氮化镓功率器件的稳态结-壳热阻测量

赵浩，鲁金科，朱一荻，周子牛，杜伟兮
（三峡大学 电气与新能源学院，湖北 宜昌 443002）

摘要：器件结-壳热阻一直是功率器件备受关注的热参数，同时也是衡量功率器件散热性能的标准。为防止器件过热损坏应考虑其散热性能，因此器件热阻的精确测量尤为重要。器件热阻测量的难点在于器件的结温测量，因为在不破坏器件封装的情况下很难直接测量结温。通过实验发现：小电流下的导通电压作温敏电参数时，导通电压与温度有良好的线性度，可用于结温测量。最后在结温已知的情况下，基于热阻公式即可完成热阻测量。

关键词：GaN器件；导通电压；结温；热阻
中图分类号：TM28 **文献标识码：**A **DOI：**10.19457/j.1001-2095.dqcd25187

Measuring Steady Junction-Case Thermal Resistance of GaN Power Devices

ZHAO Hao，LU Jinke，ZHU Yidi，ZHOU Ziniu，DU Weixi
（*School of Electrical and New Energy*，*China Three Gorges University*，*Yichang* 443002，*Hubei*，*China*）

Abstract：Junction-case thermal resistance has always been a highly concerned thermal parameter of power semiconductor devices，which is also the standard to weight the heat sink performance of power semiconductor devices. Heat-sink design should be considered in order to prevent device overheating damage. Therefore，accurate measurement of thermal resistance is particularly important for system heat-sink. The difficulty of devices thermal resistance measurement lies in the junction temperature measurement because it is difficult to measure junction temperature directly without destroying the devices package. Found through experiment that when the conduction voltage under small constant-current was used as the temperature-sensitive parameter，the conduction voltage and temperature had good linearity，which can be used for junction temperature measurement. Finally，the thermal resistance measurement can be completed based on the thermal resistance formula when the junction temperature was known.

Key words：GaN devices；conduction voltage；junction temperature；thermal resistance

近几十年来，随着半导体技术的快速发展，硅（Si）基功率器件正接近其材料性能的理论极限[1]，无法满足现阶段对耐高温、耐高压、高频率、高功率密度等特殊场合的需求，使得第三代宽禁带半导体材料应运而生。氮化镓（gallium nitride，GaN）作为典型的第三代宽禁带半导体器件，与传统的硅基功率器件相比，GaN功率器件具有更低的导通电阻、更快的开关速度以及更高的开关频率等特点，推动变换器向高效率、高功率密度方向发展[2-3]，在储能系统、工业电机驱动以及无线功率传送等领域受到更多的关注[4]。高功率密度可能使GaN器件产生严重的自热效应，所以准确测量器件的结温、热阻等热特性参数对于GaN器件的性能和可靠性的评估有重要意义[5]。

器件结-壳热阻一直是功率半导体器件备受关注的热参数，同时也是衡量功率半导体器件散热性能的标准[6]。目前关于Si基IGBT与SiC MOSFET封装的功率器件建立了热阻测量标准，但是GaN器件封装尚未建立热阻测量标准，主要原因在于缺乏准确的结温测量技术。目前，有研究人员已开始对GaN功率器件的热阻进行研究，文献[7]利用调制法测量GaN HEMT器件的热阻；文献[8]利用栅极-栅极电阻作为温敏电参数（TSEP）测量GaN HEMT器件的结-壳热阻；文献[9]利用结构函数法评估AlGaN/GaN HEMT器件的热阻构成；文献[10]通过分析新型器件GaN的

作者简介：赵浩（1995—），男，硕士，主要研究方向为功率半导体器件的热特性研究，Email：Z18081482554@163.com

瞬态热阻研究其封装性能；文献[11]研究了GaN HEMT器件的导通电阻在不同电流下与温度的关系。

本文中，将小电流下的导通电压作为温敏电参数，用于测量稳态结-壳热阻。实验步骤主要分为：1）将小电流下的导通电压作为温敏电参数，增设导通电压放大电路用于采集小电流下的导通电压；2）进行导通电压-温度标定实验，反映导通电压与温度有良好的线性关系，用于结温测量；3）基于热阻公式，在结温已知的情况下可得到器件的稳态结-壳热阻；4）最后，通过实验验证了此方法的可行性。

1　原理介绍

现阶段关于GaN器件的结温和稳态热阻测量方法较少，且暂未证明小电流下的导通电压与结温的线性关系或者并未用于GaN器件热阻的测量。本文提出将小电流下的导通电压作为温敏电参数，用于测量GaN器件的稳态热阻。

1.1　稳态热阻

目前，最广泛的热阻测试方法是热电偶测试法，也称为稳态法，通过测量稳态时器件的结温、参考点温度以及功耗即可计算器件的热阻值，如下式所示[12]：

$$R_{\mathrm{th(j-c)}} = (T_{\mathrm{j}} - T_{\mathrm{c}})/P_{\mathrm{loss}} \tag{1}$$

式中：T_{j}为稳态时的结温；T_{c}为器件外壳温度；P_{loss}为引起温升的功耗。

本文中，测量稳态时小电流下的导通电压经过K曲线转换得到结温；用热电偶测量参考点的温度；功耗通过加热电流下的导通电压与加热电流的乘积即可求得。在以上三个参数已知的情况下即可求得器件的稳态结-壳热阻。

1.2　恒流源电路

利用运算放大器搭建所需的恒流源，如图1所示。考虑到运算放大器电流输出能力有限，不能提供几百mA的电流，所以在设计中利用NPN三极管来扩大运算放大器的输出能力，进而得到所需的恒流源。当NPN三级管工作在放大状态时，该电路结构输出的电流为恒定电流。输出电流I_{set}可表示为

$$I_{\mathrm{set}} = \frac{V_{\mathrm{ref}}}{R_2} \times \frac{R_5}{R_6} \tag{2}$$

式中：V_{ref}为给定的参考电压源；R_5，R_6分别为运算放大器OP2反向端的输入电阻和反馈电阻；R_2为用于调节恒流源输出电流的电阻。

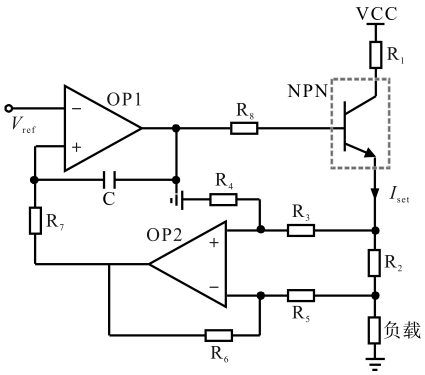

图1　恒流源电路

Fig.1　Constant-current circuit

1.3　导通电压采集电路

从GaN器件GS61008P数据手册中可以知道：在T_{j}=25 ℃、驱动电压V_{GS}=+6 V时，导通电阻通常只有7 mΩ，最大只有9.5 mΩ。给GaN器件通入小电流时所产生的导通电压极小，不能直接用示波器进行测量。因此，需要对小电流下的导通电压进行放大处理，导通电压采集电路如图2所示。选用仪表放大器的好处在于：只需要调节电阻R_{G}就可调节放大增益，实现导通电压的线性放大。

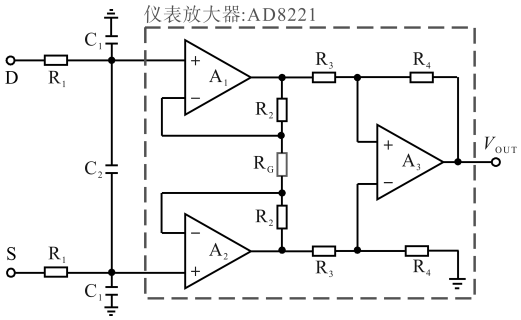

图2　导通电压采集电路

Fig.2　Conduction voltage acquisition circuit

图2中，R_1=49.4 kΩ。外接电阻R_{G}用来调节放大增益，输入端的电阻R_1和电容C_1可以组成低通RC网络滤除电路中的高频信号，抑制共模信号；而电容C_2影响差动信号。

采集电路的放大增益G如下：

$$G = 1 + \frac{R_1}{R_{\mathrm{G}}} = 1 + \frac{49.4\ \mathrm{k\Omega}}{R_{\mathrm{G}}} \tag{3}$$

为满足实验测量要求，实验中外接电阻R_{G}取100 Ω，实现的放大增益为495倍。

2　导通电压-温度标定实验

2.1　标定实验原理说明

器件热阻测量的重点在于结温测量。在完

成了小电流源设计以及小电流下的导通电压采集电路设计后，在进行器件的稳态热阻测量前，必须先确定GaN器件的导通电压与温度之间的对应关系，就需先对GaN器件进行导通电压—温度K曲线标定实验，原理如图3所示。根据GaN器件datasheet可知，相同条件下驱动电压越小，导通电阻越大，即同一小电流下的导通电压更大，所以实验所用驱动电压为+5 V。

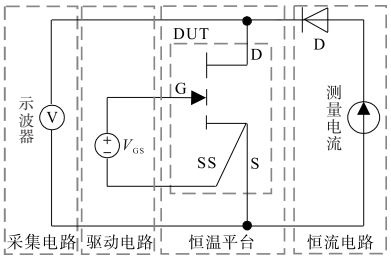

图3　K曲线测量原理

Fig.3　Principle of K curve measurement

2.2　标定实验步骤

K曲线测量一般在恒温平台上进行，步骤如下：1)将待测器件(GaN)置于恒温平台上，并用弹簧固定。随后将驱动电路、小电流源电路以及导通电压采集电路与待测器件(GaN)连接好。设置恒温平台起始温度为30 ℃并等待0.5~1 h，直至待测器件的芯片温度与恒温平台温度相同，即待测器件处于热平衡状态；2)给所有电路通电，测量通入小电流源时的导通电压采集电路的输出端，随后除以放大倍数即可得到实际的导通电压值；3)改变恒温平台温度并重复以上步骤即可得到小电流源下不同温度下的导通电压值，将数据进行处理即可得到K曲线。

热平衡状态：在待测器件(GaN)外壳上的正中心位置放置热电偶测温元件并用导热胶固定，然后将这一整体置于恒温平台上，并用弹簧固定。随后将驱动电路、小电流源电路以及导通电压采集电路与待测器件(GaN)连接好。将恒温平台起始温度设置为30 ℃并开启电源开始加热，同时进行热电偶温度采集，当加热台温度和热电偶采集温度都达到30 ℃时，等待0.5~1 h，直到加热台温度稳定不变、热电偶所采集到的温度在30 ℃上下以0.5~1 ℃小幅度波动，则认为待测器件(GaN)此时已达到热平衡状态，进而可进行标定实验中的步骤2)。

2.3　不同小电流源下的K曲线

基于标定步骤，进行小电流分别为100 mA，200 mA，300 mA，460 mA以及700 mA的K曲线标定实验，根据所得到的实验数据进行K曲线绘制，如图4所示。

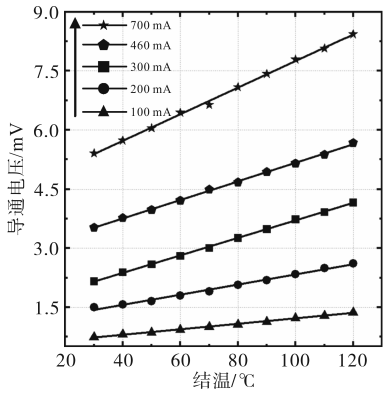

图4　不同恒流源下的K曲线

Fig.4　K curve of different constant-current

从图4中可以看出，不同小电流下导通电压与温度皆呈正相关线性关系。对数据进行分析发现：1)对同一测试电流而言，在相同的驱动电压和相同的测试电流下，温度越高，则器件的导通电压越大；2)对不同测试电流而言，在相同的驱动电压和相同的温度下，测试电流越高，则器件的导通电压越大。

3　实验验证

以GaN System公司的GS61008P器件作为实验研究对象，搭建稳态热阻测量实验平台，测量此器件的稳态结-壳热阻。

3.1　实验平台

搭建GaN器件稳态热阻测量实验平台，原理图和实物图如图5、图6所示。

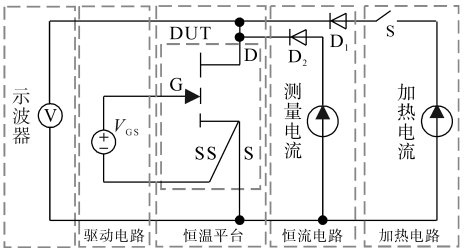

图5　主电路原理图

Fig.5　Schematic diagram of main circuit

在图6实物图中，MOS驱动部分用以驱动MOSFET晶体管，来控制加热电流的接入与关断；MOS管的左侧放置二极管D_1用以防止测量电流流入加热电流，放置二极管D_2用以防止加热电流流入测量电流；MOS驱动电路背部没有器件，且二极管D_1位于顶部。

根据温升公式$\Delta T=R_{th(j-c)}\cdot P_{loss}$，其中，$\Delta T$为器件结-壳温升，在器件GS61008P数据手册中，

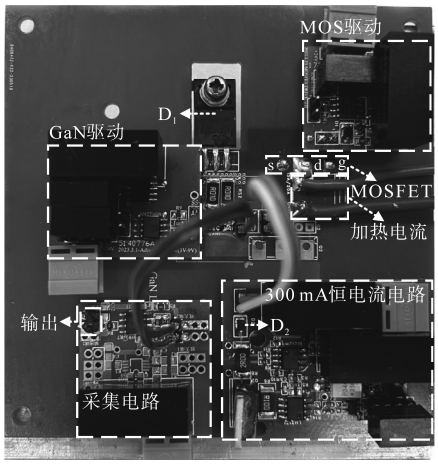

图6　主电路实物图

Fig.6　Physical diagram of main circuit

$R_{th(j-c)}$=0.55 ℃/W，导通电阻在T_j=150 ℃时通常为17.5 mΩ，所以最终影响温升的是耗散功率P_{loss}，再通过耗散功率公式$P_{loss}=I^2\cdot R_{DS(on)}$可知，施加的小电流越小，功耗$P_{loss}$越小，如：小电流$I$取300 mA，$P_{loss}$=1.575 mW，由300 mA产生的温升只有$8.663\times10^{-4}$ ℃，因此可以忽略小电流300 mA带来的温升影响。

小电流太大会对K曲线标定造成影响、电流太小会影响测量精度、K曲线的线性度以及灵敏度，本实验最终选用小电流为300 mA的K曲线，如图7所示。

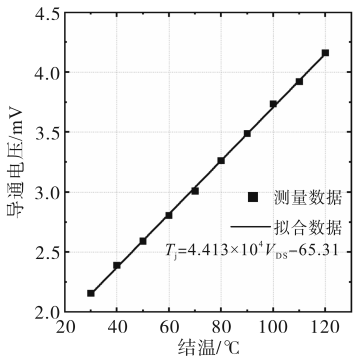

图7　恒流源为300 mA下的K曲线

Fig.7　K curve under constant current 300 mA

由图7可见，小电流下的导通电压与温度有着良好的线性度，可以作为温敏电参数用于结温测量。通过拟合关系曲线，可得到导通电压与结温之间的关系表达式：

$$T_j = 4.413\times10^4 V_{DS} - 65.31 \tag{4}$$

式中：V_{DS}为导通电压。

后续的实验都基于该等式来换算进而测量结温。

3.2　实验结果

小电流取300 mA，GaN器件驱动电压取+5 V。给器件施加加热电流使其加热到稳态，测量此时加热电流下的导通电压、小电流下的导通电压以及用热电偶测量GaN外壳的温度，得到的数据如表1所示。

表1　同一加热电流下的稳态热阻

Tab.1　Steady thermal resistance under same heating-current

加热电流/A	功率/W	T_j/℃	T_c/℃	$R_{th(j-c)}$/(℃·W^{-1})
15.01	2.548 8	84.6	83.2	0.549 3
14.99	2.512 65	82.7	81.3	0.557 2
14.98	2.479 5	80.8	79.4	0.564 6

三组实验的所有外部测试条件一致，加热电流均设置为15 A、热电偶尽量放置于器件中心的正下方位置，重复测量三次。

从表中的数据可以看出，保证实验测量中所有外部条件不变的情况下，测量得到的结-壳热阻平均值为0.557 ℃/W。与GaN手册对照，误差为1.27%，实验误差较小，表明小电流下的导通电压可作为温敏电参数测量器件的结-壳热阻。

4　结论

实验表明，小电流下的导通电压可以作为温敏电参数用于测量器件的稳态结-壳热阻。将小电流下的导通电压作温敏电参数有以下优点：

1）无须破坏器件封装便可测量器件结温；

2）导通电压与温度有着良好的线性度，能准确地测量器件结温。

综上所述，以导通电压作为温敏电参数能较为准确地测量器件稳态结-壳热阻。

参考文献

[1] ENDOH R, WATANABE J, SUGIE R, et al. Heat dissipation characterization and application of SiC power devices by transient thermal measurement[C]//2015 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), 2015: 822-825.

[2] MILLÁN J, GODIGNON P, PERPIÑÀ X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2155-2163.

[3] FLACK Tyler J, PUSHPAKARAN Bejoy N, BAYNE Stephen B, et al. GaN technology for power electronic applications: a review[J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45(6): 2673-2682.

[4] LI B, YANG X, WANG K, et al. A compact double-sided cooling 650 V/30 A GaN power module with low parasitic parame-

（下转第49页）

cle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1717-1723.

[15] SHANG C, SRINIVASAN D. Economic and environmental generation and voyage scheduling of all-electric ships[J]. IEEE Transactions on Power System, 2016, 31(5): 4087-4096.

[16] 魏繁荣,随权,林湘宁,等. 考虑可转移负荷效率的风/光/柴/蓄孤岛微网日运行能量控制优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1045-1053, 1281.
WEI Fanrong, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. Optimized energy control strategy about daily operation of islanded microgrid with wind/photovoltaic/diesel/battery under consideration of transferable load efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1045-1053, 1281.

[17] FANG S, XU Y. Two-step multi-objective management of hybrid energy storage system in all-electric ship microgrids[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3361-3373.

[18] 夏超英,苗海丽. 基于二次型最优控制的微电网实时能量管理策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 721-730, 951.
XIA Chaoying, MIAO Haili. Real-time energy management strategy for micro-grid based on the quadratic optimal control theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 721-730, 951.

[19] 李文康. 柴油发电机组的数学建模及其功率补偿技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
LI Wenkang. Modeling and research on power compensation technology for diesel generator system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[20] 孙航,肖海伟,李晓辉,等. 光伏电池模型综述[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 743-745.
SUN Hang, XIAO Haiwei, LI Xiaohui, et al. Review in photovoltaic cell model[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(3): 743-745.

[21] 姚钢,茆中栋,周荔丹,等. 协同调度电动汽车与储能装置的家庭能量管理策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(4): 35-41, 50.
YAO Gang, MAO Zhongdong, ZHOU Lidan, et al. Home energy management strategy for co-scheduling of electric vehicle and energy storage device[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(4): 35-41, 50.

[22] 李欣. MMC风电变流器控制及其稳定性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2019.
LI Xin. Research on control and stability analysis of MMC wind power converter[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.

[23] LAN H, WEN S L, HONG Y Y, et al. Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system[J]. Applied Energy, 2015, 158: 26-34.

收稿日期:2023-05-24
修改稿日期:2023-06-13

(上接第31页)

ters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 426-439.

[5] 姚芳,胡洋,吴伟涛. IGBT模块结壳热阻快速计算法研究[J]. 电气传动, 2017, 47(6): 66-70.
YAO Fang, HU Yang, WU Weitao. Study on a fast calculation method of junction-to-case thermal resistance of IGBT modules[J]. Electric Drive, 2017, 47(6): 66-70.

[6] 邓二平,赵志斌,张朋,等. 压接型IGBT器件与焊接式IGBT模块热阻测试方法对比研究[J]. 智能电网, 2016, 4(7): 631-638.
DENG Erping, ZHAO Zhibin, ZHANG Peng, et al. Comparative study on the method of thermal resistance measurement for press pack IGBT and IGBT module[J]. Smart Grid, 2016, 4(7): 631-638.

[7] SMIRNOV V, SERGEEV V, GAVRIKOV A, et al. Measuring thermal resistance of GaN HEMTs using modulation method[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(10): 4112-4117.

[8] LU S, ZHANG Z, BUTTAY C, et al. Improved measurement accuracy for junction-to-case thermal resistance of GaN HEMT packages by gate-to-gate electrical resistance and stacking thermal interface materials[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 6285-6289.

[9] ZHANG G C, FENG S W, ZHOU Z, et al. Evaluation of thermal resistance constitution for packaged AlGaN/GaN high electron mobility transistors by structure function method[J]. Chinese Physics B, 2011, 20(2): 027202.

[10] SHAN Y, GAO W, HUANG Z, et al. Test methods and principles of thermal resistance for GaN HEMT power devices[C]// 2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2020: 1-4.

[11] CHEN S H, CHOU P C, CHENG S. Evaluation of thermal performance of packaged GaN HEMT cascode power switch by transient thermal testing[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 1003-1012.

[12] 曾晓彤,王荣茂. 基于Vth和Vce的IGBT结温测量方法对比研究[J]. 电气传动, 2022, 52(11): 24-28.
ZENG Xiaotong, WANG Rongmao. Comparison of IGBT junction temperature measurement methods based on Vth and Vce[J]. Electric Drive, 2022, 52(11): 24-28.

收稿日期:2023-06-13
修改稿日期:2023-08-17