

---

---

# 第 6 世代 V シリーズ IGBT モジュール アプリケーションノート

## 第 1 章

### — 基本コンセプトと特徴 —

---

---

|   | 目次                 | ページ  |
|---|--------------------|------|
| 1 | V シリーズの基本コンセプト     | 1-2  |
| 2 | 素子構造の変遷            | 1-3  |
| 3 | V シリーズ IGBT チップの特徴 | 1-5  |
| 4 | 高放熱セラミック絶縁基板の適用    | 1-10 |

#### はじめに

---

---

第 6 世代 V シリーズ IGBT モジュールは、第 5 世代 U 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ないました。これにより更なる特性改善を行ないました。

本章では第 6 世代 V シリーズ IGBT モジュールの基本コンセプトと特徴について述べます。

## 1 Vシリーズの基本コンセプト

近年、環境面への配慮から二酸化炭素の排出量を低減することが世界中で求められています。二酸化炭素の排出量低減のためには、エネルギーの使用量を低減することが必要不可欠です。しかしながらそれとともに装置や機器に使用する部品点数の削減や部品に使用する材料の低減も、製造に費やすエネルギーの低減が可能となることから重要となります。したがって装置や機器に対してはエネルギー変換効率の向上とともに、その小型化が市場から求められています。特に電力変換装置では IGBT モジュールが主に用いられるため、その小型化が装置の小型化に貢献できることとなります。

このような背景から、最新世代の V シリーズの IGBT モジュールでは「小型化」を基本コンセプトに開発を行いました。

図 1-1 に IGBT モジュールに対する基本的な市場要求を示します。IGBT モジュールに対する基本的な市場要求は性能と信頼性の向上、環境負荷の低減です。性能、環境、信頼性に対する各諸特性は相互に関連し合っているため、IGBT モジュールの「小型化」を実現するためには、これらをバランスよく改善することが重要となります。

今回の開発した第6世代の V-IGBT モジュールは性能、環境、信頼性の各諸特性を最大化することによってその基本コンセプトである「小型化」を達成しました。また「小型化」に付随して同一パッケージでの最大電流定格の拡大を達成しました。

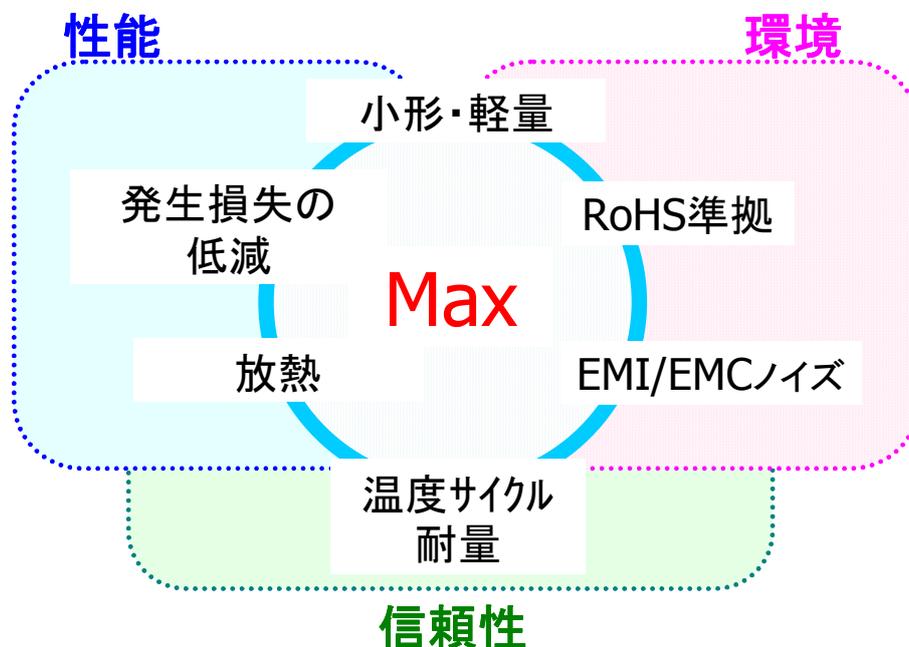


図 1-1 富士電機が目指す IGBT モジュール開発のイメージ

## 2 素子構造の変遷

図 2-1 には富士電機における 1200V 系列に関する各世代の IGBT のチップ断面図を示します。また表 2-1 には各世代 IGBT への適用技術の一覧を示します。

第三世代以前の IGBT ではプレーナゲート型パンチスルー IGBT が主流でした。当時のパンチスルー型 IGBT はエピタキシャルウェーハを用いる IGBT で、コレクタ側からキャリアを高注入することで低オン電圧を実現していました。同時にターンオフ時には n ベース層に高注入されたキャリアを速やかに消去する必要があるため、ライフタイムコントロール技術を適用しています。これにより低オン電圧と低いターンオフスイッチング損失( $E_{off}$ )を実現させていました。

しかしながらライフタイムコントロール技術を適用した場合には高注入のキャリアをライフタイムコントロール技術で抑制しているため、特性改善に限界がありました。その上ライフタイムコントロール技術を適用した場合、オン電圧特性のバラツキが大きくなるため、並列使用時の電流アンバランス抑制が課題としてありました。

これらの課題を打開する為に、第四世代の S シリーズではライフタイムコントロール技術を必要としないノンパンチスルー (NPT) 型 IGBT を開発しました。ノンパンチスルー型 IGBT は、コレクタ( $p^+$ 層)の不純物濃度をコントロールすることによりキャリアの注入効率を抑制するとともに、n ベース層の厚さを薄くして輸送効率を高くしています。ノンパンチスルー型 IGBT ではエピタキシャルウェーハを用いず、FZ (Float Zone) ウェーハを用いることができるため、結晶欠陥の影響を受けにくいという利点を持っています。一方で低オン電圧を達成するためには、高輸送効率化する必要があり、n ベース層の厚さ、すなわちチップ厚を薄くする技術が必要でした。富士電機ではウェーハの薄厚化技術を新たに開発し、特性改善に貢献してきました。更なる特性改善のためには、より薄いチップ厚を持った IGBT が必要となりますが、チップ厚の大部分を n ベース層の厚さが占めており、その厚さは素子耐圧の低下に大きく影響を与えます。この素子耐圧の特性改善を阻む要因を打破した構造が FS (Field Stop) 構造です。FS 構造とは、n ベース層に濃度が高い FS 層を設けた構造です。この構造を採用することで更なる特性改善が可能となりました。

また富士電機は IGBT の特性改善に不可欠な技術として表面構造の微細化も併せて進めて来ました。IGBT 素子はセルと呼ばれる IGBT の基本構造が多数配置される構造によって形成されています。IGBT セル数が多いほど低オン電圧化が実現できます。それゆえウェーハ表面に平面的に IGBT セルを作る構造(プレーナ構造)からシリコン表面にトレンチ(溝)を形成し 3 次元的にゲート構造を形成するトレンチ構造へと表面構造も移り変わってきました。第 5 世代の U シリーズでは上記の FS 構造とトレンチゲート構造を採用することで画期的な特性改善を実現しました。

今回量産供給を開始しました第 6 世代「V シリーズ」は、第 5 世代 U シリーズで技術開発した FS 構造を更に薄くすることで低オン電圧化やスイッチング損失の低減を図りました。加えてトレンチゲート構造の更なる最適化により、スイッチングスピードの制御性の向上を図りました。

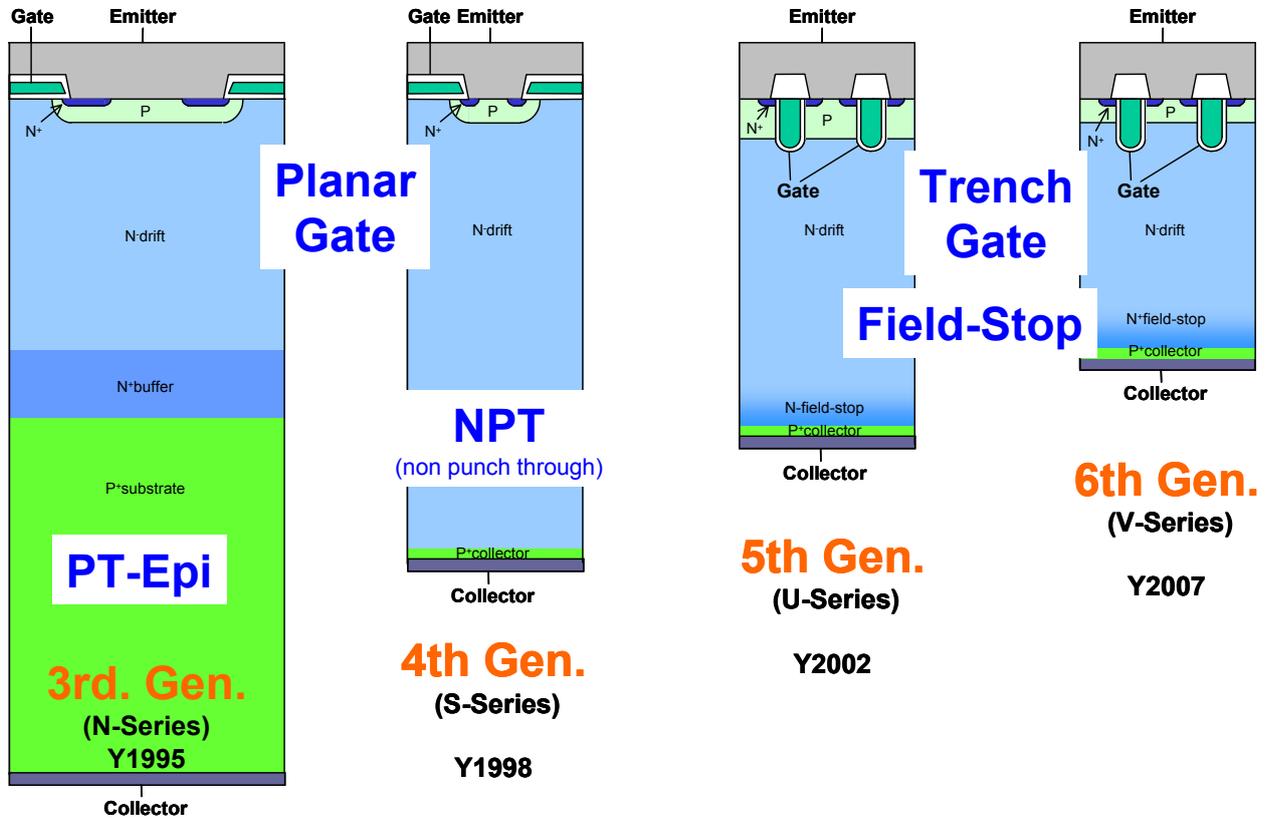


図 2-1 IGBT チップへの適用技術の変遷(1200V 系列)

表 2-1 各世代 IGBT への適用技術(1200V 系列)

| Generation       | 3rd     | 4th    | 5th    | 6th             |
|------------------|---------|--------|--------|-----------------|
| Series           | N       | S      | U/U4   | V               |
| Wafer            | Epi     | FZ     | FZ     | FZ              |
| Gate structure   | Planar  | Planar | Trench | Advanced Trench |
| Bulk             | PT      | NPT    | FS     | FS              |
| Lifetime control | Applied | None   | None   | None            |
| Thickness        | Thicker | Thick  | Thin   | Thinner         |

### 3 Vシリーズ IGBT チップの特徴

#### 3.1 Vシリーズ IGBT チップの特性改善

##### 3.1.1 オン電圧の低減

図3-1に第6世代Vシリーズ IGBT チップと従来の第5世代Uシリーズ IGBT チップの出力特性比較を示します。本図からわかるように、同じ電流密度で比較した場合はVシリーズのコレクターエミッタ電圧  $V_{ce}$  がUシリーズと比較して大きく低減されています。

この特性改善効果を適切にチップサイズ縮小へ展開することで、小型化と同一パッケージでの定格電流の向上を実現しました。

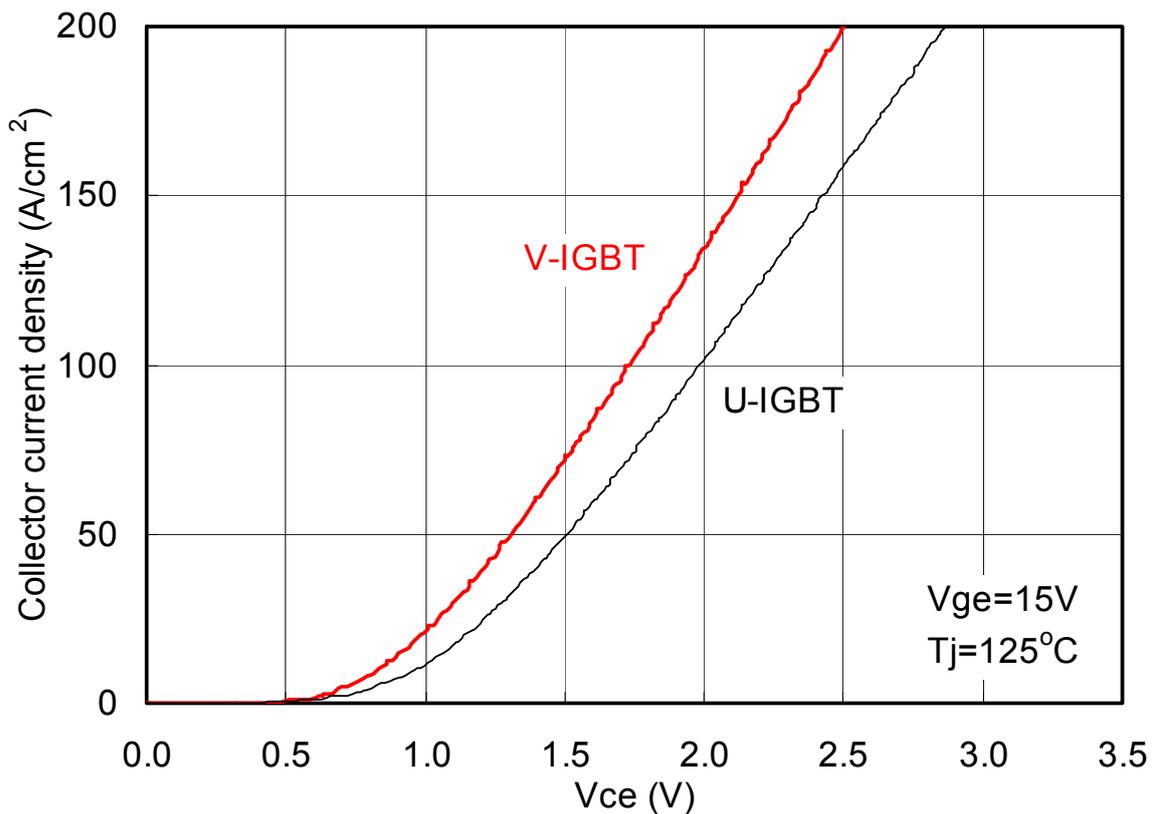


図3-1 出力特性比較(1200V 系列)

### 3.1.2 ターンオフ損失の低減

図3-2に第6世代Vシリーズ IGBT チップと第5世代Uシリーズ IGBT チップについてのターンオフ損失とオン電圧のトレードオフ特性比較を示します。本図から同じ電流密度でのターンオフ損失でオン電圧を比較した場合、V-IGBT では約0.3Vの低減していることがわかります。このように、V-IGBT では大幅な特性改善を行ないました。

この特性改善効果を適切にチップサイズ縮小へ展開することで、損失の低減と電流定格の向上を可能にしました。

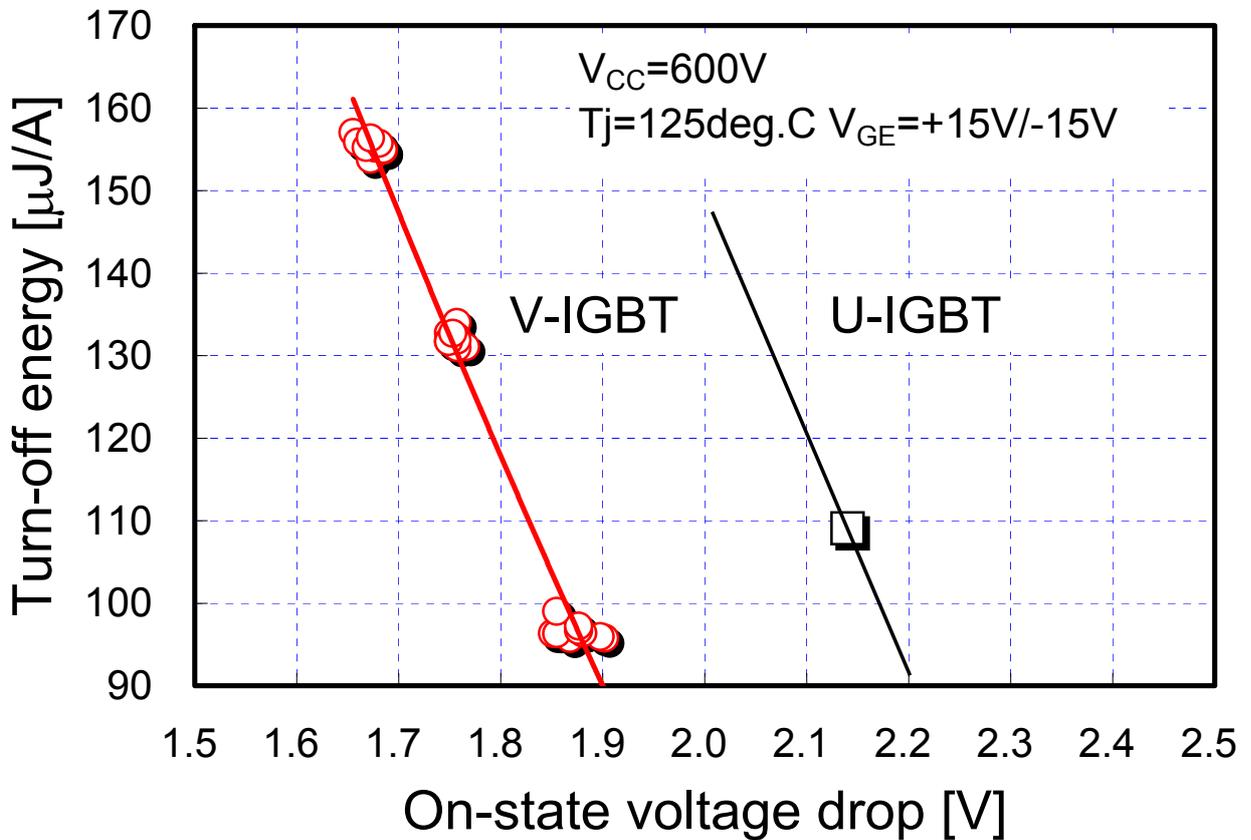


図 3-2 V-IGBT と U-IGBT のトレードオフ比較 (1200V 系列)

### 3.2 ターンオフ振動の抑制

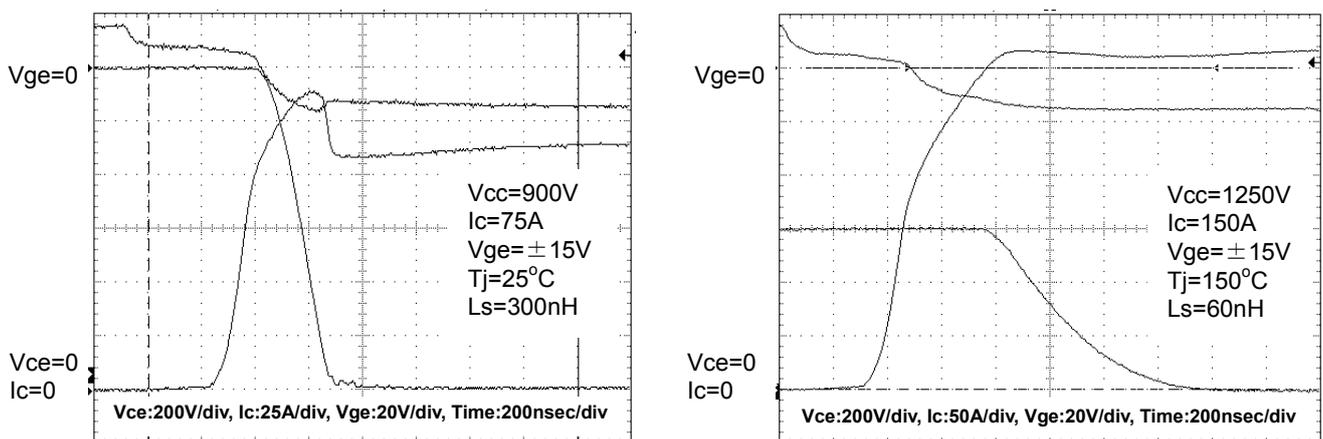
良く知られているように、IGBTはそのシリコン厚を薄くすることによって低オン電圧化やスイッチング特性の改善ができます。それゆえ IGBT は世代交代を重ねるたびに、そのシリコン厚を薄くすることで特性改善を行ってきました。しかしながら近年では IGBT のチップ厚は 100 $\mu\text{m}$  程度まで薄くなっており、耐圧を確保することも必要となりました。これに対し裏面構造にフィールドストップ(Field Stop : FS)構造を採用することで、特性改善に必要な薄型化と耐圧確保の両立を達成しています。

FS 型の IGBT ではターンオフ時に広がる空乏層が FS 層に到達するリーチスルーによって、電流や電圧などに振動を引き起こすことが知られています。

ターンオフ振動が起こる限界電圧（振動開始電圧）と素子耐圧は相反関係にあります。それゆえ素子耐圧を確保するためにドリフト層の抵抗を高くすると、振動開始電圧は低下します。反対にドリフト層の抵抗を低くすると、振動開始電圧は高くすることができますが、耐圧の確保が困難となります。

第6世代の V-IGBT では、最適な耐圧設計に加えターンオフ振動を抑制した IGBT としました。

図 3-3 に試験的に非常に厳しい条件で 1200V 系 V シリーズ IGBT をターンオフさせた場合の波形を示します。図 3-3(a)は主回路インダクタンスを非常に大きくした場合であり、図 3-3(b)は通常で適用される条件に対してはるかに厳しい電圧を印加しており、定格電圧を超えた  $V_{\text{cc}}=1250\text{V}$  でターンオフさせた場合の波形です。これらの波形からわかるように、非常に厳しい条件下でのターンオフ時でも電圧や電流に振動は見られません。このように V シリーズ IGBT は振動がなく、お客様に使いやすい素子となっています。



(a) 主回路インダクタンスが大きい場合

(b) 印加電圧が高い場合

図 3-3 V-IGBT のターンオフ波形(75A / 1200V)

### 3.3 スイッチング特性のゲート抵抗制御性

近年、IGBT モジュールは低損失化の要求からスイッチングスピードが早くなっています。しかしながら早いスイッチングスピードはその電流変化、電圧変化によって、EMI ノイズを発生させることとなります。特にターンオン特性が EMI ノイズに大きく影響することがわかっています。したがって EMI ノイズが問題となる状況ではターンオン時の電流変化、電圧変化を緩やかに（ソフトスイッチング化）する必要があります。それゆえゲート抵抗によってターンオンスピードをコントロールできることが重要になります。

このような背景から第6世代 IGBT の V シリーズでは、ゲート抵抗によるターンオンスピードの制御を容易にしました。図 3-4 に 1/10 の定格電流でゲート抵抗を変えたときのターンオンスイッチング時の波形を示します。同図にはその対向アームの FWD の電圧を示します。

本図からわかるように、ゲート抵抗を変えることでターンオンによって生じる逆回復  $dv/dt$  が大きく変化していることがわかります。このように V-IGBT ではゲート抵抗によって容易に電流変化や電圧変化のコントロールが可能です。したがってゲート抵抗の適切な選定によって、後述するように EMI ノイズとスイッチング損失のトレードオフの最適設計が可能となります。

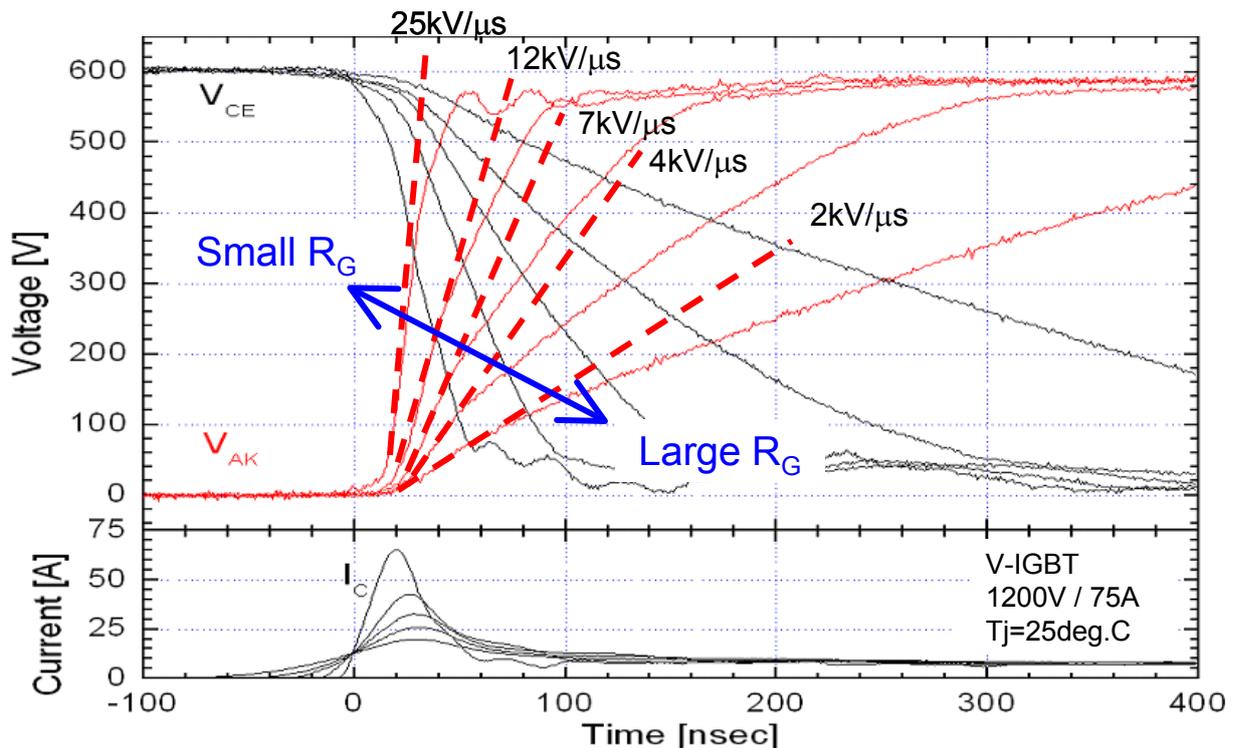


図 3-4 ターンオンスイッチング波形のゲート抵抗依存性

### 3.4 逆回復 dv/dt とターンオンロス

先に述べたように、EMI ノイズを抑制するためにゲート抵抗を大きくした場合には、緩やかな電流変化と電圧変化に起因して、ターンオンロスが大きくなります。このように EMI ノイズとターンオンロスにはトレードオフ関係にあります。したがってゲート抵抗によるターンオンスピードの制御性を改善するだけでなく、ターンオンロスとのトレードオフを改善することが重要となります。

図 3-5 には EMI ノイズの要因のひとつである逆回復 dv/dt とターンオンロスの関係を示します。本図からわかるように、従来の U シリーズ IGBT に対して V シリーズ IGBT では同じ逆回復 dv/dt で比較した場合、ターンオンロスが小さくなっていることがわかります。一方、同じターンオン損失で比較した場合には逆回復 dv/dt が小さくなっていることがわかります。

このように、V-IGBT では従来の U-IGBT に対して、逆回復 dv/dt とターンオンロスの関係が改善されていることがわかります。

以上のように V シリーズの IGBT モジュールでは低損失かつ低ノイズを両立できる製品として、お客様に使いやすい製品となっています。

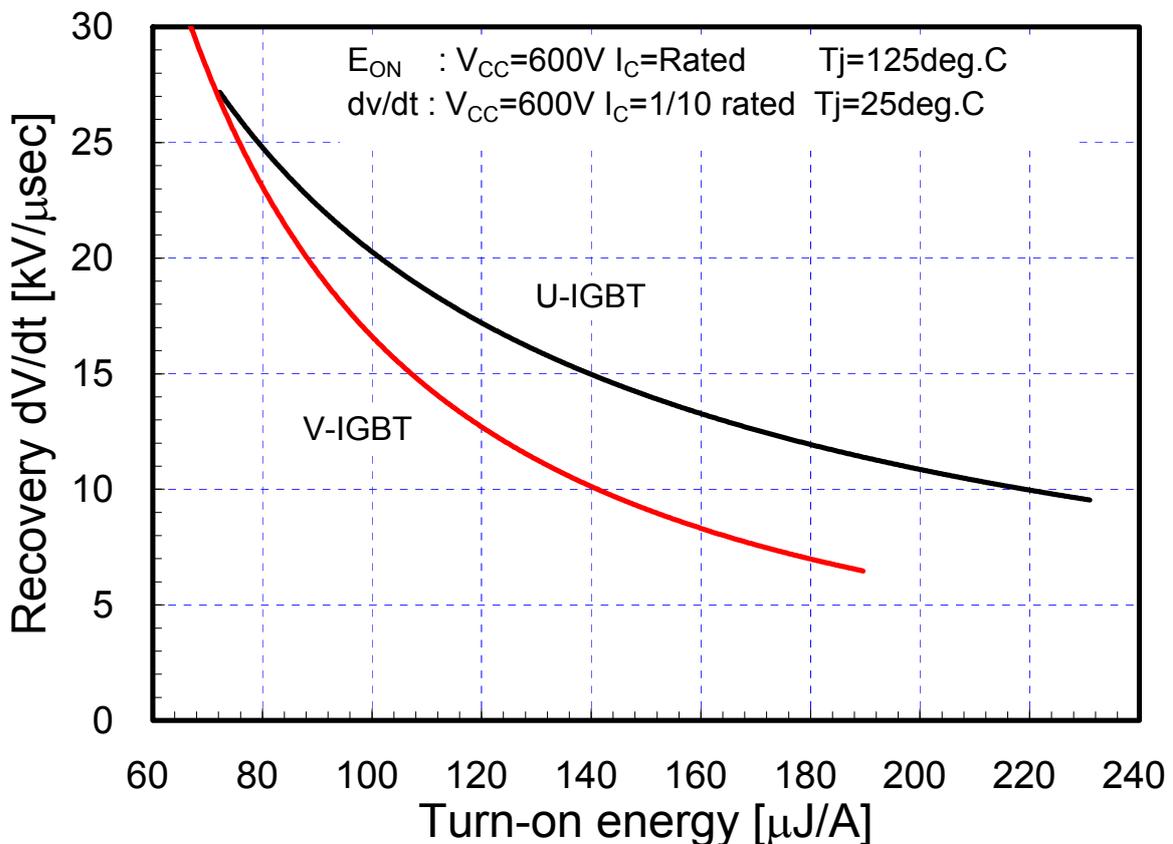


図 3-5 逆回復 dv/dt とターンオンロスの関係 (1200V 系列)

#### 4 高放熱セラミック絶縁基板の適用

各種電力変換システムの小型化のためには、IGBT モジュールの小型化が望まれています。しかしながら小型化することにより必然的にパワー密度が高くなるため、モジュール内のチップ温度の上昇が懸念されます。それゆえチップで発生する熱を効果的に放散する必要があります。

V シリーズ IGBT モジュールでは、チップ特性の改善と内部レイアウトの最適化によって小型化を実現しました。さらにパワー密度が高い一部の電流定格に対しては放熱性に優れた高放熱セラミック絶縁基板（窒化珪素基板、窒化アルミニウム基板）を適用して、大幅な電流定格の拡大を実現しました。

図 4-1 には酸化アルミニウム基板と窒化珪素基板の過渡熱インピーダンス特性の比較を示します。図 4-1 から窒化珪素基板を用いることにより、過渡熱インピーダンス特性は低減され、定常熱抵抗は約 25% 低減されていることがわかります。一方、定常状態でのチップとケース間の温度上昇  $\Delta T(j-c)$  は消費電力と定常熱抵抗の積であることから、消費電力は約 25% 大きくすることが可能となります。この消費電力の増分はパワー密度の向上に展開できることになるので、同一パッケージでの電流定格の増加に展開することができるようになります。

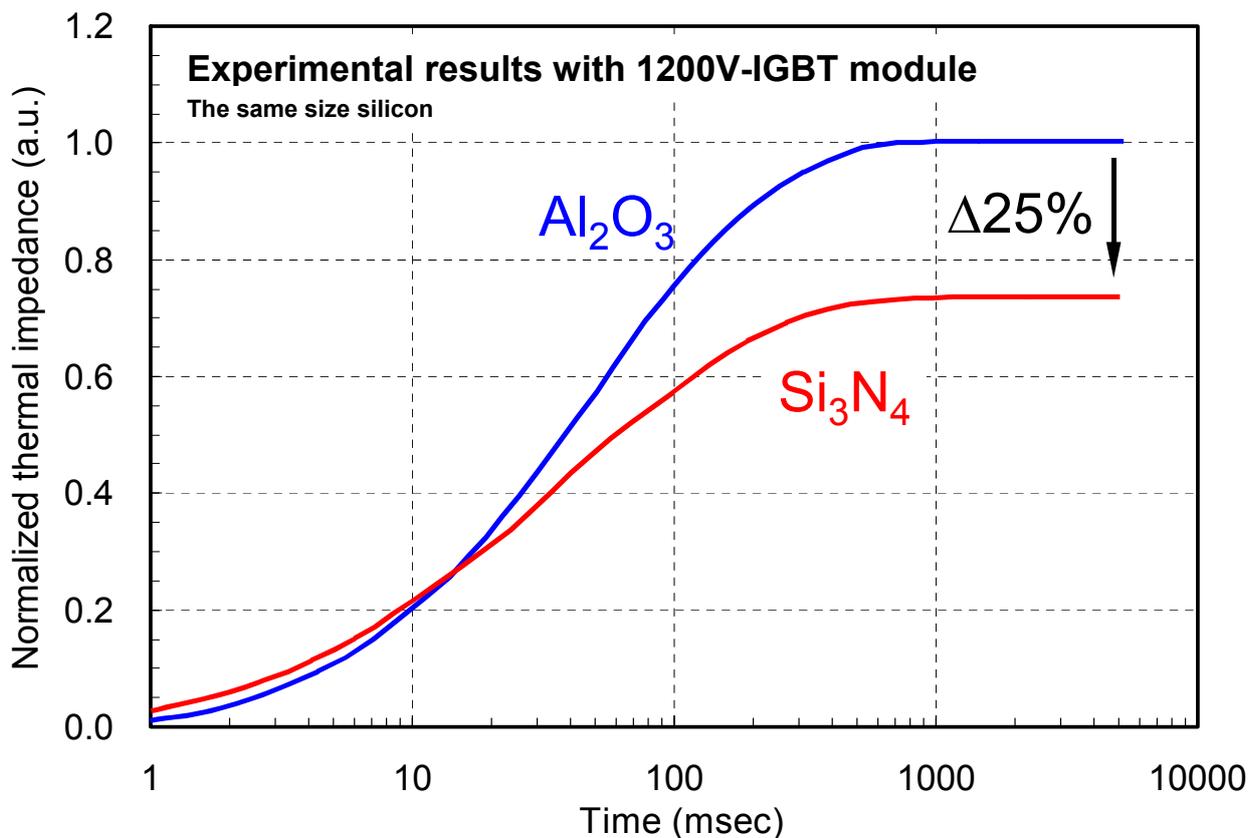


図 4-1 過渡熱インピーダンス特性比較（酸化アルミニウム基板と窒化珪素基板）

## 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2011年4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（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（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 | ・医療機器 |
- 極めて高い信頼性を要求される下記のような機器及び戦略物資に該当する機器には、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 |
|-------|-----------|----------|---------|
- 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（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（株）とその販売店は責任を負うものではありません。