

# 半導体の現状と展望

特集

藤平 龍彦 (ふじひら たつひこ)

金田 裕和 (かねだ ひろかず)

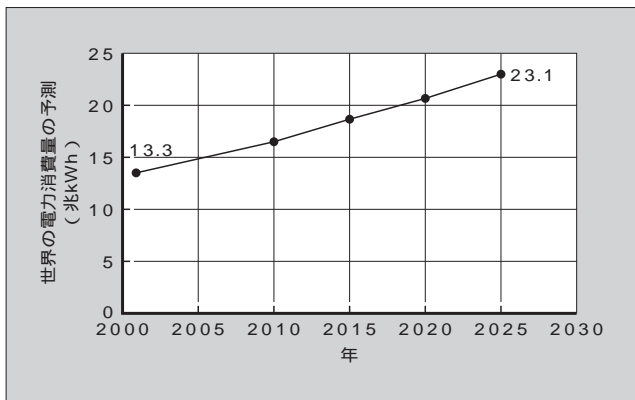
久祢田 修一郎 (くねた しゅういちろう)

## 1 まえがき

経済成長と人口増加の影響を受けて、2025年の世界の一次エネルギー消費量は2001年実績の約1.5倍、石油換算で157億トンに達し、その結果排出される二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)量も2001年実績の約1.5倍、371億トンに上ると予測されている<sup>(1)</sup>。このCO<sub>2</sub>に代表される温室効果ガスの大気中濃度の増加傾向に歯止めが掛けられなければ、温室効果によって21世紀末の地球の平均地上気温は1.4～5.8℃上昇し、海面水位は9～88cm上昇すると報告されている<sup>(2)</sup>。地球温暖化の影響は海面水位の上昇だけにとどまらず、生態系の破壊、干ばつの激化、食料生産への影響、洪水・高潮の頻発、熱帯病の増加など、広範な分野において大きな影響が予想されるとも報告されている<sup>(2)</sup>。

生活水準の向上と経済発展のための産業の生産性向上とに不可欠なことから、エネルギー消費の中で特に伸び率が高いと考えられているのが電力である。図1に示すように、世界の電力消費量は2025年には2001年実績の約1.7倍の23兆kWhに上ると予測されている<sup>(1)</sup>。電力エネルギーの有効利用を目的とするパワーエレクトロニクス、その一端を担うパワー半導体を事業とする者の立場から以上の数字を眺めると、世界の生活水準の向上と経済発展、これらと地

図1 世界の電力消費量の予測<sup>(1)</sup>



球環境の保護を両立させるという使命の重大さに身が引き締まる。

パワー半導体はその使命を果たすためには、パワーエレクトロニクス機器の電力の利用効率を高め、またその省資源化(小型化)と利用の拡大(低コスト化と用途の拡大)に効果を発揮しなければならない。具体的には、パワー半導体そのものの性能向上と制御とセンシングの改善による性能向上と小型化・高信頼化・低コスト化、そしてパワー半導体製品の系列と用途の拡大を進めなければならないと考えている。

本稿では、富士電機の代表的な半導体製品であるパワーモジュール、パワーディスクリット、パワーICについて、その現状と展望を述べる。

## 2 パワーモジュール

産業用の工作機械・ロボット、エアコンのコンプレッサ、半導体製造装置などや電車やハイブリッド車などのモータドライブ、溶接機やUPS(Uninterruptible Power Supply)、医療用機器などの電力変換などに用いる大容量のパワー半導体は、主にパワーモジュールとして提供してきている。1988年にIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を製品化して以来現在に至るまで、その優れた性能と制御性から、パワーモジュール用のトランジスタとしてはIGBTが主流となり発展してきた。

図2に富士電機のIGBTモジュールの性能と技術の推移を1,200V系の例で示す。現時点での最新世代は、2002年にリリースを開始した第五世代Uシリーズである。デバイス構造としてFS(Field Stop)構造を用い、ゲート構造としてトレンチゲート構造を用いることにより、IGBTの大幅な低損失化と高い破壊耐量とを両立させるとともに、SAS(Shallow Anode Structure)と呼ぶキャリアの注入を抑制するアノード構造を用いることで、FWD(Free Wheeling Diode)の性能も同時に改善している。1,200V系を例に取ると、6kHzのインバータ動作を行った場合の損失で第四世代品に対し約20%の低減と、IGBTチップ



藤平 龍彦

半導体デバイスの研究開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社半導体事業本部半導体工場副工場長。工学博士。電気学会会員、応用物理学会会員、日本金属学会会員。



金田 裕和

半導体デバイスの製造技術に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社半導体事業本部半導体工場長。



久祢田 修一郎

半導体デバイスの製造技術、購買、経営に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社常務取締役半導体事業本部長。

図2 富士電機の IGBT モジュールの性能と技術の推移

	1985年	1990年	1995年	2000年	2005年		
製品変遷		第一世代	第二世代 L,Fシリーズ	第三世代 J,Nシリーズ	第四世代 Sシリーズ	第五世代 T,Uシリーズ	第六世代 Vシリーズ
性能指数 インバータ損失 (1,200V- 300Aの例)		350W	280W	218W	194W	160W	<140W
小型化指数 チップ面積比 (1,200Vの例)		100	100	71	71	43	<35
デバイス技術 デバイス構造		PT		NPT	FS	アドバンストFS	
ゲート構造		プレーナDMOS				トレンチゲート	
デザインルール		6 μm	4 μm	3 μm	1.5 μm	0.8 μm	0.5 μm
製品系列		標準モジュール		標準モジュール, Econoモジュール			
		標準IPM		標準IPM, コンパクトIPM			
		PIM					
		マトリックスコンバータ用					
		ハイブリッド車用					
電圧定格		600V, 1,200V, 1,400V			~1,700V	~3,300V	
電流定格		8~400A	10~600A		10~3,600A	8~4,800A	

面積で約 40 %の小型化が同時に達成されている。続く第六世代 V シリーズでは、デバイス構造のさらなる改善（アドバンスト FS 構造）とゲート構造の改善により IGBT の低損失化とチップ面積の縮小をさらに進めるとともに、FWD の改善も同時に進める計画である。V シリーズは、1,200 V 系を 2006 年度に、600 V 系を 2007 年度にリリースする計画となっている。

系列面に関しては、標準モジュール系列から整備を始めて、第二世代で IPM (Intelligent Power Module) と PIM (Power Integrated Module) の系列を加え、第三世代で系列型式数を大幅に増やし、第四世代では小型・低コストの EconoPACK 系列を加えてきている。第五世代では、1,700 V 系のモジュールを加え、3,600 A まで電流系列を拡大するとともに、ハイブリッド車用のカスタム設計品の対応<sup>(5)</sup>やマトリックスコンバータ用の逆阻止 IGBT モジュールの製品化も進めている。今後も、大容量帯へのさらなる電圧・電流範囲の拡大と小容量帯の一層の小型化・低コスト化を進めていくとともに、新しい用途へも積極的に対応していく所存である。

パワーモジュールの将来を考えるうえで最重要の課題は、IGBT などの Si デバイスから SiC などの化合物デバイス（以下、SiC という）へいつ移行するか、ということである。富士電機では、パワーモジュールの SiC への移行は第七世代か第八世代ごろと想定している。SiC ウェーハの欠

陥密度の低減<sup>(6)(7)</sup>と大口径化は順調に進んでおり、第七世代のリリース時期である 2009 ~ 2010 年ごろに 5mm 角チップの量産に必要な 4 インチウェーハでのキラ欠陥密度 < 10 cm<sup>-2</sup> が達成される可能性がある。しかしながら、SiC ウェーハのコストが非常に大きな問題である。チップの小型化を活用してのパッケージの小型化や最大接合温度の大幅な上昇など、他の要素を最善に仮定した場合でも、IGBT チップの置換えのためには SiC ウェーハの面積単価を数十分の 1 以上低減する必要があり、これまでのコスト低減トレンドの延長とは大きなギャップが存在する。SiC ウェーハメーカー各位の技術革新と努力に期待したい。パワーデバイスメーカーの立場としては、SiC プロセス・デバイスの研究に力を入れるとともに、リスクヘッジの意味から、Si デバイスの性能改善も同時並行で継続する必要がある。とは言え、IGBT の性能改善は第六世代で限界に近づきつつあり、第七世代の実現のためには大掛かりなデバイス構造の革新が必要となる。MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) ゲートサイリスタなどの新型 Si デバイスの研究や、Si デバイスを高電流密度で使いこなすためのパッケージ技術の研究にも力を入れていかねばならないと考えている。

③ パワーディスクリート

スイッチング電源や IT (Information Technology) 機器用の UPS, 自動車用のモータやリレー, ソレノイドの

注 EconoPACK : Eupec GmbH. Warstein の登録商標

ドライブなどに用いる中容量のパワー半導体は、主にパワーディスクリート製品として提供してきている。優れた高周波性能と制御性から、ディスクリートトランジスタとしてはパワー MOSFET (MOS Field-Effect Transistor) が主流であり、同じく高周波性能の観点から、ダイオードとして高耐圧では LLD (Low Loss Diode), 低耐圧では SBD (Schottkey Barrier Diode) が主流となっている。

本章では、パワー MOSFET と LLD, SBD の現状と展望について述べる。

### 3.1 パワー MOSFET

図3に富士電機のパワー MOSFET の性能と技術の推移を示す。スイッチング電源用に代表される高耐圧系の例として 600V 系を、自動車用に代表される低耐圧系の例として 60V 系を示している。

高耐圧系の現在の主力は、2001 年からリリースを開始した第三世代 SuperFAP-G シリーズであり、擬平面接合と最適化ガードリングの二つの独自技術によって Si の理

論限界へあと 10% にまで迫る高性能を実現している。<sup>(11)</sup> 600V 系を例に取ると、低損失性を表す性能指数  $R_{on}Q_{gd}$  で第二世代品に対し約 60% の低減と、チップの小型化を表す性能指数  $R_{on}A$  で約 40% の小型化が、高温連続アバランシェ耐量の保証と同時に達成されている。次の第四世代では、<sup>(12),(13)</sup> 超接合技術を用いてのさらなる低損失化と小型化を検討している。

低耐圧系では、第五世代 FAP-T2 シリーズ (トレンチ MOSFET としては第二世代) のサンプル展開を 2004 年に開始している。トレンチゲート構造と擬平面接合技術の改善により、第四世代と比較して 60V 系の場合で約 30% の  $R_{on}Q_{gd}$  低減と約 20% の  $R_{on}A$  低減を図りながら、第四世代の高い信頼性 (高アバランシェ耐量, 高短絡耐量, 高ゲート耐圧, 高パワーサイクル耐量)<sup>(14)</sup> を維持している。次の第六世代では、トレンチゲート構造と擬平面接合技術のさらなる最適化とともに微細化も進め、性能改善と小型化のトレンドを維持していきたい。

図3 富士電機のパワー MOSFET の性能と技術の推移

	1985年	1990年	1995年	2000年	2005年
600V製品変遷	第一世代 (FAP-1, FAP-2シリーズ)		第二世代 (FAP-2A, FAP-2Sシリーズ)		第三世代 (SuperFAP-Gシリーズ) 第四世代
性能指数 $R_{on}Q_{gd}$	20 · nC		15 · nC		5.5 · nC 3 · nC
小型化指数 $R_{on}A$	130 m · cm <sup>2</sup>		125 m · cm <sup>2</sup>		76 m · cm <sup>2</sup> 24 m · cm <sup>2</sup>
デバイス技術	プレーナ型DMOS			擬平面接合DMOS	超接合
60V製品変遷	第一世代 (FAP-1シリーズ)	第二世代 (FAP-3Aシリーズ)	第三世代 (FAP-3Bシリーズ)	第四世代 (FAP-T1シリーズ)	第五世代 (FAP-T2シリーズ) 第六世代 (FAP-T3シリーズ)
性能指数 $R_{on}Q_{gd}$	800 m · nC	540 m · nC	260 m · nC	175 m · nC	125 m · nC 90 m · nC
小型化指数 $R_{on}A$	3.5 m · cm <sup>2</sup>	2.3 m · cm <sup>2</sup>	1.4 m · cm <sup>2</sup>	0.8 m · cm <sup>2</sup>	0.65 m · cm <sup>2</sup> 0.5 m · cm <sup>2</sup>
デバイス技術	プレーナ型DMOS		擬平面接合DMOS	擬平面接合トレンチ	

図4 富士電機のダイオード (LLD と SBD) の性能改善と系列拡大の推移

	1985年	1990年	1995年	2000年	2005年
製品変遷	第一世代 (標準系列)		第二世代 (用途に合わせた系列)		
低損失ダイオード (LLD)	低損失ダイオード LLD (200~600V)		超低損失 SuperLLD (600V)		SuperLLD (400~800V)
ショットキーバリアダイオード (SBD)	低 $V_F$ SBD (40~90V)	超低 $V_F$ SBD (30V)		高耐圧 SBD (120~250V) 低 $I_R$ SBD (40~100V)	大容量
パッケージ系列拡大 自立型パッケージ	TO-220 フルモールド	TO-3P 完全フルモールド	TO-220 完全フルモールド	TO-247 (100A)	TO-3PL (200A)
SMDパッケージ	D <sup>2</sup> -Pack (30A)	D-Pack (7A)	2端子 SC (1A)	TFP (30A) 2端子 SD (3A)	系列拡大

3.2 LLD と SBD

図4にLLDとSBDの性能改善と系列拡大の推移を示す。主にスイッチング電源の二次側整流や力率改善回路の整流に用いられるLLDでは、200～600Vの標準系列と600VのSuperLLD系列が現在の主力である。SuperLLD系列には、電流連続方式PFC(Power Factor Control)用にスイッチング損失を低減した系列と、電流不連続方式PFC用に順損失を低減した系列をそろえている。今後は、電流・電圧の系列を拡充していく計画である。

主にDC-DCコンバータや低出力電圧のスイッチング電源の二次側整流に用いられるSBDでは、120～250V耐圧の高耐圧SBDと40～100V耐圧の低逆漏れ電流(低 $I_r$ )SBDが現在の主力である。高耐圧SBDは、新規開発のバリヤメタル材料の適用によって高耐圧化とともに、逆漏れ電流の低減とスイッチングノイズの低減を両立させた製品であり、従来200～400VのLLDが使われていた用途に使用することで、低損失化と低ノイズ化が図られる。低 $I_r$  SBDは、やはり新規開発のバリヤメタル材料の適用によって、従来のSBDと比較して逆漏れ電流を約10分の1に低減した製品であり、接合温度( $T_j$ )=150℃までの使用が可能なることから、ACアダプタなどの放熱の悪い用途で特に効果を発揮する。今後は、大容量化とパッケージ系列の拡充を進める計画である。

4 パワー IC

4.1 自動車用パワー IC

富士電機のパワー ICには多くの系列がある。自動車用としては、エンジン点火用のワンチップイグナイタやハイブリッド IC イグナイタ、オートマチックトランスミッションコントロールのソレノイドバルブ制御などに使われるIPS(Intelligent Power Switch)、ABS(Antilock Brake System)やESC(Electronic Stability Control)のソレノイドバルブ制御やランプ制御などに使われる高機能MOSFET、ECU(Electronic Control Unit)の入出力の多チャンネルをIC化する統合ICなどがある。

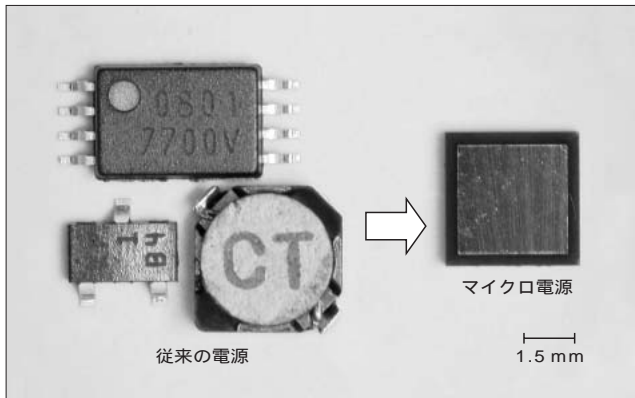
4.2 情報機器・電源システム用パワー IC

情報機器・電源システム用パワー ICとして力を入れているのが、電源システム用パワー IC(以下、電源ICという)である。図5に電源ICの性能と技術の推移を示す。電源ICの最新世代は第四世代0.6 $\mu$ m CDMOS(Complementary Double Diffused MOS)であり、横型DMOSの最適化と微細化により、第三世代に対し $R_{on}Q_{gd}$ で約17%の改善と、 $R_{on}A$ で約25%の改善を図っている。次の第五世代では、出力段にTLPM(Trench Lateral Power MOS)を内蔵したCTMOS(Complimentary TLPM MOS)への移行により、さらに $R_{on}Q_{gd}$ で約40%の改善と $R_{on}A$ で約67%の改善を進める予定である。電源ICには、AC-DC

図5 富士電機の情報機器・電源ICとPDPドライバICの性能と技術の推移

		1985年	1990年	1995年	2000年	2005年			
情報機器・電源IC	製品変遷 電源IC	第一世代	第二世代	第三世代	第四世代	第五世代			
	性能指数 $R_{on}Q_{gd}$ 30V		200 m · nC	120 m · nC	90 m · nC	60 m · nC			
	小型化指数 $R_{on}A$ 30V		300 m · mm <sup>2</sup>	78 m · mm <sup>2</sup>	60 m · mm <sup>2</sup>	20 m · mm <sup>2</sup>			
	デバイス技術	バイポーラ	BiCMOS	CDMOS		CTMOS			
	製品系列	AC-DC, DC-DC							
				高耐圧	大容量	MOS内蔵, システム電源IC	マイクロ電源		
PDPドライバIC	製品変遷 アドレスドライバ		埋込エビタキシャル	第一世代	第二	第三	第四	第五	
	小型化指数 ビットあたり面積			220 (指数)	150	100	68	48	
	製品変遷 スキヤンドライバ			SOI	第一世代	第二	第三	第四	第五
	小型化指数 ビットあたり面積				150 (指数)	110	100	78	62
	性能指数 短絡耐量				5 $\mu$ s			15 $\mu$ s	

図6 携帯用電子機器の小型・軽量化に効果を発揮する富士電機のマイクロ電源



用と DC-DC 用があり、AC-DC 用としては AC-DC ドライバ、出力段高耐圧 MOS を内蔵したワンチップパワー IC<sup>(17)</sup>、大容量高効率電源用の M-Power 系列が、DC-DC 用としては DC-DC ドライバ、MOS 内蔵型、システム電源 IC、マイクロ電源などがある。中でもマイクロ電源は、2004 年末にリリースしたばかりの富士電機独自技術による新製品であり、図 6 に示すように、従来使われていた電源 IC とパワー MOSFET とインダクタの三つの部品をワンチップに集積化することで、実装面積を大幅に低減し、携帯用電子機器の小型化・軽量化に効果を発揮する。今後、最も伸ばしていきたい製品のひとつである。

#### 4.3 プラズマテレビ向けドライバ

プラズマテレビの需要の拡大によって、近年急激に出荷が増えているのが PDP (Plasma Display Panel) ドライバである。PDP ドライバには、PDP の横方向を駆動するスキャンドライバと縦方向を駆動するアドレスドライバがあり、富士電機では PDP の立上りの時代からその両方を供給してきている。図 5 に PDP ドライバの性能と技術の推移を示す。アドレスドライバは、2005 年に第四世代の量産を開始する。この第四世代のアドレスドライバは、0.6  $\mu\text{m}$  CDMOS への移行と横型 DMOS の最適化により、小型化指数である出力ビットあたりのチップ面積で第三世代に対し約 68 % と大幅な改善を果たしており、192 ビット出力への対応を可能とした。次の第五世代アドレスドライバでは、さらなる微細化とデバイスの最適化によって、出力ビットあたりのチップ面積をさらに約 30 % 改善するとともに LVDS (Low Voltage Differential Signal) 技術を適用した高速データ転送化も進め、256 ビット出力への対応を可能とする予定である。スキャンドライバは、現在第三世代を供給中である。第三世代スキャンドライバは、出力段 IGBT の改良により出力ビットあたりのチップ面積を 10 % 低減するとともに、スマートゲート制御技術の開発によって短絡耐量を約 3 倍にまで高めており、高品質なプラズマテレビの実現に貢献している。2005 年度量産開始予定の第四世代スキャンドライバでは、スマートゲート制御技術の上側 IGBT への適用によって上側 IGBT の電流

密度を増加させ、出力ビットあたりのチップ面積をさらに 22 % 低減する。

#### ⑤ 鉛フリー化

地球環境保護の観点から、環境規制物質削減への取組みも進めている。半導体製品で特に問題とされているのは、外部接続端子のはんだに含まれる鉛である。富士電機では、パワー IC 製品やパワーディスクリート製品の鉛フリー化をすでに開始しており、2004 年から顧客のオーダーに応じて鉛フリー製品を納入している。パワーモジュール製品についても、順次鉛フリー製品を供給していく計画である。

#### ⑥ あとがき

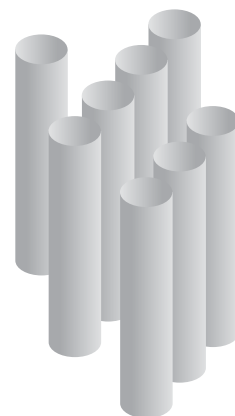
富士電機は、パワーエレクトロニクス技術の革新と普及を通じて社会の発展と地球環境保護の両立に貢献し続けていきたいと願っている。パワー半導体はその柱の一つを担う重要部品であり、本稿ではパワー半導体の主要製品について現状と展望を述べた。

社会の発展と地球環境保護の両立に関して、また科学技術の発展が人類に幸福をもたらすかに関して、否定的な意見もあるが、その答えは 1,000 年後、1 万年後の人類のみが知り得るところである。21 世紀に生きるわれわれ、技術を生業とする者、製造業に従事する者として、社会の発展と地球環境保護を両立させるための技術、人類に幸福をもたらす技術の開発・製品化によって、この問いに答えが出せるよう努めていく所存である。

#### 参考文献

- 1) Energy Information Administration. U.S. Department of Energy, International Energy Outlook 2004. 2004-04.
- 2) Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. Third Assessment Report. 2001-09.
- 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.281-284.
- 4) Otsuki, M. et al. 1200 V FS-IGBT Module with Enhanced Dynamic Clamping Capability. Proceedings of ISPSD'04. 2004. p.339-342.
- 5) Takeji, M. et al. 1200V Reverse Blocking IGBT with Low Loss for Matrix Converter. Proceedings of ISPSD '04. 2004. p.125-128.
- 6) Kamata, I. et al. Influence of 4H-SiC Growth Conditions on Micropipe Dislocation. Japan Journal of Applied Physics. vol.41, part 2, no.10B, 2002, p.L1137-L1139.
- 7) Nakamura, D. et al. Ultrahigh-quality silicon carbide single crystals. Nature. vol.430, 2004, p.1009-1012.
- 8) Iwamuro, N. et al. A new concept for high voltage MCCT with no J-FET resistance by using a very thin wafer, IEEE IEDM Tech. Dig. 1997, p.351.

- 9) Ikeda, N. et al. Study of Lead Free Solder Joint to Power Devices and Thermal Performance. MATE'04. 2004, p.375-378.
- 10) Nishimura, Y. et al. New Generation Metal Base Free IGBT Module Structure with Low Thermal Resistance. Proceedings of ISPSD'04. 2004, p.347-350.
- 11) Kobayashi, T. et al. High-Voltage Power MOSFET Reached Almost to the Silicon Limit. Proceedings of ISPSD'01. 2001, p.435-438.
- 12) Fujihira, T. Theory of Semiconductor Superjunction Devices. Japan Journal of Applied Physics. vol.36, 1997, p.6254-6262.
- 13) Onishi, Y. et al.  $24\text{m}\Omega\text{cm}^2$  680 V Silicon Superjunction MOSFET. Proceedings of ISPSD'02. 2002, p.241-244.
- 14) Yamazaki, T. et al. Low Qgd Trench Power MOSFETs with Robust Gate for Automotive Applications. Proceedings of PCIM Europe. Power Electronics, 2003, p.263-268.
- 15) 藤平龍彦ほか. 自己分離 CDMOS 技術による自動車 ECU 用サージ保護 IC. 電気学会研究会資料. 2004, VT-04-18, p.21-24.
- 16) Fujishima, N.; Salama, C. A. T. A Trench Lateral Power MOSFET using Self-Aligned Trench Bottom Contact Holes, Proceedings of IEDM'97, 1997, p.359-362.
- 17) Fujishima, N. et al. A 700 V Lateral Power MOSFET with Narrow Gap Double Metal Field Plates Realizing Low On-resistance and Long-term Stability of Performance. Proceedings of ISPSD'01. 2001, p.255-258.





\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。