

エネルギー利用率の向上に寄与する半導体デバイスの歩みと今後の動向

Trends in and Future Outlook for Semiconductor Devices with Enhanced Energy Efficiency

山口 正一 ■ YAMAGUCHI Masakazu
 小野 省司 ■ ONO Shoji
 羽田野 渉 ■ HATANO Wataru

電力消費量の増大と二酸化炭素 (CO₂) 排出量の増加が、地球規模の課題となっている。電力需要の増加に対応しつつ省エネを図ることが求められており、発電から消費に至るまでの全過程で電気エネルギー利用率を向上させることが有効である。

東芝デバイス&ストレージ(株)は、モバイル・車載・産業用から電力変換用まで、多岐にわたる分野のキー部品として、多様なIC及びパワーデバイスの開発・商品化を推進しており、電気エネルギーの効率的な利用に寄与し、これらの課題の解決に貢献している。

Among the issues that need to be addressed on a global scale are the growth in energy consumption and rise in carbon dioxide (CO₂) emissions. To conserve energy while meeting the increasing demand for electricity, it is necessary to improve energy efficiency at all stages from electric power generation to electricity consumption.

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation is promoting the development of various integrated circuits (ICs) and power devices as key parts in a broad range of fields, ranging from mobile, automotive, and other industrial applications to electric energy conversion equipment. We are making continuous efforts to supply such products in order to contribute to enhanced energy efficiency.

電力需要と有効利用

経済成長と人口増加に伴い、電力消費量は、世界的に増加し続けており、過去40年で3.8倍になっている(図1(a))¹⁾。電力消費量を大きく増加させているのは、多くの発展途上国を含むアジア、その他(中東や中南米など)の地域であり、そこでの経済成長と人口増加は、今後も継続することが予想されている。また、インターネットや通信技術の発展とスマートフォンやタブレットの普及により、ネットワーク通信量も爆発的に増加している。2021年には、モバイルデータ通信量は2016年の7倍になると予測されている(図1(b))²⁾。これに伴って、ネットワークセンターや端末での電力消費量も急速に増加している。更に、ハイブリッド自動車や電気自動車の普及も加速している。このようなことから、今後、更に電力需要が増加していくことは間違いない。

一方、地球温暖化をはじめとする環境・エネルギー問題の対策として、エネルギー形態を化石エネルギーから電気

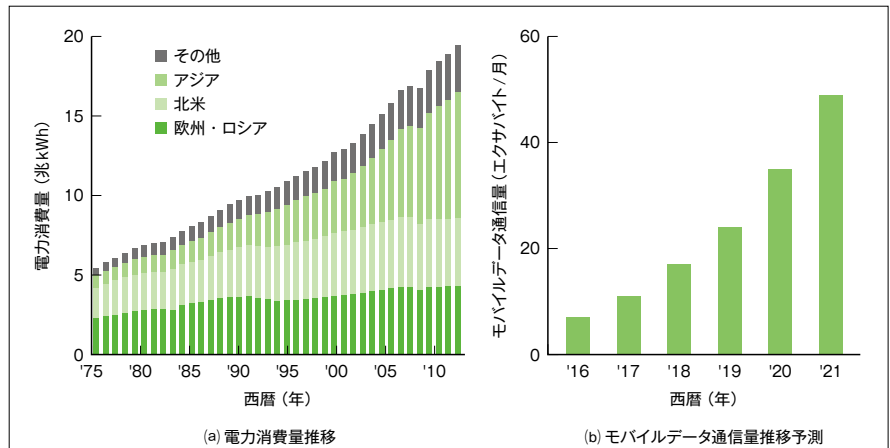


図1. 世界的な電力消費量とモバイルデータ通信量の推移 — 経済成長、人口増加、及び技術発展に伴い、電力消費量は増加し続け、データ通信量も急増すると予測されている。
 Worldwide trends in electricity consumption and mobile data traffic volume

エネルギーにシフトさせる動きが活発化しており、太陽光・風力・水力発電などの再生可能エネルギーの導入が進んでいる。しかし、再生可能エネルギーの発電システムを増設していただくだけでは、この需要の増加に対応することは不可能である。

このような背景から、電気エネルギーの有効利用率を改善し、結果的に発電

量の増加と同様の効果が得られるネットワーク、若しくはネガジュールと呼ばれる考え方が注目されている³⁾。具体的には、発電から最終利用までに行われる、様々な電気エネルギーの変換効率をシステムの制御方法や素子によって改善するものであり、多くの半導体回路技術、半導体部品が用いられている。

ここでは、電気エネルギーの有効利

用に向けたシステムトレンドとそれを実現するための、半導体デバイスのトレンドについて述べる。

システムトレンド

電気エネルギーの有効利用に向け、システムの高性能化が加速しており、キー部品である半導体への要求も厳しさを増している。ここでは主要なエネルギー利用分野として、モバイル・OA、車載・産業、及び電力変換の3分野を取り上げ、システムのトレンドと半導体への要求について述べる。

■モバイル・OA分野

携帯電話やスマートフォンに代表されるモバイル機器は、出荷台数の増加もさることながら、高機能化や高付加価値化の進展が著しい。

通信方式ではLTE (Long Term Evolution)-Advancedが普及し、従来の3G (第3世代) 通信に対して大容量の高速通信を可能としている。また、複数の周波数を組み合わせてデータ通信を高速化するキャリアアグリゲーション (CA) や、2020年の5G (第5世代) 通信の商用化開始など、超高速通信の普及が進む (図2)。

これに加え、CMOS (相補型金属酸化膜半導体) センサーの高画素化やデータスループットの高速化が進み、バッテリー容量の増加に伴う急速充電の普及や、ストレージ、メモリーの大容量化、データ転送の高速化も進む。

このような高機能化のトレンドを受け、電源ICには大電流化だけでなく、システムを構築するICの微細化に対応した、ノイズ除去性能、出力電圧の変動を抑える高速負荷応答特性、及び電源IC自身の低損失性などが求められている (この特集のp.8-10参照)。

将来的には、IoT (Internet of Things) の発展に伴い、ウェアラブルデバイス、センサーアレイといった新たな関連応用が創出され、それらの高効率な電力利

用に向けたICとその制御技術が求められる (同p.24-30参照)。

OA機器では、国際的な省エネ制度として、1995年に国際エネルギースタープログラムが始まり、今では世界九つの国と地域に広がっている。この適合認定対象には、コンピューター、プリンター、複合機などのオフィス機器、及びそれらの外部電源に加え、テレビや、エアコン、照明器具なども含まれる。製品群ごとに基準が定められており、これに対応するICやパワーデバイスの低損失性が求められている (同p.18-23参照)。

■車載・産業分野

エネルギー利用率の向上に対し、自動車の車載機器、サーバーや通信機器と

いった産業用機器においては、電源部の高効率化及び小型化に対する要求が強い。

自動車では、①環境配慮 (CO₂排出量削減)、②省エネ (燃費向上)、③予防安全 (交通事故防止) に対する技術向上を軸に新車開発が進められている。また、これらの要求を実現するため、より高度な制御が可能となる電子制御ユニット (ECU) の搭載が増加している (表1)。

このようなシステムトレンドを受け、電源部のキー部品である車載用パワーデバイスには低損失化と小型化が継続的に求められている。特に、モーター制御、電子スイッチに用いられる低耐圧パワー MOSFET (金属酸化膜半導体型電界効果トランジスター) や保護機能

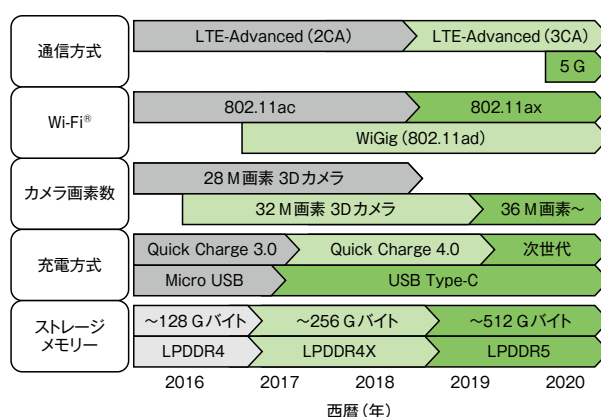


図2. モバイル機器の仕様の変遷 — モバイル機器では、高機能化・高付加価値化の進展が著しい。
Trends in specifications of mobile devices

表1. 車載機器に対する要求の動向

Trends in requirements for automotive applications

		2015~2020年	2020~2025年	2025~2030年	
環境	燃費規制	EU	130 g/km	95 g/km	70 g/km
		米国	15.1 km/L	→	23.2 km/L
		日本	18.6 km/L	20.3 km/L	→
安全快速	自動ブレーキ	法規	自動ブレーキ導入	自動運転との融合	
			衝突回避 (EuroNCAP)		
	自動運転	レベル2 (部分)	レベル3 (条件付き)	レベル4 (高度)	
	ヘッドランプ	LEDヘッドランプ		レーザーヘッドランプ	
ECU平均搭載数 (車両1台当たり)		≒20個	≒30個	≒35個	

EU: 欧州連合
EuroNCAP: European New Car Assessment Programme
LED: 発光ダイオード
*日経 Automotive「2030年までのロードマップ」⁴⁾の情報を参考に作成

付加したインテリジェントパワーデバイス (IPD) の性能改善が要求されている。

一方、産業用機器では、電力変換効率に関する規格の一つとして80PLUSがあり、性能によってグレードが分類される。この規格も影響し、サーバーや通信機器用電源ユニットでは高効率モデルが増加傾向にある。

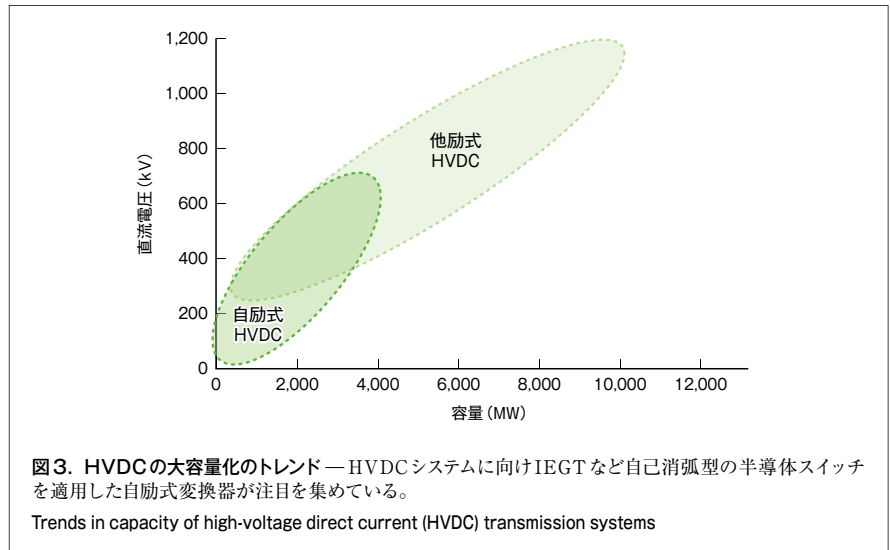
電源を回路ユニット別に見ると、整流部はダイオード、PFC (Power Factor Correction : 力率改善) 回路部は高耐圧MOSFETとダイオード、DC (直流)-DC変換部は高耐圧及び低耐圧MOSFETにより構成され、これらのデバイスの低損失性と高放熱性が求められている。

■電力変換分野

電力需要の増加には発電システムの増設と電気エネルギーの有効利用という両面での対応が必要であるが、この発電と利用の間をつなぐ役割を果たすのが電力変換システムである。大電力を扱う送配電設備では、システムの大容量化が、中規模の電力を扱う新エネルギー、鉄道分野では、小型化や高効率化の要求が技術を牽引(けんいん)している。

このうち、高圧直流送電 (HVDC: High Voltage Direct Current Transmission) は、大容量で長距離の送電に適した方式として、大規模発電所から大都市への送電や海底ケーブルを使用した系統連系において、世界中で実用化が進んでいる。国内では北海道-本州間や紀伊水道などの直流連系設備が運転中である。更に洋上風力発電や砂漠地帯の太陽光・太陽熱発電など、大規模な再生エネルギーを大陸間で連系する構想も提案されている。

既存の交流送電網にHVDCシステムを導入する場合、交流から直流、直流から交流に変換するため半導体スイッチを適用した交直変換器が不可欠であり、その容量は数百kV級の高電圧・大容量となる。この交直変換器は従来、半導体スイッチにサイリスターを適用した他励式変換器が主流であったが、調



相設備や低次高調波フィルターなどの付帯設備設置面積が課題となっていた。このため近年は、IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) などの自己消弧型の半導体を適用した自励式変換器が注目を集め、中国を中心にその大容量化と他励式HVDCからの置き換えが進んでいる(図3)(同p.11-13参照)。

送配電と並んで技術進展の著しい分野が電鉄である。電鉄分野では装置体積や質量の削減に対する要求が強い。これには主変換装置を構成するパワーデバイスの低損失化、高周波化、及び周辺部品の小型化が有効であり、高温・高耐圧性能に優れた半導体材料としてSiC(炭化ケイ素)を用いたパワーデバイスの実用化が始まっている(同p.14-17参照)。

半導体デバイスのトレンド

ここまでは、モバイル・OA、車載・産業、電力変換の3分野におけるシステムトレンドを述べた。ここからは、それらを支えるキー部品である各種ICやパワーデバイスの技術進展について述べる。

■電源ICトレンド

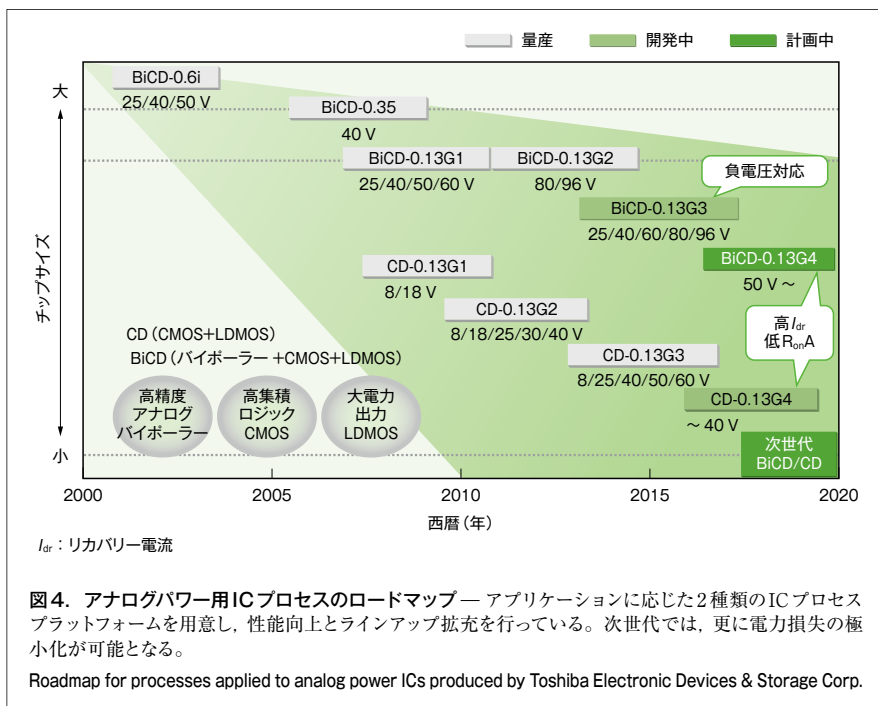
モバイル電源用デバイスでは、自身の消費電力を低減する低損失性が求められる。この消費電力は出力MOSFET

が流す電流と、入出力間(ドレイン-ソース間)電圧との積が大部分を占め、熱として失われる。消費電力を低減するには、出力MOSFETの定常損失(オン抵抗)を低減する必要がある。

オン抵抗を下げるにはMOSFETのサイズを増加させることが一般的であるが、ゲートに付随する寄生容量が増えることで発振耐性の悪化や電源ノイズ除去性能の低下を招くだけでなく、高速負荷応答特性が犠牲になる。これらの背反事項を解消しようとする、ノイズ抑制のための更なる面積増加や、高速応答のための駆動電流増加といった悪影響が避けられない。

このようなことから面積当たりのオン抵抗 $R_{on}A$ を低減するプロセス・デバイス開発が行われている。

一方、OA機器用のアナログパワーデバイスでは、アプリケーションに応じた要求仕様から、デバイス構造や混載可能素子の異なるICプロセスが必要となる。東芝デバイス&ストレージ(株)では、BiCD(バイポーラー+CMOS+LDMOS(Lateral Double Diffused MOS: 横方向二重拡散MOS))-0.13及びbCD(CMOS+LDMOS)-0.13の2種類のプロセスプラットフォームを用意した。BiCD-0.13プロセスは0.13 μm CMOSプロセスをベースにLDMOS、バイポーラートランジスタ、及び多様なアナログ素子



を混載している。CD-0.13プロセスはバイポーラトランジスタを廃止しコスト競争力を高めた。様々な製品要求に合わせて、プロセスの世代ごとに耐圧系拡大、デバイスラインアップ拡充、及び性能向上を図っている(図4)。

現在、次世代ICプロセスの検討を開始している。LDMOSの R_{onA} 低減と出力向上によりICの発熱抑制効果が著しく向上でき、電力損失の極小化が可能となる(この特集のp.21-23参照)。

■パワー MOSFETトレンド

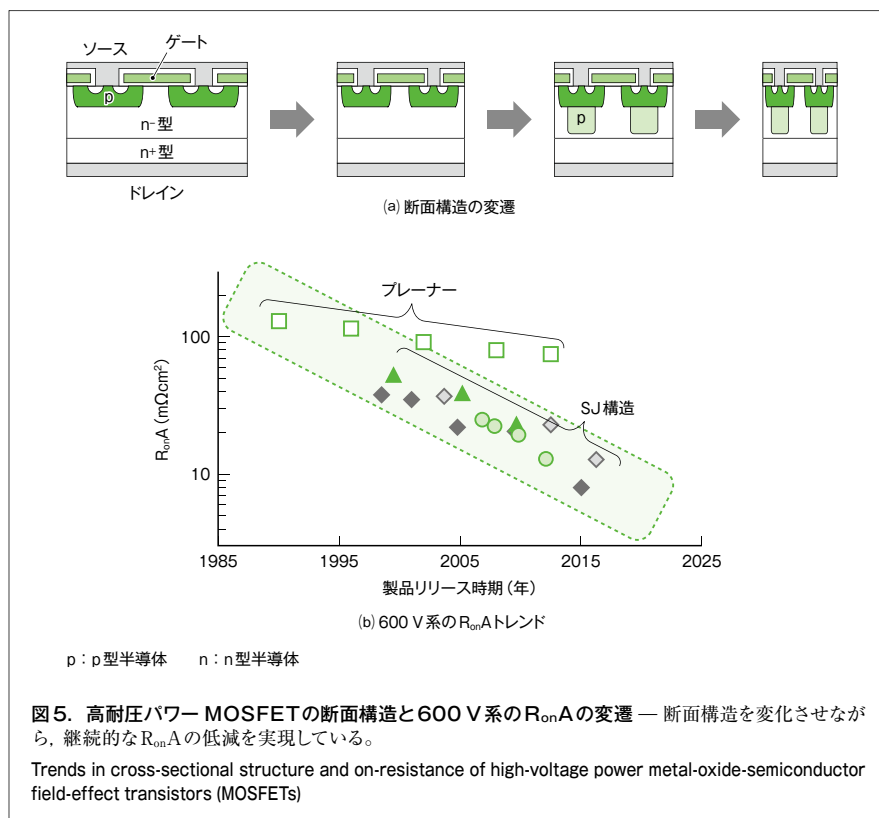
パワー MOSFETは、数10 Wから数kWまでと比較的電力容量が小さく、電源などシステムの小型化が優先される応用に用いられる。耐圧200 V辺りを境に低耐圧MOSFETと高耐圧MOSFETに分類される。

スイッチング素子として用いられ、高効率動作には、オン状態の損失とスイッチング時の損失の両方を低減することが求められる。このため、チップ面積が小さく、高速動作が可能な状態でも低オン抵抗が得られるという意味で、IC用デバイスと同様に R_{onA} が性能指標として用いられる。

通常、パワー MOSFETは、縦型構造を採用し、 R_{onA} は表面MOS部分の抵抗であるチャンネル抵抗と素子中央のドリフト抵抗が大部分を占め、ドリフト抵抗は耐圧が高いほど大きくなる。

このため、低耐圧MOSFETでは R_{onA} に対してチャンネル抵抗の占める割合が大きくなる。構造の変遷としては、LSIやメモリのプロセス技術を転用し、表面のプレーナゲートの微細化が進められた。次に、トレンチゲート構造が採用され、更に微細化が進められ、高密度ゲート構造が形成されるようになった⁽⁵⁾。

高耐圧MOSFETの変遷としては、当初、低耐圧MOSFETと同様に、先端プロセス技術を転用し、表面のプレーナゲートの微細化が進められた。その後、 R_{onA} の大部分を占めるドリフト抵抗低減のため、ドリフト層中に周期的なP型層を形成するスーパー Junction (SJ) 構造が採用され、その微細化が進められている(図5(a))⁽⁶⁾。これらの構造の変遷を経て、継続的に R_{onA} が低減され、低耐圧MOSFETの R_{onA} は15年で1/10に、高耐圧MOSFETの R_{onA} は20年で1/10に低減された(図5(b))⁽⁷⁾。このトレンドが続くと、Si(シリコン)デバイスの理論限界に到達してしまう。このため、大幅な低 R_{onA} 化が期待でき



る、GaN（窒化ガリウム）などの新しい材料を用いたデバイスが検討されている（[囲み記事参照](#)）。

IGBTトレンド

大容量の電力変換用素子では、オン電圧を始めとする低損失特性、高破壊耐量、高温動作、及び高信頼性が重要特性として要求されている。これらの要求を実現する自己消弧素子としてIGBT

（絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）が幅広く使用されてきた。IGBTはMOSゲート構造とダイオード構造を組み合わせたバイポーラ素子であり、大容量用途ではユニポーラ素子のMOSFETと比較して、大幅な低オン電圧化を実現できる。具体的には、裏面に形成されたP型コレクター層から正孔を注入して耐圧保持領域であるN型ドリフト層の抵抗を下げる電導度変調により、低オ

ン電圧を実現する。

当社は、IE（Injection Enhancement：電子注入促進）構造を導入し、その性能向上を進めることにより、大容量・低損失の素子を製品化してきた。IE構造は、エミッター側からの正孔流出を抑制し、エミッター側のキャリア密度を高めて、低オン電圧を実現する。電力変換で用いられる4.5 kV級素子として、従来のプレーナー型からトレンチ型を導入し、同

電気エネルギーの変換に用いられる半導体部品

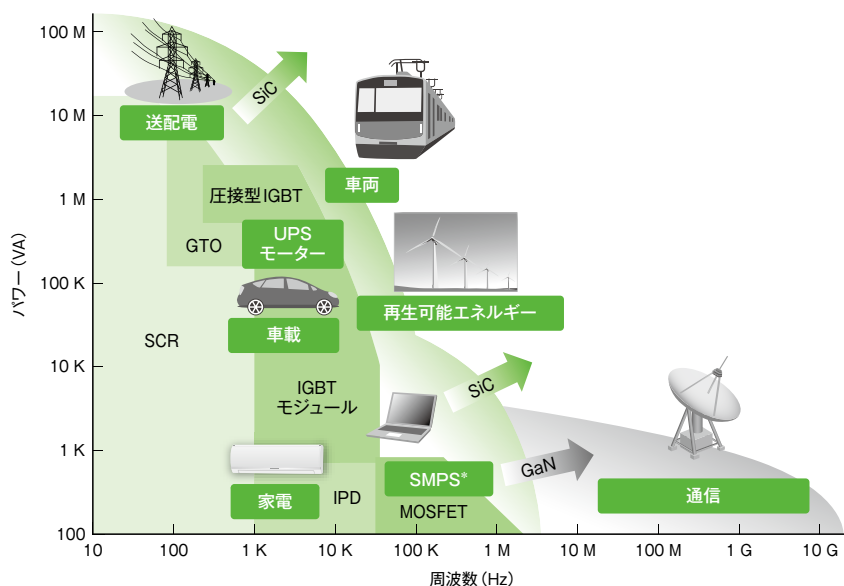
電気エネルギーは、発電所で創られてから家電や電気自動車、電車など最終利用に至るまで、電圧の大きさや直流／交流などいろいろな形に変換されながら、伝達・利用されている。例えば、発電所から伸びる電線を通る電気は、数kV～数10kVの交流、家庭やビルのコンセントから供給される電気は100Vや200Vの交流であり、スマートフォンや家電に内蔵されるマイコンなどは数Vの直流で動作する。このように電気を使用するために電力を変換する必要があり、その変換・制御する技術がパワーエレクトロニクスである。パワーエレクトロニクスでは、コイルやコンデンサーなどに一旦電気エネルギーを蓄えて、必要とする電圧や、DC、AC（交流）などの種別に半導体スイッチを用いて変換し、取り出している。

このときに用いられる半導体スイッチが、パワーデバイスと呼ばれる。パワーデバイスは、変換の際に印加される電圧に応じて、耐圧やデバイスの種類が異なる。取り扱う電力容量が大きいくほど、変換時に大きな損失が発生しやすいため、オン状態の電圧が低いIGBTなどのバイポーラ素子を低いスイッチング周波数で使用。エネルギーが小さいとシステムの小型化が優先され、パワーMOSなどのユニポーラ素子を高いスイッチング周波数で使用する（[図A](#)）。

パワーデバイスは、ゲート端子に入力信号が加わることでスイッチング動作させる。ゲート入力信号を発生するため、パワーデバイスごとにゲート駆動ICが必要である。

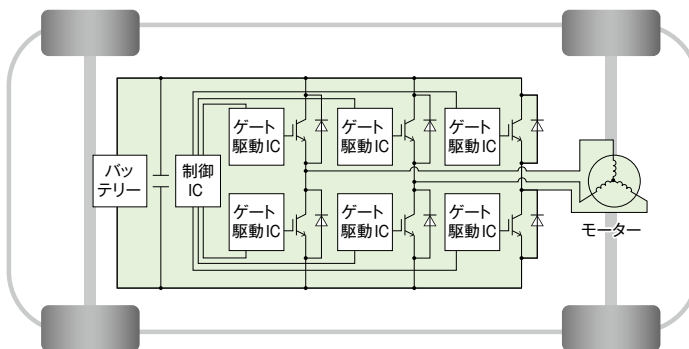
そして、システムに応じて適切なタイミングでスイッチング動作するようにゲート駆動ICを動作させる制御信号が制御ICから

出力される（[図B](#)）。このように電気エネルギーを変換するシステムには、多くの半導体部品が用いられている。

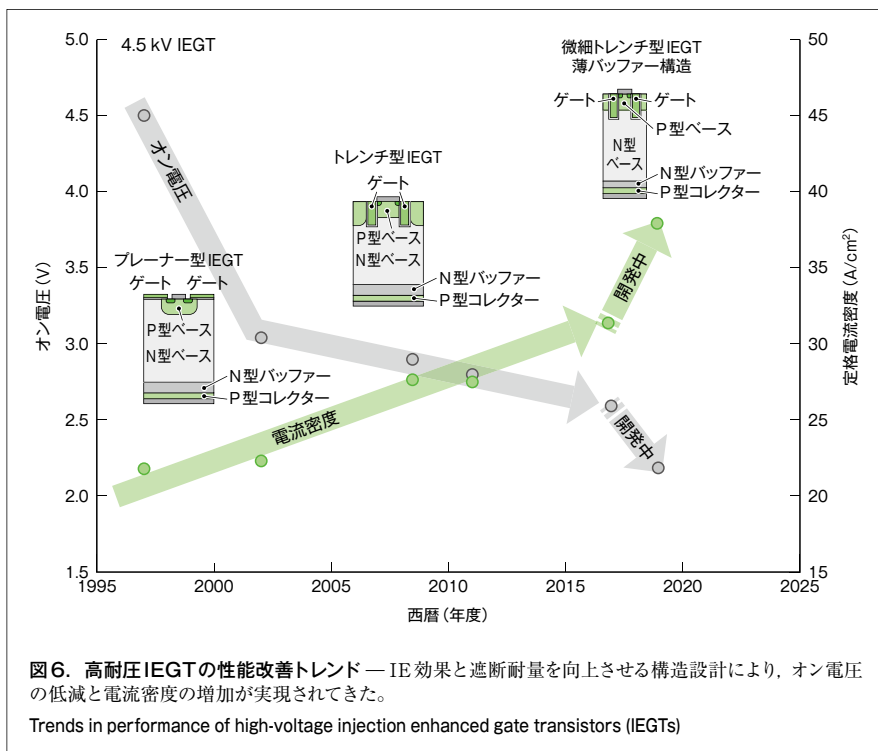


GTO：Gate Turn-Off Thyristor UPS：無停電電源装置 SCR：サイリスタ
*SMPS：スイッチモード装置

図A. 電気エネルギーを用いるシステムとパワーデバイス



図B. 電気自動車用モーターを動かすパワーデバイスとそれを駆動させるICの例



時にP型ベース配置を最適化することで、IE効果の向上を図った(同p.11-13参照)。これらセル構造の改良に加え、素子裏面のコレクター構造や高耐圧特性を得るための終端構造を最適化することで、遮断耐量を向上し、定格電流密度の増加を実現してきた(図6)。

大容量の電力変換分野では耐圧4.5kV以上のSi-IEGTがいまだに主流であり、引き続き、性能向上に向けた開発が進められている。一方、装置の小型化への要求が強い電鉄分野では、バイポーラ素子では得られない高速度を備えたSiCパワーデバイスの実用化が始まり、現在SiC-MOSFETの開発を進めている(同p.14-17参照)。

あとがき

省エネの推進には、高効率な電気エネルギーの利用に寄与するパワーエレクトロニクスの発展と、そのキーとなるIC、

パワーデバイスの技術進展が重要かつ不可欠である。応用システムの多様化と高度化が進む中、当社は、そのトレンドを的確に捉えて半導体の技術革新を進め、各システム要求にあったソリューションをタイムリーに提供し続けていく。

文献

- (1) 経済産業省 資源エネルギー庁. “平成27年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2016) PDF版”. 資源エネルギー庁ホームページ. <<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016pdf/>>, (参照2017-9-22).
- (2) Cisco. “Cisco Visual Networking Index: 全世界のモバイル データ トラフィックの予測、2016~2021年アップデート ホワイトペーパー”. Cisco Visual Networking Index. <https://www.cisco.com/c/ja_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>, (参照2017-9-22).
- (3) Ohashi, H. “Power device now and future, strategy of Japan”. Proceedings of the 2012 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Bruges, Belgium, 2012-06, IEEE, 2012, p.9-12.
- (4) 日経BP. 2030年までのロードマップ. 日経automotive. 2015, 2, p.56-59.

- (5) Williams, R. K. et al. The Trench Power MOSFET: Part I—History, Technology, and Prospects. IEEE Trans. on Electron Devices. 2017, 64, 3, p.692-714.
- (6) Udrea, F. et al. Superjunction Power Devices, History, Development, and Future Prospects. IEEE Trans. on Electron Devices, 2017, 64, 3, p.720-734.
- (7) Saito, W. Power device trends for high-power density operation of power electronics system. Jpn. J. of Appl. Phys., 2014, 53, #04EP02.

• Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの登録商標。



山口 正一
YAMAGUCHI Masakazu

東芝デバイス&ストレージ(株)
ディスクリット半導体事業部
ハイパワーデバイス技術部
応用物理学会会員
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



小野 省司
ONO Shoji

東芝デバイス&ストレージ(株)
ミックスドシグナルIC事業部
ミックスドシグナルIC応用技術部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



羽田野 渉
HATANO Wataru, D.Eng.

東芝デバイス&ストレージ(株)
ディスクリット半導体事業部
先端ディスクリット開発センター
博士(工学) 電気学会・応用物理学会・電子情報通信学会・米国電気学会会員
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.