

微波功率双极晶体管热分布的二维数值模拟 及功率密度非均匀设计

蔡 勇¹ 张利春¹ 高玉芝¹ 叶红飞¹ 金海岩¹ 张树丹²

(1 北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

(2 南京电子器件研究所, 南京 210016)

摘要: 利用双极晶体管的热电耦合模型对微波功率双极晶体管进行了二维直流稳态模拟, 并且提出了功率密度非均匀的设计方法. 模拟和实验的结果说明, 采用微波功率晶体管功率密度非均匀设计可有效提高器件电流密度的均匀性和结温的均匀性, 从而整体提高器件的可靠性.

关键词: 功率晶体管; 数值模拟; 功率密度非均匀设计; 温度分布

EEACC: 2560J; 2560P; 2550X

中图分类号: TN322*.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)02-0209-07

1 引言

双极晶体管(BJT)的热分析是长久以来一直受到关注的课题. 由于热传导的二维、三维效应, 晶体管的结温不处于统一温度, 而是随位置变化的^[1,2]. 双极晶体管的发射极电流密度(J_e)是温度的敏感函数, 结温的不均匀导致晶体管不同位置发射极电流密度不均匀分布^[3,4]. 通常晶体管中心区域的温度明显高于边缘区域, 意味着电流集中在器件的中心. 在微波功率双极晶体管中, 这种现象更加明显. 究其原因有三个方面的原因: (1) 微波应用中, 发射极与基极的线条更细, 发射极间距更小, 热耦合更加显著^[5]. (2) 为提高微波和功率性能, 集电极电流密度很大, 因而功率密度更高. (3) 为获得更大的功率和充分利用芯片面积, 器件有源区的面积也不断增加, 器件的中心区域热流趋近一维传导, 而边缘则是二维、三维导热. 由于上述几方面因素的影响, 再加上发射极电流密度对温度的正反馈, 电流集中于中心区域, 器件中心与边缘温度相差很大, 严重时可达几十度. 器件的热可靠性与最高结温相关, 微波功率双极晶体管中的大温差效应, 将导致器件的可靠性整体下降.

为提高微波功率双极晶体管的热可靠性, 最常用的改善方法是采用镇流电阻, 即在发射条的根部串联金属电阻或扩散电阻, 此种方法主要是减弱发射极电流密度对温度的正反馈效应, 减弱了电流在发射条间分布不均匀性, 从而相应减小中心与边缘的温差. 王因生等人^[6]在此方法的基础上, 利用多晶硅电阻实现垂直镇流, 减弱了发射条内的电流分布不均匀性. 然而镇流电阻不能从根本上改变热流的二维、三维效应, 所起作用是减弱热流的二维、三维效应引起的电流分布的不均匀性, 垂直镇流虽然是有效抑制电流不均匀的措施, 实际工艺加工中很难有效控制多晶硅的电阻值. 而且, 提高器件的热可靠性是以牺牲器件的频率特性为代价的.

Chen 和 Snapp^[7]在 1979 年提出另一方法: 发射条的间断设计, 在器件的中心区(通常出现最高结温的区域)边缘发射条断开, 并空出此区域, 在此区域内没有功率耗散, 从而获得结温一致的晶体管. 他们将这种方法结合镇流电阻方法用于制备线性微波功率管, 且获得了均匀结温. Lee 等人^[8]分析了不同发射条的设计对温度均匀性的影响, 他们的结果表明, 不等间距发射条和不等长度发射条设计都有利于改进 AlGaAs/GaAs HBT 结温的均匀性. 上述方法都是直接减小热流的二维、三维效应, 由此改进器

件的结温分布的均匀性,提高器件的热可靠性.基于这种思路,本文利用热电耦合的二维数值模拟,详细分析了功率密度非均匀设计(器件中心功率密度小于边缘)对微波功率双极晶体管结温和电流分布的影响,研制出功率密度非均匀设计的微波功率双极晶体管,对比并分析了实验结果.

2 双极晶体管结温分布的定性分析

为了尽可能降低硅微波功率双极晶体管的最高结温,晶体管的有源区一般设计为长条形(减小三维效应),有源区长宽比通常大于 10,有源区长度与硅片厚度比接近或大于 10.利用有限元软件 ANSYS 对晶体管的散热进行三维定性分析(ANSYS 中无法加入温度对电流的反馈作用).设:有源区面积 $A_c = 60\mu\text{m} \times 600\mu\text{m}$,芯片厚度 $W = 80\mu\text{m}$,芯片尺寸为 $400\mu\text{m} \times 1200\mu\text{m}$,总直流功耗 $P_D = 7.5\text{W}$,芯片底部温度恒定在 300K .由晶体管结温的等温线,可以看出:等温线在有源区边缘和外部近似等于有源区矩形形状,而在中心区域则收缩成细长条,沿 x 轴方向(长度方向)等温线变化较缓和,沿 y 轴方向(宽度方向)等温线变化陡峭得多.图 1 和图 2 分别为器件结温沿 x 轴($y = 0$)和 y 轴($x = 0$)变化的曲线.虽然沿 x 轴方向,结温的最大值与最小值之差较大,达到约 56°C ,但是在 $100 < x < 500$ 大约 $400\mu\text{m}$ 的范围内 $\Delta T < 5^\circ\text{C}$,占 67%.沿 y 轴方向,中心与边缘的温差相对小一点约 35°C ,可是 $\Delta T < 5^\circ\text{C}$ 的范围在

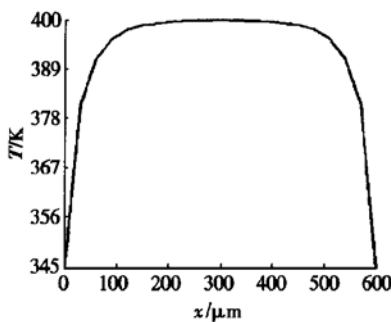


图 1 沿 x 轴结温变化

Fig. 1 Temperature variation along x -axis

$20\mu\text{m}$ 内,只占 33%.事实上,微波大功率晶体管的有源区长度 L 有可能更大,同时沿 x 轴器件一般都设计了镇流电阻,因温度的变化引起的电流不均匀受到明显的抑制,沿 y 轴方向只有发射极串联电阻,不能起到有效镇流的作用.由此可见,微波功率双极

器件的温度不均匀性及其对器件发射极电流的影响主要表现在宽度方向,即二维散热的影响是最主要的.以下将利用热电耦合数值模拟详细分析器件宽度方向的二维散热.

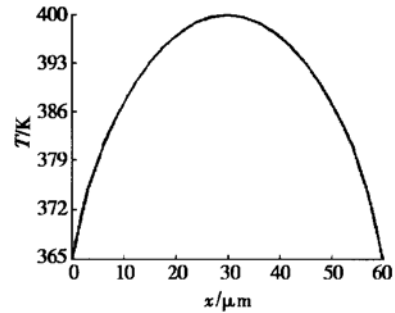


图 2 沿 y 轴结温变化

Fig. 2 Temperature variation along y -axis

3 器件的热电模型

稳态条件下微波功率晶体管的二维热流方程如下:

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

边界条件参照文献[2, 5],设芯片下底面的温度恒定为热沉温度 T_s ,由于器件的结深远小于芯片的厚度,故认为功耗产生在器件有源区的表面;忽略空气的对流传热,芯片的侧壁绝热.边界条件可表述为:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=-B/2, B/2} = 0$$

$$k(x, y) \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = P(x)$$

$$T|_{y=D} = T_s$$

考虑到温度对材料导热率的影响,参照文献[9],硅的导热率可近似为:

$$k(T) = 320/(T - 80)$$

双极功率晶体管中焦耳热主要来源于集电结,功率密度 $P(x) = V_c J_c(x)$.在此忽略了集电极电压 V_c 在有源区各处的差异.同时设 $J_c(x) = J_e(x)$.因为 BJT 的直流 β 一般都较大,只有当集电极电流密度接近或达到最大集电极电流密度 $J_{c\max}$ 时, J_c 才明显小于 J_e ,本文暂不考虑此种情况.发射极电流密度:

$$J_e = J_0 \exp\left(\frac{qV_{be} - E_g(T)}{nkT}\right)$$

式中 V_{be} 为发射结电压; n 为发射极电流的理想因子; J_0 与 T^n 成正比,和后面的指数项相比, J_0 随温

度的变化很微弱,因而在计算过程中设为常数; $E_g(T)$ 为材料的禁带宽度, $E_g(T)$ 与温度的关系为^[10]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}$$

对于 Si 材料, $E_g(0) = 1.170\text{eV}$; $\alpha = 4.73 \times 10^{-4}$; $\beta = 636$. (为简化问题本文没有考虑杂质对禁带宽度的影响).

大功率晶体管可视作多个小晶体管的并联,当发射极电流恒定时,可得一组超越方程:

$$I_c(i) = A(i) J_0 \exp\left(\frac{q(V_{be}(i) - I_c(i)R_c) - E_g(T(i))}{nkT}\right) \quad 1 < i < N$$

$$\sum_{i=1}^N I_c(i) = I_c$$

式中 R_c 为单位面积的发射极串联电阻.

4 器件的发射极布局

数值模拟中实际考虑了如图 3 所示的两种发射极布局方式. 定义 γ 等于有源区中心发射条长度与有源区边缘发射条长度之比. 图 3(a) 是传统发射极

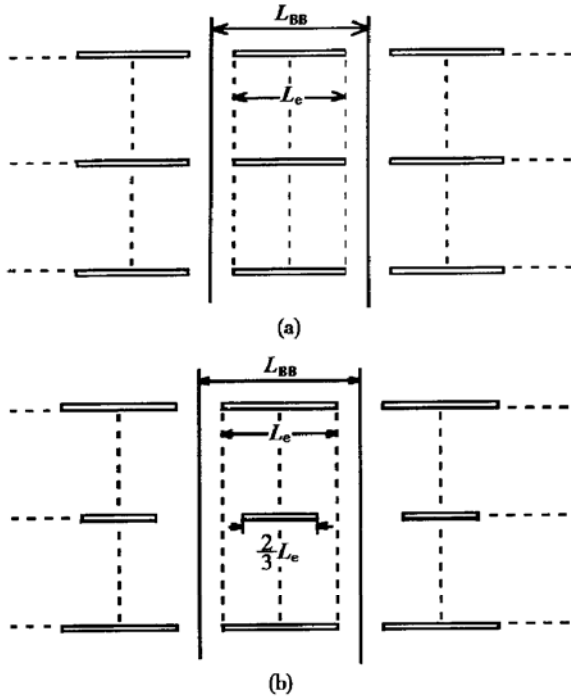


图 3 发射条的布局方式 (a) 普通结构 $\gamma = 1$; (b) $\gamma = 2/3$ 的功率非均匀结构

Fig. 3 Emitter stripes structure (a) Normal structure, $\gamma = 1$; (b) Nonuniform power designed structure, $\gamma = 2/3$

布局, 每条发射条长度相同, $\gamma = 1$. 图 3(b) 的发射条以线性递减方式布局, 中间的发射条长度是边缘发射条长度的 $2/3$, $\gamma = 2/3$. 任意两组发射条之间是外基区, 由前述假设, 此区域内不产生焦耳热. 实际器件是三维结构的, 为方便二维数值模拟, 需要将三维器件结构等效为二维结构. 我们采用如下近似: 对应于每条发射极的晶体管产生的焦耳热均匀耗散在 $W_c \times L$ 的区域内, 并且在此区域内温度相同, 由此可得对于第 i 条发射极的晶体管所耗散的功率密度为:

$$P(i) = V_c \times J_c(i) \times L_c(i)/L \quad 1 \leq i \leq N$$

5 计算结果

用于数值模拟的几何参数直接来源于实际研制出的功率晶体管, 电学参数通过拟合实际功率晶体管的测试结果得到. 参数列于表 1.

表 1 几何参数和电学参数

Table 1 Geometry parameters and electric parameters

参 数	传统发射极布局	发射条以线性递减方式布局
每组发射极总电流, I_c/A	0.02	0.0167
集电极电压, V_c/V	10/12.5	10/12.5
发射极电流密度系数, $J_0/(\text{A} \cdot \mu\text{m}^{-2})$	11.1	11.1
发射极串联电阻, $R_c/(\Omega \cdot \mu\text{m}^{-2})$	40	40
发射极电流理想因子, n	1	1
每组发射条的步距, $L_{BB}/\mu\text{m}$	28	28
每组发射条的条数, N	20	20
有源区边缘发射条长, $L_{e1}/\mu\text{m}$	20	20
比值, γ	1	2/3
芯片厚度, $D/\mu\text{m}$	80	80
芯片背面温度, $T_s/^\circ\text{C}$	75	75

采用有限差分法和松弛迭代方法对模型进行数值求解, 并且利用了器件的二维对称性, 计算了 $0 \sim W/2$ 范围内器件的温度分布和发射极电流密度分布, T_s 取 75°C 是为了与实验结果对比方便. 计算结果示于图 4 和图 5 中.

图 4 所示是晶体管有源区模拟结温分布. 对于普通发射条布局结构 $\gamma = 1$, 最高结温出现在中心区域 ($x = 0$), 最高结温与最低结温的差值较大, 当集电极电压增加时, 中心处最高结温的增加幅度明显大于边缘区域. 对于发射条长度从边缘到中心线性递减方式布局结构 $\gamma = 2/3$, 最高结温不在中心区域, 而是在 $x = 18\mu\text{m}$ 附近, 最高结温与最低结温的

差值较小, 整个有源区内结温分布非常平缓, 从 $x = 0 \sim 30 \mu\text{m}$ 结温差异仅在 5°C 以内, 集电极电压增加时, 结温分布曲线几乎是平行地上升。

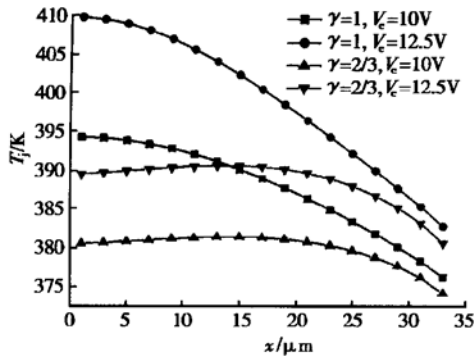


图 4 双极晶体管有源区模拟结温分布

Fig. 4 Simulated results of BJT's temperature distribution

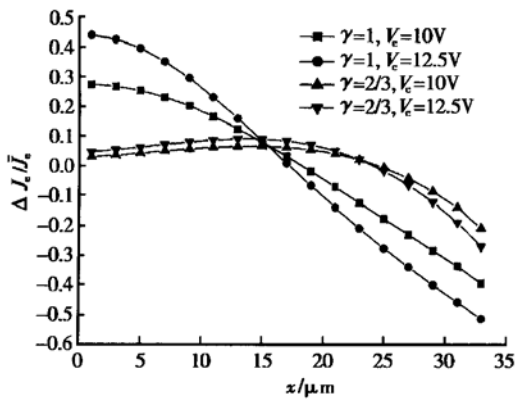


图 5 双极晶体管有源区模拟电流分布

Fig. 5 Simulated results of BJT's current distribution

结温分布的不均匀导致电流分布的不均匀。图 5 所示是晶体管有源区模拟电流密度分布。对于普通发射条布局结构 $\gamma = 1$, 电流集中在有源区中心, 此处电流密度最大, 电流密度的分布比较陡峭, 并且随着集电极电压的增加, 曲线的斜率也增加, 这种电流集中现象更加显著, 中心电流密度与边缘之比达到 3 倍。对于发射条长度从边缘到中心线性递减方式布局结构 $\gamma = 2/3$, 没有出现电流集中现象, 在 $x = 0 \sim 30 \mu\text{m}$ 的范围内电流密度与平均电流密度之比保持在 $-10\% \sim +10\%$ 以内, 随着集电极电压的增加, 电流密度分布只有微弱变化。

从以上计算结果可以看出, 发射条布局结构对双极晶体管的结温分布和电流密度分布有很大影响, 随着有源区中心发射条长度与有源区边缘发射条长度之比 γ 的降低, 晶体管结温分布和电流密度分布趋于平缓, 可降低最高结温, 避免电流集中, 提高器件的可靠性和工作的稳定性。发射条布局结构的调整, 实质上是改变了有源区各处的功率密度, $\gamma < 1$ 的情况就意味着减小有源区中心的功率密度, 从而抑制中心结温的升高。

6 实验结果

我们实际设计并研制出了功率密度非均匀设计的双极微波功率晶体管 ($\gamma = 2/3$), 为了便于比较研究, 同时也设计制作了功率密度均匀的双极微波功率晶体管 ($\gamma = 1$)。为保证两种管子的总电流一致, 因此发射极总周长相同, 基区总面积比约为 $6/5$ 。

采用单层多晶硅双自对准工艺实现器件的制造。经过直流测试, 提取出电学参数。计算模拟中采用的几何及电学参数就来源于实际制备的器件, 如表 1 所示。利用 QFI 公司生产的 Infrascop-II 热成像仪对这两种器件进行了直流稳态分析。图 6、图 7 显示了这两种结构的晶体管在不同直流偏置下的温度分布, 器件热沉的温度恒定为 75°C 。

从实验结果可以看出, $\gamma = 1$ 的普通结构结温的最大值出现在器件有源区的中心区, 而采用功率密度非均匀设计的结构 $\gamma = 2/3$ 结温的最大值在靠近有源区两侧边缘附近, 呈现马鞍型分布。这与模拟计算的结果是一致的。模拟结果和实测结果对比见表 2。最高结温的计算结果与器件实际的结温基本一致。在 $\gamma = 2/3$ 的非均匀结构中, 边缘结温的计算值与模拟值基本吻合, 而在 $\gamma = 1$ 的普通结构中, 边缘结温的计算值与模拟值差异较大。这一较大的差异是由于三维散热造成的。从图 6、图 7 可见, 由于器件有源区左右两端散热的影响, $\gamma = 1$ 的普通结构沿有源区长度方向温度分布是很不均匀的, 中心产生了一块高温区, 其几何尺寸比有源区面积小 (随 V_c 的增加有收缩的趋势), 且其横纵向尺寸的比例小于 5, 这与模型 (> 10) 的假设有很大的不同。因此, 本文所用模型不能精确计算 $\gamma = 1$ 的普通结构, 但是从实验及计算结果来看, 仍可用此模型粗略估计其最高结温。

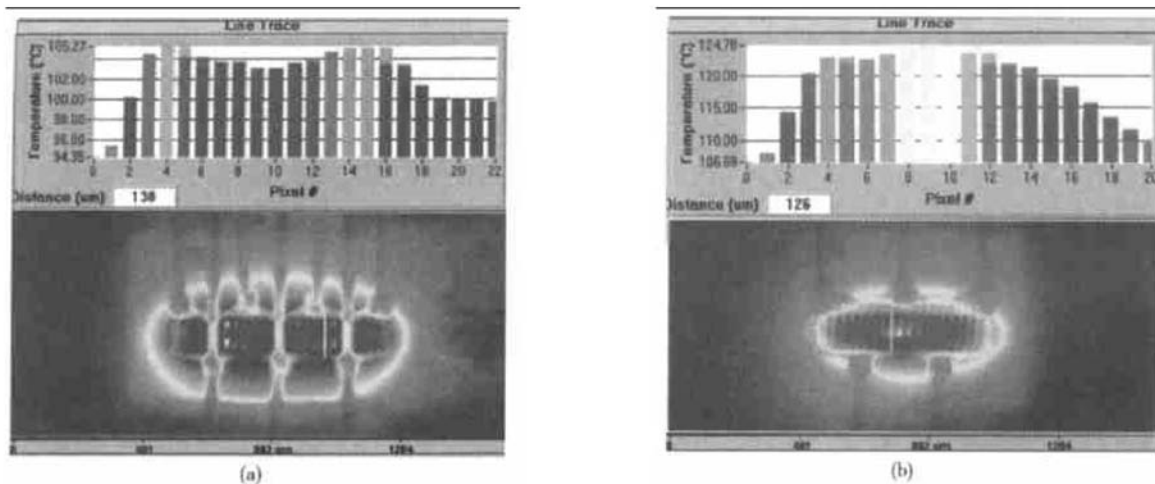


图 6 器件有源区温度分布的测试结果 (a) $\gamma=2/3$; (b) $\gamma=1$ $I_c=0.4A, V_c=10V$.

Fig. 6 Infrared images of temperature distribution (a) $\gamma=2/3$; (b) $\gamma=1$ $I_c=0.4A, V_c=10V$.

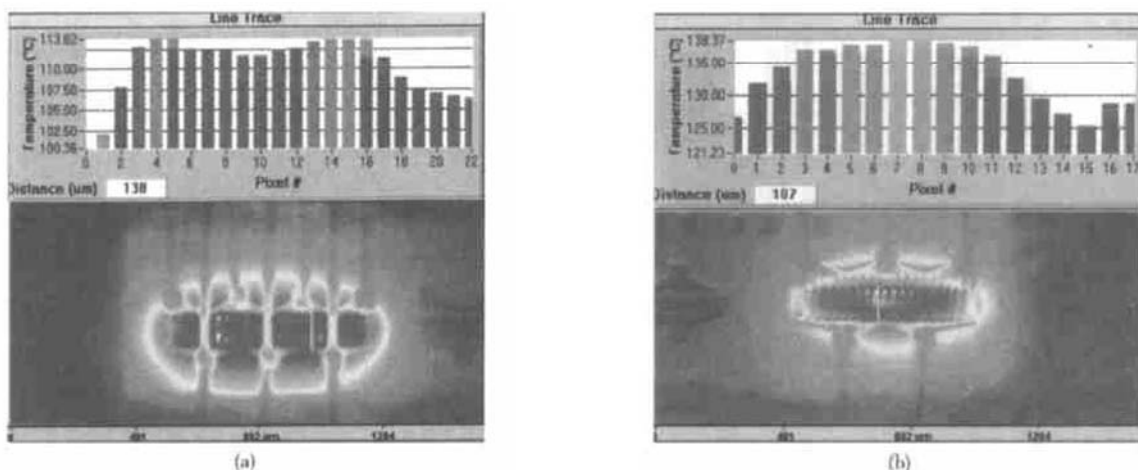


图 7 器件有源区温度分布的测试结果 (a) $\gamma=2/3$; (b) $\gamma=1$ $I_c=0.4A, V_c=12.5V$.

Fig. 7 Infrared images of temperature distribution (a) $\gamma=2/3$; (b) $\gamma=1$ $I_c=0.4A, V_c=12.5V$.

表 2 计算结果与实验结果比较 $^{\circ}C$

Table 2 Comparison of simulated results and experimental results

结 果	$\gamma=1, V_c=10V$		$\gamma=1, V_c=12.5V$		$\gamma=2/3, V_c=10V$		$\gamma=2/3, V_c=12.5V$	
	T_{jmax}	T_{jmin}	T_{jmax}	T_{jmin}	T_{jmax}	T_{jmin}	T_{jmax}	T_{jmin}
计算结果	121.3	103.2	136.7	109.8	107.6	101.2	116.6	107.6
实测结果	124.7	112	138.3	125	105.2	100	113.8	107.5

另外值得注意的是,我们制备的 $\gamma=2/3$ 的非均匀结构晶体管是没有发射极镇流电阻的(实测 $R_e < 0.05\Omega$), $\gamma=1$ 的普通结构晶体管则有发射极镇流电阻(实测 $R_e=0.2\Omega$). 实验结果显示(图 8), 非均匀结构晶体管虽然没有发射极镇流电阻, 可是其温度分布更趋于均匀.

对这两种器件在工作频率为 3.1GHz 下进行了微波测试, 占空比为 10%, V_{cc} 为 30V: $\gamma=2/3$ 的非均匀结构晶体管当脉冲宽度为 $100\mu s$ 时, 脉冲输出功率达到 6W, 有 11dB 的功率增益, 顶降 $< 1dB$, 当脉冲宽度为 $300\mu s$ 时, 脉冲输出功率达到 5.5W, 功率增益 $> 10dB$; $\gamma=1$ 的普通结构晶体管当脉冲宽度为 $100\mu s$ 时, 脉冲输出功率也达到 6W, 具有 11dB 的功率增益, 但是顶降 $> 4dB$, 当脉冲宽度为 $300\mu s$ 时, 脉冲输出功率 $< 4W$, 顶降更为明显, 且极易烧毁. 从微波测试结果可以看出, 经过功率密度非均匀设计的微波功率晶体管具有更好的热稳定性.

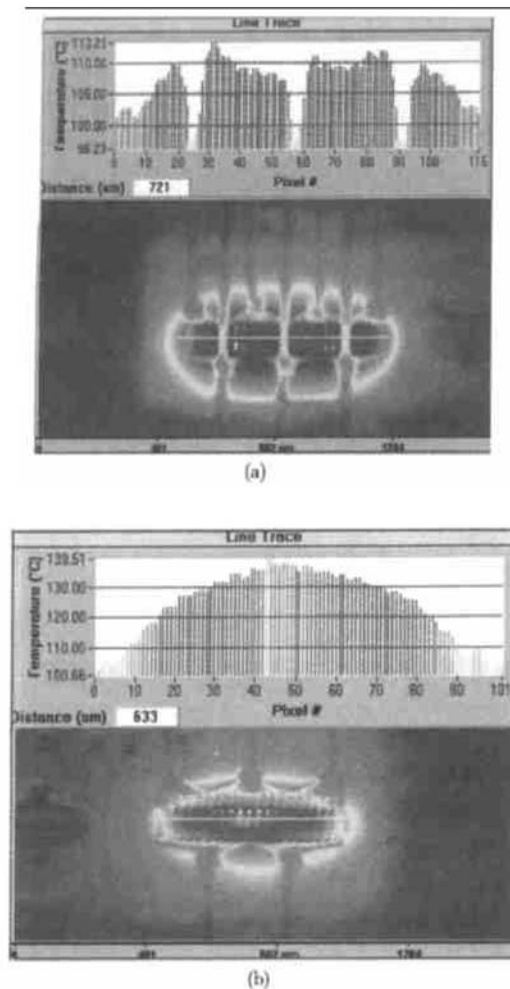


图8 器件有源区温度分布的测试结果 (a) $\gamma = 2/3$; (b) $\gamma = 1$ $I_e = 0.4A$, $V_c = 12.5V$.

Fig. 8 Infrared images of temperature distribution (a) $\gamma = 2/3$; (b) $\gamma = 1$ $I_e = 0.4A$, $V_c = 12.5V$.

7 结论

本文利用双极晶体管的热电耦合模型对双极微波功率晶体管进行了二维直流稳态模拟,并且提出了功率密度非均匀的设计方法.模拟结果和实验结果说明,微波功率晶体管的功率密度非均匀设计可有效提高器件电流密度的均匀性和结温的均匀性.本文所用发射条长度从有源区边缘到中心线性递减 ($\gamma = 2/3$) 的结构只是用来说明此设计方法的有效

性.要想获得性能最佳的器件,必须兼顾器件结温分布的均匀性、最大输出功率以及 f_T 、 f_{max} 等诸多方面,选择最优的 γ .

致谢 感谢北京大学微电子所工艺实验室的全体人员和信息产业部五十五所五中心的傅义珠等人在器件研制中给予的支持和帮助,还要感谢信息产业部十三所郑道成在测试器件温度分布中给予的帮助.

参考文献

- [1] Wilcox W R. Heat transfer in power transistors. IEEE Trans Electron Devices, 1963, ED-10(5): 308
- [2] Lindstead B D, Surty R J. Steady state junction temperatures of semiconductor chips. IEEE Trans Electron Devices, 1972, ED-19(1): 41
- [3] Gao Guangbo. Nonuniform distribution of junction temperature and current in bipolar microwave power transistors. Acta Electronica Sinica, 1978, 2: 56[高光渤. 双极型微波功率晶体管结温与电流的非均匀分布. 电子学报, 1978, 2: 56]
- [4] Bosch G. Anomalous current distributions in power transistors. Solid-State Electron, 1977, 20(7): 635
- [5] Gao Guangbo, Wang Mingzhu, Gui Xiang, et al. Thermal design studies of high-power heterojunction bipolar transistors. IEEE Trans Electron Devices, 1989, 36(5): 858
- [6] Wang Yinsheng, Shan Ning, Wang Dianli, et al. P-band high gain power transistor with 150W pulsed output. Research & Progress of SSE, 1998, 18(1): 15[王因生, 单宁, 王佃利, 等. P波段脉冲输出 150W 高增益功率晶体管. 固体电子学研究与进展, 1998, 18(1): 15]
- [7] Chen J T C, Snapp C P. Bipolar microwave linear power transistor design. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1979, 37(5): 425
- [8] Lee J G, Oh T K, Kim B, et al. Emitter structure of power heterojunction bipolar transistor for enhancement of thermal stability. Solid-State Electron, 2001, 45: 27
- [9] Kokkas A G. Empirical relationships between thermal conductivity and temperature for silicon and germanium. RCA Rev, 1974, 35: 579
- [10] Thurmond C D. The standard thermodynamic functions for the formation of electrons and holes in Ge, Si, GaAs, and GaP. J Electrochem Soc, 1975, 122(8): 1133

2-D Thermal Numeric Simulation of Microwave Power Bipolar Transistor and Nonuniform Power Density Design

Cai Yong¹, Zhang Lichun¹, Gao Yuzhi¹, Ye Hongfei¹, Jin Haiyan¹ and Zhang Shudan²

(1 *Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

(2 *Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China*)

Abstract: By the thermal-electronic coupled model, 2-D temperature distribution of microwave power bipolar transistor which is steady-state biased is numerically simulated. Nonuniform power density design technique is presented. The results of simulations and experiments show that power density nonuniformly designed transistor has better thermal and current uniformity than that of normal transistor. Hence nonuniform power density design technique can improve the reliability of microwave power bipolar transistor.

Key words: power transistor; numeric simulation; nonuniform power density design; temperature distribution

EEACC: 2560J; 2560P; 2550X

Article ID: 0253-4177(2003)02-0209-07