

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2021.04.014

非线性场控电导复合材料参数对IGBT模块内DBC三结合点 电场影响规律仿真研究

项佳宇, 李学宝, 程金金, 杨昊, 赵志斌, 崔翔
(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 高压大功率(insulation gate bipolar transistor, IGBT)模块内覆铜陶瓷基板的覆铜层、陶瓷基板与有机硅凝胶形成的三结合点处电场集中,增加了器件局部放电及绝缘失效的风险。随着IGBT模块电压等级的提高,DBC基板的绝缘水平成为制约器件研制及可靠运行的关键因素。文中拟采用非线性场控电导(nonlinear field grading, NFG)复合材料作为涂层,涂覆于DBC基板三结合点处的局部高场区,以改善电场分布,提高DBC三结合点处的放电起始电压。为此,文中首先通过实验获得了纯硅凝胶灌封的DBC试样三结合点的局放起始电压,然后以局放起始电压作为控制值,借助于有限元仿真获得了对应的电场分布及局放起始场强,依次分析了NFG涂层材料的电气参数对DBC基板三结合点处电场的影响规律,最后给出了NFG参数的选型建议。文中的研究成果对于改善DBC基板局部电场的非线性材料设计提供了理论指导。

关键词: 非线性场控电导率;覆铜陶瓷基板;三结合点;电场分布;有限元

Simulation Study on the Influence Rule of Parameter of No-linear Field Grading Composite on Electric Field at Triple-junction Point of DBC in IGBT Modules

XU Jiayu, LI Xuebao, CHENG Jinjin, YANG Hao, ZHAO Zhibin, CUI Xiang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The electric field concentration at the triple junction point formed by the copper clad layer, ceramic substrate and organic gel of copper clad ceramic substrate in the model of IGBT (insulation gate bipolar transistor) increases the risk of partial discharge and insulation failure of elements. With the increase of voltage class of IGBT module, the insulation level of Direct-Bond Copper (DBC) substrate becomes the key factor restricting the development and reliable operation of elements. In this paper, nonlinear field grading (NFG) composite is intended to be used as the coating to apply at the partial high electric field region at the triple junction point of DBC substrate so to improve the electric field distribution and enhance the discharge inception voltage of the triple junction point of DBC. For this purpose, the partial discharge inception voltage of the triple junction point of DBC sample encapsulated by pure silicone gel is obtained. Then, the partial discharge inception voltage is taken as the control value, the corresponding electric field distribution and initial the electric field strength of partial discharge is obtained with the help of the finite element method (FEM) simulation. The influence rule of electrical parameters of NFG coating material on the electric field at the triple junction point of DBC substrate is analyzed in sequence. Finally, the suggestion on the selection of parameters of NFG is given. The study result in this paper has provided theoretical guidance for improving the design of non-linear material of partial electric field of DBC substrate.

Key words: nonlinear field grading composite; DBC; triple point; electric field distribution; finite element method

收稿日期:2020-11-11; 修回日期:2020-01-08

基金项目:国家自然科学基金(52077073)。

Project Supported by National Nature Science Foundation of China(52077073).

0 引言

覆铜陶瓷基板(direct-bond copper, DBC)与有机硅凝胶材料(silicone gel, SilGel)的三结合点(triple point, TP), 是绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)模块中绝缘薄弱环节。三结合点处电场强度集中, 增加了功率模块内发生局部放电的风险^[1-3]。随着柔性直流输电技术电压等级的提升, 绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)功率模块将承受更高的关断电压, DBC基板的电场将增大, 三结合点处场强更加集中, 场强可能超过封装用灌封胶材料的耐电特性, 从而发生局部放电甚至是击穿^[4]。

SilGel凭借其优异的介电强度与热稳定性, 广泛应用于器件的封装绝缘中^[5]。即使有机硅凝胶的性能优异, 有时也会因为难以承受模块内三结合点处电场集中, 而发生局部放电^[6]。针对这个问题, 目前已有许多学者提出了改进功率模块DBC基板局部放电起始电压(partial discharge inception voltage, PDIV)的方法。Waltrich等人提出了采用沟槽设计提升功率模块DBC基板的耐电能力^[7], 然而这种方案是将最大电场转移到其他位置, 并未解决局部强场过高的问题。Buttay等人提出了一种新型的DBC基板结构设计, 该方法设计了凸台式陶瓷, 利用这种结构改善了三结合点处的电场分布^[8], 这种方案的制造工艺较为困难, 且作者测试了耐电能力, 发现该结构的DBC基板在绝缘油中, PDIV提升了30%, 但在硅凝胶灌封后, PDIV反而下降了, 这是因为在凸台处的硅凝胶材料内易残留无法脱除的气泡。Schletz等人采用了DBC基板覆铜层边缘圆角化设计^[9], 这种方法对PDIV的改进程度有限。Abdelmalik等人测试了采用氟化液绝缘的DBC基板的PDIV, 实验结果表明氟化液具有较好的绝缘性能^[10], 目前尚未能应用氟化液做封装绝缘的原因是氟化液具有低沸点, 难以耐受模块内的高温, 易产生气泡引入绝缘问题。

非线性场控(nonlinear field grading, NFG)材料, 也被称为智能材料, 可以用于改变电场分布, 改善材料绝缘性能, 已经被广泛应用于电力系统的绝缘组件^[11]。目前, 这种智能聚合物复合材料已经被应用于电缆终端绝缘以及发电机线圈绝缘等^[12-14]。

Wang等人设计了非线性介电材料, 用于改善功率模块内部局部放电情况, 复合材料是选用有机硅凝胶作为基体, 填充15%的钛酸钡粉末制成, 复合材料的介电常数表现出对电场的依赖性。依据耐

电和局部放电实验结果, 这种复合材料可以有效降低基板边缘金属凸起处的电场^[15]。Donzel等人将非线性电导材料应用于功率模块中, 这种材料涂层是通过聚酰亚胺作为基料, 氧化锌(ZnO)粉末作为填料制成的复合材料^[16-17], 该方案主要存在的问题是: ①聚酰亚胺液是非常粘稠的, 这些微米级的ZnO压敏陶瓷颗粒很难混合均匀; ②聚酰亚胺材料属于强极性材料, 很难使之良好的粘附在有机硅凝胶上。总之, 可以通过采用非线性场控材料改善DBC基板三结合点处的电场分布, 提高DBC基板的局部放电起始电压, 增强模块封装绝缘的耐电能力。然而, 材料的参数影响材料的行为, 合适的NFG材料参数将有利于绝缘性能的改善; 反之, 不恰当的NFG材料参数反而可能会恶化电场分布。

文中开展了涂覆硅凝胶后的DBC基板的耐电能力实验, 并分析了NFG材料参数的重要性, 仿真计算了材料参数对电场的影响规律。文中的研究将为NFG材料提升DBC基板三结合点处的耐电能力提供指导, 为NFG材料参数设计提供理论依据。

1 实验平台与放电实验

SilGel材料广泛应用于IGBT器件的封装绝缘中^[5]。在研究NFG材料对电场的改善效果之前, 文中首先通过实验测量了纯SilGel封装DBC基板时的局部放电起始特性。

1.1 样品准备

待测样品的DBC基板结构见图1, 该DBC基板是由光刻电极图案, 然后通过化学腐蚀工艺刻蚀掉多余的部分, 形成电极间距为1 mm的板-板电极结构, 电极材质为黄铜。有机硅凝胶灌封于DBC基板的电极间距处, 用于封涂电极间的强场区, 实验测试所用有机硅凝胶材料是基于文[18]中所述工艺制备获得的, 待测样品的主要参数见表1。

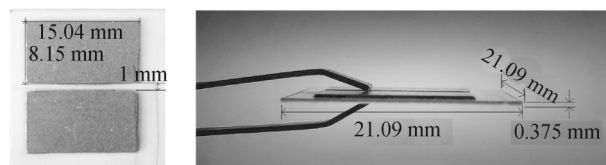


图1 用于表征PDIV的DBC基板样品

Fig. 1 The sample of DBC for characterizing PDIV

1.2 局部放电测试

依据指导局部放电(partial discharge, PD)测试的IEC 61287-1:2014标准, 文中所采用的DBC基板与硅凝胶组成的实验样品的PD测试实验平台见图2。实验平台布置于屏蔽室中, 其中工频高压交流电源用于对待测试品施加高电压; 耦合电容用于

表1 待测样品的主要参数

| Table 1 Main properties of device under test | | |
|--|-----------------------------|-------------------|
| 材料 | 参数 | 数值 |
| DBC | 陶瓷厚度/mm | 0.375 |
| | 覆铜层厚度/mm | 0.290 |
| | 电极间距/mm | 1.000 |
| | 陶瓷边长/mm | 21.040 |
| | 覆铜层长度/mm | 15.040 |
| SilGel (23 °C) | 介电强度/(kV·mm ⁻¹) | 23 |
| | 相对介电常数 | 2.7 |
| | 体积电导率/(S·m ⁻¹) | 10 ⁻¹³ |

保护回路;分压器变比为3 500:1,用于探测输出电压信号;HFCT用于探测回路局放电流信号;样品槽为陶瓷油杯,将待测试品置于样品槽中,并通过鳄鱼夹与电源和接地线形成电气连接,样品槽中充满绝缘油,对待测试品的其他位置进行绝缘保护,确保局部放电发生在硅凝胶涂层的电极间。待测样品为电极间灌封有机硅凝胶的DBC基板样品,在黄铜电极、陶瓷基板与有机硅凝胶处形成三结合点。

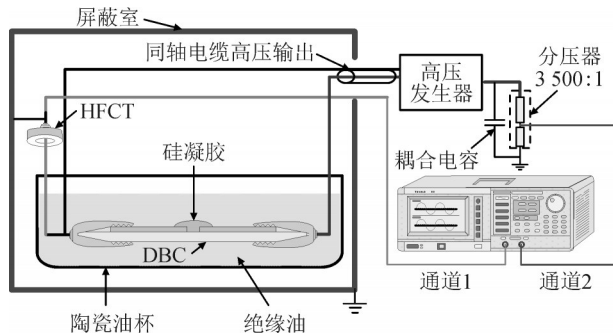


图2 DBC基板灌封纯SilGel样品的PDIV测试实验平台
Fig. 2 Setup for testing PDIV on DBC samples with pure silicone gel encapsulant

采用板—板电极结构研究交流电压下的PDIV见图2,板电极一侧接高压,另一侧接地。实验前先对无样品的测试回路进行放电测量,保证后续样品放电测量的有效性。考虑到样品的差异以及放电的随机性,采用双参数Weibull分布统计PDIV测试结果^[9],PDIV的Weibull分布见图3,其中样品的PDIV的值对应于Weibull分布63%处的累积概率。

灌封纯SilGel样品的PDIV的有效值为8.5 kV见图3,依据IEC 61287-1:2014标准^[20],该样品只能适用于最大电压为8 kV以下的器件,为了适用于更高电压等级的器件,考虑采用NFG材料涂层改善绝缘水平,在设计NFG复合材料时,将采用该数据作为仿真计算中施加的电压控制值。

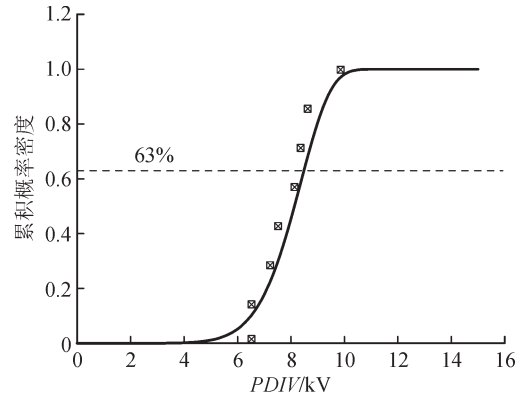


图3 DBC基板灌封纯SilGel样品的PDIV测试数据的Weibull分布(PDIV为有效值)

Fig. 3 Weibull distribution of PDIV on DBC encapsulated by pure SilGel (the value of PDIV is root mean square, RMS)

2 NFG涂层封装结构下的电场分布计算

2.1 仿真模型

考虑样品结构的对称性,在瞬态电流场中建立二维(2-D)有限元仿真模型,模型结构及其局部放大图见图4,两电极间距d为1 mm,仿真模型的详细参数见表2。通过有限元分析法(finite element analysis, FEM)计算电场分布。

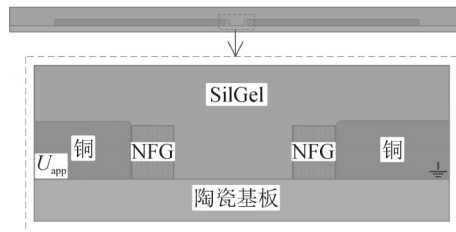


图4 2-D有限元仿真模型示意图

Fig. 4 The 2-D simulation model and its partial enlargement scheme with applying NFG layer

表2 仿真模型基本参数表

Table 2 The basic parameters of the simulation model

| 材料 | 参数 | 数值 | |
|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| DBC | 厚度/mm | 0.375 | |
| | 长度/mm | 21.090 | |
| | 陶瓷 | 相对介电常数 ϵ_s | 9 |
| | | 电导率 σ_s /(S·m ⁻¹) | 10 ⁻¹² |
| Cu | 厚度/mm | 0.29 | |
| | 长度/mm | 8.00 | |
| SilGel | 相对介电常数 ϵ_m | 2.700 | |
| | 电导率 σ_m /(S·m ⁻¹) | 10 ⁻¹³ | |

控制方程如下

$$\nabla \cdot \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (1)$$

$$E = -\nabla U_{\text{app}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: U_{app} 为外施电压, V; J 为传导电流密度, A/m²; E 是电场强度, V/m; ϵ_0 为真空介电常数, F/m; ϵ_r 为相对介电常数。

本构方程为:

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (3)$$

$$J = \sigma_N(E)E \quad (4)$$

式(3)、(4)中, $\sigma_N(E)$ 为场控材料的电导率, S/m。

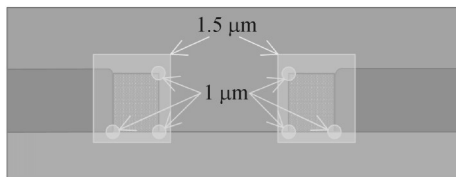
外施工频交流电压 U_{app} 和非线性电导率 $\sigma_N(E)$ ^[21] 的公式如下:

$$U_{\text{app}} = U_m \sin(100\pi \cdot t) \quad (5)$$

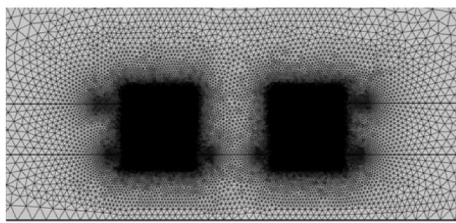
$$\sigma_N(E) = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{E}{E_b} \right)^{\alpha-1} \right] \quad (6)$$

式(5)、(6)中: t 是时间, s; σ_0 是初始电导率, S/m; E_b 是开关场强, V/m; α 是非线性系数; U_m 是外施电压峰值, V。依据 PDIV 实验测试结果, U_m 取值为 $8.5\sqrt{2} \times 10^3$ 。

为了避免仿真时剖分尺寸对仿真精度造成影响, 采用局部细剖及自适应剖分法, 见图 5^[21], 文[22]详述了保证 DBC 基板结构电场计算的准确性的仿真方法。图 5(a)中对应的 6 个圆形区域最大单元尺寸为 $2 \mu\text{m}$, 长方形框剖分区域最大单元尺寸为 $10 \mu\text{m}$, 其余部分采用自适应极细化剖分方式。



(a) 局部细剖区域的说明



(b) 局部剖分效果图

图 5 用于有限元仿真的局部优化剖分说明

Fig. 5 Local optimized mesh used for the finite element simulation

为了分析 NFG 材料对三结合点附近的电场强度的影响规律, 偏移量为 $15 \mu\text{m}$ 处位置线见图 6。图 6 所示 L_1 、 L_2 、 L_3 线上的电场分布, L_1 、 L_2 、 L_3 均位于其最临近表面的 $15 \mu\text{m}$ 处。

首先, 计算了纯 SilGel 封装的 DBC 基板的电场分布, 电场强度随外施电压的增大而增大, 关注峰值电压处的电场分布, L_1 线上的电场分布见图 7。

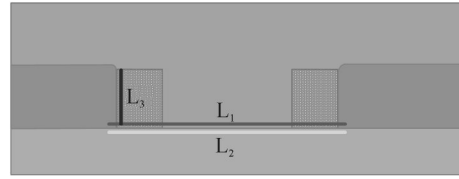


图 6 偏移量为 $15 \mu\text{m}$ 处位置线

Fig. 6 The lines on the surface with $15 \mu\text{m}$ offset

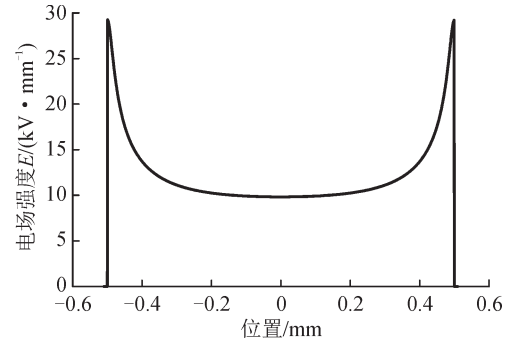


图 7 纯 SilGel 灌封下 L_1 线上的电场强度

Fig. 7 The electric field intensity on L_1 with pure SilGel encapsulant.

如图 7 所示, 电极间的电场强度为 $10 \sim 29 \text{ kV/mm}$, 因此 NFG 材料需要在该电场范围内有效作用。文[23]Ghassemi 等人计算了 NFG 材料封涂 DBC 时的电场分布, 复合材料的介电常数设为 12, 非线性电导率设置为

$$\sigma_{N1}(E) = 3.3 \times 10^{-11} \left[1 + \left(\frac{E}{2.86 \times 10^6} \right)^{11} \right] \quad (7)$$

也就是说初始电导率 σ_0 为 $3.3 \times 10^{-11} \text{ S/m}$, 非线性系数 α 为 12, 开关场强 E_b 为 2.86 kV/mm , 涂层厚度为 0.2 mm 。计算了有 NFG 涂层的电场分布见图 8。

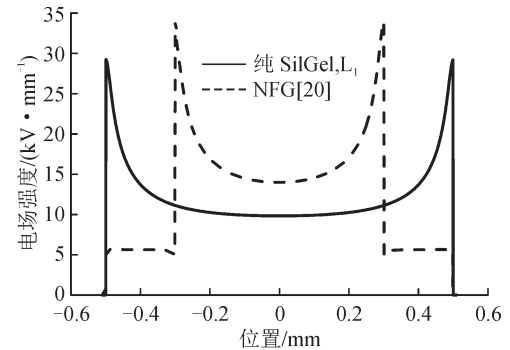


图 8 纯硅凝胶封装和有 NFG 涂层的 DBC 基板在 L_1 线上的电场分布图

Fig. 8 The comparison of electric field distribution of DBC on L_1 with pure silicone gel and NFG composite encapsulant

如图 8 所示, 含 NFG 材料涂层封装结构的最大电场强度增加为 33.9 kV/mm , 且电场分布更加集中, 灌封效果比用纯硅凝胶材料封装的最大电场还大, 因此, 该 NFG 材料的引入反而大大恶化了电场。至

此,可知NFG复合材料的参数对电场分布有较大影响,不恰当的参数选择,可能恶化电场分布。为充分利用NFG材料改善DBC基板的局放起始电压,需要研究NFG材料参数对电场的影响规律。

2.2 NFG复合材料参数对电场分布的影响

为了改善电场分布,需要优化设计和选择NFG复合材料,文中分别研究了NFG复合材料的相对介电常数、电导率参数对电场分布的影响规律。

2.2.1 NFG材料相对介电常数的影响

假设NFG材料涂层对称的封涂在电极两侧,且厚度均为0.2 mm,如图4所示,因此,模型中,横坐标-0.3~0.3 mm之间是SiGel, -0.5~-0.3 mm和0.3~0.5 mm区域为NFG材料。由于填料的相对介电常数一般较高,因此以有机硅凝胶作为基料时,复合材料的相对介电常数将高于有机硅凝胶的介电常数,为了分析NFG材料的介电常数 ϵ_N 对电场分布的影响,设置NFG材料的电导率 σ_N 为 10^{-13} S/m,分别计算了相对介电常数介于2.7~20之间时,电极间 L_1 线上的电场分布情况,见图9。

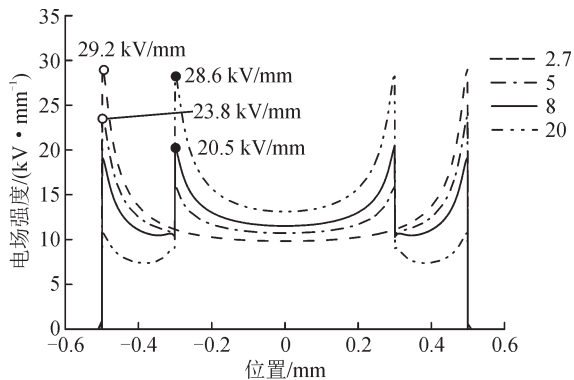


图9 NFG材料涂层的相对介电常数对电场分布的影响

Fig. 9 The electric field distribution on L_1 with different kinds of permittivity of NFG composite

如图9所示,随着NFG材料的相对介电常数的增加,最大电场强度先降低后上升。根据仿真结果,当 ϵ_N 为2.7时,最大电场强度为29.2 kV/mm,并且位于NFG材料与DBC基板的三结合点处。然而当 ϵ_N 为20时,最大电场强度为28.6 kV/mm,位于有机硅凝胶与NFG材料涂层和陶瓷基板的三结合点处。虽然较低的介电常数会使有机硅凝胶内的场强大大降低,但是可能导致NFG材料内的电场较大,因此需要权衡NFG材料的绝缘性能是否可以达到要求。为了优化电场分布,依据仿真结果,当 ϵ_N 在8附近时,电场分布得到了优化,最大场强为20.5 kV/mm,相比于纯硅凝胶灌封结构的最大电场29.2 kV/mm而言,最大电场削弱了29.8%。

2.2.2 NFG材料电导率的影响

保持与图4中仿真模型结构不变,将NFG材料涂层仍对称的封涂于电极两侧,厚度设置为0.2 mm。NFG材料的电导率受到初始电导率、非线性系数和开关场强的影响,是耦合了3个变量的非线性公式,仿真计算中难以调控,为确定电导率对电场分布的影响规律,文中首先计算了线性电导率涂层对电场分布的影响规律,以获得期望的电导率分布区间。仿真模型中涂层材料的介电常数 ϵ_N 设置为2.7,分别计算了电导率介于 10^{-13} ~ 10^{-6} S/m之间时,电极间 L_1 线上的电场分布情况,见图10。

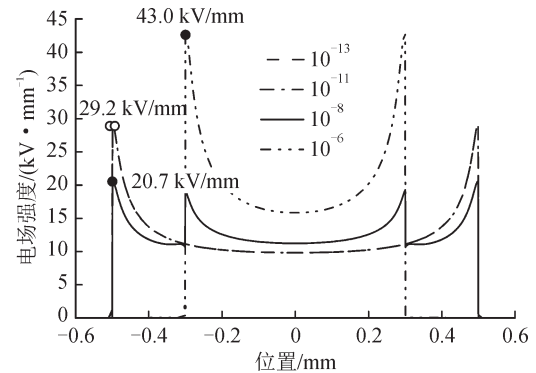


图10 线性材料的电导率对电场分布的影响

Fig. 10 The electric field distribution on L_1 with different kinds of conductivity of NFG material

如图10所示,线性材料的电导率对电场也有较大影响,这表明NFG材料的初始电导率的设计很重要。如果NFG材料的电导率较低,即 σ_N 低于 10^{-11} S/m时,涂层对电场分布的改善效果较小,基本不影响电场分布;而如果NFG材料的电导率较大,例如 σ_N 达到 10^{-6} S/m,则NFG材料区域几乎可等效为导体,NFG材料内部承压很小,相当于大大缩短了电极间距,从而增大了电场强度, L_1 上的最大电场强度可达43 kV/mm,降低了封装结构的耐电能力。为直观展示NFG材料电导率对电场的影响规律,图10只展示了其中4种电导率,实际仿真中,根据仿真结果可知,NFG复合材料的电导率大约在 10^{-9} ~ 10^{-8} S/m范围内,可以有效改善电场分布。

NFG复合材料是将半导体颗粒混合入聚合物基料中制备而成,NFG材料的场控特性主要体现在NFG材料的开关场强 E_b 、非线性系数 α 和初始电导率 σ_0 ,这些参数主要是通过渗透阈值(percolation threshold)和填料的种类及形状来调整。

1)依据NFG材料的电导率表达式,初始电导率高于 10^{-6} S/m的颗粒不能作为NFG材料的填料。此外,NFG复合材料的电导率随着电场 E 的增加而迅

速增加,因此,在工作电场范围内,最大电场作用下,电导率不能高于 10^{-6} S/m,所以在应用时,需要考虑NFG材料所能达到的最大电导率。同时,如果非线性系数 α 太高时,也会导致NFG材料的电导率迅速增加,所以开关场强 E_0 和非线性系数 α 的选择也应该在工作场强区域下合理设置。

2)如图7.9所示,根据局部放电实验测试与电场分布仿真计算结果,电极间电场强度范围为10~29 kV/mm,因此,NFG复合材料的电导率 σ_N 需在该电场范围内达到 10^{-9} ~ 10^{-8} S/m,为了让材料达到相关的性质,需要对应选择填料颗粒的种类、形貌、填充量等。

依据仿真结果,可以通过改变NFG复合材料的导电性来改善电场分布,考虑到复合材料的制造工艺,填料的介电常数、填料晶界所决定的开关场强、填料的非线性系数以及复合材料的初始电导率是可以通过对填料的设计而实现灵活调节的,文中提出一些可供选择的NFG材料参数分别记为NFG-II(见式8),NFG-III(见式9)和NFG-IV(见式10),NFG材料的电导率与场强的非线性关系见图11。

$$\sigma_{N2} = 2 \times 10^{-11} [1 + (\frac{E}{3})^2] \quad (8)$$

$$\sigma_{N3} = 10^{-11} [1 + (\frac{E}{10})^{10}] \quad (9)$$

$$\sigma_{N4} = 3 \times 10^{-10} [1 + (\frac{E}{10})^5] \quad (10)$$

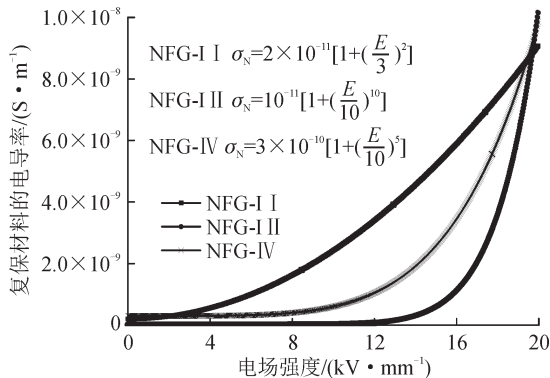


图11 3种NFG复合材料的非线性电导率

Fig. 11 Three kinds of $\sigma_N(E)$ characteristics of NFG composite are listed.

分别计算了3种NFG复合材料涂层作用后, L_1 线上的电场分布情况,见图12。

如图12所示,依据仿真结果在3种NFG材料涂层作用后, L_1 线上的电场分布大致相同。这是由于NFG复合材料参数的选择是依据仿真结果分析,已经选择了的较优参数。与纯硅凝胶灌封相比,最大电场强度已明显降低,降低了约26.7%,相当于可以提升局部放电起始电压38%。

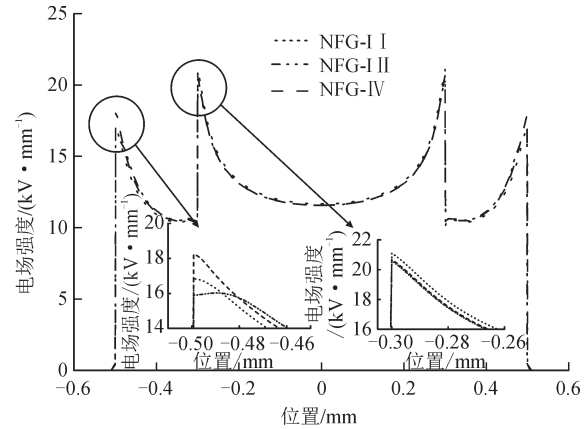


图12 不同种类NFG复合材料涂层下的 L_1 线上的电场分布

Fig. 12 The electric field distribution on L_1 with different kinds of NFG layers

此外,除灌封胶是绝缘薄弱环节外,降低灌封胶的电场可能使得陶瓷内部电场增加或者NFG材料内部电场增大,因此需要分别关注 L_2 和 L_3 上的电场分布。假设NFG复合材料的电导率为

$$\sigma_N = 3 \times 10^{-10} [1 + (\frac{E}{10})^5] \quad (11)$$

纯硅凝胶灌封与NFG复合材料灌封下 L_2 和 L_3 线上的电场分布见图13。增加NFG复合材料涂层灌封后,陶瓷内部和高压侧附近的电场强度均减弱,陶瓷内部 L_2 线上的最大场强降低了24.4%,高压侧 L_3 线上的场强降低了约37%。因此,这些区域不会成为限制DBC绝缘性能的因素。

为了分析NFG复合材料对DBC三结合点的改善作用,文中定义了电场不均匀系数 η ,电场不均匀系数 η 是最大电场强度与平均电场强度的比值。

$$\eta = \frac{E_{\max}}{E_{\text{ave}}} \quad (12)$$

$$E_{\text{ave}} = \frac{U_m}{d} \quad (13)$$

式(12)、(13)中: E_{\max} 是 L_1 线上的最大电场强度,kV/mm;在文中的仿真结构下 U_m 电极间施加的电压的峰值,此处取 $8.5\sqrt{2}$ kV; d 是电极间距离,取1 mm。

计算了不同灌封材料下的最大电场,并依据式(13)计算了对应灌封材料的场不均匀系数,见表3。仿真结果表明,采用NFG-III非线性涂层,最大电场强度降低了29.5%,等效于PDIV提升约41.8%。

3 结论

文中计算分析了NFG材料在改善功率器件中DBC与有机硅凝胶三结合点处的电场分布的参数影响规律,为非线性场控电导复合材料在提升DBC

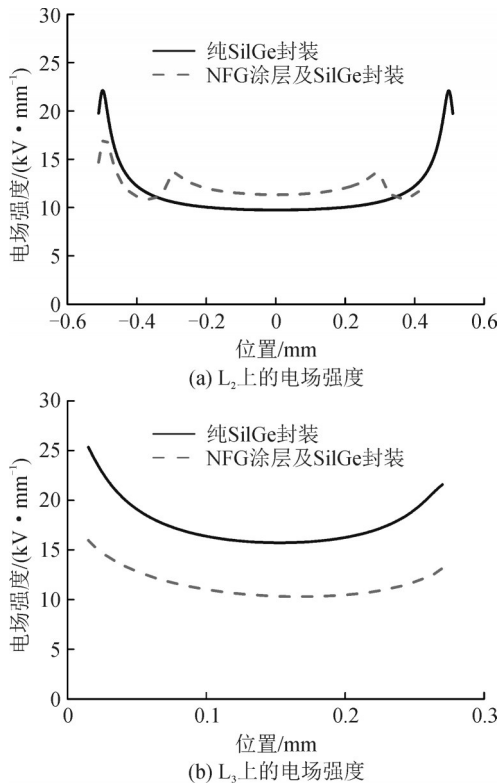


图13 纯硅凝胶灌封与NFG复合材料灌封下 L_2 和 L_3 线上的电场分布

Fig. 13 The electric field distribution on L_2 and L_3 encapsulated by pure SiGel and NFG composite.

表3 不同灌封材料下的最大电场及场不均匀系数

Table 3 Simulated electric field intensity of DBC with different kinds of encapsulants

| 灌封胶 | $E_{max}/(kV \cdot mm^{-1})$ | η |
|-----------------|------------------------------|--------|
| SilGel | 29.20 | 2.43 |
| SilGel& NFG I | 33.89 | 2.82 |
| SilGel& NFG II | 21.10 | 1.75 |
| SilGel& NFG III | 20.59 | 1.71 |
| SilGel& NFG IV | 20.68 | 1.72 |

基板应用中参数的选择提供理论指导和分析思路。主要获得以下结论:

1)通过实验测量了纯SiGel封装DBC基板时的局部放电起始特性,获得了其放电起始电压,明确DBC三结合点处的过高场强是制约其在更高电压等级的器件中应用的主要制约因素。

2)提出了采用NFG复合材料涂层改变DBC三结合点处的电场分布的方法,借助于仿真分析手段,揭示了NFG复合材料介电常数和电导率对DBC三结合点的电场分布的影响规律。

3)通过仿真分析结果,在制备和选择NFG复合材料时,其相对介电常数应小于8,按照实际封装结构的电场强度范围,电导率应介于 $10^{-9} \sim 10^{-8} S/m$ 。

以此为依据模拟了3种NFG材料电导率,计算结果表明3种材料对电场均有改善,其中选用NFG-III涂层时,有机硅凝胶内的电场降低为20.59 kV,相比于纯硅凝胶灌封,最大电场降低了29.5%,等效于PDIV提升了41.8%。

参考文献:

- [1] HOURDEQUIN H, LAUDEBAT L, LOCATELLI M L, et al. Metallized ceramic substrate with mesa structure for voltage ramp-up of power modules[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2019, 87(2): 20903.
- [2] BAYER C F, DIEPGEN A, FILIPPI T, et al. Electrochemical corrosion on ceramic substrates for power electronics—causes, phenomenological description, and outlook[C]//CIPS 2018 10th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. [S.l.]:VDE, 2018: 1-7.
- [3] 徐永生,罗兵,张福增,等.氟化液沸腾工况下的局部放电特性分析[J]. 高压电器, 2020, 56(1):128-134.
XU Yongsheng, LUO Bing, ZHANG Fuzeng, et al. Analysis on partial discharge characteristic of fluor - inert liquid under boiling condition[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):128-134.
- [4] DONZEL L, SCHUDERER J. Nonlinear resistive electric field control for power electronic modules[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 955-959.
- [5] 赵慧宇,丁娉,姜其斌,等.IGBT用双组分加成型有机硅凝胶的国产化研究[J]. 特种橡胶制品, 2013, 34(3): 31-33.
ZHAO Huiyu, DING Ting, JIANG Qibin, et al. Research on the localization of two components silicone gel used for encapsulating IGBT power modules[J]. Special Purpose Rubber Products, 2013, 34(3):31-33.
- [6] FREY D, SCHANEN J L, AUGÉ J L, et al. Electric field investigation in high voltage power modules using finite element simulations and partial discharge measurements [C]//Industry Applications Conferenc. 38th IAS Annual Meeting. [S.l.]:IEEE, 2017: 1000-1005.
- [7] WALTRICH U, BAYER C F, REGER M, et al. Enhancement of the partial discharge inception voltage of ceramic substrates for power modules by trench coating[C]//International Conference on Electronics Packaging (ICEP). [S.l.]: IEEE, 2016: 536-541.
- [8] REYNES H, BUTTAY C, MOREL H. Protruding ceramic substrates for high voltage packaging of wide bandgap semiconductors[C]//IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). [S.l.]: IEEE, 2017: 404-410.

- [9] SCHLETZ A, NOMANN M, RAUCH M, et al. Reliability of insulating substrates—High temperature power electronics for more electric aircraft[C]//Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications. [S.l.]:IEEE, 2011: 1-7.
- [10] ABDELMALIK A A, NYSVEEN A, LUNDGAARD L E. Partial discharges in liquid embedded power electronics: Effects of pressure and liquid nature under negative pulse voltage stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 1119-1125.
- [11] 何金良,谢竟成,胡 军.改善不均匀电场的非线性复合材料研究进展[J].高电压技术,2014,40(3):637-647.
HE Jinliang, XIE Jingcheng, HU Jun. Progress of nonlinear polymer composites for improving nonuniform electrical fields[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 637-647.
- [12] CHRISTEN T, DONZEL L, GREUTER F. Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(6): 47-59.
- [13] KIMURA Y, HARA S, HAYAKAWA R. Nonlinear dielectric relaxation spectroscopy of ferroelectric liquid crystals [J]. Physical Review E, 2000, 62(5): R5907.
- [14] ROBERTS A. Stress grading for high voltage motor and generator coils[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1995, 11(4): 26-31.
- [15] WANG N, COTTON I, ROBERTSON J, et al. Partial discharge control in a power electronic module using high permittivity non-linear dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4): 1319-1326.
- [16] DONZEL L, SCHUDERER J. Nonlinear resistive electric field control for power electronic modules[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 955-959.
- [17] 周 垚,刘继平,赵孝磊,等.绝缘料电阻率对直流电缆电场分布影响及其调控[J].高压电器,2020,56(8):155-160.
ZHOU Yao, LIU Jiping, ZHAO Xiaolei, et al. Influence and regulation of insulation material resistivity on DC cable electric field distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8):155-160.
- [18] 项佳宇,李学宝,崔 翔.高压大功率IGBT器件封装用有机硅凝胶的制备及耐电特性研究[J].电工技术学报, 2021, 36(2):352-361.
XU Jiayu, LI Xuebao, CUI Xiang. Research on preparation process and breakdown properties of silicone gel used for the encapsulation of IGBT power modules[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(2): 352-361.
- [19] FABIANI D, SIMONI L. Discussion on application of the Weibull distribution to electrical breakdown of insulating materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1): 11-16.
- [20] Railway applications - power converters installed on board rolling stock-part 1: Characteristics and test methods: IEC 61287-1:2014[S]. 2014.
- [21] CHRISTEN T, DONZEL L, GREUTER F. Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(6): 47-59.
- [22] BAYER C F, BAER E, WALTRICH U, et al. Simulation of the electric field strength in the vicinity of metallization edges on dielectric substrates[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 257-265.
- [23] TOUSI M M, GHASSEMI M. Combined geometrical techniques and applying nonlinear field dependent conductivity layers to address the high electric field stress issue in high voltage high-density wide bandgap power modules[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 305-313.

项佳宇(1992—),女,博士研究生,主要从事高压大功率电力电子器件封装绝缘研究(E-mail:ncepuxjy@163.com)。

李学宝(1988—),男,副教授,博士,主要从事高压大功率电力电子器件封装。

赵志斌(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事高电压大功率半导体器件测试与封装。

崔 翔(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事电磁场理论及其应用、先进输电技术、电力系统电磁环境与电磁兼容、高电压大功率半导体器件测试、建模与封装技术等研究。