

# 低ロスと高いダイナミックな耐久性を兼ね備えた次世代パワー半導体技術

中村勝光\*  
Katsumi Nakamura  
鈴木健司\*  
Kenji Suzuki  
西 康一\*  
Koichi Nishi

金田和徳†  
Kazunori Kanada  
川瀬祐介\*  
Yusuke Kawase

Next Generation Power Semiconductor Technology with Low Loss and High Dynamic Ruggedness

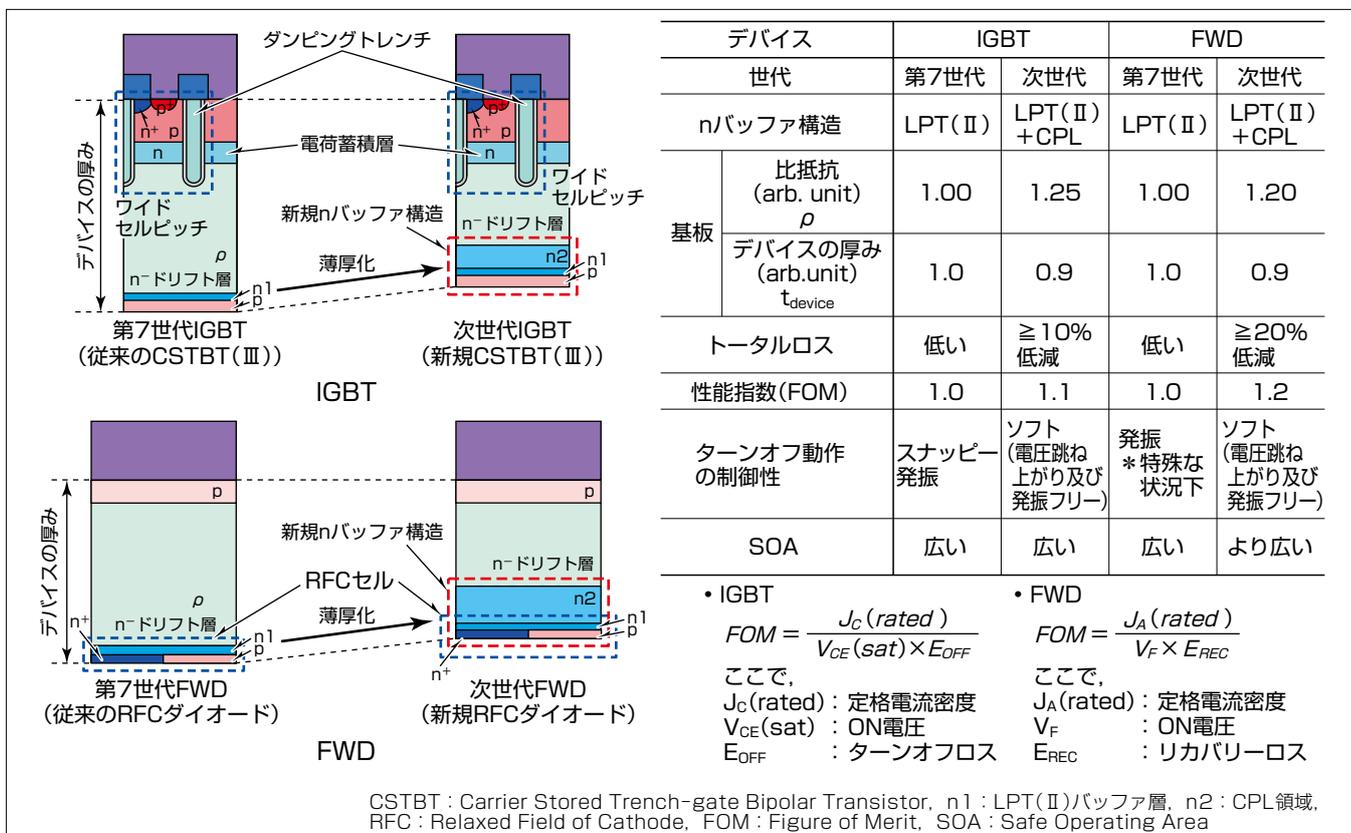
## 要 旨

21世紀に入り、世界の人口増加による将来へのエネルギー、食料や水等の資源不足や地球温暖化という二つの地球規模での問題に対し、経済発展と地球環境の調和の取れた次世代社会構築という大きな課題が突きつけられている。この目指すべき社会の実現には、エネルギー効率を上げる技術の開発が急務である。エネルギー変換デバイスであるパワー半導体は、パワーエレクトロニクスの低消費エネルギー化や高効率化を担う中核となる構成要素であり、次世代社会で求められる高エネルギー効率化に向け重要な役割を果たす技術の一つである。

期待を集めるパワー半導体のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)とFWD(Free Wheeling Diode)のON電圧とスイッチングロスの低減には、デバイス厚みをシュリ

ンクする方法が最も効果的である。一方で、最新デバイスには、低ロス化、ターンオフ動作の制御性、高いダイナミックな耐久性や広い動作温度範囲という高性能化と、高コストパフォーマンスというコスト面の継続的な要求がある。よって、パワー半導体の持続的な発展には、安価で大口径(≥200mm)なSi(シリコン)ウェーハを用いてのブレイクスルーとなる技術が必要である。

今回、大口径なウェーハの製造技術にマッチングしながら、IGBTとFWDの低ロス化と高いダイナミックな耐久性を実現する新規nバッファ技術を開発した。提案する技術は、今後の次世代パワー半導体のコア技術であり、Si系パワー半導体の更なる飛躍と発展に寄与し、周囲の期待に応える技術である。



## 次世代パワー半導体技術である新規nバッファ構造及びIGBTとFWDの性能面の特徴

新規nバッファ構造は、LPT(Light Punch-Through)(II)バッファ層とCPL(Controlling Carrier-Plasma Layer)領域からなる構造である。LPT(II)バッファ層は、パワー半導体の基本性能である高温下を含めた耐圧保持能力面に寄与し、CPL領域はダイナミック動作時のデバイス内部状態の制御による耐久性向上に寄与する。新規nバッファ構造は、大口径なSiウェーハの製造方法にマッチングした次世代パワー半導体のコア技術である。

## 1. ま え が き

パワー半導体は、厳しい使用環境下で使われるパワーエレクトロニクスの基本性能や信頼性を担う重要な構成要素である。パワー半導体の縦構造を構成するnバッファ層は、パワー半導体のトータル性能向上や性能間のバランス化の観点から、キーテクノロジーである。一方、パワー半導体のコストパフォーマンス向上の一方向性として、TWP (Thin Wafer Process) 技術と組み合わせたSiウエーハの大口径化(≥200mm)がある。つまり、パワー半導体の持続的な発展には、大口径なSiウエーハを用い、TWP技術とマッチングするnバッファ技術の構築が必要である。

本稿では、最新のパワー半導体の抱える上記課題に対し、LPT(II)バッファ層とCPL領域からなる新規nバッファ構造がその解決策であることを示す。

## 2. 新規nバッファ構造

### 2.1 構造

図1(a-2)と図1(b-2)には、それぞれ今回提案するnバッファ構造を持つIGBTとFWDのデバイス構造を示す。表1は、新規nバッファ構造を構成するLPT(II)バッファ層(n1)とCPL領域(n2)の構造パラメータを示す。ここで、従来のnバッファ構造は、LPT(II)バッファ層だけの構造である(図1(a-1)と図1(b-1))。

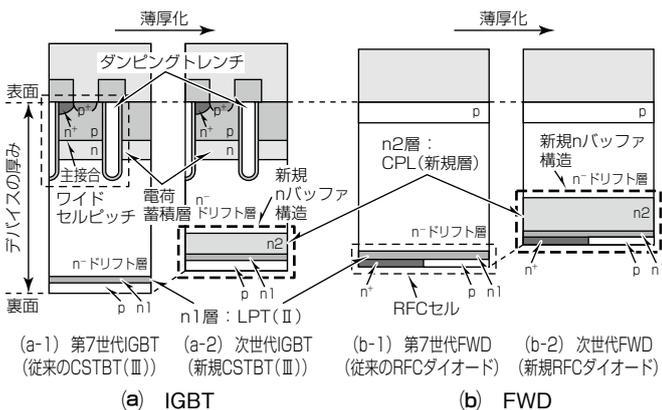


図1. 1,200V IGBTとFWDのデバイス構造模式図

表1. 新規nバッファ構造の構造パラメータ

バッファ構造	LPT(II) (n1)	CPL (n2)
ドーピング濃度及びプロファイル	低濃度で急峻なプロファイル	n1層より低濃度で緩やかなプロファイル
深さ	浅い	深い
キャリアライフタイム	長い	中程度 (トラップが存在する)
働き	・裏面側への空乏層伸びを止める	裏面側 ・キャリアプラズマ層制御 ・電界緩和

新規nバッファ層は、次の役割を担う二つの構成要素を組み合わせた構造である。

#### (1) LPT(II)バッファ層<sup>(1)</sup>

- ①主接合への逆バイアス条件下の動作時に裏面(コレクタカソード)側へ伸びる電界強度だけを止める。
- ②十分な耐圧保持能力と高温(≥448K)での熱暴走を抑制して高温動作を実現する。

#### (2) CPL領域<sup>(2)</sup>

- ①ダイナミック動作時に裏面側に蓄積したキャリアプラズマ層を制御して電界強度の勾配を緩やかにし、寄生pnpトランジスタの増幅率制御やキャリア再結合を促進する。

このように二つの構成要素を活用するのは、デバイス性能面だけでなく、製造工程での各構成要素形成時のスループット向上を実現するためでもある。CPL領域は、イオン種として荷電粒子を用い、高エネルギーイオン注入とTWP技術にマッチングする低温アニーリング技術を用いて形成する。

図2は、LPT(II)バッファ層とCPL領域それぞれに関するPL(PhotoLuminescence)法で解析したスペクトル結果である。CPL領域は、LPT(II)バッファ層に比べて二つの特徴的なピークの準位が存在する。この二つの準位は、TWP技術によって制御することで、IGBTとFWDの裏面側のキャリアプラズマ層制御に寄与し、高いダイナミックな耐久性に優れたデバイス性能を実現する。

### 2.2 ダイナミック動作への寄与

図3は、CSTBT(III)の短絡状態での電界強度分布のシミュレーション結果である。図3から、従来構造では主接合の電界強度上昇による温度上昇を招き、短絡耐量が低下する可能性がある。CPL領域を持つIGBTでは、短絡中の裏面側キャリアプラズマ層制御によって裏面側へ空乏層が伸び、バランスの取れた電界強度分布を実現し、従来構造よりも短絡耐量が向上することが見込める。

図4は、RFCダイオードのリカバリー動作終焉(しゅうえん)時のデバイス内部状態のシミュレーション結果である。図4から、従来のRFCダイオードに比べてCPL領域を持つ新規RFCダイオードは、カソード側に残留キャリアプラズマ層が存在することでカソード側の電界強度を緩

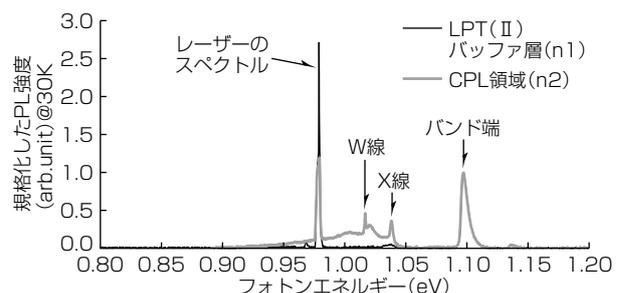


図2. 新規nバッファ層のPLスペクトル

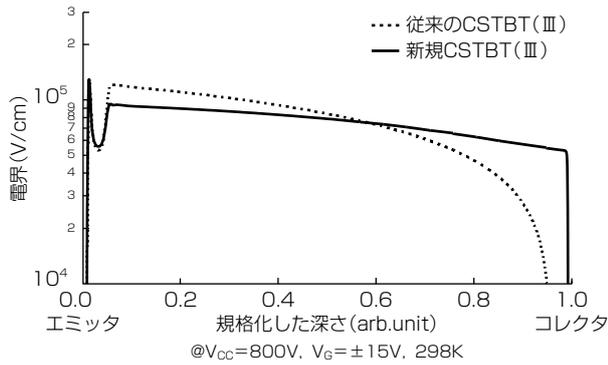


図3. シミュレーションによる短絡状態でのCSTBT(III)の縦方向の電界強度分布

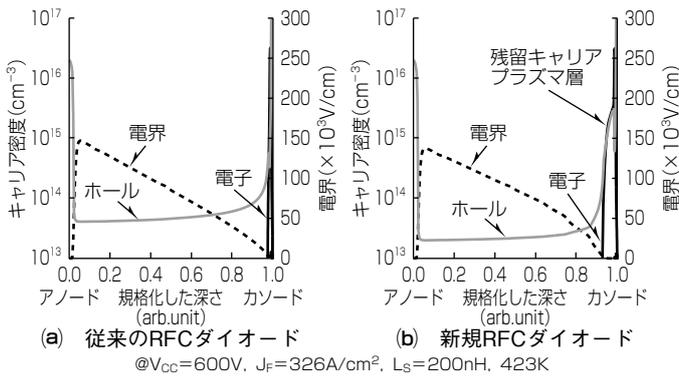


図4. シミュレーションによるリカバリー動作終了時のRFCダイオード内部状態

和させる効果がある。この効果は、後述するリカバリー動作後半での電圧跳ね上がり挙動(スナップオフ)を抑制し、制御性の良いスイッチング特性の実現が見込める。

### 3. 新規nバッファ構造の効果

#### 3.1 1,200V IGBTの性能<sup>(3)</sup>

図5は、1,200V CSTBT(III)の短絡波形を示す。図6は、短絡時の最大遮断エネルギー密度( $E_{sc}$ )とデバイスの厚み( $t_{device}$ )との関係のnバッファ構造依存性を示す。図5及び図6から、新規IGBTは、従来構造よりもSCSOA(Short Circuit Safe Operating Area)が向上し、十分なSCSOAを保証しながら、デバイスの厚みのシュリンク化が可能である。

図7は、1,200V CSTBT(III)のターンオフ波形のnバッファ構造依存性を示す。新規nバッファ構造を持つIGBTは、ターンオフ動作後半にコレクタ側に残留キャリアプラズマ層が存在する。その結果、新規IGBTでは、ターンオフ動作時のコレクタ側電界強度を緩和し、従来のIGBTのようなスナップオフ及びその後の発振を抑制し、優れたターンオフ動作を示す。よって、新規IGBTは従来のIGBTに比べ、幅広いアプリケーションに適用可能であることが分かる。

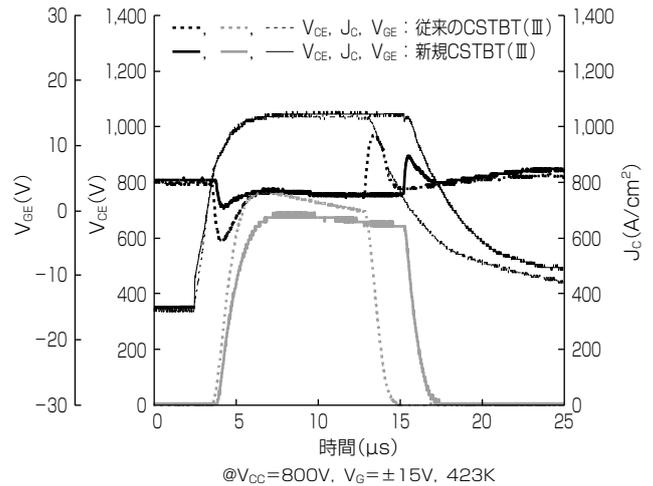


図5. 1,200V CSTBT(III)での短絡波形

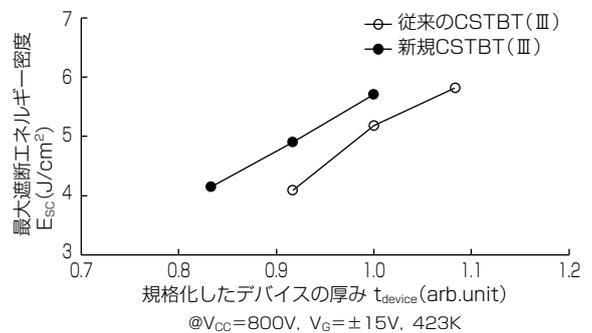


図6. 種々の1,200V CSTBT(III)の $E_{sc}$ と $t_{device}$ の関係

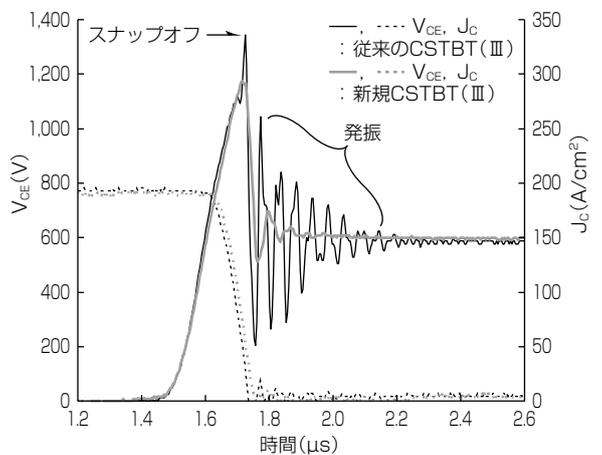
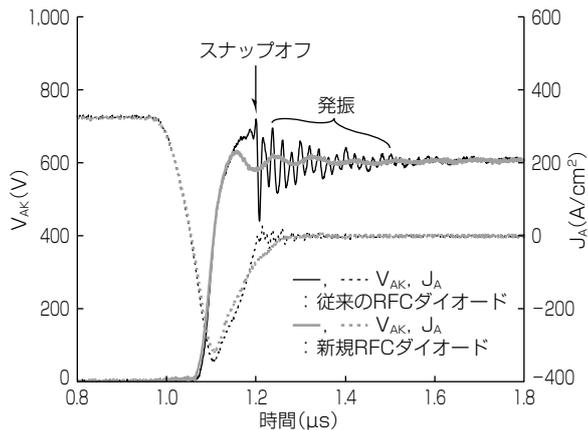


図7. 種々の1,200V CSTBT(III)でのターンオフ波形

#### 3.2 1,200V FWDの性能<sup>(2)</sup>

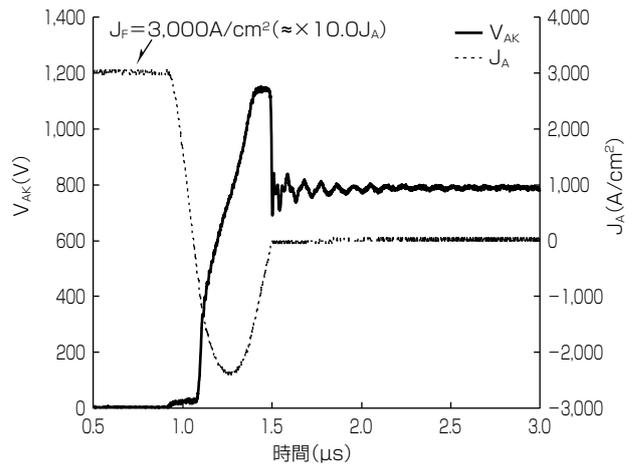
図8は、1,200V RFCダイオードのリカバリー波形のnバッファ構造依存性を示す。新規nバッファ構造を持つRFCダイオードは、CPL領域の働きによって、リカバリー動作終了時のスナップオフ及びその後の発振現象を抑制し、ソフトリカバリーの挙動を示す。

図9は、1,200V RFCダイオードのスナッピーリカバリー動作に着目したスイッチング条件下でのリカバリー



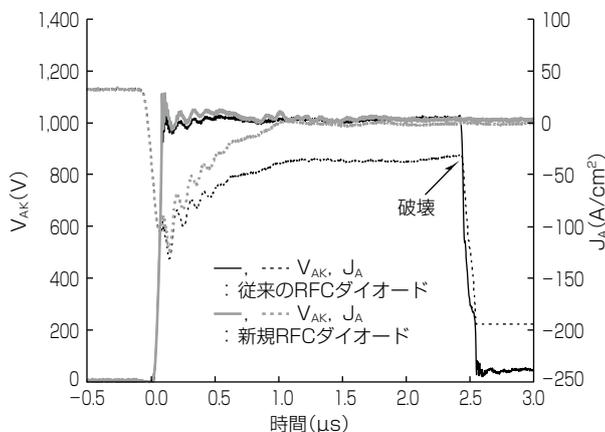
@V<sub>CC</sub>=600V, J<sub>F</sub>=326A/cm<sup>2</sup>, dj/dt=6,200A/cm<sup>2</sup>μs, L<sub>S</sub>=200nH, 298K

図8. RFCダイオードでのリカバリー波形



@V<sub>CC</sub>=800V, J<sub>F</sub>=3,000A/cm<sup>2</sup>(×10.0J<sub>A</sub>(rated)), dj/dt=27,000A/cm<sup>2</sup>μs, L<sub>S</sub>=200nH, 473K

図10. 新規RFCダイオードのターンオフ遮断能力



@V<sub>CC</sub>=1,000V, J<sub>F</sub>=32.6A/cm<sup>2</sup>(×0.1J<sub>A</sub>(rated)), dj/dt=1,200A/cm<sup>2</sup>μs, L<sub>S</sub>=2.0μH, 253K

図9. RFCダイオードでのスナッピーリカバリー波形

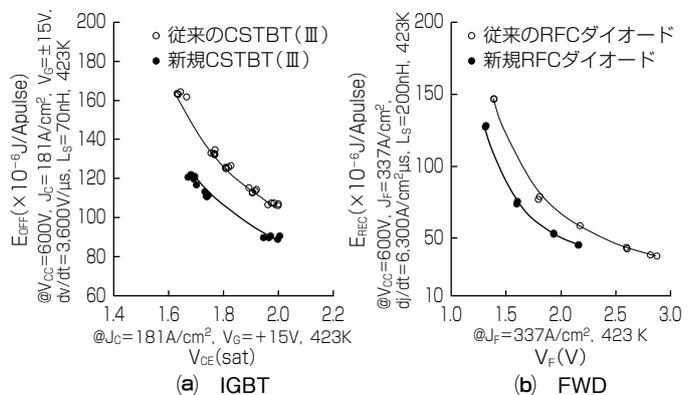


図11. 1,200V CSTBT(Ⅲ)とRFCダイオードのON電圧とスイッチングロストレードオフ特性

## 4. むすび

LPT(Ⅱ)バッファ構造に代わるLPT(Ⅱ)層とCPL領域からなる新規nバッファ構造を開発した。提案するnバッファ構造では、ダイナミック動作時の制御性、耐久性向上や熱的安定性を兼ね備えながら、デバイスの厚みのシュリンクによる低トータルロス性能を実現する結果が得られた。

新規nバッファ技術は、IGBT, FWDの性能向上と大口径化(≥200mm)するSiウェーハの製造技術にマッチングすることから、Si系パワー半導体の更なる飛躍と持続的な技術開発を支える有効なコア技術である。

## 参考文献

- (1) Nakamura, K., et al.: The Second State of a Thin Wafer IGBT — Low Loss 1200V LPT-CSTBT™ with Backside Doping Optimization Process —, Proc. of ISPSD, 133~136 (2006)
- (2) Nakamura, K., et al.: Advanced RFC diode utilizing a Novel Vertical Structure for Softness and High Dynamic Ruggedness, Proc. of ISPSD, 117~120 (2017)
- (3) Suzuki, K., et al.: N-buffer Design Optimization for Short Circuit SOA Ruggedness in 1200V class IGBT, Proc. of ISPSD, 128~131 (2018)
- (4) Nakamura, K., et al.: Advanced Si Power Semiconductor with High Dynamic Ruggedness utilizing Novel Vertical Structure, Proc. of JSAP Spring Meeting, 10000001-135 (2019)

波形である。デバイスの厚みがシュリンクしている新規RFCダイオードは、CPL領域でのキャリア再結合促進の効果によって、巨大なテール電流を抑制しながら遮断可能である。図10には、新規RFCダイオードの厳しいリカバリー動作時の遮断能力を示す。図10から、新規RFCダイオードは、473Kと高温下でも3,000A/cm<sup>2</sup>(×10J<sub>A</sub>(rated))以上の大電流密度を遮断可能であり、図2に示すようなCPL領域には特有のトラップが存在するものの、熱的に安定した動作を示すことが分かる。図9及び図10から、新規RFCダイオードは、SOA保証しながら広い動作温度範囲を持つダイオードである。

## 3.3 ロス性能<sup>(4)</sup>

図11は、1,200V CSTBT(Ⅲ)とRFCダイオードそれぞれのON電圧とターンオフロスのトレードオフ特性である。新規nバッファ構造を採用したCSTBT(Ⅲ)とRFCダイオードは、ダイナミックな制御性や耐久性を向上させながら、デバイス厚みのシュリンク化によって、従来比10%以上の低トータルロス性能を実現する。