

# All-SiC モジュールの高耐圧化

## Enhanced Breakdown Voltage for All-SiC Module

日向 裕一朗 HINATA, Yuichiro

谷口 克己 TANIGUCHI, Katsumi

堀 元人 HORI, Motohito

現在、耐圧が1kV程度の分野で普及が進んでいるSiCデバイスは、ハイブリッド自動車や電気自動車などの信頼性が強く求められる分野、および鉄道などの耐圧が3~10kVの高耐圧の分野に採用が見込まれている。富士電機は、銅ピン接続と樹脂封止からなる新構造のパッケージを開発し、All-SiCモジュールの高耐圧化を実現した。電界シミュレーションや熱解析の結果を基に、絶縁基板における電極の位置や厚みを最適化することにより、電界強度の緩和と放熱性を両立させている。

In recent years, SiC devices have been widespread mainly in fields that require a breakdown voltage of approximately 1kV. They are expected to be used in the high voltage fields that require a breakdown voltage from 3 to 10kV 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 まえがき

地球温暖化などの環境問題への関心が高まる中、CO<sub>2</sub>などの温室効果ガスの排出量の削減が求められており、電気を効率よく使いこなして省エネルギー（省エネ）を行う電力変換技術に期待が寄せられている。電力変換を行う機器・装置において、重要な役割を担っているのがパワー半導体である。これまで主流であったSi（シリコン）を使用した半導体デバイスは、長年にわたって改良が進められ、その性能が物性に基づく理論的限界に近づいている。そこで、次世代材料であるSiC（炭化けい素）やGaN（窒化ガリウム）といったワイドバンドギャップ半導体を使用したデバイスの開発が盛んに進められている。特に、SiCデバイスは飛躍的な低損失化が可能であり、パワーエレクトロニクス製品の損失を低減することにより省エネ化への貢献が期待される。現在は、太陽光発電用パワーコンディショナ（PCS）やデータサーバ用電源などの耐圧が1kV程度の分野で普及が進んでいる。今後、ハイブリッド自動車や電気自動車などの信頼性が強く求められる分野、および鉄道などの耐圧が3~10kVの高耐圧の分野に採用が見込まれている。

富士電機では、従来のワイヤボンディングとシリコンゲル封止からなる構造に替えて、銅ピン接続と樹脂封止からなる新構造のパッケージを開発し、All-SiCモジュールの高耐圧化を実現した。

### 2 モジュールの基本構造と高耐圧化のための課題

図1に示すように、All-SiCモジュールの構造は従来のSi-IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールの構造と大きく異なっている<sup>(1),(2)</sup>。All-SiCモジュールでは、

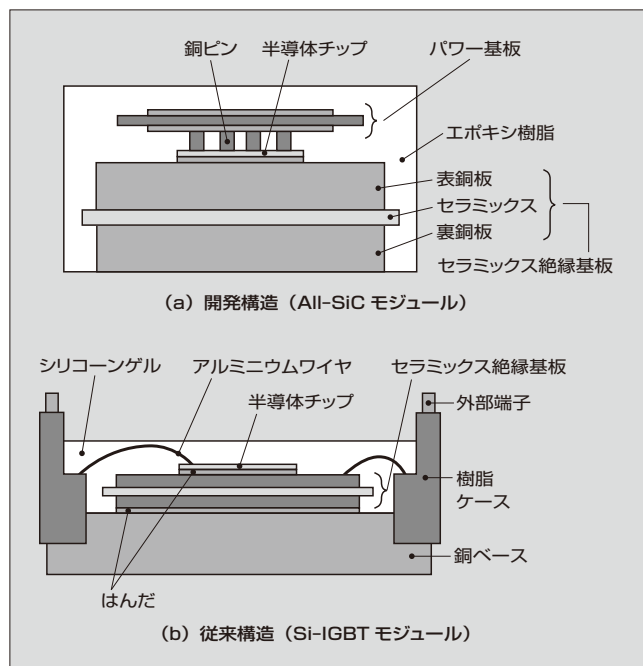


図1 モジュールの構造

従来のアルミニウムワイヤに替えて、パワー基板上に形成した銅ピンで接続している。これによって大電流が流せるようになり、SiCデバイスの高密度実装が可能になった。半導体チップを搭載するセラミックス絶縁基板には、従来よりも厚い銅板が接合されたSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>（窒化けい素）絶縁基板を採用し、低熱抵抗化を図っている。さらに、モジュール内部の封止材料として、従来のシリコンゲルに替えてエポキシ樹脂を採用することで、高温動作におけるはんだ層の劣化や絶縁性能の低下を抑え、高い信頼性を確保している。

半導体モジュールは十数年という長期にわたって使用さ

れるため、使用方法や使用環境によって変化する熱応力や電圧変化に対し、安定した絶縁性能の確保が必要である。絶縁設計を行う上では、絶縁破壊電界が重要な指標の一つである。電界強度は、材料に印加される電圧、構成材料の形状、誘電率などの影響を大きく受ける。また、電界強度は、ポイドや剝離などの封止材料の欠陥および電極端部において高くなることが多い。従来構造で封止材に用いているシリコンゲルにおいても、175℃以上の高温で使用するとシリコンゲルの内部にポイドやクラックが発生し、そこを起点に絶縁破壊に至る。そのため、高耐圧化や高温対応を行った All-SiC モジュールのパッケージを開発するためには、封止樹脂やセラミックスといった材料に適切なものを選定することが重要である。さらに、パワー基板やセラミックス絶縁基板などの界面の電界を緩和する構造を検討する必要がある。

### 3 高耐圧化に向けたパッケージ設計技術

#### 3.1 絶縁性能に関するパッケージ設計

半導体モジュールの内部で電界強度が高くなりやすい箇所は、半導体チップ表面の端部近傍や銅板の端部近傍におけるエポキシ樹脂やセラミックスなどの絶縁体である。このような電界強度の高い箇所を起点としたセラミックス貫通破壊や、セラミックスとエポキシ樹脂、表銅板とエポキシ樹脂といった部品の接合部での界面破壊が起きることにより、絶縁破壊となることが多い。導体である銅板、絶縁体であるエポキシ樹脂およびセラミックスが1点で交わる三重点に着目して電界シミュレーションを行った。

図2は、セラミックスの厚みや種類、銅板の厚み、エポキシ樹脂の種類を統一し、セラミックス端部から表裏の銅板までの距離が同じ場合〔図2(a)〕と、表銅板のみセラミックス端部からの距離を増やした場合〔図2(b)〕の電界強度の分布を示している。シミュレーションの結果から、

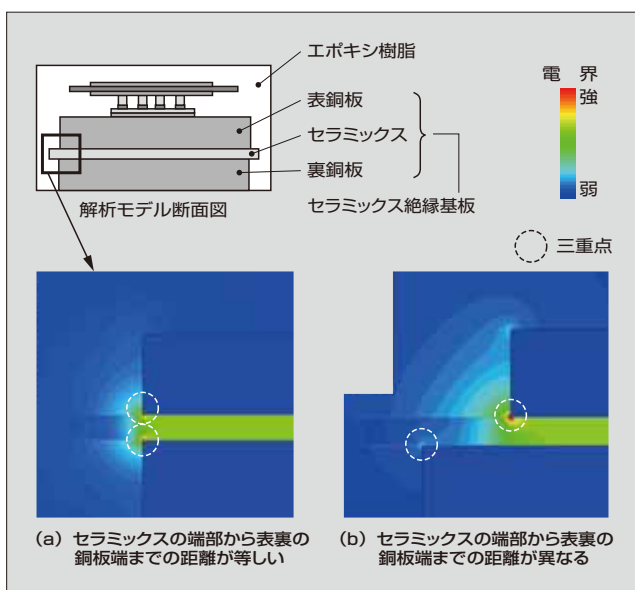


図2 電界シミュレーション結果（電界強度分布）

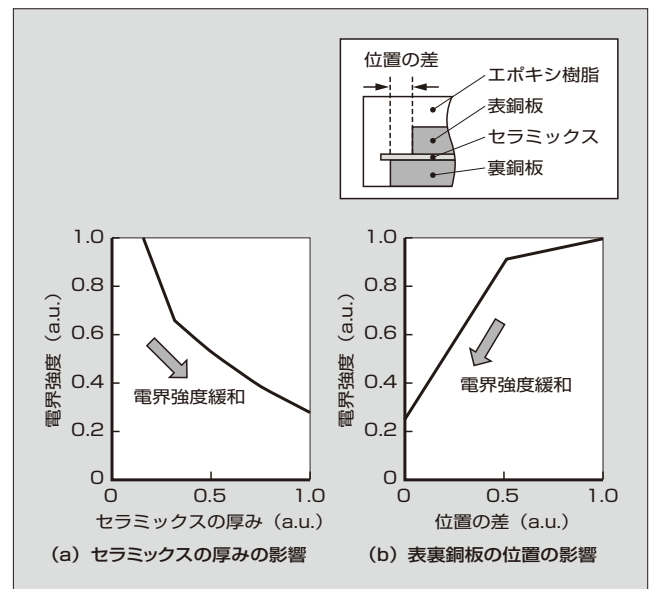


図3 電界シミュレーション結果（電界強度の変化）

電界強度が最も高い位置はセラミックスと銅板とエポキシ樹脂の三重点であり、特に、表銅板の端部近傍の電界強度が高いことが分かる。

図3は、図2(a)にてセラミックスの厚みを変えた場合と、図2(b)にて表銅板の位置を変えた場合の最大電界強度の変化を示している。セラミックスを厚くすることで、セラミックスの端部から表裏の銅板までの距離を等しくすることで電界強度を緩和できることが分かる。しかし、セラミックスを厚くするとモジュールの放熱性は悪化する。また、銅板の厚みや位置バランスが悪くなると、熱膨張係数の差によって異なる熱応力が増加し、セラミックス絶縁基板の熱変形が生じる。これによりセラミックスが割れ、絶縁性能が低下することが懸念される。

セラミックスの熱抵抗は、モジュールの構成部品全体の熱抵抗の2~3割を占める場合が多い。図3に示すように、セラミックスが薄い領域での電界強度の変化が大きく、セラミックスを厚くすることで電界強度を最高値の半分以下に低減できるが、厚さにほぼ比例してセラミックスの熱抵抗も増加し、放熱性が大きく悪化する。そのため、絶縁性能と放熱性能を最適化した設計が必要である。

#### 3.2 放熱性が高いパッケージ構造

従来構造と開発構造について熱解析を行った。得られた温度分布を図4に示す。開発構造ではチップ下に配置した表銅板が従来よりも厚くなった分、表銅板内部で面内方向に熱を拡散することにより、熱伝導率の低いセラミックス部の熱抵抗を低減でき、モジュール全体として熱抵抗を低減できる。図5に、モジュールのセラミックスの厚みと熱抵抗の関係を示す。開発構造は従来構造に比べて熱抵抗を大きく低減できるので、絶縁性能を向上するためにセラミックスを厚くしても絶縁性能と放熱性能を両立できる。なお、半導体のチップサイズやセラミックスの熱伝導率により、銅板による熱抵抗の低減効果が異なる。そこで、電

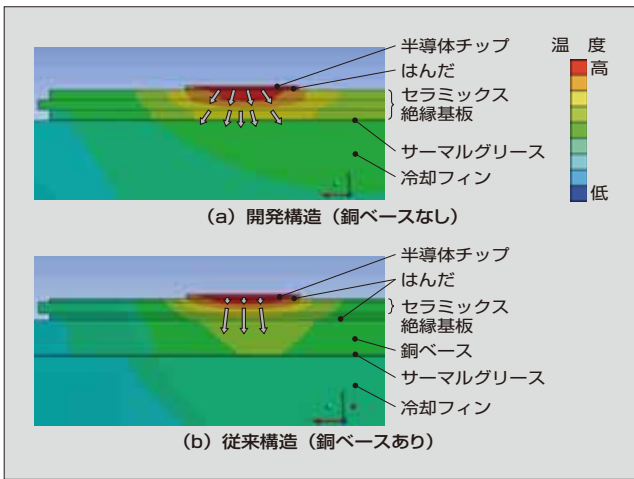


図4 熱解析結果（温度分布）

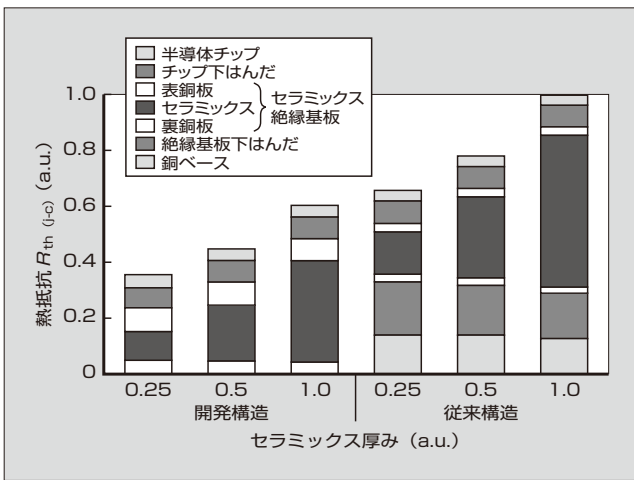


図5 絶縁基板厚みと熱抵抗の関係

流・電圧定格に応じて最適化することにより効果を最大化している。

#### 4 高耐圧化に向けた封止材料評価

初期的な絶縁耐圧試験ならびに長時間一定の電圧や温湿度環境にさらす高温電圧印加試験を行い、モジュールの絶縁性能を評価している。

特に、高温環境と高電圧の使用条件を想定すると、従来構造に用いているシリコンゲル封止は、温度上昇とともに絶縁破壊電圧が大きく低下する。これに対して、エポキシ樹脂は高温での絶縁性能の低下がシリコンゲルよりも小さいため、高温・高耐圧環境での使用が優位になる。

##### 4.1 封止材料の絶縁評価

従来構造で採用しているシリコンゲル封止と、開発構造で採用しているエポキシ樹脂封止について、絶縁性能を比較した。セラミックスや銅板の形状を同じにして封止材料を変えた試験サンプルを作製し（図6）、表面電極に接合した端子と裏面電極との間に電圧を印加して絶縁破壊電圧を測定した。図7に絶縁破壊電圧と累積破壊率の関係を、

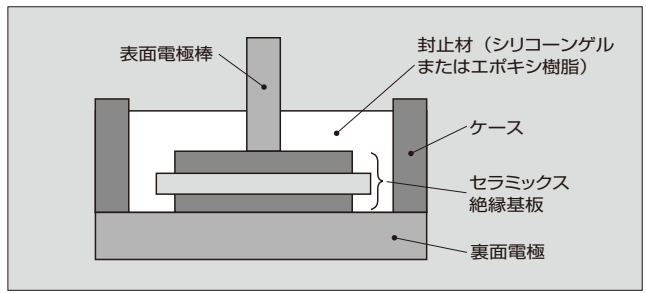


図6 試験サンプル形状

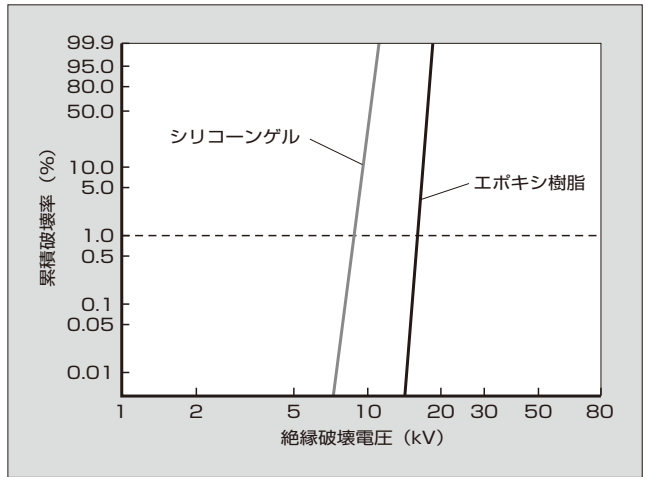


図7 絶縁破壊電圧と累積破壊率の関係

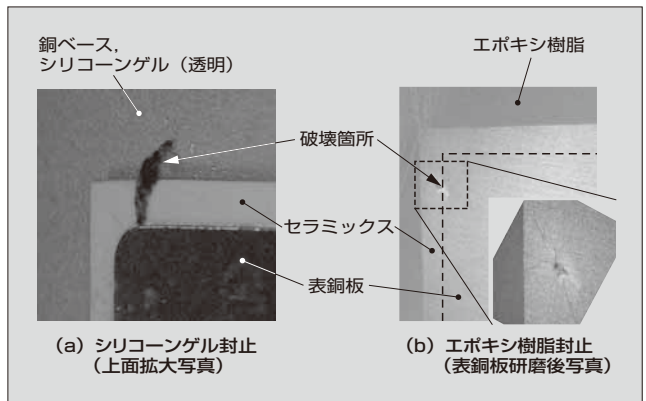


図8 絶縁破壊箇所

図8に絶縁破壊箇所を示す。累積破壊率が1%のとき、絶縁破壊電圧はシリコンゲルの8.8kVに対してエポキシ樹脂は16.3kVであり、約1.9倍の絶縁耐圧を持つ。また、このときの絶縁破壊箇所は、シリコンゲル封止の場合は表銅板とセラミックスとシリコンゲルの三重点を起点として、裏銅板側へシリコンゲルの内部を進展している破壊であった。一方、エポキシ樹脂封止の場合はセラミックスの貫通破壊であった。このことから、エポキシ樹脂封止の絶縁性能はセラミックス絶縁基板自体の破壊耐量で決まり、セラミックスの厚さや絶縁耐圧を向上することにより、さらなる高耐圧化が可能であることが分かった。

## 4.2 封止材料の寿命評価

初期の製品評価に基づいて長期的な製品寿命を評価する方法として、部分放電の有無の確認が有効である。部分放電が発生すると放電箇所を起点として劣化が進展し、長期的には絶縁破壊に至る可能性が高い。部分放電の有無によって不良品を選別・排除し、長期にわたって破壊を防ぐことができる。

図9に、シリコーンゲル封止とエポキシ樹脂封止を行った試験サンプルの部分放電試験の結果を示す。昇圧時に電荷量が増え始める電圧を部分放電開始電圧(PDIV)と呼び、降圧時に電荷量がゼロになる電圧を部分放電消滅電圧(PDEV)と呼ぶ。シリコーンゲル封止の場合は、PDIVが7kVであった。これに対し、エポキシ樹脂封止の場合は、10kVでも部分放電の発生はなく、シリコーンゲル封止に比べて部分放電が起こりにくい。

図10に、部分放電試験を繰り返した際のPDIVとPDEVを示す。エポキシ樹脂封止のサンプルは、約15kVのときに、封止材の部分ではなくケースの外側を経路とした放電が発生した。グラフはそのときの値を用いている。エポキシ樹脂のPDIVはシリコーンゲルに比べて2倍以上である。

シリコーンゲル封止は、一度部分放電が起きると、その後のPDIVは繰り返し回数が増えるごとに徐々に低下する。

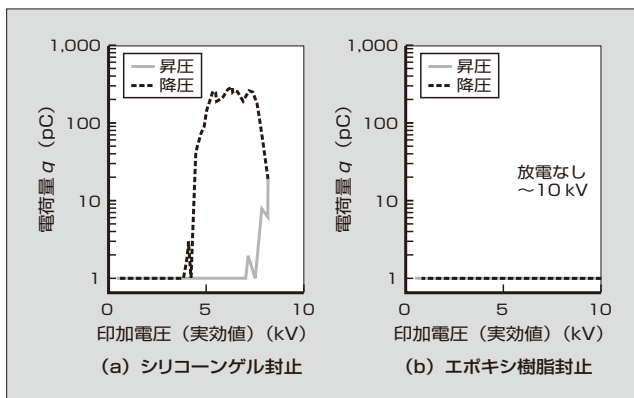


図9 試験サンプルの部分放電試験結果

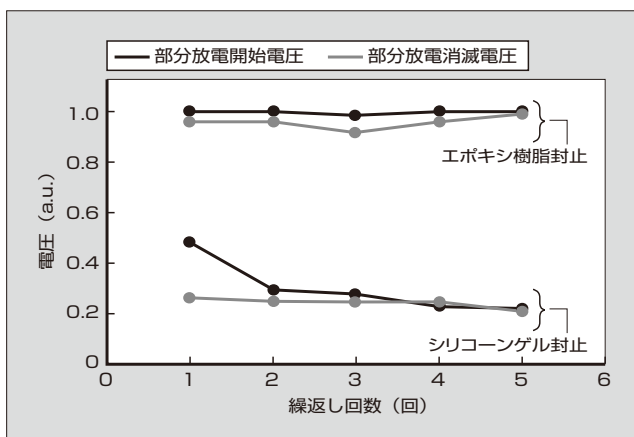


図10 部分放電開始電圧と部分放電消滅電圧

これは、放電箇所を起点としたシリコーンゲルのクラックによる空隙や、分解ガスの影響による気泡などの空隙が発生し、シリコーンゲルの内部やシリコーンゲルとセラミックスの界面での破壊が進むためと考えられる。これに対して、エポキシ樹脂は同じ試験電圧と比較すると部分放電が発生しないことから、長時間使用したとしても部分放電に起因する劣化は起きにくく、SiCデバイスの高耐圧化に向けて優れた封止材であるといえる。

## 5 あとがき

本稿では、All-SiCモジュールの高耐圧化について述べた。シミュレーションに基づく電界強度緩和と放熱性への影響、および封止材料の違いによる絶縁性能の違いを確認した。今後は、高耐圧化したAll-SiCモジュールのいっそうの高信頼性化を進めて適用範囲を広げ、パワーエレクトロニクス技術の発展と低炭素社会の実現に貢献する所存である。

## 参考文献

- (1) 仲村秀世ほか. All-SiCモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.241-244.
- (2) 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モジュール. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.244-248.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Horio, M et al. "Ultra Compact and High Reliable SiC MOSFET Power Module with 200°C Operating Capability," Proceedings of ISPSD, 2012, p.81-84.



日向 裕一朗

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。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。



**谷口 克己**

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。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チームリーダー。



**堀 元人**

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。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チームリーダー。日本伝熱学会会員。

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体





\*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。