弹性压接型IGBT封装对芯片电场及热分布的耦合效应研究

岳佳泉，李德资，邵卓潇

（南京南瑞半导体有限公司，南京 210000）

摘 要： 针对弹性压接型IGBT多层接触结构中压接压力变化对芯片热分布与电场分布的耦合影响，采用有限元方法建立考虑接触热阻的三维电-热耦合模型，分析不同压接压力条件下接触热阻、芯片结温及JTE区域电场强度的变化规律。仿真结果表明，压接压力不足会增大界面接触热阻，使芯片局部温度升高，并进一步加剧边缘区域电场集中。当压接压力由10 MPa增至20 MPa时，芯片最高结温由123.6 ℃降至108.1 ℃，降幅约为12.5%；JTE区域最大电场强度由2.14×10^5 V/cm降至1.82×10^5 V/cm。随着压接压力继续增大，热阻、结温和电场强度的改善幅度逐渐减小。

关键词： 弹性压接型封装；IGBT芯片；有限元分析；电-热耦合；计算机仿真；接触热阻

中图分类号： TN322 **文献标识码：** A

Research on coupling effect of elastic press-pack IGBT packaging on chip electric field and thermal distribution

YUE Jiaquan，LI Dezi，SHAO Zhuoxiao

（Nanjing NARI Semiconductor Co.，Ltd.，Nanjing 210000，China）

Abstract: To investigate the coupled effects of clamping pressure variation on chip thermal and electric field distributions in multilayer contact structures of elastic press-pack IGBTs, a three-dimensional electro-thermal coupling model considering thermal contact resistance was established using the finite element method. Variations in thermal contact resistance, chip junction temperature, and electric field strength in the Junction Termination Extension (JTE) region under different clamping pressures were analyzed. Simulation results show that insufficient clamping pressure increases interfacial thermal contact resistance, resulting in a local increase in chip temperature and further aggravating electric field concentration at the chip edge. When clamping pressure increases from 10 MPa to 20 MPa, maximum chip junction temperature decreases from 123.6 ℃ to 108.1 ℃, corresponding to a reduction of approximately 12.5%, while maximum electric field strength in the JTE region decreases from 2.14×10^5 V/cm to 1.82×10^5 V/cm. With a further increase in clamping pressure, improvements in thermal resistance, junction temperature, and electric field strength gradually diminish.

Key words: elastic press-pack packaging, IGBT chip, finite element analysis, electro-thermal coupling, computer simulation, thermal contact resistance

1 引言

随着高压直流输电和大容量新能源并网技术的发展，电力电子装备对功率器件长期运行可靠性的要求不断提高。在反复热循环作用下，传统焊接型IGBT易发生焊层疲劳和界面老化，限制了其在高压、大功率工况下的应用。弹性压接型IGBT采用无焊层物理压接结构，具有双面散热和失效短路等特点，已逐渐应用于高压电力电子装备。

弹性压接型IGBT内部由多层异质材料构成，各层之间通过机械压接实现电流传导和热量传递。受接触表面粗糙度及压力分布影响，界面接触热阻会随压接压力变化[1-2]。当压接压力不足时，界面传热能力下降，芯片局部温度升高，并进一步影响半导体材料的电学特性和边缘区域电场分布[3-4]。因此，压接压力变化会同时作用于器件的热分布和电场分布。

现有研究多采用有限元方法分析压接型IGBT的温度、应力和电场特性，针对不同压接压力条件下接触热阻、芯片结温与JTE区域电场之间关联关系的定量研究仍不充分。为此，本文了建立考虑界面接触热阻的三维

电-热耦合有限元模型，通过分析不同压接压力下接触热阻、芯片最高结温及JTE区域最大电场强度的变化规律，研究压接压力对热分布与电场分布的耦合影响。

2　弹性压接型IGBT电-热耦合模型

2.1　封装结构与接触特征

弹性压接型IGBT通过机械压接实现电气连接与热量传递，其典型子模块采用多层异质材料堆叠结构。该结构自上而下依次由集电极无氧铜（Cu）压块、上部钼（Mo）缓冲层、IGBT硅（Si）芯片、下部钼缓冲层以及带有弹性组件的发射极铜压块组成。

为减小大功率运行过程中不同材料热膨胀系数差异引起的热应力，封装内部采用热膨胀系数与硅接近的钼层作为缓冲结构。同时，利用碟形弹簧组或柔性接触垫形成弹性补偿机构，以吸收加工公差和热膨胀位移，减小压接压力直接作用于硅芯片产生的机械损伤，并维持各接触界面的压力稳定性。

受加工精度和表面粗糙度影响，各材料界面并非完全接触，实际接触主要发生在离散微凸体之间，有效接触面积小于名义接触面积。该特征会限制界面处的热流和电流传输，并形成与局部压接压力密切相关的接触热阻和接触电阻。

2.2　电-热耦合控制方程

弹性压接型IGBT内部温度场与电场分布分别由热传导方程和准静电场方程描述。考虑到材料热物性随温度变化，瞬态热传导方程为：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}=\nabla\cdot(k\nabla T)+Q_v \tag{1}$$

式中，ρ为材料密度；C_p为恒压比热容；k为导热系数；T为温度；t为时间；Q_v为单位体积热源功率密度。模型中的热源主要包括硅芯片功率损耗以及电流流经导电区域产生的焦耳热。

当器件处于高压阻断状态时，内部电场采用准静电场近似，电势与电场强度满足：

$$\nabla\cdot(\varepsilon\nabla V)=-\rho_q \tag{2}$$

$$\boldsymbol{E}=-\nabla V \tag{3}$$

式中，ε为材料介电率；ρ_q为空间电荷密度。

电场与温度场主要通过焦耳热及温度相关材料参数形成耦合关系。对于各向同性导电介质，电流密度满足$\boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E}$，局部焦耳热功率密度可表示为：

$$Q_v=\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{E}=\sigma|\boldsymbol{E}|^2 \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{J}$为电流密度；σ为电导率。式(4)计算得到的焦耳热作为热源项代入式(1)，温度变化则通过改变材料电导率和导热系数进一步影响电流传导与热量传递。在计算过程中，同步求解电场与温度场，并根据局部温度更新相应材料参数，实现电场与温度场之间的耦合计算。

2.3　边界条件与接触参数

为描述压接压力对界面传热性能的影响，依据粗糙表面微凸体接触理论，采用接触热阻与接触压力之间的经验关系：

$$R_{\mathrm{th},c}(P)=R_{\mathrm{th},0}\cdot\left(\frac{P_0}{P}\right)^n \tag{5}$$

式中，$R_{\mathrm{th},c}$为接触压力P下的接触热阻；$R_{\mathrm{th},0}$为参考压力P_0下通过实验标定获得的接触热阻；P为局部接触压力；P_0为参考压力；n为与接触面材料硬度及表面粗糙度有关的非线性拟合指数，本文取0.85。

电-热耦合计算中，各层材料物性参数均按温度相关形式设置。25 ℃条件下主要材料的基础物性参数如表1所列。

表1　弹性压接型IGBT封装关键材料物性参数

材料类型	密度/（kg/m³）	导热系数/（W/(m·K)）	弹性模量/GPa	泊松比	相对介电常数
硅芯片（Si）	2 330	148	162	0.28	11.7
钼极板（Mo）	10 220	138	329	0.31	—
无氧铜（Cu）	8 960	400	110	0.34	—
氮化铝陶瓷（AlN）	3 260	170	310	0.24	9.0

模型边界条件包括热学、电学和力学3类。(1)热学边界：器件底部发射极铜压块外表面设置为对流换热边界，环境温度设为25 ℃，等效表面对流换热系数设置为3 000 W/(m²·K)，器件侧壁设置为绝热边界。(2)电学边界：为模拟器件高压阻断状态，在集电极顶部施加3 300 V直流电压，发射极底部接地，电势设为0 V。(3)力学边界：在集电极顶部施加5~25 MPa均匀压接压力，发射极底部设置固定约束，并根据局部接触压力计算相应的界面接触热阻。基于上述接触参数、材料属性和边界条件，建立考虑压接压力影响的三维电-热耦合有限元模型，用于分析不同压接压力条件下器件内部温度场和电场分布。

3　仿真结果分析

模型采用以六面体单元为主的扫掠网格进行划分，并在材料接触界面及JTE区域进行局部加密，以提高接触传热和边缘电场计算精度。模型总自由度约为1.5×10⁶。在额定功率及3 300 V阻断电压条件下，分别设置5 MPa，10 MPa，15 MPa，20 MPa和25 MPa压接压力，以计算器件内部的温度场和电场分布。

3.1　压接压力对温度场的影响

不同压接压力下器件二维纵截面的稳态温度场分布如图1所示。当压接压力为5 MPa时，芯片与钼缓冲层之间的有效接触面积较小，界面接触热阻较高，热量向外层结构传递受到限制，芯片最高结温达到145.2 ℃，

局部高温区域较为明显。随着压接压力增大，界面微凸体接触程度提高，有效接触面积增加，接触热阻逐渐减小，芯片内部热量能更充分地向两侧极板传递，温度分布也趋于均匀。

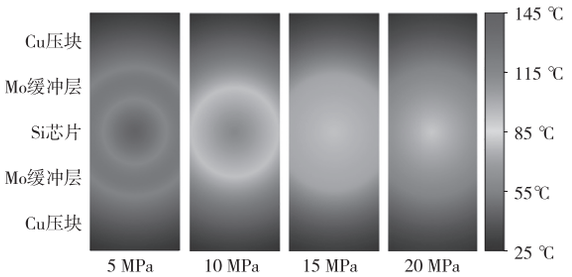

图1 二维纵截面温度场分布

由图1可知，当压接压力为5 MPa时，芯片与钼缓冲层之间的有效接触面积较小，界面接触热阻较高，热量向外层结构传递受到限制，芯片最高结温达到145.2 ℃，局部高温区域较为明显。随着压接压力增大，界面微凸体接触程度提高，有效接触面积增加，接触热阻逐渐减小，芯片内部热量向两侧极板传递更加充分，温度分布趋于均匀。

3.2 电-热耦合下的电场分布

为分析不同压接压力下芯片边缘区域的电场变化，在3 300 V阻断电压条件下提取JTE区域最大电场强度，并与芯片最高结温进行对比，结果如图2所示。

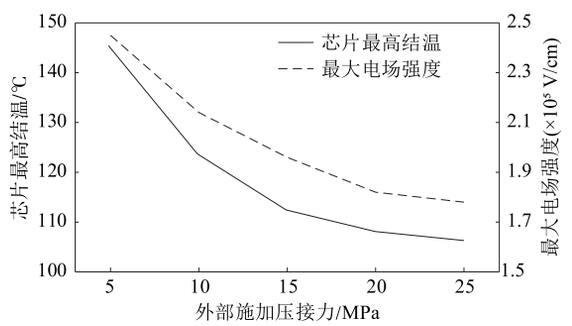

图2 芯片峰值结温与最大电场随机械压力的演化关系

不同压接压力下的界面接触热阻、芯片最高结温和JTE区域最大电场强度如表2所列。

表2 芯片电-热耦合关键参数提取对比

压接压力/MPa	芯片界面接触热阻/(K/W)	芯片最高结温/℃	JTE区域最大电场强度/(V/cm)
5.0	0.185	145.2	2.45×10^5
10.0	0.112	123.6	2.14×10^5
15.0	0.086	112.4	1.96×10^5
20.0	0.071	108.1	1.82×10^5
25.0	0.065	106.3	1.78×10^5

由表2可知，随着压接压力增大，JTE区域最大电场强度逐渐下降，其中5 MPa时为2.45×10^5 V/cm，20 MPa时降至1.82×10^5 V/cm；继续增至25 MPa后仅进一步降至1.78×10^5 V/cm，下降幅度明显减小。压接压力由10 MPa增至20 MPa时，界面接触热阻由0.112 K/W降至0.071 K/W，芯片最高结温由123.6 ℃降至108.1 ℃，JTE区域最大电场强度由2.14×10^5 V/cm降至1.82×10^5 V/cm。上述变化表明，随着压接压力提高，界面传热条件逐步改善，芯片最高结温随之降低，JTE区域的电场集中现象也得到缓解。

3.3 电-热耦合效应分析

压接压力变化会改变材料界面的接触状态，并通过界面接触热阻影响器件内部热量传递。在较低压接压力下，界面接触热阻较大，芯片局部温度升高，材料电学参数随之变化，JTE区域电场集中程度增加；随着压接压力提高，上述耦合作用逐渐减弱，芯片边缘电场集中现象得到缓解。当压接压力由5 MPa增至20 MPa时，界面接触热阻、芯片最高结温和JTE区域最大电场强度均明显下降；继续增至25 MPa后，3项参数的变化幅度明显减小，说明界面接触状态在较高压力下逐渐趋于稳定，继续提高压接压力的改善作用有限。因此，当压接压力处于15~20 MPa时，器件的传热状态和边缘电场分布均得到明显改善；继续增大压接压力后，改善幅度逐渐减小。

4 结束语

本文分析了弹性压接型IGBT封装中压接压力对热分布与电场分布的耦合影响，建立了考虑界面接触热阻的三维电-热耦合模型。研究表明，界面接触状态是连接压接压力、芯片温升与边缘电场变化的重要环节，适当提高压接压力有利于改善器件内部传热和电场分布，但其作用在较高压力范围内逐渐趋于饱和。后续可进一步结合实验测试结果，对接触热阻模型及温度相关材料参数进行修正，以提高模型对实际器件运行状态的表征能力。

参考文献：

[1] 张一鸣，邓二平，赵志斌，等.压接型IGBT器件封装内部多物理场耦合问题研究概述[J].中国电机工程学报，2019，39(21)：6351-6364.

[2] 董国忠，窦泽春，刘国友，等.压接型IGBT的接触热阻模型优化与热特性研究[J].电力电子技术，2018，52(8)：34-37+44.

[3] 李辉，龙海洋，姚然，等.不同封装形式压接型IGBT器件的电-热应力研究[J].电力自动化设备，2020，40(8)：76-81.

[4] 刘招成，崔翔，李学宝，等.弹性压接型IGBT器件封装结构对芯片内部电场的影响研究[J].中国电机工程学报，2023，43(1)：274-283.

作者简介：

岳佳泉(1986—)，本科，研究方向：电气工程及其自动化。