T，U シリーズ IGBT モジュール（600 V）

百田　聖自（ももた　せいじ）　宮下　秀仁（みやした　しゅうじ）　脇本　博樹（わきもと　ひろき）

1　まえがき

IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールは，モータコントロールなどのパワーエレクトロニクス分野では現在最も普及しているパワーデバイスである。それは駆動の容易性に加え，発生損失低減および破壊耐量向上などによる信頼性改善が進み，市場の評価を受けているためである。特に 600 V IGBT モジュールは国内では 220 V の産業用電源に，また欧州などの海外では 200 V の一般用電源を利用している地域などの広い市場で，欠かすことのできない重要なデバイスとしての役割を果たしている。

このような状況の中，富士電機も 600 V IGBT モジュールを 1988 年の開発当初から特性改善を進めつつ系列化を行ってきたが，2001 年にはウェーハを薄く加工する技術の開発により，NPT（Non Punch Through）化技術を 600 V 用デバイスにまで適用できるようになった。これにより低スイッチング損失で，特に高周波用途に適した製品として「T シリーズ IGBT」を開発し系列化した。

NPT 化技術の開発が主にチップ裏面構造の開発であったのに対し，2002 年からはチップ表面構造の改善を実施した。その結果，チャネル密度を増加させ，さらに余分な電圧降下成分を削除することにより，定常損失をも低減することができるトレンチ構造の開発を行った。これにより，現在このクラスでは最も低損失のデバイスとして「U シリーズ IGBT」の開発に成功し，現在系列化を進めつつサンプル展開を実施しているところである。

また，IGBT モジュールに内蔵されている FWD（Free Wheeling Diode）も，損失低減とともに，よりソフトリカバリーな特性が求められている。それは発振などによるその装置自身の誤動作防止だけではなく，放射ノイズが周辺機器や人体へ与える悪影響を懸念しているからである。この要求に応えるべく，上述の新しい IGBT モジュールには新構造の FWD の開発も合わせて実施し採用した。本稿ではこれらの素子技術と製品系列に関して紹介する。

2　T シリーズ IGBT モジュール

2.1　T シリーズ IGBT の特徴と課題

NPT 型 IGBT の単位セル構造を PT（Punch Through）型 IGBT の単位セル構造と比較して**図 1** に示す。これは以下のような特徴を持っている。

(1)　コレクタ側からの注入を抑制できるのでライフタイムコントロールが不要であり，高温でもスイッチング損失が増加しない。

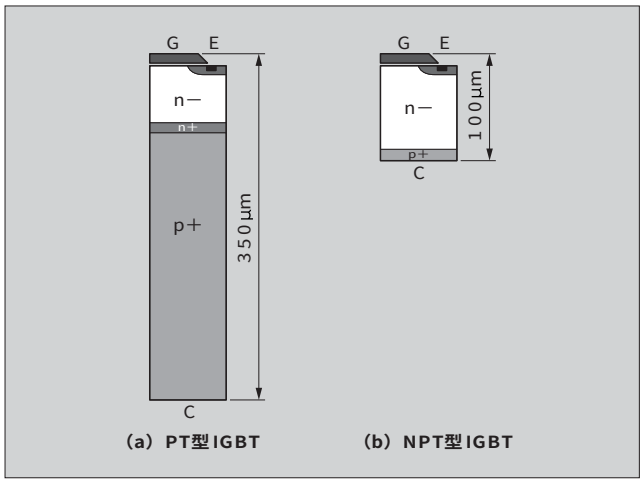
(2)　出力特性の温度依存性が正（高温でオン電圧が増加）であるので，並列使用に有利である。

(3)　負荷短絡耐量などの破壊耐量が高い。

(4)　FZ（Floating Zone）ウェーハを利用できるので安価であり，また低結晶欠陥であるので信頼性も高い。

課題としては薄いウェーハの加工技術の確立がある。NPT 型デバイスではコレクタ－エミッタ（CE）間耐圧を確保しつつ，オン電圧を低くすることが重要である。それには CE 間に最大電圧が印加された際にも，空乏層端が PT しない厚さとする必要があるが，CE 間耐圧の低いデバイスではその最適厚さは薄くなり，加工は困難となる。

図 1　単位セル構造の比較



百田　聖自

IGBT チップの開発に従事。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チームリーダー。

宮下　秀仁

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チームリーダー。電子情報通信学会会員。

脇本　博樹

パワーデバイスの研究・開発に従事。現在，富士電機総合研究所デバイス技術研究所。電気学会会員。

2.2　NPT 型デバイスへの富士電機の取組み

富士電機は**図 2** に示すように NPT 化の技術には早くから取り組んできており，より困難な低耐圧デバイスへこの技術の適用を進めてきた。

600 V IGBT に適用するための最適厚さはさまざまな研究から 100 μm程度とされていたが，富士電機はウェーハ仕様の見直しと，バックグラインド加工技術の精度向上により，厚さの設計値を他社より薄く設定することが可能となった。これは発生損失の要素であるオン電圧とターンオフ損失の低減に効果があった。

2.3　T シリーズ IGBT の特性

以下にその特性の概要を紹介する。**図 3** は CE 間耐圧である V_{CES} 波形の比較であるが，PT 型デバイスと同様に NPT 型デバイスも最大定格電圧の 600 V 以上で 800 V 程度の耐圧である。

ターンオフ波形の比較を**図 4** に示す。PT 型デバイスではコレクタ側からの注入が多いので，ターンオフ時にキャリヤの再結合を促すために，ライフタイムコントロールを実施している。この効果は高温では低減するために，ターンオフが遅くなり，損失が増加する傾向がある。一方，NPT 型デバイスではライフタイムコントロールを実施していないためにその温度特性がなく，結果としてターンオフ波形は高温でも変わらず，ターンオフ損失増加も生じない。

図 2　富士電機の NPT 技術適用の推移

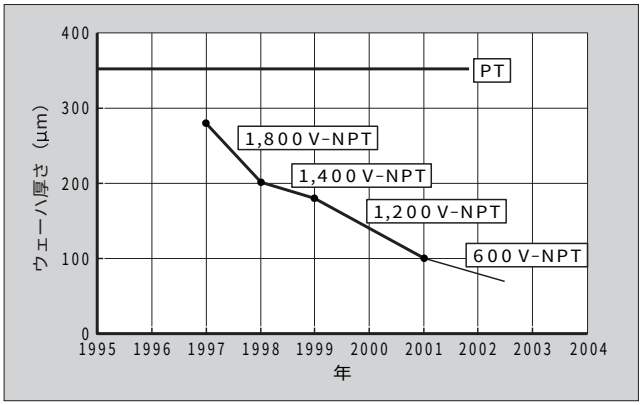
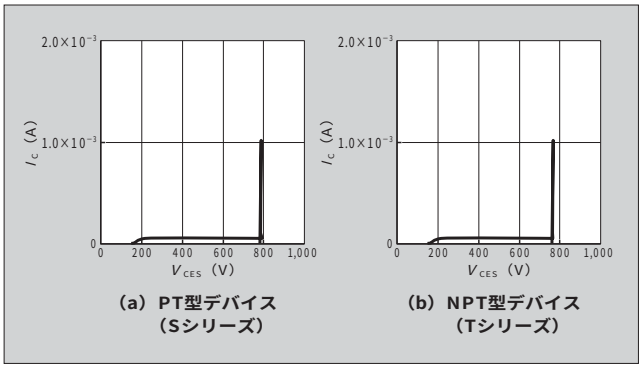


図 3　PT 型デバイスと NPT 型デバイスの V_{CES} 波形の比較



負荷短絡波形を**図 5** に示す。負荷短絡時には素子はその発生損失による温度上昇で破壊に至る。しかし n-ドリフト層が厚い NPT 型デバイスは電圧をこの広い n-ドリフト層で支えるために，温度上昇が緩和され，結果として高い短絡耐量を得ることができる。PT 型の耐量が 15 μs であるのに対し，NPT 型は 22 μs の実力があり，通常必要とされる 10 μs に対し十分なマージンを持って保証できる。

3　U シリーズ IGBT

3.1　U シリーズ IGBT の表面セル構造

チップ裏面構造の改善を行った T シリーズ IGBT の性能をさらに向上させるために，表面構造の改善を行った。富士電機ではトレンチ型のパワー MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）を生産しているが，これには車両用にも搭載可能な高い信頼性を保証するための設計とプロセス技術が適用されている。この技術を IGBT に応用したのが U シリーズ IGBT である。T シリーズのプレーナ型セル構造との比較を**図 6** に示す。

トレンチ型 IGBT ではセル密度を大幅に増加させられるのでチャネル部の電圧降下を最低限に抑えることができる。また，プレーナ型デバイス特有のチャネル間に挟まれた J_{FET} といわれる部分がトレンチ型デバイスでは存在しな

図 4　ターンオフ波形の比較

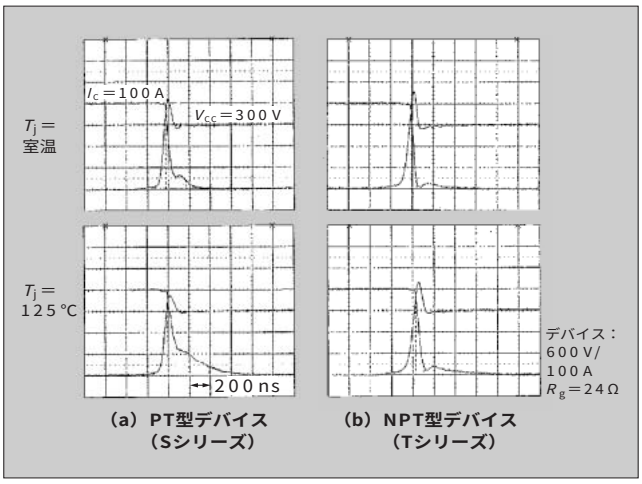
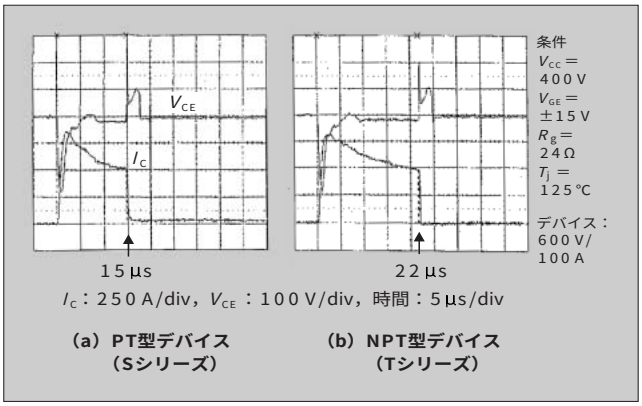


図 5　負荷短絡波形の比較



いので，この部分の電圧降下を完全に削減できる。しかし，低耐圧用のパワー MOSFET のセル設計をそのままでは適用できないので，600 V IGBT 用に適したセルピッチおよびトレンチの深さとする必要があり，U シリーズ IGBT ではシミュレーションおよび実験によりこの最適値を求め適用した。

3.2　U シリーズ IGBT の特性

上記内容に基づき設計された U シリーズ IGBT の諸特性を説明する。まずコレクタ－エミッタ間飽和電圧（$V_{CE\ (sat)}$）とコレクタ電流密度（J_C）の出力特性の比較を**図 7** に示す。

電流密度 185 A/cm²（T_j ＝ 125 ℃のとき）での $V_{CE\ (sat)}$ が 2.15 V から 1.70 V まで大幅に低減した。また室温と高温の出力特性の交点がより低電流域にあり，通常使われる領域での温度特性が正である。この特性はモジュールを並列使用する場合などに素子間の動作アンバランスを低減でき，製品としての長寿命化が図れる。この特性は前述したように NPT 型ウェーハではライフタイムコントロールを実施していないことと，n-ドリフト層が厚いためであり，T シリーズおよび U シリーズに共通した特徴である。

図 8 に電流密度を同一にした場合の IGBT の発生損失の計算結果の比較を示す。NPT 型構造の適用により T シリーズではターンオフ損失が大幅に低減し，トータルでは S シリーズに比べ約 10 %の損失低減となっている。また $V_{CE\ (sat)}$ の低減により定常損失が低下した U シリーズでは，さらに 10 %の損失低減がされている。

4　FWD の改善

IGBT モジュールには IGBT とともに FWD も内蔵されているが，FWD には発生損失低減とソフトリカバリー化が要求される。この改善には，ウェーハ仕様の最適化，アノード側からの注入抑制，最適なライフタイムコントロールの実施がある。富士電機ではこれらを見直した新設計の FWD の開発を行った。出力特性を**図 9** に示す。

結果として，順方向電圧（V_F）が低下しており，IGBT と同様に正の温度特性が得られた。またキャリヤの注入を抑制したので，逆回復時のピーク電流が減少し，発生損失が低減しているとともに，ソフトリカバリーな特性も得られた。これらにより，低発生損失で低ノイズな FWD が実現し，Uシリーズのモジュールに採用した。

図 6　プレーナ型とトレンチ型セル構造の比較

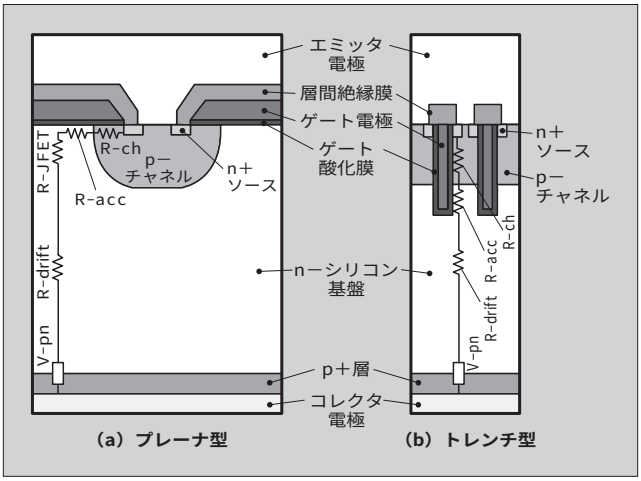


図 8　各種デバイスの発生損失比較

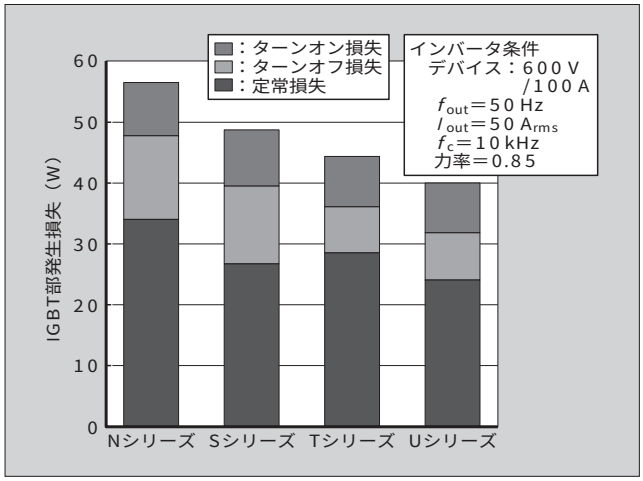


図 7　出力特性の比較

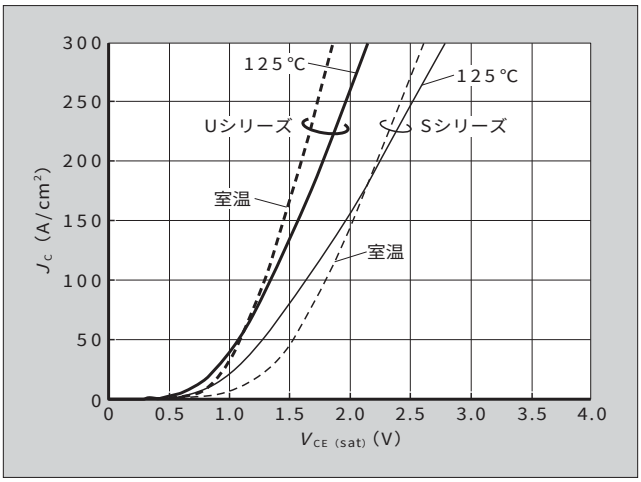


図 9　FWD の出力特性

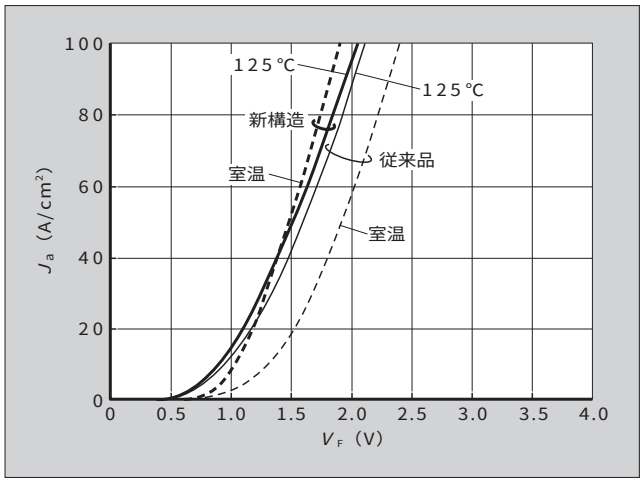
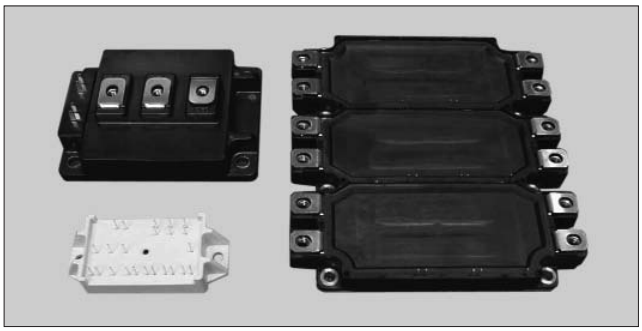


表１　U シリーズ IGBT の系列

パッケージ	電流定格	型　名	発売時期
小容量 PIM	8 A	7MBR8UE060	2003年４月
	10 A	7MBR10UE060	
	15 A	7MBR15UE060	
	20 A	7MBR20UE060	
	30 A	7MBR30UE060	
EP2	20 A	7MBR20UA060	
	30 A	7MBR30UA060	
	50 A	7MBR50UA060	
EP3	50 A	7MBR50UB060	
	75 A	7MBR75UB060	
	100 A	7MBR100UB060	
HEP2	20 A	7MBR20UC060	
	30 A	7MBR30UC060	
	50 A	7MBR50UC060	
HEP3	75 A	7MBR75UD060	
	100 A	7MBR100UD060	
7in1（M631 または M621）	100 A	7MBI100UD-060	
	150 A	7MBI150UD-060	
	200 A	7MBI200UD-060	
	300 A	7MBI300UD-060	
M232	150 A	2MBI150UA-060	
	200 A	2MBI200UA-060	
M233	300 A	2MBI300UB-060	
	400 A	2MBI400UB-060	
M238	600 A	2MBI600UE-060	
M629	400 A	6MBI400U-060	
	600 A	6MBI600U-060	

図10　U シリーズ IGBT の代表パッケージ



5　系列紹介

表１に U シリーズ IGBT の系列と発売時期，**図10**に代表パッケージの外観を示す。また，**表２**に U シリーズ IGBT モジュールの主要定格と特性を示す。

6　あとがき

600 V IGBT モジュール用として，NPT 型デバイスの T シリーズと U シリーズの紹介を行った。富士電機では今後さらに IGBT 独自の技術開発や，他の半導体デバイスの技術を取り入れて，その高性能化を進めるとともに，パワーエレクトロニクス全体の発展に貢献していく所存である。

表２　U シリーズ IGBT の主要定格と特性

（a）絶対最大定格（記述がなければ T_c＝25℃）

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}		600	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	400	A
	$I_{C\ pulse}$	1ms	800	
	$-I_C$		400	
	$-I_{C\ pulse}$	1ms	800	
最大損失	P_c	1デバイス	1,135	W
接合温度	T_j		150	℃
保存温度	T_{stg}		−40〜+125	℃
絶縁耐圧（パッケージ）	V_{iso}	AC：1min	2,500	V
ねじ締めトルク	マウンティング		3.5	N･m
	ターミナル		3.5	

（b）電気的特性（記述がなければ T_c＝25℃）

項　目	記　号	条　件		特　性 min.	typ.	max.	単位
コレクタ - エミッタ間漏れ電流	I_{CES}	V_{GE}＝0 V, V_{CE}＝600 V		—	—	2.0	mA
ゲート - エミッタ間漏れ電流	I_{GES}	V_{CE}＝0 V, V_{GE}＝±20 V		—	—	0.4	μA
ゲート - エミッタ間しきい値電圧	$V_{GE(th)}$	V_{CE}＝20 V, I_C＝400 mA		—	6.0	—	V
コレクタ - エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$ (Terminal)	V_{GE}＝15 V, I_C＝400 A	T_j＝25℃	—	1.8	—	V
			T_j＝125℃	—	1.9	—	
	$V_{CE(sat)}$ (Chip)		T_j＝25℃	—	1.6	—	
			T_j＝125℃	—	1.7	—	
入力容量	C_{ies}	V_{GE}＝0 V, V_{CE}＝10 V, f＝1MHz		—	40	—	nF
ターンオン時間	t_{on}	V_{CC}＝600 V, I_C＝400 A, V_{GE}＝±15 V, R_g＝0.5 Ω		—	—	1.2	μs
	t_r			—	—	0.6	
ターンオフ時間	t_{off}			—	—	1.0	
	t_f			—	—	0.35	
ダイオード順方向電圧	V_F (Terminal)	I_F＝400 A	T_j＝25℃	—	1.8	—	V
			T_j＝125℃	—	1.7	—	
	$V_{F(Chip)}$		T_j＝25℃	—	1.6	—	
			T_j＝125℃	—	1.5	—	
逆回復時間	t_{rr}	I_F＝150 A		—	—	0.3	μs

（c）熱抵抗特性

項　目	記　号	条件	特　性 min.	typ.	max.	単位
デバイスの熱抵抗（1デバイス）	$R_{th(j-c)}$	IGBT	—	—	0.11	℃/W
		FWD	—	—	0.18	
ケース - フィン間熱抵抗	$R_{th(c-f)}$		—	0.025	—	

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。