

# SiC レクチャーシリーズ

## 1. 三菱電機パワーデバイスの歴史

## 三菱電機パワーデバイスの歴史

半導体デバイスは急速に発展するこんにちのパワーエレクトロニクス機器に欠かせない存在であり、科学技術の発展と社会の進歩を促進する重要な原動力となっています。三菱電機は多くの技術分野のイノベータとして、半導体分野で重要な役割を果たしています。優れた技術および最新の製造プロセス、そして十分な生産能力が三菱電機の成功のキーファクターです。以下の図 1 に三菱電機のパワーデバイスの歴史を記します。

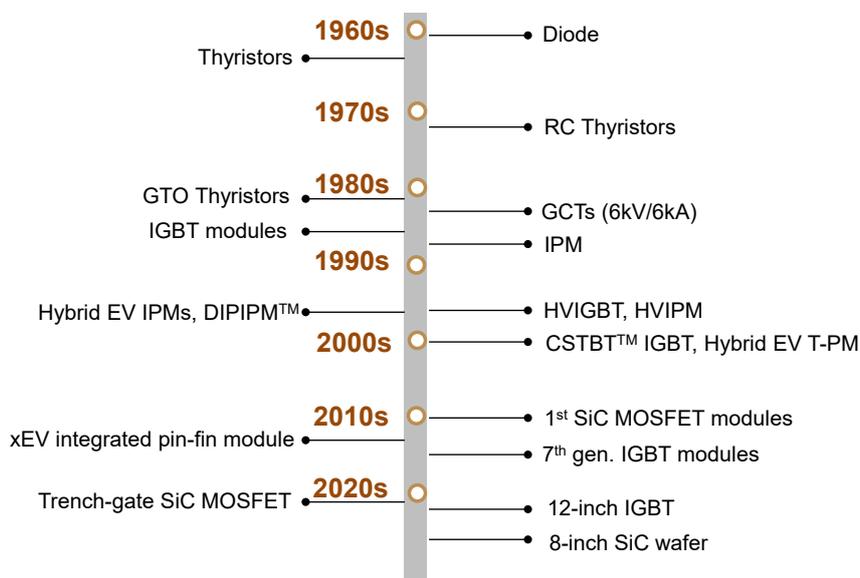


図 1 三菱電機パワーデバイスの歴史

1960年代に三菱電機は高出力ダイオードとサイリスタ製品を市場投入しました。サイリスタはパワーエレクトロニクスの近代化に置いて重要な役割を果たしており、常に高耐電圧化と大電流化を目指してきました。1980年代になると自己消弧機能を持たない逆阻止型のサイリスタから直流回路でもゲートに負バイアスを印加することでオン状態からオフ状態に変化できる自己消弧型GTO(Gate Turn Off)サイリスタが開発されました。またGCT(Gate Commutated Turn off)サイリスタはGTOサイリスタの基本構造を継承し、ゲートインピーダンスを大幅に低減することで高速動作と高いターンオフ性能を実現しています。SGCT(Symmetrical Gate Commutated Turn off)サイリスタユニットは最適化されたゲートドライバを内蔵することでGCTサイリスタの性能を十分に発揮できる逆阻止能力をもつGCTサイリスタであると同時にシステム設計を容易にすることに貢献してきました。

そして三菱電機はMOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) モジュールやIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールを開発し、市場に投入してきました。MOSFETは高速スイッチング、電圧駆動、低損失という利点があり、さまざまな中-小型電力のパワーエレクトロニクスにおける変換回路に広く適用されています。IGBTはBJT(Bipolar Junction Transistor)の小さな駆動電力、速いスイッチング速度、低いオン抵抗、大電流化対応の利点を兼ね備えており、現代のパワーエレクトロニクス技術の主要なデバイスとして中-大電力のアプリケーションにおいて重要な位置を占めています。

## ■ IGBT および IGBT モジュール

三菱電機の IGBT の開発の歴史を図 2 に示します。第 4 世代 IGBT の構造はプレーナゲート構造からトレンチゲート構造へと進化しています。第 5 世代ではトレンチゲート IGBT を基本として電荷蓄積層を備えた CSTBT™ へと進化を遂げることによってターンオフ損失と導通損失のトレードオフ関係を改善し、電力損失を低減に成功をしています。これらに基づき第 6 世代および第 7 世代では素子構造を最適化し、ウェハの厚みを薄くすることで損失をさらに低減してきました。

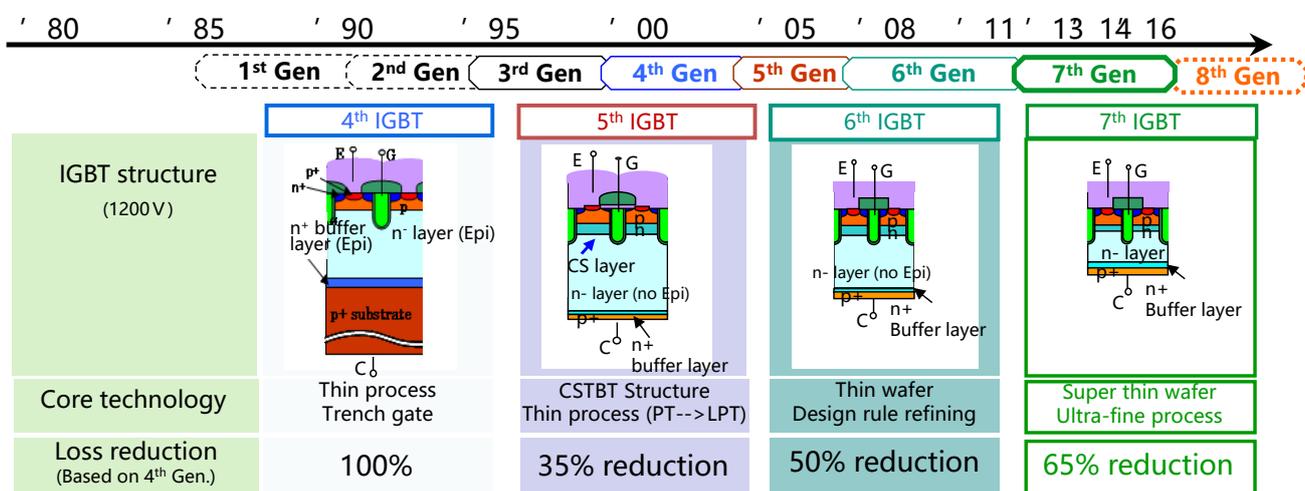


図 2 IGBT 構造の変遷

IGBT モジュールの例として図 3 に第 7 世代 IGBT モジュールの構造を示します。ダイレクトポッティング(Direct Potting、DP)樹脂と一体型の絶縁金属基板(Insulated Metal Baseplate、IMB)を採用しており絶縁層と金属ペースプレートの間の接合層を除去することで IGBT モジュールのサーマルサイクルの性能を大幅に向上させることができます。そして図 4 に示す産業用 LV100 パッケージによる IGBT モジュールでは、1.2kV、1.7kV、2.0kV など複数の耐圧レベルに応じたラインアップを揃えており、より大きい電流密度と高い信頼性を備え、太陽光発電や風力発電、水素を利用した電源やモータ制御に適しています。

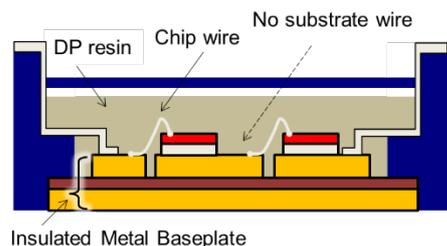


図 3 第 7 世代 IGBT モジュールの構造



図 4 産業用 LV100 パッケージ

## ■ IPM

1989 年に三菱電機はインテリジェントパワーモジュール(Intelligent Power Module、IPM)のコンセプトを独創的に提案しました。図 5 に示すようにインバータ、駆動回路、そして保護回路を統合したソリューションにより、システムノ大きさ、費用、そして開発期間の大幅な短縮が可能となりました。

IPMのうちG1シリーズを図6に示します。第7世代IGBTモジュールと同じIGBTとダイオードの技術を利用し、非常に低い損失を実現しています。G1シリーズは従来のIPMの制御電源電圧低下保護(UV)、短絡保護(SC)、過熱保護(OT)に加えて、スイッチング速度の切り替え機能や故障識別機能も追加し、インバータ機器の性能と信頼性の向上に貢献します。

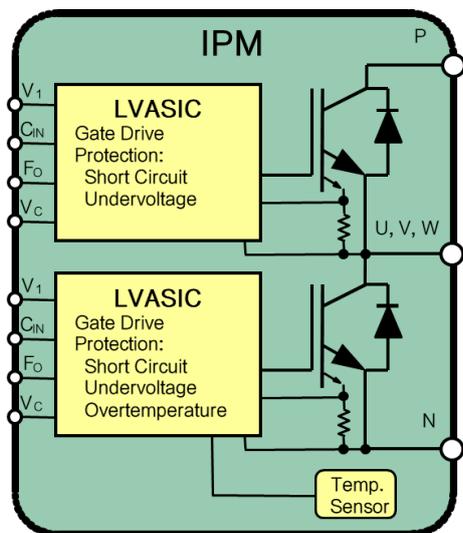


図5 IPMの内部ブロック図



図6 G1シリーズ

### ■HVIGBT モジュール

1996年に三菱電機のHVIGBTモジュールが市場に投入され始め、その優れた性能と高い信頼性により鉄道や電力網といった広い分野で適用されています。三菱電機は継続的な最適化と改善によってIGBTの電流容量を拡大し、1.7kVから6.5kVの広い電圧領域のHシリーズ、Rシリーズ、Xシリーズを次々に発売してきました。

三菱電機の最新のHVIGBTモジュールであるXシリーズは、最大動作接合温度が150°Cであり、素子端部の設計とパッケージ内部構造を最適化し、製品の動作信頼性を向上させることで、放熱性、耐湿性、難燃性を向上させています。パッケージは2種類あり、標準パッケージのHVIGBTモジュールを図7に、LV100およびHV100のパッケージを図8に示しています。



図7 HVIGBTモジュール



図8 LV100(左)、HV100(右)のパッケージ

## ■DIIPM™

1997年に図9および図10に示すようにドライブICを内蔵したDIIPM™を開発し、電源電圧低下保護、過熱保護、短絡保護などの機能を統合し、電力変換機のシステム設計の難易度を軽減し、信頼性を向上させてきました。

初代のDIIPM™の誕生以来IGBT素子の技術の開発とパッケージング技術の継続的な改善により三菱電機は継続的にアップグレードし、第7世代まで発展をしてきました。そして、パッケージの種類は大型DIIPM+™、DIIPM+™、大型、小型、超小型、SLIMDIP™、SOPIPM™へと拡がり、高いエネルギー変換効率、機能統合による高い費用対効果の提供、高い電力密度実装を顧客へ提供していくことに常に取り組んでいます。

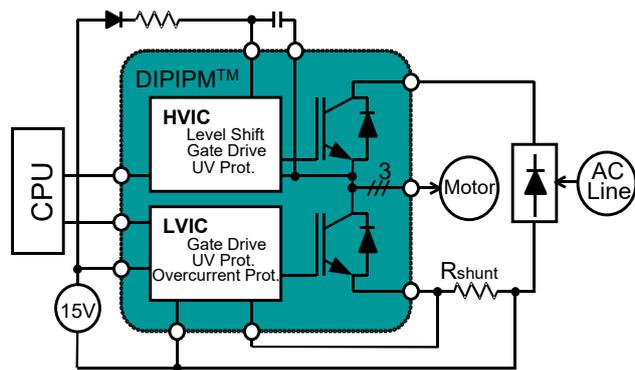


図9 DIIPM™のブロック図

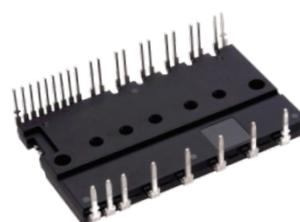


図10 DIIPM™の例(小型DIIPM™)

## ■xEV向けモジュール

1997年に三菱電機は電気自動車用パワーモジュールをハイブリッドEV(HEV)への適用に成功し、量産および応用の実績を積み上げ、三菱電機製のパワー素子やパワーモジュールを搭載した電気自動車が現在までに2600万台を超えて走行をしています。第5世代IGBTをT-PM(Transfer-molded Power Module)にかかる技術を採用し、従来のシリコンゲルによるモジュールからエポキシ系の樹脂に置き換え耐震性と実装の自由度を向上させました。J1シリーズのIGBTモジュールでは端子となるフレームをパワー素子に接合させるDLB(Direct Lead Bonding)の接合プロセスを採用しており、パワー素子の温度分布がより均一に拡がり、ピークに達する温度を緩和することでパワーサイクル寿命が向上しています。

また、最新の車載用パワーモジュール「J3シリーズ」では高信頼性で、かつ、量産性に優れたトランスファーモールドタイプのパッケージにRC-IGBTやSiCのMOSFETを搭載可能にし、また、高速スイッチングや並列利用にも対応し、移動体の電動化における高出力密度および航続距離の向上に貢献しています。J3-HEXA-Sは3台のJ3が搭載され、J3-HEXA-Lは6台のJ3が搭載されており、それぞれを図11に示します。

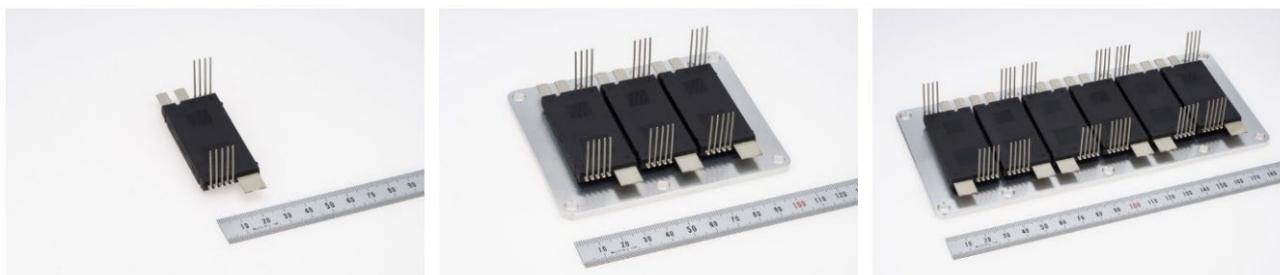


図11 J3(左)、J3-HEXA-S(中央)、J3-HEXA-L(右)

## ■SiC モジュール

三菱電機は 1994 年から SiC 関連技術の研究に取り組んでおり、30 年を超える経験を有しています。2004 年までに 10 年間は SiC MOSFET や SiC SBD(Schottky Barrier Diode)などの素子技術そのものの研究開発に注力をしました。2005 年から 2009 年にかけて SiC パワーモジュールの応用開発に注力し、SiC パワーデバイスをベースにしたインバータをさまざまな用途に設計および評価をしてきました。2010 年から 2014 年にかけて SiC パワーモジュールの商品化が開始され、三菱電機は数種類のオール SiC のパワーモジュールや Si と組み合わせたハイブリッド SiC パワーモジュールを市場投入しました。

現在、6 インチの第 2 世代プレーナゲート SiC MOSFET が安定的に量産されており、第 3 世代の SiC MOSFET と SBD を組み合わせたモジュールが順次投入される見込みです。600V から 3.3kV まで民生、産業、再生可能エネルギー、移動体電動化等の分野で数十の SiC 製品が商品化されています。

そして図 12 に示す Unifull™ シリーズは 3.3kV で 200A、400A、800A の電流ラインアップをしており、また、SiC モジュールの性能をさらに引き上げる SBD の組込み技術を採用しています。これらの技術により損失を大幅に低減することに貢献します。今後、三菱電機の SiC 製品にご期待ください。



図 12 Unifull™ 3.3kV SBD 搭載 SiC モジュール

以上  
2025 年 1 月