

# 低ノイズ FRD BlueFRD1 の開発

## Development of BlueFRD1 for Low Noise FRD

神林 佑哉\*  
Yuya Kambayashi

**概要** 効率的な電力活用が求められる昨今のパワーデバイス市場では、幅広い用途で使用される高速リカバリダイオード (FRD) によるエネルギー損失削減は不可欠である。また、汎用的なアプリケーションとして用いるためには低ノイズ性も重要である。当社では、新構造により低ノイズで  $V_F$  スイッチングオフ特性の優れた新しいプラットフォームの FRD である BlueFRD1 を開発した。

### 1. まえがき

世界の電力消費量は、産業の発展で今後ますます増加していく。持続可能な世界の実現に向けて、白物家電、電気自動車、産業機器といった様々な用途で使用されているパワー半導体デバイスは、製品の小型化、高効率化が求められる。その中でも高速リカバリダイオード (FRD) は高周波整流器、PFC、DC/DC コンバータ、インバータ、スイッチング電源など広く使用されており、電力の有効活用への役割は大きい。

FRD はスイッチング動作時における逆回復時間が高速で、スイッチングオフ時のエネルギー損失が小さくなるのが特徴である。しかしながらスイッチング動作時間が短いとリングングによるノイズが発生しやすい。このノイズは、周辺の回路や機器へも電磁干渉を引き起こす可能性がある。したがってリングングが顕著に発生する場合は、汎用的なアプリケーションとしての実用性が低くなる。

本稿では低  $V_F$  かつスイッチング動作時のエネルギー損失を小さくしながら、リカバリ動作時における低ノイズ化を両立した FRD を開発したので、報告する。

### 2. BlueFRD1 の特徴

#### 2.1. BlueFRD1 とは

今回当社が開発した BlueFRD1 とは、当社従来の FRD よりも  $V_F$  とスイッチングオフ損失 ( $= Q_{rr}$ ) のトレー

ドオフ特性、かつスイッチングオフ時のリングング発生を改善した新しいプロセスプラットフォームとなる新世代の FRD である。

#### 2.2. BlueFRD1 の特徴

当社従来の FRD と本開発における BlueFRD1 の構造の模式図を表したものが図 1 である。

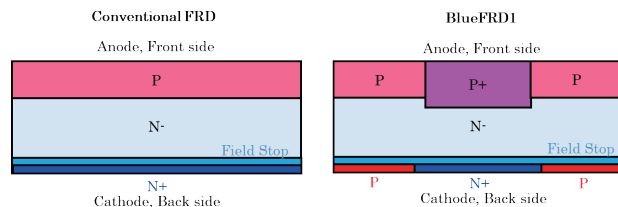


図 1 当社従来品と開発品の FRD 構造

従来構造は基本的な縦型構造のダイオードで、N-層の基板に対して表面アノード、裏面カソード、Field Stop 層で構成される。一般的に FRD のスイッチングオフ時のエネルギー損失を改善するには N-層の薄厚化が有効である。しかし、N-層を単純に薄厚化することはスイッチングオフ動作時に未空乏領域が少なくなることを意味する。したがって、急激なキャリアの枯渇が起きやすく、ハードリカバリによりノイズが発生する懸念がある。この問題を解決する方法が、カソードに P 層を形成することである。カソードに P 層が存在することでスイッチングオフ動作中にホールが供給され、キャリアの枯渇を軽減し、ハードリカバリを防ぐ。つまり、N-層の薄厚化とカソード P 層の形成により、低損失かつ、ソフトリカ

\* 技術開発本部 プロセス技術統括部  
先行パワーデバイス開発部 Si デバイス開発課

バリの両立が可能となる。

ただし、カソードにP層を形成すると二次降伏による耐圧劣化が起きやすい。これはブレイクダウン時にカソードP層からホールが注入される事で伝導度変調が発生し、局所的に抵抗値が低下し、電流集中で破壊に至るからである。本開発におけるBlueFRD1は表面アクティブ領域に深いアノードP層(Deep P)を形成し、アノード拡散層で一番深いDeep P層をブレイクポイントにすることを狙いとする。このDeep P層をアクティブエリアに複数設けることで、ブレイクダウンポイントを分散させ、電流の局所的な集中による破壊の発生を抑制する。図2は基本的なダイオード構造とBlueFRD1構造のブレイクダウン電圧における電流密度の模式図である。BlueFRD1ではブレイクダウンポイントがコーナー部からDeep P層部へと変わる。また、Deep P層と裏面カソードP層、N層の位置を合わせることで、二次降伏現象を起きにくくしている点も本開発における特徴である。Deep P層の直下にはカソードP層が存在しないように、表裏面のP層の平面位置を合わせる。これにより、Deep P層でのブレイクダウン時に、カソードP層からホールの供給を防ぐ。

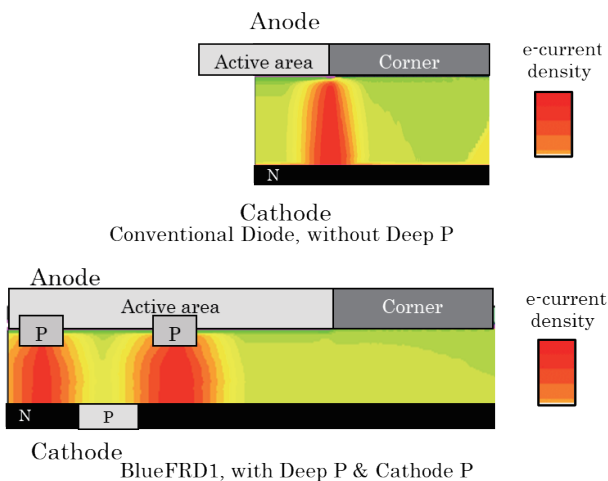


図2 ブレイクダウンポイント模式図、従来品(上)、BlueFRD1(下)

### 3. BlueFRD1の開発検討内容

#### 3.1. 薄厚ウェーハのプロセス技術

低 $Q_{rr}$ のために必要なウェーハ薄厚化は機械的強度低下やウェーハ破損のリスクを伴うため、チップの製造装置や製造プロセスに対して、従来FRDの製造ラインから全体的に見直しをおこなう必要があった。また、裏面カソードにP層を形成するプロセス工程も必要であった。これらを安定的に実現させるプロセスとして当社で実績のある薄厚ウェーハプロセス技術を適用した<sup>(1)(2)(3)</sup>。

#### 3.2. BlueFRD1 構造の検討

今回BlueFRD1の開発品ではエアコンPFC用途の定格として650V、50Aを目標指標とした。先に述べたBlueFRD1構造の特徴の一つがDeep P層をカソードN+層と重ねるように形成することである。このDeep P層の深さについてシミュレーションにて検証した結果を図3に示す。

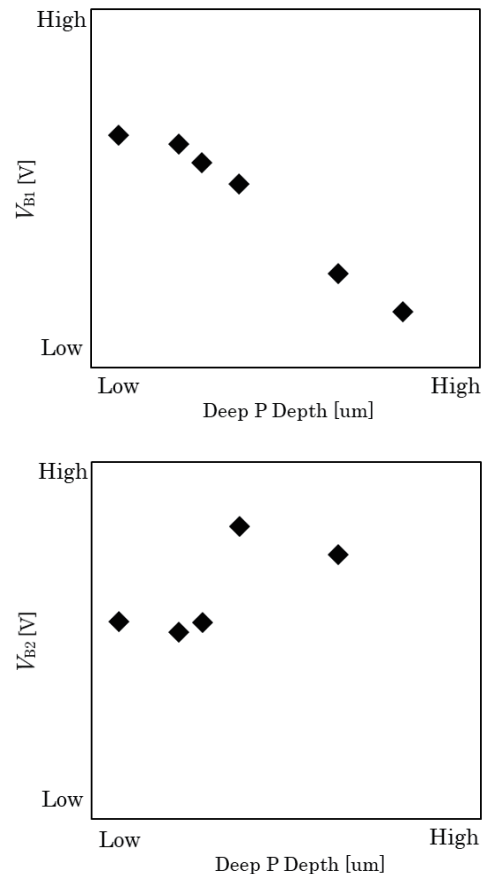


図3 Deep P深さと耐圧のシミュレーション、一次降伏(上)、二次降伏(下)

通常の静耐圧を一次降伏の $V_{B1}$ 、二次降伏が発生する電圧を $V_{B2}$ とする。Deep P層が深いとアノードとカソードの距離が近づき、ドリフトN層が薄くなるため、一次降伏電圧 $V_{B1}$ は小さくなる。しかしDeep Pが深い場合は設計狙い通りに二次降伏電圧を大きくすることが可能である。この理由は図4のDeep Pの深さにおけるホール電流密度のシミュレーション結果から説明される。表面がアノードのみの従来のダイオード構造において、ブレイクダウン時のホール電流密度はある深さにおける横方向ではどの場所でも等しい。ブレイクダウン時、電子はカソード側へと移動する。カソードP層領域の上部では、障壁の低いカソードN層へ向かって電子が横方向移動する。この横方向移動による電圧降下が障壁を上回る

と、PN接合がオンになりホール注入され、二次降伏が起こりやすくなる。一方Deep P層が深く存在するほど、Deep Pに電流が集中するため、直下のカソードNに電子は多く流れ込む。よって、カソードP層からのホール注入を抑えられる。結果、二次降伏電圧を高くすることができる。

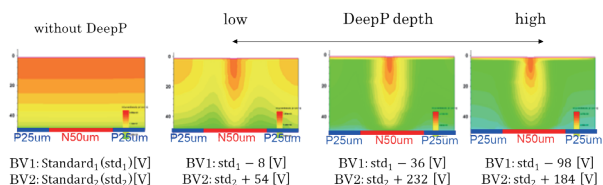


図4 ブレークダウン時の電流密度シミュレーション

## 4. BlueFRD1の開発評価

### 4.1. BlueFRD1のブレークダウン破壊評価

2章においてBlueFRD1は二次降伏を起こしづらくすることが特徴と述べた。しかしブレークダウン電流を増加していき、二次降伏電圧を正確にモニタすることは難しい。そのためUnclamped Inductive Switching (UIS) 試験においてアバランシェ耐量が向上するかを確認した(図5)。試験評価サンプルはBlueFRD1開発品とBlueFRD1と同じチップサイズ、チップ厚でカソードがN層のみでDeep P層有り、無しの構造を用意した。Deep P層なし、かつカソードがN層のみの基本的なダイオード構造の評価サンプル②の耐量を1としたとき、BlueFRD1構造の評価サンプル①では耐量が約2.8倍に増加した。一方、Deep P層ありでカソードNのみのサンプル③では約1.5倍の増加に留まった。Deep P層を形成するだけでなくカソードのP層と位置を合わせることが、アバランシェ耐量の向上に効果的である。

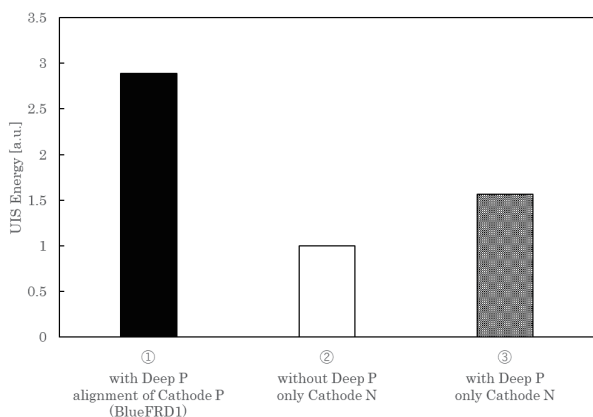


図5 UIS試験結果

### 4.2. BlueFRD1スイッチングオフ特性

本開発品BlueFRD1と従来品の $V_F$ - $Q_{rr}$ トレードオフ特性を図6に、スイッチングオフ波形を図7に示す。

RRSOA (Reverse Recovery Safe Operating Area) 試験にてスイッチングオフ特性を取得した条件は、ハイサイドに650V定格IGBTを使用、コレクター-エミッタ間電圧 $V_{CE} = 400V$ 、コレクタ電流 $I_C = 50A$ 、ゲート電圧 $V_{GE} = +15V/0V$ 、温度 $T_a = 25^\circ C$ である。

図6から、BlueFRD1は従来製品よりも $V_F$ - $Q_{rr}$ トレードオフカーブが数値の小さい方へ改善したことがわかる。つまり、スイッチングオフ時のエネルギー損失が軽減された。また、リカバリ動作時に従来製品で表れていたリングングは、BlueFRD1では減少したことが図7から確認できた。

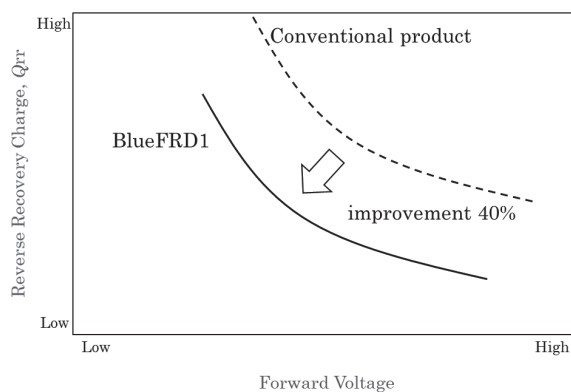


図6  $V_F$ - $Q_{rr}$ トレード特性

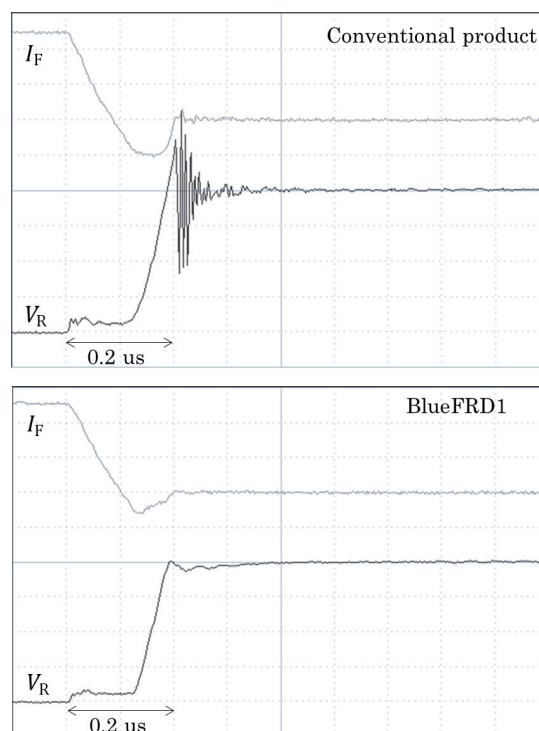


図7 スwitchングオフ波形, 従来品(上), BlueFRD1(下)

## 5. むすび

ウェーハの薄厚化かつ表裏面の拡散層の構造を最適化することで、従来製品よりもスイッチング動作時のエネルギー損失が小さく、かつ低ノイズ性を両立したBlueFRD1を開発した。

現在、BlueFRD1の製品開発を進行中である。より一層の低 $V_F$ や高耐量などが求められるアプリケーション

に合致するよう、新世代のFRDの技術開発を進める。そして市場の要求に応えることを通して、持続可能な世界の実現に向けて貢献する。

### 参考文献

- (1) 石井：サンケン技報, vol.52, p.17-20, (2020. 11)
- (2) 松田：サンケン技報, vol.53, p.50-53, (2021. 11)
- (3) 染矢：サンケン技報, vol.55, p.18-21, (2023. 11)