# 第7世代 2,300 V「X シリーズ」IGBT/FWD チップ

"X Series" 7th-Generation 2,300-V IGBT/FWD Chips

松本	治輝 MATSUMOTO, Haruki	田村	隆博 TAMURA, Taka	hiro唐本	祐樹	KARAMOTO, Yuki	
----	----------------------	----	-----------------	--------	----	----------------	--

太陽光・風力発電など再生可能エネルギー分野で電力変換装置に利用されるパワー半導体の利用が拡大している。近年、 発電出力拡大のため、搭載する IGBT モジュールの高電圧化や高耐圧化が求められている。富士電機は、この要求に応え るため、定格電圧 2,300 V の「X シリーズ」IGBT チップと FWD チップを開発した。IGBT と FWD ともに、ドリフト層 の厚さを薄くし、裏面構造を最適化することで、耐量と耐圧を確保し、既存の 3,300 V チップに対して、IGBT はコレク タ・エミッタ間飽和電圧を 39%、FWD は逆回復損失を 43% 低減した。

Power semiconductors has been widely used in power conversion equipment in the renewable energy field, including solar and wind power generation. IGBT modules are required to deliver a high voltage rating and withstand voltage due to the recent increase in power generation output. To meet this demand, Fuji Electric has developed an "X Series" IGBT chip and FWD chip with a rated voltage of 2,300 V. Use of optimal backside structure with a thinned drift layer allows both chips to have enough tolerance and withstand voltage. The IGBT has a 39% lower collector-emitter saturation voltage and the FWD has a 43% lower reverse recovery-loss than conventional 3,300-V chips.

# 1 まえがき

地球温暖化対策として温室効果ガス削減の要求が高まっ ている。温室効果ガスは、電力を効率よく利用することで 削減することができるため、電力変換装置で使用されるパ ワー半導体にはさらなる高性能化が要求されている。パ ワー半導体は、産業、車載向けなどさまざまな分野で用い られており、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネ ルギー分野での利用が急激に拡大している。パワー半導 体としては、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) チップと FWD(Free Wheeling Diode)チップで構成さ れる IGBT モジュールが広く使われている。

再生可能エネルギーのさらなる普及に向けて、発電効率 の向上と発電コストの低減が求められている。そのために は電力変換装置の入力電圧を上げて電流を低減すること が有効で、DC1,000 V から DC1,500 V へと高電圧化が進 んでいる。富士電機の現行の製品として定格電圧 1,700 V と 3,300 V の「X シリーズ」の IGBT モジュールがあるが、 定格 1,700 V では入力電圧 DC1,500 V に対して耐圧が不 足し、定格 3,300 V では耐圧が過剰で損失が増大するた め、入力電圧 DC1,500 V に適した耐圧クラスの IGBT モ ジュールが必要となっている。

そこで、新規耐圧クラスの定格2,300VのXシ リーズIGBTモジュールを開発した。本稿では、定格 2,300V/1,200AのIGBTモジュールに搭載するIGBT (X-IGBT)とFWD(X-FWD)のチップ技術について述 べる。

# 2 2,300 V「X シリーズ」IGBT チップの特徴

## 2.1 低損失化技術

## (1) 導通損失の低減

図1に IGBT の断面構造を示す。IGBT はゲートに 電圧を印加することで表面の MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) チャネルから電子が注入され、これに応 じて裏面の p+ コレクタ層からホールが注入されることで、 低不純物濃度の n- ドリフト層に電子とホールが溜まり伝 導度変調が生じる。この伝導度変調によって IGBT は低抵 抗となり、低導通損失を実現している。

2,300 V X-IGBT は、図1 に示すように3,300 V X-IGBT に対してn-ドリフト層厚を薄くし、損失を低減した。n-ドリフト層厚を薄くすると、電流経路となる コレクタ電極とエミッタ電極間の距離が短くなり、n-ドリフト層の低抵抗によりコレクタ・エミッタ間飽和電圧  $V_{CE (sat)}$ が低下し、導通損失が低減する。また、n-ドリ



図 1 IGBT の断面構造

フト層厚を薄くすることにより、導通時に n- ドリフト層 に蓄積されるキャリアの総量も減少するため、ターンオフ 時にキャリアが掃き出されるまでの時間が短縮し、ターン オフ損失 *E*<sub>off</sub> も低減する。

図 2 に 2,300 V X-IGBT と 3,300 V X-IGBT のコレク タ電流  $I_c$ - コレクタ・エミッタ間電圧  $V_{CE}$  特性を示す。定 格電流において、低抵抗の 2,300 V X-IGBT は 3,300 V X-IGBT に比べ  $V_{CE}$  が 1.58 V (39%) 低下した。

図3に $E_{off} \geq V_{CE (sat)}$ の関係を示す。 $E_{off} \geq V_{CE (sat)}$ は トレードオフの関係にあるが、2,300 V X-IGBT の $E_{off}$  お よび $V_{CE (sat)}$ は、ともに3,300 V X-IGBT よりも低くなり、 同一の $E_{off}$ において $V_{CE (sat)}$ は1.58 V (39%)低下した。 IGBT チップの $V_{CE (sat)}$ 低下は、装置に実装したときの導 通損失低減につながる。

# (2) ターンオフサージ電圧の改善

一方、n-ドリフト層厚を薄くしたことにより、ターン オフサージ電圧は上昇してしまう。n-ドリフト層厚が薄 いと、ターンオフ動作時の逆バイアス印加により、空乏 層が裏面の p+コレクタ層に到達しやすくなり、ターンオ フサージ電圧が上昇する。これに対し、2,300 V X-IGBT では n-ドリフト層と p+コレクタ層のキャリア濃度を濃 くすることで対策した。



図 2 コレクタ電流 /<sub>c</sub>-コレクタ・エミッタ間電圧 V<sub>CE</sub> 特性



図3 ターンオフ損失 *E*<sub>off</sub> とコレクタ・エミッタ間飽和電圧 *V*<sub>CE(sat)</sub>の関係

富士電機技報 2023 vol.96 no.4



図4 2,300 V X-IGBT のターンオフサージの波形

図4に2,300VX-IGBTのターンオフサージの波形 を示す。2,300VX-IGBTのターンオフサージ電圧は 2,078Vであり、通常使用される動作条件下において定格 電圧の2,300V以下に収まることが確認できた。

## 2.2 破壊耐量向上技術

IGBT は、短絡により大電流が流れた際にも一定時間破壊しないことが要求される。これに対し、n-フィールドストップ層と p+ コレクタ層の設計最適化を進めた。短絡状態ではエミッタ側から多くの電子が注入され、n-ドリフト層の正の固定電荷が打ち消されて、電界のピークが裏面側に移動することでアバランシェ破壊(裏面アバランシェ破壊)が発生する。この裏面アバランシェ破壊に対する耐量を向上させる方法として、エミッタ側から注入される電子をコレクタ側から注入されるホールで打ち消すことが挙げられる。コレクタ側からのホールの注入量を増やすことは、式(1)で表される IGBT 裏面の寄生 pnp トランジスタの増幅率 $\alpha_{pnp}$ を増大することで可能となる。



- α :コレクタ効率
- β : ベース輸送効率
- γ :エミッタ注入効率

 $\alpha_{pnp}$ は、n-フィールドストップ層の設計で決まる $\beta$ と、 p+コレクタ層濃度によって決まる $\gamma$ によって調整できる。n-フィールドストップ層の設計は漏れ電流にも影響し、低濃度もしくは浅く形成すると漏れ電流が増加してしまうが、高温で漏れ電流が増加すると、高温動作時の破壊リスクが高くなる。一方、p+コレクタ層濃度はIGBTの特性を決定する主要パラメータの一つであり、特に $E_{off}$ と $V_{CE (sat)}$ に強く影響する。このように、n-フィールドストップ層と p+コレクタ層は、裏面アバランシェ耐量だけでなく、その他の特性も満たす適切な設計とする必要がある。

2,300 V X-IGBT では、n-フィールドストップ層と p+コレクタ層の設計の最適化により $\alpha_{pp}$ を適切な値に設



図5 高温漏れ電流の測定結果



図6 裏面アバランシェ耐量測定時の短絡波形

定し、短絡時の裏面アバランシェ破壊耐量確保と、漏れ電 流低減の両立を図った。

図5にn-フィールドストップ層を最適化する前後に おける高温漏れ電流の測定結果を示す。2,300 V X-IGBT の150℃における漏れ電流は、n-フィールドストップ層 の最適化により34% 低減した。

図6に裏面アバランシェ耐量測定時の短絡波形を示す。 2,300 V X-IGBT の裏面アバランシェ耐量は、定格電流の14倍であり、十分な耐量があることが確認できた。

このように、n-フィールドストップ層とp+コレクタ 層の設計の最適化により、高温漏れ電流の増加を抑制しつ つ、裏面アバランシェ耐量を確保することができた。

# 3 2,300 V「X シリーズ」FWD チップの特徴

#### 3.1 低損失化技術

#### (1) 逆回復損失の低減

図7にFWDの断面構造を示す。3,300VのIGBTモ ジュールに搭載されているFWDは、第5世代「Uシ リーズ」のFWD(U-FWD)である。図7に示すように、 2,300VX-FWDでは、IGBTと同様に3,300VU-FWD に対してn-ドリフト層厚を薄くすることにより損失低減 を図った。n-ドリフト層厚を薄くすることで、導通時に



図7 FWD の断面構造

n-ドリフト層に蓄積されているキャリアの総量が減少するため、逆回復電流が抑えられ、逆回復損失 $E_{rr}$ が低減する。

図8に、2,300VX-FWDと3,300VU-FWDの逆回 復波形を示す。2,300VX-FWDは、3,300VU-FWD と比較して逆回復電流が低減しており、2,300VX-FWD でn-ドリフト層厚を薄くした効果が確認できた。

図9に $E_{rr}$ と順方向電圧 $V_F$ の関係を示す。 $E_{rr}$ と $V_F$ はトレードオフの関係にあり、pアノード濃度を増加させると $V_F$ が低下し、 $E_{rr}$ が増大する。同一の $V_F$ において、2,300 V X-FWDの $E_{rr}$ は、3,300 V U-FWDに対して43%低減することができた。

(2) 逆回復サージ電圧の改善

一方、n-ドリフト層厚を薄くしたことにより、逆回復 サージ電圧は上昇してしまう。n-ドリフト層厚を薄くす ると、逆回復動作時の逆バイアス印加により空乏層がカ ソード側へ到達しやすくなり、逆回復サージ電圧が上昇す る。そこで、2,300 V X-FWD ではカソード層の構造を最 適化し、カソード層側への空乏層の伸びを制御することに より急激なサージ電圧の上昇を抑制した。

図10に2,300 V X-FWD の逆回復サージの波形を示す。 サージ電圧は1,578 V で定格電圧2,300 V に対して十分 な余裕があることが確認できた。



図 8 2,300 V X-FWD と 3,300 V U-FWD の逆回復波形



図9 逆回復損失 Err と順方向電圧 VF の関係



図 10 2,300 V X-FWD の逆回復サージの波形

# 3.2 破壊耐量向上技術

FWD は、逆回復動作時の素子破壊を防止するため、製品仕様に基づいて逆回復耐量を確保する必要がある。 FWD では、素子外周の耐圧構造部に存在するキャリアが、 逆回復動作時にアノード層の素子活性領域端部に集中し やすく逆回復耐量を低下させる要因となっている。そのた め、裏面構造の最適化により、素子周縁部のキャリア量を 抑制してアノード層の活性端部に集中するキャリアを低減 し、耐量を向上させている。

2,300 V X-FWD について最大許容電流を評価した結果、 定格電流の2倍以上でも破壊しないことが確認できた。

# 4 あとがき

新規耐圧クラスとなる定格電圧 2,300 Vの「X シリー

ズ」IGBT と FWD のチップ技術について述べた。IGBT と FWD ともに、n-ドリフト層厚を薄くしたことと裏面 構造の最適化によって、再生可能エネルギー分野で要求が 高まっている入力電圧 DC1,500 V で必要な耐圧と耐量を 確保しながら低損失化を実現した。

今回、開発した技術を用いて、今後も IGBT と FWD の 特性改善を進め、温室効果ガス削減に向けた再生可能エネ ルギーの普及に貢献していく所存である。

## 参考文献

- (1) 国土交通省. "国土交通省がその事務及び事業に関し温 室効果ガスの排出の削減等のため実施すべき措置につい て定める計画". https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/ environment/sosei\_environment\_fr\_000137.html, (参 照 2023-11-30).
- (2) Onozawa, Y. et al. "Development of the next generation 1700 V trench-gate FS-IGBT". International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). 2011.
- (3) 古閑丈晴ほか. 3.3 kV IGBTモジュール. 富士時報. 2007, vol.80, no.6, p.397-401.
- (4) 川畑潤也ほか. 第7世代「X-シリーズ」IGBTモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.254-258.



## 松本 治輝

パワー半導体の設計開発に従事。現在、富士電機 株式会社半導体事業本部開発統括部デバイス開発 部。



#### 田村 隆博

パワー半導体の設計開発に従事。現在、富士電機 株式会社半導体事業本部産業事業部産業設計第一 部。工学博士。

## 唐本 祐樹

パワー半導体の設計開発に従事。現在、富士電機 株式会社半導体事業本部産業事業部産業設計第一 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。