

# 氮化镓高速电子迁移率晶体管双界面热阻测试

孙明 任翔

(中国电子技术标准化研究院 北京 100176)

**摘要:**热阻的准确对 GaN HEMT 器件寿命评价的有效性有非常大的影响。红外热像法热阻测试只能在器件未封帽时进行,不适用于封装完整的器件。利用正偏栅极电压和瞬态热阻抗分离点相结合的瞬态双界面测试法,对一款进口 GaN HEMT 器件开展了电学法热阻测试研究。将测试结果与红外热像法热阻测试结果进行了对比,并分析了在不同控温冷板温度和功率条件下器件热阻的变化。结果表明,双界面热阻测试能够在封装完整的情况下实现对 GaN HEMT 器件热阻的准确测试,在不同条件下热阻测试结果呈现一定的变化规律。

**关键词:** GaN HEMT; 热阻; 瞬态双界面测试方法

**中图分类号:** TN386    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.3010

## Dual interface thermal resistance test of GaN high-speed electron mobility transistor

Sun Ming Ren Xiang

(China Electronics Standardization Institute, Beijing 100176, China)

**Abstract:** The accuracy of thermal resistance will affect the validity of life test for GaN HEMT devices. IR thermal imaging method for thermal resistance test can only apply to devices prior to capping, but it is not suitable for completely packaged devices. Using transient dual interface test method, combination of forward-biased gate voltage and the point of separation of thermal impedance curves, the electrical measurement for thermal resistance of an imported GaN HEMT device was studied. The test result compared with IR thermal imaging method, and the variation of thermal resistance was investigated by different cold plate temperature and dissipation power. The results show that the accurate thermal resistance test result of GaN HEMT devices with complete package can be achieved using the dual interface thermal resistance test method, and the change of thermal resistance under different test conditions have a certain rule.

**Keywords:** GaN HEMT; thermal resistance; transient dual interface test method

### 0 引言

基于 GaN 材料宽禁带、高击穿场强以及高饱和电子漂移速度等优势, GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMTs) 在微波大功率应用领域中具有良好的发展前景。近几年 GaN HEMT 微波功率器件研究取得了快速的发展,并在通信和有源相控阵雷达方面得到了良好的应用。已报道国内有采用  $0.25 \mu\text{m}$  GaN HEMT 制造工艺的 Ku 波段 20 W 功率 MMIC<sup>[1]</sup> 和 C 波段 20 W 内匹配功率放大器<sup>[2]</sup> 等产品的成功研制。

GaN HEMT 作为通信和雷达系统中的核心部件,其寿命对系统可靠性有着决定性意义。对于 GaN HEMT 等大功率微波器件,功率密度大,显著的自热效应也会使

器件结温升高,因此温度应力是造成器件失效的主要应力<sup>[3]</sup>。GaN HEMT 温度应力加速寿命试验时,结温检测结果的准确性对 GaN HEMT 加速寿命试验有着非常大的影响<sup>[4]</sup>。

加速寿命试验时,由于结温不能直接测量,通常利用热阻值计算结温。同时,热阻测试也是器件筛选和考核的重要项目。与硅基功率器件不同,传统电学热阻测试方法无法准确测量 GaN HEMT 器件的热阻, GaN HEMT 器件热阻测试一般采用红外热像法<sup>[5-6]</sup>。但由于封装盖板会阻挡红外光透过,热成像时要求芯片裸露,不能封帽,这就给完整封装 GaN HEMT 器件的热阻测试带来了极大的困难。

### 1 热阻测试技术分析

#### 1.1 主要热阻测试技术

器件热阻是表征器件阻止热量传递能力的综合参量。热阻计算公式：

$$R_{thjc} = \frac{T_j - T_c}{P} \quad (1)$$

式中： $R_{thjc}$ 是器件热阻， $T_j$ 是芯片结温， $T_c$ 是器件壳温， $P$ 是器件功耗。一般，壳温采用热电偶物理接触测量，结温是热阻测试的关键。结温的测量技术主要包括红外热像法、电学法、显微拉曼法<sup>[7]</sup>和热反射率法<sup>[8-9]</sup>等。其中，红外热像法、显微拉曼法和热反射率法都属于光学方法。与光学方法相比，电学法测量热阻保证了样品完整的封装形态，更接近实际的使用状态。主要热阻测试技术分辨率比较如表1所示。

表1 主要热阻测试技术分辨率比较

测试方法	空间分辨率/ $\mu\text{m}$	温度分辨率/K	时间分辨率
红外热像法	3~10	0.02~1	1 $\mu\text{s}$
显微拉曼法	0.5	1	10 ns
热反射率法	0.3~0.5	0.08	800 ps~0.1 $\mu\text{s}$
电学法	—	0.01	1 $\mu\text{s}$

#### 1.2 双界面法热阻测试技术

传统电学法热阻测试，利用温度敏感参数的变化测量芯片结温，利用热电偶接触法测量壳温。对于微波大功率器件，由于芯片功率密度大，且器件热阻小，造成管壳底部散热面温度梯度较大，而热电偶测量空间分辨率差(>50  $\mu\text{m}$ )，且最高温度点定位困难，造成了壳温测量的误差较大，一致性较差。

双界面电学法热阻测试通过改变管壳与控温冷板界面间的热接触方式或接触介质，达到改变管壳与控温冷板热阻的目的，将两次界面状态测得的热响应曲线处理，对比得出结到管壳的热阻值<sup>[10]</sup>。双界面电学法热阻测试不需要直接测量器件壳温，避免了管壳温度不均匀造成的热电偶测试误差，同时可以对芯片有源区到管壳的纵向散热通道上各材料层的物理结构进行分析，得到各层的热学等效模型<sup>[11]</sup>。

#### 1.3 电学法热阻测试模式

GaN HEMT 电学法热阻测试有多种测试模式，包括：导通电阻法、体二极管法、MOSFET-SAT 法、正偏栅极电压法等<sup>[12]</sup>。但由于陷阱俘获效应导致的瞬态不稳定电流的存在<sup>[13]</sup>，采用栅源电压作为温度敏感参数的正偏栅极电压法被认为是最优的测试模式。

## 2 测试内容

#### 2.1 测试样品及安装

本文选择3只CREE公司功率容量为25W的GaN

HEMT 器件进行测试。该器件芯片衬底为100  $\mu\text{m}$  SiC，AuSn 焊料焊接，1 mm 厚铜钼铜管壳。器件安装到铜制测试夹具上后，同夹具一起固定到控温冷板上。

#### 2.2 测试电路

本文测试采用 T3ster 热阻测试仪进行热阻测试，栅源电压  $V_{GS}$  作为温度敏感参数。测试电路如图1所示。测试电路由被测器件、一个电压源、一个电流源和两个电子开关组成。芯片加热期间，开关  $S_1$  在位置1，开关  $S_2$  在位置1，使沟道导通，调节  $V_{DS}$  或  $V_{GS}$ ，获得功耗  $P_H$ 。温度敏感参数测量期间，将开关  $S_1$  置于位置2，开关  $S_2$  置于位置2，加热前后分别测量  $V_{GS}$ 。

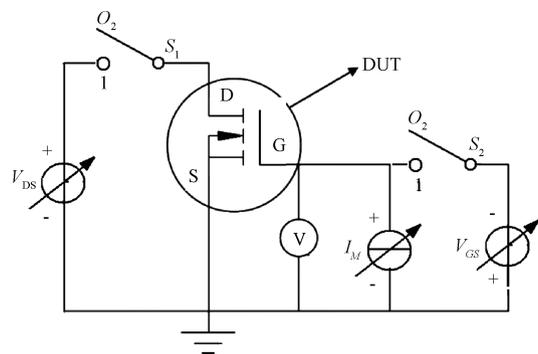


图1 正偏栅极电压法测试原理

为了防止器件在测试过程中发生自激，还需要在漏端加入去耦电容，并做好输入输出匹配。

#### 2.3 测试电流

对样品温敏参数的温度系数标定采用降温法，将样品浸入油浴锅，油的温度从150 $^{\circ}\text{C}$ 缓慢降到30 $^{\circ}\text{C}$ ，期间每5 $^{\circ}\text{C}$ 测量一次  $V_{GS}$ 。测量电流  $I_M$  分别采用1 mA 和 10 mA，测试结果如图2所示。

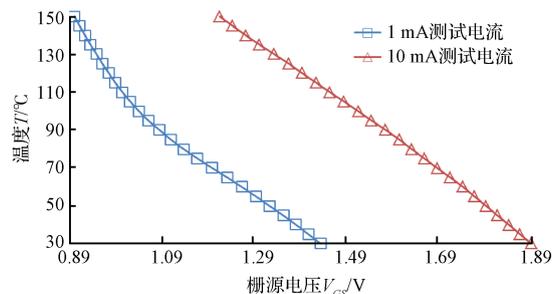


图2 样品栅源电压的温度系数(1 mA 和 10 mA 测试电流)

从图2中可以看到，与1 mA 测试电流相比，10 mA 测试电流下，样品栅源电压  $V_{GS}$  与温度呈更好的线性关系。因此，选择10 mA 测试电流能够提高温度的测量准确度。

#### 2.4 测试结果

根据双界面法热阻测试标准 JEDEC51-14 的规定，确定热阻值可以采用瞬态热阻抗分离点法和结构函数法两种计算方法。当芯片粘接使用高热导率材料(如焊料)时，热阻计算采用瞬态热阻抗分离点法；当芯片粘接使用低热

导率材料(如胶粘物)时,热阻计算采用结构函数法。

采用不涂导热脂和涂导热脂两种热接触方式进行热阻测量,获得样品的瞬态热阻抗曲线如图3所示。

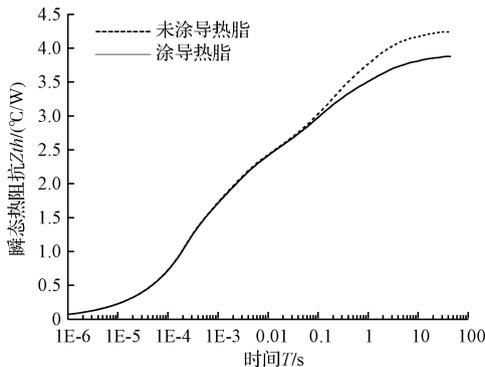


图3 两种热接触方式的热阻抗曲线

通过对热阻抗微分曲线确定分离点,获得样品的热阻值  $2.35^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

### 3 测试结果分析

#### 3.1 与红外热像法测试结果的对比

为了验证测试结果的准确性,采用红外热像法对同一样品进行热阻测试。

红外热像热阻测试方法采用光学测温技术,通过探测芯片发出的红外光测量温度,读取热图像中的结区峰值温度作为芯片结温。由于封装盖板不透光,样品必须开封去除盖板。测试采用与双界面法相同的冷板温度和加电功率,待样品达到热平衡后,在1X镜头下对样品进行显微红外热成像,样品热像图如图4所示。红外法热阻测试结果为  $2.23^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

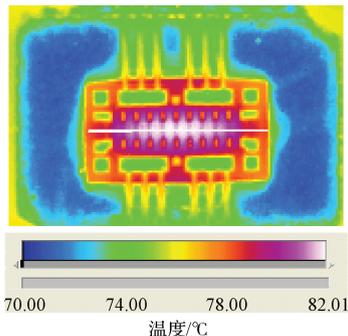


图4 样品热像图

通过两种测试方法的结果对比可以看出,双界面热阻测试结果与红外热像热阻测试结果具有较好的一致性。瞬态双界面热阻测试不仅适用于完整封装的 GaN HEMT 器件,也可以用于未封盖器件,且测试过程简单快速,较红外热像法有更大的灵活性。

#### 3.2 不同控温冷板温度条件测试结果讨论

将控温冷板温度分别设定为  $50^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$ 、 $70^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}$ 、

$90^{\circ}\text{C}$ ,在相同功率下进行热阻测试,得到不同控温冷板温度下的热阻值,并将测试结果进行线性拟合,如图5所示。

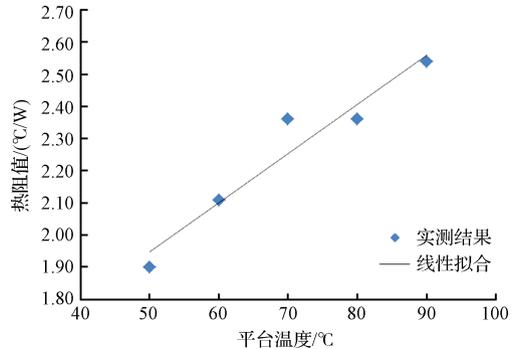


图5 不同控温冷板温度下热阻测试结果

由图5可知,在相同功率条件下,随着温度的升高,热阻值也逐渐增大。控温冷板温度从  $50^{\circ}\text{C}$  上升到  $90^{\circ}\text{C}$  时,热阻值增大了34%。这是由于芯片的 GaN、SiC 材料和管壳的 Cu、Mo 材料的热导率都随着温度的升高而变小所导致的。

从器件的结构函数曲线可知,铜铝铜管壳热阻和芯片热阻约占 GaN HEMT 器件热阻的75%<sup>[6]</sup>。由于 SiC、Cu 和 Mo 材料热导率具有负的温度相关性<sup>[14]</sup>,当器件温度升高时,材料的热导率降低,从而增大了整个器件的热阻值。

#### 3.3 不同功率条件测试结果讨论

源漏电压固定在8V,改变栅源电压,从而改变源漏电流和施加在器件上的功率,调整源漏电流分别为0.29A、0.63A、0.81A、1A、1.19A、1.5A和2.13A,在相同控温冷板温度下进行热阻测试,得到不同功率下的热阻值,并将测试结果进行线性拟合,如图6所示。

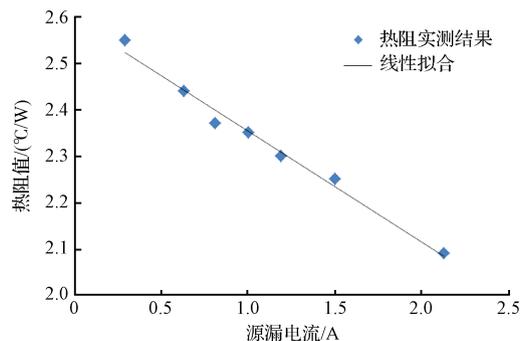


图6 不同源漏电流(功率)下热阻测试结果

由图6可知,随着施加功率的增大,测得的热阻值逐渐减少。施加到器件上的功率从2.32W提高到17.04W,热阻值减少了18%。这是由于电学法温度测量区域并不在峰值温度所在位置。GaN HEMT 器件中多子为电子,半导体材料中由电子动能所引起的电子焦耳热是器件的主要发热来源。峰值电场集中在 AlGaIn/GaN 界面,栅极下靠近漏端一侧的区域<sup>[15]</sup>,这个狭小的区域也是峰值温度区域。而电学法温度测量利用的是栅下肖特基结的压

降。因此,随着电流的升高,肖特基结处的温度与峰值温度的差值逐渐增大,从而导致热阻值的降低。

#### 4 结 论

本文将栅源电压作为温度敏感参数,采用正偏栅极电压法对一款进口 GaN HEMT 器件进行了双界面热阻测试,通过瞬态热阻抗分离点确定热阻值。该方法避免了传统电学热阻测试时壳温测量误差,且测试结果与目前广泛采用的红外热像法结果相近。同时,研究了在不同控温冷板温度和功率条件下器件热阻的变化情况。研究表明,双界面热阻测试方法适用于封装完整的 GaN HEMT 器件。由于器件温度的升高,芯片和管壳的热导率下降,器件热阻也相应增大。但由于该方法温度测量结不在峰值温度区域内,当器件功率增大时,与峰值温度热阻测量结果反而出现下降的现象。

#### 参 考 文 献

- [1] 徐波,余旭明,叶川,等. Ku 波段 20W GaN 功率 MMIC[J]. 固体电子学研究与进展, 2017, 37(2): 77-80.
- [2] 徐涛,唐厚鹭,王昭笔,等. C 波段 GaN HEMT 内匹配功率放大器[J]. 无线电工程, 2017, 47(3): 54-57.
- [3] FARID T, JEAN-BAPTISTE F, OLIVIER L, et al. Electrical and physical analysis of thermal degradations of AlGaIn/GaN HEMT under radar-type operating life[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(3): 756-766.
- [4] 翟玉卫,程晓辉,刘岩,等. 结温准确性对 GaN HEMT 加速寿命评估的影响[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(2): 5-9.
- [5] 丁晓明,王佃利,李相光,等. 微波脉冲功率器件瞬态热阻测试研究[J]. 固体电子学研究与进展, 2012, 32(1): 54-57.
- [6] 郭春生,李世伟,任云翔,等. 加载功率与壳温对 AlGaIn/GaN 高速电子迁移率晶体管器件热阻的影响[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 273-278.
- [7] MARTIN K, JAMES W P. A review of Raman thermography for electronic and opto-electronic device measurement with submicron spatial and nanosecond temporal resolution[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2016, 16(4): 667-683.
- [8] KAZUAKI Y, DUSTIN K, JUSTIN R, et al. Intrinsic transient thermal response of GaN HEMT [C]. 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2016: 1-3.
- [9] HUARUI S, JAMES W P, ROLAND B S, et al. Temperature-dependent thermal resistance of GaN-on-diamond HEMT wafers [J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(5): 621-624.
- [10] JESD51-14 Transient dual interface test method for the measurement of thermal resistance junction-to-case of semiconductor devices with heat flow through a single path[S]. 2010.
- [11] 迟雷,茹志芹,童亮,等. GaN HEMT 器件热特性的电学测试法[J]. 半导体技术, 2017, 42(3): 235-240.
- [12] TOMOAKI H, KENTARO Y. Thermal transient test of GaN HEMT devices [C]. 2017 International Conference on Electronics Packaging, 2017: 417-421.
- [13] ZHENG X, FENG S W, ZHANG Y M, et al. A new differential amplitude spectrum for analyzing the trapping effect in GaN HEMTs based on the drain current transient [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(4): 1498-1504.
- [14] MARTIN-HORCAJO S, POMEROY J W, LAMBERT B, et al. Transient thermoreflectance for gate temperature assessment in pulse operated GaN-based HEMTs [J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(9): 1197-1200.
- [15] 翟玉卫,梁法国,刘岩,等. 提高瞬态红外设备检测 GaN HEMT 结温准确度的方法[J]. 中国测试, 2017, 43(5): 20-25.

#### 作 者 简 介

孙明, 1981 年出生, 工学硕士, 中国电子技术标准化研究院工程师, 主要研究方向为半导体器件可靠性检测与分析等。

E-mail: sunming@cesi.cn