

功率晶体管峰值结温电学 测量技术中的热模型

王明珠 吕长志 高光渤
(电子工程学系)

【摘要】 描述了功率晶体管峰值结温电学测量技术中采用的三维两层结构模型, 给出其解析解及计算程序框图. 用此模型将电学测量的平均结温修正为峰值结温, 修正可达 $10 \sim 30^\circ\text{C}$. 以红外微热像仪测量的热场为标准, 峰值电学法的误差小于 8% , 标准电学法的误差则可达 50% .

【关键词】 功率晶体管, 热模型, 峰值结温, 电学测量技术

【中图分类号】 TN407

0 引言

由于功率晶体管的峰值结温具有空间不均匀性, 使用器件的峰值结温代替平均结温来衡量器件的承受热电应力的能力才更准确. 1975年 Blackburn D L 等人提出了关于功率晶体管峰值结温的电测量技术^[1], 该技术将热阻电测试技术与计算机模拟相结合, 给出了功率晶体管电学测量的峰值结温 T_{jP} .

在此技术的基础上, 我们进行了深入的研究, 提出了功率晶体管峰值结温电学法快速测量技术^[2], 并研制出了测试样机^[3]. 其测量原理可简略地归纳为对标准电学法3个误差的修正, 即①测量信号时间延迟引起误差的修正. ②测量电流 I_{EM} 与校准电流 I_{EC} 分布差异引起误差的修正. ③平均结温与峰值结温之间差别误差的修正. 前两项修正通过硬件设备完成, 第三项修正由热模型及计算程序来完成. 由于在校准曲线测量中采用了OK聚焦法, 且使用热模型解析解, 所研制测试样机可在5min内完成器件的测试, 实现了器件峰值结温的快速测量. 并且可根据需要输出器件芯片表面温度分布数据及作图.

本文将着重描述该测量技术中的热模型及计算程序框图. 用此模型将电测量的平均结温修正为峰值结温, 该项修正可达 $10 \sim 30^\circ\text{C}$. 在电流拥挤造成芯片温度分布不均匀的情况下, 峰值电学法获得的结果与使用红外微像仪测试的结果吻合较好.

1 器件热模型

将电测量的平均结温修正为峰值结温, 需要建立器件热模型, 以使用计算机模拟器件芯片的温度分布, 先定义 η 值为

$$\eta = (\Delta T_{ANG} / \Delta T_{jP})_{\text{模拟}} \quad (1)$$

其中 $\Delta T_{AVG} = T_{AVG} - T_A$

收稿日期: 1992-10-09.

本工作获得电子工业部“七五”科技攻关项目资助.

$$\Delta T_{jP} = T_{jP} - T_A$$

T_{ANG} , T_{jP} 分别为芯片表面的平均结温和峰值结温, T_A 为环境温度。

图1是三维两层结构的热模型, 芯片(厚度为 t_1) 置于铜管座(厚度为 t_2) 上。在功率晶体管中, 热主要产生于集电结, 由于其结深远小于芯片的厚度, 可将芯片内集电结热源近似处理为恒流表面边界, 则体内无热源。设两层材料的热导率为常数。该结构上任一点稳态温度均服从拉普拉斯方程

$$\nabla^2 T^{(i)}(x, y, z) = 0 \tag{2}$$

其中 $T^{(i)}(x, y, z)$ 为第 i 层的温度, $i=1, 2$ 。方程(2)式的边界条件假设如下:

- 1) 此结构的侧壁为绝热面, 忽略辐射和对流散热。
- 2) 芯片表面除有源区外, 均为绝热面。
- 3) 管座置无限大热沉上, 第二层材料的底面为等温面, 其温度等于环境温度。
- 4) 两层材料的界面处温度连续, 热流连续。以上边界条件的数学表达式为

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T^{(i)}}{\partial x} \right|_{x=0, L} &= 0 \\ \left. \frac{\partial T^{(i)}}{\partial y} \right|_{y=0, w} &= 0 \\ \kappa_1 \left. \frac{\partial T^{(1)}}{\partial z} \right|_{z=0} &= -P(x, y) \\ \kappa_1 \left. \frac{\partial T^{(1)}}{\partial z} \right|_{z=t_1} &= \kappa_2 \left. \frac{\partial T^{(2)}}{\partial z} \right|_{z=t_1} \\ T^{(1)}(x, y, t_1) &= T^{(2)}(x, y, t_1) \\ T^{(2)}(x, y, t_1+t_2) &= T_A \end{aligned}$$

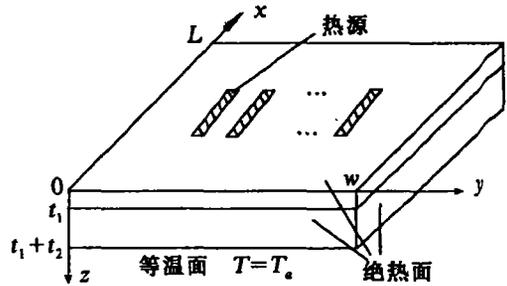


图1 三维两层结构热模型

其中: L, w 为芯片的长和宽 (cm); $P(x, y)$ 为芯片表面功率密度 (W/cm^2); κ_1, κ_2 为芯片和铜管座的热导率 ($W/cm \cdot ^\circ C$)。

采用分离变量法, (2)式的通解为:

$$\begin{aligned} T^{(i)}(x, y, z) &= a_{00}^{(i)} z + a_{00}^{(i)} + \sum_{m=1}^{\infty} (F_{m0}^{(i)} e^{\lambda_m z} + F_{m0}^{(i)} e^{-\lambda_m z}) \cos \lambda_m x \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} (E_{n0}^{(i)} e^{\mu_n z} + E_{n0}^{(i)} e^{-\mu_n z}) \cos \mu_n y \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (G_{mn}^{(i)} e^{\gamma z} + G_{mn}^{(i)} e^{-\gamma z}) \cos \lambda_m x \cos \mu_n y \end{aligned} \tag{3}$$

其中 $\lambda_m = \frac{m\pi}{L}$, $\mu_n = \frac{n\pi}{w}$, $\gamma^2 = \lambda_m^2 + \mu_n^2$

对于有 k 个分离有源区的器件, 将有源区划分成 $M_k \times N_k$ 个矩形单元。设单元内的功率密度为常数 P_{kij} , 单元的步长为 $\Delta x_k, \Delta y_k$ 。

用双傅立叶级数展开沿 Z 方向上的温度导数, 结合边界条件, 确定通解的系数, 则芯片表面温度场分布为:

$$T^{(1)}(x, y, 0) = T_A + A A(t_1 + \frac{\kappa_1}{\kappa_2} t_2)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{m=1}^{\infty} BB \cdot HH(\lambda_m) \cos \lambda_m x + \sum_{n=1}^{\infty} CC \cdot HH(\mu_n) \cos \mu_n y \\
& + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} DD \cdot HH(\nu) \cos \lambda_m x \cos \mu_n y \quad (4)
\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
AA &= \frac{1}{Lw} \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^{M_k} \sum_{j=1}^{N_k} \frac{P_{kij}}{\kappa_1} \Delta y_k \cdot \Delta x_k \\
BB &= \frac{2}{\mu_n^2 Lw} \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^{M_k} \sum_{j=1}^{N_k} \frac{P_{kij}}{\kappa_1} \Delta y_k \cdot A_{kim} \\
CC &= \frac{2}{\mu_n^2 Lw} \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^{M_k} \sum_{j=1}^{N_k} \frac{P_{kij}}{\kappa_1} \Delta x_k \cdot B_{kjn} \\
DD &= \frac{4}{\lambda_m \mu_n \nu Lw} \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^{M_k} \sum_{j=1}^{N_k} \frac{P_{kij}}{\kappa_1} A_{kim} \cdot B_{kjn} \\
HH_{(\nu)} &= 2 \left(\frac{\kappa_1}{\kappa_2} \text{th} t_2 - 1 \right) / [e^{2\nu t_1} + 1 + \frac{\kappa_1}{\kappa_2} \text{th} t_2 (e^{2\nu t_1} - 1)] + 1 \\
A_{kim} &= \sin \lambda_m (x_{i,k} + 0.5 \Delta x_k) - \sin \lambda_m (x_{i,k} - 0.5 \Delta x_k) \\
B_{kjn} &= \sin \mu_n (y_{j,k} + 0.5 \Delta y_k) - \sin \mu_n (y_{j,k} - 0.5 \Delta y_k)
\end{aligned}$$

x_{ik}, y_{jk} 为第 k 个有源区上第 i, j 矩形单元中心处的坐标。

在峰值结温电测量过程中, 从器件的冷却响应曲线可以获得器件芯片在工作条件下有效有源区面积 A_E 。对于双极型功率器件, 可假设 A_E 上热源的功率密度均匀分布, A_E 处于芯片的中心, 且关于 x, y 轴对称。于是, 可将坐标原点取在芯片的中心, 计算 1/4 芯片表面热场即可。其最高结温 T_{jp} 和热源上的平均结温 T_{AVG} 的表达式分别为:

$$T_{jp} = T^{(1)}(0, 0, 0) \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
T_{AVG} &= \iint_{A_E} T^{(1)}(x, y, z) dx dy / \iint_{A_E} dx dy \\
&= T_a + \frac{Ph_w h_i}{Lw \kappa_1} \left(t_1 + \frac{\kappa_1}{\kappa_2} t_2 \right) \\
&+ \frac{4Ph_w}{Lw \kappa_1 h_i} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m^3} \cdot HH_{(\lambda_m)} \sin \left(\lambda_m \frac{h_i}{2} \right) \\
&+ \frac{4Ph_w}{Lw \kappa_1 h_w} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^3} \cdot HH_{(\mu_n)} \sin \left(\mu_n \frac{h_w}{2} \right) \\
&+ \frac{16P}{Lw \kappa_1 h_i h_w} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\nu \lambda_m^2 \mu_n^2} HH_{(\nu)} \sin \left(\lambda_m \frac{h_i}{2} \right) \sin \left(\mu_n \frac{h_w}{2} \right) \quad (6)
\end{aligned}$$

其中

$$\lambda_m = \frac{2m\pi}{L}, \quad \mu_n = \frac{2n\pi}{w}, \quad \nu^2 = \lambda_m^2 + \mu_n^2$$

h_i, h_w 分别为有效有源区的长和宽(cm)。

峰值结温电学法测量的结果可表示为：

$$T_{jP_{max}} = \Delta T_{AVG_{max}} \times (\Delta T_{jP} / \Delta T_{AVG})_{模拟} + T_A \quad (7)$$

2 计算程序框图及误差分析

采用 Fortran 77 语言编制了功率晶体管的热分析程序，程序框图见图 2。

此程序在微型机上进行，由于解的解析形式，使该软件操作简便，运算速度快、精度高。

从解的表达式可以看出：在计算芯片表面温度场时，傅氏级数求和项选得越多，计算精度越高，但计算时间也越长。为此，在图 3 中给出了傅氏级数求和项 m_{max} 与 η 值的关系曲线。

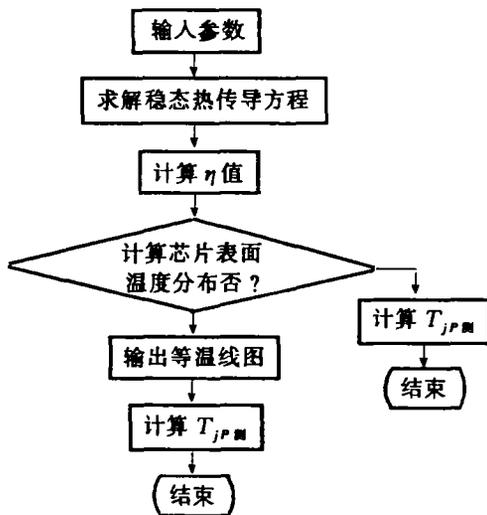


图2 热模型计算程序框图

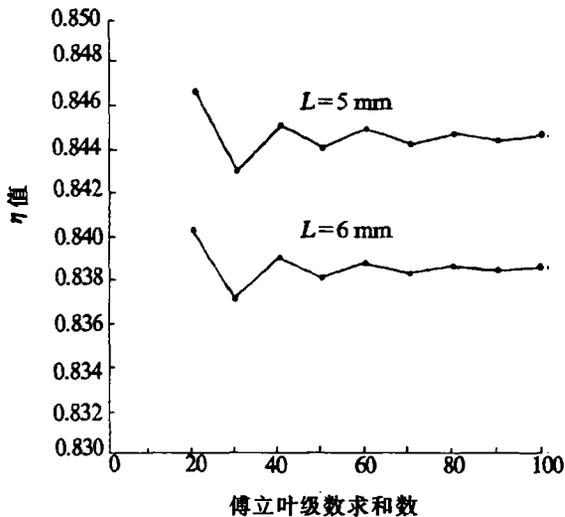


图3 η 值与傅氏级数求和项的关系

图中两条曲线均对应为 $A_E/A_T=0.25$, A_T 为芯片的总面积。当电测量的平均结温为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时，求和项分别仅为 $m_{max}=50, 100$ ，由不同 η 值获得的 $T_{jP_{max}}$ 值 50 项较 100 项的误差 $< 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。但计算时间却相差许多，此误差可以满足工程测量要求。所以，一般取求和项数为 50。

3 结果与讨论

本文分别采用红外微热像法，标准电学法和峰值电学法(电峰法)对多种功率晶体管进行了测量。表 1 给出了 3 种测量结果。以红外法的结果作为标准，标准电学法和峰值电学法的误差也列在表中，同时列出的还有电峰法对标准法的 3 个修正数据。

从表 1 看到：当器件工作在较低温度 ($100\text{ }^\circ\text{C}$ 以下) 时，电峰法对标准法第二项修正很小，说明芯片温度分布比较均匀，相应的 $A_E/A_T=0.70\sim 0.89$ 。此时的第三项修正约在 $14\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。当器件工作在最高允许结温附近时，第二项修正起的作用很大，说明芯片上温度分布严重的不均匀，相应的 $A_E/A_T=0.12\sim 0.49$ 。这种情况下，第三项修正一般为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。表中给出了标准法的误差约在 $20\%\sim 50\%$ ，电峰法的误差在 $-1.3\%\sim 7.6\%$ 。因此，在分析研究功率晶体管抗热应力方面，电峰法较标准法具有更重要的价值。它对于功率晶体管老

化条件的选取, 可靠性筛选及安全工作区的确定将发挥重要的作用.

表 1 功率晶体管温测量结果

器件	V_c/I_c V/A	结温 / °C				与红外法的误差 / %		
		红外法	标准法	修正 I	修正 II + III	电峰法	标准法	电峰法
A	18/0.50	70.67	48	52.6	57.4	68	32.1	3.8
B	50/0.80	62.17	49	56.8	57.7	63	21.3	-1.3
C	50/0.50	59.34	45	49.8	53.3	59	24.2	0.6
D	65/0.80	85.96	59	68.7	75.2	87	31.4	-1.2
E	70/0.70	87.47	60	68.4	74.2	86	34.4	1.7
F	50/0.70	199.90	99	134	168	194	50.5	3.0
G	80/0.72	202.78	103	132	172	198	49.3	2.5
H	80/0.58	257.66	126	167	205	238	51.1	7.6

图 4 是电峰法中热模型计算的芯片表面温度分布图. 图 5 是同一器件在同样工作条件下红外法测量的热图. 可见两者的温度分布吻合较好. 此外, 由于电峰法见电学测量技术与热模型计算机模型模拟的结合, 它不像红外法那样, 受到测量设备空间分辨率的限制. 这将使它在版图尺寸非常精细的 GAAS MESFET 沟道温度的测量上大有可为. 当然, 其测试设备和热模型都需要做出相应的改进.

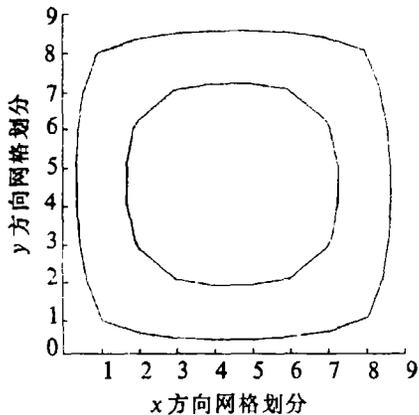


图 4 3DK42A 在 38V/0.5A 条件下由热模型计算的芯片表面温度分布图

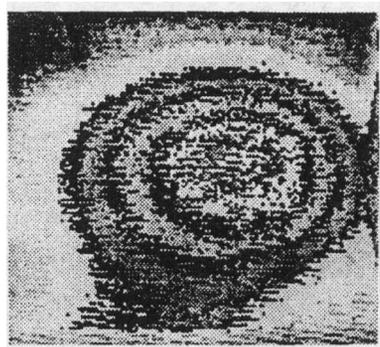


图 5 3DK42A 在 38V/0.5A 条件下由红外法测量的热图(分辨率 38 μ m)

4 结束语

本文介绍的晶体管三维两层结构的热模型, 可将电测量的平均结温转化为峰值结温, 可输出芯片表面温度分布图. 也可以单独使用做晶体管的热设计分析. 还可以根据需要, 用迭代法引入热导率随温度的变化, 分析晶体管的温度分布. 由于它的解是解析形式, 在计算速度和占用计算内存空间上都优于目前常用的数值法(有限差分法和有限元法). 该软件在 PC 机上即可方便运行.

功率晶体管峰值结温电学测量技术, 具有测试精度高, 非破坏性, 快速且成本低等优点, 在今后的器件热性能测量, 筛选及安全工作区测量方面将发挥重要的作用。

本文作者衷心感谢为我们的测量提供晶体管的厂家和为此软件编制等温曲线程序的郭海鹏同志。

参 考 文 献

- 1 Blackburn D L. An electrical technique for the measurement of the peak junction temperature of power transistors. Proc of the 13th IEEE IRPS, 1975, 142 ~ 150
- 2 Lu C Z, Wang M Z, Gui X, Gao G B. Fast measurement of the peak junction temperature of power transistor using electrical method. Seventh IEEE SEMI-THERMTM Symposium, 1991, 39 ~ 43
- 3 王明珠, 吕长志, 高光渤等. 功率晶体管峰值结温非破坏性测量装置的研究. 中国电子学会电子机械工程学会第二届学术年会论文集. 1991, 263 ~ 267

A Thermal Model for Electrical Measurement of the Peak Junction Temperature of Power Transistors

Wang Mingzhu Lu Changzhi Gao Guangbo

(Department of Electronic Engineering)

【Abstract】 We described thermal model of three dimensiond for a two-layer structure, which used in the electrical measurement of the peak junction tempersture of power transistors. The analytical solutions of this model and flow chart of the calculating program are also given. Using this model, we can correct the electrically mesuured average temperature on the surface of the chip to the peak junction temperature. This modification may be up to 10 ~ 30 °C . Compared the measured thermal field by infrared microradiometer, the measuring error of the electrical peak technique is within 8% whereas the error of the standard electrical technique may be up to 50% on the same conditions.

【Key words】 power transistor, thermal model, peak junction temperature, electrical measurement technique