

MOSFET と IGBT を中心とした パワー半導体デバイスの最新動向と課題

筑波大学 岩室 憲幸 Iwamuro Noriyuki

はじめに

昨年2月に始まったロシアによるウクライナ侵攻、さらには米国をはじめとする主要各国の金利引き上げ政策ならびに日本銀行の金融緩和と政策継続に伴う円安の進行で、資源価格が大きく上昇している。これらのことが、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、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。特にCO₂削減による地球温暖化防止の観点からも、自動車の電動化(xEV化)が世界各国で急速に進展している。このような状況において、パワー半導体デバイスの特性向上ならびに新規パワー半導体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。

パワー半導体デバイスの世界市場は、2023年以降も産業分野ならびに自動車分野がけん引し、その市場規模は2022年の約2.7兆円から2035年にはおよそ13.4兆円にまで急拡大するとの報告がある¹⁾。本報では、市場の主役であり続けるシリコンパワー半導体デバイス、特にシリコンIGBTの最近の状況についてふれた後、数ある次世代パワー半導体デバイスの中でも最近急激に市場規模が拡大しているSiC MOSFETを取り上げ、その最新開発状況ならびに市場拡大に向けた課題について述べる。

パワー半導体デバイスの主役： MOSFET と IGBT

まずパワー半導体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、パワー半導体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、パワー半導体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の配置を見ると、MOSFETならびにIGBTはゲート電極が絶縁膜であるシリコン酸化膜(SiO₂)上に形成されているのに対し、GTOサイリスタやバイポーラトランジスタはゲート電極(バイポーラトランジスタではベース電極)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とSiO₂、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。つまりゲート電極から絶縁膜であるSiO₂を介してシリコンパワー半導体デバイスを制御する構造となっている。

一方GTOサイリスタや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半導体デバイス内の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)が極めて小さくなるため、駆動回路がGTOサイリスタやバイ

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は高ドレインソース間電圧(V_{DS})印加時[IGBTの場合は高コレクターエミッタ間電圧(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チャネル部の反転層に直接 V_{DS} (V_{CE})の影響が及ばなくなり、 V_{DS} (V_{CE})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。もしパワー半導体デバイスが、GTOサイリスタ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)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してしまう。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(数 μ ~ 10 μ 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半導体デバイスの中でMOSFETとIGBTのみが、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、という特徴を有している。このことが、MOSFETとIGBTが現在のシリコンパワー半導体デバイス市場を席巻している理由である。

次章以降、再生可能エネルギー用パワエレ装置やxEVインバータ装置などの適用領域である中・高耐压領域で市場を席巻し、かつ今後その市場規模の拡大が期待されるシリコンIGBT、ならびに新材料パワー半導体デバイスであるSiC MOSFETの最新技術動向について述べる。

シリコン IGBT の最新技術

現在、最先端の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は、IGBT特有の極薄ウェハ(1200 V耐压素子で100 μ m程度)とトレンチゲート構造と融合することで超低オン

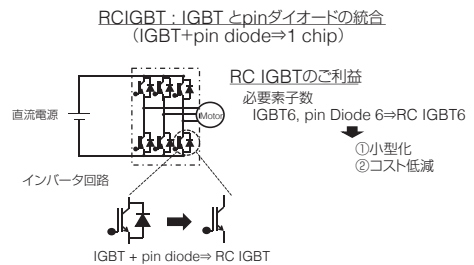


図1 逆導通IGBT(RC IGBT)の特徴

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。

最近になり、IGBTの特性改善を支えてきた技術の1つである極薄ウェハ技術にブレーキがかかりつつありIGBTの特性改善がそろそろ限界に近づいてきた、と一部で言われてきた。しかし近年の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_{jmax})175℃保証のIGBTモジュール技術の開発²⁾、直径300mm大口径ウェハを用いた量産技術開発³⁾、さらにはIGBTとpinダイオードを1チップにまとめた逆導通IGBT(RC-IGBT)⁴⁾の開発など、その開発スピードは一向に衰えていない。

もともとIGBTモジュールの中には、IGBTとインバータ還流動作時に電流を導通させるpinダイオードが別々に接続され、インバータ回路に適用されている。したがってIGBTモジュール内の半導体素子数は、たとえばIGBT 6個、pinダイオード 6個の計12個が必要になる。RC IGBTは、逆並列に接続されたIGBTとpinダイオードが1素子に集積されたという特徴を有するデバイスであるため、インバータ回路を構成する場合に必要な半導体数が通常IGBTモジュールの半分の6個で済むこととなる。そのためRC IGBTモジュールは、モジュールサイズの小型化とコスト削減が可能となる(図1参照)。このRC IGBTの設計の難しさは、素子設計の最適化手法の異なるIGBTとpinダイオードを1素子に統合し、RC IGBTとしての素子特性を最適化するところにある。たとえばxEV向けRC IGBTの場合、トレンチゲートFS