II. パワー半導体デバイスの進展

正 員 八 尾 勉 [(株)日立製作所 日立研究所]

正 員 内 田 喜 之 [富士電機(株)技術開発センター]

1. はじめに

インバータ化に代表されるパワーエレクトロニクス応用技術の最近の目覚ましい進歩は、キーコンポーネントであるパワー半導体デバイス(パワーデバイス)の進歩に依っているといても過言ではない。

図1にパワーデバイスの発展経過と展開を示すとおり、1980年代には特記すべき幾多の進展があった。GTOサイリスタとパワーMOSFETの性能向上、パワーモジュールによるトランジスタの大容量化、およびMOSゲートトランジスタIGBTの出現などである。いずれもモータ制御や電源装置などの産業用機器の高性能化、小型化に大きなインパクトを与えてきた。特に、電圧電流容量が比較的大きく、高速スイッチングが可能で、かつゲート駆動が簡単という理想的な要件を備えたIGBTの出現は、パワーエレクトロニクス分野における飛躍的な技術革新を現実のものにしつつある。また、駆動回路や保護回路を内蔵化したパワーICは、パワーエレクトロニクス技術を展開して機器の小型化、高機能化を実現しようとする家電、OA(Office Automation)機器などに適切なデバイスとして実用化が始まっている。

しかしながら、パワーデバイスの機能・性能は、現状レベルで満足されているわけではない。応用機器、システムサイドの根強い要求にこたえるべく、更に一層の進歩、発展が期待されている。

本稿では、主要なパワーデバイスの現状と新しい技術の動向について述べ、21世紀初頭までの展望を概観してみよう。

2. ダイオードの進展

IGBTを使った高周波インバータには、IGBTの電

図1 パワーデバイスの発展経過と展開

圧・電流容量やスイッチングスピードに見合った、高耐圧、高速かつソフトリカバリーのダイオードが必要である。しかし、従来のpin型高速リカバリーダイオード(FRD)では、構造が単純すぎるため性能向上の余地が少なく、高周波化のネックとなっている。また、100V以下の低圧回路に多用されているショットキーバリアダイオード(SBD)でも、電源電圧の低圧化に対応して順電圧降下の減少が強く望まれているが、バリアの低い金属に変えただけではリーク電流が増加するため全体の損失低減が図れない。

このような従来ダイオードの性能限界を打破する新しい技術が注目されている。その一つは、図2に示すようにpinダイオードと並列にSBDまたはp⁻nダイオードを配置したダイオードである⁽¹⁾⁽²⁾。ショットキー接合またはp⁻n接合をp⁺n接合で囲んだ微細構造がポイントである。逆バイアス時には空乏層のピンチオフ効果でリーク電流を低減し、順方向通電時には、低電流ではSBDまたはp⁻n接合のみが動作して低い順電圧降下を示し、高電流ではp⁺n接合も動作してn⁻層の伝導度変調を起して、そこでの電圧降下の増加を防止するとともにソフトリカバリーを可能にする。IGBTパワーモジュール用に600V、30A級のダイオードが開発されている。図3にリカバリー波形状を示す⁽²⁾。更に高耐圧化が進められよう。

もう一つは、GaAsダイオードである。GaAsはSiに比べ電子移動度が約5倍、禁制帯幅が約0.3eVも

II. Progress in Power Semiconductor Devices. By Tsutomu Yatsuo, Member (Hitachi, Ltd.) & Yoshiyuki Uchida, Member (Fuji Electric, Ltd.)

キーワード：パワー半導体、ダイオード、トランジスタ、サイリスタ、パワーモジュール、パワーIC

図2 新型高速ダイオード (SFD) の構造

図3 リカバリー特性の比較⁽²⁾

広いため、順電圧降下が低く、高温のリーク電流が少なくできる⁽³⁾。200 V/3 A, 180 V/14 A 級の SBD が既に開発され⁽⁴⁾、また 500 V 級の pn 接合ダイオードが試作されて⁽⁵⁾高性能が実証されている。Si 以外の半導体結晶の適用は、このダイオードの分野から開始された。

3. トランジスタの進展

3.1 デバイス開発の動向

スイッチングパワーデバイスの進歩が、パワーエレクトロニクス機器、システムの発展のキーファクタの一つであることは疑問の余地がない。当初ダイオード、サイリスタで構成された機器が、自己ターンオフ機能をもつパワートランジスタの普及、適用により大幅な高機能化を果たしてきた。更に、LSI 用に開発された MOS(Metal Oxide Semiconductor) 技術、多結晶シリコン技術、微細加工技術、絶縁分離技術などの応用により、パワートランジスタの高性能化、高機能化が進むとともに各種の新型デバイスが提案され、パワーデバイスのルネッサンスとも呼ぶべき時代を招来している。特に MOS ゲート構造の適用は、パワートランジスタの高速スイッチング化と駆動回路の簡略化(電圧駆動)を同時に可能ならしめ、大きなインパクトを与えつつある。

図4に、主要なパワートランジスタの断面構造図を示す。左側のBJT(Bipolar Junction Transistor)、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)はバイポーラ形、右側のMOSFET(MOS-gate Field Effect Transistor)、SIT(Static Induction Transistor)は

図4 各種パワートランジスタの断面構造

ユニポーラ形のデバイスである。

(1) BJT 最も広範に適用されているトランジスタであるが、数千個の多結晶シリコンのエミッタバラスト抵抗を集積させた高破壊耐量製品、3～4段ダーリントン構成の高電流増幅率(～5,000)製品が数年前に発表されて以後、新技術の発表がないのが残念である。

(2) パワー MOSFET 他のデバイスの追随を許さないパワー MOSFET がもつ最大の特徴は、高周波のスイッチングが可能で、低耐圧(200 V以下)デバイスのオン抵抗を低く設定できることである。スイッチング電源の小型化は、高周波動作が可能な MOSFET の適用により実現したといっても差し支えない。さらなる高周波動作(MHz レベル)を目指した微細化による入力容量の低減、デバイス構造の工夫による高破壊耐量化などが着実に進められている。また、自動車などバッテリー電源分野向けの低耐圧品では、とりわけオン抵抗の低減が重要課題である。そのため UMOS と呼ばれるトレンチ構造のデバイスが、極限の低オン抵抗化(60 V デバイスで $0.1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ レベル)に向けて検討されている。更に、信号処理機能、自己保護機能、各種判断機能などを内蔵したインテリジェント MOSFET の実用化も進んでいる。

(3) IGBT MOS ゲートによる高速スイッチング性能とバイポーラ動作による高耐圧・高電流容量の両立性を兼ね備えた IGBT は、近年最もホットなパワーデバイスとして注目され、開発が進められた。IGBT の実現により、パルス幅変調(PWM)制御のキャリア周波数を 15 kHz レベルに上げた低騒音インバータの系列化やインバータ電子レンジの製品化が進んだことは特筆に値する成果といえよう。IGBT の高性能化は急速に進展しており、図5⁽⁶⁾中の第2世代品

図 5 IGBTにおけるオン電圧とフォールタイムのトレードオフ関係の改善⁽⁶⁾

から現在は第3世代品を目指した開発が進められている。開発が順調に進めば、IGBTはBJTの適用分野をほぼ全面的に代替すると同時に、現在はGTOサイリスタが使われているハイパワー分野をも侵食する可能性がある。

(4) SIT 埋込みゲート構造の高周波SITとともに、表面ゲート構造のバイポーラモードSITが精力的に開発されている。

3.2 パワーモジュール

1980年ごろから始められたパワートランジスタモジュールの製品化は、パワーエレクトロニクス分野に大きなインパクトを与えてきた。複数のパワーチップを単相あるいは三相構成で一つのパッケージ内に複合したパワーモジュールは、単体デバイスのもっていた適用上の問題点や限界を打破するものとして市場に受け入れられ大きな発展を遂げてきている。パワーモジュールの大容量化は年々進み、1,200 V、800 Aものまで実用化され⁽⁷⁾、各種のモータ制御用インバータなどに広範に使用されている。

パワーモジュールの種類は、初期のBJTに加えてMOSFET、IGBT、SIT、BiMOSと多岐にわたっている。更に、近年の特筆すべき傾向としてインテリジェント化があげられる。従来のパワーモジュールはトランジスタ、FWD(Free Wheeling Diode)、SUD(Speed Up Diode)などのパワーチップを集積したものだが、最近インバータ回路の制御回路部分も取り込んだIPM(Intelligent Power Module)の開発が活発化してきた。その主な背景は、装置の設計時間の短縮、組立工程の簡略化、装置の小形・軽量化などの要請であるが、IGBTなど駆動回路の簡略化が可能なデバイスの出現の影響も無視できない。

3.3 特性限界拡大への挑戦

パワートランジスタの高耐圧化、大電流量化は今

表 1 SiC デバイスと Si デバイスの理論性能 (MOSFET のオン抵抗) の比較⁽⁸⁾

	ブレイク ダウン電圧 (V)	ドーピング 濃度 (cm^{-3})	電子移動度 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	空気層幅 (μm)	MOSFET オン抵抗 ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)
SiC	50	4.82×10^{17}	175.92	0.33	2.45×10^{-8}
	200	1.21×10^{17}	282.48	1.33	2.44×10^{-8}
	1,000	2.41×10^{18}	489.51	6.67	3.53×10^{-4}
	5,000	4.82×10^{18}	848.25	33.33	5.09×10^{-3}
Si	50	1.09×10^{18}	1,239.68	2.48	1.05×10^{-4}
	200	1.72×10^{18}	1,335.75	12.48	3.35×10^{-3}
	1,000	2.01×10^{19}	1,356.50	81.59	1.88×10^{-1}
	5,000	2.35×10^{19}	1,359.50	533.4	1.05×10^1

後とも進み、前述のように、IGBTがGTOサイリスタの領域を脅かす時代がそう遠くなく到来するものと思われる。そのためには、高耐圧化技術、シリコンウェーハの無欠陥化技術、パッケージ構造などに関するブレイクスルーが必要であり、それに向けて努力が続けられることになろう。

3.1項で一部触れたように、MOSFETやIGBTの性能限界(スイッチング速度、オン抵抗など)への挑戦が行われているが、限界拡大のためには、新しい動作原理のデバイスあるいは既存デバイスの長所を従来以上に巧みに組み合わせたデバイスの開発が必要である。新デバイスの開発は、最近急速な進展を示しているパワーデバイスのシミュレーション技術が大いに威力を発揮すべき対象であろう。

シリコンデバイスの限界を突破する試みとして、SiC、更には半導体ダイヤモンドを適用するアイデアがある。表1⁽⁸⁾に、SiCとシリコンとのMOSFETの性能を理論的に比較した例を示す。実現までには相当の年月が必要と思われるが、夢のあるテーマではある。

4. サイリスタの進展

4.1 光サイリスタの実用化

サイリスタは高耐圧、大電流を扱える大電力デバイスとして特長がある。高圧直流送電や産業用電源などの大容量電力変換装置用に開発が進められた光点弧サイリスタ(光サイリスタ)が代表的なものである。ライトガイドを通る10 mW程度の微弱な赤外光で直接トリガできるので、誘導性ノイズによる誤動作の防止やゲート回路の簡単化などシステムの高信頼性に有効であり、次世代の電力用サイリスタとして完成が期待されていた。図6は最近開発された6,000 V、2,500 A

図 6 6,000 V, 2,500 A 光サイリスタの外観

の光サイリスタの外観である。無効電力補償装置 (SVC) や直流送電変換装置 (HVDC) などへの本格的な実用化段階を迎えている。高耐圧化では、既に 12 kV の試作例が発表されており⁽⁹⁾、今後なお一層の大容量化が進められよう。その場合、導通特性とターンオフ特性のトレードオフの改善が必要であるが、素子内のキャリアライフタイム分布を自在に調整できるプロトン照射法などの新技術の適用などが検討されている。

4.2 ターンオフサイリスタの課題と展望

GTO サイリスタに代表される高耐圧、大電流自己ターンオフサイリスタの出現は、それまでのサイリスタでは困難であった PWM 制御を大容量変換装置の領域まで適用可能にし、パワーエレクトロニクスの新たな発展を促した。この 10 年間は、主に高耐圧、大電流化を指向し、電圧では 8 kV、電流では 4 kA までの素子が開発されている。更に最近の動向として高速化や逆導通化が進められ、1 kHz で動作する 4.5 kV、3 kA の素子も発表されている⁽¹⁰⁾。

しかし、ターンオフサイリスタの現状の性能は応用サイドからみると決して満足のいくものでなく、一層の向上が強く望まれている。主な課題とそれに対応する技術の動向を以下に簡単に述べる。

(1) ターンオフ限界性能の向上 GTO サイリスタのターンオフ限界電流はスナパコンデンサの大きさに強く依存する。現在の最高水準の素子でも 1,000 A あたり約 1 μ F の大きなコンデンサを必要とする。このことは、装置の小型化に反するばかりでなくスナパ損失の増大による効率低下や動作周波数の制限要因になる。ターンオフ時の破壊耐量を向上する以外にないが、破壊限界に関する解析的な検討が進められ、電流集中の緩和や単位セグメントの微細化が性能向上につながる重要なポイントであることが明確になり、今後この面での改良が進められよう。

(2) 損失の低減 オン損失とスイッチング損失のトレードオフの改善はこの種のパワーデバイスの命題であるが、特に、サイリスタではターンオフ時のテ

図 7 GTO サイリスタの単位セル構造

図 8 MOS ゲートサイリスタの単位セルと等価回路⁽¹⁴⁾

ール電流の低減が重要課題である。ベース層中に蓄積するキャリアを可能な限り少なく、かつ素早く外部へ掃き出すことである。現在のほとんどのターンオフサイリスタに適用されているアノードエミッタ短絡構造 [図 7 (a)]⁽¹¹⁾はこの点で画期的な技術であった。第 2 のゲート電極により積極的に引き抜くことのできるダブルゲート構造 [図 7 (b)]⁽¹²⁾⁽¹³⁾が次世代のキー技術になる可能性がある。

(3) オフ利得の向上 現状の GTO や SI サイリスタのターンオフ利得は高々 5 程度であり、例えば 4,000 A の遮断には 800 A ピークのゲート電流を要し、大形のゲートドライブ回路を必要とする。特に多数の素子を直列接続で使う高電圧の用途には障害になる。また、大きなゲート電流は素子内の動作の均一性を損ね、ターンオフ限界を下げる要因にもなっている。この面で画期的な改善が期待できるのは、MOS ゲートサイリスタ (MCT)⁽¹⁴⁾である。図 8 に単位セルの基本構造と等価回路を示す。ターンオンには nMOS をオンさせ、ターンオフにはゲート・カソード

図 9 ターンオフサイリスタの性能指数の推移

間の pMOS をオンさせてこの間を短絡し、主電流を MOS にバイパスさせる。電圧制御型なので制御性は極めて良い。現在、3,000 V、300 A の素子が試作されている⁽¹⁵⁾。IGBT と違ってラッチング型のデバイスなのでチップの並列動作が難しく、大口径の素子の場合、動作の一様性の確保や歩留りの問題を克服する製造技術の進歩を待たねばならないが、将来が期待できるデバイスである。

図 9 は今井氏の提案⁽¹⁶⁾になるパワーデバイスの性能指数の推移を GTO および SI サイリスタについてプロットしたものである。過去 10 年は着実な進歩を遂げており、上に紹介した新しい技術により 21 世紀にむけて一層の性能向上が追究されるだろう。

5. パワー IC の進展

5.1 要素技術の進展

パワーデバイスに信号処理回路、保護回路、各種判断回路など有用な周辺回路を取り込んで一つの機能を持たせた IC を、ここではパワー IC と定義してその技術動向を論ずることにする。

(1) 絶縁分離技術 パワー IC では、出力段の高電位領域と制御段の低電位領域とを電氣的に絶縁分離する必要がある。絶縁分離技術は大別して、①自己分離 (SI)、②接合分離 (JI)、③誘電体分離 (DI) の 3 方法がある。SI は製造プロセスが簡単だが、低耐圧 IC に適用が限定される。JI は逆バイアス pn 接合の非導通特性を利用するもので、最もポピュラーな方法である。しかし、この方法には寄生効果の危険性と、分離耐圧の上昇に伴う絶縁分離領域の拡大といった問題がある。

DI は、絶縁層 (通常は SiO₂ 層) を挿入して分離する方法で、高耐圧、大電流のパワー IC に現在最適の手段である。反面、基板製造工程のコスト高が指摘され、その改善に向けて張り合せ技術など多岐にわたる

研究が進められている⁽¹⁷⁾。

(2) 高耐圧化技術 高耐圧のパワー IC を実現するには、シリコン表面近傍の横方向電界を緩和する技術が必要である。簡単な方法で横方向電界を緩和する技術として、RESURF (REduced SURface Field) が知られているが、最近では SOI (Silicon On Insulator) を用いた RESURF 構造が注目されている。絶縁層上の 0.1 μm から 20 μm 程度の薄いシリコン層内に最適なデバイス配置を行うことにより、700 V 以上の耐圧の IC が実現される⁽¹⁸⁾。

また、半絶縁膜やフィールドプレートによる表面の横方向電界緩和や、配線の影響を回避する表面縦方向の電界緩和技術も重要である。

(3) 出力段デバイス技術 パワー IC の出力段デバイスとしては、LD (Lateral Double-diffused) MOSFET および LIGBT が有用であり、広範に用いられている。なお、それらの特性改善のための研究が現在精力的に進められており、各種の高耐圧構造、 μ チャネルデバイスなど多岐にわたる提案がなされている。また、600 V、25 A という高耐圧、高電流の V (Vertical) IGBT を出力段にもつパワー IC も報告されている⁽¹⁹⁾。

5.2 最近の開発例

パワー IC は、通信、モータ制御、電源、自動車など広範な分野で適用が始まっている。最近の開発例と

表 2 最近のパワー IC の開発例

種 類	内 容		
	最大定格	出力デバイス	分離絶縁技術
・自動車用ハイサイドスイッチ(1)	25 V, 1.5 A	p ch-LDMOS	DI
・FPD (Flat Panel Display) ドライバ(1)		n ch-LDMOS	JI
・三相インバータ(1)	250 V, 1 A	n ch-LIGBT	DI
・モータ用フルブリッジドライバ	500 V, 1.8 A	n ch-LDMOS	JI
・自動車用ハイサイドスイッチ(2) (以上 ISPSD'90 における発表)	60 V, 30 A	n ch-VDMOS	JI
・三相インバータ(2)	500 V, 1 A	n ch-LIGBT	DI (SDB)
・自動車イグナイタ用	600 V, 25 A	n ch-VIGBT	DI
・自動車用ハイサイドスイッチ(3)	60 V, 10 A	n ch-VMOS	SI
・FPD ドライバ(2)		n, p ch-LIGBT	JI
・PWM パワーコンバータ	340 V, 80 A/cm ²	n ch-LIGBT	JI
・ビデオアンプ用 IC	280 V	n pn-LBJT	DI
・自動車用ローサイドスイッチ	60 V, 10 A	n ch-VDMOS	SI
・三相インバータ(3) (以上 ISPSD'91 における発表)	250 V, 1 A	n ch-LIGBT	DI