

# All-SiC モジュール用封止樹脂の高耐熱性化

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

仲俣 祐子 NAKAMATA, Yuko

立岡 正明 TACHIOKA, Masaaki

市村 裕司 ICHIMURA, Yuji

175℃で動作する従来のSiデバイスに比べてSiCデバイスは200℃以上の高温動作が可能であり、SiCデバイスの普及のためには、パワーデバイスを構成する封止樹脂に、さらなる高耐熱性が要求されている。SiCデバイスが持つ性能を最大限に発揮させるAll-SiCモジュールにおいて、耐熱寿命を延ばすこと、耐トラッキング性能を向上させることなどによって封止樹脂の高耐熱性化を行い、200℃以上の連続動作が可能であることを確認した。

SiC devices are capable of operating at high temperatures of 200℃ or higher, while conventional Si devices at 175℃, 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℃ 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 まえがき

パワーモジュールは、電力変換システムの主要デバイスとして、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを扱う社会インフラ分野、電鉄分野、ハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)などの自動車分野、エアコンなどの民生分野など幅広い分野で使用されている。

電力変換システム向けのパワーモジュールに対して小型・軽量化や高性能化の要求が増している。しかし、従来のSiデバイスの性能が限界に近く、次世代デバイスとしてSiCを搭載したパワーモジュールの本格的な普及が期待されている。

175℃で動作する従来のSiデバイスに比べ、SiCデバイスは、2～3倍の高電流密度で200℃以上の高温での動作が可能であり、パワーデバイスを構成する半導体封止樹脂<sup>(1)~(3)</sup>には、さらなる高耐熱性や高絶縁耐圧性が要求されている。

本稿では、SiCデバイスが持つ性能を最大限に発揮させる樹脂封止型All-SiCモジュールにおいて、200℃以上の連続動作を可能とする封止樹脂の高耐熱性化について述べる。

## 2 パワーモジュール

### 2.1 パッケージの構造と特徴

パワーモジュールの構造は、Siデバイスで主流になっている従来のワイヤボンディングの構造と異なり、**図1**に示すように、半導体チップ、銅ピン、セラミックス絶縁基板、はんだ、封止樹脂から構成される。従来のワイヤに替えて銅ピンを形成し、パワーモジュール内部の絶縁材料にはシリコングルに替えてエポキシ樹脂を用いている<sup>(4),(5)</sup>。

本構造では、パワー基板と低熱抵抗絶縁基板を採用する

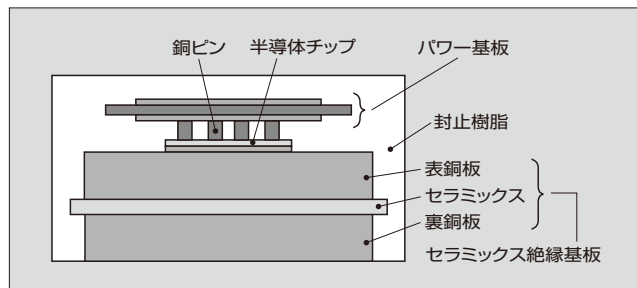


図1 パッケージの内部断面構造図

とともに、パワーチップの配線を銅ピンで接続した。これにより、パワーモジュールを小型化し、電流経路を短縮して低インダクタンス化を行った。また、チップ電極と銅ピンとの接合を強化することにより、 $\Delta T_j$  パワーサイクル耐量を向上させた。

### 2.2 封止樹脂の高耐熱化の課題

封止樹脂の耐熱性の重要な指標として、ガラス転移温度 $T_g$ がある。封止樹脂を加熱した場合、ガラス状態からゴム状態に変わる現象がガラス転移であり、ガラス転移が起こる温度が $T_g$ である。 $T_g$ よりも高い温度では、線膨張係数(CTE: Coefficient of Thermal Expansion)と弾性率が急激に変化し、封止樹脂に要求される強度、密着性、絶縁性などの特性が劣化する。そこで、パワーモジュールの耐熱性を向上させるために封止樹脂の $T_g$ を高める必要がある<sup>(6)</sup>。

しかしながら、封止樹脂が200℃以上において長期耐熱性を満足するためには、 $T_g$ を高めるだけでは不十分である。パワーモジュールのヒートサイクル試験、高温印加試験、高温高湿試験(THB: Temperature Humidity Bias)などの長期信頼性試験に耐える必要がある。さら

に、ジャンクション温度  $T_j$  が 200℃において連続使用を保証するためには、UL 規格で規定される加速寿命試験を行い、製品規格の絶縁破壊耐圧を維持しなければならない。 $T_j=200℃$ を保証する場合には、225℃・6,663hの寿命が要求され、封止樹脂は  $T_j$  よりも高い温度に対する耐熱性を持つ必要がある。

### ③ 樹脂封止技術

#### 3.1 ガラス転移温度 $T_g$ と熱減量との関係

ガラス転移温度  $T_g$  は、図 2 に示す TMA (Thermo-mechanical Analysis) チャートにおいて、変位曲線の二次微分曲線がピークとなる温度で定義されている。

封止樹脂の指標である  $T_g$  を高くする方法の一つに、単結合による架橋点数を多くするという方法がある。しかし、単結合は化学結合力が弱いので、架橋点は分解しやすい。そのため、高温環境において熱分解が促進し、強度、密着性および絶縁性が低下してしまう。

そこで、高い  $T_g$  を確保しつつ、熱分解により特性が劣化しない高耐熱樹脂を得るためには、図 3 に示すように、樹脂の架橋点数を多くするだけでなく、芳香族環/CH<sub>2</sub> 比が大きい樹脂組成を選択する必要がある。

エポキシ架橋点を増やすと  $T_g$  が大きくなるが、200℃

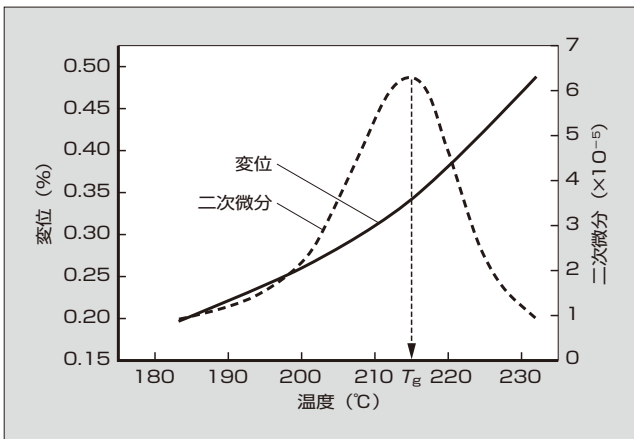


図 2 封止樹脂の TMA チャート

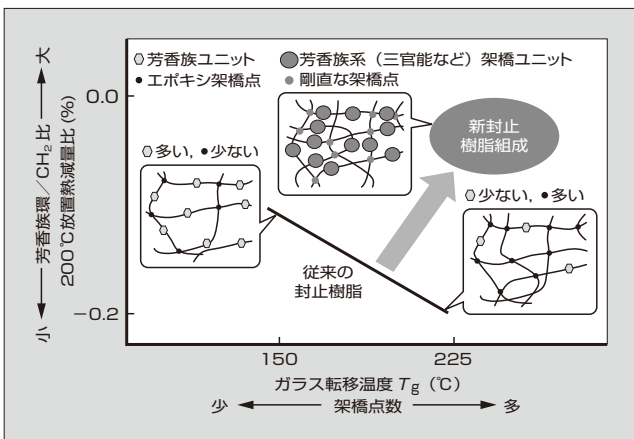


図 3  $T_g$  と 200℃ 放置熱減量比の関係

放置熱減量比はマイナスが大きくなり、また、芳香族ユニットを増やすと 200℃ 放置熱減量比はゼロに近づくが、 $T_g$  は小さくなる。このように、 $T_g$  と 200℃ 放置熱減量比とはトレードオフの関係にある。 $T_g$  とともに 200℃ 放置熱減量比を高くするためには、三官能などの芳香族系架橋ユニットと剛直な架橋点を持つ構造が必要である。

#### 3.2 耐トラッキング性

封止樹脂内に芳香族系架橋ユニットを導入することにより架橋点数が大きくなって  $T_g$  は向上するが、芳香族系架橋ユニットの主骨格である芳香族環が増加するため炭化しやすくなり、耐トラッキング性が低下する。

封止樹脂の表面に高い電界が印加された状態で、封止樹脂の表面に付着した粉じんや水分によってアーク放電が生じやすくなる。その結果として、表面が炭化して炭化導通路が形成される。そのため、絶縁性が低下して絶縁破壊に至ることがある。

太陽光発電や風力発電など、厳しい設置環境で使用されるパワーモジュールの封止樹脂においては、耐トラッキング性の向上が必須である。封止樹脂として耐トラッキング性を表す比較トラッキング指数 (CTI: Comparative Tracking Index) が表 1 の材料グループ I ( $600 \leq CTI$ ) であるものが求められる。

富士電機では、封止樹脂の組成を工夫することで、SiC パワーモジュール用の封止樹脂は、600 以上の CTI を実現している。

#### 3.3 難燃性

パワーモジュール用封止樹脂に添加されている難燃剤は、昇華などの分解温度が 200℃ 付近にある。 $T_j=200℃$  動作を保証する UL1557 の加速寿命試験条件は、225℃・6,663h に相当し、難燃剤の分解温度に近い。耐熱性を向上させるには、分解温度の高い難燃剤を選定するとともに、多芳香環などの、難燃性が付与された架橋ユニットと剛直な架橋点を持つ樹脂組成を導入することが必要である。

#### 3.4 耐熱寿命の予測

耐熱性の定義には、短期耐熱性と長期耐熱性の二つがある。

短期耐熱性は、短時間であっても、高温環境で樹脂がその形状や性質を保持できることである。短期耐熱性は、樹脂の物理的性質を保持できる上限の温度で表し、 $T_g$  がこ

表 1 比較トラッキング指数

成形材料の区分 *1	比較トラッキング指数 (CTI) *2
材料グループ I	$600 \leq CTI$
材料グループ II	$400 \leq CTI < 600$
材料グループ III a	$175 \leq CTI < 400$
材料グループ III b	$100 \leq CTI < 175$

\* 1 IEC 60664-1 による

\* 2 CTI: Comparative Tracking Index

れに相当する。

長期耐熱性は、ある温度に暴露し続けても、樹脂の形状や性質を保持できることである。長期耐熱性は、熱分解温度  $T_d$  で表す。高温下に放置すると、熱による酸化劣化により架橋点などの結合部が分断し、 $T_d$  が低下する。そこで、耐熱性を向上するためには  $T_d$  を上げることが必須となる。

樹脂は加熱すると  $T_g$  でゴム状になり、さらに加熱を続けると  $T_d$  で熱分解を起こすようになる。

長期耐熱性の耐熱寿命を、熱重量測定法を用いて予測した。測定は複数の昇温速度で行い、各速度での1%熱減量温度  $T_{d1}$  を求め、反応速度論に基づいてアレニウスプロットを行い、熱分解の活性化エネルギーを算出した。次に、昇温しながら実施した熱重量測定の結果から、式(1)を使って樹脂が一定温度にさらされた場合に重量が1%減少する耐熱寿命  $\tau$  を求めた。

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

- $\tau$  : 使用環境温度  $T_c$  における耐熱寿命 (s)
- $E_a$  : 活性化エネルギー (J/mol)
- $R$  : 気体定数 [J/(mol・K)]
- $T$  : 温度 (K)
- $B$  : 熱重量測定における昇温速度 (K/s)
- $T_0$  : 熱重量測定の開始温度 (熱分解が生じていない温度) (K)
- $T_{d1}$  : 1%熱減量温度 (熱重量測定において熱分解により減量率が1%となる温度) (K)
- $T_c$  : 使用環境温度 (K)

表 2 に封止樹脂の物性と耐熱寿命の予測結果を示す。3種類の封止樹脂は、芳香族系架橋ユニットの量を調整し、 $T_g$  を 215℃、CTE を 13 ppm/K、弾性率を 16 GPa に固定し、 $T_{d1}$  を変化させたものである。CTI は材料グループ I の 600 以上、難燃性は認定基準 V-0 とした。

耐熱寿命は  $T_{d1}$  が高いほど長く、 $T_{d1}=411℃$  の樹脂 C が UL1557 で規定されている 225℃・6,663 h の耐熱性を確保していることを確認した。

表 2 封止樹脂の物性と耐熱寿命予測結果

樹脂	熱分解温度 $T_{d1}$ (℃)	200℃寿命 (h)	225℃寿命 (h)
樹脂 A	320	21	4
樹脂 B	338	712	103
樹脂 C	411	75,000	10,500

〈注〉難燃性の認定基準：産業資材用途に用いられるプラスチックの難燃性 (優) 5V>V-0>V-1>V-2>HB (劣)

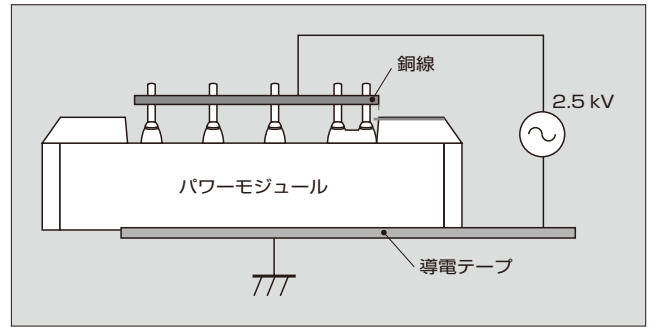


図 4 絶縁試験方法

項目	樹脂 A	樹脂 B	樹脂 C
試験後モジュール外観			
絶縁基板観察結果	基板周辺に剥離あり	短絡あり	正常

図 5 パワーモジュールの耐熱試験結果

表 3 パワーモジュールによる樹脂の評価結果

樹脂	絶縁破壊試験合格率
樹脂 A	0%
樹脂 B	60%
樹脂 C	100%

### 3.5 パワーモジュールの加速寿命試験結果

図 4 に、耐熱寿命加速試験後のパワーモジュールの絶縁試験方法を示す。

$T_j=200℃$  での動作を確認するため、表 2 に示した樹脂を用いたパワーモジュールについて、UL1557 の 225℃・6,663 h の条件で加速寿命試験を行った。樹脂 A の場合は、絶縁基板の側面に達するほどのクラックが発生し、絶縁破壊電圧が規格を満足できなかった。樹脂 B の場合は、絶縁基板の端部で短絡し、絶縁破壊が生じた。これに対して、樹脂 C の場合は、封止樹脂と絶縁基板や素子などの構成部材との剥離、および封止樹脂のクラックが抑制され、絶縁性能を満足した (図 5)。

表 3 に示すように、パワーモジュールによる樹脂の評価結果は、 $T_{d1}$  が高いほど良好な結果を示した。剛直な骨格の導入によって、225℃における熱分解が抑止された結果、加速寿命試験で剥離やクラックが発生せず、絶縁性を確保できたものと考えられる。

## 4 あとがき

本稿では、All-SiC モジュール用封止樹脂の高耐熱性化

について述べた。パワーモジュールにおいて、耐熱寿命を延ばしつつ、高耐熱化の背反となる耐トラッキング性を向上させることなどにより、200℃以上の連続動作が可能となる樹脂を開発した。

今後は、高耐熱封止樹脂の適用を目指して開発を進め、パワーモジュールの高信頼性化に貢献していく所存である。

### 参考文献

- (1) Masafumi, H. 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.5, p.431-434.
- (4) 梨子田典弘ほか. メガソーラー用パワーコンディショナ向けAll-SiCチョップモジュール. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.244-247.
- (5) 立岡正明ほか. 超小型封止樹脂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.
- (8) 市村裕. 絶縁材の反応速度論的解析. Application Brief.

1986, TA no.25, p.1-3.

- (9) 小澤丈夫. 非低温速度論(1)単一素過程の場合. Netsu Sokutei. 2004, 31(3), p.125-132.
- (10) 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

半導体封止樹脂の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部次世代モジュール開発部チームリーダー。エレクトロニクス実装学会会員。



### 立岡 正明

SiC 適用次世代モジュールの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部次世代モジュール開発部。



### 市村 裕司

SiC 適用次世代モジュールの樹脂封止材料の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部次世代モジュール開発部課長。





\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。