

富士 第7世代IGBTモジュール Xシリーズ



アプリケーションマニュアル

注意

このマニュアルの内容(製品の仕様、特性、データ、材料、構造など)は2021年7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。このマニュアル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。

本資料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、本資料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。

 **注意**

(1) 輸送と保管

段ボール箱の適切な面を上にして運搬してください。そうしないと製品に予期しないストレスがかかり、端子の曲りや樹脂パッケージ内の歪みなど、影響を及ぼす可能性があります。さらに製品を投げたり落下させたりすると、製品に大きなダメージを与える可能性があります。また水に濡れると破壊や故障の原因になりますので、雨や凍結には十分な配慮をお願いします。輸送中の温度や湿度などの環境条件は、仕様書に記載してありますので厳守してください。

(2) 組み立て環境

パワーモジュールの素子は静電気放電に対して非常に弱いため、組み立て環境におけるESD 対策を、仕様書に記載の範囲内で適切に実施してください。特に、導電性スポンジを制御端子から取り外す時が、最も製品に電氣的ダメージを与える可能性があります。

(3) 動作環境

製品を酸や有機物、腐食性ガス(硫化水素、硫酸ガスなど)にさらされる環境で使用した場合、製品性能や外観を十分確保することができません。

CONTENTS

第1章 Xシリーズの基本コンセプトと特長	1-1
1. Xシリーズの基本コンセプト	1-2
2. Xシリーズチップの特長	1-3
3. Xシリーズパッケージ技術の特長	1-7
4. IGBTモジュールの定格電流拡大と小型化の実現	1-11
5. 型式名の見方	1-13
6. 用語と記号	1-14
第2章 使用上の注意点	2-1
1. 最大接合温度 T_{vj} , T_{vjop}	2-2
2. 短絡(過電流)保護	2-2
3. 過電圧保護と安全動作領域	2-3
4. 並列接続	2-9
5. マウンティングインストラクション	2-10
第3章 第7世代XシリーズRC-IGBTモジュール	3-1
1. 第7世代XシリーズRC-IGBTモジュールの基本コンセプトと特長	3-2
2. 第7世代XシリーズRC-IGBTモジュール系列化構想	3-5

第 1 章 X シリーズの基本コンセプトと特長

1. X シリーズの基本コンセプト	1-2
2. X シリーズチップの特長	1-3
3. X シリーズパッケージ技術の特長	1-7
4. IGBT モジュールの定格電流拡大と小型化の実現	1-11
5. 型式名の見方	1-13
6. 用語と記号	1-14

本章では当社最新世代である第 7 世代 X シリーズ IGBT モジュールの基本コンセプトと特長について、説明します。

1. X シリーズの基本コンセプト

近年、化石燃料の枯渇や地球温暖化防止の観点から、エネルギー効率の改善と二酸化炭素排出量の削減が求められています。そのため、モータドライブなどの産業用途、スイッチング電源などの民生分野、電気自動車や鉄道、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーなど、様々な分野においてパワー半導体を用いた高効率な電力変換装置の適用が広がっており、その市場は急速に拡大しています。パワー半導体素子の中でも、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは、その扱い易さ、高速スイッチング、大電力における高効率といった特長を有するため、その適用分野が広がっています。

IGBT モジュールは市場に登場して以来、多くの技術革新により大幅な小型化、低損失化を達成し、これにより電力変換装置の高効率化、小型化とコストダウンに貢献してきました。しかし、IGBT モジュールの小型化はパワー密度の上昇による IGBT 接合温度の上昇と、それにとまう信頼性の低下を招くため、さらなる IGBT モジュールの小型化と高効率化を実現していくためには、IGBT チップの特性向上のみならず、パッケージ技術の革新による放熱性と信頼性の向上が不可欠となってきます。富士電機では、この市場要求に応えるため、新たなチップ技術およびパッケージ技術を適用した第 7 世代 IGBT モジュール「X シリーズ」を製品化しました。

● インバータ損失低減(チップ技術)

第 7 世代 X シリーズは、モジュールを構成する IGBT 素子の厚みを、当社従来製品の第 6 世代 V シリーズから更に薄くし、トレンチ構造を微細化することで、素子構造を最適化しました。これにより第 6 世代 V シリーズに比べてインバータ動作時の電力損失を低減しました。

● 連続運転温度 $T_{vjop}=175^{\circ}\text{C}$ の実現による出力電流アップ(パッケージ技術)

第 7 世代 X シリーズでは、新規材料の開発(高放熱絶縁基板/高耐熱ゲル/高強度はんだ)やモジュール構造の最適化(ワイヤ径/長さ)により、高温動作時の安定性や耐久性を高め、連続動作時のジャンクション温度 T_{vjop} の最大値を従来の 150°C から 175°C に拡大しました。これによりモジュールのサイズを維持しながら出力電流を増やすことを実現しました。

● IGBT モジュールの定格電流拡大と小型化の実現

上記の性能向上により、IGBT モジュールのサイズを維持しながら定格電流を拡大しました。

例) 1200V EconoPIM™2 パッケージ(最大定格電流: 第 6 世代:50A → 第 7 世代: 75A、50%定格電流拡大)

また最大定格電流の拡大により、1200V 75A 定格品は、第 6 世代 V シリーズでは EconoPIM™3 パッケージでのラインナップでしたが、第 7 世代 X シリーズでは EconoPIM™2 パッケージを使用することを可能としました。これにより電力変換装置の小型化及びトータルコスト削減に貢献します。

注) EconoPIM™は Infineon Technologies 社の登録商標です。

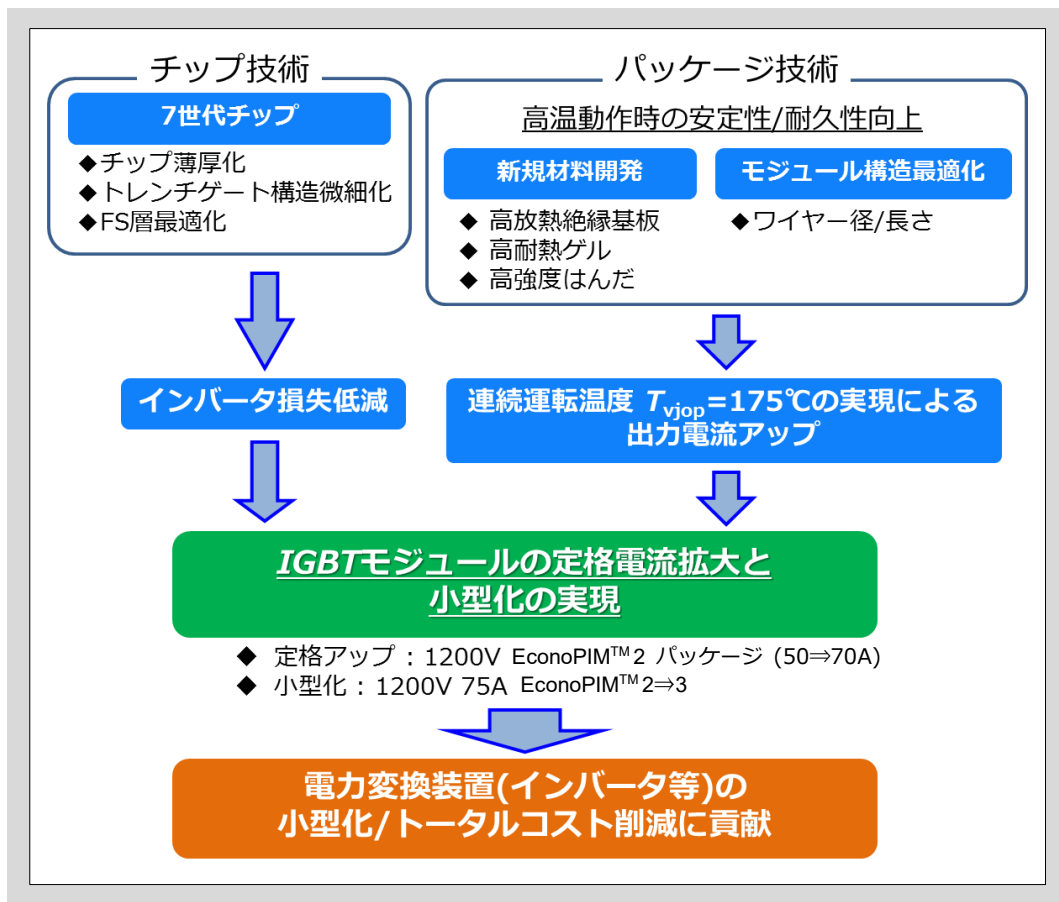


図 1-1 第 7 世代 X シリーズ IGBT モジュールの基本コンセプト

注) EconoPIM™ EconoPIM™は Infineon Technologies 社の登録商標です。

2. X シリーズチップの特長

図 1-2 に第 6 世代 V シリーズと第 7 世代 X シリーズのチップ断面図を示します。第 7 世代の IGBT チップの構造は、基本的に第 6 世代 V シリーズで技術開発したフィールドストップ (Field Stop) 構造とトレンチゲート構造を継承しています。第 7 世代 X シリーズは第 6 世代 V シリーズに比べて薄いウエハを適用することによってドリフト層の厚さが減少しています。このように薄いドリフト層を適用することにより、第 7 世代 X シリーズでは IGBT チップのオン電圧の低減を実現しています。一般に、ドリフト層を薄くした場合、ターンオフ時の電圧振動や耐圧の低下が懸念されますが、フィールドストップ層を最適化することによって電圧振動を抑制し、同時に十分な耐圧を確保することによりチップの更なる薄厚化を達成しました。また、第 6 世代 V シリーズと比較してチップ表面のトレンチゲート構造を微細化・最適化することで、導通時 p チャネルからのホールの引き抜きを抑制し、表面側のキャリア濃度を高めることで IE (Injection Enhanced) 効果を増強し、オン電圧とターンオフ損失のトレードオフ関係を大幅に改善しました。

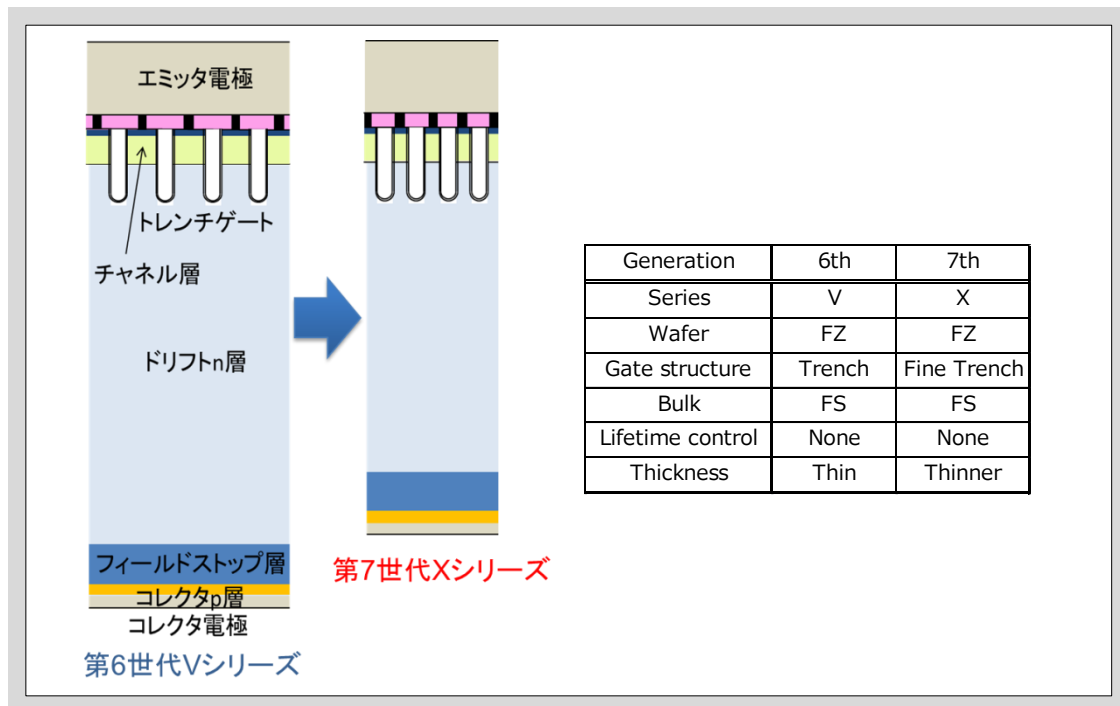


図 1-2 X シリーズ IGBT チップ断面図

X シリーズチップの主な特長

1. ドリフト層の薄厚化
 - オン電圧の低減
 - スイッチング損失の低減
2. トレンチゲート構造の微細化
 - オン電圧の低減
 - スイッチング損失の低減
3. フィールドストップ層の最適化
 - 電圧振動の抑制
 - 高温時の漏れ電流を低減

2.1 オン電圧とターンオフ損失のトレードオフの改善

図 1-3 に第 7 世代 X シリーズと第 6 世代 V シリーズの IGBT チップ出力特性の比較を示します。この図に示すように定格電流で比較した場合、第 7 世代 X シリーズのオン電圧:コレクター-エミッタ電圧 $V_{CE(sat)}$ は約 0.25V 低減しました。このオン電圧の低減により、IGBT に電流が流れるときに発生する導通損失(電流×オン電圧)の低減を実現し、電力変換装置のさらなる高効率化が可能となります。

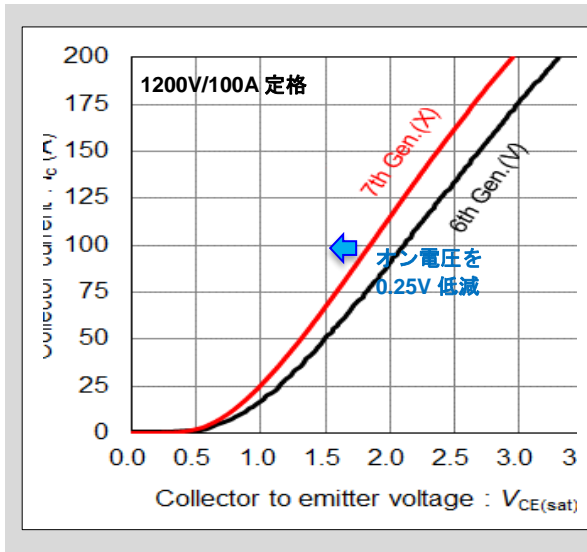


図 1-3 IGBT 出力特性の改善

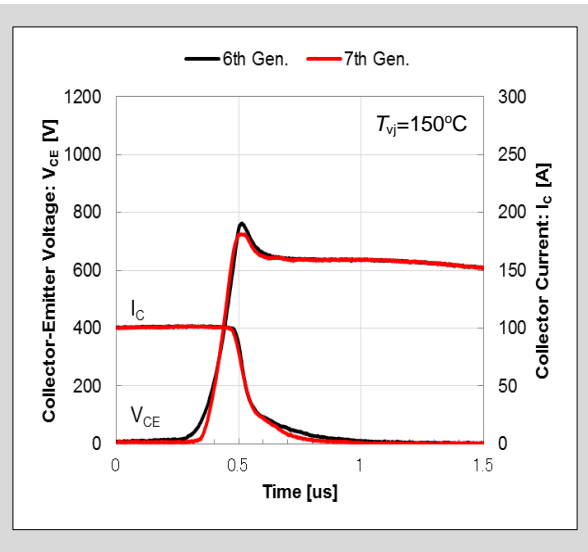


図 1-4 IGBT ターンオフ波形の比較

図 1-4 に第 7 世代 X シリーズと第 6 世代 V シリーズのターンオフスイッチング波形を示します。第 7 世代 X シリーズは、前述した薄いドリフト層の適用によるターンオフ時のテール電流の大幅低減と、IE 効果の増強によって、V シリーズに対して 10% のターンオフ損失の低減を実現しました。

図 1-5 に IGBT のオン電圧とターンオフ損失のトレードオフ関係を示します。一般的に、IGBT のオン電圧とターンオフ損失はトレードオフの関係にあることはよく知られていますが、第 6 世代の IGBT と比較した場合、第 7 世代ではオン電圧を 0.25V 低減しており、大幅に特性改善しています。

これらの改良により、第 7 世代の IGBT チップは損失改善と同時にチップサイズの低減も実現しています。

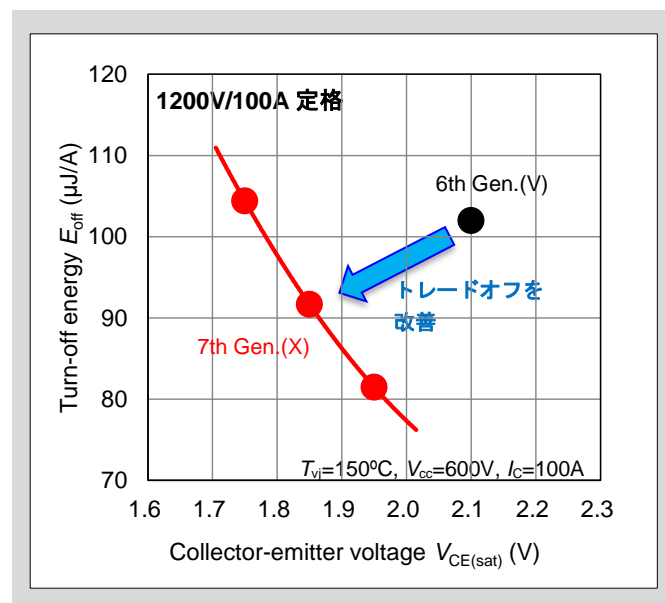


図 1-5 IGBT ターンオフ損失-オン電圧トレードオフ特性の改善

2.2 漏れ電流の改善

IGBT 素子はコレクタ-エミッタ間逆バイアス電圧印加時の漏れ電流が高温時に増加する特性があります。この高温時の漏れ電流によって発生する損失によりジャンクション温度はさらに上昇し、この温度上昇によって漏れ電流がさらに増加し、場合によっては熱暴走破壊に至る場合があります。第7世代 X シリーズ IGBT 素子は、フィールドストップ層を最適化することにより高温時の漏れ電流を第6世代 V シリーズに比べ 28%の削減し、これにより熱暴走のリスクを低減するとともに、連続動作時のジャンクション温度 175°C保証を実現しました。

2.3 FWD 逆回復特性の改善

第7世代 X シリーズ IGBT モジュールでは、IGBT チップの特性だけでなく、IGBT に並列に接続しているダイオード (FWD : Free Wheeling Diode) の特性改善も実現しています。

X シリーズ FWD 素子はドリフト層の厚みを薄くすることで順方向電圧 (V_F) を低減しています。しかしながら、一般に FWD のドリフト層を薄くすると、逆回復時に空乏層が裏面に到達しやすくなるため、逆回復時に電圧振動が発生する問題が知られています。X シリーズ FWD 素子では、チップ裏面構造を最適化することによって、逆回復動作時の空乏層の伸長を抑制し、空乏層が裏面に到達するのを防ぐことで、逆回復動作時の電圧振動およびサージ電圧の抑制を達成しました。図 1-6 に第7世代 X シリーズと第6世代 V シリーズの FWD 特性の比較を示します。図 1-6(a)に示すように逆回復ピーク電流およびテール電流を減少し、ソフトな逆回復波形を実現しています。また同図(b)に示すように、逆回復損失と順方向電圧のトレードオフ関係を改善し、同一の V_F の条件で第6世代と比較して約 30%の逆回復損失低減を達成しました。

一般に、スイッチング時にモジュールから放射されるノイズ (EMI: Electro Magnetic Interference) はスイッチング波形の dv/dt に依存することが知られています。逆回復波形をソフトにして dv/dt の値

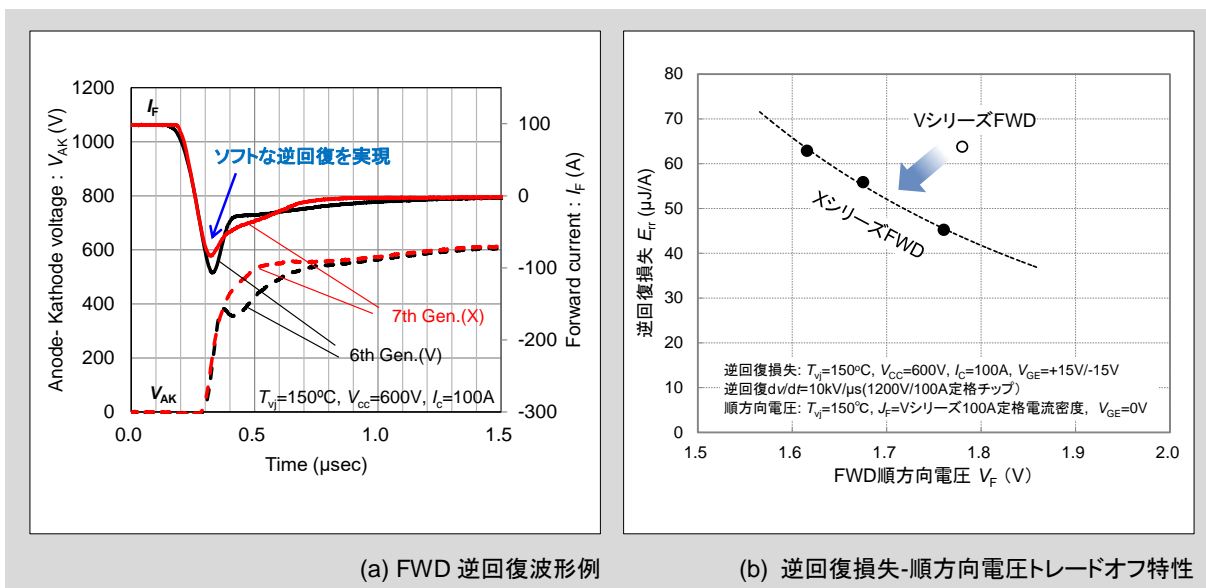


図 1-6 X シリーズ FWD 特性の改善

を抑制することで EMI ノイズの改善を図っています。

3. X シリーズパッケージ技術の特長

第 7 世代 X シリーズでは、連続動作時のジャンクション温度 $T_{vjop}=175^{\circ}\text{C}$ を保証しました。この実現のためには、IGBT および FWD チップの高効率化・小型化が不可欠ですが、一方でチップの小型化によるパワー密度の上昇は、チップ温度の上昇とそれに伴う信頼性の低下が課題となります。そのため第 7 世代 IGBT モジュールでは、新規材料を用いた高放熱パッケージの開発によってチップ温度の上昇を抑制するとともに、高信頼性・高耐熱パッケージを新規に開発し、またモジュール構造を最適化することによって、この課題を解決しました。

- 新規材料の開発
 - 高放熱セラミック絶縁基板 → 放熱性、信頼性の向上
 - 高耐熱シリコンゲル → 175°C での長期絶縁性の確保
 - 高強度はんだ → ΔT_{vj} パワーサイクル耐量の向上
- モジュール構造の最適化
 - ワイヤ径/長さの最適化 → ΔT_{vj} パワーサイクル耐量の向上

3.1 高放熱セラミック絶縁基板の開発

IGBT および FWD チップの放熱性を改善する為に、第 7 世代 IGBT モジュールでは、チップからヒートシンクまでの熱抵抗のうち、最も大きな部分を占める絶縁基板の熱抵抗を改善しました。絶縁基板の材料としては、安価な Al_2O_3 (アルミナ) や熱伝導率が高く熱抵抗の小さい AlN (窒化アルミ) などが広く使われており、近年の高出力動作・小型化の要求に応えるためには熱抵抗の小さい AlN 絶縁基板の適用が望ましいと考えられています。しかし、従来の AlN 絶縁基板はセラミックスの板厚が厚いために剛性が高く、ケース温度 (T_c) が上昇した場合に基板下のはんだに加わる熱応力が増加して信頼性が低下するといった課題がありました。

そこで、第 7 世代 X シリーズモジュールでは、図 1-6 に示すように AlN セラミック層を従来よりも薄くし、高放熱・低熱抵抗と長期信頼性を確保した新たな絶縁基板を開発しました。一般的に、 AlN を薄化した場合、絶縁耐量の低下やセラミックス基板の初期強度低下が懸念されますが、セラミックス焼結条件の最適化によってこれらの課題を解決しました。

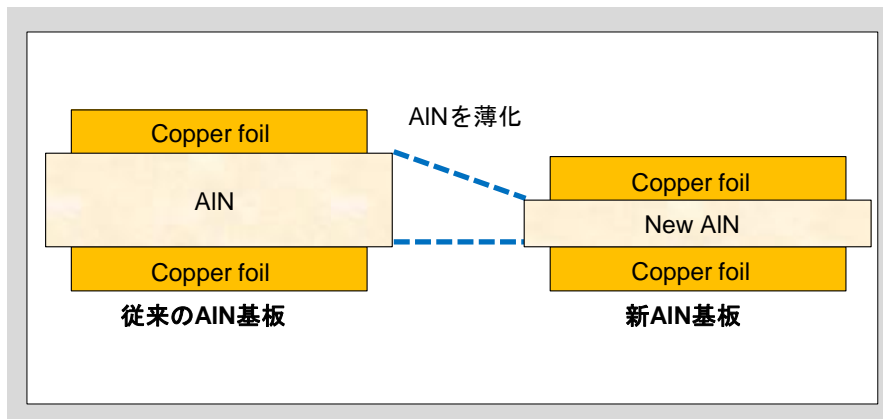


図 1-7 高放熱 AlN 基板の断面構造比較

図 1-8 に、従来の Al_2O_3 基板と新開発の高放熱 AlN 絶縁基板について、チップ-ケース間の熱インピーダンス ($Z_{\text{th(j-c)}}$) の比較を示します。ここに示すように高放熱 AlN 絶縁基板は、 Al_2O_3 基板に対し熱抵抗を約 45%低減しています(同一チップサイズでの比較)。この新 AlN 絶縁基板を、パワー密度やチップ温度の上昇が特に厳しくなる製品に適用することで、パワー密度の増加による温度上昇と長期信頼性の課題を解決し、モジュールの小型化と高温動作保証を実現しました。

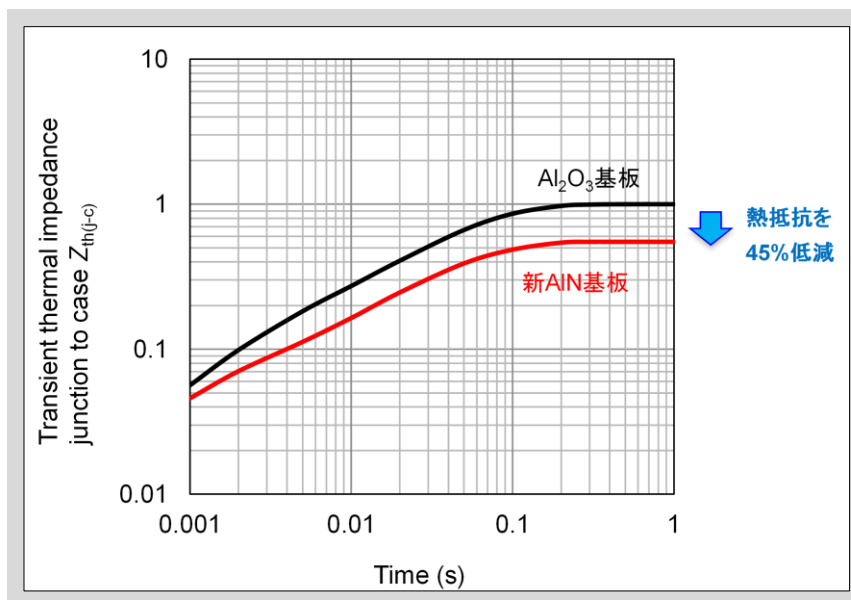


図 1-8 Al_2O_3 基板と高放熱新 AlN 基板の熱抵抗比較

3.2 高耐熱シリコンゲルの開発

第 6 世代 V シリーズでの連続動作時の最大ジャンクション温度 (T_{vjop}) は 150°C でしたが、第 7 世代 X シリーズでは 175°C の動作温度を保証しています。IGBT モジュールの長期信頼性を保証するうえで

もう一つ課題となるのが、モジュール内部に使われているシリコンゲルの高温動作における劣化です。シリコンゲルは IGBT モジュールの絶縁耐圧を確保するために使われていますが、一般にシリコンゲルは高温になるほど硬化しやすく、硬化したゲルはクラック（裂け）を引き起こす懸念があります。このクラックによってゲルの絶縁被覆が破壊し絶縁性能が低下してしまうため、高温動作時の動作保証ができないという課題がありました。この課題を克服するため、新たに高耐熱シリコンゲルを開発しました。この高耐熱シリコンゲルでは、材料組成を最適化することで高温下での硬化を抑制しており、高温環境下での放置試験（215°C、2000 時間）でもクラックの発生が無いことを実験により確認しています。

図 1-9 に環境温度とシリコンゲルの寿命の関係を示します。横軸が環境温度（値が小さいほど高温）、縦軸がゲルの寿命を表します。175°Cにおける高耐熱シリコンゲルの寿命は、従来シリコンゲルに対して約 5 倍に改善し、従来シリコンゲルの 150°Cにおける寿命と同等の寿命をとっています。これにより、X シリーズモジュールの 175°Cの高温下における絶縁性能は、従来製品の 150°Cでの絶縁性能と同等の信頼性を確保しました。

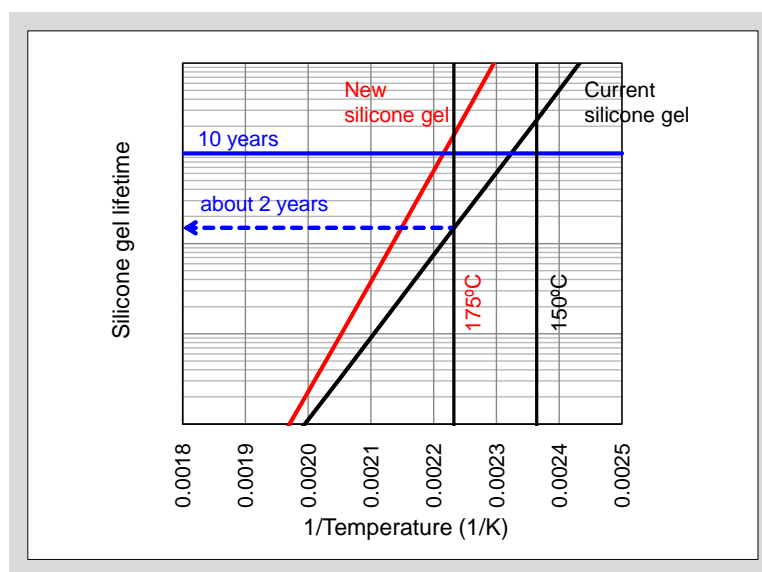


図 1-9 高耐熱シリコンゲルの高温時の長寿命化

3.3 高強度はんだの開発とワイヤ径/長さの最適化

IGBT モジュールの長期信頼性を確保するためには、繰り返しの熱ストレスに対する耐量（ ΔT_{vj} パワーサイクル耐量）の向上が求められます。

図 1-10 に IGBT モジュールの断面構造図を示します。IGBT モジュールは、銅などのベースプレートに絶縁のためのセラミック基板がはんだ付けされ、セラミック基板の銅配線パターン上に IGBT/FWD 半導体チップがはんだ接合されています。そして半導体チップと銅配線パターンはアルミなどのワイヤによって接続され、回路を構成しています。電力変換装置が動作し IGBT モジュールの温度が上昇すると、モジュール内の各材料（銅、セラミック、半導体チップ）の熱膨張率が異なるため、それらの接合部に機械的な応力が加わります。半導体チップのジャンクション温度 T_{vj} が繰り返し上下するような

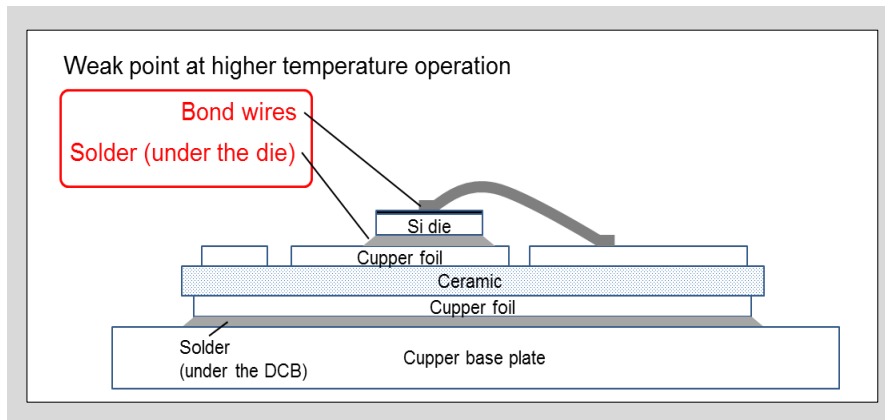


図 1-10 モジュール断面構造図

使用条件では、その接合部であるチップ上ワイヤとチップ直下のはんだ接合部に繰り返しの熱応力が加わり摩耗劣化が進行します。また、この劣化の進行速度は T_{vj} が高いほど加速されます。

第 7 世代 X シリーズでは、このような $T_{vj}=175^{\circ}\text{C}$ 連続動作においても十分な ΔT_{vj} パワーサイクル耐量を確保するため、チップ上ワイヤに対してはワイヤ径と長さの最適化を行い、チップ下はんだに対しては新規に開発した高強度はんだ材料を適用しています。

図 1-11 に第 7 世代 IGBT モジュールと第 6 世代 IGBT モジュールの ΔT_{vj} パワーサイクル耐量の比較を示します。第 7 世代は第 6 世代に対して約 2 倍の耐量を実現しました ($T_{vj,max}=150^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T_{vj}=50^{\circ}\text{C}$)。また、 $T_{vj,max}=175^{\circ}\text{C}$ 動作においても、第 6 世代の $T_{vj,max}=150^{\circ}\text{C}$ と同等以上のパワーサイクル耐量を確保することで、 $T_{vj}=175^{\circ}\text{C}$ 動作保証と高信頼性を実現しました。

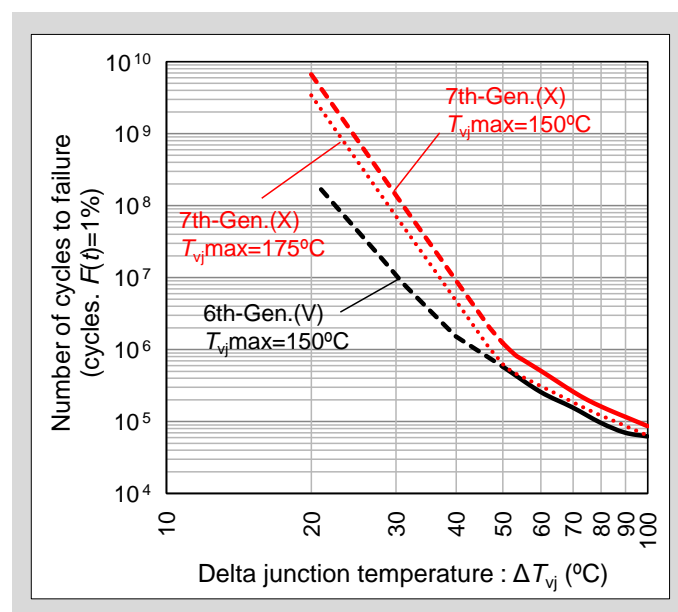


図 1-11 ΔT_{vj} パワーサイクル耐量

4. IGBT モジュールの定格電流拡大と小型化の実現

これまで述べてきたように、第7世代Xシリーズでは、IGBTとFWDのチップ技術の改善による損失低減と、より使いやすい素子への進歩を果たしました。またパッケージ技術の革新により、放熱性・信頼性の大幅な向上を図りました。これら技術を適用することにより、従来に比べIGBTモジュールの高効率化、小型化、高パワー密度化、高温動作での高信頼性を実現しました。

図1-12に第6世代Vシリーズと第7世代Xシリーズ1200V/75A定格の製品をインバータ装置に適用した際のIGBTモジュールの電力損失とIGBTジャンクション温度の比較（計算値）を示します。第7世代Xシリーズでは、前述したようにIGBTとFWDのオン電圧を低減した結果、IGBTとFWDの導通損失（ P_{sat} 、 P_f ）が低減しています。またIGBTのスイッチング特性の改善によるターンオフ損失（ P_{off} ）の低減、FWD逆回復特性の改善により、IGBTのターンオン損失（ P_{on} ）とFWDの逆回復損失（ P_{rr} ）の低減を実現しました。これにより第7世代Xシリーズではインバータ回路の約10%の損失低減と高効率化が期待できます。また、発生損失の低減による効果と、高放熱絶縁基板やパッケージ技術の最適化により、IGBTのジャンクション温度も約10°Cの低減を達成しています

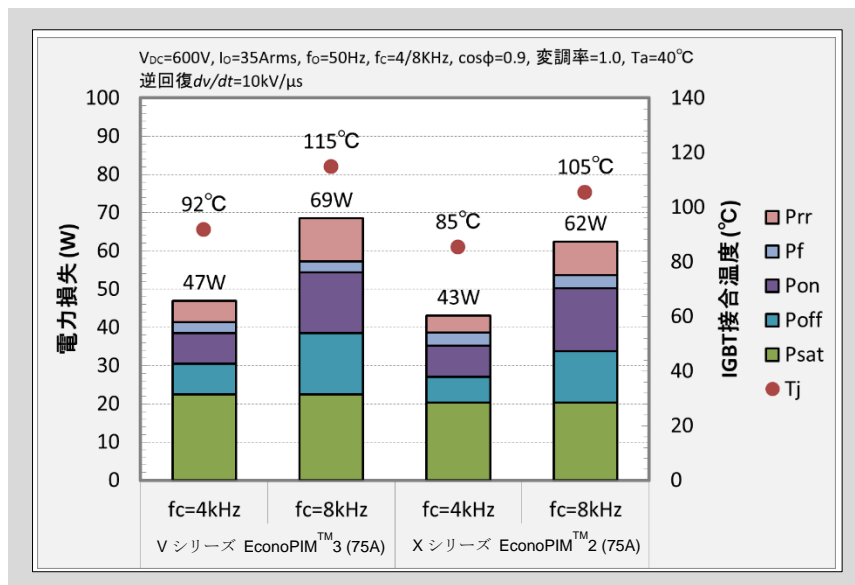


図 1-12 インバータ装置での発生損失と IGBT ジャンクション温度

注):EconoPIM™ EconoPIM™は Infineon Technologies 社の登録商標です。

また、第7世代Xシリーズでは、高温でのIGBTチップの漏れ電流の低減技術の実現や新規開発した高耐熱ゲルの適用により、ジャンクション温度175°Cでの連続動作を保証しています。インバータの損失低減と高温動作保証によって、図1-13に示すようにインバータの動作範囲を従来の第6世代よりも拡大し、同一サイズでのインバータの出力電流を約35%増加することが可能となります。

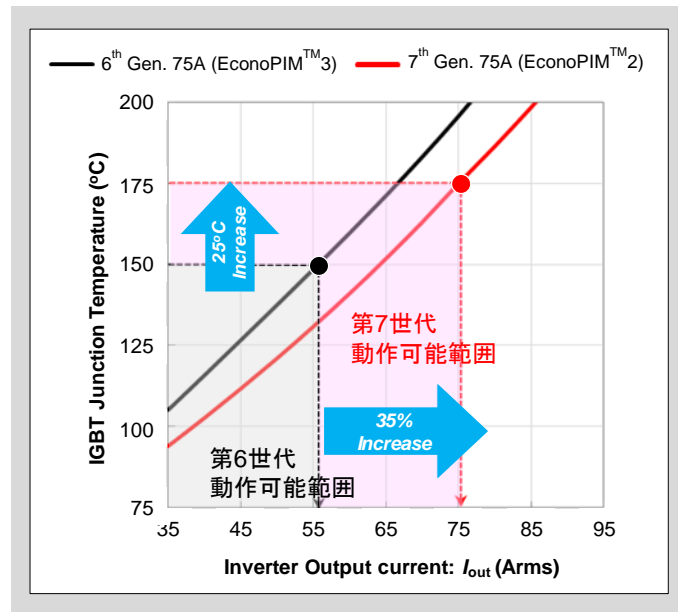


図 1-13 インバータ出力電流と IGBT 接合温度の関係

さらに第 7 世代 X シリーズでは、発生損失の低減、高パワー密度化、高温動作保証によって従来と同一パッケージによる電流定格の拡大が可能となりました。例えば、1200V 系列の EconoPIM™2 パッケージにおいては、第 6 世代 V シリーズでは最大定格電流は 50A までのラインナップでしたが、第 7 世代 X シリーズでは最大定格電流が 75A まで拡大しています。この効果により、従来の電力変換装置での筐体サイズを変えることなく、出力電力の増加が可能となります（図 1-14）。

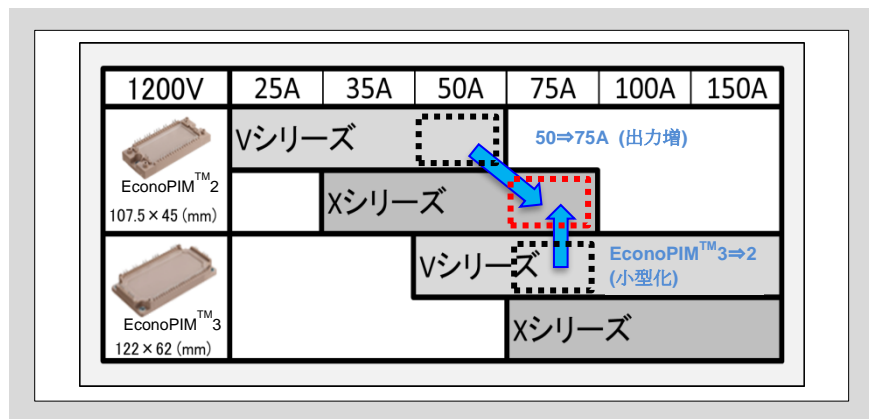
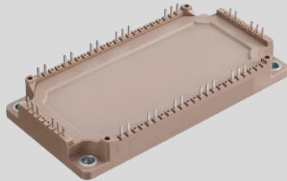
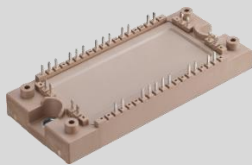


図 1-14 EconoPIM™ シリーズラインナップ(1200V 定格)

一方、IGBT モジュールの電流定格の拡大は、電力変換装置の小型化にも寄与することができます（図 1-14）。例えば表 1-1 に示すように、1200V/75A 定格の IGBT モジュールは第 6 世代 V シリーズでは EconoPIM™3 パッケージ（122mm x 62mm）でしたが、第 7 世代 X シリーズでは同定格の IGBT モジュールをより小さいサイズの EconoPIM™2 パッケージ（107.5mm x 45mm）で実現しました。これによりモジュールの設置面積（フットプリントサイズ）が 36%低減しました。

注)EconoPIM™ EconoPIM™は Infineon Technologies 社の登録商標です。

表 1-1

	第 6 世代 V シリーズ	第 7 世代 X シリーズ
パッケージ外観	 EconoPIM™3 パッケージ	 EconoPIM™2 パッケージ
電圧定格/電流定格	1200V / 75A	1200V / 75A
電流密度	100%	160%
設置面積	122mm x 62mm 7564mm ² (100%)	107.5mm x 45mm 4836mm ² (64%)
モジュール重量	310g (100%)	200g (65%)

以上述べてきたように、第 7 世代 X シリーズは、IGBT と FWD チップの大幅な損失低減と、高放熱・高信頼性パッケージの開発によって、モジュールサイズ小型化、電力損失低減、出力アップを両立しているため、電力変換装置の高効率化、出力電流拡大やキャリア周波数向上、小型化を可能とし、システム全体でのコストの削減に貢献します。

注) EconoPIM™ EconoPIM™は Infineon Technologies 社の登録商標です。

5. 型式名の見方

第 7 世代 X シリーズ IGBT モジュールの製品型式名の見方および命名ルールについて表 1-2 に示します。

表 1-2 型式名の見方 例) 6MBI100XBA120-50

6	MB	I	100	X	B	A	120	-50
IGBT スイッチ数	モジュール の種類	内部構成	電流定格	IGBT チップ世代	パッケージ		電圧定格	その他添え字
	MB: IGBT モジュール	I: Standard module R: Power integrated modules P: Intelligent power modules	$I_C \times 1$ (A)	X: X series (7 th Gen.) XR: X series (7 th Gen.)			V_{CES} x1/10 (V)	< 50: RoHS 非対応 ≥ 50: RoHS 対応

6. 用語と記号

X シリーズ IGBT モジュール製品のデータシートおよび仕様書に使用されている最大定格/電気特性の用語と記号が第 6 世代 V シリーズ以前の製品と異なる場合があります。X シリーズと V シリーズ以前の製品について、主な用語と記号の対比を表 1-3 に示しますので、V シリーズ以前の製品と比較する場合の参考として下さい。基本的に IEC 規格 (IEC60747) に準拠した表記へと変更しますが、一部の製品では表記が V シリーズと同じ場合もあります。

表 1-3 記号と用語

V シリーズ以前		X シリーズ	
用語	記号	用語	記号
コレクタ電流 Collector current	I_C	コレクタ電流 collector current	I_C
	I_C pulse	繰返しピークコレクタ電流 Repetitive peak collector current	I_{CRM}
	$-I_C$	FWD 順電流 Forward current	I_F
	$-I_C$ pulse	FWD 繰返しピーク順電流 Repetitive peak forward current	I_{FRM}
最大損失 Collector Power dissipation	P_C	最大損失 Total Power dissipation	P_{tot}
接合部温度 Junction temperature	T_J	接合部温度 Virtual junction operating temperature	T_{vj}
連続動作時接合部温度 Junction temperature (Switching condition)	T_{Jop}	連続動作時接合部温度 Operating virtual junction temperature	T_{vjop}
絶縁耐圧 Isolation voltage	V_{iso}	絶縁耐圧 Isolation voltage	V_{isol}
締付けトルク Screw torque	-	Mounting torque of screws to heat sink	M_s
		Mounting torque of screws to terminals	M_t
ケース-ヒートシンク間熱抵抗値 Thermal resistance (case to heat sink)	$R_{th(c-f)}$	ケース-ヒートシンク間熱抵抗値 Thermal resistance (case to heat sink)	$R_{th(c-s)}$

Xシリーズ RC-IGBT モジュール製品のデータシートおよび仕様書に使用されている最大定格/電気特性について、IGBT と FWD が一体となったことにより、FWD に関する用語と記号が Xシリーズ IGBT モジュール製品と異なっています。異なる理由について、IEC では電流の流れる方向を順方向と定義しています。このため RC-IGBT と一体となっている FWD は従来の FWD と順方向の定義が逆になります(図 1-15 参照)。Xシリーズ IGBT モジュール製品と Xシリーズ RC-IGBT モジュール製品について、FWD に関する用語と記号の対比を表 1-4 に示しますので、IGBT モジュール製品と比較する場合の参考として下さい。基本的には IEC 規格 (IEC60747) に準拠した表記としています。

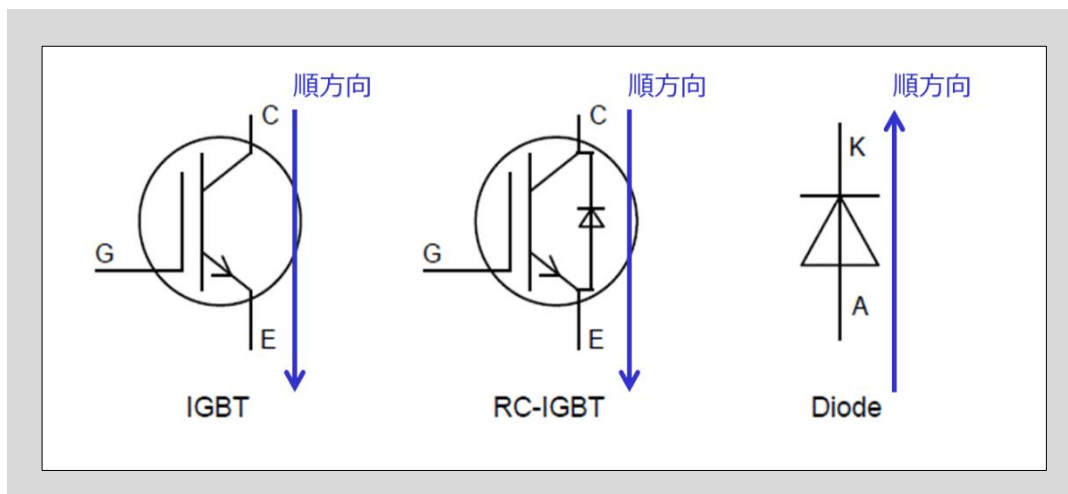


図 1-15 順方向電流の定義

表 1-4 Xシリーズ IGBT モジュールとXシリーズ RC-IGBT モジュールとの記号と用語比較

Xシリーズ IGBT モジュール		Xシリーズ RC-IGBT モジュール	
用語	記号	用語	記号
FWD 順電流 Forward current	I_F	逆導通電流 Reverse-conducting current	I_{RC}
FWD 繰返しピーク順電流 Repetitive peak forward current	I_{FRM}	繰返しピーク逆導通電流 Repetitive peak reverse-conducting current	I_{RCRM}
FWD 順電圧 Forward voltage	V_F	逆導通電圧 Reverse-conducting voltage	V_{RC}
逆回復時間 Reverse recovery time	t_{rr}	順回復時間 Forward recovery time	t_{fr}
逆回復損失 Reverse recovery energy	E_{rr}	順回復損失 Forward recovery energy	E_{fr}

第 2 章 使用上の注意点

1. 最大接合温度 T_{vj} , T_{vjop}	2-2
2. 短絡(過電流)保護	2-2
3. 過電圧保護と安全動作領域	2-3
4. 並列接続	2-9
5. マウンティングインストラクション	2-10

第7世代 X シリーズ IGBT モジュールは、第5世代 U シリーズおよび第6世代 V シリーズで技術開発した Field Stop (FS) 構造とトレンチゲート構造を継承するとともに、更なるウェーハ厚の薄厚化、トレンチ構造の最適化を行いました。これにより更なる特性改善を実現しました。

本章では第7世代 X シリーズ IGBT モジュールの使用上の注意点について説明します。

1. 最大接合温度 T_{vj} , T_{vjop}

第7世代 X シリーズ IGBT モジュールは連続運転時の最大接合温度 T_{vjop} が 175°C ですので、連続運転時にはこの温度以下となるように動作条件を決定してください。この温度を超えて使用すると、パワーサイクル耐量などの製品寿命の低下を招く可能性がありますので注意してください。

2. 短絡(過電流)保護

IGBT が短絡状態になると IGBT のコレクタ電流が増加し、所定の値を超えるとコレクタ-エミッタ間 (C-E 間) 電圧 V_{CE} が急増します。この特性により、短絡時のコレクタ電流は一定の値以下に抑制されますが、IGBT には高電圧・大電流の大きな責務が印加された状態になりますので、可能な限り短時間でこの責務を取り除く必要があります。

図 2-1 に 650V および 1200V 系列の X シリーズにおける短絡発生時の印加電圧 V_{CC} と短絡耐量 (短絡時間) の相関関係を示します。短絡検出時間に関しては、アプリケーションの動作条件とともに本相関関係を参考に設定してください。

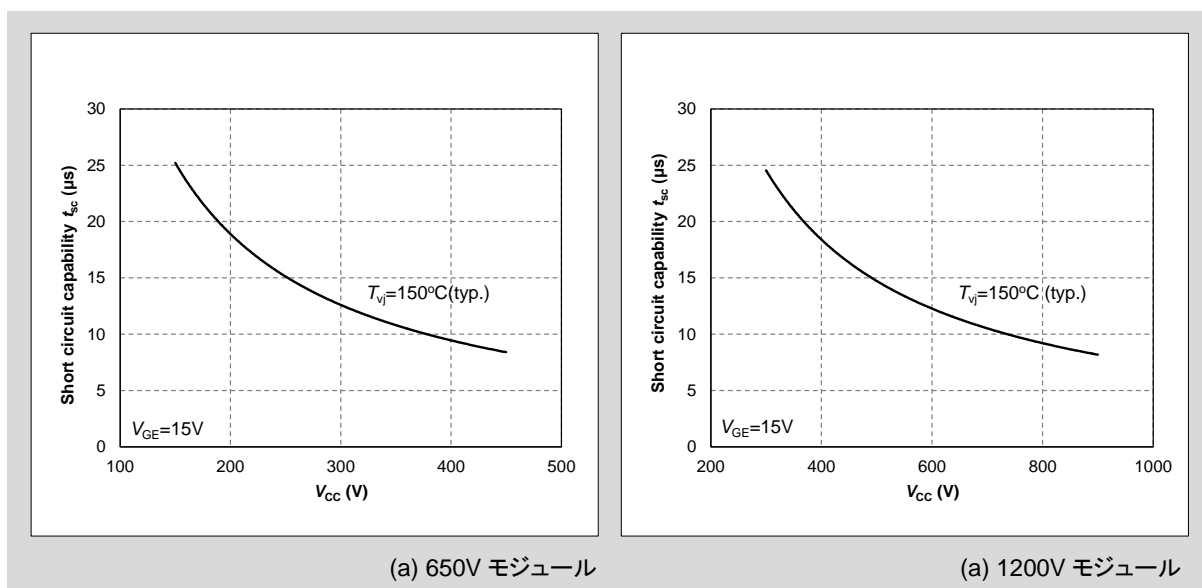


図 2-1 X シリーズ IGBT モジュールの短絡耐量の印加電圧 V_{CC} 依存性 ($V_{GE} = 15\text{V}$)

3. 過電圧保護と安全動作領域

3.1 過電圧保護

IGBT はスイッチング速度が速いため、IGBT ターンオフ時、または FWD 逆回復時に高い di/dt を発生し、モジュール周辺の配線インダクタンスとその di/dt によってサージ電圧が発生します。このサージ電圧が最大定格電圧を超えると過電圧印加状態となり、最悪の場合には破壊に至ります。これを抑制するためには、一般的にはスナバ回路を付加する、ゲート抵抗 R_G を調整する、主回路のインダクタンスを低減するなどの方法があります。

図 2-2 にターンオフ波形と逆回復波形の概略図を示すとともに、サージ電圧の定義を示します。IGBT のターンオフ時に IGBT のコレクタ-エミッタ間に発生するサージ電圧を V_{CEP} 、FWD の逆回復時に FWD のアノード-カソード間に発生するサージ電圧を V_{AKP} と定義しています。

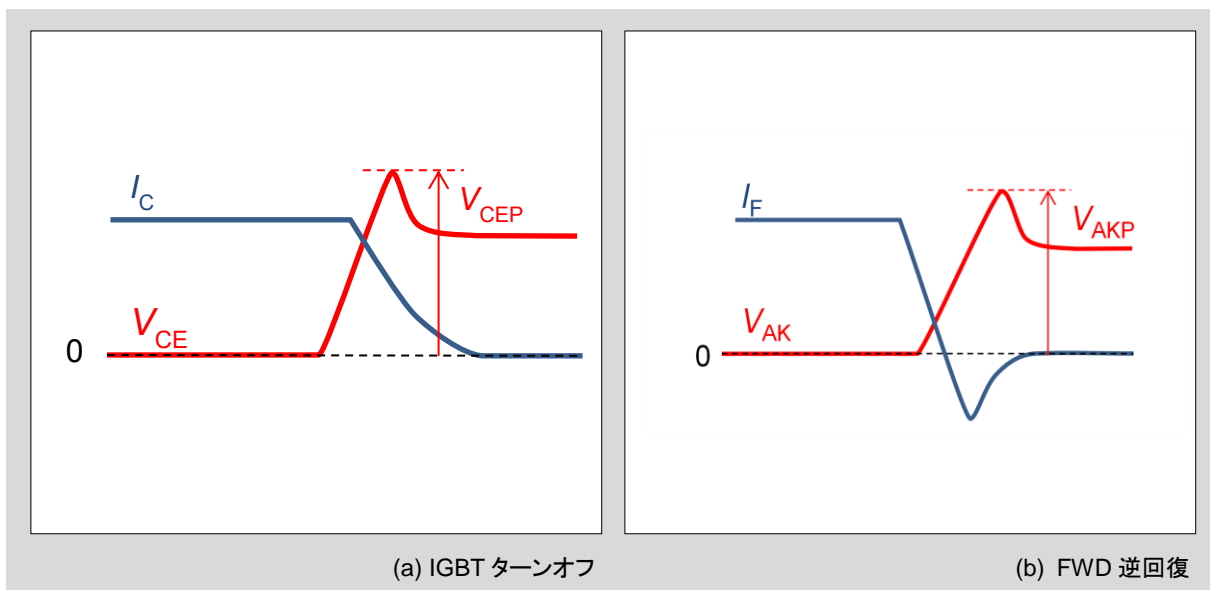


図 2-2 IGBT ターンオフ波形、FWD 逆回復波形の概略図とサージ電圧

サージ電圧の実際の特徴について、X シリーズの IGBT モジュール 7MBR100XRA065-50 (650V/100A) および 7MBR100XNA120-50 (1200V/100A) を例としてその特徴を以下に述べます。

図 2-3 に IGBT ターンオフ時のサージ電圧 V_{CEP} の主回路浮遊インダクタンス (L_s) 依存性の例を示します。この図からわかるように、 L_s が大きくなるとサージ電圧 V_{CEP} が高くなっていることがわかります。そのため、サージ電圧を抑制するためには、主回路配線をラミネート構造にするなど浮遊インダクタンスを小さくする設計が求められます。

図 2-4 に V_{CEP} および FWD 逆回復時のサージ電圧 V_{AKP} の印加電圧 V_{CC} 依存性の一例を示します。 V_{CC} が高くなるほどサージ電圧 V_{CEP} および V_{AKP} は高くなります。

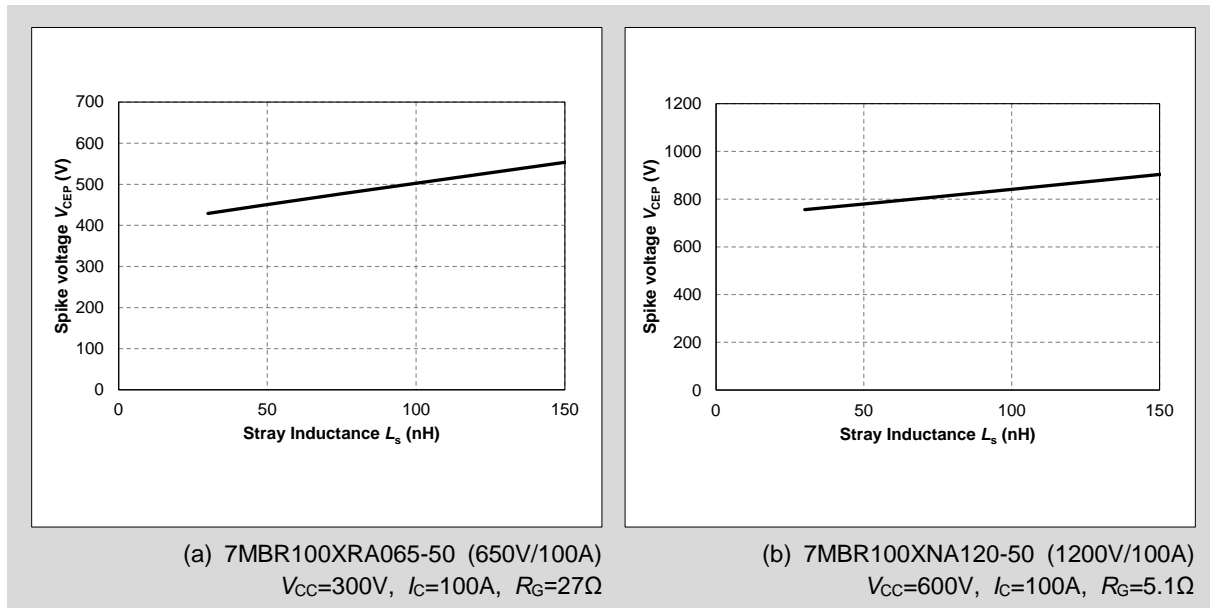


図 2-3 IGBT ターンオフサージ電圧の浮遊インダクタンス L_s 依存性の例

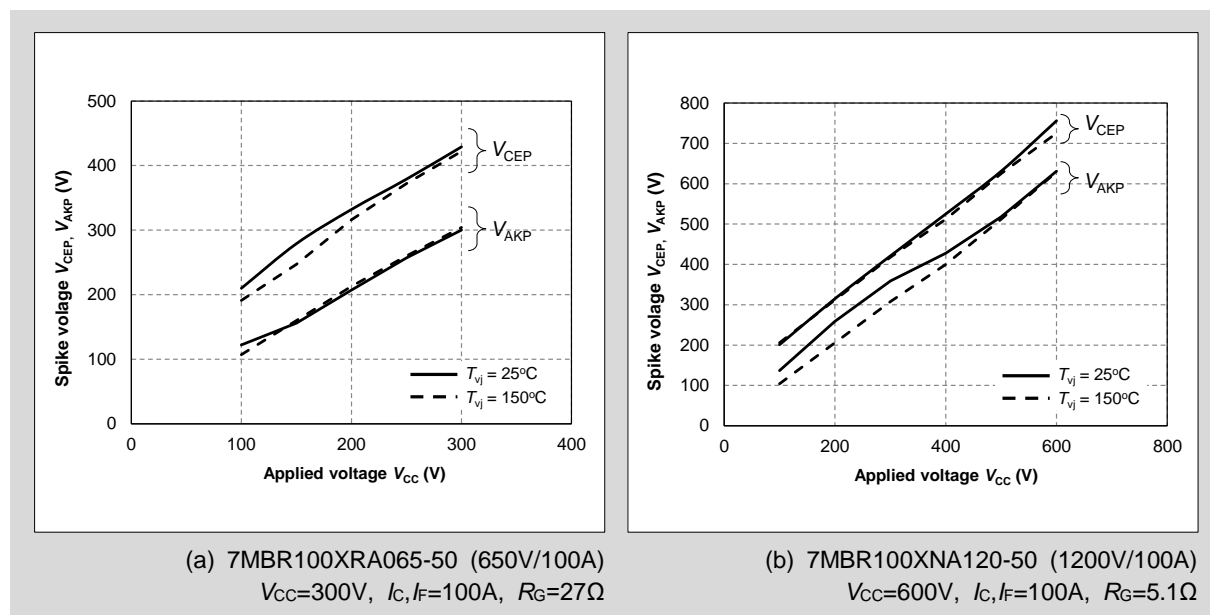


図 2-4 IGBT ターンオフ、FWD 逆回復時におけるサージ電圧の印加電圧 V_{CC} 依存性の例

図 2-5 に V_{CEP} および V_{AKP} のコレクタ電流 I_C 依存性の一例を示します。 V_{CEP} は I_C が大きいほど高くなります。一方 V_{AKP} は I_C が低電流の場合に高くなる傾向にあり、定格電流に対して数分の 1 から数十分の 1 の低電流領域で最大値となります。したがって、実際に使用される電流値でサージ電圧を正しく評価することが必要です。

図 2-6 に V_{AKP} のゲート抵抗値 R_G 依存性の一例を示します。なお電流条件はモジュール定格電流の 10 分の 1 の 10A と定格電流の 100A の 2 条件を示します。本図から低電流で R_G が小さくなると V_{AKP} が高くなっていることがわかります。

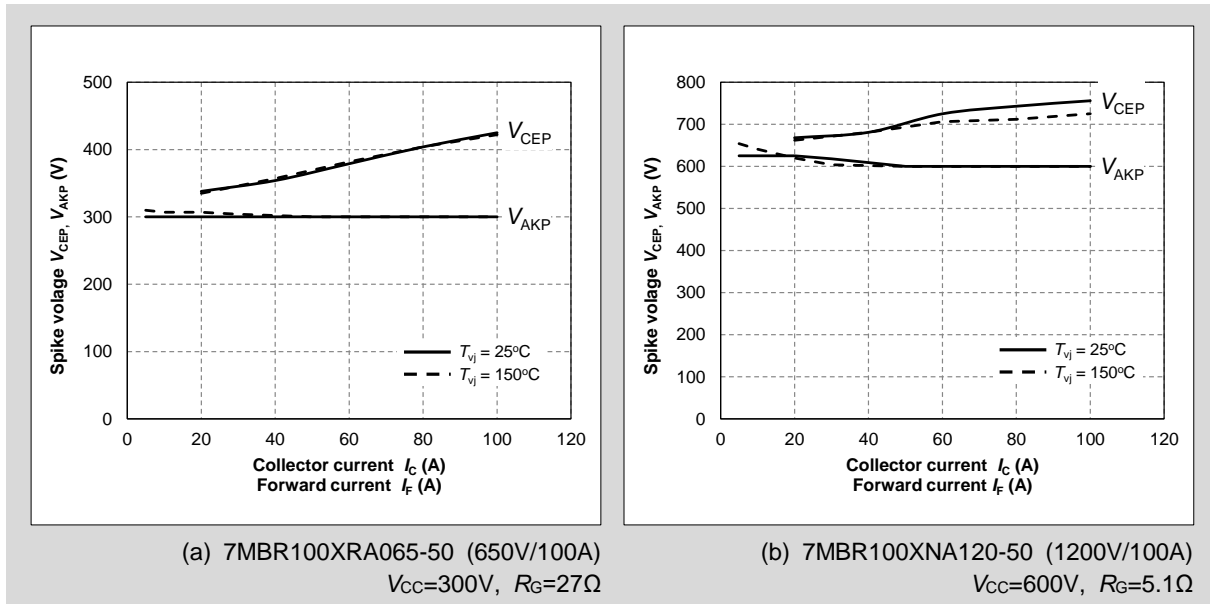


図 2-5 IGBT ターンオフ、FWD 逆回復時におけるサージ電圧のコレクタ電流 I_C 依存性の例

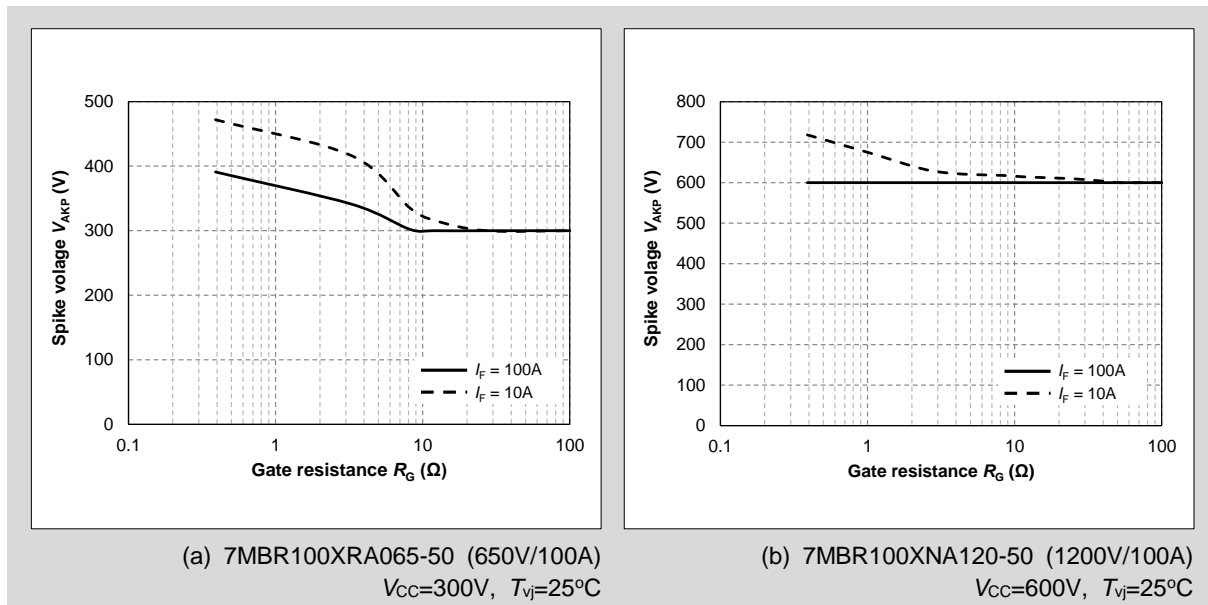


図 2-6 FWD 逆回復時におけるサージ電圧のゲート抵抗依存性の例

以上のように、IGBT モジュールに生じるサージ電圧の値は上記に示した主回路浮遊インダクタンス L_s 、スイッチング条件、ゲート駆動条件によって大きく変化します。その他にも、コンデンサ容量やゲートドライブの能力、スナバ回路の種類などの使用条件によっても影響を受けます。

したがって、IGBT モジュールの適用時にはそれを使用するインバータシステムなどの各種装置において、すべての動作条件においてサージ電圧が RBSOA 内におさまることを確認してください。サージ電圧が保証 RBSOA を超える場合には、ゲート抵抗の変更や浮遊インダクタンスの低減、スナバ回

路の付加などによってサージ電圧を低減してください。なおゲート抵抗の変更によってサージ電圧を低減する際には、オン側とオフ側のゲート抵抗を個別に選定することで、より最適な駆動条件とすることが可能となります。

3.2 ターンオフ時におけるサージ電圧のゲート抵抗依存性

過電圧保護に関連して、図 2-7 に 1200V 系列での X シリーズ IGBT モジュールのターンオフサージ電圧 V_{CEP} のゲート抵抗値 R_G 依存性を示します。

第 4 世代以前 (S シリーズ以前) の IGBT モジュールでは、一般的にサージ電圧を抑制するためにはゲート抵抗値 R_G を大きくする手法が用いられてきました。しかしながら IGBT の世代交代とともに IGBT チップの注入効率が高くなっているため、 R_G に対するサージ電圧依存性の傾向も変わってきています (詳細は下記の参考文献を参照願います)。

したがってサージ電圧抑制のために R_G を大きくした場合、旧世代製品の傾向と異なり、逆にサージ電圧が大きくなる場合がありますのでご注意ください。それゆえ R_G の選定に関しては IGBT モジュールが使用される実機での確認を十分に行なってください。

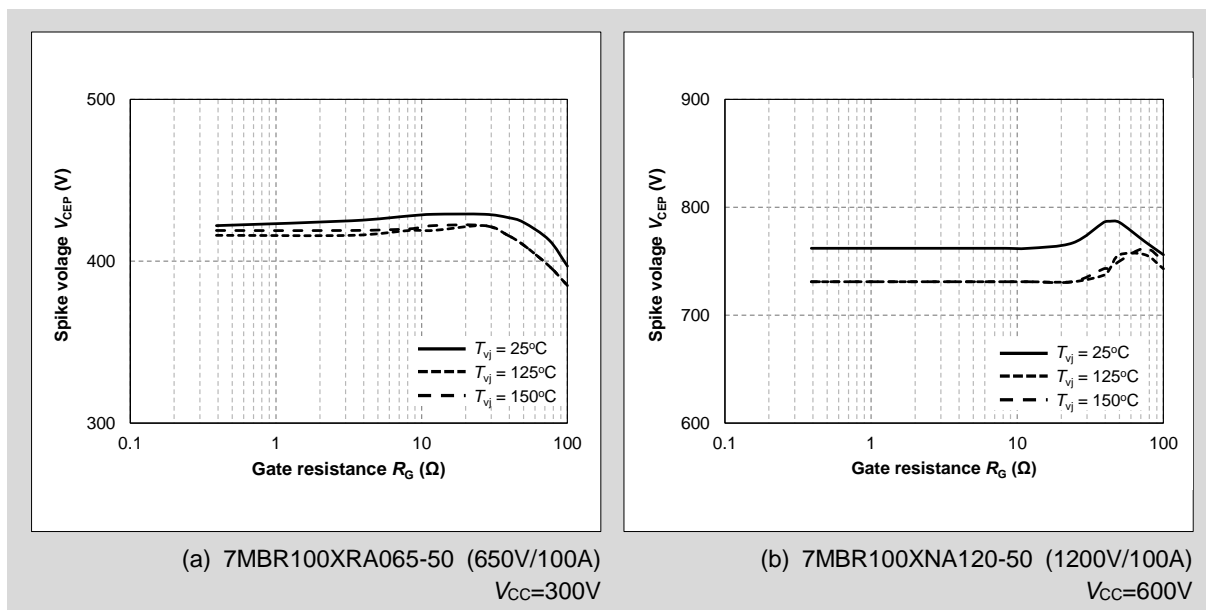


図 2-7 ターンオフサージ電圧 V_{CEP} のゲート抵抗値 R_G 依存性の例

参考文献

- 1) Y. Onozawa *et al.*, "Investigation of carrier streaming effect for the low spike fast IGBT turn-off", *Proc. ISPSD*, pp. 173-176, 2006.

3.3 短絡電流遮断時の過電圧保護

IGBT が短絡状態になると IGBT のコレクタ電流 I_C が急激に増加します。したがって短絡時の電流を遮断する際には、通常運転時に対して高エネルギーが印加された状態でのターンオフとなります。それゆえ、通常の連続動作における RBSOA (逆バイアス安全動作領域) に対して、短絡電流遮断時には非繰り返しパルスの条件で定義される RBSOA (Non-repetitive pulse) が設けられています。

図 2-8 に X シリーズ 650V 系列および 1200V 系列における繰り返しパルスでの RBSOA (Repetitive pulse)、非繰り返しパルスでの RBSOA (Non-repetitive pulse) を示します。短絡遮断時のターンオフ時の $V_{CE} - I_C$ の動作軌跡が RBSOA (Non-repetitive pulse) 内に収まるように使用してください。なお特別な記載が製品の仕様書にない場合は RBSOA の電圧 V_{CE} はモジュールのコレクタおよびエミッタ主端子で測定した電圧となります。

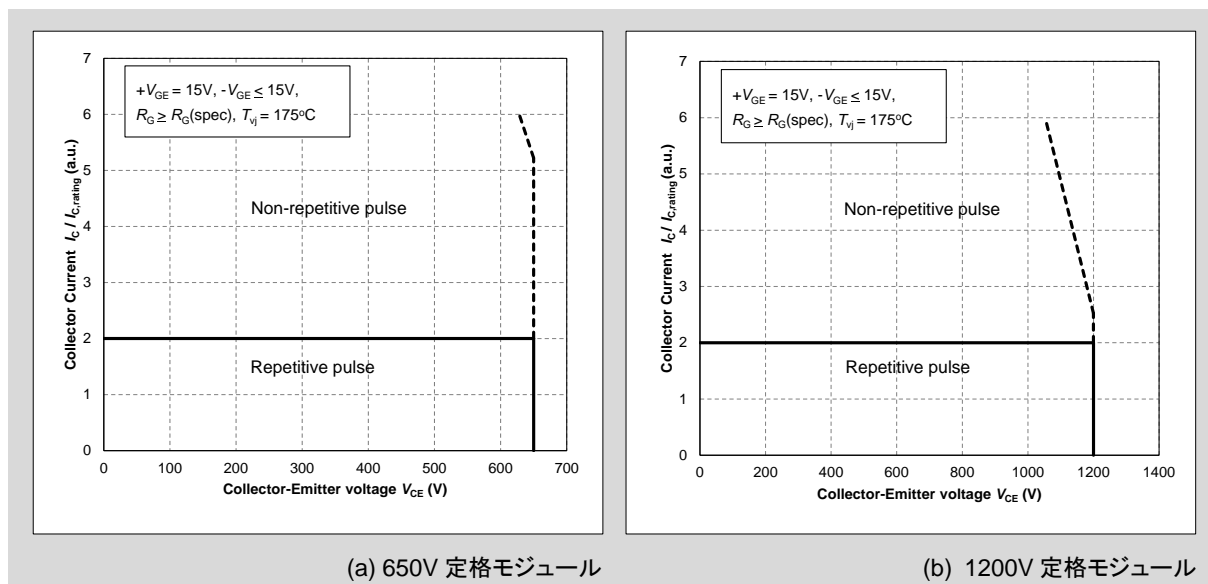


図 2-8 逆バイアス RBSOA

3.4 FWD の安全動作領域(SOA)

IGBT の RBSOA と同様に、FWD についても SOA が存在します。FWD の SOA は逆回復中に印加される電流 I_F と電圧 V_{AK} の積である最大パワー (P_{max}) が許容できるエリアとして示されます。したがって FWD 逆回復時の $V_{AK} - I_F$ 軌跡が SOA 内に収まるように設計する必要があります。なお特別な記載が製品の仕様書にない場合は SOA の電圧 V_{AK} はモジュールの主端子で測定した電圧となります。

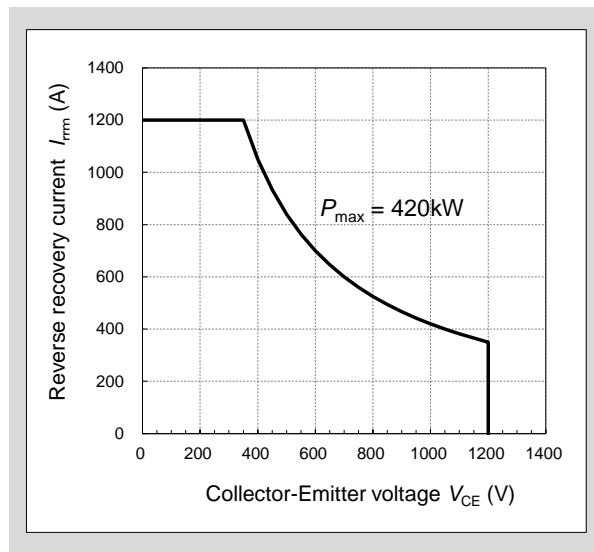
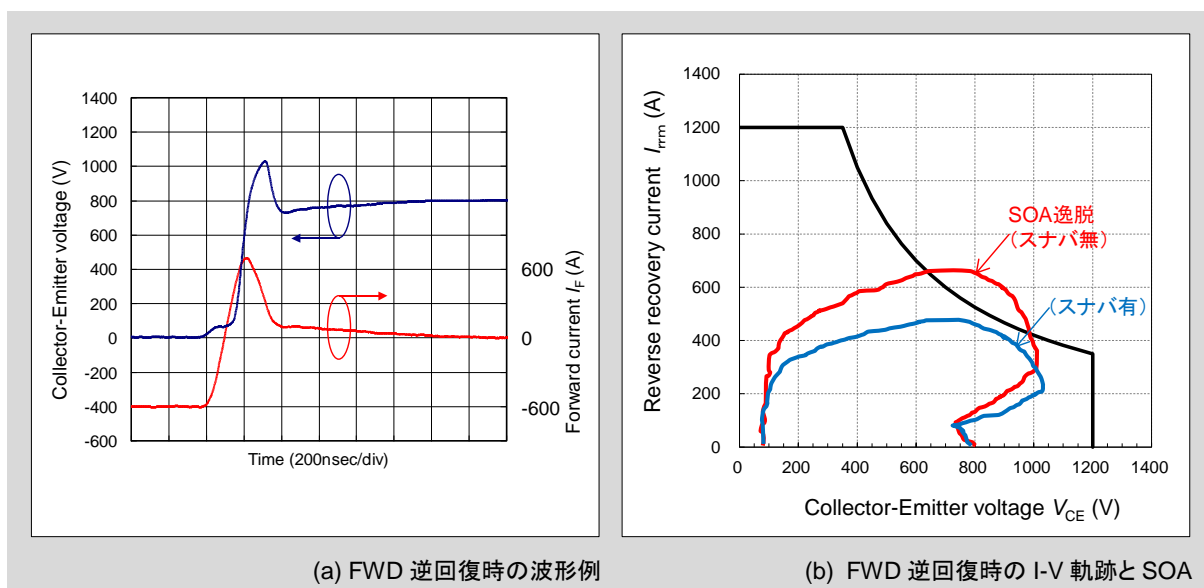


図 2-9 FWD の安全動作領域(SOA)の例

図 2-9 に 1200V 系列 2MBI600XNE120-50 における FWD の SOA を示します。本図に記載の P_{max} は 420kW となります。

図 2-10(a)に逆回復波形の一例を示します。その逆回復波形の V_{AK-I} 軌跡を図 2-10(b)の青線に示します。この場合では V_{AK-I} 軌跡が FWD の SOA 内であり、問題はありません。しかしながら同図の赤線で示される V_{AK-I} 軌跡は SOA を越えていますので、FWD が破壊する恐れがあります。IGBT のオン側のゲート抵抗値を大きくするなどし、 V_{AK-I} 軌跡が SOA 内に収まるよう対策する必要があります。

このように各 IGBT モジュールを適用する装置のすべての運転条件において、FWD の V_{AK-I} 軌跡が SOA 内となるようにゲート駆動条件などを決定してください。



(a) FWD 逆回復時の波形例

(b) FWD 逆回復時の I-V 軌跡と SOA

図 2-10 FWD 逆回復時の波形と I-V 軌跡

4. 並列接続

IGBT モジュールを適用する際に、通電能力向上を目的として IGBT モジュールを並列に接続して使用することがあります。本章では X シリーズ IGBT モジュールを並列接続する際の留意点について記載します。

4.1 出力特性の接合温度依存性と電流アンバランス

出力特性の接合温度 T_{vj} 依存性はその挙動によって、並列接続されたモジュール間の電流アンバランスに大きな影響を与えます。図 2-11 に X シリーズ IGBT モジュールの代表的な出力特性 ($V_{CE(sat)}$ - I_C 依存性) を示します。図 2-11 からわかるように、X シリーズ IGBT では T_{vj} が高くなると $V_{CE(sat)}$ が大きくなるという正の温度依存性を持っています。IGBT の出力特性の T_{vj} 依存性が正の場合では、 T_{vj} の上昇とともにコレクタ電流 I_C は減少することになるため、自動的に電流アンバランスは改善されることになります。

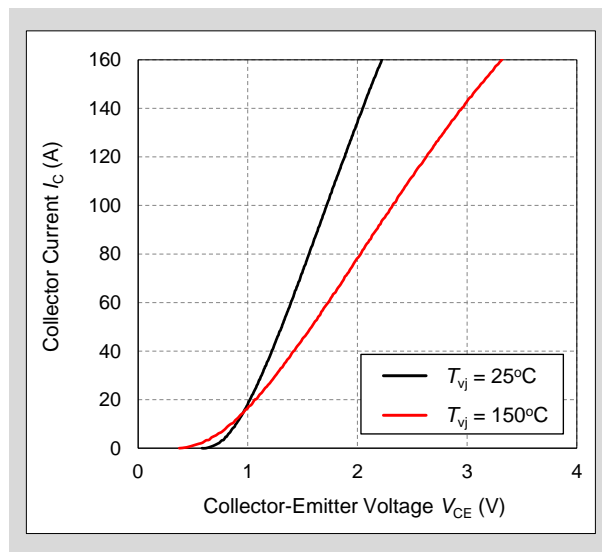


図 2-11 IGBT 出力特性の T_{vj} 依存性 (1200V/100A)

このように、X シリーズ IGBT モジュールは出力特性が正の接合温度依存性を持つため、並列運転に適した特性を持っています。このような正の温度係数を持つ出力特性の特徴は第 4 世代の S シリーズ以降より適用されており、X シリーズにおいても引き継がれています。

4.2 $V_{CE(sat)}$ のバラつきと電流アンバランス率

IGBT モジュール並列接続時に生じる各モジュール間の電流分担の割合は電流アンバランス率 α と呼ばれ、IGBT 自身の $V_{CE(sat)}$ のバラつきや出力特性の接合温度依存性によって決定されます。

図 2-12 に X シリーズ IGBT の 2 並列接続時における $V_{CE(sat)}$ のバラつき $\Delta V_{CE(sat)}$ と電流アンバランス

率 α の関係を示します。電流アンバランス率 α は、2つのモジュールを並列接続した場合に低 $V_{CE(sat)}$ 側に流れる電流値を I_{C1} 、2つのモジュールの平均電流値を $I_{C(ave)} (=I_{C1}/2 + I_{C2}/2)$ とすると、式 2-1 を用いて求められます。

この図からわかるように、 $V_{CE(sat)}$ のバラツキが大きくなると電流アンバランス率 α は大きくなります。それゆえ、IGBT モジュールを並列接続をする際には $\Delta V_{CE(sat)}$ が小さい製品を組み合わせることが重要となります。

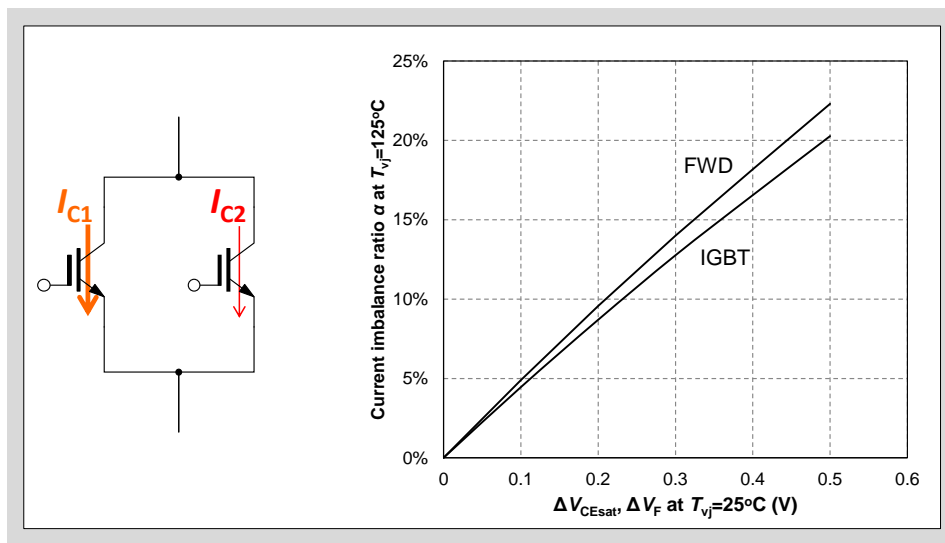


図 2-12 $V_{CE(sat)}$, V_F のバラつきと電流アンバランス率 (1200V)

$$\alpha = \left(\frac{I_{C1}}{I_{C(ave)}} - 1 \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots \text{式 2-1}$$

5. マウンティングインストラクション

X シリーズモジュールの実装方法については、各パッケージ毎のマウンティングインストラクション (下記 URL 参照) に記載していますので、そちらを参照願います。

富士電機パワー半導体 デザインサポート

<http://www.fujielectric.co.jp/products/semiconductor/technical/>

第3章 第7世代XシリーズRC-IGBTモジュール

1. 第7世代XシリーズRC-IGBTモジュールの基本コンセプトと特長	3-2
2. 第7世代XシリーズRC-IGBTモジュール系列化	3-5

本章では、富士第7世代XシリーズRC-IGBTモジュールの基本コンセプトと特長について説明します。

1. 第7世代XシリーズRC-IGBTモジュール基本コンセプトと特長

●さらなる小型化・高パワー密度化（RC-IGBT技術）

XシリーズRC-IGBTモジュールは、当社第7世代Xシリーズのチップ技術とパッケージ技術を用いることで、低損失と175°C連続動作保証を実現しました。更にRC-IGBT技術によりIGBTとFWDの機能をワンチップ化することで、IGBTまたはFWDの各々と比較してチップ面積の拡大が可能となり、ジャンクション-ケース間熱抵抗 $R_{th(j-c)}$ を低減しました。また従来のIGBTとFWDの組み合わせに対し、RC-IGBTを適用することで総チップ数および総チップ面積の低減を実現しました。これらの技術革新によりXシリーズRC-IGBTモジュールは従来と同一のパッケージサイズで高パワー密度化を実現し、電力変換装置のさらなる小型化およびトータルコスト削減に貢献します。

●XシリーズRC-IGBTチップの特長

図3-1にXシリーズRC-IGBTチップの概略図と等価回路を示します。RC-IGBTはIGBTとFWDをワンチップ化したことにより、スイッチング動作時はIGBT動作・FWD動作が同一チップ上で交互に繰り返します。IGBT動作・FWD動作が同一チップ上で連続するため、IGBT・FWDが別チップで交互に動作する場合に比べ、ジャンクション温度の変化(ΔT_{vj})が小さくなります。またIGBTとFWDがワンチップとなったため、従来のIGBT・FWD各々のチップ面積と比較して大きくなることで、熱抵抗の低減を実現しました。

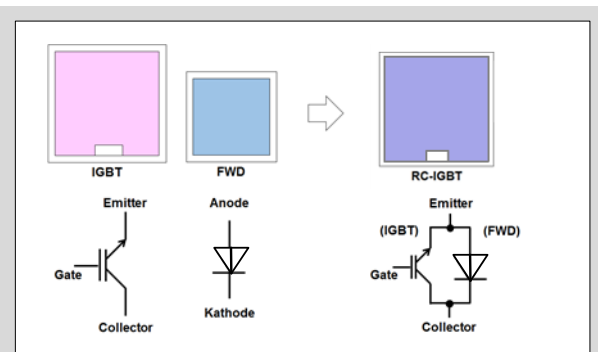


図3-1 XシリーズRC-IGBTチップ概略図と等価回路

図3-2に1200V XシリーズRC-IGBTの出力特性を示します。XシリーズRC-IGBTチップは、一つのチップで順方向（IGBT）と逆方向（FWD）の両方向に電流を出力することが可能です。順方向ではXシリーズのチップ技術適用により、VシリーズIGBTチップよりも低い飽和電圧を実現しました。

XシリーズRC-IGBTチップは、Xシリーズのチップ技術である薄ウエハ技術を適用することにより特性を改善しています。薄ウエハを用いることでターンオフ時の振動や耐圧の低下が懸念されますが、XシリーズRC-IGBTチップはウエハの比抵抗と各構造を最適化することにより振動および耐圧低下を抑制しました。図3-3に示すように、XシリーズRC-IGBTのサージ電圧はVシリーズIGBTと同等であり、テール電流をVシリーズIGBTと比較して低減したことによって、ターンオフ損失 E_{off} を23%低減しました。ターンオンまたは逆回復動作は図3-4および図3-5に示すようにVシリーズIGBTとFWDの組み合わせでは急峻な電流波形となっているのに対し、XシリーズRC-IGBTでは構造パラメータを最適化することでソフトリカバリ電流波形を実現しています。また順回復ピーク電流 I_{fm} と順回復電荷の低減により、順回復損失 E_r を20%低減しました。

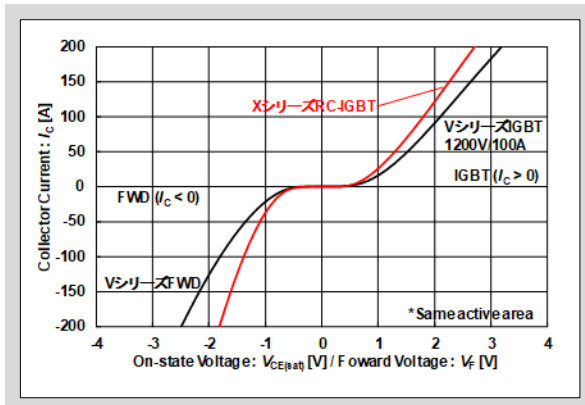


図3-2 XシリーズRC-IGBTの出力特性

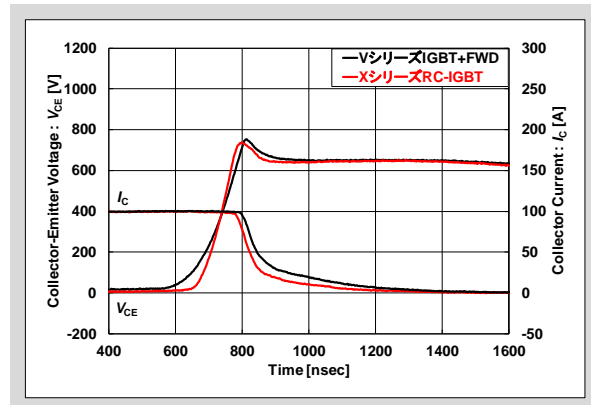


図3-3 XシリーズRC-IGBTのターンオフ波形

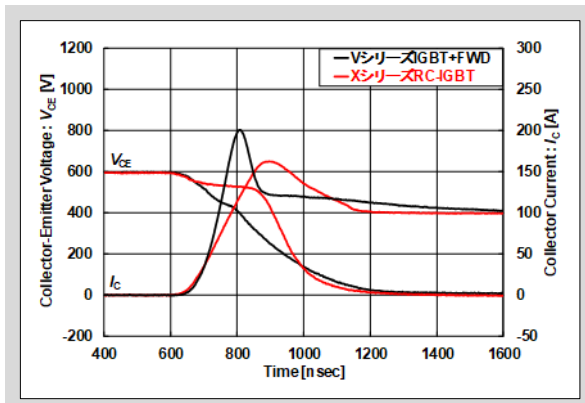


図3-4 XシリーズRC-IGBTのターンオン波形

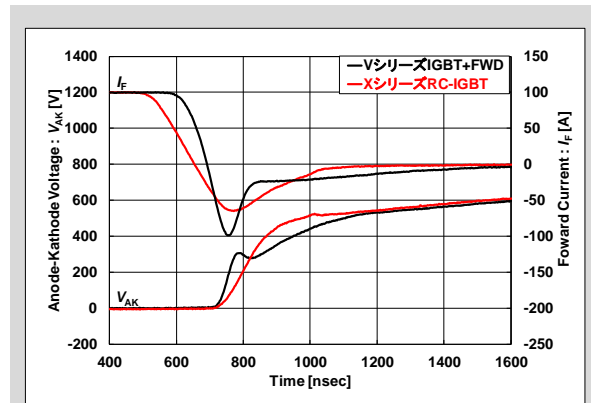
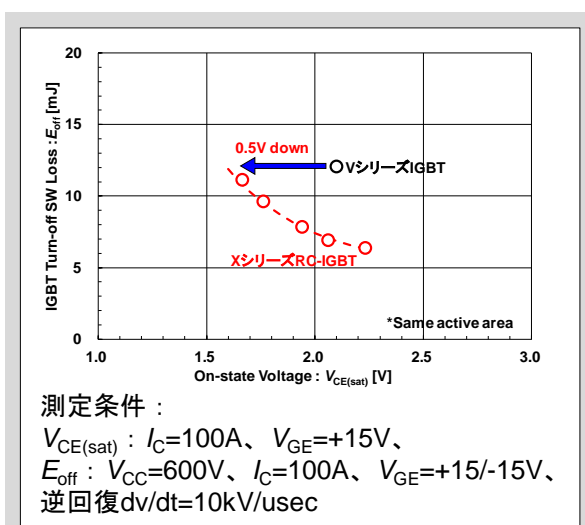


図3-5 XシリーズRC-IGBTの逆回復波形

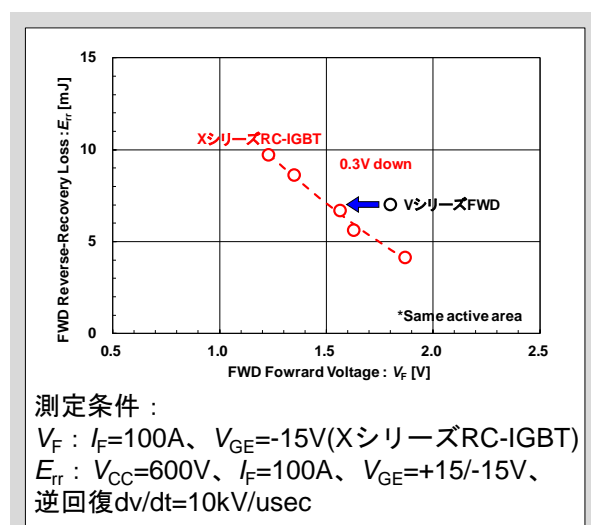
図3-6に同一活性面積で比較したIGBTのトレードオフ特性を示します。ターンオフ損失が同じ場合、XシリーズRC-IGBTはVシリーズIGBTに比べ飽和電圧を0.5V改善しています。図3-7に同一活性面積で比較したFWDのトレードオフ特性を示します。順回復（逆回復）損失が同じ場合、XシリーズRC-IGBTは、VシリーズFWDに比べ $V_{RC}(V_F)$ を0.3V改善しています。



測定条件：

$V_{CE(sat)}$: $I_C=100A$, $V_{GE}=+15V$,
 E_{off} : $V_{CC}=600V$, $I_C=100A$, $V_{GE}=+15/-15V$,
 逆回復 $dv/dt=10kV/usec$

図3-6 XシリーズRC-IGBT(IGBT)のトレードオフ特性



測定条件：

V_F : $I_F=100A$, $V_{GE}=-15V$ (XシリーズRC-IGBT)
 E_{tr} : $V_{CC}=600V$, $I_F=100A$, $V_{GE}=+15/-15V$,
 逆回復 $dv/dt=10kV/usec$

図3-7 XシリーズRC-IGBT(FWD)のトレードオフ特性

●XシリーズRC-IGBTパッケージの特長

XシリーズRC-IGBTモジュールでは、IGBTおよびFWDの機能をワンチップ化することによる小型化・高パワー密度化といった特長を生かすため、XシリーズIGBTモジュールと同様にAlN（窒化アルミニウム）絶縁基板を採用することでさらなる熱抵抗の低減を実現しました。図3-8にジャンクション-ケース間熱抵抗を示します。AlN絶縁基板は、 Al_2O_3 （アルミナ）絶縁基板に比べ熱抵抗が約45%（同一チップサイズ比）と大幅に改善し、IGBTモジュールの小型化による温度上昇の課題を解決しました。さらにワイヤボンディングの最適化、高強度はんだおよび高耐熱シリコーンゲルの採用により、高信頼性を確保するとともに175℃連続動作の保証を実現しました。

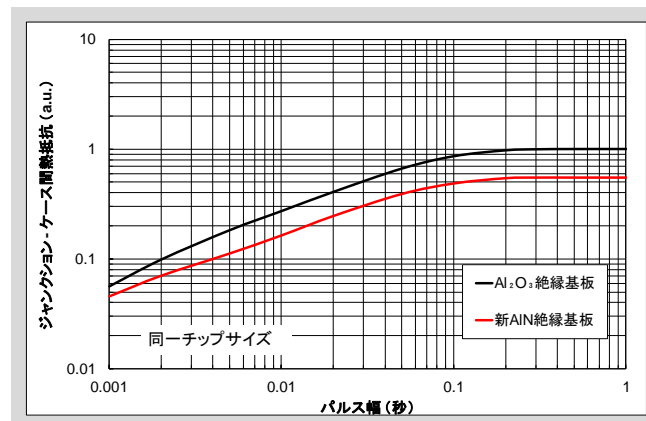


図3-8 ジャンクション-ケース間熱抵抗

●XシリーズRC-IGBT製品の特長

図3-9に1200V/600A Vシリーズ DualXT製品と同一パッケージの1200V/1000A XシリーズRC-IGBT DualXT製品をインバータドライブ装置に搭載した場合を想定し、インバータの出力電流 I_o とIGBT最大接合温度 T_{vjmax} のシミュレーション結果を示します。XシリーズRC-IGBTモジュールはVシリーズIGBTモジュールと比較し、電力損失およびジャンクション-ケース間の熱抵抗を低減しました。さらに、第7世代Xシリーズのパッケージ技術を適用することにより連続動作保証温度をVシリーズIGBTモジュールの150℃から175℃に拡大しました。この結果、同一パッケージにおいてVシリーズIGBTモジュールと比較して高い電流密度が可能となり、IGBTモジュールのさらなる高パワー密度化と小型化を達成しました。

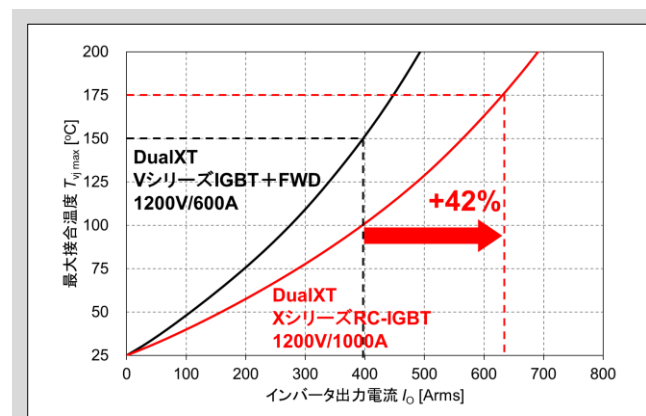


図3-9 IGBT最大接合温度とインバータ最大出力電流

図3-10にモータの加減速時などインバータが低周波で動作する際の T_{vj} のシミュレーション結果を示します。従来のIGBT+FWD構造では、IGBTおよびFWDがそれぞれ発熱および放熱を繰り返します。一方、IGBTとFWDをワンチップ化したRC-IGBTでは、素子内のIGBT領域およびFWD領域が交互に発熱します。これによりRC-IGBTではIGBTで発生した熱がFWD領域にも伝わり、またFWDで発生した熱はIGBT領域にも伝わるため、IGBT+FWD構造と比較して放熱面積が拡大します。そのため熱抵抗が低減し T_{vj} の温度変化 ΔT_{vj} が大幅に低減します。以上のことから、アルミニウムワイヤ接合部およびシリコンチップ下はんだ接合部への熱ストレスが緩和します。XシリーズRC-IGBTモジュールは、低周波動作時の ΔT_{vj} を大幅に低減することで、 ΔT_{vj} パワーサイクル耐量を大幅に向上させました。これにより従来のIGBT+FWD構造と比べ、同一パワーサイクル耐量の場合高出力が期待できます。一方、同一 ΔT_{vj} の場合高い信頼性が期待できます。以上によりXシリーズIGBTモジュールは、IGBTモジュールに求められる小型化、低損失化および高信頼性化要求に応えることが可能となります。

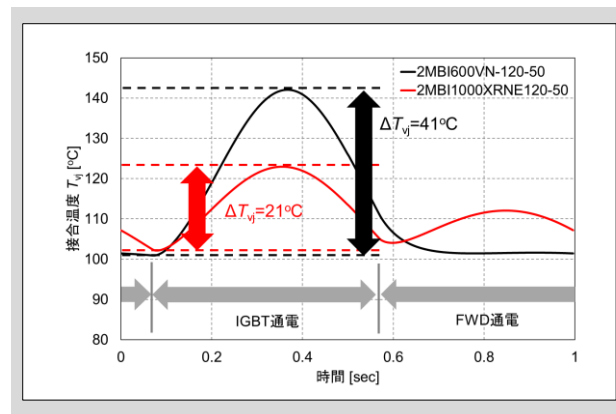


図3-10 ΔT_{vj} シミュレーション結果

2. 第7世代XシリーズRC-IGBTモジュール系列化

IGBTモジュールの定格電流の拡大は、出力電力の増加に貢献できます。例えば図3-11に示すように、1200V系列のDualXTパッケージでは、Vシリーズの最大定格電流は600Aでした。XシリーズIGBTモジュールではXシリーズの技術を適用することで最大定格電流を800Aに拡大し、さらにRC-IGBT技術を適用することで最大定格電流1000Aを実現しました。同一パッケージでの定格電流の拡大により、電力変換装置の筐体サイズを変えることなく、出力電力の増加が可能となります。

IGBTモジュールの定格電流の拡大は、電力変換装置の小型化にも貢献できます。例えば図3-11に示すように1200V/900~1000A定格電流モジュールを、VシリーズではPrimePACK™ 2パッケージ（172mm x 89mm）で実現しましたが、XシリーズRC-IGBTモジュールではDualXTパッケージ（150mm x 62mm）で実現しました。これによりモジュール設置面積（フットプリントサイズ）を39%低減しました。

注) PrimePACK™はInfineon Technologies社の登録商標です。

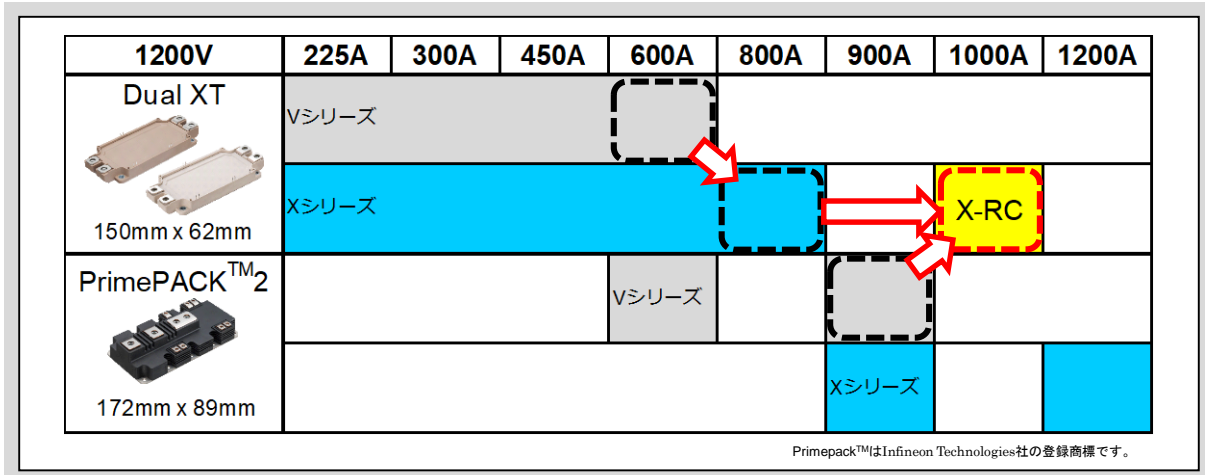


図3-11 富士XシリーズRC-IGBTモジュール容量拡大

図3-12に当社XシリーズRC-IGBTモジュールラインナップを示します。従来のIGBTとFWDの組み合わせでは困難であった定格電流の拡大を、Xシリーズ技術とRC-IGBT技術を組み合わせることにより達成しました。

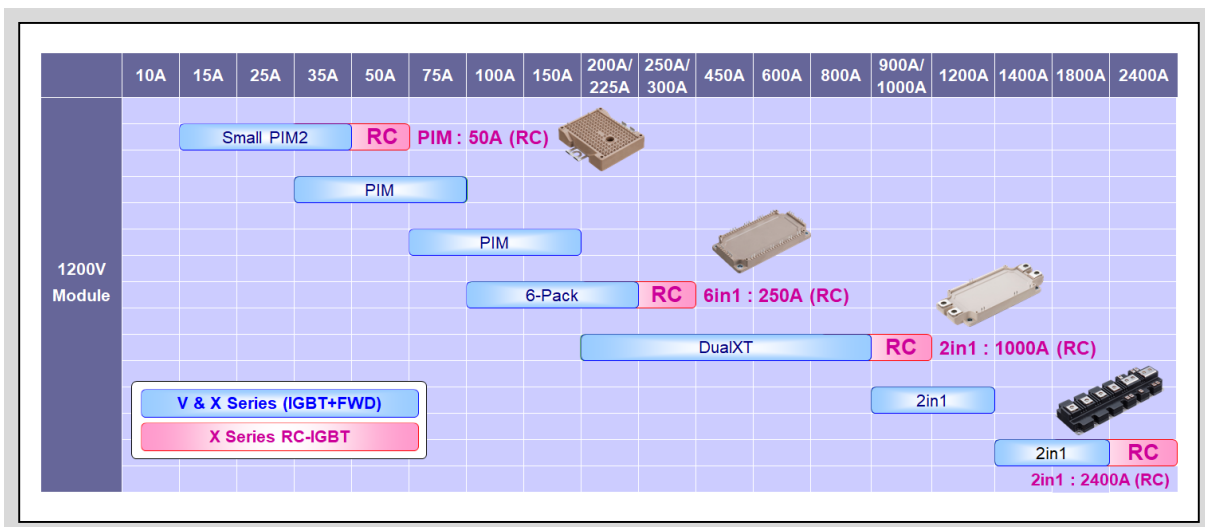


図3-12 富士XシリーズRC-IGBTモジュール系列