All-SiC 模块用密封树脂的高耐热性化

Enhanced Thermal Resistance of Molding Resin Used for All-SiC Modules

仲俣 祐子 NAKAMATA, Yuko　　立冈 正明 TACHIOKA, Masaaki　　市村 裕司 ICHIMURA, Yuji

相比在 175℃的温度下运行的传统 Si 元件，SiC 元件可在 200℃以上的高温下运行，而为了将其普及，则要求构成功率元件的密封树脂具备更高的耐热性。我们确认到对于可最大限度地发挥 SiC 元件性能的 All-SiC 模块，通过延长耐热寿命、提升耐电痕性能等，可提高密封树脂的耐热性，实现 200℃以上温度下的连续运行。

SiC devices are capable of operating at high temperatures of 200°C or higher, while conventional Si devices at 175°C, and the molding resin that molds the power devices requires an even higher thermal resistance to spread in the market. Our All-SiC module maximizes the performance of SiC devices, and we have confirmed that the module can operate continuously at temperatures of 200°C or higher through the use of a high thermal-resistant molding resin that is characterized by a longer thermal-resistant service life and improved tracking resistance.

1 引言

功率模块作为电力转换系统的主要元件，被用于太阳能发电、风力发电等可再生能源的社会基础设施领域、电力铁路领域、混合动力汽车（HEV）以及电动汽车（EV）等汽车领域，以及空调等民生领域等多个领域中。

针对面向电力转换系统的功率模块，小型轻量化和高性能化的要求不断增加。但是，传统的 Si 元件的性能已经趋近极限，作为新一代元件，搭载了 SiC 的功率模块的正式普及备受期待。

相比在 175 ℃的温度下运行的传统的 Si 元件，SiC 元件能够以 2 ～ 3 倍的高电流密度在 200 ℃以上的高温下运行，构成功率元件的半导体密封树脂，则面临着具备更高耐热性和更高绝缘耐压性的要求[(1)~(3)]。

本稿将针对最大限度地发挥 SiC 性能的树脂密封型 All-SiC 模块，就使其可在 200 ℃以上温度下连续运行的密封树脂的高耐热性化进行介绍。

2 功率模块

2.1 模块的结构和特征

功率模块的结构不同于 Si 元件中主流的传统引线接合结构，如**图 1** 所示，它是由半导体芯片、铜针、陶瓷绝缘基板、焊接、密封树脂构成的。它形成了铜针以代替传统的引线，功率模块内部的绝缘材料采用了环氧树脂代替硅胶以代替传统的硅胶[(4),(5)]。

本结构在采用了功率基板和低热阻绝缘基板的同时，用铜针连接了功率芯片的配线。由此，实现了功率模块的小型化，缩短了电流路径，实现了低电感化。并且，通过强化芯片电极与铜针的接合，提升了 ΔT_j 功率循环耐量。

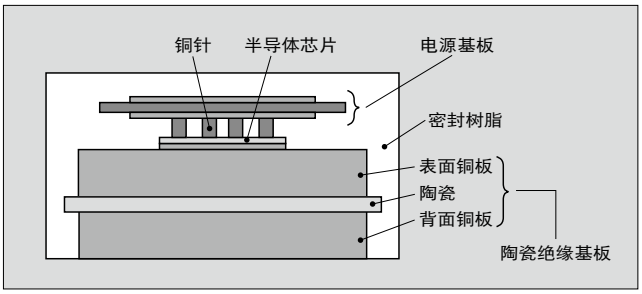

图 1　封装的内部截面结构图

2.2 密封树脂高耐热化的课题

作为密封树脂耐热性的重要指标，有玻璃转化温度 T_g 这一项。加热密封树脂时，从玻璃状态改变为橡胶状态的现象即玻璃转化，玻璃转化发生的温度就是 T_g。在比 T_g 更高的温度下，线膨胀系数（CTE：Coefficient of Thermal Expansion）和弹性率会急剧改变，密封树脂所要求的强度、粘合性、绝缘性等特性会劣化。因此，为提升功率模块的耐热性，必须提高密封树脂的 T_g[(6)]。

但密封树脂在 200 ℃以上的温度下为满足长期耐热性，仅提高 T_g 是不够的。必须能够承受功率模块的热循环试验、高温外施试验、高温高湿试验（THB：Temperature Humidity Bias）等长期可靠性试验。并且，为保证在结温 T_j 200 ℃下的连续使用，必须实施 UL 标准中规定的加速寿命试验，维持产品规格的绝缘破坏耐压。要保证 T_j =200 ℃，要求必须有 225 ℃、6663 h 的寿命，因此密封树脂必须具备对 T_j 以上温度的耐热性。

3 树脂密封技术

3.1 玻璃转化温度 T_g 和热减量的关系

玻璃转化温度 T_g，在**图 2** 所示的 TMA（Thermomechanical Analysis）图中，位移曲线的二次微分曲线是根据峰值温度定义的。

增加单键合产生的交联点数，是提高密封树脂的指标 T_g 的方法之一。但单键合的化学键合力弱，因此，交联点容易分解。所以，在高温环境中热分解会加剧，强度、粘合性和绝缘性会下降。

因此，为确保高 T_g，得到不会因为热分解而导致特性劣化的高耐热树脂，必须如**图 3** 所示，不仅要增加树脂的交联点，还要选择芳香环 /CH_2 比大的树脂组成。

若增加环氧交联点，则 T_g 会提高，但放置在 200 ℃下时，热减量比会大幅减小；若增加芳香族单元，放置在 200 ℃下时热减量比虽将接近零，但 T_g 会降低。像这样，T_g 和放置在 200 ℃下时的热减量比存在均衡关系。为同时提高 T_g 和放置在 200 ℃下时的热减量比，与具有三个官能团等的芳香族类交联单元维持牢固交联点的结构必不可少。

3.2 耐电痕性

通过在密封树脂内导入芳香族类交联单元，交联点数将增加，T_g 也会提高，但芳香族类交联单元的主结构芳香环会增加，因此容易碳化，导致耐电痕性降低[7]。

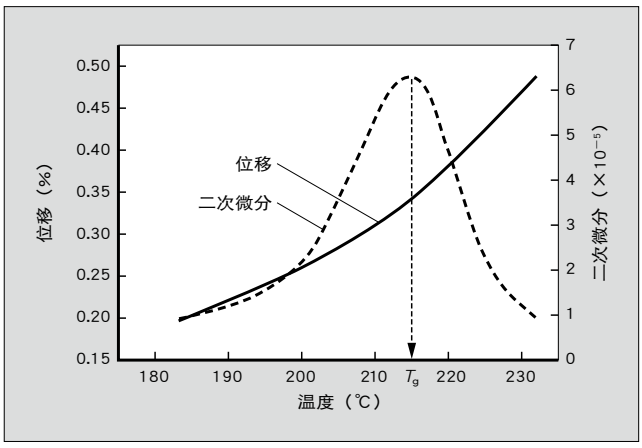

图 2 密封树脂的 TMA 图

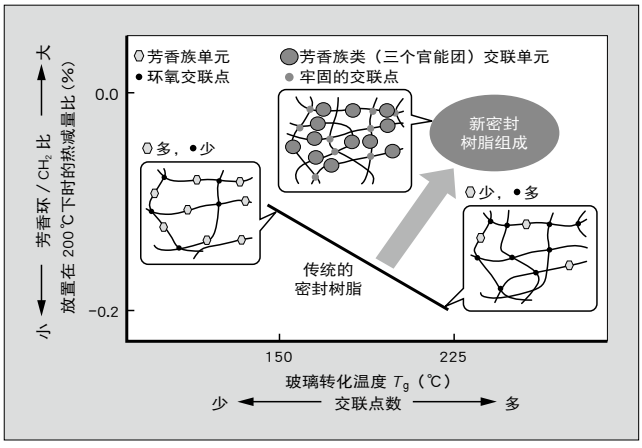

图 3 T_g 和放置在 200 ℃下时的热减量比的关系

表 1 比较电痕指数

成形材料的分类 *1	比较电痕指数（CTI *2）
材料组 I	600 ≤ CTI
材料组 II	400 ≤ CTI < 600
材料组 III a	175 ≤ CTI < 400
材料组 III b	100 ≤ CTI < 175

*1 根据 IEC 60664-1
*2 CTI： Comparative Tracking Index

在对密封树脂表面外施高电场的状态下，受密封树脂表面附着的粉尘、水分的影响，容易发生电弧放电现象。结果导致表面碳化，形成碳化导电通路。因此，可能导致绝缘性下降，发生绝缘破坏。

而在太阳能发电、风力发电等严苛设置环境下使用的功率模块的密封树脂，必须提高耐电痕性。表现密封树脂耐电痕性的比较电痕指数（CTI：Comparative Tracking Index），要求达到**表 1** 中材料组 I（600 ≤ CTI）的程度。

富士电机通过改良密封树脂的组成，使 SiC 功率模块用密封树脂的 CTI 达到了 600 以上。

3.3 难燃性

功率模块用密封树脂中添加的阻燃剂，其升华等的分解温度在 200 ℃附近。保证在 T_j=200 ℃下运行的、UL1557 的加速寿命试验条件，相当于 225 ℃、6663 h，接近阻燃剂的分解温度。要提高耐热性，不仅要选择分解温度高的阻燃剂，还必须导入与多芳环等具有难燃性的交联单元维持牢固交联点的树脂组成。

3.4 预测耐热寿命

耐热性的定义中有短期耐热性和长期耐热性两项。

短期耐热性是在短时间内、在高温环境中，树脂可保持其形状和性质的特性。短期耐热性用可保持树脂物理性质的上限温度来表现，例如 T_g。

长期耐热性是即使持续暴露在某一温度下，也能保持树脂形状和性质的特性。长期耐热性用热分解温度 T_d 来表现。若放置在高温下，热引发的氧化和劣化会导致交联点等键合部分解，T_d 下降。因此，为提升耐热性，必须提高 T_d。

树脂若加热，在 T_g 下会呈橡胶状态，若再继续加热，会在 T_d 时发生热分解。

我们用热重量测定法预测了长期耐热性的耐热寿命[8]。我们按照多个升温速度进行了测定，求得了各速度下 1% 热减量温度 T_{d1}，然后根据反应动力学绘制了阿伦尼乌斯（Arrhenius）图，计算出了热分解的活性化能量。接下来，根据一边升温一边实施的热重量测定的结果，使用公式(1)，求得了暴露在一定温度下时，重量减少 1% 时的耐热寿命[9,10] τ。

$$x=\frac{\int_{T_0}^{T_{d1}}\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)dT}{B\exp\left(-\frac{E_a}{RT_c}\right)} \quad \cdots\cdots(1)$$

τ ：使用环境温度 T_c 下的耐热寿命（s）

E_a ：活性化能量（J/mol）

R ：气体常数〔J/（mol・K）〕

T ：温度（K）

B ：热重量测定时的升温速度（K/s）

T_0 ：热重量测定的开始温度（未发生热分解的温度）（K）

T_{d1} ：1% 热减量温度（在热重量测定中因为热分解，减量率达到 1% 时的温度）（K）

T_c ：使用环境温度（K）

表 2 展示了密封树脂的物性和耐热寿命的预测结果。3 种密封树脂是调整芳香族类交联单元的量、将 T_g 固定为 215 ℃、CTE 固定为 13 ppm/K、弹性率固定为 16 GPa，再改变 T_{d1} 后得到的。CTI 达到了材料组 I 的 600 以上，难燃性为认证标准(注) V-0。

T_{d1} 越高耐热寿命越长，我们确认到，T_{d1}=411 ℃的树脂 C 确保了 UL1557 规定的 225 ℃、6663h 的耐热性。

3.5 功率模块加速寿命试验的结果

图 4 中展示了耐热寿命加速试验后的功率模块的绝缘试验方法。

为确认 T_j=200 ℃下的运行情况，我们对使用**表 2** 所示树脂的功率模块，在 UL1557 规定的 225 ℃、6663h 的条件下，实施了加速寿命试验。树脂 A 产生了到达绝缘基板侧面的裂纹，绝缘破坏电压未达到标准要求。树脂 B 在绝缘基板的端部短路，发生了绝缘破坏。树脂 C 与此相对，密封树脂和绝缘基板、元件等构成构件的剥离、密封树脂的裂纹都得到了抑制，满足了绝缘性能（**图 5**）。

如**表 3** 所示，使用功率模块实施的树脂评估结果显示，T_{d1} 越高结果越好。通过导入牢固的结构，使 225 ℃下的热分解得到抑制，因此在加速寿命试验中未产生剥离和裂纹，确保了绝缘性。

表 2　密封树脂的物性和耐热寿命的预测结果

树脂	热分解温度 T_{d1}（℃）	200 ℃时的寿命（h）	225 ℃时的寿命（h）
树脂 A	320	21	4
树脂 B	338	712	103
树脂 C	411	75000	10500

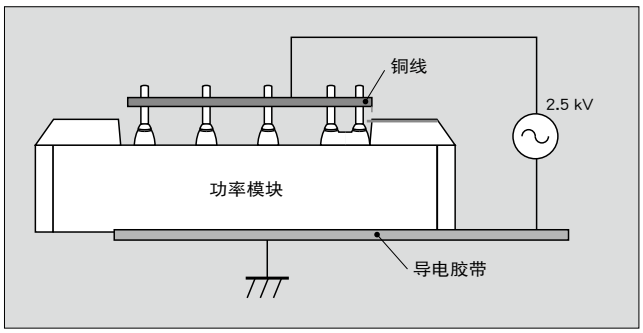

图 4　绝缘试验的方法

〈注〉难燃性认证标准：产业资材用塑料的难燃性（优）5V > V-0 > V-1 > V-2 > HB（劣）

项目	树脂 A	树脂 B	树脂 C
测试后模块外观外観			
绝缘基板的观察结果	基板周围有剥离	有短路	正常

图 5　功率模块的耐热试验结果

表 3　使用功率模块的树脂评估结果

树脂	绝缘破坏试验合格率
树脂 A	0%
树脂 B	60%
树脂 C	100%

4　后记

本稿对 All-SiC 模块用密封树脂的高耐热性化进行了介绍。对于功率模块，富士电机通过延长耐热寿命，提升与高耐热化存在冲突的耐电痕性等，开发出了可在 200 ℃以上高温下连续运行的树脂。

今后，富士电机将以高耐热密封树脂的适用为目标推进开发，为功率模块的高可靠性化做贡献。

参考文献

(1) Horio, M. et al. “New Power Module Structure with Low Thermal Impedance and High Reliability for SiC Devices” PCIM Europe 2011, 37 (2011) , p.229-234.

(2) 鶴田和弘. SiC 半導体パワーデバイスの車載実用化の展望. デンソーテクニカルレビュー 16 (2011) , p.90-95.

(3) 山田忠則ほか. インバータエアコン用小容量 IPM. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.430-434.

(4) 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.

(5) 立岡正明ほか. 超小型樹脂封止パッケージの高信頼性検証. Mate2015.

(6) 小椋一郎. エポキシ樹脂の化学構造と特性の関係. DIC Technical Review. 2001, no.7, p.1-12.

(7) 西村孝司ほか. IGBT ハイパワーモジュール. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p.390-394.

⑻ 市村裕. 絶縁材の反応速度論的解析. Application Brief. 1986, TA no.25, p.1-3.
⑼ 小澤丈夫. 非低温速度論⑴単一素過程の場合. Netsu Sokutei. 2004, 31⑶, p.125-132.
⑽ 近畿経済産業局. 平成 24 年度戦略的基板技術高度化支援事業“パワー半導体混載モジュールの樹脂封止剤真空加圧成形プロセスの開発”.

仲俣　祐子
从事半导体密封树脂的开发。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。电子工业实装学会会员。

立冈　正明
从事适用 SiC 的新一代模块的研究开发。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。

市村　裕司
从事适用 SiC 的新一代模块的树脂密封材料的研究开发。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课长。

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。