U シリーズ IGBT モジュールの技術革新

岩室　憲幸（いわむろ　のりゆき）　宮坂　忠志（みやさか　ただし）　関　康和（せき　やすかず）

1　まえがき

IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）は，MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）の高インピーダンス特性と，バイポーラトランジスタの低オン電圧特性とを兼ね備えたパワーデバイスとして，1980 年代前半に考案された。その後 1980 年代後半の第一世代 IGBT の出現により電力変換装置用デバイスとして，産業，情報，交通などの各分野でのパワーエレクトロニクス技術の中で非常に大きな役割を占めてきた。IGBT はバイポーラトランジスタ以上の電圧・電流定格を持つこと，さらには高速スイッチングができることで年々注目されるようになり，それに伴ってさらなる低損失化が切望されるようになった。その結果，表面セル構造の微細化とそれに伴う高性能化の技術革新により第一，第二，第三世代と進歩を重ね，装置の小型化・高性能化に大きく寄与してきた。特に近年，IGBT モジュールの性能向上は目を見張るものがある。

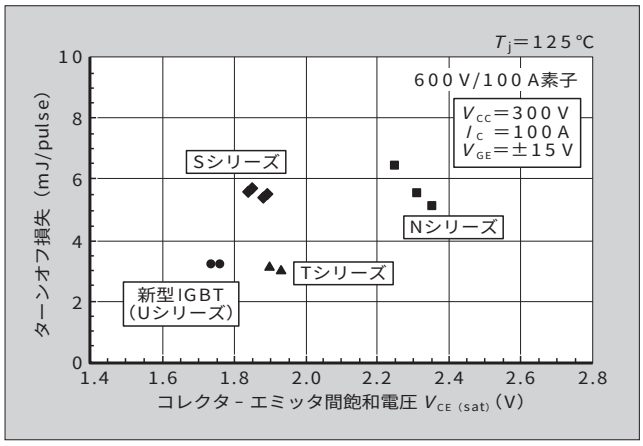
本稿では，富士電機が開発した超低損失 U シリーズ IGBT モジュールの設計コンセプトならびに諸特性を報告し，富士電機製 IGBT モジュールの技術革新について紹介する。

2　超低損失 IGBT チップの開発

富士電機は IGBT の製品化を 1988 年から始め，市場に供給してきた。ワイドベース pnp トランジスタの注入効率を上げ，ライフタイムコントロールにより輸送効率を下げるという設計コンセプトを基にした PT（Punch Through）構造 IGBT において，表面セル構造の微細化による MOSFET 部からの電子電流の供給増により特性改善を進め，1988，1990，1994 年に第一，第二，新第三世代（N シリーズ）IGBT モジュールを製品化した。その後，さらなる性能向上を目指して，上記 pnp トランジスタの注入効率を下げ，ライフタイムコントロールしないで輸送効率を上げるという設計コンセプトに基づいた NPT（Non Punch Through）構造 IGBT（NPT-IGBT）を開発した。特にこの NPT-IGBT の開発にあたっては，ウェーハ厚を 100 μm 近くになるまで削り素子を作成するという薄ウェーハプロセス技術を新たに開発することで特性改善に成功し，その結果，1,200 V 系は 1999 年に S シリーズを，600 V 系では 2001 年に T シリーズをそれぞれ製品化した。

今回開発した超低損失 U シリーズ IGBT チップ（U-IGBT チップ）は，上記 NPT-IGBT チップの開発で培われた薄ウェーハプロセス技術と，より一層の表面セル微細化を可能にするトレンチゲート技術を融合させることで，さらなる特性改善を図ったパワー半導体素子である。**図 1** は 600 V 系 IGBT チップの各世代でのオン電圧ーターンオフ損失トレードオフ特性比較を示したものである。トレンチゲート構造と薄ウェーハ NPT 構造により，大きな性能改善が達成できていることが分かる。また上記薄ウェーハ NPT 技術をさらに進歩させた薄ウェーハ FS（Field Stop）技術[(1)]を今回新たに開発し，1,200 V 系ならびに 1,700 V 系 IGBT チップに適用した。これにより，**図 2** に示すようにオン電圧ーターンオフ損失トレードオフ特性を飛躍的に改善することに成功した。さらにこの U-IGBT チップは，pnp トランジスタの注入効率を下げ，ライフタイムコントロールをせず輸送効率を上げるという設計コンセプトによ

図 1　600 V IGBT トレードオフ比較



岩室　憲幸

パワー半導体素子の研究開発に従事。現在，富士日立パワーセミコンダクタ（株）松本事業所開発設計部マネージャー。工学博士。IEEE Senior Member，電気学会会員。

宮坂　忠志

パワー半導体モジュールの開発・設計に従事。現在，富士日立パワーセミコンダクタ（株）松本事業所開発設計部副グループ長。

関　康和

パワー半導体デバイスの研究開発に従事。現在，松本工場半導体基盤技術開発部長。工学博士。電気学会会員。

り，**図 3** に示すようにオン電圧が正の温度係数を示し，その結果，大電流定格品への適用に非常に適した素子となる。

IGBT の設計において，トレンチゲート構造のような微細表面セル構造を適用することでオン電圧の低減が実現できることは知られているが，その反面，負荷短絡などの異常時に大きな電流が流れてしまい，その結果として素子が破壊しやすくなる問題が生じ，これをブレークスルーすることが大きな課題となっていた。今回開発した U-IGBT チップは，トレンチゲート構造を最適化することでオン電圧を犠牲にすることなく，負荷短絡などの異常時に流れる電流値を抑えることに成功し，その結果耐量の向上も図れている。**図 4** は 1,200 V/450 A U-IGBT モジュールにおける負荷短絡波形である。負荷短絡時の電流値を定格電流の約 5 倍に制限し，125 ℃においても 10 μs 以上もの十分な耐量が得られていることが分かる。

図２　1,200 V，1,700 V IGBT トレードオフ比較

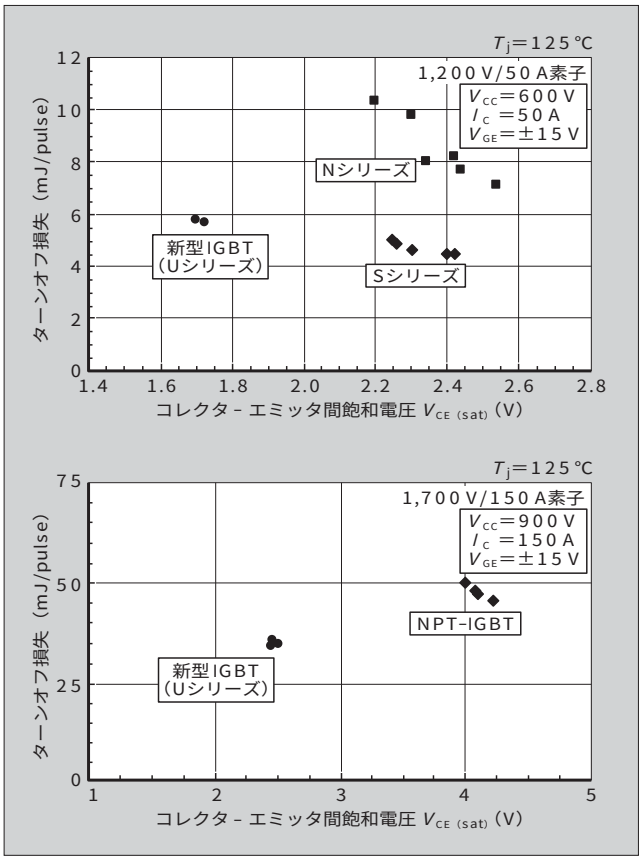
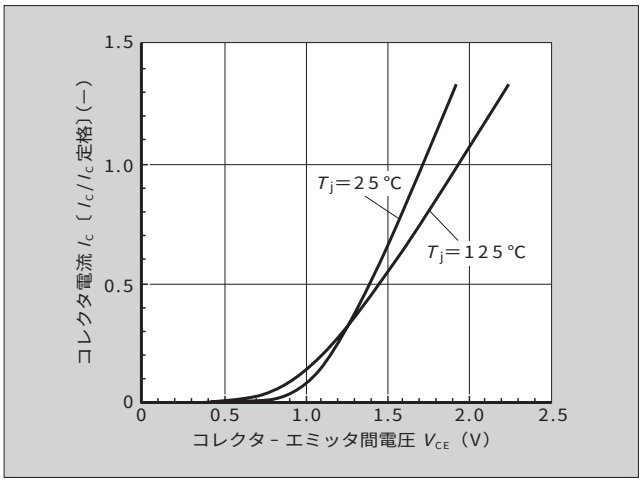


図３　U-IGBT 出力特性（1,200 V 素子）



3　新 FWD チップの特徴

新 FWD（Free Wheeling Diode）素子はアノード層からの少数キャリヤの注入をコントロールすることで，ソフトな逆回復特性を有する。さらにライフタイムコントロールを最適化することで，IGBT 同様，オン電圧が正の温度係数を示すよう設計されており，大電流定格品への適用に非常に適した素子となっている。この新 FWD の適用により，**図 5** に示すように IGBT のターンオン時の電流ピーク値を抑制することができ，その結果，ターンオン損失を低減させることが可能となる。

4　U-IGBT のインバータへの適用時の熱検討

汎用インバータ分野では IGBT モジュールの適用が一般的になってきているが，さらなる性能向上と信頼性向上を達成し，コストパフォーマンスの向上を進めることが大きな課題になっている。**図 6** にチップサイズとインバータ適

図４　U-IGBT モジュール負荷短絡波形（1,200 V/450 A）

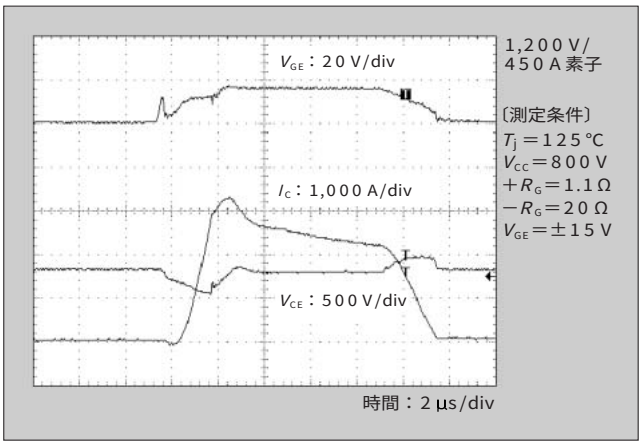
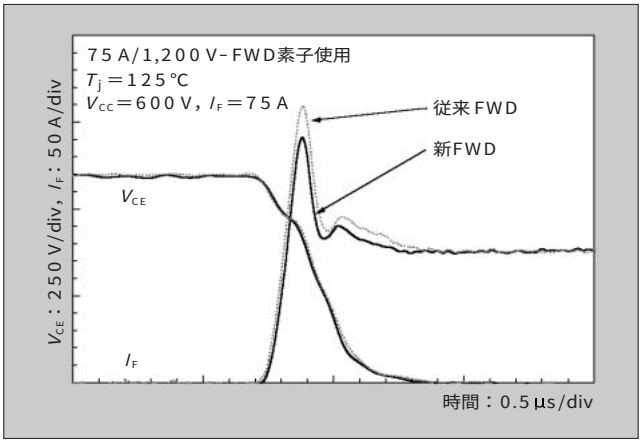


図５　U-FWD と従来 FWD 適用時の IGBT ターンオン波形比較



用時の発生損失の関係を示す。従来品のチップサイズを基準とし 1,200 V/150 A 素子を代表例に 30 kW インバータの定格負荷時の損失を比較すると，従来品の発生損失に対し同サイズであれば約 30 %の損失低減が可能である。またチップサイズの依存性が小さく，仮に同一損失とするならば 20 %程度までチップシュリンクの可能性があることを示唆している。これは前述のチップ技術の適用により，**図 7** に示す IGBT の出力特性が大幅に改善され，電流密度を上げてもオン電圧が増加しないためである。

しかし**図 8** に示すようにベース部温度を基準としたチップ温度上昇（$\Delta T_{j\text{-}c}$）は熱抵抗（$R_{th\ (j\text{-}c)}$）がチップサイズに反比例するため単純に $\Delta T_{j\text{-}c}$ ＝発生損失×R_{th} で計算すると，チップサイズをシュリンクした場合，急激に上昇し，信頼性上パワーサイクル耐量などの課題が生じる。

4.1　放熱器を含む温度上昇

IGBT チップの温度上昇は放熱器を含む冷却システムにより確定されるものであるが，従来は冷却システムトータルでの検証は容易ではなく簡易的にフィン温度を固定し，

図 6　IGBT 発生損失とチップサイズ比較

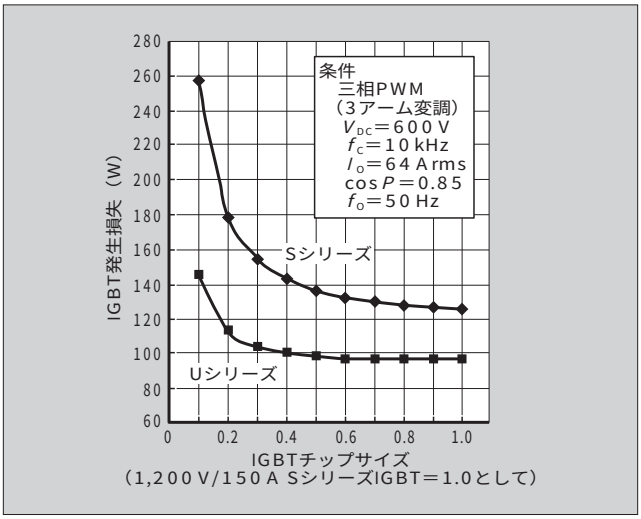
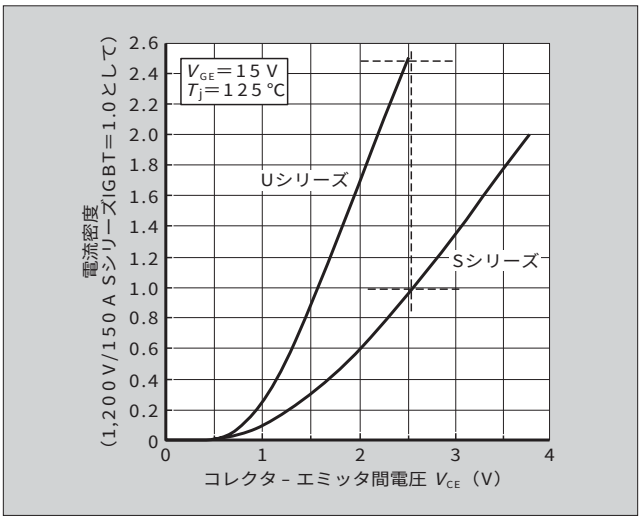


図 7　IGBT 出力特性比較



$\Delta T_{j\text{-}c}$ を加算する方法で議論してきている。

図 9 に冷却システムを含む温度上昇を有限要素法（FEM）を用い検証した結果を示す。三次元モデル解析により，

(1)　放熱器取付け用ベース部の横方向熱広がり

(2)　チップ間隔の最適化による相互干渉の低減

(3)　モジュール配置の最適化

を実施することにより，チップ温度上昇を抑制できる可能性があることが分かった。

この解析技術の開発により，信頼性を検証するうえで重要な温度検討を容易にかつ精度よく実施できるようになったと考える。

4.2　パワーサイクル耐量の向上

富士電機では，IGBT モジュールにおけるパワーサイクル試験素子の解析から，パワーサイクル耐量はチップ下の

図 8　IGBT $\Delta T_{j\text{-}c}$ とチップサイズ比較

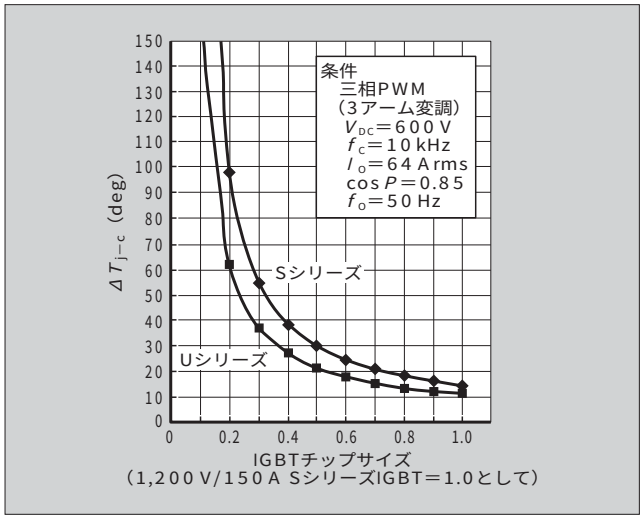


図 9　IGBT チップ温度上昇 FEM 解析結果

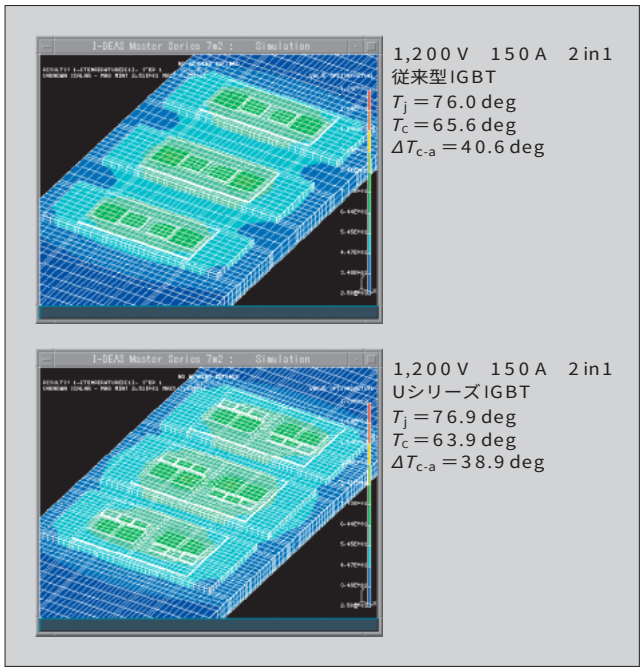


図 10　パワーサイクル耐量の向上

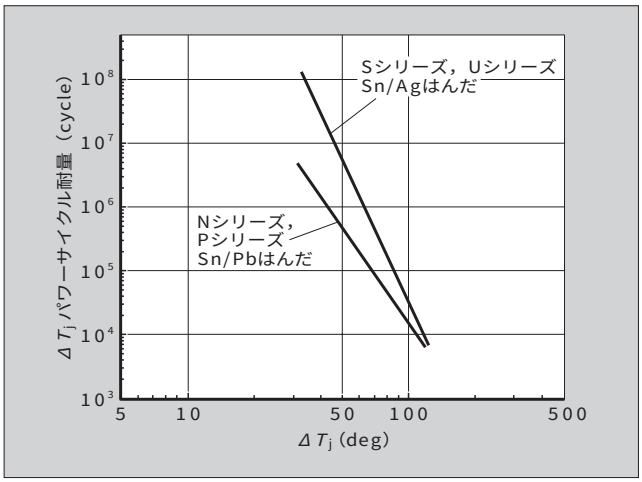
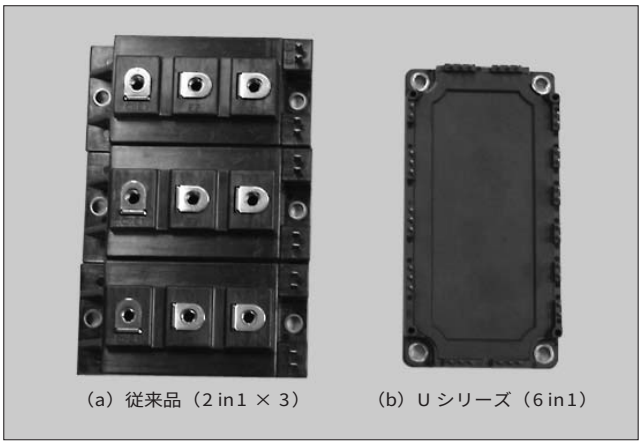


図 11　U-IGBT モジュールと従来モジュールの外形比較



はんだとボンディングワイヤの，おのおのの寿命の合成で求まることを確認し，寿命向上のためチップ下はんだをすず系の高剛性材料に変更する技術を報告した。[2]

今回Uシリーズではこの技術を全面適用し，**図10**に示すように，例えばΔ40 deg においては従来比 10 倍以上に耐量を向上させている。逆に従来と同等の耐量であれば，従来 40 deg 以下であった温度変化を 60 deg まで上げることが可能である。

図11は従来品の 1,200 V/150 A 素子とUシリーズとのモジュールの比較を示したものであるが，上述技術の適用によりベース面積で 40 %の小型化を達成している。

5　あとがき

超低損失 U シリーズ IGBT モジュールの開発にあたり，富士電機のチップ技術ならびにパッケージ技術について概略を紹介した。特に U シリーズ IGBT チップはトレンチゲート構造と薄ウェーハ技術の融合により IGBT としては究極に近い姿となり，装置の低損失化ならびに小型化に大きく寄与している。IGBT モジュールの性能を最大限生かすためには装置における最悪条件を理解し，その条件における放熱器を含む熱検証をしたうえ，最適な素子を選択することが現在要求される事項である。そのための要素技術を開発したが，今後さらにレベルを向上させ，製品に適用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. Proceedings of the 12th ISPSD. 2000, p.355-358.

(2)　Morozumi, A. et al. Reliability of Power Cycling for IGBT Power Semiconductor Module. Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Conf. 36th. 2001, p.1912-1918.

e-Front runners

＊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。