

SiC-SBD素子 FMPA-10565の開発

Development of SiC-SBD Device FMPA-10565

鶴岡 政行*
Masayuki Tsuruoka

熊倉 弘道**
Hiromichi Kumakura

概要 SiCは、材料物性として絶縁破壊電界が、Siの10倍、バンドギャップがSiの3倍など、優れた物性を持つため、Siデバイスでは達成不可能な、高耐圧/高速応答性能を有する次世代パワー半導体として長年期待され、研究開発が続けられてきた。従来はSiC基板に内在する結晶欠陥問題、ウェーハプロセスの高温処理による結晶欠陥問題などにより、材料が高価、生産性が低いなどの課題が残っており、結果として高価なデバイスとなっていたため、一部の特定用途に使用されるにとどまっていた。しかし、近年のSiC基板の品質向上、ウェーハプロセス改善進捗は目覚ましく、SiCデバイスがいよいよ製品化展開、普及段階に入ってきている。

当社ではSiC-SBDの最大メリットである高速応答性を生かし、電流連続モードPFC回路整流/高速チョッパ回路整流に最適な、FMPA-10565を開発、製品化を実現した。

1. まえがき

近年、次世代パワー半導体製品を使用した電子機器の量産化の情報は後を絶たない。

従来は、Siデバイスとの価格差が大きかったため、次世代パワーデバイスの採用は、コスト差を埋めて余りある性能差の発揮できるような、特殊な大型電子機器への採用が主であり次世代パワーデバイスの生産数量としては、微増の状態が続いていた。

しかし、最近のSiCデバイスでは、SiC基板供給メーカーの品質向上に合わせて、デバイス製造メーカーのプロセス改善の効果が実り、Siデバイスとの価格差も小さくなってきている。

また、汎用量産機への採用も始まっており、いよいよ市民権を得た状態となっている。

当社でも小型、汎用電子機器向けへの対応として、650V/5A定格の製品ラインアップを追加したので、紹介する。

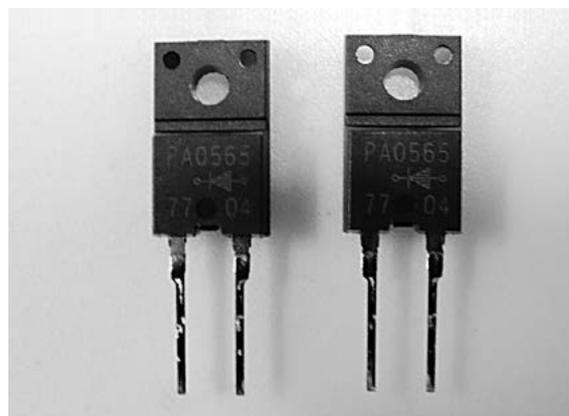


写真1 FMPA-10565の外観
External View of FMPA-10565

2. 素子構造

従来のSi製品については、PN接合からのキャリア注入による伝導度変調効果で低オン電圧が得られるバイポーラ型デバイス(PiNダイオード)によって、200V以上の高耐圧製品を実現してきた。

SiC材料においては、PN接合の拡散電位が約2.5Vと大きく、PiNダイオードの順方向オン電圧はSi製品と比較して高くなる。一方で、絶縁破壊電界強度がSiの約10倍という特徴を有し、Si製品では200V以下で適用されてきたユニポーラ型デバイス(SBD:ショットキーバリアダイオード、JBS:ジャンクションバリアショット

*技術本部 開発統括部 ディスクリット開発部 ダイオード技術課
**技術本部 プロセス技術統括部 化合物デバイス開発部 SiC開発課

キーダイオード)が、SiC製品では高耐圧2kV程度まで実現可能となる。

SiC-SBDの順方向特性は、図2に示すとおり、正の温度特性をとることが特徴的である。Si-FRDは、温度上昇と共に、キャリア濃度および再結合電流の増加によりオン電圧が低下することが広く知られている。SiC-SBDはバンドギャップが広いことによりキャリア濃度の増加が少なく、ユニポーラ型で再結合電流が生じないため、オン電圧降下はエピタキシャル層および基板の抵抗増加が支配的となり、温度上昇と共にオン電圧が増加する。

この特徴は、デバイスを並列接続した際に電流の均一化を促す役割を果たし、大電流素子や並列接続設計を容易にする。

逆方向特性は図3に示すとおり、温度上昇に伴うキャリア増加が少ないため、600Vにおいて、25℃～150℃の温度変化に対して、1桁程度のリーク電流増大にとどまっている。

素子の終端構造模式図を図1に示す。FLR (Field Limiting Ring) による電界緩和構造で650V以上の耐圧を確保した。FLRの本数、間隔を最適化しチップシュリンクを行うことで、汎用、小型電子機器市場へ展開可能な低コストを実現した。

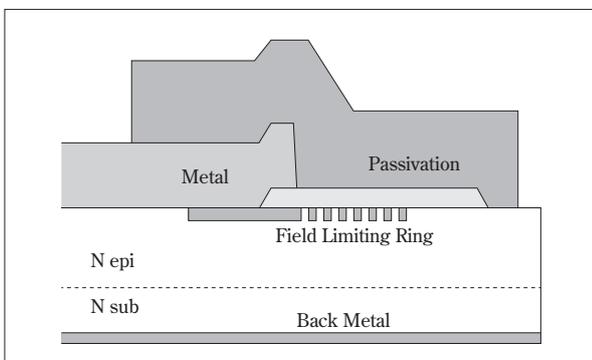


図1 終端構造模式図
Schematic diagram of termination structure

SiC-SBDのスイッチング特性は、活性領域で空乏層が広がる際の容量性電荷の排出が不十分であるため、リカバリ電流値および回復時間が小さくかつ温度依存性が無い。したがって、高周波動作可能で低損失である理想的な高耐圧パワーデバイスが得られる。

このリカバリ特性は、回路応用においてスイッチ素子側のターンオン電流のオーバーシュートを小さく抑えることに繋がり、Si-FRDと比較して大幅なターンオン損失低減が可能となる。高周波化と損失低減により、受動部品の小型化やヒートシンクおよびファンの削減などが見込まれ、コンパクトな電源が実現できる。

3. 製品概要

FMPA-10565の絶対最大定格を表1、主な電気的特性を表2に示す。

表1 絶対最大定
Absolute maximum ratings

項目	記号	条件	規格値	単位
過渡ピーク繰返し逆電圧	V_{RSM}		650	V
ピーク繰返し逆電圧	V_{RM}		600	V
平均順電流	$I_{F(AV)}$		5	A
サージ順電流-1	I_{FSM-1}	10ms	25	A
サージ順電流-2	I_{FSM-2}	10ms	18	A
サージ順電流-3	I_{FSM-3}	100 μ s	110	A
接合部温度	T_j		-40~+175	℃
保存温度	T_{stg}		-40~+175	℃

表2 電気的特性
Electrical characteristics

項目	記号	条件	規格値	単位
順方向降下電圧	V_F	$I_F = 5A$	1.75max.	V
逆方向漏れ電流	I_R	$V_R = V_{RM}$	150max.	μ A
高温逆方向漏れ電流	$H \cdot I_R$	$V_R = V_{RM}$ $T_j = 150^\circ C$	300max.	μ A
容量性電荷	Q_C	$V_R = 400V$ $di/dt = 250A/\mu s$	12typ.	nC
熱抵抗	$R_{th(j-l)}$	接合部—カソードリード間	2.5max.	℃/W

3.1 代表特性

図2に順方向特性、図3逆方向特性の代表温度特性を示す。

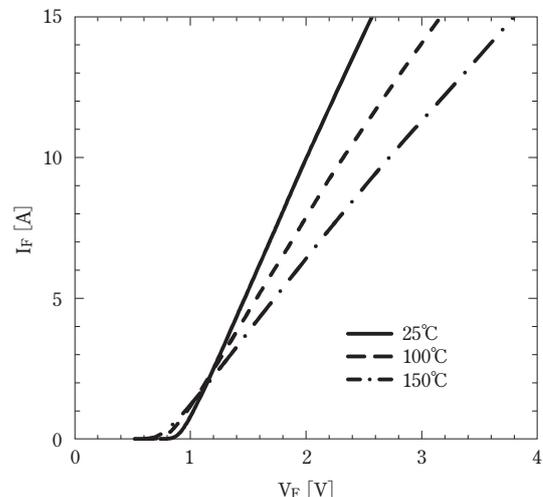


図2 I_F - V_F 代表温度特性
 I_F - V_F Temperature characteristic typical value

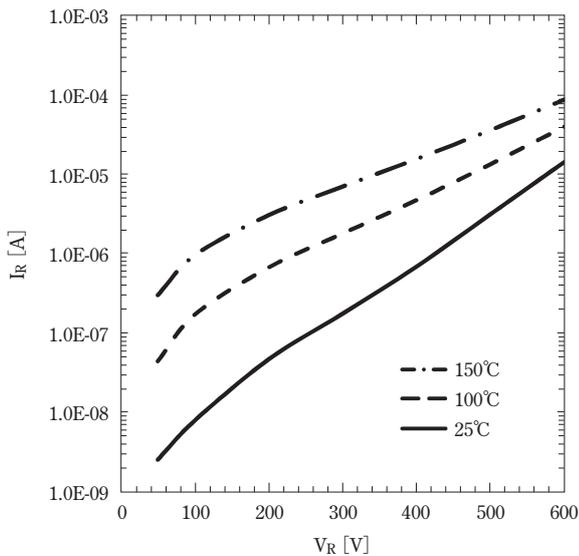


図3 V_R - I_R 代表温度特性
 V_R - I_R Temperature characteristic typical value

V_F - I_F 特性では、温度上昇により V_F 値が増加するユニポーラデバイス特有の特性を示しており、良好なスイッチング特性が期待できる特性となっている。

V_R - I_R 特性では、 $T_j=150^\circ\text{C}$ でもリーク電流は、 $100\mu\text{A}$ 程度に抑えられており、実機動作時に逆方向漏れ電流による損失を懸念する必要のない特性となっている。

3. 2 PFC 回路動作評価結果

電子機器の高調波抑制対策として、PFC (Power Factor Correction) 回路が広く使われているが、代表的な制御方式の一つである電流連続方式 (CCM) は、インダクタに連続的に電流を流すため、スイッチ素子のピーク電流が抑えられ、スイッチ素子のオン損失を小さくできるメリットがある。

しかしながら、整流ダイオードとしては、電流を流している状態でスイッチされるため、非常に高速なスイッチング特性が求められることになる回路方式である。

そこで今回、スイッチ素子の周波数可変タイプのCCM PFC試験回路で、周波数を200kHzで動作させた際のFMPA-10565の動作波形を図4, 5に示し、比較のため図6に当社従来FRDに置き換えた際の動作波形を示す。

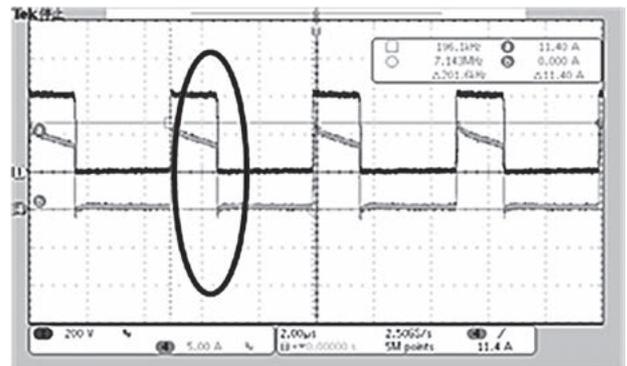


図4 FMPA-10565 PFC回路動作波形
 FMPA-10565 PFC circuit operation waveform

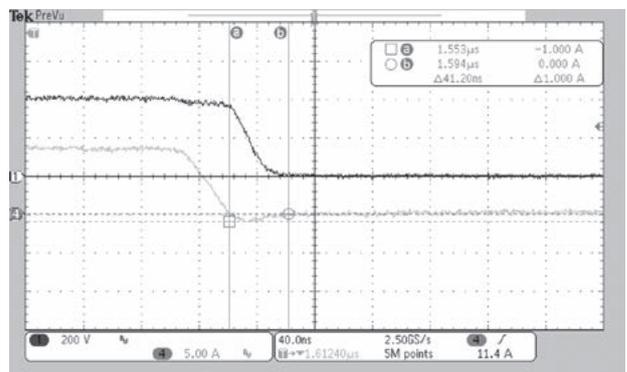


図5 FMPA-10565使用時SW波形
 Switching waveform of FAMA-10565

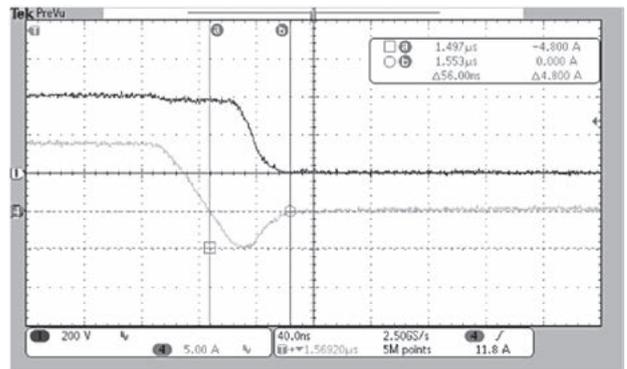


図6 Conventional FRD使用時SW波形
 Switching waveform of conventional FRD

FMPA-10565では、スイッチング時のリカバリ電流は殆ど観測されず、理想的なスイッチング特性が確認できる。また、電圧波形においては、従来FRD使用には逆方向転流直後に逆バイアスのかからないショート状態の期間が観測されているが、FMPA-10565では逆方向転流直後から逆バイアス印可が確認され、遅れることなく電圧ブロックしていることが確認できる。

この理想的なスイッチング特性は、ダイオードの損失のみならず、スイッチ素子の損失低減にも貢献する。

スイッチ素子として使用したFETのターンオン波形を図7～図9に示す。

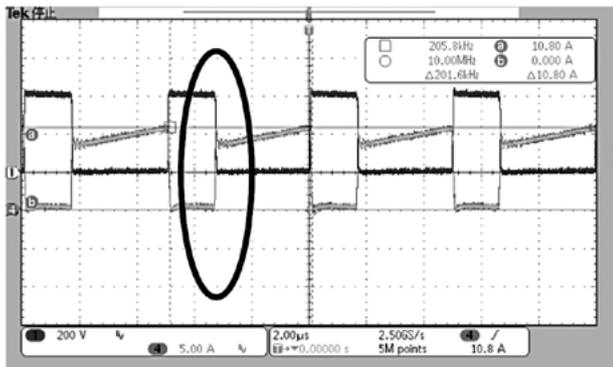


図7 FETターンオン波形
FET Turn-on waveform

ダイオードのリカバリ電流は、ターンオン時のドレイン電流に重畳して流れてしまうため、FRDを使用した際はドレイン電流のピーク値が高く、FETの損失増加の要因となるが、FMPA-10565を使用することにより、ダイオードのリカバリ電流が殆ど無いため、FETターンオン時のドレイン電流ピークが抑えられ、大幅な損失低減が可能となる。

FMPA-10565は、ドレイン電流のピーク値を抑えることによるFETの損失低下、ダイオードのリカバリ損失の低下の両面で損失低減効果を発揮し、CCMモードPFC整流素子として効率向上、温度上昇低減に貢献できる製品となっている。

4. むすび

今回、650V/5A 定格の汎用的な仕様のSiC-SBD製品をラインアップに追加した。

今後さらに汎用用途への採用拡大が期待されるSiC-SBDのラインアップをタイムリーに展開することで、市場拡大の波に乗り事業拡大を図って行く。

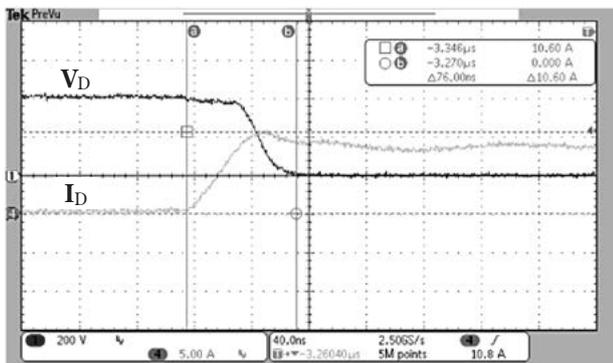


図8 FMPA-10565使用時
Using FMPA-10565

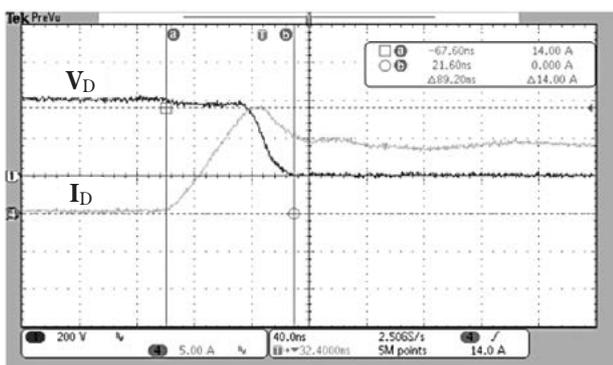


図9 Conventional FRD使用時
Using Conventional FRD