photodetectors.