DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.05.016　　文章编号：1000-128X(2023)05-0145-07

碳化硅MOSFET基于栅压延时关断方法的结温监测技术研究

周　维[1]，王勇志[1]，魏晓慧[2]，郭维立[1]，何　勇[1]
（1.湖南国芯半导体科技有限公司，湖南 株洲　412001；
2.株洲中车时代电气股份有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：准确监测功率器件结温一直是器件厂商及应用端非常重要的一项工作。主流的温敏电参数法由于响应速度快、测量准确，被广泛地应用于各个领域。目前在硅基器件应用上已相对成熟，然而由于碳化硅器件的高开关特性及栅极氧化层缺陷，采用电参数法会产生更强烈的寄生振荡与高频EMI噪声，这对于测量器件初始温度会带来很大的误差，因此文章提出一种栅压延时关断的改进电参数法测试方案，抑制器件关断阶段的V_{DS}振荡，通过仿真及电路应用验证，以及热阻测试对比分析，验证了这种栅压延时方案能够有效抑制波形振荡，达到准确测量器件结温的目的。

关键词：栅极电压延时；温敏电参数；结构函数；碳化硅MOSFET；热阻
中图分类号：TN304.2+4　　**文献标识码：**A

Research of SiC MOSFET junction temperature monitoring technology based on gate voltage delayed turn-off method

ZHOU Wei[1], WANG Yongzhi[1], WEI Xiaohui[2], GUO Weili[1], HE Yong[1]

(1. Coresing Semiconductor Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Monitoring the junction temperature of power devices accurately is very important for device manufacturers and applications. The mainstream temperature-sensitive electrical parameter method is widely used in various fields because of its fast response speed and accurate measurement. At present, it is relatively mature in silicon-based device applications. However, due to the high switching characteristics of SiC devices and the defects of gate oxide layer, the electrical parameter method generates stronger parasitic oscillation and high frequency EMI noise. This causes large errors in measuring the initial temperature of the device. Therefore, a test scheme based on the improved electrical parameter method for gate time delay was proposed to suppress the V_{DS} oscillation at the device turn-off moment. Through simulation and circuit application verification, as well as comparative analysis of thermal resistance test, it was proved that this scheme could effectively suppress waveform oscillation and measure the junction temperature of the device accurately.

Keywords: gate voltage time delay; temperature-sensitive electrical parameters; structure function; SiC MOSFET; thermal resistance

0　引言

近年来，随着全球功率半导体器件产业的迅猛发展，行业对器件的可靠性评估日益受到重视，器件寿命评估是可靠性评估的一个重要课题并在各个行业开展研究，其中功率循环试验作为一个重要的评估方法被广泛应用，而最重要的环节就是器件结温监测，器

基金项目：湖南省重点研发计划项目（2022GK2006）
通信作者：周　维（1984—），男，工程师，研究方向为半导体器件可靠性测试技术和寿命评估；E-mail: zhouwei4@csrzic.com
引用格式：周维, 王勇志, 魏晓慧, 等. 碳化硅MOSFET基于栅压延时关断方法的结温监测技术研究[J]. 机车电传动, 2023(5): 145-151.
Citation：ZHOU Wei, WANG Yongzhi, WEI Xiaohui, et al. Research of SiC MOSFET junction temperature monitoring technology based on gate voltage delayed turn-off method[J]. Electric drive for locomotives,2023(5): 145-151.

件结温（平均结温，结温差）是影响使用寿命的重要参数。获取器件结温的准确数据对于评估器件热阻特性、预测器件寿命、应用端电力变换系统热管理设计，以及保证系统稳定可靠运行具有至关重要的意义。

温度敏感电参数法（K系数法）[1-2]目前是行业快速在线监测器件结温的重要方法。该方法利用器件在微小电流下的某一项电性参数与器件结温呈线性关系，在硅器件、碳化硅等器件的结温监测上都得到了广泛应用。对于硅IGBT常采用多种电参数作为温敏参数，如V_{CE}、米勒平台电压、关断电流变化率[3]、阈值电压[4]等，对于碳化硅MOSFET常采用寄生体二极管电压、阈值电压作为温敏参数，对于GaN器件目前主要采用栅极的肖特基二极管特性作为温敏参数，采用这些方式都能得出很好的线性关系，以准确反馈器件的结温，且响应速度到达微秒级，理论上这是一种完美的结温监测方案，然而在实际应用中并非如此。目前非常火热的下一代功率半导体碳化硅器件，因其具有高开关速度、低导通电阻带来的低器件损耗优势，对于电力电子变换器高频、高功率密度、高效率以及小型化设计的应用需求，碳化硅器件具有全方位的优势，在工业变频、新能源和轨道交通等领域得到了越来越广泛的应用。但这种优越的高频特性使得在监测器件结温时增加了难度。首先碳化硅MOSFET高开关速度需要设备匹配更高的带宽及采样率，以及更高EMI噪声抑制，减小测试回路寄生参数，抑制器件振荡。同时碳化硅MOSFET栅极氧化层存在严重的界面态问题，在老化过程中栅氧的退化会出现阈值偏移，这对于采用栅源阈值电压作为温度敏感电参数会带来监测结温不准的问题。在提高采样率方面，目前行业主要采取变频的方式，在关断大电流的初期增大采样率，在稳定阶段减小采样率，既保证了数据的准确性，同时又避免了数据量过大带来的数据处理问题。对于高开关速度带来的振荡，目前主流的方法是栅极串联大电阻，通过减慢开关速度来抑制振荡，但这种方式对于结温监测的快速监测做了妥协，对于栅源阈值电压的漂移问题，只能通过改善栅氧层质量来解决。本文将主要阐述如何通过栅压延时关断的方法来抑制器件振荡，准确测量器件结温做分析研究、建立仿真模型及试验对比验证。

1 温度测量理论基础[5−12]

功率半导体器件结温一般指的是器件内部芯片的温度，目前通常所采用的温度监测手段主要有热电偶法、电参数法和红外热成像探测法。其中热电偶法是一种接触式测温法，需将热电偶贴附在器件表面，该方法响应速度较慢，且只能测量器件封装外壳表面的温度，无法满足结温在线监测的要求。电参数法是一种间接的非破坏性的测量芯片结温的方法，由于其测量的是器件两端的电参数，反映的是器件芯片的平均结温，根据所选用的电参数不同，该结温所处的发热区域在芯片内分布也具有差异，比如采用阈值电压模式则发热点位于芯片发射极端沟道区，而采用饱和电压模式则热主要集中在集电极P-N结侧。红外测温法，是一种非接触式测温法，采用该方法可以获取芯片上的表面温度，精度高、响应速度较快，但因为试验前需要去除芯片表面上的硅胶或树脂等覆盖材料，还需涂敷黑胶，操作上十分复杂，也容易造成芯片表面的键合线断裂。

1.1 热电偶法

热电偶法测温原理是热电效应，利用热电偶这一感温元件，将温度转换为热电势，再通过测量采集卡将热电势转换为温度值，由于热电偶材料通常是2种不同的金属，这使得其测温范围非常广，可以达到上千摄氏度，价格也相对便宜。目前行业主要采用埋入式热电偶，即在被测物体下表面开槽，在器件基板底下2 mm左右处，将热电偶埋入至沟槽中。由于其操作简单，且不会影响系统正常工作，在电力电子系统应用端得到了广泛应用，通常把热电偶贴附在功率器件边缘、磁性器件绕组/磁芯表面、电容外壳等处，用来监测发热器件温度，但其响应速度慢，对于瞬时过热引起的元器件损伤无法获得及时的信息反馈，同时也需要考虑安装过程中的绝缘问题。

1.2 电参数法

电参数法是基于结温T_j和温度敏感参数(temperature sensitive parameter，TSP)间的线性关系，即K系数标定监测器件结温，是一种可实现在线监测的无损监测技术。对于不同的功率器件，有不同的K系数标定方案，该方案目前主要应用在开关频率不高的可靠性试验中，在轨道交通、新能源汽车行业的器件寿命监测近年来也陆续开始应用，但由于常用的集–射极电压V_{CE}和栅–射极阈值电压$V_{GE(th)}$作为温敏参数的方式在测试过程中需要关断大电流通微小测试电流，在电力电子变换器实际应用过程中监测结温很难实现，所以目前行业内也在研究在大电流下实现K系数标定，保证实际应用中的实时监控，例如研究将di/dt、米勒平台电压作为温敏参数等结温监测方法。

1.3 红外热成像系统测温

红外热成像系统测温是通过热成像仪来监测器件表面温度，该方法主要是利用热辐射原理，不同温度的物体辐射能量不同，利用红外辐射能量大小与波长的关系，准确测定其表面温度。

2　结温监测技术在功率半导体器件热阻测试上的应用

热阻测试需要获得器件的降温曲线，降温曲线则需要通过电参数法获取，如目前主流的采用测试设备Phase11与T3ster测热阻方案，一种是采用多脉冲升温，另一种则是采用单脉冲升温来分析降温曲线函数以获得器件的稳态热阻[12-15]，而无论哪种方案，都需要在关断加热电流后通过提供测试电流来完成结温监测，这个关断过程带来的测量采样延迟时间为加热电流关断到测试电压开始采样监测结温的时间。由于加热电流是通过恒流电源关断，这期间电源关断需要一段时间，同时由于器件寄生电容的存在，关断也会产生反向恢复时间，需要设定采样延迟时间来准确监测器件结温，而设定采样延迟时间过短会导致监测结温的测试电压尚未稳定，而采样延迟时间过长会导致器件结温下降，测量电压偏小，监测的结温比实际结温高。因此需要根据被测器件的实际开关特性选取数十到上百微秒的测量延迟时间（一般用示波器抓取采样波形，以获得合适的延迟时间）。原则是在测量电压已经稳定的前提下尽量选取短的测量延迟时间，同时，基于温度与时间1/2次方的线性关系，将采样测量电压数据还原成温度与时间的曲线后进行回归补偿，以获得关断瞬态t_0时刻器件结温。

由于IGBT器件开关速度低，在关断过程中产生的振荡基本都在250 μs内（6 500 V的高压大功率模块由于漂移区更厚，会带来更长的关断拖尾时间，延迟时间可能会高于250 μs），对于碳化硅MOSFET器件，由于其开关速度快，所产生的振荡剧烈，不仅采样延迟时间长，而且关断瞬间的过压尖峰也容易损坏设备的驱动和采样回路[16]。本文以T3ster测试设备和CREE碳化硅MOSFET器件为例（如图1所示），分析关断瞬态测量电压曲线，将用示波器测量器件关断波形和用T3ster设备自身获取的波形进行对比分析。从图1可以

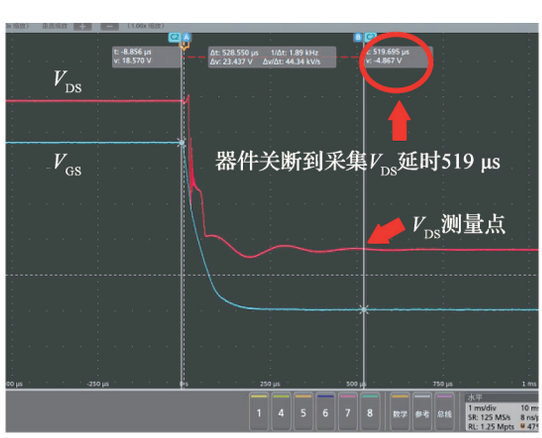


图1　SiC MOSFET关断瞬间V_{DS}与V_{GS}波形

Fig. 1　V_{DS} and V_{GS} waveform of SiC MOSFET at the moment of turn-off

看出，示波器抓取的测量电压漏–源极电压V_{DS}（红色曲线）在519 μs左右才逐渐稳定，此时采样的V_{DS}才能准确反映器件结温，而热阻或功率循环试验结温监测过程中会根据设备自身显示的V_{DS}波形来设定测量延迟时间，此时设备显示V_{DS}在延时96 μs后已经稳定（如图2所示），但实际上这个位置测量的V_{DS}并没有达到稳定状态，如图3所示V_{DS}稳定点519 μs处的电压值与96 μs的电压值有近200 mV的偏差，监测的结温会不准确。显然传统的电参数法在关断加热电流后通过测量电压V_{DS}来监测器件结温的方法已经不能适用碳化硅MOSFET器件的高开关频率特性，需要对电参数法进行优化来准确表征器件在关断瞬态的结温。



图2　T3ster显示碳化硅MOSFET电压波形

Fig. 2　Voltage waveform of SiC MOSFET from T3ster

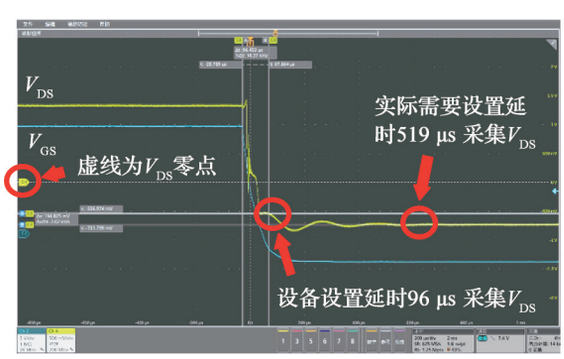


图3　延时96 μs处测量电压与延时519 μs测量电压对比

Fig. 3　Comparison of measured voltage at delay time of 96 μs and 519 μs

3　基于电参数法的结温监测优化方案[17]

如上所述，电参数的结温监测方法中的测量电压V_{DS}的准确性极为重要。采用一种栅压延迟关断方法的结温监测技术解决碳化硅MOSFET结温监测出现的问题，本章通过仿真模型搭建、实际测试案例和结果进行对比分析，阐述采用此方法监测碳化硅MOSFET器件结温的原理和优势。

针对上述碳化硅MOSFET器件在结温监测上所面

临的问题，考虑优化测量方法缩短器件关断瞬态由于寄生参数串扰引起的测量电压 V_{DS} 振荡的时间和降低振幅。现传统的结温监测方法，加热电流关断瞬间，器件也同时关断，器件及测试回路的杂散电感与电流变化率 di/dt 作用，形成 V_{DS} 电压尖峰，同时器件内部寄生电容与杂散电感耦合形成LC回路，引起 V_{DS} 振荡并持续一段时间。通过采取加热电流关断后延迟一定时间关断栅极电压的方案，实现零电流关断工作模式，由于在关断栅压时器件加热电流已降为0，所以杂散电感无法和电流变化率 di/dt 作用，V_{DS} 的振荡明显减弱。但由于栅压关断，导致器件米勒电容上的电压出现跳变，在米勒电容上产生 di/dt 耦合到器件的输出电容 C_{OSS}，器件仍然会出现 V_{DS} 振荡，但振幅很小并在极短的时间内恢复稳定，相比传统结温监测方法对测量电压 V_{DS} 振荡时间的缩短和振幅的抑制有明显效果。

3.1 栅极电压延迟关断功能实现方式介绍

碳化硅MOSFET开关控制逻辑实现方法如图4所示，辅助开关控制加热电流 I_{heat} 的接通，通过对栅极电压 V_{GS} 的开启时间进行一定的延时以达到设定方案试验的功能。

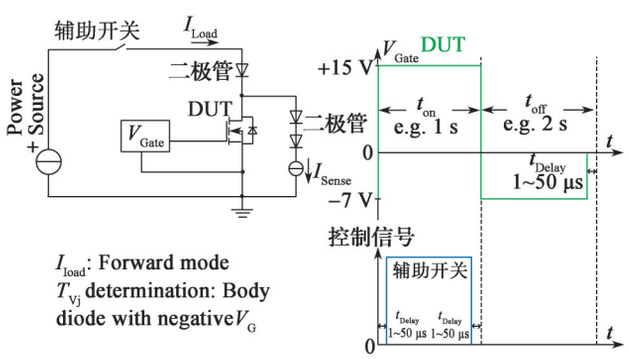


图4 控制逻辑实现方法示意图

Fig. 4 Implementation method diagram of control logic

3.2 栅极电压控制时序介绍

栅极电压控制时序如图5所示，控制信号Trigger在 t_1 时刻发出关断信号，即触发信号置低电平，在 t_2 时刻关断加热电流 I_{heat}，在 t_3 时刻驱动将栅极电压 V_{GS} 关断，V_{GS} 从正电压切换到负电压，通过这种方法，实现栅极电压在加热电流关断后延时一段时间再关断。

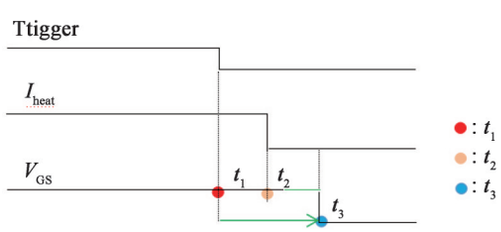
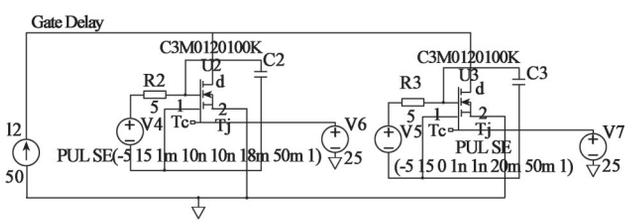


图5 栅极电压关断时序图

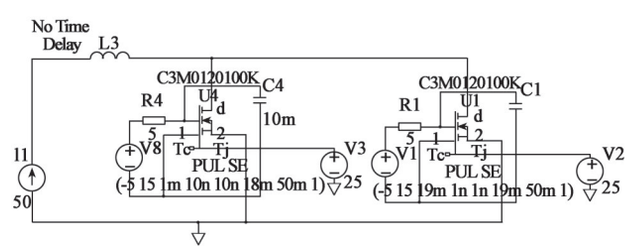
Fig. 5 Gate voltage turn-off timing diagram

3.3 栅极电压延时关断方案仿真验证

通过上述碳化硅MOSFET开关控制逻辑方案，搭建仿真电路，验证栅极电压 V_{GS} 延时关断对测量电压 V_{DS} 振荡的抑制作用。仿真电路模型如图6所示，Gate Delay电路为带栅极电压延时功能[如图6(a)所示]，No Time Delay电路为不带栅极电压延时功能[如图6(b)所示]，采用CREE的C3M0120100K器件作为电路仿真的芯片模型，U_2、U_4 为被测器件，U_3、U_1 为陪测管，由于电流源无法工作在开环模式，所以与实际应用电路相对应，设备在被测器件关断时电流源需要切换到另一只MOSFET陪测管上，栅极电压波形如图7所示，红色曲线为被测器件 U_2 的栅极电压波形，蓝色曲线为陪测器件 U_3 栅极电压波形。



(a) 具备栅压延迟关断功能仿真电路



(b) 不具备栅压延迟关断功能仿真电路

图6 栅极电压延迟电路仿真建模

Fig. 6 Gate voltage delay circuit simulation & modeling

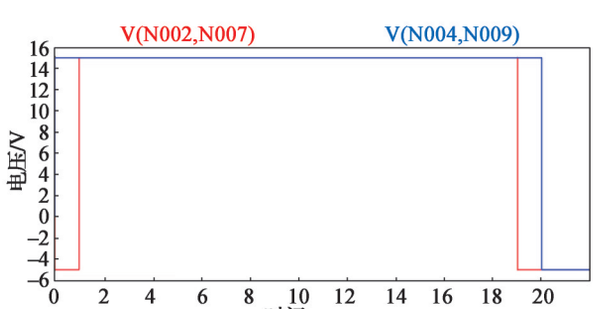


图7 栅压延时功能电路栅极电压波形

Fig. 7 Gate voltage waveform of a functional circuit during gate voltage delay

对仿真电路模型进行分析，被测器件 U_2、U_4 的 V_{DS} 仿真波形如图8所示，蓝色曲线为栅极电压延时关断后的 U_2 的 V_{DS} 电压波形，红色曲线为无栅极电压延时关断后的 U_4 的 V_{DS} 电压波形。从 V_{DS} 波形可以看出，具备栅极电压延时关断的 U_2 的 V_{DS} 波形振荡很小，且快速稳定，而无栅极电压延时关断的 U_4 的 V_{DS} 波形有一个很高的电压尖峰，并且持续振荡一段时间才稳定，这

是因为不带延时功能的电路在切换到陪测管U_1时，U_1从截止区到饱和区需要一定时间，这段时间器件U_1和U_4均处在高阻状态，电流源会出现短暂的开路状态，导致U_4的V_{DS}电压迅速上升且持续振荡。

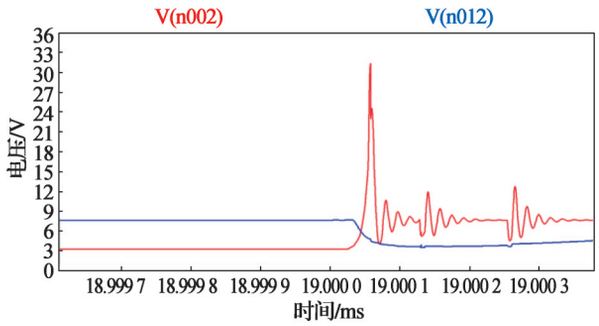


图 8　U_2和U_4的V_{DS}波形对比

Fig. 8　V_{DS} waveform comparison of U_2 and U_4

3.4　栅极电压延迟关断波形试验验证

通过上述仿真分析，进行试验验证。本次采用10 μs的延迟时间进行栅极电压V_{GS}（黄色曲线）关断（如图9所示），测量CREE碳化硅MOSFET器件的V_{DS}（绿色曲线），从图9可以看出，器件从加热电流I_{heat}开始关断到测量电压V_{DS}达到稳定时间在19 μs左右，且未出现之前在关断稳定过程中持续振荡的现象，此时测量的V_{DS}能准确监测器件结温。

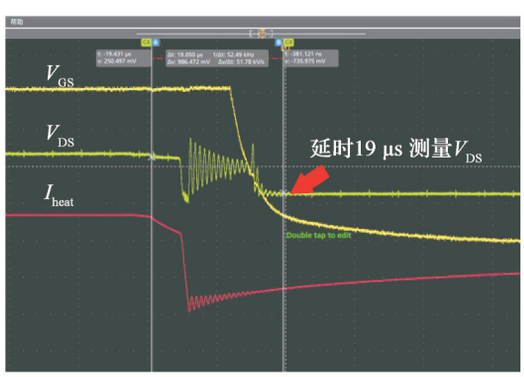


图 9　栅压延时关断功能的测试波形

Fig. 9　Test waveform of gate voltage delay turn-off function

4　采用监测器件结温的传统方式与栅压延时关断方法的热阻测试对比分析

通过上述试验结果证明采用栅压延时关断方法能准确监测器件结温，并对器件电压振荡有极好的抑制作用。由于结温监测的准确性对热阻测试结果具有决定性的作用，因此通过碳化硅MOSFET器件热阻测试来做对比以验证分析传统的结温监测和栅压延时关断结温监测2种方案对器件热阻测试结果的影响。器件规格型号如表1所示，测试原理如图10所示，首先通过在恒温箱内通测试电流，以获取器件温敏参数与温度的线性曲线即K系数曲线（如图11所示）。在器件热阻测试阶段，通过恒流源给器件通加热电流，试验器件主动发热，在达到热稳定后，切断加热电流，施加负栅压对器件进行关断，同时对碳化硅MOSFET的体二极管通测试电流，测量体二极管正向电压随温度的热敏参数，并转换为器件结温，纪录降温曲线。

表 1　器件参数

Table 1　Parameters of devices

参数项目	器件类型	器件型号	器件规格
参数值或说明	SiC MOSFET	CAS300M17BM2	1 700 V/300 A

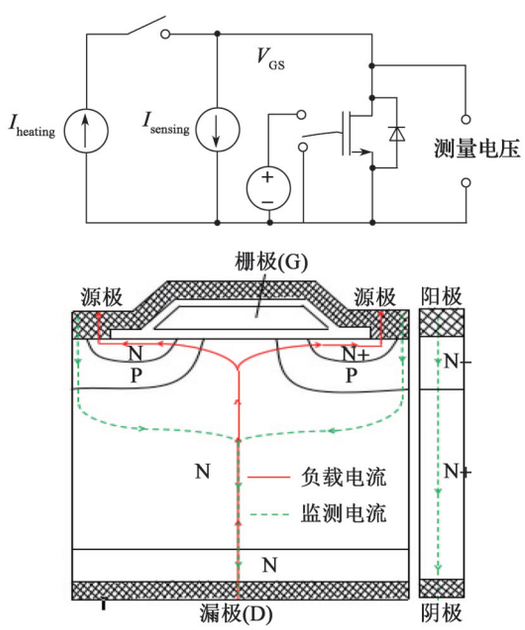


图 10　SiC MOSFET热阻测试原理图

Fig. 10　Schematic diagram of SiC MOSFET thermal resistance test

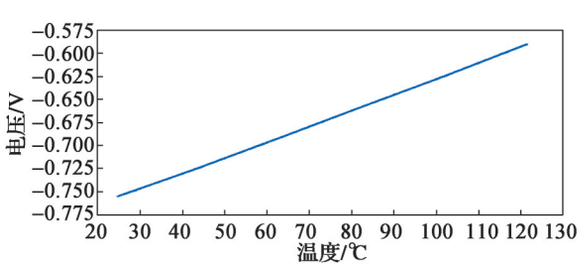


图 11　器件K系数曲线图

Fig. 11　Device K coefficient curve

为保证测试结果具有对比性，将传统的热阻测试方法和栅极电压延时关断的热阻测试方法的2次试验条件保持一致，如加热电流、水温、水流量、开通关断时间等，测试条件如表2所示。

将测量的数据还原成温度与时间的曲线后进行回归补偿，得到的2次试验降温曲线汇总如图12所示，深红色为不带栅压延时关断测得的降温曲线，深蓝色为16 μs栅压延时关断方法测量的降温曲线。从2条曲线回归补偿到t_0时刻器件结温可以得出，红色曲线t_0时刻器件结温比16 μs栅压延时关断的器件结温高出1.367 ℃，而器件结构函数曲线获得的器件稳态热阻也

是不带栅压延时关断功能的器件比 16 μs 栅压延时的器件的稳态热阻值高出 0.003 7 K/W（如图 13 所示）。2 种方案测量的器件结温和热阻的差异都是由加热电流关断瞬态测量器件的 V_{DS} 差异造成的，下面对测试结果的差异进行原理分析。

表 2　热阻试验测试条件

Table 2　Conditions of thermal resistance test

参数项目	无栅压延时关断	栅压延时关断
加热电流/A	200	200
开通时间/s	120	120
关断时间/s	120	120
测试电流/mA	100	100
驱动电压/V	18/−5	18/−5
栅压关断延时/μs	无延时	16
水温/℃	24	24
水流量/(L·min^{-1})	8	8

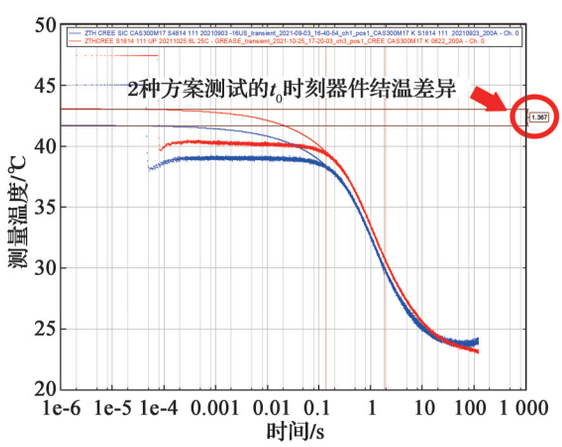


图 12　2 种热阻测试方法的降温曲线图

Fig. 12　Cooling curves of two thermal resistance test methods

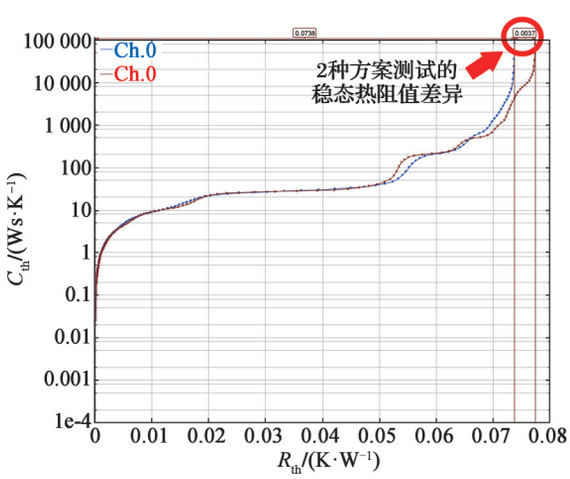


图 13　2 种热阻测试方法结构函数曲线图

Fig. 13　Structure function curves of two thermal resistance test methods

从前面 3.3 节的验证结果得知，栅压延迟关断的方案测量的结温是器件的真实结温。通过对图 3 示波器显示波形进行分析，由于加热电流关断后测试电流是通过碳化硅 MOSFET 的反向体二极管，所以关断后测量器件两端的 V_{DS} 为负值，负值仅代表方向，因此无栅压延迟关断功能测量的 V_{DS} 的绝对值比实际需要测量稳定的 V_{DS} 的绝对值小。根据 K 系数曲线负温度特性，V_{DS} 值越小对应的器件结温就越大，因此测量的器件结温比实际值大；而热阻测试在降温阶段是实时采样 V_{DS} 来监测结温的，最终稳态阶段 2 种方式器件都会稳定在初始温度，所以对于无栅极电压延迟关断方案的热阻测试，根据式(1)器件热阻计算公式进行分析。

$$R_{th}=\frac{\Delta T_j}{\Delta P}=\frac{T_{j0}-T_{js}}{\Delta P} \tag{1}$$

式中：R_{th} 为器件稳态热阻；ΔT_j 为器件结温差；T_{j0} 为器件 t_0 时刻结温；T_{js} 为器件初始时刻结温；ΔP 为加热功率。

由于 T_{j0} 偏大，ΔT_j 就会偏大，而 ΔP 恒定，导致测试的器件 R_{th} 偏大；而采用栅压延时关断的方法测量的器件真实 T_{j0}、ΔT_j 和 R_{th} 都会比传统结温监测方法测试的值小，因此 t_0 时刻监测的结温差异最终造成器件稳态热阻值的偏差，如表 3 所示。

表 3　器件热阻测试结果

Table 3　Test results of device thermal resistance

栅压延迟关断时间	无延迟	16 μs
稳态热阻值/（K·W^{-1}）	0.077 5	0.073 8

同时结温监测的差异也会影响到其他采用碳化硅 MOSFET 体二极管作为温敏参数的可靠性试验中，例如功率循环试验，传统的结温监测方法会导致器件在加热电流关断 t_0 时刻测量的芯片结温高于实际结温，这会使器件每次功率循环实际结温未达到设定值，试验应力更为宽松，从而增加了功率循环次数，带来器件寿命更长的假象，无法评估器件的真实寿命，影响器件实际应用的可靠性。

5　结论

本文介绍了目前行业内主流的器件结温监测的方法，说明了这几种监测结温方法的优点与缺点。针对目前最主要的电参数 K 系数法在线监测器件结温的应用，阐述了这种方法在测量碳化硅 MOSFET 器件结温上产生的问题，并提出优化解决方案，同时通过搭建仿真模型、热阻试验对比分析、测试原理研究，证明了在采用栅极电压延时关断的方法监测器件结温更准确，解决了因为碳化硅 MOSFET 器件高开关速度带来的测量电压振荡问题，这对于以器件结温作为重要依据的热阻测试及功率循环寿命评估等相关试验结果的准确性具有重大的意义。后续将会继续重点研究碳化硅 MOSFET 及氮化镓器件使用阈值电压作为温敏系数进行结温监测的应用情况、产生的问题及优化方案。

参考文献：

[1] CHEN Yuxiang, LUO Haoze, LI Wuhua, et al. A thermo-sensitive electrical parameter with maximum dI_C/dt during turn-off for high power trench/field-stop IGBT modules[C]// IEEE. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Long Beach: IEEE, 2016: 499-504.

[2] 冯士维, 谢雪松, 吕长志, 等. 半导体器件热特性的电学法测量与分析[J]. 半导体学报, 1999, 20(5): 358-364.
FENG Shiwei, XIE Xuesong, LYU Changzhi, et al. Measurement and study on thermal characteristics of semiconductor devices by electrical method[J]. Chinese journal of semiconductors, 1999, 20(5): 358-364.

[3] AVENAS Y, DUPONT L, KHATIR Z. Temperature measurement of power semiconductor devices by thermo-sensitive electrical parameters−a review[J]. IEEE transactions on power electronics, 2012, 27(6): 3081-3092.

[4] 彭英舟, 周雒维, 孙鹏菊, 等. 基于开通密勒平台电压的IGBT模块结温估计研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3254-3262.
PENG Yingzhou, ZHOU Luowei, SUN Pengju, et al. Study of IGBT junction temperature estimation based on turn-on Miller platform voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3254-3262.

[5] 张志学, 薛秀生, 阮永丰, 等. SiC晶体测温技术研究[J]. 中国测试, 2017, 43(5): 1-4.
ZHANG Zhixue, XUE Xiusheng, RUAN Yongfeng, et al. Research of temperature measurement technology based on SiC crystal[J]. China measurement & testing technology, 2017, 43(5): 1-4.

[6] 王魁汉. 温度测量实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
WANG Kuihan. Temperature measurement technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.

[7] 刘希真, 周文俊, 尤佳, 等. IGBT 工作结温的状态识别[J]. 天津大学学报, 2002, 35(2): 243-246.
LIU Xizhen, ZHOU Wenjun, YOU Jia, et al. State identification of IGBT junction temperature on line[J]. Journal of Tianjin university, 2002, 35(2): 243-246.

[8] JEDEC. Thermal impedance measurements for insulated gate bipolar transistors: JESD 24-6[S]. Arlington: JEDEC Solid State Technology Association, 2002.

[9] 孙鹏飞, 罗皓泽, 董玉斐, 等. 基于关断延迟时间的大功率IGBT模块结温提取方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3366-3372.
SUN Pengfei, LUO Haoze, DONG Yufei, et al. Junction temperature extraction of high power IGBT module based on turnoff delay time[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3366-3372.

[10] 陈明, 胡安. IGBT结温模拟和探测方法比对研究[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(12): 44-49.
CHEN Ming, HU An. Study on the junction temperature simulation and detection method of IGBT power electronic devices[J]. Electric machines and control, 2011, 15(12): 44-49.

[11] 孙晓刚, 李云红. 红外热像仪测温技术发展综述[J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 101-104.
SUN Xiaogang, LI Yunhong. Review of the development of temperature measurement technology with infrared thermal imager[J]. Laser & infrared, 2008, 38(2): 101-104.

[12] 刘岩, 翟玉卫, 范雅洁, 等. 基于红外测温技术的微波功率器件降温曲线测量系统[J]. 光学仪器, 2016, 38(2): 100-105.
LIU Yan, ZHAI Yuwei, FAN Yajie, et al. Cooling curve measurement system for microwave power devices based on infrared thermal measurement technique[J]. Optical instruments, 2016, 38(2): 100-105.

[13] JEDEC. Integrated circuit thermal measurement method-electrical test method (single semiconductor device): JESD 51-1[S]. Arlington: JEDEC Solid State Technology Association, 1995.

[14] 肖超, 王立新. 基于结构函数的功率MOSFET器件热阻研究[J]. 电子器件, 2012, 35(5): 489-492.
XIAO Chao, WANG Lixin. Research on thermal resistance in the power MOSFET device based on structure function [J]. Chinese journal of electron devices, 2012, 35(5): 489-492.

[15] NATARAJAN S, HA M, GRAHAM S. Measuring the thermal resistance in light emitting diodes using a transient thermal analysis technique[J]. IEEE transactions on electron devices, 2013, 60(8): 2548-2555.

[16] KUO D S, CHOI J Y, GIANDOMENICO D, et al. Modeling the turn-off characteristics of the bipolar-MOS transistor[J]. IEEE electron device letters, 1985, 6(5): 211-214.

[17] USAMENTIAGA R, GARCÍA D F, MOLLEDA J, et al. Temperature measurement using the wedge method: comparison and application to emissivity estimation and compensation[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2011, 60(5): 1768-1778.

收稿日期：2023-08-03
修回日期：2023-08-20