

巻頭論文

環境対策に不可欠な パワーデバイスの技術動向



マジュムダール ゴーラブ*



西村隆司**

Indispensable to Counter Climate Change—Progresses in Power Device Technology

Gourab Majumdar, Takashi Nishimura

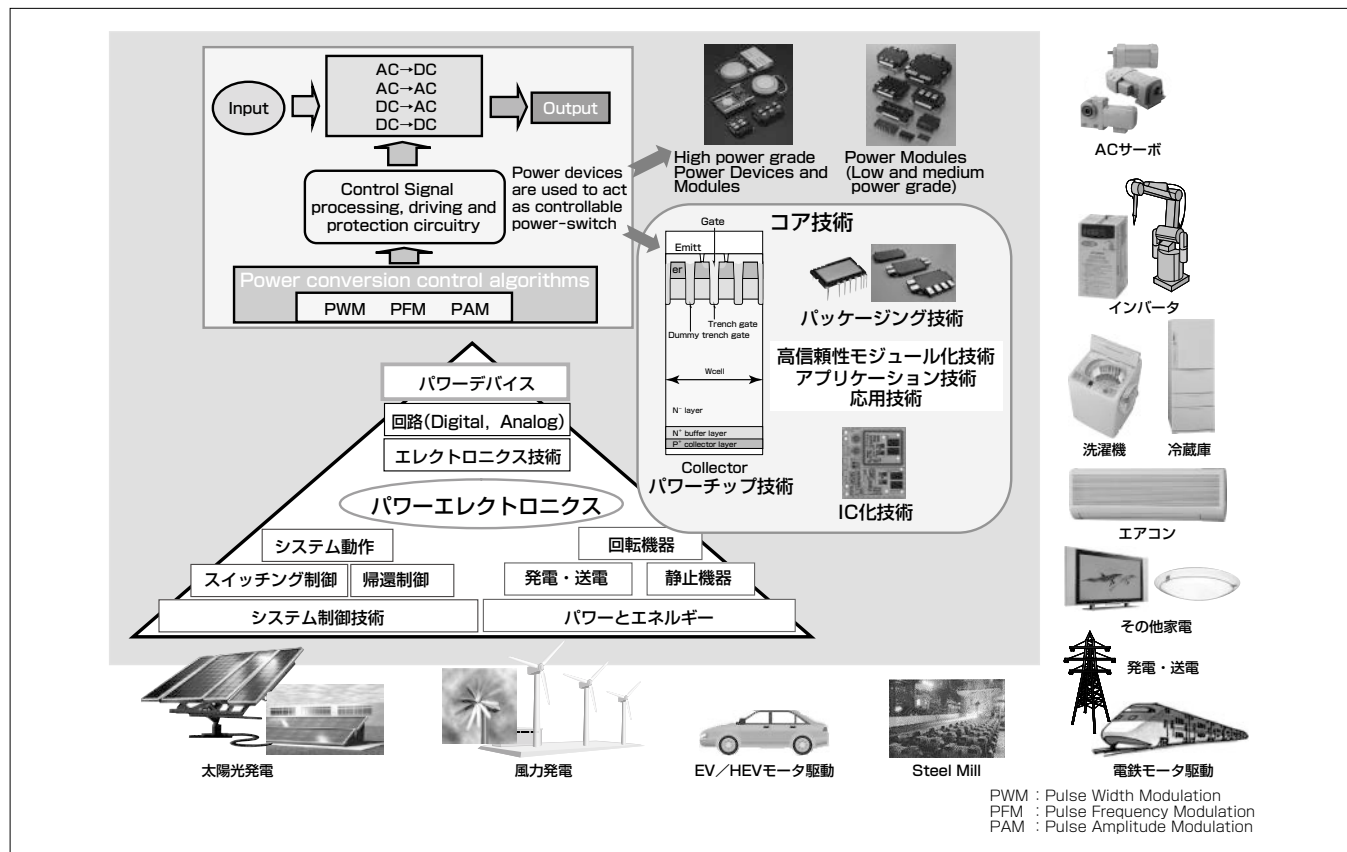
要 旨

地球温暖化・環境汚染・エネルギー問題は、人類にとって最も重要な課題となっている。環境保護のため資源とエネルギーを高度利用することが重要な課題であり、その解決のためには、電力分野で、高効率で低消費電力の家電機器及び産業装置の開発、風力発電・太陽電池・燃料電池などクリーンエネルギーを電力源とする発電システムの開発、ハイブリッド電気自動車(HEV)やピュアー電気自動車(EV)など超低燃費の新しい自動車の開発などが必要不可欠であり、パワーエレクトロニクス技術の展開とそのキーパーツであるパワーデバイスの果たすべき役割は重要である。これらシステムに適用されているパワーデバイスは、数アンペアの低電流領域から数千アンペアの大電流領域まで及んでいる。また、太陽光発電や風力発電などのクリーンエネルギーへの応用も拡大している。このような適用分野の広がりに対応して三菱電機のパワーデバイスも大きな

発展を遂げており、今後も継続的な進化が期待されている。

特にIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールやIGBTと駆動回路と保護・制御の周辺回路を最適な構成で一つのパッケージに組み込んだ高機能・小型のインテリジェントパワーモジュール(IPM)の技術革新は目覚ましく、今日では数十ワットから数十メガワット領域のパワーエレクトロニクス装置で、電力損失を大幅に低減し、省エネルギーの電力変換効率向上に大きく寄与している。

またパワーモジュールは、IGBTやダイオードなどパワーチップの高性能化だけではなく、新パッケージ技術や周辺回路機能の集積化に最適なHVIC(高電圧集積回路)などの技術ポテンシャルを駆使し、パワーエレクトロニクス機器の応用分野の拡大につれて、様々な応用ニーズに対応しつつ、進化し続けている。



パワーエレクトロニクス技術の概念とパワーデバイスの重要性

IGBTモジュールやIPMは、産業用のモータ制御や電源、インバータ家電、太陽光発電、電車や自動車など幅広い分野のパワーエレクトロニクス領域で使われている。パワーエレクトロニクス装置の省エネルギー化や小型化、高性能化の実現のためパワーデバイスに対する期待は大きい。

1. ま え が き

現在、人類の存続に大きな危機感を与えている最も重要なグローバルな課題は地球温暖化や環境汚染であり、消えていく化石リソースなどの問題も加え、エネルギーの有効利用が日常生活まで直結する時代になってきた。それに伴い、特に電気エネルギー分野の技術開発が世界的な話題となっている。家電の省エネルギー化、ハイブリッド車や電気自動車など新エネルギー自動車の開発、風力発電・太陽光発電など再生可能エネルギーの実用化など、様々な国家レベルの開発研究が行われているが、それらイノベーションのカギを握るのが、パワーエレクトロニクス(PE)技術とその発展をコア技術として支えるパワーデバイスの進化である。資源とエネルギーを高度利用し、地球環境保護に、より早く貢献するためには、密接な関係にある両方の技術の継続的な発展が期待され、様々な分野で注目を集めている⁽¹⁾。

本稿の2ページに示した概念図は、省エネルギー・環境課題の解決に挑戦している応用システムとPE技術の基本的な仕組みに加え、コアテクノロジーとして重要な役割を果たすパワーデバイスとの密接な関係を示すものである。PEシステムの開発を進めるに当たって、最適な電力変換用ハードウェア及びソフトウェアの両面で多くの課題が発生するが、最も重要なのはシステムの心臓部として機能するパワーデバイスの選定である。以前は、パワーデバイスの開発はハードウェアを重視したデバイス単体としての性能改善が中心であったが、今日では、その開発方向は単なるデバイスの性能改善だけではなく、より高度な機能を内蔵したり、自己制御を可能としたりした、インタフェースの向上を図ったものになっている。このため、パワーモジュールの更なる技術発展が期待されている。図1に、密接に進んできたシステムニーズ対デバイスシーズの過去20数年間の主な動きを示す。この期間に、PE機器の発展として高効率・高性能化の追求とともに重要とされてきたのはパワー変換機のパワー密度向上である。これに対してIGBTモジュールやIPM製品群の世代交代が激しく進み、PE装置のパワー密度向上に大きく寄与した。今後、Si系IGBTやダイオードなど主力パワーデバイスの更なる高性能化、半導体ソリューションを追求するIPMの高機能化、又は新材料(SiCなど)適用のチップ技術などへの展開が期待されている。当社は、IGBTモジュールやIPMを含め、業界トップレベルのパワーデバイス技術の開発・実用化や、次世代デバイスの研究などを通じて、パワーデバイスの継続的な発展を目指して事業を進めている。

本稿では、パワーデバイス技術の主なトレンドについて述べる。

2. 主パワーチップ技術動向

PE機器の発展は、パワーデバイスの物理学やプロセス技術の革新やブレイクスルーによって加速され続けていると言っても過言ではない。

1980年代に製品化されたIGBTが、現在パワーデバイスの主役の座を占めている。このポジションをとることに当たって重要なポイントは、IGBTの技術発展である。図2に、当社IGBTチップの性能改善の経緯をFOM(Figure Of Merit)の相対値で示す。セル構造の微細化、プレナーゲート構造からトレンチゲート構造への移行、キャリア蓄積層を加えた新トレンチゲート構造デバイス(CSTBT)の適用及びリファイン化、ウェーハの薄厚化などの技術進歩によって、2009年に製品化した第6世代IGBTは第1世代品に対し、FOMが約12倍レベルまで改良している。

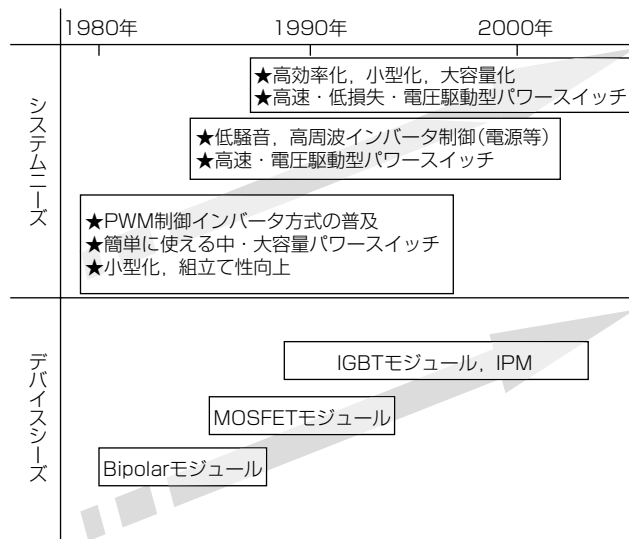


図1. システムニーズ対デバイスシーズの推移

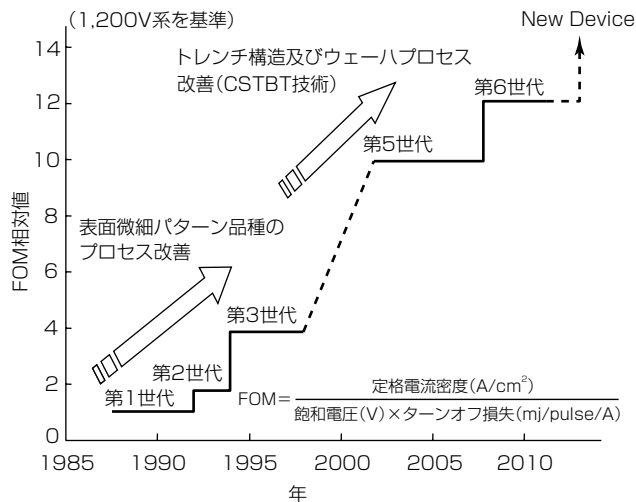


図2. IGBTのFOM改善

図3に、1,200V耐圧クラスの6世代IGBTのセル構造の特徴及び特性改善について第5世代との比較を示す。6世代IGBTはULSI(Ultra LSI)設備適用のプロセスによってウェーハ厚みの最適化に加え、セル構造の微細化やキャリア蓄積層の最適な形成などが特徴の新CSTBT構造の技術であり、飽和電圧 $V_{ce(sat)}$ 及びターンオフスイッチング損失(ターンオフ・スイッチング・エネルギー) E_{off} のトレードオフを大幅に改善したものである。また、第6世代IGBTの場合、電流密度の許容範囲も広がったことによって、従来の5世代IGBTに比べて、20%以上のFOM向上(図2)が実現できた。

また、インバータなど誘導負荷スイッチング用途で重要な回生機能の役割を果たすフリーホイール・ダイオードFWD(Free Wheeling Diode)についても、6世代IGBTチップ技術の発展に匹敵する新プロセスや構造を適用し、大幅な性能の改善を図った。図4に1,200V耐圧クラスの新しいダイオード(第6世代FWD)技術の特徴を示す。

この場合も、チップ断面図で示すように薄ウェーハ化がキーであり、FZタイプを用いて最適な縦構造を実現したことでオン電圧 V_F 及び逆回復動作損失(エネルギー) $E_{sw(rec)}$ のトレードオフを大きく改善することが可能となった。ま

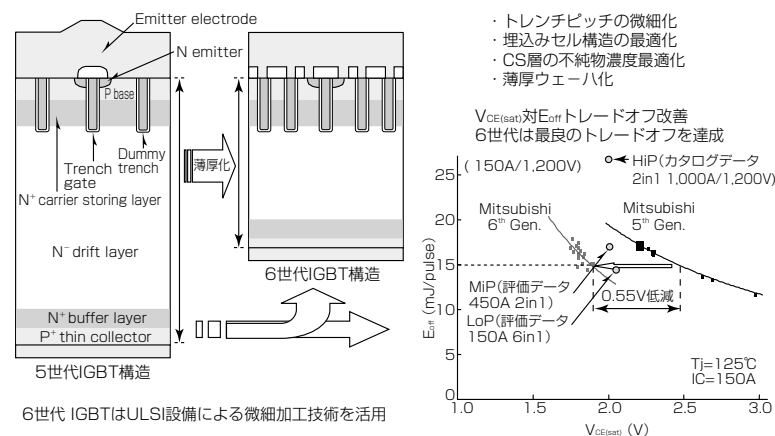


図3. 第6世代IGBTのチップ構造及び特性改善

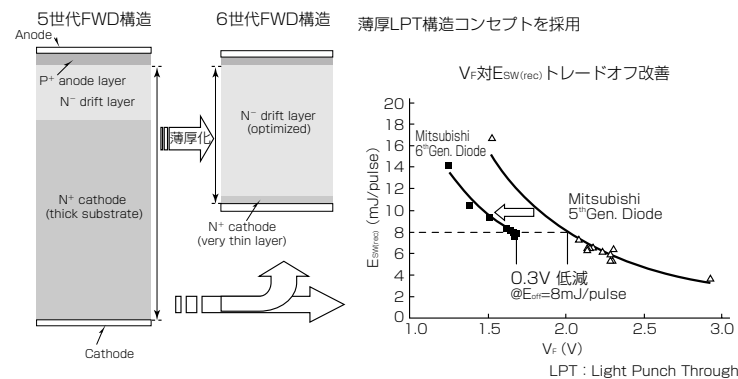


図4. 第6世代FWDのチップ構造及び特性改善

た、第6世代ダイオードのもう一つ大きな特長は、低負荷電流条件でも電流リングが抑制されたソフトな逆回復動作をすることであり、インバータなど応用装置のEMI(Electro Magnetic Interference)ノイズの低減に大きく貢献している。図5に最新IGBTモジュールのEMI評価結果の一例を示す。

低負荷電流インバータ動作条件でも、第6世代IGBT/FWDチップを適用した150A/1,200V定格の第6世代IGBTモジュールが従来品に比べて、EMIレベルは5dB以上(@40MHz)低減されていることが分かる。

また図6に示すように、インバータ実動作シミュレーション結果から150A/1,200V第6世代IGBTモジュールの総合動作損失(@10kHz)は、同第5世代タイプに比べて18%低減されていることが分かる。これら新世代の主要パワーチップ技術を適用することによって、IGBTモジュールの高性能化が進んでいる。図7にその概念を示す。第6世代IGBTモジュールシリーズのほとんどが、従来製品との互換性を重視して5世代と同一パッケージ構造を適用している。

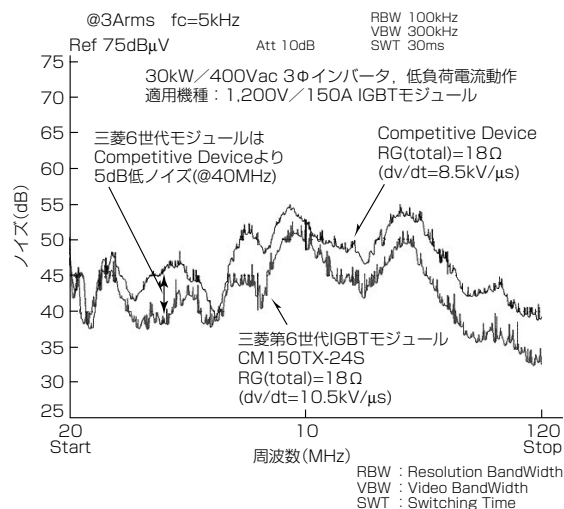


図5. 最新IGBTモジュールのEMIノイズ比較

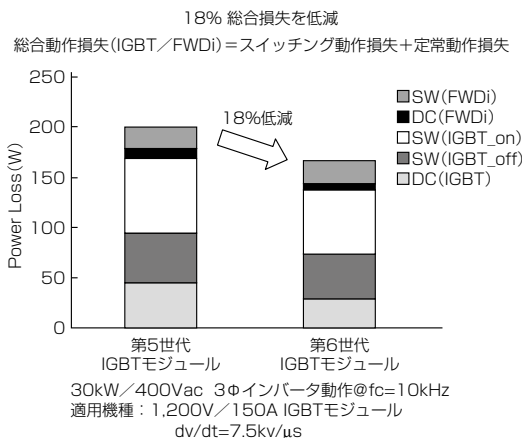


図6. 最新IGBTモジュールの損失比較

3. パワーモジュール高機能化動向

IGBTチップ及びその最適な駆動・保護機能をマルチチップ構成でコンパクトなモジュールパッケージに集積化した、当社独自コンセプトのIPMが、IGBTの発展に大きな役割を果たした。IPMはこれまで多くの応用分野で顧客の要求、悩みのソリューションとして発展してきたとともに、図8に示すようにパワーモジュールの二極化の流れを導いてIGBTモジュールとともに技術進歩を遂げてきた。

これらIPMは、パワーデバイスとして使用が簡便であるほか、市場での故障が改善されるなどを特長に、産業用インバータ、インバータ家電、電気自動車、電気鉄道など駆動システム用途に幅広く普及した。今後は周辺システム機能を最適な半導体集積技術を駆使してシステム化へ進もうとしている。IPMソリューションとして最も注目を集めてきたのは、インバータ家電や小容量モータドライブ応用の的確なソリューションと1990年代に生まれたDIPM (Dual Inline Package IPM) 製品群である。DIPM製品群は市場投入後、インバータ家電用途でデファクト品として成長し、省エネルギー化に大きく貢献した(図9)。今後、更なる高性能・高機能化に向けて成長し続けることが期待されている。

IGBTモジュールの展開

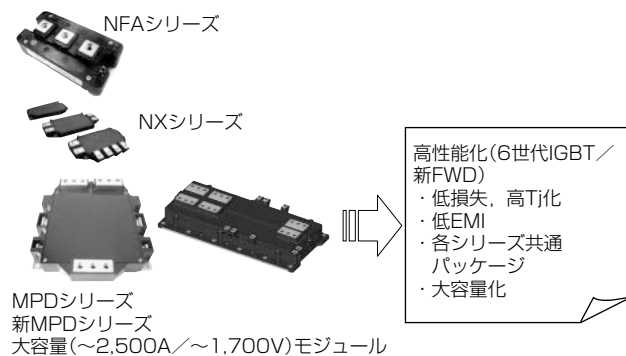


図7. 製品シリーズの展開

4. 新材料パワーデバイス

パワーデバイス材料として重要な物性で見れば、SiCはシリコン(Si)と比較し約10倍の絶縁破壊電界強度や約3倍のバンドギャップなどの特長を持つため、低オン損失で高温動作かつ、高速動作が可能な新世代の電力変換用スイッチング素子の実現に向けて希望を与えている。SiデバイスのPiNダイオードやIGBTなどバイポーラデバイスが使われている数kV級以上の応用領域では、SiCを用いたパワーデバイスとそれを応用したインバータの実現が切望されている。特にスイッチングデバイスであるSiC-MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)は、低損失性とスイッチング駆動の容易性から、その開発には大きな期待が寄せられている。

図10に発表したいくつかのSiCデバイス(nチャネル形MOSFET及びSBD(Schottky-Barrier Diode))のオン抵抗率と降伏電圧の関係を、次の関係式から求めた理論限界との比較で示す。

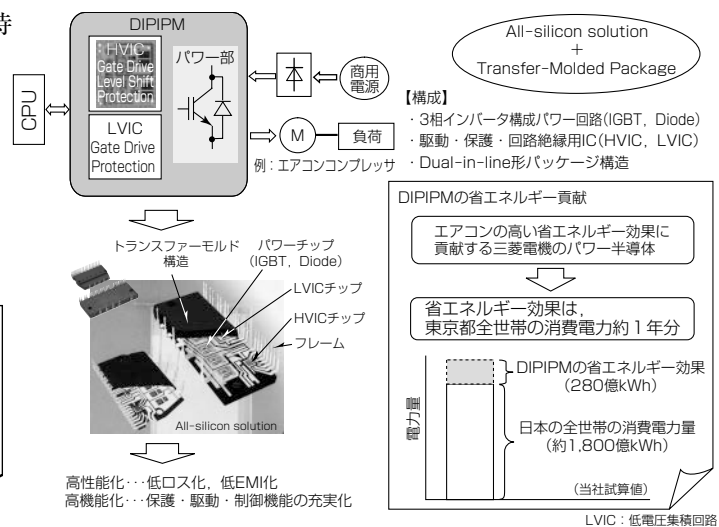


図9. DIP-IPMの特長と省エネルギー化への貢献

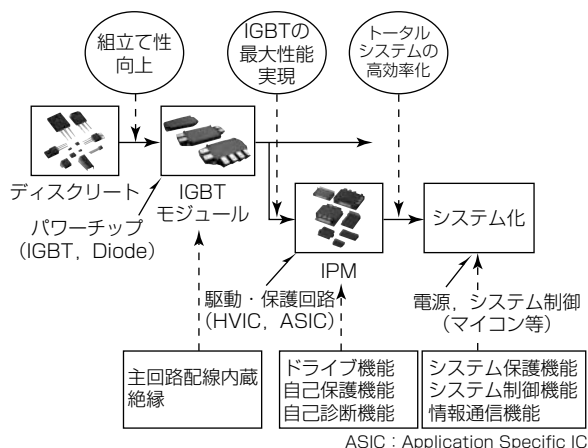


図8. パワーモジュールの高機能化のトレンド

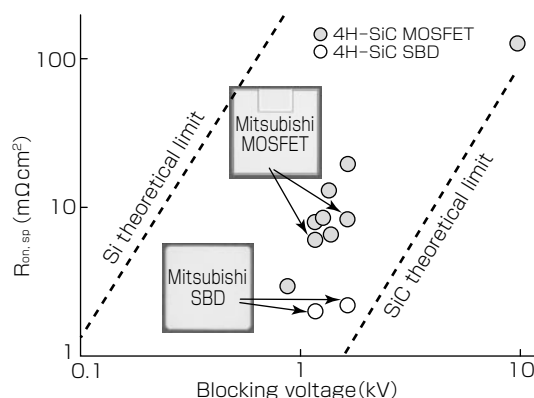


図10. SiCデバイスのオン抵抗の低減

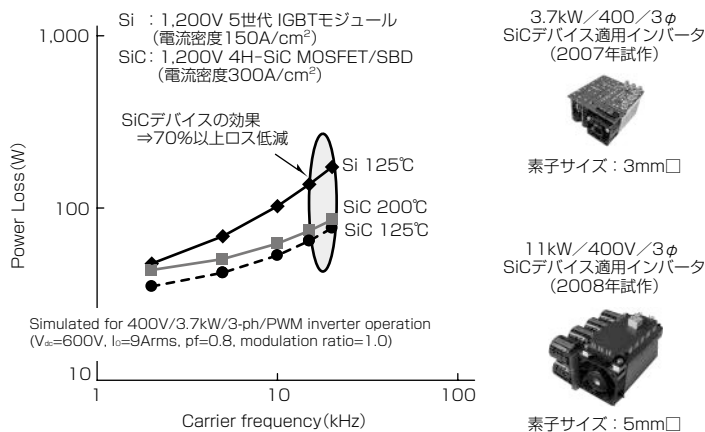


図11. SiCインバータ試作と実動作評価

$$R_{on, sp} = W/q\mu_n N_D = 4V_B^2 / \epsilon_r E_c^3 \dots\dots\dots (1)$$

(for unipolar one-sided step junction devices)

- $R_{on, sp}$: Specific ON-resistance (オン抵抗)
 W : Depletion Width (空乏層幅)
 q : Elementary Charge Value (電子の電荷量)
 μ_n : Electron Mobility (電子の移動度)
 N_D : Drift Layer Doping (ドリフト層ドーピング濃度)
 V_B : Breakdown Voltage (絶縁破壊電圧)
 ϵ_r : Dielectric Constant (誘電率)
 E_c : Critical Electric Breakdown Field (絶縁破壊電界)

さらに図10に当社が研究を進めている4H-SiC材料適用した1,200V及び1,700V耐圧クラスの大電流量型MOSFET及びSBD試作チップの最新特性も示す。また、図11にこれら試作チップを採用して試作した高パワー密度の高周波SiCインバータを示す⁽²⁾⁽³⁾。図に示すグラフは、実動作における動作周波数対損失特性の比較であるが、従来のSiモジュール(IGBTとPiNダイオードの構成)に比べ、SiCモジュール(MOSFET及びSBDの構成)の損失が大幅に低減していることが分かる。また、SiCデバイスはその材料の特徴から高温動作に優れていることが知られているが、実装の形態ではデバイスのみならず、周辺材料・組立てに関する高度な技術開発も重要な課題である。図12に高温動作対応のSiCモジュール構造のイメージと、高温動作を実現するに当たっての技術課題解決のポイントを示す。

SiCデバイスを使用することによって、インバータなど様々なPE装置の高効率化を実現できる。また、パワー密度の大幅な向上や動作周波数の高周波化による周辺回路部品の小型化や、冷却システム的大幅な簡素化などのメリットを生かして応用装置の革新的な技術進歩が得られるため、様々な応用分野で大きな省エネルギー効果を得ることが可能となり、地球環境問題への対応として大きく貢献できると考えられる。

5. む す び

環境保護対策が重要になるにつれ、省エネルギー化やクリーンエネルギーをリードするパワーエレクトロニクスと

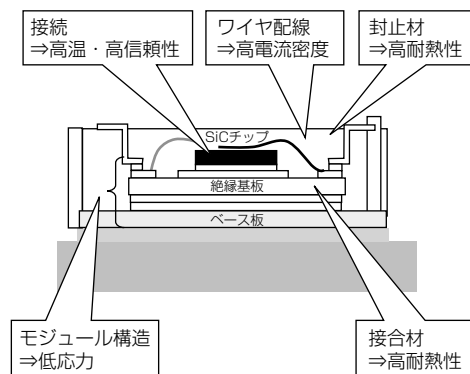


図12. 高温動作対応SiCモジュールの構造と技術課題

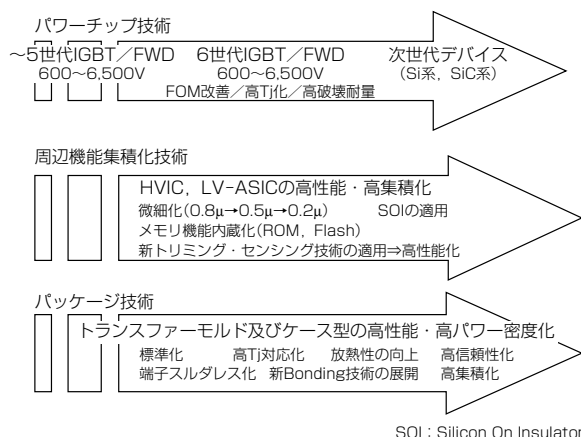


図13. 当社パワーデバイス技術の主なトレンド

そのキーパーツであるパワーデバイスはますます必要不可欠な技術になっている。パワーデバイス技術の発展は目覚ましいものがあり、パワーエレクトロニクス市場の拡大に伴う多彩な要求に対応した性能・機能・品質・信頼性及び使いやすさを追求した新デバイスが開発されている。

図13に当社が進めているパワーチップ技術、周辺機能集積化技術及び、パッケージ技術の三つのカテゴリーの主な技術トレンドを示す。パワーチップ技術に関して、シリコン系IGBTが主役の座を継続的に獲得しているが、将来的には、SiC(Silicon Carbide)を適用したMOSFETやSBDなど超低損失パワーデバイスの市場登場も予想されている。環境保護のために、これら技術を駆使した当社パワーエレクトロニクスの更なる発展がますます注目を集めていく。

参 考 文 献

- (1) Majumdar, G. : Power Modules as Key Component Group for Power Electronics', PCC Nagoya (2007)
- (2) Kinouchi, S., et al. : High Power-Density SiC Converter, ICSCRM Ootsu (2007)
- (3) 大森達夫 : SiCパワーデバイス技術開発の現状, Nikkei Micro-devicesセミナー, 東京 (2007)