基于V_{th}和V_{ce}的IGBT结温测量方法对比研究

曾晓彤[1],王荣茂[2]
(1.襄阳汽车职业技术学院 汽车工程学院/新能源汽车学院,湖北 襄阳 441021;
2.上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)

摘要:小电流下饱和压降法(V_{ce}法)和阈值电压法(V_{th}法)是IGBT热阻测试标准中推荐使用的两种结温测量方法,然而并没有说明两种方法测得的结温的关系及等效性。首先理论分析了小电流下饱和电压和阈值电压的电压构成,表明V_{ce}法测得的结温反映的是芯片集电极侧的温度信息,V_{th}法测得的结温反映的是芯片发射极侧的温度信息,由于芯片内部存在垂直温度梯度,推断V_{th}法测得的结温将高于V_{ce}法测得的结温;然后根据两种测量方法的测量原理,搭建了IGBT结温测量平台,在不同负载电流下用两种方法测量结温,实验结果验证了理论预测,且两种方法测得的结温的差值随着负载电流增加而增大。最后,提出一种简易热校准模型用于快速计算差值,使得两种方法的结果可以等效变换并进行公平对比。

关键词:IGBT模块;结温测量;小电流下饱和压降法;阈值电压法
中图分类号:TM464 **文献标识码**:A **DOI**:10.19457/j.1001-2095.dqcd22721

Comparison of IGBT Junction Temperature Measurement Methods Based on V_{th} and V_{ce}

ZENG Xiaotong[1],WANG Rongmao[2]
(1. *College of Automotive Engineering/New Energy Automobile College*, *Xiangyang Auto Vocational Technical College*, *Xiangyang* 441021,*Hubei*,*China*; 2. *School of Electronic Information and Electrical Engineering*,*Shanghai Jiaotong University*, *Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: The V_{ce} method and the V_{th} method are two recommended junction temperature measurement methods in the IGBT thermal resistance test standard. However, the relationship and equivalence of the junction temperature measured by the two methods are not explained. Firstly, the voltage composition of V_{ce} and V_{th} was theoretically analyzed, which shows that the junction temperature measured by the V_{ce} method reflects the temperature information on the collector side, and the junction temperature measured by the V_{th} method reflects the temperature information on the emitter side. Due to the vertical temperature gradient inside the chip, it is inferred that the junction temperature measured by the V_{th} method will be higher than that by the V_{ce} method. Then, according to the measurement principles of the two methods, an IGBT junction temperature measurement platform was built, and the junction temperature was measured by two methods under different load currents. The experimental results verify the theoretical prediction, and the junction temperature difference between the two methods increases as the load current increases. Finally, a simple thermal calibration model was proposed to quickly calculate the difference, so that the results of the two methods could be equivalently transformed and fairly compared.

Key words: IGBT module;junction temperature measurement;V_{ce} method; V_{th} method

绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)正广泛应用于各种电力电子系统中,准确测量其热学参数对于评估封装性能和提升可靠性尤为重要[1]。

热阻是IGBT最重要的热学参数之一,根据国际电工委员会(international electrotechnical commission,IEC)标准[2]对测试方法的说明,通过测量IGBT器件的结温T_j,壳温T_c和功率损耗P即可计算得到IGBT的结到壳热阻值:

$$R_{th_jc} = \Delta T/P = (T_j - T_c)/P \quad (1)$$

基金项目:湖北省高等学校省级教学研究项目(2018589);湖北省职教学会2018年重点课题(ZJGA201808)
作者简介:曾晓彤(1967—),女,本科,副教授,Email:zengxt11@163.com

其中，壳温一般是通过在IGBT器件与散热器界面处放置一个热电偶进行测量，功率损耗则通过电流与测得饱和电压相乘计算而得，而结温的准确测量是热阻测量中最关键但又最困难的，因为芯片封装在器件内部不易接触和观察。

IEC标准推荐使用温敏电参数法进行结温测量，并推荐了两种结温测量方法，分别是小电流下饱和压降法（V_{ce}法）和阈值电压法（V_{th}法），两种方法也被广泛应用于各种热阻测试系统中[3-4]。然而标准并没有说明两种方法测得的结温的关系以及等效性，导致难以对测量结果进行有效解读。

本文通过理论分析和实验测量结合的方式，对两种结温测量方法进行对比分析，并讨论不同因素对两者差距的影响，最后，提出一种简易校准热模型，用于计算两种方法测得的结温的偏差，为IGBT结温测量和热阻测量结果的对比提供指导。

1　理论基础

IGBT在小电流下的饱和压降和阈值电压的测量电路分别如图1和图2所示。两者的测量都是测量小电流下的集电极-发射极电压V_{ce}，不同的是，小电流下饱和压降的测量栅极电压为15 V，IGBT工作在饱和区，而阈值电压的测量要求栅极和集电极短接，此时测量的V_{ce}即为V_{ge}。

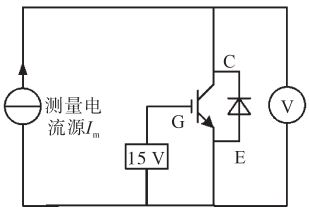


图1　小电流下饱和压降测量电路

Fig.1　Saturation voltage drop measurement circuit under small current

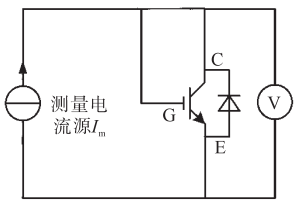


图2　阈值电压测量电路

Fig.2　Threshold voltage measurement circuit

测量小电流下饱和压降和阈值电压时，测量电流在IGBT芯片内部的流通路径如图3所示。

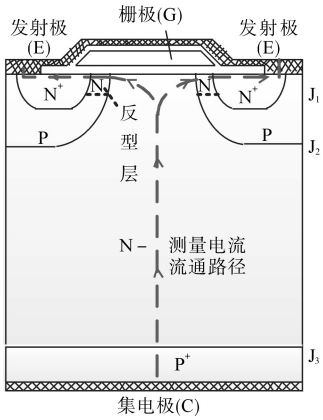


图3　测量电流在IGBT芯片中的流通路径

Fig.3　The flow path of measurement current in the IGBT chip

由图3可以看出，测量电流经过集电极PN结、N型基区和MOS沟道区，由于测量电流较小，N型基区上产生的压降可以忽略不计，因此小电流下的集-射极导通压降可以表示为[5]

$$V_{ce} = V_{PN} + V_{MOS} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I}{I_S}+1\right) + \frac{pL_{CH}I}{\mu_{ni}C_{ox}(V_G - V_{th})} \quad (2)$$

式中：q为电子电荷；k为玻尔兹曼常数；T为热力学温度；I为测量电流；I_S为反向饱和电流；p为元胞节距；L_{CH}为沟道长度；μ_{ni}为反型层内的电子迁移率；C_{OX}为栅氧层电容；V_G为栅极电压，V_{th}为阈值电压。

测量小电流下饱和压降时，IGBT工作在饱和区，阈值电压为15 V，沟道区电阻较小，可以忽略，因此PN结压降占主导作用，此时：

$$V_{ce} \approx V_{PN} = kT\ln(I/I_S + 1)/q \quad (3)$$

测量阈值电压时，栅极电压仅比阈值电压高一点，导致沟道区电阻极高，沟道区导通压降占主导作用，此时：

$$V_{ce} \approx V_{MOS} = \frac{pL_{CH}I}{\mu_{ni}C_{ox}(V_G - V_{th})} \quad (4)$$

从测得的小电流下饱和电压和阈值电压的组成部分不难发现，小电流下饱和压降法测得的结温反映的是集电极侧PN结处的温度信息，而阈值电压法测得的结温则反映的是发射极侧沟道区的温度信息。如果IGBT芯片中的纵向温度分布是均匀的，那么两种方法测得的结温则是相同的，但是在器件实际工作时，芯片中的纵向温度分布并不是均匀的，而是存在温度梯度的，导致两种方法测得的温度可能存在差异。一般而言，由于IGBT器件内部散热路径是从芯片到散热器（从上到下），导致发射极侧温度也会高于集

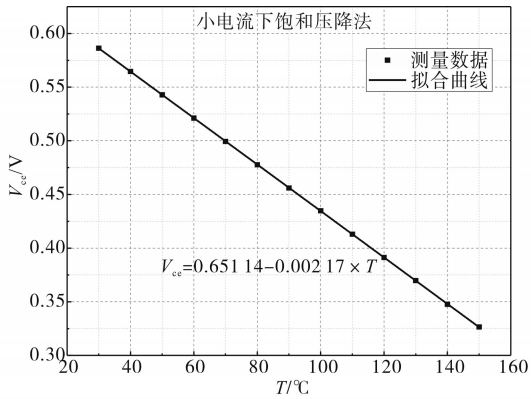
电极侧，因此理论推断阈值电压法测得的结温高于小电流下饱和压降法测得的结温。

2 实验验证

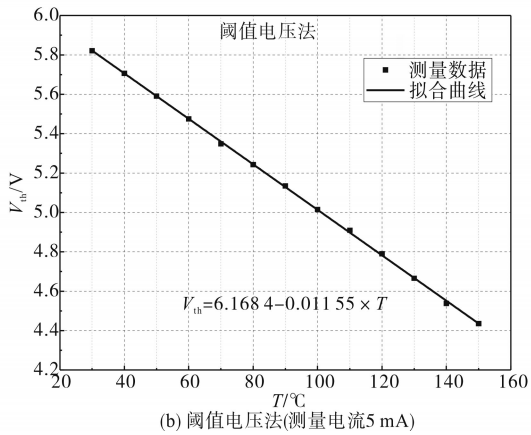
2.1 温度系数校准

应用温敏电参数法进行结温测量之前，必须要经过温度系数校准实验，事先建立温敏电参数与结温的关系，对于本文讨论的两种方法同样如此。校准实验的电路原理图也如图1和图2所示，不同的是待测器件需要放置在恒温箱中，加热至指定温度并保持恒定，等温度稳定之后，可认为器件整体达到热稳定状态，即器件内部各处温度相同，此时测量壳温即可认为是器件的结温。

本文以某1 200 V/100 A IGBT半桥模块作为研究对象，在进行小电流下饱和压降法的温度系数校准时，选择测量电流为100 mA，在进行阈值电压法的温度系数校准时，选择测量电流为5 mA，记录不同温度下的集-射极电压，得到两种结温测量方法的温度系数校准曲线如图4所示。



(a) 小电流下饱和压降法(测量电流100 mA)



(b) 阈值电压法(测量电流5 mA)

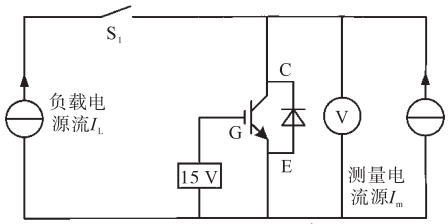
图4　两种测量方法的温度校准曲线

Fig.4　Calibration curves of two junction temperature method

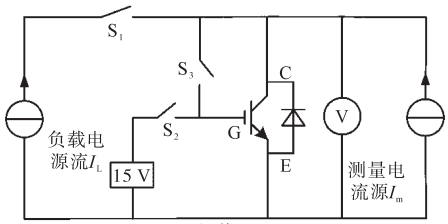
由图4可以看出，两种结温测量方法的温度校准曲线都是线性的，非常便于进行结温计算。对于小电流下饱和压降法，饱和电压随温度变化量约为−2.2 mV/℃，而对于阈值电压法，阈值电压随温度变化量约为−11.5 mV/℃，因此后者具有更高的温度灵敏度，有利于提高测量精度，可以使得因测量误差导致的结温计算误差最小化。

2.2 结温测量设置

根据两种结温测量方法的测量原理，搭建了IGBT结温测量平台，测试电路原理图如图5所示。



(a)小电流下饱和压降法



(b)阈值电压法

图5　两种测量方法的测量平台电路图

Fig.5　Circuit diagram of measurement platform for two measurement methods

对于小电流下饱和压降法，测量原理简单，开关S_1控制负载电流的导通和关断，当S_1导通，负载电流加热待测器件，器件结温升高；当S_1断开，负载电流被切断，器件在水冷散热器(恒定水温30 ℃)的作用下开始被冷却，结温下降。为测得最高结温，理论上当S_1断开之后立即测量IGBT集-射极电压用于计算结温，但是由于芯片内部载流子恢复的过程，需要在延迟时间之后进行测量[6]，本实验中选择延迟时间为500 μs，延迟时间内的结温下降忽略不计。

阈值电压法的实现过程相对复杂，有3个开关用于控制，3个开关的控制时序如图6所示。首先，S_2导通给栅极15 V电压，使得待测IGBT保持开通状态；然后(100 μs后)S_1导通，负载电流开始加热待测器件，器件结温升高；之后S_1断开，负载电流被切断，器件开始冷却，结温下降。为了测量结温，S_3需要导通把栅极与集电极短接，但在这之前(100 μs前)，需要断开S_2将栅极15 V电压

切断。同样，最高结温在负载电流被切断后的500 μs时刻进行测量，与小电流下饱和压降法的延迟时间相同，保证延迟时间对结温测量的影响是相同的。

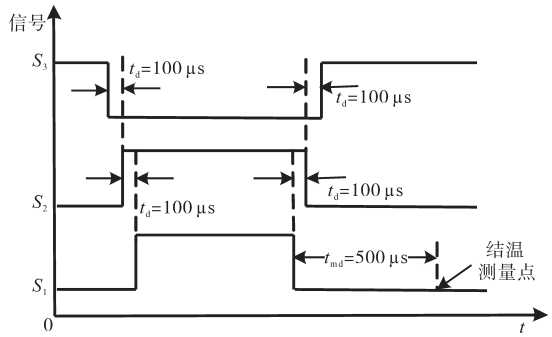


图6　阈值电压法结温测量中开关控制时序

Fig.6　The control timing of junction temperature measurement by V_{th} method

2.3　结温测量结果对比

选择不同的负载电流对IGBT进行加热至稳态，分别采用两种方法测量最高结温，每组试验各进行3次，结果取平均值，消除偶然误差，最终试验结果统计如表1所示。

表1　不同电流下两种方法测得的结温对比

Tab.1　Comparison of junction temperature measured by two methods at different load currents

电流/A	功率/W	V_{ce}法/℃	V_{th}法/℃	差值/℃
50	90.5	53.7	54.4	0.8
60	120.3	65.1	66.2	1.1
70	151.7	82.4	83.9	1.4
80	187.5	104.9	107.1	1.8
90	216.1	123.7	126.5	2.0
100	248.4	148.3	151.9	2.4

从表1中可以看出，阈值电压法测得的结温始终要高于小电流下饱和压降法测得的结温，符合理论预测，并且两种方法测得的结温的差值随着电流增加而增加，其原因在于功率损耗越高，芯片中的温度梯度越大，集电极表面和发射极表面温度差异越大。

3　热校准模型

从上述理论分析和实验研究可知，小电流下饱和压降法和阈值电压法测得的结温并不等效，后者比前者偏大，且加热功率越大，差值越大。究其原因，与两种测量方法测得的结温的物理意义有关，小电流下饱和压降法测得的结温反映的是IGBT器件集电极侧温度信息，而阈值电压法测得的结温反映的是IGBT器件发射极侧温度信息。相同测试条件下，两种标准推荐的方法得到的结温却不同，直接影响最后热阻的测量结果，对于对比器件热性能非常不利。因此，本文提出一种简易热校准模型，来校准两种方法测得的结温的差值。对于功率器件，热量从芯片中产生，经过各层组件从上往下进行扩散，最终通过散热器向环境中耗散，热流的流通路径可以简化为一维集总热阻网络[7]，其中芯片的集总热阻模型如图7所示。

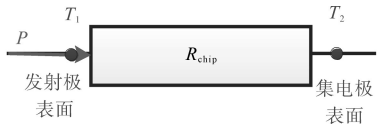


图7　两种方法测得的结温的热校准模型

Fig.7　Thermal calibration model of junction temperature measured by two different methods

芯片热源在发射极表面，T_1为阈值电压法测得的结温，T_2为小电流下饱和压降法测得的结温，两者的偏差ΔT可以表示为

$$\Delta T = T_1 - T_2 = P \cdot R_{chip} = P \cdot \frac{d}{KA} \tag{5}$$

式中：P为加热功率；R_{chip}为芯片热阻；K为热导率，属于材料属性；A为芯片表面积，电流等级越高的芯片表面积越大；d为芯片厚度，电压等级越高的芯片越厚。

A和d都属于几何属性，可以看出对于高压芯片，两种方法测得结果的误差将会更大。因此，对于确定的器件型号和芯片，两种方法测得的结温的偏差与功率成正比，可以通过式(5)进行校准。例如，表1中两种方法测得的结温的差值随加热功率变化曲线如图8所示。

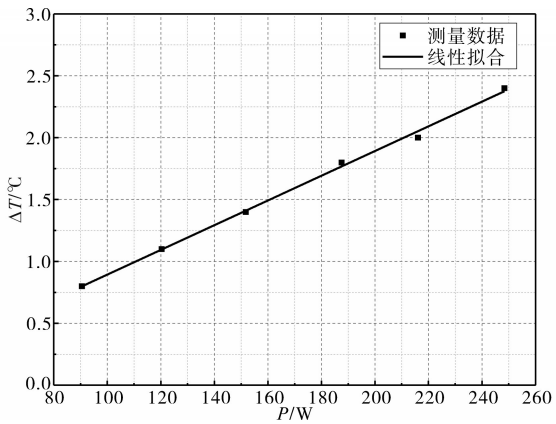


图8　偏差与功率的变化关系(测试数据)

Fig.8　The relationship between deviation and power loss(test data)

由图8可以看出，偏差和功率呈现线性关系，

斜率为0.009 3 ℃/W，即为芯片的热阻值，符合式(5)的预测。个别数据存在微小的偏差，主要是不同功率下结温不同，而芯片热导率与温度有关，导致偏差和功率本质上并不是完美的线性关系，但是对结果的影响并不大，可以忽略。因此，两种方法测得的结温的偏差可以通过式(5)进行校准，以进行公平的对比。

综上所述，从灵敏度、测量难度和测得的结温三个方面，对阈值电压法和小电流下饱和压降法两种结温测量方法的对比总结如表2所示，可以看出，前者的灵敏度更高，但是测量难度高，后者的灵敏度偏低，但是更容易实现，测试人员可以根据需求进行选择。然而需要注意的是，两种测量方法测得的结温的物理意义不同，数值上也存在偏差，不能直接进行对比。

表2　两种测量方法的综合对比

Tab. 2　Comparison of the two measurement methods

	灵敏度/(mV·℃$^{-1}$)	测量难度	测得的结温
V_{th}法	−11.5	高	发射极侧温度(偏高)
V_{ce}法	−2.2	低	集电极侧温度(偏低)

4　结论

本文对IGBT热阻测量标准中推荐的两种温敏电参数结温测量方法进行了对比和分析，结果发现两种方法测得的结温并不相等及等效。理论分析表明，阈值电压法测得的结温更倾向于IGBT发射极侧的温度，而小电流下饱和压降法测得的结温则更倾向于IGBT集电极侧的温度，由于芯片内部存在温度梯度，发射极侧温度一般会高于集电极侧，实验测量结果验证了理论猜想，且两者差值与功率损耗呈线性关系。进一步提出了简易热校准模型用于计算两者的误差，使之可以公平对比。因此，在进行结温测量或热阻测量时，需要注明所采用的结温测量方法，这对测量结果会有直接的影响，对于高压器件尤为如此，对于不同测量方法测得的结果，推荐采用本文提出的校准模型进行校准。

参考文献

[1] 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.

[2] International Electrotechnical Commission. IEC 60747—90—2007. insulated-gate bipolar transistors (IGBTs)[S]. Geneva：International Electrotechnical Commission，2007.

[3] 黄月强，吕长志，谢雪松，等. 一种IGBT热阻的测量方法[J]. 电力电子技术，2010，44(9)：104-105，108.
Huang Yueqiang，Lü Changzhi，Xie Xuesong，*et al*. One measurement method of thermal resistance of IGBT[J]. Power Electronics，2010，44(9)：104-105，108.

[4] Chen M，Hu A，Wang B，*et al*. Test of IGBT junction-case steady state thermal resistance and experimental analysis[C]//2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application，Changsha，China，2010：557-560.

[5] Baliga B J. Fundamentals of power semiconductor devices[M]. Beijing：Publishing House of Electronics Industry，2012.

[6] Herold C，Beier M，Lutz J，*et al*. Improving the accuracy of junction temperature measurement with the square-root method[C]//International Workshop on Thermal Investigations of ICS and Systems，Berlin，Germany，2013：92-94.

[7] Yu Y，Lee T Y，Chiriac V A. Compact thermal resistor-capacitor-network approach to predicting transient junction temperatures of a power amplifier module[J]. IEEE Transactions on Components，Packaging，and Manufacturing Technology，2012，2(7)：1172-1181.

收稿日期：2020-11-24
修改稿日期：2020-12-30