

パワー半導体の現状と動向

重兼 寿夫(しげかね ひさお)

関 康和(せき やすかず)

藤平 龍彦(ふじひら たつひこ)

1 まえがき

長引く不況の中であっても、混迷する経済情勢の中にあっても、技術開発への要求は根強く、その開発行為はとどまることなく着実に前進するものと確信している。特にわれわれの明日の社会をよりよくするためのインフラストラクチャーの改善には多くの技術開発力を結集し、その目的を達してきた。

現代ではそれを支える最も大きな技術がパワーエレクトロニクスであり、われわれの生活のほとんどすべての分野において用いられているといっても過言ではない。このパワーエレクトロニクス技術の根幹を支え、または相互に補いながら、これまで、パワーデバイス開発の歴史が刻まれてきた。パワーエレクトロニクスが大きく発展する中で、当然のことながら、パワーデバイスへの要求も、さらなる高機能化や高性能化にとどまらず、より高い信頼性の実現にまで及んでいる。

富士電機ではこれらの要求に応えるべく、洗練された技術開発力で、高信頼性の最新鋭のパワーデバイスを社会に提供し続けている。

2 最近のパワーデバイスの開発動向

パワーデバイスの最新動向を知るためには、パワーデバイスで最も権威のある国際学会「ISPSD」(International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs)での動向を見るのがよい。ISPSDは1988年に電気学会主催により日本で発足し、その後パワーデバイスに携わる多くの人たちが大切に育てた国際学会である。現在では毎年、日本、米国、欧州の持ち回りで開催しており、日本では電気学会主催、IEEE共催、米国と欧州ではIEEE主催、電気学会共催として開催されている。2001年のISPSD 01は大阪で開催され、Banquet Keynote Addressにおいて富士電機の社長・沢邦彦が前電気学会会長として、My Experiences in Developments of Power Electronics — What I expect to young researchers and engineers —

と題して講演し、パワーエレクトロニクスにおける自らの開発体験に基づく内容により、参加した多くの研究者やエンジニアに強い感銘を与えたことは記憶に新しい⁽²⁾。

2002年のISPSD 02は、米国ニューメキシコ州サンタフェにて6月初旬に開催された。ここでは40件の口頭発表と、31件のポスター発表が行われた。富士電機からは3件の口頭発表が行われた⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

表1に今回も含め最近6年間のISPSDにおける分野別論文件数の推移を示す。この表から分かるように、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) や MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) が含まれる MOS-gated Device の発表件数が群を抜いており、それに Power IC/HVIC (High Voltage IC) が続いている。これらパワーデバイス分野での関心の高さを示している原動力の一つには LSI のウェーハプロセス技術のパワーデバイスへの導入によりパワーデバイスとしての特性向上が著しいことと、パワーデバイス独自の設計技術やプロセス技術において、幾つもの革新的で興味ある報告がなされていることである。

例えば最近のパワーデバイス分野では、パワー MOSFET でエピタキシャル層を幾重にも重ねたスーパー Junction 構造の実現や、IGBT でウェーハを極限まで薄くしたフィールドストップ型 IGBT の開発などが、パワーデバイス固有技術として注目されている。

また、もう一つにはパワーデバイスを単体としてのみ扱うのではなく、ドライブ機能や保護機能を集積させることで、コンパクトで信頼性の高いパワー回路ブロックを構成したいというアプリケーション技術者からの要求も原動力の一つになっており、Power IC/HVIC の論文が続いて多いことの背景となっている。

また、パワーデバイスにおける期待の新材料として SiC (Silicon Carbide) の発表も堅調である。特に SiC の最大電界強度が Si に比較して一けた高い物理的な特徴を生かした高耐圧領域でのパワーデバイスに期待が大きい。反面、現在の Si パワーデバイスに工業的に置き換わるには、克服しなければならない技術課題も多く、技術的なブレーク



重兼 寿夫

パワー半導体デバイスの研究開発に従事。現在、電子カンパニーパワー半導体事業部副事業部長兼富士日立パワーセミコンダクタ(株)代表取締役副社長。工学博士。電気学会会員。



関 康和

パワー半導体デバイスの研究開発に従事。現在、松本工場半導体基盤技術開発部長。工学博士。電気学会会員。



藤平 龍彦

パワー半導体デバイスの研究開発に従事。現在、松本工場パワー半導体開発部長兼富士日立パワーセミコンダクタ(株)取締役松本事業所長。工学博士。電気学会会員、応用物理学学会会員。

表1 最近6年間のISPSDにおける分野別論文件数の推移

開催地 発表分野	ISPSD 97 ワイマール (ドイツ)	ISPSD 98 京都 (日本)	ISPSD 99 トロント (カナダ)	ISPSD 00 ツールーズ (フランス)	ISPSD 01 大阪 (日本)	ISPSD 02 サンタフェ (アメリカ)
Application	4	4	7	8	13	5
Simulation	6	1	1	4	1	2
Bipolar Device	0	1	0	1	1	1
MOS-gated Device	23	29	28	25	37	28
Power IC/HVIC	26	26	11	8	2	11
Power Module	1	3	3	5	0	1
Thyristor/Diode	6	12	10	8	15	4
GTO	5	6	1	0	2	0
SI Device	2	3	0	0	1	0
Material/Process	5	7	8	16	13	7
Packaging	2	0	1	1	6	1
SiC	8	7	6	8	11	11
合計	88	99	76	84	102	71

スルーが期待されている。

③ 富士電機のパワーデバイスの開発方針

富士電機は IGBT、パワー MOSFET、パワーダイオード製品を産業、自動車、情報、民生の4市場分野に絞り込んでワールドワイドにパワー半導体事業を展開している。新製品開発は、どこにでも適用されるコモディティデバイスを開発するのではなく、上記4市場分野を対象に、さらに限定されたアプリケーション市場セグメントにおいて、グローバル No.1 かオンリーワンと成りうる製品しか開発しないことが特徴である。このような製品をキラー製品と呼んでおり、全パワー半導体の売上高に占める割合を2000年の35%から2002年には48%レベルに拡大しようとしている。

このようなキラー製品を開発するためには、単にパワーデバイス技術者が技術を磨くだけでは不十分であり、アプリケーション側技術者とよく連携することが肝要である。富士電機では、各市場分野のリーディング顧客と強固で継続的な戦略的パートナーシップを組み、開発することを基軸としている。また、徹底した顧客起点で新製品開発を考えると、顧客はパワーデバイスにお金を払うのではなく、パワーデバイスを顧客のパワーエレクトロニクス製品に適用した場合の効果にお金を払っていることが理解できる。したがって、開発する新製品は単なるパワーデバイスではなく、顧客の技術的な悩みを解決するソリューション提案型デバイスでなければならない。

富士電機はこのような観点から、まずソリューション提案の基本となるアクティブデバイスである MOS ゲートデバイスの売上高比率を2000年の52%から2002年には55%に引き上げようとしている。また同時に、これら MOS デバイスにドライブ機能や保護機能を内蔵させたスマートパワーデバイス・インテリジェントパワーデバイス

の比率を2000年の28%から2002年には33%に引き上げようとしている。パワーダイオードなどのパッシブデバイスであっても、最先端 MOS ゲートデバイスと組み合わせて使用することで、新しいアプリケーション上の効果を引き出せることを狙って開発を行っている。

すなわち、富士電機のパワーデバイスの開発方針は、世界最先端技術で高性能なパワーデバイスを実現するとともに、顧客と一体となりパワーデバイス技術と IC 技術を融合することで、ソリューション提案型のスマートパワーデバイス・インテリジェントパワーデバイスを提供することである。富士電機は「顧客の懐の中に入って」新製品の開発を行うことが基本方針である。

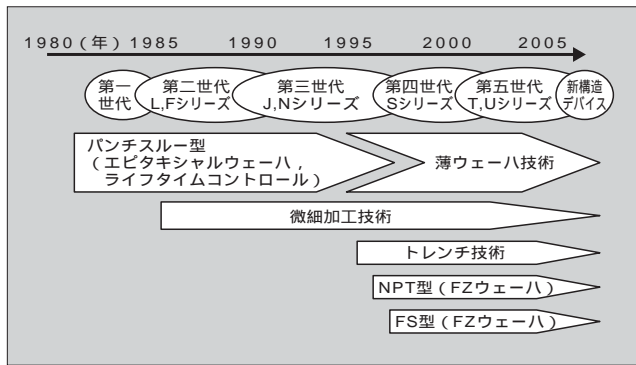
④ 富士電機の IGBT

本特集号の前半では特に技術革新の激しいデバイスの第五世代 IGBT「U シリーズ」に関する論文を集め、最近開発した 600V、1,200V、1,700V モジュールについてまとめた。U シリーズの技術革新については次稿(U シリーズ IGBT モジュールの技術革新)を、その他それぞれの耐圧別モジュールについてはそれに続く稿(3編)を参照されたい。

図1は第一世代から第五世代までの IGBT の経緯と適用技術について表したものである。

第一世代から第三世代までの IGBT では、いわゆるエピタキシャルウェーハを用いて、ライフタイムコントロール技術の最適化を図ることと微細加工技術で特性改善を行ってきた。第四世代⁽⁶⁾⁽⁷⁾や第五世代では、これまでのエピタキシャルウェーハから FZ (Floating Zone) ウェーハを用いることで、大幅な特性改善を実現させることになる。これは、単に使用するウェーハを変更したということばかりではなく、IGBT の従来の設計方針を大きく転換させることになった。エピタキシャルウェーハを用いて IGBT を設計

図1 富士電機製 IGBT の適用技術の推移



する場合には、コレクタ側からキャリアを高注入させ、IGBT ボディに伝導度変調によりキャリアを充満させ、低オン電圧化を狙い、電流遮断時には、この伝導度変調により充満したキャリアをライフタイムコントロール技術の適用により再結合させ消滅させるという基本設計を用いた。ライフタイムコントロール技術を適用すると、通常のオン状態においてもその効果があるためキャリアの輸送効率は低い。それを補うだけキャリアの高注入化を図り、オン電圧を低減させることになる。すなわち、高注入、低輸送効率というのが基本設計であった。FZ ウェーハを用いて IGBT を設計するときには、コレクタ側からのキャリアの注入を抑制し、注入効率を下げて輸送効率を上げるという基本設計の変更が必要である。単にキャリアの注入効率を低減させれば、オン電圧が上昇してしまうが、ここで IGBT ボディにおけるキャリアの輸送効率を上げることで、この問題を解決した。すなわち、ライフタイムコントロール技術を適用しない設計である。富士電機ではまず、第四世代の 1,200 V IGBT からその適用を始めた。NPT (Non Punch Through) 構造の「S シリーズ」である。

FZ ウェーハを用いるためには、従来の半導体デバイス開発技術に加えて、NPT 構造を実現させるためのウェーハを薄くする技術が必要である。富士電機ではこの技術開発にいち早く取り組み、IGBT の FZ 化を積極的に進めてきた。600 V の「T シリーズ」は S シリーズの技術を展開し、さらに薄層化を進めて実現させたものである。

また、IGBT の特性改善には不可欠な技術として表面エミッタ側のトレンチ形成技術がある。トレンチ形成技術の IGBT への適用については、オン電圧は低減できるものの、短絡耐量が問題視された時期もあった。しかしながらそれらも現在では、表面構造設計の最適化や NPT 構造などの適用により克服し、まったく問題のないレベルになっている。600 V 第五世代 IGBT の U シリーズでは、このトレンチ技術を適用し大きな特性改善を果たした。

さらに IGBT の特性改善は、NPT 構造から FS (Field Stop) 構造へと進展する。FS 構造とは、従来の IGBT における n+ パツファ層を FS 層とし、キャリアの低注入、高輸送効率という基本動作を用いながら、NPT 構造よりもベース層を薄くしてさらにトランジスタとしての特性改善を実現させたものである。ここでは、ウェーハの薄層化

図2 600 V IGBT チップ断面の推移

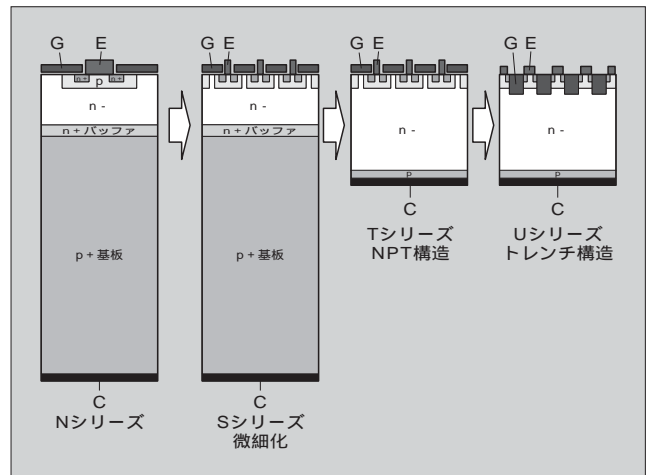
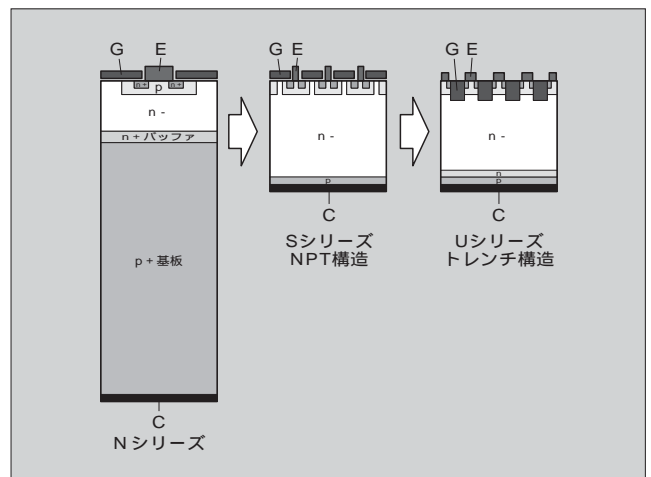


図3 1,200 V IGBT チップ断面の推移



技術をさらにレベルアップさせ、薄いウェーハ状態でのコレクタ側の FS 層や p 層の形成プロセス技術を開発し、このデバイスを実現させた。1,200 V、1,700 V の第五世代 IGBT U シリーズである。

これらのチップの断面構造を世代別に分かりやすく示したのが、図 2、図 3 である。それぞれ 600 V、1,200 V IGBT チップの変遷を示した。これらの図から分かるように従来の IGBT チップと比較すると、最近の IGBT チップの厚さは非常に薄いものとなっているばかりでなく、トレンチ化や FS 化技術など高レベルな技術が幾つも織り込まれている。

5 インテリジェント化

富士電機では前述した開発方針に従って、パワーデバイスのインテリジェント化を推進してきた。パワーデバイス部に加え、ドライブ機能や保護機能、自己診断機能、演算機能などを内蔵させ、このデバイスを使用されるお客様の悩みを解決し満足していただけることを最大の開発目的として推進してきた。本特集号では、新たに T シリーズの IGBT を用いて損失低減ばかりでなく、温度依存性が少な

く電流集中を生じにくい「R-IPM3シリーズ」と、パッケージの小型・薄型化を狙った「Econo IPMシリーズ」を開発した。ノイズの低減などの効果も含めて総合的にお客様に使いやすいデバイスを目指している。

また電源分野においては、すでに「M-Power1」を製品化展開し、カラーテレビ、CRT モニタなどに採用されている。今回新たに、軽負荷時でも高効率な制御が可能な方式を新規に開発し、これを用いてLCD (Liquid Crystal Display) モニタなどの電源を容易に設計できる「M-Power2シリーズ」を提案した。これにより小型、軽量そして高効率電源を可能とすることができる。

富士電機は自動車分野においてもこれまで、高機能MOSFET やイグナイタ用インテリジェントパワーデバイスなどの実績を持っている。今回はランプの点灯やモータの駆動など負荷の通電開始時に瞬間的な大電流を流通させる能力を付加させた車載用高機能 MOSFET を開発した。これはさらにフェイルセーフ設計として過電流検出、過電流制限そして過熱検出の保護機能を取り込んで多重の安全設計とした。

このように富士電機では、産業、自動車、情報、民生の絞り込んだ分野で、パワーデバイスのインテリジェント化を推進させ、顧客と一体になり提案型の新製品開発を行ってきた。

⑥ 個別素子の高性能化

2001年の低 R_{on} (オン抵抗) と低 Q_{gd} (ゲート-ドレイン間チャージ容量) を両立させて大幅な損失低減を実現させた、パワー MOSFET 「SuperFAP-Gシリーズ」がある。すでに450 ~ 600V 耐圧クラスでは約40型式を量産している。今回は新たにDC-DCコンバータ用に100 ~ 250Vの中耐圧クラスと、AC200V入力のスイッチング電源用に700 ~ 900Vクラスの高耐圧クラスの系列化を行った。SuperFAP-Gシリーズは独自の表面設計構造により表面での電界を緩和し、シリコン理論限界の97%の耐圧を実現させ低抵抗ウェーハを使用可能としたもので、パワーMOSFETにおいて大きなブレイクスルーを果たした。

スイッチング電源分野では、さらに損失低減を目的としてダイオードへの改善要求がある。実際にはスイッチング電源の二次側出力整流ダイオードでは、スイッチング電源損失の約半分を占めるほどである。これまでは200 ~ 300Vクラスではpn接合ダイオードが用いられてきた。今回は、この損失低減のためにショットキーバリヤダイオード(SBD)の優れた特性に注目し、開発を進めた。特にブレイクスルーしなければならなかった技術は、バリヤメタルの最適化であった。バリヤメタルのバリヤハイトが高すぎれば順方向電圧(V_F)は高くなり、低すぎれば漏れ電

流(I_r)が増加するというトレードオフの中で、高耐圧のSBDは開発された。

⑦ あとがき

ここ数年のパワーデバイスにおける技術開発の進展は目覚ましい。激しく動く時流の中で、富士電機では常に最先端の技術でパワーデバイスをリードしてきた。新製品開発では、常に絞り込んだ市場セグメントにおいてグローバルNo.1かオンリーワンと成りうるものしか開発しないという方針を貫いている。

本特集号ではこれらの開発方針に従って開発した富士電機のパワーデバイス製品を紹介する。特に今回は期待の大きい第五世代IGBT(Uシリーズ)の製品化にあたり、本特集号の前半に集めて紹介した。Uシリーズの技術革新、また600V、1,200V、1,700V IGBTモジュールについて詳細な紹介をしたので参照されたい。

IGBTばかりではなく、特定分野におけるインテリジェント化への取組みや、特定アプリケーションにおける専用デバイスの提案、また個別デバイスでの技術的な大きなブレイクスルーなど、常に顧客起点で開発された富士電機のパワーデバイスをも本特集号では紹介している。

これらの新製品が顧客満足度を十分に向上させるものと確信している。

さらにわれわれは品質に対しても「*Quality is our message*」と宣言し、自らを律し今後とも確かな品質を持つ製品をお客様に提供していく所存である。

参考文献

- (1) 関康和．パワーデバイスの最近の動向2002．平成14年電気学会全国大会シンポジウム．3-S15-1，2002．
- (2) Sawa, K．My Experiences in Developments of Power-Electronics．Proceedings of ISPSD 01．2001，p.461．
- (3) Otsuki, M. et al．Investigation on the Short-Circuit Capability of 1200 V Trench Gate Field-Stop IGBTs．Proceedings of ISPSD 02．2002，p.281．
- (4) Ohnishi, Y. et al．24 m cm² 680 V Silicon Super Junction MOSFET．Proceedings of ISPSD 02．2002，p.241．
- (5) Sugi, A. et al．A 30 V Class Extremely Low On-resistance Meshed Trench Lateral Power MOSFET．Proceedings of ISPSD 02．2002，p.297．
- (6) 関康和．IGBTの開発動向．電気学会論文誌C．vol.122-C，no.6，2002，p.1074．
- (7) 関康和．パワー半導体の現状と動向．富士時報．vol.74，no.2，2001，p.103-105．
- (8) 重兼寿夫．パワー半導体の現状と動向．富士時報．vol.72，no.3，1999，p.161-163．