

IGBT 键合线脱落故障特征分析

孔梅娟, 李志刚, 赵旺旺

(省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130)

摘要: IGBT 功率模块的可靠性是现今关注的重点, 键合线脱落故障是导致其失效的主要原因。故障的发生会致使模块相关的特征参量发生变化, 如通断过程中, 模块的栅极电压米勒平台和栅极阈值电压。通过实验模拟了不同程度的键合线脱落故障, 并分析了随着键合线故障程度的加深, 栅极电压米勒平台和阈值电压的变化情况, 为 IGBT 的状态监测技术提供了可靠的参考。
关键词: 键合线故障; 可靠性; 米勒平台; 栅极阈值电压; 状态监测
DOI: 10.12067/ATEEE1708055 **文章编号:** 1003-3076(2018)10-0083-06 **中图分类号:** TN32

1 引言

绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 是现今应用极其广泛的大功率开关器件, 其可靠性的研究对于保证电力电子装置及其所在系统的安全可靠运行起着至关重要的作用。国内外相关学者从不同角度开展了大量有关 IGBT 模块可靠性的研究, 包括利用高速红外热像仪观测其失效过程、通过监测不同的外部可测信号对模块的失效状况进行分析、利用模块的表面温升评估模块的可靠性等^[1-6]。

根据相关学者的研究可知, 键合线脱落故障是影响 IGBT 模块可靠性运行的主要因素。键合线发生脱落故障时, 会影响 IGBT 模块的通断过程、内部杂散参数和相应的状态特征参量, 针对这些方面, 也有相关学者进行了分析研究^[7-17], 并取得了一定的成果。文献[18]指出 IGBT 模块键合线脱落故障会导致模块的栅极电容变化, 从而影响模块的开通关断时间。对于 IGBT 通断过程的研究, 建立准确可靠的模型和保证数据的精度是研究的关键。文献[19]指出由于 IGBT 栅极电压开关特性不会受到负载变化的影响, 相对独立稳定, 使得通过监测模块的栅极电压来实现 IGBT 的键合线故障识别具有了较高的可行性, 而栅极关断电压下降趋势的改变能够反映出键合线故障情况。IGBT 开通与关断过程中

的电压波形变化虽然较栅极等效电容的变化容易测取, 但是, 数据的精度问题是该方向研究的主要制约因素。文献[20]基于小波分析和信息熵相结合的方法, 研究了键合线故障与模块门极杂散阻抗的关系, 通过分析键合线故障时栅极电压信号能量熵的变化, 可以对故障情况进行监测。但只是定性地对栅极电压信号的变化进行了研究, 并没有明确发生故障栅极电压能量熵的阈值。键合线脱落模块的导通阻抗将会大于正常模块的导通阻抗, 文献[21]基于传感器测量的方法, 通过在芯片的发射极引出一个端子并接入外接电阻等辅助测量电路来对 IGBT 的键合线脱落故障进行监测, 这样由 IGBT 键合线脱落导致其电阻值的变化将通过并接的电阻反映到辅助测量电路中, 从而可对其键合线故障情况进行分析。但该方法需要引入外接电路, 不仅会增加设备体积、费用, 也改变了模块的工作电路, 给模块的正常运行带来了额外的影响。

基于上述分析可知, 由于 IGBT 模块栅极信号基本上不受负载变化的影响, 测取栅极信号也不会破坏模块的封装结构和内部电路结构, 而现今先进的测量技术和仪器也可以保障信号获取的精度, 因此选取了模块开通时栅极电压信号 V_{ge} 和模块栅极阈值电压 $V_{GE(th)}$ 来分析模块发生键合线故障时的特征变化。通过实验分析, 研究了随着键合线脱落程度的不同, 两个特征参量的变化情况; 通过数据分析, 给出了判断

收稿日期: 2017-08-17
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAA09B01)、国家自然科学基金项目(51377044)
作者简介: 孔梅娟(1992-), 女, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为电器可靠性及检测技术;
李志刚(1958-), 男, 河北籍, 副教授, 博士, 研究方向为电器可靠性及检测技术。

模块是否发生失效的参数门限值。为 IGBT 模块的可靠性评估提供了重要的参考依据。

2 IGBT 模块栅极信号分析

对于 IGBT 模块键合线故障情况的分析,选取栅极信号中的 V_{ge} 和 $V_{GE(th)}$ 两个特征参量进行分析。

2.1 通断过程中 V_{ge} 波形分析

IGBT 开通关断过程只受栅射极电压 V_{ge} 控制,由于栅极和发射极之间存在极间电容 C_{ge} ,因此,IGBT 开通与关断主要是对极间电容 C_{ge} 进行充放电。

IGBT 模块通常都是几个芯片并联结构,当其中一个芯片发生键合线脱落故障而停止工作时,IGBT 模块的栅射极之间的极间电容 C_{ge} 将会发生相应的变化,由上述可知,IGBT 的开通关断过程与栅射极的极间电容密切相关,因此键合线脱落将会影响模块的通断过程。

IGBT 模块内部极间电容分布如图 1 所示。由图 1 可知,单个 IGBT 芯片的栅射极寄生电容为:

$$C_{ge} = \frac{C_{oxs} C_s}{C_{oxs} + C_s} + \frac{C_{oxc} C_c}{C_{oxc} + C_c} \tag{1}$$

式中

$$C_{oxs} = \varepsilon_0 \varepsilon_{ox} \frac{A_{ges}}{t_{oxge}}, C_{oxc} = \varepsilon_0 \varepsilon_{ox} \frac{A_{gec}}{t_{oxge}}$$

其中, C_{oxs} 为栅射极金属氧化物电容; C_{oxc} 为栅极-集电极金属氧化物电容; ε_0 、 ε_{ox} 分别为真空介电常数和氧化层介电常数; A_{ges} 和 A_{gec} 分别为栅极多晶硅与芯片内部的 P 阱区域和 N+ 区域的交叠面积; t_{oxge} 为氧化层的厚度。

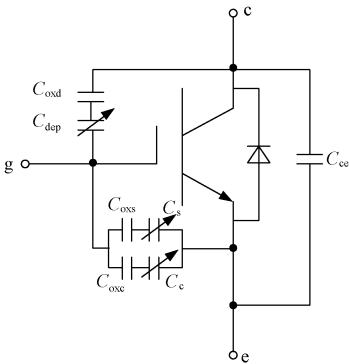


图 1 IGBT 内部电容分布

Fig. 1 IGBT internal capacitance distribution

由式(1)可知,若 C_{ge} 的值会因 A_{ges} 和 A_{gec} 的面积值变小而减小,而这两者面积的减小是因为在相同的直接覆铜基片(DCB)上 IGBT 芯片的两个发射极

电极都是内部互连的,因此,当键合线脱落失效时, A_{ges} 和 A_{gec} 的面积将会减小。

在 IGBT 模块驱动条件不变的情况下,键合线发生脱落故障, C_{ge} 减小。相应地在模块开通时,电容充电时间变短,因此,故障模块的电压上升时间较正常模块上升时间将变短。而在关断过程中,故障模块电压下降速度增快,时间缩短。因此,可以得出,键合线脱落故障对 IGBT 模块开通关断过程的影响是缩短其开关时间。

由于 IGBT 模块栅极-集电极之间的米勒电容 C_{gc} 的影响,IGBT 通断时,栅极电压将会出现一个平台期,这一现象被称作米勒效应。关断过程栅极电压如图 2 所示。由图 2 可以清楚地看到,在栅极电压下降阶段,出现了明显的米勒平台期。该阶段,电压 V_{ge} 维持在固定值,不发生改变。米勒平台的持续时间和电压值均与米勒电容 C_{gc} 有着直接的联系, C_{gc} 的计算公式为:

$$C_{gc} = \frac{C_{oxd} C_{dep}}{C_{oxd} + C_{dep}} = \frac{C_{ox} A a_i C_{dep}}{C_{ox} A a_i + C_{dep}} \tag{2}$$

式中, C_{oxd} 为栅极-集电极交叠氧化电容; C_{ox} 为单位面积氧化物电容; a_i 为 IGBT 芯片内胞与整个焊盘面积的比例; $A a_i$ 为在一个 IGBT 芯片焊盘内的内胞面积; C_{dep} 为耗尽层电容。

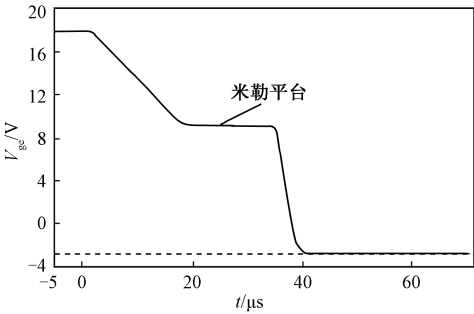


图 2 关断过程栅极电压

Fig. 2 Gate voltage during turn-off

由式(2)可知,如果 IGBT 模块发生键合线脱落故障,芯片栅极下方将不会形成导电沟道,此时, $C_{dep} = 0$;而由于键合线脱落故障可能导致栅极和发射极间发生开路,使得 $C_{oxd} = 0$ 。因此,IGBT 极间电容 C_{gc} 将会随着键合线脱落程度的加深而逐渐减小,故障模块的栅极驱动电压米勒平台持续时间将缩短。

2.2 栅极阈值电压 $V_{GE(th)}$

IGBT 作为压控器件,通过在栅极施加高于额定阈值电压的正偏电压来进行器件开通,但该阈值电

压会随着器件失效的过程而发生变化。有研究指出,若 IGBT 发生性能退化,将影响器件内部结构中的栅极氧化层,而该氧化层的改变会导致栅极电容参数也发生改变,这就导致 IGBT 在失效前后的栅极阈值电压与失效程度呈现出一定的相关性,因此可以利用 IGBT 模块的栅极阈值电压反应 IGBT 的运行状态的变化。

功率器件的失效故障将会导致器件栅极阈值电压高于新器件,即 $V_{GE(th)}$ 会随着失效进程而增大,器件在原有的驱动条件下会变得较难开通,如果阈值电压持续增大,将致使原有的驱动系统无法达到模块现阶段开通的要求,导致其无法使用,造成计划之外的系统停机故障。

3 可靠性实验

3.1 实验原理和实验电路

由于一般市场上出售的模块都是封装完好的模块,不利于对实验现象的观察分析,因此实验中将模块进行激光开封,以便于进行键合线脱落故障模拟实验的操作和对现象进行观察。实验采用型号为 GD50HFL120C1S、功率等级为 1200V/50A 的模块,其结构如图 3 所示。

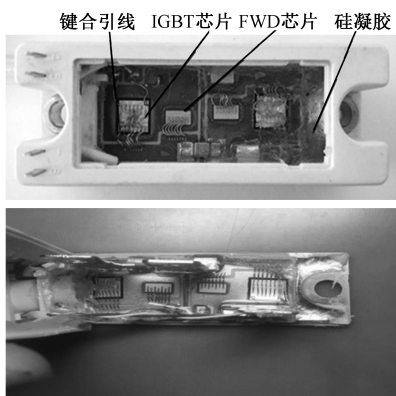
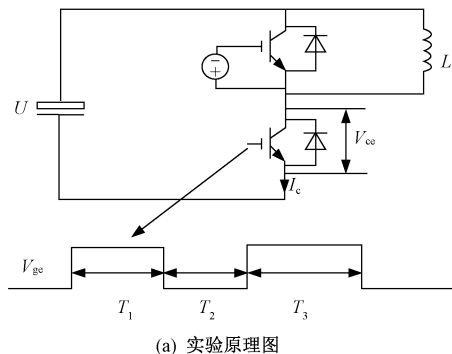


图 3 IGBT 模块开封装图

Fig. 3 Opening package of IGBT module

由于该型号的 IGBT 模块由构成一个桥臂的两个 IGBT 芯片和反并联二极管组成,芯片表面有 7 根键合线连接到上铜层,与外部端子进行连接。测试时,只用一个 IGBT 芯片,因此只对其中的一个 IGBT 芯片施加驱动信号,另一 IGBT 芯片不工作。实验采用双脉冲法对模块进行参数测定,实验原理图和实验平台如图 4 所示。上管 IGBT 的栅极上加了负压,因此它是关断的,只有续流二极管起作用。下管 IGBT 和上管的二极管是被测对象,利用高压

隔离探头测量 V_{ce} 电压,用罗氏线圈电流探头测量 I_c ,用美国 IGBT 功率器件动态参数测试仪 ITC57240 测量 V_{ge} 信号,利用静态参数测试仪测量 $V_{GE(th)}$ 。



(a) 实验原理图



(b) 实验测试平台

图 4 IGBT 键合线故障实验系统

Fig. 4 IGBT bonding wire failure test system

实验操作平台中,在①处设置脉冲参数,包括设置触发方式、开关频率等;②为实验用的 IGBT 模块,为了方便连接,需要将模块去封装,打开上盖,用夹具和引线端子进行连接;③为用于采集栅极电压信号波形和数据的示波器。

3.2 实验结果

通过实验,获取了模块的开通关断过程波形,如图 5 所示。将其进行分析对比,可以看出,正常模块与键合线故障模块在开通时 V_{ge} 上升时间不同,键合线故障模块的 V_{ge} 上升时间要小于正常模块,这与第 2 节理论分析的结果相一致。由于开通关断时间是 ns 级别的,因此图 5 中即使很小的差距,其所反映的 IGBT 模块开通关断时间的变化却是较大的。因此,IGBT 模块的通断过程中电压 V_{ge} 的变化情况可以作为判断其是否发生键合线故障的重要参考。

图 5 是对 IGBT 通断过程电压 V_{ge} 变化情况整体的描述,可以看出, V_{ge} 在开通和关断过程中存在着一个明显的平台期,在实验过程中,采用精度更高的测试仪器对其进行了波形捕捉,结果如图 6 所示。可以看出,栅极电压的米勒平台随着键合

线故障的发生,其持续时间缩短,与第 2 节理论分析一致。因此,栅极电压米勒平台的持续时间也可作为判断键合线故障是否发生的重要参数。

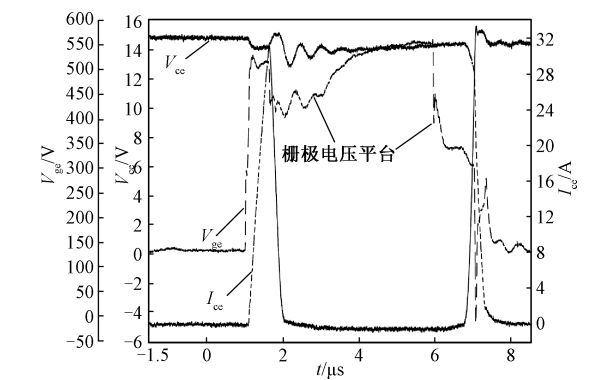


图 5 IGBT 模块开关状态波形对比

Fig. 5 IGBT module switch state waveforms comparison

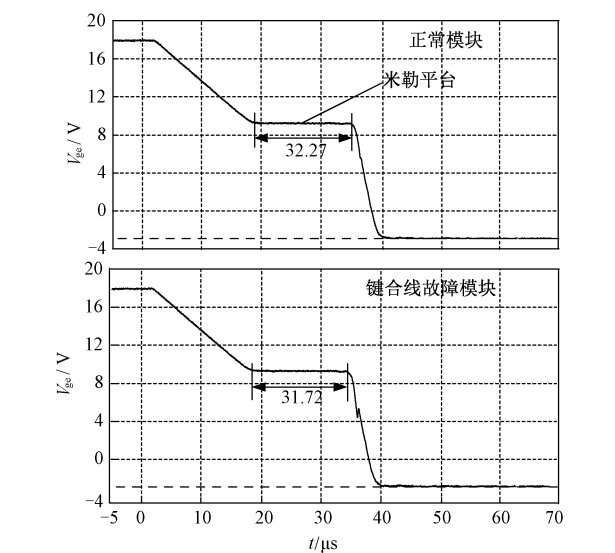


图 6 关断时栅极电压波形图

Fig. 6 Gate voltage waveform at shutdown

栅极阈值电压作为 IGBT 模块的静态参数,可以直接通过测试电路得到其数值。通过模拟键合线脱落故障实验,测量随着键合线脱落故障程度的加深 IGBT 模块栅极阈值电压的数值,结果如表 1 所示。其中 N 表示键合线脱落根数。

表 1 IGBT 栅极阈值电压与键合线脱落根数关系
Tab. 1 Relation of IGBT gate threshold voltage and number of bonding wire lift off

N	0	1	2	3	4	5	6
$V_{GE(th)}/V$	6.212	6.213	6.213	6.215	6.217	6.220	6.224

根据表 1 绘制能够直观反映栅极阈值电压增长

趋势的折线图,如图 7 所示。根据实际工作情况,键合线脱落程度较轻时,仍可工作一段时间,而当其脱落程度较深时,说明模块已经发生了明显的故障情况,必须马上进行更换 IGBT 模块等操作。

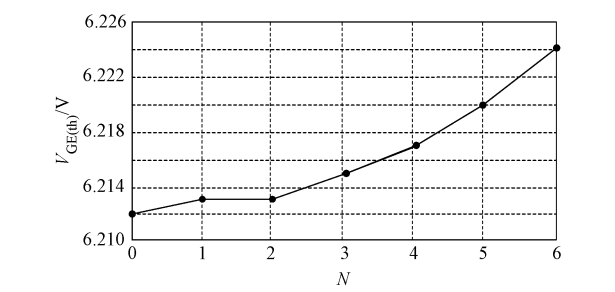


图 7 栅极阈值电压增长趋势折线图
Fig. 7 Gate threshold voltage growth trend

由图 7 可以看出,当键合线脱生根数较少,即 IGBT 模块没有发生明显的键合线脱落故障时,栅极阈值电压的变化幅度较小;随着键合线脱落程度加深,栅极阈值电压的值开始明显增大,对应模块的实际情况就是 IGBT 模块的开通越来越困难。按照图 7 计算可得,当模块键合线脱落百分比在 40% 左右时,栅极阈值电压呈现出明显的变化,因此,可以实时监控 IGBT 模块栅极阈值电压的变化作为 IGBT 模块键合线故障情况的状态监测方法。

4 结论

通过理论和实验相结合的方法,对 IGBT 模块发生键合线脱落故障时,其状态特征参量的变化情况进行了研究。通过开展 IGBT 键合线脱落故障模拟实验,测取了栅极电压信号,通过对比正常情况下与故障发生时 IGBT 模块栅极电压 V_{ge} 和栅极阈值电压 $V_{GE(th)}$ 的变化特征,得出以下结论:

- (1)随着键合线脱落程度的加深,栅极电压 V_{ge} 在通断过程中的升降速度加快,通断时间缩短,且其米勒平台持续时间缩短。
- (2)栅极阈值电压随着键合线脱落程度的加深,呈逐渐增加趋势,且其前期增长缓慢,当键合线脱落百分比达到 40% 左右时,栅极阈值电压表现出明显增大。因此,可以将键合线脱落百分比为 40% 作为判断 IGBT 发生显著键合线故障的依据。

本文通过对 IGBT 模块两个状态参量变化特征的分析研究,为 IGBT 的状态监测技术提供了可靠参考,对确保 IGBT 模块可靠运行具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] 唐勇,汪波,陈明,等 (Tang Yong, Wang Bo, Chen Ming, et al.). 高温下的 IGBT 可靠性与在线评估 (Reliability and on-line evaluation of IGBT modules under high temperature) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (6): 17-23.
- [2] Ouakour A, Tala-Ighil B, Pouderoux B, et al. Ageing defect detection on IGBT power modules by artificial training methods based on pattern recognition [J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51 (2): 386-391.
- [3] 徐盛友 (Xu Shengyou). 功率模块 IGBT 状态监测及可靠性评估方法研究 (Study on condition monitoring and reliability assessment of IGBT module) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2013.
- [4] Du Mingxing, Wei Kexin, Li Jian, et al. Condition monitoring IGBT module bond wire lift-off using measurable signals [A]. Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference [C]. Harbin, China, 2012. 1492-1496.
- [5] Choi U M, Blaabjerg F, Jørgensen S. Effect of junction temperature swing durations on a lifetime of a transfer molded IGBT module [A]. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) [C]. 2016. 1-7.
- [6] Tounsi M, Ouakour A, Tala-Ighil B, et al. Characterization of high-voltage IGBT module degradations under PWM power cycling test at high ambient temperature [J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50 (9): 1810-1814.
- [7] 王春雷,郑利兵,方化潮,等 (Wang Chunlei, Zheng Libing, Fang Huachao, et al.). 键合线失效对于 IGBT 模块性能的影响分析 (Analysis of the performance effect with bonding wires lift-off in IGBT modules) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (1): 184-191.
- [8] 罗毅飞,汪波,刘宾礼,等 (Luo Yifei, Wang Bo, Liu Binli, et al.). 基于电压对电流变化率的 IGBT 结温变化机理及监测方法 (Junction temperature variation mechanism and monitoring method of IGBTs based on derivative of voltage to current) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2017, 43 (1): 38-43.
- [9] 杨珍贵,杜雄,孙鹏菊,等 (Yang Zhengui, Du Xiong, Sun Pengju, et al.). 风电全功率变流器参数对可靠性的影响分析 (Analysis of effect of the converter parameters on full-rated wind power converters reliability) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (16): 137-145.
- [10] 龚灿,孙鹏菊,杜雄,等 (Gong Can, Sun Pengju, Du Xiong, et al.). 基于键合线压降的 IGBT 模块内部缺陷监测研究 (Research on condition monitoring for defects inside IGBT modules based on voltage drop of bond wires) [J]. 电源学报 (Journal of Power Supply), 2016, 14 (6): 153-162.
- [11] 孔德宏,李崇坚,朱春毅,等 (Kong Dehong, Li Chongjian, Zhu Chunyi, et al.). IGCT-NPC/H 桥型变流器换流过程研究 (Research on IGCT-NPC/H bridge converter commutation process) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (6): 169-175.
- [12] 陈玉林,孙驰,艾胜,等 (Chen Yulin, Sun Chi, Ai Sheng, et al.). 一种中电压大功率 IGBT 模块行为模型 (The medium-voltage high power IGBT module behavior model) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (4): 25-34.
- [13] Rodriguez-Blanco M A, Claudio-Sanchez A, Theilliol D, et al. A failure-detection strategy for IGBT based on gate-voltage behavior applied to a motor drive system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (5): 1625-1633.
- [14] Choi U M, Blaabjerg F, Jørgensen S. Study on effect of junction temperature swing duration on lifetime of transfer molded power IGBT modules [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (8): 6434-6443.
- [15] Babel A S, Muetze A, Seebacher R R, et al. Inverter device nonlinearity characterization technique for use in a motor drive system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51 (3): 2331-2339.
- [16] Alatisse O, Kennedy I, Petkos G, et al. Reliability of repetitively avalanched wire-bonded low-voltage discrete power trench n-MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2011, 11 (1): 157-163.
- [17] Anderson J M, Cox R W, Noppakunkajorn J. An on-line fault diagnosis method for power electronic drives [A]. 2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium [C]. 2011. 492-497.
- [18] Wei Kexin, Du Mingxing, Xie Linlin, et al. Study of bonding wire failure effects on external measurable signals of IGBT module [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2014, 14 (1): 83-89.
- [19] 沈刚,周维维,杜雄,等 (Shen Gang, Zhou Luowei, Du Xiong, et al.). 基于小波奇异熵理论的 IGBT 模块键合线脱落故障特征分析 (Characteristics analysis of IGBT module with bond wire lift-off based on wavelet singular entropy theory) [J]. 电工技术学报 (Transactions

of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (6): 165-171.

[20] 陈红纳, 李志刚, 梅霜, 等 (Chen Hongna, Li Zhi-gang, Mei Shuang, et al.). IGBT 模块键合线故障与门极杂散阻抗的关系研究 (Study on the relationship between bonding wire failure and the gate stray impedance of IGBT module) [J]. 电子技术应用 (Application of E-

lectronic Technique), 2016, 42 (8): 56-59, 66.

[21] Lehmann J, Netzel M, Herzer R, et al. Method for electrical detection of bond wire lift-off for power semiconductor [A]. IEEE 15th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs [C]. Cambridge, UK, 2003. 333-336.

Analysis of fault characteristics of IGBT bonding wire lift off

KONG Mei-juan, LI Zhi-gang, ZHAO Wang-wang
(State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The reliability of IGBT power module is a hot topic today, and the failure of its bonding wire is the main cause of its failure. The occurrence of the fault will cause the module to change the characteristic parameters, such as the module's gate voltage Miller platform and the gate threshold voltage in the on-off process. The different faults of bonding wire failure are simulated by experiments, and the change of gate voltage Miller platform and threshold voltage with the severeness of the fault is analyzed. The result provides a reliable reference for the IGBT working monitoring technology.

Key words: bonding-wire fault; reliability; Miller platform; gate threshold voltage; condition monitoring

(上接第 64 页, cont. from p. 64)

Design of high efficiency and high power density
GaN-based LLC converter

LI Yuan, MA Hong-bo, KE Yu-lian
(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Gallium nitride could increase switching power supply efficiency when working at higher frequency because of its fast switching speed and low conductor resistance. Meanwhile higher working frequency could dramatically reduce the volume of the passive components and improve the power density of the power supply. LLC resonant converter could further improve the efficiency of power supply by reducing operation loss for its essential characteristics of realizing zero-voltage switching for primary switches and zero current switching for secondary diodes. With the requirement of IEEE IFEC 2017 and based on the parameter optimization of the LLC resonant converter, a 300kHz 750W prototype with 360~400V input voltage is developed, which uses the GaN transistor as the primary device and combines with the rectification technology and planar transformer. The total power density is 8.27W/cm³ and peak efficiency reaches 96.23%. Experimental results verified the validity and advancement of the solution.

Key words: high efficiency; high power density; LLC resonant converter; Gallium nitride; synchronous rectification