

車載向け 1200V IPM シリーズ搭載パワーデバイスの開発

Development of Power Device for Automotive 1200V IPM series

石 井 孝 明*
Takaaki Ishii

山 田 隼 人*
Hayato Yamada

概要 当社では、パワーデバイスとそれを駆動かつ保護機能をもつ制御用ICチップ、温度検出用サーミスタを搭載したトランスファーモールド構造のIPM SAM2製品をシリーズ化してきた。これらは、自動車や産業機器のエアコンのモータを制御するIPMとしてインバータユニットの小型化と省エネルギー化に大きく貢献している。またアプリケーションの多様化した市場要求に応えるため、定格1200Vのラインナップの拡充を進めている。本稿では、電動ウォーターポンプ制御ドライバ用に新たに開発した、車載向け定格1200Vのパワーデバイスとそれらを搭載したSAM2製品について報告する。

1. まえがき

パワーデバイスとは、電力の制御や変換、供給を行うためのスイッチングデバイスである。エネルギーなどの資源を効率的に有効活用できるパワーエレクトロニクスにおけるパワーデバイスの役割は、昨今の環境に対する取り組みやそれらを取り巻く社会的背景からより一層重要度を増している。当社では600Vクラスを中心にパワーデバイスのプロセス開発を進め、内製IGBTおよびFRDを搭載した製品開発をおこなっており、エアコンやIHヒーターといった民生機器用途から、インバーター、UPSなどの産業機器用途や車載用途に至るまで、幅広く製品化してきた。特に民生エアコン向けIPMで長年培った技術と経験を基に、産業機器や車載エアコン向けに高電圧・大電流対応のパワーデバイス、制御用IC、サーミスタを搭載したトランスファーモールド構造IPM「SAM2」を製品化してきた⁽¹⁾。またラインナップの拡充やアプリケーションの多様化した市場要求に応えるため、1200Vクラスのパワーデバイスおよびパッケージの技術開発により産業機器向け定格1200V SAM2製品の開発を進めてきた⁽²⁾。現在のSAM2製品ラインナップを表1、車載向けSAM2製品の開発動向について図1に示す。

表1 SAM2製品ラインナップ

製品名	定格	用途	状況
SAM265M30AA1	650V/30A	車載	量産中
SAM265M50AA1	650V/50A	車載	量産中
SAM265M50BS3	650V/50A	産業機器	量産中
SAM265M50AS3	650V/50A	車載	量産中
SAM212M05BF1	1200V/5A	産業機器	量産中
SAM212M10BF1	1200V/10A	産業機器	量産中
SAM212M15BF1	1200V/15A	産業機器	量産中
SAM212M05AF1	1200V/5A	車載	開発中
SAM212M10AF1	1200V/10A	車載	開発中
SAM212M15AF1	1200V/15A	車載	25年量産
SAM212M25AF1	1200V/25A	車載	開発中

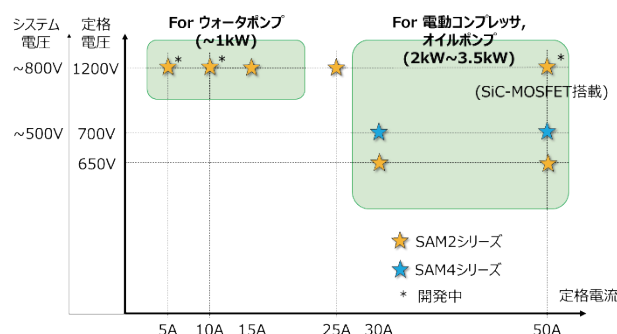


図1 車載向けSAM2製品の開発動向

近年のxEVでは冷却水を電動ウォーターポンプで循環させるシステムが新たに生まれている。このシステムを制御するSAM2パワーモジュールを新たにラインナップに加えるため、定格電流15A以下の1200V IGBTとFRDの開発を進めている。ウォーターポンプの冷却システム用途では、低損失や高応答な駆動性能が求められる。

* 技術本部プロセス技術統括部

パワーデバイス開発部 製品開発課

るだけではなく、モジュール自体は直接冷却されない厳しい使用環境に耐える必要がある。このような市場要求に応えるべく、耐熱性として低温・高温での動作保証、耐ノイズ性としてFRDのソフトリカバリー性能を実現した。本稿では、それら車載向け定格1200Vのパワーデバイスを搭載したSAM2製品について報告する。

2. 製品概要

SAM2製品は、出力スイッチング素子としてIGBTとFRD、プリドライバIC、制限抵抗付きブートストラップダイオードおよび温度検出用サーミスタを搭載したトランスファーマールド構造の3相インバーター駆動用IPMである。SAM2製品シリーズの外観写真を図2に示す。パッケージは絶縁距離を確保し1200V定格を実現している。その他、シリーズで共通する製品特長を以下に示す。

- 制御電圧最大定格25V
- 絶縁耐圧2500V（1分）保証
- サーミスタ内蔵
- 各種保護機能搭載
- 過電流保護保持時間調整可能
- IGBT, FRD動作温度保証 T_j : 175°C

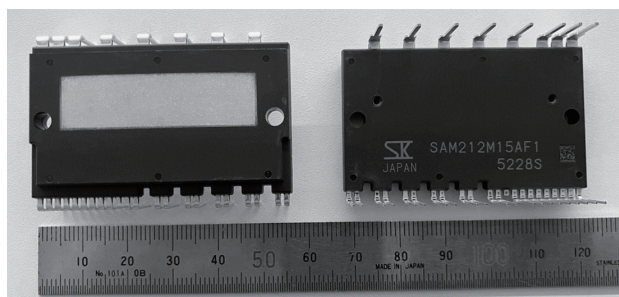


図2 SAM2製品シリーズの外観

車載向け、定格1200V/15A、SAM212M15AF1の応用回路例を図3に示す。図左側のControllerから受けた信号でIGBTを駆動し、高電圧かつ大電流を制御する。これによってモータへの出力端子U, V, W端子の通電状態・電流方向を変化させ、顧客の使用方法に合わせたモータ駆動を実現する。過電流保護機能の搭載や温度監視のためのサーミスタ内蔵などといったシステム全体を補助する機能も有している。こうしたController側へのフィードバックをおこなうことができるのが製品特長である。

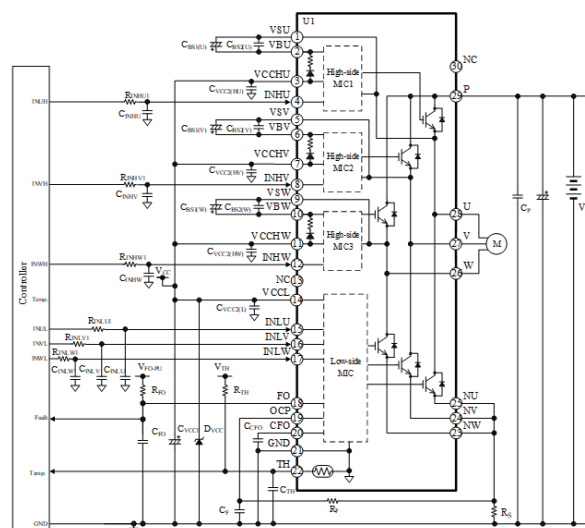


図3 SAM212M15AF1 応用回路例

3. 1200Vパワーデバイスの開発

3.1. 1200V FS-IGBTチップ技術

定格1200VのIGBTでは、ウェーハの薄厚化によるFS(Field Stop)構造の採用や、安定した薄化プロセスの構築、トレンチゲート構造の微細化・最適化、裏面構造の改良により、高耐圧・低損失化を実現した⁽³⁾。これにより、産業機器向けSAM2製品の電流ラインナップ品を量産展開している。車載向け1200V FS-IGBTの特長について次項で詳述する。

3.2. 車載向け1200V FS-IGBTの特長

(A) 低温耐圧保証

車載向けにおいては厳しい使用環境での製品保証が必要になり低温-40°Cの環境下においても定格電圧を保持する必要がある。低温時はシリコン結晶内の格子振動が低下し電子と原子の衝突電離確率が高まる。すなわちインパクトイオン化率が高くなるため、素子耐圧が低くなる。そのため低温時の耐圧低下を考慮し、IGBT構造においてNドリフト層厚みの最適設計をおこなった。

(B) T_{jmax} : 175°C高温保証

高温環境下においても安定して動作するようにIGBTのジャンクション温度(T_j)を最大175°C保証する。図4にSAM2製品に搭載したIGBT単一チップのジャンクション温度(T_j)と定格1200V印加時のリーク電流 I_{CES} について示す。高電圧印加時の大きなリーク電流 I_{CES} は熱暴走を引き起こすことがあるため、パワーデバイスの品質や信頼性を保証する上での重要な指標である。1200V SAM2製品開発ではチップ構造の最適化をおこな

うことで高温時の耐圧リーク電流 I_{CES} を抑制し、 $T_j = 175^\circ\text{C}$ を超えても熱暴走しにくい設計とした。図4に示すように、IGBT単チップの定格1200V耐圧リーク電流 I_{CES} は 190°C で3mA程度であり、熱暴走していないことが確認した。

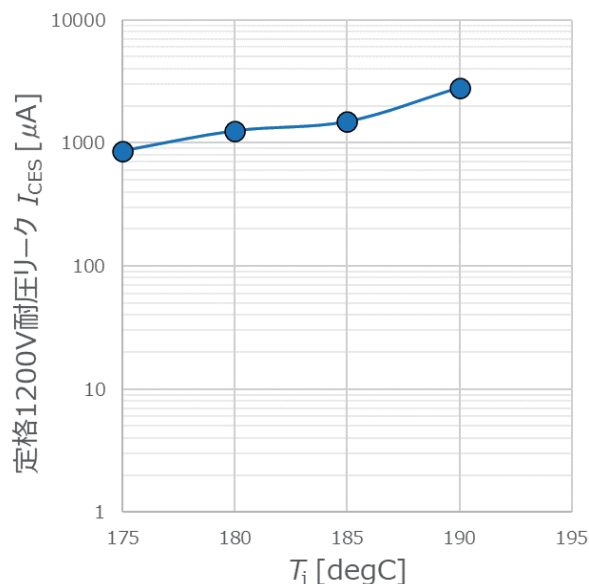


図4 SAM212M15AF1 搭載 IGBT 単チップの
定格 1200V 耐圧リーク I_{CES} とジャンクション温度 T_j

(C) 短絡時における安全動作領域保証

IGBTでは大容量の電力を扱うために、オン電圧の低減やターンオフスイッチング損失低減を進める一方で、破壊耐量を確保する必要がある。負荷が短絡した場合や他の素子が破壊した場合でも、短絡（過電流）保護回路が働きゲート電圧が遮断するまでの一定時間、IGBTは破壊せずに耐える設計にしなければならない。IGBTの電流飽和特性を生かし、表面Nエミッタ層にあたるチャネル領域を調整し、MOS構造を最適化することで飽和電流を抑制し、製品に必要な破壊耐量を確保できるように設計した。

(D) 車載品質保証への取り組み

車載向け製品において、品質や安全性に直結する重要特性およびお客様からの要求特性についてはリスク分析をおこない、影響度の高い項目に関連する技術的要素を製品設計や製品仕様で反映している。パワーデバイス製造は重要工程パラメータとしてSPC（Statistical Process Control）管理をおこなっている。未然防止や異常の早期発見だけでなく、製造工程のばらつきについて日常的に把握し工程能力を管理することで品質の安定化に努めている。

3.3. 1200V FRD チップ技術

定格1200VのFRDについては、600V 低ノイズFRD⁽⁴⁾の活性部構造を踏襲した低濃度アノード構造を採用し、ライフタイムコントロールにより低損失化とソフトリカバリー特性を両立している。車載向け1200V FRDの特長について次項で詳述する。

3.4. 車載向け 1200V FRD の特長

(A) ソフトリカバリー特性

車載向け定格1200V FRDの活性部構造を図5に示す。製品でのスイッチングノイズを抑制するために、ドリフト層の底部に緩やかな濃度勾配を持ったN層を設けることで、急峻なキャリア消滅を抑制しソフトリカバリー特性になるように設計した。低濃度アノード構造によるホール注入の抑制および粒子線によるライフタイムコントロールの最適化により低損失化を実現した。

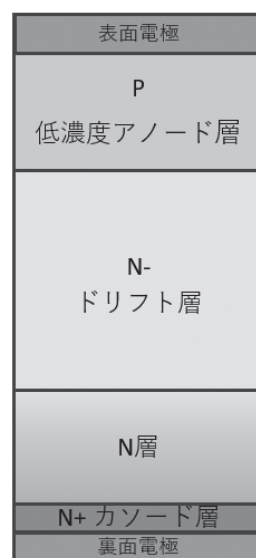


図5 車載向け定格 1200V FRD の活性部構造

(B) 低温耐圧保証と順回復電圧抑制

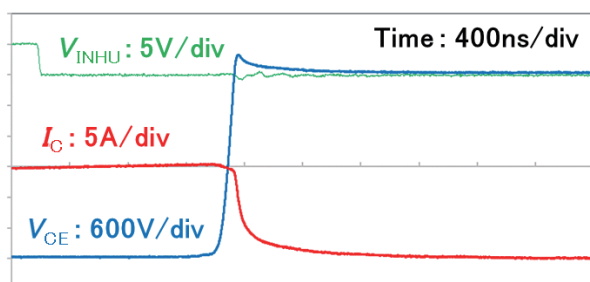
低温 -40°C の定格電圧保持の為にN-ドリフト層を厚くする必要があるが、その際には順回復電圧について考慮する必要がある⁽²⁾。IGBTのターンオフ時、FRDの高抵抗N-ドリフト層にキャリアが注入され、電導度変調によりその抵抗値が徐々に低下するが、ターンオフ直後は抵抗値が十分に下がりきらず順方向電圧（順回復電圧）が上昇する。この発生した電圧がハイサイド駆動ICに負電位として印可され、誤動作の要因となる。N-ドリフト層厚が厚くなると順回復電圧は上昇してしまうため、N層の厚みとキャリア濃度を最適化することで、低温での定格電圧保持と順回復電圧抑制の両立をおこなった。

4. 製品検討結果

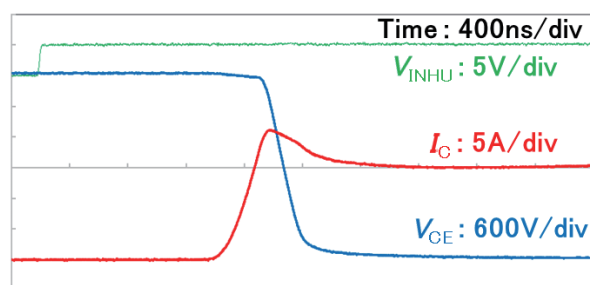
4.1. スイッチング特性および電気特性

検討した車載向け定格1200V/15AのSAM2製品SAM212M15AF1のスイッチング試験波形を図6に示す。

$T_j = 175^\circ\text{C}$ においても安定した高温動作を確認しており、スイッチング損失やソフトリカバリー特性について製品目標を満足する特性が得られた。電気的特性について表2に示す。



(a) ハイサイド ターンオフ波形



(b) ハイサイド ターンオン波形

縦軸: V_{INHU} , V_{CE} , I_{G} , 横軸: Time

測定条件: $V_P = 600\text{V}$, $V_{\text{CC}} = 15\text{V}$, $I_{\text{C}} = 15\text{A}$, $T_j = 175^\circ\text{C}$

図6 SAM212M15AF1 スイッチング試験波形

4.2. 伝導ノイズ特性

インバーターのスイッチング動作によって発生する電流・電圧の影響について、各周波数帯域での伝導ノイズ特性を図7に示す。CISPR22 Class B規格を満足しており、スイッチング損失とノイズ特性のバランスについて最適化がおこなわれていることが確認できた。

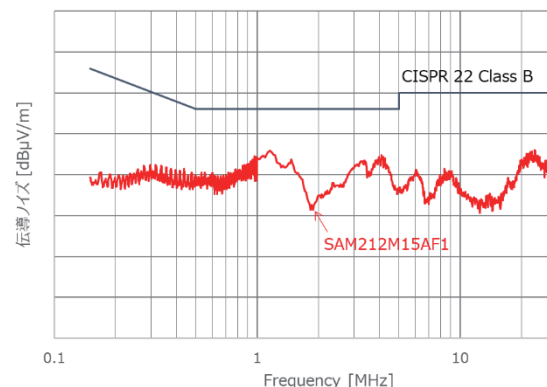


図7 各周波数帯域での伝導ノイズ特性

4.3. 短絡試験

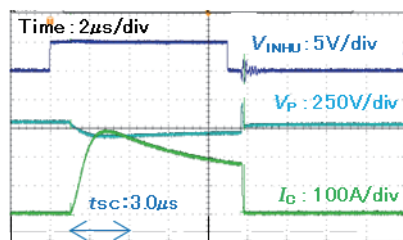
図8に短絡試験の波形を示す。低温 -40°C および高温 175°C において、製品目標である短絡電流時間 $t_{\text{sc}} : 3.0\mu\text{s}$ に対して非破壊となり、温度保証全範囲において十分な短絡耐量を確保した。

4.4. 信頼性評価

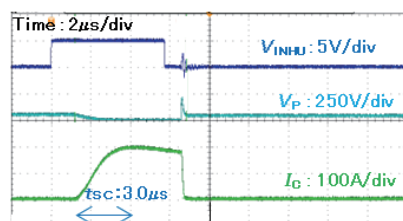
パワーモジュールの性能評価として、検討した車載向け定格1200V/15AのSAM2製品SAM212M15AF1において、IEC, JEITA, AQG324の信頼性ガイドラインに準拠した包括的な試験を実施し問題ないことを確認した。

表2 SAM12M15AF1の電気的特性

項 目	記 号	条 件	Min.	Typ.	Max.	単位
コレクター-エミッタ間漏れ電流	I_{CES}	$V_{\text{CE}} = 1200\text{V}$, $T_{\text{j}}=25^{\circ}\text{C}$	—	—	0.1	mA
コレクター-エミッタ間飽和電圧	$V_{\text{CE(SAT)}}$	$I_{\text{C}} = 15\text{A}$, $T_{\text{j}} = 25^{\circ}\text{C}$	—	1.7	2.2	V
		$I_{\text{C}} = 15\text{A}$, $T_{\text{j}} = 125^{\circ}\text{C}$	—	2.1	2.7	V
ダイオード順方向電圧	V_{F}	$I_{\text{F}} = 15\text{A}$, $T_{\text{j}} = 25^{\circ}\text{C}$	—	2.1	2.6	V
ハイサイドスイッチング特性		$V_{\text{P(DC)}} = 600\text{V}$, $I_{\text{C}} = 15\text{A}$, $V_{\text{IN}} = 0 \leftrightarrow 5\text{V}$, $T_{\text{j}} = 25^{\circ}\text{C}$, 誘導負荷				
ダイオード逆回復時間	t_{rr}		—	0.50	—	μs
ターンオン時間	t_{ON}		—	1.25	—	μs
ターンオンスイッチング時間	$t_{\text{C(ON)}}$		—	0.45	—	μs
ターンオフ時間	t_{OFF}		—	1.30	—	μs
ターンオフスイッチング時間	$t_{\text{C(OFF)}}$		—	0.30	—	μs
ローサイドスイッチング特性		$V_{\text{P(DC)}} = 600\text{V}$, $I_{\text{C}} = 15\text{A}$, $V_{\text{IN}} = 0 \leftrightarrow 5\text{V}$, $T_{\text{j}} = 25^{\circ}\text{C}$, 誘導負荷				
ダイオード逆回復時間	t_{rr}		—	0.45	—	μs
ターンオン時間	t_{ON}		—	0.90	—	μs
ターンオンスイッチング時間	$t_{\text{C(ON)}}$		—	0.45	—	μs
ターンオフ時間	t_{OFF}		—	0.90	—	μs
ターンオフスイッチング時間	$t_{\text{C(OFF)}}$		—	0.30	—	μs



(a) $T_j = -40^{\circ}\text{C}$ の時



(b) $T_j = 175^{\circ}\text{C}$ の時

縦軸: V_{INHU} , V_P , I_C , 横軸: Time
測定条件: $V_P = 800\text{V}$, $V_{\text{CC}} = 16.5\text{V}$

図 8 SAM212M15AF1 の短絡試験波形

5. むすび

1200Vクラスの車載向けモータドライバIPM製品搭載に向けたパワーデバイスとしてIGBT・FRDを開発，定格1200V/15AのSAM2製品SAM212M15AF1を製品化し，SAM2ラインナップを拡張した。産業機器向けと同様な電流ラインナップを順次量産展開するとともに，定格1200Vにおいて大電流領域のIPM製品の拡充へむけてパワーデバイスおよびパッケージの開発を今後も進めていく。

参考文献

- (1) 高山, 浅見, 小野: サンケン技報, vol.53, pp.21-24, Nov.2021
SAM265M30AA1・50AA1の開発
- (2) 張, 久我: サンケン技報, vol.54, pp.9-12, Nov.2022
産業機器向けモータドライバIPM
SAM212M10BF1の開発
- (3) 石井: サンケン技報, vol.52, pp.17-20, Nov.2020
1200V FS-IGBTの開発
- (4) 南野: サンケン技報, vol.50, pp.39-42, Nov.2018
低ノイズFRD FMXR-1206Sの開発