解説・展望

車載用パワーデバイス
－低損失･高破壊耐量化技術の展望－

上杉　勉

Power Devices for Automotive Applications - Review of Technologies for Low Power Dissipation and High Ruggedness -

Tsutomu Uesugi

要　旨

自動車の高性能化を実現する上で，エレクトロニクス技術は無くてはならないものとなっている。この自動車用エレクトロニクスを支える半導体デバイスの一つに「パワーデバイス」がある。パワーデバイスは電力を制御するデバイスとして，ABS等の油圧バルブ制御，パワーウィンドウ等のモータ制御，さらに電気自動車のバッテリ直流電圧を交流に変換するインバータシステム等自動車の多くの部分に使用されている。これら車載用パワーデバイスには，コスト低減を実現するために低損失・高破壊耐量特性が強く求められている。本稿では車載用途に用いられるパワーデバイスの特徴を概説し，その「低損失化」「高破壊耐量化」を実現する技術について展望する。

キーワード　パワーデバイス，自動車，EV，HEV，低損失，破壊耐量，パワートランジスタ，パワーMOSFET，IGBT，BSIT，トレンチ，埋込み構造，実装技術，インテリジェント技術，新材料，SiC，GaN

Abstract

Electronics technology is indispensable for improving automotive performance. Especially, in electric vehicles (EV) and hybrid electric vehicles (HEV), electric systems are the heart of the automobile. Power devices are one of the most important components of car electronics systems and they are applied to many systems, for example, oil-pressure valve control of the ABS system, and motor control of the power windows or inverter system of an electric vehicle that converts the DC voltage of the battery into AC voltage. Therefore, the power devices that have low power dissipation and high ruggedness are definitely required in order to realize a reduced cost of the automotive systems. In this paper, I review the characteristics of the power devices that are used in automotive applications, and the technologies that realize the low power dissipation and high ruggedness.

Keywords　Power device, Automobile, EV, HEV, Low power dissipation, High ruggedness, Power transistor, Power MOSFET, IGBT, BSIT, Trench, Buried structure, Module technology, Intelligent technology, New material, SiC, GaN

1．　はじめに

「カーエレクトロニクス」の言葉に代表されるように，車の高性能化・高機能化を実現する上で「エレクトロニクス」は必須の技術となっている。特に「電気自動車」ではパワーデバイスを用いたモータ駆動の採用により，エレクトロニクス機器が単なる「補機」ではなく「主機」の地位を占めるに至っている。このように「エレクトロニクス」が車載分野に広く適用され重要な位置を占めるに至った理由の一つに，「車載用パワーデバイスの進化・発展」が挙げられる[1)]。

半導体スイッチングデバイスであるパワーデバイスは ABS (Antilock Brake System) 等の油圧バルブ制御，EFI (Electronic Fuel Injection) のガソリン噴射弁制御，パワーウィンドウ等のモータ制御，電池の直流電圧を交流電圧に変換するインバータシステムなど多くのカーエレクトロニクスシステムに適用されている。

本稿ではこれら「カーエレクトロニクス」を支えるパワーデバイスに関して，特に「低損失化」と「高破壊耐量化」の観点から現状およびその将来展望について解説を行う。

2．パワーデバイスの種類とその特徴

一般にパワーデバイスが取り扱う電圧（耐圧）は電池で駆動される携帯端末機器用途の20V程度から発・送配電システムで要求される数kVまで幅広く，おのおのの耐圧系に最適なデバイスが選択・適用されている。**Fig. 1**は車載システムが要求するパワーデバイスの耐圧と扱える電流の最大値（最大定格電流）についてまとめたものである。現在の自動車で主として用いられている12Vバッテリ系では，ABSやパワーウィンドウシステムに60V耐圧パワーMOSFETが適用されている。一方，電気自動車で用いられている288Vバッテリ系では600V耐圧IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の独壇場であり，両者の中間に位置する耐圧系ではバイポーラパワートランジスタあるいはBSIT (Bipolar mode Static Induction Transistor：バイポーラモード静電誘導トランジスタ）も適用されている。

本章では上記パワーデバイスに関する構造・特徴を概説する。

2．1　パワートランジスタ

Fig. 2(a) はパワートランジスタのデバイス断面構造例を示す。パワートランジスタは，ベースからコレクタへ正孔が注入され，それに伴ってエミッタからコレクタへ電子が注入される。この正孔注入に伴い，見かけ上の不純物濃度が増加する「伝導度変調効果」によりデバイスの抵抗が減少する。これによりデバイス損失が低減される。このパワートランジスタは早くから車載用途に適用されている。

しかし，電流を注入してデバイスを駆動するため駆動回路が複雑かつ駆動損失が大きいこと，電流が正の温度係数を有し他のデバイスに比べ電流集中を起こしやすいことから，100V以下の低耐圧用途ではパワーMOSFET，400V以上の高耐圧用途ではIGBTが用いられてきている。

2．2　パワーMOSFET

Fig. 2(b) はパワーMOSFETの一部の断面構造を示している。パワーMOSFETは電圧駆動素子で駆動が容易でオン電流が負の温度係数を持ち，熱暴走しにくい等の特長を持つ。またバイポーラトランジスタと異なり，電気伝導に寄与するキャリアが単一のユニポーラデバイスであるため，少数キ

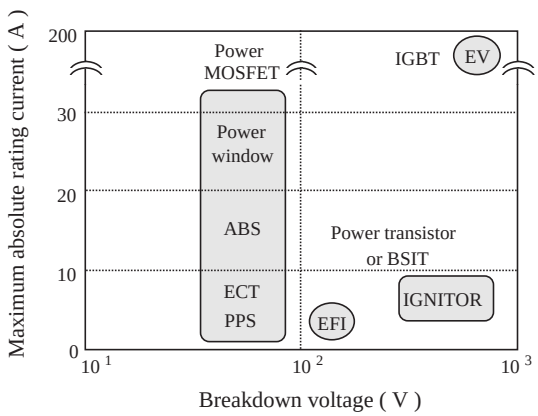


Fig. 1　Relation between maximum absolute rating current and breakdown voltage for automotive applications.

ャリアの蓄積がなく高速性にも優れている。しかし逆に損失を低減させる伝導度変調効果がなく，デバイス耐圧の増加とともに耐圧の2.5乗に比例してオン抵抗が急激に増加するため，主として低耐圧デバイスとして広く適用されている。

2．3　IGBT

Fig. 2(c) はIGBTの一部の断面構造を示している。Fig. 2(b) と異なる点は基板がN^+基板ではなく，P^+基板になっている点である。これがデバイス特性上の大きな違いをもたらしている。IGBTではゲートに電圧を印可することでPベース中に形成されたチャネルを経由してエミッタからNベース中に電子が注入され，P^+基板であるコレクタから正孔が同様にNベースへ注入される。これによりパワートランジスタと同様にNベース中で伝導度変調効果が起こり，大幅にデバイス抵抗が低減する。すなわち「電圧駆動による駆動の容易性」と「伝導度変調効果による低損失性」の長所を合わせ持ったデバイスと言える。このことから600V以上の高い耐圧が要求される電気自動車のインバータ素子として適用されており，一部イグナイタへの適用も進みつつある。

2．4　BSIT

BSITの断面構造をFig. 2(d) に示す。BSITはゲートから注入された少数キャリアによりソース･ドレイン間のポテンシャルを制御し，電流を制御するデバイスである。BSITはパワートランジスタに比べ高い電流利得が得られ，熱暴走を起こしにくい特長を持つ。さらに伝導度変調効果によるオン電圧の低減も実現できる。しかし電流駆動型素子のため駆動の点で不利であり，現状ではその適用範囲が限定されているが，今後想定される車載

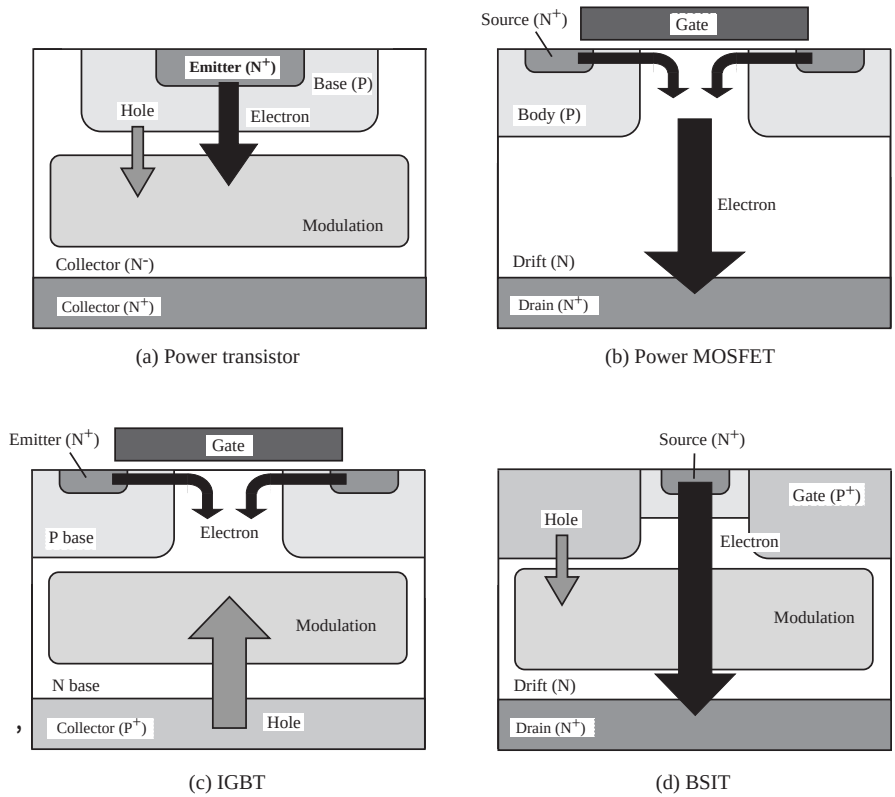


Fig. 2　Cross-sectional view of power device, (a) power transistor, (b) power MOSFET, (c) IGBT, and (d) BSIT. Black arrows indicate electron flow and gray arrows indicate hole flow.

バッテリの高電圧化に伴い，その適用範囲が広がるものと予想される。

３．車載用パワーデバイスの高性能化

現在車載用パワーデバイスとして最も重要視されている特性に「低損失」と「高破壊耐量」がある。本章ではこれらの特性を実現するための技術の現状および今後の展開についてまとめる。

３．１　低損失化

単位面積あたりの損失を低減することはシステムから要求される特性を満足するためのチップ面積を縮小でき，チップコストひいてはシステムコストの低減が実現できることからパワーデバイス研究・開発の最重要項目となっている。

LSIで培われてきた微細加工技術がパワーデバイスの低損失化に果たした役割は大きい。例えばパワーMOSFETの低損失化に着目すると，セルピッチの微細化に伴いオン抵抗は着実に減少してきた (**Fig. 3**)。これはパワーMOSFETの主要抵抗成分であるチャネル抵抗の低減によるものである。ところが**Fig. 4**(a) に示すようにセルピッチの微細化，特にゲートの微細化に伴い電流の流れる領域がボディ接合の空乏層により狭くなる，いわゆる寄生JFET抵抗が顕著になる。このためセルピッチは12μm程度が一つの限界と考えられてきた。これをブレークスルーした技術がトレンチゲート技術である。トレンチゲート構造 (Fig. 4(b)) はボディ接合の空乏層の広がりによる電流経路の狭窄すなわち寄生JFET抵抗が存在しないことから，ゲート寸法を加工限界まで縮小でき飛躍的な低抵抗化が可能となった[2, 3]。さらに抵抗を低減するためにはソース領域の微細化が必要であり，自己整合的に形成し微細化を実現する手法が提案されている[4~6]。またゲートの平面構造の工夫も行われており，例えば従来のストライプ構造からメッシュ構造を採用することで耐圧72V／オン抵抗0.08Ω･mm^{2}の特性が報告されている[7]。

このトレンチ構造はIGBTにも適用され，従来のプレーナゲート構造のオン電圧1.8V／ターンオフ時間0.2μsec@140A/cm^{2}に対してオン電圧1.4V／ターンオフ時間0.2μsec@200A/cm^{2}の特性が得られている[8]。またトレンチIGBTではさらに抵抗を低減するため，Nベース中のキャリア濃度を高めサイリスタと同等の抵抗に低減できるIEGT (Injection Enhanced Gate Transistor)[9] やCSTBT (Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor)[10] が提案されている。

３．２　高破壊耐量化

車載用途と民生用途の半導体デバイスを比較した場合，最も顕著な違いはデバイスが使用される環境である。車載環境では使用温度が高くさらにノイズの影響も強い。このことから民生用途以上に高破壊耐量が求められる。車載パワーデバイスが駆動する負荷を考えるとモータ，ソレノイドバルブ等のインダクタンス負荷が圧倒的多数を占めるため，インダクタンス負荷駆動時に発生するアバランシェ破壊をいかに抑制するかが重要となる。

アバランシェ破壊はデバイスがターンオフする際にインダクタンス負荷で発生する逆起電力がトリガとなって破壊に至る現象で，デバイス内部に存在する寄生トランジスタの動作と強い相関がある。このアバランシェ破壊を抑制するには寄生トランジスタの動作を抑制することが有効と考えられており，次の二つの手法が提案されている。

(1) デバイスを構成する単位セルそのものの耐量を向上させる。

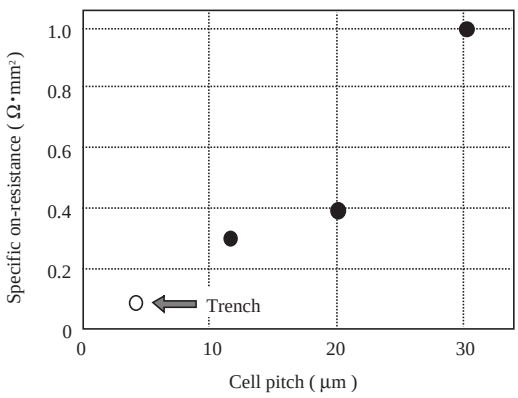


Fig. 3　Specific on-resistance of power MOSFETs versus unit cell pitch. The symbol of " ○ " indicates the resistance of the trench gate structure.

(2) 素子部でのブレークダウンを回避する。

(1) の具体的手段としては高濃度で深いP型層形成による寄生トランジスタベース抵抗の低減[11]，ソース領域の濃度低減[12, 13]，ライフタイムキラーによる寄生トランジスタのh_{FE}低減[14]，内蔵ダイオードの高速化[15]，ソース・ドレイン間ツェナーダイオードの内蔵[16, 17]等が提案されている。また (2) の手法としてはゲート・ドレイン間ツェナーダイオードの内蔵[18~20]が提案されている。しかし，これらの技術はチップ面積の増加による抵抗の増大等，特に低抵抗化とトレードオフの関係にあり，高耐量化と低抵抗化を両立させた最適化が必要となる。

これらの技術とは逆に，チップ全面で積極的に寄生トランジスタを動作させ電流集中を回避して耐量を向上させる手法も提案されている。この構造ではセルピッチの微細化も可能なことから，従来までの提案では困難であった高耐量化と低抵抗化の両立が可能になると期待される[21]。

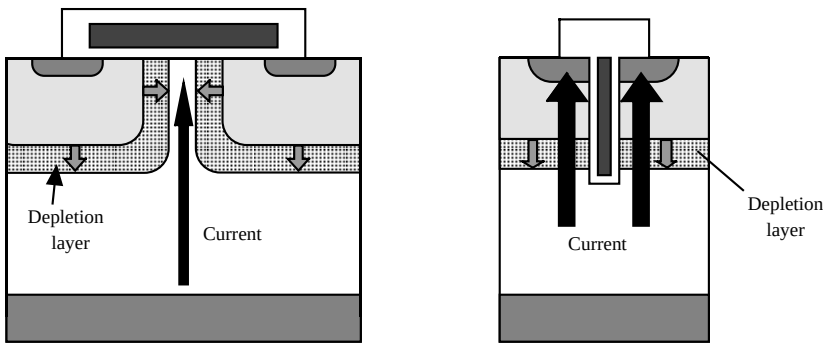
4．パワーデバイス高性能化を支える周辺技術

4．1　実装技術

パワーデバイスはチップ単体でシステムに用いられることはなく，必ずパッケージもしくはパワーモジュールの形でシステムに組み込まれる。従ってパワーデバイスの高性能化にはパッケージあるいはパワーモジュールを含めた実装技術の開発も重要であり，技術課題として「高放熱特性」と「低インダクタンス」が挙げられる。これらの特性を実現する構造として，放熱板の材料をSiC/Al複合材を用い放熱性を高め，主電流配線の形状をループ状にして寄生インダクタンスを低減させた方法[22]や，チップを両面から金属電極材料で挟み加圧接触させた圧接型パッケージの開発が進んでいる[23, 24]。この圧接型パッケージはチップの両面から冷却が可能であり，さらに表面からの電極取り出しにワイヤが不要になることから，寄生インダクタンスの低減および信頼性の点で有利と考えられ，今後車載用としての適用が期待される。

4．2　インテリジェント技術

パワーデバイス高性能化の方向としてロジック等を内蔵したインテリジェント化がある。例えば，過熱・過電流に対する自己保護機能を内蔵したパワーICが開発されている[25]。これらパワーICにはデジタル回路を形成する「CMOSFET」，アナログ回路を形成する「バイポーラトランジスタ」，出力部を構成する「パワーデバイス」を一つの基板に作り込む技術と，それらのデバイスを電気的に分離する技術が必要となる。当初基板構造が単純な自己分離型のフルCMOSパワーICが開発されたが，より精度の高いアナログ機能の要求からバイポーラトランジスタも内蔵できるP-N分離型の



(a) Planar gate　　(b) Trench gate

Fig. 4　Cross-sectional view of the planar gate structure (a) and the trench gate structure (b) under on-state.

BiCDMOS技術が開発され，現在主流となっている[26]。素子分離技術としては，寄生素子構造を有しない誘電体分離技術が張り合わせSOI基板技術の確立に伴い，主流となりつつある[27]。

インテリジェント機能としては従来の自己保護機能にとどまらず，車室内LAN用途として通信機能を内蔵したパワーICの適用も提案されている[28]。

5．今後の動向

5．1　ポストトレンチデバイス

現在，パワーデバイスの研究・開発の重要な項目に「ポストトレンチデバイス開発」がある。トレンチデバイスよりさらに抵抗低減を可能にしたデバイスの創出である。これに関して最近提案された構造に「Super Junction構造」がある（**Fig. 5**）[29, 30]。Super Junction構造では，基板深さ方向に形成した縦型のP/N不純物領域から水平方向に空乏層を延ばすことで従来構造では得られない広範囲のドリフト領域の完全空乏化が可能になる。これにより高い不純物濃度でも高い耐圧を得られ，耐圧600Vでオン抵抗3Ω･mm^{2}の特性が得られている。これは耐圧から一義的に決まるオン抵抗の材料限界であるSiリミット値の1/3に相当する値である[30]。しかし，同等耐圧のIGBTに比べ3倍程度の抵抗であり，低抵抗よりむしろ高速性を要求される用途への適用が考えられている。

もう一つの構造として，Si基板内部に電極あるいは絶縁膜を埋め込んで抵抗を低減する構造が提案されている[31~33]。**Fig. 6** はパワーMOSFETに適用した例で，表面ゲートと埋込みゲートの効果によりチャネル抵抗の低減を図るとともに，埋込み電極による基板内部のポテンシャル制御による耐圧の向上も実現できる[31]。さらにトレンチ技術との組合わせにより，ドリフト抵抗も低減できる横型パワーMOSFETを提案されている[32]。またBSITにも適用され，ソース領域への絶縁膜埋込みによりh_{FE}の向上が確認されている[33]。

ここで紹介したようにポストトレンチデバイスとしていくつかの技術が提案されているが，トレンチデバイスに置き換わるまでには至っていない。今後新たな技術あるいはこれらの技術を組合わせた複合技術によるポストトレンチ技術の創出が待たれる。

5．2　ポストシリコンデバイス

すでにSiパワーデバイスでは「Siリミット」にかなり近い特性が得られている。このことからSiに代わる新しい半導体材料の検討が進んでいる。その最有力候補がSiCである。SiCはSiより約1桁絶縁破壊電界が高いこと，高温動作が可能なこと，熱伝導が高いことに加えてSi製造プロセス技術の適用が可能なため，パワーデバイス用新材料として注目されている[34]。試算によれば耐圧と密接

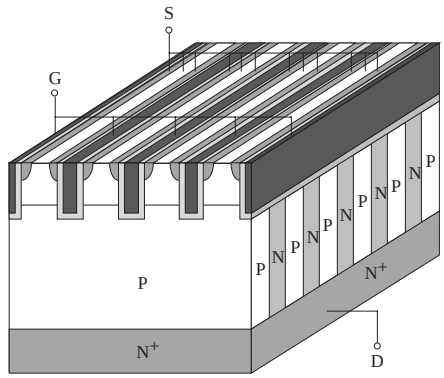


Fig. 5　Cross-sectional view of the super junction power MOSFET[29].

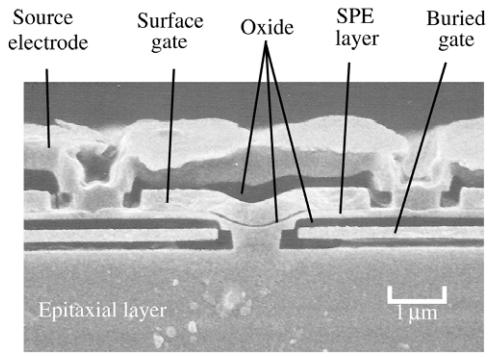


Fig. 6　Cross-sectional SEM photograph of the double gate power MOSFET[31].

な関係のあるドリフト層の抵抗をSiの1/300に低減できると言われている[35]。しかし，現状で得られているSiCパワーMOSFETの特性は耐圧750V/オン抵抗6.6Ω･mm^{2}とSiリミットのほぼ半分に相当する値であり，前節で紹介した「Super Junctionデバイス」に比べその優位性は認められない。このように現状ではSiC材料本来の特性を引き出すに至っておらず，「結晶性の向上」，「チャネル移動度の向上」等課題が多く，今後の研究・開発が待たれる。

GaNはSiCよりパワーデバイスとして優れた材料であると言われており[36]，チャネル移動度もSiCに比べ高い値が得られている[37]ことから，今後注目される材料である。しかし，SiCと同様良質な結晶を得る技術に加え，Siプロセスとの整合性等解決すべき課題は多い。

これら新材料に共通する問題点はSiに比べ製造コスト等が高くなる点である。従って低コストでデバイスを実現する技術開発のみならず，それら材料の特長を十分に活かし，システムとしてコストメリットが出せる応用分野の開拓も一方で重要と考えられる。

6．まとめ

本稿では車載用パワーデバイスの現状と将来に関して展望を行ってきた。高性能で環境に優しい車を追求するにはカーエレクトロニクスの発展が必要不可欠であり，それを実現する上で今後とも精力的なパワーデバイスの研究･開発が必要である。

参考文献

1) 三原輝儀 : "自動車用パワーデバイスの研究開発動向", 自動車技術, **46**-2(1992), 73～79
2) Ueda, D., et al. : "A New Vertical Power MOSFET Structure with Extremely Reduced On-Resistance", IEEE Trans. Electron Devices, **ED32**-1(1985), 2～6
3) Matsumoto, S., et al. : "A 70-V, 90-mΩ･mm^2, High-Speed Double-Layer Gate UMOSFET Realized by Selective CVD Tungsten", Proc. ISPSD, (1994), 365～369
4) Matsumoto, S., et al. : "A High-Performance Self-Aligned UMOSFET with a Vertical Trench Contact Structure", IEEE Trans. Electron Devices, **ED41**-5(1994), 814～818
5) 鈴木隆司, ほか : "半導体装置およびその製造方法", 特開平9-266309
6) 上杉勉, ほか : "半導体装置の製造方法", 特開平10-150191
7) 松木宏文, ほか : "60Vトレンチゲート PWMOSFETの開発", 平成9年電気学会全国大会講演論文集, 805(1997), 4-44～4-45
8) Harada, M., et al. : "600V Trench IGBT in Comparison with Planar IGBT", Proc. ISPSD, (1994), 411～416
9) Kitagawa, M., et al. : "A 4500V Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor (IEGT) Operating in a Mode Similar to a Thyristor", IEDM Tech. Dig., (1993), 679～682
10) Takahashi, H., et al. : "Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor (CSTBT) - A Novel Power Device for High Voltage Application", Proc. ISPSD, (1996), 349～352
11) Baliga, B. J., et al. : "Suppressing Latch-up in Insulated Gate Transistors", IEEE Electron Device Lett., **EDL5**-8(1984), 323～325
12) 上杉勉 : "絶縁ゲート型半導体装置およびその製造方法", 特開平8-186254
13) Baliga, B. J. : Power Semiconductor Devices, (1995), PWS, Boston, 1995
14) 山口博史, 高田育紀 : "電界効果型半導体装置", 特開昭62-39069
15) 角田英樹, 吉田功 : "半導体装置及びその製法", 特開平3-259537
16) Matsushita, T., et al. : "A Surge-Free Intelligent Power Device Specific to Automotive High Side Switches", IEEE Trans. Electron Devices, **ED38**-7(1991), 1576～1581
17) Hoshi, M., et al. : "A DMOSFET Having a Cell Array Field Ring for Improving Avalanche Capability ", Proc. ISPSD, (1993), 141～145
18) Phipps, J. P., et al. : U. S. Patent 5,365,099, (1994)
19) 山崎智幸, ほか : "過電圧保護機能内蔵型IGBT", 電気学会研究会資料, EDD-93-27/SPC-93-49 (1993), 67～74
20) 川井文彰, 上杉勉 : "半導体装置", 特開平8-172190
21) Uesugi, T., et al. : "A New Power MOSFET Having Excellent Avalanche Capability", Proc. ISPSD, (2000), to be published
22) 新居良英, 他 : "ハイブリッド車用インテリジェントIGBTモジュール", 自動車技術会学術講演会前刷集, 982(1998), 61
23) Takahashi, Y., et al. : "2.5kV 100A μ-stack IGBT", Proc. ISPSD, (1994), 25～30
24) 日吉道明, ほか : "2.5kV-1kA 圧接型IGBTの電気特性と信頼性", 平成9年電気学会全国大会講演論文集, 795 (1997), 4-32～4-33
25) 和泉田孝夫, 大畑有 : "インテリジェントパワースイッチ", 東芝レビュー, **47**-11(1987), 853
26) Kurishna, S., et al. : "An Analog Technology Integrates Bipolar, CMOS, and High-Voltage DMOS Transistors", IEEE Trans. Electron Devices, **ED31**-1(1984), 89～95

27) Nakagawa, A., et al. : "New 500V Output Devices Structures for Thin Silicon Layer on Silicon Oxides Film", Proc. ISPSD, (1990), 97～101
28) "車内LAN, 新機能導入がMOS系の自動車市場を牽引, 車内多重通信の導入と電気自動車の台頭がパワーデバイス応用拡大を加速", 日経マイクロデバイス, No.9(1992), 33, 37
29) Fujihira, T. : "Theory of Semiconductor Superjunction Devices", Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, **36**-10(1997), 6254～6262
30) Deboy, G., et al. : "A New Generation of High Voltage MOSFETs Breaks the Limit of Silicon", IEDM Tech. Dig., (1998), 683～686
31) 樹神雅人, ほか : "埋込みゲートを有する縦型MOSFET", 電子情報通信学会論文誌, **J80-C-II**-5(1997), 157～163
32) Uesugi, T., et al. : "New 3-D Lateral Power MOSFETs with Ultra Low On-Resistance", Proc. ISPSD, (1998), 57～60
33) 河路佐智子, ほか : "部分SOI構造BSITの検討", 第9回SIデバイスシンポジウム講演論文集, SSID-96-7(1996), 28～33
34) Baliga, B. J. : "Semiconductors for High-Voltage, Vertical Channel Field Effect Transistors", J. Appl. Phys., **53**-3 (1982), 1759～1764
35) 八尾勉 : "SiCパワーデバイスの可能性と課題", 平成9年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, (1997), 243～246
36) Chow, T. P. and Tyagi R. : "Wide Bandgap Compound Semiconductors for Superior High-Voltage Power Devices", Proc. ISPSD, (1993), 84～88
37) Detchprohm, T., et al. : "Hybrid Vapor Phase Epitaxial Growth of a High Quality GaN Film Using a ZnO Buffer Layer", Appl. Phys. Lett., **61**-22(1992), 2688～2690

(2000年2月11日原稿受付)

著者紹介

上杉　勉　　Tsutomu Uesugi
生年：1958年。
所属：パワーデバイス研究室。
分野：車載用パワーデバイスの研究・開発。
学会等：電気学会，電子情報通信学会，応用物理学会会員。