

## 逆回復特性を大幅に改善した 150 V 及び 650 V 耐圧パワー MOSFET

150 V and 650 V Power MOSFETs with Substantially Improved Reverse Recovery Characteristics

加賀野井 啓介 KAGANOI Keisuke 鈴木 誠和子 SUZUKI Miwako

金子 敦司 KANEKO Atsushi 嶋村 伸也 SHIMAMURA Shinya

データ通信量及び記憶容量は増加し続け、データセンターや通信基地局などは最も消費電力が増加しているアプリケーションの一つとなっている。カーボンニュートラルの実現に向け、電源の低消費電力化が喫緊の課題であり、パワーデバイスの消費電力低減も求められている。

東芝デバイス&ストレージ(株)は、パワー MOSFET (金属酸化膜半導体型電界効果トランジスター)の損失低減に取り組んでいる。今回、従来のオン抵抗 ( $R_{on}$ ) やゲート電荷量の特性向上だけでなく、ライフタイム制御プロセスの導入による最適化で逆回復特性の大幅な改善を図った、U-MOS X-H プロセスを用いた 150 V 耐圧、及び DT MOS VI プロセスを用いた 650 V 耐圧のパワー MOSFET を開発した。データセンター・通信基地局用電源の高効率化に寄与する。

Data centers and communication base stations have recently become one of the largest consumers of electric power as a result of the ongoing increases in the volume of data communication and storage capacity. Reduction of the power consumption of power devices in the power supplies of such facilities is therefore an issue of vital importance in the context of achieving carbon neutrality.

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation is engaged in activities to realize loss reduction in power metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) products. Reduction of the reverse recovery loss is essential in order to reduce the total loss of power MOSFETs. We have now released a 150 V power MOSFET fabricated using the U-MOS X-H process and a 650 V power MOSFET fabricated using the DT MOS VI process. In addition to improvements in the conventional methods for achieving smaller on-resistance ( $R_{on}$ ) and smaller gate charge, these devices provide a substantial improvement in reverse recovery characteristics, achieved by the optimization of lifetime control techniques, in order to enhance the efficiency of power supplies used in data centers and communication base stations.

### 1. まえがき

5G (第5世代移動通信システム)の普及などによる通信量の増大に伴い、データセンターや通信基地局に必要な電力が飛躍的に増えて、電源の需要も高まっている。カーボンニュートラルの実現に向けて、消費電力削減のため電源の高効率化は喫緊の課題であり、パワーデバイスの損失低減も求められている。

図1に、データセンター及び通信基地局用の電源の構成例を示す。AC (交流) 入力後は、AC-DC (直流) 電源や、絶縁型 DC-DC 電源、非絶縁型 DC-DC 電源などのパワーデバイスが連なり、必要な電圧を出力する。各パワーデバイスに MOSFET が使われており、この MOSFET の動作時に、導通、スイッチング、ドライブ、及び逆回復の損失が生じる。

これらの損失を減らすために、従来は MOSFET の  $R_{on}$  やゲート入力電荷量 ( $Q_g$ ) を低減してきた。現在は、 $R_{on}$  や  $Q_g$  の低減が進み、導通やスイッチングのときの損失が飛躍的に改善されたため、損失全体に占める逆回復損失の割合が

増加した。

図2を用いて、逆回復損失を説明する。図2(a)は、MOSFET の内蔵ダイオードに、順方向に電流が流れている状態を示す。ソースに接続された p 層からは正孔が、ドレインに接続された不純物濃度の高い n 型半導体層 ( $n^+$ ) から電子が注入され、不純物濃度の低い n 型半導体層 ( $n^-$ ) には過剰なキャリアが蓄積される。この状態から、急峻(きゅうしゅん)にバイアス方向を反転させたときの挙動を、図2(b)に示す。蓄積したキャリアが排出又は再結合により消滅するまでの時間 ( $t_{rr}$ : 逆回復時間) に、内蔵ダイオードに対して逆方向の電流 ( $I_{DR}$ ) を流し続ける。この電荷量による損失が、逆回復損失である。

商用電源をデータセンターや通信基地局向けの電圧に変換する 150 V 及び 650 V 耐圧のパワーデバイスの逆回復特性の改善は、パワーデバイスの損失を低減し、電源の高効率化につながる。そこで、東芝デバイス&ストレージ(株)は、逆回復損失を大幅に低減した、150 V 耐圧及び 650 V 耐圧の MOSFET を開発した。

ここでは、ライフタイム制御プロセスの適用による、逆回

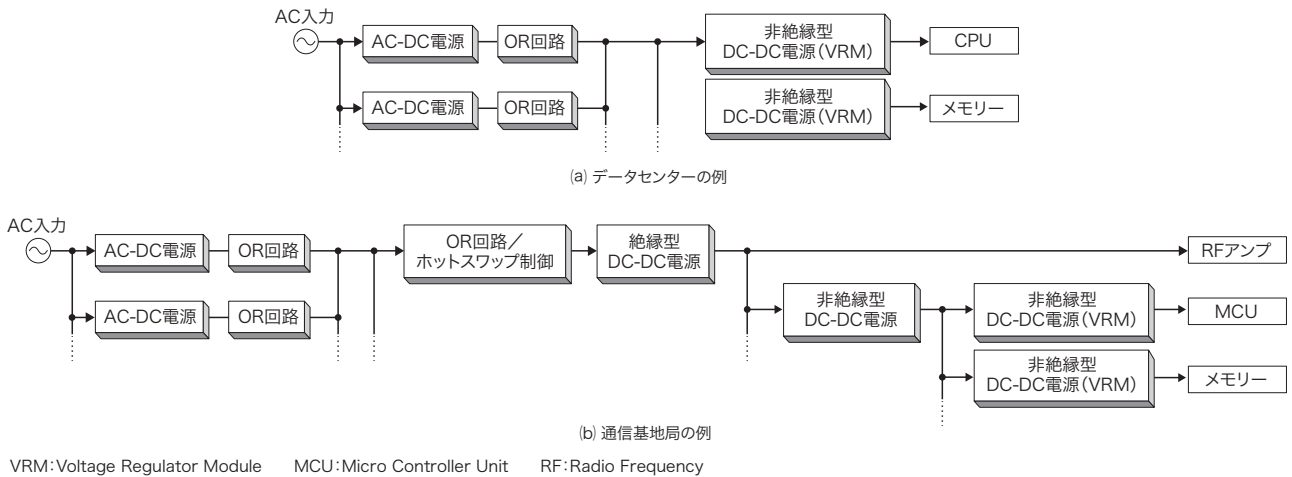
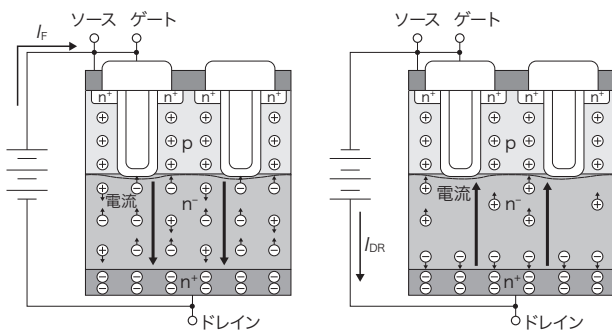


図1. 産業用電源の構成例

電源を構成する各部品に、MOSFETが使用される。

Examples of configuration of industrial power supplies



⊕: 正孔  
⊖: 電子  
 $I_F$ : ダイオード順方向電流

図2. 内蔵ダイオードの正孔と電子の動き

内蔵ダイオードの順方向から逆バイアスに転流すると、蓄積したキャリアが排出、あるいは消滅するまで、内蔵ダイオードに対して逆方向の $I_{DR}$ を $t_{rr}$ の間、流し続けるため、損失が発生する。

Movement of holes and electrons in body diode of MOSFET

復特性の改善について述べる。

## 2. 逆回復特性の改善

当社は、低 $R_{on}$ 高速スイッチング化が可能なMOSFETとして、トレンチフィールドプレート構造の150V耐圧U-MOS X-Hシリーズ製品、及びスーパージャンクション構造の650V耐圧DTMOS VIシリーズ製品を、提供している。

逆回復特性の改善には、内蔵ダイオードを高速回復動作させ、 $t_{rr}$ を短縮して $Q_{rr}$ を低減することが重要である。図3に $t_{rr}$ と $Q_{rr}$ の関係を示す。

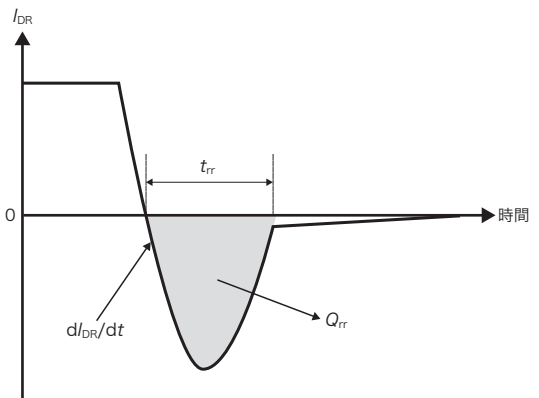


図3.  $t_{rr}$ と $Q_{rr}$ の関係

$t_{rr}$ が短く、 $Q_{rr}$ が少ない方が、スイッチング損失は小さい。

Relationship between reverse recovery time ( $t_{rr}$ ) and amount of reverse recovery charge ( $Q_{rr}$ )

$t_{rr}$ が短く、内蔵ダイオードオフ時の逆方向電流が少ない、すなわち $Q_{rr}$ が少ない方が、逆回復損失が小さい。

そこで、図4に示す従来構造の低 $R_{on}$ ・高速スイッチング特性を維持したまま、正孔が電子と再結合して消滅する確率を高めるライフタイム制御プロセスを導入して最適化することで、内蔵ダイオードの逆回復特性の改善を図った。ライフタイム制御は、重金属拡散や電子線照射による格子欠陥で半導体中に深い準位を導入して、電子とホールを再結合させる再結合中心として機能させるものである。ライフタイム制御の手法として、ドレイン・ソース間のリーク電流が少ないPt(白金)拡散方式を採用した。

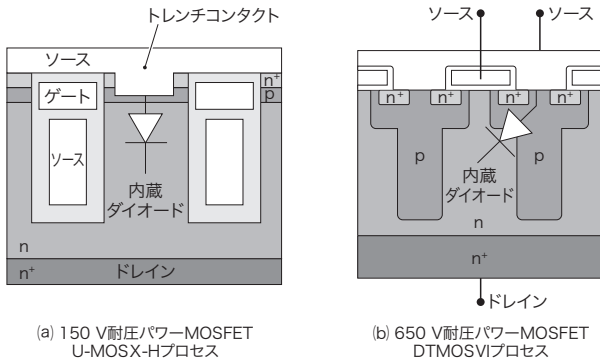


図4. MOSFETの内蔵ダイオード

フィールドプレート構造とスーパージャンクション構造のそれぞれにライフタイム制御プロセスを適用して、逆回復特性を最適化する。

Intrinsic body diodes in 150 V and 650 V power MOSFETs

### 3. 150 V 耐圧 MOSFET の逆回復特性改善

表1に、従来のU-MOSX-Hプロセス製品と、ライフタイム制御プロセスを適用したものの特性比較を示す。

ライフタイム制御プロセスの導入により、従来品と同等の $R_{on}$ 及び $Q_g$ を維持しながら、 $t_{rr}$ を約44%、 $Q_{rr}$ を約74%

表1. 150 V 耐圧 U-MOS X-H 従来プロセス品との  $t_{rr}$  と  $Q_{rr}$  の比較

Comparison of  $t_{rr}$  and  $Q_{rr}$  of conventional and newly developed 150 V power MOSFETs

項目	$t_{rr}$ (ns)	$Q_{rr}$ (nC)
ライフタイム制御プロセスあり	40	34
ライフタイム制御プロセスなし	72	130
低減率	44 %	74 %

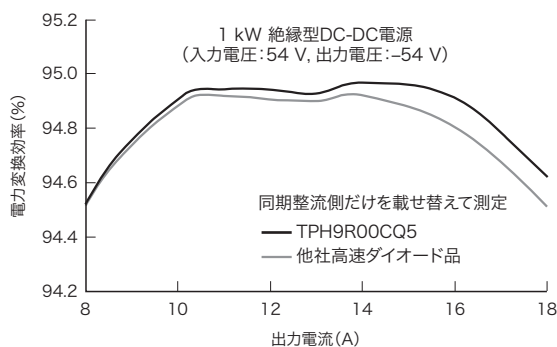


図5. U-MOS X-H 150 V 耐圧パワー MOSFET を使用した DC-DC 電源の電力変換効率

他社従来品より、電力変換効率が全出力電流範囲で0.05～0.1%以上高く、最大電力変換効率約94.6%を達成した。

Result of measurement of power conversion efficiency of DC-DC power supply using newly developed 150 V power MOSFET

低減 (測定条件:  $-dI_{DR}/dt = 100 \text{ A}/\mu\text{s}$ ) した。

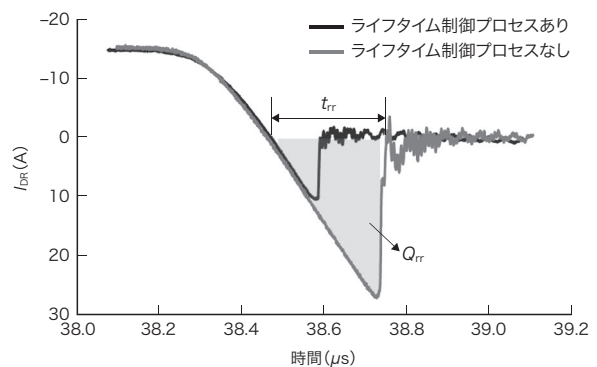
図5に1 kWの絶縁型DC-DC電源(入力電圧: 54 V, 出力電圧: -54 V)の、同期整流側における効率比較結果を示す。ライフタイム制御プロセスを適用したものを、一般的で代表的な他社高速ダイオード品(ライフタイム制御プロセス適用)と同じ条件で比較測定したところ、電力変換効率が全出力電流範囲で0.05～0.1%以上良好であることを確認した。また、最大で電力変換効率約94.6%を達成した。

このように、U-MOSX-H 150 V 耐圧プロセスへのライフタイム制御プロセスの適用によって、優れた $R_{on}$ 及び $Q_g$ 特性を保持しながら、内蔵ダイオードの逆回復特性の改善と、電力変換効率向上を確認した。

### 4. 650 V 耐圧 MOSFET の逆回復特性改善

図6に、従来のDTMOSVIプロセス製品と、ライフタイム制御プロセスを適用したものの波形比較を示す。従来のDTMOSVIプロセス品と比較して、 $t_{rr}$ が約65%、 $Q_{rr}$ が約88%低減(測定条件:  $dI_{DR}/dt = -100 \text{ A}/\mu\text{s}$ )した。

図7に2 kW AC-DC電源のフルブリッジ整流回路の効率を同じ条件で測定した比較結果を示す。ライフタイム制御プロセスを適用したものは、他社高速ダイオードと比較して、電力変換効率が全出力電力範囲で0.15%以上向上した。最大で、電力変換効率約92.5%を達成した。



項目	$t_{rr}$ (ns)	$Q_{rr}$ (nC)
ライフタイム制御プロセスあり	115	0.6
ライフタイム制御プロセスなし	330	5.1
低減率	65 %	88 %

図6. DTMOS VI 650 V 耐圧パワー MOSFET の従来品と開発品の  $t_{rr}$  と  $Q_{rr}$  の比較

従来のDTMOSVIプロセス品と比較して、 $t_{rr}$ が約65%、 $Q_{rr}$ が約88%低減した。

Comparison of  $t_{rr}$  and  $Q_{rr}$  of conventional and newly developed 650 V power MOSFETs

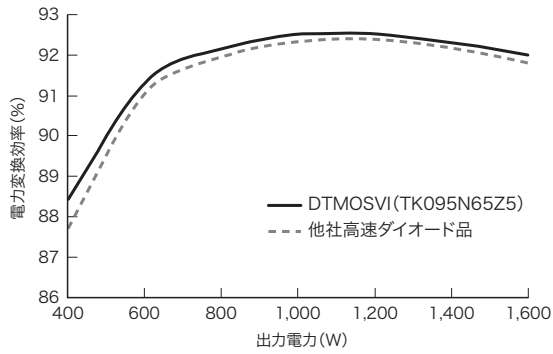


図7. 650 V耐圧パワー MOSFETを使用したAC-DC 電源の電力変換効率

DTMOSVI (TK095N65Z5) は、他社従来品と比較して電力変換効率が全出力電力範囲で0.15 %以上向上し、最大電力変換効率 約92.5 %を達成した。

Result of measurement of power conversion efficiency of AC-DC power supply using newly developed 650 V power MOSFET

このように、650 V耐圧DTMOSVIプロセスへのライフタイム制御プロセスの適用によって、優れた $R_{on}$ 及び $Q_g$ 特性を保持しながら、内蔵ダイオードの逆回復特性の改善と、電力変換効率の向上を確認した。

### 5. あとがき

ライフタイム制御プロセスの適用により、逆回復特性を飛躍的に向上させることで、データセンターや基地局向けの産業用電源の高効率化に貢献する、150 V耐圧及び650 V耐圧のパワー MOSFETを開発した。

今後も、更なる高効率化を実施して消費電力の低減要求に応えるパワーデバイス製品を提供することで、カーボンニュートラルの実現に貢献していく。



加賀野井 啓介 KAGANOI Keisuke  
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.



鈴木 誠和子 SUZUKI Miwako  
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.



金子 敦司 KANEKO Atsushi  
東芝デバイス&ストレージ (株)  
半導体事業部 パワー半導体開発技術部  
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



嶋村 伸也 SHIMAMURA Shinya  
東芝デバイス&ストレージ (株)  
半導体事業部 パワー半導体開発技術部  
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.