



引用格式: 窦智峰, 翟朝伟, 崔光照, 等. IGBT 现场失效短路结温测量方法研究[J]. 轻工学报, 2017, 32(4): 73-80.

中图分类号: TN34 文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1553.2017.4.011

文章编号: 2096-1553(2017)04-0073-08

IGBT 现场失效短路结温测量方法研究

Research on short-circuit junction temperature measurement method of IGBT field failure

窦智峰, 翟朝伟, 崔光照, 金楠

DOU Zhi-feng, ZHAI Chao-wei, CUI Guang-zhao, JIN Nan

关键词:
短路失效; IGBT 现场失效; 结温; 热积累热电模型

郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002

College of Electric Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

Key words:
short circuit failure;
IGBT field failure;
junction temperature;
heat accumulation
thermoelectric model

摘要: 针对 IGBT 存在的响应速度慢、异质结构导致的热传导系数不均衡等问题, 在对 IGBT 失效机理和现有结温测量模型研究的基础上, 提出一种基于热积累的热电模型, 以实时准确地测量 IGBT 结温. 该方法在能量平衡的基础上, 将 IGBT 温度的测量转换为测量 IGBT 某一点的温度, 很好地避开了 IGBT 异质结构问题. Matlab 仿真和实验结果表明, 二者温度曲线有较好的拟合度, 验证了该方法的可行性.

收稿日期: 2016-06-13; 修回日期: 2016-12-06

作者简介: 窦智峰(1979—), 男, 吉林省松原市人, 郑州轻工业学院讲师, 博士, 主要研究方向为大功率电力电子器件可靠性.

Abstract: To overcome the problems of slow response speed and uneven thermal conductivity caused by the heterogeneity structure which exists in recent junction temperature measurements, a thermoelectric model based on heat accumulation was proposed to accurately measure the IGBT junction temperature in real time, based on the study of IGBT failure mechanism and the existing junction temperature measurement models. The IGBT temperature measurement was converted to measure the temperature of a certain point of the IGBT based on the energy balance to avoid the heterogeneity structure problem of IGBT. Matlab simulation and experimental results showed that the two temperature curves have a good degree of fit, verified the feasibility of the proposed method.

0 引言

受当前功率器件整体工艺水平的限制,电能转换装置或系统的可靠性远低于机电装置的其他部分.提高电能转换装置或系统的可靠性,对提高机电系统稳定性、增加电能转换效率、改善无功分布和电压支撑等显得尤为重要,是关系到整个系统安全、可靠运行的关键^[1-4].

绝缘栅双极型晶体管(IGBT)作为电能转换装置中的基本单元、全关断器件的代表,与其他可关断器件相比,具有可靠性高、驱动简单、保护容易、开关频率较高等优点,被广泛应用于大、中功率的电能转换系统中.由于IGBT本身参数具有离散性,在极短时间内动态非线性的开关过程难以掌控,因此,以IGBT为代表的针对全控型开关器件故障后失效分析的基本理论和方法,成为提高电能转换系统可靠性的研究重点,其成果不但能为大、中功率IGBT的制造提供可靠性失效物理数据和理论依据,也是高可靠性电能转换系统在极限或故障工作模式下依然具有较高的系统运行可靠性的关键^[5-6].

研究表明,IGBT的失效尤其是短路失效对IGBT造成的损坏是毁灭性的、不可逆的,而在此过程中往往伴随着IGBT的温度升高等现象^[7-9].因此短路状态下IGBT瞬态结温实时测量对IGBT的故障诊断具有重要的现实意义.目前IGBT结温的测量方法,如一维热传导模型、等效热网络模型、分析模型和数值模

型^[10-12]等,存在响应速度慢、异质结构导致的热传导系数不均衡、不能在线监测等问题.鉴于此,本文拟提出一种基于热积累的热电模型,以为IGBT瞬态结温测量提供一种行之有效的方法.

1 IGBT失效机理

根据IGBT发生失效历经时间的长短,IGBT的失效分为老化失效和现场失效.

造成IGBT老化失效的主要原因是IGBT模块在导通和关断的过程中受到热冲击的影响,加之不同封装工艺下IGBT各层异质结构的热膨胀系数不同,使得IGBT在受到长时间过应力作用时表现出不同的失效模式^[6].文献[3]指出,温度每波动10℃,失效率将会翻倍.因此,IGBT结温瞬态变化机理直接影响功率器件寿命预测理论的建立.

IGBT的现场失效是指IGBT在经受瞬间的过应力冲击之后所引起的失效.IGBT的现场失效又可分为开路失效和短路失效.

造成IGBT开路失效的原因,一是由于机械原因或者过电流造成的键合线脱落或断裂,二是由于门极驱动电路的缺失.造成键合线脱落或断裂,通常是由高温梯度下硅和铝的热膨胀系数不同造成的;门极驱动电路缺失通常是由IGBT故障或者门电路模块与IGBT芯片之间开路造成的,此种情况往往会造成IGBT间歇性不点火、输出电压变小,增大其他IGBT和电容的负担等.无论哪种原因造成的开路失效,

从系统可靠性的角度来分析,由于其失效模式最终表现为开路,而开路失效对系统本身的安全运行并不是致命的^[7].

造成短路失效的原因主要包括过电压、门锁效应、二次击穿和过能量冲击.过电压故障引起的短路包括两种:关断过电压和导通过电压,这两种情况都会引起 I_c 快速增长,导致芯片边缘温度过高而烧毁.门锁效应指集电极电流不再受门极电压控制的状态,包括静态和动态两种:静态门锁效应是由过电流 I_c 造成的,动态门锁效应是由过电压变化率 dv/dt 导致的,这两种情况会导致因设备芯片有源区过热而烧毁.二次击穿是由于过电流产生局部过热而造成发射区大部分被烧毁.能量冲击分为 $E < E_c$ 和 $E > E_c$ 两种情况,其中 E_c 是引发短路的临界能量值.文献[7]指出,当 $E < E_c$ 时,IGBT 在经受 10^4 次短路循环冲击之后,由于局部温度过高而导致键合线断裂而失效(老化失效).反之,当 $E > E_c$ 时,如果 E 远大于 E_c ,IGBT 会在经历一次短路后,由于热失控而导致芯片局部温度过高,使发射区大部分被烧毁;如果 E 略大于 E_c ,通常会在短路切断后几 ms 之后误导通.综上所述,IGBT 在各种短路失效模式下都伴随着很高的 di/dt 和瞬间高温的现象,这种致命的失效模式对 IGBT 的损坏是不可逆转的^[7-9].

总结 IGBT 各种短路失效模式可知,虽然导致 IGBT 失效的原因不同,但 IGBT 的最终损坏几乎都是因元件温度升高引起的:当温度达到最高允许结温,就会发生局部电流密度过大,并导致硅片上出现微小裂痕,最终造成器件损坏、系统瘫痪.因此能否准确、实时地测量 IGBT 在短路失效时的温度瞬态变化规律,对实时检测 IGBT 是否失效具有关键性意义.

2 IGBT 结温测量模型分析

基于 IGBT 实际工作时的瞬态短路失效机

理相对复杂,温度瞬间变化较大,导热系数不均衡,文献[10-12]提出了3种基于有限元的 IGBT 温度测量模型,即一维热传导模型、等效热网络模型、分析模型和数值模型.

2.1 一维热传导模型

对于 IGBT 垂直导电结构而言,其芯片的厚度远小于 DBC 和焊锡层的厚度,可以近似认为器件只在表面发热,且在沿 x 轴(垂直于硅片表面)的平面上均匀分布,即热源只有1个.不妨假设芯片顶部平面坐标为 $x = 0$,此处热功耗 $P_{in}(t)$ 是均匀分布的,芯片底部平面坐标为 $x = L_0$,此处为冷却边界,对应温度为 T_{in} ,如果不考虑对流和辐射,则一维热传导方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(T) \frac{\partial T}{\partial x}(t, x) \right] = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}(t, x)$$

在芯片温度不高的情况下,该方法获得的芯片温度能够满足精度需要;但是在短路状态下,芯片的温度往往瞬间变化较大,该方法获得的温度值与实情往往有一些误差.另外,此方法响应速度较慢,没有综合考虑 Al 键合线在温度瞬变时对边界条件的影响,很难满足工况下 IGBT 瞬态短路结温预测的需要.

2.2 等效热网络模型

将一维热传导方程离散化可得基于有限元的离散化一维热网络模型,如图1所示.

两个节点之间的相关参数可以用 RC 网络代替,由于系统响应至少需要两个主要节点,所以等效热回路至少是二阶的;但是此二阶回路

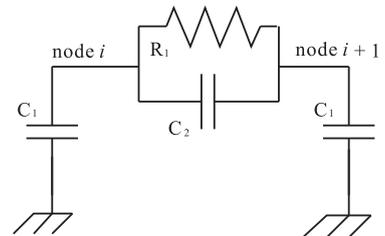


图1 一维热网络模型

Fig. 1 One-dimensional thermal network model

仅能够给出沟道温度演变的初步近似值,因此一般采用三阶以上的回路芯片瞬态响应的变化规律(阶数越大, R_{th} 越趋向于沟道和漏极间的等效电阻 R_{th}). 然而,此模型并不适用于预测瞬态短路条件下的温度,因为 IGBT 的功耗主要集中在沟道端部,即功耗分布不均衡,而此模型成立的前提是功耗分布均匀,因此用此模型测得 IGBT 峰值温度往往误差较大.

为了能够更真实地反映 IGBT 的内部情况,文献[12]提出了如图2所示的二维热网络模型.

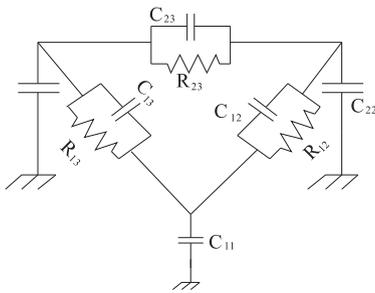


图2 二维热网络模型

Fig. 2 Two-dimensional thermal network model

二维热网络模型比一维热网络模型更能够反映 IGBT 内部实际情况,但是它们都属于等效热模型的范畴,此类模型通常没有考虑导热系数的非线性,对短路状态下 IGBT 的测量温度误差较大,且响应速度较慢,很难满足短路状态下结温测量的要求.

2.3 分析模型和数值模型

为了评估功率元器件的温度分布,进一步探究其失效机理,文献[10-11]在热网络模型的基础上提出了热电耦合模型,以得到 IGBT 器件在短路状态下的结温分布. 然而此模型也是一种理想化模型,虽然综合考虑了三维温度场在芯片内部的分布情况,但忽略了垂直导电结构的 IGBT 各层异质结构导热系数不均衡的问题. 为了提高模型的准确性,文献[12]提出了分析模型和数值模型.

通过数值模型完成所有温度参数的识别通

常需要数百个周期(约 8000 min),因此,使用这个模型进行仿真时需要进行人为设定. 此模型测得的结温与实验测得的数据有很高的契合度,因此,通常将其作为基准参考分析模型. 通过分析模型和数值模型获得的数据在温度 < 600 K 时,与实验所得数据吻合,但是当温度 > 600 K 时,由于一些参数出现非线性的变化,不能够准确测得器件的结温.

由对以上 3 种 IGBT 结温测量模型的分析可知,它们对 IGBT 结温的测量主要针对的是稳态温升(在瞬态温升中,器件各部分之间因热传导和热交换时间极短而来不及传导,因此被忽略),而对于 μs 级的温度变化测量极为困难,且未能很好地解决 IGBT 的异质结构和非线性传导系数的问题^[13].

3 基于热积累的热电模型的建立

为了解决这些问题,本文提出一种基于热积累的热电模型,IGBT 封装结构如图3所示,当给 IGBT 通入静态电流时,IGBT 键合线的温度分布如图4所示. 从图4可以发现,当 IGBT 通入电流时,键合线键合处温度最高,最容易烧毁^[14-15]. 因此,研究 IGBT 现场短路瞬态结温即是研究键合线键合处温度瞬态变化. 图5为金属导体单元体积热分析示意图.

体积为 dv 的金属导体温度上升 $d\theta$ 所需要

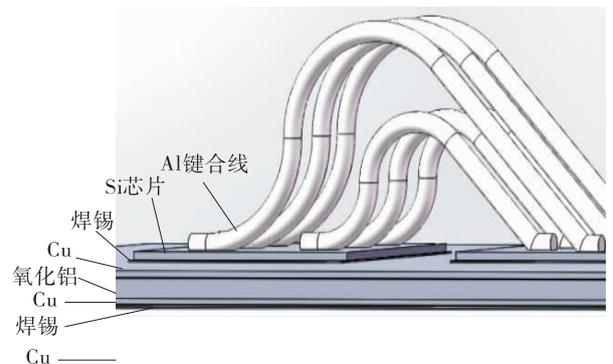


图3 IGBT 封装结构图

Fig. 3 Encapsulation of IGBT

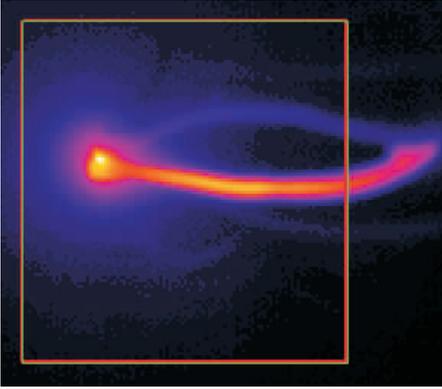


图4 键合线温度分布图

Fig.4 Temperature distribution of bonding wire

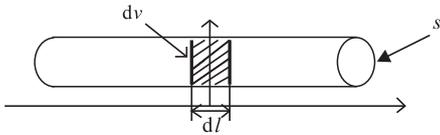


图5 金属导体单元体积元热分析示意图

Fig.5 Thermal analysis diagram of metal conductor

的热量为

$$Q_1 = C\delta dv d\theta \quad (1)$$

体积为 dv 的金属导体在 dt 时间内辐射周围空间的热量为

$$Q_2 = KA(\theta - \theta_a) dv dt$$

体积为 dv 的金属材料在 dt 时间内传送到临界的热量为

$$Q_3 = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dv dt$$

大小为 i 的电流通过体积为 dv 的金属材料在 dt 时间内产生的热量为

$$Q_R = R_\theta i^2 dt \quad (2)$$

由能量守恒定律得

$$Q_R = Q_1 + Q_2 - Q_3$$

考虑到瞬态温升时测量周期比较短,散热和热传导可以忽略不计,因此,上式可简化为

$$Q_R = Q_1 \quad (3)$$

金属导体在温度 θ 时的电阻为

$$R_\theta = \rho_0(1 + \alpha\theta) \frac{dl}{S} \quad (4)$$

将式①②④代入式③可得

$$\ln = \left(\frac{1 + \alpha\theta_m}{1 + \alpha\theta_a} \right) = \frac{\alpha\rho_0}{C\delta S^2} \int_0^{t_m} i^2 dt \quad (5)$$

令 $k_1 = \frac{\alpha\rho_0}{C\delta S^2}, k_2 = \theta_a + \frac{1}{\alpha}, k_3 = \frac{1}{\alpha}$, 代入⑤

式得

$$\theta_m = k_2 \exp(k_1 \int_0^{t_m} i^2 dt) - k_3$$

其中, C 为金属导体比热容, δ 为金属导体的密度, α 为温度系数, θ_a 为环境温度, θ_m 为 $t = t_m$ 时导体温度, S 为电流通过导体的横截面积.

由图3可知, IGBT 由6根键合线构成, 则 $S = 6 \times S_{结}$.

因此 IGBT 的热积累模型为

$$\theta_m = k_2 \exp(k_1 \int_0^{t_m} i^2 dt) - k_3 \quad (6)$$

其中, $k_1 = \frac{\alpha\rho_0}{N^2 C\delta S_{结}^2}, k_2 = \theta_a + \frac{1}{\alpha}, k_3 = \frac{1}{\alpha}$.

4 仿真与验证

为了验证热积累热电模型作为测量 IGBT 瞬态短路失效结温测量的有效性, 本文首先从仿真角度分别测量了 IGBT 键合线与芯片结合处短路时在不同环境温度下的温度变化情况, 然后通过快速热电偶试验测得短路状态下键合线与芯片结合处的温度变化情况.

4.1 仿真

由热积累模型分析可知, 当电流流过键合线时, 键合线与芯片结合处的导体在弧前周期满足公式⑥的关系. 图6为基于热积累的 IGBT 结温测量原理图, 其中电源 $E = 250 \text{ V}$, 缓冲电阻 $R_1 = 1000 \text{ }\Omega$, IGBT 的参数设置: 电感 $L = 30 \text{ nH}$, 电阻 $R = 2.2 \text{ m}\Omega$. 开关 S_1, S_2 是通过一个触发信号控制的, 不同的是在控制 S_2 的触发信号前加入了一个延迟时间, 这样做的目的是使充电完成后充电电路断开, 同时放电电路

开启.

本研究所用 IGBT 键合线的材质为铝质, 相关参数如下所示: $C = 897 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, $\sigma = 2700 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\alpha = 0.004$, $\rho = 2.65 \times 10^{-10} \text{ } \Omega/\text{m}$, 可得 k_1, k_2, k_3 .

根据图 6, 应用 Matlab 建立的 IGBT 的结温测量仿真模型见图 7. 先给电容 C 充电, 此时保持 S_1 导通、 S_2 断开, 充电 3 s 后, 断开 S_1 , 同时打开 S_2 , 10 s 后关闭 S_2 , 在实验室将流过 IGBT 的电流数据经电流表检测后, 传输给 id 模块, 通过计算最终得到结温 T , 环境温度分别为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时测得的仿真数据见图 8.

由图 8 可知, 在环境温度分别为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, IGBT 键合线与芯片结合处温度随时间变化而增加, 另外三者曲线近似平行, 符

合实验预期.

4.2 实验验证

按图 6 搭建实验平台: IGBT 采用 Infineon 公司生产的型号为 F4-50R12KS4 的 $1200 \text{ V}/50 \text{ A}$ IGBT, 在 IGBT 导通时, 电感 $L = 30 \text{ nH}$, 电阻 $R = 2.2 \text{ m}\Omega$; 电容选用 AXV 公司生产的 $2200 \text{ }\mu\text{F}/1000 \text{ V}$ 的大功率电容; 另外, 本文选用的温度测量器件为由美国 Nanmac 公司生产的型号为 E-12 的快速响应热电偶, 其探头为铜质. 环境温度分别为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 实验结果和仿真结果对比见图 9—11.

由图 9—11 可知, 通过热积累热电模型测得的仿真数据与通过在线试验测得的数据基本吻合. 因此热积累电热模型能够作为 IGBT 现场失效短路结温测量的一种方法.

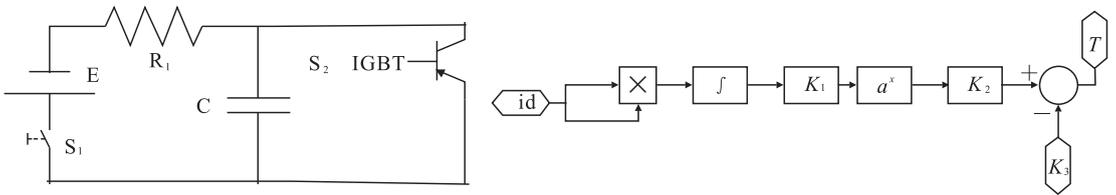


图 6 结温测量原理图

Fig. 6 Measure principle of junction temperature

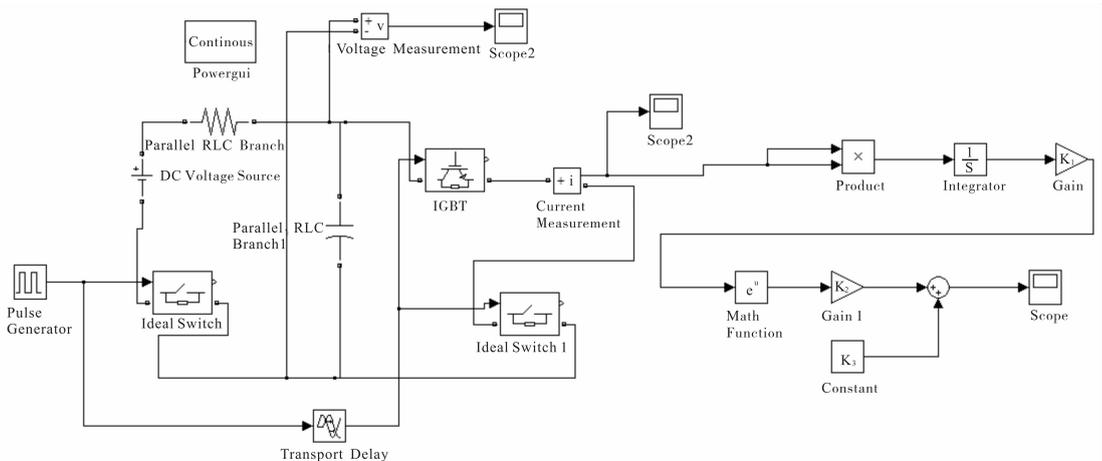


图 7 IGBT 的结温测量仿真模型

Fig. 7 Simulation model of IGBT junction temperature measurement

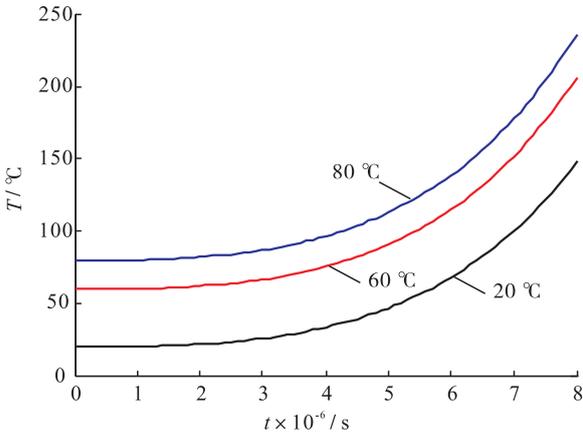


图 8 温度随时间变化仿真图

Fig. 8 Simulation of temperature over time

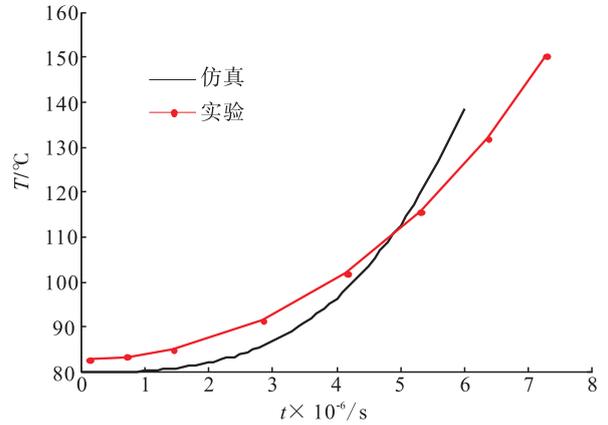


图 11 80 °C 时温度随时间变化图

Fig. 11 Temperature over time at 80 °C

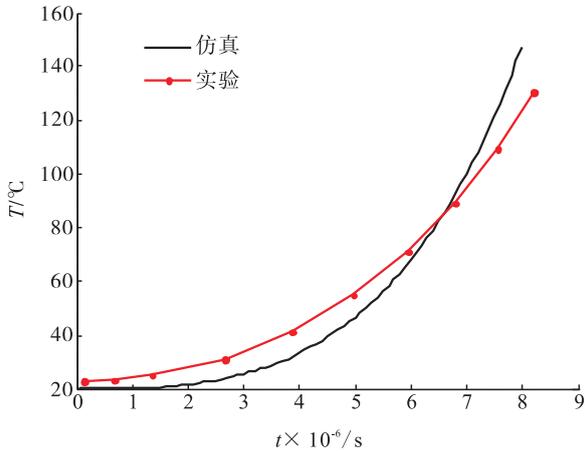


图 9 20 °C 时温度随时间变化图

Fig. 9 Temperature over time at 20 °C

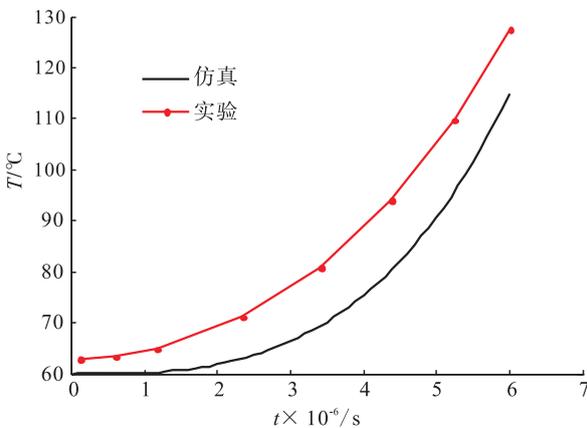


图 10 60 °C 时温度随时间变化图

Fig. 10 Temperature over time at 60 °C

5 结语

鉴于目前 IGBT 结温测量主要停留在稳态层面,而 IGBT 现场短路失效由于其温度瞬态变化大,给 IGBT 结温测量带来了一定的难度,其方法不能有效地解决 IGBT 异质结构问题和热传导系数不均衡问题.本文提出了一种基于热积累的热电模型以实时准确地测量 IGBT 结温,该方法将 IGBT 温度的测量转换为测量 IGBT 某一点的温度,能够准确地测量 IGBT 在现场短路失效过程中 IGBT 温度瞬态变化的过程,也很好地避开了 IGBT 异质结构问题. Matlab 仿真和实验结果表明,二者温度曲线有较好的拟合度,验证了热积累热电模型作为测量 IGBT 瞬态结温方法的可行性.另外,由于此方法对结温测量为 μs 级别,热传导可以忽略,从而提高了测量的准确性.

参考文献:

- [1] PECHT M G, KAPUR K C, 康锐, 等. 可靠性工程基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [2] YANG S, BRYANT A, MAWBY P, et al. An industry-based survey of reliability in power electronicconverters [J]. IEEE Transactions on

- Industry Applications, 2011, 47(3): 1441.
- [3] SONG Y T, WANG B S. Survey on reliability of power electronic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 591.
- [4] 徐帅, 杨欢, 王田刚, 等. 电力电子变换器可靠性研究[J]. 北京交通大学学报(自然科学版), 2015, 39(5): 125.
- [5] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [6] LUTZ J, SCHLANGENOTTO H, SCHEUERMANN U, 等. 功率半导体器件——原理、特性和可靠性[M]. 卞抗, 杨莺, 刘静, 译. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [7] WU R, BLAABJERG F, WANG H, et al. Catastrophic failure and fault-tolerant design of IGBT power electronic converters—An overview [C] // IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE Conference Publications, 2013: 507.
- [8] LEFEBVRE S, KHATIR Z, SAINT-EVE F, et al. Experimental behavior of single-chip IGBT and COOLMOS devices under repetitive short-circuit conditions[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(2): 276.
- [9] BENMANSOUR A, AZZOPARDI S, MARTIN J C, et al. Failure mechanisms of trench IGBT under various short-circuit conditions [C] // 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Piscataway: IEEE Conference Publications, 2007: 1923.
- [10] AMMOUS A, AMMOUS K, MOREL H, et al. Electrothermal modeling of IGBTs: application to short-circuit conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(4): 778.
- [11] WANG Z Q, SHI X J, TOLBERT L M, et al. Temperature-dependent short-circuit capability of silicon carbide power MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1555.
- [12] BREGLIO G, IRACE A, NAPOL E, et al. Experimental detection and numerical validation of different failure mechanisms in IGBTs during unclamped inductive switching[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(2): 563.
- [13] 李森. 大功率变流器中快速熔断器的设计分析与选型[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [14] 陈明, 胡安, 唐勇, 等. IGBT结温及温度场分布探测研究[J]. 电力电子技术, 2011(7): 130.
- [15] TSENG H K, WU M L. Electro-thermal-mechanical modeling of wire bonding failures in IGBT [C] // 2013 8th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). Piscataway: IEEE Conference Publications, 2013: 152.