

# 一种考虑热扩散和热耦合的 IGBT 模块热阻抗模型

何怡刚, 张钟韬, 刘嘉诚, 赵 明, 李晨晨

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 针对传统热等效电路模型对 IGBT 模块结温计算误差较大的问题, 提出一种基于传热研究的 IGBT 模块等效热阻抗模型。通过对 IGBT 模块内部传热研究, 以热流密度变化规律确定热扩散角, 由此计算出热网络参数并建立改进的单芯片 Cauer 网络等效电路模型。然后在此基础上, 考虑多芯片之间的热耦合效应, 计算出自热热阻和耦合热阻并建立 IGBT 模块热阻抗矩阵, 利用线性叠加原理可对各芯片的结温进行预测计算。最后, 将等效热阻抗模型计算出的结温与有限元仿真值进行比较, 验证了该模型的有效性与准确性。

**关键词:** IGBT 模块; 热扩散角; 热耦合效应; 热阻抗模型

**DOI:** 10.12067/ATEEE1904033 **文章编号:** 1003-3076(2020)05-0017-08 **中图分类号:** TM930; TN322; TK311

## 1 引言

绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 模块以其独特的优良性能应用于现代工业的各个领域, 无论是在光伏发电、风力发电等新能源领域, 还是在高压直流输电 (High Voltage Direct Current, HVDC) 等电力传输领域, 甚至在家用电器方面都得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。但是 IGBT 模块由于集成度高、功率密度大的特点, 使得其内部芯片温度较高。研究表明, 超过一半的故障失效由温度过高引起, 并且温度每升高 10℃, 器件的失效率会增加近一倍<sup>[2,3]</sup>, 从而对器件运行的可靠性产生很大影响。因此有必要对 IGBT 模块的热可靠性进行研究<sup>[4]</sup>。

热等效电路模型广泛应用于 IGBT 模块的热模拟, 它包括 Cauer 模型和 Foster 模型。其中, 连续网络即 Cauer 模型正确反映了模块内部物理层的热阻和热容值, 可用来预测每一层的温度。文献[5-9]以经典的 Cauer 模型传热 RC 网络结构为基础, 对 IGBT 模块的温度进行计算和预测。但实际上, 传统 Cauer 模型的热阻和热容值计算并不准确, 会影响 IGBT 模块温度的预测, 因此有必要对其进行改进。

IGBT 模块一般为七层结构, 由于模块内部灌封有绝热凝胶, 因此 IGBT 模块内芯片产生的热量主要由上往下传递, 最终通过底层的基板将热量传递出去<sup>[3]</sup>。热量在模块内部传递过程中并不是完全垂直向下传递的, 而是会发生扩散, 从而使有效导热面积不断增加。文献[5]将每层的有效导热面积近似为该层上一层的长宽分别加上其厚度的乘积。文献[10,11]使用一个固定值 45° 热扩散角对 IGBT 模块各层的热参数进行计算。文献[12-14]则认为模块内每层的热扩散角并不相同, 而是该层导热系数与下一层导热系数之比的反正切值。但是有研究<sup>[15]</sup>指出, 热扩散角不能简单地认为是 45° 或者是当前层导热系数与下层导热系数之比的反正切值。尤其对于多层 IGBT 封装结构, 运用上述两种热扩散角在确定模块最高温度方面的精度很差。

此外 IGBT 模块大多为多芯片结构, 即不止一个热源。这些芯片焊接在同一个基板上, 且它们之间的热路径是共享的, 这就导致了热交叉耦合效应<sup>[16]</sup>。传统的 Cauer 一维等效网络模型由于简化, 通常忽略了 IGBT 模块中并联的多芯片之间的热耦合影响, 只能计算单一芯片发热时的温度, 而无法充

收稿日期: 2019-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(51577046)、国家自然科学基金重点项目(51637004)、国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”项目(2016YFF0102200)、装备预先研究重点项目(41402040301)

作者简介: 何怡刚(1966-), 男, 湖南籍, 教授, 博士, 研究方向为电路理论及其应用、模拟与混合信号电路测试与故障诊断、电信号检测、智能电网、卫星通信监测和智能信号处理;  
张钟韬(1993-), 男, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为功率模块可靠性。

分计算多芯片并联 IGBT 模块的结温。基于此,文献[17-19]研究了 IGBT 模块多芯片之间的热耦合效应,认为每个芯片的温升是由其自热效应和其他芯片的热耦合效应引起,通过引入等效热阻抗矩阵对模块内每个芯片的温度进行预测计算。其中,文献[17]构造了一个详细的功率 IGBT 模块的三维热网络模型。该模型包括了 IGBT 模块的多层热行为、芯片之间的热耦合效应以及各层上不同位置的热耦合效应,但是其热网络又过于复杂使得计算难度大大增加。

综合上述考虑,本文对 IGBT 模块内部的传热进行研究,首先通过芯片热量向下传递过程中热流密度变化的规律来确定热扩散角和有效导热面积,由此计算出热网络参数并建立改进的单芯片 Cauer 网络等效电路模型。然后在此基础上计算自热热阻和耦合热阻并建立多芯片 IGBT 模块的热阻抗矩阵,利用线性叠加原理对每个芯片的结温进行预测计算。为了更加直观地说明,本文以某商用 IGBT 模块为例进行研究,验证了所提出模型的有效性与准确性。

## 2 IGBT 模块单芯片 Cauer 网络模型

### 2.1 IGBT 模块等效电路模型

IGBT 模块通常为图 1 所示的七层结构,具有良好的电气绝缘、机械稳定以及导热性能。根据电-热比拟理论<sup>[20]</sup>,IGBT 模块的热特性可用图 2 所示的 Cauer 模型 RC 等效电路来描述。在该等效模型中,热源的功率消耗用电流源表示,而网络中的电阻和电容代表模拟热系统中的热阻和热容,地电位则相当于环境温度。电参数和热参数之间对等关系如表 1 所示。

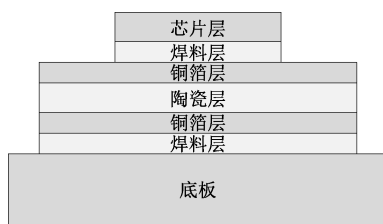


图 1 IGBT 模块横截面视图

Fig.1 IGBT module cross-sectional view

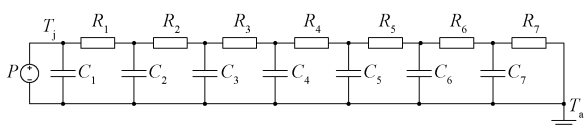


图 2 IGBT 模块 Cauer 等效电路模型

Fig.2 Cauer equivalent circuit model of IGBT module

表 1 电参数和热参数之间对等关系

Tab.1 Equivalent relationship between electrical and thermal parameters

电参数	热参数
电压 $U$	温度 $T$
电流 $I$	热流 $P$
电荷量 $Q$	热量 $Q_{th}$
电阻 $R$	热阻 $R_{th}$
电容 $C$	热容 $C_{th}$

根据传热学理论,将热流通道看作传输线,由此 IGBT 模块每层材料的热阻及热容计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$R_{th} = \frac{d}{\lambda A} \quad (1)$$

$$C_{th} = \rho c d A \quad (2)$$

式中,  $d$  为模块内每层材料的厚度;  $\lambda$  为材料的导热系数;  $A$  为有效导热面积;  $c$  为材料的定压比热容;  $\rho$  为材料的密度。

然而,上述计算热阻及热容的表达式较为简单,而且对有效导热面积并没有明确的说明,使得计算结果并不十分准确。因此,有必要对 IGBT 模块的传热进行研究从而推导出更加精确的热阻及热容计算公式。

### 2.2 IGBT 模块传热研究及热阻热容的计算

#### 2.2.1 IGBT 模块传热研究

IGBT 模块是由多种材料构成的功率半导体器件,一般为七层结构,从上往下依次是硅芯片、芯片焊料层、直接敷铜(Direct Copper Bonded, DCB)上铜层、DCB 氧化铝陶瓷层、DCB 下铜层、衬板焊料层以及铜底板。某 1200V/50A 商用 IGBT 模块各层厚度及材料物理属性如表 2 所示。

表 2 IGBT 模块各层厚度及材料物理属性

Tab.2 Thickness of layers and physical properties of materials of IGBT module

分层	厚度/ mm	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数/ (W/(m·K))	比热容/ (J/(kg·K))
硅芯片	0.5	2328	148	700
芯片焊料层	0.1	7300	54	230
DCB 上铜层	0.25	8960	401	385
DCB 陶瓷层	0.38	3600	30	840
DCB 下铜层	0.25	8960	401	385
衬板焊料层	0.1	7300	54	230
铜底板	3.0	8960	401	385

IGBT 模块工作时会产生功率损耗,从而导致芯片温度升高。由于模块内部灌封有绝热凝胶,因此芯片产生的热量主要通过热传导由上往下传递,最

终通过底板以热对流的方式将热量传递出去。

方形芯片和圆形芯片温度梯度分布如图 3 所示。对于方形芯片,其有限元仿真的温度梯度形状和分布与圆形芯片的几乎相同。因此,为了便于分析计算,可把方形芯片近似等效成圆形芯片来分析。那么所等效的圆形芯片的热阻、总发热量和单位体积发热量应与原先的方形芯片保持一致,即两者的厚度和面积保持一致,因此可得出圆形芯片的半径为:

$$r = \frac{a}{\sqrt{\pi}} \quad (3)$$

式中,  $a$  为方形芯片边长。

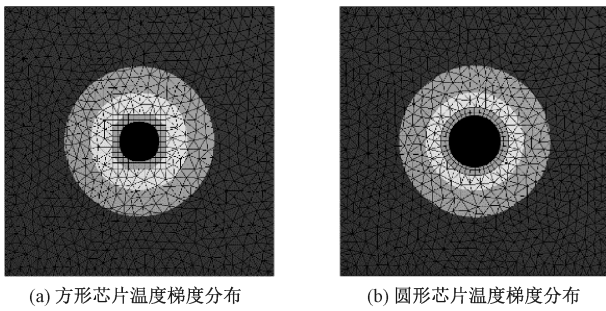


图 3 方形芯片和圆形芯片温度梯度分布

Fig.3 Temperature gradient of square chip and circular chip

由芯片热源产生的等温线近似呈圆形由内向外扩散,同时其发出的热量在向下传递的过程中会发生热扩散,热流扩散区域类似圆台,如图 4 所示。

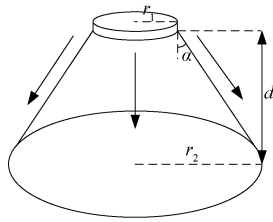


图 4 热流扩散区域视图

Fig.4 Heat flow diffusion region view

假定热扩散角在每一层中是恒定的<sup>[22]</sup>,则可以运用图 4 所示的圆台模型计算热阻。IGBT 模块每层材料的热阻及热容计算表达式为:

$$R_{th} = \int_0^d \frac{1}{\lambda \pi (r_1 + x \tan \alpha)^2} dx \quad (4)$$

$$C_{th} = \int_0^d c \rho \pi (r_1 + x \tan \alpha)^2 dx \quad (5)$$

式中,  $r_1$  为上层与该层交界处有效传热面积圆的半径;  $d$  为模块内每层材料的厚度;  $\alpha$  为热扩散角;  $\lambda$

为材料的导热系数;  $c$  为材料的定压比热容;  $\rho$  为材料的密度。

### 2.2.2 热扩散角的确定

对于热扩散角,目前较为常用的是  $45^\circ$  固定值或者是当前层导热系数与下层导热系数之比的反正切值,但是研究表明这都不十分准确。

芯片热源发出的热量在向下传递的过程中,由于发生热扩散,有效导热面积会增大,但是总的热流是不变的,这也就意味着热流密度在逐渐减小。因此,可以利用芯片中心垂直向下路径的热流密度变化曲线来获得热扩散角。

为此,采用有限元法 (Finite Element Method, FEM) 获取芯片中心垂直向下路径的一系列热流密度数据并由此绘出变化曲线图。IGBT 模块有限元模型如图 5 所示,包含两个相同的 IGBT 芯片和两个相同的续流二极管 (Free Wheeling Diode, FWD) 芯片,忽略了键合引线,使用 ANSYS 软件工具对其进行稳态热仿真。以其中一个 IGBT 芯片为例,其损耗主要包括通态损耗和开关损耗,总和为  $157.5\text{W}$ 。为了简化模型,将 IGBT 模块底部对流换热系数设为  $5000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  以代替散热器的散热作用<sup>[23]</sup>,其他表面绝热,环境温度设为  $25^\circ\text{C}$ 。

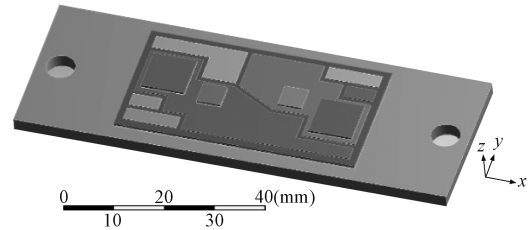


图 5 IGBT 模块有限元模型

Fig.5 Finite element model of IGBT module

IGBT 芯片中心垂直向下路径的热流密度变化曲线如图 6 所示,其中,横坐标表示路径上的点到芯片顶部的距离,纵坐标表示热流密度。

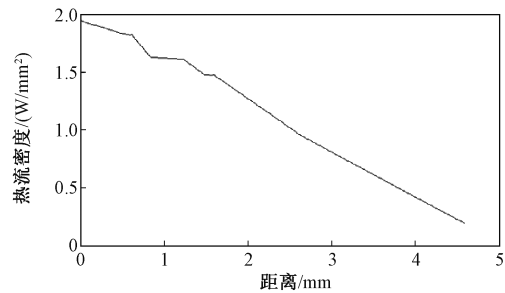


图 6 热流密度变化曲线图

Fig.6 Heat flux curve



由于芯片发出的热量在向下传递的过程中发生了热扩散,热流密度不断减小,但是总热流量不变,从而导致有效导热面积不断增加,而有效导热面积近似为圆形,因此,有效导热面积的半径也不断增加。由 IGBT 模块结构及其模型可知,由于芯片和芯片焊料层形状面积相同,所以从 DCB 上铜层开始通过考虑热扩散角来计算热阻。有效导热面积半径变化曲线如图 7 所示,图 7 中曲线的斜率就反映了热扩散角的大小。

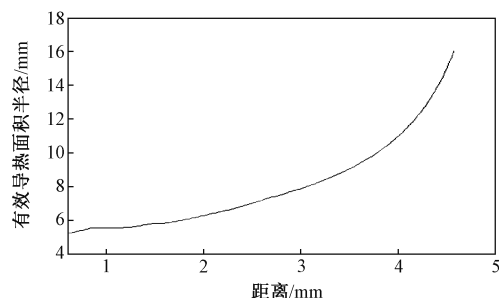


图 7 有效导热面积半径变化曲线图

Fig.7 Curve of radius of effective heat conduction area

由于模块内每一层的热扩散角是不同的,因此,可以将图 7 所示的曲线按照每层的位置分布来分段,对每一段进行线性拟合从而得到该层的热扩散角。事实上热量在每一层中不是完全以相同的角度扩散的,但是文献[22]指出,为了简化模型可以用一个固定的角度来近似。对于这种固定角度热扩散模型,当该层的厚度较小时误差很小,且误差随着厚度的增加而增大。

从图 7 可以看出,对于厚度较小的 DCB 上铜层、DCB 陶瓷层、DCB 下铜层和衬板焊料层,线性度较高,适合线性拟合。但是对于厚度较大的铜底板,线性度较低,不适合线性拟合,否则误差较大,为此,可将铜底板段曲线再次分段。从提高精度和简化计算两方面考虑可将其平均分为三小段,然后对每一小段进行线性拟合从而分别得到铜底板上中下三部分的热扩散角。最终计算出的热扩散角如表 3 所示。

### 2.2.3 热阻和热容的计算

根据表 3 中的热扩散角,利用式(4)和式(5)可对热阻和热容进行计算。应当注意的是,总的热阻除了七层材料的导热热阻之外,还应包含对流换热热阻。对流换热热阻  $R_{nv}$  的计算公式为<sup>[24]</sup>:

$$R_{nv} = \frac{1}{hA_s} \quad (6)$$

表 3 IGBT 模块各层热扩散角

Tab.3 Heat spreading angle of each layer of IGBT module

分层	材料	热扩散角正切值
DCB 上铜层	Cu	1.3518
DCB 陶瓷层	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0855
DCB 下铜层	Cu	0.9892
衬板焊料层	Sn3.5Ag	0.1364
铜底板上部	Cu	1.3305
铜底板中部	Cu	2.0766
铜底板下部	Cu	6.3969

式中,  $h$  为对流换热系数;  $A_s$  为有效对流换热面积,其值等于铜底板底面的有效导热面积。各分层热阻和热容值的计算结果如表 4 所示。

表 4 各分层热阻和热容值

Tab.4 Thermal resistance and thermal capacitance of each layer

分层	热阻值/(K/W)	热容值/(J/K)
IGBT 芯片	0.0417	0.0660
芯片焊料层	0.0229	0.0136
DCB 上铜层	0.0068	0.0794
DCB 陶瓷层	0.1286	0.1132
DCB 下铜层	0.0060	0.0893
衬板焊料层	0.0171	0.0182
铜底板	0.0361	2.9314
对流换热热阻	0.2486	—
总和	0.5078	—

### 2.3 不同热扩散角计算结果的比较

分别用热流密度曲线获得的热扩散角( $\alpha$ )、该层导热系数与下一层导热系数之比的反正切值获得的热扩散角( $\beta$ )和 45°固定热扩散角计算热阻值,结果如表 5 所示。

表 5 不同热扩散角计算的热阻值

Tab.5 Thermal resistance calculated by different heat spreading angles

热扩散角	导热热阻/(K/W)	对流换热热阻/(K/W)	总热阻/(K/W)
$\alpha$	0.2592	0.2486	0.5078
$\beta$	0.1487	0.2687	0.4174
45°	0.2701	0.7760	1.0461

然后用表 5 中的总热阻值计算结温,并与有限元仿真值进行比较。其中,结温等于芯片总损耗乘以总热阻再加上环境温度,误差等于有限元仿真值与计算的结温值之差除以有限元仿真值,结果如表 6 所示。

表 6 不同热扩散角计算的结温值

Tab.6 Junction temperature calculated by different heat spreading angles

	结温/℃	误差(%)
$\alpha$	104.96	-3.6437
$\beta$	90.74	10.3979
45°	189.75	-87.3704
有限元仿真值	101.27	-

通过表 5 和表 6 可以发现,利用热流密度曲线获得的热扩散角计算的结温值最接近有限元仿真值,且误差较小,验证了此方法的有效性与准确性。另外,用 45°固定热扩散角计算的结温值明显偏高,误差很大,这主要是因为,在较厚的铜底板层运用 45°固定热扩散角使得计算的有效导热面积半径和有效对流换热面积明显偏小,从而导致计算出的铜底板热阻和对流换热热阻明显偏大。

### 3 IGBT 模块多芯片热阻抗矩阵模型

#### 3.1 IGBT 模块多芯片热耦合效应研究

对于一个多芯片结构的 IGBT 模块而言,由于不止一个热源,会产生热交叉耦合效应。研究表明<sup>[16]</sup>,与仅运行一个芯片时相比,当所有芯片都运行时,位于模块中间芯片的热阻明显变大。从芯片位置上来看,与外部的芯片相比,中间芯片的温度更高,热阻也更大。因此,为了对多芯片结构 IGBT 模块内的芯片温度进行计算,需要在 Cauer 网络模型的基础上建立热阻抗矩阵模型,利用线性叠加原理对芯片的温度进行计算。IGBT 模块多芯片热阻抗矩阵模型表达式为<sup>[25-27]</sup>:

$$\begin{bmatrix} T_{j1} \\ T_{j2} \\ \vdots \\ T_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} + T_a \quad (7)$$

式中, $T_{jn}$  为第  $n$  个芯片的结温; $P_n$  为第  $n$  个芯片的损耗; $T_a$  为环境温度。

定义热阻抗矩阵如下:

$$R_{th} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,矩阵主对角线上元素  $R_{ii}$  为自热热阻,表示芯片  $i$  损耗对自身温度的影响;非主对角线上元素  $R_{ij}$  为耦合热阻,表示芯片  $j$  损耗对芯片  $i$  温度的影响。

#### 3.2 热阻抗矩阵的计算

对于式(8)所示的热阻抗矩阵,自热热阻的计算方法已在第 2 节给出,因此接下来将对耦合热阻的计算方法进行研究。

热扩散及热耦合效应示意图如图 8 所示。芯片  $j$  发出的热量在向下传递的过程中发生了扩散,并且对芯片  $i$  的温度产生了影响。将芯片中心温度近似看作结温,由图 8 可知,芯片  $j$  的热扩散区域与芯片  $i$  中心垂直向下的直线相交,相交处芯片  $j$  有效导热面积的半径恰好等于两芯片中心的水平距离。

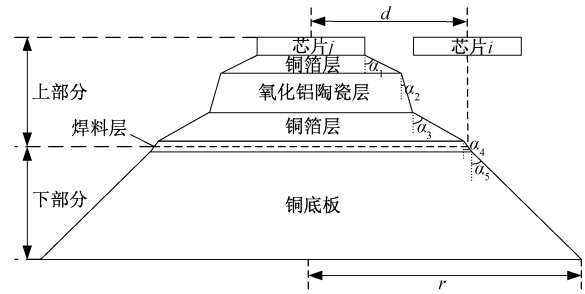


图 8 热扩散及热耦合效应示意图

Fig.8 Schematic of heat spreading and thermal coupling effect

设芯片  $j$  自热热阻里包含的对流换热热阻对应的有效对流换热面积半径为  $r$ ,两芯片中心的水平距离为  $d$ ,那么,只有当  $r > d$  时,芯片  $j$  才会对芯片  $i$  产生热耦合影响,否则可以忽略热交叉耦合效应。

由图 8 可知,若  $r > d$ ,相交处的截面将热流扩散区域分为上下两部分。由于热流从温度高的地方流向温度低的地方,且 IGBT 模块内芯片产生的热量是由上往下传递的,因此,只有截面下部分的热阻会对芯片  $i$  的温度产生影响,所以芯片  $j$  对芯片  $i$  的耦合热阻为截面下部分的热阻,包括耦合导热热阻和耦合对流换热热阻。

对于耦合导热热阻,只需从截面处开始,根据式(4)即可计算。对于耦合对流换热热阻,先分别计算出芯片  $i$  和芯片  $j$  所对应的有效对流换热面积,分别设为  $A_i$  和  $A_j$ ,它们重合的面积为  $A_{ij}$ 。然而,芯片  $j$  的对流换热热阻并不是全部对芯片  $i$  的温度产生影响,只有重合的那部分对流换热区域会对芯片  $i$  的温度产生影响,其影响程度为重合对流换热面积与芯片  $j$  的有效对流换热面积之比。因此,芯片  $j$  对芯片  $i$  的耦合对流换热热阻  $R_{nvij}$  为:

$$R_{nvij} = \frac{A_{ij}}{A_j} R_{nj} \quad (9)$$

式中,  $R_{nvj}$  为芯片  $j$  自热热阻里包含的对流换热热阻。

IGBT 模块芯片分布图如图 9 所示。根据图 9 所示的芯片编号, 并且运用式(3)、式(4)、式(6)、式(8)和式(9), 计算的热阻抗矩阵为:

$$R_{th} = \begin{bmatrix} 0.5078 & 0.1612 & 0.0233 & 0 \\ 0.1429 & 0.9337 & 0.0964 & 0.0203 \\ 0.0203 & 0.0964 & 0.9337 & 0.1429 \\ 0 & 0.0233 & 0.1612 & 0.5078 \end{bmatrix} \quad (10)$$

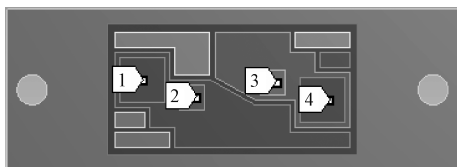


图9 IGBT 模块芯片分布图

Fig.9 Distribution view of IGBT module chip

从式(10)中的数据可以发现, 对于自热热阻, 相同类型芯片的自热热阻相同, 如  $R_{11}$  和  $R_{44}$ ; 不同类型芯片的自热热阻不同, 如  $R_{11}$  和  $R_{22}$ 。对于耦合热阻, 若芯片  $i$  和芯片  $j$  是同一类型芯片, 如芯片 2 和芯片 3 都是 FWD, 那么  $R_{23}$  和  $R_{32}$  值相同; 若芯片  $i$  和芯片  $j$  不是同一类型芯片, 如芯片 1 是 IGBT 而芯片 2 是 FWD, 那么  $R_{12}$  和  $R_{21}$  值不同。另外, 由图 9 可知, 此 IGBT 模块内的结构和芯片分布是中心对称的, 因此,  $R_{12}$  和  $R_{43}$  值是相同的。

### 3.3 对比与验证

当 IGBT 模块内所有芯片都工作时, IGBT 芯片损耗为 157.5W, FWD 芯片损耗为 45W, 环境温度为 25℃, 有限元仿真结果如图 10 所示。

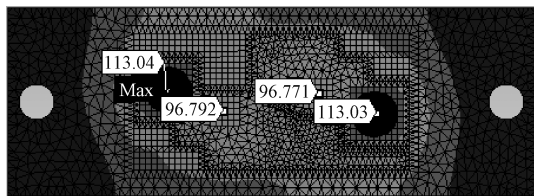


图10 IGBT 模块芯片有限元仿真温度

Fig.10 Finite element simulation temperature of IGBT module chip

根据式(7)和式(10)可计算出 4 个芯片的结温并与有限元仿真值对比, 其中, 误差等于有限元仿真值与计算出的结温值之差除以有限元仿真值, 结果如表 7 所示。

表7 计算值与仿真值对比

Tab.7 Comparisons between calculated and simulated values

芯片号	计算值/℃	仿真值/℃	误差(%)
1	113.28	113.04	-0.2123
2	97.24	96.79	-0.4649
3	97.24	96.77	-0.4859
4	113.28	113.03	-0.2212

由表 7 可以看出, 通过热阻抗矩阵计算出的各芯片结温值比有限元仿真值稍偏大, 这可能是因为对图 7 中铜底板段凹曲线分段线性拟合使得计算出的有效导热面积半径和有效对流换热面积稍偏小, 从而导致计算的铜底板热阻和对流换热热阻稍偏大, 最终导致计算值比仿真值略微偏大。但总体来说两者高度接近, 误差很小, 验证了该模型的有效性与准确性。

## 4 结论

本文以传统的 Cauer 网络模型为基础, 通过研究 IGBT 模块内部传热, 提出以热流密度变化规律确定热扩散角。与其他传统热扩散角取值相比, 用此热扩散角计算出热网络参数进而计算出的芯片结温最接近有限元仿真值, 且误差较小, 较为真实地反映了 IGBT 模块内部热扩散的情况。在此基础上, 深入分析多芯片之间的热耦合效应, 计算自热热阻和耦合热阻并得到热阻抗矩阵, 由此建立 IGBT 模块等效热阻抗模型对各芯片的结温进行计算。通过模型计算结果与有限元仿真值对比, 验证了所提出模型的有效性与准确性。

## 参考文献 (References):

- [1] 龚熙国, 龚熙战 (Gong Xiguo, Gong Xizhan). 高压 IGBT 模块应用技术 (Application technology of high voltage IGBT module) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2015.
- [2] Yang S, Bryant A, Mawby P, et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47 (3): 1441-1451.
- [3] 董少华 (Dong Shaohua). IGBT 器件热可靠性的研究 (The research of thermal reliability of IGBT) [D]. 济南: 山东大学 (Jinan: Shandong University), 2014.
- [4] 孙微, 刘钧, 苏伟, 等 (Sun Wei, Liu Jun, Su Wei, et al.). 直接冷却 IGBT 功率模块散热性能研究 (Capability of accommodating wind power for different dispatching models based on economy) [J]. 电工电能新

- 技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (4): 21-25, 60.
- [5] 刘宾礼, 罗毅飞, 肖飞, 等 (Liu Binli, Luo Yifei, Xiao Fei, et al.). 基于传热动力学作用特征的 IGBT 结温预测数学模型 (Junction temperature prediction mathematical model of IGBT based on the characteristics of thermal dynamics) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (12): 79-87.
- [6] 唐波, 刘任, 吴卓, 等 (Tang Bo, Liu Ren, Wu Zhuo, et al.). 三相电压源逆变器内部 IGBT 模块温度的求解及评估 (Temperature solution and evaluation of IGBT module in three-phase voltage source inverter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (2): 50-58.
- [7] 唐波, 刘任, 鲁少军, 等 (Tang Bo, Liu Ren, Lu Shaojun, et al.). 绝缘栅双极晶体管模块温度的快速求解算法 (Fast algorithm for the temperature of insulated gate bipolar transistor module) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2017, 53 (4): 129-136.
- [8] 魏克新, 杜明星 (Wei Kexin, Du Mingxing). 基于集总参数法的 IGBT 模块温度预测模型 (Temperature prediction model of IGBT modules based on lumped parameters method) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2011, 26 (12): 79-84.
- [9] 陈明, 胡安, 唐勇, 等 (Chen Ming, Hu An, Tang Yong, et al.). 绝缘栅双极型晶体管传热模型建模分析 (Modeling analysis of IGBT thermal model) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2011, 37 (2): 453-459.
- [10] Wang Z, Qiao W. A physics-based improved Caue-type thermal equivalent circuit for IGBT modules [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (10): 6781-6786.
- [11] Wu Z, Su X, Zhu Y. IGBT junction and coolant temperature estimation by thermal model [J]. Microelectronics Reliability, 2018, 87: 168-182.
- [12] Meng J, Wen X, Zhong Y. Studies on the temperature effect on thermal resistance of power modules [A]. 2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference [C]. Beijing, China, 2013. 11-15.
- [13] 黄欢 (Huang Huan). IGBT 功率模块热传导与退化研究 (The research on thermal-conductivity and degradation for IGBT power module) [D]. 天津: 河北工业大学 (Tianjin: Hebei University of Technology), 2014.
- [14] 姚芳, 王少杰, 李志刚 (Yao Fang, Wang Shaojie, Li Zhigang). 基于 IGBT 模块热阻的状态评估研究 (Research on IGBT module state assessment based on thermal resistance) [J]. 现代电子技术 (Modern Electronics Technique), 2017, 40 (10): 133-137.
- [15] Xu Y, Hopkins D C. Misconception of thermal spreading angle and misapplication to IGBT power modules [A]. 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. Fort Worth, TX, USA, 2014. 545-551.
- [16] Stippich A, Neubert M, Sewergin A, et al. Significance of thermal cross-coupling effects in power semiconductor modules [A]. 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference [C]. Auckland, New Zealand, 2016. 1-6.
- [17] Bahman A S, Ma K, Blaabjerg F, et al. A novel 3D thermal impedance model for high power modules considering multi-layer thermal coupling and different heating/cooling conditions [A]. 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. Charlotte, NC, USA, 2015. 1209-1215.
- [18] Li H, Liao X, Li Y, et al. Improved thermal couple impedance model and thermal analysis of multi-chip paralleled IGBT module [A]. 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. Montreal, QC, Canada, 2015. 3748-3753.
- [19] Drofenik U, Cottet D, Musing A, et al. Computationally efficient integration of complex thermal multi-chip power module models into circuit simulators [A]. 2007 Power Conversion Conference [C]. Nagoya, Japan, 2007. 550-557.
- [20] Luo Z. A thermal model for IGBT modules and its implementation in a real time simulator [D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2002.
- [21] Wu R, Wang H, Pedersen K B, et al. A temperature-dependent thermal model of IGBT modules suitable for circuit-level simulations [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52 (4): 3306-3314.
- [22] Vermeersch B, Mey G D. A fixed-angle heat spreading model for dynamic thermal characterization of rear-cooled substrates [A]. Twenty-Third Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium [C]. San Jose, CA, USA, 2007. 95-101.
- [23] 吴岩松, 罗皓泽, 李武华, 等 (Wu Yansong, Luo Haoze, Li Wuhua, et al.). 用于 IGBT 模块结温预测的热-电耦合模型研究 (Researches on electro-thermal model for junction temperature prediction in IGBT modules) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (3): 13-17, 65.
- [24] 罗冰洋, 黄丽婷, 莫易敏, 等 (Luo Bingyang, Huang



- Liting, Mo Yimin, et al.). 大功率 IGBT 散热器水冷热阻计算 (Forced water cooled therma-resistance calculation for high-power IGBT radiator) [J]. 现代电子技术 (Modern Electronics Technique), 2013, 36 (2): 165-170.
- [25] Cheng J, He X. Research on thermal coupling effect of multi-heating sources in MCM [A]. 2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology [C]. Wuhan, China, 2016. 1469-1475.
- [26] Poller T, Arco S D, Hernes M, et al. Influence of thermal cross-couplings on power cycling lifetime of IGBT power modules [A]. 2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems [C]. Nuremberg, Germany, 2012.
- [27] Bahman A S, Ma K, Blaabjerg F. Thermal impedance model of high power IGBT modules considering heat coupling effects [A]. 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition [C]. Shanghai, China, 2014.

## Thermal impedance model for IGBT modules considering heat spreading and thermal coupling

HE Yi-gang, ZHANG Zhong-tao, LIU Jia-cheng, ZHAO Ming, LI Chen-chen

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the traditional thermal equivalent circuit model has large error in calculating the junction temperature of IGBT module, an equivalent thermal impedance model of IGBT module based on heat transfer research is proposed. By studying the heat transfer inside IGBT module, the heat spreading angle is determined according to the law of heat flux variation. Thermal network parameters are calculated and an improved equivalent circuit model of single chip Cauer network is established. Then, considering the thermal coupling effect between multi-chips, the self-heating thermal impedance and coupling thermal impedance are calculated and the thermal impedance matrix of IGBT module is established. The junction temperature of each chip can be predicted by using the linear superposition principle. Finally, the junction temperature calculated by the equivalent thermal impedance model is compared with the finite element simulation value, which verifies the effectiveness and accuracy of the model.

**Key words:** IGBT module; heat spreading angle; thermal coupling effect; thermal impedance model