

# 模拟器件稳态热场正确性的判断方法\*

张鸿欣

(西安电子科技大学 CAD 所, 西安 710071)

**摘要:** 对稳态热场, 二个水平剖面 A 和 B 所夹的薄层上的温差必须严格等于本文提出的平均值定理的计算值。当芯片、基片和底座的截面大小一样时, 可以直接根据平均值定理计算出芯片、基片和底座的每一水平剖面上的平均温度, 通常可以手工完成; 当芯片、基片和底座的截面大小不一样时, 可以通过数据合成根据平均值定理计算出芯片、基片和底座的每一水平剖面上的平均温度。如果计算中有的参数如沟道长度不十分清楚时, 应作模拟了解该参数对热斑温度的影响, 必要时对该参数进一步了解以保证模拟精度。

**关键词:** 热分析; 可靠性; 半导体器件

**EEACC:** 0170N; 1350; 0290

**中图分类号:** TN 406

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2001)04-0496-04

## 1 引言

热失效、热电耦合等使工作热场成为器件可靠性共性因素, 有关论文不下数百。复杂模块热分析和瞬态热场加速计算是两类主要工作, 主要方法分别是微网格 (Micro Mesh) 技术<sup>[1]</sup> 和传输线矩阵 (Transmission Line Matrix) 法<sup>[2]</sup>。热应力是与热有关的另一类主要工作, 国内这方面工作也有相当进展, 例如王雪梅等的热应力分析<sup>[3]</sup>; 穆甫臣等对测量 MESFET 栅极串联电阻的 Fukui 法的改进<sup>[4]</sup>; 谢志坤等用传输线矩阵方法模拟器件中的金刚石的作用<sup>[5]</sup>; 张鸿欣提出的计算 MESFET 沟道温度的等效结构模型<sup>[6]</sup>; 张鸿欣提出的模拟多芯片多基片模块热场的层次模型<sup>[7]</sup>。ZHANG(张鸿欣)提出的模拟瞬态热场的时间步内建模法 (Modeling the Diffusion Processes Within the Time step, MPWT)<sup>[8]</sup>。

真实器件热模拟繁琐易错, 需要有判断模拟结果正确性的方法。提出的方法的主要内容如摘要所述, 不再重复。

## 2 平均值定理

### 2.1 平均值定理的推导

#### 2.1.1 最简单情况下的平均值定理的推导

图 1 所示为简化器件结构, 暂定芯片、基片和底座截面相等, 底座下表面固定于参考温度, 其余表面近似为绝热面。热源置于芯片上表面下的一个平面内。根据能量守恒定律, 对稳态热场, 通过热源下面的任何一个水平剖面的向下热流等于热源功率; 通过热源上面的任何一个水平剖面的热流等于零。设二个邻近水平剖面 A 和 B 所夹薄层厚度为  $\Delta L$ 。根据附录的推导有:

$$\Delta T^{\text{av}} = T_A^{\text{av}} - T_B^{\text{av}} = P_{\text{chp}} \Delta L / (k_{\text{chp}} S_{\text{chp}}) \quad (1)$$

式中  $T_A^{\text{av}}$ 、 $T_B^{\text{av}}$  为剖面 A、B 的平均温度;  $k_{\text{chp}}$ 、 $S_{\text{chp}}$  为薄层的导热率、面积;  $P_{\text{chp}}$  为器件功率。

式(1)为平均值定理, 即器件的芯片、基片和底座的任一平行于底座下表面的薄层平均温度的差值必须与式(1)预期值严格一样。当芯片、基片和底座的截面大小一样时, 可以直接用式(1)计算出芯片、

\* 国家自然科学基金资助项目(69876029)。

张鸿欣 男, 1938 年出生, 教授, 从 1990 年起主要从事半导体器件与热有关的研究。

2000-03-22 收到, 2000-06-17 定稿

©2001 中国电子学会

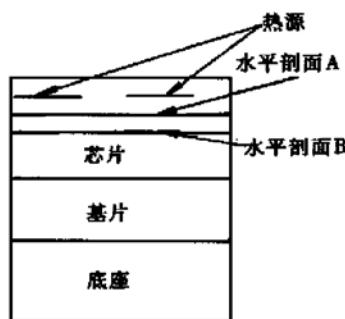


图 1 简化的器件结构

FIG. 1 Simplified Structure of a Semiconductor Device

基片和底座的每一水平剖面上的平均温度,通常可以手工完成;当芯片、基片和底座的截面大小不一样时,可以通过数据合成根据式(1)计算出芯片、基片和底座的每一水平剖面上的平均温度.

### 2.1.2 导热率与温度有关的处理

通过克希霍夫变换

$$\theta = \int_{\infty}^k u \, du \quad (2)$$

非线性泊松方程

$$k(t) \Delta T = p \quad (3)$$

变为线性方程

$$k(t_0) \Delta \theta = p \quad (4)$$

$t_0$  为环境温度. 对于线性化温度  $\theta$  平均值定理成立.

求得  $\theta$  后, 通过式(2)的反变换可得  $T$ .

### 2.1.3 多种构成材料处理

当某一水平层由多种材料构成,  $T_A^{av}$ 、 $T_B^{av}$ 、 $k_{chp}$  应代之以相应的加权(权因子为导热率)平均值  $T_A^{avw}$ 、 $T_B^{avw}$ 、 $k^{avw}$  即

$$T_A^{avw} - T_B^{avw} = P_{chp} \Delta L / (k^{avw} S_{chp}) \quad (5)$$

其中

$$T_A^{avw} = \sum T_{Ai} k_i s_i / \sum k_i s_i \quad (6)$$

$$T_B^{avw} = \sum T_{Bi} k_i s_i / \sum k_i s_i \quad (7)$$

$$k^{avw} = \sum k_i s_i / \sum s_i \quad (8)$$

显然  $S_{chp} = \sum s_i$

$k_i$ 、 $s_i$ 、 $T_{Ai}$ 、 $T_{Bi}$  分别为该水平层的小柱元  $i$  的导热率、截面积、上、下表面温度.

### 2.2 平均值定理的模拟验证

图 2 所示是经过等效结构处理<sup>[6]</sup>的 MESFET 单指结构, 热源分布沿栅的漏端, 分布宽度沿栅长方

向为  $0.8 \times 10^{-6}$  m, 沿栅宽方向均匀分布, 层 6—12 为 GaAs 芯片, 层 1—5 为 Cu 底座, 底座的下表面固定于参考温度, 由于每一层仅由一种材料构成(即图 2 中墙的材料 Au 用 GaAs 代替并让通孔面积减小到零), 因此数值模拟的每一层的上表面(其面编号为层号加 1)的温升平均值应与平均值定理预期的严格一样, 如表 1 所示, 非常接近. 由于热源在面 11, 所以面 11, 面 12, 面 13 的平均温升应严格相同. 层 13(金属电极所在层, 其上表面号为 14)不是完整层, 故没有列出面 14 的平均温升值.

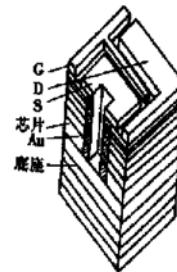


图 2 经过等效处理的 MESFET 单指结构

FIG. 2 The Single-Finger Structure of MESFET Device After Simplified by Using the Equivalent Structure Model

表 1 平均值定理的模拟验证

Table 1 Expected Value by Average Theorem and Simulation Value

面号	温升的平均值/℃	
	平均值定理预期值	模拟热场的计算值
1	0	0
2	1.2513	1.2513
3	2.1273	2.1273
4	2.8780	2.8780
5	3.5037	3.5037
6	3.7280	3.7280
7	10.156	10.156
8	13.119	13.123
9	13.761	13.763
10	13.928	13.929
11	14.055	14.058
12	14.055	14.058
13	14.055	14.058

### 3 应用实例

#### 3.1 GaAs MESFET 微波功率器件热分析

器件经等效结构处理后的结构如图 2 所示. 检查结果如下: 平均值、预期值与模拟值的差别小于千分之一; 热场峰的形状、位置合理; 不清楚因素是热

源沿栅长方向的分布, 模拟说明当功率沿栅长方向的分布宽度从  $0.8 \times 10^{-6}$  m 降至  $0.2 \times 10^{-6}$  m 仅使沟道温度上升约  $2^{\circ}\text{C}$ . 在经过以上检查后与实验<sup>[6]</sup>对比为计算: 实验=  $117^{\circ}\text{C}$ :  $118^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2 Si BJT 微波功率器件热电一体分析

器件结构如图 3 所示(工作温度为  $70^{\circ}\text{C}$ ). 由于芯片、基片和底座的截面积不等, 需要用到数据合成. 芯片结果如表 2 所示(基片和底座的结果与芯片的相似, 略).

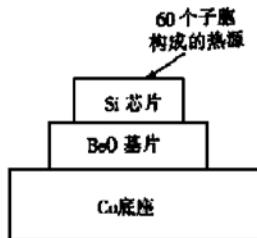


图 3 Si BJT 微波功率器件的结构 60 个子胞的总功率为 2W.

FIG. 3 Structure of a BJT Microwave Power Device. The active region, consisting of 60 sub cell transistors, is on top of the chip. The total power of 60 sub cell transistors is fixed at 2W by a circuit.

表 2 硅微波功率器件芯片的各水平剖面上平均温升的预期值和模拟值(面 1 对应芯片的下表面)

Table 2 Average Increment of Temperature at Horizontal Cross-Section in Silicon Microwave Power Devices

面号	温升的平均值/℃		
	平均值	定理预期值	模拟热场的计算值
1	7.333	7.333	7.333
2	7.687	7.686	7.686
3	11.863	11.861	11.861
4	15.343	15.339	15.339
5	18.242	18.243	18.243
6	20.660	20.662	20.662
7	22.674	22.678	22.678
8	24.352	24.356	24.356
9	25.751	25.753	25.753

热场形貌(峰的形状和位置)与预期的一致, 网格划分加倍基本不改变计算结果. 模拟考虑了 Si 导热率随温度的变化、双极器件的正热电反馈和器件的子胞有效面积随子胞发射极电流增加而减少的效应. 模拟结果  $204^{\circ}\text{C}$  与三个样品的测量结果( $207$ 、 $197$ 、 $187^{\circ}\text{C}$ )的平均值( $197 \pm 10$ )  $^{\circ}\text{C}$  一致. 本器件的热模拟详见文献[9].

### 4 结论

二个通过了这套检查的模拟结果与实验的对比如下: MESFET GaAs 微波功率器件模拟热斑温度: 测量=  $107^{\circ}\text{C}$ :  $108^{\circ}\text{C}$ (底座下表面固定于  $60^{\circ}\text{C}$ ); BJT Si 微波功率器件模拟: 测量=  $204^{\circ}\text{C}$ :  $197^{\circ}\text{C}$ (底座下表面固定于  $70^{\circ}\text{C}$ ), 都在实验误差内一致. 提出的方法可以判断模拟的器件稳态热场的正确性.

### 附录

从上平面 A 流到下平面 B 的热流在稳态时必须等于器件功耗  $P_{\text{chp}}$ . 将平面 A、B 间的薄层划分为很多小柱元, 用  $k_i s_i T_{Ai} T_{Bi}$  表示柱元 i 的导热率、截面积、上、下表面的温度, 则有

$$\begin{aligned} P_{\text{chp}} &= \sum k_i s_i (T_{Ai} - T_{Bi}) / \Delta L \\ &= ((\sum k_i s_i T_{Ai} - \sum k_i s_i T_{Bi}) / \Delta L \sum k_i s_i) \\ &\quad \times (\sum k_i s_i / \sum s_i) \sum s_i \end{aligned}$$

定义

$$\begin{aligned} T_A^{\text{avw}} &= \sum T_{Ai} k_i s_i / \sum k_i s_i \\ T_B^{\text{avw}} &= \sum T_{Bi} k_i s_i / \sum k_i s_i \\ k^{\text{avw}} &= \sum k_i s_i / \sum s_i \end{aligned}$$

由于  $S_{\text{chp}} = \sum s_i$   
就得到正文的式(5)

$$T_A^{\text{avw}} - T_B^{\text{avw}} = P_{\text{chp}} \Delta L / (k^{\text{avw}} S_{\text{chp}})$$

当  $k_i$  与 i 无关, 即层是由一种材料构成, 上式变为正文的式(1).

### 参考文献

- [1] Vincent J. Ferrara, IEEE MTT-S Digest, TH2C - 2, 1995, 1143—1147.
- [2] P. B. Johns, Int. J. Numer. Methods Eng., 1977, **17**: 1307—1328.
- [3] WANG Xue-mei, SUN Xue-wei, JIA Song-liang, Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21**(4): 409—413 (in Chinese) [王雪梅, 孙学伟, 贾松良, 半导体学报, 2000, **21**(4): 409—413].
- [4] MU Fu-chen, LI Zhi-guo, ZHANG Wan-rong et al., Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(3): 250—253 (in Chinese) [穆甫臣, 李志国, 张万荣, 等, 半导体学报, 1999, **20**(3): 250—253].

- [ 5 ] XIE Zhi-kun, SHEN Jin-jin, CHEN Kang-sheng *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(8): 691—694 (in Chinese) [ 谢志坤, 沈进进, 陈抗生, 等, 半导体学报, 1998, **19**(8): 691—694].
- [ 6 ] ZHANG Hong-xin, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(8): 591—594 (in Chinese) [ 张鸿欣, 半导体学报, 1998, **19**(8): 591—594].
- [ 7 ] ZHANG Hong-xin, Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21**(4): 409—412 (in Chinese) [ 张鸿欣, 半导体学报, 2000, **21**(4): 409—412].
- [ 8 ] H. X. ZHANG and P. W. Webb, Int. J. Numer. Model., Electron. Netw. Devices Fields, 1996, **9**: 215—223.
- [ 9 ] ZHANG Hong-xin, Electro-Thermal Simulation of BJT Microwave Power Transistor, 11th National Conference of IC/Si Material of China Dalian, 1999, 387—390 (in Chinese) [ 张鸿欣, 双极微波功率器件稳态热场的热电一体模拟, 第十一届全国半导体集成电路和硅材料学术会议论文集, 大连, 1999, 387—390].

## A Method of Verifying Simulated Steady Thermal Field of a Semiconductor Device<sup>\*</sup>

ZHANG Hong-xin

(CAD Institute of Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The 3-D thermal simulation of a realistic semiconductor device is diverse and error prone, so it is desired to be verified at the design stage. Besides the trivial morphology check, in which the shape of simulated thermal field must consist with the heat source of the device, a new method, average value check is proposed in this paper to judge the simulation results. If the simulation is correct, the average temperature of any horizontal cross section is equal to the predicted values of the chip, substrate and heat sink. And the average temperature can be predicted as follows: on condition that the average temperature drop over the layers, paralleling the bottoms of heat sink, equals the one predicted by the average theorem proposed; if the cross sections of the chip, substrate and heat sink are same sized, it can be obtained by directly from the average theorem; otherwise, it can be obtained using the average theorem together with the data synthesizing. To obtain a reliable result, it is necessary to simulate the dependence of the hottest spot temperature on an inaccurate parameter, if have, and then to determine the error of this temperature caused by the uncertainty of the parameter. This method is proved by simulating of GaAs MESFET and a Si BJT microwave device, with the results in good agreement with the experimental ones.

**Key words:** thermal simulation; reliability; semiconductor device

**EEACC:** 0170N; 1350; 0290

**Article ID:** 0253-4177(2001)04-0496-04

\* Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69876029.

ZHANG Hong-xin male, professor, was born in 1938. His research interest is thermal and thermal related properties of semiconductor devices.