

IGBT モジュールの高信頼性実装技術

High Reliability Packaging Technologies of IGBT Modules

百瀬 文彦 MOMOSE Fumihiko

西村 芳孝 NISHIMURA Yoshitaka

望月 英司 MOCHIZUKI Eiji

再生可能エネルギーの利用拡大に伴い、IGBT モジュール製品の用途が多様化し、さらなる信頼性の向上が求められている。製品の品質と信頼性を確保するためには、故障・劣化モードを特定し、破壊メカニズムに基づいた信頼性設計が必要である。富士電機では、高信頼性を実現するため、実機を模擬した熱疲労寿命、電界シミュレーションによる絶縁寿命および極低温動作保証の設計を行っている。また、製品の長寿命化を実現するため、実装技術として Sn-Sb はんだ接合と超音波端子接合を開発した。さらに、実装状態で良好な放熱性を確保するため、熱伝導グリスについて調査した。

With the expansion in use of renewable energy, the uses of insulated gate bipolar transistor (IGBT) module products have diversified and there is a demand for higher reliability. Ensuring the quality and reliability of products requires specification of failure/degradation modes and reliability design based on failure mechanisms. To achieve high reliability, Fuji Electric is creating designs for thermal fatigue lifetime based on simulation of actual device, insulation lifetime through electric field simulation, and ultra-low temperature operation assurance. In addition, to achieve longer product life, we have developed ultrasonic welding of terminal and Sn-Sb soldering as packaging technologies. Furthermore, to ensure good heat dissipation under the conditions of use, we have investigated thermal grease.

1 まえがき

近年、地球温暖化の防止に向けて、化石燃料の使用による CO₂ の排出を削減するため、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの利用拡大、ハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) の普及促進が図られている。さらに、従来の電力システムは、大規模集中電源に大きく依存しているため、再生可能エネルギーをはじめとした多様な供給力の最大活用によるリスク分散と効率性を確保する分散型の次世代システムが検討されている⁽¹⁾。

そのため、電力変換やモータ制御において IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュール製品の使用と、その用途は従来に増して広がっている。

本稿では、市場要求に応える IGBT モジュールの高信頼性実装技術とそれを支える設計技術について述べる。

2 IGBT モジュールへの高信頼性要求

再生可能エネルギー分野では、砂漠のメガソーラーや洋上の風力発電など、メンテナンス時のアクセスが容易でないことが多いため、製品のメンテナンスフリー化が求められている。このような場合、要求される製品寿命は 30 年ほどあり、一般の産業製品に比べて長い。したがって、パワーサイクル耐量、温度サイクル耐量などの高い信頼性が要求される⁽²⁾。

車載向け電子部品は、炎天下から寒冷地に至るまでさまざまな環境下で安全性を確保する必要がある。自動車特有の信頼性のため、動作環境に対する耐久性は他の民生用途に対し 2～3 倍以上と高い⁽³⁾。さらに、HEV や EV では、燃費改善の視点から小型・軽量化が求められ、IGBT モジュールの高密度実装化 (高電流密度化) 要求を満足し

なければならない。

鉄道車両分野では、電力変換装置に大容量のパワー半導体素子が用いられている。使用電圧が高いため、高絶縁の材料・設計技術と高耐圧信頼性の確保が重要である。また、シベリアなどの極寒地での耐久性も要求されている。

3 高信頼性設計技術

3.1 熱疲労寿命設計

IGBT モジュールの典型的な故障に、熱疲労によるものがある。モジュール構造部材の温度変化が繰り返すことにより、線膨張係数の違いから各部材間の接合部に繰返し応力が加わることで発生する。主な故障箇所を図 1 に示す。⁽⁴⁾

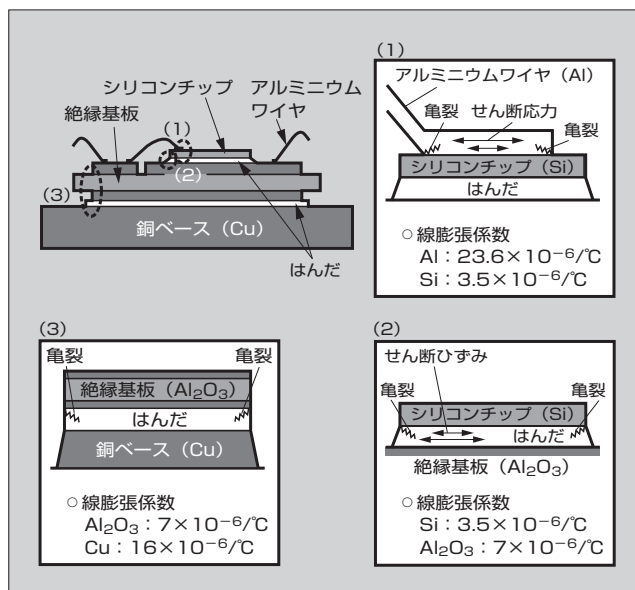


図 1 IGBT モジュールの故障箇所

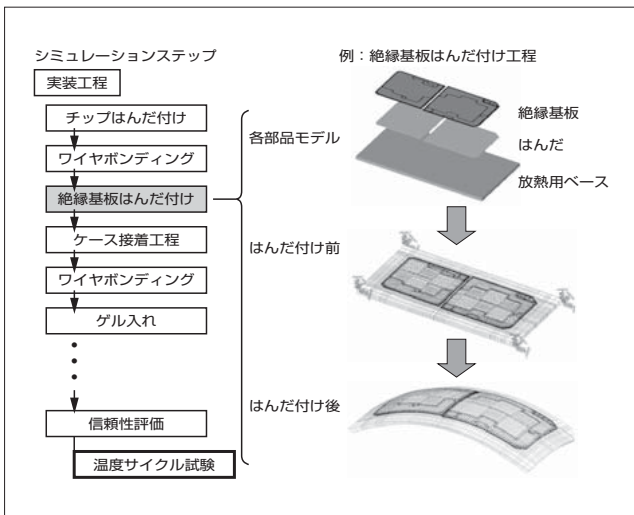


図2 実装工程を反映したシミュレーション

接合箇所の金属材料への繰返し応力による破壊であることから、一般に疲労寿命には塑性ひずみが大きく影響し、次式に示す Coffin-Manson 式で表される。

$$N_f = \alpha \Delta \epsilon^{-n} \dots \dots \dots (1)$$

N_f : 破断までの繰返し数
 ϵ : 塑性ひずみ範囲
 α, n : 材料によって決まる定数

富士電機では、疲労寿命の予測精度を向上させるため、IGBT モジュールに用いる各材料の金属組織の変化までを考慮した、材料の疲労特性を取得している⁽⁵⁾。

また、IGBT モジュールの接合箇所には、実装工程における残留応力や累積ひずみが存在する。そこで実装工程を反映したシミュレーション (図2) を実施し、IGBT モジュールに発生する塑性ひずみなどを整合させることで、設計段階から高精度な製品寿命の予測を可能にした。

3.2 絶縁設計

IGBT モジュールにおける絶縁設計においては、製品定格に応じた絶縁破壊耐圧および長期信頼性を確保するため、部分放電開始電圧を考慮する必要がある。部分放電開始電圧が低いと、動作時の印加電圧により放電が発生し、シリコンゲル部が絶縁劣化して破壊に至る。

図3に IGBT モジュールにおける絶縁破壊の例を、図4に銅回路端部における電界強度解析の結果を示す。

絶縁破壊は銅回路の端部から発生し、セラミックスとシリコンゲル界面が破壊経路になっている。電界強度は銅回路の端部近傍で最大になっており、絶縁破壊の起点となっていることが分かる。したがって、絶縁設計では、この最大電界強度をいかに小さくするかが重要である。

富士電機では、シミュレーションを活用した絶縁設計により、製品定格に応じた破壊耐圧および長期信頼性確保の観点から、部分放電開始電圧を考慮した最適設計を行っている。

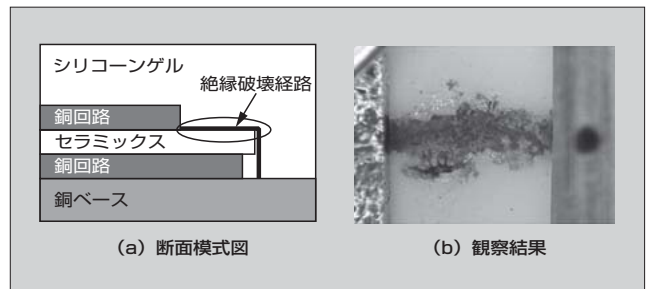


図3 IGBT モジュールにおける絶縁破壊

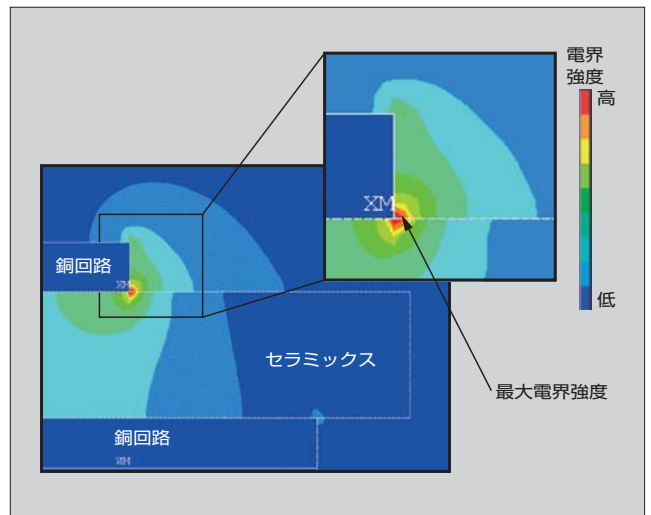


図4 銅回路端部における電界強度解析の結果

3.3 極低温動作技術

一般の IGBT モジュールにおける最低動作保証温度は -40°C であるが、シベリアなどの極寒地で IGBT モジュールを使用したいという要求に応えるため、極低温 (-55°C) での IGBT モジュールの破壊モードについて調査した。

IGBT モジュールの動作時の信頼性寿命を示すパワーサイクル試験を、周囲温度 -55°C 、IGBT チップ温度 $\Delta T_j = 80^{\circ}\text{C}$ ($T_j = -55 \sim +25^{\circ}\text{C}$) で実施した。通常、パワーサイクル試験では、チップ下のはんだ、もしくはアルミニウムワイヤ部で破壊する⁽⁶⁾。しかし、周囲温度 -55°C でのパワーサイクル試験では、通常温度と比較して少ないサイクル数で絶縁破壊が生じた。図5に、 ΔT_j パワーサイクル試験を 5,000 サイクル行った後の IGBT モジュールの状態を示す。シリコンゲルにはクラックが発生し、クラック部と絶縁破壊位置が整合した。

周囲温度の変化に対する耐量を示す温度サイクル試験 (試験温度 $-55 \sim +150^{\circ}\text{C}$) でも、破壊モードは ΔT_j パワーサイクル試験と同様に、シリコンゲルのクラック部の絶縁破壊であった。極低温 (-55°C) での破壊モードがシリコンゲルのクラックによるものであることから、ゲルの脆化 (ぜいか) を抑制する特殊な分子構造に変更することで、 -55°C で使用可能なシリコンゲルを開発した。

図6に、周囲温度 -55°C で 75 時間放置したシリコンゲルの状態を観察した結果を示す。通常のシリコンゲル

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

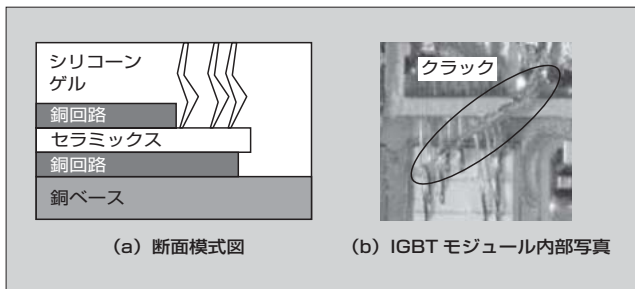


図5 周囲温度 -55°C における ΔT_j パワーサイクル試験 5,000 サイクル後の状態

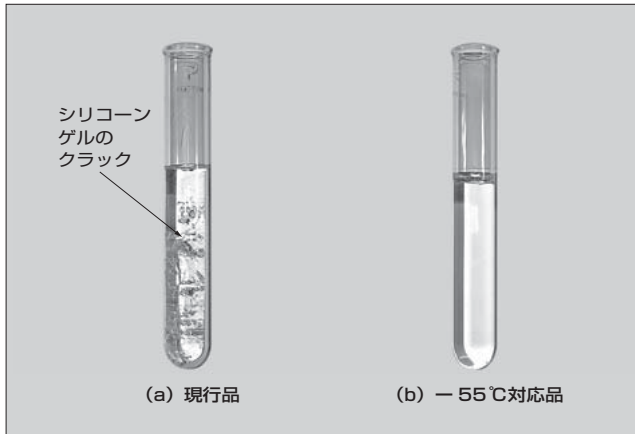


図6 周囲温度 -55°C における放置試験の結果

ではクラックが発生したが、 -55°C 対応シリコンゲルでは、極低温でも弾性が保持されるためクラックが発生しない。このシリコンゲルを用いることにより、 ΔT_j パワーサイクル、温度サイクル試験でシリコンゲルのクラックによる絶縁破壊は発生せず、従来と同等の信頼性寿命を確保することができる。

4 高信頼性実装技術

4.1 はんだ接合

IGBT モジュールの組立において、はんだは主にチップと絶縁基板、絶縁基板と銅ベース、および端子と絶縁基板の接合に用いられる。IGBT モジュールは使用時の環境やチップ発熱によって繰り返し温度変化を受け、はんだ接合部には熱膨張係数差による応力が生じる。これにより、はんだ層の応力集中部にクラックが発生・進展する場合があるため、はんだの信頼性を確保することが重要となる。

図7に、従来の代表的な鉛フリーはんだであるSn-Ag はんだとSn-Sb はんだの高温時効後の引張強度を示す。どちらも初期強度は変わらないが、 150°C および 175°C での1,000h保持後ではSn-Ag はんだの強度が大きく減少するのに対し、Sn-Sb はんだでは初期の強度を維持している。

図8に、IGBT モジュールの基板下に適用したSn-Ag はんだおよびSn-Sb はんだの温度サイクル($-40 \sim +150^{\circ}\text{C}$)試験前後の超音波探傷像を示す。300サイクル後では従来のSn-Ag はんだにクラックが発生しているのに

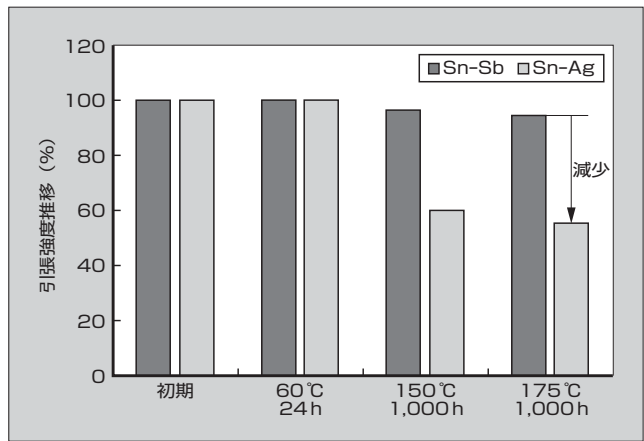


図7 Sn-Sb はんだおよびSn-Ag はんだの高温時効後の引張強度

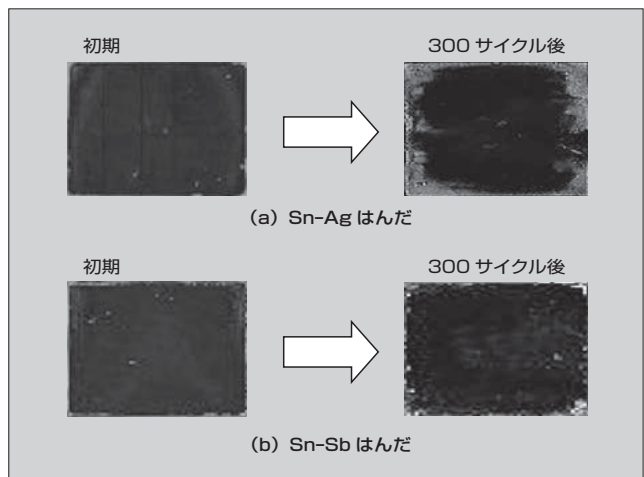


図8 温度サイクル後の基板下はんだクラック進展(超音波探傷像)

対して、Sn-Sb はんだではクラックの進展はほとんど見られない。Sn-Sb はんだは耐熱性が高く、温度サイクルでの疲労特性も優れ、絶縁基板と銅ベースの間に適用することにより高信頼性を実現している。

4.2 超音波接合

IGBT モジュールの端子と内部絶縁基板の接合には、以前からはんだを用いている。製品の大電流化に伴う大型化およびIGBT モジュールへ接続されるブスバーの大型化のため、IGBT モジュールの端子部への応力の増大によるはんだ接合部での破壊が懸念される。そこで、端子と内部回路基板の接合に超音波接合を適用している^{(8),(9)}。図9に、超音波接合部の外観および断面写真を示す。超音波接合を用いて、端子と基板の銅回路が固相拡散により直接接合しているため、強固で線膨張係数差のない接合部が得られる。図10に、製品における温度サイクル後の端子の最大引張荷重を示す。Sn-Ag はんだ接合による端子接合部は300サイクルにおいて強度が50%まで低下しているが、超音波接合を用いた端子は1,000サイクルまで強度の低下は確認されていない。超音波接合では、端子と基板の接合強度が

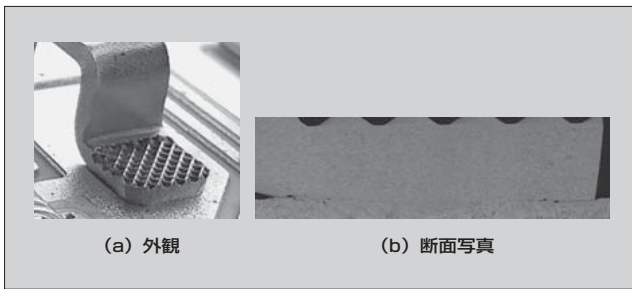


図9 超音波接合部

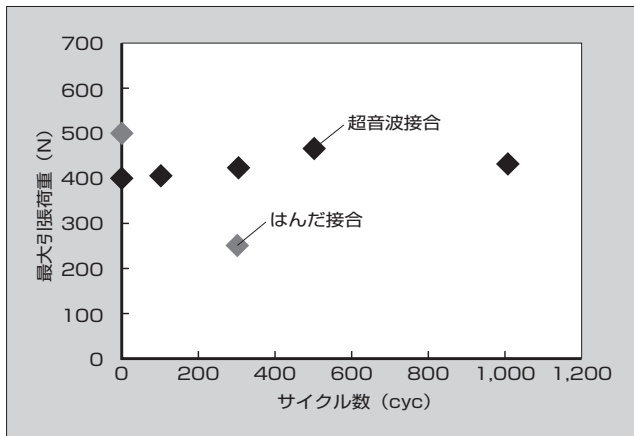


図10 温度サイクル後の端子の最大引張荷重

高いだけでなく、端子と基板が同じ銅系の材料なので線膨張率の差による応力が発生しない。このため、非常に高い信頼性を得ることができた。

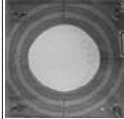
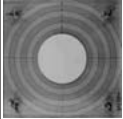
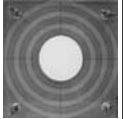
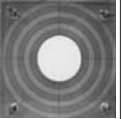
5 信頼性向上アプリケーション技術

IGBT モジュールは、良好な放熱性を得るために熱伝導グリースを介して冷却フィンに搭載される。グリースの不足や枯渇は放熱性を低下させるため、IGBT チップ温度が過度に上昇し熱破壊に至る。

表1に、熱伝導グリースの特性を示す。粘度が低いグリースは広がりやすく、より薄く塗布することが可能である。IGBT モジュールと冷却フィンのシステム設計では、熱抵抗を小さくする必要があるため、寿命の観点も含めてグリースの厚さを最適にすることは機器として非常に重要である。

IGBT モジュールと冷却フィン、常に水平に搭載されているとは限らない。例えば、キャビネットではIGBT モジュールは垂直に搭載されているため、動作中のグリースの流出も合わせて考慮する必要がある。そこで実際にグリースの流出について調査を行った。具体的には、まず冷却フィンを模擬したアルミニウムプレートに粘度の異なるグリース(表1)を塗布し、温度サイクル(-40~+125℃)試験を実施した。実動作でのグリースの挙動を模擬するために試験サンプルは垂直に設置し、グリースの流出を観察した。図11に観察結果を示す。サンプルA、B

表1 熱伝導グリースの特性

	サンプルA	サンプルB	サンプルC	サンプルD
粘度 (Pa・s)	38	54	195	110
広がり性	 12cm	 8cm	 7.5cm	 7.5cm
最薄膜(BLT) (μm)	5	19	11	8
熱伝導率 [W/(m・K)]	0.76	0.66	0.58	2
ベースオイル	シリコーン	非シリコーン	非シリコーン	非シリコーン

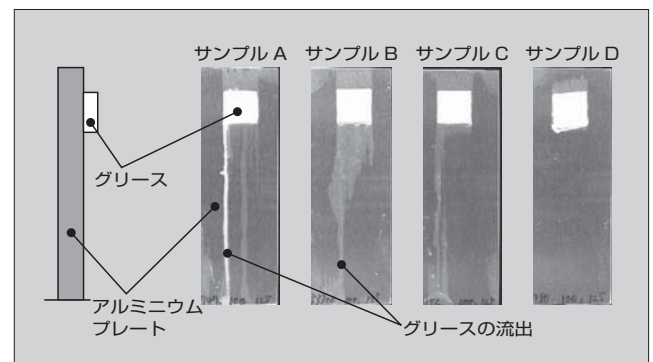


図11 温度サイクル試験後のグリースの観察結果

ではグリースの流出が顕著にみられるのに対し、サンプルDではグリースは形状を保持している。これらの結果から、グリース流出は粘度に依存していると考えられ、粘着性が高いグリースは温度サイクルにおいて安定した形状保持性を持っていることが分かる。

次に、IGBT モジュールに実際にグリースを塗布して、グリースの特性とIGBT モジュールの信頼性との関係を調査した。IGBT モジュールは、銅ベースレス構造で冷却フィンに垂直に搭載し、温度サイクル(-40~+125℃)試験を実施した。初期と試験後の熱抵抗の変化を測定することで、グリースの安定性を確認した。図12に、温度サイクル後の熱抵抗変化を示す。低粘度のサンプルAの熱抵抗上昇率は25%であり、高粘度のサンプルC、Dではそれぞれ10%、9%であった。サンプルBは図11の結果から実施しなかった。

これらの結果から、低粘度のグリースは薄く塗布でき、初期熱抵抗を下げるのが可能だが、動作中に流出の影響で熱抵抗が上昇し、高粘度のグリースに比べて短寿命化するリスクがあると考えられる。また、グリースの塗布厚みは、粘度だけでなく塗布方法にも影響する。このため、熱伝導グリースの選定は、実際のIGBTアプリケーションとその動作および塗布方法に基づいて行うことが重要である⁽¹⁾。

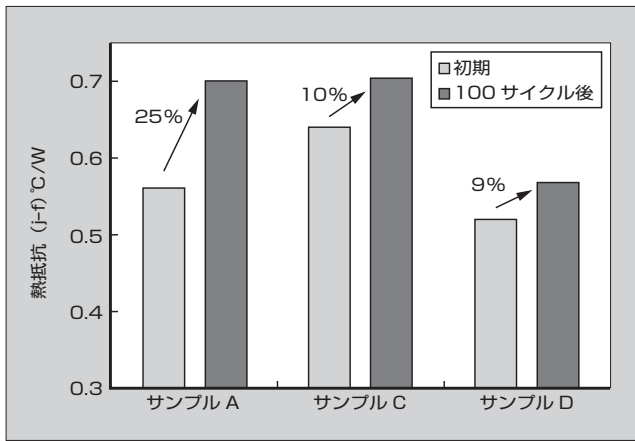


図 12 温度サイクル試験後の熱抵抗変化

6 あとがき

本稿では、IGBT モジュールにおける高信頼性実装技術について述べた。これらの技術を基に、高信頼性の要求を満足する IGBT モジュールの開発を行い、装置の高効率化、省エネルギー化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会基本問題委員会. 新しい「エネルギー基本計画」策定に向けた論点整理. 2011.
- (2) エネルギーエレクトロニクス実装における信頼性の課題. 信頼性解析技術委員会. エレクトロニクス実装学会誌. 2010, vol.13, no.1, p.17-19.
- (3) 山口浩二ほか. 車載用半導体製品の品質・信頼性の作り込み. 富士時報. 2011, vol.84, no.2, p.127-131.
- (4) 両角朗ほか. パワー半導体モジュールにおける信頼性設計技術. 富士時報. 2001, vol.74, no.2, p.145-148.
- (5) 塩川国男ほか. 製品の品質・信頼性を支える評価技術. 富士時報. 2011, vol.84, no.2, p.157-162.
- (6) Morozumi, A. et al. IEEE Trans on Industry Applications. 39, 2003, p.665-671.
- (7) 福田恭平ほか. “IGBTモジュールのリードフレーム配線構造における鉛フリー接合信頼性に関する研究”. 平成20年溶接学会秋季全国大会予稿集, no.83, p.420-421.
- (8) 木戸和優ほか. “IGBTモジュール用超音波接合技術の開発(第一報)”. Mate2010予稿集, p.335-338.
- (9) 木戸和優ほか. “IGBTモジュール用超音波接合技術の開発(第二報)”. Mate2011予稿集, p.197-200.
- (10) 西村芳孝ほか. IGBTモジュールのサーマルマネジメント技術. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.423-427.
- (11) Momose, F. et al. “Thermal management of IGBT modules systems”. PCIM Asia 2012.



百瀬 文彦

半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センター。日本機械学会会員。



西村 芳孝

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターチームリーダー。工学博士。日本材料学会会員、エレクトロニクス実装学会会員。



望月 英司

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、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターマネージャー。エレクトロニクス実装学会会員、IMAPS 会員。





*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。