

第6世代 1,700 V 「Vシリーズ」 IGBT

6th Generation 1,700 V "V-Series" IGBT

尾崎 大輔 Daisuke Ozaki

小野澤 勇一 Yuichi Onozawa

山崎 智幸 Tomoyuki Yamazaki

風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーを用いた大規模な発電設備の普及に伴い、高い信頼性と優れた特性を持つ高耐圧、大電流の IGBT モジュールが要求されている。そこで、マイクロ p ベース構造と、高耐圧用に最適化されたフィールドストップ構造を適用した第6世代 1,700 V 「Vシリーズ」 IGBT を開発した。従来の 1,700 V 「Uシリーズ」 IGBT と比較して、ターンオフ損失とオン電圧のトレードオフを 0.2 V 改善した。さらに、新開発のフィールドストップ構造によって熱暴走温度を高めることに成功し、その結果、チップ最大接合温度 T_{jmax} を 175 °C まで高めることが可能となった。

With the emergence of large-scale renewable energy systems, such as wind and solar power generation systems, there is a need for high-voltage, high-current IGBT modules with high reliability and outstanding electrical characteristics. To meet this need, Fuji Electric has developed the 6th generation 1,700 V "V-Series" IGBT, featuring a micro p-base structure and a field stop structure optimized for high voltage tolerance. Compared to the previous 1,700 V "U-Series" IGBT, the tradeoff between turn-off loss and on-voltage has been improved by 0.2 V. The newly developed field stop structure has succeeded in raising the thermal runaway temperature, making it possible to raise a chip maximum junction temperature T_{jmax} to 175 °C.

1 まえがき

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは、モータ駆動やトラクション制御、電力制御に代表されるさまざまなアプリケーションに適用されている。特に近年では、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーを用いた大規模な発電設備の普及に伴い、高い信頼性と優れた特性を持つ高耐圧、大電流の IGBT モジュールが要求されている。

本稿では、低ノイズと低損失を両立したマイクロ p ベース構造と、高破壊耐量と動作温度の向上を実現する新しいフィールドストップ (FS) 構造を適用した第6世代 1,700 V 「Vシリーズ」 IGBT について述べる。

2 デバイス構造・設計

2.1 表面構造

図1に、1,700 V Vシリーズ IGBT チップの構造を示す。

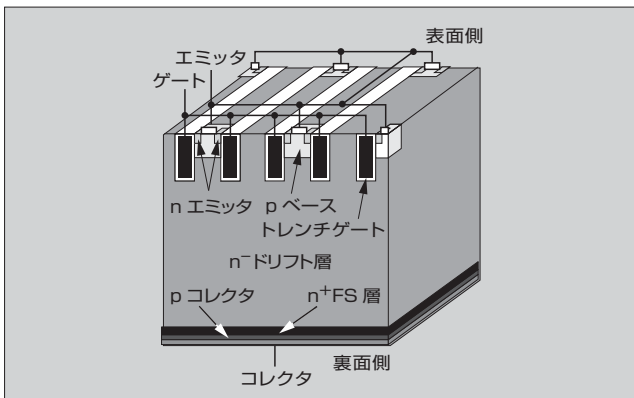


図1 第6世代 1,700 V 「Vシリーズ」 IGBT の構造

表面側には 600 V、1,200 V 耐圧の素子と同様、マイクロ p ベース構造を適用している^{(1)~(3)}。この構造はキャリア蓄積効果を損なうことなく、ターンオン di/dt の制御性を改善できるため、第5世代「Uシリーズ」 IGBT よりもノイズを低減することが可能となった。

また、トレンチゲートが均等に配置されるため、トレンチ底部の電界が緩和され耐圧が向上する。この結果、より低抵抗のドリフト層が適用できるため、ターンオフ時の振動を抑制しつつ、素子の厚さを薄くすることができた。

2.2 裏面構造

低ノイズと低損失を両立したマイクロ p ベース構造に加えて、1,700 V Vシリーズ IGBT のもう一つの特徴は、FS 構造の最適化を行っていることである。

特に、ドリフト層のキャリア濃度が低い高耐圧の IGBT では、短絡時にエミッタ側から多量の電子を注入すると、ドリフト層内のドナーの正電荷が電子の負電荷によって相殺され、印加電圧を支えることができなくなる。この結果、コレクタ側の狭い領域に電圧が集中し、通常よりも著しく低い電圧でアバランシェ降伏を起こして破壊する場合がある^{(3)~(5)}。

この破壊モードを抑制する方法として、短絡時にエミッタ側から注入する電子の量を少なくすることが挙げられる。これは表面 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) のチャネル幅を狭くすることで容易に達成できるが、この方法では出力電流が低下し、かつ $V_{CE(sat)}$ が増加してしまうため実用的ではない。

もう一つの方法は、コレクタ側から注入するホールの量を増やして、エミッタから注入する電子の負電荷を相殺することである。ホールの注入を増やすことは寄生 pnp トランジスタの増幅率 α_{pnp} を増加することで達成できる。

α_{pnp} は式(1)で導くことができる。

$$\alpha_{pnp} = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \dots\dots\dots(1)$$

- α_{pnp} : 共通ベースの電流増幅率
- α : コレクタ効率
- β : ベース輸送効率
- γ : エミッタ注入効率

このうち、 β は FS 構造の中性領域の残り幅によって変化させることができる⁽⁶⁾。この FS 構造を低濃度もしくは浅く形成することで β が大きくなるので α_{pnp} は増加し、そ

の結果、コレクタ側からのホールの注入を増やすことができる。図2に、 α_{pnp} が高い IGBT と低い IGBT における短絡時の電界分布を計算した結果を示す。 α_{pnp} を高めることによって、コレクタ側の電界上昇が抑制されており、短絡時においても印加電圧はドリフト層全体で支えられていることが分かる。

しかしながら、FS 構造を低濃度もしくは浅く形成することにより、特に高温時の漏れ電流が増加する問題がある。このことは、高温動作時に漏れ電流と印加電圧の積による損失によって IGBT が自己発熱を起こし、熱暴走破壊を起こすリスクが高くなることを意味する。

この問題を克服するために、高濃度で浅い層を追加した高耐圧素子向けの新しい FS 構造の開発を行った。この新 FS 構造を適用することにより、高い α_{pnp} を維持したまま漏れ電流の増加を抑制することが可能となった。

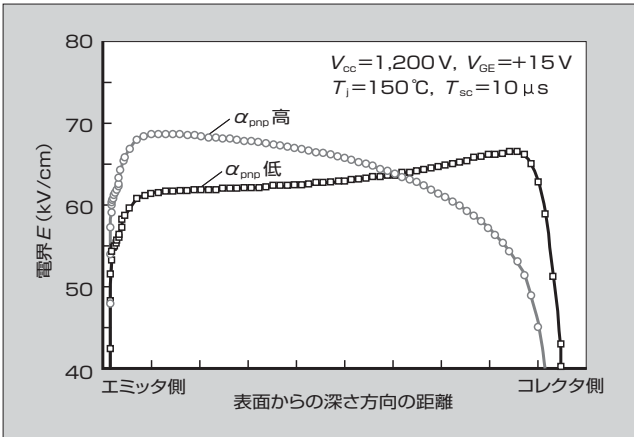


図2 1,700V IGBTの短絡時の電界分布

3 電気的特性

3.1 静特性

図3に、定格1,700V 150AのVシリーズ IGBT とUシリーズ IGBT の出力特性を比較した結果を示す。コレクタ電流150A、電流密度125A/cm²、温度150℃におけるオン電圧 $V_{CE(sat)}$ は、Vシリーズ IGBT が約2.5V、Uシリーズ IGBT は約2.75Vである。Vシリーズ IGBT では、マ

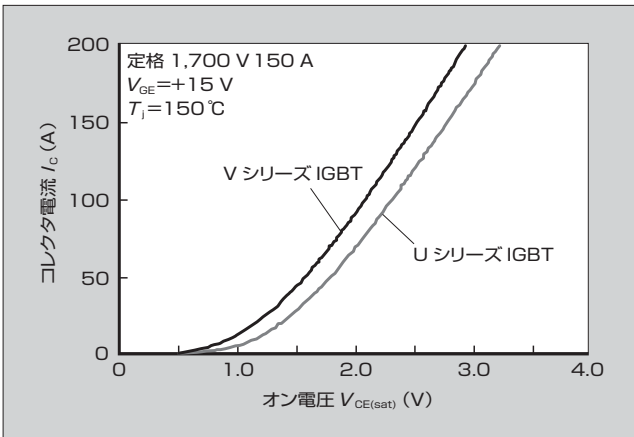


図3 1,700V 「Vシリーズ」 IGBTのV-I特性

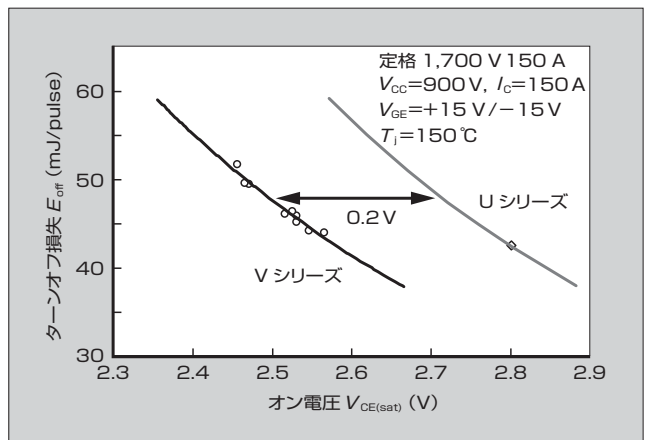


図5 $V_{CE(sat)}$ と E_{off} のトレードオフ関係

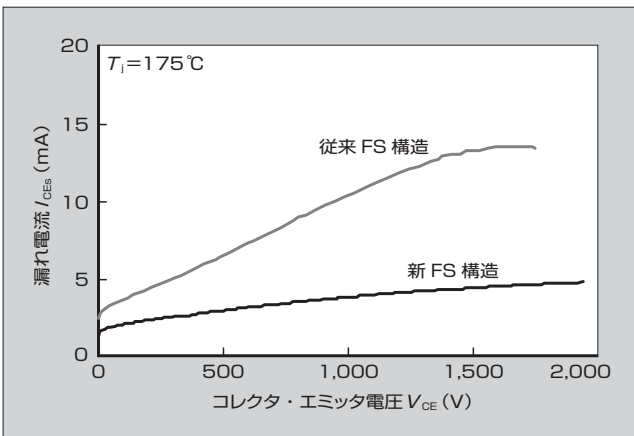


図4 新FS構造と従来FS構造の漏れ電流

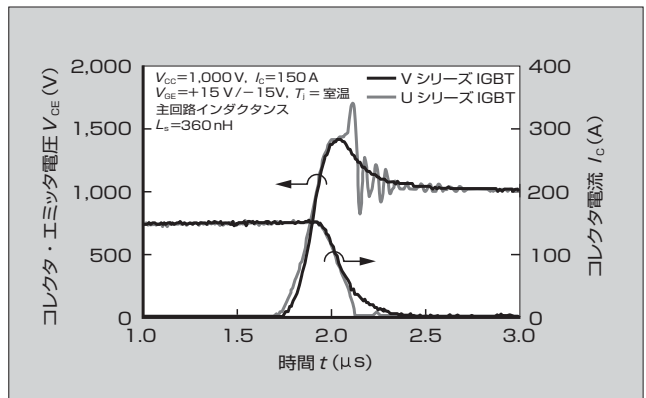


図6 $L_s=360\text{nH}$ 時のターンオフ波形

イクロ p ベース構造の適用によりキャリアの蓄積効果向上とドリフト層の薄化が可能になり、約 0.25 V の $V_{CE(sat)}$ の低減を実現した。

図 4 に、175℃における漏れ電流を新 FS 構造と従来 FS 構造で比較した結果を示す。新 FS 構造の適用により、漏れ電流が約 1/3 に低減していることが分かる。

3.2 ターンオフ特性

図 5 に、オン電圧 $V_{CE(sat)}$ とターンオフ損失 E_{off} のトレードオフカーブを示す。V シリーズは U シリーズに対して約 0.2 V の改善ができた。

図 6 に、主回路インダクタンス $L_s=360\text{ nH}$ 、 $V_{CC}=1,000\text{ V}$ 、 $I_C=150\text{ A}$ 、 $T_j=$ 室温でのターンオフ波形の比較を示す。このような厳しい条件においても、V シリーズ IGBT では、サージ電圧は十分に小さく、また、波形に振動が生じていないことが分かる。この結果は、V シリーズ IGBT ではサージ保護機能がなくてもターンオフできる可能性があることを示している。

3.3 ターンオン波形

図 7 に、ゲート抵抗を変えたときの定格電流の 1/10 の室温時における電流ピーク I_{cp} と、定格電流の高温 150℃ 時におけるターンオン損失 E_{on} のトレードオフを比較した結果を示す。例えば、 $I_{cp}=70\text{ A}$ でのターンオン損失を比べると、V シリーズ IGBT では U シリーズ IGBT より E_{on} が

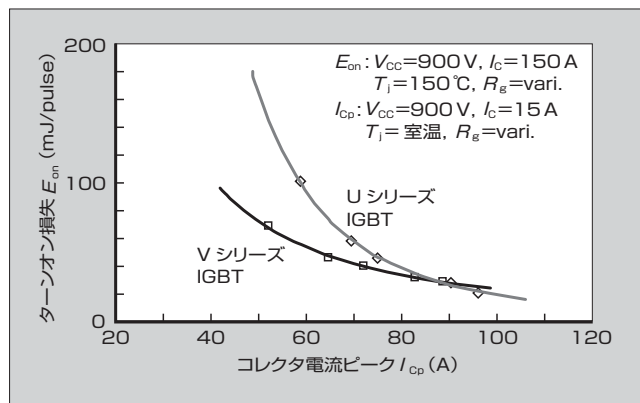


図 7 I_{cp} と E_{on} のトレードオフ関係

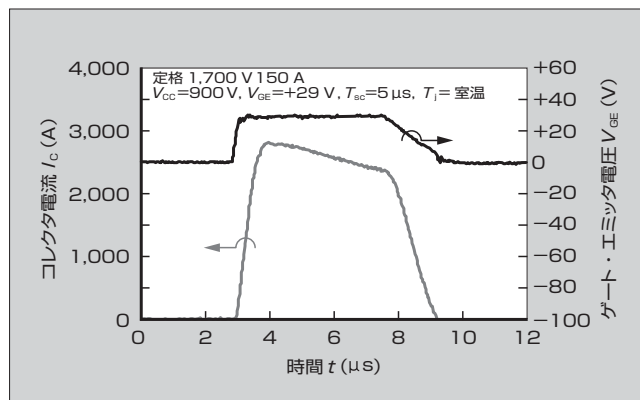


図 8 大電流の短絡波形

約 30% 低減していることが分かる。このことは、ノイズレベルを合わせた場合に E_{on} が 30% 低減することを意味する。

3.4 短絡耐量

短絡時のアバランシェ降伏に対する耐量を評価するため、1,700V 150A の V シリーズ IGBT においてゲート電圧を $V_{GE}=29\text{ V}$ に設定し、コレクタ電流の最大値を 2,800 A まで上げた状態で $5\mu\text{ s}$ の短絡試験を実施した。図 8 に実施結果を示す。このような大電流の短絡においても、V シリーズ IGBT は破壊されない。この結果から、V シリーズ IGBT では短絡時の裏面アバランシェ降伏破壊を十分に抑制できていることが分かる。

3.5 熱暴走温度

IGBT モジュールのパワー密度向上の需要に伴い、高温での動作を保証することは今後のモジュールの重要な課題の一つである。そこで、1,700V V シリーズ IGBT の熱暴走温度を確認する試験を実施した。図 9 に、この測定回路を示す。この試験では、IGBT をホットプレート上に置いて初期温度を 175℃ に設定する。その状態で 1,200V の電圧を IGBT の C-E 間に印加すると、印加電圧と漏れ電流の積により自己発熱を生じるため、IGBT の温度は上昇し、最終的に熱暴走を起こして破壊に至る。

図 10 に、新 FS 構造および従来 FS 構造を適用した

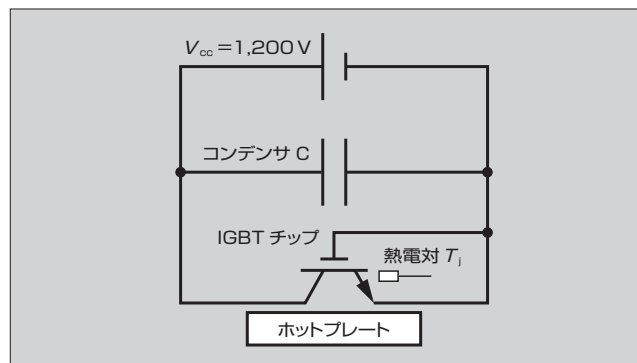


図 9 熱暴走試験の回路

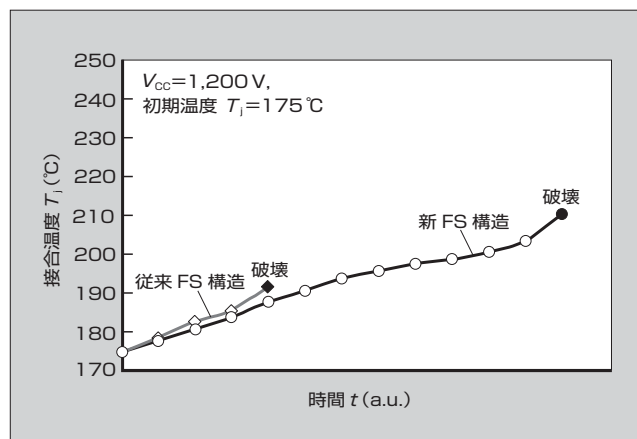


図 10 新 FS 構造と従来 FS 構造の熱暴走温度

1,700 V Vシリーズ IGBT の熱暴走破壊の温度を比較した結果を示す。従来 FS 構造では約 190℃で破壊を生じているのに対し、新 FS 構造を適用した IGBT では破壊温度が約 210℃まで上昇していることが分かる。この理由は前述したように、新 FS 構造の適用により漏れ電流が低減したためである。

4 あとがき

第6世代 1,700 V 「Vシリーズ」 IGBT は、マイクロ p ベース構造と新しい FS 構造により、従来の 1,700 V 「Uシリーズ」 IGBT に対して、ターンオフ損失とオン電圧のトレードオフを 0.2 V 改善することに成功した。さらに低損失と低放射ノイズに加えて、高い短絡耐量を実現した。また、熱暴走温度を U シリーズ IGBT に対して約 20℃向上させることに成功し、その結果、チップ最大接合温度 T_{jmax} を 175℃に高めることが可能となった。

今後は、この V シリーズで適用した FS 構造の技術をさらに高耐圧の領域に適用し、いっそうの高性能化と高信頼性に向け努力していく所存である。

参考文献

- (1) Onozawa, Y. et al. "Development of the next generation 1,200 V trench-gate FS-IGBT featuring lower EMI noise and lower switching loss", in Proc. 19th ISPSD. 2007, p.13-16.
- (2) Nakano, H. et al. "600 V trench-gate FS-IGBT with Micro-P structure", in Proc. 21st ISPSD. 2009, p.13-16.
- (3) Momose, M. et al. "A 600 V Super Low Loss IGBT with Advanced Micro-P structure for the next Generation IPM",

in Proc. 22nd ISPSD. 2002, p.355-358.

- (4) Pfaffenlehner, M. et al. "1,700 V IGBT3 : Field Stop Technology with Optimized Trench Structure-Trend setting for the High Power Application in Industry and Traction", in Proc. 14th ISPSD. 2002, p.355-358.
- (5) Nakagawa, A. et al. "MOSFET-mode Ultra-Thin Wafer PTIGBTs for Soft Switching Application-Theory and Experiments", in Proc. 16th ISPSD. 2004, p.103-106.
- (6) Otsuki, M. et al. "1,200 V FS-IGBT module with enhanced dynamic clamping capability", in Proc. 16th ISPSD. 2004, p.339-342.



尾崎 大輔

パワー半導体の設計開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所 Si デバイス開発センターデバイス開発部。



小野澤 勇一

パワー半導体の設計開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所 Si デバイス開発センターデバイス開発部。工学博士。



山崎 智幸

パワー半導体の設計開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所 Si デバイス開発センターデバイス開発部マネージャー。工学博士。電気学会会員。





*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。