

绝缘栅双极型晶体管脉冲工作时结温特性及温度分布研究

陈明, 胡安, 唐勇, 汪波

(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 430033, 武汉)

摘要: 建立了电热耦合和损耗热场耦合计算模型, 采用该模型, 获得了相同外部条件下的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)芯片结温波动特性及温度分布特征, 完成了使用红外热成像实时探测短时脉冲工作方式下 IGBT 芯片表面温度波动及分布特性的预测. 探测结果表明, 在一定散热条件和占空比不大的情况时, 短时脉冲间歇等非周期瞬态工作方式下芯片表面温度快速上升之后, 进入一个缓慢的上升周期, 实验也表明, 在特殊工作场合时可突破器件手册推荐使用的最大电流值. 利用建立的热分析模型, 还可以实现对不同工作方式下器件结壳温差和结温波动幅度的预测.

关键词: 绝缘栅双极型晶体管; 短时脉冲; 结温特性; 温度分布; 电热耦合

中图分类号: TM322 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)04-0070-07

Investigation on Junction Temperature Characteristic and Temperature Distribution Detection for Pulsed IGBT Operation

CHEN Ming, HU An, TANG Yong, WANG Bo

(State Key Laboratory of Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The junction temperature characteristic fluctuation and temperature distribution profiles of the IGBT power module under transient impulse intermittent operation with the same external operation condition is analyzed for different simulation models, which is implemented by the power loss and temperature field coupling relation. The distribution of temperature profiles on the chip surface is detected by a high-speed mid-wave infrared imaging camera. The real time detection shows that under transient pulse intermittent operation the temperature of the chip surface rises quickly and then slowly for a certain heat sink situation and little duty ratio, while the junction temperature drops quickly in the intermittent time, and it is possible to breaking the restriction of the peak operational current. The simulation models are applied to predicting junction-case temperature drop and fluctuation characteristic of junction under temperature different working conditions.

Keywords: insulated gate bipolar transistor; transient pulse; junction temperature characteristic; temperature distribution; electro-thermal coupling

温度(特别是结温)对绝缘栅双极型晶体管(IGBT)正常工作的影响主要有^[1-7]如下几种情况. ①硅芯片的正常工作结温不能超过 150 ℃, 最新一代

器件不超过 175 ℃, 在短时脉冲工作方式下, 即使器件结温进入相对稳定的等幅波动状态后, 仍有可能在平均结温附近发生剧烈波动, 从而会对器件可靠

收稿日期: 2011-07-10. 作者简介: 陈明(1982—), 男, 博士生; 胡安(通信作者), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50737004).

网络出版时间: 2011-11-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20111117.1744.001.html>

性产生很大影响。② 过大的温度梯度产生的热应力可能造成 IGBT 失效。短时脉冲间歇工作方式在完成一次温度循环后要间歇一段时间,由于模块内部各层材料的热膨胀系数不同,长期的重复热胀冷缩可能会导致器件封装内部芯片与直接覆铜陶瓷层(DBC)、DBC 与基板、电气端子与 DBC 之间的焊料层产生裂纹,裂纹扩大直至产生分层、空洞或气泡^[8-10]。温度波动的反复冲击导致键合引线强度下降、剥离焊盘或翘曲、熔断^[11],从而引起失效,使器件寿命缩短和可靠性降低,影响到整个装置的工作性能和长期可靠性。③ 温度引起 IGBT 通态与开关瞬态的工作特性发生变化。载流子迁移率、本征激发浓度、复合速度、门槛电压以及跨导等参数都会随温度发生变化^[12],从而导致器件导通压降、关断拖尾电流、开通和关断速度、损耗等性能指标都发生改变,器件工作寿命也随温度的升高而下降。文献^[13]指出,近 60% 的器件失效由温度升高引起,在正常工作温度范围内,温度每上升 10 °C,器件失效概率以近 2 倍的速率上升。

近年来,在西方发达国家,电磁轨道炮和电磁发射装置等新概念装备发展迅速^[14-16],这些新一代装备有一个共同点,就是将储存的能量以电能的形式在极短的时间内释放,从而将战斗部、运载装置等以极高的速度发射出去,短时电能变换装置在这些装备中起着关键作用。IGBT 等全控型电力电子器件在这些电能变换装置中得到了广泛应用,且在这些装置中器件可能是非周期瞬态的特殊工作方式,与常规周期稳态工作方式不同。在该工作方式下,器件在短时间内导通大电流,一般接近其可重复关断峰值电流,在很短时间内就产生很大损耗。由于热量的散失需要相对较长的时间,从而导致器件结温在短时间内上升很大,加上在实际运行过程中负载的不断变化,导致器件结温波动范围变化剧烈。当 IGBT 工作结温不超过 120 °C 时,结温脉动量对寿命的影响比实际最高结温对寿命的影响还大^[17-18]。实际上,根据器件手册,只要工作结温不超过最高允许值,实际最高结温对寿命的影响很小。但是,目前国内还不具备 IGBT、IGCT 等全控型电力电子器件的生产能力,同时对于其内部机理、工作特性以及优化使用的研究水平也不高,特别是在这些电磁发射装置中,对电力电子器件处于短时脉冲的特殊非周期瞬态工作方式开展的研究就更少^[19]。此外,采用传统集总参数热路法研究 IGBT 温度特性只能得到平均结温^[20-21],不能获得精确的结温分布。因此,分析与探

测器件在上述特殊工作方式下的结温特性及温度分布,对于确保器件在装置内安全运行、优化使用、延长使用寿命,以及提高电力电子系统功率密度和可靠性都具有重要的现实意义。

本文首先分析了脉冲工作方式下电力电子器件的结温上升和波动特征,指出该工作方式时温度变化的特殊性。分别在 Saber 仿真环境里采用电热耦合模型和在热分析仿真环境 ANSYS 里采用损耗-热场耦合计算方法,对相同外部条件时的结温特性及温度场进行了比对分析,采用一种高速红外热成像仪对某型 IGBT 芯片结温进行了实时探测,探明了结温温升、波动及瞬态温度分布特征,并进行了分析。

1 脉冲工作时功率器件结温波动特性

IGBT 结温的上升是由于工作时的功率损耗引起的,幅值为 P_0 的矩形单脉冲或间隔时间足够长的连续脉冲作用于 IGBT 芯片时,所引起的 IGBT 结温 T_j 自初始温度 T_0 的变化如图 1 所示。

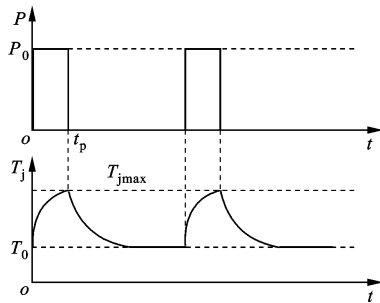


图1 功率脉冲引起结温变化

IGBT 结温上升规律可表示为^[22]

$$T_j(t) = P_0 \theta_{jc} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

式中: θ_{jc} 为芯片到管壳的热阻值; τ 为热时间常数。结温上升到最高

$$T_{jmax}(t) = T_j(t_p) + T_0 \quad (2)$$

然后按指数规律逐渐下降

$$T_j(t) = P_0 \theta_{jc} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

经过足够长的时间回到初始温度。但是,当 IGBT 处在连续导通一串脉冲的 PWM 工作方式下,且连续脉冲的间隔时间不足以使结温恢复到初始值,此时 IGBT 结温的上升与波动过程如图 2 所示。

由图 2 可知,当 IGBT 导通时结温上升,关断后结温开始下降,但是在下降阶段,间隔时间不足以让结温回到初始值,就又进入另一个上升过程,结温在连续脉冲的反复作用下累积叠加上升。在经过一个

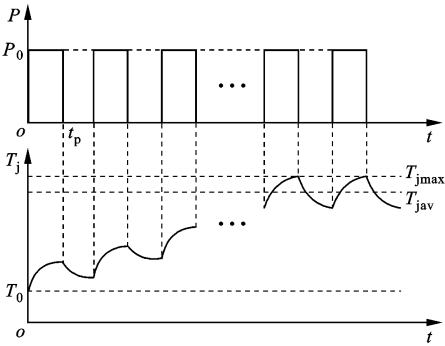


图 2 结温叠加上升过程

逐步上升的过程后,结温进入周期等幅波动状态,围绕着一个恒定的平均温度 T_{jav} 做近似等幅波动,此时热量的产生与散失达到了动态平衡。

在短时脉冲间歇工作情况下,IGBT 瞬时导通电流大,产生极大功耗和发热量,因此结温上升的幅度和波动范围也比一般常规工作条件下要剧烈,加上实际运行过程中负载的变化,结温的波动规律将不再如图 2 所示. 由于是短时脉冲,结温可能还未进入等幅波动便进入下降阶段,且结温也可能变幅波动,这为突破器件最大工作结温提供可能. 因此,在器件应用和散热设计时,必须将结温波动的最高温度也考虑进去。

2 Saber 电热耦合模型分析

在 Saber 仿真环境里,采用其模型库中的 IGBT 模型与等效传热模型,构建了如图 3 所示的电热耦合仿真电路。

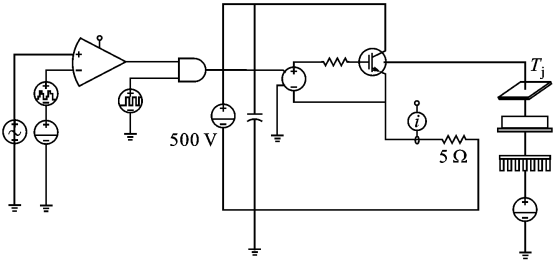


图 3 IGBT 电热耦合仿真电路

如图 3 所示,仿真电路采用了由 IGBT、续流二极管、负载电阻和负载电感构成的斩波电路,其中 IGBT 为 Saber 模型库中一种具有热接口的理想器件,可与外部热传递网络相连接. 传热模型采用文献[16]所建的模型。

采用图 3 所示仿真电路,设定 IGBT 工作电压为 530 V,栅极驱动电压为 20 V,负载电感为 1 mH,负

载电阻为 $5.3\ \Omega$,环境温度为室温,开关频率为 1 kHz,占空比为 0.5,仿真得到等幅波动的结温波形与 IGBT 工作电流波形如图 4 所示。

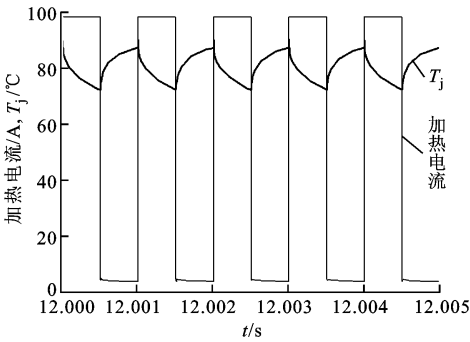


图 4 IGBT 结温仿真波形

从图 4 可以看出,由于在 IGBT 的开通瞬态、导通稳态与关断瞬态都将产生损耗,相应的都会导致结温上升. 进入等幅波动状态后,结温围绕着平均温度 $80\ ^\circ\text{C}$ 作幅度约为 $10\ ^\circ\text{C}$ 的等幅波动. 当 IGBT 进入开通状态后,结温开始上升,且在整个开通瞬态、导通状态和关断瞬态中都保持上升. 当 IGBT 退出关断瞬态后,结温开始下降,直至下一个开通瞬态开始,结温上升和下降的幅度相等,在占空比为 0.5 时,上升与下降的时间也相等. 从图中还可以看出,在开关瞬态过程中,开关损耗将引起温度的急剧上升,出现了一个温度尖峰,在关断瞬态时尤为明显. 这主要是由于在关断瞬态过程中,IGBT 与二极管进行换流,IGBT 电压首先要上升到母线电压,随后电流才开始下降,同时 IGBT 关断时电流不会马上消失,有一个拖尾阶段,而此时电压已上升,因此会产生较大功耗,结温急剧升高。

由仿真结果可知,当处于瞬时导通大电流的短时脉冲间歇工作方式时,IGBT 平均工作结温与波动幅度都较大,会对器件的工作寿命与可靠性等产生较大的影响,必须作为设计阶段的一个重要因素来考虑。

3 ANSYS 结温分布分析

几何模型中做的假设同文献[20],在 ANSYS Workbench 热分析环境下,通过施加热载荷实现损耗-热场耦合,从而进行温度分布数值计算. 仿真环境边界条件设置为:环境温度 $25\ ^\circ\text{C}$,加热电流 100 A,经网格划分后有 50 177 个单元和 192 256 个节点。

计算得到的模块芯片表面的瞬态温度场在 1、

5、10、12、15 s 时的温度分布如图 5 所示,15 s 时达到稳态,其中高温区域为 IGBT 模块芯片。

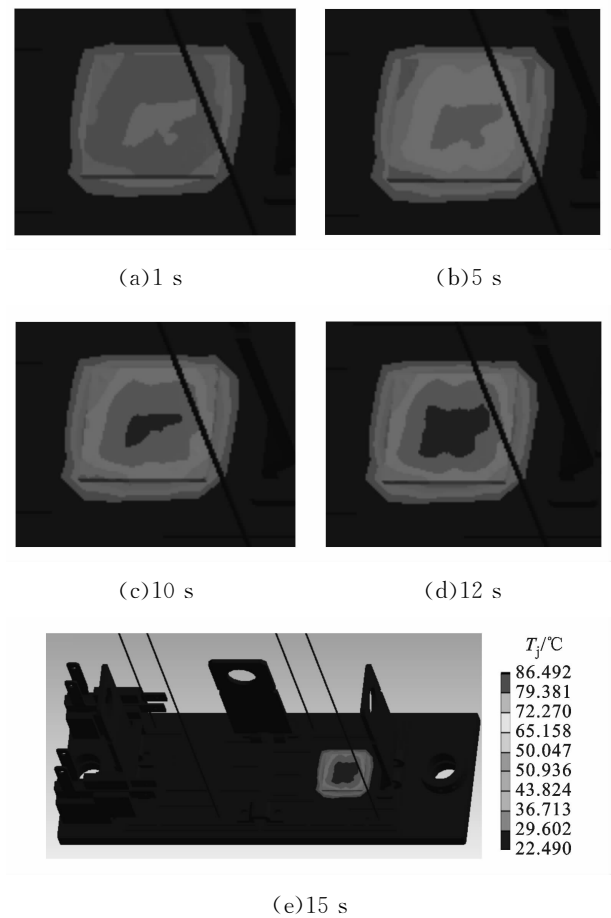


图 5 不同时刻芯片结温分布云图

如图 5 所示,在 15 s 左右结温从接近室温的 22℃附近上升到最高温度 86.5℃。对比图 5 中各分图,模块芯片高温区域位于整个芯片表面,且中心温度高于边缘温度,温度由中心向边缘逐步降低。这是因为仿真是在理想假设条件下得到的,即忽略了功耗源具体产生位置,将芯片层整个表面视为一个内热源,忽略了铝丝键合引线引起的电流在芯片表面的不均匀分布和芯片间的耦合作用。

4 结温分布探测分析

目前,比较成熟的功率半导体器件温度探测方法主要有热传感器法、热敏电气参数法和红外热成像探测法^[23-25]。由于速度和绝缘达不到要求,使用热电偶实时探测 IGBT 工作结温不可行。电参数测温法可以对 IGBT 工作结温进行估算,但测得的是 IGBT 芯片的平均结温,测试精度与速度不会很高。红外测温方法作为一种非直接接触被测物体的温度测量手段,精度高、探测速度非常快,可以满足 IG-

BT 实时结温的测量要求。一般已封装好的成品 IGBT 模块内部芯片表面还覆盖有一层硅胶,实验采用了一种外壳打开同时芯片表面未覆盖硅胶的模块进行测试,型号为 GD50HEL120C1S 的 1200 V/50 A,结构如图 6 所示。采用如图 7 所示的高速红外热成像仪测温,可以在 1 s 内连续拍 200 幅图像。

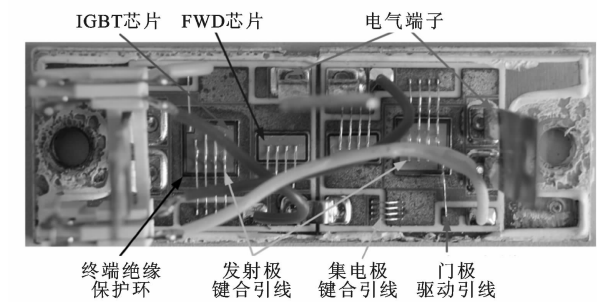


图 6 打开封装模块的结构示意图

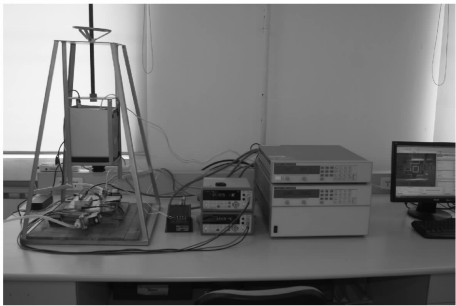


图 7 红外热成像仪测试平台

结温探测实验采用了与图 3 所示仿真研究中相同的斩波电路,负载采用可变电阻器,通过改变电阻值来调整导通电流的大小,被测 IGBT 的开通与关断通过数字信号处理器(DSP)控制驱动电路实现。设定被测 IGBT 工作频率为 1 kHz,脉宽为 1 ms,占空比为 0.5,直流母线电压为 500 V,关断时峰值电压达到 740 V,导通电流为 100 A,达到可重复关断峰值电流即额定直流工作电流的 2 倍,工作时间为 2 s,连续导通 2 000 个脉冲,工作一次后间歇 2 min,芯片表面温度回到初始状态。

芯片结温是一个近似的概念,一般定义为位于芯片基区栅极沟道附近 PN 结的温度,位于芯片内部。芯片结构分为两层,硅芯片表面有一个镀层,镀层由中心位置的金属层和绝缘保护层两部分组成。其中金属层镀铝,厚度约为 5 μm,如图 8 所示的芯片表面中心银白色区域;芯片上表面的边缘保护层镀有一圈 Si₃N₄,即为如图 8 所示芯片镀层四周的黑边框,镀层的下面才是硅片层。

红外测温仪显示的温度常称为目标的辐射温

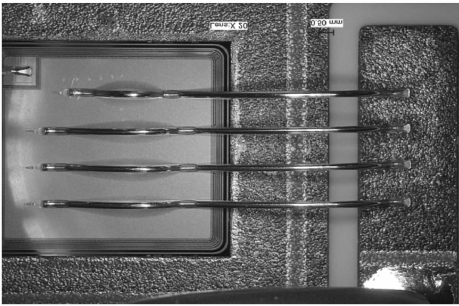


图8 IGBT 芯片表面结构

度,并非物体真实温度.为使黑体辐射定律适用于所有实际物体,引入一个与材料性质及表面状态有关的比例系数,即发射率.发射率是指物体表面辐射出的能量与相同温度的黑体辐射能量的比值.各种物质的发射率由物体本身的材质所决定,相同的温度下,物质不同,向外辐射的能量也不同.影响发射率的主要因素有材料种类、表面状况(包括粗糙度和氧化程度等)、表面几何形状、表面颜色、测量角度和波长温度等.文献[26]采用公式计算的方法来校正探测结果,从而确定材料发射率.

当红外热成像仪对准芯片表面进行探测时,探测器所接收到的辐射能量 Φ 由被测芯片表面本身的辐射能量、从被测芯片表面反射的环境辐射能量和从被测芯片表面透射的环境辐射能量3部分组成

$$\Phi = \epsilon\Phi_b + \mu\Phi_a + \tau\Phi_a \tag{4}$$

式中:环境辐射能量为 Φ_a ,由环境温度 T_a 决定;与被测芯片表面温度相同的黑体辐射能量为 Φ_b ,由被测芯片的真实温度 T_r 决定;被测芯片发射率为 ϵ ;反射率为 μ ;透射率为 τ .又因为 $\epsilon + \mu + \tau = 1$,所以有

$$\Phi = \epsilon\Phi_b + (1 - \epsilon)\Phi_a \tag{5}$$

由辐射换热的4次方定律得到芯片表面向外辐射的热流量为

$$\Phi = \epsilon A \sigma T^4 \tag{6}$$

式中: A 为辐射表面积; σ 为黑体辐射常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T 为芯片表面温度,K.于是,式(5)可化为

$$\Phi = \epsilon \sigma T_r^4 + (1 - \epsilon) \epsilon' \sigma T_a^4 \tag{7}$$

式中: ϵ' 为环境的发射率,经查表约为0.95.

红外热成像仪出厂前标定后的辐射温度值与接收到的辐射能量的关系为

$$\Phi = \sigma T_d^4 \tag{8}$$

式中: T_d 为探测得到的温度.按照仪器内疗的算法和目标发射率校正后, T_d 转变为被测目标的温度值.于是,联立式(7)和式(8)可得

$$\sigma T_d^4 = \epsilon \sigma T_r^4 + (1 - \epsilon) \epsilon' \sigma T_a^4 \tag{9}$$

即

$$T_r = (4/T_d^4 - (1 - \epsilon) \epsilon' T_a^4 / \epsilon)^{1/4} \tag{10}$$

因此,通过式(10),可由 T_d 修正得到真实的温度 T_r .中心区域铝材料对应的发射率约为0.45,而边缘区域 Si_3N_4 对应的发射率约为0.65.

采用高速连续拍摄功能对IGBT的结温上升过程进行了测试,拍摄时间为5、10、15、20 s时探测到的图像分别如图9所示.

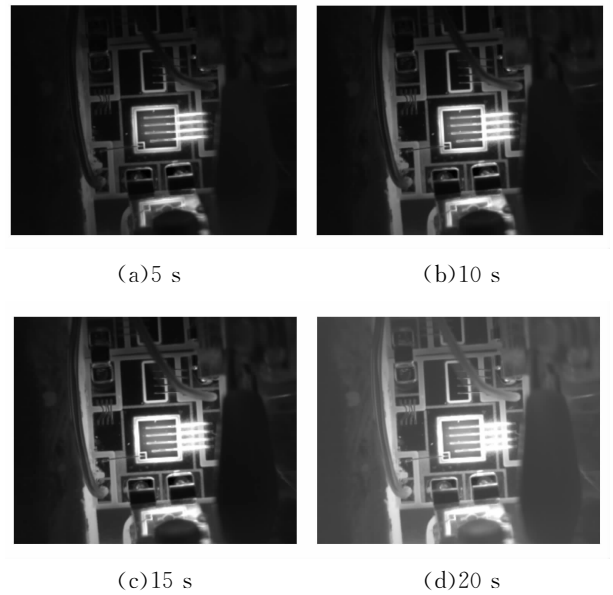


图9 不同时刻结温温度分布云图

从图9可知,在设定的短时脉冲工作方式下,IGBT芯片表面温度上升很快且幅度很大,到达稳态等幅波动后的芯片表面最高温度如表1所示.

由表1可知,芯片表面温度分布为中心高于边缘1~6℃.实际探测结果表明,脉冲结束时,结温从室温上升到约86℃,经过约20 s之后进入等幅波动状态,仿真结果与实测结果基本吻合.由于红外探测时需打开芯片封装,而仿真时忽略芯片散热,将壳温设定为恒定值,因此仿真时温度上升时间比实测稍短.

表1 不同时刻芯片表面最高温度

t/s	5	10	15	20
$T_e/^\circ\text{C}$	45	52	58	62
$T_{er}/^\circ\text{C}$	57	66	74	80
$T_s/^\circ\text{C}$	38	45	50	54
$T_{sr}/^\circ\text{C}$	58	71	79	86

注: T_e 为芯片表面绝缘保护层探测温度; T_{er} 为芯片表面绝缘保护层实际温度; T_s 为芯片表面金属镀层探测温度; T_{sr} 为芯片表面金属镀层实际温度.

5 结壳温差和脉动量预测

对比模型计算及探测结果可知,电热耦合模型计算结果结温最高,这是由于基于理想散热条件得到的. 损耗-温度场耦合计算结果较电热耦合模型计算结果低,这是由于该模型考虑了芯片厚度,实际上模块热源在芯片内部,热量是由内部硅层往表面金属层传导的. 红外热成像实时探测中采用的 IGBT 芯片表面未覆盖硅胶,工作时产生的热量也会向外部空间辐射和对流,因此这种工作方式与实际电路中有硅胶覆盖的 IGBT 芯片工作时存在一定的差别,但是这种差别不会影响测试得到的芯片表面结温分布与上升过程,只是测量得到的结温会偏小一些.

在同样散热条件下,采用电热耦合模型对不同加热电流时的芯片温升(即结壳温差)及结温波动幅度进行预测,结果如表 2 所示,可见随着加热电流的增大,结壳温差和结温波动幅度增大.

表 2 不同加热电流时的结壳温差和结温波动幅度

加热电流/A	结壳温差/℃	波动幅度/℃
20	6	1
30	9	2
40	14	3
60	28	5
70	36	6
80	47	7
90	62	9

实际最高结温和结温波动幅度是决定器件正常工作、寿命预测与可靠性评估的关键因素,必须在设计阶段充分考虑到器件在短时脉冲工作方式时的最高工作结温和波动范围,综合器件选型、散热设计、主电路和辅助电路设计等各方面的因素,尽量使系统达到安全可靠和最优化. 实验时可选择封装材料传热特性较为一致的器件,保持内部各层材料温度的均匀性,以减小热应力,同时降低工作结温,以延长器件使用寿命并保证其可靠工作.

6 结 论

(1)建立了电热耦合模型和损耗-热场耦合计算模型,获得了相同外部条件时 IGBT 芯片的结温特性和热场分布特征,利用所建模型可实现器件对多

种工作方式,特别是短时脉冲间歇这类非周期瞬态工作方式下芯片表面的结温波动和温度分布的预测.

(2)在一定散热条件和占空比不大的情况下,芯片表面温度上升很快,随后进入一个缓慢的上升周期. 这也表明,当器件处于短时脉冲间歇这类非周期瞬态工作方式时,只要占空比和间歇时间满足一定条件,可突破模块手册推荐使用的最大电流值.

(3)温度是个惯性量很大的物理量,当 IGBT 处于高频率脉冲工作方式时,短时关断,IGBT 结温往往还来不及下降,因此可将其视为导通近似处理. 只有当 IGBT 完全处于间歇时,结温下降,间隔一定时间后,IGBT 模块可较快进入等幅波动状态,此时 IGBT 主要处于大温度梯度工作方式,短时间处于高结温状态,因此影响器件可靠性的主要因素是结温波动幅度.

参考文献:

[1] LU Hua, BAILEY C, YIN Chunyan. Design for reliability of power electronics modules[J]. Microelectronics Reliability, 2009, 49(9/10/11): 1250-1255.

[2] KHATIBI G, WROCZEWSKI W, WEISS B, et al. A fast mechanical test technique for Life time estimation of micro-joints[J]. Microelectronics Reliability, 2008, 48(11/12): 1822-1830.

[3] LEFRANC G, MITIC G, LICHT T. Properties of solders and their fatigue in power modules[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(9/10/11): 1641-1646.

[4] BRYANT A T, MAWBY P A, PALMER P R, et al. Exploration of power device reliability using compact device models and fast electrothermal simulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(3): 894-903.

[5] WEI Lixiang, LUKASZEWSKI R A, LIPO T A. Analysis of power-cycling capability of IGBT modules in a conventional matrix converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(4): 1443-1451.

[6] BOUARROUDJ M, KHATIR Z, OUSTEN J P, et al. Degradation behavior of 600 V-200 A IGBT modules under power cycling and high temperature environment conditions[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(9/10/11): 1719-1724.

[7] AMRO R, LUTZ J, LINDEMANN A. Power cycling with high temperature swing of discrete components based on different technologies [C] // Proceeding of

- 35th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 2593-2598.
- [8] ONUKI J, KOIZUMI M, SUWA M. Reliability of thick Al wire bonds in IGBT modules for traction motor drives[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2000, 23(1): 108-112.
- [9] MAURO C. Selected failure mechanisms of modern power modules[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(4/5): 653-667.
- [10] SOLOMALALA P, SAIJ J, MERMET-GUYENNET M, et al. Virtual reliability assessment of integrated power switches based on multi-domain simulation approach[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(9/10/11): 1343-1348.
- [11] FELLER L, HARTMANN S, SCHNEIDER D. Life-time analysis of solder joints in high power IGBT modules for increasing the reliability for operation at 150°C [J]. Microelectronics Reliability, 2008, 48(9): 1161-1166.
- [12] HEFNER A J. A dynamic electro-thermal model for the IGBT[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(2): 394-405.
- [13] FABIS P M, SHUM D, WINDISCHMANN H. Thermal modeling of diamond-based power electronics packaging[C]// Proceeding of Fifteenth IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 98-104.
- [14] LIM D J, PULKO S H. Characterisation of heat spreader materials for pulsed IGBT operation[J]. IET Circuits, Devices and Systems, 2007, 1(2): 126-136.
- [15] FAIR H D. Electric launch science and technology in the United States[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2003, 39(1): 11-17.
- [16] KAYE R J. Operational requirements and issues for coilgun EM launchers[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2005, 41(1): 194-199.
- [17] COVA P, FANTINI F. On the effect of power cycling stress on IGBT modules[J]. Microelectronics Reliability, 1998, 38(6/7/8): 1347-1352.
- [18] SANKARAN V A, CHEN C, AVANT C S, et al. Power cycling reliability of IGBT power modules[C]// Conference Record of Thirty-Second IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1997: 1222-1227.
- [19] CLEMENTE S. Transient thermal response of power semiconductors to short power pulses [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(4): 337-341.
- [20] YUN Chansu, MALBERTI P, CIAPPA M, et al. Thermal component model for electrothermal analysis of IGBT module systems[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2001, 24(3): 401-406.
- [21] 陈明, 胡安, 唐勇, 等. 绝缘栅双极型晶体管传热模型建模分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 453-459.
- CHEN Ming, HU An, TANG Yong, et al. Modeling analysis of IGBT thermal model[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 453-459.
- [22] 华伟, 周文定. 现代电力电子器件及其应用[M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2002: 175-176.
- [23] KRAUS R, MATTAUSCH H J. Status and trends of power semiconductor device models for circuit simulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(3): 452-465.
- [24] SOFIA J W. Electrical temperature measurement using semiconductors[J]. Electronics Cooling, 1997, 3(1): 22-25.
- [25] 唐勇, 陈明, 汪波. 电力电子器件短时脉冲工作的结温特性研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(3): 88-90.
- TANG Yong, CHEN Ming, WANG Bo. Research on junction temperature characteristic of power electronics devices under short pulse operation[J]. Power Electronic, 2010, 44(3): 88-90.
- [26] 陈明, 胡安, 刘宾礼. 绝缘栅双极型晶体管失效机理与寿命预测模型分析[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(10): 65-71.
- CHEN Ming, HU An, LIU Binli. Investigation on failure mechanism and lifetime prediction modeling of IGBT power electronic devices[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(10): 65-71.

[本刊相关文献链接]

- 绝缘栅双极型晶体管失效机理与寿命预测模型分析. 2011, 45(10): 65-71.
- 等离子活化烧结过程的温度分布研究. 2011, 45(1): 122-126.
- 电压反转极性对温度梯度场下聚乙烯内空间电荷的影响. 2011, 45(10): 54-58.
- 移动数字电视调谐器中低噪声模拟滤波器的设计. 2009, 43(2): 72-76.
- 有机电致发光器件的热传导特性研究. 2009, 43(4): 70-74.
- 局部放电脉冲群的实用快速分类技术及应用. 2008, 42(8): 1021-1025.
- 环氧及其复合材料气固界面快脉冲闪络特性. 2008, 42(6): 703-707.

(编辑 杜秀杰)