All-SiC 模块的高耐压化

Enhanced Breakdown Voltage for All-SiC Modules

日向 裕一朗 HINATA, Yuichiro　　**谷口 克己** TANIGUCHI, Katsumi　　**堀 元人** HORI, Motohito

现在，在耐压 1 kV 左右的领域中不断普及的 SiC 元件，预计将被用于混合动力汽车、电动汽车等对可靠性要求极高的领域，以及铁路等耐压 3～10 kV 的高耐压领域中。富士电机开发了由铜柱连接和树脂密封构成的新封装结构，实现了 All-SiC 模块的高耐压化。根据电场仿真和热分析的结果，对绝缘基板中电极的位置和厚度进行了优化，由此兼顾了电场强度的缓和和散热性。

In recent years, SiC devices have been widespread mainly in fields that require a breakdown voltage of approximately 1 kV. They are expected to be used in the high voltage fields that require a breakdown voltage from 3 to 10 kV such as railways, as well as the automotive field that require high reliability such as hybrid vehicles and electric vehicles. Fuji Electric has developed a newly structured package featuring copper pin connections and resin molding to achieve SiC modules with high breakdown voltage. Based on the results of electric field simulations and thermal analysis, the electric field strength relaxation and high heat radiation are achieved by the optimization of the positioning and thickness of electrodes on the insulation substrate.

1 引言

全球气候变暖等环境问题日益受到关注，企业被要求削减 CO_2 等温室气体的排放量，因此能够实现高效、节能的电力转换技术备受期待。而在进行电力转换的设备和装置中，功率半导体发挥着重要作用。过去作为主流来使用的 Si（硅）基半导体器件，经过多年的改良，其性能正不断趋近于其物性理论极限。因此，使用新一代材料 SiC（碳化硅）、GaN（氮化镓）等宽禁带半导体的器件开发正不断推进。尤其是 SiC 器件可实现飞跃性的低损耗化，有望通过减少电力电子产品的损耗，为节能化做贡献。现在，正在太阳能逆变器（PCS）、服务器电源等耐压 1 kV 左右的领域中不断普及。今后，预计将被用于混合动力汽车、电动汽车等对可靠性要求极高的领域，以及铁路等耐压 3～10 kV 的高耐压领域中。

富士电机开发了由铜柱连接和树脂密封构成的新封装结构，取代过去由引线接合和硅胶密封构成的结构，实现了 All-SiC 模块的高耐压化。

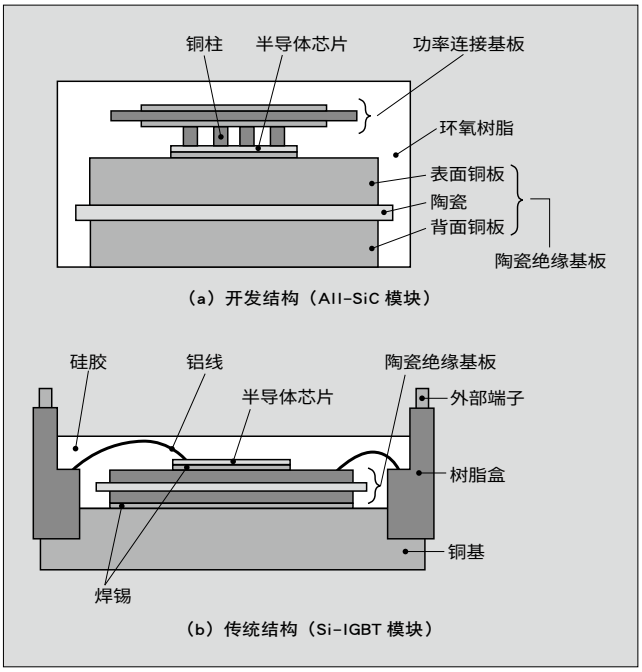

图 1　模块结构

2 模块的基本结构和实现高耐压化的课题

如**图 1** 所示，All-SiC 模块的结构与传统的 Si-IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）模块的结构有很大不同[(1),(2)]。All-SiC 模块中，以形成在功率连接基板上的铜柱连接，代替传统的铝线。如此便可流通大电流，实现 SiC 器件的高密度安装。安装半导体芯片的陶瓷绝缘基板，采用了 Si_3N_4（氮化硅）绝缘基板，上面接合了比传统产品更厚的铜板，以实现低热阻化。另外，采用环氧树脂代替传统的硅胶作为模块内部的密封材料，抑制了高温运行时焊接层的劣化和绝缘性能的降低，确保了高可靠性。

半导体模块将被使用十多年，因此，针对会因使用方法、使用环境而改变的热应力、电压波动，必须确保稳定的绝缘性能。在进行绝缘设计时，绝缘损坏电场是一项非常重要的指标。电场强度会受到由外部施加给材料的电压、构成材料的形状、介电常数等的显著影响。另外，在孔隙、剥离等密封材料的缺陷部和电极端部，电场强度通常会升高。传统结构中，密封材料中的硅胶在 175 ℃以上的高温下使用时，内部会产生孔隙、裂纹，并以这一部位为起点发展，最终导致绝缘损坏。因此，在高耐压化和高温应对处理的 All-SiC 模块封装开发中，选择合适的密封树脂、陶瓷等材料非常重要。而且，功率连接基板、陶瓷绝缘基板等的电场缓和结构也必须考虑。

3 面向高耐压化的封装设计技术

3.1 关于绝缘性能的封装设计

半导体模块内部，电场强度容易升高的部位是半导体芯片表面的端部附近，以及铜板端部附近的环氧树脂、陶瓷等绝缘体。由于以这些高电场强度部位为起点的陶瓷击穿损坏，以及陶瓷和环氧树脂、表面铜板和环氧树脂等部件接合部的界面损坏的发生，而导致绝缘损坏的情况非常多见。因此，我们针对作为导体的铜板、作为绝缘体的环氧树脂和陶瓷相交汇的交点，进行了电场仿真（**图 2**）。

将陶瓷厚度和种类、铜板厚度、环氧树脂种类统一后，从陶瓷端部到表面背面铜板的距离相同时〔**图 2**(a)〕，和仅增加陶瓷端部到表面铜板的距离时〔**图 2**(b)〕的电场强度分布。从仿真结果中我们发现，电场强度最高的部位是陶瓷、铜板和环氧树脂的交点，尤其是表面铜板端部附近的电场强度非常高。

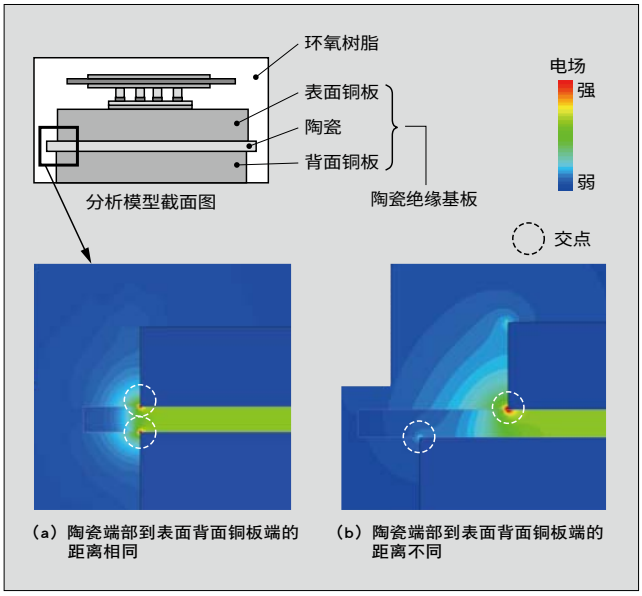

图 2　电场仿真的结果（电场强度分布）

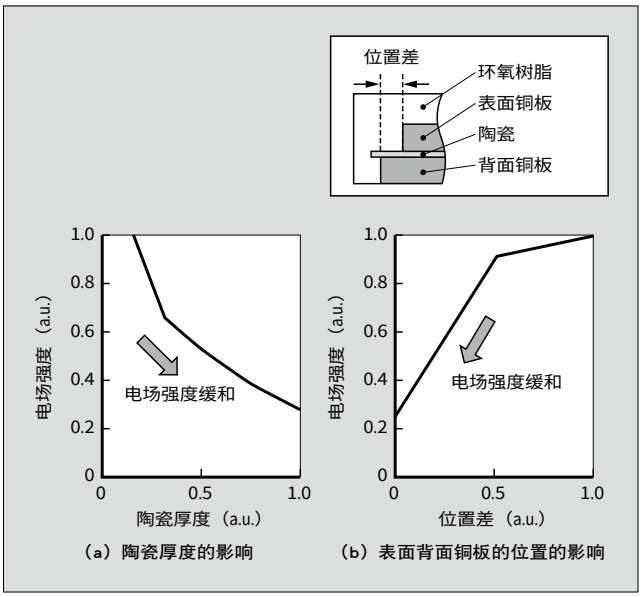

图 3　电场仿真的结果（电场强度的变化）

改变**图 2**(a)中的陶瓷厚度时，和改变**图 2**(b)中的表面铜板位置时的最大电场强度的变化如**图 3** 所示。我们发现通过加厚陶瓷，以及使陶瓷端部到表面背面铜板的距离一致，可缓和电场强度。但若加厚陶瓷，会使模块的散热性恶化。另外，若铜板厚度和位置的平衡不佳，因热膨胀系数的差，热应力的增加会不均匀，从而使陶瓷绝缘基板发生热变形。由此，可能发生陶瓷破裂、绝缘性能下降的情况。

陶瓷的热阻通常占模块整体热阻的 2～3 成。如**图 3** 所示，陶瓷较薄的区域电场强度变化大，通过加厚陶瓷，可将电场强度降低至最高值的一半以下，但陶瓷的热阻几乎与厚度成正比地增加，散热性会显著恶化。因此，必须采用优化了绝缘性能和散热性能的设计。

3.2 高散热性的封装结构

我们就传统结构和新开发结构进行了热分析。得到的温度分布如**图 4** 所示。新开发结构中，由于配置于芯片下方的表面铜板比过去加厚，使得热量向表面铜板内部的面内方向扩散，降低了热导率低的陶瓷部的热阻，从而降低了模块整体的热阻[3]～[5]。模块的陶瓷厚度和热阻的关系如**图 5** 所示。新开

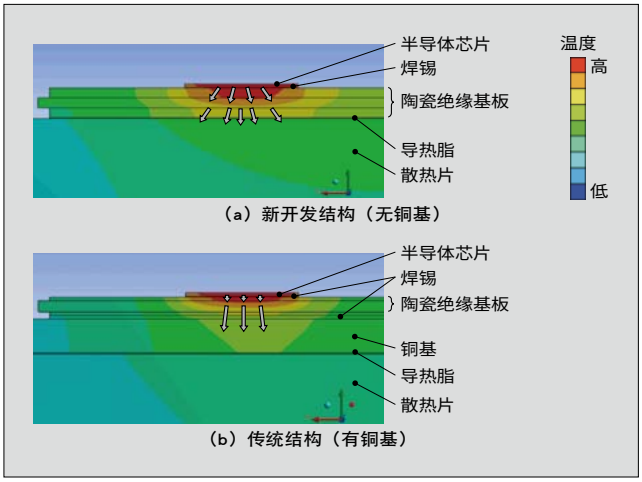

图 4　热分析的结果（温度分布）

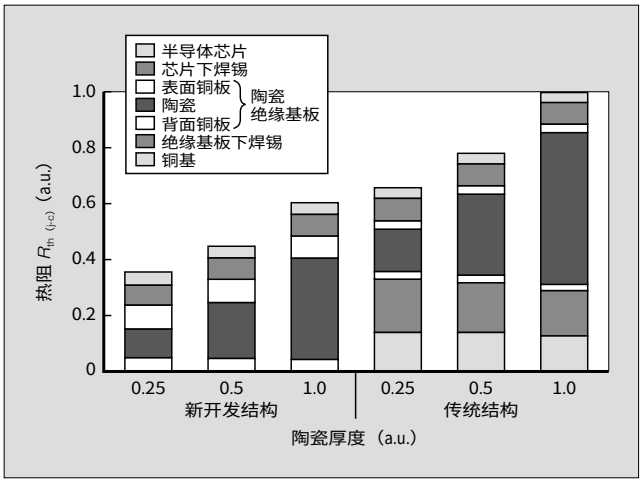

图 5　绝缘基板厚度与热阻的关系

发结构相比传统结构可大幅降低热阻，因此，即使为提升绝缘性能而加厚陶瓷，也能兼顾绝缘性能和散热性能。另外，受半导体的芯片尺寸和陶瓷热导率的影响，铜板的热阻降低效果有所不同。因此，我们根据电流、电压的额定值进行了优化，从而实现了最佳效果。

4 面向高耐压化的密封材料的评估

我们进行初始绝缘耐压试验，和长时间固定电压和温湿度环境下的高温电压外施试验，对模块的绝缘性能进行了评估。

尤其是若设想高温环境和高电压的使用条件，传统结构中使用的硅胶密封随着温升，绝缘损坏电压会大幅下降。与此相比，环氧树脂在高温下绝缘性能的降低幅度小于硅胶，因此在高温、高耐压环境下的使用上拥有优势。

4.1 密封材料的绝缘评估

我们对传统结构中使用的硅胶密封和新开发结构中使用的环氧树脂密封，进行了绝缘性能的比较。我们以相同形状的陶瓷和铜板，制作了不同密封材料的试验样品（**图 6**），然后在与表面电极接合的端子和背面电极间外施电压，测定了绝缘损坏电压。绝缘损坏电压和累积损坏率的关系如**图 7**，绝缘损坏部位如**图 8** 所示。累积损坏率为 1% 时，相对于硅胶 8.8 kV 的绝缘损坏电压，环氧树脂为 16.3 kV，约是硅胶的 1.9 倍。另外，此时的绝缘损坏部位，硅胶密封时以表面铜板、陶瓷和硅胶的交点为起点，是从硅胶内部向

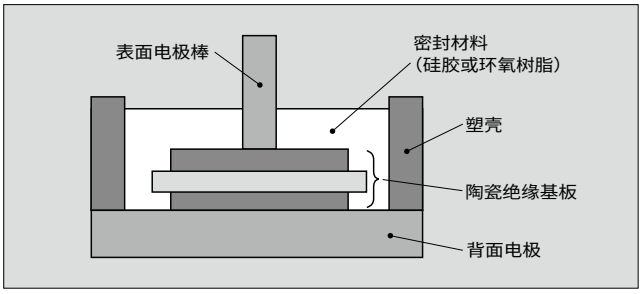

图 6　试验样品形状

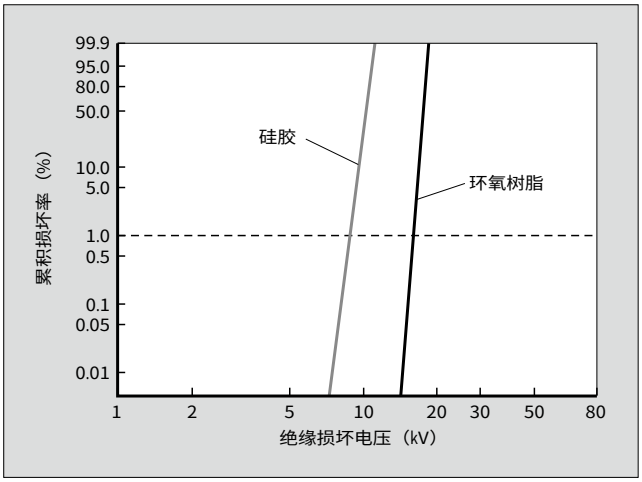

图 7　绝缘损坏电压和累积损坏率的关系

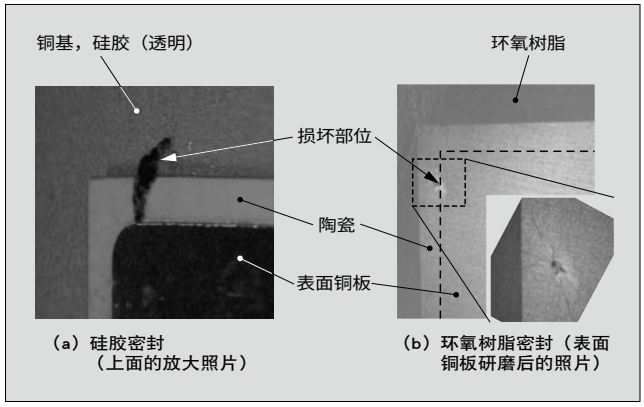

图 8　绝缘损坏部位

背面铜板侧发展的损坏。而环氧树脂密封时，是陶瓷的击穿损坏。由此可见，环氧树脂密封的绝缘性能是由陶瓷绝缘基板自身的损坏耐量决定的，而通过加厚陶瓷、提升绝缘耐量，可实现进一步的高耐压化。

4.2 密封材料的寿命评估

作为根据初期产品评价长期产品寿命的有效方法，可以对是否存在局部放电进行确认。若发生局部放电，劣化将以放电部位为起点发展，长期来看，很可能导致绝缘损坏。根据局部放电的有无来筛除不良品，长期来看可以防止损坏。

采用硅胶密封和环氧树脂密封的试验样品的局部放电试验的结果如**图 9** 所示。升压时电荷量开始增加的电压称为局部放电起始电压（PDIV），降压时电荷量为零的电压称为局部放电熄灭电压（PDEV）。硅胶密封时 PDIV 为 7 kV。与此相对，环氧树脂密封时即使达到 10 kV 也不会发生局部放电，相比硅胶密封不易发生局部放电。

反复进行局部放电试验时的 PDIV 和 PDEV 如**图 10** 所示。环氧树脂密封的样品在约 15 kV 时，以塑壳外侧为路径发生放电，而不是密封材料部分。图表中采用的是当时的数值。环氧树脂的 PDIV 是硅胶的 2 倍以上。

硅胶密封一旦发生局部放电，之后的 PDIV 随着局部放电重复次数的增加，会逐渐降低。这是因为以放电部位为起点的硅胶裂纹会导致空隙，受分解气体影响也会产生气泡等空隙，从而使硅胶内部以及硅胶和陶瓷的界面处的损坏加剧。与此相对，在相同试验电压下进行比较时，由于环氧树脂不

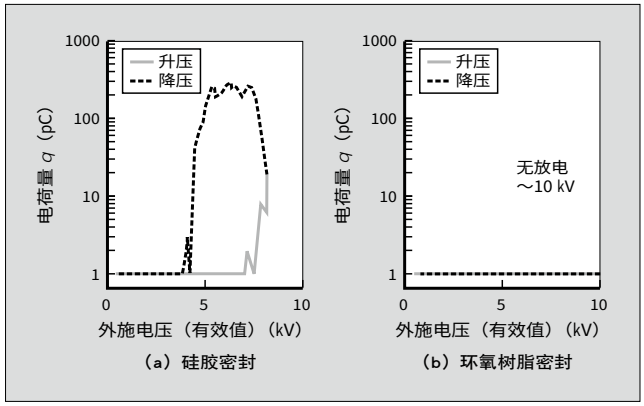

图 9　试验样品局部放电试验的结果

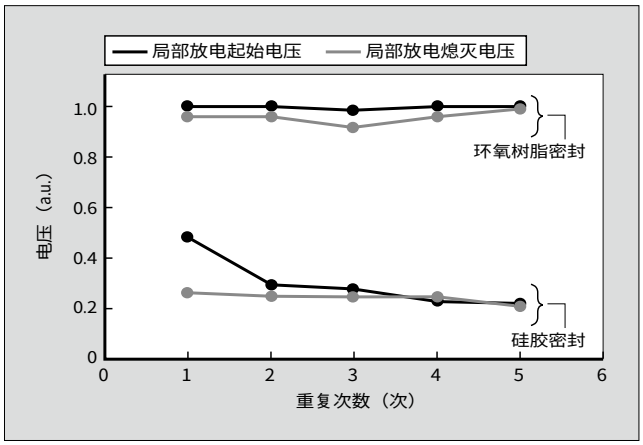

图 10　局部放电起始电压和局部放电熄灭电压

会发生局部放电，因此即使使用了很长时间，也不易发生局部放电导致的劣化，是实现 SiC 元件高耐压化的优秀密封材料。

5　后记

本稿对 All-SiC 模块的高耐压化进行了介绍。确认了以仿真为基础的电场强度的缓和和对散热性的影响，以及密封材料的不同带来的绝缘性能的差异。今后，富士电机也将继续推进高耐压化 All-SiC 模块可靠性的进一步提升，并拓宽适用范围，为电力电子技术的发展和低碳社会的构建做贡献。

参考文献

⑴　仲村秀世等. All-SiC 模块的封装技术. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.3-6.
⑵　梨子田典弘等. 针对百万瓦级太阳能用功率调节器的 All-SiC 模块. 富士电机技报. 2015, vol.C7, no.1, p.7-10.
⑶　Horio, M et al. “New Power Module Structure with Low Thermal Impedance and High Reliability for SiC Devices,” Proceedings of PCIM, 2011, p.229-234.
⑷　Ikeda, Y et al. “Investigation on Wirebond-less Power Module Structure with High-density Packaging and High Reliability,” Proceedings of ISPSD, 2011, p.272-275.
⑸　Horio, M et al. “Ultra Compact and High Reliable SiC MOSFET Power Module with 200℃ Operating Capability,” Proceedings of ISPSD, 2012, p.81-84.

日向 裕一朗
从事功率半导体元件用封装的研究开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部新一代模块开发部。

谷口　克己
从事功率半导体元件用封装的研究开发。现为富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部新一代模块开发部组长。

堀　　元人
从事功率半导体元件用封装的研究开发。现为富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部新一代模块开发部组长。日本传热学会会员。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。