

175℃連続動作を保証する IGBT モジュールのパッケージ技術

New Assembly Technologies for $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ Continuous Operation Guaranty of IGBT Module

百瀬 文彦 MOMOSE Fumihiko

齊藤 隆 SAITO Takashi

西村 芳孝 NISHIMURA Yoshitaka

インバータの小型化とコストダウンの要求に応えるため、IGBT モジュールには従来に増して高パワー密度化が求められている。富士電機は、アルミニウムワイヤ、はんだおよび表面電極保護膜を新たに開発して、IGBT モジュールの連続動作温度を従来の 150℃ から 175℃ へ向上させることで高パワー密度化を実現した。パワーサイクル寿命は、全ての温度領域で従来に比べ 2 倍以上を達成した。これにより汎用インバータの最大出力を約 20% 向上させることが期待できる。

In order to meet the needs for miniaturization and cost reduction of inverters, IGBT modules are required to offer higher power density than ever. Fuji Electric has developed a new aluminum wire, solder alloy and surface electrode protection layer to improve the continuous operating temperature of an IGBT module from the conventional 150°C to 175°C, thereby realizing higher power density. A power cycle life-time has been more than doubled compared with the conventional products in all temperature ranges, and thus 20% improvement of inverter maximum output can be expected.

1 まえがき

省エネルギー（省エネ）に大きく寄与することから、産業分野で汎用インバータの普及と需要が拡大している。汎用インバータにおいては省エネ化と小型化だけでなく、システム開発も含めたトータルコストダウンが市場要求として強い⁽¹⁾。

富士電機は、これらの市場要求に応えるため、汎用インバータに搭載される IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの主要構成要素である IGBT チップの損失改善と小型化を進めてきた。IGBT モジュール「V シリーズ」は、「U シリーズ」から動作温度を 25℃ 上昇させ、150℃ での連続動作を保証することで IGBT モジュールの高パワー密度化を行い、インバータシステム全体の小型化およびコストダウンに大きく貢献してきた。図 1 に、定格 (1,200 V/50 A) における IGBT モジュールのチップ面積のトレンドを示す。IGBT チップの損失改善は限界に近づいており、IGBT モジュールのさらなる小型化、高パワー密度化を実現するために、動作温度の上限を

さらに引き上げる検討を行った。動作温度の上限を従来の 150℃ から 175℃ に上げた場合、試算上では汎用インバータ出力は約 20% の向上が可能である。本稿では、175℃ 連続動作で高信頼性を実現する IGBT モジュールのパッケージ技術について述べる。

2 175℃連続動作を保証するための技術的課題

175℃ での連続動作を保証する上で、パワーサイクル寿命は重要な要素の一つである。最高使用温度が従来の 150℃ から 25℃ 上昇するため、構成材料にかかる熱応力が従来よりも増大する。同時に、運転、停止による温度変化も大きくなり、従来よりも高い熱疲労に対する耐性を保証する必要がある。

最高使用温度 T_{jmax} を固定した場合で、累積故障率が 1% における従来モジュールのパワーサイクル寿命を図 2 に示す。 T_{jmax} を 150℃ から 175℃ に上げると、寿命は約 30 ~

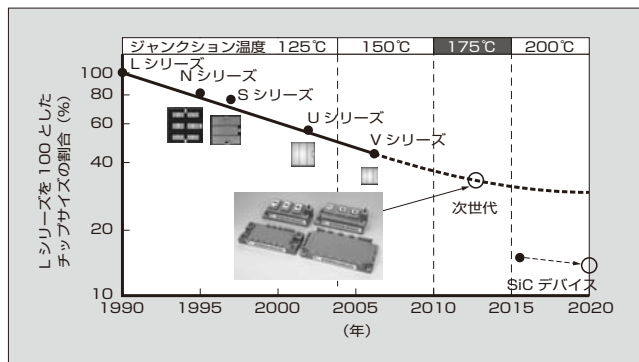


図 1 IGBT チップ面積のトレンド (1,200 V/50 A)

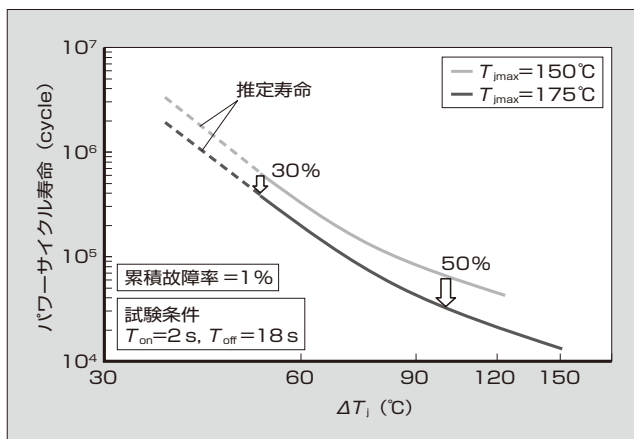


図 2 従来構造におけるパワーサイクル寿命

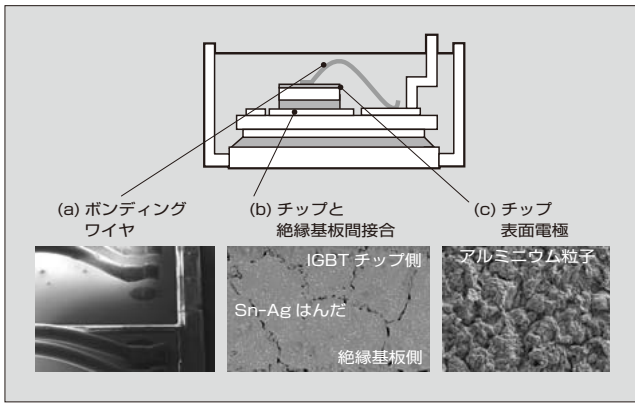


図3 パワーサイクル試験後 ($T_{jmax}=175^\circ\text{C}$) の破壊箇所

50% 低下してしまう。そのため、最高使用温度を 175°C に上げて、従来の 150°C と同等のパワーサイクル寿命を確保する高信頼性パッケージを実現することが必要不可欠となる。

一般的にパワーサイクル試験における IGBT モジュールの破壊は、温度変化によって線膨張係数の異なる構成材料間に繰返し応力が発生し、これによって起こる疲労破壊であると考えられている^{(2),(3)}。 175°C 連続動作時では、この繰返し応力に加えて、 25°C 上昇分の構成材料における金属組織の変化の影響を考慮しなくてはならない。考慮すべき構成材料には、はんだとアルミニウムがある。これらの観点から、 175°C 連続動作時のパワーサイクル試験における破壊箇所について観察を行った。

図3にパワーサイクル試験後 ($T_{jmax}=175^\circ\text{C}$) の破壊箇所を示す。主な破壊機構としては次の三つがある。

(a) ボンディングワイヤ

アルミニウムワイヤと Si チップとの線膨張係数差によって発生するせん断応力により、アルミニウムワイヤの母材中にクラックが進行し、最終的にアルミニウムワイヤが剥離する。

(b) チップと絶縁基板間接合

チップと絶縁基板間のはんだの金属組織の変化と熱疲労によってはんだ接合部にクラックが進行する。

(c) チップ表面電極

チップ表面電極におけるアルミニウムの結晶粒の粗大化と、Si との線膨張係数差によりクラックが発生する。

175°C 連続動作を確保するためには、これら三つの破壊機構における材料寿命をそれぞれ改善する必要がある。

3 高信頼性を達成する新接合技術

3.1 新アルミニウムワイヤ

図4にパワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175^\circ\text{C}$, $\Delta T_j=75^\circ\text{C}$) 後のアルミニウムワイヤ接合部の断面を示す。アルミニウムワイヤ接合部は、アルミニウムワイヤの母材中にクラックが進行したことで、破壊に至っている。このことから、アルミニウムワイヤの母材強度が寿命を支配していると推測できる。

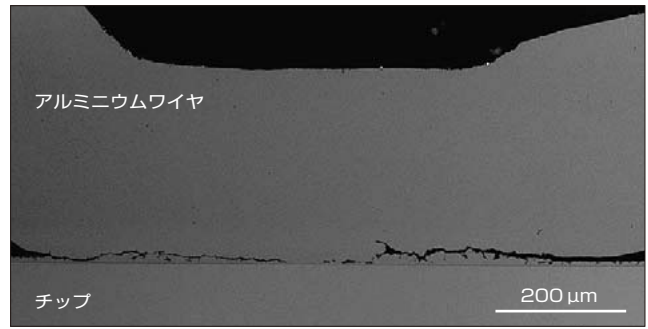


図4 パワーサイクル試験後のワイヤ断面

T_{jmax} が 175°C のパワーサイクル試験では、アルミニウムの再結晶温度領域内であるため、アルミニウムワイヤの結晶粒は成長して粗大化すると考えられる。

金属の結晶粒径と強度の関係は、次に示す Hall-Petch 式で表される⁽⁴⁾。

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \dots\dots\dots (1)$$

σ_y : 降伏応力
 d : 金属の平均粒径

σ_0, k : 材料によって決まる定数

Hall-Petch 式は、金属結晶粒の成長は強度を低下させることを示している。そこで、富士電機では 175°C よりも高い再結晶温度を持つ新アルミニウムワイヤを開発した。図5に、パワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175^\circ\text{C}$) 前後のアルミニウムワイヤの断面を示す。EBSD (Electron Back Scatter Diffraction) により断面を観察したものである。従来のアルミニウムワイヤの結晶粒はパワーサイクル試験後に成長が認められたが、新アルミニウムワイヤの結晶粒は変化していない。つまり、パワーサイクル試験でアルミニウムワイヤの母材の強度低下が起こっていないと推定できる。

3.2 新はんだ

175°C 連続動作においては、熱および熱応力によるチップ-基板間のはんだ接合部の劣化が加速される懸念がある⁽⁵⁾。そこで、微細組織の考察に基づき、高温環境に対するはん

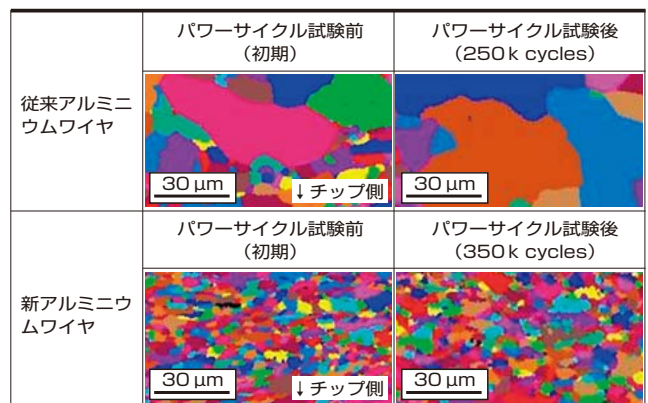


図5 パワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175^\circ\text{C}$) 前後のアルミニウムワイヤの断面

だ材の強化を検討した。

金属を添加元素により強化する方法として、析出強化型と固溶強化型が挙げられる。⁽⁶⁾ 図 6 に、熱時効前後のはんだ組織の模式図を示す。各強化方法における金属の微細な組織変化を示している。析出強化型の例としては、Sn-Ag はんだが挙げられる。Sn-Ag はんだでは、 Ag_3Sn の微細な金属間化合物が Sn 粒界に析出し、粒界を強化することでクラックの進行を防いでいる。しかし高温下においては、Sn 粒の粗大化および Ag_3Sn の凝集により粒界クラックが発生する。一方、Sn に Sb や In を固溶限度内で添加したはんだは固溶強化型となる。Sb や In などの元素は Sn 粒内に固溶し、高温下での Sn 粒粗大化を抑制する。

図 7 に高温放置試験後のはんだの引張強度の変化を示す。150℃および175℃で1,000時間放置した後に、Sn-Ag はんだは初期に比べて強度が大きく低下するのに対し、Sn-Sb はんだは初期強度を維持している。また、これらのはんだがパワーサイクル寿命に与える効果を比較するため、Sn-Ag はんだおよび Sn-Sb はんだを用いたサンプルでパワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175℃$) を実施した。Sn-Sb はんだは、Sn-Ag はんだに比べてパワーサイクル寿命が向上することを確認した。さらに、Sb を固溶限度以上に添加すると、溶け残った Sb が SnSb 合金として析

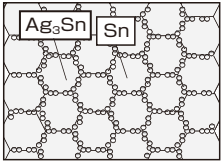
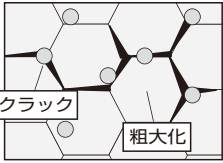
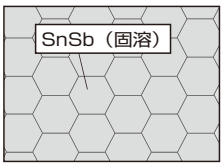
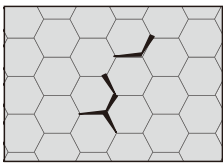
	初期 (熱時効前)	信頼性試験後 (熱時効後)
析出強化型		
固溶強化型		

図 6 熱時効前後のはんだ組織の模式図

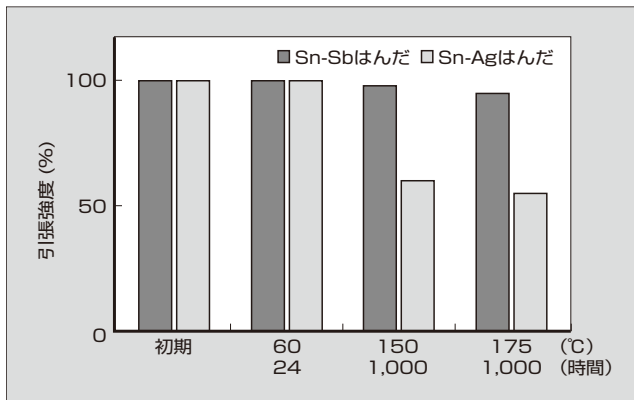


図 7 高温放置試験後のはんだ引張強度の変化

〈注〉時効：時間の経過に伴い金属の性質（例えば、硬さなど）が変化する現象をいう。

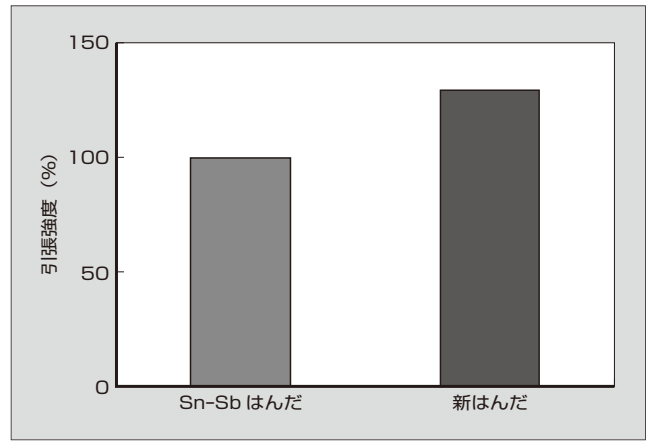


図 8 Sn-Sb はんだと新はんだの引張強度

出し、固溶強化と析出強化を兼ね備えたはんだとなる。⁽⁷⁾

この性質を生かして、富士電機では次世代 IGBT モジュールの量産化に向け、Sn-Sb に新元素を加えた固溶強化と析出強化を兼ね備えた新はんだを開発した。図 8 に Sn-Sb はんだと新はんだの引張強度を比較した結果を示す。新はんだは Sn-Sb はんだよりも高い引張強度を持ち、新はんだを用いたパワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175℃$) でのパワーサイクル寿命は Sn-Sb はんだに対し高寿命となることを確認した。

3.3 表面電極の新保護膜

従来、Si チップの表面電極は純アルミニウムまたは Si や Cu などを添加したアルミニウム合金が用いられる。パワーサイクル試験におけるチップの表面電極は、チップの発熱によるアルミニウム結晶粒の粗大化および Si チップとの線膨張係数差により、チップ表面電極に応力が加わり、アルミニウムワイヤ接合部以外の、表面電極内にクラックが進展する⁽⁸⁾。この現象を防ぐために、チップの表面電極に発生する応力を低減し、アルミニウムよりも Si に近い線膨張係数を持つ Ni をアルミニウム電極上に成膜した構造を開発した。図 9 に、パワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175℃$) 後のアルミニウムワイヤボンディングをしていない表面のチップ表面電極の観察結果を示す。Ni をアルミニウム電極表面に成膜し、保護膜とすることで劣化を抑制することが可能である。

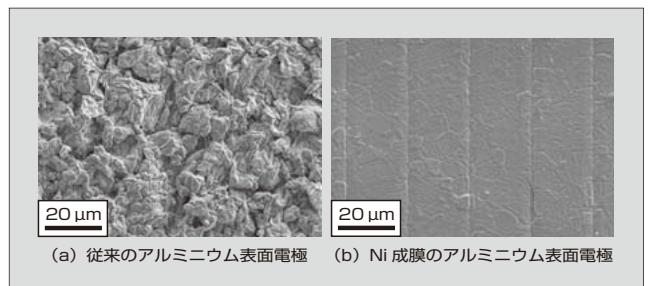
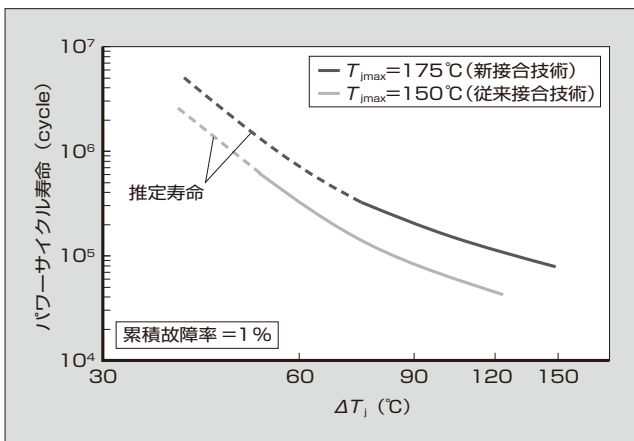


図 9 パワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175℃$) 後の表面電極

図10 パワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$) 結果

4 新接合技術適用の効果

3章で述べた三つの新接合技術を適用したサンプルを製作し、パワーサイクル試験を実施した。

図10にパワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$) 結果を示す。新接合技術を適用したパワーサイクル寿命 ($T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$) は、目標とした従来接合技術によるパワーサイクル寿命 ($T_{jmax}=150^{\circ}\text{C}$) を大きく上回り、全ての温度領域で2倍以上の寿命を達成した。

5 あとがき

175℃連続動作で高信頼性を達成する IGBT モジュールのパッケージ技術について述べた。高耐熱性を持つ新アルミニウムワイヤ、高温で高強度を持つ新はんだ合金、ならびに高温で高強度を持ち Si とアルミニウムワイヤ間の熱応力が低い新表面電極保護膜の三つの新接合技術により、175℃連続動作を保証し、かつ従来よりも高寿命の IGBT モジュールを開発した。

これらの技術は現状の富士電機のプロセスをそのまま使用できるため、175℃連続動作を保証する製品の量産が容易に可能である。さらなる高パワー密度化により汎用インバータの最大出力を向上させることが期待できる。今後も、175℃連続動作を保証する IGBT モジュールの開発、系列化を進め、産業機器の高効率化、省エネルギー化に貢献し

ていく所存である。

参考文献

- (1) 酒井利明ほか. 汎用インバータとサーボシステムの最新技術. 富士時報. 2009, vol.82, no.2, p.133-139.
- (2) Morozumi, A. et al. 'Reliability of power cycling for IGBT power semiconductor modules' Proceedings IEEE, 36th Industry Applications Conference vol.3, p.1912-1918, 2001.
- (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) N. J. Petch, J. Iron Steel Inst., 174, Part I. 1953, p.25-28.
- (5) 日本金属学会編. 金属便覧 改訂4版. 丸善株式会社. 1982, p.511.
- (6) 西川精一. 金属工学入門. アグネ技術センター. 1985, p.225-232.
- (7) Morozumi, A. et al. Direct Liquid Cooling Module with High Reliability Solder Joining Technology for Automotive Applications, Proceedings of the 25th ISPSD & ICs, Kanazawa, May 26-30, 2013.
- (8) Ikeda, Y. et al. 'A study of the bonding wire reliability on the chip surface electrode in IGBT' Proceedings of The 22nd International Symposium on ISPSD, Hiroshima 2010.



百瀬 文彦

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パッケージ開発部。日本機械学会会員。



齊藤 隆

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パッケージ開発部。表面処理技術協会会員。



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パッケージ開発部マネージャー。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。



*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。