

xEV 向け IGBT モジュールの過電流耐量の向上

Enhanced Over-Current Capability of IGBT Modules for xEVs

原 康文 HARA, Yasufumi

吉田 崇一 YOSHIDA, Soichi

井上 大輔 INOUE, Daisuke

近年、省エネルギー化や CO₂ 排出規制に伴い、世界各国でハイブリッド自動車や電気自動車のような電動化車両への切換えが加速している。電動化車両のインバータに搭載される車載 IGBT は、異常時に発生した過電流に対する耐量 (I^2t 耐量) の向上が要求される。富士電機は、RC-IGBT を搭載し、さらに RC-IGBT 表面電極の回路への接続をリードフレーム方式として、 I^2t 耐量を向上させた xEV 向け IGBT モジュールを開発した。従来の構造では個別 FWD とワイヤボンディングによる方式を採用していたが、RC-IGBT とリードフレームを組み合わせた構造によって、 I^2t 耐量が 2.6 倍向上した。

In recent years, measures to achieve energy savings and reduce CO₂ emissions have accelerated the switchover to xEVs, such as hybrid vehicles and electric vehicles, throughout the world. The IGBTs used in the inverters of xEVs are being required to enhance their capability to withstand over current (I^2t capability) at the time of accident. Fuji Electric has developed IGBT modules for xEVs that use RC-IGBTs and a lead frame to connect to the circuit of RC-IGBT surface electrodes, improving I^2t capability. The I^2t capability is 2.6 times higher for the new structure combining RC-IGBTs with a lead frame than for the conventional method using discrete FWDs and wire bonding.

1 まえがき

近年、省エネルギー化や CO₂ 排出規制に伴い、世界各国でハイブリッド自動車 (HEV: Hybrid Electric Vehicle) や電気自動車 (EV: Electric Vehicle) などの電動化車両 (xEV) への切換えが加速している。HEV や EV には電気モータを駆動するために搭載されるインバータとともに、その構成部品である xEV 向け IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの需要が高まっている。この xEV 向け IGBT モジュールは車両の小型化、高効率化、高信頼性を実現する上でのキーデバイスである。

富士電機は、IGBT と FWD (Free Wheeling Diode) を 1 チップ化した RC-IGBT (逆導通 IGBT: Reverse-Conducting IGBT) を搭載し、さらに RC-IGBT の表面電極の回路への接続を従来のワイヤボンディング方式に替わるリードフレーム (LF) 方式を適用し、過電流耐量 (I^2t

耐量) を向上させた xEV 向け IGBT モジュール (図 1) を開発したので、その内容について述べる。

2 I^2t 耐量

2.1 I^2t 耐量の向上の必要性

車両に搭載されたインバータ装置では、過電流や過電圧などで異常が発生した場合に、減速して停止する処理が実行される。その際、モータの逆起電力による平滑コンデンサの破壊を防止するため、アクティブショートサーキット (ASC: Active Short Circuit) 制御が働き、上下アームどちらかの IGBT を ON 状態にする場合がある (図 2)。HEV や EV の効率を改善するため、バッテリーが高電圧化する傾向にある。それに伴い、モータの駆動電圧が高電圧化し、ASC 制御の動作時にパワーモジュール内の半導体チップに瞬間的に流れる過電流が増加する。この過電流によって発生する熱に対する IGBT モジュールの FWD チップの I^2t 耐量の向上が課題となっている⁽¹⁾。

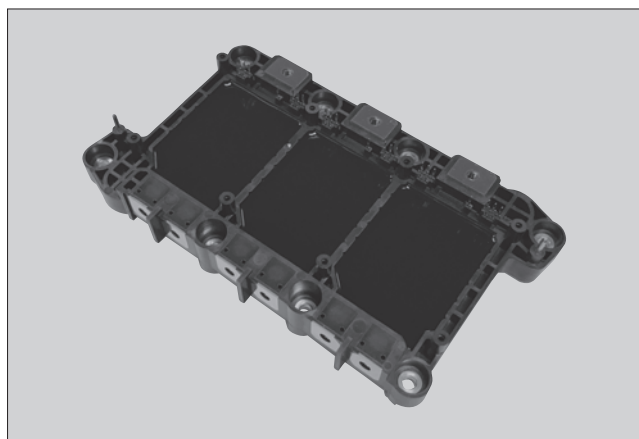


図 1 xEV 向けモジュール (開発品)

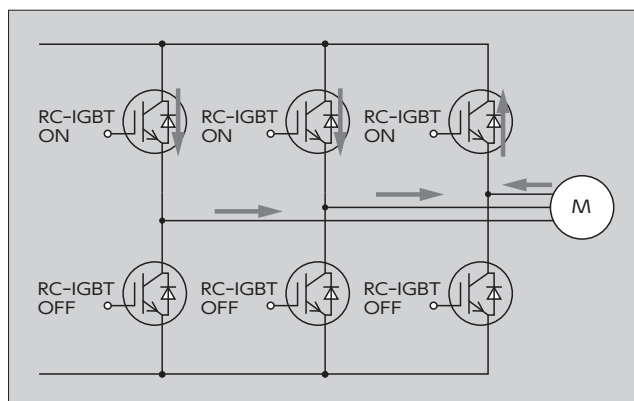


図 2 アクティブショートサーキット (ASC) 時の電流経路例

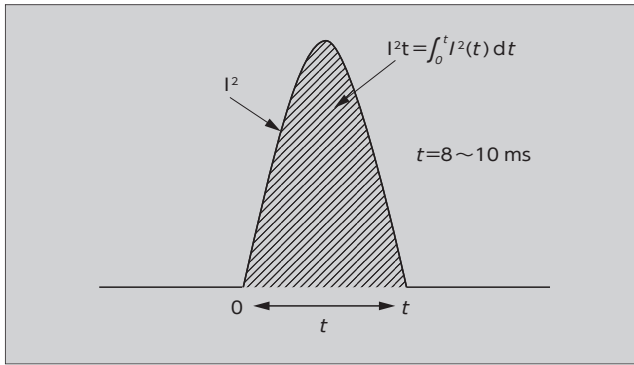


図3 I²tを定義する電流波形

2.2 I²t 耐量の定義と耐量を決める要因

I²t 耐量とは、式(1)で示すように、通電時の電流と電圧によって発生するジュール熱に関わる時間幅 8 ~ 10 ms の正弦半波の 1 サイクルで素子が破壊する耐量と定義され、図3に示すように電流の 2 乗を時間に対して積分した値である。

$$E = \int_0^t IV dt = \int_0^t I \cdot IR dt \propto \int_0^t I^2 dt \quad \dots\dots\dots(1)$$

I²t 耐量は、チップ自体の発熱だけでなく表面電極や回路への接続部の発熱や放熱特性に依存する。そのため、I²t 耐量を向上するためには、放熱性の向上が必要である。

③ RC-IGBT 適用による放熱性の向上

従来の IGBT と FWD の個別チップの組合せ (IGBT+FWD チップ構成) と RC-IGBT の断面模式図を図4に示す。従来のモジュールでは、IGBT チップと FWD チップをそれぞれ配置していた。RC-IGBT は、1 チップ内に IGBT 領域と FWD 領域をストライプ状に配置した構造をしているので、搭載面積が減少する。さらに、IGBT と FWD は同時に通電動作することがないので、そ

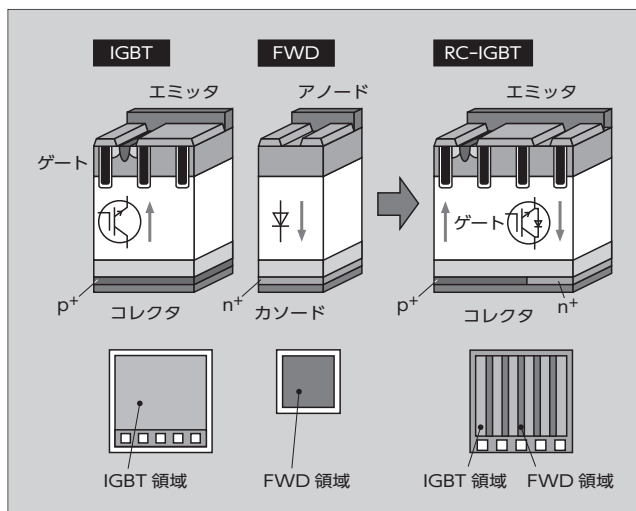


図4 個別チップと RC-IGBT との比較図

れぞれが動作するときにはチップ面全体で放熱できるので熱抵抗が低いという特徴がある。

従来の IGBT+FWD では、FWD チップサイズの面積は IGBT よりも小さい。そのため、FWD チップの熱抵抗が高くなり、I²t 耐量が低下する傾向にある。

FWD チップと RC-IGBT チップの I²t 耐量を実測した結果を図5に示す。FWD のチップ面積（活性面積）が大きくなると熱抵抗と電流密度がともに下がるため、I²t 耐量が向上している。FWD 領域の活性面積が同じ条件で比較すると、RC-IGBT の I²t 耐量は FWD の約 2 倍になることが分かった。この耐量の向上は、上述したチップの熱抵抗の低減に加え、RC-IGBT は FWD よりもワイヤ本数が 20% 多いことによって、放熱性が向上した効果によるものである。

実験結果の妥当性を検証するため、FWD 通電時のシミュレーションを行った結果を図6に示す。本シミュレーションでは、チップ厚さ、ワイヤ本数、FWD 活性面積を同一としている。RC-IGBT チップでは、FWD 部の発熱が IGBT 部分に拡散するため、160℃以上の高温部分は、FWD チップよりも減少していることが分かる。その結果、RC-IGBT は従来の FWD に比べて熱抵抗が低くなり、I²t 耐量が向上したと考えられる。

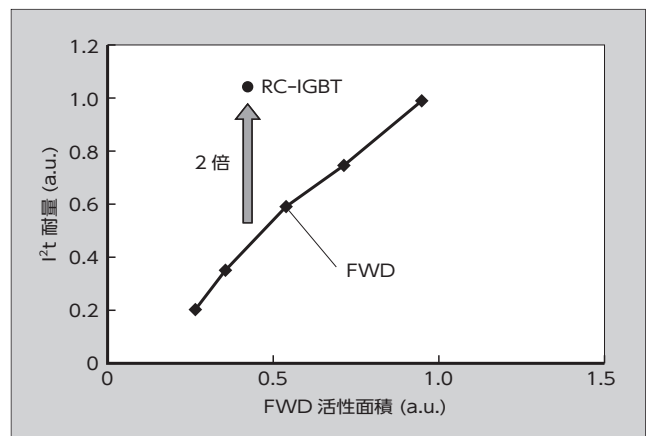


図5 I²t 耐量の比較

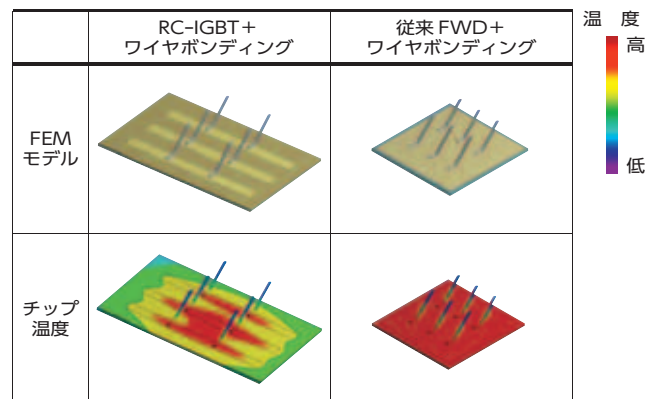


図6 ワイヤボンディング構造の熱シミュレーション

④ リードフレーム方式による放熱性の向上

I^2t 耐量に影響を及ぼす放熱条件は、チップと配線の接合面積を増加させることによって向上する。従来のワイヤボンディング方式（図 7(b)）では、ワイヤをチップの表面電極に超音波接合している。これに対し、LF 方式（図 7(a)）では、LF をチップの表面電極にはんだ接合して接合面積を増やして放熱性を向上させている。このことは、図 8 に示す熱シミュレーションでも確認している。

表 1 に、LF 方式とワイヤボンディング方式の I^2t 耐量の実測結果を示す。同一活性面積で比較すると、LF 方式を採用することで I^2t 耐量が 0.3 から 0.4 に約 30% 向上する。

表 1 I^2t 耐量比較 (LF- ワイヤボンディング)

接続方式	I^2t 耐量 (a.u.)
LF	0.4
ワイヤボンディング	0.3

⑤ 開発品と従来品の I^2t 耐量比較

ワイヤボンディング方式を採用した個別 FWD と IGBT からなる IGBT モジュール（従来品）に比べ、LF 方式を採用した RC-IGBT モジュール（開発品）の I^2t 耐量は 2.6 倍に向上した。これは、RC-IGBT と LF 方式の組み合わせによる放熱性の向上の効果である。

⑥ あとがき

xEV 向け IGBT モジュールの過電流耐量の向上について述べた。今回、xEV 向け IGBT モジュールに RC-IGBT と LF 方式を採用することによって I^2t 耐量が向上した。これにより、インバータ装置の ASC 制御時の過電流に対して使い勝手がよく、高い信頼性の xEV 向け IGBT モジュールを提供することができた。

今後、xEV 向け IGBT モジュールとしてさらなる損失の低減、小型化、信頼性の向上に取り組み、インバータ装置の性能向上に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Nakano, H. et al. “Impact of I^2t capability of RC-IGBT and Leadframe combined structure in xEV active short circuit survival”. Proc. PCIM Europe 20118.
- (2) 野口晴司ほか. マイルドハイブリッド車用 RC-IGBT. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.254-257.
- (3) Otsuki, M. et al. “Advanced thin wafer IGBTs with new thermal management solution”. ISPSD 2003.

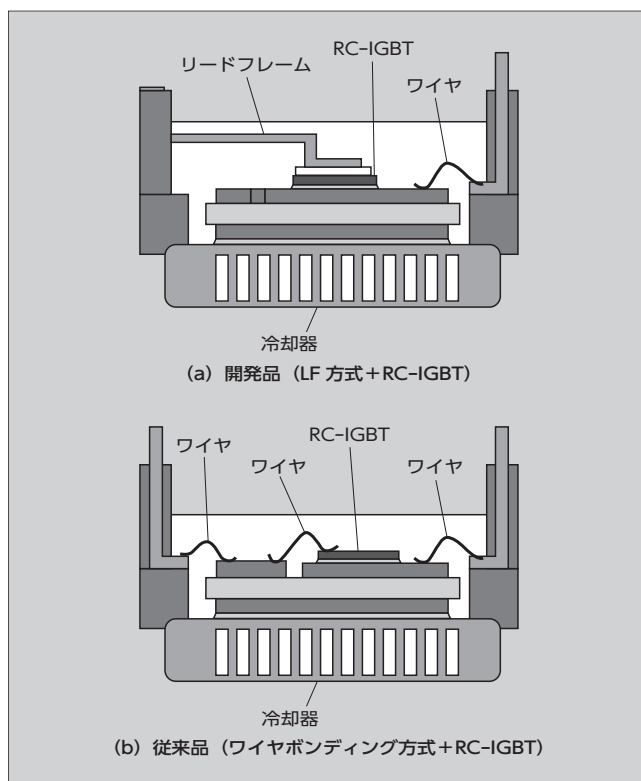


図 7 開発品と従来品の構造比較

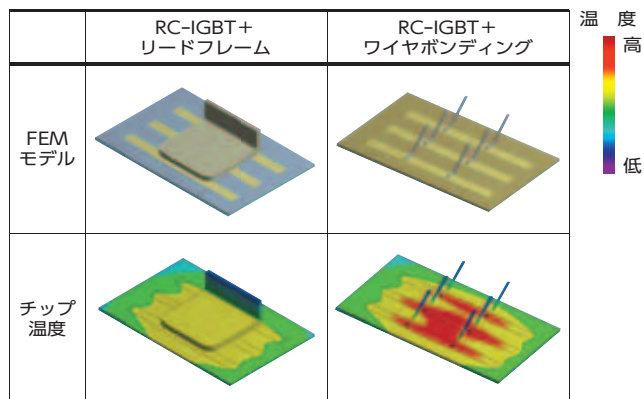


図 8 LF とワイヤボンディング構造の熱シミュレーション



原 康文

車載 IGBT モジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部電装事業部電装モジュール部。



吉田 崇一

車載用 IGBT 半導体素子の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部電装事業部電装モジュール部。



井上 大輔

車載用 IGBT モジュールのパッケージ構造開発・設計に従事。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パッケージ開発部。





＊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。