

自動車用SiCパワーモジュール

Automotive SiC Power Module

河面英夫*

Hideo Komo

折田昭一*

Shoichi Orita

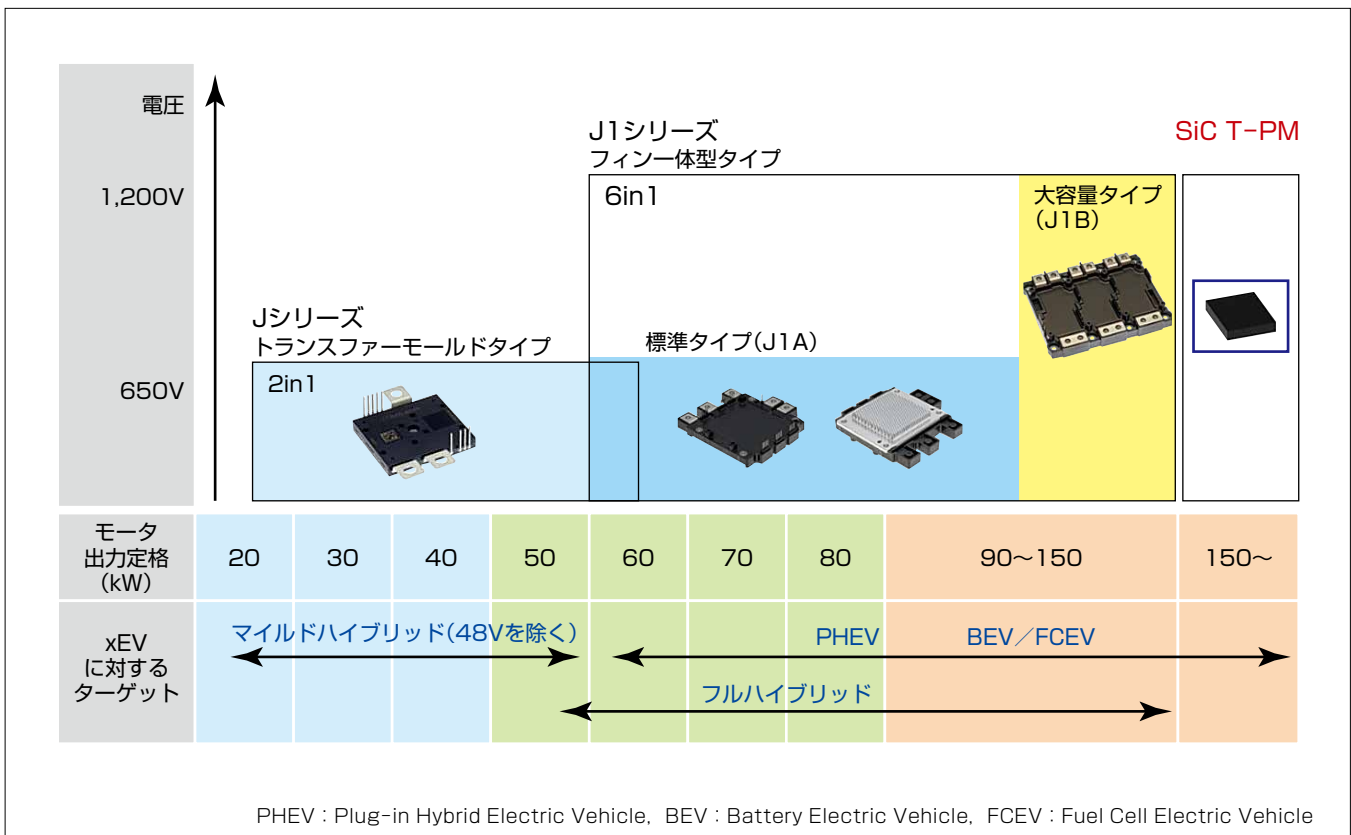
波多江慎治*

Shinji Hatae

要旨

これまで省エネルギーと環境保護の観点から電動車(xEV)の普及が進められてきたが、近年、各国の脱炭素政策としてガソリン車の新車販売禁止等、中国を始め北米、欧州と全世界でその動きが加速しており、2030年には世界の新車市場でのxEVのシェアは最大50%に達するとも予想されている。また、それらに用いられているパワーモジュール用途のパワーモジュールにはSi(シリコン)パワーデバイスが搭載された製品が主であったが、最近では小型・高効率による長航続距離化が期待できるSiC(シリコンカーバイド)パワーデバイスを搭載したパワーモジュールが各自動車メーカーで採用され、順次市場投入され始めている。

このようなxEVの進化とともに、三菱電機は1997年にパワーモジュールに制御回路を搭載した自動車用IPM(Intelligent Power Module)の製品化を皮切りに、2001年には小型・高信頼性を特長とするT-PM(Transfer-molded Power Module)を市場投入した。2015年には最新世代の自動車用ケースタイプパワーモジュールとして“J1シリーズ”を量産化しており、xEV普及に貢献している。今後更に全世界で活発化が予測されるxEVシフトに対して、当社では1990年代初めから開発を続けてきたSiCパワーデバイスと、20年余りの市場実績とノウハウを持つT-PMを組み合わせることで今後のxEV市場のニーズをキャッチアップした製品をリリースするため開発中である。



自動車用パワーモジュールのラインアップと今後の展望

当社は、小型・低背で信頼性も高いトランスファーモールドタイプと、小型・大容量のフィンー体タイプを展開することで幅広いモータ定格をカバーしてきた。両タイプとも更なる小型化や大容量化を目指して、ラインアップを充実化するために新製品の開発を進めている。

1. ま え が き

近年、温室効果ガス排出削減を目的にして、世界各国で自動車の電動化政策の取組みが活発に行われており、2025年以降順次ガソリン車販売が規制され、電動車の新車販売が拡大していくことが予測される。

当社では2001年に小型・高信頼性を特長とするT-PMを市場投入し、2015年に自動車用ケースタイプのパワーモジュールとしてJ1シリーズを市場投入し、Siパワーデバイスによる車の電動化に貢献してきた(図1)。今後更にxEVの普及を促進するためには車両の航続距離を伸ばしていく必要があり、その解決手段の一つとしてインバータ損失の低減が挙げられる。SiCパワーデバイスはSiパワーデバイスに対して半導体素子損失が7割減程度になって、インバータ損失の低減が可能になるため、次世代の半導体素子として開発が進められている。

当社はこれまで蓄積してきたSiCパワーデバイスのノウハウと、T-PMパッケージを組み合わせたSiC T-PM(仮称)を開発中である。本稿では、この開発での新たな課題とその対策について述べる。

2. SiC T-PM

2.1 SiCパワーデバイス⁽¹⁾

当社では1990年代からSiCパワーデバイスの開発を開始し、2010年に第1世代と呼ばれるSiC MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)を内蔵した電鉄用パワーモジュールをリリースして、その後セル寸法や注入条件を最適化した第2世代を2013年に量産化して民生、産業、車載用途に展開し、現在第3世代としてトレンチ型を開発中である(図2)。

現在開発中の第3世代トレンチ型SiCパワーデバイス(MIT2-MOS(Multiple Ion-implantation into Tilted Trench sidewall Metal Oxide Semiconductor))は、トレンチ構造の技術課題である、高電界によるゲート絶縁膜劣化、及び高密度化によるオン抵抗(R_{on})低減の限界を解決する目的で、当社独自技術である電界緩和構造、高濃度層(n層)形成を採用している。

トレンチゲートの角部では高電界が発生する影響によってゲート絶縁膜の劣化、素子破壊の懸念があるため、トレンチゲート下部に電界緩和層を配置することで、通電時に発生する高電界からゲート酸化膜を保護し、信頼性を向上させている。この際に電界緩和層には電荷が蓄積される影響で、高速動作の障害、すなわちスイッチング(SW)損失

の悪化が懸念される。この懸念に対して、側面接地部を配置することで、電界緩和層をp層及びソース電極と電氣的に導通し、電界緩和層の電位を安定化し、かつ電界緩和層に蓄積された電荷の排出を促して、SW損失の低減が可能になる。

トレンチゲート構造は高密度化によって R_{on} の低減を図ってきたが、高密度化によってドレイン電流密度が増大する影響で、 R_{on} の低減に限界があった。これに対して、トレンチゲート側面に高濃度層(n層)を配置することで、ドレイン電流経路のキャリア密度を増大し、 R_{on} の低減を図っている。

プレーナ型に対してMIT2-MOSはキャリアの高密度化によって R_{on} を低減しており、さらに R_{on} とゲートしきい値電圧(V_{th})のトレードオフカーブの改善を果たしている。これによってMIT2-MOSは、常温で、1,200V定格耐圧素子(アバランシェ電圧1,500V)で $V_{th} = 4.1V$ 時に規格化オン抵抗 $= 1.9m\Omega \cdot cm^2$ を達成している⁽²⁾。

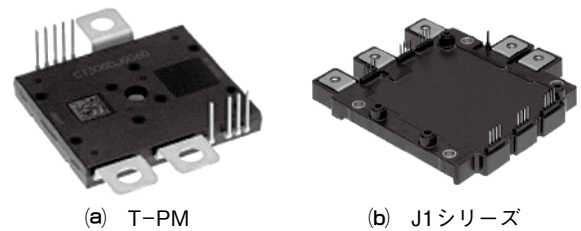
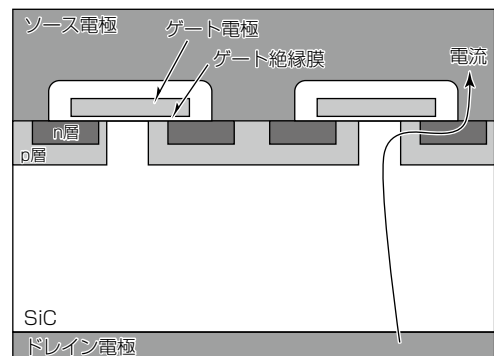
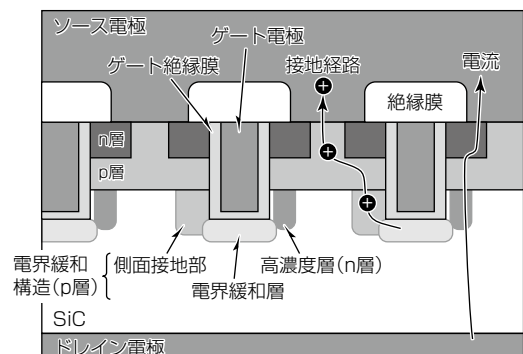


図1. 自動車用Siパワーモジュール



(a) プレーナ型SiCパワーデバイス



(b) トレンチ型SiCパワーデバイス

図2. 当社SiCパワーデバイスの構造

2.2 T-PMパッケージ⁽³⁾

T-PMは当社が民生向けに市場リリースした“DIPIPM”のパッケージ技術を車載用途に展開し、小型、低背、高信頼性をコンセプトにしたトランスファーモールド構造の製品である。

この製品の特長は、チップとモールド封止樹脂の線膨張係数のマッチングを図ることで、ケースタイプモジュールに比べて温度サイクル耐性を向上させて、さらにチップとの電気的接続をワイヤボンドからDLB(Direct Lead Bonding)にすることでパワーサイクル耐性の長寿命のほか、配線抵抗と自己インダクタンスの低減を図っている。

チップの冷却構造は、チップ直下に厚みのある銅(ヒートスプレッド)を配置し、その下面にはモールド封止樹脂よりも熱伝導率の高い絶縁シートを配置した構造にすることで、高い電気的絶縁性を持ちつつ、チップで発生した熱をヒートスプレッドで広げた後に絶縁シートを通過させ、定常熱抵抗を低減し、かつ自動車アプリケーションで重要な過渡熱抵抗を低減できる構造にしている。

T-PMは2in1で構成されており、ディスクリートデバイスのように、アプリケーションに応じて並列数を変更して出力を可変できるため、フレキシブルに回路を構成できる特長を持つ。図3にケースタイプモジュールの代表例とT-PMのパッケージ構造を示す。

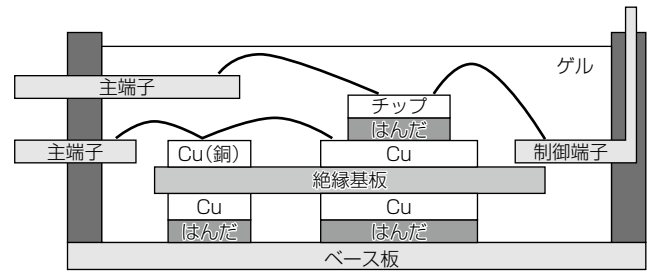
2.3 SiC T-PM

これまで培ってきたSiCパワーデバイス技術と、T-PMの特長である高信頼性、低インダクタンスを組み合わせることで、SiCパワーモジュールに求められる低損失に加えて、更なる高出力密度化、小型化、高信頼性化が可能になる。しかしながら、SiCパワーデバイスは200℃以上といった高温動作、高速動作が可能な半導体素子であるため、その特長を生かすためには従来のT-PMパッケージに対して、更なる高耐熱化、低熱抵抗化、低インダクタンス化を図る必要がある。特に高耐熱化、低熱抵抗化については新規要素技術開発が必要である。

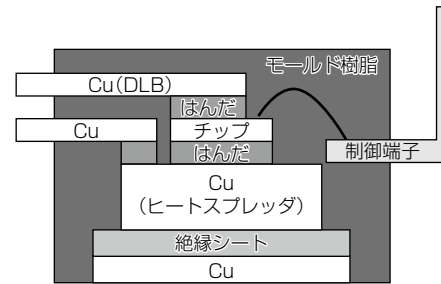
新規要素技術開発が必要な材料としては、主に次の二つが挙げられる(図4)。

(1) チップ接合材

チップ接合材には、これまで当社ではPb(鉛)フリー規制に基づいて、主にSn(錫(スズ))合金系はんだ材料を使用してきた。SiCパワーデバイスをT-PMに搭載する上で、SiCパワーデバイスの機能を生かすためにはチップ最大接合温度を増大させた使い方が必要であるが、従来のはんだ材料では接合温度増大に対して耐熱性が不十分であり、パワーサイクル性の悪化が懸念される。



(a) ケースタイプパワーモジュールの代表例



(b) T-PM

図3. ケースタイプパワーモジュールの代表例とT-PMのパッケージ構造

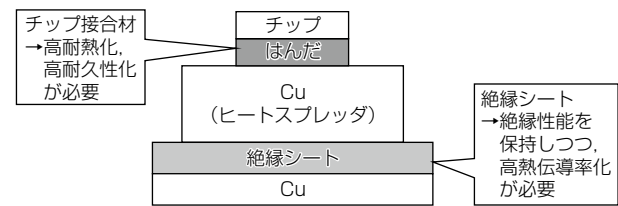


図4. SiCデバイス搭載T-PMの材料課題

(2) 絶縁シート

当社はこれまで絶縁シートの高放熱化を図るために絶縁材の材料開発を進めてきており、熱伝導率の向上を果たしてきた。SiCパワーデバイスの高い出力密度、高い接合温度に対応するためには、絶縁シートの絶縁性能を保持しつつ、更なる熱伝導率の改善が必要になる。

これら材料の技術課題と対策について3章で述べる。

3. SiC T-PMの技術課題と対策

3.1 チップ接合材

一般的に高温動作を実現するためには、Pbを主成分とする高温はんだの採用がなされてきたが、RoHS(the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment)指令が発令され、Snを主成分とする鉛フリーはんだの開発が世界中で加速されている状況にある。

Snを主成分とする鉛フリーはんだは、固相点が200~250℃であることからSiCパワーデバイスによって高温動作を実現できても、チップ接合耐久性が低下する課題があ

る。鉛フリーはんだのチップ接合耐久性低下を抑制するためには、はんだに各種元素を添加する必要があるが、背反として熱伝導率が低下するため、放熱性の悪化からSiCパワーデバイスの性能を十分に引き出すことができない懸念がある。

チップ接合耐久性と放熱性の両方を実現するためには、新たな接合材料を採用することが急務である。当社はこの課題に対してAg(銀)焼結接合に着目した。Ag焼結接合材は、熱分解できる有機保護被膜に覆われたAg粒子を使用することで、融点降下現象を利用し、はんだ接合と同等温度である300℃以下での接合を実現する。これによって接合後は900℃以上の融点かつ200W/m・K程度の熱伝導率を持つ接合材になる。

図5に鉛はんだ、鉛フリーはんだ、Ag焼結接合材の耐パワーサイクル性能を想定した温度サイクル試験(当社独自手法)結果を示す。パワーサイクル試験($T_{jmax} = 175^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_j = 90\text{K}$)で得られた発生歪(ひずみ)値に対して、温度サイクル試験で発生する歪み値を換算した結果、鉛フリーはんだは、鉛はんだに対して2.3倍の耐量を持つのに対してAg焼結接合材は鉛フリーはんだの3.3倍の耐量を持っており、高接合温度のパワーサイクル性に適した材料と言える。

3.2 絶縁シート⁽⁴⁾

絶縁シートは、熱伝導性が高いセラミックフィラー(以下“フィラー”という)を樹脂に含有したものであり、放熱性と絶縁耐圧を兼ね備えた材料である。フィラーの材質、形状、充填率等は、絶縁シートの放熱性と密接に関係して

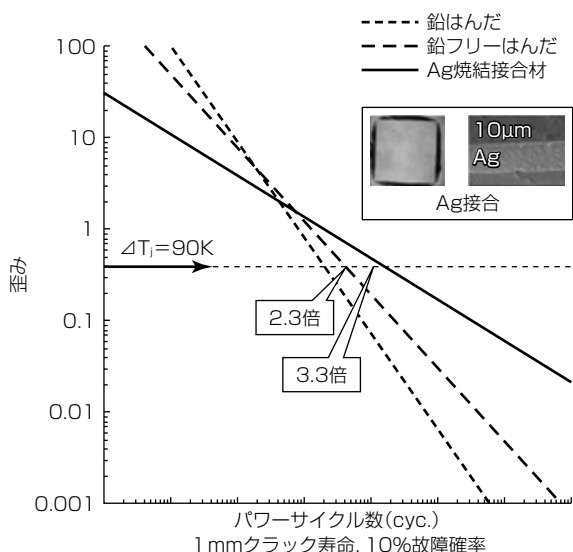


図5. 各種接合材料のSN線図

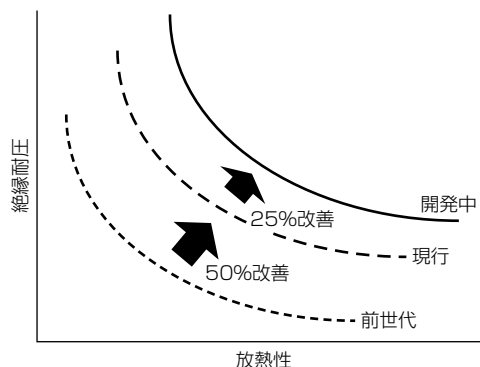


図6. 絶縁シートの放熱性と絶縁耐圧の関係性

いるが、絶縁耐圧は放熱性に対して、しばしばトレードオフの関係にある。これからフィラー調整によって放熱性は向上するが、絶縁耐圧の確保が課題になる。このように絶縁シートでは放熱性と絶縁耐圧の両者のバランス設計が必要であり、各要素の最適化が求められる(図6)。

4. 自動車用パワーモジュールの今後の展開

xEVは急速に市場が拡大し、小型車から大型車まで電動化が推し進められているため、パワーモジュールへのニーズも多様になっている。当社は本稿で述べた高出力対応であるSiCパワーモジュールに加えて、インバータの小型化が期待できるRC-IGBT(Reverse Conducting Insulated Gate Bipolar Transistor)搭載のパワーモジュールの製品開発も行っていき、様々なニーズに対応する製品展開を推し進めていく。

5. むすび

当社はこれまで20年余り自動車用パワーモジュールの開発と市場投入を行ってxEVの普及に貢献してきた。そこで蓄積してきた技術、ノウハウを活用した開発を続けるとともに、新しいデバイスやパッケージ技術を積極的に開発・活用していくことで、ますます活発になる自動車の電動化に貢献していく。

参考文献

- (1) Sugawara K., et al. : A Novel Trench SiC-MOSFETs Fabricated by Multiple-Ion-Implantation into Tilted Trench Side Walls(MIT2-MOS), PCIM Europe digital days 2021 (2021)
- (2) 菅原勝俊, ほか: 低損失化を実現する新構造SiCトレンチMOS-FET, 三菱電機技報, 96, No.3, 160~163 (2022)
- (3) 飯塚 新, ほか: 自動車用パワーモジュール“J1シリーズ”, 三菱電機技報, 94, No.3, 173~176 (2020)
- (4) 西村 隆, ほか: 高性能トランスファーモールド型パワーモジュール, 三菱電機技報, 84, No.4, 219~223 (2010)