

次世代パワーデバイスの動向を大電力化，低損失化，集積化，インテリジェント化の観点から述べる。

大電力化は，IGBT（絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）などを中心にキャリア分布の精密制御や新しい設計原理によるチップ面積の利用率向上とチップの並列ドライブに関心が向いている。低損失化は，MOS 駆動デバイスを中心に GTO (Gate Turn-Off thyristor) 並みの低オン電圧駆動が可能な新しいデバイスコンセプト (IEGT：電子注入促進型トランジスタ) が普及する。その結果，MOS 駆動デバイスの守備範囲は 4 kV 以上にまで拡大する。集積化では SOI (Silicon On Insulator) 技術が今後も重要になる。インテリジェント化では，出力波形をフィードバックさせ波形制御を行う能動型波形制御の方向に進展する。

This paper outlines future trends in next-generation power devices from the standpoints of higher power devices, lower power loss, power device integration, and intelligent power device functions.

Multichip parallel running concepts and efficient chip area utilization with new device design methods will become a major focus of interest in the progress of higher power devices, particularly in the field of IGBTs. In terms of lower power loss, a new MOS controlled device concept (IEGT) which realizes a low on-state voltage similar to that of GTOs will be widely used in the near future. The voltage coverage of MOS controlled devices will become more than 4 kV. SOI process technologies will be used as a key method of power device integration. And the active device driving method will become an important concept for the future progress of intelligent power device functions.

1 まえがき

21 世紀は，エネルギー消費や地球環境保全の問題解決と経済発展を両立させる“持続可能な発展”に人類がチャレンジする時代と言われている。“持続可能な発展”の観点から，21 世紀は今まで以上にエネルギーを電力で利用する時代となると予測されている。こうした時代背景のなかで，電力を発電，送電，貯電，消費するあらゆる場面で，電力を有効に利用するパワーエレクトロニクス技術は今後ますます重要になっていく。パワーエレクトロニクスのキーデバイスである次世代パワーデバイスはどのように発展していくのであろうか。

ここでは，次世代パワーデバイスの技術動向を，大電力化，低損失化，集積化，インテリジェント化の観点からシリコンデバイスを中心に述べる。

2 大電力化

ターンオフ電流の進展を例に，代表的なパワーデバイスの過去および将来の進展を図 1 に示す。GTO やサイリスタに代表されるパワーデバイスの大電力化は，シリコン結晶の大口径化による電圧・電流定格の増大の歴史を歩んできた。しかし，IGBT などを中心に最近のパワーデバイスは，“大電力化=ウェーハ大口径化”の図式から，パターン寸法

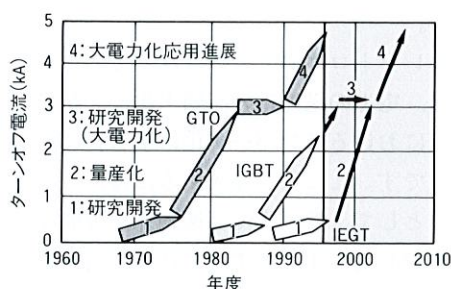


図 1. パワーデバイス大電力化の進展 代表的なパワーデバイスである GTO, IGBT と今後の主流となる IEGT の大電力化の進展を示す。

Evolution in current ratings of high power devices

の微細化や少数キャリア寿命の精密制御，新設計原理の導入などによりチップ面積を有効に使い，取扱い電力を増やす方向に変化している。

こうした動向を念頭に，主流パワーデバイスの大電力化の動向を考察する。

2.1 光トリガサイリスタ (LTT)

いくつかの解決すべき問題もあるが，技術的には結晶およびデバイス技術ともに現在の 6 インチから 8 インチ化は可能であろう。むしろ経済性が優先され，当面は 6 インチデバイスでの損失改善により，実質的に扱える電力の増加が進む。かつて中性子照射技術によりウェーハの比抵抗の面内均一性が大幅に改善され，サイリスタの高耐圧・大電

力化の大きな引き金になった。最近活用されているプロトン照射による少数のキャリア寿命の局所制御技術は、LTTに限らず、パワーデバイスの損失低減に大きく寄与している。

2.2 GTO

ゲート電極とドライブ回路をくふうし、ゲート電流利得を1以下で駆動すると、大電力化の際、GTOの弱点であった最大遮断電流を向上できる。また、キャリア分布の最適化設計によるGTOの低損失化も進んでいる。こうした最近の技術進歩を取り込みながら、送配電用の自励型インバータなど大電力分野への適用をにらんだ大電力GTOの検討が進む。

2.3 IGBT

当社は、ノンラッチアップ型IGBTの発明により、80年代前半に世界に先駆けてIGBTの大電力化の道を開いた。以来、微細加工技術を積極的に導入し、IGBTの低損失化と大電力化を積極的に進めてきた。IGBTは、微細加工の制約から1チップ寸法は $\square 20\text{ mm}$ 程度だが、並列接続が容易なため、モジュール方式の採用で比較的安いコストで大きな電圧・電流定格が取れる。モジュールでの大電力化の問題点は、多数配線されるボンディングワイヤの信頼性や、内部の浮遊インダクタンスなどで、この面の改善に精力が注がれる。

一方、圧接構造は多数のチップを均一に押さえるくふうはいるが、上述のような問題点は少なく、特に高い信頼性が要求される高耐圧、大電流用途に有効である。今後、モジュール型と圧接型IGBTは、それぞれの特長を生かし、併存しながら大電力化が進む。

IGBTなど、大電力パワースイッチングデバイスが高速化するに従い、設計の自由度が少ないダイオードは、パワースイッチングデバイスと比べて高速化の限界が早く来る可能性がある。pn接合を基本にしたダイオードのキャリア分布の最適化技術を徹底追求し、スイッチングデバイスの性能向上に見合った、高速性・大電力化が今後も続けられる。

3 低損失化

スイッチングにより、電力を自在に高効率変換するパワーデバイスは、動作時の損失が少ないほど、より理想的な電力変換が可能になる。その意味で、パワーデバイスの歴史は、低損失化の歴史とも言える。

図2は、代表的なパワーデバイスのオン電圧決定因子の模式図である。スイッチング損失を犠牲にしないで、これらの通電損失決定因子を小さくすることが、パワーデバイスの最重要課題である。図2(a)のMOSFET(MOS型電界効果トランジスタ)のオン電圧は、基本的にはチャネル抵抗 R_{ch} と活性層抵抗 R_A で決まる。図2(b)のIGBTのオン電圧

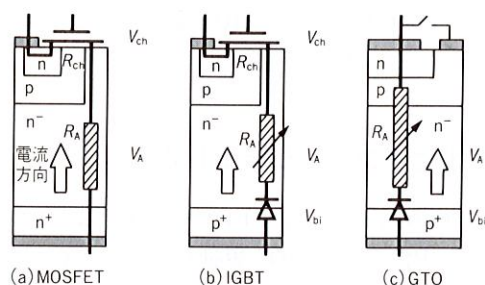


図2. パワーデバイスのオン電圧決定因子の模式図 MOSFET, IGBT, GTOの導通損失を決定するpn接合部, nベース部, MOSゲート部のオン電圧を模式的に示す。

On-state voltage factor of three types of power devices

は、 V_{ch} と V_A の和に加えてアノード側のpn接合のしきい値電圧 V_{bi} で決まる。図2(c)に示すGTOは、 V_A と V_{bi} の和で決まる。 V_{bi} はpn接合固有のしきい値であり、シリコンでは0.7V前後の値である。

3.1 パワー MOSFET

活性層に蓄積キャリアをもたないMOSFETは高速性に優れているが、高耐圧化すると R_A が急激に大きくなるため、 R_A が問題にならない数100V以下が主要な用途である。この電圧領域のMOSFETの低損失化にはチャネル密度を上げ、単位面積当たりの R_{ch} を減らすことが有効である。そのため、現在は $1\mu\text{ m}$ 以下の微細加工技術を使い、ゲートをチップ内部に埋め込むトレンチゲート型が実用化され、 R_{ch} のさらなる低減が進む。トレンチゲートはMOSFETだけでなく、今後、主流になるMOS駆動パワーデバイス低損失化のキー技術として発展していく。

3.2 IGBTの限界とIEGT

第一世代、第二世代、第三世代と続いたIGBTの低損失化はチップ表面ゲート構造の微細化により実現した。600Vの場合、第三世代でオン電圧は半減した。トレンチゲートを使う第四世代ではオン電圧はさらに低減するが、1kV以下のIGBTではオン電圧の低減は V_{bi} で決まる原理限界に近づきつつある。この領域では V_{bi} が問題にならない新デバイス構造の検討など、新たな原理的チャレンジが行われる。

1kV以上の高耐圧領域では、IGBTのオン電圧に占める V_A の割合が大きくなるので、活性層のキャリア分布を最適化して V_A を下げ、高耐圧化をねらう努力も続けられている。しかし、活性層のカソード側に原理的にキャリア蓄積が少ないという、従来のIGBTの最大の欠点を克服することは難しいため、新しいデバイス構造も盛んに研究開発されるようになってきている。当社は、優れた電流遮断能力などIGBTの長所を損なうことなく、4kV以上の高耐圧でも、GTO並みのオン電圧ができる新型MOS駆動デバイス、IEGTを開発した。この新型デバイスは高耐圧領域だけでなく、図1に示したように、より損失の低いパワーデバイスとして、中

電力領域から大電力領域まで MOS 駆動パワーデバイスの応用範囲を広げていく役割を果たす。

4 集積化とインテリジェント化

微細化技術の進展と、MOSFET や IGBT などパワーデバイスが IC と相性のよい MOS 駆動パワーデバイスになったことで、価格面からも、パワーデバイスとドライブ回路を 1 チップまたは 1 パッケージ化することが容易になった。

現在、省エネルギーの観点から、市場拡大がもっとも期待される家庭内のパワーエレクトロニクス利用機器（エアコン、洗濯機、冷蔵庫など）や各種モータドライブなどの分野で、パワー部とドライブ部を集積化した 1 チップのパワー IC のニーズが広がっている。このようなニーズに対し、高耐圧パワー部と低電圧ドライブ部を集積化する技術として、当社が有効性を示したウェーハどうしを絶縁層を介して直接接着する SOI ウェーハ技術が、今後さらに重要になる。

高耐圧部と低電圧部を絶縁層で分離できる SOI プロセスは、工程数が少なく、低価格化が期待でき、パワー IC に最適である。すでに SOI プロセスによる 500 V/1 A 出力の 1 チップ三相インバータが実現している。また、SOI パワー IC は、絶縁体素子分離技術を活用できるため、従来の pn 接合素子分離に比べ、集積化に伴う寄生デバイスの障害がほとんどない。その結果、従来技術では集積化が困難な高速ダイオードや IGBT などの低損失デバイスが初めて集積化が可能になった。さらに、SOI パワー IC は原理的に高温動作（例えば 200°C 動作）が可能であり、熱による電流定格限界も乗り越えようとしている。100 V から 1,200 V の電圧領域で、これらの特長を活用した SOI パワー IC の高性能化が進む。また、数 A から数 10 A の中出力電流領域では、SOI ドライバ IC と、個別パワーデバイスをマルチチップ構成で 1 パッケージ化するなどパワー IC 技術の適用拡大の努力が続けられる。

集積化に加えて注目すべきパワーデバイスの動向の一つはインテリジェント化である。従来、パワーデバイスのスイッチング波形制御は図 3 に示すように、ゲート抵抗値 (R_g)、デバイスの内部寄生容量 (C_{ce})、主回路の配線インダクタンス (L) で決まる受動的波形制御であった。過電圧、過電流を検出しデバイスを保護したり、スイッチングのノイズを打ち消すインテリジェント機能をもつ回路を組み込んだドライブ IC を内蔵するモジュールが出現している。

今後は、図 3(a)の従来デバイス制御法に代わり出力波形をフィードバックし、積極的に波形制御する能動的波形制御技術が発達していく。能動的制御技術の進展により、用途に応じたスイッチング損失の最適化、EMC（電磁環境）対応、複数ゲート制御によるマルチ動作モードデバイスなども可能になる。当社は、マルチモード動作をする新型デバ

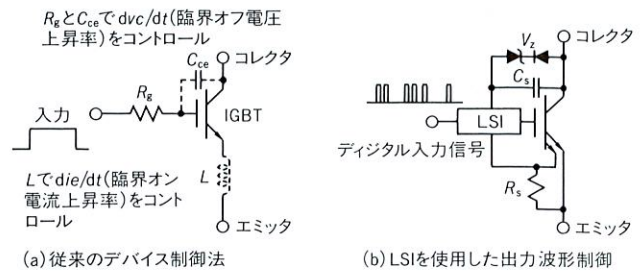


図 3. LSI を使用したパワーデバイスのゲートドライブの概念 従来の受動的出力波形制御から、基準クロック回路、通信回路、波形発生回路、制御電源などを内蔵する LSI によりデジタル信号だけで制御する新しいゲートドライブに進展していく。

Future gate drive system using LSI for power device

イスとして、2 ゲートを使い IGBT モードでターンオフできる MOS 駆動サイリスタ IGTT (IGBT mode Turn-off Thyristor) の開発をしている。

さらに、図 3(b)に示すように基準クロック回路、通信回路、波形発生回路、制御電源などを内蔵する LSI をもち、デジタル入力信号だけで完全に負荷を制御するインテリジェントモジュールへの進展も視野に入ってきた。

5 あとがき

シリコンパワーデバイスを中心に、次世代パワーデバイスの動向を、大電力化、低損失化、集積化、インテリジェント化の観点から考察した。微細加工技術の深耕、キャリア分布の精密制御、能動型波形制御に代表される回路技術との相乗効果の利用した高性能化、パワー集積化技術など基本手法を使い、シリコンパワーデバイスのさらなる可能性追求が、今後も 10 年以上は続くともてよい（図 1 参照）。一方で、10 年先を見て、シリコンカーバイトなど、シリコンの限界を突破する新材料デバイスや、新しい原理によるデバイスの研究も盛んになる。冒頭に述べたように、エネルギーの有効利用の観点から、21 世紀に向けてパワーデバイスの重要性はますます大きくなる。このような要請に答えるため、研究開発を今後も強力に進めたい。



大橋 弘通 Hiromichi Ohashi, D.Eng.

研究開発センター 材料・デバイス研究所 技監、工博。
パワーデバイスの研究開発に従事。電気学会、IEEE 会員。
Materials & Devices Research Labs.



杉本 隆 Takashi Sugimoto

半導体事業本部 技監。
バイポーラ LSI、ディスクリットデバイスの開発に従事。
Semiconductor Group