

# 第1章 パワーエレクトロニクス技術と パワー半導体の役割

岩室憲幸\*

## 1 はじめに

一昨年に勃発したウクライナでの戦争や最近のガザ地区紛争など、国際政治の世界では不安定さが増している。また経済でも米国での金利上昇ならびに日本銀行の金融緩和政策継続に伴う円安が今も進行中である。そのため原油価格が大きく上昇しており、資源を海外に頼っている我が国にとっては厳しい状況になっている。そしてこのことがわが国の電力供給に影響を及ぼし、社会的に大きなインパクトを与える結果となった。そのため、従来にも増して再生可能エネルギーを活用し、かつ環境にやさしい安全・安心なエネルギーの確保が喫緊の課題となっている。またエネルギー消費の分野においても、例えばガソリン車から電動自動車への転換（xEV化）などが徐々に進行中であり、その結果、従来は電気エネルギーが使われていなかった領域で、電気エネルギーの利用がますます増えている。そしてこの電気エネルギーの有効活用には欠くことのできないキーテクノロジーがパワーエレクトロニクスであり、パワーデバイスである。

パワーエレクトロニクス（以下パワエレと略す）機器のなかでパワーデバイスは、電流を流したり切ったりすることで電力変換を行う。つまりパワエレ機器の中でパワーデバイスは、「スイッチ」として動作するのである。このパワエレ機器の高効率化は、いかにパワーデバイスでの損失を抑えて電力を変換するか、ということの意味している。理想的なパワーデバイスは損失を全く発生させずに電力を変換することができ、電力変換効率100%で超小型・軽量の高性能パワエレ装置を実現することができる。しかしながら実際の装置を見てみると、変換効率100%は達成されておらず、装置内は損失により熱気を帯び、また十分な小型・軽量化ができていない。このことから、パワーデバイスに要求される性能はスイッチとして動作する際にその発生損失が小さいこと、具体的には①電流導通時の電気抵抗が低いこと、②スイッチング速度が速いこと、そして③破壊することなく安定な動作が可能なこと、となる。これら低オン抵抗（低オン電圧とも言う）特性、高速スイッチング特性、さらには高破壊耐量特性の3つがパワーデバイスに必要とされる重要な特性となる。ところがこれら3つの特性は一般的にトレードオフの関係にある。つまり新しいパワーデバイスを開発するという事は、これら3つの特性を同時に改善していくことになるのである。この3つの特性を同時に改善可能な新規パワーデバイス開発への期待は近年ますます高くなってきている。2024年2月に出版されたある調査会社の資料<sup>1)</sup>によれば、パワー

---

\* Noriyuki IWAMURO 筑波大学 数理物質系 物理工学域 教授

デバイスの世界市場は 2023 年で約 3.2 兆円であったものが、12 年後の 2035 年にはおよそ 7.8 兆円にまで拡大するとしている。そしてこの市場の急拡大を支えているのが、シリコンパワーデバイスならびに SiC パワーデバイスである。

## 2 パワーデバイスの主役：MOSFET と IGBT

図 1 は、代表的なパワーデバイスであるバイポーラトランジスタ、MOSFET、ならびに IGBT の素子断面構造の概略図である。まずパワーデバイス共通の特徴として、電極が半導体をはさんで素子の上と下に配置されている縦型デバイス構造であることが挙げられる。これは、パワーデバイスはより大電流を流し、かつ高電圧印加に耐えなければならないので、半導体素子全体に縦方向に電流を流すことが可能で、半導体の厚みで高電圧を維持できる縦型デバイス構造にする必要があるためである。ここが、横型デバイス構造が主流である IC/LSI と大きく異なる点である。次に、パワーデバイス中の制御電極に注目する。制御電極であるゲート電極 (G) またはベース電極 (B) の配置を見ると、MOSFET ならびに IGBT はゲート電極 (G) が絶縁膜であるシリコン酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ ) 上に形成されているのに対し、バイポーラトランジスタはベース電極 (B) が直接 p 型半導体に接触している。MOSFET ならびに IGBT のオン・オフ動作はこのゲート電極 G とシリコン酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ )、さらにはシリコン半導体で構成される「コンデンサ」に少量の電荷を充電・放電させることで行う。つまりゲート電極 G から絶縁膜である  $\text{SiO}_2$  を介してシリコンパワーデバイスを制御する構造となっている。一方バイポーラトランジスタは p 型半導体に直接多くの電荷 (電流) を、一定期間常に供給、または引き抜くことでパワーデバイス内の pn 接合をオン・オフさせてスイッチング動作を行う。このオン、オフ動作の違いにより、MOSFET ならびに IGBT はそのスイッチング動作に必要な電力 (駆動電力と言う) が極めて小

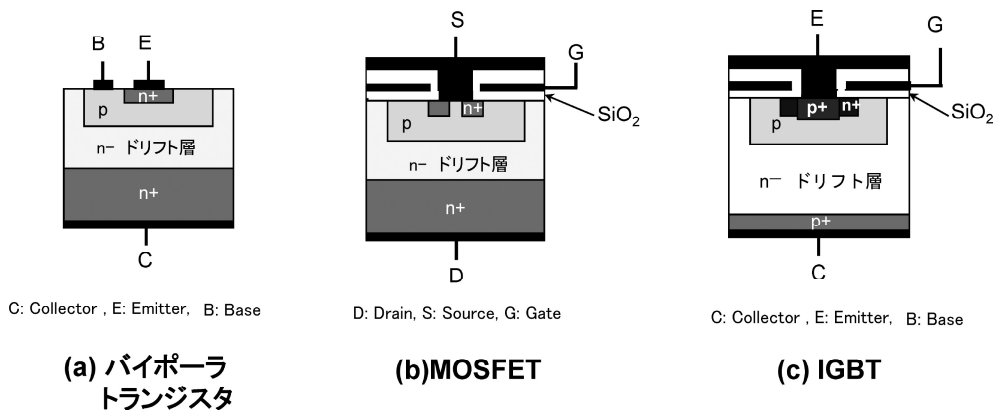


図 1 バイポーラトランジスタ、MOSFET、IGBT の断面構造

## 第1章 パワーエレクトロニクス技術とパワー半導体の役割

さくなるため、駆動回路がバイポーラトランジスタに比べ小型化できるという特徴を有する。これはパワエレ装置の小型化、高機能化に非常にメリットをもたらすこととなった。

さらにこのMOSFETならびにIGBTは図2に示す高ドレイン-ソース電圧 ( $V_{DS}$ ) 印加時 (IGBTの場合は高コレクター-エミッタ電圧 ( $V_{CE}$ ) 印加時) に電流飽和特性を示すという特筆すべき特徴を有していた。これは、 $V_{DS}$  (IGBTは  $V_{CE}$ ) が高くなるとMOSFETチャンネル部の反転層に直接  $V_{DS}$  ( $V_{CE}$ ) の影響が及ばなくなり、ドレイン電圧上昇分が空乏層を広げるだけに費やされるという“ピンチオフ”という現象が生じるためである。もしパワーデバイスが、このような電流飽和特性を示さない素子であった場合、負荷短絡(ショート)のような重大事故が発生し高電圧が素子に直接印加された時点で瞬時に大電流が流れ、半導体デバイスはすぐに破壊する。しかしながら、電流飽和特性を示す素子であれば、高電圧が素子に印加されても飽和電流値以上の電流は流れず、その結果瞬時破壊を避けることができる。素子が瞬時破壊をせずにある一定の時間 (~10  $\mu\text{sec}$  程度) 破壊を防ぐことができれば、パワエレ装置内の保護回路機能が働き、安全に装置を停止することが可能となる。つまり数あるパワーデバイスの中でMOSFETとIGBTのみが、ゲート電極が  $\text{SiO}_2$  上に形成されていることで駆動回路の小型化ができ、なおかつ電流飽和特性を示すため瞬時破壊しない、という特長を有している。このことが、MOSFETとIGBTが現在のシリコンパワーデバイス市場の大部分を占め、なおかつSiCにおいてもMOSFETがその中心に存在している理由である<sup>2)</sup>。

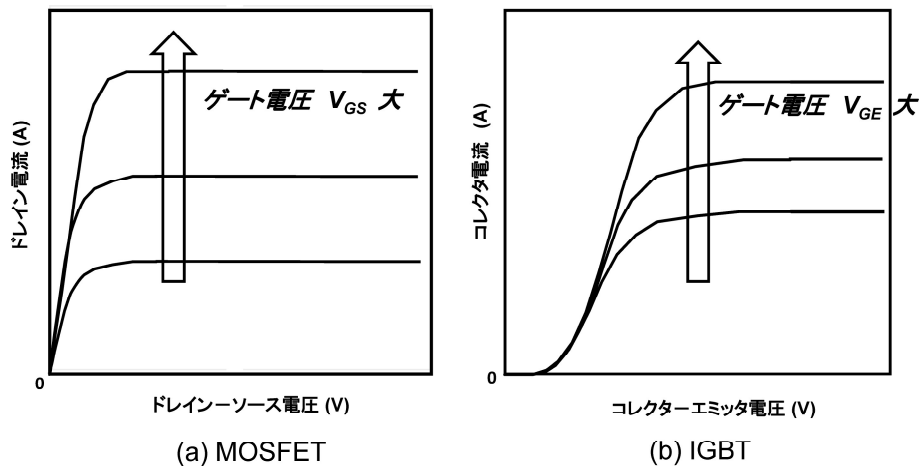


図2 MOSFETとIGBTの電流-電圧特性

### 3 最新シリコン MOSFET 技術

#### 3.1 低耐圧 MOSFET

トレンチ MOSFET はチャネル部の抵抗成分を低減することで全オン抵抗を低減できるという特徴があり、これは全抵抗に占める n-ドリフト層抵抗の比率が小さい耐圧 100~200 V 以下の低耐圧 MOSFET で効果的となる。トレンチゲート構造の誕生によりチャネル抵抗は格段に小さくなった。しかしながら n-ドリフト層の抵抗はほとんど低減することなく、低耐圧 MOSFET においてもその抵抗の大きさが目立つようになってきた。このような背景のなか誕生したのが、図 3 に示すトレンチフィールドプレート MOSFET である<sup>3)</sup>。この素子構造の特徴は、トレンチ MOSFET 構造のトレンチを n-ドリフト層深くまで掘り、厚い酸化膜に囲まれた埋め込みゲート電極構造を取るところにある。この埋め込み電極はゲート電極と同様にポリシリコンで形成する。この埋め込みポリシリコン電極がソース電極と接続されているためいわゆる RESURF 効果 (REduce SURface Field 効果) により n-ドリフト層内の電界分布を均一にする。これにより、n-ドリフト層の不純物濃度を高くしてもソース・ドレイン間の耐圧を保つことができるため、耐圧を維持したまま低オン抵抗化が可能となるのである。また MOSFET の低オン抵抗特性と高速スイッチング特性を表す性能指数  $R_{on} \times Q_g$  ( $Q_g$ : ゲート電極電荷量) を比較すると、トレンチフィールドプレート構造の方がトレンチ MOSFET よりも良好であるとの結果も報告されており、定格電圧 60 V 素子においても十分効果的であるといえる<sup>4)</sup>。これは、ゲート・ドレイン間容量 (帰還容量) である  $C_{gd}$  (または  $C_{rss}$ ) が、トレンチ底部ならびにその周辺の酸化膜が厚いことにより低減でき、その結果低オン抵抗化とともに高速スイッチング特性にも有効となるためである。そしてその良好な特性から、2020 年に中国で発売された 50 万円の 4 人乗り電気自動車のインバータに、耐圧 150 V/定格電流 100 A のこの素子構造を用いた MOSFET が採用された

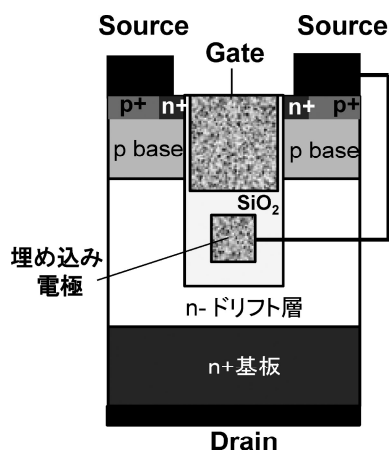


図 3 トレンチフィールドプレート MOSFET の断面図

との報告もある<sup>5)</sup>。

### 3.2 高耐圧 MOSFET

耐圧 500~650 V クラスを代表とするシリコン高耐圧 MOSFET においては、オン抵抗の大部分が耐圧を保持する n-ドリフト層自体の抵抗で決まる。一時期その特性改善の限界が取りざたされていたが、1990 年代にスーパージャンクション (SJ) の概念が示され<sup>6)</sup>、実際の試作結果が報告されるようになった<sup>7)</sup>。そして実際にシリコンリミットを超え得ることが示され、大きなインパクトを与えた。さらに最近の SJ 製造技術の進歩は目覚ましく、製造法が複雑であると言われてきたエピタキシャル層を幾重にも重ねた多層エピ成長法に代わり、n-エピ層に深いトレンチ層を直接形成し、そこに p 型エピタキシャル層を形成するトレンチ埋め込み法なども開発された。SJ 型 MOSFET は pn 柱状構造の不純物濃度のばらつきに素子耐圧特性が極めて敏感であるという特徴から、この不純物分布のばらつきをいかに抑えることができるかが特性改善の鍵となる。この課題を解決すべく SJ 型 MOSFET はその製造コスト低減と性能向上への取り組みがますます盛んであり、今後も pn 柱状構造の微細化・高濃度化による一層の低オン抵抗化を中心に、しばらくは高耐圧 MOSFET の主役となるべく、さらなる発展が期待されている。

## 4 最新シリコン IGBT ならびにモジュール技術

現在、最先端のシリコン IGBT 構造であるトレンチゲート型フィールドストップ (FS) IGBT (ライトパンチスルー (LPT) IGBT とも言う) は、IGBT 特有の極薄ウェハ (600 V 耐圧素子で 100  $\mu\text{m}$  未満) とトレンチゲート構造と融合することで超低オン電圧かつ超高速スイッチングという低損失性能を示しながら、高破壊耐量をも併せて持った素子である。さらにこの最先端素子は、オン電圧 (オン抵抗) の温度依存性が正、つまり IGBT というバイポーラ素子でありながら温度が上昇するとオン電圧 (オン抵抗) が増加するという特徴を有している。そのためデバイスの並列動作が容易となり、モジュール構造を適用することで大電力化を達成している。さらにそこに過電流・過熱保護機能を持つ最新 IGBT 素子と制御機能を持つ専用 IC チップを搭載した IPM を開発することで、より低損失、高破壊耐量で使いやすいデバイスへと進展している。

近年の IGBT 技術動向を見ると、素子表面構造の改良によるオン電圧・ターンオフ損失のトレードオフ特性の一層の向上や、最大接合温度 ( $T_{j\text{max}}$ ) 175°C 保証の IGBT モジュール技術の開発<sup>8)</sup>、直径 300 mm 大口径ウェハを用いた量産技術開発<sup>9)</sup>、さらには IGBT と pin ダイオードを 1 チップにまとめた逆阻止 IGBT (RB-IGBT)<sup>10)</sup> や逆導通 IGBT (RC-IGBT)<sup>11)</sup> の開発など、その開発スピードは一向に衰えていない。特に RC-IGBT の進展が目覚ましく、ついに RC-IGBT モジュールの xEV 用途への適用も始まった<sup>12)</sup>。従来までの IGBT モジュール内には別々に IGBT とダイオード (FWD) 素子が接続され、それをインバータ回路に適用していた。したがって半導体素子数は、例えば IGBT 6 個、FWD 6 個の計 12 個が必要になる。図 4 に RC-IGBT の断