

xEV 向け IGBT モジュールの高電力密度化を実現する パッケージ技術

Package Technology for Achieving Higher Power Density in IGBT Modules for xEVs

佐藤 悠司 SATO, Yushi

安達 新一郎 ADACHI, Shinichiro

東 展弘 HIGASHI, Nobuhiro

自動車分野では、温室効果ガス排出削減の手段として電動車が期待されている。電動車のインバータに搭載されるパワーモジュールは、小型・薄型化、高出力化を併せ持った高電力密度化が求められる。富士電機は、これらの市場要求に対して業界トップクラスの超小型の xEV 向け IGBT モジュール「M677」を開発した。高電力密度化に伴い増加する単位体積当たりのストレスに対して、リードフレーム配線をチップの平面上に接合することで小型で薄型の IGBT の短絡耐量が向上した。また、市場で要求されるはんだ接合部のエレクトロマイグレーション寿命に対して、十分な耐性を確保した。

In the automotive field, electrified vehicles are expected as a measure of reducing greenhouse gas emissions. Their power modules in the inverter are required to have a higher power density, that is, small, thin and high output. To meet these market demands, Fuji Electric has developed the “M677,” an industry-leading ultra-compact IGBT module for xEVs. We have improved the short-circuit withstand capacity of this small, thin IGBT by bonding the lead frame on the flat surface of the chip to reduce the stress per unit volume that has increased with the growth of the power density. In addition, the solder joints have sufficient resistance to the electromigration lifetime to meet the market needs.

1 まえがき

気候変動問題を解決するために“2050年のカーボンニュートラル実現”に向けた国際的な取組みが加速している。自動車分野では、温室効果ガス排出削減の手段として、ハイブリッド自動車（HEV：Hybrid Electric Vehicle）やプラグインハイブリッド自動車（PHEV：Plug-in Hybrid Electric Vehicle）、電気自動車（EV：Electric Vehicle）のような電気モータで走行する電動車（xEV）の普及が期待されている。

この社会的要請の実現に貢献するため、富士電機は、xEVのパワートレインを構成するキーコンポーネントとして、100kWクラスのインバータをターゲットとした業界トップクラスの超小型の xEV 向け IGBT モジュール「M677」を開発した（図1）。M677では、高い電力密度を実現することにより、市場の要求に応えるモジュールの小型化を達成した。

本稿では、高電力密度化を実現するパッケージ技術について述べる。

2 高電力密度化の課題

開発した M677 では、モジュールの小型化と高出力化を両立させるために第7世代 RC-IGBT（逆導通 IGBT：Reverse-Conducting Insulated Gata Bipolar Transistor）を採用し、さらにその導通損失を低減するため、チップの薄化と表面構造の最適化を行っている。また、回路構成を1チップ/アームとして、従来品の「M653」で採用していた2チップ/アーム構成に比べてチップの専有面積を低減した。その結果、表1に示すように、従来品の M653 に比べて主回路の面積が半減し、電力密度を約2倍高めている。一方、従来品に比べてチップを小型化・薄化したことにより、チップ体積の減少に伴う熱容量

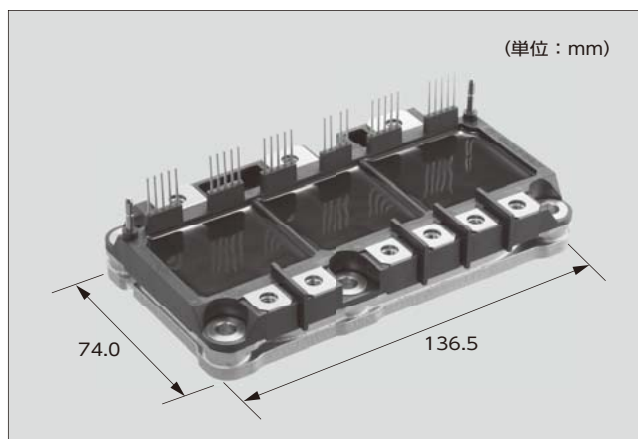


図1 xEV 向け IGBT モジュール「M677」

表1 「M653」と「M677」の内部回路比較

	M653	M677
内部回路構成		
回路面積 (arb.unit)	1.00	0.49
電力密度 (arb.unit)	1.00	1.98

〈注〉アーム：219 ページ「解説1」を参照のこと

の減少や、チップ表面積の減少による熱抵抗の増加が避けられない。モジュールの性能を低下させないためには、動作時の接合部の温度を規定値以下に保たなければならないので、チップからの放熱性を高める対策が必要となる。

また、高電力密度化に伴って、エレクトロマイグレーションへのさらなる対策も必要となる。エレクトロマイグレーションとは、金属中に電流を流すと、電子が金属原子と衝突して金属原子が輸送される現象である。金属原子が輸送されるとポイドを形成し、これが増大すると電気抵抗や熱抵抗の上昇をもたらす。最終的には断線を引き起こす可能性もあることから、モジュールの信頼性を確保するためにも、電流密度の高い部分が十分なエレクトロマイグレーション耐性を備えることが必要となる。

③ 短絡耐量の向上

3.1 IGBT の短絡故障モード

パワーモジュールの短絡動作は、チップ破壊、制御回路や駆動回路の異常、ノイズによる誤動作、配線接続の間違い、地絡などが原因となり発生する。IGBT が短絡状態になると、高電圧が印加された状態で数千 A の大電流が流れるため、IGBT に大きなストレスがかかり、この状態が続くと IGBT が破壊に至る。

短絡動作に伴う IGBT の破壊モードは、図 2 に示す四つに大別することができる。高電圧が印加された状態で大電流が流れることによりラッチアップが起き、ターンオン動作後すぐに破壊に至る A モード、短絡動作中の電力損失による急激な温度上昇によって熱破壊に至る B モード、ターンオフ動作中に IGBT 内部の不均一な動作による電流集中が影響して破壊に至る C モード、短絡遮断後の異常なリーク電流による熱暴走が起これ破壊に至る D モードである。このような短絡動作時に IGBT が破壊に至るまでの時間は、短絡耐量として規定される。

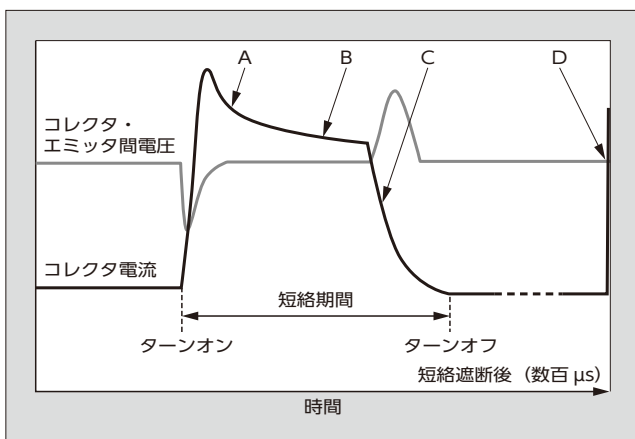


図 2 IGBT の短絡破壊モード

3.2 IGBT の活性体積と D モード短絡耐量の関係

D モードに対する短絡故障の原因は、短絡遮断後に発生する異常なリーク電流によって熱暴走が起これ、チップの内部温度が急激に上昇することである⁽⁶⁾。この短絡耐量は、チップの薄化を図ると低下する。薄化したチップは、体積が減少して熱容量が小さくなるため、短絡遮断後の熱暴走に対してチップの温度が格段に上昇しやすいことが原因とされている⁽⁹⁾。図 3 に IGBT の活性体積（電流が流れる有効領域）と短絡破壊エネルギーの関係を示す。IGBT の活性体積と D モードに対する短絡耐量は比例するので、小型化と高耐量化はトレードオフの関係にある。

3.3 リードフレーム配線による短絡耐量の向上

チップの薄化に伴って熱容量が低下しても、チップと配線の接合面積を増加して放熱性を向上することで温度上昇を抑えることができる⁽¹⁰⁾。

今回開発した M677 のチップに対して、従来品の M653 に使われていたアルミニウムワイヤ配線を適用した場合は、D モードに対する短絡耐量が M653 に対して 30% 低下する。その対策として、アルミニウムワイヤ配線に比べて熱容量が大きい銅製リードフレーム配線をチップの平面上に接合する構造を採用した。

図 4 にアルミニウムワイヤ配線と銅製リードフレーム配線の D モードで破壊に至る短絡破壊エネルギーの比較による、リードフレーム配線による短絡耐量の向上の効果を示す。従来のアルミニウムワイヤ配線に対して、40% 向上することを確認した。

M677 では、上述した対策により、導通損失低減に有効となる薄化したチップにおいて短絡耐量を確保した。加えて、RC-IGBT の表面構造を最適化することにより、導通損失を低減している。図 5 にコレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ を示す。同一の飽和電圧下におけるコレクタ電流密度は、従来の RC-IGBT と比べて 20% 増加している。

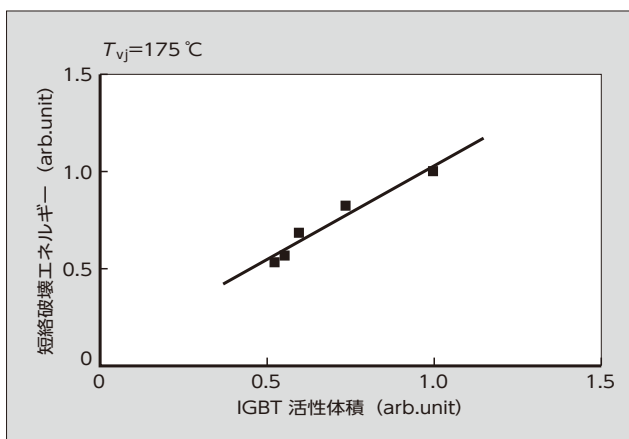


図 3 IGBT の活性体積と短絡破壊エネルギーの関係

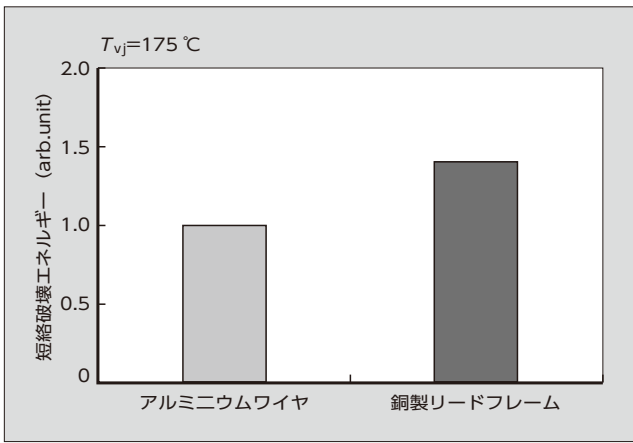


図4 リードフレーム配線による短絡耐量の向上の効果

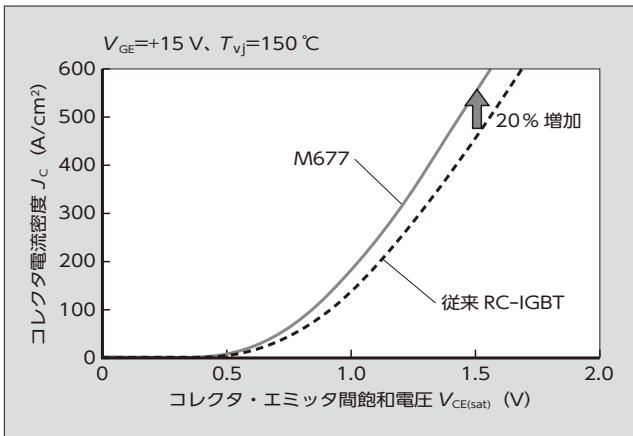


図5 コレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$

4 エレクトロマイグレーションと信頼性評価手法

4.1 エレクトロマイグレーション

2章で述べたエレクトロマイグレーションに起因する平均故障時間 (MTTF: Mean Time To Failure) は、式(1)に示す“Blackの式”より推定できる¹¹⁾。

$$MTTF = AJ^{-n} \exp\left(\frac{Ea}{kT}\right) \dots\dots\dots(1)$$

- A : 定数
- J : 電流密度
- n : 電流密度指数
- Ea : 活性化エネルギー
- k : ボルツマン定数
- T : 絶対温度

この式(1)によれば、エレクトロマイグレーションによるMTTFは、電流密度が大きく、温度が高いほど短くなる。パワーモジュールを構成する部材の中で、最も電流密度が大きくなるのは接合材として使われるはんだ部分であるため、M677の開発に際しては、はんだ接合部に対するエレクトロマイグレーション耐性を検証した。

4.2 電流密度と温度の影響

M677において、リードフレームや絶縁基板とチップを接続するはんだ接合部のエレクトロマイグレーション耐性を検証するため、はんだ接合部を模擬した試験片を用いて評価した。図6に試験回路の概要を示す。M677では、パワーモジュール動作時の温度変化によって接合部に発生するひずみを低減するために、はんだAとはんだBには特性が異なるはんだを採用しているため、それぞれ試験片を評価した。

試験方法として、試験片には一定の電流を連続通電し、恒温槽中で周囲温度を制御した。上述した式(1)で支配因子となっている電流密度と温度を試験条件として比較した。また、エレクトロマイグレーション寿命の判定基準として、試験片の抵抗値が20%増加した時間とした。

試験結果として、図7に電流密度に対するエレクトロマイグレーション寿命を、図8に温度に対するエレクトロマイグレーション寿命を示す。“Blackの式”から予想されるとおり、電流密度が大きいほど、また、温度が高いほど短くなっている。また、はんだBは、はんだAに対してエレクトロマイグレーション耐性があることを確認した。

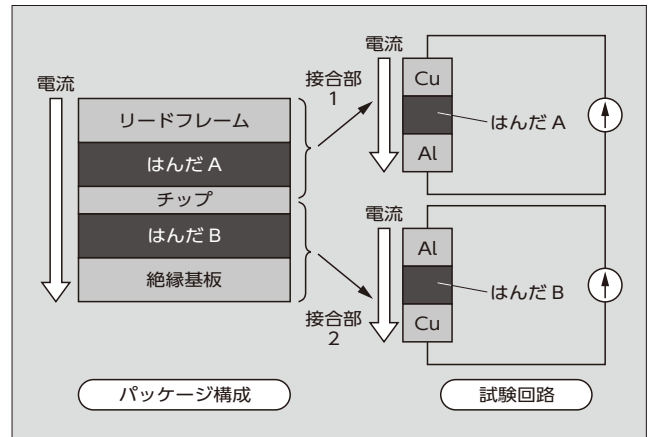


図6 試験回路の概要

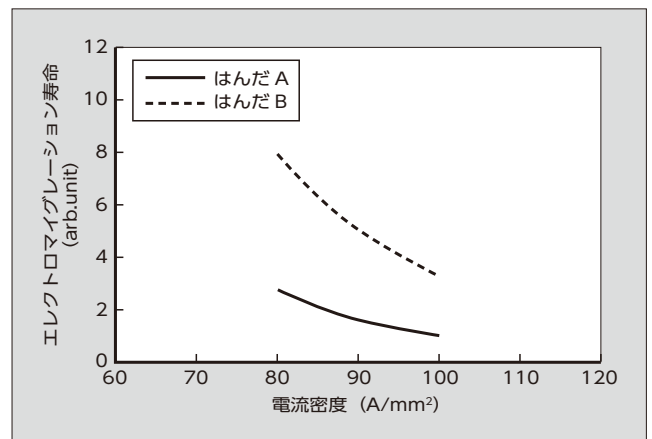


図7 電流密度に対するエレクトロマイグレーション寿命

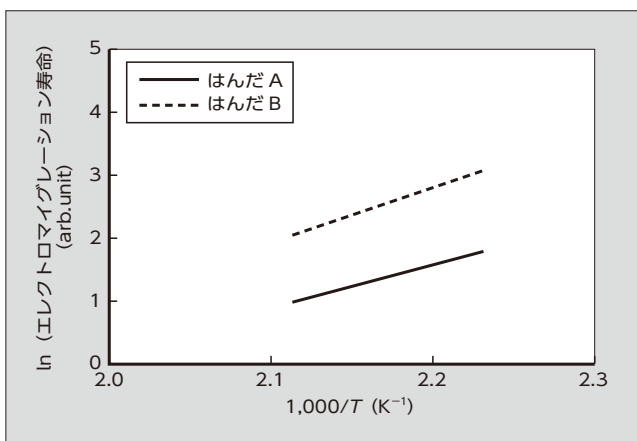


図8 温度に対するエレクトロマイグレーション寿命



図9 連続通電試験後のはんだ接合部の断面

4.3 「M677」のエレクトロマイグレーション耐性

M677 は、エレクトロマイグレーション寿命の目標値を満足できるように、チップサイズ、はんだ材料、内部配線などが設計されている。エレクトロマイグレーションの目標寿命は、4.2 節で述べた電流密度と温度に対する結果から、式(1)で求めたはんだ材料の MTTF と、パワーモジュールが実際に xEV に使われる際に想定されるストレスにより求めた。

M677 のエレクトロマイグレーション耐性を検証するために、実機を使った連続通電試験を実施した。図9 に連続通電試験後のはんだ接合部の断面を示す。それぞれ、目標寿命の約 3 倍の時間まで連続通電した際の、はんだ接合部 1 およびはんだ接合部 2 の断面である。試験後の断面には、配線抵抗や熱抵抗の上昇に伴うポイドが確認されなかったことから、M677 はエレクトロマイグレーションの目標寿命に対して十分な耐性を実現していると考えられる。

5 あとがき

xEV 向け IGBT モジュールの高電力密度化を実現するために取り組んだ短絡耐量の向上およびエレクトロマイグレーション耐性について述べた。このような取り組みにより、xEV 向け 100 kW クラス超小型 RC-IGBT モジュール「M677」の提供を可能にした。

今後も急速に伸長する xEV 向けパワー半導体の需要に対し、低損失化、高電力密度化、高信頼性化のために技術開発に引き続き取り組み、市場要求に応えたパワーモジュールを提供することでカーボンニュートラルの実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 安達新一郎ほか. xEV向け100 kWクラス超小型RC-IGBTモジュール「M677」. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.236-239.
- (2) 立石義博ほか. xEV向け超小型RC-IGBTモジュールの冷却技術. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.240-245.
- (3) 荒井裕久ほか. 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.269-273.
- (4) Yamashita, J. et al, "A Study on the Short Circuit Destruction of IGBTs", Proc. of the 5th ISPSD, 1993, p.35-40.
- (5) Yamashita, J. et al, "A Study on the IGBT's Turn-off Failure and Inhomogeneous Operation", Proc. of the 6th ISPSD, 1994, p.45-50.
- (6) Otsuki, M. et al, "Investigation on the Short-Circuit Capability of 1200 V Trench Gate Field-Stop IGBTs", Proc. of the 14th ISPSD, 2002, p.281-284.
- (7) Hagino, H. et al, "An Experimental and Numerical Study on the Forward Biased SOA of IGBT's", IEEE Transactions. Electron Devices, 1996, vol.43, no.3, p.490-500.
- (8) Takata, I. et al, "Non Thermal Destruction Mechanisms of IGBTs in Short Circuit Operation", Proc. of the 14th ISPSD, 2002, p.173-176.
- (9) Otsuki, M. et al, "A Study on the Short-Circuit Capability of Field-Stop IGBTs", IEEE Transactions. Electron Devices, 2003, vol.50, no.6, p.1525-1531.
- (10) Otsuki, M. et al, "Advanced thin wafer IGBTs with new thermal management solution", ISPSD, 2003, April 14-17, Cambridge UK, p.144-147.
- (11) R.L. de Orio. et al, "Physically based models of electromigration : From Black's equation to modern TCAD models", Microelectronics Reliability, 2010, vol.50, p.775-789.



佐藤 悠司

電気・ハイブリッド自動車用 IGBT モジュール・IPM の開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部電装設計第一部。



安達 新一郎

電気・ハイブリッド自動車用 IGBT モジュール・IPM の開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部電装設計第一部。



東 展弘

電気・ハイブリッド自動車用 IGBT モジュール・IPM のパッケージ開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部電装設計第一部。





*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。