車載向け 1200V/25A IPM SAM212M25AF1 の開発

Development of Automotive 1200V/25A IPM SAM212M25AF1

塩　川　智　久*
Tomohisa Shiokawa

概要　近年，xEVの高電圧化および高出力化に伴い，電動コンプレッサ，電動ウォーターポンプおよび電動オイルポンプなどの車載補機向けIPMには，より広い電流範囲への対応が求められている。当社では，その要求に対応するため，車載向け1200V/25A IPM SAM212M25AF1を開発した。本製品は，高温動作および短絡耐量を考慮した車載向け1200V IGBTと，ソフトリカバリー特性を有する1200V FRDを搭載している。また，NTCサーミスタ（以下，NTCという）をDBC（Direct Bonding Copper）基板上に搭載し，パワーチップの発熱を反映した温度情報を取得可能とした。本稿では，本製品の特長ならびに電気的特性，伝導ノイズ特性，短絡耐量およびパワーサイクル寿命の評価結果について述べる。

1．まえがき

近年，xEVの高電圧化に伴い，車載高圧補機向けインバータには高出力化，高信頼化および温度管理への対応が求められている。そこで当社は，これらの要求に対応する車載高圧補機向けIPMとしてSAM212M25AF1を開発した。

2．製品概要

SAM212M25AF1は，車載向けの1200V/25A IPMである。本製品は，高温動作性，短絡耐量および低ノイズ性能を備え，高出力車載補機向けに開発した。現在の車載向け1200V SAM2シリーズ製品ラインアップを**表1**に示す。SAM2パッケージは，IGBT，FRD，プリドライバIC，NTCおよびブートストラップダイオードなどを1パッケージに集積した三相インバータ駆動用IPMである。これにより，外付け部品点数および実装箇所の削減が可能となり，インバータシステムの省スペース化に貢献する。**写真1**にSAM2シリーズの外観を示す。SAM2パッケージは絶縁耐圧2500Vを確保し，1200V定格に対応する絶縁設計を採用している。また，共通の外形および端子配置を採用しており，シリーズ内での基板設計を共通化している。さらに，過電流保護機能および電源電圧低下保護機能を備えている。本製品は，既存ラインナップより高い出力領域の車載補機への適用を可能とする1200V/25A品としてラインアップに追加した。

表1　車載向け 1200V SAM2 シリーズ製品ラインアップ

製　品　名	V_{CES}	I_C
SAM212M05AF1	1200V	5A
SAM212M10AF1	1200V	10A
SAM212M15AF1	1200V	15A
SAM212M25AF1	1200V	25A

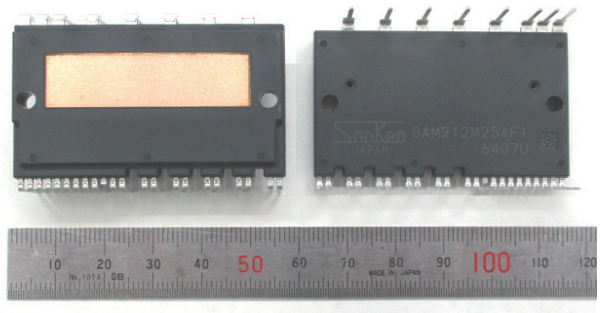


写真1　パッケージ外観

SAM212M25AF1の主な電気的特性を**表2**に示す。本製品は車載補機向けIPMとして必要な電流定格，動作温度範囲および保護機能を備えている。

＊技術開発本部ﾊﾟﾜｰﾓｼﾞｭｰﾙ開発統括部
IPM 開発部 IPM 開発 2 課

表２　SAM212M25AF1 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_{CE} = 1200V, T_J = 25℃	—	—	0.1	mA
コレクターエミッタ間飽和電圧	$V_{CE(SAT)}$	I_C = 25A, T_J = 25℃	—	1.8	2.3	V
		I_C = 25A, T_J = 125℃	—	2.3	2.8	V
ダイオード順方向電圧	V_F	I_F = 25A, T_J = 25℃	—	2.0	2.4	V
ハイサイドスイッチング特性						
ダイオード逆回復時間 *	t_{rr}	$V_{P(DC)}$ = 600V, I_C = 25A, V_{IN} = 0 ↔ 5V, T_J = 25℃, 誘導負荷	—	1.05	—	μs
ターンオン時間 *	t_{ON}		—	1.20	—	μs
ターンオンスイッチング時間 *	$t_{C(ON)}$		—	0.40	—	μs
ターンオフ時間 *	t_{OFF}		—	1.70	—	μs
ターンオフスイッチング時間 *	$t_{C(OFF)}$		—	0.35	—	μs
ローサイドスイッチング特性						
ダイオード逆回復時間 *	t_{rr}	$V_{P(DC)}$ = 600V, I_C = 25A, V_{IN} = 0 ↔ 5V, T_J = 25℃, 誘導負荷	—	1.05	—	μs
ターンオン時間 *	t_{ON}		—	0.80	—	μs
ターンオンスイッチング時間 *	$t_{C(ON)}$		—	0.40	—	μs
ターンオフ時間 *	t_{OFF}		—	1.00	—	μs
ターンオフスイッチング時間 *	$t_{C(OFF)}$		—	0.30	—	μs

* 設計保証

3. 製品の特長

3.1 1200V FS-IGBTチップ技術

定格1200VのIGBTについては，ウェーハを薄厚化したFS（Field Stop）構造の採用および安定した薄化プロセスの構築, チップ表面のトレンチゲート構造の微細化・最適化および裏面構造の改良によって，高耐圧および低損失化を実現し，産業機器向けSAM2製品の電流ラインア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℃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，**図１**に示すFS-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。

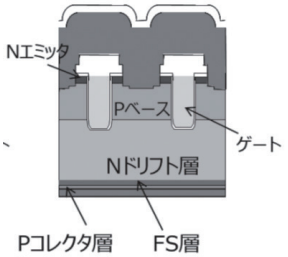


図１　車載向け 1200V FS-IGBT 活性部構造 [2]

（B）T_{Jmax}：175℃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℃保証する。**図２**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℃を超えても熱暴走しにくい設計とした。**図２**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℃で3mA程度であり，熱暴走していないことを確認した。

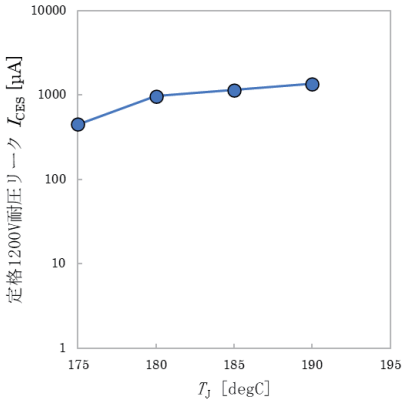


図２　SAM212M25AF1 搭載 IGBT 単チップの定格 1200V 耐圧リーク I_{CES} とジャンクション温度 T_J

（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くてはならない。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に反映している。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3**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。

（B）低温耐圧保証と順回復電圧抑制

低温-40℃の定格電圧保持のために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。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）が大きくなる。この発生した電圧がハイサイド駆動ICに負電位として印加され，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ので，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[(1)]。

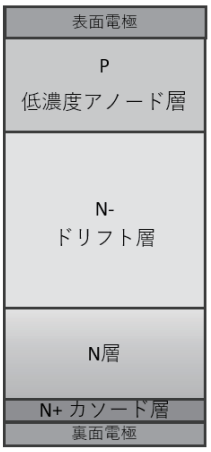


図3　車載向け定格 1200V FRD の活性部構造

3.5 DBC基板上に搭載したNTCによる温度検出

本製品は，NTCをDBC基板上に搭載している。**図4**にNTCの搭載位置を，**図5**にドライバチップ温度とサーミスタ温度の応答の違いを模式的に示す。NTCは，IGBTおよびFRDと同一のDBC基板上に配置している。DBC基板は熱伝導率が高く，パワーチップで発生した熱を効率良く伝達できるため，パワーチップの発熱を反映した温度情報を取得することが可能である。一方，ドライバチップで温度を検出する構成では，パワーチップと検出部との間に樹脂封止材が介在するため，温度勾配および熱伝達遅れが生じる。本構成では，パワーチップの発熱をより直接的に反映した温度情報を取得できる。取得した温度情報は，システムの温度管理や異常発熱の検知に用いられる。

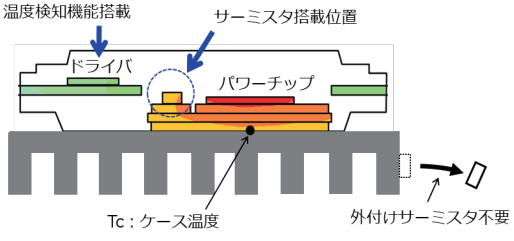


図4　NTC 搭載位置（イメージ図）

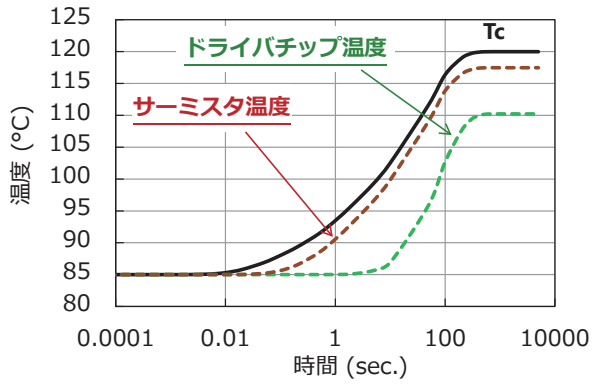


図5　ドライバチップ温度とサーミスタ温度応答（イメージ）

4. 製品評価結果

4.1 静特性評価

図6にSAM212M25AF1の$V_{CE(SAT)}$温度特性を示す。**表2**に示した$V_{CE(SAT)}$目標値に対し，25℃および125℃における測定結果はいずれも目標値を満足した。また，温度上昇に伴う特性変化は設計想定範囲内であり，安定した静特性が得られることを確認した。

図7にSAM212M25AF1に搭載したフリーホイールダイオードの順方向特性を示す。25℃における順方向電圧V_Fは目標値を満足し，所定の導通特性が得られることを確認した。

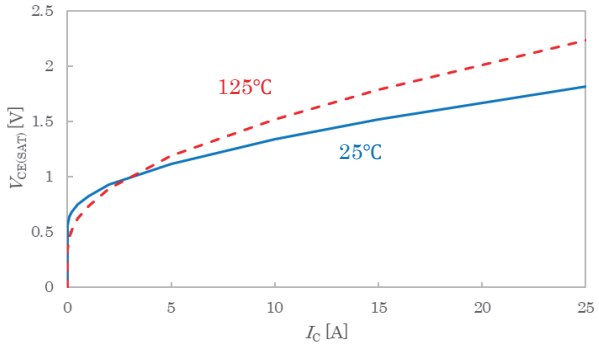


図6　IGBT $V_{CE(SAT)}$-I_C 特性

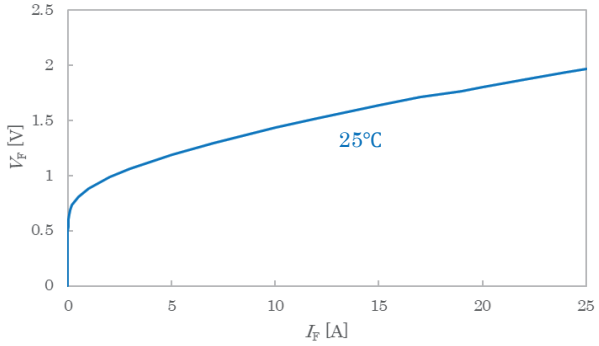
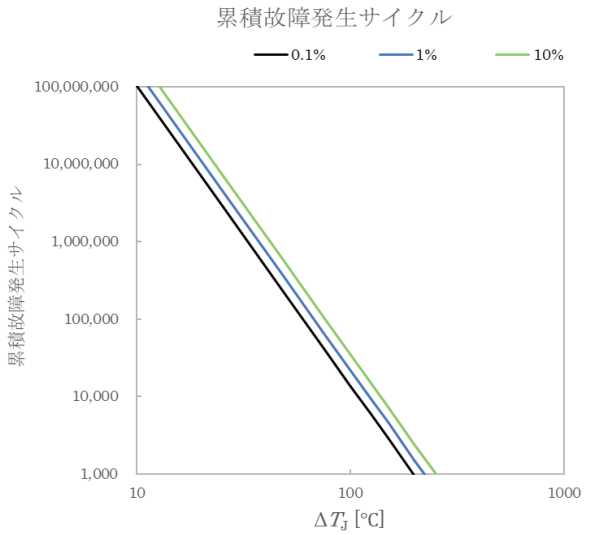


図7　フリーホイールダイオード V_F-I_F 特性

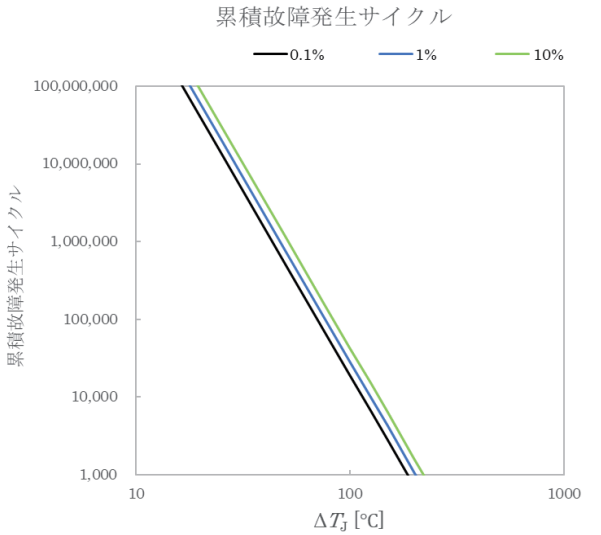
4.2 パワーサイクル試験

図8および**図9**に，SAM212M15AF1とSAM212M25AF1のパワーサイクル寿命曲線を示す。車載補機は車両寿命中に多数の起動停止および負荷変動を繰り返すため，パワーデバイスには温度変動が発生する。そのため，ワイヤ接合部およびチップ接合部の信頼性を評価する指標として，パワーサイクル寿命は重要な特性である。ΔT_J = 100℃におけるSAM212M25AF1の累積故障発生率0.1%，1%および10%の推定寿命は，いずれもSAM212M15AF1を上回った。これにより，本製品がSAM212M15AF1と同等以上のパワーサイクル寿命を有することを確認した。



累積故障発生率	0.1%	1%	10%
ΔT_J = 100℃	14068cyc	22296cyc	35637cyc

図8　パワーサイクル寿命曲線（SAM212M15AF1）

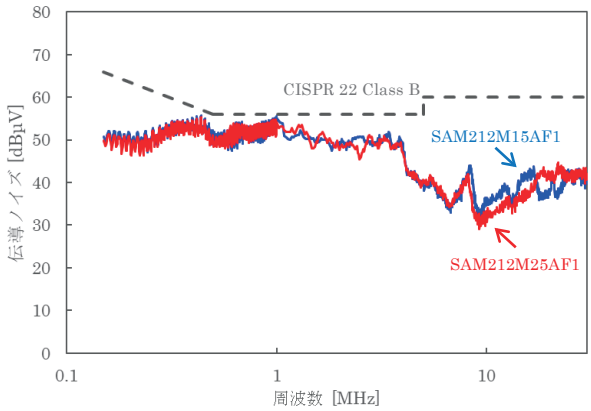


累積故障発生率	0.1%	1%	10%
ΔT_J = 100℃	19324cyc	28904cyc	43558cyc

図9　パワーサイクル寿命曲線（SAM212M25AF1）

4.3 伝導ノイズ特性

図10に，同一条件で評価した伝導ノイズ特性を示す。SAM212M25AF1は，SAM212M15AF1と同等の伝導ノイズ特性を示し，本評価条件においてCISPR 22 Class Bの規格値を下回ることを確認した。

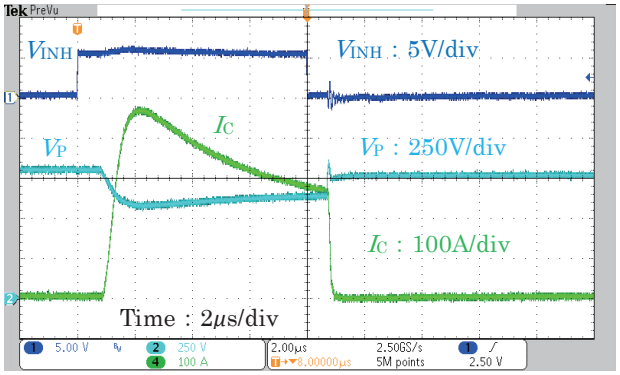


（測定条件：V_P = 600V，I = 5A rms，f_C = 10kHz）

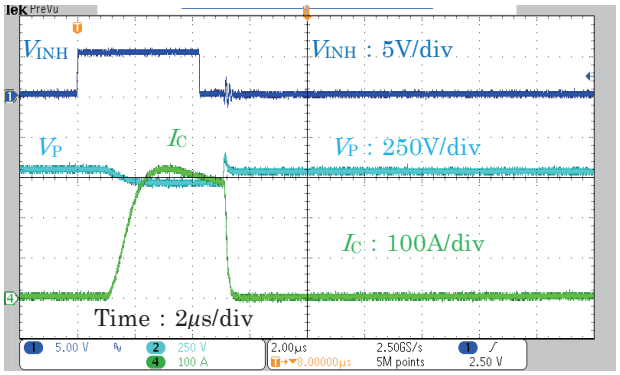
図 10　各周波数帯域での伝導ノイズ特性

4.4 短絡試験

図11に短絡試験波形を示す。T_J = −40℃および175℃において，製品目標である短絡時間t_{SC} = 3.0μsを満足した。



(a) T_J = −40℃



(b) T_J = 175℃

（測定条件：ハイサイド，V_P = 800V，V_{CC} = 16.5V）

図 11　短絡波形

5. むすび

本稿では，車載向け1200V/25A IPM SAM212M25AF1の特長および評価結果について述べた。本製品は，高温動作および短絡耐量を考慮した車載向け1200V IGBTと，ソフトリカバリー特性を有する1200V FRDを採用し，1200V/25A定格の車載向けIPMとして製品化した。評価の結果，電気的特性，伝導ノイズ特性および短絡耐量が製品目標を満足し，さらにSAM212M15AF1と同等以上のパワーサイクル寿命を実現できた。本製品をラインアップに加えることで，補機出力に応じた製品選択範囲を拡大し，高出力化する車載補機への適用に貢献する。

参考文献

(1) 石井，山田：サンケン技報，vol.57，p.4-1–4-5，(2025.11)
(2) 石井：サンケン技報，vol.52，p.17–20，(2020.11)