

21世紀、シリコン半導体の限界が見えるなか、情報機器、携帯機器などシステムの高性能化は加速する。シリコンLSIを補完するディスクリート半導体、実装技術、回路技術、素子を使いこなすシステム設計が重要になる。エネルギーの使用の合理化に関する法律(以下、省エネ法と略記)など地球環境保全は重要さを増し、半導体の選択の基準に省エネルギー(以下、省エネと略記)の指針が加わる。ディスクリート半導体は理論限界に迫りながら発展を続け、素子としての最適化から、周辺回路を含めた回路ブロック、システムとしての最適化が開発の指針となる。

In the 21st century, the progress of information systems and mobile equipment will further accelerate despite the limits of silicon technology. Discrete devices supplementing silicon LSI performance, high-density assembly, circuit technologies, and system architectures will be important. Environmental preservation, including energy-saving legislation, will influence the standards for device selection. Discrete devices will continue to evolve under the principle of optimizing circuit blocks or overall system performance.

重要になるディスクリート半導体

21世紀は、“情報の大量享受とエネルギー・環境問題”の時代に要約されるだろう。今、システムや技術を形容する言葉が氾濫(はんらん)している。マルチメディア、モバイル、デジタル化、光通信、電気自動車(EV)、インターネット、携帯電話、携帯情報端末(PDA)、高度道路交通システム(ITS)、エレクトロニックコマース(EC)、バーチャルリアリティなどである。

20世紀後半、技術を牽引(けんいん)したものは、半導体の発展に支えられたエレクトロニクス技術であった。大規模集積回路を代表するメモリとCPUの高度な発展は、コンピュータを個人レベルに引き下げ、携帯電話を爆発的に普及させた。デジタル技術はアナログレコードをCDで置き換えただけでなく、今まで独立した技術を用いていたテレビ、ラジオ、ビデオ、写真、ファクシミリ、電話、パソコンなどの境界

をなくし、いわゆるマルチメディア機器へと進化させようとしている。

システムが高度化することでキー部品は多様化してきた。携帯電話やPDAでは、システムLSI、パワーアンプ、電池、高密度実装基板、液晶など、高機能化、小型化を実現する上でキーとなる部品が飛躍的に増え、かつ半導体に限定されず、広範な部品が多量に供給される時代が変わった。

半導体技術の進歩がシステムを牽引していた時代が終わり、様々な新しいシステムの提案がなされ、その実現のための技術が求められている。シリコン半導体はシステムを集積するシステムLSIへと進化し、シリコンLSIで実現できない高性能部品はディスクリート半導体に求められる。しかもタイムリーに市場に出すことが重要になってきている。ディスクリート半導体は以前にもまして重要な役割を担い始めた。

情報量の増加とシステムの高性能化は、一方で多量な化石エネルギーの消費を促し、今後もエネルギー消

費は年率1.39%の増加が予測され、地球温暖化を促す二酸化炭素の排出量の規制が求められている。将来の子孫のために地球環境の保全がいつそう重要になりつつある。

エネルギー効率を上げるパワー素子

1980年代に自己消弧型素子GTr(Giant Transistor)やGTO(Gate Turn Off thyristor)が開発され、本格的なPWM(Pulse Width Modulation)方式の電力変換が可能となった。MOS(Metal Oxide Semiconductor)ゲート素子であるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)は、85年に当社が初めて大電力モジュールを商品化して以来、今日では数千V、数千Aの電力をMOSゲートで容易に制御できるようになった。鉄道、新幹線をはじめ、エアコン、洗濯機、冷蔵庫などモータを利用する機器、システムは、省エネの観点からエネルギー効率を上げることができるインバータ化が進んでい

る。MOSゲートで容易に駆動ができるMOSFET(Field Effect Transistor)とIGBTは近年性能の改善が著しく、今後も進むと予測される。

■ パワー MOSFET

MOSFETは、最近では携帯機器のバッテリー制御に多用されており、オン抵抗を下げ、パッケージ面積を小さくすることが重要である。オン抵抗を下げる有効な技術はトレンチゲートの採用であり、ウェーハの表面に細いトレンチ溝を掘り、この側面をチャンネルとすることでチャンネル幅を飛躍的に増大できる。30V耐圧のパワー MOSFETはオン抵抗が15年間で1/20に下がり、数mΩが実現した。今後は、トレンチピッチを更に微細化することで10 mΩ・mm²以下の特性オン抵抗が実現するであろう。

CPUの電源の低下により、2V以下の電源を実現するため効率の良い同期整流方式の採用が進んでいる。パワー MOSFETは二局化し、低オン抵抗を実現するものと、同期整流に対応してキャパシタンスの低減を重視したもの開発が進む。

横型パワー MOSFET(LDMOS : Lateral Double diffused MOS)は、縦型トレンチ MOSFET並にオン抵抗が低く、同時に寄生キャパシタンスが小さいので、同期整流用低耐圧パワー素子として有望である。

トレンチ側壁を横方向に利用する当社の提案の横型トレンチ MOSFET (図 1)は10 mΩ・mm²以下の低オン抵抗が可能であり、横型パワー MOSを出力段とするパワー ICに採用が進むと思われる。

■ IGBT

IGBTではトレンチゲートに加えて、100 μm程度の薄いウェーハを用いたノンパンチスルー構造の採用が進み、壊れにくい低スイッチングロスのIGBTが実現した。IGBTの更

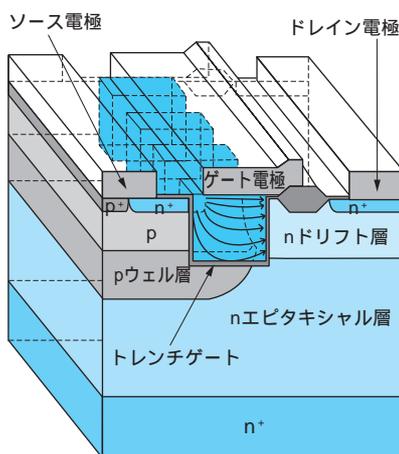


図1. 新構造横型トレンチ MOSFET トレンチ側壁を横方向に利用することで、10 mΩ・mm²以下の低オン抵抗が可能となる。 Novel lateral trench gate MOSFET

なる特性の改善は、より薄いウェーハを採用し、ノンパンチスルーからパンチスルー構造にし、低注入アノードを採用することである。例えば、600V系 IGBTでは50 μm基板を用いることでダイオードより低い1V以下の順電圧降下の実現が予測される(図 2)。1,200V系 IGBTでは、従来600V IGBTに用いてきた100 μm薄層基板を用いることで、現状の600

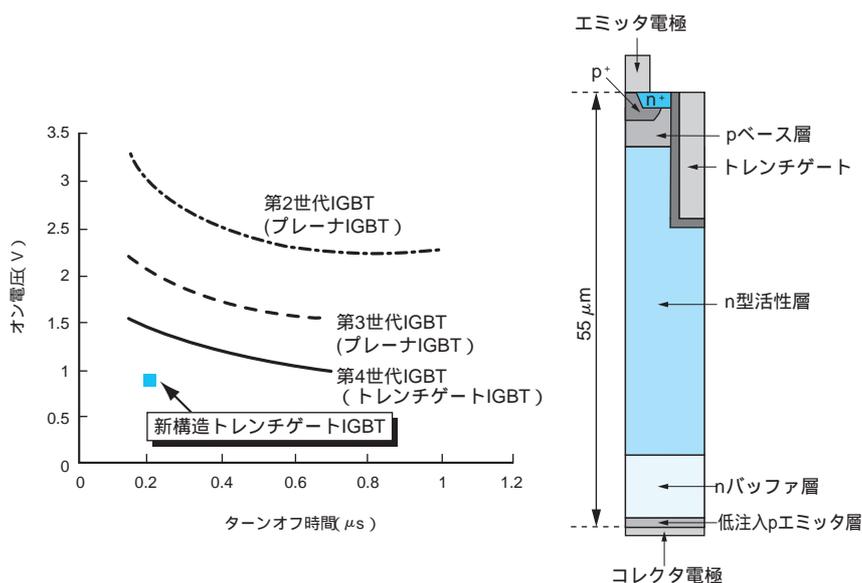


図2. 600V系での各世代IGBTのオン電圧とフォールタイム(降下時間)の比較 トレンチゲート構造を用いることで、素子中のJFET(Junction FET)抵抗成分を取り除くことができ、オン電圧の改善が見られた。 Tradeoff between on-state voltage drop and fall time for different generation IGBTs

V素子並の順電圧降下が実現できる。

IGBTを用いたシステムの高性能化のため、保護回路や駆動回路を内蔵したインテリジェントIGBTモジュール(IPM : Intelligent Power Module)が発展する。ゲート駆動電源の単一化を可能とするSOI(Silicon On Insulator)高耐圧ドライバICの搭載、EMI(電磁干渉)ノイズ低減、ソフトウェアでIGBTのゲート駆動を能動的に可変とし、ユーザーやシステムにフレキシブルに対応できる汎用IPMの実現が予想される。

■ 進むシステムの高電圧利用

CPUやLSIの駆動電源の低電圧化とは裏腹に、システムの高電圧化が進行している。これらは、消費電流の増大によって低電圧直流(DC)電源では電力損失が大きくなるためである。例えば、電気自動車、ハイブリッド車では300V程度のDC電源を用いてモータをインバータ制御しており、従来型自動車でも効率を上げるため従来の12Vに替えて42V DC電圧の採用が確実に進行している。

このようなシステムにはDC/DCコンバータが不可欠になる。また、PDR(Plasma Display Panel)平面ディスプレイでは高性能化のために200Vの高耐圧駆動ICが必要となる。

既存の100Vや200V交流での小容量モータ駆動は依然として家電機器で使われ、インバータ回路を1チップ化した250Vや500VのインバータICは、家電製品の高効率化のため普及が加速する。このような高電圧を扱う高耐圧ICは、当社が提唱した高耐圧SOI技術を用いて、今後ますます応用が拡大する。

■二極化するパワーIC

大規模集積回路は、今後システムLSIへと集積化が進むが、パワー素子を一体化する動きは二極化が進む。パワー素子は、微細化においてLSIの技術を借りてはいるが、薄いウェーハを用いるなど、明らかにLSIとは相いれない方向に進化しており、1チップ化は不可能に近い。一方、システムLSIではCMOSをパワー段として用いる動きが加速する。ディスクリート素子とシステムLSIの中間的存在として、LSIのプロセスを変えずに中規模のシステムと数A程度の出力段を搭載したパワーICと、パワー素子に特化したプロセスで小規模の回路を搭載したパワーICの二極化が進む。前者はBCD(Bipolar, CMOS, DMOS)プロセスであり、後者の代表は高耐圧SOIパワーICである。

■環境問題と省エネ化で多様さを増すパワー素子

21世紀は、地球規模での環境問題の取組みが重要になり、省資源化を目指した省エネ法の改正、トッランナー方式の採用など、今までの小型高性能化の指針とは異なった省エネが開発指針となりつつある。これはパワーデバイスの選択にも影響を

与えており、多様な素子を使い分けが必要ができてきている。600V IGBTに替えてオン電圧0.5V以下が実現できるBSIT(Bipolar-mode Static Induction Transistor)や、次に紹介するスーパーマルチリサーチMOSFETを使いこなそうとする動きがでてくる。オン抵抗を低くして省エネを実現することは、場合によってはコストよりも優先される。

■スーパーマルチリサーチMOSFET

最近注目を集めている新型MOSFET(Super Multi-Resurf MOSFET)は、囲み記事に示すようにリサーチ層を縦方向に形成した素子と見なすことができる。このリサーチ層の厚みを $1\mu\text{m}$ 程度に微細化することで、600Vから1,200V素子でオン抵抗でIGBTの特性を凌駕(りょうが)し、スイッチングスピードでは一けた大きい100kHzが可能である。この素子は、太陽光発電、電気自動車や電源など高電圧を用いるシステムで高効率化に寄与するだろう。

■SiCデバイス

SiC(Silicon Carbide)パワーMOSFETは、耐圧1,000V前後で、既にSiリミットより低いオン抵抗の試作

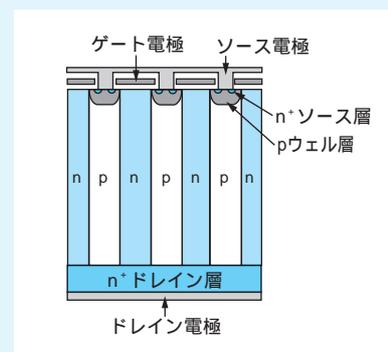
報告がなされている。本来はSiリミットを2けた以上上回る特性がでるはずであるが、MOSチャネル移動度が低いことと、SiCと酸化膜の絶縁破壊電界強度の差が小さくベース厚を広くせざるを得ないという問題があって、いまだその特性が引き出せていない。これらの問題点を回避するために、SIT(Silicon Intensifier Target)構造でSiC素子を実用化しようという動きが出ている。

SiCウェーハで最大の問題とされている。欠陥密度が低減できれば、10mm角以上のチップが実用化され、低オン抵抗と高温動作が必要な電気自動車などへの応用が見えてくる。電気自動車やエアコンのモータ駆動は、現状のIGBTからBSIT又はスーパーマルチリサーチMOSFETを経てSiC素子へと進化していく。環境問題の解決のため、コストに問題はあがるが低オン抵抗と高温動作が可能であるため、SiCデバイスは積極的に利用されると予測される。

図3は、21世紀に向けて各種デバイスの予想される特性を図示したものである。省エネ化という新たな指針を加えて、用途別の多彩なパワー素子が要求されメーカーごとの分業化が進むと予測される。

スーパーマルチリサーチMOSFET

縦型パワーMOSFETの高抵抗n層を、ストライプ状のp及びn層で置き換えた新構造素子である。横型素子の低オン抵抗化に有効なリサーチ(RESURF: REduced SURface Field)の概念を拡張したもので、低電圧でp層とn層が空乏化するために、n層の濃度を高くしても従来素子と同じ耐圧が得られる。n層の濃度は、n層及びp層の幅を狭くするほど高くでき、素子耐圧はストライプの長さだけに依存するため、耐圧が高くなるほど効果は大きくなる。



スーパーマルチリサーチMOSFETの断面

大量情報社会を担う高周波デバイスと光デバイス

■ 携帯機器

携帯電話が爆発的な普及をした背景には、GaAs パワーアンプや小規模高周波 IC、高密度実装など LSI 以外の周辺技術の寄与が大きい。携帯電話は PDA と競合し、インターネットにつながれ、様々なコンテンツを受信する端末となる。世界規模で通信方式が CDMA (Code Division Multiple Access) に統合され、リニアリティの良いパワーアンプとして小規模 GaAs HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) 集積回路 (MMIC : Monolithic Microwave IC) の利用が進む。横型シリコン MOSFET は GaAs に迫る高周波素子として動向が注目される。

■ 光通信

インターネットの普及に代表されるように、データ通信容量は今後も急激な増大が見込まれる。この情報通信のインフラストラクチャを担うのが、光ファイバ基幹通信網の大容量化であり、2010 年には 1T (テラ)

bps の容量が必要とされている。当面、高速化と波長多重方式の併用で大容量化が進む。このため、高度に波長制御されたレーザと高速変調素子がキー技術となる。

基幹の光ファイバ網と各家庭の間をつなぐ加入者系では、100 Mbps の容量が必要とされ 20 ~ 40 GHz 程度の無線通信、光ファイバが究極の解である。当面は、既存の CATV 網の利用、電話線での高速通信 (ADSL) が利用される。家庭内のネットワークは無線と電話線が利用されるが、更に高速のデータ通信は、IEEE1394 規格などの方式を用いてマルチメディア機器間での画像データ通信、家庭内・自動車内での LAN に使われる。このためには低コストであることが必須であり、最近性能向上が著しいプラスチックファイバが実用的な方式となり、500 Mbps から 2.5 Gbps へと実用化が進むであろう。

■ ITS

21 世紀には、車両の安全運行と快適走行を目指した ITS (Intelligent Transport Systems) が整備される。

まずは、無線通信による高速道路の自動料金収受 (ETC) が実用化される。

車両の高度ナビゲーション情報の提供や安全運行のために大容量の路車間通信には 5.8 GHz の高周波 MMIC、安全運転を実現する車載レーダなどに 60GHz 以上のミリ波デバイスの使用が想定されており、この周波数帯の信号を取り扱う化合物半導体素子技術のいっそうの進展が要求される。

■ ディスクリート半導体がキー部品に

多くのシステムは状態を検出するセンサ、シグナル処理をするプロセッサ、実際に仕事をするアクチュエータ、電源から成る。このうちセンサ、アクチュエータ、電源にはディスクリート半導体素子が多用される。プリンタのインク残量、濃度検出など目立たない部分でセンサなど個別部品が使われる。高精細 DVD RAM では青紫のレーザがキー部品となろうとしている。システムの高性能化と省エネ化の指針のもと、より優れたディスクリート半導体が求められ、高密度実装技術によってシステム全体の高性能化が実現される。

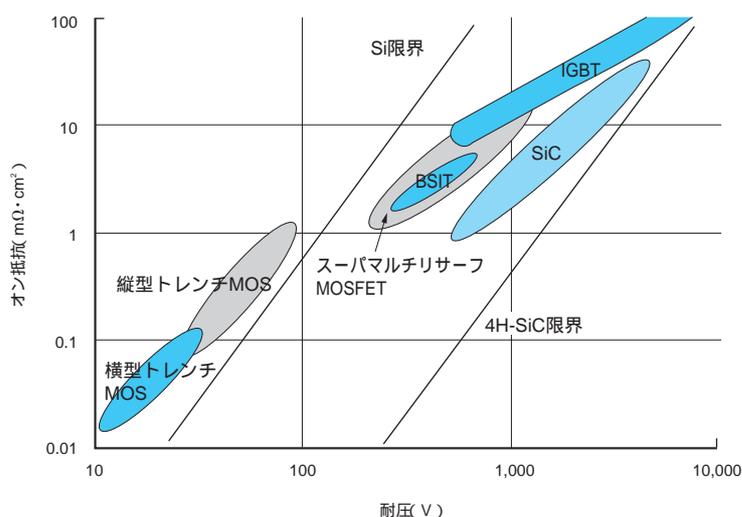


図3．各種パワーデバイスの予想される特性 微細化技術、新構造・新材料の採用で更に低損失化が進み、用途別に多彩なパワー素子が要求される。
Expected characteristics of power semiconductor devices



中川 明夫

NAKAGAWA Akio, D.Eng.

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー技監, 工博。

パワー素子, パワー IC の研究・開発に従事。電気学会, 応用物理学会, IEEE 会員。

Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.



四戸 孝

SHINOHE Takashi

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー主任研究員。縦型パワー素子, SiC パワー素子の研究・開発に従事。電気学会, 応用物理学会, 物理学会会員。

Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.