

BaTiO₃ 复合硅胶对 IGBT 模块内部电场分布的影响

王昭, 刘曜宁

(中车永济电机有限公司 半导体分公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 随着 IGBT 高压功率模块的发展, 模块内部电场绝缘问题也显得越来越重要。功率模块封装中使用的硅胶的电场承受能力直接影响了整个模块的绝缘表现。目前已经有学者研究了一系列方法来优化电场表现, 提高可靠性。本文通过使用有限元分析方法, 分析和确定模块中最大电场存在的位置并提出相应的优化解决方案。

关键词: IGBT 模块; 硅胶; BaTiO₃; 有限元分析; 电场模拟; 局部放电

中图分类号: TM215.92 文献标识码: A 文章编号:

Influences of BaTiO₃ silicone composite on the electric field distribution in IGBT modules

WANG Zhao, LIU Yaoning

(Semiconductors Branch, CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: With the development of the IGBT high voltage power module, it leads to serious problems concerning the electric field insulation. The electric field capabilities of the silicone gels used in the power module encapsulation directly affect the module insulation. Some solutions have been developed to optimize the electric field and reliability. In this letter, the finite element simulation was used to analyze and localize the maximum electric field position; solutions were proposed to improve the module insulation.

Key words: IGBT module; silicone gel; BaTiO₃; finite element analysis; electric field simulation; partial discharge

随着近些年来高压 IGBT 模块的发展和使用 (电压已达到 6.5kV), 随之而来的就是对模块内部绝缘介电材料性能要求的提高^[1]。通常我们使用硅胶对 IGBT 模块进行电气绝缘保护, 主要是因为它拥有良好的导热, 机械和电学性能。然而, 在模块电压日益增大时, 内部局部电场过高就成为导致硅胶中产生局部放电或击穿的重要原因之一^[2-5]。目前可以通过以下两个方向来研究缓解这一问题, 一是研究新的耐压能力更好的电介质凝胶^[6-8]; 二是通过研究分析找到最大电场存在的位置, 并通过模型结构改进使得电场得到改

善, 降低到电介质材料所能容忍的限度^[9-11]。

在 IGBT 模块中有三个主要的介电系统, 一是陶瓷基板, 通常使用氧化铝或氮化铝 (AlN) (本文中氮化铝展开研究); 二是封装用的硅胶 (Silicone gel), 其作用是防止模块局部放电或击穿; 三是前面两个介质的界面处, 通常这里也是 IGBT 功率模块绝缘最薄弱的部分^[12-15]。

陶瓷基板的质量, 硅胶的使用环境温度和湿度是影响局部放电的重要因素, 然而尽管如此, 制约功率模块局部放电最关键部位还是在陶瓷基底与铜金属

收稿日期: 2016-08-10 通讯作者: 王昭

作者简介: 王昭 (1987—), 男, 陕西西安人, 博士, 中级工程师, 主要从事 IGBT 模块封装和工艺研究, 通信地址: 陕西省西安市经开区凤城十二路中车永济电机有限公司, 邮编: 710018, 联系电话: 029-86101306, E-mail: wangz_crrc@163.com ;

刘曜宁 (1988—), 男, 山西永济人, 硕士, 中级工程师, 研究方向为 IGBT 模块焊接工艺工序, E-mail: 365317813@qq.com

化层边缘,因此在这个位置的硅胶就不仅仅是防止自身内部放电,还要有防止基板与电极边缘放电的作用,而且有研究人员认为 IGBT 功率模块局部放电的主要来源就是在基板和铜层与硅胶的界面处^[16]。本文通过有限元分析的方法,来分析功率模块中最大电场存在的位置,并提出以对硅胶的掺杂改性,来解决模块内部局部电场过高的现象,同时提出局部放电测试的验证方法。

对工业产品来说,新材料和工艺的研发周期太长而且研发费用也比较高,因此,利用软件进行产品工艺设计是一种高效的解决方案。通过有限元分析方法可以模拟模块中的电场强度分布,很容易就可以找到 IGBT 模块中电场强度最大的位置。然而模拟也有它的局限性,因为实际产品中会存在焊接缺陷,空洞等因素,但是仍然可以通过电场模拟对比从整体上得出模块绝缘比较薄弱的位置,因此它是一种高效的实验验证方案。

1 实验建模

利用电场模拟方法来寻找功率模块内部高电场强度的分布位置,有益于优化版图结构,从而得到最优化的设计方案。通过模拟结果可以得到整个模块内部的电场分布情况,有效降低产品的开发成本。

本文仿真使用 Ansoft Maxwell 3D 电磁场仿真软件,它并不是专业半导体模拟软件,但它被广泛应用于以电磁分析为目的的而各种应用场景下。对于使用有限元分析软件来说,最重要的步骤就是网格的划分。对这种有薄膜层的结构来说网格的划分并不容易,边角处的网格划分尺寸必须很小以避免收敛问题,同时,划分成的四面体总数量又不能太多,因此仿真条件设定时需要有一定的推理和预判能力。

图 1 所示为,IGBT 模块的截面示意图,然后我们根据实际生产中使用的覆铜陶瓷基板(DBC)尺寸,构建一个上下两层铜金属化层覆盖的氮化铝(AIN)陶瓷基板模型,如图 2 所示。

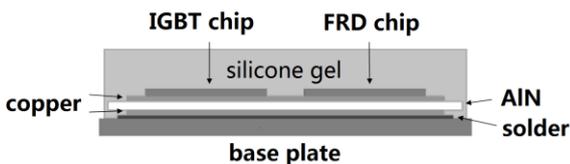


图 1 典型 IGBT 模块截面图

Typical cross section view of IGBT module

在进行电场仿真时,集电极铜层上施加高电压,发射极铜层接地,仿真在 50 Hz 的频率下进行。在对

IGBT 模块电场仿真时,我们将整个模块仅简化为 DBC 基板和硅胶,这是因为 Maxwell 不能进行专业的半导体特性的模拟,所以当把 DBC 上方芯片被看作有介电常数和阻抗的半导体硅的时候,硅芯片表面上的电场强度几乎和铜层上是一致的,当然这是相对较为理想的一种仿真状态,因为其忽略了芯片中可能存在的某些特殊结构。

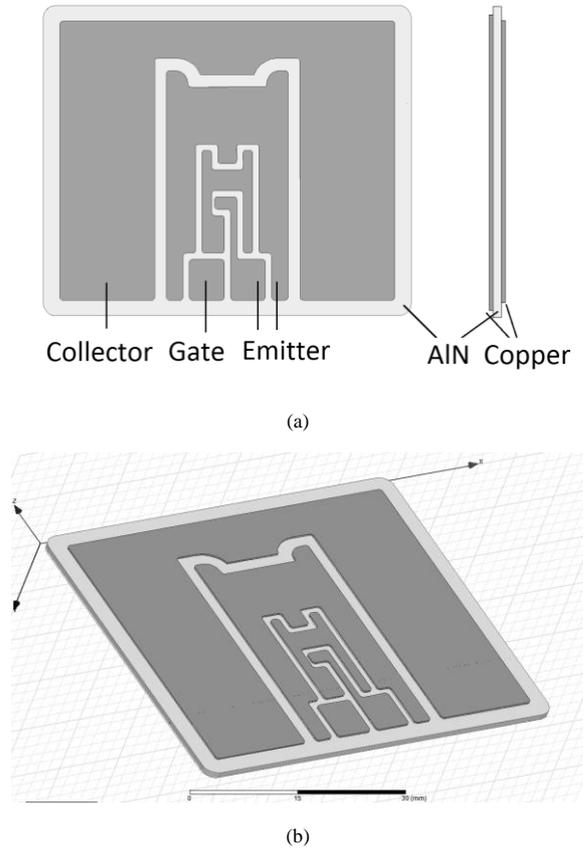


图 2 (a) DBC 基板结构示意图 (b) DBC 基板仿真模型

(a) DBC figure of structure (b) DBC simulation model

2 结果与分析

以 6.5 kV IGBT 模块模型为例,当在集电极铜电极施加 6.5 kV 电压,发射极接地,电场强度的峰值主要集中在 AIN 基板和铜金属化层的界面边缘处,从图 3 中 DBC 基板表面电场分布的有限元分析结果可以很明显看出。

AIN 基板与铜金属化层界面边缘的高电场很容易导致功率模块局部放电测试时发生失效击穿,而降低边缘电场的一种有效方法就是,通过对介质的硅胶进行改性或替换新的介质材料,使其达到提高局部放电时的耐压和提高功率模块可靠性的目的。

目前来看,使用具有介电非线性的新型材料(介电常数随外加电场变化)来充当绝缘填充介质,这可能是缓解 AIN 基板与铜金属化层界面边缘高电场

的一个很好的选择^[17-19]。

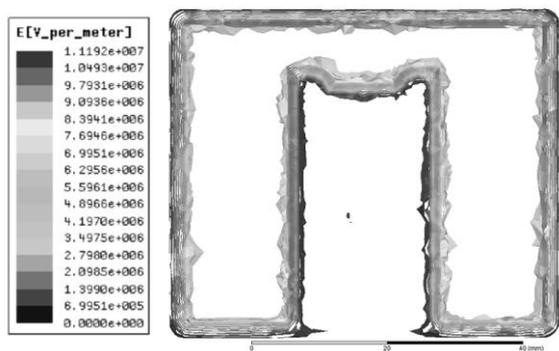


图3 DBC基板表面电场分布图(6.5 kV电压时)

Electric field distribution map of DBC surface (under 6.5 kV)

研究发现, 在用于封装的硅胶进行铁电陶瓷粉体填充后, 其在外加一定电场时, 分散在硅胶内部的铁电颗粒会发生自发极化和电畴分布, 这种增强的极化现象就会使得铁电颗粒与硅胶这种复合材料产生介电常数的增加。同时在复合硅胶体系中, 复合材料的居里温度(铁电体发生相变的温度点)会远高于 IGBT 模块工作的最大结温 150 °C, 因此不用担心复合硅胶材料会产生自发极化突然消失的情况。重要的是, 这种介电可调的效应或机理只能在交流电场条件下实现, 符合功率模块的工况。

研究发现使用钛酸钡(BaTiO₃)陶瓷粉体作为与硅胶的复合材料时, 钛酸钡粉体与硅胶的复并不会明显改变硅胶本身的粘性和固化特性^[6]。在使用钛酸钡粉料填充的硅胶注入模块前, 首先对其介电性能进行分析测试, 主要针对复合材料的介电常数, 耐压和介电可调特性测试。室温条件下, 硅胶的介电常数为 2.9, 钛酸钡的介电常数约为 1700 左右, 介质材料 0-3 复合介电常数理想公式为:

$$\ln \varepsilon_{eff} = f \ln \varepsilon_i + (1 - f) \ln \varepsilon_m \quad (\text{公式 1})$$

其中, f 为混合的体积比, ε_i 为掺入的陶瓷粉体的介电常数, ε_m 为硅胶的介电常数。通过计算可以得到, 在钛酸钡陶瓷粉以 15% 体积比均匀混入硅胶后, 通过计算得到复合硅胶体系的理论有效介电常数 ε_{eff} 为 5.42, 相比纯硅胶的介电常数提升非常大。有研究人员通过实验发现, 此复合硅胶体系材料实际通过偏置电压测试, 可得到的介电常数随电场强度的变化关系为^[6]:

$$\varepsilon_r(E) = 6.4 + 1.3E \quad (\text{公式 2})$$

也就是说, 当复合硅胶处于较高的偏置电场时, 它的介电常数也会随之增大。

若纯硅胶的介电常数为 2.9, 而混有粉体的硅胶

因为界面边缘处的高电场导致介电常数增加约为 15 左右, 为了更深入分析模块内分别注入纯硅胶和掺杂改性硅胶后, 铜金属化层和 AlN 陶瓷界面边缘电场的变化情况, 我们利用 Maxwell 3D 软件同时对这两种条件下的电场分布情况进行仿真, 通过仿真可以得到 IGBT 模块横截面处电势分布情况如图 4 所示, 从图中可以明显看出, 在复合硅胶中电势的弥散过程更加快速, 同时在铜金属化层和 AlN 陶瓷的界面边缘处, 电场强度的下降也比较明显, 可以有效降低界面边缘处的电场强度。

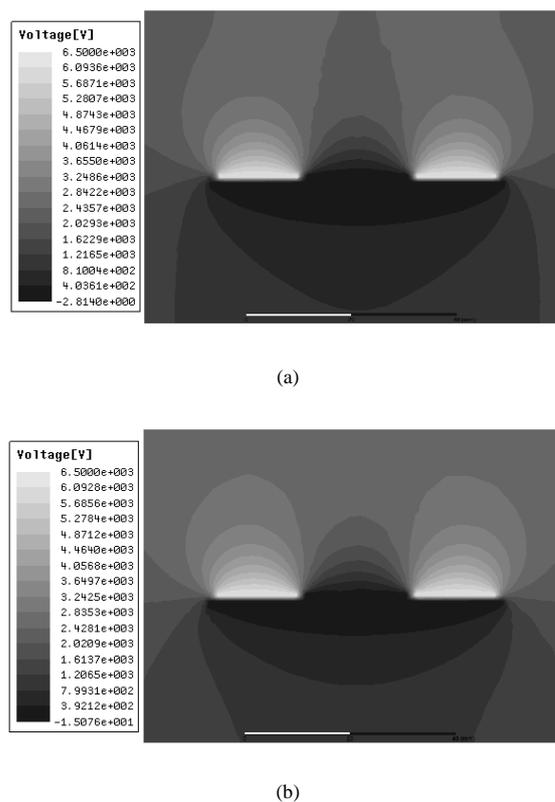


图 4 (a)纯硅胶中电势分布图 (b)为复合硅胶中电势分布图

(a) Voltage distribution map for silicone gel (b) voltage distribution map for silicone composite

图 5 所示为 DBC 基板横截面 AlN 表面电场强度从左到右的变化曲线, 通注入不同硅胶和复合硅胶模型的仿真结果可以看出, 在 AlN 和铜金属化层界面边缘处的最大电场强度由 9.96 kV/mm 降低到 8.16 kV/mm, 电场强度峰值降低达 18%, 所以通过使用复合硅胶注入, 可以有效改善铜金属化层和 AlN 界面边缘处的电场分布, 从而提高器件绝缘和局部放电性能, 有效提高功率模块的可靠性。复合硅胶与纯硅胶相比拥有较高的介电常数, 而且通过对硅胶的复合改性来实现功率模块中的电场降低也必将会是 IGBT 功率模块商品化的发展趋势之一。

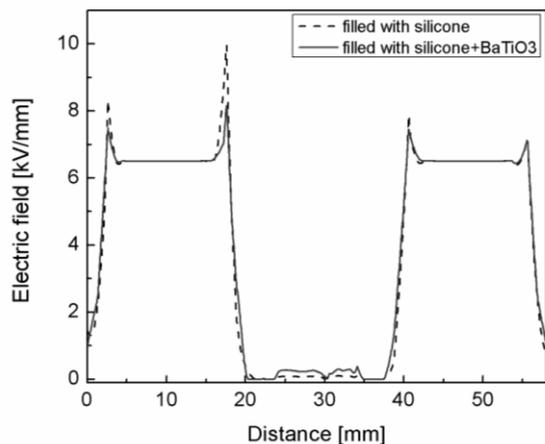


图5 在纯硅胶和复合硅胶中 AlN 基片表面电场强度对比

The comparison of Electric field strength on AlN surface in silicone gel and silicone composite

影响局部放电最关键的部分就是被硅胶覆盖的覆铜陶瓷基板，承受高电压基板产生的高电场强度会引起硅胶中产生局部电场放电的现象，高的局部放电效应会使得硅胶绝缘失效，最终导致 IGBT 模块绝缘失效，可靠性降低。

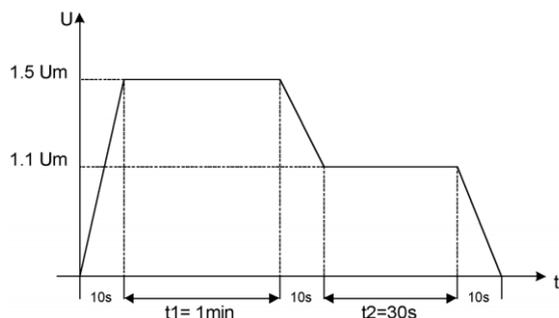


图6 IGBT 模块局部放电测试循环（依据 IEC 1287 标准）

Test cycle for determining the partial discharge strength for IGBT module (to IEC 1287)

局部放电测试中，先使用 1.5Um rms 的交流电压 1 分钟，然后电压降至 1.1Um rms 保持 30 秒，在 1.1Um rms 测试循环的最后 5 秒，局部放电的电荷积累必须小于 10 pC。局部放电测试的操作频率必须是 50 或 60 Hz。对于 6500 kV IGBT 模块，局部放电的测试电压为 5.1 KV rms。

3 结论

通过使用有限元分析方法，分析和得到了 IGBT 功率模块中最大电场出现的位置，同时提出了使用硅胶复合改性的方法来解决局部电场过高的问题，而且仿真结果表明，复合硅胶因其较高的介电常数

可以很明显的抑制陶瓷基板与铜金属化层界面边缘的电场强度，从而有效提高模块在绝缘和局部放电时的表现，提高了 IGBT 功率模块的可靠性。

参考文献:

- [1] MUTO H, SHIOTA H, HASEGAWA T. Insulation technology for power semiconductor modules[C]// International Symposium on Electrical Insulating Materials. IEEE, 2008:671.
- [2] FABIAN J H, HARTMANN S, HAMIDI A. Analysis of insulation failure modes in high power IGBT modules[J]. 2005, 2(2):799-805 Vol. 2.
- [3] DO M T, LESAINT O, AUGÉ J L. Partial discharges and streamers in silicone gel used to encapsulate power electronic components[C]// Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007. Ceidp 2007 Report - Conference on. 2007:155-158.
- [4] DO M T, AUGÉ J L, LESAINT O. Partial Discharges in Silicone Gel in the Temperature Range 20-150 C[J]. IEEE, 2006.
- [5] LEBEY T, MALEC D, DINCULESCU S, et al. Partial discharges phenomenon in high voltage power modules[J]. Dielectrics & Electrical Insulation IEEE Transactions on, 2006, 13(4):810 - 819.
- [6] 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 & Electrical Insulation, 2010, 17(4):1319-1326.
- [7] LI Z, OKAMOTO K, OHKI Y, et al. The role of nano and micro particles on partial discharge and breakdown strength in epoxy composites [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2011, 18(3):675-681.
- [8] DO M T, AUGÉ J L, VU T A T, et al. Partial discharges in dielectric liquids[C]// Electrical Insulating Materials, 2008. (ISEIM 2008) International Symposium on. IEEE, 2008:226 - 229.
- [9] MITIC G, LICHT T, LEFRANC G. IGBT module technology with high partial discharge resistance[C]// 2001:1899-1904 vol.3.
- [10] DONZEL L, SCHUDERER J. Nonlinear resistive electric field control for power electronic modules[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 19(19):955-959.
- [11] TIPTON C W, IBITAYO D, URCIUOLI D, et al. Development of a 15 kV bridge rectifier module using 4H-SiC junction-barrier schottky diodes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2011, 18(4):1137-1142.
- [12] AUGÉ J L, LESAINT O, THI A T V. Partial discharges in ceramic substrates embedded in liquids and gels[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2013, 20(1):262-274.
- [13] VU T A T, AUGÉ J L, LESAINT O, et al. Partial discharges in Aluminium nitrite ceramic substrates[C]// IEEE International Conference on Solid Dielectrics. IEEE, 2010:1-4.
- [14] FABIAN J, HARTMANN S, HAMIDI A. Partial Discharge Failure Analysis of AlN Substrates for IGBT Modules[J]. Microelectronics Reliability, 2004, 44(9-11):1425-1430.
- [15] DUTARDE E, DINCULESCU S, LEBEY T. On some electrical characteristics of AlN and Al₂O₃[J]. 2000:172-175.
- [16] 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 & Electrical Insulation, 2015, 22(1):257-265.
- [17] HAERTLING G H. Ferroelectric Ceramics: History and Technology [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1999, 82(4):797-818.
- [18] CURECHERIU L, BUSCAGLIA M T, BUSCAGLIA V, et al. Grain size effect on the nonlinear dielectric properties of barium titanate ceramics[J]. Applied Physics Letters, 2011, 97(24):242909-242909-3.
- [19] ROBERTSON J, HALL D A. Nonlinear dielectric properties of particulate barium titanate polymer composites[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2008, 41(11):1441-1446.

(编辑:)