

基于热电模型的多发射极功率 HBTs 非均匀镇流电阻设计*

金冬月[†] 张万荣 谢红云 王 扬 邱建军

(北京工业大学电子信息与工程控制学院, 北京 100022)

摘要: 在考虑发射结电压随温度的变化和发射极加入镇流电阻的情况下, 给出简化的三维热电模型, 用以计算功率 HBT 芯片表面温度分布. 分析表明, 对于采用均匀发射极镇流电阻设计的功率 HBT, 芯片中心发射极条温度最高, 严重限制了器件的功率处理能力. 因此提出非均匀发射极镇流电阻设计方案, 并以 12 指 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ HBT 为例, 详细地给出非均匀发射极镇流电阻设计流程. 结果表明, 在总发射极镇流电阻阻值(各指发射极镇流电阻并联值)不变的情况下, 非均匀发射极镇流电阻设计与传统的均匀设计相比, 芯片中心结温显著降低, 芯片表面温度趋于一致. 还发现当各指发射极镇流电阻阻值从芯片边缘到中心按指数形式分布时, 功率 HBT 的芯片表面温度更容易趋于均匀, 大大提高了 HBT 的功率处理能力, 为功率 HBT 的设计提供了指导.

关键词: 异质结双极晶体管; 热电模型; 发射极镇流电阻

PACC: 8160C EEACC: 2560J

中图分类号: TN32 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0439-04

1 引言

异质结双极晶体管(HBT)被广泛应用于功率放大器、雷达、通讯等领域. 为改善电流处理能力和散热能力, 减少沿发射极条长方向的信号异相延迟时间, 功率 HBT 通常采用多发射极并联方式. 然而每一个条上的自热效应和条间的热耦合使 HBT 在高功率下变得不稳定, 严重限制晶体管的功率处理能力^[1].

为了削弱多发射极 HBT 的自加热效应, 通常采用发射极镇流电阻技术, 这是防止自热效应的行之有效、简单易行的办法, 被现代微波功率 HBT 普遍采用. 然而传统的多发射极镇流电阻均为均匀设计(即每个发射极条的镇流电阻值是相等的). 均匀发射极镇流电阻设计虽然可以通过适当选取镇流电阻阻值来补偿自加热效应, 但无法改善由热电耦合效应引起的热不稳定性. 因此本文提出非均匀发射极镇流电阻设计, 来改善功率 HBT 的热稳定性. 并在考虑发射结电压负温度系数 $\phi(\phi = \partial V_{BE} / \partial T < 0)$ 和发射极加入镇流电阻的情况下给出改进的三维热电模型, 用以计算功率 HBT 芯片表面温度分布. 并以 12 指 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ HBT 为例, 详细给出非均匀发射

极镇流电阻设计过程. 同时, 对非均匀发射极镇流电阻分布进行了线性拟合、二次多项式拟合和指数拟合, 并进行了比较.

2 热电模型

功率 HBT 一般采用多发射极梳状结构, 工作时可以等效为多个子晶体管的并联, 以提高其功率处理能力, 其等效模型如图 1 所示, 其中芯片延 x, y, z 方向的尺寸分别为 L, W 和 d . 发射极条数为 N , 芯片底部温度为环境温度 T_0 , 每个发射极的条长为 l , 条宽为 w . 芯片稳态热分布满足拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 T(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

边界条件如下所示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0, L} &= 0 & \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0, W} &= 0 \\ K_{th} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=d} &= -p(x, y) & T \Big|_{z=0} &= T_0 \end{aligned}$$

其中假设热源位于芯片表面($z=0$), $p(x, y)$ 为芯片表面功率密度, $k(x, y, z)$ 为芯片的热导率.

采用分离变量法及双边傅里叶级数对(1)式进行化简及求解, 可以得到各发射极条上温度 $T(x, y, 0)$ 的表达式. 理论上, 由于每个热源的温度分布是不均匀的, 所以要把其划分为若干小的基元^[2]. 但

* 国家自然科学基金(批准号: 60376033)、北京市教委科技发展计划(批准号: KM200710005015)、北京市优秀跨世纪人才基金(批准号: 67002013200301)及模拟集成电路国家重点实验室基金(批准号: 51439010804QT0101)资助项目

[†] 通信作者. Email: jindy@emails.bjut.edu.cn

2006-12-29 收到

©2007 中国电子学会

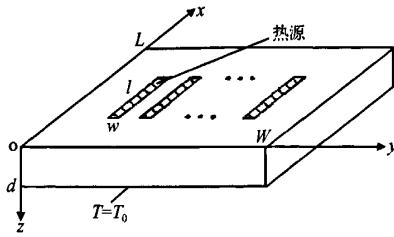


图 1 功率 HBT 三维热传导模型

Fig. 1 Schematic diagram of power HBT heat-conduction model in three dimensions

是考虑到功率 HBT 各指发射极条尺寸比较小,对于每个发射极条来讲,其上温差不会太大,所以可假设每个发射极条就是一个基元,即可以用第 k 个发射极条的中心坐标 (x_k, y_k) 处温度表示第 k 个发射极条的温度,进而得到简化的 $T(x, y, 0)$ 表达式:

$$T(x_k, y_k, 0) = \frac{2w}{LW} \times \left[\sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\lambda_m} \tanh(\lambda_m d) \sum_{k=1}^N \frac{P_k}{K_k} F(m, k) \cos(\lambda_m x_k) \right] + \frac{2l}{LW} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\mu_n} \tanh(\mu_n d) \sum_{k=1}^N \frac{P_k}{K_k} \times G(n, k) \cos(\mu_n y_k) \right] + \frac{4}{LW} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\lambda_m \mu_n \gamma} \tanh(\gamma d) \times \sum_{k=1}^N \left[\frac{P_k}{K_k} F(m, k) G(n, k) \times \cos(\lambda_m x_k) \cos(\mu_n y_k) \right] \right\} + \frac{lwd}{LW} \sum_{k=1}^N \frac{P_k}{K_k} + T_0 \quad (2)$$

其中

$$\lambda_m = m\pi/L \quad \mu_n = n\pi/W \quad \gamma^2 = \lambda_m^2 + \mu_n^2$$

$$F(m, k) = \sin\lambda_m(x_k + 1/2) - \sin\lambda_m(x_k - 1/2)$$

$$G(n, k) = \sin\mu_n(y_k + w/2) - \sin\mu_n(y_k - w/2)$$

$$K_k = \frac{320}{T_k - 80}$$

在考虑发射结电压负温度系数和发射极镇流电阻情况下,每个条上的电流密度 J_{ck} 为:

$$J_{ck} = J_{co} \times \exp \left\{ \frac{V_{BE} - l w J_{ck} R_{Eck} (h_{fek} + 1) / h_{fek} - \phi [T(x_k, y_k, 0) - T_0]}{kT_0/q} \right\} \quad (3)$$

其中 R_{Eck} 为发射极镇流电阻; h_{fek} 为每个子晶体管的电流增益; ϕ 为 SiGe HBT 发射结电压温度系数 ($\phi = \partial V_{BE} / \partial T < 0$).

3 结果与讨论

利用(2)和(3)式,采用自洽迭代法可以得到芯

片表面的稳态温度场分布,如图 2 所示,其中 6 指功率 HBT 发射区面积为 $6 \times 2 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$. 可以看出,对于传统的均匀发射极镇流电阻设计而言通过增大各发射极镇流电阻值可降低器件整体工作温度,但芯片中心发射极条温度仍高于芯片边缘发射极条温度,因而限制了器件的功率处理能力.而在保持器件发射极总镇流电阻不变的情况下,通过各指发射极镇流电阻非均匀设计可有效降低芯片中心发射极温度,芯片表面温度分布趋于平均.

	R_{E1} / Ω	R_{E2} / Ω	R_{E3} / Ω	R_{E4} / Ω	R_{E5} / Ω	R_{E6} / Ω
A1	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
B1	6	6	6	6	6	6
C1	5.5	6	6.6	6.6	6	5.5

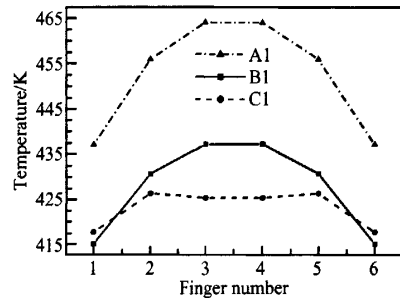


图 2 6 指功率 HBT 芯片温度分布

Fig. 2 Temperature of each finger across a 6-finger HBT

对于功率 HBT,通常发射极条数较多,因此我们以 12 指功率 HBT 为例给出发射极镇流电阻非均匀设计规则.首先,根据器件工作条件确定器件自热补偿所需最小镇流电阻值^[3,4]:

$$R_{EminHBT} = \frac{\phi R_{th} I_C V_{CE} - KT_0/q}{I_E + \Delta E I_{pb} R_{th} I_C V_{CE} / KT^2} \quad (3)$$

其中 R_{th} 为器件热阻; I_C , I_E 分别为集电极和发射极电流; V_{CE} 为工作电压; I_{pb} 为发射结空穴反向注入电流; ΔE 为发射结能带不连续性能量差.

本文以 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ HBT 为例,在一定的工作条件下求得功率 HBT 所需总发射极镇流电阻为 0.75Ω ,即对于 12 指 HBT 来说每个发射极镇流电阻均为 9Ω .在此基础上我们对 12 指 HBT 非均匀镇流电阻分布进行了设计.考虑到对称性,只需设计 6 个发射极镇流电阻即可.假设这 6 个发射极镇流电阻阻值分别为 $R_{E1}, R_{E2}, \dots, R_{E6}$,其中 R_{E6} 为芯片中心发射极镇流电阻.将这 6 个发射极镇流电阻分成四组 R_{E1}, R_{E2}, R_{E3} , 和 $R_{E4} \sim R_{E6}$,这样只需对四组镇流电阻进行设计,减少计算量.具体设计概括如下:(1)以 9Ω 发射极镇流电阻为基准,在保证总发射极镇流电阻(即各发射极镇流电阻并联值)不变的

情况下,减小第一组 R_{E1} 和第二组 R_{E2} 阻值,增大第三组 R_{E3} 和第四组 ($R_{E4} \sim R_{E6}$) 阻值.通过试值,得到了一组较为理想的镇流电阻分布,如图 3 曲线 C 所示.可以看出芯片中心温度显著下降,芯片边缘温度适当升高,芯片表面温度趋于一致.(2)以曲线 C 各发射极镇流电阻为基准,对 $R_{E1}, R_{E2}, \dots, R_{E6}$ 6 个发射极镇流电阻进行微调,适当减小芯片边缘镇流电阻、增大芯片中心发射极镇流电阻,进而得到更为理想的芯片表面温度稳态均匀分布曲线,如图 4 曲线 F 所示.

	R_{E1} / Ω	R_{E2} / Ω	R_{E3} / Ω	$R_{E4} \sim R_{E6}$ / Ω
A	9	9	9	9
B	6	8.6	9.9	10.6
C	7	8.5	9.5	10
D	8	8.8	9.2	9.4

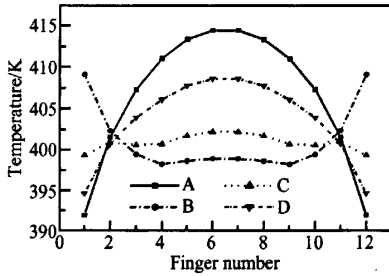


图 3 非均匀发射极镇流电阻(R_E)设计对芯片温度分布的改善(A~D)

Fig. 3 Improvements of temperature distribution in power HBT with non-uniform R_E designs

	R_{E1} / Ω	R_{E2} / Ω	R_{E3} / Ω	R_{E4} / Ω	R_{E5} / Ω	R_{E6} / Ω
C	7	8.5	9.5	10	10	10
E	6.8	8.6	9.4	10.1	10.1	10.1
F	6.8	8.6	9.4	9.9	10.2	10.3
G	6.5	8.5	9.7	10.3	10.3	10.3

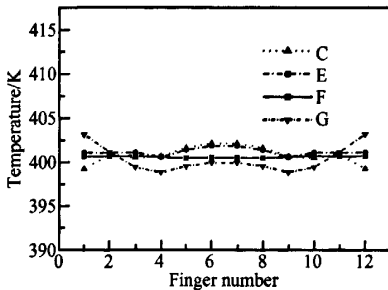


图 4 非均匀发射极镇流电阻(R_E)设计对芯片温度分布的进一步改善(C~G)

Fig. 4 Further improvements of temperature distribution in HBT with non-uniform R_E designs

图 5 给出了器件总发射极镇流电阻恒定的情况下,采用发射极非均匀镇流电阻设计后功率 HBT 芯片表面温度改善情况,可以看出与传统的均匀发射极镇流电阻设计相比,非均匀设计的芯片中心结温降低了 15K,芯片表面温差由 20K 减小到 0.3K.值得注意的是此时器件并没有工作在大功率条件下 ($V_{BE} = 1V, V_{CB} = 3V$).当功率 HBT 偏置电压处于更高的功率水平时,非均匀发射极镇流电阻设计对芯片表面温度分布的改善会更加明显.

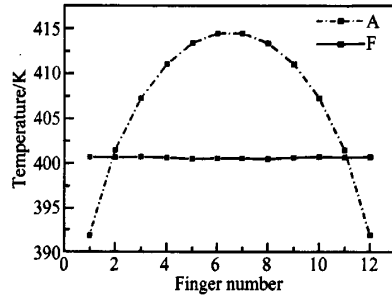


图 5 发射极镇流电阻非均匀设计和均匀设计比较

Fig. 5 Comparison of temperature across the 12-finger HBT for uniform and non-uniform R_E

$$S1: R_{En} = 6.92 + \frac{n}{1.54}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (4)$$

$$S2: R_{En} = \frac{(n - 5.24)^2}{5.33} + 10.31, \quad n = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (5)$$

$$S3: R_{En} = 10.44 - 6.95 \times e^{-\frac{n}{1.54}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (6)$$

同时,对非均匀发射极镇流电阻分布进行了线性拟合、二次多项式拟合和指数拟合,拟合方程见(4~6)式,拟合曲线如图 6 所示,其中保持总发射极镇流电阻恒定不变.对应的芯片表面温度分布如图 7 中 $T_1 \sim T_3$ 曲线所示.可以看出,发射极镇流电阻按线性拟合分布时,芯片中心 R_E 值过大导致中心温度太低,可见线性模拟并不理想.与线性拟合结果相

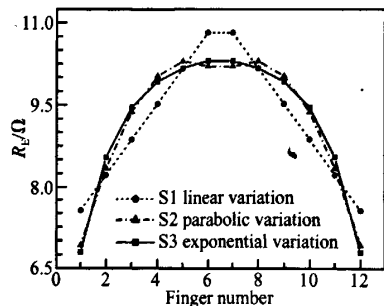


图 6 非均匀发射极镇流电阻拟合曲线

Fig. 6 R_E distribution of linear, parabolic, and exponential variation

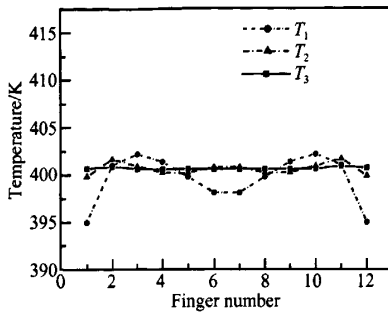


图 7 不同拟合下的芯片温度分布

Fig. 7 Simulated temperature distribution for linear, parabolic, and exponential variation of R_E

比,二次多项式拟合设计较为理想,然而芯片表面温差超过 6K,因此发射极镇流电阻分布有待进一步优化。 R_E 按指数拟合分布时,芯片表面温度差小于 1.5K,与图 5 的 F 曲线非常接近,温度分布优于线性模拟和二项式模拟结果。

4 结论

在考虑发射结电压随温度的变化和发射极加入镇流电阻的情况下,给出简化的三维热电模型,用以计算功率 HBT 芯片表面温度分布.并以 12 指 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ HBT 为例,详细地给出了非均匀发射极镇

流电阻设计过程.结果表明,在总发射极镇流电阻阻值(各指发射极镇流电阻并联值)不变的情况下,非均匀发射极镇流电阻设计与传统的均匀设计相比,芯片中心结温降低了 15K,芯片表面温差由 20K 减小到 0.3K,非均匀设计大大提高了 HBT 的功率处理能力.同时我们发现当各指发射极镇流电阻阻值从芯片边缘到中心按指数分布时,多发射极功率 HBT 的芯片表面温度更趋于均匀,进而大大提高了 HBT 的功率处理能力,为功率 HBT 的设计提供了指导.

参考文献

- [1] Rinaldi N. Small-signal operation of semiconductor devices including self-heating, with application to thermal characterization and instability analysis. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(2): 323
- [2] Gao Guangbo, Wang Mingzhu, Gui Xian. Thermal design studies of high-power heterojunction bipolar transistors. *IEEE Trans Electron Devices*, 1989, 36(5): 854
- [3] Jin Dongyue, Zhang Wanrong, Wu Chunyu. Self-heating effect of RF power HBT and its compensation. *Chinese Journal of Microelectronics*, 2006, 36(3): 288 (in Chinese) [金冬月,张万荣,吴春瑜.射频功率 HBT 自加热效应及补偿方法.微电子学报,2006,36(3):288]
- [4] Jin Dongyue, Zhang Wanrong, Xie Hongyun. New expression of the thermal stability for RF power HBT. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2006, 29(4): 1168 (in Chinese) [金冬月,张万荣,谢红云.射频功率 HBT 热稳定性的一种新表征方法.电子器件,2006,29(4):1168]

Non-Uniform Emitter Ballasting Resistor Design of Multi-Finger Power HBTs with a Thermal-Electrical Model*

Jin Dongyue[†], Zhang Wanrong, Xie Hongyun, Wang Yang, and Qiu Jianjun

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Taking into account of the temperature dependence of base-emitter voltage and the additional ballasting resistor in emitter, an improved three-dimensional thermal-electrical model is presented to study the temperature distribution in power heterojunction bipolar transistor (HBT). It is found that multi-finger HBT with uniform emitter ballasting resistor exhibits a higher temperature at the center of the device, which reduces the power-handing capability of HBT. Therefore, non-uniform emitter ballasting resistor design of multi-finger power HBT is presented to improve the power-handing capability of HBT. Taking 12-finger $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ HBT for example, the design procedure of non-uniform emitter ballasting resistor is described in detail. Compared with the uniform design, the center finger temperature reduces obviously and the device temperature distribution is uniform with the design of non-uniform emitter ballasting resistor under the condition that the total emitter ballasting resistance is the same. Furthermore, it is found that the temperature distribution is more uniform with the exponential variation of emitter ballasting resistance. As a result, the power-handing capability of HBT is improved obviously, which is beneficial to the design of power HBT.

Key words: heterojunction bipolar transistor; thermal-electrical model; emitter ballasting resistor

PACC: 8160C EEACC: 2560J

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0439-04

* Projects supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60376033), the Beijing Municipal Commission of Education (No. KM200710005015), the Beijing Municipal Excellent Trans-Century Talent Project (No. 67002013200301), and the Foundation of National Key Laboratory for Analog Integrated Circuits of China (No. 51439010804QT0101)

[†] Corresponding author. Email: jindy@emails.bjut.edu.cn

Received 29 December 2006