

トレンド

ディスクリート半導体技術の最新動向と展望

Latest Trends in and Future Outlook for Discrete Semiconductor Technologies

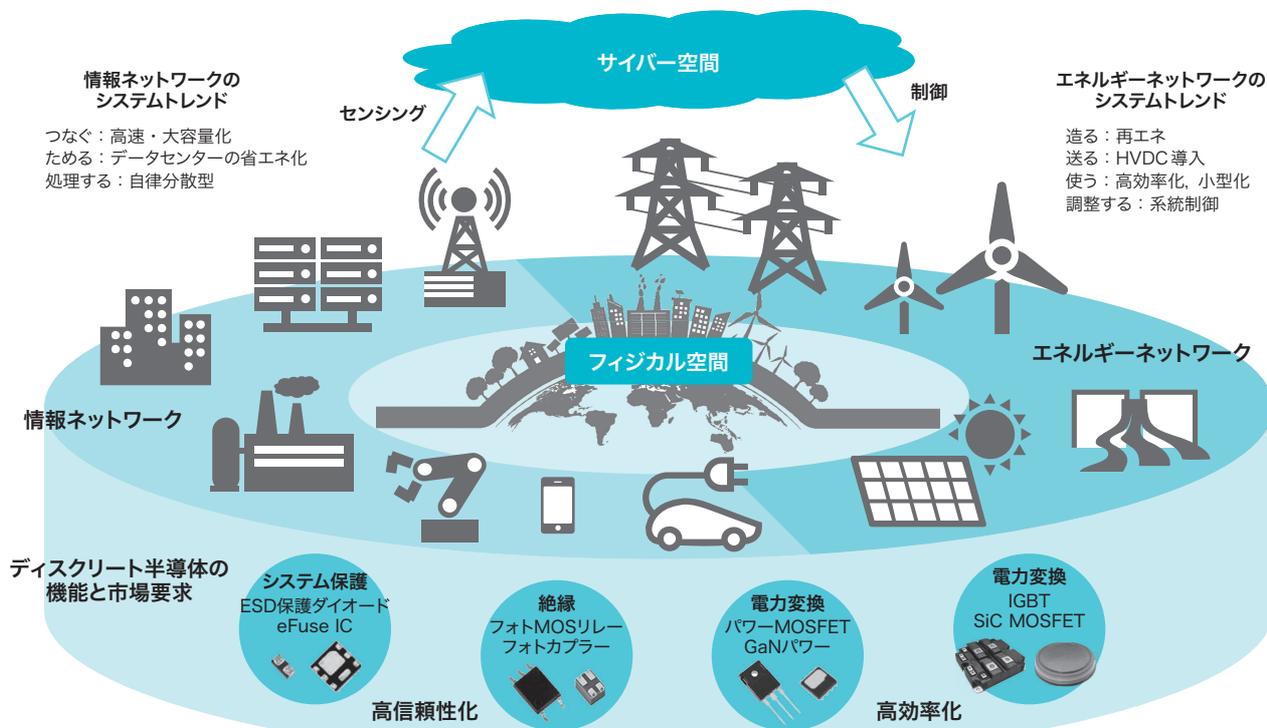
西脇 達也 NISHIWAKI Tatsuya 横田 誠 YOKOTA Makoto 山口 正一 YAMAGUCHI Masakazu

環境・エネルギー問題が地球規模で深刻化する中、情報・通信、車載・産業、発電・送電など、様々な分野において電気エネルギーの更なる有効利用が求められている。

東芝デバイス&ストレージ(株)は、小電力から大電力まで電気エネルギーの変換や応用機器の保護に用いられるディスクリート半導体製品を幅広く展開するとともに、技術開発や商品化に取り組んでいる。先端のディスクリート半導体技術を活用した、電気エネルギーを高効率かつ安定的で安全に取り扱うソリューションの提供を通して、省エネ社会の実現に貢献する。

Severe global environmental and energy problems are driving demand for more effective utilization of electric energy in a broad range of fields including information and communication technology (ICT) systems, automotive and industrial systems, and electricity generation and transmission systems.

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has been progressively developing and introducing a wide variety of discrete semiconductor products for electric energy conversion and protection applications ranging from small- to large-scale power systems, and is also making efforts to develop advanced technologies and commercialize products applying these technologies. We are committed to delivering various solutions to enable the efficient, stable, and secure handling of electric energy by means of our advanced discrete semiconductor technologies with the aim of realizing an energy-saving society.



HVDC: High Voltage Direct Current (高压直流送電) ESD: Electrostatic Discharge (静電気放電) MOS: 金属酸化膜半導体
 MOSFET: MOS型電界効果トランジスター GaN: 窒化ガリウム IGBT: 絶縁ゲート型バイポーラトランジスター SiC: 炭化ケイ素

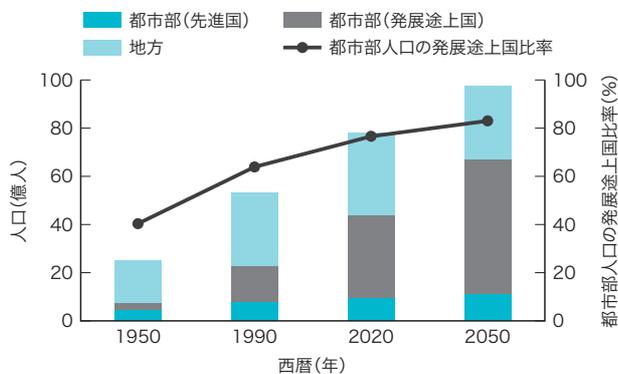
特集の概要図。省エネ社会を支えるディスクリート半導体

Toshiba discrete semiconductor products underpinning energy-saving society

1. まえがき

世界人口の増加とその都市部集中から、環境・エネルギー問題が深刻化している。2018年の国連の推計⁽¹⁾によると、今後、世界人口は都市部を中心に増加が続き、2050年には世界人口の約68%が30万人以上の都市部に居住すると予測されており、その都市部人口の拡大は主に発展途上国で発生する見込みである(図1)。化石燃料を主たるエネルギー源とする発展途上国では、人口増加で今後ますます環境・エネルギー問題が深刻化する懸念があり、ローカルな省エネ化だけでは解決が困難である。

2015年の国連サミットでは、将来の気候変動や社会問



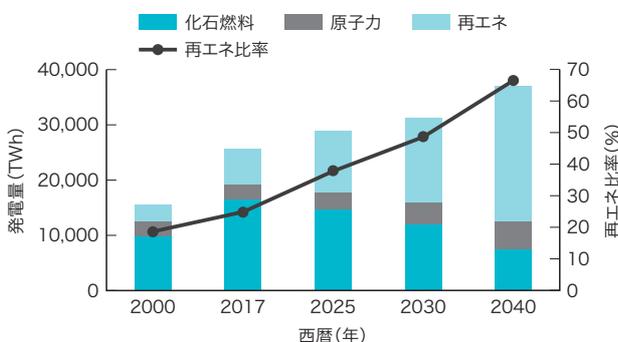
都市部:人口30万人以上

*United Nations. 「World Urbanization Prospects:The 2018 Revision」⁽¹⁾のデータを基に作成

図1. 都市部人口の世界的な推移

世界人口は、主に発展途上国の都市部で拡大していく。

Global trends in urban populations of industrialized and developing countries



*International Energy Agency (IEA). 「World Energy Outlook 2018」⁽²⁾を基に作成

図2. エネルギー源別の世界的な発電量の推移

持続可能な開発目標を達成するシナリオでは、再エネが主要発電方式となる。

Global trends in power generation by type of energy source

題などを先進国と途上国が一丸となって解決することを目的に、SDGs (Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標) が採択された。この成否は、太陽光や風力などの再生可能エネルギー (以下、再エネと略記) の比率の向上に懸かっている(図2)⁽²⁾。都市部を中心とした電力消費量の増加に対し、都市部から離れた場所へ電力リソースの分散化が進むと予想される。

これらの状況から、時間的・空間的な電力マネジメントや電力融通による、更なるエネルギー利用効率の向上が求められる。機器・建物・街・地域・国といった、あらゆる次元でフィジカル空間とサイバー空間をより緊密に結びつけるCPS (サイバーフィジカルシステム) 技術の進展が期待され、それを活用した省エネ社会の実現には、CPSを構成する情報ネットワークやエネルギーネットワークにおいて、電気エネルギーを高効率かつ安定的で安全に取り扱うことが重要となる。

東芝デバイス&ストレージ(株)は、これらのネットワークにおいて、小電力から大電力まで電気エネルギーの変換や保護に用いられるディスクリート半導体製品を幅広く展開している。機器・システムの高効率化や高信頼性化に貢献するソリューションを、先端のディスクリート半導体技術を活用して提供する活動を通して、省エネ社会の実現に貢献している(特集の概要図)。

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、その実現を支えている半導体デバイスのトレンドについて述べる。

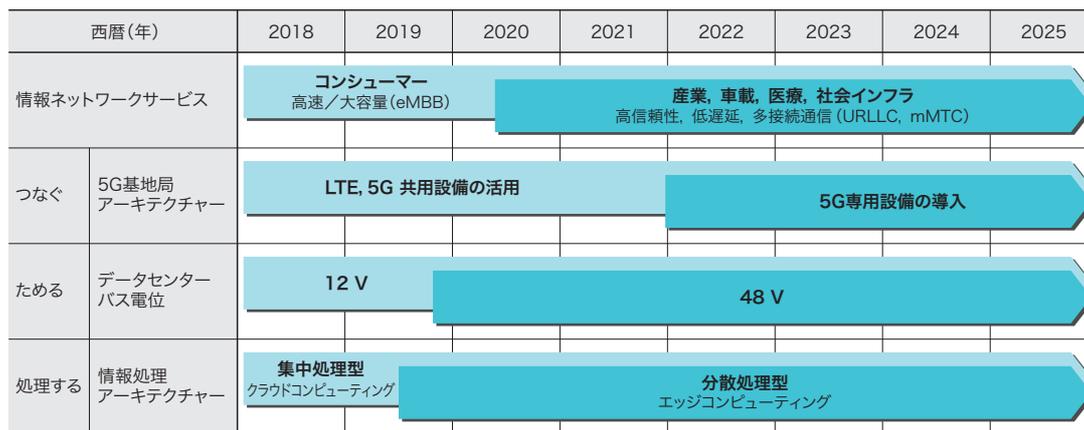
2. システムトレンド

2.1 情報ネットワーク

情報化社会の現代では、モバイルデータ通信量は増加の一途をたどっており、それに伴ってエネルギー消費量も増加している。これまでは、情報・通信・民生機器を中心とした情報・映像コンテンツのやり取りが主体であったが、近年、IoT (Internet of Things) の進展とともに、車載・産業機器まで含めた、機能・サービスの連係まで対象を拡大しようとしている。

この基幹である情報ネットワークの進化は、図3に示す、「つなぐ」、「ためる」、「処理する」の各ステージでのシステム技術の発展に支えられる⁽³⁾。

「つなぐ」では、5G (第5世代移動通信システム) の寄与への期待が大きい。高速・大容量に加え、高信頼・低遅延・多接続が可能になる。ただし、5Gは電波特性によるリンク距離及び送信電力の制約から、LTE (Long Term Evolution) の数十倍の数の基地局が必要と見込まれ、送



eMBB : enhanced Mobile Broadband
 URLLC : Ultra-Reliable and Low Latency Communications
 mMTC : massive Machine Type Communication

*富士キメラ総研、「5G通信を実現するコアテクノロジーの将来展望 2020」³⁾を基に作成

図3. 情報ネットワーク技術のトレンド

情報ネットワークの進化は、“つなぐ”、“ためる”、“処理する”の各ステージにおける技術の発展に支えられている。

Trends in information network technologies

受信ユニットやアンテナ設備の小型化・低消費電力化が望まれる。更に、車載・産業や医療用に向けては機器の高信頼性化・冗長化への要求が高まる。

「ためる」では、省エネ化・低コスト化に向け、データセンターで48V給電システムが広がりつつある。給電ラインの基準電位を従来の12Vから48Vへと変更することで、理論上1/4の電流で同じ電力を供給することが可能となり、電源ライン上での電力損失低減を実現する。この技術の普及には、48V化に対応した電源ユニットの高効率化が不可欠である。

「処理する」では、ユーザーに近い情報ネットワークの終端部（エッジ）でデータ処理を行い、通信・演算・ストレージの各処理での負荷を軽減するエッジコンピューティング（自律分散型情報処理）技術が注目されている。今後は、クラウドコンピューティング型とエッジコンピューティング型の各機能を補完する融合型プラットフォームの普及が見込まれる。

このようなシステムトレンドを受け、高効率化に向けては、電源システムのキー部品であるパワーデバイスには低損失化や高放熱化が求められ、通信インフラに使用されるパワーデバイスには小型化や高温動作化が求められる。また、高信頼性化に向けては、TVS (Transient Voltage Suppression) ダイオードやeFuse ICといった保護デバイスや、通信機器間の絶縁インターフェースを担うアイソレーションデバイスの需要が拡大している。

2.2 エネルギーネットワーク

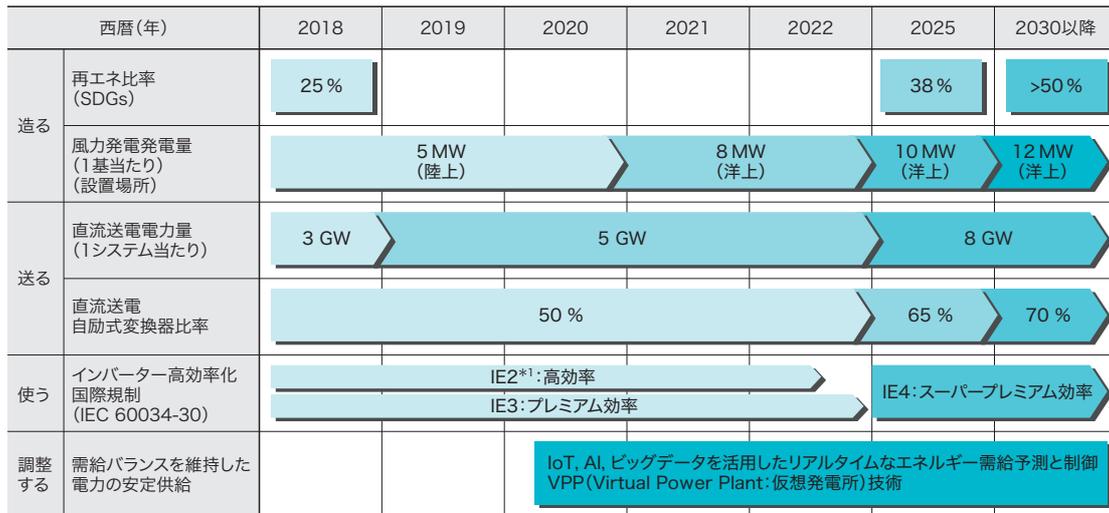
発電量増強と環境負荷軽減の両立には、再エネによる発

電の普及・拡大が欠かせない。発電設備は、人口の集中する都市部から離れた場所に設置されることが多く、送電ネットワークの整備が進む。更に、ビッグデータやAIを活用し、電力需給予測を取り入れた電力マネジメントの取り組みも始まっている。

一連のエネルギーネットワークの進化は、図4に示す、“造る”、“送る”、“使う”、“調整する”の各ステージでのシステム技術の発展に支えられる^{(2), (4)}。

「造る」では、再エネ比率の向上と発電量の増加が進展する。既にヨーロッパを中心に大規模洋上風力発電プラント（ウインドファーム）の普及が始まっている。洋上風力発電の場合、大きな風力エネルギーが持続的に得られやすく安定的な電力供給が期待できるほか、敷地の制限が少なく、より発電量の大きい大型の風車を大規模に設置できる。ただし、風力発電に適した地域には送電インフラが整備されていない場合が多く、送電インフラを新規に敷設し維持管理する必要がある。発電量の増強と発電・維持管理コストの低減に向け、設備の大型化と大規模プラント化、IoT技術を活用したスマートメンテナンスなどが進展する。

「送る」では、発電設備と利用者の間をつなぐ電力変換・送配電システムの高効率化、大容量化が進展する。中でも大容量で長距離の送電に適した方式として、HVDC (High Voltage Direct Current : 高圧直流送電) の導入が世界中で進んでいる。交流より長距離での送電効率に優れ、エリア間融通も容易であることから、再エネ電力系統との親和性も高い。HVDCシステムの基幹である交直変換器には高



*1: IEコード。IEC 60034-30で規定された効率クラスで、IE1からIE4までである
 *2: IEA, 「World Energy Outlook 2018」²及び小坂田昌幸, ほか, 「グリーンエネルギーアグリゲーションへの取り組み」⁴を基に作成

図4. エネルギーネットワーク技術のトレンド

エネルギーネットワークの進化は, “造る”, “送る”, “使う”, “調整する” の各ステージでの技術の発展に支えられている。

Trends in energy network technologies

電圧・大電力を扱うハイパワーデバイスが搭載される。従来は, 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, 近年は中国を中心に IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) などの自己消弧型デバイスを適用した自励式変換器への置き換えが進んでいる。

「使う」では, 省エネ化・省スペース化に向けて, システムの高効率化と小型化が進む。産業用モーター・インバーターでは IEC 60034-30 (国際電気標準会議規格 60034-30) をベースに効率基準が定められ, 法規制化が進みつつある。自動車では, 環境配慮・省エネ・安全・情報アクセスのため, ハイブリッド車や電気自動車の普及はもとより, 電動化・電子化が加速度的に進んでいる。一方, 電鉄では主変換装置の小型軽量化に向け, 低損失・高周波, 高温・高耐圧性能に優れた SiC (炭化ケイ素) パワーデバイスの搭載が始まっている。

「調整する」では, 情報ネットワークと各電力系統制御との連携や IoT 技術を活用したリアルタイムな電力需給予測により, 電力利用効率の向上を実現する。

このようなシステムトレンドを受け, 電力変換システムのキー部品であるハイパワーデバイスには, 更なる低損失化・高耐圧化・高信頼性化とそれらによる大容量化が求められる。

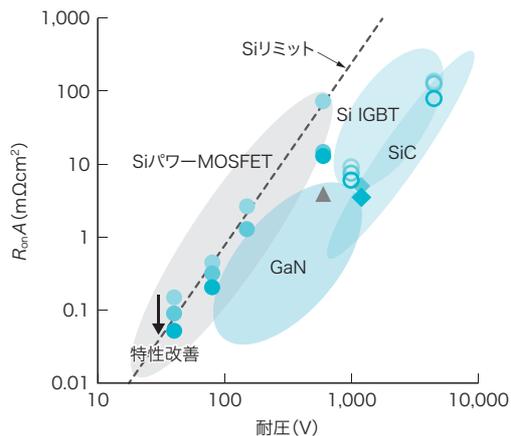
3. ディスクリート半導体デバイスのトレンド

2章では, 情報量・電力量の増加と電気エネルギーの有効利用に向けたシステムトレンドを述べた。これらのシステム

の中で, ディスクリート半導体は, 電気エネルギーを高効率に取り扱うために不可欠な電力変換や, 安定的で安全に運用するために重要な保護・絶縁などの役割を担っている。以下では, 代表的なディスクリート半導体デバイスの, 当社における技術進展について述べる。

3.1 様々なディスクリート半導体デバイス

多くの機器・システムにおいて電力変換の機能を果たすのがパワーデバイスである。パワーデバイスが扱う電圧の範囲は, 用途に応じて十数Vから数千Vに及び, それぞれの電圧に適したデバイスや半導体材料が用いられている。図5は, 代表的なパワーデバイスの耐圧と特性オン抵抗 ($R_{on}A$) を示したものである。耐圧が高く $R_{on}A$ が低いほど, 理想的なスイッチに近づく。家電・OA・情報通信機器向けの, およそ900V以下の領域では, Si (シリコン) パワー-MOSFET (金属酸化膜半導体型電界効果トランジスター) が用いられており, デバイス構造, プロセス技術の革新により $R_{on}A$ をはじめとする特性改善が続いている。また, 近年, GaN (窒化ガリウム) を用いた GaN パワーデバイスが登場してきており, 従来の Si パワー-MOSFET より小さい $R_{on}A$ が実現され始めている。更に, 600V以上の領域においては Si IGBT (絶縁ゲート型バイポーラトランジスター) が用いられており, ハイブリッド車や, 電鉄, 送配電を担うキー部品となっている。この高耐圧の領域においても, 近年 SiC を用いたパワー MOSFET の開発が進んでおり, 電鉄などで実用化が始まっている。



*▲のデータは文献(5)から引用

図5. 各種パワーデバイスの耐圧と $R_{on}A$ の関係

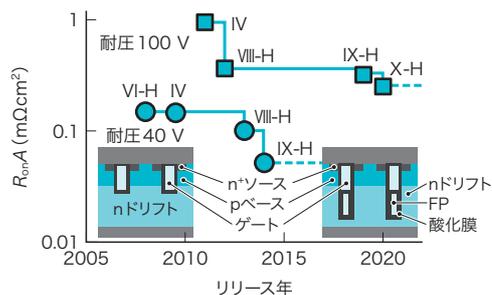
耐圧が高く $R_{on}A$ が低いほど、理想的なスイッチに近づく。破線はSiリミットと呼ばれ、1次元構造のSiデバイスが到達できる $R_{on}A$ の理論限界を示している。

Relationship between breakdown voltage and specific on-resistance ($R_{on}A$) of various types of power devices

省エネ社会を実現するためには、エネルギー機器・システムの高い信頼性が望まれ、電力変換用パワーデバイスの低損失化に加え、保護や絶縁の機能を果たすデバイスの高性能化も欠くことができない。例えば、エッジ端末ではESD（静電気放電）から機器を保護するため、ESD保護ダイオードが用いられ、信号の高速化に対応するための静電容量低減が進んでいる（この特集のp.24-27参照）。また、過電流保護のため、従来のロードスイッチICの機能を向上させ、高速の短絡保護機能を設けたeFuse IC保護素子が登場している（同p.28-30参照）。更に、電圧差の大きい回路間でのデータ送受や絶縁が必要な用途では、フォトカプラーあるいはフォトMOS（金属酸化膜半導体）リレーといった、光半導体を用いたアイソレーションデバイスが使われ、小型化や大電流化が進められている（同p.31-34参照）。

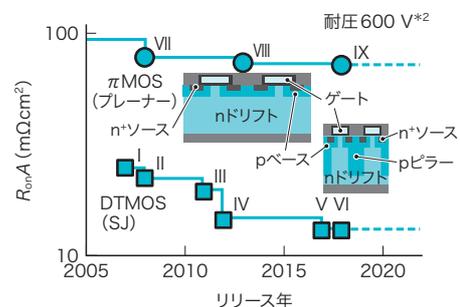
3.2 Siパワー MOSFET

Siパワー MOSFETは、耐圧がおおよそ200~300 Vを境に、低耐圧MOSFET (LVMOS) と高耐圧MOSFET (HVMOS) に分類される。図6に、それらの $R_{on}A$ 及び主要技術トレンドを示す。LVMOSは耐圧40 Vと100 V素子の変遷を、HVMOSは耐圧600 Vのプレーナー型の π MOS、スーパージャンクション (SJ) 型のDTMOSの変遷を示している。 $R_{on}A$ の中でチャンネル抵抗の占める割合が高かった世代では、主にセルピッチの微細化によりチャンネル密度を高めて、 $R_{on}A$ が低減された⁽⁶⁾。この結果、以降の世代では耐圧を保持するドリフト層の抵抗が支配的となり、その抵抗低減のためトレンチフィールドプレート (FP) 構造⁽⁷⁾、SJ構造⁽⁸⁾といった新



| | | |
|---------|---------|---------|
| セル構造 | トレンチ | FP |
| セルピッチ*1 | 耐圧100 V | 1 → 0.8 |
| | 耐圧40 V | 1 → 0.6 |

(a) LVMOS (U-MOSシリーズ)



| | | | |
|---------|-------|---------|---------|
| セル構造 | プレーナー | SJ (ME) | SJ (SE) |
| セルピッチ*1 | 1 | 0.9 | 0.7 |

(b) HVMOS (DTMOS/ π MOSシリーズ)

n⁺ : 不純物濃度の高いn型半導体
ME : マルチエピタキシャルプロセス

*1 : 初期の値を1として規格化

*2 : DTMOS V, VIIは耐圧650 V素子の値を記載

図6. Siパワー MOSFETの $R_{on}A$ と技術の推移

LVMOSでは、トレンチからFP構造化とセルピッチ微細化、HVMOSではプレーナーからSJ構造化とSE（シングルエピタキシャルプロセス）技術を用いたセルピッチ微細化によってオン抵抗を低減してきた。

Trends in $R_{on}A$ and technologies for silicon (Si) power metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs)

規構造が導入された。一般にドリフト層は耐圧により不純物濃度と厚さが決まることから、図5に破線で示したように、ドリフト層抵抗にはSiリミットと呼ばれる最低値があるが、FP構造では埋め込み電極、SJ構造ではp（p型半導体）ピラー層の電荷補償効果によって、耐圧を維持したままドリフト層の不純物濃度を高め、Siリミット以下に $R_{on}A$ を低減できる。その結果、耐圧100 VのLVMOSでは10年で $R_{on}A$ が1/3以下に、SJ-HVMOSでは約1/2に低減された。

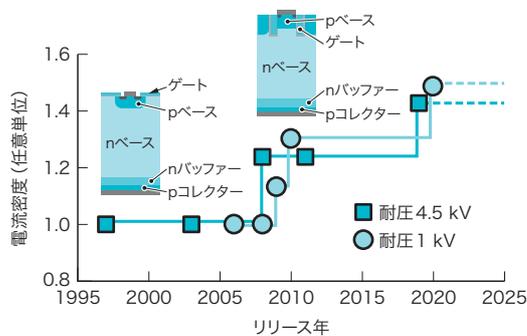
今後は、微細化による継続的な $R_{on}A$ の低減に加え、ドライブ損失や、スイッチング損失、リバースリカバリー損失の

低減を同時に進めていく。パワー MOSFETは、数多くの電源に搭載されており、その高性能化を通して、システムの低損失化・小型化に寄与していく(同p.9-13参照)。

3.3 Si IGBT

IGBTは、MOSFETのゲート制御性と、バイポーラトランジスターの大電流・低オン電圧の特長を併せ持ったデバイスである。表面のMOSゲートから電子を、裏面のp型コレクター層から正孔を注入し、耐圧保持領域であるn(n型半導体)ドリフト層内で伝導度変調を起こすことにより、低オン電圧を実現する。

Si IGBTの代表的な特性指標として、電流密度のトレンドを図7に示す。耐圧4.5 kVのHVDC向けIEGTと耐圧1 kVの家電向けIGBTについて示している。電子注入促進(IE)効果の向上、薄ウエハー化、裏面構造の最適化により、電流密度の向上を実現してきた。また、IGBTは、FWD(Free Wheeling Diode)を並列接続して用いられることが多いが、このFWDをIGBTチップ内に一体形成したRC-IGBT(Reverse Conducting IGBT)の実現により、更なる電流密度の向上を図っている(同p.14-18参照)。更に、開発をより短期間を実現するため、高精度なシミュレーション技術やモデルベース開発にも取り組んでいる(同p.35-39参照)。



| | | | | |
|-----------|-------|-------|------|-------------------|
| 耐圧 4.5 kV | セル構造 | プレーナー | トレンチ | トレンチ IE効果最適化 |
| | ダイオード | | 別チップ | 同一チップ集積 (RC-IGBT) |
| 耐圧 1 kV | セル構造 | | トレンチ | 微細トレンチ IE効果最適化 |

図7. Si IGBTの電流密度と技術の推移

トレンチ技術、IE効果の促進、薄ウエハー技術によるオン電圧低減、その他周辺技術に加えて、ダイオードの集積化により、電流密度の向上を図ってきた。

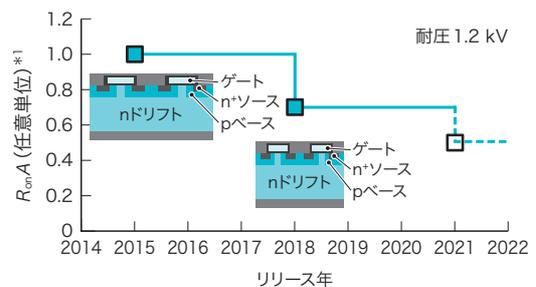
Trends in current density of and technologies for Si insulated gate bipolar transistors (IGBTs)

3.4 ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス

近年、SiCやGaNといった、いわゆるワイドバンドギャップの半導体材料を用いたパワーデバイスの実用化が進んでいる。

SiC(4H-SiC^(注1))は、Siに対しバンドギャップが約2.9倍、絶縁破壊電界強度が約10倍の物性を持ち、SiパワーMOSFETに対し、原理的にドリフト層濃度を100倍、ドリフト層厚を1/10にできることから、 $R_{on}A$ を2桁以上低減できる。このため、従来はバイポーラデバイスであるIGBTが担ってきた高耐圧領域までユニポーラデバイスの適用範囲が拡大できる。これにより高いスイッチング周波数で使用でき、周辺部品を含むシステムの小型化が実現される。

図8に、当社のSiCパワーMOSFETの $R_{on}A$ と技術のトレンドを示す。SiCは、SiパワーMOSFETに対してチャネル移動度が低いという課題が知られているが、プロセスの改善⁽⁹⁾及びセルピッチ縮小によるチャネル密度向上によって、チャネル抵抗を低減し、 $R_{on}A$ を低減してきた。また、SiCパワーMOSFETのドレインとソースの間に存在するpnダイオードに順方向電圧が印加されてバイポーラ動作が起ると、電子と正孔の再結合によって発生するエネルギーによりSiCエピタキシャル層内に積層欠陥が拡張し、ダイオードの順方向電圧やMOSFETのオン抵抗(R_{on})が上昇する、バイポーラ通電劣化の問題が知られている⁽¹⁰⁾。当社は、



| | | | |
|---------|-------|-------|-----|
| セル構造 | プレーナー | SBD内蔵 | |
| セルピッチ*2 | 1.0 | 0.7 | 0.6 |

*1: MOSセル部だけの $R_{on}A$ を算出。2015年を1.0として規格化
*2: MOSセル部のセルピッチで表記。2015年を1.0として規格化

図8. SiCパワーMOSFETの $R_{on}A$ と技術の推移

セルピッチの縮小による $R_{on}A$ の低減と、SBD内蔵による信頼性の向上を図ってきた。

Trends in $R_{on}A$ of and technologies for silicon carbide (SiC) power MOSFETs

(注1) SiCの結晶多形の一つ。4は積層方向の1周期中に含まれるSiC単位層を、H(Hexagonal)は六方晶を表している。

SBD (Schottky Barrier Diode) の内蔵化によりこの問題を解決している (同p.19-23参照)。これらの技術を適用した当社のSiCパワー MOSFETは、国内電鉄のインバーター装置に採用されている。今後も素子構造やプロセスの改善を進め、性能向上を継続していく。

ここまで述べたSiCと同様に、GaNはバンドギャップがSiの約3.0倍と大きく、AlGaN (窒化アルミニウムガリウム)とのヘテロ界面にHEMT (高電子移動度トランジスター) 構造を形成可能なことから、高耐圧で高速スイッチングが可能なパワーデバイスとして期待されている。横型デバイスでは、大口径Si基板上エピタキシャルウエハーを利用できることに加え、プレーナーゲート構造を用いることでゲートチャージを小さくできることから、ドライブ損失及びスイッチング損失を小さくできる。一方、GaNパワーデバイスにはノーマリーオフ動作化の課題が存在するが、Si MOSFETを組み合わせたカスコード化や、AlN (窒化アルミニウム) 層を挿入したMOSデバイスの開発を進めている (同p.40-43参照)。このGaNパワーデバイスの高速動作の利点を生かし、電源回路のスイッチング周波数を高めることにより、装置の小型化が期待される。

4. あとがき

今後も情報量とエネルギー消費量の増大が見込まれる中、環境・エネルギー問題の解決には電気エネルギー利用効率の向上が不可欠である。当社は、様々な用途に向けたディスクリット半導体をタイムリーに開発し提供することによって、省エネ社会の実現に貢献していく。

文 献

- (1) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. "World Urbanization Prospects: The 2018 Revision". New York, United Nations, 2019, 124p. <<https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>>, (accessed 2020-08-05).
- (2) International Energy Agency. "World Energy Outlook 2018". Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2018, 661p. <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>>, (accessed 2020-08-05).
- (3) 富士キメラ総研. 5G通信を実現するコアテクノロジーの将来展望2020. 2019, 237p. <<https://www.fcr.co.jp/report/193q07.htm>>, (参照 2020-08-05).
- (4) 小坂田昌幸, ほか. グリーンエネルギーアグリゲーションへの取り組み. 東芝レビュー. 2019, 74, 1, p.2-7. <https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2019/01/74_01pdf/a02.pdf>, (参照 2020-08-06).
- (5) Saito, W. et al. Field-Plate Structure Dependence of Current Collapse Phenomena in High-Voltage GaN-HEMTs. IEEE Electron Device Lett. 2010, 31, 7, p.659-661.
- (6) Williams, R. K. et al. The Trench Power MOSFET: Part I - History, Technology, and Prospects. IEEE Trans. Electron Devices. 2017, 64, 3, p.674-691.
- (7) Gajda, M. A. et al. "Industrialisation of Resurf Stepped Oxide Technology for Power Transistors". Proc. The 18th Int. Symp. Power Semicond. Devices IC's. Naples, Italy, 2006-06, IEEE. 2006, p.109-112.
- (8) Fujihira, T. Theory of Semiconductor Superjunction Devices. Jpn. J. Appl. Phys. 1997, 36, 10, p. 6254-6262.
- (9) Asaba, S. et al. "Breakthrough in Channel Mobility Limit of Nitrided Gate Insulator for SiC DMOSFET with Novel High-temperature N₂ Annealing". Proc. 2019 31st Int. Symp. Power Semicond. Devices IC's. Shanghai, China, 2019-05, IEEE. 2019, p.139-142.
- (10) Skowronski, M.; Ha, S. Degradation of hexagonal silicon-carbide-based bipolar devices. J. Appl. Phys. 2006, 99, 1, 011101.



西脇 達也 NISHIWAKI Tatsuya, D.Eng.
東芝デバイス&ストレージ(株)
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・応用物理学会会員
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



横田 誠 YOKOTA Makoto
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部 ディスクリット応用技術センター
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



山口 正一 YAMAGUCHI Masakazu
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部
応用物理学会会員
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.