U シリーズ IGBT モジュール（1,700 V）

星　保幸（ほし　やすゆき）　宮坂　靖（みやさか　やすし）　村松 健太郎（むらまつ　けんたろう）

1　まえがき

近年，電力変換器や可変速モータコントロールインバータ用に高耐圧パワーデバイスの要求が高まってきている。IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）は特にスイッチング特性のゲート制御性（電圧制御）や保護の容易性の点でバイポーラトランジスタや GTO（Gate Turn-Off）サイリスタに比べて優れた特性を持っており，これらデバイスからの置換えが可能となってきた。特に総合損失の低減技術と安全動作領域の拡大技術など相反する特性をデバイスデザイン，プロセスデザイン，応用デザインなどによる総合技術によって IGBT の開発が進み，経済性，信頼性など市場の要求に応えていることが評価を高めている要因である。今回，装置のさらなる大電流化，小型化，高信頼性化の要求に応えるために 1,700 V 用 U シリーズ IGBT モジュールの開発を行った。IGBT の総合損失の改善を図るために表面構造はトレンチ構造を適用し，裏面は薄ウェーハ技術を適用した FS（Field Stop）構造を適用し，両者の特性の最適化を図ることで総合損失のきわめて低い IGBT の開発に成功した。また高速・低損失の IGBT の開発にあたっては周辺素子，例えば IGBT モジュールの IGBT に逆並列に接続されている FWD（Free Wheeling Diode）の特性向上も同時に求められる。両者は相互作用を及ぼしあっており，むしろ一体のものと考えるべきである。今回 1,700 V U シリーズ IGBT モジュールの開発にあたって FWD の損失低減のほかにノイズ低減のためのソフトリカバリー特性を有した FWD の開発も行った。本稿では特にデバイスの特徴と製品系列について紹介する。

2　新型 IGBT の特徴

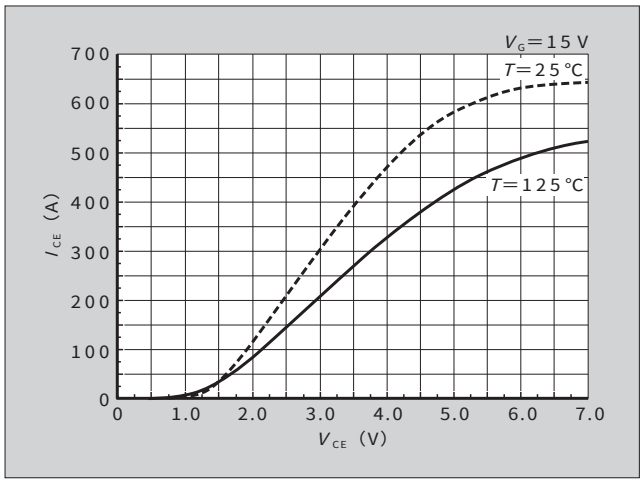
従来の IGBT の表面構造はプレーナ IGBT で構成されているためトータルのセル密度が低いこと，および表面の J_{FET} 抵抗分によってコレクタ－エミッタ間飽和電圧（$V_{CE\,(sat)}$）を悪化させていた。また，ウェーハの基板は NPT（Non Punch Through）構造のため厚くなっており $V_{CE\,(sat)}$ と E_{off}（ターンオフ損失）のトレードオフを悪化させていた。

今回の 1,700 V 用 U シリーズ IGBT の定格電流密度は 130 A/cm^2 以上と高く設定するために，いかにして IGBT に内蔵されているワイドベーストランジスタのベース電流を増加させるかがポイントであった。このため表面構造の最適化を図るために表面構造，裏面構造のシミュレーションを行った。その結果，表面構造はトレンチゲート構造を適用した。トレンチゲート構造を適用することにより，プレーナ構造に存在していた表面の J_{FET} の抵抗をなくし，セル密度の増加に伴い表面からの電子電流を増加させ十分なベース電流を確保した。全電流のうち，電子電流の比率を増加させることはターンオフ時の損失低減を可能とした。

次にさらなる特性向上を図るために FS 構造を開発し適用した。FS 構造にすることによって基板ウェーハの抵抗分を低下することができるため，$V_{CE\,(sat)}$ の低下と E_{off} の低減が同時に可能となる。上記表面トレンチゲート構造と FS 構造を組み合わせた V_{CE}（コレクタ－エミッタ間電圧）と I_{CE}（コレクタ－エミッタ間電流）の出力特性（125 ℃）を**図 1** に示す。

最大の特徴はトレンチゲート構造を適用しているにもか

図 1　U シリーズ IGBT の出力特性（1,700 V/150 A 素子）



星　保幸

IGBT，FWD 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チームリーダー。

宮坂　靖

IGBT，FWD 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。

村松 健太郎

IGBT モジュールの開発設計および応用技術の開発に従事。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。

かわらず，飽和電流は定格 150 A に対して定格× 3.6 倍程度の飽和電流まで抑制されており，かつ飽和電圧を 2.5 V までに低減できていることである。表面構造は単にトレンチゲート構造にするだけでなく，表面構造のセルピッチおよび特にトレンチの深さ，および V_{th}（しきい値電圧）を最適化するといったプロセスとデバイスの総合的な改善によって初めて低抵抗な IGBT を達成できたことである。この効果によって $V_{CE\ (sat)}$ −E_{off} のトレードオフは従来の構造に比べて大幅な特性改善を達成した（**図 2**）。

図 3 は 125 ℃における L 負荷時のターンオフ波形を示す（定格電流 150 A）。$V_{CE\ (sat)}$ が 2.5 V のとき，E_{off} は 34 mJ である。**図 4** はターンオン時の波形を示し，di/dt は 2,700 A/μs である。トレンチゲート構造と FS 構造の効果によって高速なターンオン波形を示しており，$V_{CE\ (sat)}$ が 2.5 V のときの E_{on}（ターンオン損失）は 31 mJ である（**図 5**）。**図 6** に耐圧波形を示す。耐圧は 1,900 V 以上あり，十分な実力を確認した。

図 7 に SCSOA（Short Circuit Safe Operating Area）

図２　U シリーズ IGBT の V_{on}−E_{off} 特性

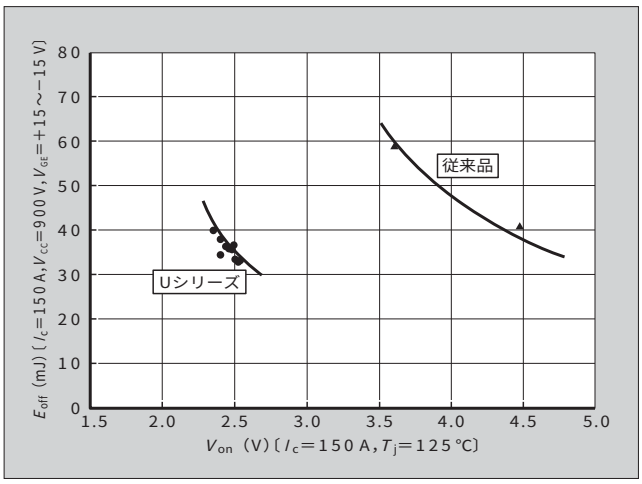


図３　ターンオフ波形

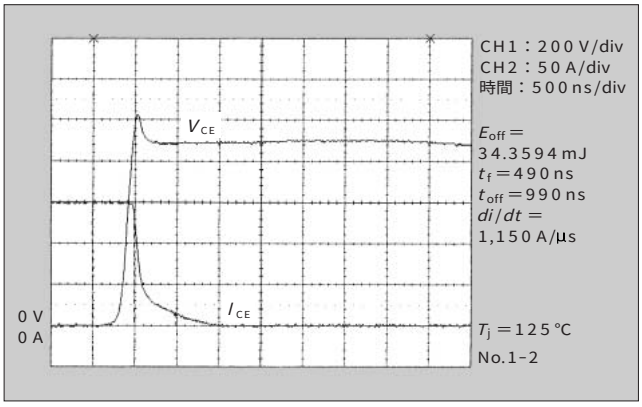


図４　ターンオン波形

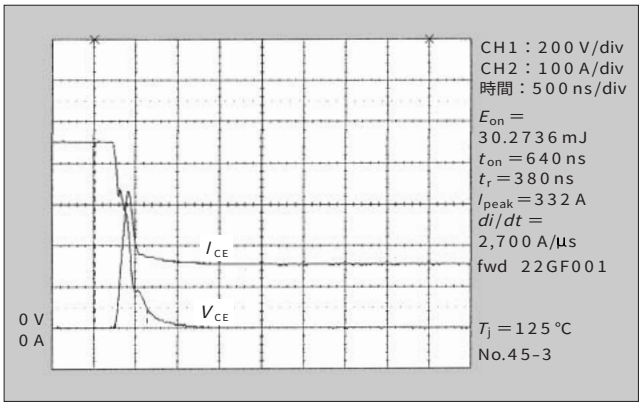


図５　U シリーズ IGBT の V_{on}−E_{on} 特性

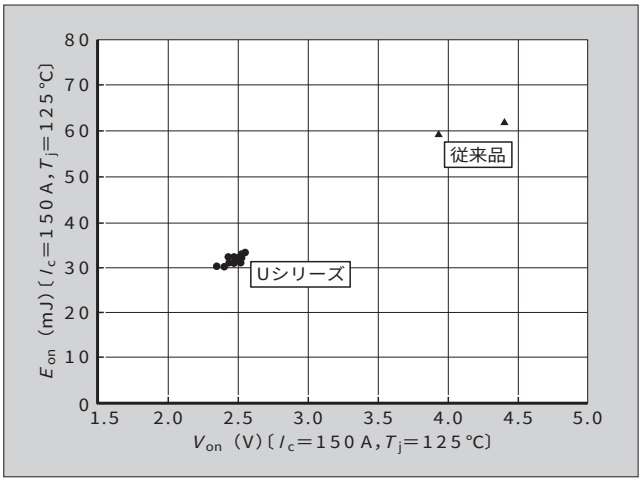


図６　耐圧波形

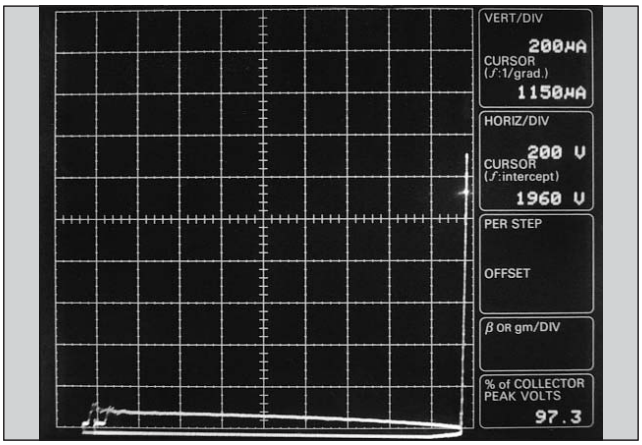


図７　SCSOA 波形

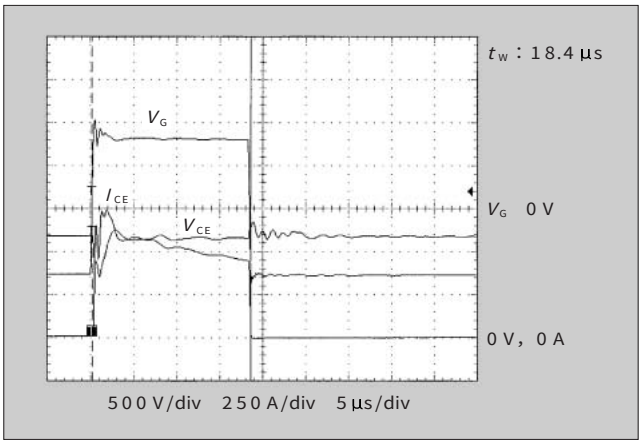


図8　RBSOA 波形

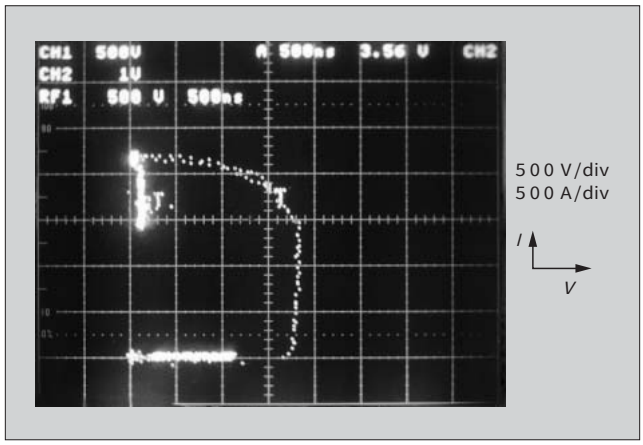
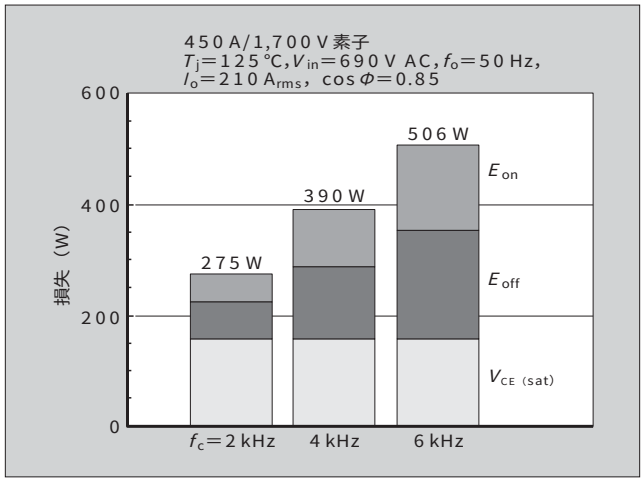


図9　損失計算結果



の波形を示す。短絡時のピーク電流を 600 A 程度（定格×4 倍）に抑制し SCSOA の実力は約 15μs 以上を有する。従来，トレンチゲート構造を適用した IGBT は SCSOA の実力が弱いといった課題があった。今回の 1,700V 用 U シリーズの IGBT は表面トレンチ構造の最適化を図ることで SCSOA の十分な実力を確保できた。**図8** に 125 ℃の RBSOA（Reverse Bias Safe Operating Area）の実力を示す。V_{CE} = 1,700 V で定格× 8 倍の実力を有し高破壊耐量を確認した。**図9** に各周波数における損失計算結果を示す。

3　新型 FWD の特徴

FWD は IGBT モジュールでは IGBT に対して逆並列に接続されて使用されており，FWD の特性改善も重要なポイントである。IGBT のターンオン時の FWD のリカバリー特性を改善することはサージ電圧の発生を抑制し，IGBT へのダメージおよび周辺回路への悪影響，例えば誤動作などを抑制し，かつターンオン時の損失低減化を図るうえで必要である。また，回生時の損失低減なども含めると FWD の低 V_F（順方向電圧）化は製品としての総合損失の低減に寄与しておりきわめて重要なことである。損失低減は重要な項目の一つであるが経済性も最重要項目である。従来の FWD の基板設計はエピタキシャルウェーハを使用していた。今回 1,700 V 用 U シリーズの開発にあたって経済性と総合損失を考慮したシミュレーションを行い最適化を図り試作を行った。その結果拡散ウェーハでも最適化設計することによって V_F と E_{rr}（逆回復損失）のトレードオフはエピタキシャル並みの特性が得られた（**図10**）。拡散ウェーハを使用することによって経済性に大きな効果

図10　U シリーズ FWD の V_F-E_{rr} 特性

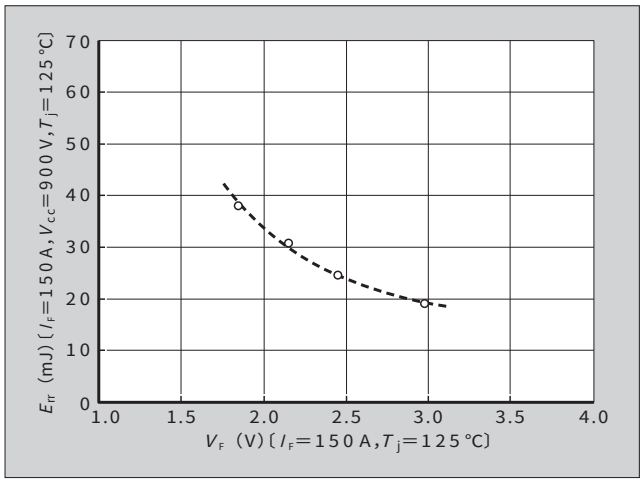


図11　U シリーズ FWD の出力特性

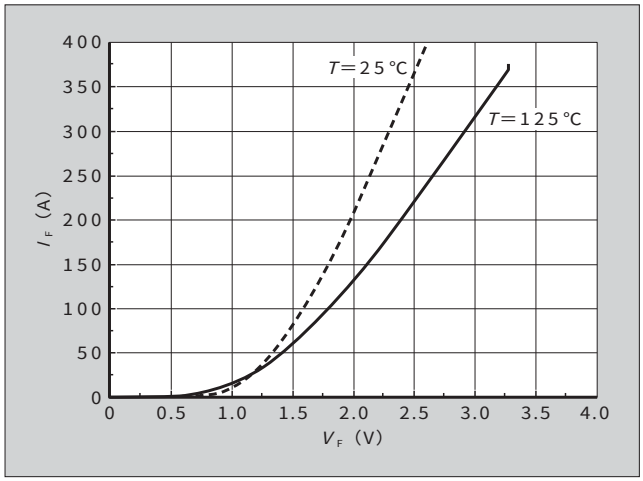


図12　FWD の低電流スイッチング波形

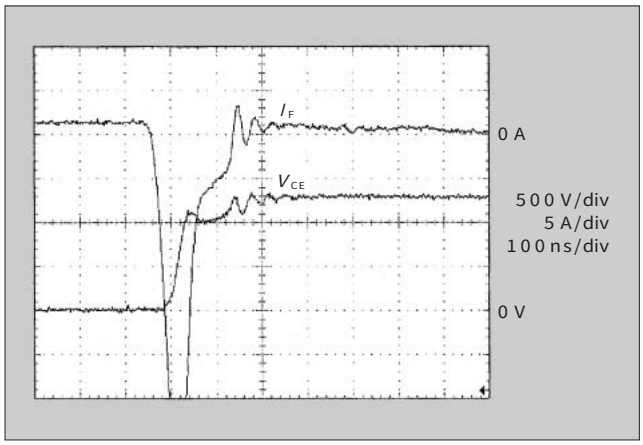


図13　ECONOPACK™-Plus の外観

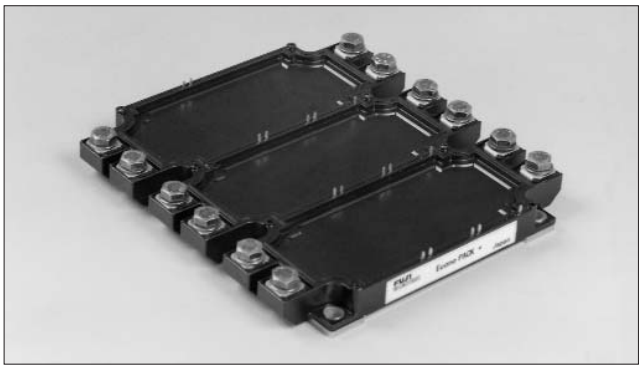


図14　ECONOPACK™-Plus の外形および等価回路

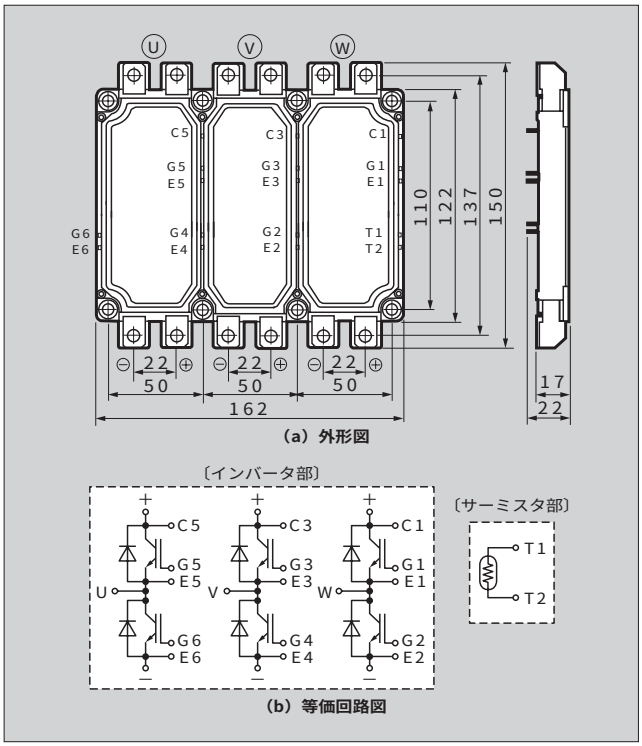


表1　ラインアップ一覧

型式 ＼ 項目	定格電圧	電流定格	パッケージNo.
6MBI150U-170	1,700 V	150 A	M629
6MBI225U-170		225 A	
6MBI300U-170		300 A	
6MBI450U-170		450 A	

を確認した。

図11に FWD の出力特性を示す。大電流定格品への適用ではチップを並列接続して使用されるケースが多く，V_F の温度特性が負の場合，電流のアンバランスを発生しやすく製品の寿命に影響を与えていた。今回の U シリーズ FWD は V_F の温度特性が正になるようなライフタイムキラーを適用し改善を図った。**図12**に定格電流の 1/150 倍の

表2　1,700 V/450 A モジュールの定格および特性

(a) 最大定格（記述がなければ T_c＝25 ℃）　450 A/1,700 V 素子

項目	記号	条件		最大定格	単位
コレクタ-エミッタ間電圧	V_{CES}			1,700	V
ゲート-エミッタ間電圧	V_{GES}			±20	V
コレクタ電流	I_C	連続	T_c＝25 ℃	675	A
			T_c＝80 ℃	450	
	$I_{C\ pulse}$	1ms	T_c＝25 ℃	1,350	A
			T_c＝80 ℃	900	
	$-I_C$			450	A
	$-I_{C\ pulse}$			900	A
最大損失	P_c	1素子		2,000	W
接合部温度	T_j			150	℃
保存温度	T_{stg}			−40〜+125	℃
絶縁耐圧（パッケージ）	V_{iso}	AC：1min		3,400	V AC

(b) 電気的特性（記述がなければ T_c＝25 ℃）　450 A/1,700 V 素子

項目	記号	条件		特性 min.	特性 typ.	特性 max.	単位
コレクタ-エミッタ間漏れ電流	I_{CES}	V_{GE}＝0 V, V_{CE}＝1,700 V		—	—	3.0	mA
ゲート-エミッタ間漏れ電流	I_{GES}	V_{CE}＝0 V, V_{GE}＝±20 V		—	—	0.6	μA
ゲート-エミッタ間しきい値電圧	$V_{GE(th)}$	V_{CE}＝20 V, I_C＝450 mA		TBD	7	TBD	V
コレクタ-エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)\text{-}Chip}$	V_{GE}＝15 V, I_C＝450 A	T_j＝25℃	—	2.20	TBD	V
			T_j＝125℃	—	2.50	TBD	
ターンオン時間	t_{on}	V_{CC}＝900 V, I_C＝450 A, V_{GE}＝±15 V, R_G＝TBD Ω		—	—	1.2	μs
	t_r			—	—	0.6	
	$t_{r(i)}$			—	—	—	
ターンオフ時間	t_{off}			—	—	1.0	
	t_f			—	—	0.3	
ダイオード順方向電圧	$V_{F\text{-}Chip}$	V_{GE}＝0 V, I_F＝450 A	T_j＝25℃	—	1.75	—	V
			T_j＝125℃	—	2.00	—	
逆回復時間	t_{rr}	I_F＝450 A		—	—	0.35	μs

(c) 熱抵抗特性　450 A/1,700 V 素子

項目	記号	条件	特性 min.	特性 typ.	特性 max.	単位
デバイスの熱抵抗（1素子）	$R_{th(j\text{-}c)}$	IGBT	—	—	0.06	℃/W
		FWD	—	—	0.10	
ケース-フィン間熱抵抗	$R_{th(c\text{-}f)}$		—	0.0167	—	

ECONOPACK™ is a trademark of eupec GmbH, Warstein.

低電流時の逆回復波形を示す。U シリーズ FWD では表面の注入を抑制した構造となっており拡散ウェーハを最適化することでカソードからのキャリヤを高注入にすることでサージ電圧は 1,700 V 以下に抑えられており良好な特性が得られた。

4　製品紹介

今回開発した 1,700 V 用 U シリーズ IGBT モジュールは従来品のパッケージに対してベース面積を 50 %削減した ECONOPACK™–Plus および PIM（Power Integrated Module）の製品に適用される。**図 13** に ECONOPACK™–Plus の外観を示す。**図 14** には ECONOPACK™–Plus の外形図および等価回路を示す。

今回開発したラインアップ一覧は**表 1** に，1,700 V/450 A モジュールの定格および特性は**表 2** に示すとおりである。

5　あとがき

以上，1,700 V 用 U シリーズの IGBT，FWD のチップ開発およびモジュール製品について紹介した。本 IGBT，FWD は装置の小型化，高性能化，高信頼性化要求に対して十分貢献できる製品と確信している。特に高耐圧 IGBT ではトレンチゲート技術による特性改善は難しいと考えられていたが，デバイス技術の最適化を図ることで大幅な特性改善が図られた。今後はさらなる技術のレベルアップを図り，新製品の開発を行っていく所存である。

参考文献

(1)　Sze, S. M. MODERN SEMICONDUCTOR DEVICE PHYSICS. 1st ed. USA. John Wiley & Sons. 1998, 557p.

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。