

車載応用に向けての次世代パワーデバイス – GaN, SiC

Next-generation Power Switching Devices for Automotive Applications: GaN and SiC

上田 哲三
Tetsuzo Ueda

高橋 理
Satoru Takahashi

海本 博之
Hiroyuki Umimoto

神澤 好彦
Yoshihiko Kanzawa

澤田 和幸
Kazuyuki Sawada

山崎 晃
Akira Yamasaki

要 旨

電気自動車／ハイブリッド自動車における各種モータ駆動や電力変換回路の小型化かつ高効率化を実現できる GaN, SiC パワーデバイスを開発した。GaN に関しては大面積 Si 基板上に Gate Injection Transistor (GIT) と名付けた新規構造によりノーマリオフ動作と 600 V での連続安定動作を実現した。SiC ではダイオードを内蔵した DioMOS (Diode-integrated MOSFET) を提案し、従来必要であった外付けダイオードを不要にしてより小型・低コストを可能にした。これらの次世代パワーデバイスは自動車の軽量化・省エネルギー化に貢献し、今後の普及が期待される。

Abstract

Next-generation power devices using GaN and SiC which have been developed at Panasonic and are applicable to electric and hybrid electric vehicles are reviewed. A novel normally-off transistor named Gate Injection Transistor (GIT) on cost-effective Si substrates enables stable operation at 600V. A DioMOS (Diode-integrated MOSFET) structure is proposed for SiC, which eliminates the conventional external diode and reduce the total area of SiC chips and the cost. These GaN and SiC power devices are very promising automobile applications since they can make the system lighter and smaller with reduced power consumption.

1. はじめに

電気自動車 (EV) / ハイブリッド自動車 (HEV) のさらなる普及に向けては各種モータ駆動や電力変換に使用されるパワーデバイスの高性能化が必要不可欠である。現在は IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) や MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) といった Si パワーデバイスが用いられているが、その材料限界のために、さらなるオン抵抗低減、耐圧向上、高周波化といった特性改善に限界がある。この課題を解決すべく期待されているのが、GaN (窒化ガリウム)、SiC (炭化ケイ素) といったワイドバンドギャップ半導体である。これらの材料は絶縁破壊電界が大きく電極間距離を短くしても高耐圧を実現できるので、高耐圧かつ低オン抵抗を有するパワーデバイスを容易に実現できる。小さなオン抵抗によりチップ面積を小さくしてより低容量を実現できるため、従来の Si パワーデバイスと比較して高速動作が可能となる。動作周波数を上げることができればリアクトルやキャパシタといった周辺受動部品を小型化でき、オン抵抗やスイッチング損失低減により動作効率が向上できれば放熱器を小型化できる。これらによりシステムの大幅な小型化が可能となり、自動車の軽量化・燃費改善が期待される。

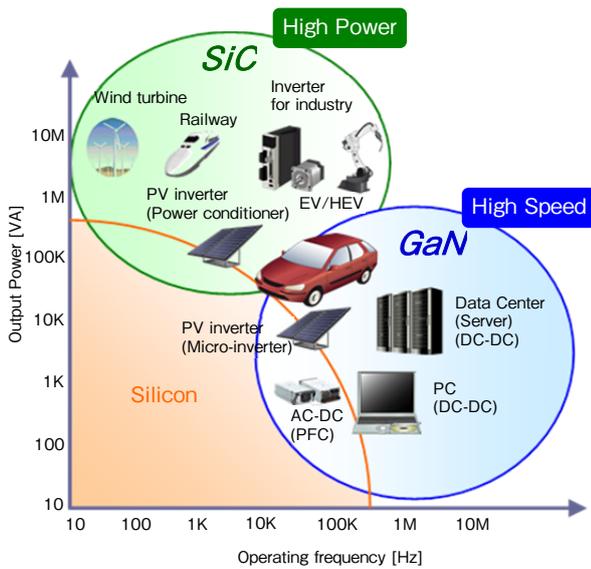
本稿においては、これら次世代パワーデバイスの車載応用に関連して GaN, SiC それぞれに適した応用分野と当

社で開発中のこれらパワーデバイスの最新特性について報告する。

2. 次世代パワーデバイスの車載応用

GaN, SiC はともに類似した材料物性を有しているが、結晶成長層およびデバイス構造が大きく異なっており、その応用分野は区別されるべきものと考えられる。従来の Si パワーデバイスを含めて次世代パワーデバイスの応用分野をまとめたものが第 1 図である。GaN は Si 基板上に作製しており、その耐圧が形成する GaN の膜厚で決定されてしまうため、現状では耐圧 1000 V 以下に留 (とど) まっている。一方で横型のデバイス構造であり寄生容量が小さく Si では実現不可能な高速動作が可能である。SiC は熱伝導率が高く SiC 基板上に縦型構造を形成するため高電圧・大電流用途に適している。これらを考慮して GaN は 1000 V 以下で Si では実現できない高周波動作を、SiC は 1000 V 以上でより大電力の応用をそれぞれ訴求する応用が適している。

車載応用は GaN, SiC の適する分野が重複する領域であり、GaN, SiC それぞれの特長を活 (い) かした棲 (す) み分けが可能である。第 2 図は EV/HEV において GaN, SiC が目指す応用をまとめたものである。GaN は動作周波数を上げて小型・軽量化を訴求できる充電器や蓄電池間の電圧変換を担う DC-DC コンバータが、SiC は主モータを



第1図 GaN, SiCパワーデバイスの応用分野
Fig. 1 Potential applications of GaN and SiC power switching devices

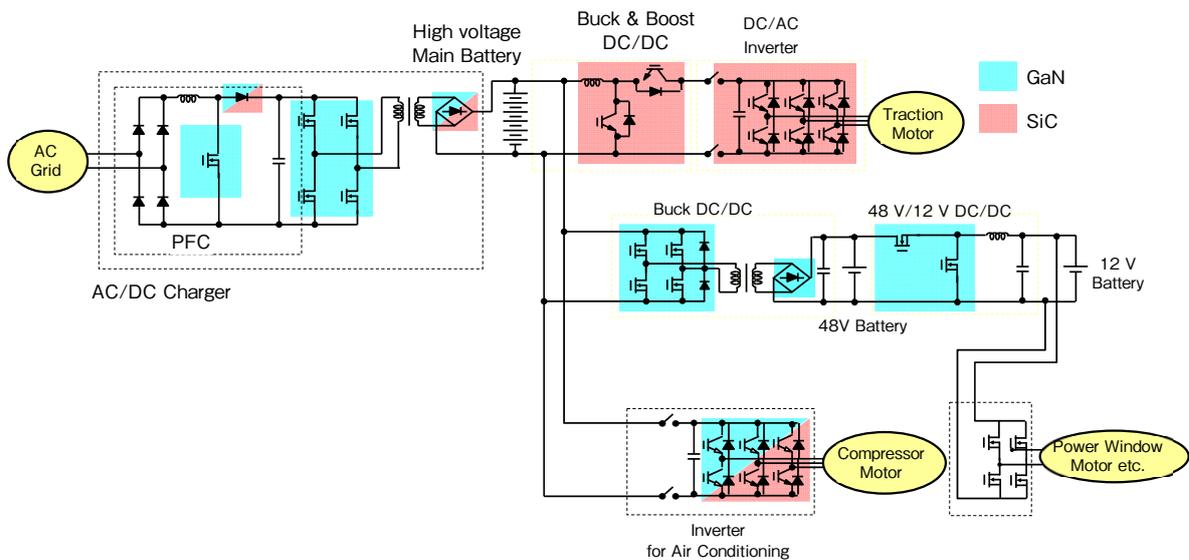
駆動するインバータ, その前段のDC-DCコンバータが最適な応用分野である. 以下, 当社が独自に開発したGaN, SiCパワーデバイスに関して解説する.

3. GaNパワーデバイス

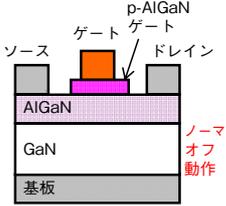
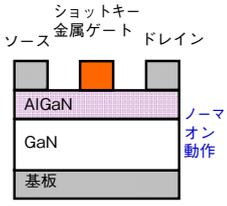
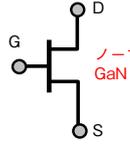
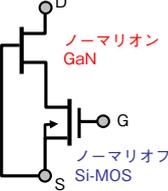
GaNではより低コストでの商品化を目指し大口径基板が入手可能なSi基板上でのトランジスタ開発が積極的に

推進されてきた. 課題であった結晶成長に関しては, 有機金属気相成長 (MOCVD) を用いて多層バッファ層を採用することにより鏡面かつクラックフリーで5 μm 厚程度の成長に成功し実用化に向けて目途がついた状況にある. 加えて課題であったノーマリオフ動作の実現についてもデバイス構造を改善することで解決している[1]. ノーマリオフ動作とはゲート電圧が印加されていない状態でドレイン電流が流れない特性のことで機器の安全動作のため必要不可欠であるが, GaNパワーデバイスでは採用するAlGaIn/GaNヘテロ接合に高密度の電子が蓄積されてしまいその実現が困難であった.

第3図は当社が独自に開発したGate Injection Transistor (GIT) と他社からノーマリオフ型として報告のあるカスコード接続型を比較しまとめたものである. GITはp型ゲートによりノーマリオフ動作を実現しているが, このゲートからオン時に注入される正孔によって電子が形成されることでドレイン電流が増加する, いわゆる伝導度変調が生じるためノーマリオフ動作を維持しつつ大電流・低オン抵抗を実現できる[2]. 単一デバイスであり潜在的に低コストであることに加え, ゲート抵抗によりスイッチング速度が制御できることや, 集積化が可能であることも特長である. 一方でカスコード型は低耐圧MOSFETをノーマリオン型GaNトランジスタと直列に接続したものであり, 閾 (しきい) 値電圧が高く従来のSiパワーデバイスへのゲート駆動を適用できるという長所はあるものの, チップ数が多く実装工程が複雑で低コスト化に限界があることやスイッチング速度の制御性が悪



第2図 EV/HEV回路構成におけるGaN, SiC応用の可能性
Fig. 2 Typical circuit diagram of EV/HEV and suitable applications of GaN and SiC

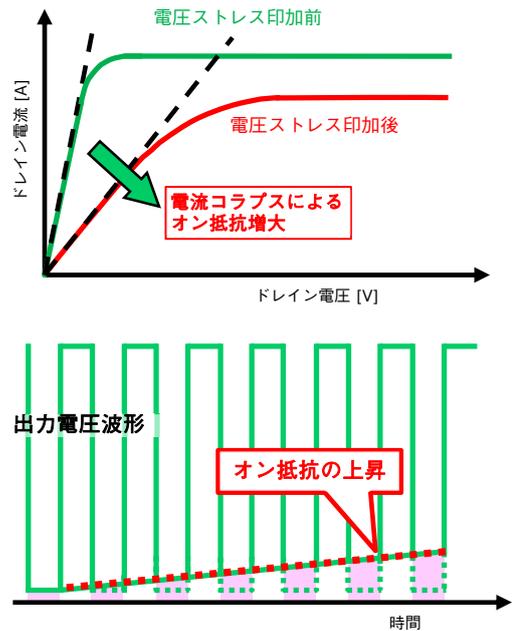
	GIT (p型ゲート)	カスコード接続
デバイス構造		
回路図		
特長・課題	<p>(特長)</p> <ul style="list-style-type: none"> 単一デバイスで低コスト 大電流を小型PKGで実現 スイッチング速度をゲート抵抗で制御可能 集積化可能 	<p>(課題)</p> <ul style="list-style-type: none"> 複数デバイスで高コスト PKGサイズ大 スイッチング速度の制御困難 PKG内の寄生Lが問題

第3図 ノーマリオフ型GaNトランジスタの特性比較

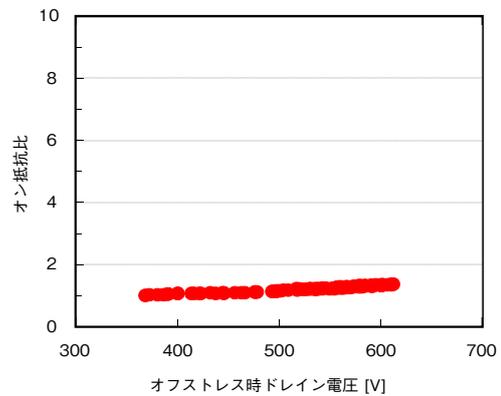
Fig. 3 Comparisons between Panasonic's GIT and a conventional normally off GaN transistor

いといった課題がある。GITは横型であり双方向に電流が流せるのでゲート電圧を印加しない場合の逆方向電流-電圧特性がダイオードのそれと同様であり、インバータ回路などでトランジスタに並列に接続する逆方向ダイオードが不要となることも大きな特長である。

GITにおいては電流コラプスと呼ばれるGaN特有の課題に対しても解決し業界で初めて600 Vでのコラプスフリー動作を確認している。第4図はこの電流コラプスについての説明である。電流コラプスは大きなドレイン電圧を印加した際に電子が結晶や各種界面に捕獲され、その結果ドレイン電流が減少し同時のオン抵抗が増大する現象である。スイッチングを複数回繰り返して印加した場合にはオン抵抗が徐々に増大しデバイスの発熱などにより最後はデバイス破壊に至ってしまう。GITでは作製プロセス・デバイス構造を改善し、第5図に示す通り、印加するドレイン電圧として600 Vまで電流コラプスを抑制することに成功した[3]。信頼性についてもBT試験（バイアス印加高温試験）などの基本項目で既に十分な特性を確認できている。Si基板上に形成した600 V耐圧GITの代表特性は第1表の通りである。このGITを用いて絶縁DC-DCコンバータの代表的回路であるLLCコンバータの1 MHz動作やインバータの高効率動作など、従来のSiパワーデバイスと比較して高速・高効率な特性を既に確認できている[4]。



第4図 GaNパワーデバイスにおいて観測される電流コラプス
Fig. 4 Current collapse observed in GaN power transistors



第5図 GITにおける電流コラプス抑制-オン抵抗のオフストレス電圧依存性

Fig. 5 Suppression of current collapse in a GIT: Change of on-state resistance after applying various drain voltages

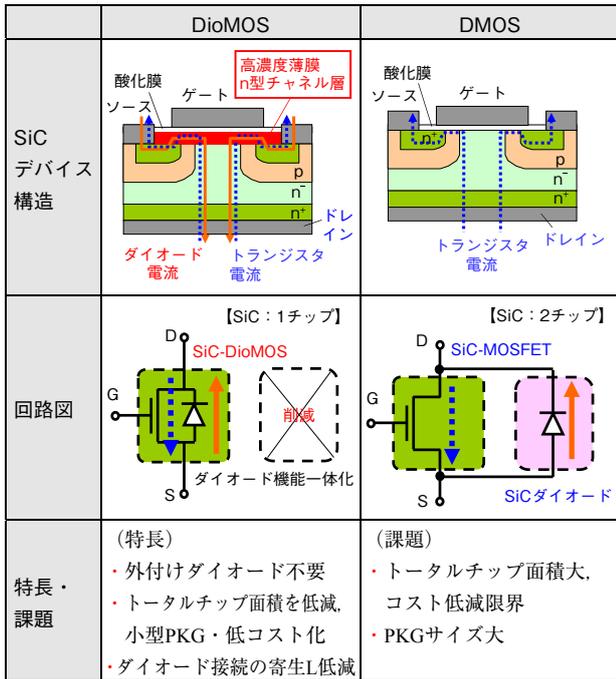
第1表 Si基板上GITの代表特性

Table 1 Typical characteristics of a 600 V GIT on Si

閾値電圧 V_{th}	1.2 V
耐圧 (定格, 室温) BV_{ds}	600 V
耐圧 (ブレイクダウン) BV_{ds}	1000 V
ドレイン電流 (定格, 室温) I_{ds}	15 A
オン抵抗 (室温) R_{on}	71 mΩ
スイッチング立ち上がり時間 (400 V, L負荷) t_r	16 ns
スイッチング立ち下がり時間 (400 V, L負荷) t_f	9 ns
逆方向ダイオード立ち上がり電圧 ($V_{gs}=0$ V時) V_{f0}	1.5 V

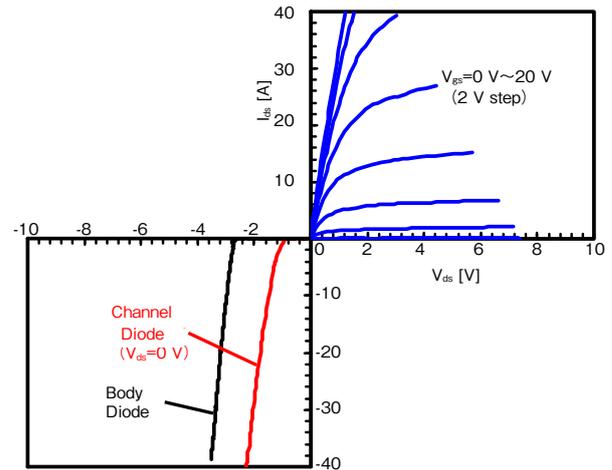
4. SiCパワーデバイス

当社で開発しているSiCパワートランジスタはDioMOS (Diode-integrated MOSFET) と呼ばれ、トランジスタの内部に逆方向ダイオードの機能を内蔵していることが大きな特長である。従来のDMOS (Double-diffused MOSFET) との比較を第6図に示す。いずれもSiC基板上に形成した縦型構造を有しているが、DioMOSではMOSゲート直下に高濃度の薄膜n型チャンネル層を形成していることが異なっている。逆方向電圧印加時に0.8 V程度の低電圧から

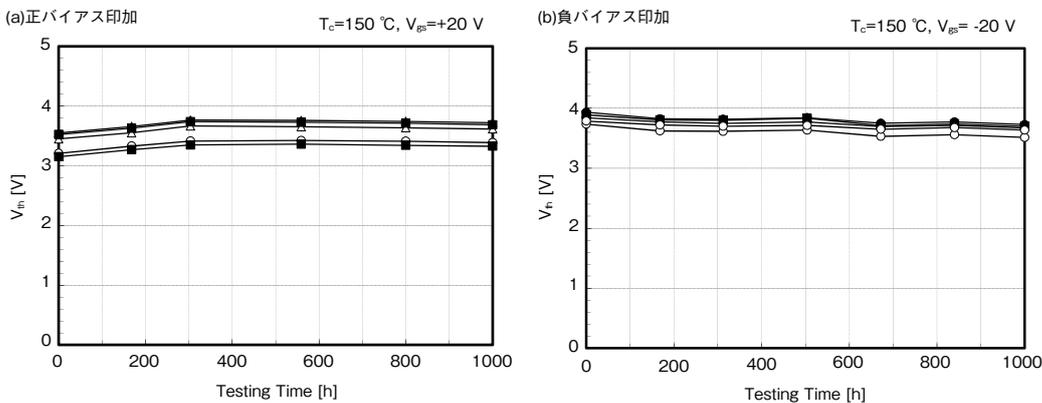


第6図 SiCトランジスタの特性比較
Fig. 6 Comparisons between Panasonic's DioMOS and a conventional DMOS transistor

この層に電流が流れるようにその厚さ・濃度を設計することで、あたかも逆方向ダイオードを並列に接続した場合と同様の電流-電圧特性を実現できる[5,6]. これによりインバータなど応用でSiCトランジスタに並列に接続される必要のあったSiCショットキーバリアダイオードが不要となる. 使用するSiCチップの面積を低減できパッケージサイズを低減できると同時に低コスト化を実現できる. さらに、トランジスタとダイオードの接続で生じる寄生インダクタンスも低減でき、より高速で低損失のスイッチングが期待できる. 得られた電流-電圧特性の代表例を第7図に示す. チップ当たりのオン抵抗25 mΩ, 定格電圧1200 Vのデバイスでアバランシェ耐圧として1650 Vと十分大きな値を確保している. ここでボディダイオードと記載した逆方向特性はSiCトランジスタに内蔵されたpn接合のダイオード特性であるがDioMOSの場合はチャンネル層を用いたダイオードの立ち上がり電圧が低



第7図 SiC DioMOSの電流-電圧特性
Fig. 7 Current-voltage characteristics of a SiC DioMOS



第8図 SiC DioMOSのゲート信頼性試験結果
Fig. 8 Reliability of MOS gates in SiC DioMOS

いためpn接合に電流は流れない。

当社ではゲート形成工程を改善することでMOSゲートに関して良好な信頼性を確保している。第8図はゲートに正負20 Vを印加した場合の閾値電圧の変化を示すが、1000時間でも大きな変動はなく実用上問題ないことがわかる。より大きなゲート電圧を印加できるので高速スイッチングに向け有利である。1200 V耐圧DioMOSの代表特性を第2表にまとめる。DioMOSによりDC-DCコンバータの500 kHz動作、それによる小型化を確認できており、今後さらに応用検討を進めていく。

第2表 SiC DioMOSの代表特性

Table 2 Typical characteristics of a 1200 V SiC DioMOS

閾値電圧 V_{th}	3.9 V
耐圧 (定格, 室温) BV_{ds}	1200 V
耐圧 (ブレイクダウン) BV_{ds}	1650 V
ドレイン電流 (定格, 室温) I_{ds}	25 A
オン抵抗 (室温) R_{on}	40 m Ω
スイッチング立ち上がり時間 (600 V, R負荷) t_r	58 ns
スイッチング立ち下がり時間 (600 V, R負荷) t_f	13 ns
逆方向ダイオード立ち上がり電圧 ($V_{gs}=0$ V時) V_{10}	0.8 V

5. まとめ

EV/HEVのさらなる軽量化・省エネルギー化に貢献すると期待されるGaNおよびSiCパワーデバイスに関して、当社における最新デバイス技術についてまとめた。GaNに関しては独自のGIT構造によりノーマリオフ型600 V耐圧品を、SiCに関しては同じく独自のDioMOSにより逆方向ダイオードを内蔵した1200 V耐圧品を開発している。今後は、これらの次世代パワーデバイスに関して車載応用の視点から長期信頼性技術確立や実機応用上の課題対策を進め、実用化を目指し取り組んでいく。GaNは充電器あるいはDC-DCコンバータの小型化に、SiCは主モータ駆動用インバータの高効率化に貢献すると期待され、次世代EV/HEV向けに非常に有望である。

参考文献

- [1] M. Ishida et al., "GaN on Si technologies for power switching devices," IEEE Trans. Electron Device, vol.60, no.10, pp. 3053-3059, 2013.
- [2] Y. Uemoto et al., "Gate injection transistor (GIT)—A normally-off AlGaIn/GaN power transistor using conductivity modulation," IEEE Trans. Electron Device, vol.54, no.12, pp. 3393-3399, 2007.
- [3] T. Ueda, "Reliability issues in GaN and SiC power devices," IEEE IRPS Tech. Dig., Wikoia, Hawaii, USA, June 2014, 3D-4.

- [4] T. Ueda, "The challenge and progress of high-voltage normally-off GaN gate injection transistors," IEEE WIPDA, Columbus, Ohio, USA, October 2013.
- [5] M. Uchida et al., "Novel SiC power MOSFET with integrated unipolar internal inverse MOS-channel diode," IEEE IEDM Tech. Dig., Washington D.C., USA, December 2011, pp. 26.6.1 - 26.6.4.
- [6] A. Ohoka et al., "40 m Ω / 1700 V DioMOS (Diode in SiC MOSFET) for high power switching applications," Materials Science Forum vols. 778-780, pp. 911-914, 2014.

執筆者紹介



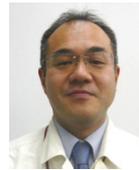
上田 哲三 Tetsuzo Ueda
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systems Company
博士 (工学)



高橋 理 Satoru Takahashi
パナソニック セミコンダクターソリューションズ (株) 半導体ビジネスユニット
Semiconductor Business Unit,
Panasonic Semiconductor Solutions Co., Ltd.



海本 博之 Hiroyuki Umimoto
パナソニック セミコンダクターソリューションズ (株) 半導体ビジネスユニット
Semiconductor Business Unit,
Panasonic Semiconductor Solutions Co., Ltd.



神澤 好彦 Yoshihiko Kanzawa
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systems Company
博士 (工学)



澤田 和幸 Kazuyuki Sawada
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



山崎 晃 Akira Yamasaki
パナソニック セミコンダクターソリューションズ (株) 半導体ビジネスユニット
Semiconductor Business Unit,
Panasonic Semiconductor Solutions Co., Ltd.