

# 半导体器件热特性的 电学法测量与分析\*

冯士维 谢雪松 吕长志 张小玲 何焱 沈光地

(北京工业大学电子工程系 北京 100022)

**摘要** 利用电学法测量器件的温升、热阻及进行瞬态热响应分析是器件热特性分析的有力工具。本文利用电学法测量了 GaAs MESFET 在等功率下, 加热响应曲线随电压的变化, 并通过红外热像仪测量其温度分布, 结果表明电学法测得的平均温度与温度分布有很大关系。理论计算也表明了这一点, 在等功率条件下, 电学平均温度随着温度分布趋于均匀而减少。该方法可用来判断器件的热不均匀性。

PACC: 7220P, 7330

## 1 引言

半导体器件的热特性直接影响器件工作温度、热阻, 并决定器件的工作寿命。其热特性的测量变得越来越重要。目前, 半导体器件工作温度及热阻测量的主要方法有: 红外微象仪法<sup>[1]</sup>, 电学参数法<sup>[2]</sup>, 还有对半导体激光器的温升及热阻测量的光谱法<sup>[3]</sup>、光热阻扫描法<sup>[4]</sup>及光功率法<sup>[5]</sup>。这些方法基于不同的测量原理, 可以用来确定半导体器件表面的温度分布或者某种意义上的平均温度。本文用改进的电学法, 测量了半导体器件工作时的温升、热阻, 对其瞬态温度特性进行了较为详细的测量与分析, 并通过计算模拟, 将电学法用于分析 GaAs MESFET 的热不均匀性。

## 2 测量原理及其装置

在恒定电流下许多器件的半导体结电压与温度具有很好的线性关系<sup>[6]</sup>。图 1 是 In-GaAsP/InP 异质 PN 结在不同测试电流下的线性关系曲线。为保证测量的结电压与温度有较为准确的对应关系, 测试电流一般很小, 为  $100\mu\text{A} \sim 2\text{mA}$ , 依芯片的结面积大小而定。这样可以减少由于测试电流产生的自升温。

\* 北京市科技新星培养计划项目资助课题

冯士维 男, 1961 年出生, 副教授, 主要从事半导体器件可靠性物理、光电器件等研究

谢雪松 男, 1970 年出生, 工程师, 主要从事器件可靠性物理、电路等研究

1998-09-18 收到, 1998-12-22 定稿

器件测量时,一般分为工作状态和测量状态。对于 GaAsMESFET, 正常工作时, 栅源之间加反偏, 漏源之间加正偏。所以从工作状态切换到测量状态时必须通过快速开关电路切断漏源、栅源电压, 将正向恒定电流加到器件上。测量此时结电压, 以确定对应的温度。我们的测量设备从工作状态到测试状态的转换延迟时间为 3~ 5 $\mu$ s。然后通过对延迟时间之后的数据采集, 进行拟合, 反推出  $t = 0$  时的温度。见图 2。测量的方框图见图 3。为保证测量数据的

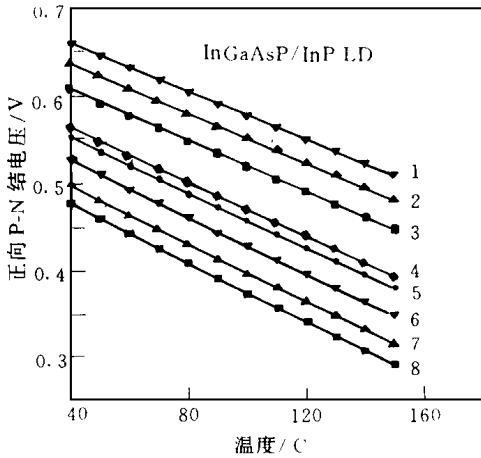


图 1 InGaAsP/InP 异质 PN 结电压随温度的线性关系

曲线 1: 4.0mA; 曲线 2: 3.0mA; 曲线 3: 2.0mA;  
曲线 4: 1.0mA; 曲线 5: 0.8mA; 曲线 6: 0.5mA;  
曲线 7: 0.3mA; 曲线 8: 0.2mA.

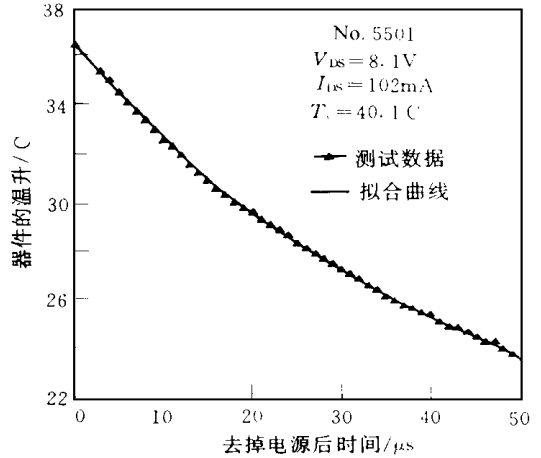


图 2 利用结电压的变化测量温升的冷响应曲线

准确性和可比性, 采用无限大热沉是非常必要的, 保证测量过程中管壳处于一个恒定温度。这样, 首先测量器件加功率前的结电压值  $V_{f1}$ , 再测量器件加功率后的电压值  $V_{f2}$ , 由于热沉温度不变, 两次测量的电压差  $\Delta V (= V_{f2} - V_{f1})$  就是由于器件工作功率引起的温升  $\Delta T$  造成的。由结电平和结温的线性关系,  $\Delta T = \Delta V / k$ ,  $k$  是  $T$  与  $V$  关系的线性斜率。器件所加功率是  $P = V I$ , 这样热阻  $R_{th} = \Delta T / P = \Delta V / (k V I) = (V_{f2} - V_{f1}) / (k V I)$ 。

改进的电学测量仪中, 功率的持续时间、工作电压及电流、以及测试窗口的冷却时间均

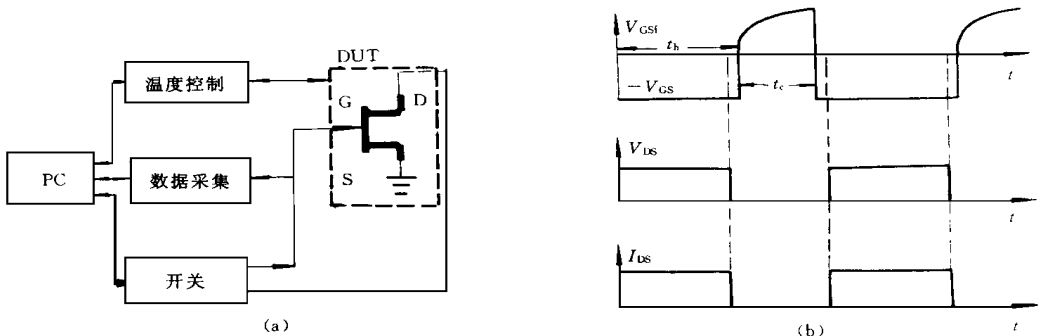


图 3 (a) 测量方框图; (b) 时序图

可由程序自动设定,实现了测量自动化,并可通过测试条件的组合,测量半导体器件多种热特性

### 3 测量结果及其讨论

采用上述测试仪,可以测量半导体器件的多种热学特性. 半导体器件通常由多种不同热特性材料组成,如芯片、焊料、热沉及外壳. 利用瞬态加热响应特性,可以将器件多层材料结构的热阻区分开来,并确定每一部分热阻<sup>[7]</sup>;通过测量半导体激光器瞬态热阻与工作电流的关系,可以进一步得到激光器由自发辐射、超辐射,到产生激光输出的过程中,内部瞬态热的产生与响应情况<sup>[8]</sup>.

这里,我们利用电学法,测量 GaAs MESFET 的热不均匀性. 器件表面热不均匀性的测量主要依靠红外热像法. 由于这种方法操作复杂,而且只能对芯片表面直接测量,所以对于实际器件成品的考核不能满足需要. 电学法测得的温度值是一种平均温度,是以器件内部的温度对器件综合影响后,由结电压表示出的温度. 不同的温度分布产生的综合平均效果不同. 我们做了如下测量.

图 4(a)、(b)是保持 GaAs MESFET 器件所加的功率不变,即乘积  $V_{ds} \times I_{ds}$  为一常数,改变  $V_{ds}$  和  $I_{ds}$ ,而测量的加热响应曲线. 该曲线通过一个测量序列形成. 测量序列的加热时间从  $10\mu s$  到  $100s$ ,步长以对数方式增加. 在每一个加热脉冲后,迅速测量其温升. 每两个加热脉冲之间留有足够长的时间,使有源区恢复到热沉温度. 图 4(a)、(b)中的三条曲线所加的功率相同,但随着  $V_{ds}$  的减少,测量的瞬态热阻降低,热响应曲线整体下降.

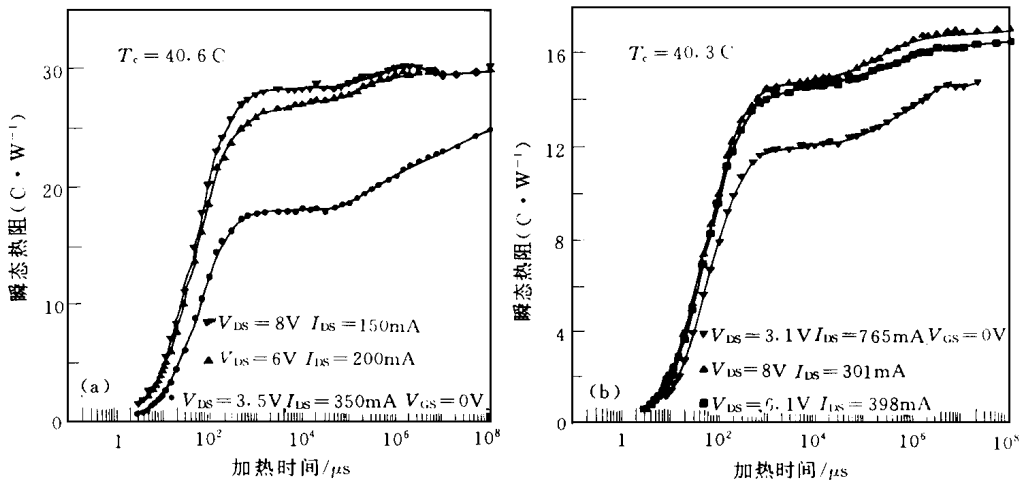


图 4 相同功率下电学法测量的热阻及其加热响应曲线的变化

有源区所加的热量一定,但电学法测得的温升确有不同. 这表明,电学法测量的温度与器件的工作状态及温度分布有关. 为此,我们使用红外热像仪,测量器件表面的温度分布. 测量结果见表 1.

表 1 红外与电学法测量结果对比

	电学法(瞬态平均热阻)							红外法 $R_{th,max} / (^\circ C \cdot W^{-1})$
	工作条件		$t_h \quad t_d = 5\mu s \quad R_{th} / (^\circ C \cdot W^{-1})$					
	$V_{ds} \times I_{ds}$	$P / W$	100 $\mu s$	10m s	100m s	1 s	10s	稳态
DX6723	8V $\times$ 150mA	1.2	19.2	27.0	27.5	28.4	27.8	39.8
	6V $\times$ 200mA	1.2	17.5	25.1	25.9	27.0	27.2	37.9
	3.5V $\times$ 340mA	1.2	15.9	22.7	22.9	24.2	24.6	40.0
DX5n41-2	8V $\times$ 300mA	2.4	9.8	14.6	15.1	16.1	16.5	31.0
	6V $\times$ 400mA	2.4	9.4	14.2	14.7	15.5	15.8	29.7
	3.1V $\times$ 765mA	2.2	7.7	11.8	12.3	13.4	14.1	28.8

从红外测量的温度场分布图表明: 在功率相同条件下, 高电压、低电流使峰值温度升高, 热不均匀性严重; 相反, 低电压、大电流使芯片表面温度峰值温度降低, 温度分布趋于均匀。

电学测量结果与红外测量结果一致。造成这种现象的原因, 我们认为一方面是器件在工作状态下, 高电压使漏栅之间的反向电场集中, 热量集中, 导致温度分布不均匀严重; 而低电压、大电流时, 热量更趋于均匀分布于沟道之中。另一方面, 这种热不均匀也可由非正常因素, 如热斑等引起。电学法测量的平均温度反映出这种温度分布的不同, 并且表面热不均匀对电压敏感。

所以, 通过测量恒定功率, 不同电压、电流比例下, 电学平均温度的改变量, 可判定热不均匀性的程度。为进一步表明这一点, 我们进行了电学平均温度的理论计算。

### 4 电学平均温度的理论计算

电学法测量半导体器件温度时, 可以将半导体结看成是一系列二极管的并联。如图 5 所示, 这些二极管的温度不同, 形成一种分布, 但它们有共同的结电压  $V$ 。设器件的有源区宽度为  $W$ , 温度分布为高斯分布, 即有源区中心温度最高, 边沿最低, 且对称分布。只考虑一维情况:

$$T = T_0 \exp\left(-\left(\frac{x}{x_0}\right)^2\right) + T_c$$

正向肖特基结电流电压关系是:

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

式中  $A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h}$ ,  $A^*$  是理查逊常数。将有源区沿  $x$  方向网格化, 每个网格点上的电流密度为:  $J_1(T_1, V)$ ,  $J_2(T_2, V)$ , ...,  $J_n(T_n, V)$ , 面积是  $S_n = \Delta x_n \times l$ ,  $l$  是有源区的长度,  $\Delta x_n$  是两格点之间的步长。

$$I = S_1 J_1(T_1, V) + S_2 J_2(T_2, V) + \dots + S_n J_n(T_n, V)$$

式中  $I$  是测试电流, 通过上式, 求解离散化后的超越方程, 可求出共同的结电压  $V$ 。然后设

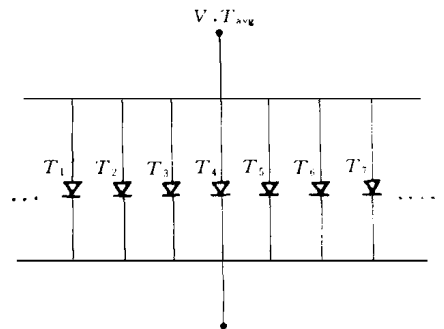


图 5 将有源区分成多个不同温度的二极管的并联

整个芯片的温度均匀分布为  $T_{avg}, I = SJ(T_{avg}, V)$ .  $T_{avg}$  即是电学平均意义下的温度 这里温度分布的改变是通过改变高斯分布因子的  $x_0$   $x_0$  较小时, 温度分布严重不均匀 随着  $x_0$  增加, 温度分布趋于均匀 设有源区的半宽度为  $W/2 = 50\mu\text{m}$ . 图 6 是高斯分布的峰值温度不变时, 温度分布随  $x_0$  的变化 图 7 是计算的电学平均温度随  $x_0$  的变化 为了比较, 我们将温度对位置的平均  $T_{avg-x}$ 、温度对电流密度的平均  $T_{avg-j}$  以及有源区边沿  $W/2$  处的温度的计算结果作在一张图上(峰值温度不变).

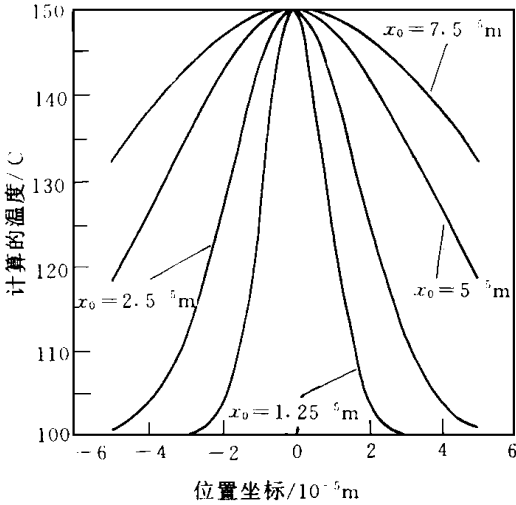


图 6 有源区  $x$  方向不同  $x_0$  的高斯分布

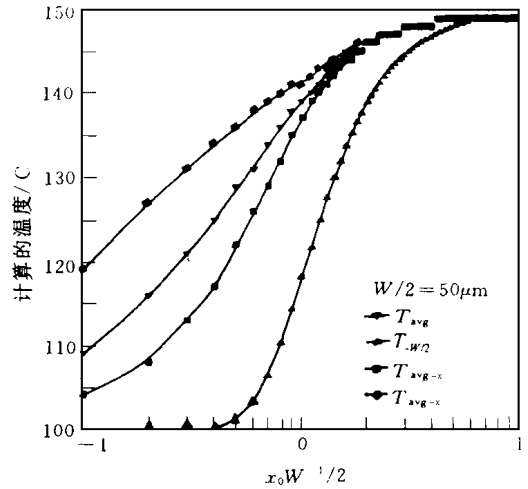


图 7 计算的电学平均温度及其它温度与高斯分布的关系

计算结果表明: 在较小的  $x_0$  下, 电学平均温度低于峰值温度较多. 随着  $x_0$  的增加,  $T_{avg}$  逐渐接近峰值温度. 当  $x_0/(W/2) = 1$  时,  $T_{avg}$  已达到 139, 与峰值温度 150 相差很小. 在几种平均温度中, 电学平均低于对电流密度的平均, 高于对位置坐标的平均及边沿  $W/2$  处的温度.

$$T_{avg-x} = \frac{\int T(x) dx}{W} \qquad T_{avg-j} = \frac{\int J(x)T(x) dx}{\int J(x) dx}$$

在器件加等功率的条件下进行计算. 我们令  $T(x)$  与  $x$  轴的面积保持不变, 改变  $T(x)$  中的  $T_0$  及  $x_0$ , 计算电学平均温度随热不均匀性的关系. 图 8 是在等功率条件下, 温度分布的改变. 图 9 是计算的电学平均温度及其它平均温度随  $x_0$  的变化. 很明显, 功率保持恒定时, 随  $x_0$  的增加, 热分布趋于均匀时, 电学平均温度降低.

结果表明, 对于一定的热量, 平均分布在器件有源区时, 其电学温度就较低. 若这些热量在有源区产生较大的热不均匀, 其电学平均温度就很高. 实验测量结果也表明, 恒定功率下, 降低电压可使其温度分布趋于均匀. 所以, 在恒定功率下, 低电压、大电流下测量的温升较大, 热阻也较大, 表明此时的器件处于严重热不均匀的状态. 当然, 热不均匀的判断, 也还要结合其它热特性的测量与分析.

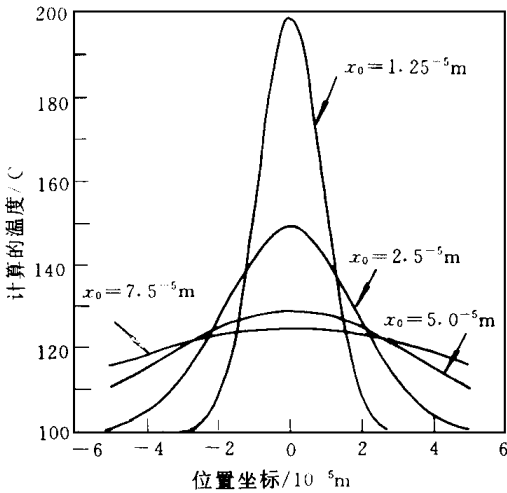


图 8 等功率条件下温度分布与  $x_0$  的关系

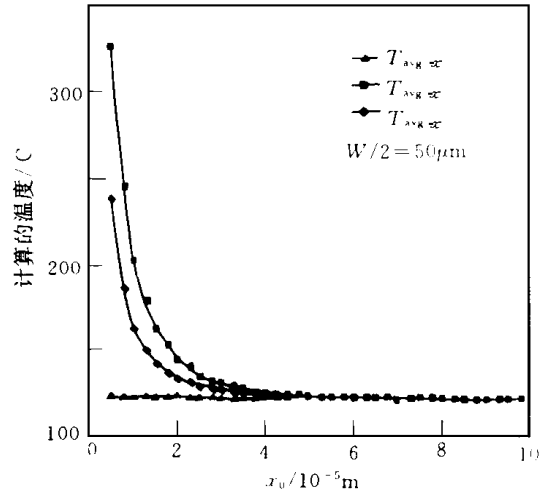


图 9 等功率条件下计算的电学平均温度随温度均匀分布程度增加而降低

### 5 结论

电学平均温度是温度分布对结电压的综合作用结果的表征 对于 GaAs MESFET, 在保持功率恒定不变时, 电学平均温度及热阻随电压的降低而减少 这表明了温度分布对电学平均温度的影响 理论计算表明: 等功率下, 电学平均温度随温度分布趋于均匀而降低 在实验上可以通过电学平均温度的变化判断其热均匀情况 对于同一批器件, 相同功率下电学平均温度高的器件, 热分布不均匀 对于同一器件, 同一功率下, 低电压下, 电学平均温度测得的热阻减少大的热更不均匀

电学平均温度是综合器件总体电热特性的综合结果 用该方法测得的热阻也是全面特性的热阻, 比起由测量温度场方法给出的峰值热阻, 电学方法测量的热阻具有较好的应用性和可比性

致谢 感谢电子部 13 所何大伟、刘成名、李道成在样品制备及红外测量方面的帮助

### 参 考 文 献

[ 1 ] L. Walshak and W. Poole Microwave J. , Feb. 1977, 62~ 65  
 [ 2 ] P. W. Webb, IEE Proc , 1987, 34: 51~ 56  
 [ 3 ] J. C. Dymant, Y. C. Cheng and A. J. Spring Thorne, J. Appl Phys , 1975, 46(4): 1739~ 1743  
 [ 4 ] M. Bettolotti, G. L. Liakhov, R. Li Voti *et al* , Appl Phys Lett , 1994, 65(18): 2266~ 2268  
 [ 5 ] Chinc Lee Jae, W. Lee and David H. Chien Thirteenth IEEE Semi-Therm Symposium, 1995, 218~ 223

- [ 6 ] 冯士维, 吕长志, 丁广钰, 半导体学报, 1994, 15(11): 747~ 753
- [ 7 ] Shiwei Feng, Xuesong Xie *et al* , Proceeding of The Third International Symposium on Electronic Packaging Technology, 1998, pp73~ 77, Beijing China
- [ 8 ] Shiwei Feng, Xuesong Xie *et al* , The Fifth International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology, October, 1998, pp649~ 652, Beijing China

## Measurement and Study on Thermal Characteristics of Semiconductor Devices by Electrical Method

Feng Shiwei, Xie Xuesong, Lu Changzhi, Zhang Xiaoling, He Yan, Shen Guangdi

(Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Received 18 September 1998, revised manuscript received 22 December 1998

**Abstract** The electrical method (EM) has become an important means for measuring the temperature rise, the thermal resistance and especially the transient thermal response of semiconductor devices. In this paper EM is used to measure the transient heating response of GaAs MESFET at different ratio of voltage to current under constant power. The temperature distribution in the device is measured by infrared thermograph. Both of experimental and calculated results show that the average temperature  $T_{\text{avg}}$  by EM is strongly dependent on temperature distribution in device. This feature could be used to judge the thermal inhomogeneities in device.

**PACC:** 7220P, 7330