

## xEVトラクションインバーターの損失低減に 寄与するパワーデバイス

Power Devices Achieving Traction Inverter Switching Loss Reduction for xEVs

松岡 裕磨 MATSUOKA Yuma 林 才人 HAYASHI Masato 吉川 大輝 YOSHIKAWA Daiki

自動車の電動化の流れは今後も確実に進むと予測されており、それに伴い車載用半導体の需要増大が見込まれている。このうち、電動車(xEV)のトラクションインバーター回路に使用されるパワーデバイスであるIGBT(絶縁ゲート型バイポーラトランジスター)は、車両の電費(バッテリー容量当たりの走行距離)の向上の観点から、耐圧要求が現在主流である750Vから、今後は1,200Vへと引き上げられることが予測されている。

東芝デバイス&ストレージ(株)は、このような状況に対応するため、2種類のSi(シリコン)-IGBTを開発した。750V耐圧のIGBTは、裏面構造を最適化することにより、破壊耐量を保持しつつオン電圧( $V_{CE(sat)}$ )とターンオフ損失( $E_{off}$ )のトレードオフを改善した。また、1,200V耐圧のRC-IGBT(Reverse Conducting IGBT)は、RC化によりチップサイズを縮小しつつ、背反する逆回復損失( $E_{rr}$ )を表面構造の最適化により改善した。

In recent years, the proliferation of electrified vehicles (xEVs) is driving demand for automotive semiconductor products. This has resulted in greater focus on insulated gate bipolar transistors (IGBT), as a main power device for xEV traction inverters, which is required to achieve higher breakdown voltage from conventional 750 V to 1 200 V to improve xEV electricity consumption.

As a solution, Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has developed silicon (Si) IGBT products, including (1) a 750 V IGBT capable of improving the trade-off between on-voltage ( $V_{CE(sat)}$ ) and turn-off switching loss ( $E_{off}$ ) while maintaining sufficient tolerability by optimizing the backside structure, and (2) a 1 200 V reverse conducting IGBT (RC-IGBT) capable of improving reverse recovery energy ( $E_{rr}$ ) through optimizing the surface structure while reducing the chip size via the RC structure.

### 1. まえがき

自動車業界の変革を示すキーワードであるCASE(Connected, Automated, Shared & Service, Electric)に象徴される昨今の自動車を取り巻く環境の変化は、社会の在り方と自動車メーカーの戦略に大きな影響を及ぼしつつある。東芝デバイス&ストレージ(株)は、CASEの4領域のそれぞれに対応した車載用の各種半導体製品を展開している。とりわけ市場の拡大が著しいElectric(電動化)領域に焦点を当てて、パワートレインやドライブレインに使用されるパワー半導体や、絶縁デバイス、モータードライバーIC、インテリジェントパワーデバイスなどのラインアップを拡充している。

車載用パワー半導体は、モータードライブ用、ブレーキエネルギー回生用、及び電力変換用などの回路に用いられ、エネルギーの効率的な伝達と車両の電費向上を通じて、xEVの省エネ化やカーボンニュートラルの実現に貢献している。中でも、Si-IGBTは高いコレクター-エミッター間耐圧( $V_{CES}$ )と低い導通損失を併せ持つことから、高電圧かつ大電流のスイッチングが必要なトラクションインバーターに多く

使用されている。

xEVのトラクションインバーターへ電力を供給するためのバッテリー電圧は、現在主流の400Vから800Vへ移行していくことが見込まれる。モーターの動作電圧を上げて配線による損失を低減すれば、モーター巻線やハーネスの軽量化による電費の改善が可能となるが、一方、インバーター回路に使用されるスイッチングデバイスの耐圧要求は現行の750Vから1,200Vへと引き上げられる。

当社は、750V耐圧のIGBTについてはSiチップ厚の薄化により損失低減を図り、背反して生じるスイッチング振動と短絡耐量低下を抑制するために、裏面構造の最適化を実施した新製品YG400B75Aを開発した。また、1,200V耐圧のRC-IGBT(IGBTとダイオードを一つのチップで形成したトータルチップ面積を低減した構造)については、IGBTの表面構造を最適化することで損失を低減した。ここでは、これら2種類のIGBTの損失低減技術の概要と効果の検証結果について述べる。

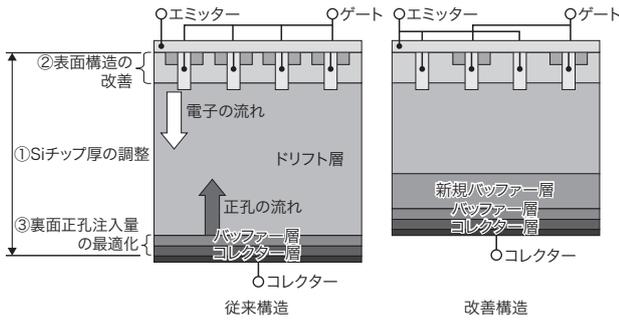


図1. IGBTの設計パラメーター及び従来構造と改善構造の比較

$V_{CE(sat)}$ と $E_{off}$ のトレードオフの改善に関わるIGBTの設計パラメーターは、①Siチップ厚の調整、②表面構造の改善、③裏面正孔注入量の最適化である。改善構造では、Siチップ厚を薄くし、新規裏面バッファ構造を採用した。

Main design parameters and cross-sectional structure of new IGBT compared with conventional IGBT

## 2. 750 V 耐圧 IGBT の損失低減

### 2.1 電気的特性に関わる設計パラメーターと改善施策の概要

$V_{CE(sat)}$ と $E_{off}$ のトレードオフの改善など、IGBTの電気的特性を向上させるための設計パラメーターとして、主に、①Siチップ厚の調整(裏面バッファ設計を含む)、②表面構造の改善(チャネル密度向上、ゲート容量の最適化)、③裏面正孔注入量の最適化の三つが挙げられる(図1)。

特に、①のSiチップ厚の調整は、Siチップ厚を薄くすることで、 $V_{CE(sat)}$ やスイッチング損失を低減できる。素子の基本構造の一つである薄パンチスルー(PT:Punch Through)構造は、電圧印加したときの空乏層の広がりがないバッファ層で阻止されるため、ノンパンチスルー(NPT)構造に対してドリフト層を狭くすることができ、 $V_{CE(sat)}$ 低減に有効な構造である。今回、YG400B75Aの開発にあたり、PT構造を用いた特性改善として、Siチップ厚を薄化した薄ウェハーPT構造を採用した。Siチップ厚を薄くすると、背反して、(1)ターンオフ時のスイッチング振動の発生、(2)ドリフト層の薄化による耐圧低下、(3)破壊耐量(負荷短絡耐量など)の低下が懸念され、単にSiチップ厚を薄くすることは、これらの特性とのトレードオフ関係から選択できない。そこで、Siチップ厚の薄化に伴うトレードオフを、新規裏面バッファ構造の採用、及び表面構造の改善(チャネル密度向上、ゲート容量の最適化)と合わせて行うことで改善した。これらの対策の詳細とその効果について、以下で述べる。

### 2.2 スwitching振動のメカニズムと対策

図2に、当社のテストモジュール及び条件にて従来のnバッファ構造で、Siチップ厚が厚いA構造と薄いB構造を

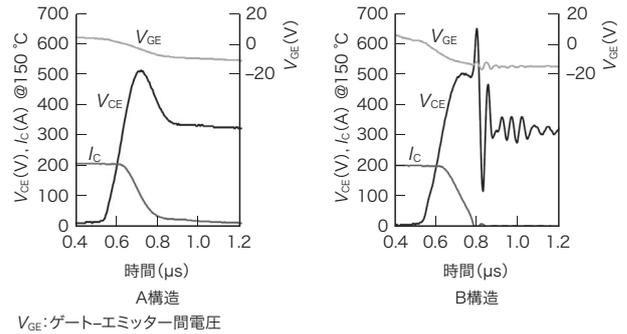


図2. Siチップ厚が異なる構造でのターンオフ波形の差異

Siチップ厚を薄くすることで $V_{CE(sat)}$ やスイッチング損失を低減できるが、スイッチング振動が背反して発生する。

Differences in turn-off switching waveforms of IGBTs with thick and thin Si structures

スイッチング評価した際の波形を示す。A構造はターンオフ時(コレクター電流 $I_C$ が遮断されるとき)にコレクター-エミッター間電圧( $V_{CE}$ )が振動することなく、緩やかにオフできているのに対して、B構造はターンオフ時に $V_{CE}$ の跳ね上がり(過電圧)が発生し、振動している。このスイッチング振動が、周辺機器やインバータ駆動回路の誤動作や、モーターの寿命短縮の原因になることから、振動を発生させない素子が求められる。

図3は、チップ内部の電界分布及び正孔密度分布がターンオフ時に時間( $t$ )とともに推移していく様子についての解析結果を示す。ターンオフ開始後の電圧上昇時( $t=T1$ )、ターンオフ中( $t=T2$ )、及び過電圧発生時( $t=T3$ )の各時点で内部解析すると、 $t=T3$ で裏面に空乏層が到達(ダイナミックパンチスルー)し、キャリアがなくなっていることが分かる。これは、空乏層が裏面n層に到達することで、キャリアが急峻(きゅうしゅん)に排出されて高 $dI_C/dt$ となったことで、デバイス内部の空乏層容量( $C$ )と外部の寄生インダクタンス( $L$ )で決まる共振が起こったことによる。すなわち、スイッチング中のデバイス内部の電界分布、及びキャリア密度が急峻に変化することが振動の要因である。

そこで、スイッチング振動の対策として、YG400B75Aでは、裏面にキャリアが残留するように、図1に示したような新規の裏面バッファ構造を採用した。図4は、開発したYG400B75Aの代表的なターンオフ波形である。裏面バッファ構造を最適化することで、Siチップ厚の薄い状態でターンオフ時のスイッチング振動が発生しないことを、当社のテストモジュールを用い、図中に記載した条件にて確認した。

### 2.3 裏面正孔注入量の最適化

新規裏面バッファ構造を適用すると、負荷短絡評価時

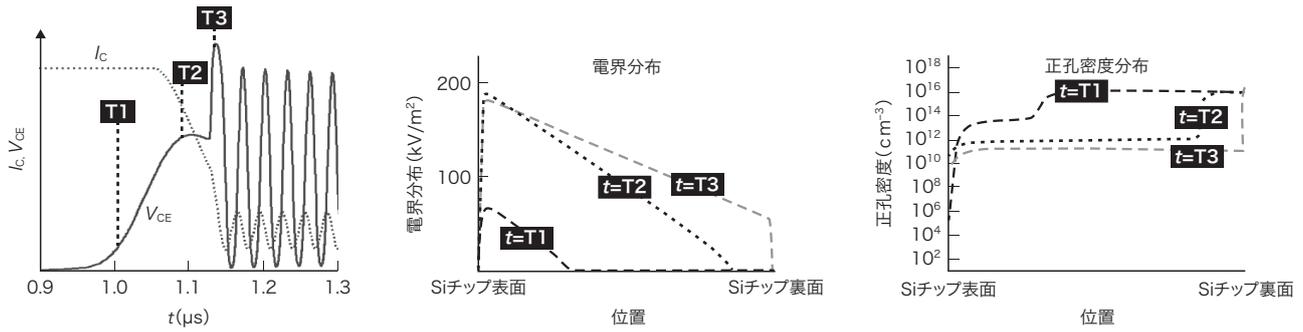


図3. ターンオフ時におけるチップ内部の電界分布及び正孔密度分布の解析結果

裏面に空乏層が到達することでキャリアがなくなり、振動が発生する。キャリアがターンオフ時に裏面に残留する設計が求められる。

Results of simulations of electric field and hole density distributions inside chip at time of turn-off

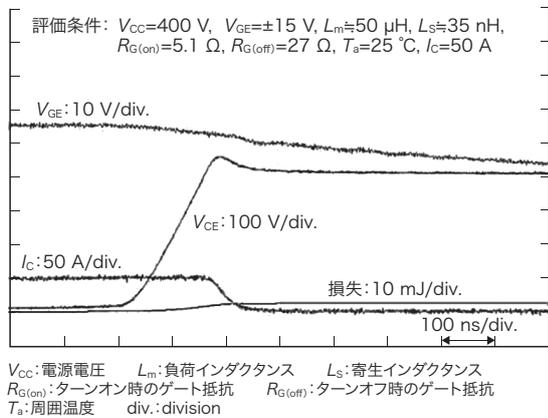


図4. 新規裏面バッファ構造を導入したYG400B75Aのターンオフ波形

新規の裏面バッファ構造を適用することで、スイッチング振動が発生しないことを確認した。

Turn-off switching waveforms of 750 V IGBT with new buffer structure

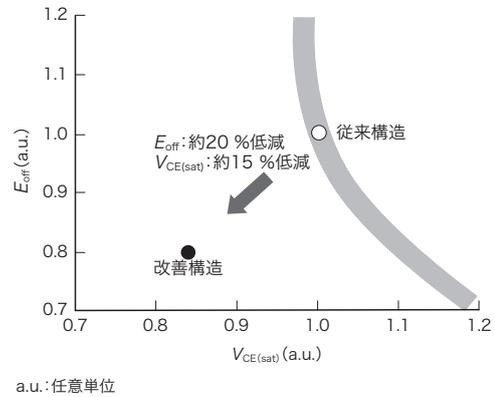


図5. 従来構造の $V_{CE(sat)}$ と $E_{off}$ のトレードオフ特性に対する改善構造の損失低減効果

YG400B75Aは、従来製品に比べて $V_{CE(sat)}$ が15%低減、 $E_{off}$ が20%低減した。

Comparison of trade-off between  $V_{CE(sat)}$  and  $E_{off}$  of IGBTs with conventional and new structures

にゲート波形が振動することが確認されており、これは裏面コレクター側の電界の上昇が発生要因であると分かっている<sup>(1)</sup>。そこで、前述した設計パラメーター③の裏面正孔注入量の最適化によってベース輸送効率を調整した。これにより、短絡ゲート振動の抑制、破壊耐量の確保、及びスイッチング振動の抑制の全てを達成した。

#### 2.4 YG400B75Aのトレードオフ特性

図5は、従来構造と改善構造の $V_{CE(sat)}$ と $E_{off}$ のトレードオフ特性比較である。2.2節及び2.3節に述べたように、改善構造では、設計パラメーター①のSiチップ厚の調整及び③の裏面正孔注入量の最適化を施し、更に、図1に示したように、②の表面構造の改善でチャンネル密度の向上、及びゲート容量の最適化を行った。改善構造を適用したYG400B75Aは、従来品に対して、 $V_{CE(sat)}$ 約15%、 $E_{off}$

約20%の低減を実現した。

### 3. 1,200 V 耐圧 RC-IGBT の損失低減

RC-IGBTは、一つのチップの中にIGBTとダイオードを形成しており(図6)、終端領域やドリフト層を共用できるため、チップサイズの縮小が期待される。一方、共通のドリフト層を持つことによるデメリットも存在する。IGBTとダイオードそれぞれが動作するときに相互作用し、特性が悪化する。特に、図6に示すように、ダイオード導通時、pアノード層からの正孔注入のほかに、IGBT領域のpベース層からも正孔注入が発生し、その注入電荷によって逆回復時の電流が増加し、スイッチング損失が増大してしまう。

これを解決するために、1,200 V 耐圧 RC-IGBTのIGBT側から、ダイオード動作時の電子の排出を促進させ、また

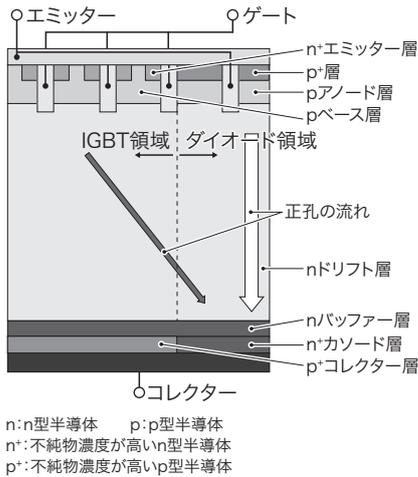


図6. RC-IGBTの断面図

終端領域やドリフト層の共用でチップサイズを縮小できる反面、ダイオード導通時にIGBT領域のpベース層からも正孔注入が発生して逆回復時の電流が増加し、スイッチング損失が増大する。

Cross-sectional structure of RC-IGBT

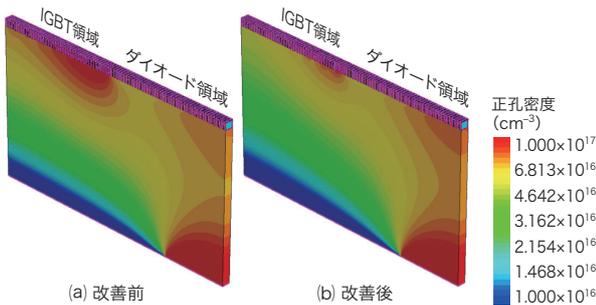


図7. ダイオード導通時の正孔密度分布のシミュレーション結果

改善後の構造は、IGBT領域の正孔密度が減少しており、逆回復時に排出するキャリア量が減少することから、 $I_{rr}$ の減少が期待できる。

Results of simulations of hole density distribution in diode conduction mode before and after structure improvement

正孔の注入を抑制させることで、IGBT特性である  $V_{CE(sat)}$  とスイッチング損失をほとんど損なうことなく、ダイオード特性である逆回復中に発生するピーク電流 ( $I_{rr}$ ) と、 $E_{rr}$  を大きく低減できた。図7に、IGBTとダイオードの境界近傍の、ダイオード導通時における、構造改善前後の正孔密度分布のシミュレーション結果を示す<sup>[2]</sup>。図中の色は正孔密度分布を示しており、暖色は濃度が高く、寒色は濃度が低いことを表す。改善後の構造では、IGBT領域の正孔密度が減少していることが分かり、逆回復時に排出するキャリア量が減少することから、 $I_{rr}$ の減少が期待できる。図8に、改善前後の誘導負荷のダブルパルス試験による逆回復波形の実測結果を示す。IGBT側の表面構造に改善を加えること

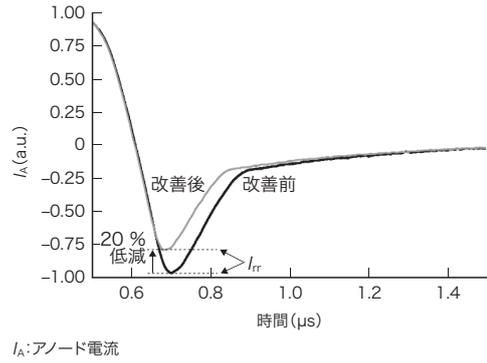


図8. 構造改善前後の逆回復波形の比較

逆回復波形から改善後の構造は、改善前に比べて  $I_{rr}$  が約20%改善したことが分かる。

Reverse recovery waveforms before and after structure improvement

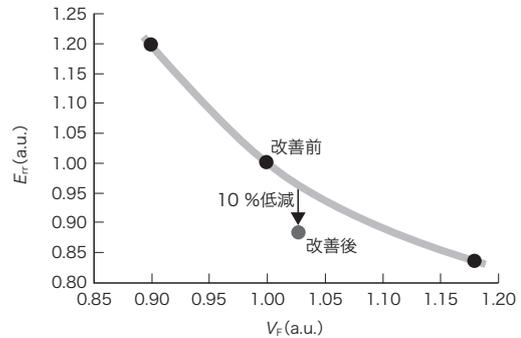


図9. 構造改善前後におけるダイオード領域の  $V_F$  と  $E_{rr}$  の関係の差異

従来構造の表面濃度変調による  $V_F$ - $E_{rr}$  のトレードオフ特性に比べて、改善構造は同一  $V_F$  における  $E_{rr}$  が約10%低減した。

Relationship between  $E_{rr}$  and diode on-voltage ( $V_F$ ) before and after structure improvement

表1. 構造改善前後におけるIGBT、ダイオード、インバーターの損失の差異

Comparison of switching loss of IGBT, diode, and inverter before and after structure improvement

	$V_{CE(sat)}$ *1	$E_{off}$	$V_F$ *2	$E_{rr}$	インバーター損失*3
構造改善後 (改善前を1.00とした相対値)	0.98	1.01	1.03	0.88	0.83

\*1:  $I_c=280$  A,  $V_{GE}=15$  V,  $T_j=150$  °Cの条件で評価  
\*2:  $I_c=280$  A,  $V_{GE}=15$  V,  $T_j=150$  °Cの条件で評価  
\*3:  $V_{CC}=800$  V,  $f_c=8$  kHz,  $I_{MOT}=200$  Arms,  $\cos \theta=0.85$ の条件で評価  
 $f_c$ : キャリア周波数  $I_{MOT}$ : モーター電流  
 $\cos \theta$ : 負荷力率  $T_j$ : ジャンクション温度

により、 $I_{rr}$  が約20%低減したことが分かる。図9に、改善前後のダイオードのオン電圧 ( $V_F$ ) と  $E_{rr}$  の関係を示す。改善前と改善後で、 $V_F$  は変わらないにもかかわらず、 $E_{rr}$  は約10%低減できた。表1に、改善後の構造におけるIGBTと

ダイオードの損失特性と、インバーター駆動時の損失を示す。IGBTの表面に改善を加えることで、IGBT特性をほぼ維持したまま $E_{rr}$ を低減でき、インバーター駆動時の損失を約17%低減できた。

#### 4. あとがき

自動車の電動化の流れは、今後も確実に進んでいくと予測されており、それに伴い、車載半導体の需要増大が見込まれる。今回、これに対応した750V耐圧IGBT、1,200V耐圧RC-IGBTの製品を開発し、損失低減による省電力化を実現した。

更なる特性改善、省電力化を目指したSiC（炭化ケイ素）製品開発の流れもあるが、BEV（バッテリー電気自動車）に比べて求められるモーター容量が小さいHEV（ハイブリッド自動車）やPHEV（プラグインハイブリッド自動車）ではSi製品が引き続き使用されると予測されている。今後も市場ニーズに対応した製品を開発することで、自動車業界の発展に貢献していく。

#### 文 献

(1) Kikuchi, T. et al. "Investigation of the mechanism of gate voltage oscillation in 1.2kV IGBT under short circuit condition". The 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD2018). Chicago, USA, 2018-05, IEEE Electron Device Society. 2018, p.503-507.

(2) Yoshikawa, D. et al. "The Reduction of Reverse Recovery Current in RC-IGBT by Controlling Hole Injection from IGBT Region with Partially Extended N-emitter". International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2024). Himeji, Japan, 2024-09, The Japan Society of Applied Physics. 2024, p.191-192.



松岡 裕磨 MATSUOKA Yuma  
東芝デバイス&ストレージ(株)  
半導体事業部 半導体応用技術センター  
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



林 才人 HAYASHI Masato  
東芝デバイス&ストレージ(株)  
半導体事業部 ハイパワーデバイス技術部  
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



吉川 大輝 YOSHIKAWA Daiiki  
東芝デバイス&ストレージ(株)  
半導体事業部 先端半導体デバイス開発センター  
電気学会会員  
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.