

第 1 章

構造と特徴

目 次

	ページ
1. 素子の構造と特徴.....	1-3
2. 富士電機デバイステクノロジーの IGBT.....	1-4
3. ゲート制御による過電流遮断.....	1-7
4. 過電流制限機能.....	1-7
5. モジュール構造.....	1-8
6. IGBT モジュールの回路構成.....	1-9

はじめに

モータ可変速駆動装置や電算機の無停電電源装置などの電力変換器は、バイポーラ型パワートランジスタモジュールやパワーMOSFET の登場により、大きく様変わりしました。これらのスイッチング素子を使用した各種の電力変換器は、近年の省エネ・装置の小型・軽量化に対する要求の高まりとともに急速に発展してきています。しかしながら電力変換器側からの要求は、バイポーラ型パワートランジスタモジュールとパワーMOSFET によって完全に満足されたわけではありません。バイポーラ型パワートランジスタモジュールについては高耐圧・大容量の素子が入手できますがスイッチング速度が十分に速くなく、パワーMOSFET についてはスイッチング速度は十分に速いが高耐圧・大容量の素子が入手出来ないなどの不満が残されていました。

IGBT (JEDEC 登録名称、インシュレーテッド・ゲート・バイポーラ・トランジスタ) はこのような要求に応えるべく開発されたものであり、パワーMOSFET の高速スイッチング性能とバイポーラトランジスタの高電圧・大電流処理能力とを合わせ持った新型素子として、今後一層の発展が期待されています。

1 素子の構造と特徴

IGBT の構造をパワー-MOSFET と対比させて図 1-1 に示します。IGBT は、パワー-MOSFET のドレイン側に p+層を追加した構造となっており、これによって、以下に述べる数々の特徴を実現しています。

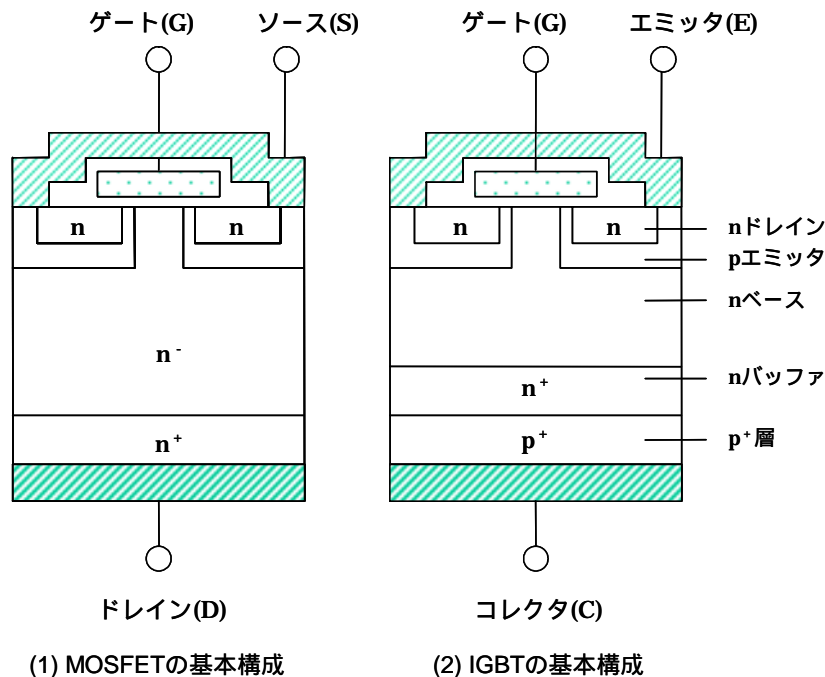


図 1-1 パワー-MOSFET と IGBT の構造比較

1.1 電圧制御要素子

IGBT の理想的な等価回路は、図 1-2、に示すように pnp バイポーラトランジスタとパワー-MOSFET をダーリントン接続したモノリシックの Bi-MOS トランジスタです。

したがって、ゲート エミッタ間に正の電圧を印加してパワー-MOSFET を導通させると pnp トランジスタのベース - コレクタ間に低抵抗が接続されたことになり、pnp トランジスタは導通状態となります。

次にゲート - エミッタ間の電圧を 0V にすると、まずパワー-MOSFET が遮断状態となり、pnp トランジスタはベース電流の供給を絶たれて遮断状態になります。

以上のように、IGBT はパワー-MOSFET と同様に電圧信号によってターンオン・オフ動作を制御できます。

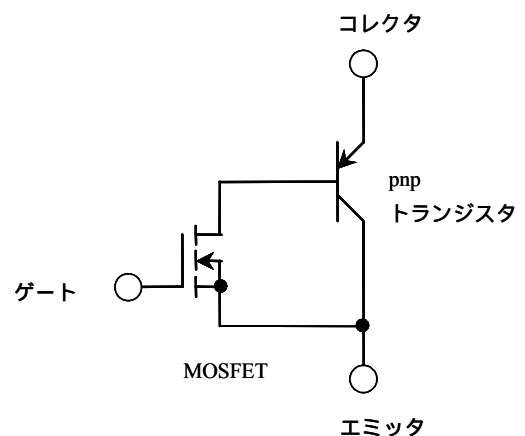


図 1-2 理想的な等価回路

1.2 高耐圧で大容量

IGBT はパワー-MOSFET と同様に、ゲートに正の電圧を印加すると導通しますがドレイン側に p^+ 層を追加したことによりオン状態では p^+ 層より n ベースに正孔が注入され、伝導度変調を誘起するためにパワー-MOSFET に比較して極めて低いオン電圧が得られます。

解説（下記の解説は図 1-1 を参照しながらお読みください。）

IGBT で低いオン電圧が得られる理由を簡単に説明すると下記ようになります。

周知のように、パワー-MOSFET はゲートに正の電圧を印加すると P ベース層にチャネルが形成されオン状態になります。この時、 n エミッタ（ソース）層と n ベース層はチャネルを介して導通しているため、MOSFET のドレイン - ソース間は単一の半導体（図 1-1 では n 型）となり、その電気的特性は単純な抵抗体となります。この抵抗が低いほどオン電圧は低くなります。しかし、MOSFET を高耐圧化する際にはこの n ベース層を厚くする必要があり（ n ベース層はオフ状態において ドレイン - ソース間に印加された電圧を支えるための層で、支える電圧が高いほどこの層は厚くなります）素子の耐圧が高いほど、ドレイン - ソース間の抵抗が増加します。このために 高耐圧のパワー-MOSFET のオン抵抗は大きくなり、大きな電流を流すことができなくなるので大容量化が困難となります。

これに対して IGBT では、 p^+ 層が追加されているのでドレイン側から見ると n ベース層との間で pn ダイオードが構成されています。このダイオードの働きで n ベースが電導度変調され、そのオン抵抗は無視できるほどに小さな値になります。このため IGBT は MOSFET に比べて大容量化が容易です。

IGBT は、図 1-2 に示す理想的な等価回路のように pnp バイポーラトランジスタとパワー-MOSFET をダーリントン接続したモノリシックのカスケード型 Bi-MOS トランジスタです。なお、IGBT とバイポーラトランジスタのチップとパワー-MOSFET のチップとを組み合わせで作られるハイブリッドのカスケード型 Bi-MOS トランジスタとの差はパワー-MOSFET 部のオン抵抗です。IGBT では、パワー-MOSFET 部のオン抵抗が極めて小さな値になり、チップ間の配線の必要性を考慮すると、ハイブリッド型カスケード Bi-MOS トランジスタより IGBT の方が優れています。

2 富士電機デバイステクノロジーの IGBT

富士電機デバイステクノロジーは IGBT の製品化を 1988 年から始め、市場に供給してきました。図 1-3 は第 1 世代から第 5 世代までの IGBT 開発の経緯と適用技術について表したものです。第一世代から第三世代までの IGBT では、エピタキシャルウェーハを用い、ライフタイムコントロールの最適化と、IGBT の微細化技術によって特性改善を行いました。そして第四世代や第五世代では、エピタキシャルウェーハから FZ（Floating Zone）ウェーハへ移行することで大幅な特性改善を実現させました。これは IGBT の設計方針を従来より大きく転換させることとなりました。

まずエピタキシャルウェーハを用いた IGBT（第三～四世代の 600V 系迄の系列、パンチスルー型と呼んでいます。）の基本設計思想を下記に示します。この IGBT ではオン時の低オン電圧化を狙うために、コレクタ側からキャリアを高注入して IGBT 内に高濃度のキャリアを充満させることに加え、高い電圧を支える n バッファ層を設けることで薄い n^- 層を実現し、低オン電圧を実現しました。速いターンオフ時間を実現するために、IGBT 内に充満したキャリアをすみやかに消去することを目的としたライフタイ

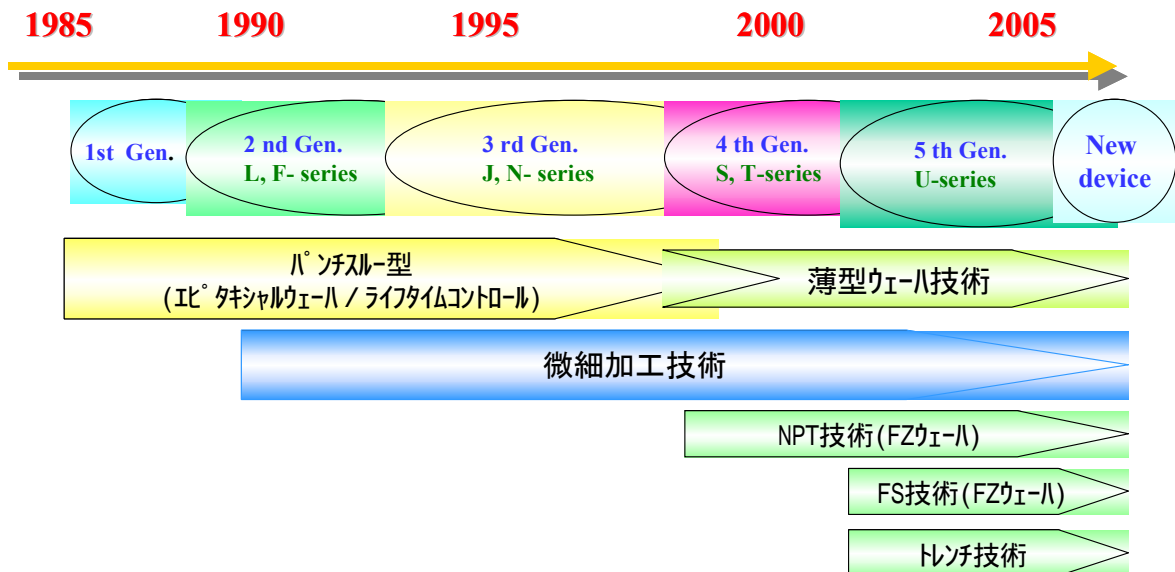


図 1-3 富士電機デバイステクノロジー製 IGBT の適用技術の推移

ムコントロールを併せて用いています(これにより低いスイッチング損失(E_{off})をも実現しています)。しかし、ライフタイムコントロールを適用すると、通常のオン状態においてもその効果(キャリアの輸送効率を下げる)のためオン電圧が増えるという課題があり、更なるキャリアの高注入化を図ることでこの課題を解決していました。つまりエピタキシャルウェーハを用いた IGBT の基本設計は「高注入、低輸送効率」という言葉に集約する事が出来ます。これに対し、FZ ウェーハを用いた IGBT (第四世代の 1200V 系以降の系列)はコレクタ側からのキャリアの注入を抑制し、注入効率を下げて輸送効率を上げるという逆の基本設計を採用しています。既述のエピタキシャルウェーハを用いた IGBT の「高注入、低輸送効率」という設計方針ではせっかく注入したキャリアをライフタイムコントロールで抑制するという無理をしているため、特性改善に限界があった上、ライフタイムコントロールを行うことによるオン電圧特性のバラツキ増大など、近年要求の高まってきた並列使用による大容量化等に対するデメリットがありました。これを打開するために技術開発したのが FZ ウェーハを用いた新 IGBT (NPT: Non Punch Through(第四世代より適用)/FS: Field Stop (第 5 世代より適用) - IGBT) です。この IGBT はライフタイムコントロールを使用せず、コレクタ(p+層)の不純物濃度コントロールで、キャリアの注入効率の抑制を行うことを基本的な設計思想としています。しかしながら、エピタキシャルウェーハを用いた IGBT 以上の特性を実現するには 1200V の高耐圧系でも百数十 μm という薄さの IGBT を実現する必要がありました (FZ ウェーハを使用した NPT、FS-IGBT では n⁻層の厚さ チップ(ウェーハ)の厚さになり、この厚さが薄いほど低オン電圧になります)。つまり、FZ ウェーハを用いた IGBT 開発はチップの薄さとの戦いであったといっても過言ではありませんでした。

富士電機デバイステクノロジーではこれらの課題を解決し、第四世代の 1200V 系 - IGBT から FZ ウェーハを用いた NPT 構造の「S シリーズ」を製品化しました。そして更に薄厚化を要求される 600V 系においても技術開発を進め、600V-U2 シリーズ (第 5 世代) の製品化を目前に捉えています。更に 1200V 系 - 第 5 世代「U シリーズ」においては S シリーズを更に凌ぐ特性改善を行うために NPT 構造から FS 構造へと進展しました。FS 構造とは、ライフタイムコントロールを使用しないキャリアの「低注

入、高輸送効率」という基本設計思想を守りながら、電圧を支えるための n バッファ層を FZ ウェ - ハに設けることで NPT 構造より更に薄い IGBT 構造を実現した構造です。これにより 1200V 系-U シリーズは S シリーズを凌ぐ低オン電圧特性を実現し製品化を完了しました。また、この技術は 1700V 系の高耐圧系列にも適用され、製品化を目前に捉えています。

また富士電機デバイステクノロジーは IGBT の特性改善には不可欠な技術として表面構造の微細化も併せて進めてきました (IGBT は多数の IGBT ブロックから形成されており、微細化によりこの IGBT ブロック数を増やすほど低オン電圧化が実現できます)。第 4 世代迄はプレーナー構造 (平面的に IGBT を作る構造) による微細化を進め特性改善を行ってきましたが、第 5 世代 - 1200、1700V 系列からは Si 表面にトレンチ (溝) を掘り、IGBT を構成させるトレンチ IGBT を技術開発・適用することで微細化における技術的な壁を破り、画期的な特性改善を実現しました。図 1-4 は 1200V 系列における特性改善の推移です。

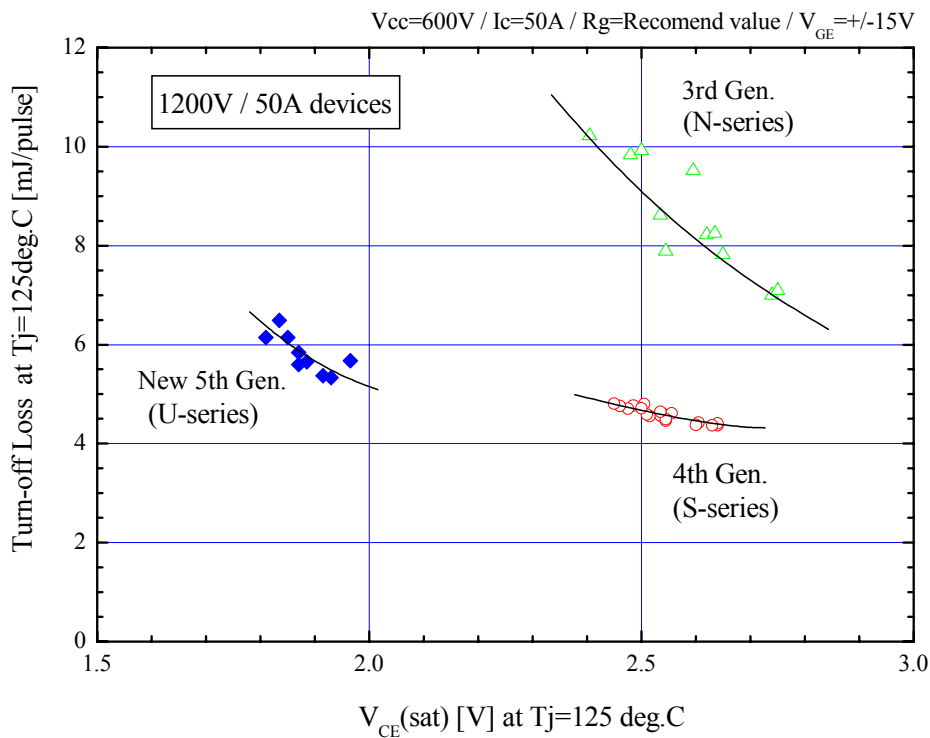


図 1-4 トレードオフ特性の改善

3 ゲート制御による過電流遮断

IGBT の製品化上の最大の課題は、過電流が流れた時にゲート制御による遮断（保護）を、「素子破壊など起こさずに安全に実施すること」を可能にすることでした。

IGBT の実際の等価回路を図 1-5 に示します。これは図 1-2 の理想的な等価回路と異なり、サイリスタとパワー MOSFET で構成されています。

図 1-5 において、サイリスタが点弧するとサイリスタはゲートのオフ信号などによる自己消弧ができませんので、IGBT はターンオフが不可能になり、過電流による素子破壊の原因となります（これをラッチアップ現象と言います）。

IGBT では、このラッチアップ現象の防止を目的として、下記のような技術を駆使しています。

- 1) ラッチアップが生じ難い構造の採用（図 1-5 における BE 間抵抗の低減）
- 2) n バッファ層の厚みと不純物濃度の最適化による pnp トランジスタの h_{FE} のコントロール。
- 3) ライフタイムキラーの導入による pnp トランジスタの h_{FE} のコントロール。

以上のような技術によって IGBT は十分に過電流（短絡）保護がかけられる耐量を維持した上で、高速スイッチング・高耐圧・大容量化を実現し、製品化されています。

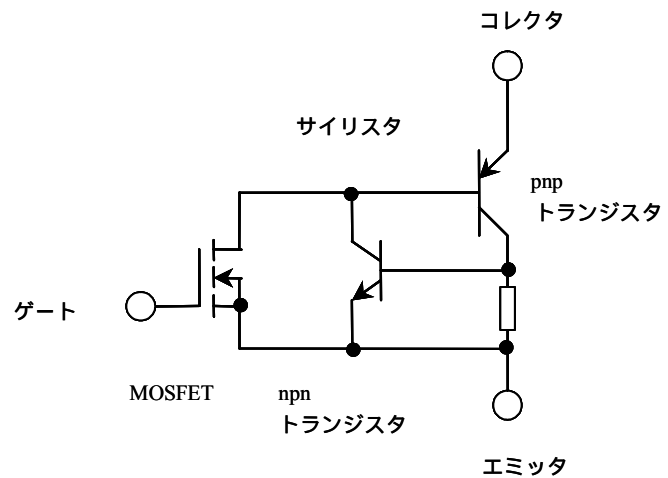


図 1-5 等価回路

4 過電流制限機能

IGBT の実際の使用上、装置の短絡事故等により IGBT に過電流が流れる場合があり、この過電流が流れ続けると素子自身に急激な温度上昇が起こり永久破壊になります。通常、この過電流の流れ始めから破壊に至るまでの時間を「短絡耐量」として表現します。そして、過電流が小さい程その短絡耐量は高く（長く）なります。

IGBT では、短絡事故時等の過電流を定格電流の数倍に IGBT 自身が制限するように設計されており、過電流検出後に十分保護がかけられる高い短絡耐量を実現しています。

5 モジュール構造

図 1-6、図 1-7 に代表的な IGBT モジュールの構造を示します。

図 1-6 に示す端子台一体構造モジュールは、ケースと外部電極端子が一体に成型された構造の採用により、部品点数の削減及び内部配線インダクタンスの低減を図りました。

またDCB (Direct Copper Bonding) 基板の採用により低熱抵抗及び高抗折強度を有す高信頼性製品を実現しました。

図 1-7 に示すワイヤー端子接続構造モジュールは、主端子をはんだ付けにて DCB 基板に接合するのではなく、ワイヤーで接合する構造を採っています。これにより、パッケージ構造の簡易化・小型化・薄厚化・軽量化・組立工数の削減を実現しました。

さらに、IGBT や FWD チップを適切に配置させることにより効果的な熱分散を可能にする工夫や、上下アームの IGBT 素子を均等に配置することでターンオン時の過渡電流バランスを均等化してターンオン損失の増加が起らない工夫なども行っています。

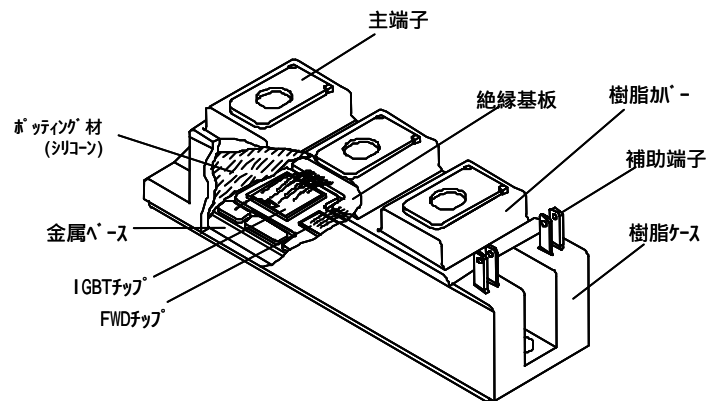


図 1-6 端子台一体構造 IGBT モジュール

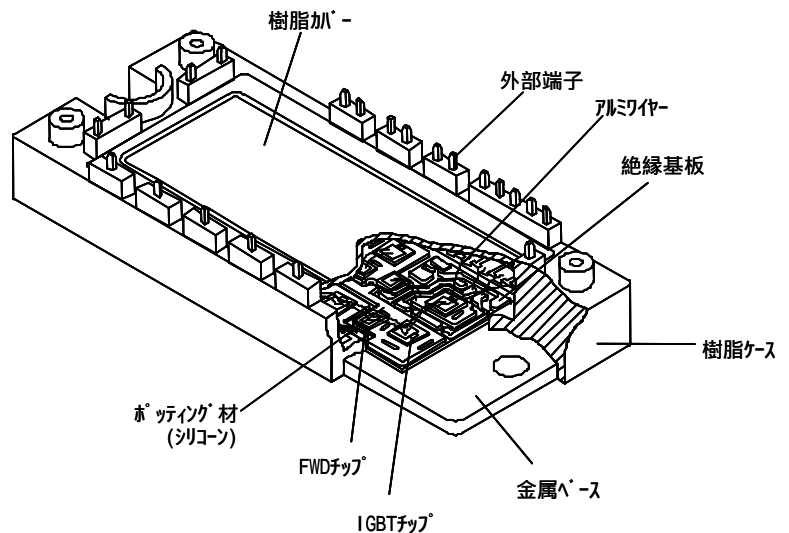

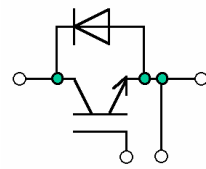
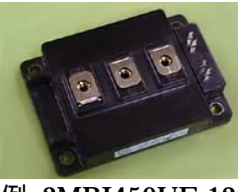
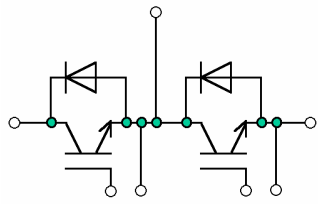
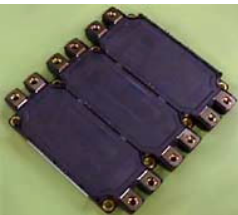
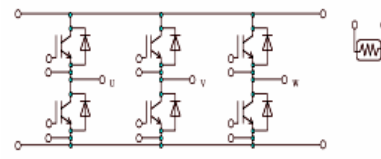

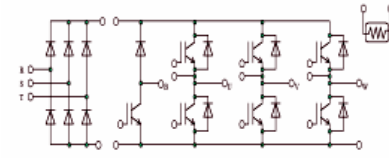


図 1-7 ワイヤー端子接続構造 IGBT モジュール

6 IGBT モジュールの回路構成

表 1-1 に IGBT モジュールの回路構成例を示します。

表 1-1 IGBT モジュールの回路構成例

名称	IGBT モジュールの例		特徴
	外観	等価回路	
1 in 1	 <p>例: 1MBI600S-120</p>		製品の中に IGBT と FWD が各 1 個内蔵された製品。電流定格の大きな領域の製品で、並列接続してさらに大容量エリアに適用されることも多い。
2 in 1	 <p>例: 2MBI450UE-120</p>		製品の中に IGBT と FWD が各 2 個内蔵された製品。3 台一組で使用して PWM インバータを構成するのが一般的。 また、電流定格の大きい領域の製品を並列使用することも多い。
6 in 1	 <p>例: 6MBI450U-120</p>		製品の中に IGBT と FWD が各 5 個内蔵された製品。温度検出用のサーミスタを内蔵しているタイプもある。1 台一組で使用して PWM インバータを構成するのが一般的。 また、並列使用に適した EconoPACK+™ もラインナップされている。
PIM	 <p>例: 7MBR75UB120</p>		7 in 1 とは製品の中にインバータ部 + ブレーキ部で IGBT と FWD が各 7 個内蔵された製品。PIM とは上記 7 in 1 に加えてコンバータ部を内蔵した製品。製品によっては温度検出用のサーミスタや電解コンデンサ充電回路に使用するサイリスタを内蔵したタイプもある。

IGBT モジュールには基本的に 1 in 1、2 in 1、6 in 1、(7 in 1)、PIM の 4 種類が存在し、それぞれこの表に示す回路構成となっています。また、それぞれのタイプの特徴も記載しましたので、素子選定の折りに参考にしてください。

ご 注 意

- このカタログの内容(製品の仕様、特性、データ、材料、構造など)は2004年2月現在のものです。
この内容は製品の仕様変更のため、または他の理由により事前の予告なく変更されることがあります。このカタログに記載されている製品を使用される場合には、その製品の最新版の仕様書を入手して、データを確認してください。
- 本カタログに記載してある応用例は、富士電機の半導体製品を使用した代表的な応用例を説明するものであり、本カタログによって工業所有権、その他権利の実施に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 富士電機デバイステクノロジー(株)は絶えず製品の品質と信頼性の向上に努めています。しかし、半導体製品はある確率で故障する可能性があります。
富士電機の半導体製品の故障が、結果として人身事故、火災等による財産に対する損害や、社会的な損害を起こさぬように冗長設計、延焼防止設計、誤動作防止設計など安全確保のための手段を講じてください。
- 本カタログに記載している製品は、普通の信頼度が要求される下記のような電子機器や電気機器に使用されることを意図して造られています。
・コンピュータ ・OA 機器 ・通信機器(端末) ・計測機器 ・工作機械
・オーディオビジュアル機器 ・家庭用電気製品 ・パーソナル機器 ・産業用ロボット など
- 本カタログに記載の製品を、下記のような特に高い信頼度を持つ必要がある機器に使用をご予定のお客様は、事前に富士電機デバイステクノロジー(株)へ必ず連絡の上、了解を得てください。このカタログの製品をこれらの機器に使用するには、そこに組み込まれた富士電機の半導体製品が故障しても、機器が誤動作しないように、バックアップ・システムなど、安全維持のための適切な手段を講じることが必要です。
・輸送機器(車載、船用など) ・幹線用通信機器 ・交通信号機器
・ガス漏れ検知及び遮断機 ・防災/防犯装置 ・安全確保のための各種装置
- 極めて高い信頼性を要求される下記のような機器には、本カタログに記載の製品を使用しないでください。
・宇宙機器 ・航空機搭載用機器 ・原子力制御機器 ・海底中継機器 ・医療機器
- 本カタログの一部または全部の転載複製については、文書による当社の承諾が必要です。
- このカタログの内容にご不明の点がありましたら、製品を使用する前に富士電機デバイステクノロジー(株)または、その販売店へ質問してください。
本注意書きの指示に従わないために生じたいかなる損害も富士電機デバイステクノロジー(株)とその販売店は責任を負うものではありません。