

# U4 シリーズ IGBT モジュール

特集

原口 浩一(はらぐち こういち)

宮下 秀仁(みやした しゅうじ)

小野澤 勇一(おのざわ ゆういち)

## 1 まえがき

汎用インバータや無停電電源装置(UPS)などの電力変換機器には、常に高効率化・小型化・低価格化・低騒音化が要求されており、そのインバータ回路に適用される電力用半導体素子にも高性能化・低価格化・高信頼性が求められている。近年、電力用半導体素子としてはその低損失性、駆動回路の容易さ、さらに破壊耐量の大きさから IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が最も普及している製品である。

富士電機では 1988 年の製品化以来、特性改善や高信頼性を急速に進めてきた。富士電機は、トレンチ構造やフィールドストップ(FS)構造<sup>(3)</sup>などを適用した IGBT として最新型の第五世代 IGBT モジュール(Uシリーズ)の開発<sup>(1)(2)</sup>を行った。

本稿では、ノイズ対策とさらなる特性改善を目的に開発した U4 シリーズ 1,200 V 耐圧の IGBT モジュール「EconoPACK-plus<sup>注</sup>」を例にとり、最新の素子技術とその製品系列について紹介する。

## 2 U4 シリーズ IGBT モジュールの特徴

### 2.1 コンセプト

富士電機ではすでにトレンチ型のパワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) の技術をベースとして、トレンチゲート IGBT を開発した<sup>(2)</sup>。

U4 シリーズでは、この技術にさらに特性改善を行い、次のコンセプトにより開発を行った。

#### 1) 素子発生損失の低減

今回開発した U4 シリーズ IGBT モジュール(以下、U4-IGBT と略す)は、従来のトレンチ IGBT チップの、P 層とエミッタを高抵抗の  $R_s$  でショートすることにより、従来のトレンチ IGBT よりさらにターンオンスピードの制御性を向上させること、また、従来のトレンチ IGBT に比

ベターンオン損失を約 30 % 低減させることを目標とした。ターンオフ損失とダイオード逆回復損失については、従来品とほぼ同等レベルを目標とした。

#### 2) 素子特性ばらつき低減により並列接続が容易

並列接続を容易にできるようにするために、U4 シリーズ FWD (Free Wheeling Diode) (以下、U4-FWD と略す)を使用することにより、順電圧 ( $V_F$ ) の分布ばらつきを 0.3 V 以下へ低減することと、高速かつソフトなりカバリー特性を目標とした。

#### 3) 実機適用時における放射ノイズの低減

スイッチング時の放射ノイズに関しては、FWD の逆回復特性に着目されているが FWD の特性だけで決まるのではなく、IGBT の特性で FWD 逆回復特性が決まる。よって、IGBT チップと FWD チップとのマッチングにより、ノイズレベルも変わることになるため、両方の特性を最適化することによりノイズ低減を図ることとした。

#### 4) 従来技術の流用

パッケージに関しては、従来の IGBT モジュールと同様のものを使用しているため、主回路や放熱フィンなどの再設計は不要となる。

### 2.2 U4-IGBT チップの特徴

図 1 に従来のトレンチ IGBT チップと U4-IGBT チップの構造比較を、図 2 に IGBT 容量成分とターンオン特性の関係を示す。P 層とエミッタを高抵抗の  $R_s$  でショートすることにより、従来より実効的に小さなミラー容量 ( $C_{res}$ ) が実現できている。

従来のトレンチ IGBT の構造では、ゲートをトレンチ形状にすることによりプレーナ型 IGBT の JFET (Junction Field Effect Transistor) 成分が存在しないためコレクタ-エミッタ間飽和電圧 ( $V_{CE(sat)}$ ) が低減されているが、トレンチ構造のため容量成分が大きくなる。特に  $C_{res}$  が大きいとターンオンスイッチングスピードが遅くなり、スイッチング損失が大きくなる。したがって、ターンオン時スイッチング損失を低減するためには  $C_{res}$  の低減および入力容量 ( $C_{ies}$ ) と  $C_{res}$  比率の最適化が有効であり、U4-

注 EconoPACK-plus : Eupec GmbH. Warstein の登録商標



原口 浩一

IGBT モジュールの開発・設計に従事。現在、富士日立パワーセミコンダクタ株式会社松本事業所開発設計部。



宮下 秀仁

IGBT モジュールの開発・設計および応用技術開発に従事。現在、富士日立パワーセミコンダクタ株式会社松本事業所開発設計部チームリーダー。電子情報通信学会会員。



小野澤 勇一

パワー半導体デバイスの開発・設計に従事。現在、富士日立パワーセミコンダクタ株式会社松本事業所開発設計部。

IGBT ではシミュレーションと確認実験を併用して最適化を行った。

図3に従来のトレンチIGBTとU4-IGBTのターンオンスイッチング比較波形を示す。図1に示す $R_s$ により実効的な $C_{res}$ が低減されているため、U4-IGBTはコレクタ-エミッタ間電圧( $V_{CE}$ )テールが短く、そのためにターンオン損失が従来のトレンチIGBTよりも小さくなっている。また、ゲート抵抗( $R_G$ )を大きくした場合にもテール電圧が小さいので、ターンオン損失が比較的小さくなるため、 $R_G$ によるターンオン速度制御がより広範囲に可能となる。

図4にU4-IGBTの $I_C-V_{CE}$ 特性を示す。

従来のトレンチIGBT同様、正の温度特性が得られているため、並列接続時の電流アンバランスが緩和され、大容量インバータ回路などへの並列接続適用が容易となる。

2.3 U4-FWDの特徴

最近の汎用インバータは低周波出力時のトルクを向上させる傾向にあり、FWDについても熱的責務が大きい。また、IGBTと同様に、FWDを並列接続する際の電流バランスの均等化が重要となる。このため、 $V_F$ のばらつきの小さい新しいダイオードが必須となり、今回U4-FWDで

は高信頼性を目的とし、ばらつきに対する工程要因の少ない、FZ (Floating Zone) 結晶を採用した。これにより、 $V_F$ のばらつきが結果的にIGBT並みの0.3V以内となり、モジュール並列接続適用時の $V_F$ のランク分け管理が不要となり、大容量インバータなどのモジュール並列接続用途においてその適用が容易となる。

図5に従来のFWDとU4-FWDの構造比較を示す。FZ結晶の適用にあたり、逆回復時のサージ電圧を少なく、低 $V_F$ にするために、結晶プロファイルの最適化が必要である。今回はキャリアプロファイルと逆回復特性のシミュレーションを行い、最適な値を導き出した。

図6に低電流逆回復特性のシミュレーション結果と実測波形を示す。これによると、U4-IGBTとU4-FWDの組合せにより、低電流の逆回復による振動やサージ電圧が発生しにくくなっているため、スナバ回路の簡素化や放射ノイズ低減に寄与するものとなっている。

図1 従来のトレンチIGBTチップとU4-IGBTチップの構造比較

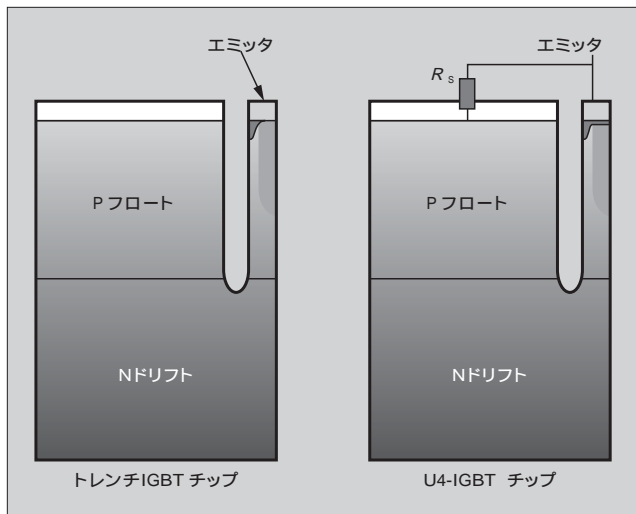


図2 IGBT容量成分とターンオン特性の関係

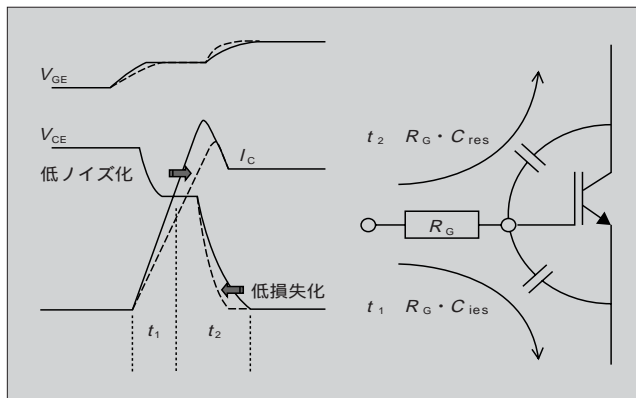


図3 従来のトレンチIGBTとU4-IGBTのターンオンスイッチング波形比較

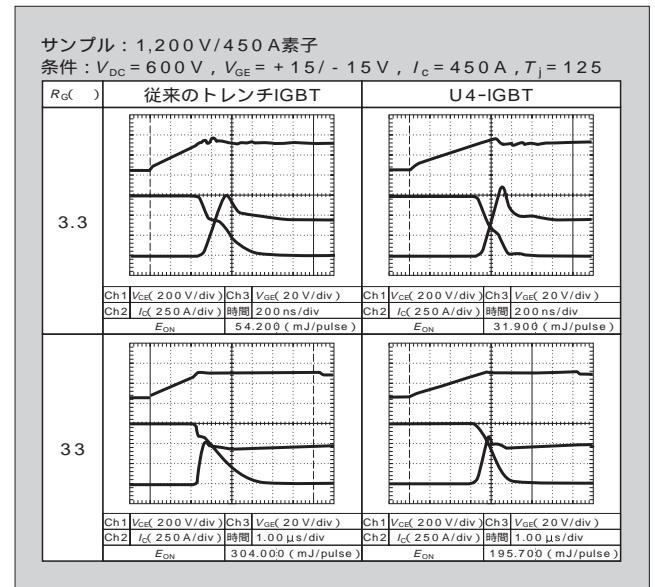


図4 U4-IGBTの $I_C-V_{CE}$ 特性

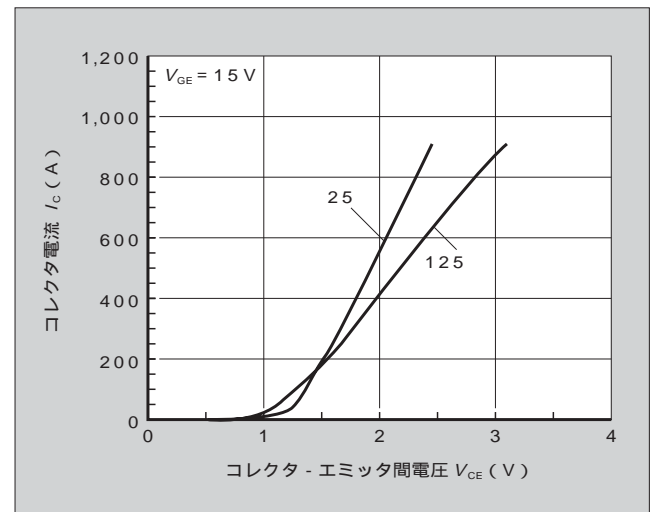


図7にU4-FWDの $I_F$ - $V_F$ 特性を示す。U4-IGBTチップ同様、正の温度特性が得られており、並列使用時の電流バランスに有効となる。

2.4 放射ノイズの比較

IGBTモジュールを実機に適用する際に、外部への放射ノイズが発生するが、欧州規格EN61800-3などにてそのレベルは制限されている。図8に放射ノイズ発生機構と測

定方法を示す。この方法では簡易的にノイズ測定を行うことができる。実際にはIGBTモジュールとスナバ回路間の共振回路による振動が放射源となることが報告されており<sup>(4)</sup>、そのトリガはスイッチング時の $di/dt$ と $dv/dt$ に起因している。この $di/dt$ と $dv/dt$ はIGBTのターンオン特性により決まり、FWDの逆回復特性も同様にターンオン特性により決定される。したがって、放射ノイズ低減のためには、FWDのみならずIGBTの特性の最適化が必要となる。

図5 従来のFWDとU4-FWDの構造比較

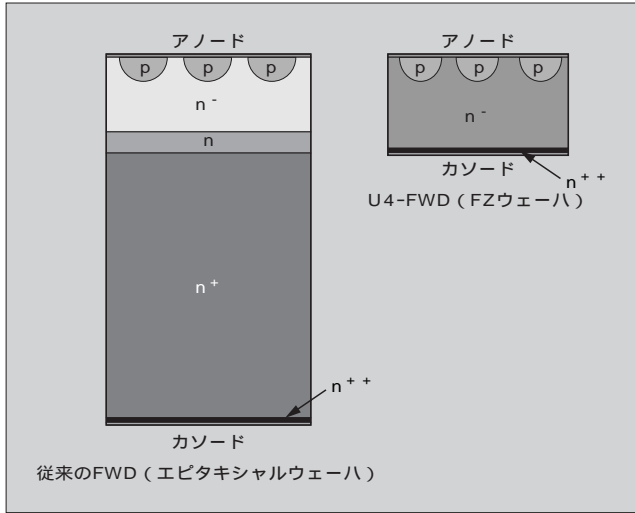


図6 低電流逆回復特性のシミュレーション結果と実測波形

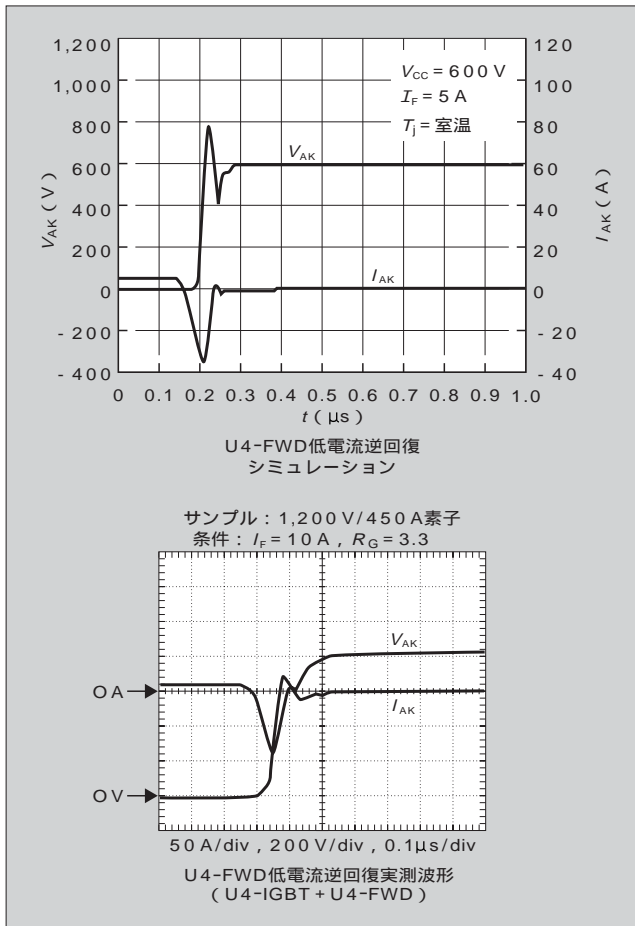


図7 U4-FWDの $I_F$ - $V_F$ 特性

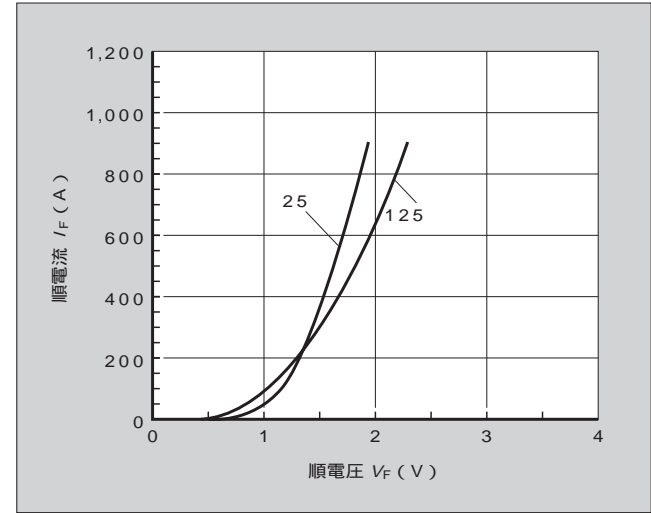


図8 放射ノイズ発生機構と簡易的測定方法

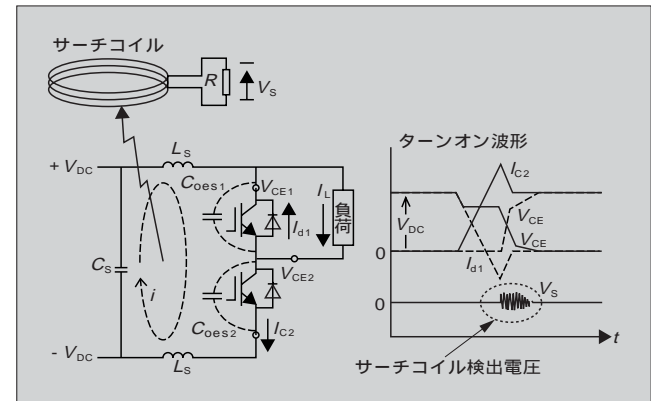


図9 DCチョップパ試験時の放射ノイズ比較

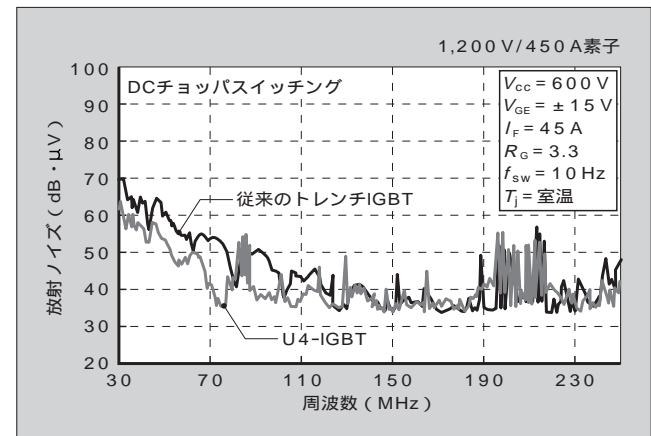


表 1 U4-IGBTの系列

電圧 定格	パッケージ	$I_c$ 定格														
		50 A (11 kW)	75 A (22 kW)	100 A	150 A	225 A (40 kW)	200 A	300 A	450 A (75 kW)	400 A	600 A	800 A	1,200 A	1,600 A	2,400 A	3,600 A
1,200 V	PIM	EP3														
	6 in 1	New PC2 with NTC		New PC3 with NTC			EconoPACK-plus (6 in 1)									
	2 in 1					M232	M233	M235		M249		M248				
	1 in 1							M127		M138	M142		M143			
1,700 V	6 in 1	New PC3 with NTC				EconoPACK-plus (6 in 1)										
	2 in 1					M249		M248								
	1 in 1							M142		M143						

図 10 U4-IGBT のパッケージ例

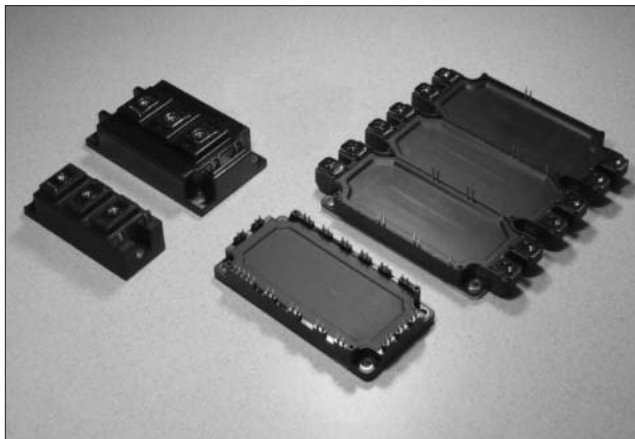


図 9 に DC チョップ試験時の放射ノイズ (3メートル法) 比較を示す。U4-IGBT では  $R_g$  によるターンオンスピード制御性を向上させつつ、ターンオンスイッチング損失を低減させているため、同じゲート駆動条件でも従来のトレンチ IGBT より放射ノイズは低くなり、素子発生損失も低減されている。

③ U4-IGBT の系列

富士電機は、前述の U4-IGBT 技術と U4-FWD 技術を組み合わせ、またパワーサイクル耐量の高い U-IGBT モジュールのパッケージ技術を引き続き適用し、従来のトレンチ IGBT モジュールに対し特性改善された U4-IGBT 「EconoPACK-plus」を開発完了し系列化した。

図 10 に U4-IGBT のパッケージ例、表 1 に IGBT モ

ジュールのパッケージの系列内容を示す。

今回、U4-IGBT には、1,200 V、1,700 V の 2 種類の耐圧系列に 50 ~ 3,600 A という広範囲な電流量および多彩なパッケージが準備されている。これにより、さまざまな電力変換装置への適用が可能である。

④ あとがき

今回は IGBT モジュールの U4-IGBT、U4-FWD 技術とその特徴、および製品系列について紹介した。本製品は最新の半導体技術とパッケージ技術を駆使し、より低損失な素子となっており、インバータ回路装置の小型化・低損失化に大きく貢献できるものと確信する。

富士電機では今後も素子の高性能化・高信頼性化に取り組み、さらなる技術のレベルアップを図るとともにパワーエレクトロニクスの発展に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) Laska, T. et al. The Field Stop IGBT (FS IGBT) A New Power Device Concept with a Great Improvement Potential. Proc. 12th ISPSD. 2000, p.355-358.
- 2) 宮下秀仁 . U シリーズ IGBT モジュール . 富士時報 . vol.77, no.5, 2004, p.313-316.
- 3) Otsuki, M. et al. 1200 V FS-IGBT module with enhanced dynamic clamping capability. Proc. ISPSD'04. 2004, p.339-342.
- 4) 五十嵐輝征ほか . 電力変換装置から放射される電磁雑音の解析と低減方法 . 産業応用部門誌 . vol.118-D, no.6, 1998, p.757-766.