

パワーデバイスの品質と信頼性を支える 分析評価技術

榎田豊次*
阿部 剛*
伊藤隆啓**

Analysis and Evaluation Technologies for Quality and Reliability of Power Device

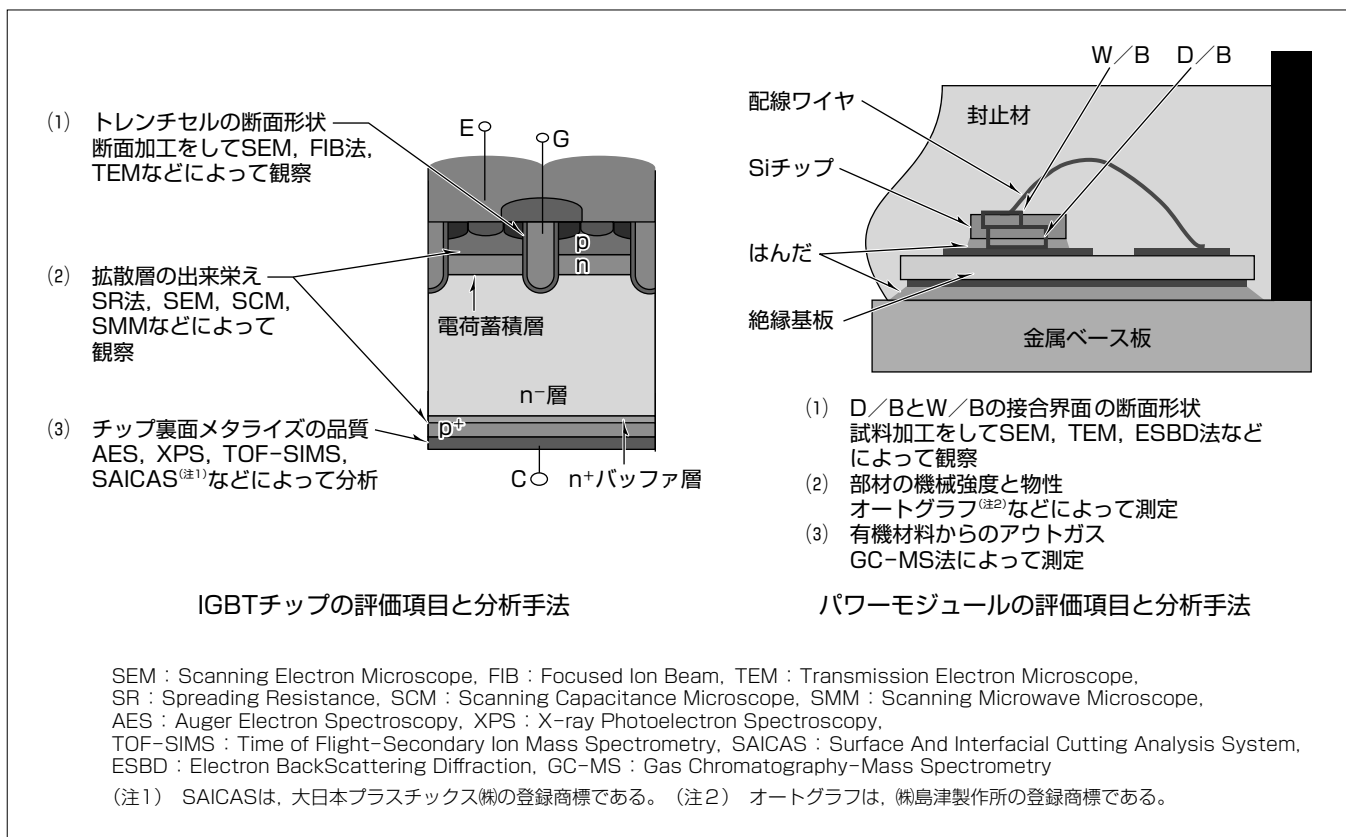
Toyotsugu Enokida, Takeshi Abe, Takahiro Ito

要 旨

三菱電機は、風力及び太陽光発電などの長寿命が求められる高効率パワーコンディショナー、高耐圧・大電流に加えて高信頼性が求められる鉄道車両や電気自動車(EV)やハイブリッド自動車(HEV)の車載用インバータ、エアコンや冷蔵庫及び照明などの家電機器用インバータに適用されるパワーモジュールを得意として製造及び普及することによって、世界の省エネルギー化に貢献をしている。また、1990年代初頭からSi(シリコン)デバイスよりも電力損失の大幅な低減と小型化が実現できるSiC(シリコンカーバイド)デバイスの研究開発を開始し、2010年頃に実用化に成功、現在は製品ラインアップを拡充しながら、適用領域の拡大を続けている⁽¹⁾⁽²⁾。

パワーモジュールを構成する素子であるIGBT(Insulated

Gate Bipolar Transistor Module)やMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)及び環流ダイオードには、静特性や動特性などの要求仕様はもちろん、高い品質と信頼性が要求される。また、素子と端子や基板をワイヤやはんだで接合したり、汚染や水分からの保護と絶縁のために樹脂で被覆したりするため、金属間の結合状態や有機物の密着性、アウトガスなどがパワーモジュールの品質と信頼性に大きく影響を及ぼす。そのため、分析評価部門は、品質・設計・製造技術部門と連携しながら、パワーデバイスを設計開発段階から、出来栄評価、不具合品の解析、使用部材の選定評価などを行い、品質向上を支えている。



IGBTチップとパワーモジュールの評価項目と分析手法

パワーモジュールに搭載されるIGBTチップとパワーモジュール組立て工程での評価項目と分析手法の一例を示す。IGBTチップは、トレンチセルの断面形状、拡散層の出来栄、裏面メタライズの品質を確認する。パワーモジュール組立て工程では、D/B(Die Bonding)、W/B(Wire Bonding)など各接合界面の断面形状、各部材の機械強度やアウトガス成分分析を行う。

1. ま え が き

当社パワーデバイス製作所の敷地内には分析評価部門が所在し、基礎研究、設計・開発、信頼性試験、量産化の過程、また市場で発生する懸念点や詳細に検証すべき事象を迅速かつ多様な手法で解析を行うことができる。また、分析評価部門は最先端の分析技術と長年培ってきた知識によって、ウェーハプロセスとアセンブリプロセスの不良と市場故障の原因究明と対策に直結する分析・解析を提供している。例えば、半導体素子の内部構造と各種電極、素子と配線ワイヤ間の接合状態、素子と絶縁回路基板間の接合状態、半導体素子の拡散構造、パワーモジュールに使用される部材などの出来栄え評価と不良解析を行っている。

本稿では、次の事象に対する解析と対策の提案事例を述べる。

(1) 設計開発段階での分析手法と事例

- ①半導体素子の分析評価技術
- ②パワーモジュールの分析評価技術

(2) 故障(破壊)品の解析事例

2. 設計開発段階での分析手法と事例

2.1 半導体素子の分析評価技術

半導体素子の設計開発段階では、SCF(Short Cycle Feedback)評価による適正なプロセスの条件出しと出来栄えを確認しながら、プロセスフローを確立させている。例えば、IGBTチップの設計開発段階で出来栄えを確認する場合、主に次のような評価を行う。

- (1) トレンチセルの断面形状評価
- (2) 拡散層の出来栄え評価
- (3) チップ裏面メタライズの品質評価

2.1.1 トレンチセルの断面形状評価

トレンチセルの断面形状観察は、樹脂包埋研磨後のSEM(走査型電子顕微鏡)観察、FIB(集束イオンビーム)法による断面観察などで行う。FIB法は、集束させたGa(ガリウム)イオンビームで特定領域に幅数10 μm の穴を開けて傾斜することで、穴の側面を観察する手法であり、数 μm のトレンチの断面構造を鮮明に観察できる。また、FIB加工技術を用いて薄片化加工を行い、TEM(透過型電子顕微鏡)で観察することで、nmのゲート酸化膜の微細形状やコンタクト界面の詳細な構造を観察できる(図1)。

断面観察手法はその試料前処理である断面加工技術と密接な関係があり、目的に応じて、観察手法を選定している。

2.1.2 拡散層の出来栄え評価

トレンチ型又はプレーナ型のIGBTチップで、拡散層の深さ方向の出来栄え評価は、へき開やFIBによる断面加工を行った後、SEMによる電位コントラスト法と化学エッチングで段差を形成させる観察方法がある。観察位置を

指定する場合は、FIBを用いる。最近では、SCM(走査型容量顕微鏡)とSMM(走査型マイクロ波顕微鏡)を使用した拡散層の観察技術を立ち上げ、拡散層の出来栄え評価技術を飛躍的に向上させた。SCMはP/N判定が可能で、SMMは信号強度が濃度に比例するため、SCMとSMMを組み合わせることで、拡散層のP/N判定と濃度勾配の観察が可能である(図2)。

2.1.3 チップ裏面メタライズの品質評価

パワーモジュールに搭載される素子の多くは、はんだによって基板と接合される。その際に、素子裏面のメタル層(バックメタル)の表面が有機物や酸化物で汚染されていると、はんだ濡れ性が悪化し、ボイドの発生など接合状態が悪くなる。それは、はんだ接合強度の低下や熱抵抗の上昇に影響を及ぼし、信頼性低下の原因となる。

そのため、プロセス開発の段階でバックメタルの膜質を確認することが重要であり、最表面の組成、各層の膜質(膜中不純物)、膜の密着性などに着目して評価を行う。バックメタルは、表面側からA層:酸化防止膜、B層:Sn(スズ)との化合物を形成する膜、C層:バリアメタル等で構成されていて、はんだ濡れ性に影響するのはA層表面に析出するB層成分酸化と有機汚染である。特に、B層成分の表面析出と酸化は、バックメタル成膜後の熱処理によるB層元素の熱拡散と酸化が原因で、表面濃度が一定水準を

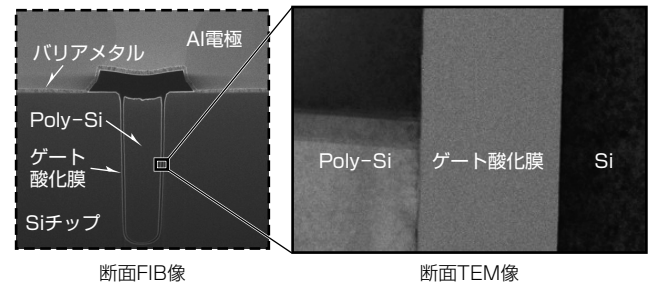


図1. トレンチセルの断面FIBと断面TEM観察事例

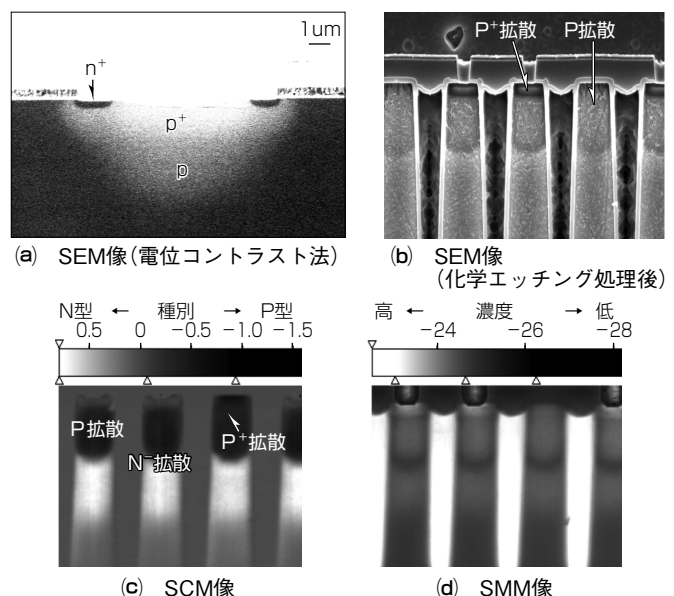


図2. 拡散層の断面観察事例

超えるとはんだボイドが発生しやすいことが分かっている。表面濃度の分析には、数nmの検出深さで分析可能なAES(オージェ電子分光)又はXPS(X線光電子分光)を用いる。

その事例として、バックメタル表面のAES分析事例を**図3**に示す。成分Aのほかに、成分Bと酸素(O)が検出されている。成分Aに対する成分Bの組成比(B/A比)が基準値以下になるプロセス条件を選定し、はんだ濡れ不具合を未然に防止している。

また、バックメタル表面の有機汚染、膜中と界面の成分分析にはTOF-SIMS(飛行時間型2次イオン質量分析)を活用する機会が多い。TOF-SIMSは、Bi(ビスマス)イオンを照射し、2次イオンを検出する手法であり、極最表面(情報深さ:< 1 nm)の有機成分や微量成分の分析に活用される。また、スパッタリングを併用し、深さ方向分析も可能であり、多層膜の酸化や有機汚染の分析に活用している。ここでは、バックメタルの膜中の僅かな酸素量やメタルの酸化成分に着目して分析し、メタル層形成時のプロセス条件の確立に寄与した事例を述べる(**図4**)。NG品の方がC層中の酸素の量やCO_x(Cの酸化物)量がOK品に比べて、顕著に多いことが確認された。

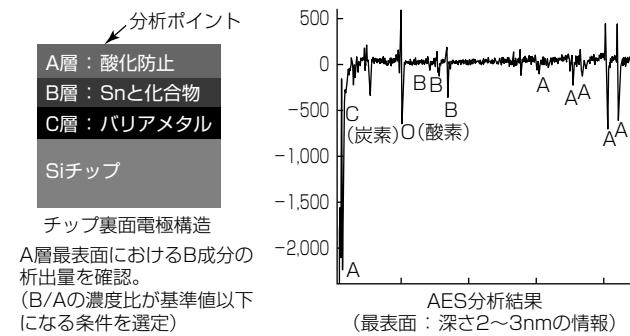


図3. バックメタル表面のAES分析事例

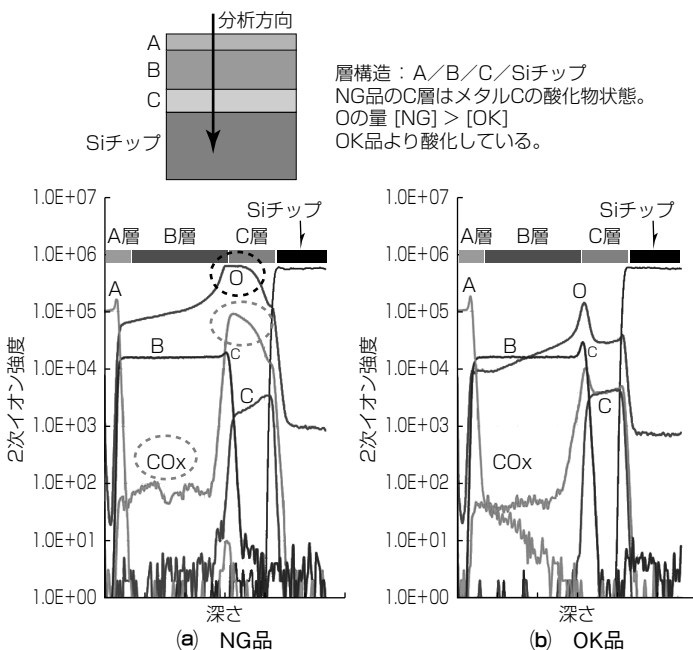


図4. バックメタル膜中のTOF-SIMS分析事例

2.2 パワーモジュールの分析評価技術

パワーモジュールの組立てプロセスでの分析手法について述べる。基本的なパワーモジュールの断面構造は、上部からチップ、セラミックス製絶縁基板、金属ベース板の構造を持っていて、それらの間にはんだで接合している。Siチップの表面電極にはAlワイヤで接合しており、シリコンゲル等で封止している構造である。ここでの着目点は、D/B(Die Bonding), W/B(Wire Bonding)など各接合界面の評価、有機材料からのアウトガス分析などである。

2.2.1 D/BとW/Bの接合界面の評価

図5に、D/B接合界面の断面模式図、断面SEM像、及びB層とIMC(Intermetallic Compound: 金属間化合物)に着目した断面TEM像を示す。Siチップ側からC層とB層の残り、さらに、SnとB層でなるIMCが鮮明に観察される。このように、最適なはんだ接合条件の選定には、IMCの形成状態などを確認することが重要である。

次に、Al(アルミニウム)ワイヤボンディング(以下“Al-W/B”)という。)の分析について述べる。Al-W/B部分の接合状態を詳細に分析することで、最適なボンディング条件の選定に寄与している。Al-W/Bの接合部を断面加工し、EBSD(電子後方散乱回折)法で観察することで、接合状態はもちろん、グレイン形状とサイズ、結晶配向等が観察できる(**図6**)。

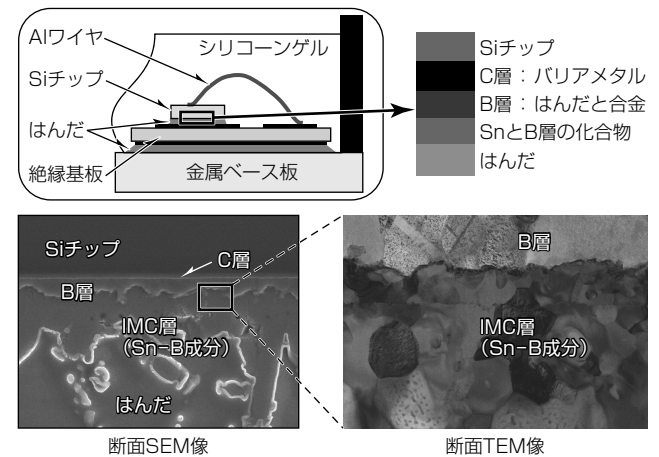


図5. D/B接合界面の断面解析事例

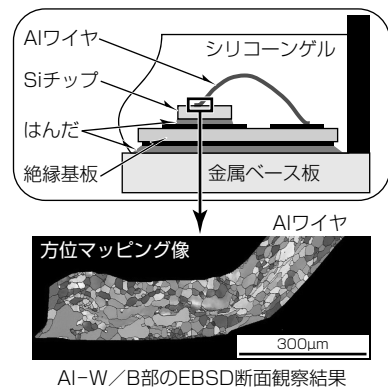
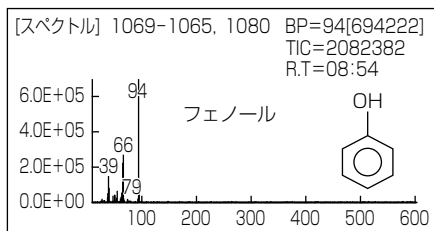
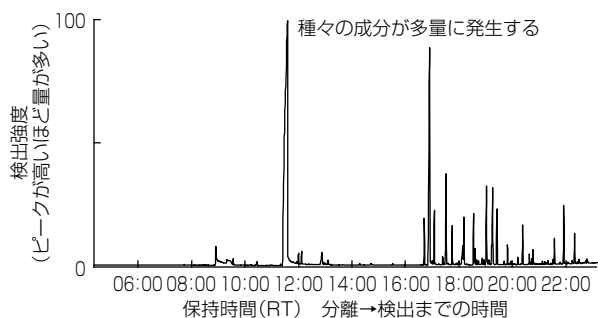


図6. Al-W/B接合界面の断面解析事例



成分特定のため質量分析→フェノールと特定

(a) 基板コート材A



(b) 基板コート材B

図7. 基板コート材からのアウトガス分析事例

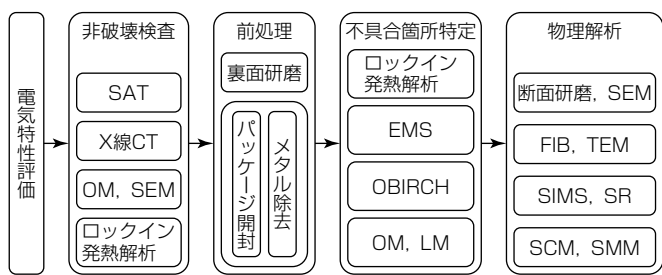
2.2.2 有機材料からのアウトガス分析

パワーモジュールには各種の有機材料が使用されていて、材料からのアウトガスによる周辺電極や接着部材などへの汚染が懸念される。シール材、有機材料などからのアウトガス分析を行い、部材認定の評価データとして活用している。基板コート材からのアウトガスの分析事例について述べる。2種類のコート材について、GC-MS(ガスクロマトグラフィ質量分析)による測定を行った結果、コート材Aは、Bに比べて、種々の有機成分が多量に検出された。検出されたピークについて、質量分析を行った結果、フェノール類が多いことも確認された(図7)。

このように、アウトガスが懸念される有機材料については、ガス発生温度と成分を事前に把握して使用することで有機汚染による不良発生リスクを軽減できる。

3. 故障(破壊)品の解析事例

開発品の信頼性試験と量産品のファイナルテストで不具合が生じた場合や顧客のアセンブリ工程又は市場稼働中に電気的特性の異常が発生した場合の基本的な解析フローを図8に示す。まず、パワーモジュール状態で、電気特性評価を実施し、不具合内容を確認する。次に、外観調査とともに、透過X線、SAT(超音波探傷)画像、ロックイン発熱解析などの非破壊検査による不具合発生位置を検出する。次に、裏面研磨やパッケージ開封で、チップを露出させ、EMS(Emission MicroScope: 発光解析)、OBIRCH



OM : Optical Microscope, LM : Laser Microscope

図8. 故障解析の基本フロー

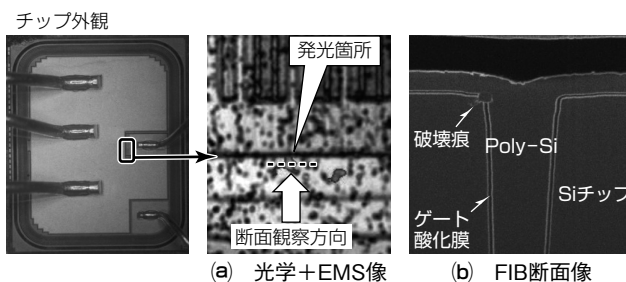


図9. 破壊箇所のEMS像とFIB断面解析事例

(Optical Beam Induced Resistance CHange: オバーク法光ビーム励起抵抗変化)によるチップ内の不具合箇所を特定する。その後、破壊の大きさ、不具合モード、推定原因などを考慮した上、断面研磨、FIB、TEM、SCM/SMM等の様々な物理解析手法の中から、適切な手法を選定して不具合の現象を詳細に把握する。

今回、故意に、リード端子にESD(静電気放電)を印加し、破壊させた製品の解析事例について述べる。まず、SATやX線、外観検査、発熱解析で不具合に至ったチップを特定した。次に、電気特性から表面解析を選択し、パッケージ開封後にチップ表面のEMS発光解析によってIGBTチップ内の不具合箇所を特定した。FIB断面解析を実施した結果、センス部トレンチゲートの酸化膜に破壊痕が観察された(図9)。

4. むすび

三菱電機のパワーデバイスの品質・信頼性を強力にサポートしている分析評価技術と解析事例について述べた。パワーモジュールの小型化、大容量化、高温駆動化や使用環境の過酷化に対して、高い信頼性を確保するため、今後も継続的に分析評価技術によって対応していく。

参考文献

- (1) 塩田裕基, ほか: パワーモジュールの絶縁信頼性を支える絶縁評価技術, 三菱電機技報, 91, No.7, 385~388 (2017)
- (2) 福本晃久, ほか: パワーモジュールの接合部での信頼性設計技術, 三菱電機技報, 91, No.7, 389~392 (2017)