

# 发射极镇流电阻对 $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$ HBT 特性的影响\*

石瑞英<sup>1</sup> 孙海峰<sup>2</sup> 袁志鹏<sup>2</sup> 罗明雄<sup>2</sup> 汪 宁<sup>2</sup>

(1 四川大学物理学院, 成都 610064)

(2 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘要:** 在发射极加一个镇流电阻可以解决在多个 HBT 并联时, 常常出现电流坍塌的问题。研究了发射极镇流电阻对  $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$  HBT 直流及高频特性的影响, 并对实验现象进行了理论分析。

**关键词:** 发射极镇流电阻;  $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$  HBT; 直流特性; 高频特性

**EEACC:** 1350F; 2560B; 2560J; 2560Z

中图分类号: TN 303; TN 385

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)07-0831-05

## 1 引言

HBT 器件及电路所用芯片面积小, 驱动能力强, 开启电压可控性和重复性好, 且无需亚微米光刻, 也不需要昂贵的电子束曝光等设备, 这就使得 HBT 器件在大功率电路应用中占有优势<sup>[1,2]</sup>。功率 HBT 在应用时, 大多采用多个小发射极面积器件并联的方式。由于散热困难和器件之间热耦合双重作用的结果, 功率 HBT 器件将出现电流坍塌现象<sup>[3,4]</sup>。发射极加镇流电阻后可以很好地解决这个问题<sup>[5~7]</sup>, 因此有必要对发射极镇流电阻对 HBT 直流和高频特性的影响加以研究, 为电路设计时发射极镇流电阻的选取提供理论依据。为此, 本文对发射极镇流电阻对  $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$  HBT 器件热稳定性、直流及高频性能的影响进行了实验研究, 并对结果进行了理论分析。同时提出了在电路设计时如何优化镇流电阻的值, 使它既要兼顾镇流电阻对电路热稳定性的提高, 又要考虑它对电路速度的影响。

## 2 器件制备

实验中所用材料是从美国 Kopin 公司购买, 它

是在半绝缘(100)面 GaAs 衬底上用 MOCVD 法生长的, Si 和 C 分别用于 n 型和 p 型掺杂, 其材料外延结构如下: 在半绝缘 GaAs 衬底上是厚度为 500nm, 掺杂浓度为  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的 n 型 GaAs 亚集电区; 然后是 500nm 厚, 掺杂浓度为  $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  的 n 型 GaAs 集电区; 集电区上面为 60nm 厚, 掺杂浓度为  $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的 p 型 GaAs 基区; 基区上为 InGaP 发射区, 它的厚度为 50nm, 掺杂浓度为  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; 最上面为欧姆接触用的帽层, 帽层有三层, 依次为 120nm 厚, 掺杂浓度为  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的 n 型 GaAs; 50nm 厚, 掺杂浓度为  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的 n 型  $In_xGa_{1-x}As$ , In 的含量有 0 渐变到 0.6; 最上面一层是 50nm 厚, 掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的 n 型  $In_{0.6}Ga_{0.4}As$ 。

在制备器件时, 首先蒸发 TiPtAu 为发射极金属, 用柠檬酸系腐蚀液腐蚀帽层, 用 HCl 系腐蚀液腐蚀 InGaP 发射区; 然后蒸发 TiPtAu 为基极金属, 剥离, 形成发射极-基区金属的自对准; 基区版曝光、显影, 以胶为掩膜腐蚀到亚集电区; 隔离版光刻, 以胶为掩膜腐蚀到衬底形成隔离区; 蒸发 AuGeNi/Au 为集电极金属; 用  $Si_2O$  和  $Si_3N_4$  双层介质作为钝化层; 在钝化层上用聚酰亚胺平面化工艺以避免发射极引线断线现象的发生及减小发射极引线与基极、

\* 国家重点基础研究发展规划资助项目(编号: G200006830403)

石瑞英 女, 副教授, 目前主要从事化合物半导体器件和微波单元集成电路等研究。

2003-07-23 收到, 2003-11-12 定稿

©2004 中国电子学会

集电极之间的寄生电容; 制备空气桥; 蒸发布线金属完成整个器件的制备。

### 3 电流增益坍塌现象及相应的解决方案

HBT 的优势是在大功率应用方面, 大多采用多个小发射极面积器件并联的方式。图1是用HP4155 测量的5个发射极面积为 $3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 的In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>P/GaAs HBT 单管并联时的输出特性曲线。从图中可以看出, 当电流密度较高、所加电压较大时, 会出现电流坍塌现象。在多个小面积HBT 并联的情况下, 由于器件之间存在热耦合, 导致中心器件温度升高。器件与器件之间的电流分布并不相等, 而是与它们各自的结温有关<sup>[5]</sup>, 因此, 中心器件的电流较大。随着中心器件电流的增加, 其器件产生的热量也将随之增加, 再加上GaAs 的热导率是随着温度的升高而降低, 致使器件的散热更加困难, 在中心器件将产生更多的热量使结温进一步升高。而随着温度的进一步升高, 又使得位于中心器件的电流进一步增加, 这种强烈的电热反馈在持续一段时间后将形成局部热点, 从而产生电流坍塌现象<sup>[4]</sup>, 严重的将使器件损坏, 无法正常工作。

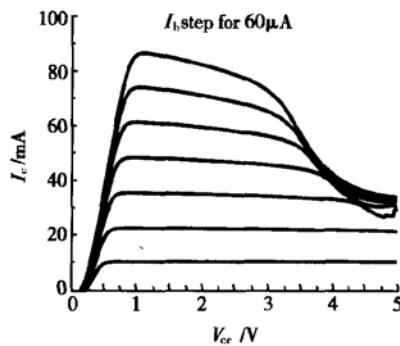


图1 5个 $3\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$  In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>P/GaAs HBT 并联时的输出特性曲线

Fig. 1 DC characteristics of 5-transistors, In<sub>0.49</sub>-Ga<sub>0.51</sub>P/GaAs HBT

发射极加镇流电阻后, 如果中心器件由于热耦合的原因, 使其结温升高, 集电极电流增加, 这时降在发射极镇流电阻上的压降增加。由于各器件C、E 之间的电位保持不变, 这时中心器件上的发射结两端的压降将降低, 使集电极电流减小。而其他器件, 由于集电极电流较小, 发射极镇流电阻上的压降也

较小, 这又使得其发射结两端的压降增加, 集电极电流也相应增加。两者作用的结果是各器件的集电极电流趋于相等, 结温也趋于相同, 使器件的热稳定性得到改善, 发生电流增益坍塌现象的电流增加。发生电流增益坍塌现象时器件的集电极电流与发射极镇流电阻的关系为<sup>[3]</sup>:

$$I_{\text{critical}} = N \frac{\eta_F k T_A}{q} \times \frac{1}{(\Phi R_{\text{th}} V_{\text{ce}} - R_e)} \quad (1)$$

式中  $I_{\text{critical}}$  为发生电流增益坍塌现象的集电极电流;  $N$  为并联的HBT 个数;  $T_A$  为环境温度;  $R_{\text{th}}$  为每一个器件的热阻;  $R_e$  为每一个器件发射极所加的电阻;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $\eta_F$  为集电极电流理想因子;  $\Phi$  为B-E 结电压反馈系数。从(1)式可以看出, 发射极镇流电阻越大, 发生电流增益坍塌现象的集电极电流也就越大, 器件的热稳定性越好。从提高热稳定性角度考虑, 发射极镇流电阻越大越好。但它的选取也要考虑对其他器件性能的影响。

为了验证上述分析的正确性, 我们制备并测量了发射极有镇流电阻16个HBT 并联器件的输出特性曲线, 如图2 所示。所测器件是由16个单管并联而成的, 每个单管发射极面积为 $2\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$ , 每个发射极所加的镇流电阻为 $25\Omega$ 。从图中可以看出, 它的发射极电流在大于 $90\text{mA}$  时仍没有发生电流增益坍塌现象, 说明用这种方法解决HBT 由于热不稳定造成的电流增益坍塌现象是切实可行的。

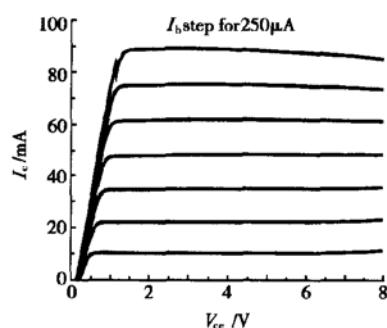


图2 发射极加镇流电阻后16个 $2\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$  In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>-P/GaAs HBT 并联时的输出特性曲线

Fig. 2 DC characteristics of 16-transistors InGaP/GaAs HBT's with emitter ballasted resistor

从上面的理论分析及实验研究可以看出, 发射极加一个镇流电阻后, 可以显著改善器件的热稳定性, 而且发射极镇流电阻越大, 器件的热稳定性就越好。但是它的选取也要考虑对其他器件性能的影

响。

发射极加一个10Ω的镇流电阻和发射极无镇流电阻时,发射极面积为2μm×6μm的In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>-P/GaAs HBT的输出特性曲线分别如图3(a)、(b)所示。从图中可以看出,发射极有无镇流电阻时器件的补偿电压基本不变,均为150mV。无发射极镇流电阻时器件的饱和电压为0.75V,发射极加10Ω镇流后,同样电流时器件的饱和电压稍有增加。从以上结果可以看出,发射极加一个小的镇流电阻后对器件的输出特性没有明显的不利,因此为了提高器件的热稳定性,加入一个小的发射极镇流电阻,对器件的直流特性影响不大。

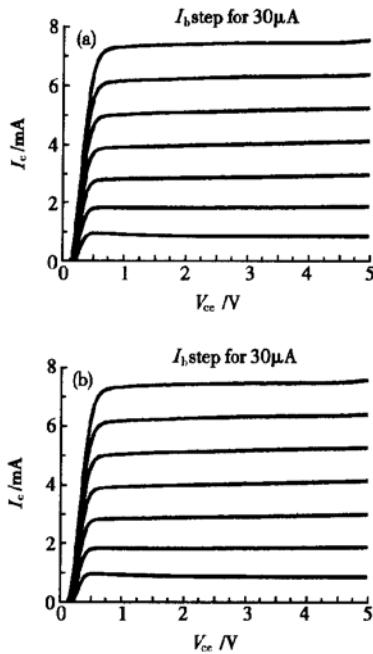


图3 In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>P/GaAs HBT 的输出特性曲线 (a) 发射极加10Ω镇流电阻;(b)无镇流电阻

Fig. 3 DC characteristics of In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>P/GaAs HBT's (a) 10Ω emitter ballasted resistor; (b) No emitter ballasted resistor

HBT的补偿电压为:

$$V_{\text{offset}} = \frac{\eta_{\text{be}}kT}{q} \ln\left(\frac{I_{\text{ex}}}{I_{\text{es}}}\right) - \frac{\eta_{\text{bc}}kT}{q} \ln(\alpha_r) + \frac{\eta_{\text{bc}}}{\eta_{\text{be}}} I_b R_e + (1 - \frac{\eta_{\text{bc}}}{\eta_{\text{be}}})(V_{\text{be}} - I_b R_b) \quad (2)$$

式中  $\alpha_r, \alpha_f$  分别为正、反向电流转移率;  $\eta_{\text{be}}, \eta_{\text{bc}}$  分别为发射结、集电结电流理想因子;  $R_e, R_b$  分别为发射区、基区电阻。发射极加10Ω的镇流电阻后,(2)式中的 $R_e$ 变为 $R_e+10\Omega$ ,其他项不变,因此补偿电压的增

加值为 $10I_b$ 。在上述测试中, $I_b$ 的最大值为210μA,计算可得补偿电压的最大增加值为 $2.1 \times 10^{-3}$ V。如此小的差异是在测量误差范围内的,因此从测量曲线很难看出。

HBT 膝点电压的计算公式为[8]:

$$V_{\text{knee}} = \frac{\eta_{\text{be}}kT}{q} \ln\left[\frac{I_e - \alpha_r I_c}{I_{\text{es}}(1 - \alpha_r \alpha_f)}\right] - \frac{\eta_{\text{bc}}kT}{q} \times \ln\left[\frac{\alpha_r I_e - I_c}{(1 - \alpha_r \alpha_f) I_{\text{es}}}\right] + I_e R_e + I_c R_c \quad (3)$$

在上述测量中,集电极电流的最大值为7.3mA,因此发射极电流的最大值也约为7.3mA(这时对应的发射极电流密度高达 $6.1 \times 10^4$ A/cm<sup>2</sup>)。由此可知,加10Ω的发射极镇流电阻后,在很高的电流密度下膝点电压的增加值大于70mV。如此小的改变对器件的直流特性影响不大。随着发射极镇流电阻的增加,它对HBT 直流特性的不利影响将加大。

#### 4 发射极镇流电阻对 HBT 高频特性的影响

用HP8510C 测量了不同偏置条件下,发射极加一个10Ω的镇流电阻和发射极无镇流电阻时,发射极面积为2μm×6μm的In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>P/GaAs HBT 的截止频率与基极-发射极,集电极-发射极之间电压的关系,测试结果如图4 所示。从图中可以看出,对于同样发射极面积的器件其截止频率相同,均为74GHz,所不同的是它们达到此截止频率的条件不

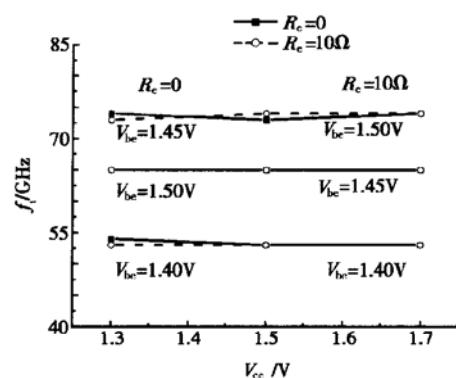


图4 有无发射极镇流电阻时In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>P/GaAs HBT 的截止频率与输出电压的关系

Fig. 4  $f_c$  of In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>P/GaAs HBT as a function of  $V_{\text{ce}}$

同。在基极-发射极偏压相同的情况下,集电极-发射

极之间的电压在 1.3~1.7V 的范围内, 对截止频率几乎没有影响。发射极无镇流电阻, 基极-发射极之间的电压为 1.45V 时, 截止频率达到最大值, 而发射极加 10Ω 的镇流电阻后, 基极-发射极之间的电压  $V_{be}$  为 1.50V 时, 截止频率才达到最大值。这是因为基极-发射极之间的电压有一部分要降到发射极阻  $R_e$  上, 扣除这部分的影响后, 实际上截止频率达到最大值时, 两种情况加到发射结上的电压  $V_{be'}$  是相同的。

有无发射极镇流电阻时截止频率与集电极电流的关系如图 5 所示。从图中可以看出, 两种情况下, 集电极电流均为 6~7mA, 即电流密度为 5~6 × 10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup> 时, 截止频率达到较高的水平。但电流密度在 4~5 × 10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup> (对应的集电极电流为 4.8~6mA) 之间时, 发射极有镇流电阻时器件的截止频率比没有镇流电阻时的略低。这是因为在发射极加镇流电阻  $R_e$  后, 它的集电区渡越时间  $\tau_c^{[8]}$  由  $\tau_c = (R_e + R_{ce})C_{je}$  变为  $\tau_c = (R_e + R_{ce} + R_e)C_{je}$ 。由于公式中增加了一个电阻  $R_{ce}$ , 使得它的集电区渡越时间  $\tau_c$  增加。由公式<sup>[8]</sup>:

$$f_t = \frac{1}{2\pi(\tau_e + \tau_b + \tau_{sc} + \tau_c)} \quad (4)$$

可知, HBT 的截止频率降低。当电流较高时, 集电极电容和电阻均降低, 集电区渡越时间常数对截止频率的影响不大, 而器件的截止频率又是在较高电流的情况下达到的, 因此它对截止频率的影响不大。

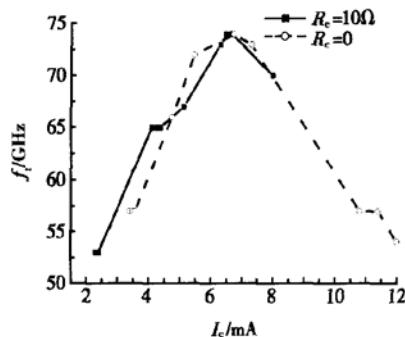


图 5 有无发射极镇流电阻时  $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$  HBT 的截止频率与集电极电流的关系

Fig. 5  $f_t$  of  $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$  HBT as a function of  $I_c$

应用在电路中的 HBT, 一般情况下器件的工作电流密度设计在 4~5 × 10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup> 之间。尽管发射极有镇流电阻并没有使其截止频率降低, 但器件在工

作条件下的截止频率有所降低, 因此它仍会使电路的速度有所下降。所以在电路中用到镇流电阻时, 一定要优化电阻的设计, 既要利用它对电路中器件热稳定性能的提高, 又不能使电路的传输速率降低太多。

## 5 结论

从上面的实验结果及理论分析可以看出, 发射极加一个镇流电阻后可以显著提高  $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$  HBT 的热稳定性。当发射极镇流电阻不很大时, 它对器件的直流特性并没有明显不利, 也不会影响它的截止频率, 但电流密度为 4~5 × 10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup> 左右时, 有镇流电阻时器件的截止频率比没有镇流电阻时要小。因此, 在电路设计时要优化镇流电阻的值, 既要兼顾镇流电阻对电路热稳定性的提高, 又要考虑它对电路速度的影响。

## 参考文献

- [1] Urteaga M, Dcott D, Mathew T, et al. Single-stage G-band HBT amplifier with 6.3dB gain at 175GHz. IEEE GaAs Digest, 2001: 83
- [2] Shi Ruiying, Liu Xunchun. Improve transmit data bit rate and characteristic of optical modulator driver circuit by cascode HBT. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(5): 534 (in Chinese) [石瑞英, 刘训春. 用新的电路形式提高 HBT 光调制器驱动电路的传输速率及性能. 半导体学报, 2003, 24(5): 534]
- [3] 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
- [4] Gao Guangbo, Wang Mingzhu, Gui Xiang, et al. Thermal design studies of high-power heterojunction bipolar transistors. IEEE Trans Electron Devices, 1989, 36(5): 854
- [5] Adlerstein M G. Thermal stability of emitter ballasted HBT's. IEEE Trans Electron Devices, 1998, 45(8): 1653
- [6] Plavski L G, Rubanovitch M G, Shauro G S. Improvement of properties of ballast loadings of a microwave. 4th International Conference, 1998: 312
- [7] Gao G B, Ünlü M S, Morkoc H, et al. Emitter ballasting resistor design for, and current handling capability of AlGaAs/GaAs power heterojunction bipolar transistors. IEEE Trans Electron Devices, 1991, 38(2): 185
- [8] Liu William. Handbook of III-V Compound Semiconductor. United States of America, A Wiley-Interscience Publication, 1998

## Effect of Emitter Ballasting Resistor on $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$ HBT Characteristics<sup>\*</sup>

Shi Ruiying<sup>1</sup>, Sun Haifeng<sup>2</sup>, Yuan Zhipeng<sup>2</sup>, Luo Mingxiong<sup>2</sup> and Wang Ning<sup>2</sup>

(1 Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(2 Institute of Microelectronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The collapse of current often occurs in multi-transistors heterojunction bipolar transistors. It is demonstrated that the emitter ballasting resistor can prevent the collapse of current. Effect of emitter ballasting resistor on  $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$  HBT characteristics is studied and analyzed.

**Key words:** emitter ballasting resistor;  $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$  HBT; DC characteristics; RF characteristics

**EEACC:** 1350F; 2560B; 2560J; 2560Z

**Article ID:** 0253-4177(2004)07-0831-05

\* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. G200006830403)

Shi Ruiying female, associate professor. Her research interests are compound semiconductor devices and MMICs.

Received 23 July 2003, revised manuscript received 12 November 2003

© 2004 The Chinese Institute of Electronics