



家庭から宇宙まで、エコチェンジ



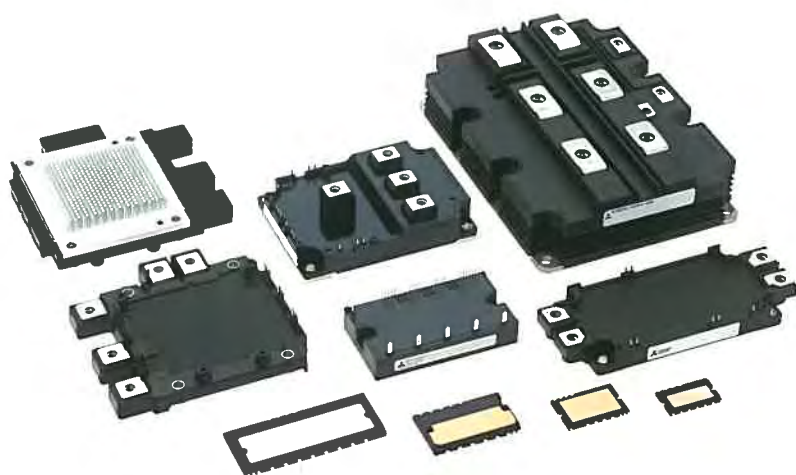
三菱電機技報

5

2016

Vol.90 No.5

パワーデバイス



目次

特集「パワーデバイス」

2026年への想像力	巻頭言	1
大村一郎		
パワーモジュールの最新動向と展望	巻頭論文	2
島 顕洋・佐藤克己		
SiCパワーモジュールの開発と応用分野の拡大		7
安藤正之・西田信也		
プレーナ型SiC-MOSFETのオン低抵抗低減化技術		11
谷岡寿一・海老池勇史・折附泰典・日野史朗・海老原洪平		
トレンチ型SiC-MOSFET		15
菅原勝俊・香川泰宏・藤原伸夫・福井 裕・足立亘平		
SiCパワーモジュールのダイナミックインテグリティ設計		19
山口義弘・大開美子・井上貴公・中嶋純一・上田哲也		
産業用第7世代パワーチップ技術		23
上馬場 龍・森本 昇・渡部俊一		
産業用高信頼性パッケージ技術		27
浅田晋助・吉田 博・近藤 聡・境 紀和・石橋秀俊		
産業用第7世代IGBTモジュール“Tシリーズ”		31
宮澤雅臣・大原孝太		
産業用第7世代IPM“G1シリーズ”		35
木村義孝・荒木健宏		
コンバータ・インバータ・ブレーキ内蔵の オールインワンタイプ“DIPIPM+シリーズ”		39
山口公輔・田中智典・中川信也		
RC-IGBT搭載パワーモジュール“SLIMDIPシリーズ”		43
柴田祥吾・張 洪波		
次世代自動車用パワーモジュール“大容量J1シリーズ”		47
猪ノ口誠一郎・斉藤省二・飯塚 新・秦 佑貴・波多江慎治		
大容量・高信頼性HVIGBTモジュール“Xシリーズ”		51
羽鳥憲司・大田賢児・田中宜彦		

Power Device

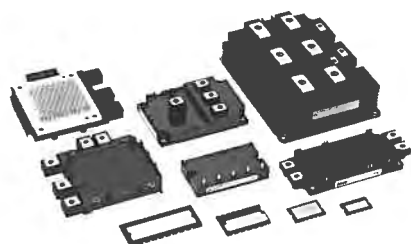
Power the Imagination to 2026	
Ichiro Omura	
Latest Trend and Prospect of Power Module Technology	
Akihiro Shima, Katsumi Sato	
Development and Expansion of Application Fields for SiC Power Module	
Masayuki Ando, Nobuya Nishida	
Low On-Resistance Technology for Planer SiC-MOSFET	
Toshikazu Tanioka, Yuji Ebike, Yasunori Oritsuki, Shiro Hino, Kohei Ebihara	
SiC Trench MOSFET	
Katsutoshi Sugawara, Yasuhiro Kagawa, Nobuo Fujiwara, Yutaka Fukui, Kohei Adachi	
Dynamic Integrity Design for SiC Power Module	
Yoshihiro Yamaguchi, Yoshiko Obiraki, Takahiro Inoue, Junichi Nakashima, Tetsuya Ueda	
7th Generation Power Chip Technologies for Industrial Applications	
Ryu Kamibaba, Noboru Morimoto, Shunichi Watabe	
Packaging Technologies for High Reliable Industrial Power Modules	
Shinsuke Asada, Hiroshi Yoshida, Satoshi Kondo, Norikazu Sakai, Hidetoshi Ishibashi	
7th Generation IGBT Module "T Series" for Industrial Applications	
Masaomi Miyazawa, Kota Ohara	
7th IPM "G1-Series" for Industrial Applications	
Yoshitaka Kimura, Takehiro Araki	
All-in-one Type "DIPIPM+ Series" with Built-in Converter, Inverter and Brake	
Kosuke Yamaguchi, Tomofumi Tanaka, Shinya Nakagawa	
"SLIMDIP Series" Power Module Using RC-IGBT	
Shogo Shibata, Hongbo Zhang	
Next Generation Power Module "High Power J1 Series" for EV and HEVs	
Seiichi Inokuchi, Shoji Saito, Arata Iizuka, Yuki Hata, Shinji Hatae	
HVIGBT Module "X Series" with High Power Rating and High Reliability	
Kenji Hatori, Kenji Ota, Nobuhiko Tanaka	

特許と新案

「半導体装置」「炭化珪素半導体装置」	55
「炭化珪素半導体装置の製造方法」	56

スポットライト

オールインワンタイプのDIPIPM“DIPIPM+シリーズ”



表紙：パワーデバイス

三菱電機は、産業、家電、電力、電鉄、自動車、新エネルギー等、幅広いパワーエレクトロニクス製品に向けたパワーデバイスを供給している。内蔵される半導体チップは主力のSi(Silicon)に加え次世代チップであるSiC(Silicon Carbide)のラインアップも充実している。

さらに、それら半導体チップを搭載するパッケージにも樹脂系の絶縁材や硬質樹脂封止、放熱フィン一体型形状など、最先端の技術を採用し、幅広い顧客からの要望に対応できる製品群を充実させている。表紙の写真は代表製品である。

巻/頭/言

2026年への想像力

Power the Imagination to 2026

大村一郎

Ichiro Omura



はじめに

パワー半導体が本格的に使われ始めて50年以上が過ぎた。今ではギガワットクラスの送電から、電車やハイブリッド自動車、家電やコンピュータ、ロボットやモータ用機器に至るまで、ほとんどすべての電気に関わる機器にパワー半導体が使われている。パワー半導体は制御対象が電力であるため特別な半導体として位置づけられているが、今後10年で半導体技術全体が統合的に電力機器やシステムに関わっていくと予想される。ここでは過去を振り返るとともに現状を直視し、将来を想像する中で10年後のパワー半導体についての考えを述べる。

2006年以降の状況

この10年間の社会や半導体技術の変化は大きなものであったと思う。初代iPhone^(注1)が2007年に発表され、半導体では更なる微細化と300mm化が急速に進んだ。ハイブリッド自動車が急速に普及し、新幹線が輸出されるようになった。アジア諸国による工学研究の量・質ともに急速に向上し、我が国はいくつかの分野で産業上のポジションを失った。市場や社会の評価軸が次々と変化し、気付かなかった現実が突然現れるなど、将来が見通せない時代に入った印象が強い。

パワー半導体に目を移すと、その需要は過去10年間で拡大し、それに伴うウェーハの大口径化、生産性の向上、生産拠点の地政学的拡散、性能改善が着実に進んだ。我が国のパワー半導体業界は従来の枠組みを大切にしながら、信頼性向上やノイズ対策など見えにくい性能を地道に改善してきたことで、この10年間で乗り切ってきたと思う。一方で、新しいデバイス技術の提案が少ないこともこの10年間の特徴である。要求される技術レベルの高さから研究が長期化する傾向にあることがその理由だと想像する。

(注1) iPhoneは、Apple Inc.の登録商標である。

現在の状況

我々の社会は多様な価値観を受け入れる代わりに、より多くの新たな問題と直面することとなった。我が国も様々な問題を抱える中で立ち位置を模索する難しい時期にきている。半導体業界では、技術革新を引っ張ってきた“ムーアの法則”が発表以来50年を迎え、半導体技術全体がこの法則からの離脱を迫られている。

パワー半導体の需要拡大とともに製品の幅がチップから

インバータ応用のモジュールにまで広がり、市場が多様化した。各メーカーは力のある顧客との垂直的な関係を維持しながら標準化の力による世界市場の取り込みが迫られている。製造面では、日米欧による高性能・高機能化競争の一方で、新興国が高耐圧半導体や化合物半導体の市場に参入した。加えて、水平分業が進み、パワー半導体ビジネスへの参入バリアが低下した。海外では企業統合によって巨大なパワー半導体専門メーカーが登場し、IoE(Internet of Everything)、IoT(Internet of Things)やIndustrie4.0といった構想をパワー半導体に取り入れようとする企業も現れた。パワー半導体は世界中の企業にとって多様な関わり方が可能な産業となり、我々の予想を超えて発展の方向も多様化しつつある。

2026年の状況

将来について想像してみると、国内外を問わず次々と現れる複雑な対立軸に対して、人類の知恵で解決策を見いだしていく試みが続く中で、日米欧の影響力は低下してくる。半導体では“ムーアの法則”がその役割を完全に終えているはずである。“ムーアの呪縛”から解放された結果、パワー半導体技術とマイクロ・エレクトロニクス技術の垣根が一気に取り払われ、急速に視界が広がってくると予想される。パワー半導体を含めた幅広い半導体技術全体は、多様な社会的価値を包含した複合的かつ現実的なビジョンの中のコア技術として新しいイノベーションの段階に入っているはずである。

おわりに：2026年への想像力

2026年、我々は自らの想像力を発揮し、多様化するパワー半導体技術を含む電力やエネルギーに関わる新しいエレクトロニクスの構築に向かっているのではないだろうか。現在研究が進められているSiC(Silicon Carbide)パワー半導体、高性能シリコンパワー半導体は、これらの新しいエレクトロニクスの中に位置づけられ、多様な技術と融合することで真価を発揮し、世界的な課題の解決に貢献するものと思われる。

2026年までの10年間は我々の想像力が試される10年である。使い古されたキーワードや通念は捨て去り、自らの想像力でリアリティを見つけ出さなければならない。このリアリティこそが我々のコアコンピタンスであり、新しいエレクトロニクスの核心へとつながるのだと思う。

パワーモジュールの最新動向と展望



島 顕洋*



佐藤克己**

Latest Trend and Prospect of Power Module Technology

Akihiro Shima, Katsumi Sato

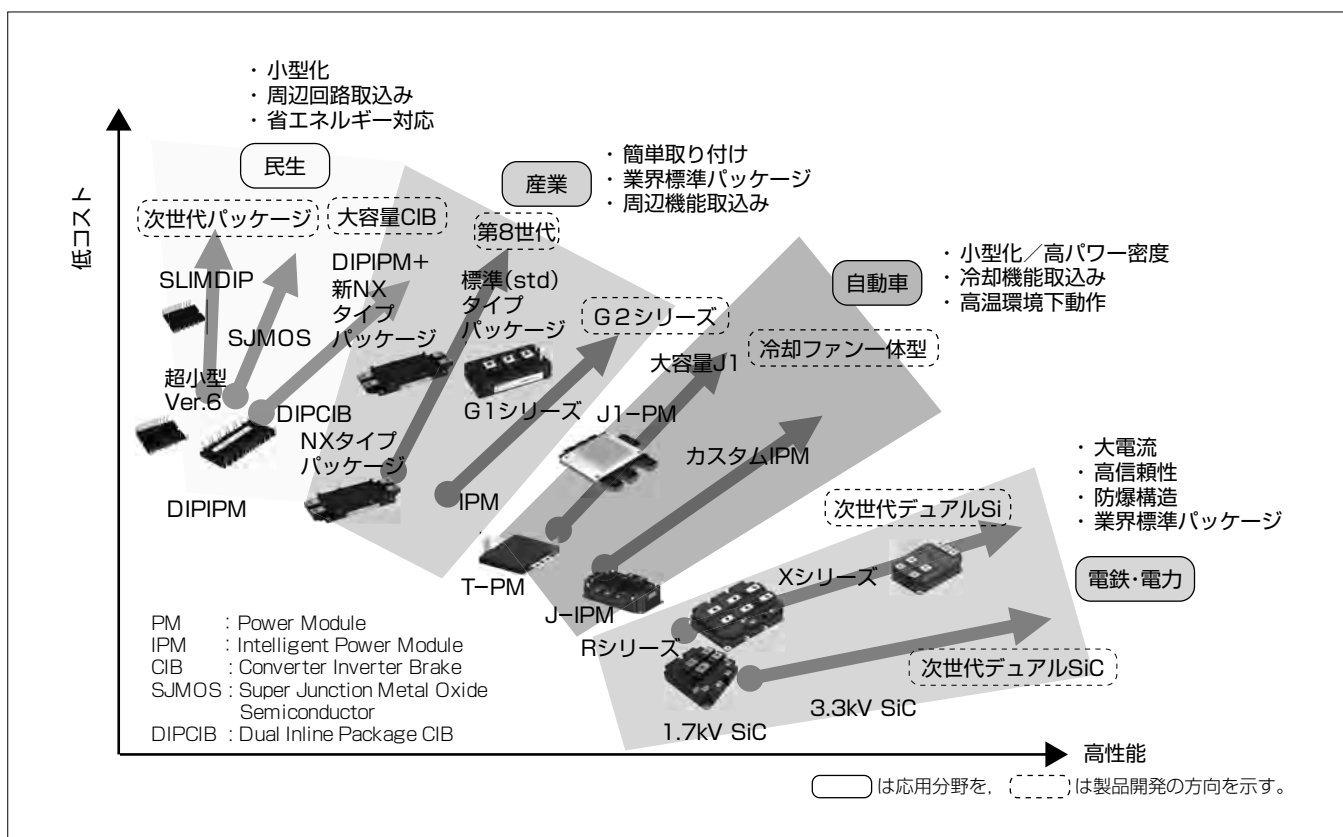
要 旨

電気エネルギーの有効利用が急務である。パワーエレクトロニクス (PE) 技術は、省エネルギーに貢献するのはもちろんのこと、創エネルギー (太陽光発電や風力発電、地熱発電などのCO₂を排出しない電気エネルギーの創造) 技術の効率化を可能にする、電気エネルギー有効利用の中核的な技術である。応用分野は拡大しており、PE機器市場は高い成長率を保ち続けている。

PE機器の心臓部に当たる重要部品がパワーデバイスであり、パワーデバイスの性能がPE機器の性能を左右すると言っても過言ではない。三菱電機は、バイポーラデバイスの優れた通電性能を持ち制御が容易なSi (Silicon) - IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) チップとモジュールパッケージ技術とを組み合わせることで、百W

級から数MW級までのパワーモジュールをラインアップして、民生から産業、自動車、電鉄・電力までの応用分野のPE応用機器に対応してきた。

PE機器の応用分野拡大に伴って、ユーザーのパワーモジュールへの主たる要求は多様化し始めている。最新のSiチップ改良技術 (第7世代技術) やSiC (Silicon Carbide) デバイス技術の確立・導入を進めて低損失化や高密度実装による小型・軽量化を推進し、さらに、EMI (Electro Magnetic Interference) の改善技術やユーザー側の設計・組立てを簡素化するための高機能化、生産性向上にも取り組み、それらの技術を選択的に組み合わせたバランス設計でコスト低減を実現しながら、それぞれの応用からの多様な要求に応じていく。



パワーモジュール製品の普及・拡大に向けた製品開発トレンド (多様な製品群)

定格耐電圧が数百Vから数千V、定格電流が数Aから数千Aの大きな容量領域をカバーするパワーモジュールは、民生、産業、自動車及び電鉄・電力などの応用機器に使用されている。応用分野の拡大に伴って、パワーモジュールへの要求が多様化しているが、高性能化技術と低コスト化技術を基盤技術として継続的に改良するとともに、用途に応じた技術の取捨選択を行って製品化を進めていく。

1. ま え が き

PE機器の中核部品であるパワーデバイス(主にSi-IGBT)の絶え間ない性能向上で、数Aから数千Aまでの電流量を、また数百Vから数千Vまでの定格電圧を持つパワーモジュールを実現しており、PE機器の発展に大きく貢献してきた。今後も、SiチップやSiCチップ、それらのパッケージ技術がPE機器の性能改善に貢献するであろう。

性能改善という大きな潮流に加えて、PE機器の普及拡大に伴って要求の多様化という新たな潮流が始まっている。これからのパワーデバイスには、応用分野ごとの性能改善と多様化のバランス設計が重要な技術となるであろう。

当社は、機器の低損失化、小型・軽量化要求に応えるために、Si-IGBTやSiCチップなどの主たる半導体チップ技術と高密度パッケージ実装技術を基盤技術として要素技術を確立していく。さらに、多様化に応える技術として、ユーザー側の設計や組立ての負荷軽減のための高機能化技術やEMIの改善に取り組んでいく。基盤技術と多様化技術を応用分野ごとに取捨選択したバランス設計でコスト低減を図りながら、高性能化、小型・軽量化、高機能化を進めていく。

本稿では、バランス設計を推進している当社のパワーモジュールの最新動向と展望について述べる。

2. パワーモジュール技術の最新動向

2.1 パワーチップ技術

現在のパワーモジュールの主力チップはSi-IGBTとSiダイオードである。Si-IGBTは、1980年代半ばの実用化以降、数年ごとに世代交代を繰り返して、低損失化が図られてきた。現在、当社のIGBTは第7世代まで進化している。第7世代技術(本号23ページ)では、MOS(Metal

Oxide Semiconductor)ゲート構造を持つ表面の超微細加工技術、極薄デバイスの高精度な加工・設計の技術を総称した極薄ウェーハ技術、表面だけでなく裏面にも回路を形成する裏面パターンニング技術を中核技術としている。これらの新技术を用いた第7世代IGBTは、2014年に民生用の“DIPIPM”に最初に搭載された。それ以降、産業用及び自動車用、電鉄・電力用として1,200V品から6,500V品までシリーズ化開発している⁽¹⁾⁽²⁾。図1に1,200V IGBTの第4世代から第7世代までの進化(断面構造と電力損失低減効果)を示す。世代が進むにつれて、Si-IGBTチップの厚さは薄くなり、第7世代IGBTはpn接合の耐圧保持に必要な厚さの理論限界にまで近づいている。この厚さの低減と極薄チップの最適設計によって、諸性能悪化を招くことなく、オン電圧(コレクター-エミッタ間飽和電圧(V_{CEsat}))の低減を実現している。 V_{CEsat} はターンオフスイッチング損失(E_{off})とトレードオフ関係があるため、同一の E_{off} 値(0.1mJ/A/p)で比較した。その結果、第7世代IGBTの V_{CEsat} は第4世代IGBTの V_{CEsat} の70%にまで低減改善している。

パワーモジュール内でIGBTチップと逆並列に接続される還流用FWD(Free Wheeling Diode)でも、順電圧(V_F)と逆回復損失(E_{rec})のトレードオフ関係の改善を図っている。改善に用いた主要技術は、極薄ウェーハ技術と裏面パターンニング技術である。図2に、従来のFWDと第7世代FWD(RFC(Relaxed Field of Cathode)-Diode)の断面構造及び V_F と E_{rec} のトレードオフ関係を示す。カソード側(裏面)にpn接合で回路を形成したことで、逆回復動作時のn-層中の電荷量を制御でき、その結果として E_{rec} を40%低減した。カソード側への回路形成は、低電流時の逆回復動作でしばしば発生する電圧振動(リングング)を抑制する効果も併せ持ち、モジュールのEMI改善にも役立っている。

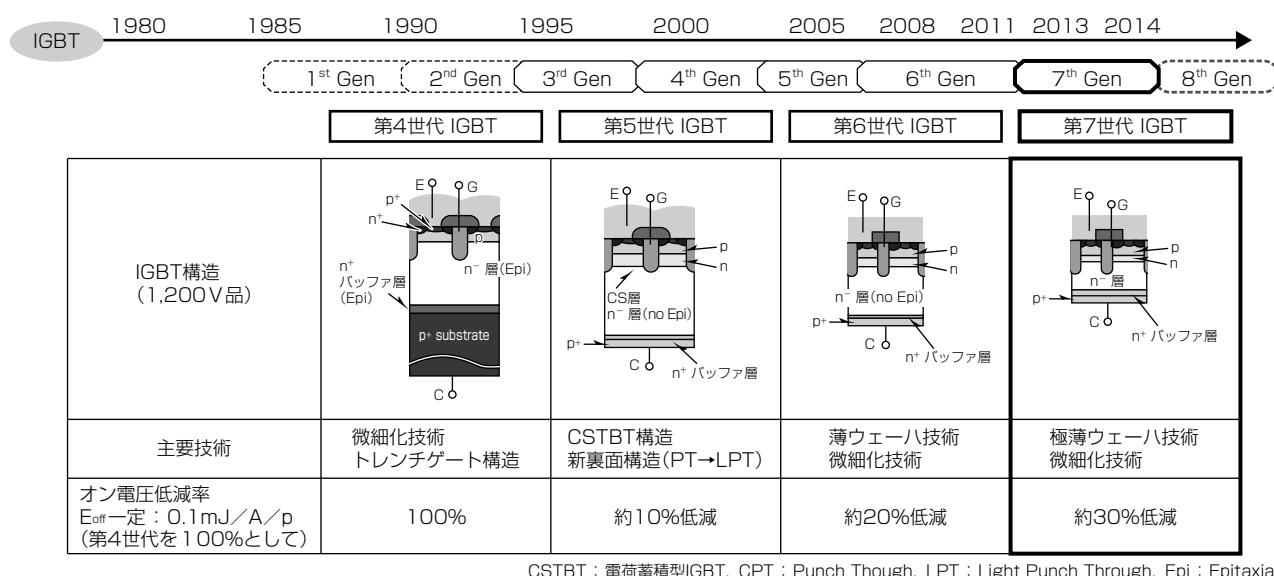


図1. IGBTの進化(断面構造と電力損失低減効果)

Siチップに比べて能動層の厚みを10分の1ほどにすることが可能なSiCチップは、オン電圧とスイッチング損失のトレードオフ関係を劇的に改善できる。既に、600Vから3,300VまでのSBD(Schottky Barrier Diode)チップ及びMOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(本号11ページ及び15ページ))チップを製品化して、モジュールの更なる低損失化を進めている。

2.2 パッケージ技術

トランスファーモールドパッケージでは、更なる高密度実装技術の開発に注力した。従来のDIIPMでは14~16個のチップを一括でモールドアセンブリしていたが、高絶縁・高放熱性能と高流動性を両立させるモールド材料の開発・導入によって、20数個までのチップを一括モールドアセンブリできるようにした。この技術開発で、DIIPMにコンバータ回路とブレーキ回路を付加することが可能になり、モーター駆動用のインバータシステムとして必要なパワー部主回路全てを内蔵した高実装密度のパワーモジュール“DIIPM+シリーズ”(本号39ページ)を製品化した⁽³⁾。

ケースタイプパッケージでは、ユーザーの利便性、小型・軽量化を追求したパッケージを開発している。産業用では、樹脂絶縁銅ベース板構造を新たに開発・導入したことでコスト低減と高放熱性能を両立させている。さらに、はんだを使用せずにプリント基板へ高信頼度の圧着

接続が可能な独自の新型プレスフィット接続端子付きパッケージ(図3)や、ユーザー組立て時にモジュールへのグリス塗布を不要にしたPC(Phase Change)-TIM(Thermal Interface Material)付きパッケージ(図4)などを製品化(本号27ページ)している。

自動車用では、接合-フィン間の熱抵抗を20%低減し、更にフィンの材質を最適化して製品質量を半減させた冷却フィン一体型の大容量パッケージ“大容量J1シリーズ”(本号47ページ)(図5)を、電鉄・電力用では、直並列接続が容易な電極端子を持つ次世代デュアルパッケージ(図6)を開発して、順次製品化を図っている。

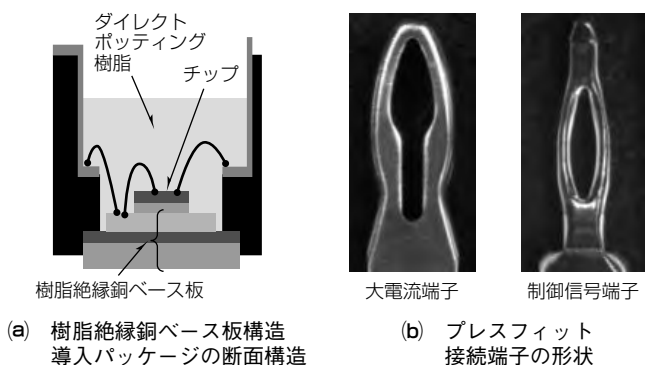


図3. ケースタイプパッケージの新技术

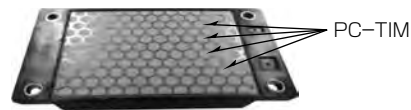


図4. 銅ベース板に塗布されたPC-TIM

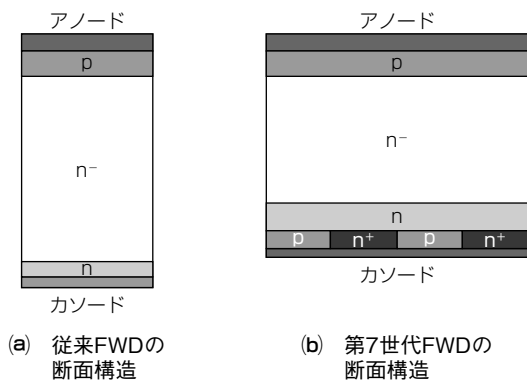


図2. FWDの断面構造と V_F - E_{rec} のトレードオフ関係

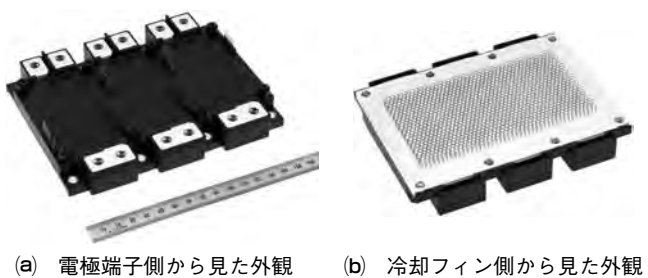


図5. 大容量J1シリーズの冷却フィン一体型パッケージ

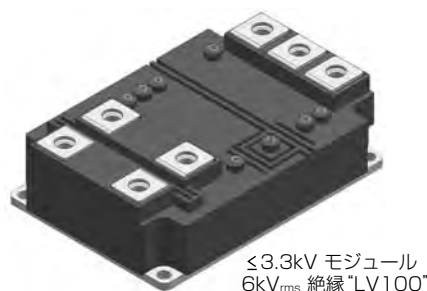


図6. 次世代デュアルパッケージ

3. 市場別の製品技術と展望

3.1 民生応用製品

民生用パワーモジュールの最大市場であるエアコンへの応用では、省エネルギー性能を示すAPF(Annual Performance Factor)国内基準が適用されていることから、DIIPMには低損失化が要求されている。そこで、IGBTに比べて低電流動作時の損失を小さくできるSJ(Super Junction)-MOSFETと、急冷などの過負荷動作にも対応できるようにIGBTと並列接続したSJ-MOSFET内蔵DIIPMを開発・製品化した。SJ-MOSFET内蔵DIIPMの損失は国内最高レベルのAPF性能をもたらすが、更なる高性能化に対応する技術として、SiC-MOSFETを内蔵したフルSiC DIIPMの製品化も進めている。定格電圧600V、電流容量15Aの従来のDIIPMとSJ-MOSFET内蔵DIIPM、フルSiC DIIPMの損失比較を図7に示す。損失評価条件は、電源電圧(V_{cc}) = 250V、出力電流(I_o) = 1.5Arms、接合部温度(T_j) = 25℃、キャリア周波数(F_c) = 5 kHz、力率(P.F) = 0.95、変調率(M) = 0.8(暖房中間)である。SiC-MOSFETを内蔵したフルSiC DIIPMは、高性能SJ-MOSFET内蔵DIIPMと比べても50%以上の大幅な損失低減が可能である。

欧米の低容量民生市場では、価格面メリット等の観点からディスクリットデバイスが用いられている。“SLIMDIPシリーズ”(本号43ページ)は、第7世代IGBT技術を活用してIGBTとFWDを一体化(Reverse-Conducting IGBT: RC-IGBT)することで、従来の性能・機能を損なうことなくパッケージ体積を30%小型化した⁽⁴⁾。この小型化は、金属フレームの単位面積当たりの製品取れ数を高めて、生産性を向上させる。図8に、従来の超小型DIIPMとSLIMDIPの外観を示す。

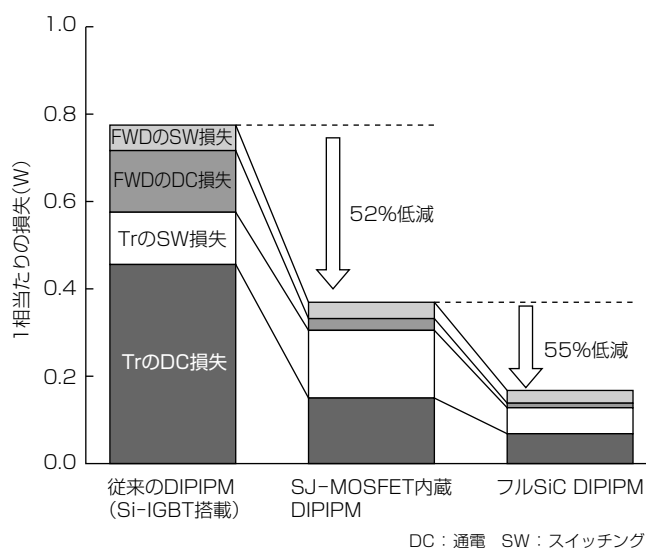


図7. DIIPMの損失比較

3.2 産業応用製品

産業用モジュールは、“NXタイプパッケージ”をベースに製品展開を行ってきたが、応用分野の広がりや分野別のモジュールへの要求が多様化し始めていることから、NXタイプパッケージに加えて当社標準(従来の“NFシリーズ”互換IGBTモジュール仕様)(std)タイプパッケージでも製品化を進めた。両パッケージでの製品化に当たり、第7世代チップ技術と樹脂絶縁銅ベース板構造、PC-TIM、プレスフィット接続端子を選択・組合せして、低損失化と利便性向上を実現している。IPMにも同様の技術を導入して“G1シリーズ”(本号35ページ)として製品化している。

図9にG1シリーズIPMと従来のIPMのEMIノイズ評価結果を示す。周波数50MHzから100MHzの領域にわたってEMIノイズが5dBμV/m程度低く、改善しているのが分かる。スイッチング時の電流の時間変化率(di/dt)制御性改善及びFWDのリングングの抑制がEMIノイズ低減に寄与している。

さらに、今後機能の拡充やSiCデバイスの採用などでモジュールの性能向上を実現していく。SiCデバイスを用いた性能向上に当たっては、SiC材料が高価であるため、FWDだけをSiC化したハイブリッドモジュールとトランジスタまでSiC化したフルSiCモジュールを用途・要求性能ごとに使い分けすることを提案していく。フルSiCモジュールはハイブリッドモジュールと比べて損失を半分以

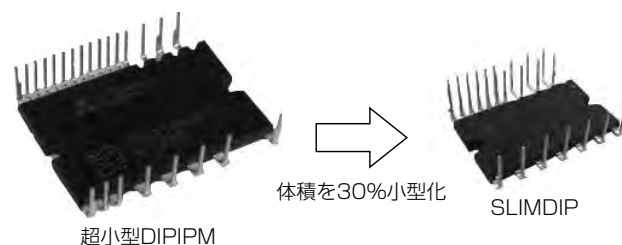


図8. 超小型DIIPMとSLIMDIP

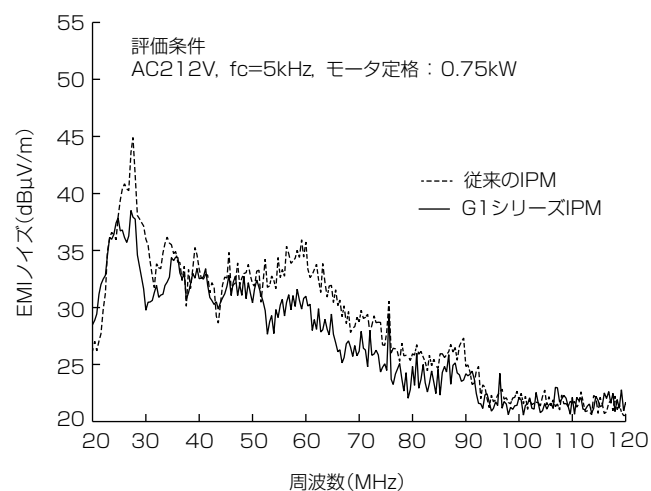


図9. 650V/100A IPMのノイズ評価結果

表 1. 大容量J1シリーズの製品ラインアップ

形名	定格電圧	定格電流	結線方式
CT600CJ1B120	1,200V	600A	6in1
CT1000CJ1B060	650V	1,000A	6in1

下にでき、高周波動作も可能であるため、数十kHzの動作が必要な高周波電源機器応用などに展開してSi-IGBTやハイブリッドモジュールとすみ分けしていく。

3.3 自動車応用製品

自動車市場では、トランスファーマールド技術を適用することで長寿命化と小型化を両立させたトランスファーマールド形パワーモジュール(T-PM)を主力製品と位置付けてきたが、より一層の小型・軽量化を目的に冷却性能を高めた冷却フィン一体型パワーモジュール“J1シリーズ”をT-PMの後継として製品化してきた。さらに、自動車の電動化を見据えて、ラインアップ強化のための大容量の冷却フィン一体型パワーモジュール“大容量J1シリーズ”を新たに開発中である。大容量J1シリーズは、J1シリーズに用いたT-PM 6台とCu冷却フィンを一体化した6in1製品であり、実装面積を約60%縮小改善している。表1に大容量J1シリーズの製品ラインアップを示す。併せて、今後個別ユーザー対応のカスタムIPM開発にも必要に応じて対応していく。

3.4 電鉄・電力応用製品

電車への応用では、耐電圧3.3kV電流定格1,500Aや耐電圧6.5kV電流定格750AのHV(High Voltage)-IGBTを“Rシリーズ”として拡充してきたが、洋上風力発電市場や電力国際連携のためのHVDC(High Voltage DC Transmission)市場等の電力応用市場には更なる大容量化が必要とされる。第7世代IGBTチップ技術を適用することで、Rシリーズと同一パッケージでありながらRシリーズ比で電流量を20%から30%ほど増加改善させた“Xシリーズ”(耐電圧6.5kV電流定格1,000AのHV-IGBT)を製品化した⁽⁵⁾(本号51ページ)。間もなく耐電圧3.3kV電流定格1,800AのHV-IGBTも製品化を完了する予定である。Xシリーズは、損失の大幅低減も実現している。図10に、耐電圧6.5kV電流量1,000Aモジュール(Xシリーズの“CM1000HG-130XA”)の V_{CEsat} と E_{off} のトレードオフ曲線を示す。併せて、従来製品(Rシリーズの“CM750HG-130R”)の実力値も示す。同一の E_{off} 値(=6J)で比較すると、従来のCM750HG-130Rに比べて、CM1000HG-130XAの V_{CEsat} は35%も小さく、通電損失の大幅な低減を実現している。シリーズ化製品を順次市場へ投入して、順応性の高い電力基盤網の構築に寄与していく。

一方、デバイスのスイッチング性能の向上によるリアク

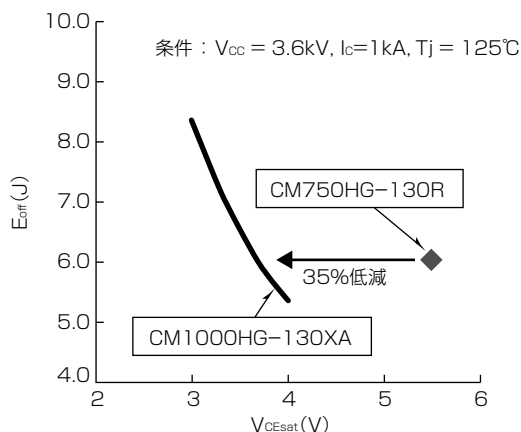


図10. 6.5kV HV-IGBTの V_{CEsat} と E_{off} のトレードオフ関係

トルの小型化など、高付加価値をシステム機器にもたらし应用では、SiCを用いた製品の継続的な拡充を進めていく。

4. む す び

第7世代チップ技術、SiCチップ技術や高密度実装パッケージ技術を基盤技術として、低損失化、小型・軽量化、低ノイズ化のニーズに応えている。さらに、それぞれの応用分野の動向をつかみ、ラインアップの充実化、プレスフィット端子設計技術及びPC-TIM技術などの機能充実化技術を選択的に基盤技術に組み合わせるバランス設計を進めている。これによって、低コスト化を図りながらユーザーの多様なニーズにもタイムリーに応じて、事業を発展させ、低炭素社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) Miyazawa, M., et al.: 7th Generation IGBT Module for Industrial Applications, PCIM Europe 2014, 34~38 (2014)
- (2) Ohara, K., et al.: A New IGBT Module with insulated Metal Baseplate(IMB) and 7th Generation Chips, PCIM Europe 2015, 1145~1148 (2015)
- (3) Yamaguchi, K., et al.: A New Version Transfer Mold-Type DIIPMTMs with built-in Converter and Brake function, PCIM Asia 2015, 272~276 (2015)
- (4) Shibata, S., et al.: New Transfer-Molded SLIMDIP for white goods using thin RC-IGBT with a CSTBTTM structure, PCIM Europe 2015, 1149~1154 (2015)
- (5) Ota, K., et al.: The Next Generation 6.5kV IGBT Module with High Robustness, PCIM Europe 2014, 28~33 (2014)

SiCパワーモジュールの開発と 応用分野の拡大

安藤正之*
西田信也*

Development and Expansion of Application Fields for SiC Power Module

Masayuki Ando, Nobuya Nishida

要 旨

エネルギーの高度な利用が求められる中、パワー半導体モジュール(以下“パワーモジュール”という。)は、家電製品から産業、電鉄に至るまで広い分野で使用されて注目を集めている。特に、SiC(Silicon Carbide)は更なる低損失・小型化を実現する次世代デバイスとして期待されている。

三菱電機では、SiC-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)とSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)のSiCデバイス、及びこれらを搭載したSiCパワーモジュールの開発を進めるとともに⁽¹⁾、パワーエレクトロニクス機器への応用開発を行うなど、実用化も進めてきた。

当社のSiCデバイス及びSiCパワーモジュールの開発は、1994年から約10年間の要素技術の研究開発を経て、2006年1月に電流10A級のSiCデバイスを用いたインバータで世

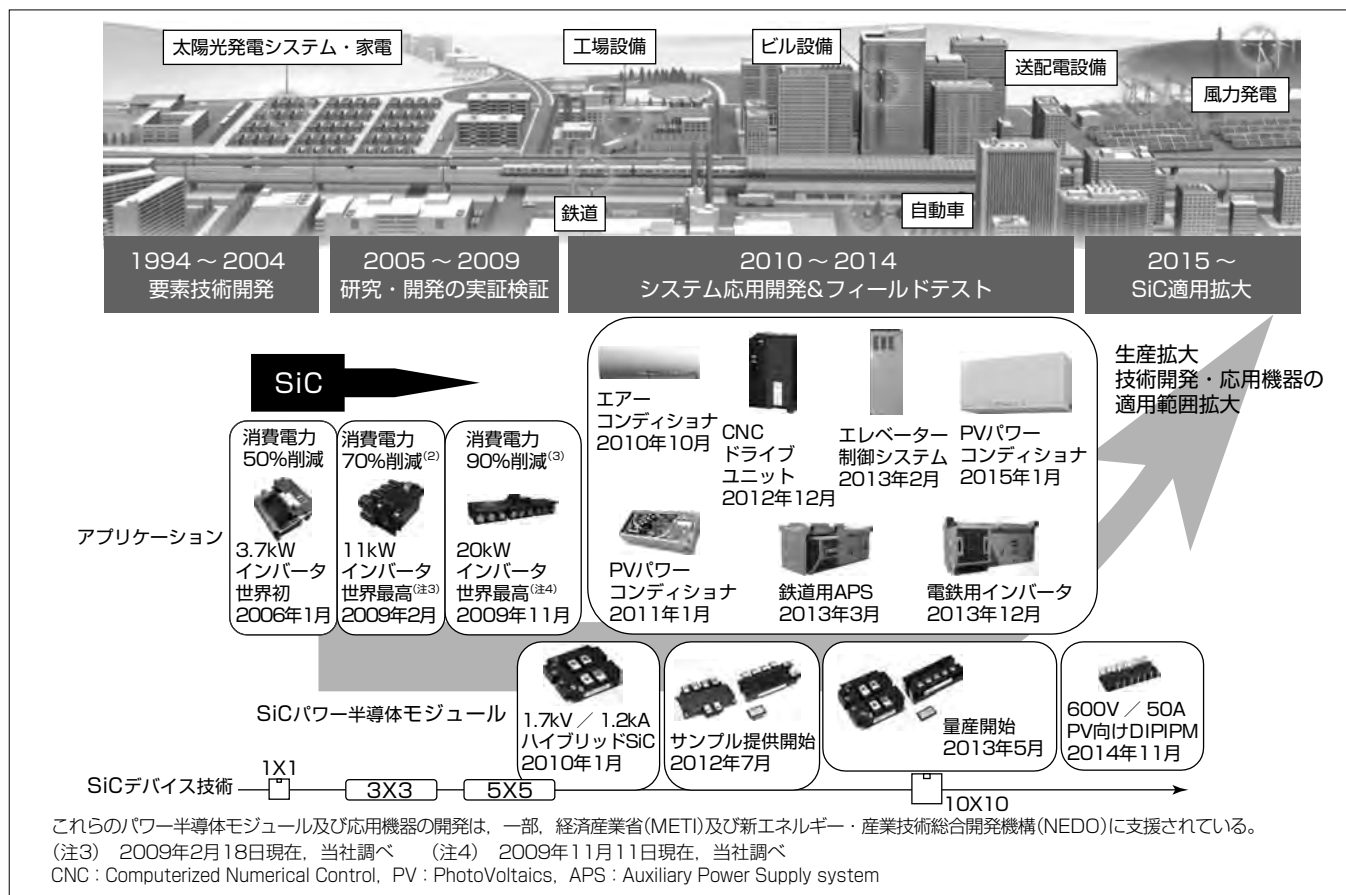
界で初めて^(注1) 3.7kW定格の三相モータの駆動に成功したことを皮切りに、2009年には11kW、20kWインバータで電力損失を大幅に低減できることを示した。

2010年10月には、世界初^(注2)となるSiCパワーモジュール搭載エアコンを発売して、2011年1月には太陽光パワーコンディショナ、2013年2月にはエレベーターでのSiCパワーモジュールの効果実証に成功した。また、鉄道車両においても、2013年3月に補助電源装置、同年12月に車両用インバータ装置を製品化した。

SiCパワーモジュールの一般向け提供も2012年7月から開始して⁽⁶⁾、随時、ラインアップ拡充を進めてきた。

(注1) 2006年1月現在、当社調べ

(注2) 2010年8月24日現在、当社調べ



当社SiC製品の開発

当社SiC製品の開発では、1994年から約10年間の要素技術の研究開発を経て、2005～2009年には各種容量帯のインバータで効果を実証した。2010年以降は各分野で製品化を実現し、現在も、生産拡大に向けた技術開発・応用機器の適用範囲の拡大が進む。

1. ま え が き

エネルギーの高度な利用が必要不可欠となる中でパワーエレクトロニクスの発展・普及が著しく、キーパーツであるパワーモジュールは、家電製品から産業、電鉄に至るまで広い分野で使用され、注目を集めている。

半導体材料としては、Si(Silicon)が用いられているが、近年、新材料として絶縁破壊電界強度が高い等の特長を持つSiCが実用段階に入ってきた。

当社でも、SiC-MOSFETとSiC-SBDのデバイス開発を進め、これらを搭載したSiCパワーモジュールを製品化して、エアコン、太陽光発電用パワーコンディショナ、エレベーター、電鉄など、各種システムへの適用を実現している。

本稿では、SiCパワーモジュールの種類と特長、現状のラインアップを示し、各種システムへの適用事例について述べる。

2. SiCパワーモジュールの種類と特長

2.1 SiCパワーモジュールの種類

一般的に、パワーモジュールは、通電制御を行うスイッチングデバイスとスイッチングのターンオフに伴ってエネルギーを還流するダイオードデバイスとを対にして、1パッケージ化したものである。したがって、SiCをどのデバイスに適用するかでSiCパワーモジュールの種類が異なる。

当社では、ダイオードデバイスだけにSiCを適用したものをハイブリッドSiCパワーモジュール、還流ダイオードだけでなくスイッチングデバイスにもSiCを適用したものをフルSiCパワーモジュールと称している。また、Siパワーモジュールでのラインアップと同様に、スイッチングデバイスの能力を最大限に活用するための保護を持つ駆動制御回路をSiCパワーモジュールに内蔵したSiC-IPM(Intelligent Power Module)やトランスフォーマーモールドタイプのSiC-DIIPMもラインアップする(表1)。

2.2 SiCパワーモジュールの特長

2.2.1 抵抗値の低減による低損失化・小型化

Si-MOSFETとSiC-MOSFETの縦構造イメージを図1に示す。絶縁破壊電界強度に着目すると、Siは0.3MV/cmであるのに対して、SiCでは3MV/cmと、Siより約10倍高い。このため、SiCではスイッチングデバイスを形成する際に電気抵抗の主要因となるドリフト層をSiの10分の1に薄くすることができ、ドレイン電極-ソース間の抵抗値が大幅に低減されて電力損失を大幅に低減できる。

また、電力損失、すなわち発熱量が減ることで、パワーモジュールの応用で必要不可欠な冷却器を小型化できるメリットもあり、自動車や産業用途など適用機器の小型・軽

量化が可能となる。

したがって、SiCパワーモジュールを適用することで、システムの低損失化、小型化の点で優位である。

2.2.2 ワイドバンドギャップによる高温動作の安定

SiCの特長として、バンドギャップ幅が広いことも挙げられる。半導体デバイスでは、電子がバンドギャップを超えて遷移することでスイッチング動作を行うが、光や熱によってもバンドギャップ幅以上のエネルギーが与えられるケースがある。例えば、高温時にリーク電流が増加するが、これは熱エネルギーによってバンドギャップを超える電子の遷移が発生するためである。

バンドギャップを比較すると、Siは1.1eVであるのに対して、SiCは3.3eVであり、Siより約3倍大きい(図2)。したがって、Siでは温度が高くなるとリーク電流が増加し、さらには正常動作できないケースもあるが、SiCでは高温時

表1. SiCパワーモジュールのラインアップ

形態	電圧(V)	電流(A)	SiCタイプ	回路構成	形名
DIIPM	600	20	フルSiC	2in1(PFC)	PSF20L91A6-A
		20	ハイブリッドSiC	2in1(PFC)	PSH20L91A6-A
		50	ハイブリッドSiC	4in1	PSH50YA2A6
IPM	600	200	ハイブリッドSiC	6in1	PMH200CS1D060
		75	フルSiC	6in1	PMF75CL1A120
		75	ハイブリッドSiC	6in1	PMH75CL1A120
SiC パワー モジュール	1,200	400	フルSiC	4in1	FMF400BX-24A
		800	フルSiC	2in1	FMF800DX-24A
		1,200	フルSiC	2in1	FMF1200DX1-24A
		100	ハイブリッドSiC	2in1	CMH100DY-24NFH
		150	ハイブリッドSiC	2in1	CMH150DY-24NFH
		200	ハイブリッドSiC	2in1	CMH200DU-24NFH
		300	ハイブリッドSiC	2in1	CMH300DU-24NFH
		400	ハイブリッドSiC	2in1	CMH400DU-24NFH
		600	ハイブリッドSiC	2in1	CMH600DU-24NFH
	1,700	1,200	ハイブリッドSiC	2in1	CMH1200DC-34S

PFC : Power Factor Correction

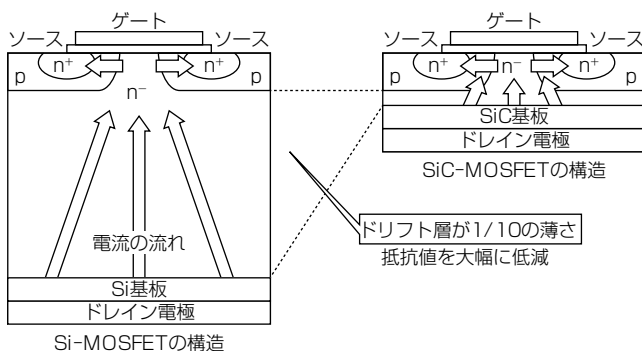


図1. SiC-MOSFETの縦構造

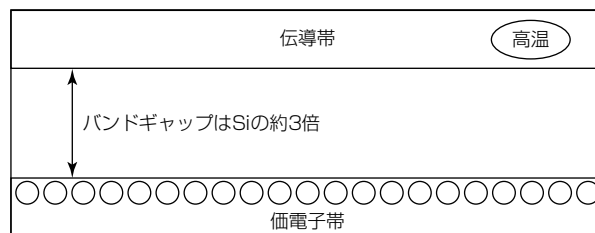


図2. SiCバンドギャップのイメージ

にもリーク電流の増加が少なく安定した高温動作が得られる。

2.2.3 高耐圧SBD実現による低損失化

先に述べたとおり、SiCは高い絶縁破壊電界強度とワイドバンドギャップという特長を持つ。このため、Siでは実現し得なかったショットキーバリアダイオード(SBD)の高耐圧化を実現できる。

SBDは、金属と半導体との接合によって生じるショットキー障壁を利用したダイオードであり、蓄積キャリアがなく高速スイッチング動作が可能というメリットがある反面、Siでは耐圧が低く高温時のリーク電流が大きいことがデメリットである。

これに対して、SiCをSBDへ適用することで、高耐圧・高温環境下でも高速スイッチング動作を可能として、低損失化を実現する。

SiC-SBDを搭載したハイブリッドSiCパワーモジュールの代表波形を図3に示す。Siパワーモジュールはターンオンスイッチング動作に伴って電流がオーバーシュートしているのに対して、ハイブリッドSiCパワーモジュールは短時間で安定状態に収束しており、スイッチング損失の抑制に寄与する。

図4は、Siパワーモジュール(Si-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)+ダイオード)の損失を100とした時の、代表的な条件でのSiCパワーモジュールの損失低減効果を示している。

損失を大別するとスイッチング損失と導通損失がある

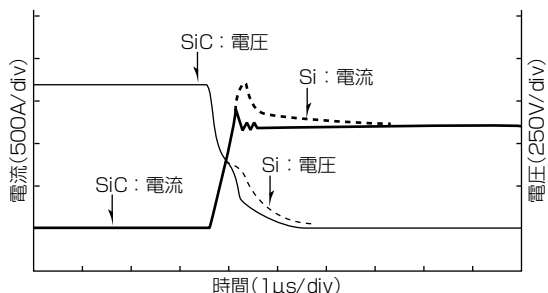


図3. ハイブリッドSiCパワーモジュールの代表波形

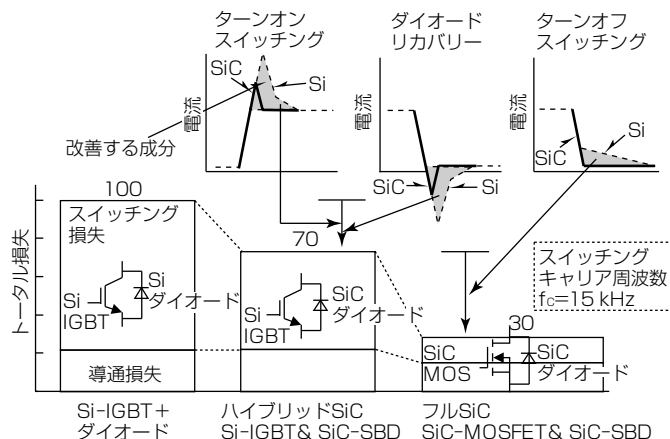


図4. SiCパワーモジュールの損失低減効果

が、ハイブリッドSiCでは先に述べたようにダイオードでのスイッチング損失低減効果が得られ、トータル損失を従来比70%に抑制可能である。さらに、フルSiCでは、ダイオードだけではなくスイッチングデバイスのスイッチング損失(ターンオン・オフ)及び導通損失の低減効果も得られ、トータル損失をSi製品の30%まで抑制可能である。

3. SiCパワーモジュールの応用

3.1 エアコンへの適用事例

2010年10月、世界初となるSiCパワーモジュール搭載エアコン「霧ヶ峰ムーブアイ」を発売した⁽⁴⁾。

エアコンの圧縮機を駆動するインバータにハイブリッドSiCパワーモジュールを適用して、前年度モデルに比べて約60%のスイッチング損失低減効果を確認した。冷房定格能力が3.6kWの機種で、期間消費電力量は前年度モデル1,183kWhから1,110kWhへ約6%の低減を実現した。

ハイブリッドSiCパワーモジュール搭載機種と従来機種とのスイッチング波形の比較を図5に示す。2.2.3項で述べたように、スイッチング時の電流オーバーシュートを抑制してスイッチング損失低減を実現した。

3.2 太陽光発電用パワーコンディショナへの適用事例

2011年1月に、フルSiCパワーモジュールを当社製太陽光発電用パワーコンディショナ単相200V/5kW機種(昇圧回路+インバータ)へ適用して、低損失化を実証した(図6)。

SiCの高速動作特性によるスイッチング損失の低減と、高耐圧特性を活用した導通損失の低減で、従来機種に比べて5kW定格出力時の損失を半減して、電力変換効率を2ポイント以上向上させて電力変換効率98.0%という結果を得た(図7)⁽⁵⁾。

3.3 エレベーターへの適用事例

2013年2月、業界で初めて^(注5)フルSiCパワーモジュールを搭載した高速エレベーターを開発して、電力損失を約65%低減して、装置の体積及び設置面積を約40%削減した⁽⁷⁾。

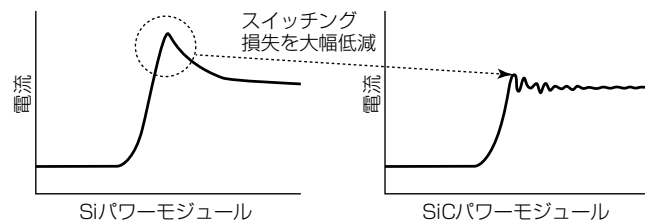


図5. パワーモジュール搭載エアコンのスイッチング波形の比較



図6. SiCパワーモジュール搭載パワーコンディショナ

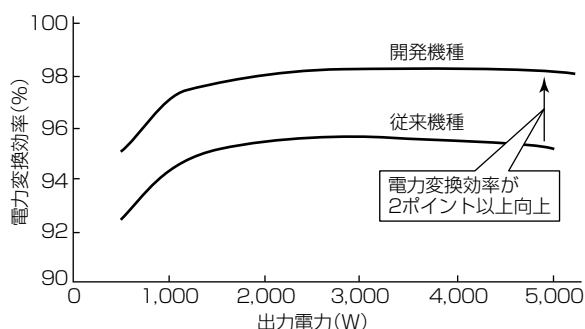


図7. パワーコンディショナ電力変換効率比較

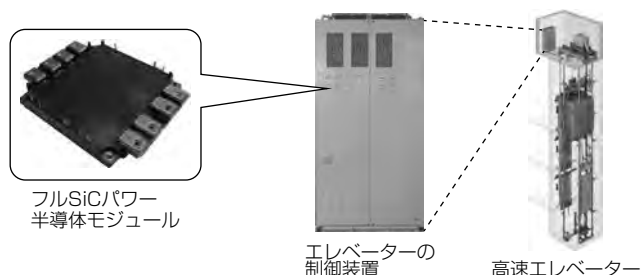


図8. SiCパワーモジュール搭載高速エレベーターの制御装置

図8は高速エレベーターのイメージである。高速エレベーターでは、人や荷物を乗せるかご室を上下に動かす巻上機の制御装置をエレベーターの最上部の機械室に設置しているが、機械室のレイアウト自由度を向上させるため、制御装置の小型化が求められている。しかし、今までは巻上機のモーターを駆動するパワーモジュールの発熱が大きく、それに応じた放熱機構が必要なため、制御装置の小型化が困難であった。

今回、世界最大クラスのフルSiCパワーモジュールを開発して高速エレベーターの制御装置に適用することで、電力損失を大幅に低減でき、併せて、放熱機構の小型化を実現して制御装置・機械室の小型化に寄与した。

(注5) 2013年2月26日現在、当社調べ

4. む す び

各種パワーエレクトロニクス機器の大幅な電力損失の低減や小型化が強く求められており、そのキーマンであるパワーモジュールの高性能化への期待も強まっている。

これに応えるために開発・拡充しているSiCパワーモジュールについて、その種類と特長及びラインアップを示し、実用化事例について述べた。

特長は、高い絶縁破壊電界強度に伴うドリフト層の薄厚化及び抵抗値の低減、ワイドバンドギャップによる高温時リーク電流の低減、高耐圧SBD実現によるダイオードでのスイッチング損失の低減であり、SiCパワーモジュールを用いることで低損失化・小型化の点で優位である。

各種パワーエレクトロニクス機器の動作周波数と出力容量の分布を図9に示す。また、パワーモジュールのすみ分けについても併せて示している。高度なエネルギー利用が

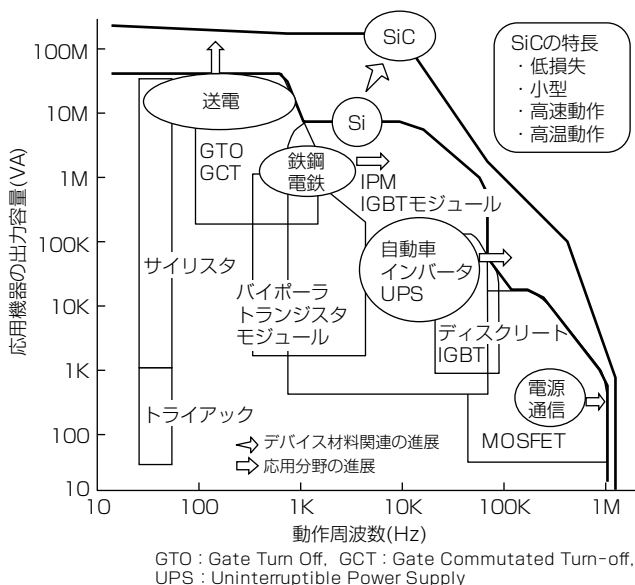


図9. パワー半導体モジュール応用の現状と将来の可能性

求められる中、各分野で動作周波数も出力容量も拡大していく傾向にある。一方で、機器の低損失化・小型化の要望は強まっており、幅広い分野でSiCパワーモジュールの適用が拡大していくと考えられる。

今後、SiCパワーモジュールの持続的な革新・普及に向けて、デバイス技術・パッケージ技術・信頼性技術などの包括的なソリューション開発を進めて、SiCの特長である低損失・小型・高速動作・高温動作を最大限に引き出すSiCパワーモジュールの開発を推進してSiCパワーモジュールの応用分野の拡大・普及を図り、更なる低炭素社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 中田修平，ほか：SiCパワーデバイス技術とその応用，三菱電機技報，84，No.4，215～218(2010)
- (2) 三菱電機ニュースリリース：11kWのSiCインバーターで、世界最高値となる電力損失約70%低減を実証，2009年2月18日
- (3) 三菱電機ニュースリリース：SiCインバーターで、世界最高値となる電力損失90%低減を実証，2009年11月11日
- (4) 三菱電機ニュースリリース：2011年度三菱ルームエアコン「霧ヶ峰ムーブアイ」発売のお知らせ，2010年8月24日
- (5) 三菱電機ニュースリリース：SiCを用いたパワーコンディショナで国内業界最高の電力変換効率98.0%を実証，2011年1月20日
- (6) 三菱電機ニュースリリース：「SiCパワー半導体モジュール」サンプル提供開始のお知らせ，2012年7月9日
- (7) 三菱電機ニュースリリース：SiC適用エレベーター制御装置の開発のお知らせ，2013年2月26日

プレーナ型SiC-MOSFETの オン抵抗低減化技術

谷岡寿一* 日野史朗**
 海老池勇史* 海老原洪平***
 折附泰典*

Low On-Resistance Technology for Planer SiC-MOSFET

Toshiyazu Tanioka, Yuji Ebiike, Yasunori Oritsuki, Shiro Hino, Kohei Ebihara

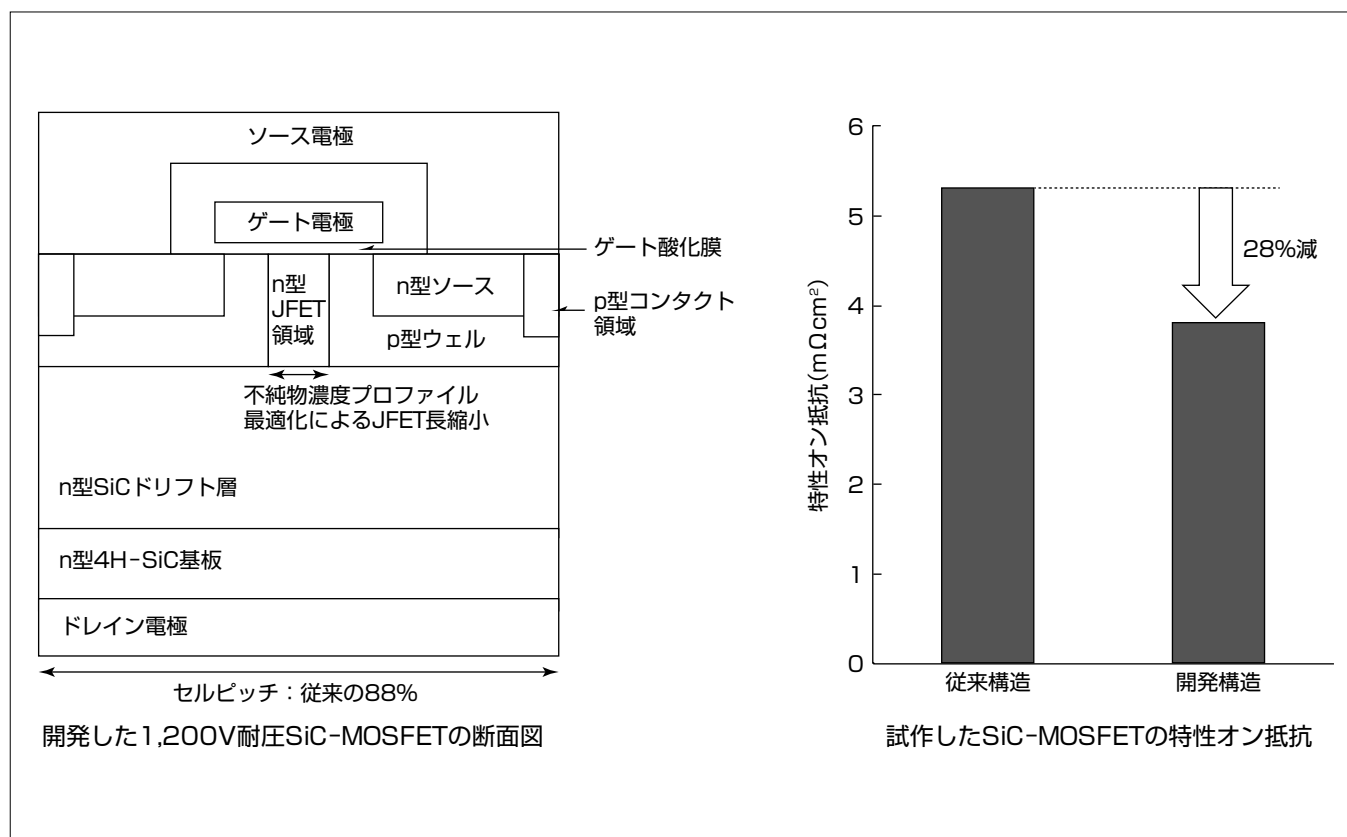
要 旨

SiC(Silicon Carbide)を用いたパワーデバイスは、パワーエレクトロニクス機器の更なる低損失化、小型化を実現する次世代のキーデバイスとして注目を集めている。

三菱電機はSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)やSiC-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)の開発を進め、これまで幅広い用途のSiCモジュールを製品化し、家電製品、FA機器、鉄道車両に搭載することで省エネルギー効果を実証してきた。

現在、更なる低損失化のため、次世代プレーナ型SiC-MOSFETの開発を行っている。1,200V耐圧SiC-MOSFETのオン抵抗を更に低減するには、オン抵抗に占

める割合が高いチャネル部の抵抗を、MOSセルのシュリンクなどによって低減することが効果的である。デバイスシミュレーション及び試作をもとに、MOSセルをシュリンクした場合の課題であるJFET(Junction Field Effect Transistor)長の縮小と低抵抗化の両立を実現し、従来比28%減となる特性オン抵抗 $3.8\text{m}\Omega\text{cm}^2$ の1,200V耐圧SiC-MOSFETを実現した。また、耐圧終端部の注入構造の最適化によって、従来と比較して耐圧終端部の縮小が可能であることを示し、有効領域 1cm^2 の1,200V耐圧SiC-MOSFET大電流チップに適用して低損失でロバスト性に優れた動作を確認した。



開発したプレーナ型1,200V SiC-MOSFETの断面構造と特性オン抵抗

JFET領域、p型ウェル領域の不純物濃度プロファイルを最適化することでMOSセル密度を29%向上させた1,200V耐圧SiC-MOSFETの試作に成功し、特性オン抵抗の28%低減を確認した。

1. ま え が き

持続可能な社会を実現するため、省エネルギー化、省資源化に向けた取組みが世界規模で進められている。半導体パワーデバイスは、電力を効率よく制御する電子部品として、家電製品から産業機器、電鉄・電力系統にいたる広い分野で使用されており、電力変換器の低損失化や小型・軽量化に大きく貢献している。

SiCを用いたパワーデバイスは、パワーエレクトロニクス機器の更なる低損失化、小型化を実現する次世代のキーデバイスとして注目を集めている。SiCは高い絶縁破壊電界強度を持つため、Si(Silicon)よりも高耐圧でオン抵抗の低いデバイスが実現できる。また、ユニポーラデバイスのMOSFETとSBDで高耐圧素子を作製できるため、Siのバイポーラデバイスに比べてスイッチング損失を大幅に低減することができる。

当社はSiC-SBDやSiC-MOSFETのデバイス開発を進め、これまで幅広い用途のSiCモジュールを製品化し、家電製品、FA機器、鉄道車両に搭載することで、省エネルギー効果を実証してきた⁽¹⁾⁽²⁾。

本稿では、1,200V耐圧プレーナ型SiC-MOSFETの低オン抵抗構造の開発と試作結果について述べる。

2. 1,200V耐圧SiC-MOSFETの低オン抵抗構造

2.1 チャネル部抵抗の低減

プレーナ型nチャネルSiC-MOSFETの断面構造を図1に、1,200V耐圧クラスのSiC-MOSFETのオン抵抗に占める各種抵抗成分の割合を図2に示す。

主な抵抗成分は、チャネル抵抗(R_{CH})、p型ウェル部に囲まれた領域のJFET抵抗(R_{JFET})、ドリフト抵抗(R_{DRIFT})、基板抵抗(R_{SUB})の4つで構成される。SiC-MOSFETの実効的なチャネル移動度は、バルクの電子移動度に比べて小さいため、 R_{CH} はオン抵抗全体の50%以上の割合を占める。このため、素子のオン抵抗を低減するには、 R_{CH} を下げるのが最も効果的である。

SiC-MOSFETの抵抗を下げるには、セルピッチをシュリンクすることで総チャネル幅を増やす手法、チップ面積に対する電流を流す有効領域の割合を増やす手法などがあるが、プレーナ型MOSFETは、セルピッチを過度にシュリンクしてしまうとJFET領域が狭くなり、逆に抵抗が増加することになる。

今回の開発構造では、JFET領域のn型不純物濃度をドリフト層のn型不純物濃度よりも高濃度化することで、JFET長の縮小と低抵抗化の両立を実現している⁽³⁾。

図3にJFET領域の濃度が現行仕様(n型ドリフト層と同じ濃度)のものと、n型不純物を注入することでJFET領域の濃度を $5.0e+16cm^{-3}$ 、 $2.0e+17cm^{-3}$ と変化させた場合

のJFET長とオン抵抗の関係(シミュレーション値)を示す。

JFET領域のn型不純物濃度を上げるほどJFET長を縮小でき、かつオン抵抗が小さくなるが、JFET長を過度に縮小すると電流経路が狭まり、オン抵抗が顕著に増加することが分かる。JFET長変動に対するロバスト性や遮断特性、信頼性への影響を考慮し、JFET長、JFET部注入濃度、p型ウェル濃度プロファイルを最適化した。

2.2 耐圧終端領域の縮小

デバイスシミュレーションを用いて、耐圧終端部のp型注入領域の幅や間隔の最適化検証を行った。図4に断面構

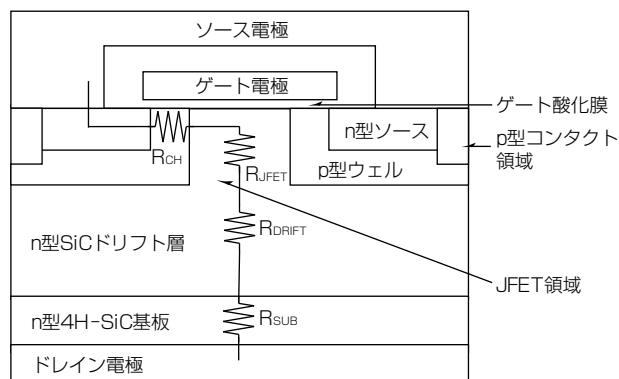


図1. プレーナ型SiC-MOSFETの断面構造

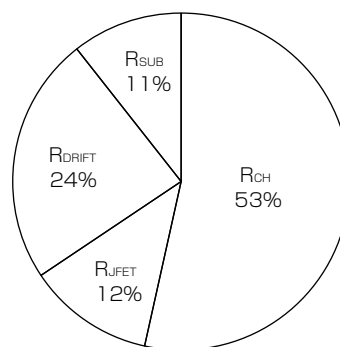


図2. 1,200V耐圧クラスのオン抵抗に占める各種抵抗の割合

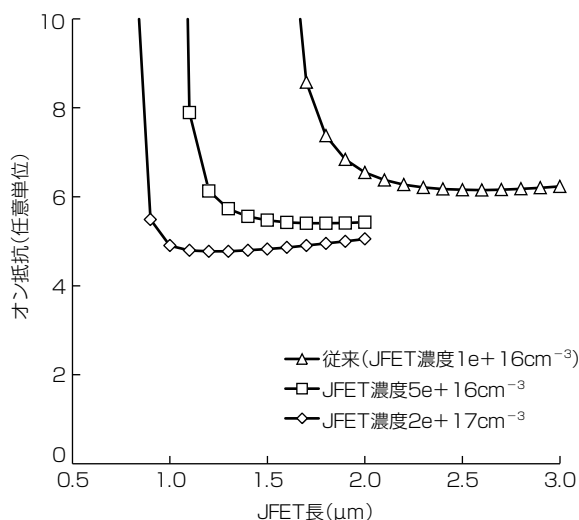


図3. JFET長とオン抵抗の関係

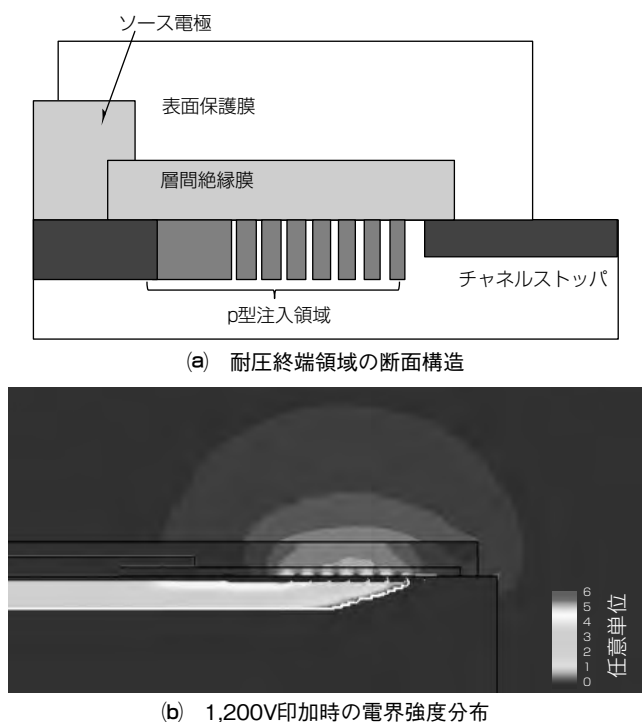


図4. 耐圧終端構造と電界強度分布

造と1,200V印加時の耐圧終端領域の電界強度分布を示す。SiCデバイスでは素子周辺部の耐圧終端領域の電界強度がSiデバイスに比べ高くなるため、電界強度を下げて耐圧を確保する構造設計が非常に重要である。p型注入リングの本数を従来構造の2/3に削減することで、耐圧終端幅を従来品に比べて50%縮小できることが分かった。今回、最適化した耐圧終端領域の電界強度分布は局所的に高電界となる箇所がなく、SiCの絶縁破壊電界強度に対し十分低い電界強度に維持できている。

3. SiC-MOSFETの試作と電気特性評価

3.1 SiC-MOSFETの試作

最適化したセル構造(セルピッチ8.8 μm)を持つ1,200V耐圧SiC-MOSFETを4H型SiCエピウェーハ上に試作した。p型ウェル領域、n型ソース領域、p型コンタクト領域、JFET領域にイオン注入を行った後に、熱処理で不純物を活性化した。厚み方向の注入プロファイルに関しては、MOSFETのチャネル特性やゲート酸化膜電界に影響を及ぼさないよう、ドリフト層の表面近傍を避けてイオン注入を実施した。MOSFETのサイズは100 μm 角と1cm角の2種類とした。終端領域には新しく開発したシュリンク構造を採用している。

3.2 静特性評価

サイズ100 μm 角のMOSFETを用いて静特性を測定し、従来のセル構造と最適化したセル構造で比較評価した。

図5に試作したSiC-MOSFETの典型的な出力特性を示す。ゲート電圧15Vで、従来構造のドレイン電流密度

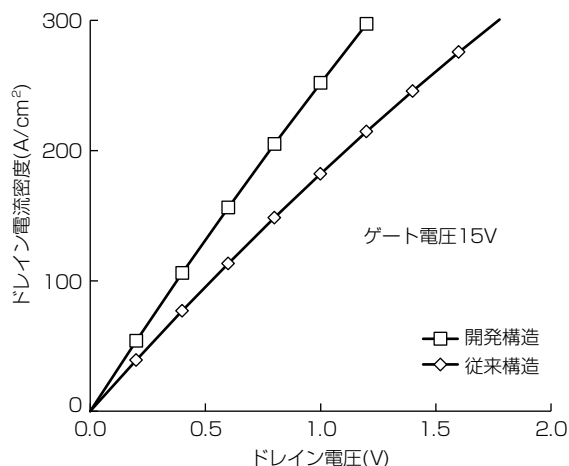


図5. SiC-MOSFETの出力特性

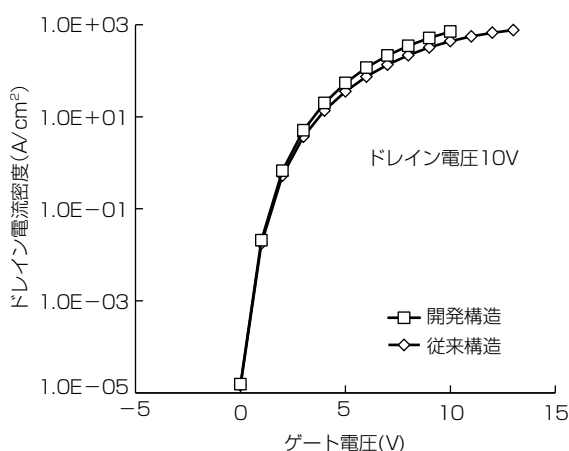


図6. SiC-MOSFETの伝達特性

100A/cm²でのオン抵抗は5.3m Ωcm^2 である。一方、最適化構造を適用することで、オン抵抗は3.8m Ωcm^2 まで低減することが確認できた。

図6にSiC-MOSFETの伝達特性を示す。ドレイン電圧10Vで、ドレイン電流密度100mA/cm²でのしきい値電圧は従来構造、最適化構造ともに1.4Vである。JFET領域を縮小しても、チャネル構造が同じであれば同等のしきい値電圧が得られる。

3.3 耐圧特性

従来構造と開発構造の耐圧特性を比較した。図7に耐圧特性を示す。ドレイン電圧1,200Vで、ドレインリーク電流は従来構造、開発構造ともに数nA程度である。またブレークダウン電圧は従来構造、開発構造ともに1,500V程度である。これらの結果から、従来構造と同等の耐圧特性を確保できていることが分かった。

3.4 スイッチング特性評価

最適化したセル構造を適用した有効面積1cm角のMOSFETとSiC-SBDを用いて600V/300Aのスイッチング試験を実施した⁽⁴⁾。図8に試作したSiC-MOSFETのターンオフ波形及びターンオン波形を示す。スイッチン

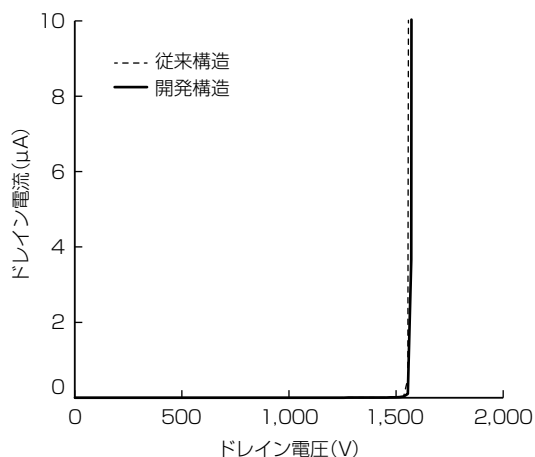


図7. SiC-MOSFETの耐圧特性

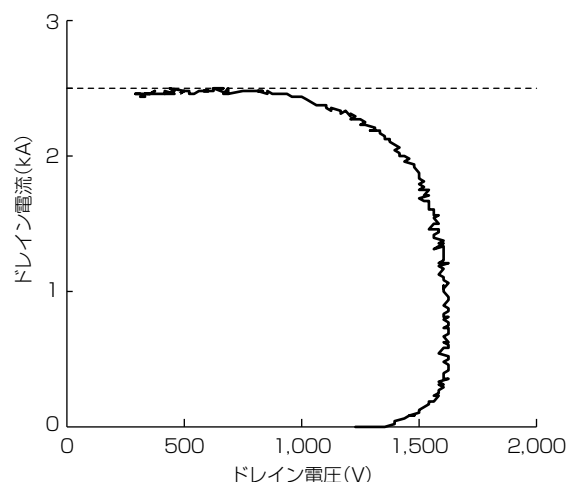
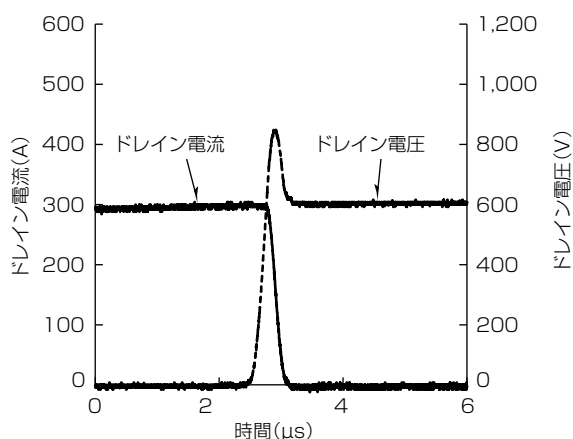
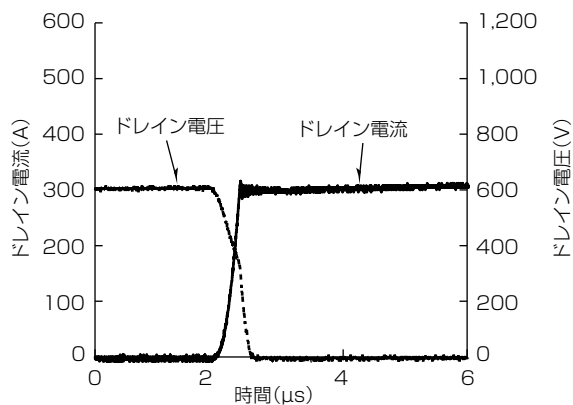


図9. RBSOAリサージ波形



(a) ターンオフ波形



(b) ターンオン波形

図8. SiC-MOSFETのスイッチング波形

グ試験でゲート抵抗は 29.3Ω とした。ターンオフ及びターンオン損失はそれぞれ53mJ, 22mJであり、蓄積キャリアによる電流成分のない波形が得られている。

ゲート抵抗 2Ω で高速スイッチングしたときのRBSOA (Reverse Bias Safe Operating Area) 耐量を評価した。図9にリサージ波形を示す。測定機の限界である2,500Aまで遮断できる耐量を保有していることを確認した。

これらの結果から、開発した1,200V耐圧SiC-MOSFET

は実使用に適したスイッチング性能とSOA (Safe Operating Area) を持つことが示された。

4. む す び

JFET領域のn型濃度プロファイルを最適化することでセル密度を向上させ、低オン抵抗な1,200V耐圧SiC-MOSFETを実現した。オン抵抗を従来構造の72%まで低減でき、また、従来構造の50%まで縮小した耐圧終端幅で十分な耐圧を保持できた。

今後はこの構造を採用したSiC-MOSFETチップをモジュールに搭載し、製品展開していく予定である。

この研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究開発機構 (New Energy and industrial technology Development Organization : NEDO) から委託された“低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト”の成果によってなされたものである。

参 考 文 献

- (1) 三菱電機ニュースリリース：小田急電鉄車両での「フルSiC適用VVVFインバータ装置」のお知らせ，2015年6月22日
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2015/0622-a.html>
- (2) 三菱電機ニュースリリース：駆動回路と保護回路を内蔵したフルSiC-IPMを世界で初めて開発，2011年2月16日
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2011/0216-b.html>
- (3) 濱田憲治，ほか：3.3kV耐圧SiC-MOSFETの低抵抗化技術，三菱電機技報，**88**，No.5，309～312(2014)
- (4) Hino, S. : Investigation on Internally Unbalanced Switching Behavior for Realization of 1-cm² SiC-MOSFET, Materials Science Forum 778～780 (2013)

トレンチ型SiC-MOSFET

菅原勝俊* 福井 裕†
香川泰宏** 足立亘平†
藤原伸夫***

SiC Trench MOSFET

Katsutoshi Sugawara, Yasuhiro Kagawa, Nobuo Fujiwara, Yutaka Fukui, Kohei Adachi

要 旨

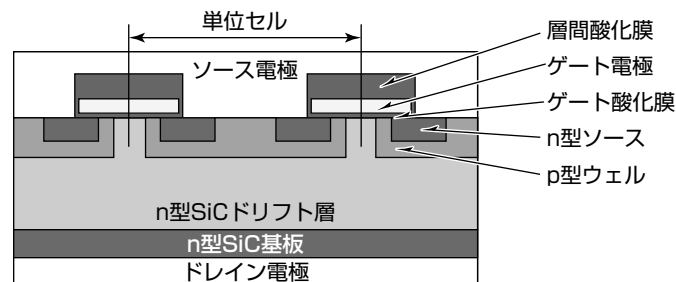
近年、パワーエレクトロニクス機器へのSiC(Silicon Carbide)パワーデバイスの導入が盛んに進められている。SiCは、従来のSi(Silicon)に比べてパワーデバイスとしての利用に有利な物性を持っており、SiCパワーデバイスの導入による飛躍的な省エネルギー化や、高耐圧化が期待されている。

SiCパワーデバイスの用途は、家電機器から電力機器まで幅広い。三菱電機では、これらを網羅する600Vから3.3kV超の耐圧を持つSiC-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)及びSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)の開発を進めてきた。さらに、これらSiCパワーデバイスのインバータへの搭載に向けた技術開発を進め、フルSiCパワーモジュールを搭載した鉄道車両用インバータを世界

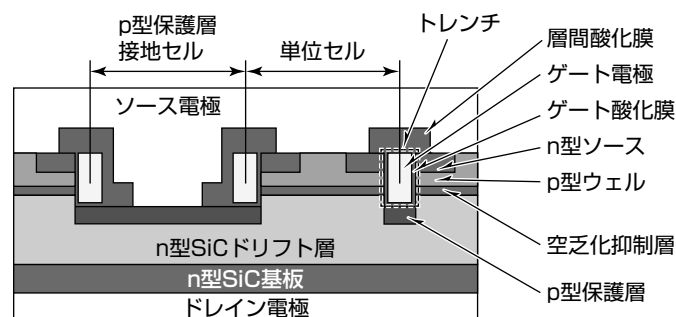
で初めて(注1)製品化した。

トレンチ型SiC-MOSFETは、従来開発してきたプレーナ型に比べて単位セルの小型化、高集積化が可能な構造である。トレンチ型ではトレンチ底部のゲート酸化膜に電界が集中することから、電界緩和のためにp型保護層を設ける必要がある。今回、このp型保護層を接地する構造を設けて、これを適切な割合で配置した結果、素子の破壊耐性を示す短絡耐量が大幅に向上した。また、低損失化に寄与するオン抵抗の低減には、p型保護層とp型ウェル間に生じる電流経路狭窄(きょうさく)を緩和することが有効である。そこで、狭窄の生じる位置に空乏化抑制層を新たに導入して、オン抵抗をプレーナ型に比べて45%低減した。

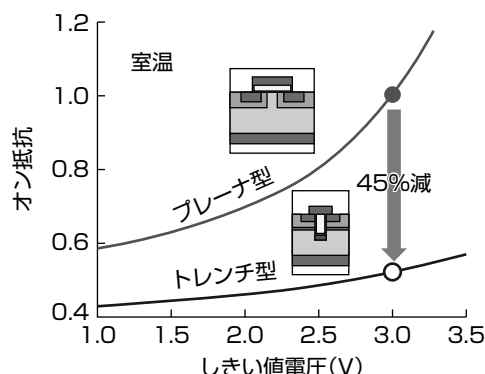
(注1) 2013年12月25日現在、当社調べ



従来のプレーナ型SiC-MOSFETの断面構造



開発したトレンチ型SiC-MOSFETの断面構造



プレーナ型及びトレンチ型SiC-MOSFETのオン抵抗の比較
(オン抵抗はプレーナ型のしきい値電圧3.0Vの値を1.0として規格化)

開発したトレンチ型SiC-MOSFETの構造と電気特性

トレンチ底部にp型保護層を設けて、かつMOSFET動作する活性セルを一定の割合で間引いて、p型保護層をソース電極に接続するための構造(p型保護層接地セル)を形成した。これによって、ゲート酸化膜電界の緩和とスイッチング損失の低減及び短絡耐量の向上を実現した。さらに、p型ウェル直下に空乏化抑制層を設ける低抵抗化技術によって、しきい値電圧3.0Vで従来のプレーナ型に比べて45%のオン抵抗低減を実現した。

1. ま え が き

パワーエレクトロニクス機器に一層の省エネルギー化をもたらすSiC-MOSFETの開発を進めている。中でも、トレンチ型SiC-MOSFETは、単位セルの小型化による高集積化を始めとした特長によって、一般的なプレーナ型に比べてより一層の低損失化が期待されている。低損失化には、ドレイン電極-ソース電極間通電時の電気抵抗であるオン抵抗の低減が必要である。しかし、一般にオン抵抗の低減とともに、ドレイン電極-ソース電極間通電が始まるゲート電圧であるしきい値電圧もまた低下する関係がある。しきい値電圧の低下はノイズによる誤動作を招くため、避ける必要がある。トレンチ型はプレーナ型に比べてこのオン抵抗としきい値電圧の関係を改善することができる。すなわち、ノイズによる誤動作を招くことなく低損失化を実現することが可能である。

しかし、トレンチ型SiC-MOSFETはドリフト層内にトレンチが突出する形状のためトレンチ底部のゲート酸化膜に電界が集中することから、ゲート酸化膜が破壊されやすいという問題があった。これに対して、トレンチ底部にp型保護層を形成してゲート酸化膜にかかる電界を緩和する構造がある。この構造は、電界の緩和には優れたものの、p型保護層からドリフト層へ伸びる空乏層の応答速度が遅いため、スイッチング速度が低下する問題があった。

これまで、当社は主に家電製品への応用が想定される600V耐圧トレンチ型SiC-MOSFETの開発を進め、活性セルを間引いてp型保護層をソース電極に接続する構造(p型保護層接地セル)を設けることによるスイッチング速度向上⁽¹⁾、短絡耐量(負荷短絡発生から素子破壊に至るまでの時間)の向上⁽²⁾、p型ウェル下への空乏化抑制層導入によるオン抵抗の低減⁽³⁾を実現してきた。

本稿では、これまでの取組みについて振り返るとともに、産業機器、車載機器への応用が期待される1,200V耐圧トレンチ型SiC-MOSFETの開発内容について述べる。

2. 600V耐圧トレンチ型SiC-MOSFETの開発

2.1 トレンチ型SiC-MOSFETの構造

これまでに開発を進めてきたトレンチ型SiC-MOSFETの模式図、及び走査型電子顕微鏡像を図1に示す。MOSFETとして動作する活性セルを格子状に形成して、全てのトレンチ底部にはゲート酸化膜にかかる電界を緩和するためp型保護層を設けた。p型保護層は、トレンチのSiCドライエッチング時に用いた酸化膜マスクをそのまま使用してイオン注入することで、トレンチ底部だけに選択的に形成した。また、一定の割合で活性セルを間引いてp型保護層接地セルを設けてp型保護層をソース電極に接続して、電気的に接地した。p型保護層接地セルは、周囲の活性セルの大きさに合わせて幅の広いトレンチ及びp型保護層を設け

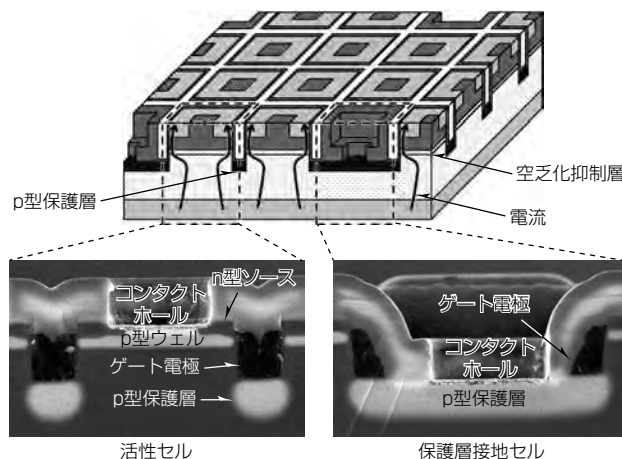


図1. トレンチ型SiC-MOSFETの模式図及び走査型電子顕微鏡像

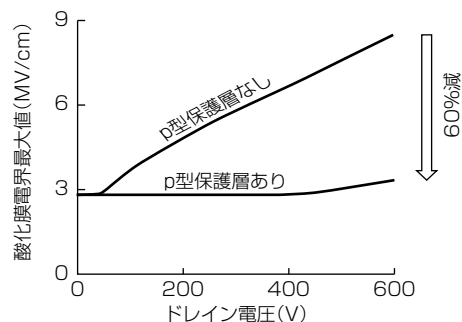


図2. 酸化膜電界最大値のドレイン電圧依存性

た後、コンタクトホールを開口して形成した。

トレンチ底部のゲート酸化膜にかかる電界のドレイン電圧依存性をシミュレーションした結果を図2に示す。p型保護層を設けることで、ドレイン電圧600Vでの酸化膜電界は約60%低減される。なお、p型保護層を設けた場合でもドレイン電圧450V付近から電界が増加しているが、p型保護層のAl(アルミニウム)濃度を上げることで、この増加分を小さくすることが可能である。これによって、ゲート酸化膜電界の増加を抑えて素子の長寿命化を図ることができる。

2.2 p型保護層の接地によるスイッチング速度向上⁽¹⁾

MOSFETの損失は、通電時の損失とスイッチング時の損失に分かれる。スイッチング時の損失を低減するためには、スイッチング速度を高める必要がある。ターンオン、ターンオフのスイッチング速度及びスイッチング損失の外部ゲート抵抗依存性を図3に示す。p型保護層を接地することで、接地しない場合に比べてターンオン、ターンオフともにスイッチング速度が増加して、それに伴って損失が大きく減少する効果が得られた。スイッチングの際、p型保護層には空乏層内のキャリアの移動に伴う変位電流が流れる。p型保護層を接地することで、この変位電流がソース電極を通して引き抜かれるため、p型保護層とドリフト層との間の空乏層の応答速度が向上してスイッチング速度の向上、損失低減につながったと考えられる。

2.3 p型保護層接地セルによる短絡耐量向上⁽²⁾

短絡耐量は、負荷短絡事故の発生によって素子に大電

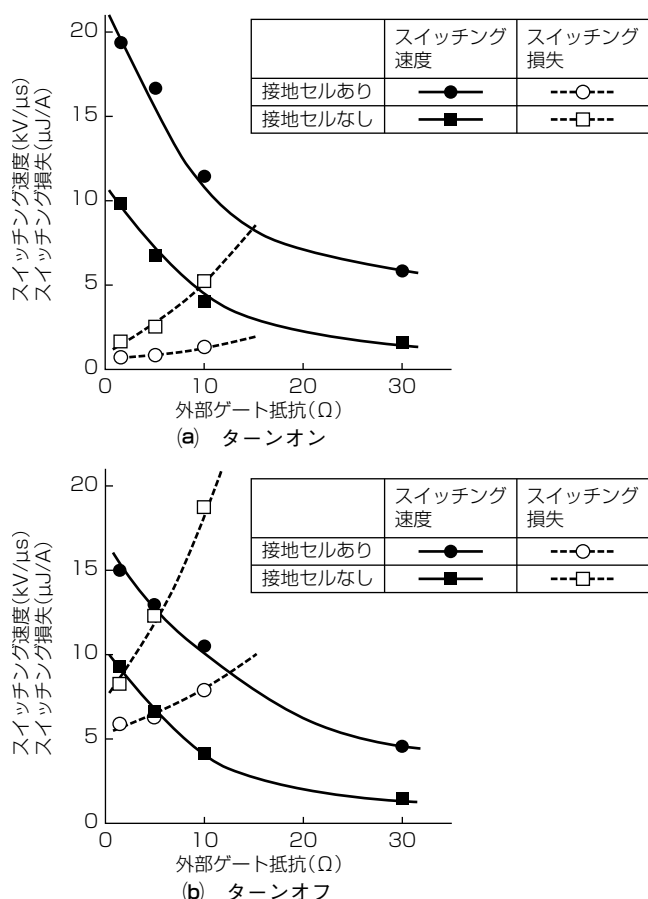


図3. スイッチング速度と損失の外部ゲート抵抗依存性

圧・大電流が付加された場合に、短絡事故発生から素子破壊に至るまでの時間である。短絡耐量は、短絡事故の発生が回路的に検知されて電圧が遮断されるまでの時間よりも長い必要がある。一般に、短絡耐量はオン抵抗と関係があり、オン抵抗が小さいほど短絡耐量も小さくなる傾向がある。トレンチ型SiC-MOSFETは従来のプレーナ型に比べてオン抵抗が小さいため、短絡耐量が低下する懸念がある。

短絡耐量及びオン抵抗のp型保護層接地セル設置割合依存性を図4に示す。p型保護層接地セルの設置割合の増加に伴って短絡耐量も増加していく傾向があり、設置割合11%で約11 μ sに達した。これは、短絡発生が回路によって検知されて電圧が遮断されるまでに十分な時間である。この場合でも、設置割合は1割程度にとどまることから、オン抵抗の増加は抑えられている。なお、ゲート酸化膜破壊までにこれらの素子が消費したエネルギー、すなわち素子破壊エネルギーは、p型保護層接地セルの設置割合によらず約8J/cm²であった。

短絡耐量測定によってゲート酸化膜が破壊した素子の発光解析像を図5に示す。発光解析像から、破壊が生じた点はp型保護層接地セルから遠い部分に集中していることが分かる。p型保護層接地セルの割合によって短絡耐量に変化した原因は次のように考えられる。まず、過渡応答時にp型保護層内を流れる変位電流によってp型保護層に接

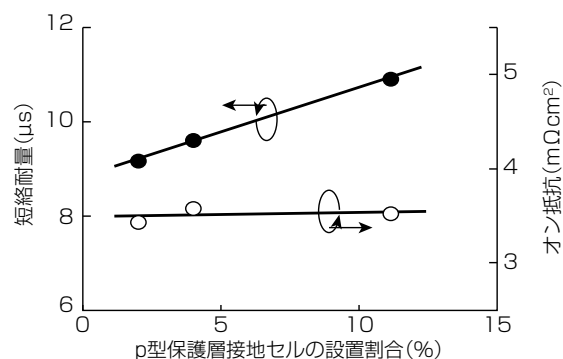


図4. 短絡耐量及びオン抵抗のp型保護層接地セル設置割合依存性

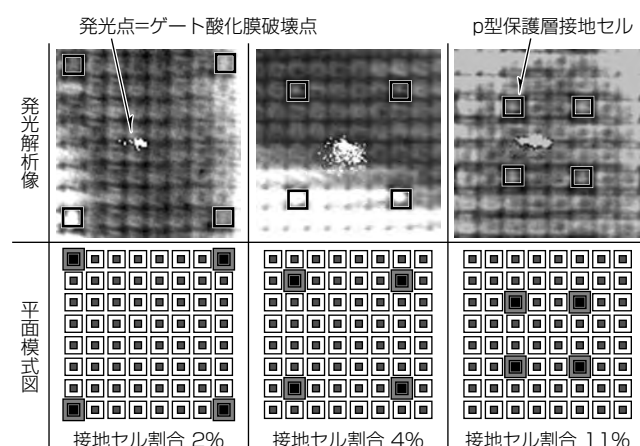


図5. ゲート酸化膜が破壊した素子の発光解析像

するトレンチ底部のゲート酸化膜にかかる電界が増加する。その際、p型保護層接地セルからの距離が大きいほど変位電流が流れる経路が長いため、ゲート酸化膜にかかる電界がより高くなる。p型保護層接地セルの設置割合が増すほどp型保護層接地セル間の距離は短くなり、変位電流によるゲート酸化膜電界の増加が抑えられる。したがって、p型保護層接地セルの割合とともに短絡耐量が増加したと考えられる。

2.4 空乏化抑制層導入によるオン抵抗の低減⁽³⁾

トレンチ型SiC-MOSFETでトレンチ底部にp型保護層を設けた場合、図6(a)に示すように、p型保護層からドリフト層中に延びる空乏層とp型ウェルからドリフト層中に延びる空乏層によってドレイン電流の経路(図中の矢印間)が狭窄されてオン抵抗が増加する問題がある。特に、トレンチ深さが浅い場合はこれら2つの空乏層が近づいて狭窄が強くなるため、オン抵抗が急激に増加する。これを改善するためには、トレンチ深さを深くして電流経路を広くすればよいが、それに伴ってドレイン電極-ソース電極間の耐圧が低下する。トレンチ深さを深くすることなく電流経路狭窄を緩和するためには、p型保護層-ドリフト層間、又はp型ウェル-ドリフト層間のどちらかの空乏層の延びを抑制すればよい。

空乏化抑制層は、p型ウェル下に適切な濃度・厚さのn型層を導入することで、オン時にp型ウェルからドリフト層へ延びる空乏層を空乏化抑制層内にとどめて、電流経路

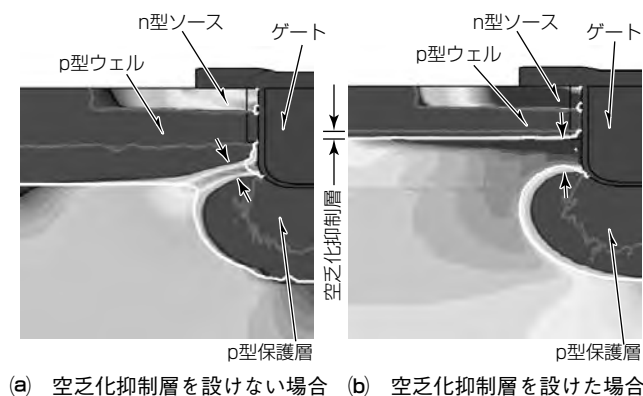


図6. 電界分布シミュレーション結果

の狭窄を緩和する技術である(図6(b))。これによって、浅いトレンチの場合でもオン抵抗の増加を抑制できる。また、オフ時には空乏層が空乏化抑制層を越えて広がるため、耐圧及びゲート酸化膜電界に対する影響は小さい。オン抵抗のトレンチ深さ依存性を図7に示す。空乏化抑制層を設けない場合、トレンチ深さが浅くなるとともにオン抵抗は急激に増加する。一方、空乏化抑制層を設けた場合にはp型ウェルドリフト層間の空乏層の伸びが抑制されるため、トレンチ深さが浅くなることに伴うオン抵抗の増加が抑えられている。すなわち、空乏化抑制層の導入によって、オン抵抗の低減が実証された。空乏化抑制層を導入したトレンチ型のオン抵抗をしきい値電圧3.0Vのプレーナ型と比較した場合、45%の低減に相当する(図8)。

3. 1,200V耐圧トレンチ型SiC-MOSFETの開発

1,200V耐圧MOSFETは、産業機器や車載機器への応用が見込まれている。特に車載機器向けのMOSFETは、電気自動車やハイブリッド自動車の普及によって今後大きな成長が見込まれている。

ドリフト層及びp型保護層の厚さ、濃度の最適化と、終端設計の変更、MOSFET構造の見直しを行って、1,200V耐圧のトレンチ型SiC-MOSFETを開発した。その結果、ドレイン電極-ソース電極間耐圧1,200Vの素子でも600V耐圧と同様のオン抵抗低減効果が得られた。また、1,200V耐圧での短絡耐量評価を行って、素子破壊エネルギーが600V耐圧の評価で得られた約8 J/cm²とほぼ同じであることを確かめた。これは、破壊にいたるメカニズムが600V耐圧と1,200V耐圧とで変化していないことを示している。

一方、600V耐圧から1,200V耐圧へとドレイン電圧が増加することで、ゲート酸化膜にかかる電界も増加する。トレンチ型のゲート酸化膜はSiC結晶の様々な面と接することから、その長期信頼性は未知の部分が多い。今後は、更なる特性の向上に加えて、長期信頼性を支配する要因の解明及びその改善を行う必要がある。

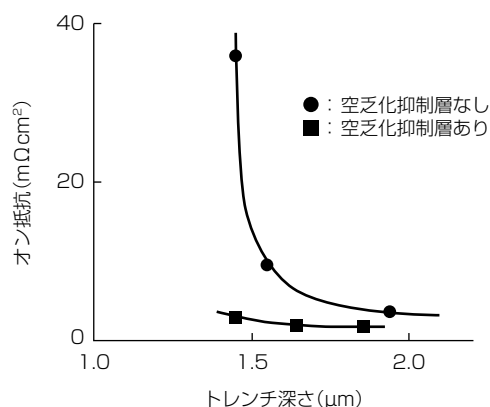


図7. オン抵抗のトレンチ深さ依存性

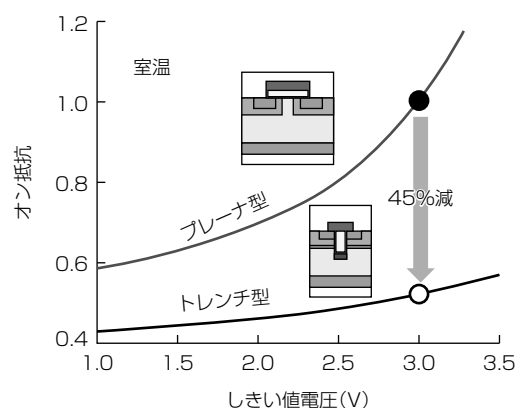


図8. プレーナ型及びトレンチ型SiC-MOSFETのオン抵抗(プレーナ型のしきい値電圧3.0V時の値で規格化)の比較

4. む す び

600V・1,200V耐圧トレンチ型SiC-MOSFETの開発を行い、p型保護層及びp型保護層接地セルの導入によるスイッチング損失の低減及び短絡耐量の向上を実現した。さらに、p型ウェル下への空乏化抑制層の導入によってオン抵抗の低減化を図り、しきい値電圧3.0Vで従来のプレーナ型に比べてオン抵抗が45%低減できることを実証した。

参 考 文 献

- (1) Kagawa, Y., et al.: 4H-SiC Trench MOSFET with Bottom Oxide Protection, Materials Science Forum, **778-780**, 919~922 (2014)
- (2) Tanaka, R., et al.: Impact of grounding the bottom oxide protection layer on the short-circuit ruggedness of 4H-SiC trench MOSFETs, 2014 IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), 75~78 (2014)
- (3) Kagawa, Y., et al.: Introduction of Depletion Stopper for Reduction of JFET Resistance for 4H-SiC Trench MOSFET, Materials Science Forum, **821-823**, 761~764 (2015)

SiCパワーモジュールの ダイナミックインテグリティ設計

山口義弘* 中嶋純一**
大開美子** 上田哲也*
井上貴公*

Dynamic Integrity Design for SiC Power Module

Yoshihiro Yamaguchi, Yoshiko Obiraki, Takahiro Inoue, Junichi Nakashima, Tetsuya Ueda

要 旨

環境保護と省エネルギーの観点からパワーエレクトロニクスは電力制御に不可欠であり、民生・産業用市場から、電鉄、自動車、太陽光・風力発電市場へと適用範囲を拡大している。

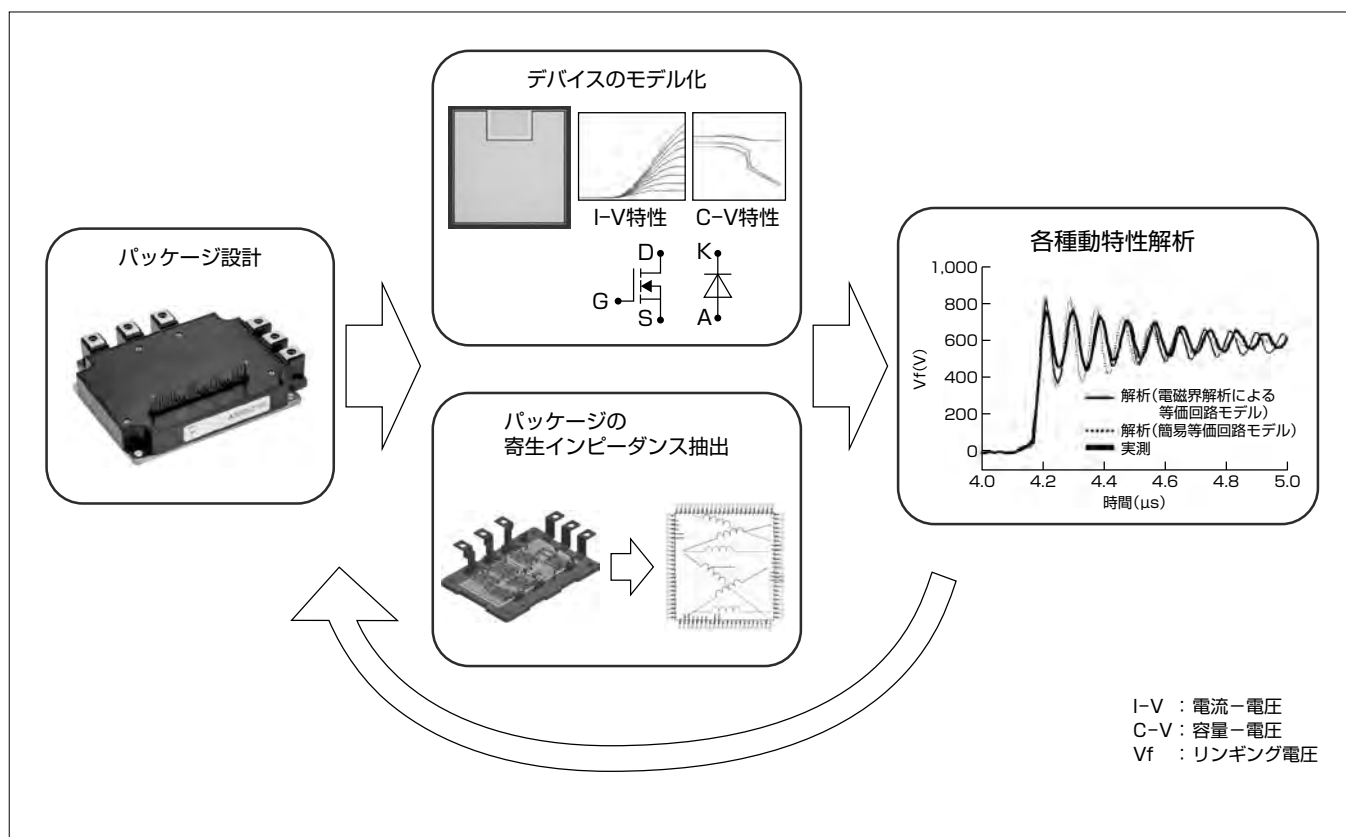
特に近年注目されているSiC(Silicon Carbide)を用いたパワー半導体モジュール(以下“パワーモジュール”という。)は、従来のSi(Silicon)パワーモジュールに比べて高速動作化、動作時の低損失化に優れ、飛躍的な特性向上を図ることができ、今後の適用拡大が期待される。

SiCパワーモジュールの高速動作化のためには、チップの高速動作化に加えて、パッケージの低インダクタンス化、並列間のデバイス動作均一化、低ノイズ化、リンギング・

ゲート発振対策が重要である。さらに、スナバ回路等のアプリケーション側での最適化も重要である。

三菱電機では、高速動作での過渡電磁界現象がデバイス動作に及ぼす影響について、回路解析上でシミュレートする技術を用いて、パワーモジュールのパッケージ構造最適化、ダイナミックインテグリティ設計に取り組んでいる。

従来のSiのパワー半導体チップ(以下“パワーチップ”という。)を搭載したパワーモジュールの動作解析に適用している電磁界解析技術を基に、SiCのパワーチップを搭載したパワーモジュールの高速動作に対応した解析へ適用するため、より高精度なモデルを用いたリンギングとゲート発振の解析を実施して妥当性を実験的に検証し、その有効性を確認した。



ダイナミックインテグリティ設計

ダイナミックインテグリティ設計とは、パッケージ設計で仮想的にパッケージを模擬して課題を抽出した後、再度パッケージ設計に反映して性能の最適化を行う技術である。この設計手法では、電気的特性の設計に着目したパッケージの寄生インピーダンスを抽出する電磁界解析と、実デバイスの特性を再現したデバイスモデルを用いて回路シミュレータ上で連成解析を行う。

1. ま え が き

環境保護と省エネルギーの観点からパワーエレクトロニクスは電力制御に不可欠であり、民生・産業用市場から、電鉄、自動車、太陽光・風力発電市場へと適用範囲を拡大している。その基幹部品であるパワーモジュールは、電流制御の高効率化、適用製品の小型化、高信頼性要求に応えるとともに、適用市場の拡大に合わせた信頼性、特性の向上を進めている。特に近年注目されているSiCを用いたパワーモジュールは、従来のSiモジュールに比べて高速動作化、動作時の低損失化に優れ、飛躍的な特性向上が図れるため、今後の適用拡大が期待される⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

SiCパワーモジュールの高速動作化のためには、チップの高速動作化に加えて、パッケージの低インダクタンス化、並列間のデバイス動作均一化、低ノイズ化、リンギング・ゲート発振対策が重要である。さらに、スナバ回路等のアプリケーション側での最適化も重要である(図1、図2)。

当社は、高速動作時の過渡電磁界現象がデバイス動作に及ぼす影響について、回路解析上でシミュレートする技術を用いてパワーモジュールのパッケージ構造最適化、ダイナミックインテグリティ設計に取り組んでいる⁽⁴⁾。

2. パワーデバイスの高周波振動

パワーデバイスは、スイッチング時の電圧・電流変動によって高周波振動が発生して、パワーモジュール動作不良を引き起こす場合がある。主な動作不良は、リンギング、



図1. パワーモジュール

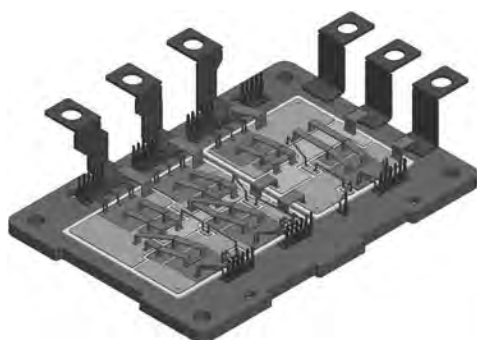


図2. パワーモジュールのパッケージ構造

ゲート発振である。

リンギングは、スイッチングデバイスのターンオン、ターンオフ時に発生する主回路内で起こる共振現象であり、主回路の寄生インダクタンスとデバイスの主電極間の寄生容量に起因する。バイポーラデバイスでは通常観測されないが、ユニポーラデバイスであるSiCデバイスでは顕著となり、問題となることがある。

ゲート発振は、スイッチングデバイスのターンオン、ターンオフ時や、短絡時に発生するゲート電圧の高周波振動であり、モジュール内の寄生インダクタンスと並列配置されているデバイスとの間の寄生容量、又は絶縁基板の浮遊容量に起因する。

3. 解 析 例

回路シミュレータを用いて電磁界解析で抽出した配線の等価回路モデルを、デバイスや主回路(電源、負荷等)、ゲートドライバ等と接続して解析を行った。主回路などの等価回路モデルは、現物をインピーダンスアナライザで評価してモデルを作成している。一方、この中に使用されているデバイスモデルは、実デバイスから抽出したI-V特性やC-V特性などを再現したモデルである。本稿で述べるリンギング、ゲート発振解析ではモデルの精度が重要である。

3.1 リンギング

バイポーラデバイスであるSiデバイスを使用した従来のSiモジュールでは、リカバリー中キャリアがダイオード内部に存在するため、ある程度の抵抗成分を持ち、ダンピング効果によってリンギングは発生しにくい。一方、ユニポーラデバイスであるSiCデバイスを使用したSiCモジュールでは、リカバリー動作がなくダイオードオフ時の空乏層の広がりによって容量成分が支配的になり、リンギングが発生しやすい。そのため、SiCモジュールではリンギングを抑制する対策が必要となる。

そこで、SiCデバイスのモデル、パッケージ構造のインピーダンス、主回路インピーダンスなどを統合して回路シミュレーションを行うリンギング解析技術を開発した。この解析結果のリンギング周波数や振幅は実測とよく一致する。また、パッケージの寄生インピーダンスのうちリンギングに影響する部分はPN間のループインダクタンスであることから、PN間のループインダクタンスだけの簡易等価回路モデルで表現でき、その結果も実測とよく一致する(図3)。

この簡易等価回路モデルによる解析で、簡単にリンギングレベルとパッケージの寄生インダクタンスとの相関が確認できる。そこで、パッケージの寄生インダクタンスを変更した解析を実施して、リンギング抑制対策として一般的に知られているRC(抵抗器-コンデンサ)スナバ回路をモジュールの外部回路に設けた場合と比較した結果、パッケージ側のインダクタンスを85%程度低減しなければな

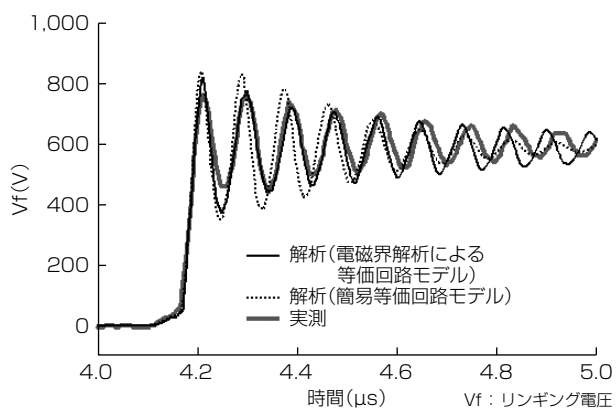


図3. リンギング波形

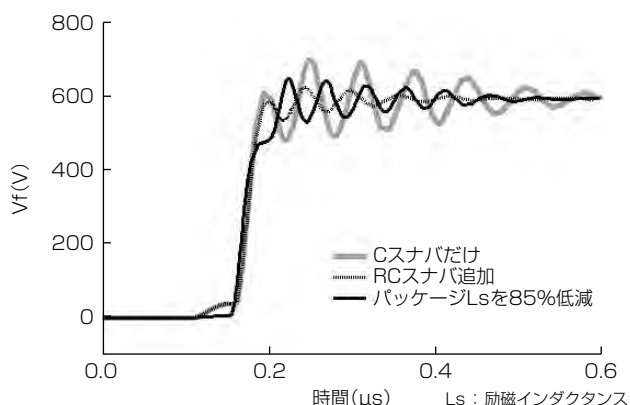


図4. 各条件でのリンギング波形

らないことが判明した(図4)。これは、パッケージ外部の寄生インダクタンスを入れた全体の寄生インダクタンス比では40%低減に相当する。このように、パッケージ構造の低インダクタンス化は重要な要素となるため、今後、この解析技術を用いて、搭載デバイス特性とのマッチングを含めたパッケージ構造最適化設計を展開していく。

一方、先に述べたとおり、リンギングを抑制するにはRCスナバは有効な方法である。今回、RCスナバ定数を見極めるためリンギング解析技術を実パッケージに適用して、パッケージに対してRCスナバのパラメータを振ってリンギングレベル(振幅)を確認した(図5)。リンギングレベルは抵抗(R)に対して極値を持ち、Rが小さければダンピング効果が小さく、Rが大きければスナバとしての役割が下がることが分かった。また、容量(C)がある程度の大きさ以上ではCを増やしてもリンギングレベルが変わらないことが分かり、リンギング抑制に有効なRCスナバの最適値を見極めることができた。この手法はアプリケーション側へも適用可能な技術である。

3.2 ゲート発振

従来、Si-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールでも短絡動作時にゲート発振が観測される場合があるが、ユニポーラデバイスであるSiCモジュールでは

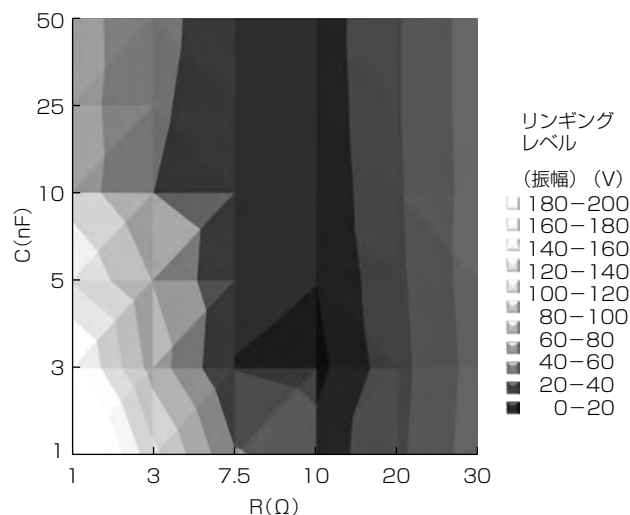


図5. リンギングレベルとRCスナバ定数の相関

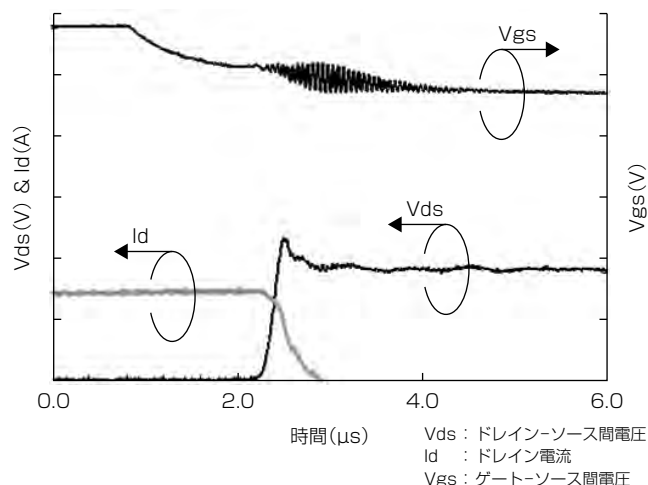


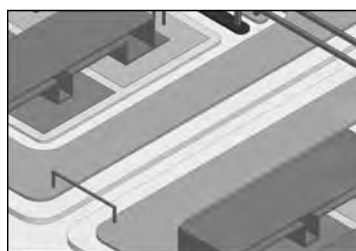
図6. ゲート発振の波形

短絡動作だけではなくターンオン、ターンオフ時にもゲート発振が観測される場合がある。図6に、ゲート発振の波形を示す。ゲート発振は誤動作や過電圧によるゲート酸化膜破壊につながる場合があり、ゲート発振抑制は重要である。ゲート発振対策には、モジュール内部、チップ直近へのバランス抵抗の配置が有効であるが、SiCデバイスの特長である高速動作を妨げるため、バランス抵抗最適化や他のゲート発振を抑制する技術が必要である。

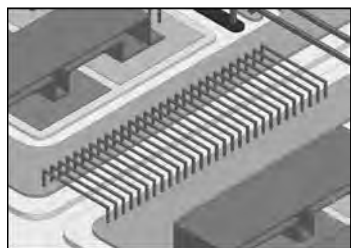
バランス抵抗を配置するには、抵抗値と損失はトレードオフであるため、試作段階で微調整が必要であった。そこで、電磁界解析と回路シミュレーションを用いた連成解析によるゲート発振解析技術を開発して対策方法を検討した。

3.2.1 解析の有効性とパッケージ構造設計への適用

製品設計段階で観測されたゲート発振に対して連成解析で原因を調査した結果、素子が搭載された絶縁基板間の寄生インダクタンスが大きい場合に絶縁基板間でゲート電圧変動が発生していることが判明した。そこで、絶縁基板間インダクタンスを低減する構造でゲート発振解析を行った



(a) 対策前



(b) 対策後

図7. 対策前後の電磁界解析モデル

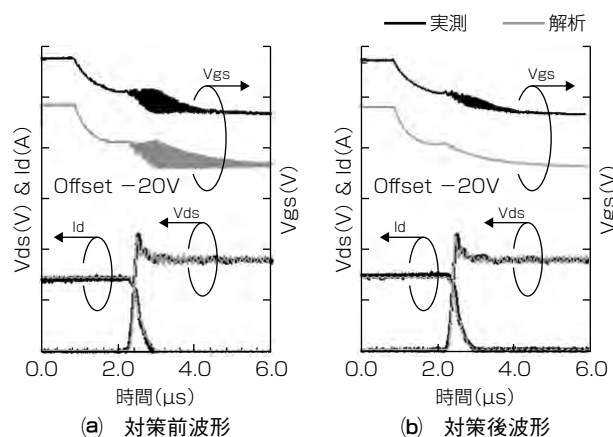


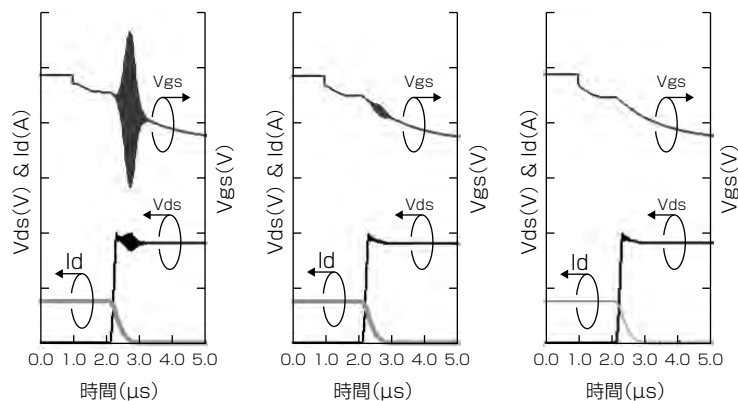
図8. 対策前後の実測と解析結果

ところ、ゲート発振の抑制が確認できた。図7に対策前後での電磁界解析モデルを、図8に対策前後の実測と解析結果を示す。実測と解析の結果から解析の有効性が証明されて、パッケージ構造設計への適用が可能となった。

3.2.2 ゲートバランス抵抗最適化

ゲートバランス抵抗値をパラメータとして連成解析を行った結果を図9に示す。ただし、ゲートバランス抵抗値に応じてドライバ側の抵抗値を変更することで、1チップ当たりの駆動速度を調整して損失を同等にした。この解析結果から、ゲートバランス抵抗を大きくすることでゲート発振強度が低減しており、スイッチング速度を下げずにゲート発振を抑制できることが判明した。

これらの解析を用いて、設計段階でのゲート発振抑制が可能となった。



(a) ゲートバランス抵抗:小

(b) ゲートバランス抵抗:中

(c) ゲートバランス抵抗:大

図9. ゲート発振のバランス抵抗依存性

4. む す び

従来のSiパワーチップを搭載したパワーモジュールの動作解析に適用している電磁界解析技術を基に、SiCパワーチップを搭載したパワーモジュールの高速動作に対応した解析へ適用するための、より高精度なモデルを用いたリングングとゲート発振の解析を実施した。その結果の妥当性を実験的に検証して、解析の有効性について述べた。現在、更なる高速化及び汎用性のある対策構造の解析・検証に取り組んでいる。

この研究は、経済産業省と国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託された“低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト”の成果を含んでいる。

参 考 文 献

- (1) マジウムダール ゴーラフ, ほか: パワーモジュールの最新技術動向, 三菱電機技報, **86**, No.5, 262~266(2012)
- (2) 長谷川 滋, ほか: 1.7kV大容量ハイブリッドSiCモジュール, 三菱電機技報, **86**, No.5, 287~290(2012)
- (3) 加柴良裕, ほか: エネルギーの高度利用に向けて革新を続けるパワー・モジュール, 半導体技術年鑑2014[パッケージング/実装編], 日経BP, 217~227(2013)
- (4) 大月高実, ほか: SiCパワーモジュール化技術, 三菱電機技報, **88**, No.5, 301~304(2014)

上馬場 龍*
森本 昇*
渡部俊一**

産業用第7世代パワーチップ技術

7th Generation Power Chip Technologies for Industrial Applications

Ryu Kamibaba, Noboru Morimoto, Shunichi Watabe

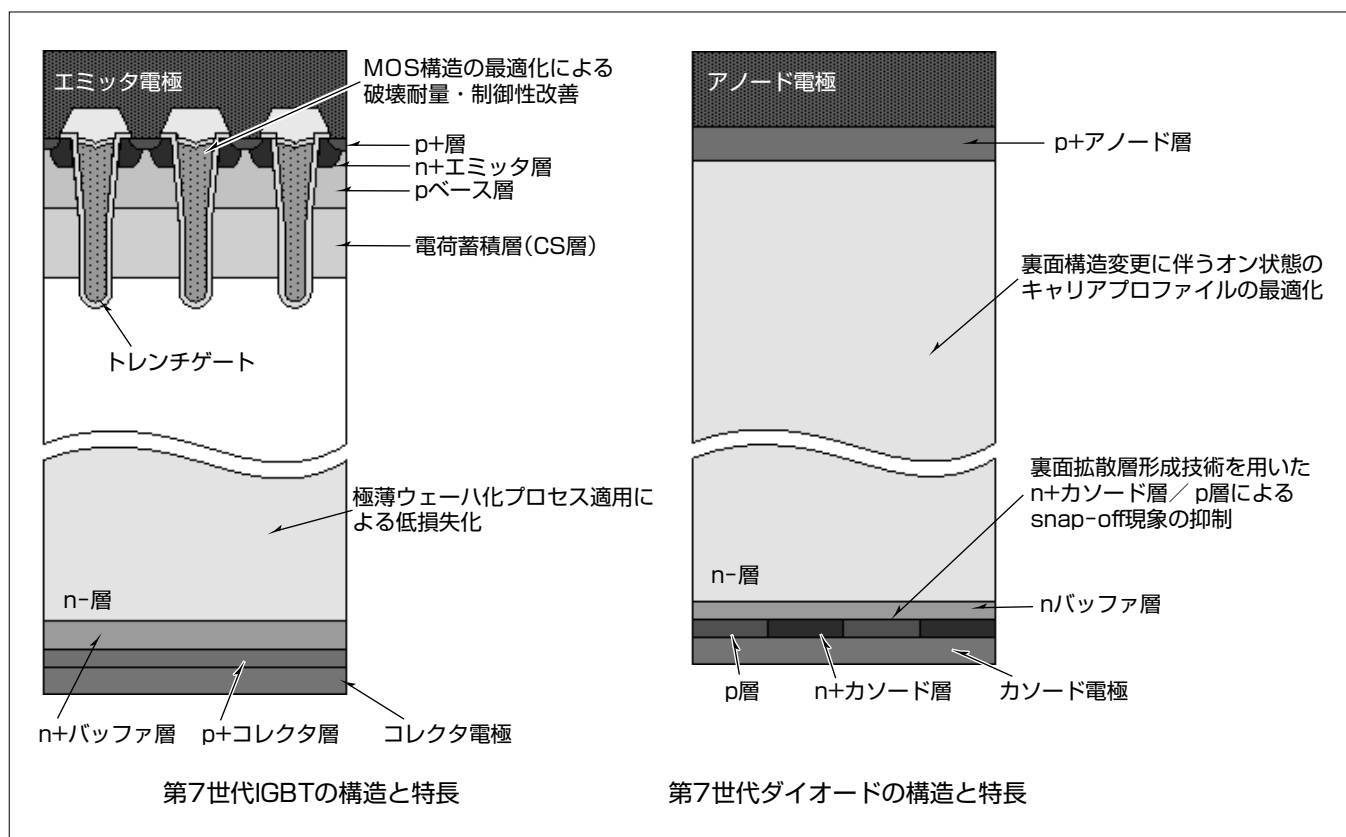
要 旨

世界的に地球環境問題への関心が高まる中、パワーデバイスの用途は、太陽光・風力等の新エネルギー発電用や、ハイブリッド・電気自動車等のエコカーなど、多岐にわたり、その市場も拡大している。同時に、低損失化、低ノイズ化、高耐量化、高信頼性化など、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)やダイオードに求められる要求性能も厳しくなっている。三菱電機では、IGBTとダイオードの定常損失とスイッチング損失を低減するために、平面型IGBT、トレンチ型IGBT、電荷蓄積型IGBT“CSTBT”へと、また、拡散ダイオードを薄ウェーハダイオードへと進化させてきた。

今回、更なる性能改善を盛り込んだ第7世代パワーチッ

プを開発した。耐圧1,200V級第7世代IGBTは、MOS(Metal Oxide Semiconductor)構造の最適化によって、破壊耐量改善及びターンオン時のリカバリー dv/dt 制御性を改善し、極薄ウェーハ化プロセス技術を用いたLPT(Light Punch-Through)構造による低損失化も実現した。耐圧650V級第7世代ダイオードは、極薄ウェーハ化とともにRFC(Relaxed Field of Cathode)ダイオード構造を適用し、従来型ダイオードと同等の破壊耐量のまま損失低減を実現した。

これら第7世代パワーチップを各耐圧級の様々な製品向けに順次展開していく。



第7世代IGBTとダイオードの構造と特長

第7世代IGBTは、極薄ウェーハ化プロセス技術を用いたLPT構造による低損失化と、MOS構造の最適化による破壊耐量改善及びリカバリー dv/dt 制御性改善が特長である。また、第7世代ダイオードにはRFC効果を適用し、裏面拡散層形成技術を用いたn+カソード層/p層によるsnap-off現象の抑制と、オン状態でのキャリアプロファイルの最適化を特長としている。

1. ま え が き

長年研究され続けているSi(Silicon)パワーデバイスは、これまでデバイス構造の改良による性能改善が繰り返されてきた。現在のSiパワーデバイスは物性限界に近付いているものの、製品用途ごとの最適化や、使いやすさの改善など、優れたデバイス設計を行うことでSiパワーデバイスの価値はまだ高められると考えている。

本稿では、更なる性能改善として、産業用IGBTモジュール向けに開発した第7世代IGBTとダイオードについて述べる。

2. 第7世代IGBT

2.1 IGBTの性能向上⁽¹⁾

当社のトレンチゲート型IGBTでは、第5世代から電荷蓄積層(CS層)を採用し、セル内で最も高抵抗成分であったJFET(Junction Field Effect Transistor)抵抗を劇的に低減したCSTBT⁽²⁾構造を採用している。第6世代ではトレンチゲートを狭ピッチ化し、キャリア蓄積効果を更に高めた。第7世代では極薄ウェーハ化、MOS構造及び裏面構造の改良によって高性能かつ高い駆動制御性を実現した。

IGBTの性能は、しばしば性能指数FOM(Figure Of Merit)で議論される。FOMはチップサイズを決める主要素であるコレクタ電流密度 J_c (A/cm²)、定常損失を決めるコレクター-エミッタ間飽和電圧 V_{CEsat} (V)、ターンオフスイッチング損失 E_{off} (mJ/A)の値を用いて式(1)で示される数値である。

$$FOM = \frac{J_c}{V_{CEsat} \times E_{off}} \dots\dots\dots (1)$$

産業用1,200V級IGBTで、第5世代IGBTのFOMを1にした場合、第6世代では1.25、第7世代では1.32となり、各世代で性能向上を達成してきた。また、低コスト、高温動作、高破壊耐量等を成立させるため、MOS構造、裏面構造の改良に加え、終端構造をシュリンクすることで、要求性能に添えてきた。

2.2 産業用第7世代IGBTの構造の特長

薄ウェーハ化は電気特性改善に効果的だが、チップの熱容量減少による破壊耐量低下、過剰なストレスによる電気特性変動などの問題があった。産業用1,200V級第7世代IGBTは、MOS部のn+エミッタ層とp+層の面積比率を最適化することで、通電能力と破壊耐量を確保した。次に、ウェーハプロセスで、研削や熱処理等の処理条件を最適化することで、チップに対し過剰なストレスなく薄ウェーハ化できるプロセス技術を確立した。また、第7世代ではトレンチゲートのアクティブ・非アクティブの比率を調整することで、ゲート容量(ゲート・エミッタ・コレクタ間の静電容量)を最適化した結果、ターンオン時のリカバリー

dv/dt (以下“ dv/dt ”という。)の電流依存性を改善し、高い dv/dt 制御性を実現させた。

2.3 産業用第7世代IGBTの電気特性

図1に産業用IGBTモジュール向け第7世代IGBTのSCSOA(Short Circuit Safe Operating Area)の波形を示す。薄ウェーハ化は熱容量減少によってSCSOAが低下するが、n+エミッタ層とp+層の面積比率を最適化することで、飽和電流(ゲート-エミッタ間電圧(V_{GE})=14V、接合部温度(T_j)=150℃、定格電流×2)及びラッチアップ耐量(T_j =175℃、定格電流×2)を確保した。その結果、 V_{CE} =800V、 V_{GE} =15V/-15V、 T_j =150℃の測定条件で、パルス幅10.5μsまで非破壊となり、製品要求を満足できる通電能力と高破壊耐量を達成した。

また、薄ウェーハ化はチップへの過剰なストレスによって特性変動のおそれがあるため、ウェーハプロセス中のストレス軽減は極めて重要である。特に、研削や電極形成、熱処理プロセスの処理条件を重点的に最適化したことで、小容量チップのみならず大容量チップの極薄ウェーハ化を実現した。

図2は極薄ウェーハ化した定格600V/20Aの小容量チップと、定格650V/200Aの大容量チップの表面写真及びゲート-エミッタ間しきい値電圧 $V_{GE(th)}$ の面内バラつきを示している⁽³⁾。図2(a)、(b)のチップ面積比率は約20倍である。 $V_{GE(th)}$ はストレスの影響を受けやすいキャリア移動度と相関を持つため、機械的なストレスによる電気特性変動を確認する指標として有効である。図2(c)、(d)から $V_{GE(th)}$ の面内バラつきが±0.2V以下で差異がないことは、チップへの過剰なストレスなく薄ウェーハ化できていることを意味する。

次に、ゲート容量を最適化した第7世代IGBTの制御性を述べる。IGBTにおけるスイッチングの基本動作は、コレクター-エミッタ間に電圧印加しつつ、ゲートに電荷を充放電することでターンオン・オフ動作をする。この充放電を高周波で繰り返すことで高効率な電力制御が可能となる。スイッチング時は回路中で電圧変化が生じており、特にターンオン時の電圧変化値は dv/dt で定義される。この dv/dt が基準値(例：20kV/μs)以上に大きくなると、放

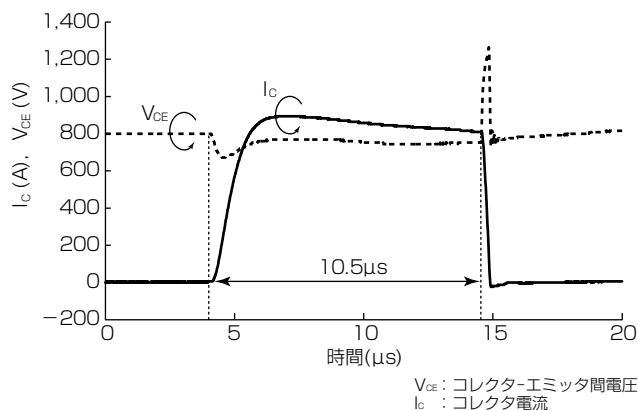


図1. 第7世代IGBTのSCSOA波形

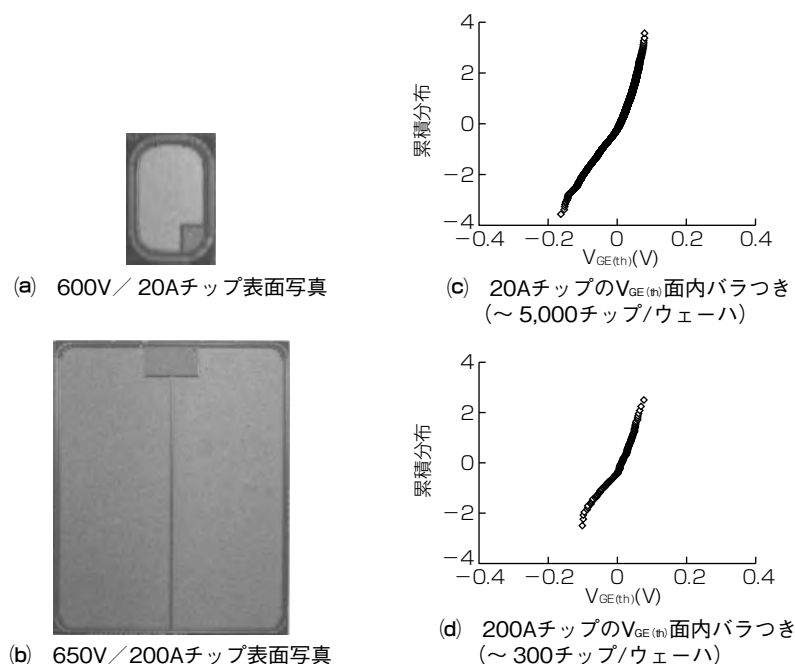


図2. 第7世代チップの表面写真と面内均一性

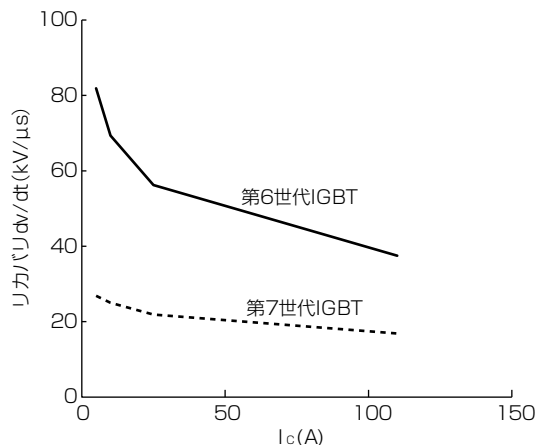


図3. リカバリーdv/dt特性の比較

射ノイズが無視できなくなり、モータ等の誤動作を引き起こすリスクがある。そのため、使用電流域 dv/dt が基準値以下になるようにゲート抵抗 $R_{g(on)}$ を大きくすることで調整する。一方で、 dv/dt が基準値に対し小さい場合、スイッチング速度も遅いためターンオンスイッチング損失 E_{on} が悪化する。したがって、 dv/dt は使用電流域で電流依存性が小さい方が望ましい。

図3に第6世代及び第7世代IGBTの dv/dt のコレクタ電流 I_c 依存性を示す。いずれも定格1,200V／110Aのチップを用いており、スイッチング条件は、 $V_{CE} = 600V$ 、 $V_{GE} = 15V / -15V$ 、 $T_j = 25^\circ C$ 、ゲート抵抗 $R_{g(on/off)} = 10\Omega$ 、コレクタ電流 I_c は5～110Aの間で振り分けている。第6世代における $I_c = 5A$ 時の dv/dt は、110A時に対して約2.2倍に増大しており、電流依存性が非常に大きい。一方、第7世代は約1.6倍となっており、どの電流域でもほぼ一定のスイッチング速度を保つことができる。このようにゲート容量を最適化し、第7世代の dv/dt 制御性を向上させた。

3. 第7世代ダイオード

3.1 ダイオードの性能向上

ダイオードの性能向上として、薄ウェーハ化によって順電圧 V_F を低減可能であるが、薄ウェーハ化とともにリカバリー時にsnap-off(電圧跳ねあがり)が増大し破壊耐量が低下する問題が指摘されている。この問題に対し、当社では新規の裏面拡散層形成技術によるRFCダイオードを開発してきた。RFCダイオード構造は、カソード側に部分的に形成したp層からリカバリー時にホールを注入し、リカバリー波形をソフトにすることで、急な電圧の立ち上がりを抑制することが可能な技術である。

当社第7世代ダイオードは、薄ウェーハ化とともにRFCダイオード構造を適用し、これまでに、1,200V以上の耐圧級で、従来型ダイオードからの性能改善と高い破壊耐量を達成している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。ここでは、更なる耐圧展開として、産業用650V級の第7世代ダイオードを試作・評価した結果を述べる。

3.2 第7世代(RFC)ダイオードの構造の特長

従来型拡散ダイオード及び第7世代ダイオードの断面構造を図4に示す。耐圧650V級の第7世代ダイオードは、極薄ウェーハ化プロセスによって従来型拡散ダイオードの約0.3倍まで薄厚化し、裏面パターンニングプロセスを用いて裏面側にn+カソード層／p層構造を形成した。

3.3 第7世代ダイオードの電気特性

第7世代ダイオードチップのリカバリー波形を図5に示す。リカバリー時の発振現象は、高電源電圧(V_{CC})、高配線インダクタンス(L_s)、低動作温度等、ハードリカバリー条件下で顕著になることが報告されているが、この評価は定格650V／100Aのチップを用いて、発振現象が発生しや

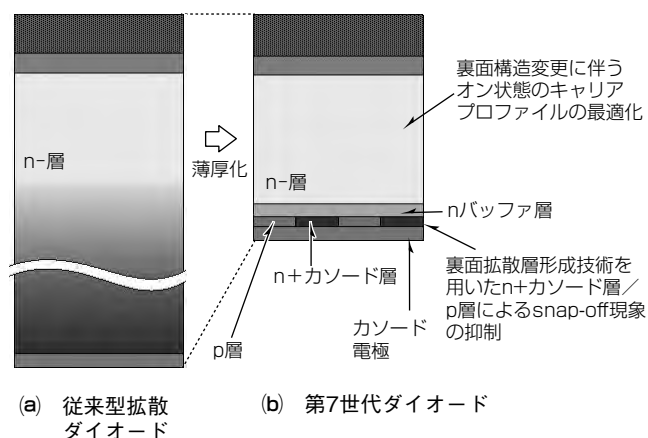


図4. 断面図の比較

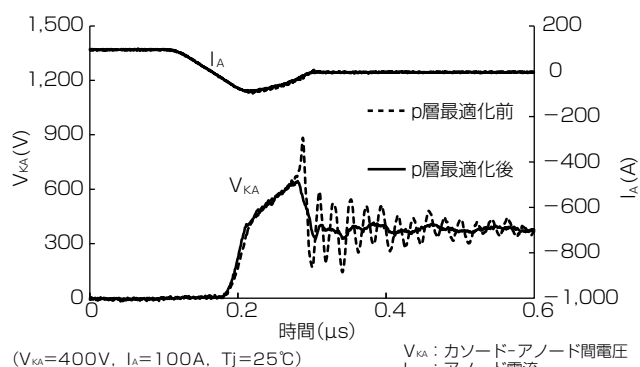


図5. 発振現象が発生しやすい条件下でのリカバリー波形

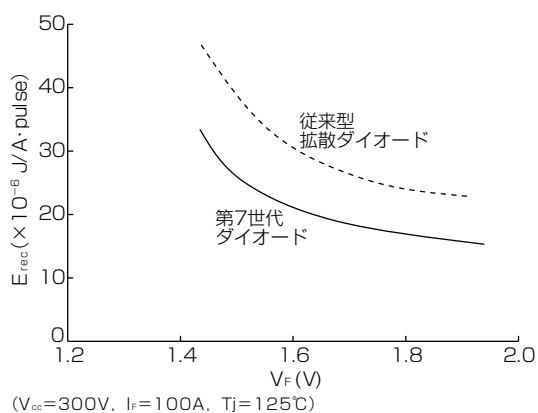


図6. V_F-E_{rec}のトレードオフ特性

すい条件下で評価を行った。先に述べたように、RFCダイオードでは裏面のp層からホールを注入することで、リカバリー波形をソフトにする。すなわち、ウェーハ厚や使用条件に応じて、p層の濃度、レイアウトを調整することによって、ホールの注入を制御することができる。条件最適化前のチップでは電圧のsnap-offとそれに続く発振が見られたが、これらのパラメータを最適化することで、snap-offを650V以下に抑えることができ、従来型ダイオードと同等の破壊耐量を達成した。

次に、従来型拡散ダイオードと第7世代ダイオードのV_Fとリカバリー損失E_{rec}のトレードオフ相関を図6に示す。ダイオードの性能改善としてはこのトレードオフ相関

自体を改善することであり、第7世代ダイオードでは、従来型拡散ダイオードに対して同一V_FでE_{rec}を30%低減した。また、ダイオードの性能指数FOMは式(2)で表されるが、性能指数FOMでも、50%改善している。

$$FOM = \frac{J_A}{V_F \times E_{rec}} \quad (2)$$

J_A : アノード電流密度(A/cm²)

V_F : 125℃での順電圧(V)

E_{rec} : 125℃のリカバリー損失(J/A・パルス)

このように第7世代ダイオードは、従来型ダイオードと同等の破壊耐量を確保しつつ損失を大きく低減することができた。これによって、産業用途の幅広い使用条件に対応し、損失を低減することが可能である。

4. む す び

極薄ウェーハ化プロセス技術、裏面拡散層形成技術等の新技術を適用することによって、高性能・高破壊耐量を持つ第7世代IGBT及び第7世代ダイオードを開発した。さらに、産業用途向けにIGBTではMOS構造の最適化によるdv/dt制御性向上、ダイオードでは裏面構造の最適化による発振抑制など、使いやすさの改善に重点を置き開発を行った。

極薄ウェーハ化プロセス技術は耐圧600Vから1,400V級のIGBT及びダイオードに展開している。また、裏面拡散層形成技術を適用したダイオードは、6,500V級を含むすべての耐圧に適用予定である。今後は、より高性能・高制御性・高品質を持つ第8世代Siパワーチップを開発し、市場要求に応じていく。

参 考 文 献

- (1) Sato, K., et al.: New chip design technology for next generation power module, Proceedings of PCIM 2008, 673~678 (2008)
- (2) Takahashi, H., et al.: Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor(CSTBT) - A Novel Power Device for High Voltage Application, ISPSD1996, 349~352 (1996)
- (3) Kamibaba, R., et al.: Next Generation 650V CSTBT™ with improved SOA fabricated by an Advanced Thin Wafer Technology, ISPSD2015, 29~32 (2015)
- (4) Masuoka, F., et al.: Great Impact of RFC Technology on Fast Recovery Diode towards 600V for Low Loss and High Dynamic Ruggedness, ISPSD2012, 373~376 (2012)
- (5) 鈴木健司, ほか: 高性能・高破壊耐量第7世代パワーチップ技術, 三菱電機技報, 88, No.5, 281~284 (2014)

産業用高信頼性パッケージ技術

浅田晋助* 境 紀和*
吉田 博* 石橋秀俊*
近藤 聡*

Packaging Technologies for High Reliable Industrial Power Modules

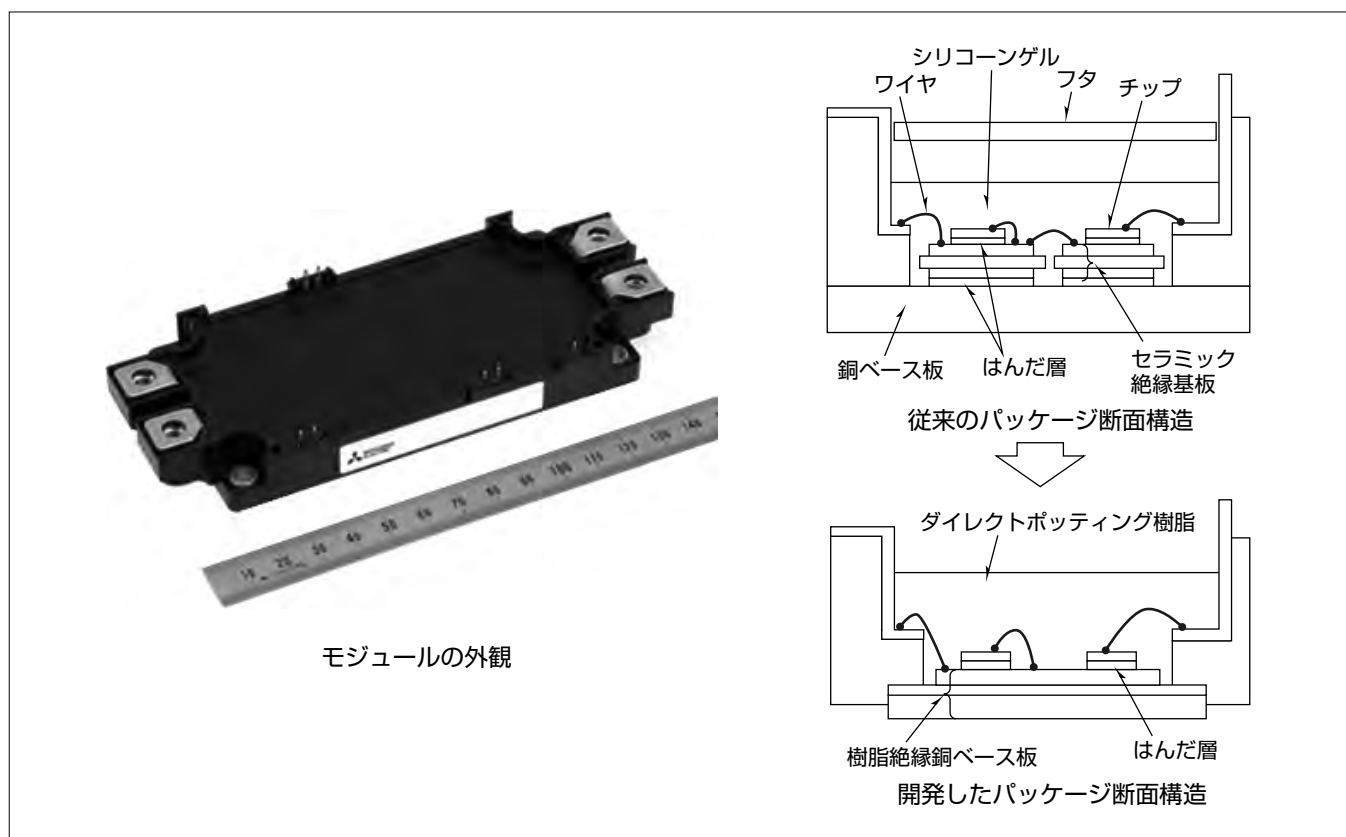
Shinsuke Asada, Hiroshi Yoshida, Satoshi Kondo, Norikazu Sakai, Hidetoshi Ishibashi

要 旨

産業機器分野におけるパワーモジュールは、モータ制御用途を始め、無停電電源装置や自然エネルギー発電の電力変換用途等、広範囲に使用されており、省エネルギー要求の高まりを受けてその用途は拡大の一途をたどっている。それに伴って、産業用パワーモジュールには高い信頼性に加えてユーザーによるシステムへの簡易的な取付けに対する要求が高まっている。これらの要求に応えるため、新規パッケージ技術を開発して産業用第7世代IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールTシリーズNXタイプに搭載した。

新技術では、銅ベース板の上に高放熱性の樹脂絶縁層と配線パターンを一体化した樹脂絶縁銅ベース板を採用した。従来構造でセラミック絶縁基板と銅ベース板を接合してい

たはんだ層をなくして、製品寿命への影響因子を削減した。さらに、車載用トランスファモールド型パワーモジュールで培った高信頼性技術をケース型パワーモジュールに応用したダイレクトポッティング封止技術を適用して、従来の柔軟なゲル封止に対して硬質な樹脂による封止を可能とした。一方で、ユーザーでのモジュールのシステムへの取り付けを容易とするために、はんだ付けレスでプリント基板に取り付け可能となるプレスフィット接続端子を選択可能とした。さらに、ユーザーでの放熱面への熱伝導グリース塗布が不要となるPC(Phase Change)-TIM(Thermal Interface Material)を塗布したモジュールも選択可能とした。



産業用第7世代IGBTモジュールTシリーズNXタイプのパッケージ

産業用第7世代IGBTモジュールTシリーズNXタイプのモジュール外観と、従来のパッケージ及び開発したパッケージの断面構造を示す。開発したパッケージでは、高信頼化を実現するために樹脂絶縁銅ベース板とダイレクトポッティング封止技術を採用した。

1. ま え が き

産業機器分野におけるパワーモジュールは、モータ制御用途を始め、無停電電源装置や自然エネルギー発電の電力変換用途等、広範囲に使用されており、省エネルギー要求の高まりを受けてその用途は拡大の一途をたどっている。それに伴って、産業用パワーモジュールには、より高い信頼性と、ユーザーによるシステムへの簡易的な取付けに対する要求が高まっている。これらの要求に応えるため、新規パッケージ技術を搭載した産業用第7世代IGBTモジュールTシリーズNXタイプを開発した。

本稿では、産業用第7世代IGBTモジュールのパッケージ構造の特長及び信頼性について述べる。

2. 高信頼化のためのパッケージング技術

2.1 パッケージ設計のコンセプト

今回開発したモジュールの外観写真を図1に示す。高信頼性を実現するため、パッケージ構成部材の大幅な見直しを行った。従来のパッケージ構造は、図2(a)に示すように銅ベース板にセラミック絶縁基板がはんだ接合されている構造であった。外部環境や通電発熱でモジュールの温度が変化すると、銅ベース板とセラミック絶縁基板の線膨張係数差に起因したはんだ層への応力が生じるため、その寿命を考慮してモジュール設計を行っていた。新パッケージ構造では、図2(b)に示すように、新たに樹脂絶縁銅ベース板とダイレクトポッティング封止を適用することでモジュール内部の熱ストレスを緩和した。

2.2 樹脂絶縁銅ベース板

開発したモジュールでは、従来構造の配線と絶縁のためのセラミック絶縁基板と熱拡散のための銅ベース板の機能を集約した樹脂絶縁銅ベース板を採用している。この基板は銅ベース板上に樹脂絶縁層と配線パターンを直接形成したものであり、従来構造にあったセラミック絶縁基板をなくすことで、線膨張係数のミスマッチによる熱ストレスの緩和を図っている。さらに、樹脂絶縁層には高熱伝導率の材料を適用することで、モジュールとして必要とされる絶縁性と放熱性を確保した。



図1. 開発したモジュール

2.3 ダイレクトポッティング封止

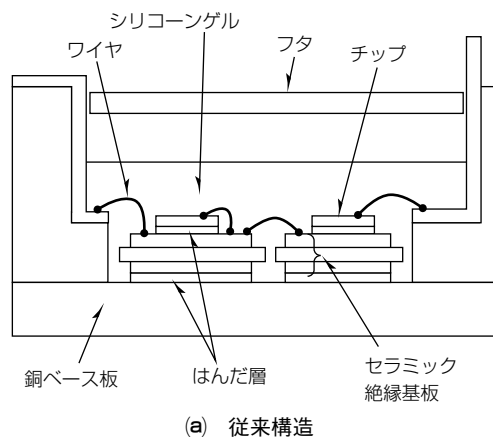
三菱電機は、パワーモジュールとして主流であったシリコンゲル封止構造の数倍の寿命を持つトランスファモールド構造を開発・製品化した⁽¹⁾。この利点を活用して、硬質樹脂封止を産業用パッケージに用いられるケース構造に適用するため、ダイレクトポッティング封止技術を開発した。固形の樹脂を金型に流し込むトランスファモールドに対して液状の樹脂材料を開発することで、ケース構造への注入封止を可能とした。さらに、線膨張係数を適性化することで、パッケージ内部のチップ下のはんだに作用する熱ストレスを緩和した。

2.4 アセンブリプロセスのシンプル化

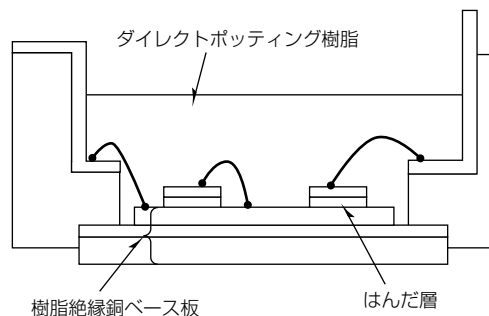
従来構造のモジュールのアセンブリ工程ではセラミック絶縁基板と銅ベース板を別々に準備して組み立てる必要があったが、新構造では樹脂絶縁銅ベース板の1部品に集約したため、組立て部品点数を削減できた。これに伴って、はんだ接合箇所も削減され、従来構造よりもアセンブリプロセスをシンプル化でき、製造ばらつき要因を削減した。

2.5 ヒートサイクル信頼性

ヒートサイクル試験(−40~125℃)の結果を図3に示す。初期及び同一のサイクル回数後の基板コーナー部周辺のSAT(Scanning Acoustic Tomography)画像を比較した図である。従来構造では、セラミック絶縁基板下のはん



(a) 従来構造



(b) 新構造

図2. パッケージ断面構造の比較

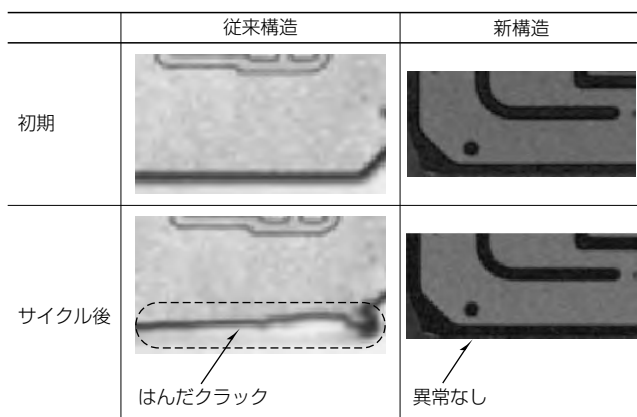


図3. ヒートサイクル後のSAT画像比較

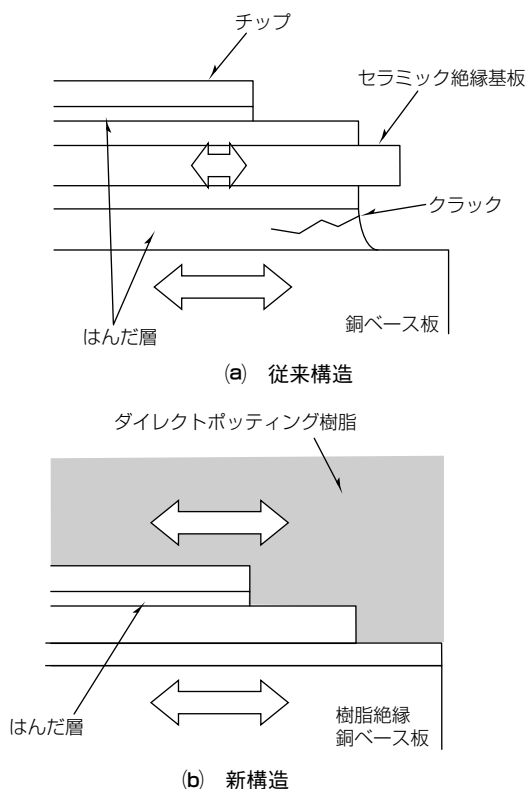


図4. 高信頼性化手法を示す断面模式図

だ接合層にわずかなクラック発生が認められるのに対して、新構造では、はんだ層そのものが存在しないため異常は見られない。また、同じサイクル回数でチップ下のはんだ層にも熱ストレスに対する影響がほぼ見られないことも確認した。これは、図4に示すように、ダイレクトポッティング樹脂の線膨張係数を樹脂絶縁銅ベース板等の線膨張係数を考慮して適正化したことで、はんだ接合部の応力が低減したためと考えられる。

3. 簡易取付けを実現するパッケージング技術

3.1 簡易取付け化のためのコンセプト

一般的に、産業用パワーモジュールは図5に示すように接続端子をプリント基板に接続した状態で使用される。ま

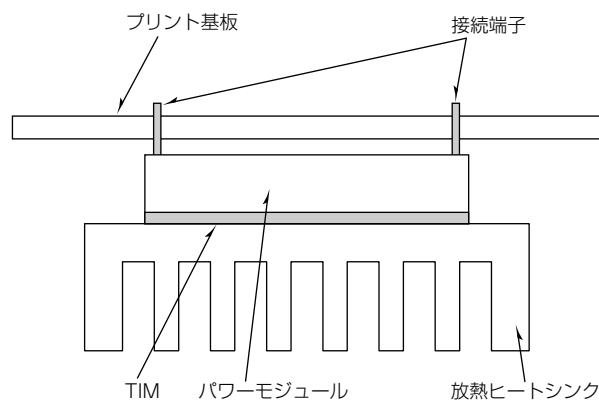


図5. モジュールの取付け構造

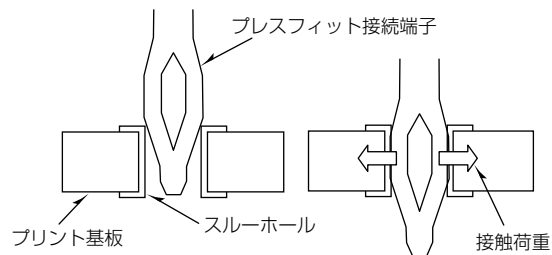


図6. プレスフィット接続技術

た、モジュールの裏面に放熱ヒートシンクを取り付けて使用され、両者の間には放熱を助けるためのTIMが供給される。従来構造では接続端子をプリント基板にはんだ付けする工程と、放熱ヒートシンクに取り付ける前にTIMとして放熱グリスを塗布する工程をユーザーが行う必要があったが、これらを簡略化するためにプレスフィット接続端子とPC-TIMを備えたパワーモジュールを選択可能とした。

3.2 プレスフィット接続端子

プレスフィット接続は、プリント基板のスルーホールにスルーホール直径よりもわずかに幅の広いプレスフィット接続端子を圧入することで接触荷重を生じさせて電氣的接続を行う技術である(図6)。従来、コネクタのプリント基板への接続などに適用されてきた技術をパワーモジュールの接続端子に応用した。このプレスフィット接続端子を備えたモジュールを用いれば、プリント基板にセットしてプレスするだけで全端子の接続が一括して完了する。これによって、従来のはんだ付けに比べて、モジュールをプリント基板へ組み付ける工程を簡素化できる。

3.3 PC-TIM

PC-TIMは従来の熱伝導性グリスとは異なり、約45℃以下では固体状態で、約45℃を超すと液状化する特性を持つ。この特性によって、PC-TIMはモジュールに印刷された状態で保管・輸送が可能であり、パワーモジュールの製造工程で供給できる。その結果、これまでユーザーが熱伝導性グリスを塗布していた作業は不要と

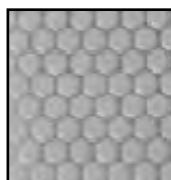


図7. PC-TIMの印刷状態



図8. PC-TIMの濡れ広がり状態

なり、工程の簡素化が実現できる。

PC-TIMを塗布したパワーモジュールは、放熱ヒートシンクに押し付けても熱伝導性グリースのように薄く伸びることはなく、温度が約45℃を超えると軟化しはじめて締め付け圧力の影響を受けて横方向に広がる。この時、締め付け対象物の形状の影響を受けづらく、パワーモジュールと放熱ヒートシンクの間で隙間の広い所には厚く、隙間の狭い所には薄く広がってパワーモジュールと放熱ヒートシンクの間の空気を押し出す。図7にPC-TIMを印刷し

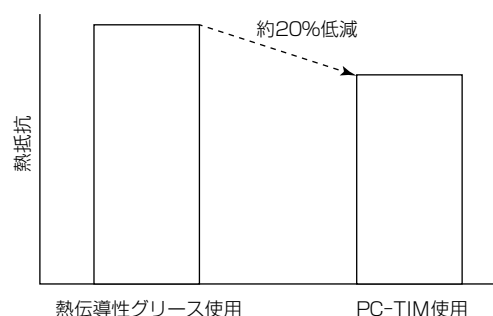


図9. 熱抵抗のシミュレーション値の比較

たモジュールの外観写真を示す。六角形を組み合わせたパターンを持っており、濡(ぬ)れ広がり考慮した形状を採用している。図8はヒートシンクの代わりに透明な板を用いて濡れ広がり状態を確認した結果を示している。ベース面全面に隙間なく濡れ広がっていることが確認できる。図9にTIM材による熱抵抗($R_{th(j-f)}$)の比較の一例を示す。一般の熱伝導性グリースと比較して高放熱のPC-TIMを適用することで約20%の熱抵抗低減が可能となる。

4. む す び

産業用第7世代IGBTモジュールTシリーズNXタイプは、従来構造からパッケージ構成部材を見直して樹脂絶縁銅ベース板とダイレクトポッティング封止を組み合わせることで高信頼性を実現した。さらに、プレスフィット接続技術とPC-TIMを選択可能にすることで、モジュールのシステムへの取付けも簡易化しており、ユーザーのニーズに応える製品として省エネルギー化社会に貢献できる。

参 考 文 献

- (1) 篠原利彰, ほか: トランスファーモールド形大容量パワーモジュール, 三菱電機技報, 81, No.5, 325~328 (2007)

産業用第7世代IGBTモジュール“Tシリーズ”

宮澤雅臣*
大原孝太*

7th Generation IGBT Module "T Series" for Industrial Applications

Masaomi Miyazawa, Kota Ohara

要 旨

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールは産業機器分野でモータ制御などに広く使用されている。また、医療機器や溶接機、停電対策用バックアップ電源であるUPS(Uninterruptible Power Supply)で使用されるなど応用機器の分野は拡大している。さらに近年では、太陽光や風力を始めとする再生可能エネルギーを利用した発電の電力変換用としてIGBTモジュールの需要が増加しており、今後ますます役割は大きくなると予想される。

今回、新たに開発した第7世代IGBTとダイオードを搭載し、新規構造のパッケージを適用した産業用第7世代IGBTモジュール“Tシリーズ”を開発した。幅広い産業用途のニーズに応えるため、NXタイプパッケージとstdタイプパッケージとで48品種(2016年5月現在)と幅広いラ

インアップをそろえた。NXタイプパッケージでは、絶縁部と銅ベース部が一体化された樹脂絶縁銅ベース板とダイレクトポッティング樹脂充填を組み合わせたSLC(SoLid Cover)技術を適用した。一方、stdタイプパッケージでは、US(Ultra Sonic)接合と厚銅セラミック基板を使用するTMS(Thick Metal Substrate)技術を適用した。これらの新規パッケージ技術と三菱電機独自のCSTBT(Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor:電荷蓄積型トレンチゲートバイポーラトランジスタ)構造を採用した第7世代IGBT及びダイオードチップを組み合わせることで、応用製品の低損失化、パッケージ内部インダクタンスの低減、信頼性の向上を可能とした。



NXパッケージ(62×152(mm))



stdパッケージ(62×108(mm))

第7世代IGBTモジュール“Tシリーズ”(2in1タイプ)

第7世代IGBTモジュールでは、絶縁部と銅ベース部が一体化した新規構造パッケージ技術の導入と第7世代チップの適用によって、低損失かつ高信頼性の製品を開発した。48品種(2016年5月現在)をラインアップすることで、幅広い用途の産業機器に対応する。

1. ま え が き

当社産業用IGBTモジュールは、低損失性、高信頼性を特長として、これまでインバータ、サーボアンプ、風力・太陽光発電、UPSなどの産業用市場の幅広い応用機器製品で採用されてきた。近年、エネルギー利用の効率化や機器の長寿命化のため、更なる低消費電力と高信頼性の要求が高まっている。これらに 대응するため、今回、第7世代IGBTとダイオードを搭載し、新構造のパッケージを適用した新製品として、第7世代IGBTモジュール“Tシリーズ”を開発した。

本稿では、第7世代NXタイプパッケージ、stdタイプパッケージの特長と製品特性について述べる。

2. Tシリーズの特長

2.1 低 損 失 性

図1に、インバータ動作時の発生損失を第6世代と第7世代IGBTモジュールとで計算した結果を示す。Tシリーズは、第7世代のIGBTとダイオードチップの適用によって、第6世代IGBTモジュールと比較して約10%の損失低減を実現した。

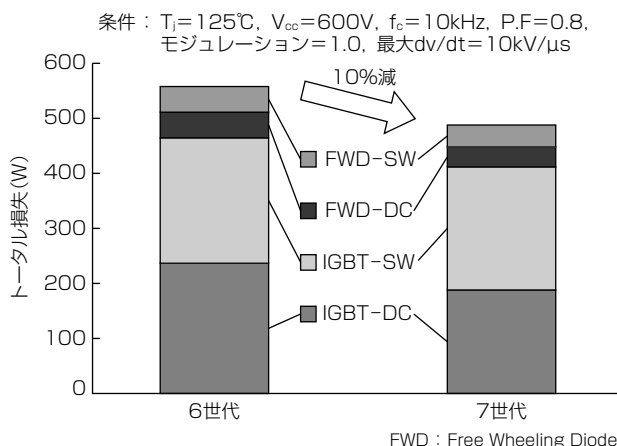


図1. 1,200V/450A素子におけるトータル損失の比較

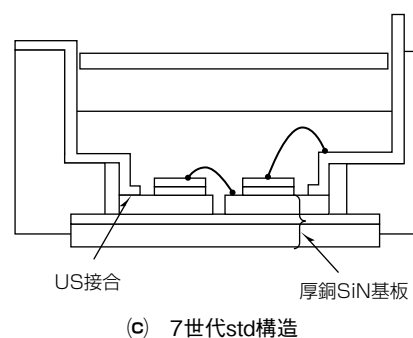
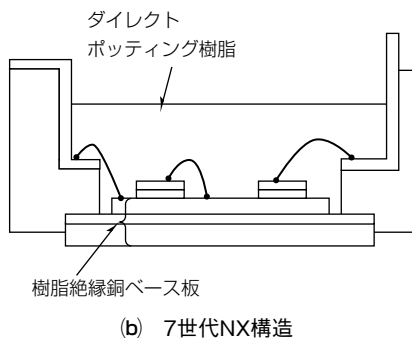
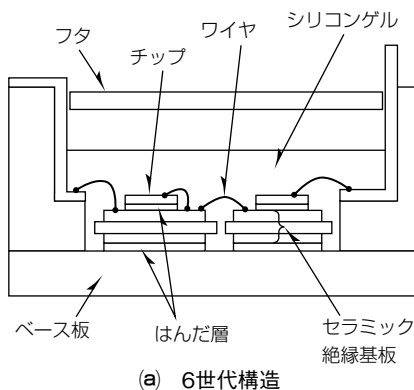


図2. 構造の比較

2.2 高 信 頼 性

システムの起動、停止によってIGBTモジュールのケース温度 T_c は大きく変化する。モジュールは複数の素材から構成されているので、線膨張係数の差によってそれぞれの境界には強い応力がかかり疲労を起こす。これを模擬した試験がサーマルサイクル試験であり、通電、停止を繰り返すことで T_c を変化させて製品の寿命を評価する。6世代構造⁽¹⁾、7世代NX構造⁽²⁾及び7世代std構造⁽³⁾を図2に示す。6世代構造では特に応力が高くなる絶縁基板下のはんだ層にクラックが発生することが耐量を決める要因であったが、これは銅やセラミックに比べはんだがもろいためであった。一方、7世代構造では絶縁部と銅ベース部を一体化した構造を採用することで基板下のはんだ層を排除し、サーマルサイクル性の向上を可能とした。図3に、6世代構造及び7世代NX構造の初期及び同一サイクル後のSAT (Scanning Acoustic Tomograph) 画像を示す。

6世代構造では、セラミック絶縁基板下のはんだ層にクラック発生が観察されるのに対し、7世代構造では、はんだ層はなく、樹脂絶縁銅ベース板の樹脂層にも異常は見られない。

2.3 製品ラインアップ

表1にTシリーズの製品ラインアップを示す。今回、第7世代IGBTモジュールとしてNXパッケージ(はんだ付け端子/プレスフィット接続端子)、stdパッケージ、650V

	6世代構造	7世代NX構造
初期		
サイクル後		
	はんだクラック	異常なし

図3. サーマルサイクル後のSAT画像比較

及び1,200V耐圧の48品種と幅広いラインアップを開発した。プレスフィット接続端子は、プリント基板にセットしてプレスするのみで接続が完了するため、ユーザーでの工程が従来のはんだ付け端子に比べて簡素化できる。NXタイプパッケージではプレスフィット接続端子を新たにラインアップに追加し、従来のはんだ付け端子とプレスフィット接続端子を選択することが可能となった。stdタイプパッケージでは、外形寸法W62×D108(mm)のパッケージでこれまで製品化されていなかった1,200V／600A品を新たにラインアップに追加した。また、表1の48品種全てに対してPC-TIM(Phase Change Thermal Interface Material)塗布のオプションを準備しており、これを選択することで、ユーザーでの放熱グリスを塗布していた作業が不要となり、工程の簡素化が実現できる。

表1. 製品ラインアップ

パッケージ タイプ	形名	定格 電圧	定格 電流	回路 構成	外形 W×D(mm)
NXタイプ はんだピン パッケージ + プレス フィット パッケージ	CM300DX-13T CM300DXP-13T	650V	300A	2in1	62×152
	CM450DX-13T CM450DXP-13T		450A		
	CM600DX-13T CM600DXP-13T		600A		
	CM100TX-13T CM100TXP-13T		100A	6in1	62×122
	CM150TX-13T CM150TXP-13T		150A		
	CM200TX-13T CM200TXP-13T		200A		
	CM150RX-13T CM150RXP-13T		150A	7in1	62×137
	CM200RX-13T CM200RXP-13T		200A		
	CM225DX-24T CM225DXP-24T	1,200V	225A	2in1	62×152
	CM300DX-24T CM300DXP-24T		300A		
	CM450DX-24T CM450DXP-24T		450A		
	CM600DX-24T CM600DXP-24T		600A	2in1	110×137
	CM1000DX-24T CM1000DXP-24T		1,000A		
	CM100TX-24T CM100TXP-24T		100A	6in1	62×122
	CM150TX-24T CM150TXP-24T		150A		
	CM200TX-24T CM200TXP-24T		200A		
	CM100RX-24T CM100RXP-24T		100A	7in1	62×137
	CM150RX-24T CM150RXP-24T		150A		
	CM100DY-13T	650V	100A	2in1	34×94
	CM150DY-13T		150A		
	CM200DY-13T		200A		
	CM300DY-13T		300A	2in1	48×94
	CM400DY-13T		400A		
	CM600DY-13T		600A		
	CM100DY-24T	1,200V	100A	2in1	34×94
	CM150DY-24T		150A		
	CM200DY-24T		200A		
	CM300DY-24T		300A	2in1	48×94
	CM450DY-24T		450A		
	CM600DY-24T		600A		

3. パッケージ

3.1 NXパッケージ

7世代NXパッケージでは、当社の従来構造である6世代パッケージから大きく構造を変更した。6世代構造は、チップ下の材料としてセラミック絶縁基板、銅ベース板、チップ下及び基板下のはんだで構成されていた。図2(b)に示すように7世代NX構造では、絶縁部と銅ベース部が一体化された樹脂絶縁銅ベース板を新規採用した。樹脂絶縁銅ベース板は、銅ベース部及び厚銅パターン層、放熱性と絶縁性確保のために最適化された絶縁シートで構成されている。また、銅ベース部及びパターンの厚みを最適化したことによって、6世代比で15%の質量低減を実現した。図2(a), (b)に示すように複数枚の絶縁基板を搭載していた6世代構造と比較して、7世代NX構造では単一の樹脂絶縁銅ベース板を搭載している。これによって、基板間を電気接続するためのワイヤが不要となり、内部インダクタンスを6世代比(1,200V／300A品)で30%低減した。

6世代構造では、基板上のチップとワイヤボンドを覆うための封止材としてシリコーンゲルが採用されてきたが、7世代NX構造では、ボンディングワイヤへの機械的なストレスを低減するために最適化されたダイレクトポッティング樹脂で封止する技術を開発した。熱サイクルによるストレスを6世代構造から低減させることで、パワーサイクル性の向上を可能とした。

3.2 stdパッケージ

7世代stdパッケージでは、絶縁基板と銅ベース板を一体化した構造として樹脂絶縁銅ベース板ではなく厚銅SiN(窒化ケイ素)基板を採用したので、その特長を次に述べる。厚銅SiN基板は、従来のAlN(窒化アルミニウム)基板とはセラミック基板という点で同じだが、銅パターンの厚み、絶縁層の材質及び厚みが異なる。チップ側の銅パターン厚みを従来の約3倍としたことで、熱伝導に不利な絶縁層を通過する前での熱拡散量を大きくし、また、より細い回路パターン幅で大電流を流すことを可能にした。絶縁層の材質をAlNからSi₃N₄へ変更することで基板の機械的強度を上げ、基板サイズの拡大と絶縁層の薄厚化を可能にし、また、US接合に対する高い信頼性を確保した。銅パターンを厚くしたことで基板サイズの拡張は、従来の基板間ワイヤを排除し、チップ搭載可能エリアの拡大とより理想的な大電流回路パターンの配置を可能にした。これらの利点によって7世代stdシリーズでは、従来パッケージサイズと互換ながら、より小型のパッケージへの大容量チップの搭載を実現した。

4. チ ッ プ

4.1 第7世代IGBT

第7世代IGBTの断面構造を図4に示す。7世代では、

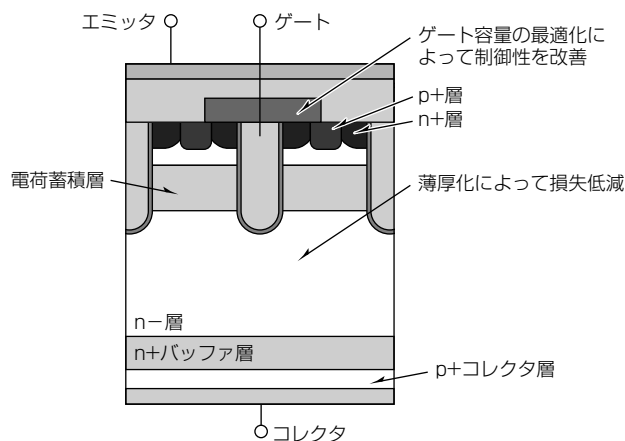


図4. 第7世代IGBTの断面構造図

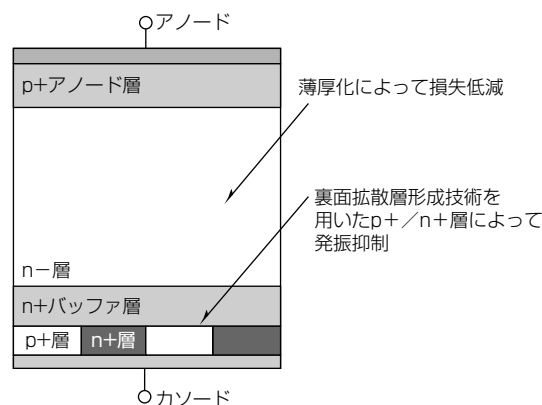


図7. 第7世代ダイオードの断面構造図

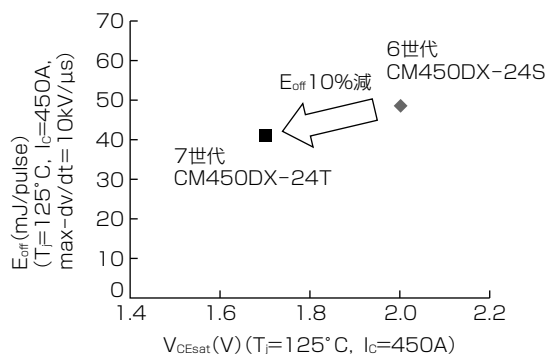


図5. V_{CEsat} - E_{off} 比較

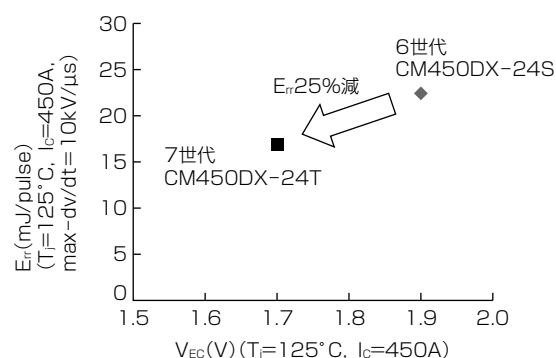


図8. V_{EC} - E_{rr} 比較

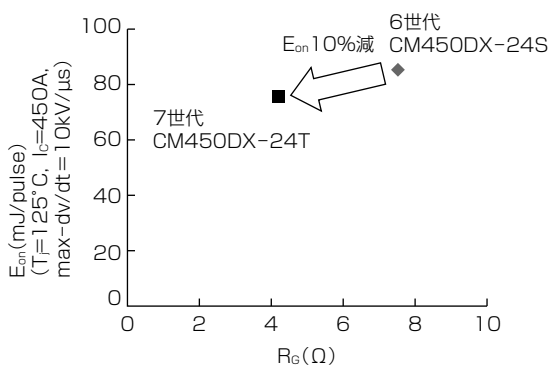


図6. R_G - E_{on} 比較

6世代より約10%ウェーハを薄厚化し、コレクタ-エミッタ間飽和電圧 V_{CEsat} とターンオフ損失 E_{off} のトレードオフ性能を改善した(図5)。MOS部のゲート容量調整、表面のn+層とp+層の面積比率調整を行うことで薄チップでの破壊耐量を確保し、ゲート抵抗 R_G によるリカバリー dv/dt の制御性を改善した。すなわち、従来より小さい R_G でリカバリー dv/dt を下げることができ、これによって同一リカバリー dv/dt 時のターンオン損失 E_{on} を10%低減した(図6)。

4.2 第7世代ダイオード

第7世代ダイオードの断面構造図を図7に示す。7世代では、6世代より約20%ウェーハを薄厚化し、裏面拡散層形成技術を用いてカソードにp+/n+構造を形成したRFC(Relaxed Field of Cathode)ダイオードを採用した。この効果によって、ウェーハの薄厚化で一般に問題となる発振

を抑制しつつウェーハを薄くすることが可能となり、従来型ダイオードと比べて順電圧降下 V_{EC} とリカバリー損失 E_{rr} のトレードオフを改善した(図8)。

5. む す び

第7世代IGBTモジュールでは、絶縁部と銅ベース部が一体化した新構造パッケージ技術の導入と第7世代チップの適用によって、低損失かつ高信頼性の製品を開発した。さらに、NXパッケージ、stdパッケージでのラインアップの充実化、PC-TIMを備えたモジュールを選択可能としたことで、ユーザーの多様なニーズに応える製品となっている。今後、第7世代IGBTモジュールを市場に展開していくことで、省エネルギー化社会に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 西山建人, ほか: 6世代IGBTモジュール“NXシリーズ”, 三菱電機技報, **84**, No.4, 240~243 (2010)
- (2) Ohara, K., et al.: A New IGBT Module with insulated Metal Baseplate(IMB) and 7th Generation Chips, PCIM Europe 2015, 1145~1148 (2015)
- (3) Miyazawa, M., et al.: 7th Generation IGBT Module for Industrial Applications, PCIM Europe 2014, 34~38 (2014)

産業用第7世代IPM“G1シリーズ”

木村義孝*
荒木健宏**

7th IPM "G1 - Series" for Industrial Applications

Yoshitaka Kimura, Takehiro Araki

要 旨

地球環境保全の目的から省エネルギー化が求められる中、大電力の電力変換に欠かせないパワー半導体の需要は年々増加傾向にある。特にパワー半導体を搭載したパワーモジュールの中でも駆動回路と保護回路を同パッケージ内に持ったIPM(Intelligent Power Module)は多くのユーザーに使用されている。近年ではパワーモジュール適用分野も多岐にわたるため、ユーザーによって使用環境・実装方法に対する要求は様々である。

パワーモジュールの特性はもとより、パッケージの狭幅、小型化及びユーザーでの使いやすさに対する要求も強い。これらの要求に対応するため、三菱電機は産業用第7世代IPM“G1シリーズ”を開発した。

G1シリーズでは当社従来IPM比で約30%程度実装面

積を削減することに成功し、特に1つの筐体にパワーモジュールを複数実装する場合に、ユーザーの筐体の小型化が可能となる。G1シリーズIPMは7世代IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)チップ採用に加えて、パッケージ構造、駆動回路方式での新規要素を盛り込み、特性の改善とユーザーの使いやすさを実現している。

G1シリーズの特長は次のとおりである。

- (1) ユーザー要求に対応した狭幅・小型パッケージ開発とラインアップ拡充
- (2) 7世代IGBTチップを搭載して特性を改善
- (3) 樹脂絶縁銅ベース板構造を採用したセラミック絶縁基板下はんだレスによるサーマルサイクル寿命向上
- (4) 低ノイズIGBT駆動回路の採用による発生損失低減



主端子ねじタイプ



主端子はんだピンタイプ

G1シリーズA-pkge



G1シリーズB-pkge



G1シリーズC-pkge

第7世代IPM“G1シリーズ”

樹脂絶縁銅ベース板構造、低ノイズIGBT駆動回路を採用し、従来IPMから狭幅・小型化外形設計を実施したG1シリーズIPMを開発した。製品定格に応じた3タイプのパッケージを展開しており、“A-pkge”では、主端子仕様としてねじタイプとはんだピンタイプのどちらかを選択することが可能である。

1. ま え が き

省エネルギー化が求められる近年では、パワー半導体の需要は増加傾向にある。中でもIPMは駆動回路、保護回路を内蔵しており、ユーザーでの駆動回路設計、保護回路設計が不要となるため、使いやすいパワーモジュールとして多くのユーザーに使用されている。

最近の傾向としてユーザーでの筐体設計の効率化への要求が高まっており、パワーモジュールは組立性を考慮したモジュールが求められている。また、産業用途向けIPMはインバータシステム市場で広く使用されており、製品の小型化、軽量化やラインアップ充実化への要求が強い。

G1シリーズIPMは軽量化、ラインアップの充実化に加え、樹脂絶縁銅ベース板構造採用による高信頼性化と低ノイズIGBT駆動回路による損失低減効果を確保し、ユーザーにとって使いやすいモジュール仕様としている。

2. G1シリーズIPM

2.1 製品ラインアップ

G1シリーズIPMは第7世代パワーチップを搭載した新製品である。G1シリーズIPMのパッケージは表1に示すように製品定格に応じた3タイプのパッケージを展開しており、650V定格品は50Aから450A定格まで、1,200V定格品は25Aから200A定格までをラインアップした(図1)。また、パワーモジュールは近年小型化やラインアップ充実化が求められている。特に1つの筐体の中にパワーモジュールを複数実装することも多く、筐体の小型化を実現するためにパッケージの狭幅・小型化の要求が強い。G1シリーズIPMは現行の“L1シリーズ”IPMからパッケージを狭幅・小型化したことで同定格サイズ比で実装面積を“B-pkge”で25%、“C-pkge”で31%を削減し、インバータ機器の小型化と軽量化に貢献する。

表1. G1/L1シリーズIPMのパッケージ仕様

	パッケージ外形仕様		
	A-pkge	B-pkge	C-pkge
G1 シリーズ	ねじタイプ 22mm 90mm 50mm	22mm 120mm 55mm	24mm 120mm 85mm
	はんだタイプ 17mm 90mm 50mm	面積25%減	面積31%減
L1 シリーズ	typeS 17mm 90mm 50mm	小pkg 22mm 131mm 66.8mm	中pkg 24mm 135mm 110mm

図1にG1シリーズIPMのラインアップを示す。各パッケージ間で製品定格のラインアップをオーバーラップさせているため、用途に応じてパッケージを選択することが可能である。

2.2 A-pkgeの特長

G1シリーズA-pkgeは主端子仕様としてはんだピンタイプ、ねじタイプの2つをラインアップしている。各主端子仕様ではどちらも実装面積を同等にしており、ユーザーのパワーモジュールの実装プロセス、接続仕様に応じて選択可能とした。また、図2のようにG1シリーズIPMのA-pkgeとB-pkgeを同一筐体内に複数実装する場合、A-pkgeねじタイプは主端子高さをB-pkgeと統一しているため、図3のようにユーザー側の主配線高さを統一化することができ、ユーザーでの組立性を考慮した外形仕様となっている。

	電流容量								
	25A	35A	50A	75A	100A	150A	200A	300A	450A
650V 6in1			A B				C		
650V 7in1			A B				C		
1,200V 6in1	A B				C				
1,200V 7in1	A B				C				

図1. G1シリーズIPMのラインアップ

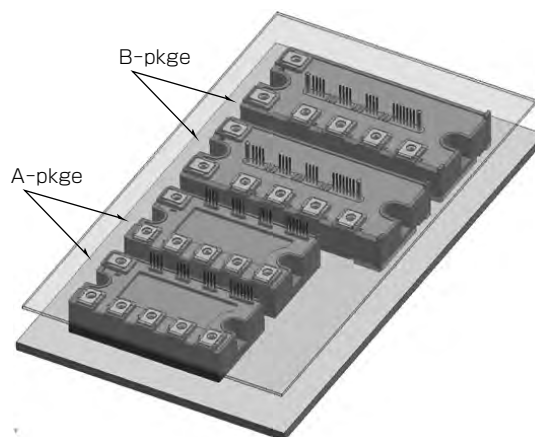


図2. IPMを複数実装した場合の配置例

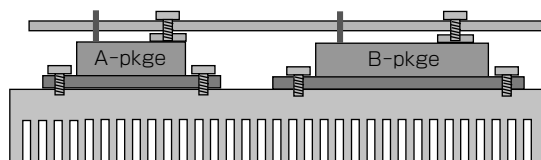


図3. A-pkge主端子ねじタイプとB-pkgeの主配線高さの統一化

3. パッケージ構造について

パワーモジュールで高放熱と絶縁を両立させるために従来はセラミック絶縁基板を使用してきたが、G1シリーズIPMでは製品寿命向上を目的として、それを樹脂絶縁銅ベース板に置き換えて絶縁基板下はんだレスの構造とし、封止材にエポキシ系樹脂を用いてダイレクトボッティング技術を採用した。図4にL1シリーズIPMとG1シリーズIPMの縦構造の断面図を示す。

パワーモジュールの寿命試験の1つとしてサーマルサイクル試験がある。モジュールはシステムの起動、停止を繰り返すことでケース温度が変化し、構成部材に熱ストレスが発生し、各構成部材間の線膨張係数の違いによって接合材であるはんだ層の劣化(クラック)が進行する。従来のIPM構造では銅ベース板とセラミック絶縁基板の接合にはんだ材を使用しており、絶縁基板下はんだ層のクラックが進行することによってサーマルサイクル耐量劣化につながる⁽¹⁾。

G1シリーズIPMでは絶縁基板下はんだレス構造と封止材の線膨張係数を最適化することで構成部材にかかる熱ストレスを緩和し、はんだ層劣化に起因するサーマルサイクル耐量が向上し、モジュールの高信頼性を達成した。

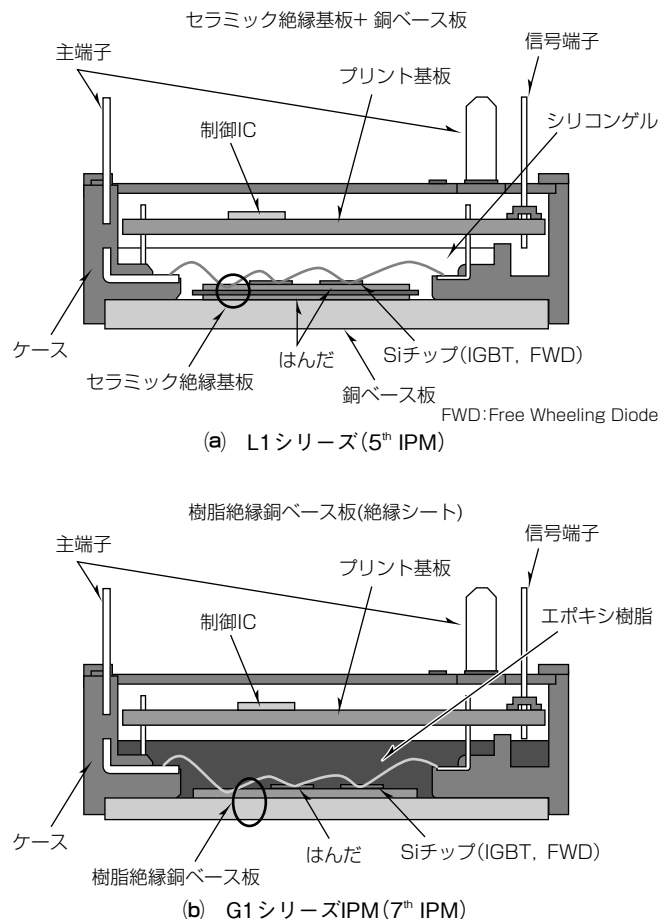


図4. L1シリーズIPMとG1シリーズIPMの構造比較

4. 搭載機能

4.1 低ノイズIGBT駆動回路

G1シリーズIPMではEMI(Electro Magnetic Interference)ノイズ低減のために“Lシリーズ”IPMに搭載していた低ノイズIGBT駆動回路を搭載している。低ノイズIGBT駆動回路の原理を図5に示す。

従来の駆動方式では低電流域で dv/dt が急峻(きゅうしゅん)になるため、EMIノイズが発生しやすくなる。このためEMIノイズを低減するために低電流域の dv/dt を低減した場合、全電流領域で発生損失が増加するというデメリットがあった。G1シリーズでは低ノイズIGBT駆動回路を採用することで低電流域で dv/dt を遅く設定してEMIノイズの発生を低減し、大電流域(定格電流)ではスイッチングスピードを速く設定して発生損失を低減する特性とした。G1シリーズIPMではIGBTチップ内に形成された素子を使用することでIGBTに流れる電流をリアルタイムに制御ICで検出し、あるしきい値以上で駆動能力が自動的に切り替わる仕様としている。チップ上の素子を利用して電流検出を行っているため、外部に検出用回路を構成することなく駆動方式の切替えを可能にしている。

この機能によって発生損失を低減しながらEMIノイズを抑えることが可能となる。またスイッチングスピードを切り替えるポイントはユーザー側で特性を最大限引き

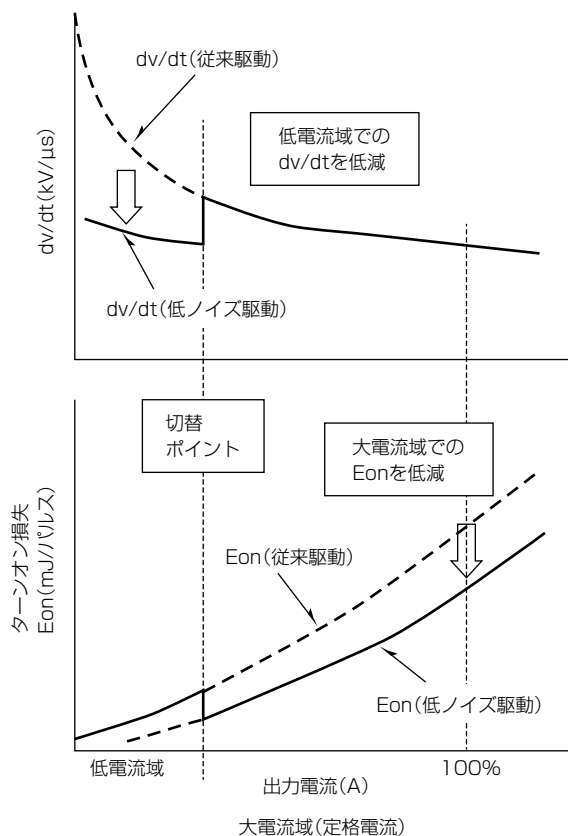


図5. 低ノイズIGBT駆動回路の原理

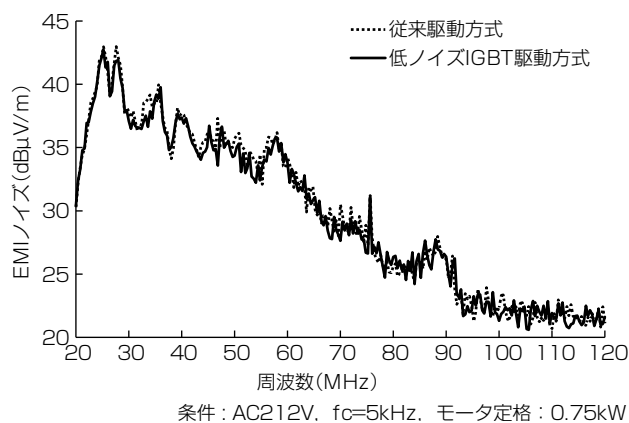
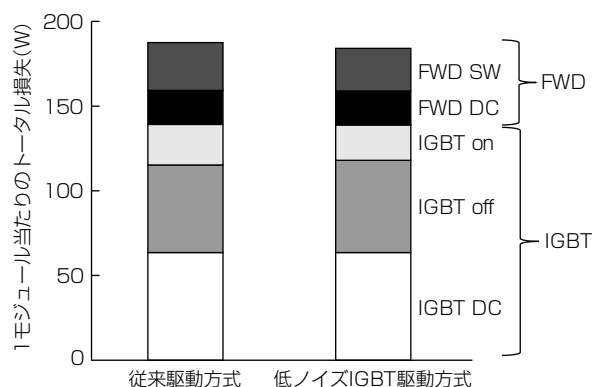
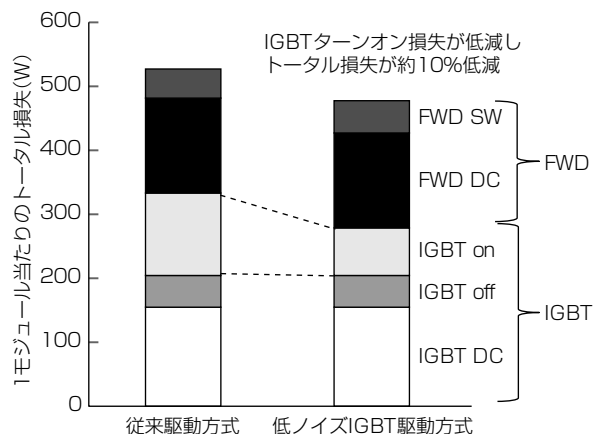


図6. EMIノイズの比較



【低電流域】定常運転モード条件($T_j=125^{\circ}\text{C}$)
電源電圧 $V_{cc}=300\text{V}$, $f_c=10\text{kHz}$, $I_g=30\text{Arms}$, 力率: 0.8,
変調率: 0.8

図7. 低電流域の発生損失シミュレーション比較



【大電流域(定格電流)】ロックモード条件($T_j=125^{\circ}\text{C}$)
電源電圧 $V_{cc}=300\text{V}$, $f_c=10\text{kHz}$, $I_g=100\text{A}$, Duty: 0.5

図8. 大電流域の発生損失シミュレーション比較

出すように設計を最適化している。

パワーモジュール主配線回路のチップは固定として、従来駆動方式とG1シリーズIPMに採用した低ノイズIGBT駆動回路方式の制御基板をそれぞれ搭載したサンプルでEMIノイズ試験を実施した結果を図6に示す。全ての周波数領域でEMIノイズはほぼ同等の値を示している。こ

のサンプルの低電流運転時(定常運転モード)と大電流運転時(ロック運転モード)での発生損失シミュレーション結果をそれぞれ図7, 図8に示す。低電流域では1モジュール当たりの発生損失がほぼ同等であるが、大電流域ではこの低ノイズIGBT駆動方式の方が発生損失が低減している。損失低減の大きな要因は、図5で示したとおりスイッチングスピードの切替えによって大電流領域でのIGBTチップのターンオン損失が低減し、トータル損失が約10%改善していることである。この機能を搭載することでEMIノイズを従来駆動方式と合わせた場合、スイッチング切替えポイント以上の電流領域では損失を低減することができ、特にモーターロックモードなど過酷な条件での発生損失低減につながる。

4.2 エラー識別機能

IPMでは異常動作時(素子温度増加, 大電流発生等)にIGBTをオフするための保護回路を持っている。G1シリーズIPMでは従来の保護機能(過熱保護(OT), 制御電源電圧低下保護(UV), 短絡保護(SC))のエラー出力機能に対してエラー識別機能を追加した。各種保護機能に対してエラー出力時間(F_o)を設定しており, 規定の F_o 時間でパルス出力される。ユーザーで F_o 時間を検知することでエラーの内容を把握することが可能となる。

5. む す び

G1シリーズIPMの新規要素を中心に製品特性に関して述べた。このIPMはL1シリーズIPMからパッケージを狭幅・小型化したことで基板実装面積をB-pkgeで25%, C-pkgeで31%を削減し, インバータ機器の小型化と軽量化に貢献する。G1シリーズA-pkgeは主端子仕様としてはんだピンタイプ, ねじタイプをラインアップしており, ユーザー要求仕様に応じて選択可能である。また, A-pkge, B-pkgeは主端子高さを統一しているためユーザー側の主配線高さをそろえることができ, ユーザーでの組立性を考慮した外形仕様となっている。また, 機能としては低ノイズIGBT駆動回路を搭載することによって過負荷領域での損失低減を実現した。

G1シリーズIPMは主端子の選択性を含む外形の最適化, ラインアップの充実化によって, ユーザーが使いやすいモジュールとしており, 特性面でも従来IPMから向上しているため, 幅広い市場での要求に対応することが可能と考える。

参 考 文 献

- (1) Ohara, K., et al.: A New IGBT Module with Insulated Metal Baseplate(IMB) and 7th Generation Chips, PCIM Europe 2015, 1145~1148 (2015)

コンバータ・インバータ・ブレーキ内蔵の オールインワンタイプ“DIIPM+シリーズ”

山口公輔*
田中智典*
中川信也*

All-in-one Type "DIIPM+ Series" with Built-in Converter, Inverter and Brake

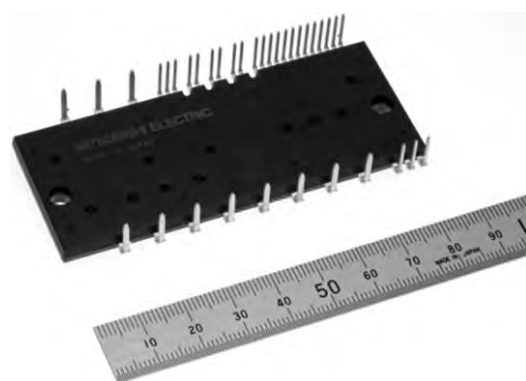
Kosuke Yamaguchi, Tomofumi Tanaka, Shinya Nakagawa

要 旨

近年、世界的な地球環境保護の意識が高まる中、省エネルギー化・高機能化を目的としたモータ駆動システムのインバータ化が民生機器から産業機器まで幅広く進展している。三菱電機のDIIPM(Dual In-line Package Intelligent Power Module)はパワーチップと駆動ICチップを内蔵したトランスファーマールド構造のIPMであり、省エネルギー化・高機能化を実現できるキーデバイスとして、インバータ駆動用に多く採用されている。業務用エアコンなどのコンプレッサ、汎用インバータなどの小容量産業用モータ駆動用としては、2008年から第5世代IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を搭載した“大型DIIPM Ver.4シリーズ”，2015年からは第6世代IGBT

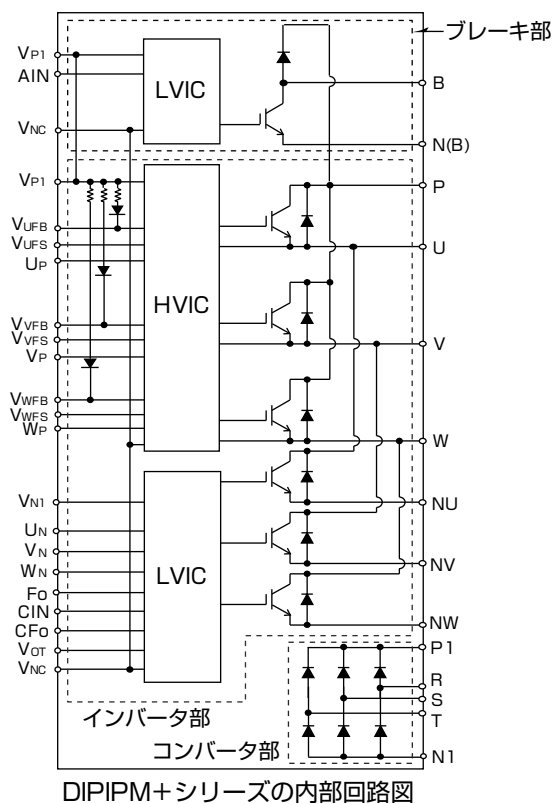
を搭載した大型“DIIPM Ver.6シリーズ”を製品化し、インバータシステムの小型化に貢献してきた。

今回、インバータシステムの更なる小型化・設計負荷低減をコンセプトとし、インバータ回路と駆動ICを内蔵した従来のDIIPMに、新たに三相コンバータ及びブレーキ回路を1パッケージに集約した製品“DIIPM+シリーズ”を開発した。モータ駆動用のインバータシステムとして必要なパワー部主回路を全て内蔵したオールインワン構成としたことで、インバータシステムの小型化、外付け部品削減による直材費低減、また端子配列の最適化による基板設計の大幅な簡素化を可能にした。



DIIPM+シリーズの外観(34×85×5.7(mm))

LVIC : Low Voltage Integrated Circuit
HVIC : High Voltage Integrated Circuit



DIIPM+シリーズの内部回路図

“DIIPM+シリーズ”の外観及び内部回路図

DIIPM+シリーズはIGBT×6素子、FWD(Free Wheeling Diode)×6素子によるインバータ回路と、それらを駆動するHVIC、LVIC及びBSD(Boot Strap Diode)×3素子とブレーキ回路、三相コンバータ回路によって構成している。

1. ま え が き⁽¹⁾

当社は業界に先駆け、パワーチップと駆動用ICを同一パッケージに内蔵したトランスファーモールド構造のDIIPMを1997年から製品化し、エアコン、冷蔵庫、洗濯機等の白物家電用途からパッケージエアコンや小容量モータ駆動用としての産業機器用途に幅広く採用されている。

今回、インバータシステムの更なる小型化・設計負荷低減をコンセプトとし、インバータ回路と駆動ICを内蔵した従来のDIIPMに、新たに三相コンバータ及びブレーキ回路を内蔵したオールインワンタイプのDIIPM+シリーズを開発した。

本稿では、DIIPM+シリーズの機能、特長、性能等について述べる。

2. DIIPM+シリーズの機能

DIIPM+の主回路は三相AC出力インバータ、ブレーキ、三相コンバータで構成される。表1にDIIPM+シリーズのラインアップを、図1に内部回路図、図2にDIIPM+を用いたシステムイメージ図をそれぞれ示す。

2.1 インバータ

2.1.1 パワー部

IGBT(6素子)及びダイオード(6素子)によって、三相AC出力インバータ回路を構成している。

2.1.2 制御部

HVIC(1素子)は、P側IGBT用駆動回路、高圧レベルシフト回路、制御電源電圧低下(UV)保護回路(エラー出力なし)を内蔵している。また、P側三相分を1チップ化して端子数を削減、端子配列の最適化で制御パターンの引き回しを容易にした。

LVIC(1素子)は、N側IGBT用駆動回路、制御電源電圧低下(UV)保護回路、短絡(SC)保護回路を内蔵している。短絡電流保護は、外部接続シャント抵抗で過電流を検出し、LVICにフィードバックしてIGBTを遮断する。制御電源電圧低下保護回路と、短絡電流保護回路の動作時はエラー信号を出力する。また、IPMの温度情報として、モジュール内部温度をアナログ信号で出力する機能を搭

載している。

BSD(3素子)は、ブートストラップ回路のダイオード(電流制限抵抗付き)を内蔵している。ブートストラップ回路を使用することで、単電源駆動が可能となる。

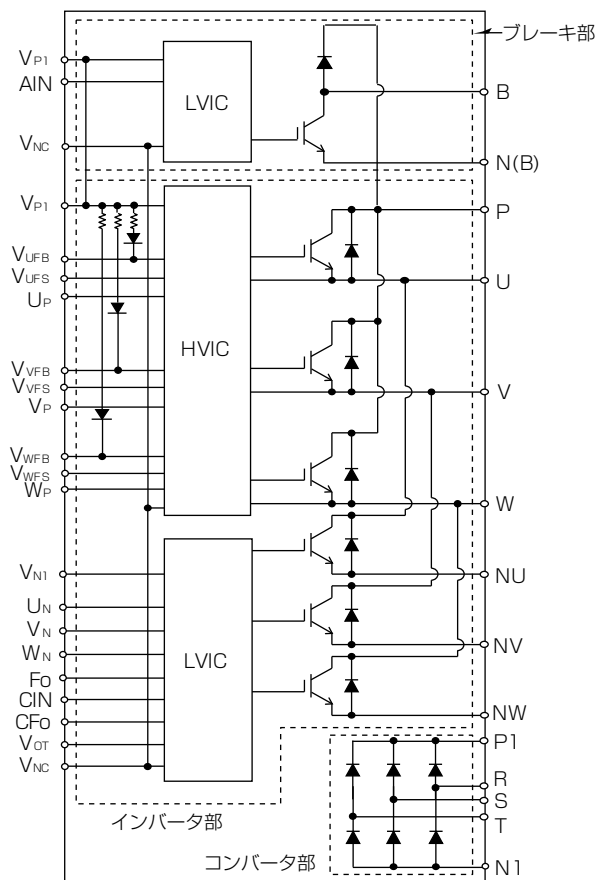


図1. 内部回路図

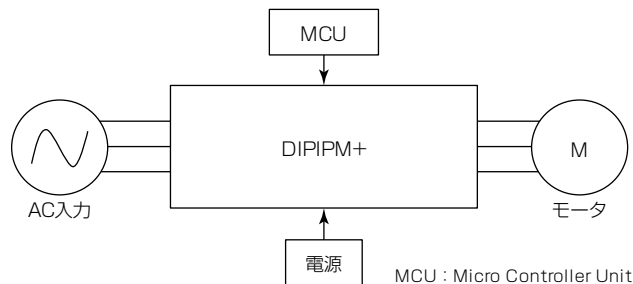


図2. システムイメージ図

表1. DIIPM+シリーズのラインアップ

形名	PSS05 MC1FT/ NC1FT ^(注1)	PSS10 MC1FT/ NC1FT ^(注1)	PSS15 MC1FT/ NC1FT ^(注1)	PSS25 MC1FT/ NC1FT ^(注1)	PSS35 MC1FT/ NC1FT ^(注1)	PSS50 MC1F6/ NC1F6 ^(注1)
定格	5A/1,200V	10A/1,200V	15A/1,200V	25A/1,200V	35A/1,200V	50A/600V
用途	業務用エアコン・大型エアコンなどのコンプレッサ及びファンモータのインバータ制御用サーボ及び汎用インバータなどの小容量産業用モータ駆動					
主回路構成	三相AC出力インバータ回路、三相コンバータ回路、ブレーキ回路					
内蔵機能	インバータ部					
	-P側IGBT用：駆動回路、高圧レベルシフト回路、制御電源電圧低下保護回路(エラー出力なし)、単電源駆動用ブートストラップ方式					
	-N側IGBT用：駆動回路、制御電源電圧低下保護回路、短絡電流保護回路(外部接続シャント抵抗による)					
	-Fo出力：N側IGBT用短絡保護回路動作時と制御電源電圧低下保護回路動作時にエラー(Fo)出力					
ブレーキ部	-LVIC温度アナログ出力(VOT)					
	-IGBT用：駆動回路、制御電源電圧低下保護回路(エラー出力なし)					

(注1) ブレーキ回路非搭載

2.2 ブレーキ

ブレーキは、IGBT(1素子)、ダイオード(1素子)とIGBT駆動用LVIC(1素子)を搭載している。LVICは制御電源電圧低下(UV)保護回路(エラー出力なし)を内蔵している。

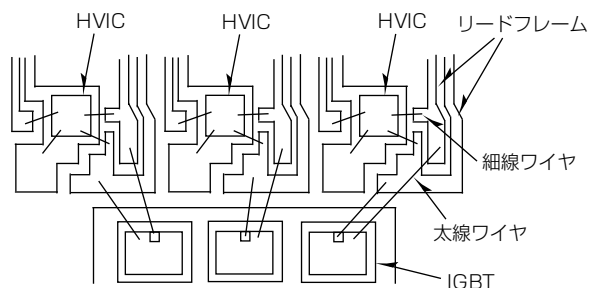
2.3 コンバータ

コンバータは、ダイオード(6素子)によって三相コンバータ回路を構成している。

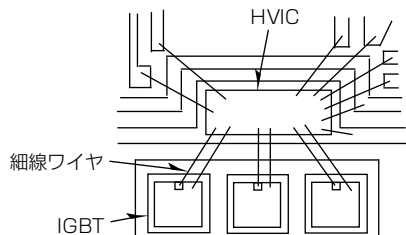
3. DIPIPM+シリーズの特長

3.1 オールインワン構成

DIPIPM+シリーズで、パワー部は新しく開発したCSTBT(電荷蓄積型トレンチIGBT)での性能改善によって搭載エリアを縮小した。さらに、従来の大型DIPIPM Ver.4シリーズ⁽²⁾では駆動ICとIGBTはリードフレームを介して、それぞれ細線ワイヤ、太線ワイヤで接続していたが、このシリーズではP側IGBT駆動用の駆動IC(HVIC)三相分を1チップ化し、内部パターンレイアウトや成型時の樹脂流動を最適化することによって、大型パッケージでは実現できなかった駆動ICとIGBT間を細線ワイヤでダイレクトに接続することを可能とし、制御部の小型化を実現した(図3)。

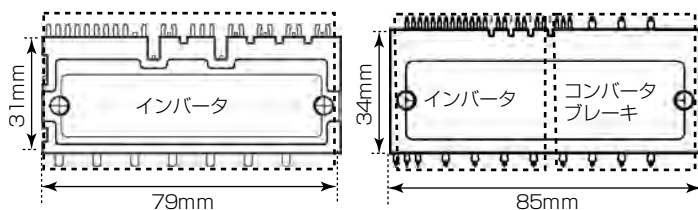


(a) 大型DIPIPM Ver.4

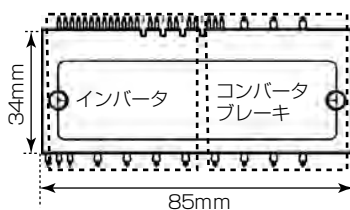


(b) DIPIPM+

図3. 内部図



(a) 大型DIPIPM Ver.4



(b) DIPIPM+

図4. 外形図

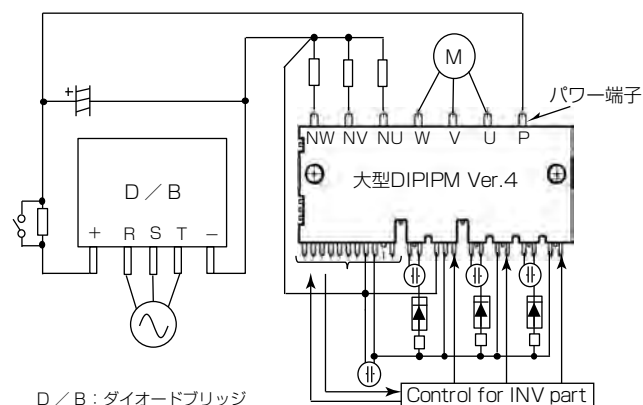
これらの技術改善によって、従来の大型DIPIPMと比較して、インバータ部の面積を約25%低減し、最適レイアウトしたコンバータ、ブレーキ部を含めたオールインワン構成を実現した(図4)。

3.2 設計の容易性

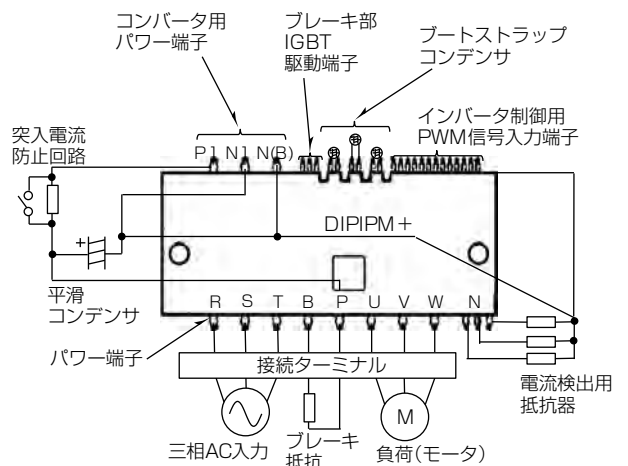
図5に大型DIPIPM Ver.4とDIPIPM+の基板レイアウト例を示す。このシリーズでは端子配列の最適化及びBSD内蔵によって、配線の引き回しを容易にし、基板面積縮小を可能とした。

三相AC入力、モータ出力などの入出力パワー端子と制御用低圧部端子が分離している。これによって基板の各配線パターンが相互干渉しないシンプルな配線設計ができる。また、BSDを内蔵しているため、ブートストラップコンデンサを接続するだけで単電源駆動ができ、部品数削減及び配線簡素化による基板面積縮小が可能となる。

図5(b)のパワー端子の三相入力端子(R, S, T), ブレーキ抵抗接続端子(B, P), 出力端子(U, V, W)を1列に並べることで配線の交差がなく、インバータ機器の接続ターミナルに直結することができ、配線簡素化による基板面積縮小や配線で発生するサージ電圧の低減、発生ノイズ



(a) 大型DIPIPM Ver.4使用時の配線イメージ



(b) DIPIPM+使用時の配線イメージ

図5. 基板レイアウト例

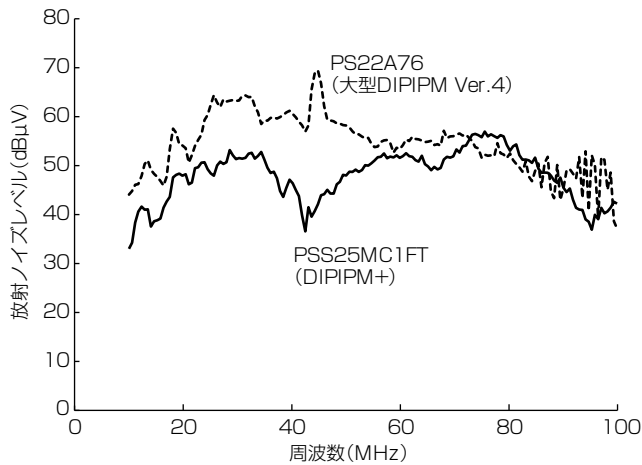


図6. 各周波数帯域における放射ノイズ(当社評価例)

の低減につながる。

各配線の簡素化、短縮化による配線インダクタンスや容量の低減と合わせて、このシリーズでは従来製品からIGBTのスイッチング速度を低速に調整しており、ノイズフィルタ回路の削減も期待できる。図6に各周波数帯域における放射ノイズを示す。なお、このシリーズでは従来の最大動作ケース温度を100℃から110℃へ拡大することで、放熱設計の自由度も向上させている。

これによって、部品取り込みの直材費低減、基板小型化による効果だけでなく、ユーザーの設計・評価期間を大幅に短縮することが可能となる。

4. DIPIPM+シリーズの性能、特性

表2にDIPIPM+シリーズの代表品種PSS25MC1FT(25A/1,200V)の主要電気的特性を示す。

このシリーズでは、薄ウェーハ化及び微細セル構造によって性能を改善した新開発のIGBTを採用することで、従来の大型DIPIPM Ver.4シリーズと比較して定格電流時における飽和電圧 V_{CEsat} を約18%低減した。図7に代表例として、PSS25MC1FT(25A/1,200V)と同じ定格電流である大型DIPIPM Ver.4 PS22A76(25A/1,200V)のコレクタ電流 I_c -飽和電圧 V_{CEsat} 特性($T_j=125^\circ\text{C}$)を示す。飽和電圧の低減によってDIPIPM+は、従来の大型DIPIPM Ver.4に対して、出力電流 $I_o=25\text{A}$ ピーク時におけるIGBT 1素子当たりの損失を約10%改善した(注2)。

(注2) 条件: $T_j=125^\circ\text{C}$, $V_{cc}=600\text{V}$, $P.F=0.8$, $f_c=5\text{kHz}$, 三相正弦波出力

5. む す び

今回開発し、製品化したDIPIPM+シリーズの機能、特長、性能等について述べた。今後も幅広い市場ニーズに応えられる製品開発を続け、インバータシステムの進化に貢献していく。

表2. PSS25MC1FT(25A/1,200V)の主要電気的特性

(a) インバータ部

項目	条件	最小値	標準値	最大値	単位
V_{CEsat}	$V_D=V_{DB}=15\text{V}$, $V_{IN}=5\text{V}$, $I_c=25\text{A}$, $T_j=25^\circ\text{C}$	—	1.50	2.20	V
	$T_j=125^\circ\text{C}$	—	1.80	2.45	
V_{EC}	$T_j=25^\circ\text{C}$, $-I_c=25\text{A}$	—	2.40	3.10	V
t_{on}	$T_j=125^\circ\text{C}$, $V_{cc}=600\text{V}$, $V_D=V_{DB}=15\text{V}$, $V_{IN}=0\sim 5\text{V}$, $I_c=25\text{A}$, 誘導負荷(上-下アーム)	1.10	1.90	2.60	μs
t_{off}		—	2.80	3.80	
$t_{c(on)}$		—	0.60	0.90	
$t_{c(off)}$		—	0.50	0.90	
t_{rr}		—	0.60	—	

(b) コンバータ部

項目	条件	最小値	標準値	最大値	単位
I_{RRM}	$V_R=V_{RRM}$, $T_j=125^\circ\text{C}$	—	—	7.0	mA
V_F	$T_j=25^\circ\text{C}$, $I_F=25\text{A}$	—	1.1	1.4	V

(c) ブレーキ部

項目	条件	最小値	標準値	最大値	単位
V_{CEsat}	$V_D=V_{DB}=15\text{V}$, $V_{IN}=5\text{V}$, $I_c=15\text{A}$, $T_j=25^\circ\text{C}$	—	1.50	2.20	V
	$T_j=125^\circ\text{C}$	—	1.80	2.45	
V_F	$T_j=25^\circ\text{C}$, $I_F=15\text{A}$	—	2.20	2.80	V
t_{on}	$T_j=125^\circ\text{C}$, $V_{cc}=600\text{V}$, $V_D=V_{DB}=15\text{V}$, $V_{IN}=0\sim 5\text{V}$, $I_c=15\text{A}$, 誘導負荷	1.10	1.90	2.60	μs
t_{off}		—	2.60	3.60	
$t_{c(on)}$		—	0.65	1.00	
$t_{c(off)}$		—	0.40	0.95	
t_{rr}		—	0.65	—	

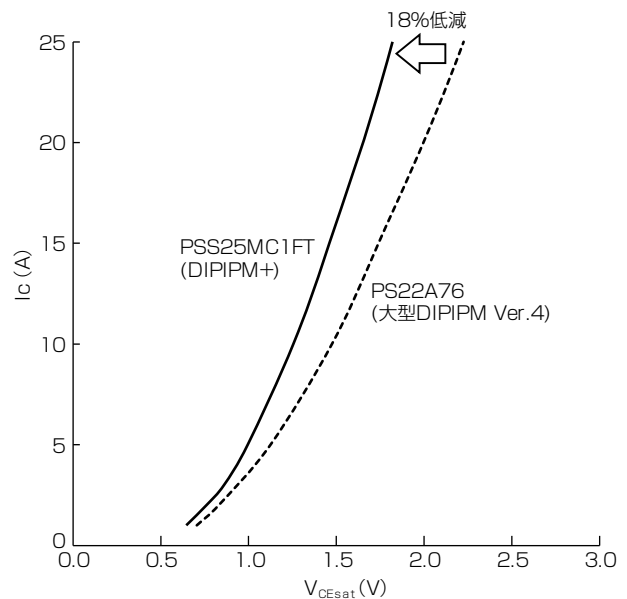


図7. コレクタ電流 I_c -飽和電圧 V_{CEsat} 特性(25A品)

参 考 文 献

- (1) Yamaguchi, K., et al.: A New Version Transfer Mold-Type DIPIPMTMs with built-in Converter and Brake function, PCIM Asia 2015, 272~276 (2015)
- (2) 白石卓也, ほか: 1,200V大型DIPIPM“Ver.4シリーズ”, 三菱電機技報, **84**, No.4, 251~254 (2010)

RC-IGBT搭載パワーモジュール “SLIMDIPシリーズ”

柴田祥吾*
張 洪波*

"SLIMDIP Series" Power Module Using RC-IGBT

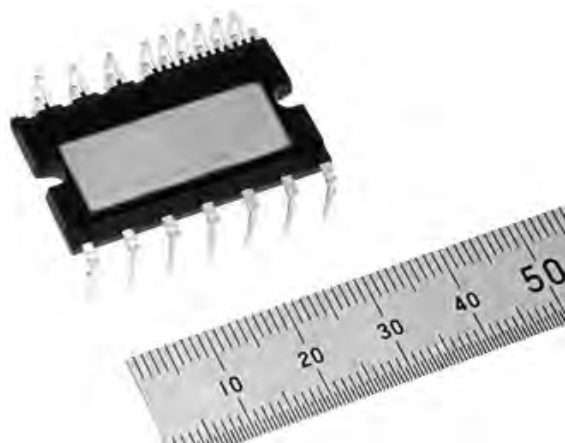
Shogo Shibata, Hongbo Zhang

要 旨

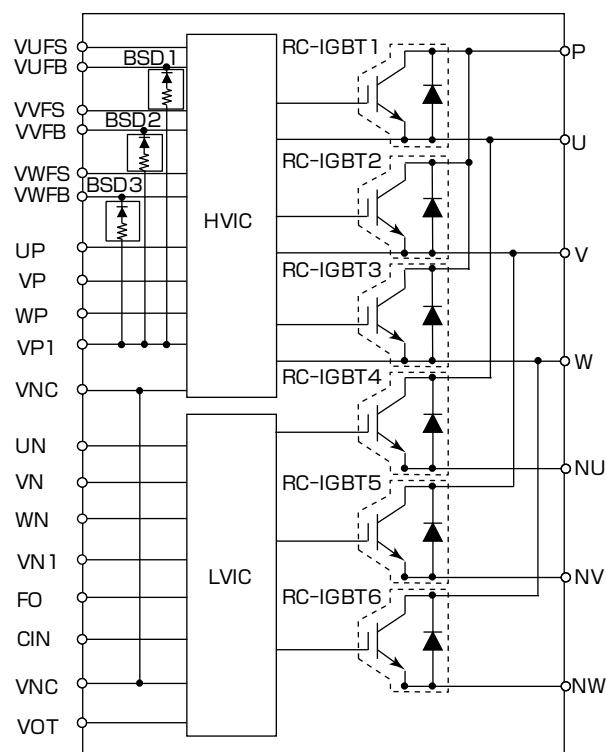
環境保護と節電への意識が高まり、省エネルギー化がより一層重要視されている中、一般家庭での消費電力が高いエアコン、洗濯機、冷蔵庫などの白物家電でも省エネルギー化が求められている。これらの省エネルギー化のキーとなるのがインバータシステムであり、搭載されるパワーモジュールもその中核を担う。

三菱電機は、パワーチップとそれを駆動するICチップを内蔵したトランスファーモールド構造の“DIIPM(Dual In-line Package Intelligent Power Module)”を1997年から製品化しており、1パッケージ化による品質向上及びインバータシステムの設計負荷軽減に貢献してきた。DIIPM

はこれまでアジア市場を中心に白物家電を始め多くのインバータ機器に採用されてきたが、欧米の低容量市場では価格面のメリット等から現在もディスクリート構成が広く用いられている。今回、このような市場にも対応可能な製品として“SLIMDIPシリーズ”を開発した。このシリーズは当社独自の第7世代IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)の薄厚ウェーハ技術を適用したRC(Reverse Conducting)-IGBTの搭載によって、パッケージサイズを従来の“超小型DIIPM Ver.6”から30%縮小させるとともに、配線しやすい端子配列とすることで、システム的小型化及びコスト削減に大きく貢献する。



SLIMDIPシリーズの外観
(18.8×32.8×3.6(mm))



SLIMDIPシリーズの内部回路図

“SLIMDIPシリーズ”の外観及び内部回路図

SLIMDIPシリーズはRC-IGBT×6素子によるインバータ回路と、それを駆動するHVIC(High Voltage Integrated Circuit)、LVIC(Low Voltage Integrated Circuit)及びBSD(Boot Strap Diode)×3素子によって構成している。

1. ま え が き

当社は業界に先駆けてDIPIPMを製品化した以降も、市場要求の変化に対応した製品を次々と開発、量産化してきた。2010年に空調機器業界に新たな省エネルギー基準として導入されたAPF(Annual Performance Factor：通年エネルギー消費効率)の観点に対しても、2013年に当社独自の第7世代IGBTを内蔵した超小型DIPIPM Ver.6シリーズを製品化し⁽¹⁾⁽²⁾、通電能力の拡大及び低電流域(定格電流の10分の1程度)の飽和電圧を15%低減することでインバータシステムの小型化、省エネルギー化に貢献している。

近年、環境保護と節電への意識が高まる中、システムの設計負荷を軽減可能なパワーモジュールは、幅広い分野のインバータシステムに普及しているが、欧米の低容量市場では基板の占有面積や価格面のメリットから現在もディスクリット構成が広く用いられる。また、新興国市場でもインバータ化が進む中、システムコスト低減が課題となっている。

本稿では、このような市場に対応して小型化、低コスト化を実現しつつ、設計負荷の軽減を目的として開発したSLIMDIPシリーズ⁽³⁾の概要、特長及び開発のベースとなったキーテクノロジーについて述べる。

2. SLIMDIPシリーズの概要

SLIMDIPシリーズはRC-IGBTを用いた三相AC出力インバータ回路と制御用HVIC、LVIC及びBSDから構成される。表1にラインアップを、図1に内部回路図をそれぞれ示す。

2.1 パワー部

IGBTとダイオードを1チップ化したRC-IGBT(6素子)による三相AC出力インバータ回路を構成している。

2.2 制御部

HVIC(1素子)にはP側IGBT用駆動回路、高圧レベルシフト回路、フローティング電源電圧低下保護回路(UV, エラー信号(Fo)出力なし)を内蔵している。また、ブートストラップ回路方式の採用によって、15V単一電源駆動が可能である。

LVIC(1素子)にはN側IGBT用駆動回路、制御電源電圧低下保護回路(UV)、短絡電流保護回路(SC)に加え、過熱保護回路(OT)及びアナログ温度出力回路(VOT)を内蔵している。短絡電流保護は、外部接続のシャント抵抗で過電流を検出し、LVICにフィードバックしてIGBTを遮断させる。UV、SC及びOTの動作時にFoを出力する。

ブートストラップ回路にはダイオード(電流制限抵抗付きBSD、3素子)を内蔵している。これによって外付け部品が不要となるため、基板の小型化につながる。

表1. SLIMDIPシリーズのラインアップ

形名	SLIMDIP-S	SLIMDIP-L
用途	冷蔵庫、ファンなど	エアコン、洗濯機など
外形サイズ	18.8×32.8×3.6(mm)	
内蔵チップ	三相インバータを構成するRC-IGBTチップ、HVICチップ、LVICチップ、制限抵抗付きBSDチップ	
内蔵機能	制御電源電圧低下(UV)保護機能：N側保護動作時Fo出力、短絡電流(SC)保護機能(外付けシャント抵抗による)：保護動作時Fo出力、過熱(OT)保護機能(N側のみ)：保護動作時Fo出力、アナログ温度出力機能(VOT)	
その他	インバータN側分割エミッタ(3シャント)方式	

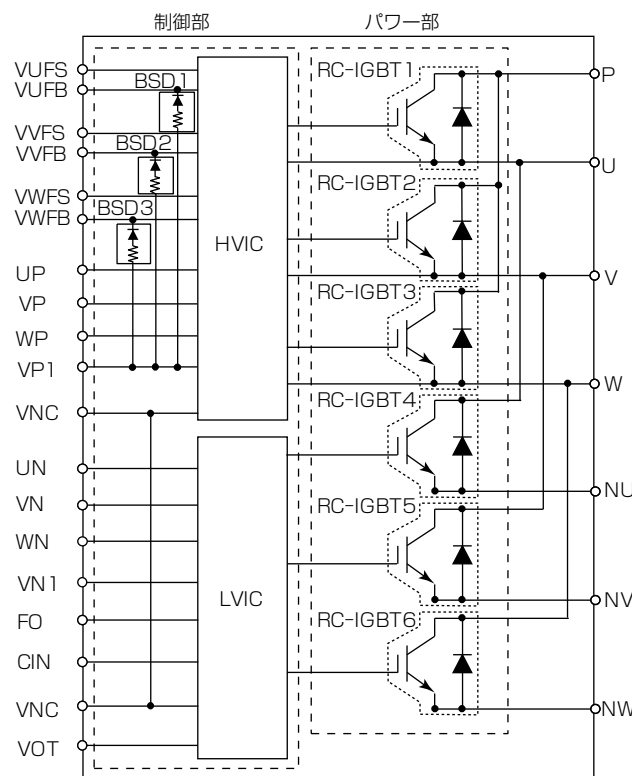


図1. 内部回路図

3. SLIMDIPの特長

3.1 薄厚技術を用いたRC-IGBT搭載

SLIMDIPでは、基板占有面積の縮小及びコスト低減を目的にパッケージサイズの小型化を追求するため、キーアイテムとしてRC-IGBTを適用した。このRC-IGBTには当社独自の第7世代IGBTの技術を用いて、図2に示すとおり従来のRC-IGBTと比較して極薄ウェーハ化を実現した。これによって、電気特性でも図3のようにコレクターエミッタ間飽和電圧(V_{CEsat})は従来のRC-IGBTに対して同一チップサイズで50%の低減を可能とし、パッケージサイズの小型化に大きく貢献した。

3.2 パッケージサイズの縮小

先に述べたRC-IGBTを適用して搭載するパワーチップ数を従来の超小型DIPIPMの12チップから6チップへと半減することで、チップ搭載エリアを縮小し、図4のように内部構造をシンプルにした。この結果、図5に示すパッケージサイズは従来品と比較して30%小型化した。

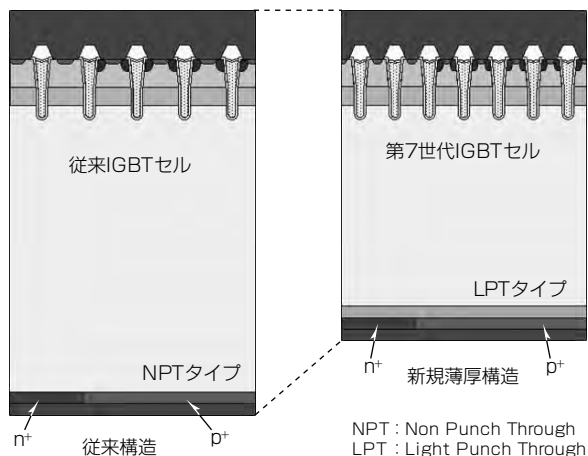


図2. RC-IGBT構造

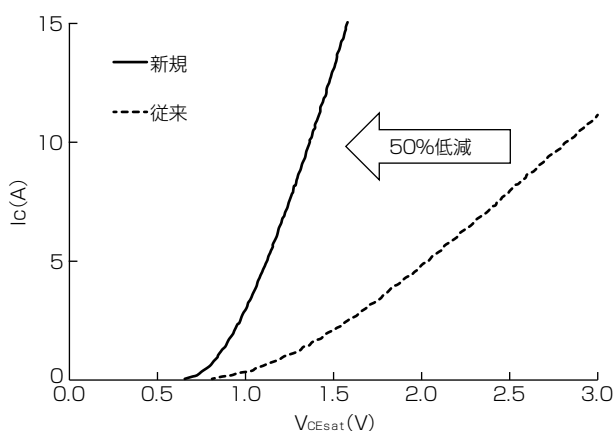


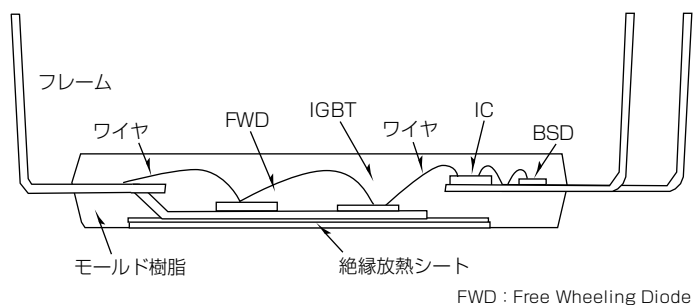
図3. コレクタ電流 I_c -コレクタ・エミッタ間飽和電圧 V_{CEsat} 特性

3.3 システム基板の配線簡素化

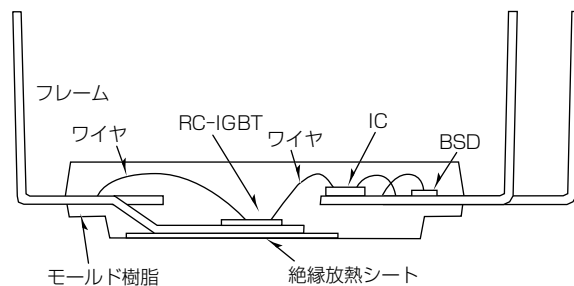
SLIMDIPではパッケージサイズの縮小に加え、システム基板上の配線パターンの簡素化も実現している。DIPIPMのP側IGBTを駆動させるために用いるブートストラップ回路には、電源電圧を安定させるため、外部にコンデンサを接続する必要がある。従来の超小型DIPIPMの端子配列では、このコンデンサは図6のように出力端子(U, V, W)とp側駆動電源端子(VUFB, VVFB, VWFB)間での引き回しが必要なため基板のパターンが複雑となり、余分な基板エリアが必要となっていた。そこで、SLIMDIPではP側駆動電源のGND(Ground)端子を新たに3本設けることで、長い配線パターンを基板上に引き回す必要をなくし、基板設計の簡素化、基板エリアの縮小に貢献した。

3.4 使いやすさの向上

SLIMDIPシリーズではシステムでの使いやすさの向上もコンセプトの1つとしており、ユーザーの保護設計、放熱設計、実装性の面で改良を加えている。保護設計については、従来の超小型DIPIPMはIGBTの過大な温度上昇時に自動的に保護する過熱保護機能(OT)と、制御IC部の温度をアナログ信号で出力する温度出力機能(VOT)のどちらかを選択する必要があったが、このシリーズでは両機能の

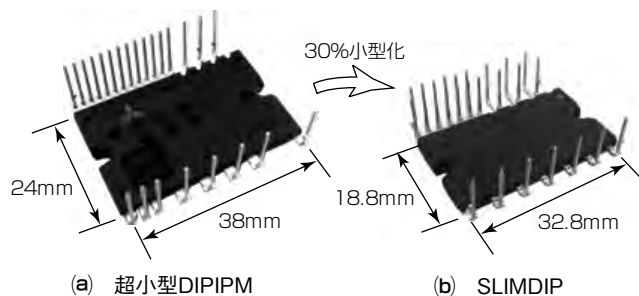


(a) 超小型DIPIPM



(b) SLIMDIP

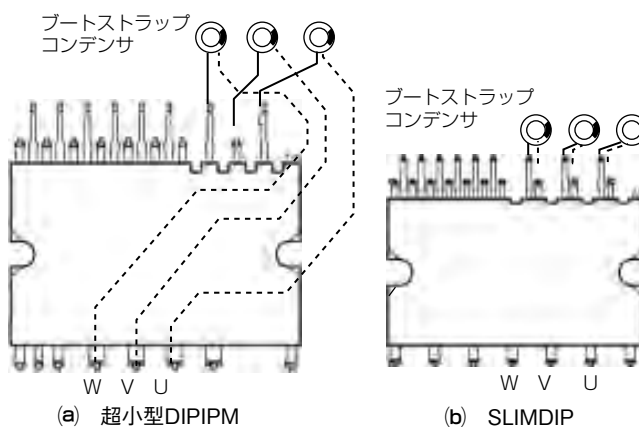
図4. 内部構造図



(a) 超小型DIPIPM

(b) SLIMDIP

図5. パッケージサイズ



(a) 超小型DIPIPM

(b) SLIMDIP

図6. 配線パターン例

搭載によって熱に対する保護設計の自由度向上に貢献する。また、放熱設計については最大許容ケース温度も15℃拡大して115℃までとすることで、設計の自由度を向上させた。

実装面では端子先端を先細りしたテーパ状にすることで基板のスルーホールへの挿入性を向上させた。

表2. SLIMDIP-Lの電気的特性

項目	記号	条件		Min.	Typ.	Max.	単位
コレクター-エミッタ間飽和電圧	V _{CEsat}	V _D = V _{DB} = 15V	T _j = 25℃	—	1.6	1.95	V
		I _C = 15A, V _{IN} = 5V	T _j = 125℃	—	1.80	2.15	
FWD順電圧降下	V _{EC}	- I _C = 15A, V _{IN} = 0V		—	1.4	1.9	V
スイッチング時間	t _{on}	V _{CC} = 300V, V _D = V _{DB} = 15V, I _C = 15A, T _j = 125℃, V _{IN} = 0~5V, 誘導負荷		0.65	1.05	1.45	μs
	t _{rr}			—	0.30	—	
	t _{c(on)}			—	0.40	0.65	
	t _{off}			—	1.15	1.60	
	t _{c(off)}			—	0.15	0.30	
回路電流	I _D	V _{P1} -V _{NC} , V _{N1} -V _{NC} の総和	V _D = 15V, V _{IN} = 5V	—	—	3.10	mA
			V _D = 15V, V _{IN} = 0V	—	—	3.10	
	I _{DB}	V _{UFB} -U, V _{VFB} -V, V _{WFB} -W	V _D = V _{DB} = 15V, V _{IN} = 0V	—	—	0.10	
			V _D = V _{DB} = 15V, V _{IN} = 5V	—	—	0.10	
短絡保護トリップレベル	V _{SC(ref)}	V _D = 15V		0.455	0.480	0.505	V
制御電源電圧低下保護	UV _{DBt}	T _j ≤ 125℃	トリップレベル	7.0	10.0	12.0	V
	UV _{DBr}		リセットレベル	7.0	10.0	12.0	
	UV _{Dt}		トリップレベル	10.3	—	12.5	
	UV _{Dr}		リセットレベル	10.8	—	13.0	
BSD順電圧降下	V _F	I _F = 10mA, 制限抵抗の電圧降下含む		1.1	1.7	2.3	V

4. SLIMDIPシリーズの性能、特性

SLIMDIPシリーズのうち、主にエアコンや洗濯機市場向け1.5kWクラスのモーター駆動用として開発した“SLIMDIP-L”の電気的特性を表2に示す。LVICに内蔵している短絡電流保護機能では、超小型DIIPM Ver.6と同様なトリミング回路による特性補正を実施しているため、短絡電流保護検知電圧のばらつきを±5%に抑制することでインバータの過負荷運転範囲の拡大に貢献する。

また、図7にRC-IGBTの温度上昇特性を示す。第7世代IGBT技術を用いたRC-IGBTを適用することで、従来品より30%小型化したパッケージサイズを実現しつつ、“SLIMDIP-S”で4 Arms以上、SLIMDIP-Lでは7 Arms以上の通電能力を持つ。

5. む す び

インバータシステムの小型化を実現するための、従来の超小型DIIPMに対してパッケージサイズを30%縮小したSLIMDIPシリーズについて述べた。今後も幅広い市場ニーズに応えられる製品開発を続けていくことで、インバータシステムの発展に貢献していく。

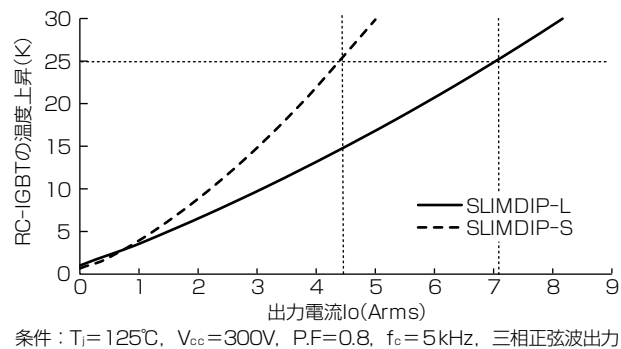


図7. RC-IGBTの温度上昇

参 考 文 献

- (1) 加藤正博, ほか: 超小型DIIPM“Ver.6シリーズ”, 三菱電機技報, **88**, No.5, 285~288 (2014)
- (2) 鈴木健司, ほか: 高性能・高破壊耐量第7世代パワーチップ技術, 三菱電機技報, **88**, No.5, 281~284 (2014)
- (3) Shibata, S., et al.: New Transfer-Molded SLIMDIP for white goods using thin RC-IGBT with a CSTBT™ structure, PCIM Europe 2015, 1149~1154 (2015)

次世代自動車用パワーモジュール “大容量J1シリーズ”

猪ノ口誠一郎* 秦 佑貴*
 齊藤省二* 波多江慎治*
 飯塚 新*

Next Generation Power Module "High Power J1 Series" for EV and HEVs

Seiichiro Inokuchi, Shoji Saito, Arata Iizuka, Yuki Hata, Shinji Hatae

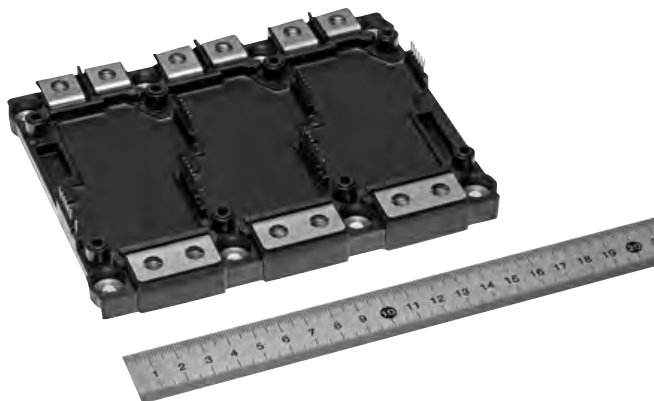
要 旨

地球温暖化や大気汚染などに対する環境保護機運が世界的に高まる中、各地域で排ガス規制強化やエコカー優遇措置導入など積極的な環境施策の広がりがみられる。このような市場の追い風を背景に、小型EV(Electric Vehicle)や中型PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)など様々な環境対策車が開発・市場投入されている。今般、更なる市場ニーズとして大型自動車やトラック、バスなど大型環境対策車の需要が高まっており、それらのモータ駆動のためのパワーモジュールとして自動車用大容量製品の開発が求められている。

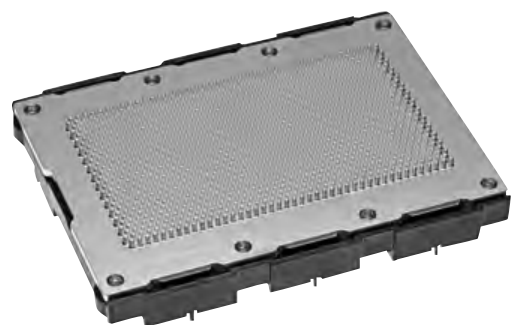
三菱電機は、高性能、小型・軽量化を追求した次世代自動車用パワーモジュール“J1シリーズ”を開発してきたが、

それらのコンセプトを踏まえて、自動車用大容量モータ駆動に適合した“大容量J1シリーズ”を新たに開発した。

“高性能”“小型・軽量化”と“大容量化”を同時に実現するソリューションとして冷却フィン一体型の直接水冷構造を新規開発して、6in1化、DLB(Direct Lead Bonding)構造、最新第7世代IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)とダイオードを採用することで、従来製品(“JシリーズT-PM(Transfer-molded PowerModule) CT300DJH120⁽¹⁾”6台をCu冷却フィンに放熱グリスを介して取り付けたもの)に比べて熱抵抗を約20%低減、実装面積を約60%縮小、製品質量を約70%低減して、次世代自動車用として最適な大容量パワーモジュールを実現した。



大容量J1シリーズ(表側)



大容量J1シリーズ(裏側)

大容量J1シリーズの製品ラインアップ

形名	定格電圧	定格電流	結線方式
CT600CJ1B120	1,200V	600A	6in1
CT1000CJ1B060	650V	1,000A	6in1

“大容量J1シリーズ”の外観とラインアップ

“高性能”“小型・軽量化”“大容量化”をコンセプトとしたEV・HEV(Hybrid Electric Vehicle)向けのパワーモジュール大容量J1シリーズを開発した。製品ラインアップは1,200V/600A及び650V/1,000Aの2品種である。

1. ま え が き

地球温暖化や大気汚染などに対する環境保護機運が世界的に高まる中、各地域で排ガス規制強化やエコカー優遇措置導入など積極的な環境施策の広がりがみられる。このような市場の追い風を背景に、小型EVや中型PHEVなど様々な環境対策車が開発・市場投入されている。今般、更なる市場ニーズとして大型自動車やトラック、バスなど大型環境対策車の需要が高まっており、それらのモータ駆動のためのパワーモジュールとして自動車用大容量製品の開発が求められている。

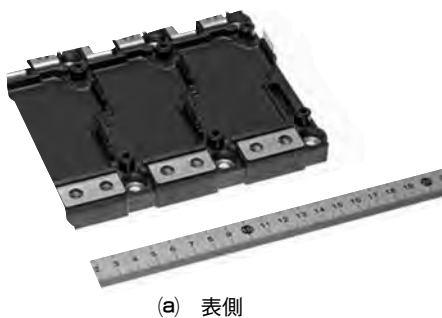
当社は“高性能”“小型・軽量化”を追求した次世代自動車用パワーモジュールJ1シリーズを開発してきたが⁽²⁾、そのコンセプトを踏まえて、自動車用大容量モータ駆動に適した大容量J1シリーズを新たに開発した。

本稿では、大容量J1シリーズの特長と性能について述べる。

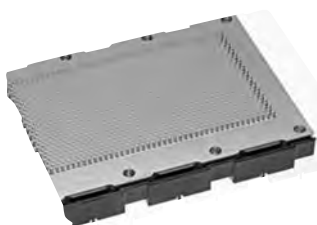
2. 大容量J1シリーズ

2.1 概 要

“大容量J1シリーズ”は“高性能”“小型・軽量化”と“大容量化”を同時に実現する自動車用パワーモジュールである(図1)。高電圧、大電流の用途に適合させるため、1,200V/600A及び650V/1,000Aのラインアップを準備した(表1)。



(a) 表側



(b) 裏側

サイズ：163×124.5×33.6(mm) (制御端子、フィンを含む)

図1. 大容量J1シリーズ

表1. 大容量J1シリーズのラインアップ

形名	定格電圧	定格電流	結線方式
CT600CJ1B120	1,200V	600A	6in1
CT1000CJ1B060	650V	1,000A	6in1

2.2 回路構成

図2に大容量J1シリーズの等価回路を示す。水冷ジャケットへの取付けと製品サイズの小型化を考慮して6in1結線方式とした。また、各相を同一構成として個別に絶縁することで、自己インダクタンスのばらつきによるスイッチング特性のばらつきを低減する構成とした。各アーム全てに短絡時の高速遮断を実現するオンチップ電流センサと精度の高い過熱保護やインバータ負荷調整に使用可能なオンチップ温度センサを搭載した。

2.3 構造

大容量J1シリーズの断面構造を図3に示す。T-PMで培ったDLB構造と第7世代IGBTとダイオードを採用することで、小型・高信頼性を実現している。図4にJシリーズ

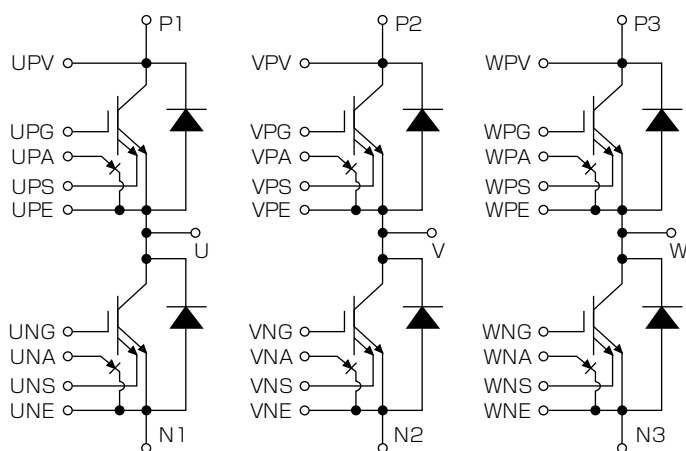


図2. 大容量J1シリーズの等価回路

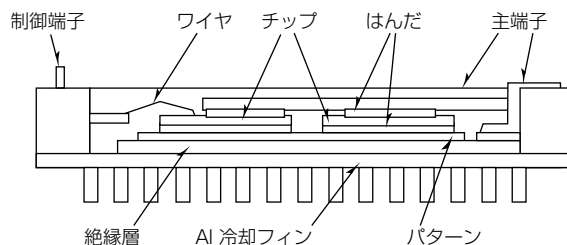


図3. 大容量J1シリーズ断面構造

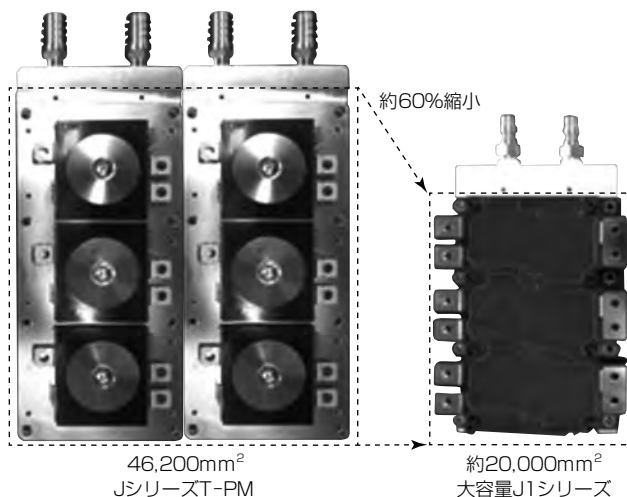


図4. フットプリントの比較

ズT-PM(CT300DJH120を6台Cu冷却フィンに放熱グリスを介して取り付けしたもの)と大容量J1シリーズのフットプリント比較を示す。構造の最適化とモジュールの6in1化によって、T-PMソリューションと比較して約60%のフットプリント縮小を達成した。また、図5に質量比較を示す。アルミフィンを採用することで、従来構成と比較して約70%の質量低減を達成した。

図6に熱抵抗の比較を示す。アルミは銅よりも熱伝導率が悪いものの、アルミフィンをもジュールと一体化することで放熱グリス層を削減して、さらに絶縁基板下のはんだ層を削減することで、T-PMソリューションと比較して約20%の熱抵抗低減を達成した。この絶縁基板下のはんだ層の削減で、熱サイクル耐量の向上も果たしている。

図7にPN間のインダクタンス比較を示す。通常、大型

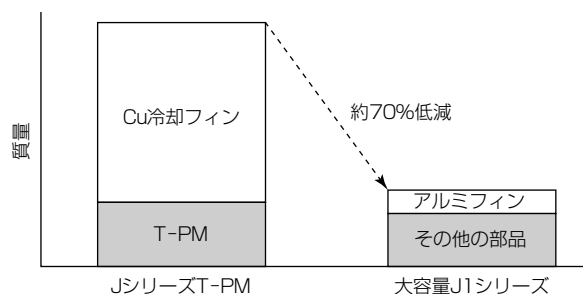


図5. 質量の比較

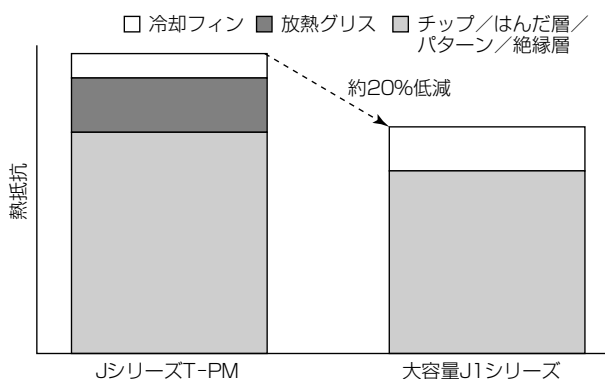


図6. 熱抵抗の比較

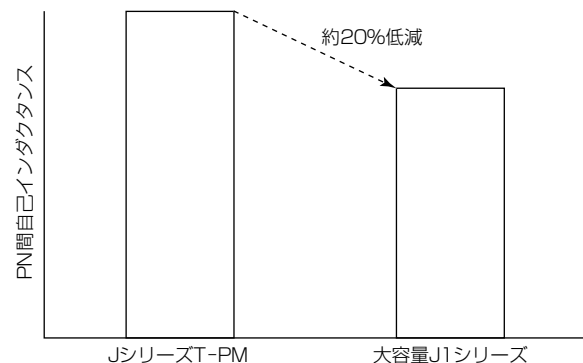


図7. PN間自己インダクタンスの比較

のパッケージは配線長が長くなるため、小型のパッケージに比べて自己インダクタンスが大きくなる傾向がある。この自己インダクタンスが大きいと、IGBTの高速スイッチングの際、より高いサージ電圧を生じるため使用条件が限定的になることがあり、パワーモジュールの大容量化が困難であった。しかし、大容量J1シリーズではパッケージの小型化とpn電極の平行配線を施すことで、T-PMソリューションと比較して約20%の自己インダクタンス低減を達成しており、使用条件の拡大や低スイッチング損失を実現可能にした。

3. 大容量J1シリーズの性能

3.1 第7世代IGBTとダイオード

大容量J1シリーズは、第7世代IGBTとダイオードを搭載している。第7世代IGBTは“CSTBT”に加えて、極薄ウェーハプロセス技術を適用して低損失化を実現した。さらに、第7世代ダイオードはRFC(Relaxed Field of Cathode)効果が得られる裏面構造を適用したことで、snap-off(電圧跳ね上がり)とそれに誘発される発振が抑制できる高リカバリーSOA(Safe Operating Area)性能が可能となり、前世代品よりも更に薄ウェーハ化することで低損失化を実現した。当社のIGBTとダイオードの性能進化は常に高出力密度化と低損失化を目指して進めており、第7世代IGBTとダイオードは大容量J1シリーズの小型化、低損失化に貢献している(図8)。

3.2 1,200V系

図9に大容量J1シリーズCT600CJ1B120のインバータ損失の内訳を、図10に大容量J1シリーズCT600CJ1B120のTjシミュレーション結果を示す。Tjmax(175℃)以下で500Arms以上の通電が可能であり、様々な通電条件に対応可能であることを示している。

3.3 650V系

図11に大容量J1シリーズ650V系のインバータ損失の内訳を、図12に大容量J1シリーズ650V系のTjシミュレー

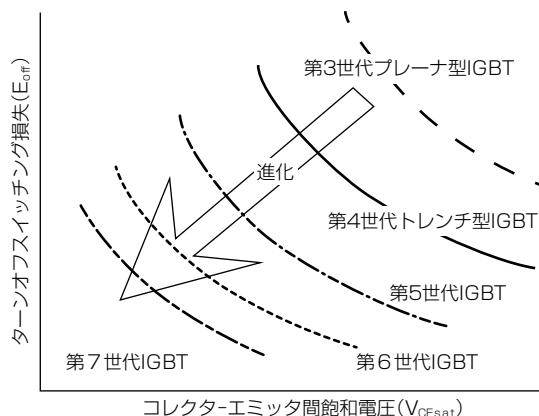
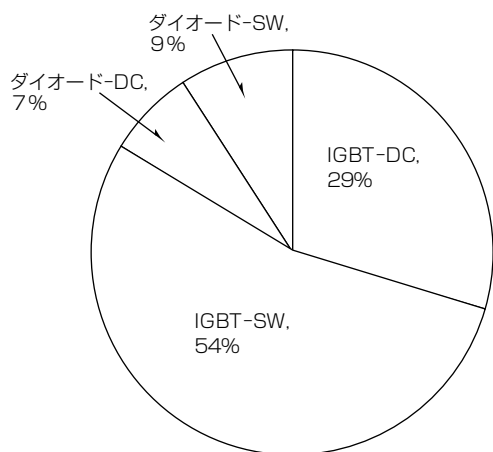
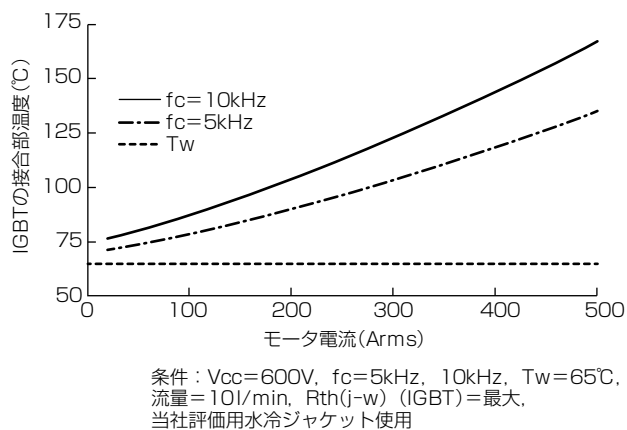


図8. IGBTの進化



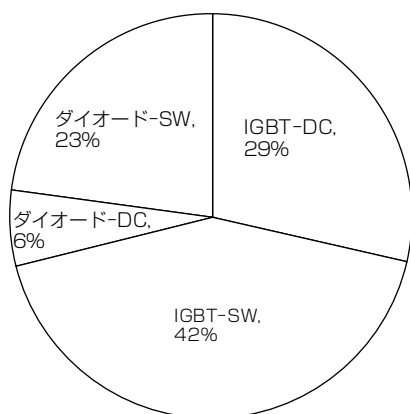
条件: $I_o=400\text{Arms}$, $V_{cc}=600\text{V}$, $f_c=5\text{kHz}$, $\text{PF}=0.8$, $M_o=1$
 SW: スイッチング損失, DC: 通電損失

図9. CT600CJ1B120のインバータ損失の内訳 (代表例)



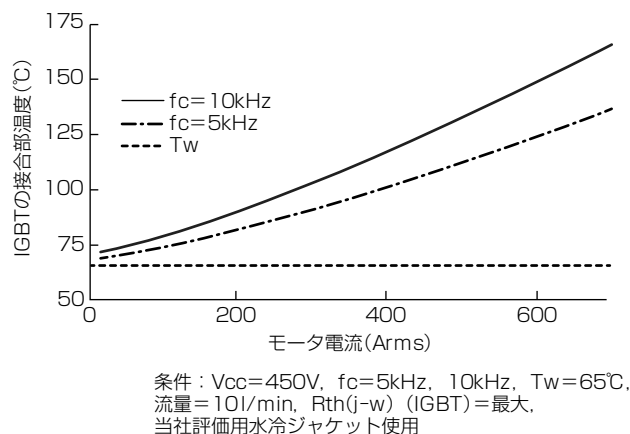
条件: $V_{cc}=600\text{V}$, $f_c=5\text{kHz}$, 10kHz , $T_w=65^\circ\text{C}$,
 流量=10l/min, $R_{th(j-w)}$ (IGBT)=最大,
 当社評価用水冷ジャケット使用

図10. 1,200V系のTjシミュレーション結果 (代表例)



条件: $I_o=600\text{Arms}$, $V_{cc}=450\text{V}$, $f_c=5\text{kHz}$, $\text{PF}=0.8$, $M_o=1$

図11. 650V系のインバータ損失内訳 (代表例)



条件: $V_{cc}=450\text{V}$, $f_c=5\text{kHz}$, 10kHz , $T_w=65^\circ\text{C}$,
 流量=10l/min, $R_{th(j-w)}$ (IGBT)=最大,
 当社評価用水冷ジャケット使用

図12. 650V系のTjシミュレーション結果 (代表例)

シミュレーション結果を示す。Tjmax(175°C)以下で700Arms以上の通電が可能であり、様々な通電条件に対応可能であることを示している。

4. む す び

次世代自動車用パワーモジュール“大容量J1シリーズ”は、冷却フィン一体型構造、DLB構造の採用と内部構造の最適化、及び第7世代IGBTとダイオードの採用によって、自動車用として“高性能”“小型・軽量化”と“大容量化”を同時に達成するモジュールとして開発中である。当社は、EV/HEV市場のニーズに応えるため、“大容量J1シリーズ”に最適な評価キット(ドライバボード、DCリンクキャパシタ、水冷ジャケット)を準備しており、大容量J1シリーズのユーザーサポートの充実化に取り組んでいる。

今後は、大容量製品を含めた“J1シリーズ”の更なるラインアップの拡充を行うとともに、新たな高性能モジュールの開発を行って、ますます広がる自動車用パワーデバイス市場を主導していく。

参 考 文 献

- (1) 猪ノ口誠一郎, ほか: 自動車用IPM/T-PM“Jシリーズ”, 三菱電機技報, **86**, No.5, 283~286 (2012)
- (2) 石原三紀夫, ほか: 次世代自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”, 三菱電機技報, **88**, No.5, 321~324 (2014)

大容量・高信頼性HVIGBT モジュール“Xシリーズ”

羽鳥憲司*
大田賢児*
田中宜彦*

HVIGBT Module "X Series" with High Power Rating and High Reliability

Kenji Hatori, Kenji Ota, Nobuhiko Tanaka

要 旨

大電力を高速にスイッチングする三菱電機のHVIGBT(High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールは、1997年に製品化して以来、高い信頼性が評価され、主に電鉄の駆動用システムや工業用大型機器などの電力変換装置に広く採用されてきた。近年は電鉄市場の世界的拡大や、HVDC(High Voltage DC transmission)などの応用分野への適用事例の増加を受け、HVIGBTの需要が高まっている。当社では、3.3kV以上の耐圧クラスに特化した製品として、2008年に“Rシリーズ”HVIGBTを市場投入した。RシリーズHVIGBTでは電流容量の増加や動作温度の拡大を実現し、電鉄・電力市場の発展に大きく貢献してきた。

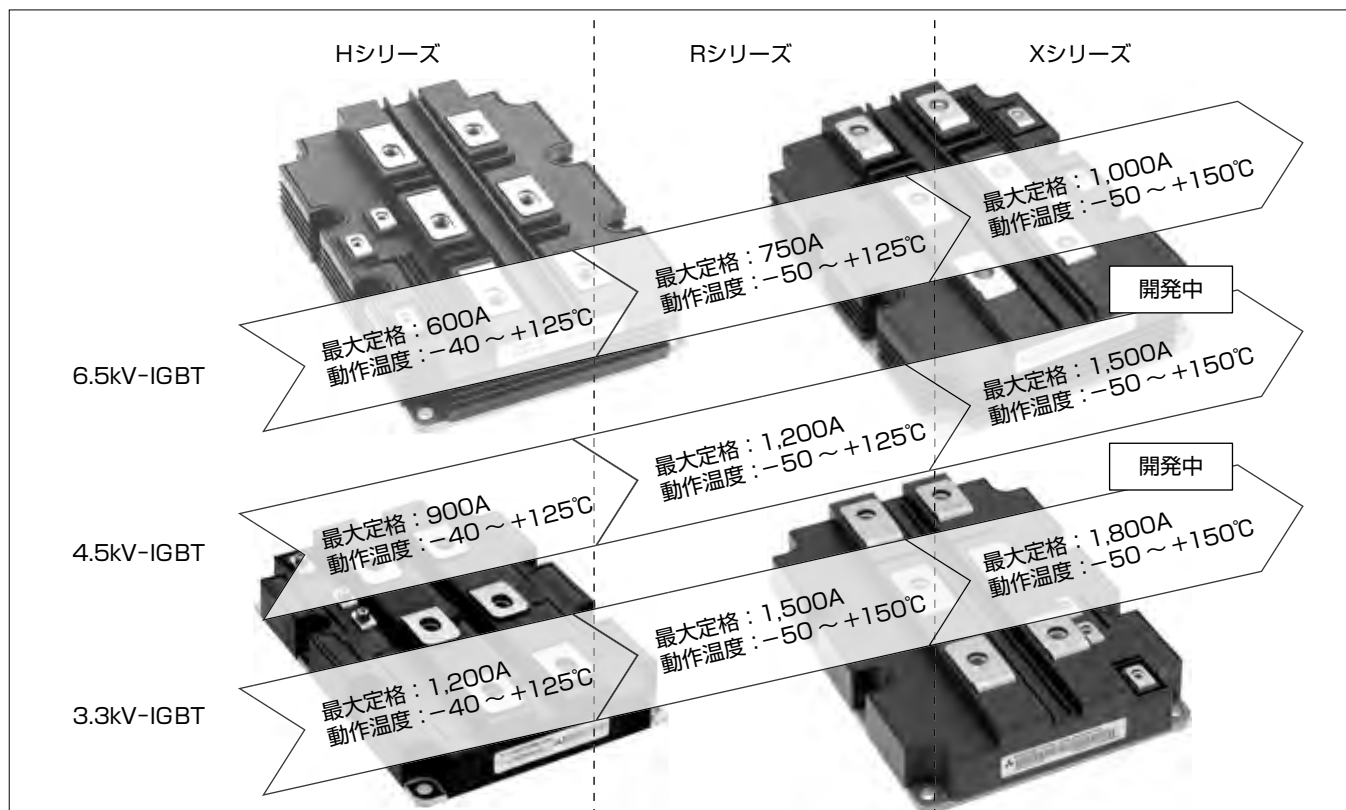
そのRシリーズHVIGBTの後継機種として、2015年11月に“Xシリーズ”HVIGBTの発売を開始した。XシリーズHVIGBT

では“CSTBT(Carrier Stored Trench-gate Bipolar Transistor)”構造を6.5kV-IGBTに採用し、業界最大^(注1)容量である6.5kV/1,000A定格を実現した⁽¹⁾。XシリーズHVIGBTの特長は次のとおりである。

- (1) 大容量(6.5kV/1,000A, 4.5kV/1,500A, 3.3kV/1,800A)
- (2) 全耐圧クラスで動作保証温度150℃
- (3) 優れた耐環境性能
- (4) 従来製品との外形互換性を確保

今後は6.5kV製品に引き続き、3.3kV製品や4.5kV製品についても順次市場投入し、電鉄・電力市場の更なる発展に貢献していく。

(注1) 2015年9月29日現在、当社調べ



当社製HVIGBT(耐圧クラス3.3kV以上)の製品変遷

当社の3.3kV以上の耐圧クラスのHVIGBTについて、シリーズごとの最大定格電流と動作温度の変遷を示す。Xシリーズでは“Hシリーズ”の1.5倍以上の定格電流を予定している。また、動作温度についても、Hシリーズでは最大125℃であったが、Rシリーズで3.3kV-IGBTが最大150℃に対応し、Xシリーズでは全耐圧クラスで最大150℃対応を予定している。

1. ま え が き

電鉄の駆動用システムや工業用大型機器などの電力変換装置用途に、大容量・高信頼性パワー半導体である当社のHVIGBTが多く搭載されてきた。従来、当社の3.3kV以上の耐圧クラスのHVIGBTにはプレーナ構造のIGBTチップを採用してきたが、今回、当社独自のトレンチ構造であるCSTBTを初めて6.5kV-IGBTに適用したXシリーズHVIGBTの開発に成功した。また、RFC(Relaxed Field of Cathode)ダイオードを新たに搭載し、CSTBT構造のIGBTとの相乗効果で6.5kV/1,000Aの大容量素子を実現した。

本稿では、6.5kV/1,000A素子を中心にXシリーズHVIGBTの特長と性能について述べる。

2. XシリーズHVIGBTの構造と特長

2.1 XシリーズのCSTBTチップ

XシリーズHVIGBTモジュールに採用したIGBTチップは次の特長を備える(図1)。

(1) コレクタ-エミッタ間飽和電圧(V_{CEsat})の低減

当社独自技術であるCSTBT構造の適用によって、IGBT表面のキャリア密度を高めることができる。それによって、IGBTチップの厚み方向のキャリア分布を高く保つ効果が得られる。その結果、3章で述べるように V_{CEsat} の劇的な低減を実現できた。

(2) 破壊耐量の向上

裏面のpコレクタ層をパターンニングする部分pコレクタ構造を採用した。それによって、IGBTチップ外周部のキャリアの流入を抑制し、ターンオフ破壊耐量や短絡耐量を大幅に改善することができた。

(3) 熱抵抗の低減

新たなチップ終端構造として、LNFLR(Linearly-Narrowed Field Limiting Ring)構造⁽²⁾を採用した。この構造は耐環

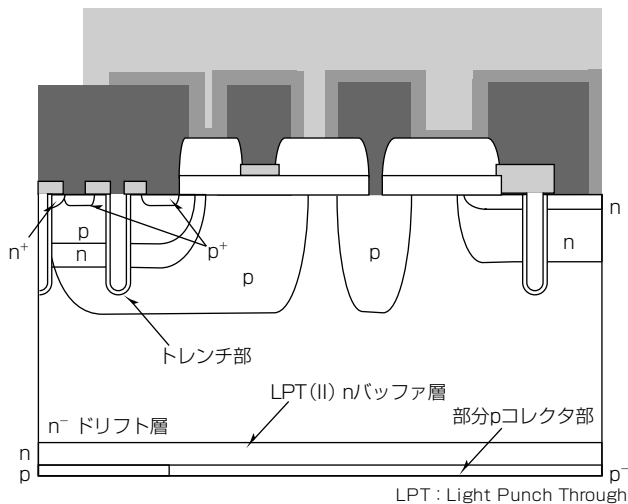


図1. XシリーズIGBTチップの断面図

境性能に優れているため、従来の終端構造に比べて終端長を大幅に低減できる。特に6.5kV-IGBTではこの構造を採用することで、チップの有効面積を28%拡大でき、次に述べるように、熱抵抗の大幅な低減を実現した(図2)。

2.2 XシリーズRFCダイオードチップ

XシリーズHVIGBTモジュールに採用したダイオードチップは次の特長を備える(図3)。

(1) V_F の低減と破壊耐量の向上

裏面にP層を形成するRFCダイオード構造⁽³⁾の適用によって、ダイオード裏面の電界を緩和することができる。それによって、ダイオードのリカバリー耐量を大幅に改善し、 V_F を劇的に低減することができた。

(2) 熱抵抗の低減

IGBTと同様にダイオードにも耐環境性能に優れた終端構造であるLNFLR構造を採用した。それによって、6.5kVダイオードでは有効面積を50%も拡大でき、熱抵抗を大幅に低減することに成功した(図4)。



図2. IGBTチップの有効面積拡大

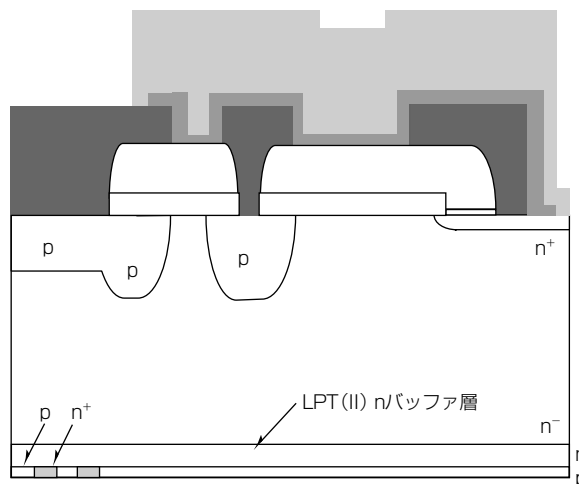


図3. Xシリーズダイオードチップの断面図

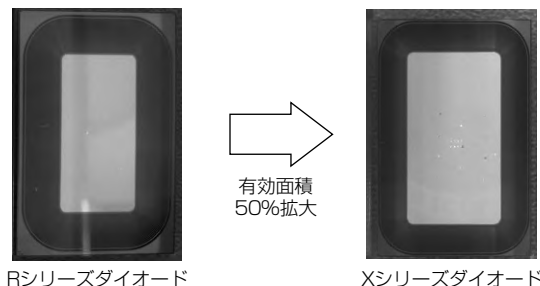


図4. ダイオードチップの有効面積拡大

2.3 Xシリーズのパッケージ

封止剤に耐環境性能に優れたシリコンゲルを採用した。それによって、高湿度環境などの非常に厳しい環境に対しても優れた耐性を示す製品を実現できた。

2.4 Xシリーズの製品ラインアップ

当社は2015年11月に6.5kV/1,000A素子である“CM1000HG-130XA”の発売を開始した。他の耐圧クラスについても、順次市場投入を予定している。

3. XシリーズHVIGBTの性能

3.1 CM1000HG-130XAの静特性

Xシリーズ6.5kV/1,000A素子であるCM1000HG-130XAで、RシリーズHVIGBT“CM750HG-130R”比で V_{CEsat} を38%低減、エミッタ-コレクタ間電圧(V_{EC})を25%低減した。CM1000HG-130XAのIGBT部の出力特性を図5に、静特性スペックを表1に示す。

3.2 CM1000HG-130XAの熱抵抗

LNFLR終端構造の適用によって、RシリーズHVIGBT(CM750HG-130R)比で、IGBT部の熱抵抗($R_{th(j-c)Q}$)が8.3%減、ダイオード部の熱抵抗($R_{th(j-c)D}$)が22.7%減となった(表2)。

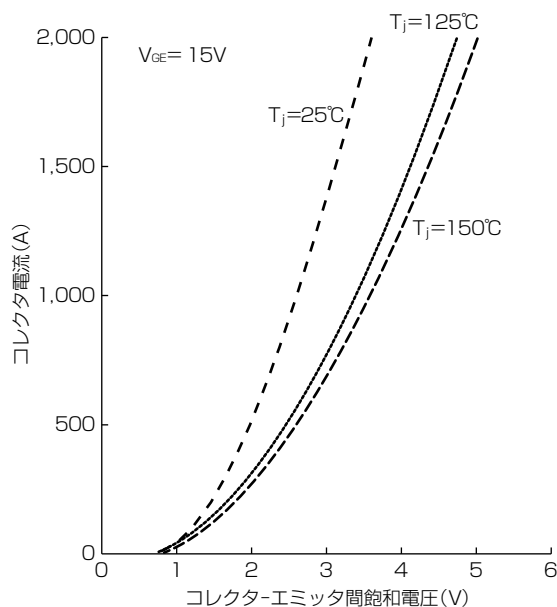


図5. CM1000HG-130XAのIGBT部の出力特性

表1. 静特性スペック

品種	V_{CEsat} (1,000A, 125°C)	V_{EC} (1,000A, 125°C)
CM750HG-130R	5.5 V	4.0 V
CM1000HG-130XA	3.4 V	3.0 V

表2. 熱抵抗スペック

品種	$R_{th(j-c)Q}$	$R_{th(j-c)D}$
CM750HG-130R	12.0K/kW	22.0K/kW
CM1000HG-130XA	11.0K/kW	17.0K/kW

3.3 CM1000HG-130XAの破壊耐量

XシリーズHVIGBTでは部分pコレクタ構造の適用によって、非常に強固なターンオフ耐量を確保した。CM1000HG-130XAでは定格1,000Aに対し、4.4倍の4,400Aでも非破壊と、動作温度150°Cの条件下でも十分な耐量があることを確認した(図6)。

また、ダイオードの破壊耐量についても、RFCダイオード構造の適用によって、動作温度150°Cの条件下で、リカバリー動作時のピークパワー(P_{rr})が12.8MWで非破壊と、十分な破壊耐量を持つことを確認した(図7)。

3.4 CM1000HG-130XAの短絡耐量

インバータ回路における短絡動作モードには、IGBTとダイオードがともに非導通状態から短絡を開始するモード(短絡Type1)のほか、IGBTがターンオンしている際の短絡動作(短絡Type2)や、ダイオードが還流中の逆並列IGBTの短絡動作(短絡Type3)がある。XシリーズHVIGBTでは、短絡Type1だけでなく、より厳しい短絡モードである短絡Type2や短絡Type3についても、十分な耐量を確保することに成功した。

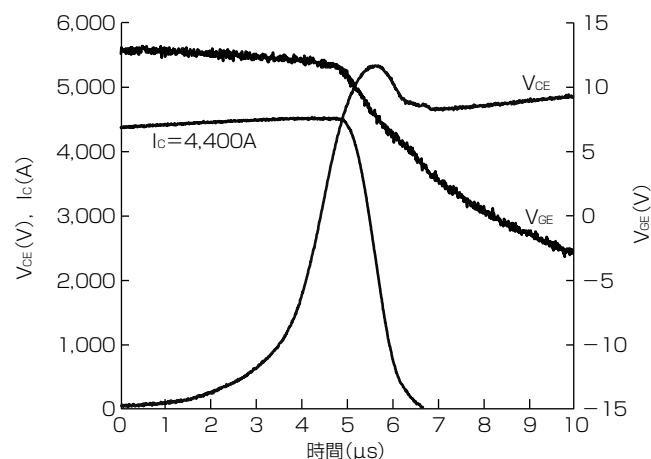


図6. CM1000HG-130XAのターンオフ耐量波形

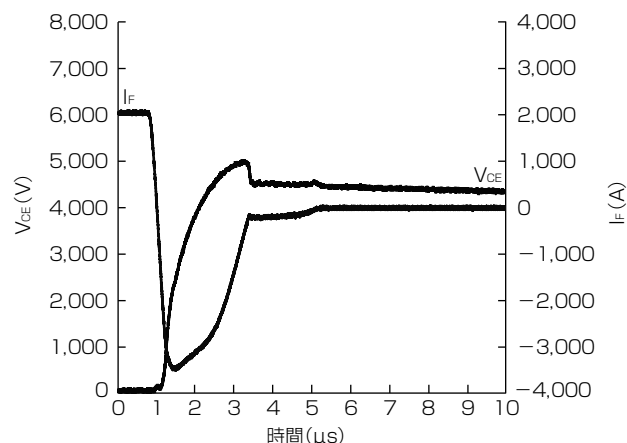
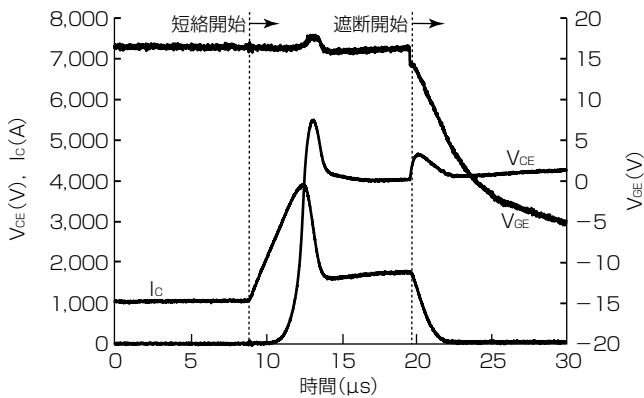
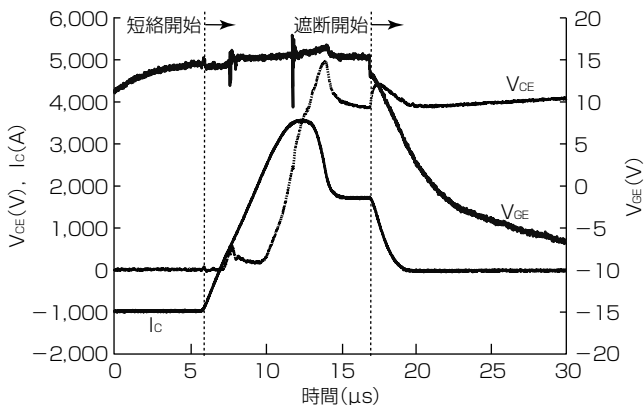


図7. CM1000HG-130XAのリカバリー耐量波形



試験条件： $T_j=150^{\circ}\text{C}$ ， $V_{cc}=4,200\text{V}$ ， $I_c=1,000\text{A}$ ， $L_s=4.2\mu\text{H}$

図8. CM1000HG-130XA(1/3駆動)の短絡Type2波形



試験条件： $T_j=150^{\circ}\text{C}$ ， $V_{cc}=4,200\text{V}$ ， $I_c=-1,000\text{A}$ ， $L_s=4.2\mu\text{H}$

図9. CM1000HG-130XA(1/3駆動)の短絡Type3波形

表3. 結露試験1サイクル

ステップ	条件	ゲル状態
ステップ1	85℃，85%，36時間保持	 無色透明
ステップ2	冷却	
ステップ3	25℃，50%，2時間保持	 白濁(結露)
ステップ4	DC5,200V印加試験 25℃，50%，3分	

CM1000HG-130XAの短絡Type2波形を図8に，短絡Type3波形を図9に示す。素子のコレクタ主端子及びエミッタ主端子のそれぞれ3端子のうち1端子のみを接続することで，モジュール全体の1/3のみを動作させて試験実施している。よって，試験電流波形の3倍がモジュール全体の電流波形と等価となる。

試験では，モジュールの1/3部分に1,000Aと定格の3倍を通電した状態から短絡状態へ移行させ，10μsの短絡期間を経た後に，問題なく遮断可能であることを確認した。

3.5 CM1000HG-130XAの耐環境性能

当社は，高湿度環境に対する耐性を調査する試験として，表3に示す結露試験方法を確立した⁽⁴⁾。ステップ1～4まで

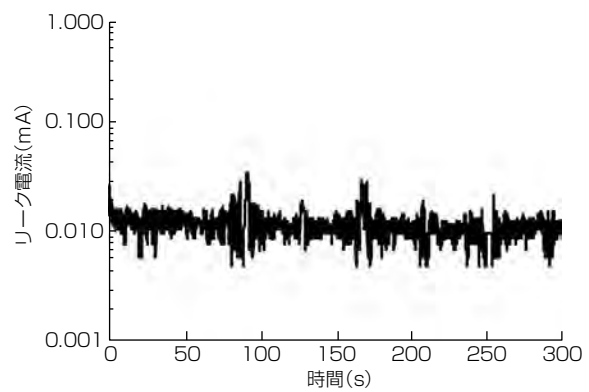


図10. 結露試験5サイクル後のステップ4試験波形

を実施することでモジュール内を結露させ，これを繰り返し実施することで高湿度環境に対する耐性を確認しており，XシリーズHVIGBTでも，この結露試験によって高湿度環境に対する耐性を調査した。

XシリーズHVIGBTでは耐環境性能に優れたチップ終端構造LNFLR構造や，耐環境性シリコンゲルを採用している。その結果，結露試験を5サイクル実施しても，ステップ4におけるリーク電流の増加はみられず，高湿度環境に対して強い耐性を持つことを確認した(図10)。

4. む す び

電鉄・電力用途のHVIGBTには高い信頼性が求められることから，当社ではロバスト性を重視した設計を行ってきた。新たに開発したXシリーズHVIGBTでも，従来に比べて大きく損失を低減しながら，高破壊耐量及び優れた耐環境性能を示すロバスト設計を実現した。

当社では，こうした非常に高い信頼性を持つ大容量のXシリーズHVIGBTのラインアップを今後拡充していき，電鉄・電力市場の発展に引き続き貢献していく。

参 考 文 献

- (1) Ota, K., et al.: The Next Generation 6.5 kV IGBT Module with High Robustness, PCIM Europe 2014, 28～33 (2014)
- (2) Chen, Z., et al.: A Balanced High Voltage IGBT Design with Ultra Dynamic Ruggedness and Area-efficient Edge Termination, Proc. ISPSD 2013, 37 (2013)
- (3) Nishii, A., et al.: Relaxation of Current Filament due to RFC Technology and Ballast Resistor for Robust FWD Operation, Proc. ISPSD 2011, 96 (2011)
- (4) Tanaka, N., et al.: Robust HVIGBT module design against high humidity, PCIM Europe 2015, 368～373 (2015)