

ディスクリート半導体の技術動向と展望

Trends in Discrete Semiconductor Technologies and Future Outlook

村上 浩一

■ MURAKAMI Koichi

ディスクリート半導体はコモディティ(汎用)商品の代表であり、その名が表すように家電から、モバイル、IT(情報技術)、自動車、産業やエネルギー関連に至るまであらゆる分野で使用されている。

東芝のディスクリート半導体事業は、パワーデバイス、小信号デバイス、汎用ロジック、及びオプトデバイスの四つの商品群から成り、常に新技術を取り入れて、たゆまぬ進歩を続け最先端商品を市場に提供し、顧客のニーズに応えてきた。

近年、気候変動が地球規模で極めて重要な問題となっており、当社は製造プロセスにおける二酸化炭素(CO₂)排出量抑制や商品の省エネ化を推進している。また、ディスクリート半導体のリーダーとして、革新的な製品やサービスを通じ、多岐にわたる市場分野に向けて多様なソリューションを提供し続けている。

Discrete semiconductors, which are considered to be typical commodity products, are used in various fields including consumer electronics, mobile devices, information technology equipment, automobiles, industrial equipment, energy utilities, and so on.

Toshiba has been developing discrete semiconductor products focusing on four categories: power devices, small signal devices, standard logic, and optoelectronic devices. To meet customers' needs, we are continuing our efforts to supply the most advanced products applying state-of-the-art technologies.

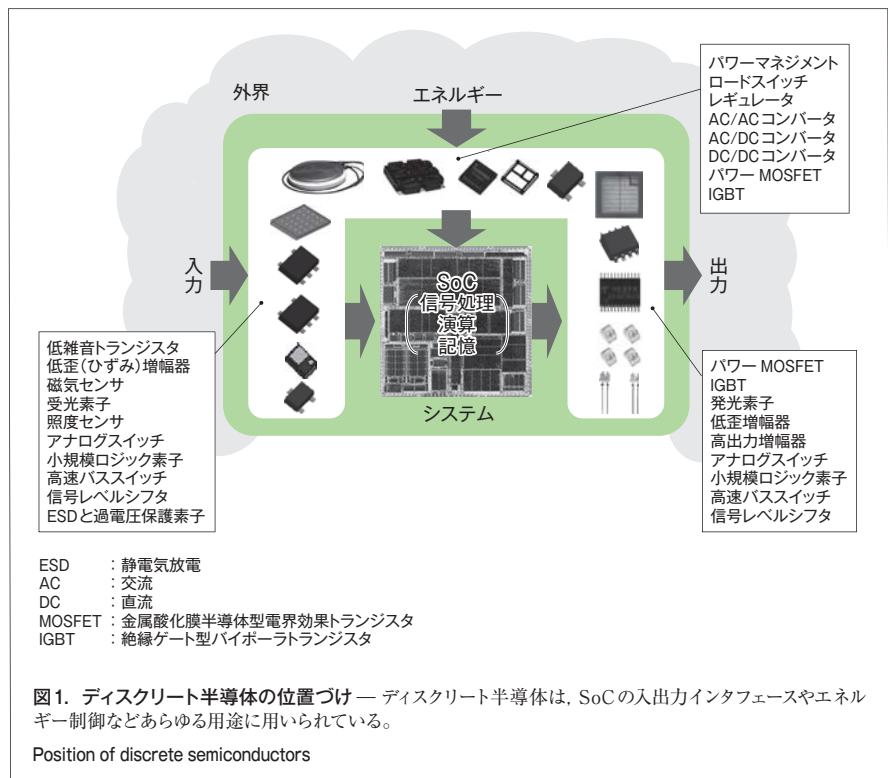
Climate change has become a global issue in recent years, and we have also been promoting both the improvement of discrete semiconductor manufacturing processes and the development of new energy-saving products for the reduction of carbon dioxide (CO₂) emissions. We have been providing a range of discrete semiconductor solutions to users through innovative products and services as a global leader in the discrete semiconductor industry.

ディスクリート半導体の位置づけ

生活のあらゆるシーンに欠かせないエレクトロニクス応用機器は、高集積化と高機能化が年々進んでおり、その結果、電力消費量が増大しCO₂排出量の増加をきたしたことにより、温暖化が地球規模の極めて重大な問題となっている。

東芝は、ディスクリート半導体事業でも製造プロセスにおけるCO₂排出量抑制と商品の省エネ化を推進しグリーンIT社会に貢献している。

ディスクリート半導体の位置づけを模式的に図1に示す。微細加工技術の進歩により、高性能システムソリューションSoC(System on a Chip)の商品化が進められている。近年、SoCの入出力情報は多様化し、インタフェースデバイスの伝送速度の高速化や制御信号の高線形化などアナログ特性が非常に重要



になってきた。この面では、小信号デバイスと汎用ロジックがおおいに貢献している。

省エネ促進には、高効率な電力の利用を図るパワーエレクトロニクス技術の発展と、照明やテレビ(TV)及びパソコン(PC)のバックライトなど発光効率向上技術の発展が不可欠で、この面では、パワーデバイスとオプトデバイスが中心的役割を果たしている。

現在かつてない経済危機にのぞみ、ディスクリート半導体市場も規模縮小を余儀なくされているが、2007年までの4年間は年平均6.5%と順調に伸長してきた。市場構成比順では、パワーデバイスが全体の4割強、オプトデバイスが3割強、残りは小信号デバイスと汎用ロジックとなっている。応用製品の多種多様化動向に対してディスクリート半導体への期待は引き続き高まるばかりである。ここでは、ディスクリート半導体の最新技術動向と将来の展望について述べる。

パワーデバイス

パワーデバイスの応用は、PC及びPC周辺機器向けが27%、デジタル家電向けが15%、車載向けが13%、白物家電、産業及び通信向けが29%に大別される。多種多様な市場ニーズに対してソリューションを提供するためには、種々の応用回路や、顧客の使いやすさを重視したパッケージ、複合化及び高機能化、電流電圧定格のラインアップなど、多岐にわたる取組みが必要である。

近年、大口径微細加工技術やライフタイム制御技術、キャリア注入量制御が著しく進歩した。低耐圧デバイス分野では、ユニポーラデバイスの代表的なMOSFET(金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ)の高速化、低オン抵抗化、及び複合化の流れが加速している。他方、高耐圧デバイス分野では、バイポーラデバイスの代表的存在IGBT(絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)の大電流化、低損失化、及び高破壊耐

量化が進んだ。

これらの発展によりパワー密度が向上して応用機器の小型軽量化が図れ、CO₂排出量の削減におおいに貢献している。

■高耐圧デバイス

600V系MOSFETの性能改善指標として、単位面積当たりのオン抵抗RonA^(注1)の推移と将来動向を図2⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾に示す。2000年代初頭に商品化されたSJ(スーパージャンクション)-MOSFETがオン抵抗低減にブレークスルー(突破口)をもたらした。通常DMOS(2重拡散型MOSFET)では、所定の耐圧を保持する空乏層幅^(注2)を確保するためにドリフト層のドーピング濃度を下げる。このため、ドリフト層の抵抗が大きくなる。SJ-MOSFETでは、ドリフト層にドーピング量が等しいp(正孔)層とn層を交互に配置している。ドーピング濃度を高くしてもドリフト層全体が空乏化して耐圧を保持できる。このため、従来のDMOSに比べて大幅なオン抵抗の低減

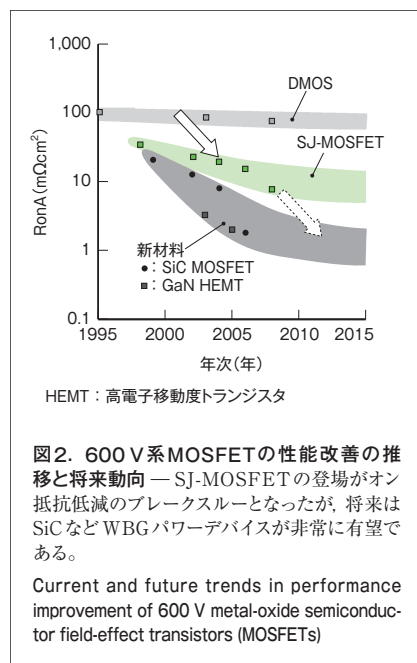


図2. 600V系MOSFETの性能改善の推移と将来動向 — SJ-MOSFETの登場がオン抵抗低減のブレークスルーとなったが、将来はSiCなどWBGパワーデバイスが非常に有望である。
Current and future trends in performance improvement of 600V metal-oxide semiconductor field-effect transistors (MOSFETs)

(注1) Ron (オン抵抗)とA(電流の導通にかかわる有効面積)の二つの積をとった性能指標。
(注2) 空乏層とは、P層とn層の接合面付近で互いのキャリアが中和された高抵抗の領域のことで、この領域の幅で印加される電圧を保持している。

が可能になった。

現在、炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)の新素材を用いたWBG(ワイドバンドギャップ)パワーデバイスの開発が非常に活発である。

ただし、現在は、材料コストがシリコン(Si)に比べ依然として非常に高価で、量産効果を生かす大口径化と欠陥密度低減の高品質化も道半ばである。他方、Si材料では到達しえない低オン抵抗を実現でき、材料のブレークスルーが起きれば、非常に有望な次世代デバイスの候補である点はまちがいない。

600V系MOSFETは主にAC(交流)アダプタやスイッチング電源として各種機器に採用されている。1,000Vを超える高耐圧デバイスも自動車や電車駆動インバータのほか産業用全般に大きな市場が存在する。各種のパワーデバイスの耐圧と性能指標RonAの相関を図3⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾に示す。

高耐圧領域はサイリスタからIGBTへと変遷したが、600V系と同様に、SiCやGaNのWBGパワーデバイスがSi-IGBTをしのぐ性能指標を達成している。電力変換装置の小型・軽量化への要求は非常に強く、高耐圧パワーデバイス性能改善のけん引力となっている。

■低耐圧デバイス

最大の伸長市場は、30V系の低耐圧

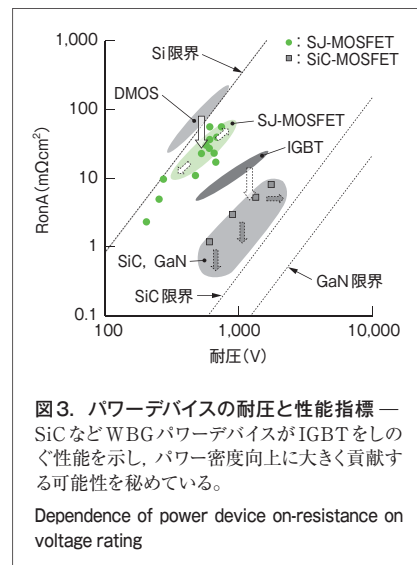


図3. パワーデバイスの耐圧と性能指標 — SiCなどWBGパワーデバイスがIGBTをしのぐ性能を示し、パワー密度向上に大きく貢献する可能性を秘めている。
Dependence of power device on-resistance on voltage rating

ムーアの法則とディスクリート半導体

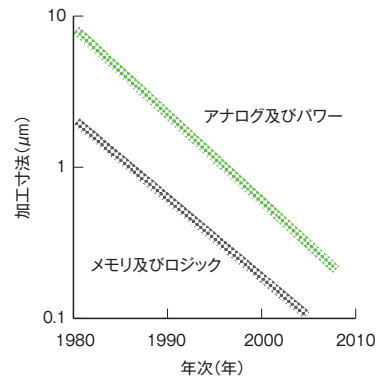
MOSトランジスタのサイズを1/kに縮小し、同時に電圧も1/kに縮小すると、スイッチング動作は高速化し低電力化するという比例縮小則を指導原理とし、半導体は微細化技術を推進してきた。微細化は、集積度の向上という直接的な恩恵をもたらすので投資対効果が明確で、集積回路は12～18か月ごとに集積度が2倍になるという有名なムーアの法則が長期間にわたり維持されてきた。

一方、ディスクリート素子は、トランジスタ又はダイオード単体が基本機能なので、微細化技術によって集積度向上のような直接的な恩恵を受けることはない。しかし、大電流を流すパワートランジスタは微細なトランジスタを並列接続したものとみなせるので、微細化はセル密度の向上を通じオン抵抗の低減など、ディスクリート半

導体の性能向上に寄与してきた。また、微細化は動作周波数の向上をもたらすので、マイクロトランジスタなどの性能改善にも寄与している。

図は、LSIでの加工寸法とディスクリート素子の加工寸法の年次推移を模式的に示したものである¹⁰⁾。ディスクリート素子でも、LSIから数年遅れて微細化技術を取り込んできたことがわかる。

しかし、ディスクリート素子では動作電圧の限界(耐圧)を確保したり線形性などのアナログ性能を改善することが必須要件なので、電圧に比例縮小を適用することはできない。よって、微細化による性能改善は動作電圧の高い素子ほど先に限界に達してしまう。中高耐圧素子の領域では、既に平面寸法の微細化だけに頼った性能改善は限界に達しており、SJ構造の導入やWBG



材料の採用など、微細化とは異なる技術革新が試みられているゆえんである。今後は、より低耐圧の領域でも、しだいに微細化だけでは性能改善が困難になる領域に入ってくるものと予想され、新しい技術の早期開発と投資対効果の見極めがますます重要になってくる。

MOSFET (LV-MOS) が使用される市場である。PCやPC周辺機器、電池パック向けのDC/DCコンバータ(直流電源変換器)用高速スイッチングデバイスやロードスイッチ用低オン抵抗デバイスの要求は高まる一方である。

低耐圧デバイスは、大口径8インチウェーハを用い最先端微細加工技術適用のトレンチゲート構造により、低オン抵抗を実現した(囲み記事参照)。最近では、オン抵抗低減の取組みだけでは不十分で、例えばノートPC用DC/DCコンバータでは、ハイサイドとローサイドのMOSFET最適組合せにより高効率を達成する必要があり、相互のスイッチングによるセルフターンオン現象を防止しなければならない。セルフターンオンはDC/DCコンバータの効率悪化を招くばかりではなく、熱暴走による素子破壊にもつながるおそれがある。

このため高速スイッチングに適用するMOSFETでは、オン抵抗低減以外にスイッチング損失低減のためのCrss(帰還容量)低減、ドライブ損失低減のためのQg(ゲート入力電荷量)低減な

どを盛り込んで素子設計を行う必要がある。DC/DCコンバータは、その負荷がCPUや、グラフィックシステムLSI、メモリなどバリエーションがあり、顧客はMOSFETの並列使用数や素子スペックをつと最適化しなければならないのが実情である。

現状はスイッチング周波数も600 kHz程度であり、ディスクリートMOSFETを使用している例が大半である。ディスクリートMOSFETの実装時に生じる浮遊インダクタンスが効率低下の原因ともなるため、より高周波で動作させる(1 MHz以上)には、複数個のMOSFETを一つのパッケージ内に収めたマルチチップモジュール(MCM)や、更に周波数の高い領域(3 MHz近辺)ではモノリシックパワー ICを使用ようになる。当社ではこれら低耐圧MOSFETやMCM、モノリシックパワー ICの商品化にも注力している。

損失低減に加えて、高品位電源という観点からは、ノイズ低減が重要である。この面では素子の種々改良にとどまらず、プリント基板上のレイアウトの最

適化を含め、顧客と一体となった改善への取組みが必要な例が多く見られる。実装の自由度を向上させつつ、放熱特性の改善や、浮遊インダクタンス低減、接続抵抗低減などのパッケージ技術を開発する取組みが行われている。

小信号デバイス

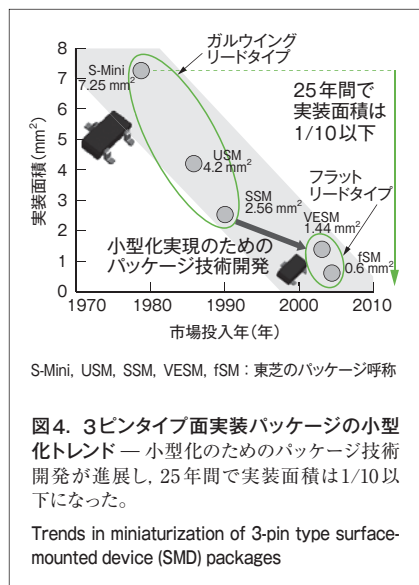
小信号デバイスの応用は、携帯電話向けが41%と非常に大きく、TV向けが9%、PC及びPC周辺機器向けが4%、家電、車載、及び産業向けなどそのほかが46%となっている。これらの市場ではSoCと外界との信号のやり取りを制御する必要がある。これらの信号はアナログで微弱であったり高周波であったりと多様であり、LSIに取り込まれない領域が必ず存在する。この課題を解決するためにインタフェース用又は信号制御用として、増幅、低雑音、及び高周波特性を重視したトランジスタやフィルタ用高性能ダイオード、ロジックが商品化されてきた。

小信号デバイス開発のキーとなるパッ

ケースの小型化の動向を図4に示す。25年間で実装面積は1/10になっており、当社は今後も小型化実現のためのパッケージ構造や小チップの搭載技術の開発を積極的に進めていく。

開発のもう一つのキーは高性能化である。小型携帯機器の電源ラインに入るパワーマネジメント用スイッチとしてMOSFETが用いられている。このMOSFETはバッテリー駆動機器であるため、低オン抵抗や低駆動電圧に向けた技術開発が盛んに進められている。現在はNチャネルMOSFETで、最新世代プロセスを適用して30V定格でRonA指標で8mΩmm²を実現した。また、1.2Vの低駆動電圧製品も登場している。今後もSi限界に近づく歩みは続けられ、駆動電圧も1Vを切るレベルまで到達する見込みである。

MOSFETに微細加工技術を適用することでチップサイズのシュリンク（縮小化）が進むにつれ、MOSゲートの静電気放電（ESD）耐性の低下が課題となっている。対策としてはESD保護用にダイオードの別チップを搭載したり同一チップ上に形成したりする手段があり、コストとの兼ね合いで決定されている。また近年、電源ノイズ耐量を持たせる必要性が非常に高まっており、このために高性能ショットキーバリアダイオード（SBD）



の需要が非常に増加している。リーク電流と順電圧の仕様とチップコストとの最適なトレードオフを図りつつ商品化が進められている。

近年は、Siホール素子を核とした高性能磁気開閉センサなど、特長ある商品の市場投入も増えてきている。この商品は、従来のGaAs（ガリウムヒ素）センサを用いる場合とは異なり、Si上に後段アンプやオフセットキャンセル回路のモノリシック化が可能で、センサ周辺回路が非常に簡略化できるため、応用製品上大きなメリットが出せる。

汎用ロジック

汎用ロジックの応用は、フラットパネルTV向けが27%、携帯電話向けが25%、PC及びPC周辺機器向けが15%、カーナビ及びオーディオ向けが10%などとなっている。なかでも携帯電話の開発は、小型化と多様化が急速に進展する状況になっている。現在、携帯電話では、USB (Universal Serial Bus) 信号のやり取りはもちろんのこと、オーディオ信号やUART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) 信号のやり取りを外部とのインタフェース端子の一つであるUSB端子を用いて行い、端子数を減らしてコストを削減する動きが広がりをを見せている。応用製品に応じたバススイッチの高速化の動向を図5に

示す。

信号の伝送速度向上の要求は高まる一方であり、それに用いるスイッチも今後ますます高速化が必要となっている。また、前述のように複数の信号を切り替える機能も必要になっている。高速化のための低容量化と複数の信号を切り替えることとはトレードオフ関係にあるため、微細プロセスの適用によりスイッチとしての最適性能を模索する必要がある。このようなスイッチは、携帯電話以外にもPCやフラットパネルディスプレイなど外部インタフェースを用いるあらゆる機器に必要となる。

このほか、各種基板間のインタフェースとして外来ノイズ耐量を向上させた高駆動能力を持つロジック素子や、携帯電話向けSDカード用レベル変換素子が必要となっている。主となる応用製品は携帯電話で、小型化は必須であり、実装上の要求からWCSP（ウェーハレベルチップスケールパッケージ）への搭載要求も年々高まっている。

オプトデバイス

オプトデバイスは、可視光発光ダイオード（LED）とフォトカプラ（リレーを含む）に大別される。

可視光LEDの応用は、携帯電話や家電向けが37%、車載向けが24%、照明向けが24%、液晶バックライト向

