

第一世代 RC-IGBT の開発

Development of RC-IGBT Gen.1

染 矢 亮*
Ryo Someya

概要 エネルギーや環境問題を背景に、パワーデバイスへの注目は、近年さらに高まっている。これにともない、高性能化や小型化といった市場要求を実現するための技術開発もさかんである。これらの要求に応えることができるデバイスの一つとして、RC-IGBT (Reverse Conducting IGBT) がある。RC-IGBTは、IGBTとDiodeの2つのデバイスを1チップに作り込むことで小型化を可能にしたデバイスである。今回、当社では第一世代RC-IGBTを開発し、当社の旧世代RC-IGBTの性能を大幅に上回ることを確認した。さらに、第一世代RC-IGBTについて、デザインによる応答性も確認したので報告する。

1. まえがき

昨今の地球環境への関心の高まりからパワーデバイスの用途は広く、エアコン冷蔵庫などの民生機器から、電気自動車や産業用機器といった様々な用途で使用されている。これにともない、高性能化や小型化の市場要求があり、盛んに技術開発が進められている。これらの要求に応えるデバイスの一つとして、RC-IGBT (Reverse Conducting IGBT) がある。RC-IGBTは、IGBTとDiodeを一つのチップ内に作り込むことで、従来の2チップ構成に比べて、部品点数の削減や小型化が可能なデバイスである。部品点数の削減は、半導体不足による在庫管理や調達といった顧客の負荷低減に役立つ。また、小型化はコスト低減に寄与する。一方で、同一チップであることから、プロセス・デバイス設計に制限があり、特性改善にはより多くの困難をともなう。

当社は、今回開発をおこなった第一世代RC-IGBTの先駆けとなるRC-IGBT技術も有する。第一世代RC-IGBTでは、この旧世代RC-IGBT技術をベースに改良をおこない、大幅な改善を実現した。

2. RC-IGBTについて

RC-IGBTは、前述の通り、IGBTとDiodeを一つのチッ

プ内に作り込んだデバイスである。図1に示したように、IGBTとDiodeは裏面拡散層の極性が異なる。これを1チップに作り込むため、RC-IGBTでは、IGBTのp型コレクタ拡散層の一部にDiodeのn型カソード拡散層を形成する。このように、活性部内にはIGBTとDiode 2つのデバイスを作り込む一方で、終端構造は共用することができる。そのため、RC-IGBTでは、IGBTとDiode 2チップ構成と同じ活性部面積であっても、チップの小型化が可能である。さらに、第一世代RC-IGBTでは、Diodeの専用領域を設けることで相互干渉の影響を最小限にした。これにより、IGBTとDiodeそれぞれの構造の最適化も可能となる。

図2は、当社旧世代RC-IGBTと第一世代RC-IGBTの性能比較である。第一世代では、IGBTとDiodeそれぞれの構造の最適化をおこなったことで、旧世代に比べて、大幅な特性改善を実現した。

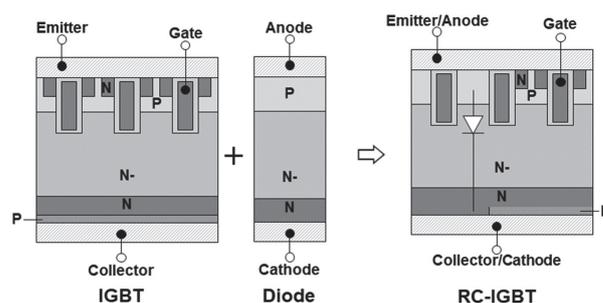


図1 RC-IGBTの構造

*技術開発本部 プロセス技術統括部
パワーデバイス開発部 デバイス開発課

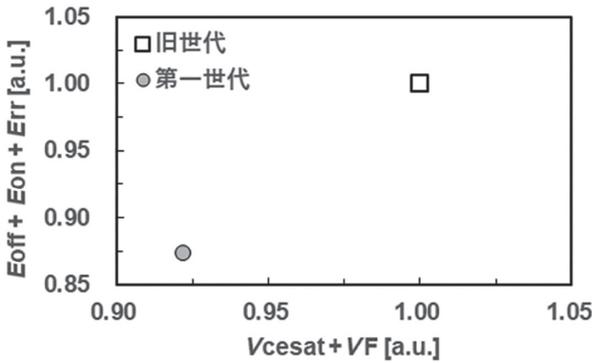


図2 当社旧世代, および第一世代 RC-IGBT の比較

3. 第一世代RC-IGBTの設計について

3.1 ダイオード配置検討

先に述べたように、第一世代RC-IGBTではDiode専用領域をもうけることで、IGBTとDiodeそれぞれの構造の最適化をおこなうことが可能となる。実動作において、このIGBTとDiodeは、交互にON-OFFを繰り返し、同時にONすることはない。つまり、IGBTがONのとき、損失により発生した熱はDiode側に逃げる。DiodeがONのときは、逆にIGBT側に熱が逃げることになる。このことは、言い換えれば、IGBTとDiodeはたがいにヒートスプレッダーの役割をすることになる。このため、Diode領域の配置が重要となる。

Diode配置の検討は、はじめにDiode面積一定で複数のデザイン案を作成した。次に、それらの全面像をシミュレーター上で再現し、熱シミュレーションをおこなった。

シミュレーション結果を図3に示す。グラフ横軸はDiodeの周辺長、つまりIGBTとDiodeの境界長を示す。グラフからわかるように、Diodeの周辺長が長いほど、 T_{max} (最大温度) が下がるという明確な傾向を確認できた。また、 T_{max} 減少の傾きは、Diode周辺長0.6あたりまでが急峻で、それ以降は緩やかになるという傾向も確認できた。

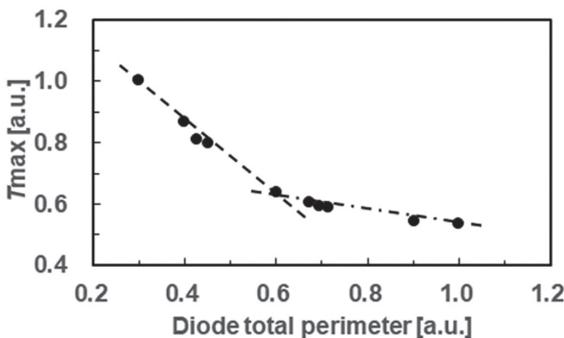


図3 Diode 配置検討シミュレーション結果

3.2 スナップバック現象について

RC-IGBTでは、IGBTとDiodeが隣接するため、相互干渉が起きる。その影響の一つとして、スナップバック現象が一般に知られている。

図4に2つのデザインのRC-IGBTのVc-Icシミュレーション波形を示す。Design_Aは、スナップバックが発生している。IGBT modeになる前に、Vcが大きく上昇し、その後、一旦Vcが下がり、Ic増加へと転じる。一方のDesign_Bでは、スナップバックは発生していない。

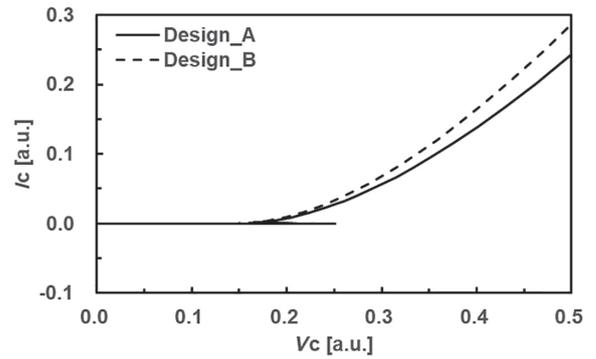


図4 Vc-Ic スナップバックとデザインの関係

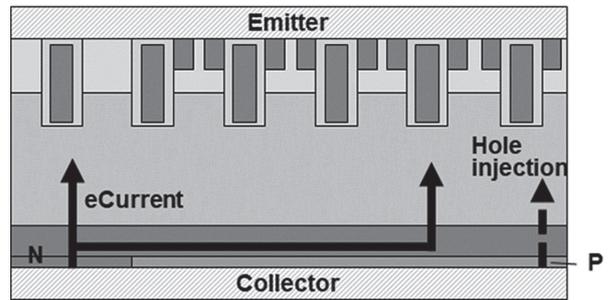


図5 Vc-Ic スナップバック発生メカニズム

ここでIGBT modeにおけるスナップバック発生メカニズムについて図5を用いて説明する。IGBT modeの順バイアスが印加された状態でゲートが開くとエミッタから電子が供給される。FS-IGBTなどでは、この電子は、バッファ層とp型コレクタ拡散層からなる電位障壁を乗り越える必要がある。一方で、RC-IGBTの場合、電子は隣接するn型カソード拡散層を通ることができる。これをMOS modeと呼び、この特性のため、一般的にRC-IGBTの低電流側の立ち上がりは、FS-IGBTよりも早い。MOS modeによる電子電流の一部は、図5に示したイメージのように、バッファ層を横切るように流れる。横方向電流成分は、電圧降下を引き起こし、p型コレクタ拡散層の中心部分(最もn型拡散層から離れた場所)で電圧降下は最大となる。この部分からホール

注入が開始される。ホールが注入され、ドリフト層に溜まっていくと、デバイスは伝導度変調状態となり、抵抗が低下し、電圧が下がる。この結果スナップバックが発生する。

スナップバックの発生に関わるパラメータは、ドリフト層の厚さや、バッファ層の濃度など複数存在する。しかし、RC-IGBT設計段階において、制御可能なパラメータは、ほとんどp型コレクタ拡散層の幅のみである。なぜなら、一般的にRC-IGBTは既存のIGBT技術をベースにDiodeを作り込む。言い換えれば、RC-IGBTのIGBT modeに期待される特性は、ベースとなったIGBT同等であると言える。そのため、ドリフト層の厚さや、拡散層の濃度などのパラメータを変更することは望ましくない。

先に示した図4の各デザインは、p型コレクタ拡散層幅を変えてシミュレーションした結果である。設計に当たっては、このようにシミュレーションを用いて検証をおこなった。

上記の通り、RC-IGBTの設計においては、Diodeの分散配置をするほど放熱性の面では好ましいが、一方でスナップバックの懸念が出てくる。このため、適切なデザインの選定が重要である。

4. 第一世代RC-IGBTの特性

4.1 Diode面積による影響

第一世代RC-IGBTの特性について述べる。

RC-IGBTチップ設計の特徴として、チップ面内でIGBTとDiodeそれぞれの面積比を要求特性に応じて変更することが可能である。

図6は、チップ面内のDiode面積比と V_{sat} - E_{off} の関係である。Diode比率が下がるほど、言い換えればIGBTの比率が高くなるほど、 V_{sat} は下がり、 E_{off} は増える。

図7は、同様に V_F - I_{rp} の関係である。Diode比率が上がるほど、 V_F は下がり、 I_{rp} は増える。

4.2 Diode配置による影響

先にDiodeの分散配置と放熱性、スナップバック現象の関連性について述べた。ここでは、Diodeの分散配置と V_{sat} - E_{off} 、 V_F - I_{rp} の関係について述べる。Diodeのチップ面内合計面積は一定に保ちつつ、分散配置をおこなった。つまり、Diode 1つあたりの面積は変わるようになる。

図8は、 V_{sat} - E_{off} の関係である。面内のDiode数が増えるほど、 V_{sat} は上がり、 E_{off} は下がった。これは、Diode数が増えるほどIGBTとDiodeの境界長が増えるためだと考えられる。十分に伝導度変調が進んだ V_{sat}

の領域であっても、裏面のn型拡散層に隣接するp型コレクタ拡散層からは、ホール注入が促進されないことをシミュレーターで確認している。つまり、この部分は、IGBT動作に寄与しない無効領域になることがわかっている。Diode数が増え、IGBTとDiodeの境界長が増えることで、この無効領域が増え、 V_{sat} が上昇すると考えられる。

図9は、 V_F - I_{rp} の関係である。面内のDiode数が増えるほど、 V_F は下がり、 I_{rp} は上がる。これも、Diode数が増えることによりIGBTとDiodeの境界長が増える

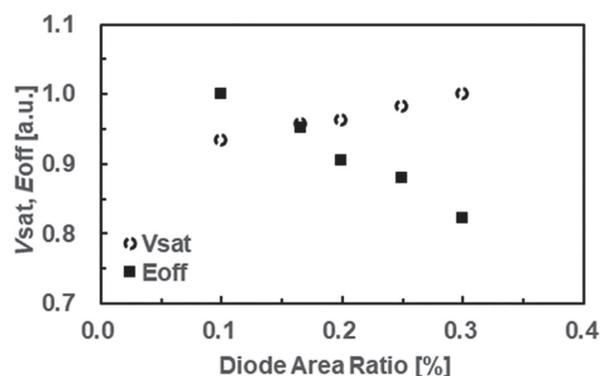


図6 Diode面積と V_{sat} - E_{off} の関係

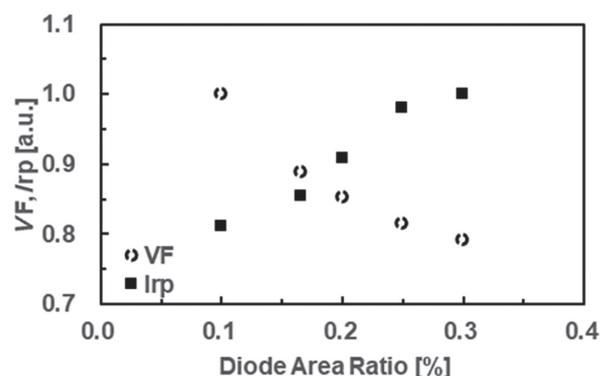


図7 Diode面積と V_F - I_{rp} の関係

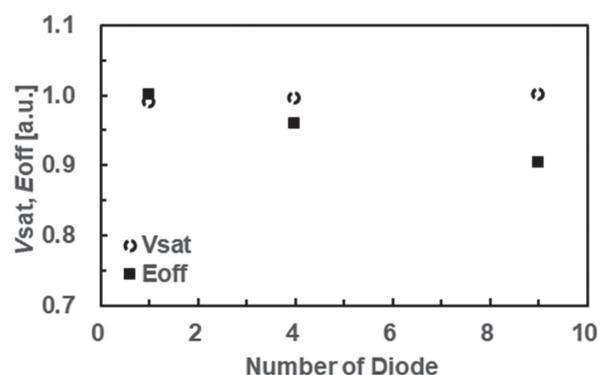


図8 Diode個数と V_{sat} - E_{off} の関係
(Diodeのチップ面内合計面積一定)

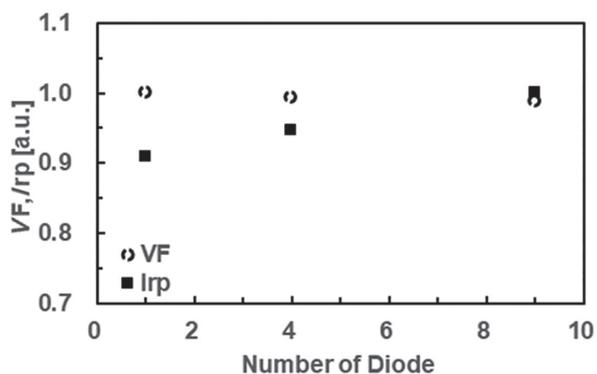


図9 Diode 個数と $V_F - I_{FP}$ の関係
(Diode のチップ面内合計面積一定)

ことから説明ができる。図1のRC-IGBTの構造からも分かる通り、隣接するIGBTのn型エミッター拡散層が

無い部分は、Diodeのアノードと同じ構造である。つまり、この部分はDiode動作時、Diodeのアノードとして振る舞う。Diode数が増え、IGBTとDiodeの境界長が増えることで、同部分が増え、VFが下がると考えられる。

5. むすび

IGBTとDiodeそれぞれの構造を最適化することで、当社旧世代RC-IGBTに比べ、大幅に特性改善した第一世代RC-IGBTチップを開発した。

現在、第一世代RC-IGBTを用いた製品開発を進めている。同時に、さらなる特性改善を目的とした第二世代RC-IGBTの開発も進行中である。

当社は、これらの技術を元に、市場要求に応えることを通して、地球環境の保全に貢献する。