

高効率ワンチップGaNインバータIC

High-Efficiency GaN-based Monolithic Inverter ICs

森田 竜夫
Tatsuo Morita

梅田 英和
Hidekazu Umeda

上本 康裕
Yasuhiro Uemoto

上田 哲三
Tetsuzo Ueda

田中 毅
Tsuyoshi Tanaka

上田 大助
Daisuke Ueda

要 旨

地球温暖化問題が大きな課題となっている中、産業用途から家電機器に至る幅広い分野でモータドライバとして使われるインバータの高効率化が求められている。高効率化の有効な手段として、従来のSi半導体に比べ優れた材料特性を有するGaNを用いたパワーデバイスの導入が期待されている。今回、独自に開発したノーマリーオフゲート注入型GaNトランジスタを利用したワンチップGaNインバータICを開発し、初めてそのモータ駆動を確認したので報告する。各素子を独立に駆動するため十分な素子間耐圧を実現することが課題であったが、Feイオン注入を用いた素子分離技術により解決した。作製したGaNインバータICは、20 W出力という低出力で従来インバータよりも高い効率95%を示し、変換損失を従来のIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) インバータより42%低減できた。

Abstract

A high-efficiency inverter system has been strongly desired for driving motors in a variety of applications including appliances and industrial uses for the prevention of global warming. The GaN-based power devices are highly expected to realize higher efficiency than that of systems using conventional Si-based devices. We report on a GaN-based monolithic inverter IC and its first successful use in a motor drive. The conversion loss in the GaN-based inverter is reduced by 42% compared to systems using conventional Si-IGBTs. The key processing technology is newly introduced planar isolation using Fe ion implantation which fully isolates the GaN-based lateral devices from each other.

1. はじめに

温暖化問題が地球規模の大きな課題となっている中、産業から家庭に至る幅広い分野で電気機器のさらなる省エネルギー化が強く求められている。特に、産業用機械の動力や空調機のコンプレッサなど、さまざまな分野に利用されているモータは、日本の電力の57%を占める膨大な電気エネルギーを消費しており[1]、モータの高効率運転によって社会全体で大きな省エネルギー効果が期待できる。効率的なモータ利用を行うため、モータの可変速制御を可能とするインバータが産業用から一般家電製品まで広く普及している。インバータは、直流電力を三相交流電力に変換し、モータの回転数・トルクを制御することで、必要な時に必要な量だけモータを駆動し、効率的なモータ利用を実現できる。そのため、多くの機器でインバータが搭載されており、インバータでの電力変換効率をさらに向上させることが、モータドライブの省エネルギー化において大変重要となる。現在のインバータは、Si半導体を用いたIGBTと呼ばれるパワートランジスタとFRD (Fast Recovery Diode) と呼ばれるダイオードで構成され、それぞれのトランジスタをスイッチングすることで三相交流電流を生成し、モータ制御を行っている。こ

の動作の中で、IGBTがオン時には直流電源からモータへIGBTを介して駆動電流が流れ、IGBTがオフ時にはモータからの還流電流がFRDを介して流れている。このため、IGBTとFRDのそれぞれで導通損失が発生し、これがインバータの電力変換損失の主因となっている。インバータの変換損失をさらに低減するためには、IGBTやFRDよりもオン抵抗が小さいデバイスが必要となるが、現在のIGBTおよびFRDのオン抵抗は、Siの材料物性値で決定される理論値にほぼ達しており、さらなる低減は困難である。さらに、これら2つのデバイスの電流電圧特性において、デバイス内部のPN接合に起因するオフセット電圧が発生し、オン抵抗の低減をいっそう困難にさせている。

一方で、GaNをはじめとした窒化物半導体は、絶縁破壊電界が従来のSiと比べ桁高く、さらにAlGaNとGaNとの接合界面に高い電子濃度で高移動度のチャネル層が形成できることから、これらを利用したHFET (Hetero-junction Field Effect Transistor) でSiデバイスをしのぐ低オン抵抗・高耐圧のパワーデバイスが実現できる[2]。また、チャネル上に直列にPN接合が内在せず、その電流電圧特性においてオフセット電圧が発生しないためIGBTに比べより小さなオン抵抗のデバイスが可能であり、IGBTインバータで課題であった小電流での駆動時においても

高効率で駆動できる．さらに，GaNトランジスタは横型デバイスであり，縦型デバイスであるIGBTに比べ，高耐圧デバイスを容易にワンチップに集積できる．

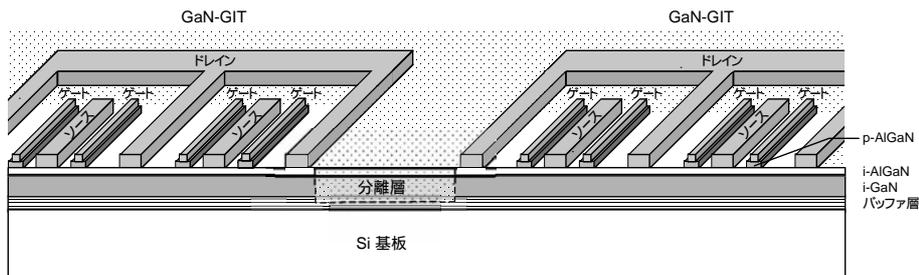
今回，筆者らは横型GaNトランジスタを集積化し，小電流での駆動時でも高効率で駆動できるワンチップGaNインバータICの検討を行った．特に，各素子を独立に駆動するため十分な素子間耐圧を実現することが課題であったが，Feイオン注入を用いた素子分離技術により解決した．さらに，GaNトランジスタ自身がダイオードのように動作する逆導通モードを積極的に利用することで，従来インバータで必要不可欠であったFRDを用いないモータ駆動も検討を行った．

2. 本論

2.1 デバイス構造

第1図に，今回開発したノーマリオフ型Gate Injection Transistor (GIT) [3][4]と呼ぶGaNトランジスタを集積したGaNインバータICの構造図を示す．GaN-GITは，AlGaIn/GaNヘテロ接合の上にゲートとなるp型AlGaIn層を形成している．p型AlGaIn層がゲート直下のチャンネルのポテンシャルを上昇させるため，ゲート電圧0 V時でも空乏化し，ノーマリオフ特性を得ることができる．さらに，p型ゲートより正孔を注入することで，電子 - 正孔対を形成するいわゆる伝導度変調により大電流化および低オン抵抗化が可能となる[3]．

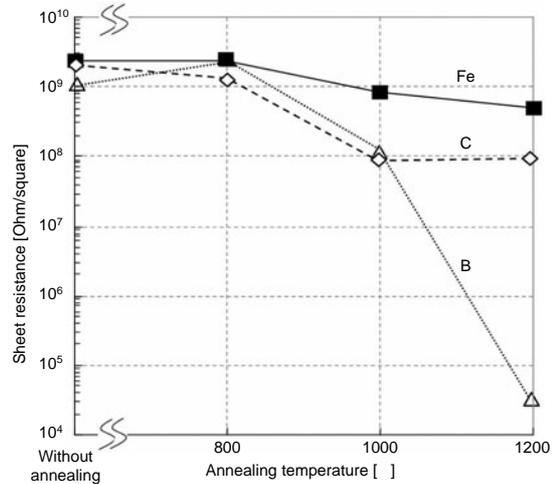
インバータICとするため，イオン注入により高抵抗化させた素子分離を行った．素子分離層は，作製プロセス中の高温アニール工程を経ても絶縁を維持する必要があるため，今回，イオン種を検討し，高温プロセスでも高い絶縁性を維持する分離層の検討を行った．第2図に，Fe，B，CイオンをAlGaIn/GaN層に注入した分離層の絶縁特性を示す．いずれのイオン種も $10^9 \Omega/\text{square}$ 以上の高い絶縁性を示したが，800℃以上の熱処理を行った場合，BおよびCイオンを注入した分離層で絶縁性が低下した．第3図に，



第1図 GITを用いたワンチップGaNインバータICのデバイス構造

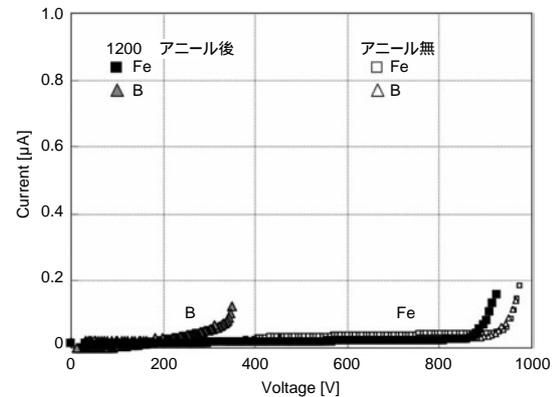
Fig. 1 Schematic cross section of two AlGaIn/GaN gate injection transistors (GITs) in monolithic inverter system

1200℃アニール処理前後のBおよびFeイオンを注入した分離層の耐圧特性を示す．Bイオンはアニール後に絶縁性



第2図 イオン注入したAlGaIn/GaN層絶縁特性のアニール温度，注入イオン種依存性

Fig. 2 Change of isolation properties after annealing at various temperatures. Fe, C, and B ions are implanted onto AlGaIn/GaN



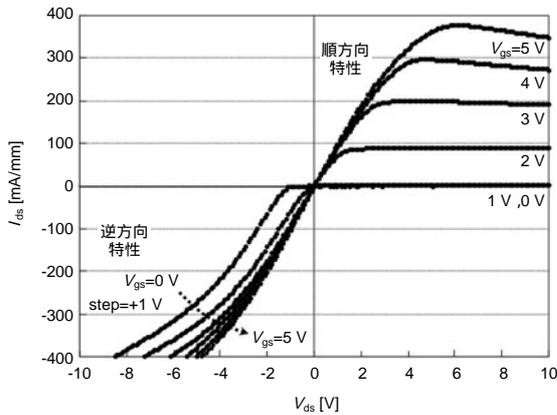
第3図 FeおよびBイオン注入した絶縁領域のアニール前後の耐圧特性 (電極幅20 μm)

Fig. 3 Isolation characteristics between 20 μm spacing of Fe and B ion-implanted isolation regions

を低下させているのに対して、Feイオンはアニール後もその絶縁性を維持し、900 Vもの高い絶縁耐圧を示した。

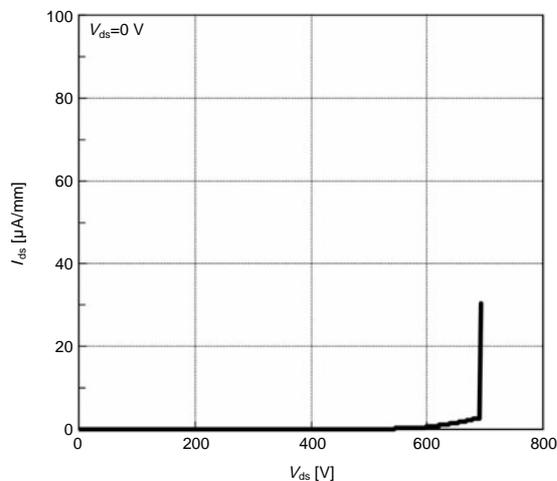
2.2 デバイス特性

第4図に、作製したGITの順方向および逆方向 I_{ds} - V_{ds} 特性を示す。単位面積当りのオン抵抗 $R_{on} \cdot A$ として $2.0 \text{ m} \cdot \text{cm}^2$ とIGBTと比べ非常に小さい値が実現できた[3]。また、同図の逆方向特性に示すように、 $V_{gs} = 0 \text{ V}$ のGITはトランジスタがダイオードのように動作する逆導通モードとなる。この逆導通モードは、インバータの還流ダイオードの代わりとなることが可能であるため、従来インバータで必要不可欠であったFRDを用いず、モータ駆動が可能となる。さらに、 $V_{gs} = 4 \text{ V}$ 時において、オフセット電圧のない I - V 特性で、双方向にドレイン電流を通電する



第4図 順方向および逆方向 I_{ds} - V_{ds} 特性

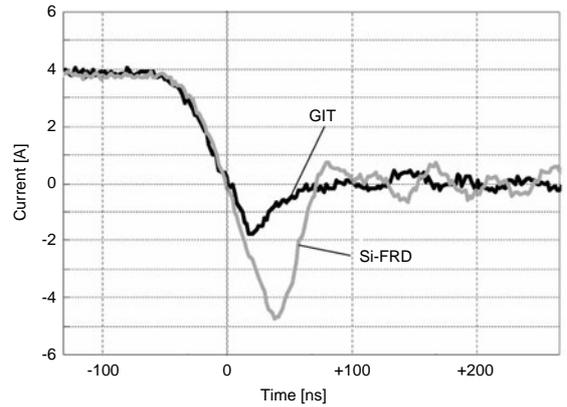
Fig. 4 On-state I_{ds} - V_{ds} characteristics of forward and reverse operations of fabricated GIT



第5図 オフ特性

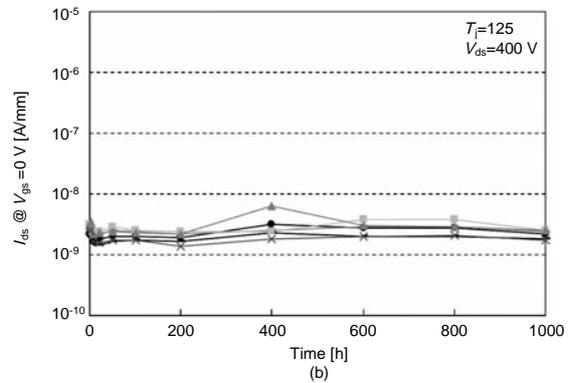
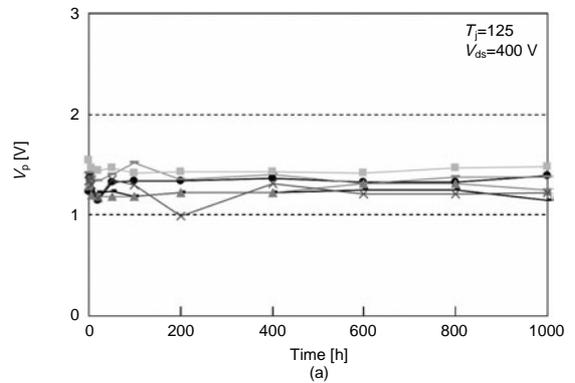
Fig. 5 Off-state breakdown characteristics of fabricated GIT exhibiting breakdown voltage of 700 V

FET (Field Effect Transistor) モードとなる。第5図に、GITのオフ特性を示す。Si基板上で700 V以上の耐圧を実現した。第6図に、GITの逆導通モードとSi-FRDのリカバリ特性を示す。GITの逆導通モードを還流ダイオードとして使用する際には、還流電流をすばやくスイッチングして遮断する良好なリカバリ特性が求められる。逆導



第6図 GIT逆導通モードとSi-FRDのリカバリ特性

Fig. 6 Recovery characteristics of reverse conduction mode of fabricated GIT comparing with that of conventional Si-FRD



第7図 高温高電圧バイアス試験におけるデバイス特性値の時間変動 (a) 閾値電圧 (V_p), (b) リーク電流 (I_{ds})

Fig. 7 Bias-temperature reliability test results on (a) threshold voltage (V_p) and (b) off-state leakage current of GITs

通モードのリカバリ時間は、20 ns程度であり、Si-FRDより非常に小さい値を示した。この特性により、逆導通モードのスイッチング損失が低減できる。第7図は、GITの高温高電圧バイアス試験の結果であり、125 で $V_{ds} = 400$ Vを1000時間にわたり印加しても、閾値（しきいち）電圧（ V_p ）およびオフリーク電流（ I_{ds} ）に大きな変動はなく、十分な信頼性を確保できていることを確認した。

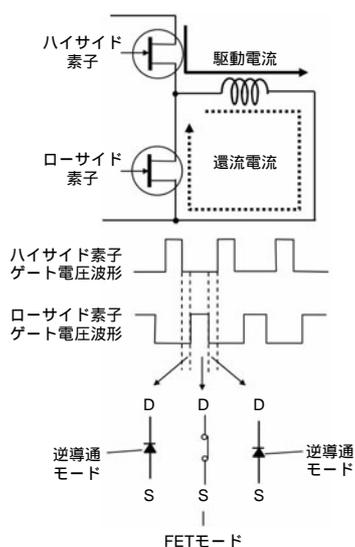
2.3 ワンチップGaNインバータIC

第1表に、Siデバイスを用いた従来のインバータ製品とワンチップGaNインバータの比較を示す。従来インバータで用いられているIGBTやMOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）は縦型デバイスであり、集積化が困難である。一方、横型デバイスであるGaNトランジスタは、素子分離をすることで容易に集積することができる。また、GITのダイオードモードのリカ

第1表 ワンチップGaNインバータとSiデバイスを用いた従来インバータの比較

Table 1 Comparison of various inverters using GaN and Si-based power device

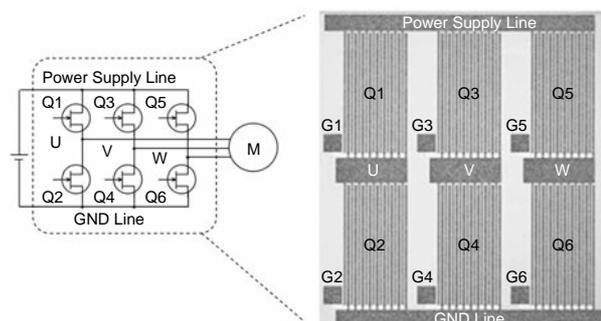
	GaN-GIT インバータ	Si-IGBT インバータ	Si-MOSFET インバータ
デバイス構造	横型	縦型	縦型
ワンチップ 集積化	集積可能 6 GaN-GITs	集積困難 6 IGBTs + 6 FRDs	集積困難 6 MOSFETs
還流ダイオード	不要（逆導通モード）	FRD	ボディダイオード
リカバリ時間	20 ns	50 ns（FRD）	200 ns



第8図 GITを用いたハーフブリッジ回路における還流ダイオードフリー動作

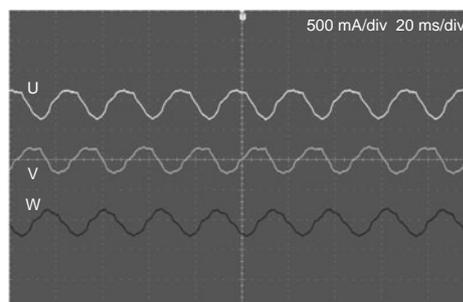
Fig. 8 Details of FWD-free operation of half bridge to flow fly-wheel current using two GITs in inverter systems

バリ時間はSi-FRDやMOSFETのボディダイオードのものよりも短く、インバータのスイッチング損失の低減が可能である。第8図に、GITを用いたハーフブリッジ回路のFRDフリー動作を示す。還流電流を通电するため、逆導通モードとFETモードの両方を用いた同期整流制御を行った。この制御により、還流電流をオフセット電圧のないFETモードで通电することができ、導通損失を低減することができる。また、逆導通モードをFETモードの前後に挿入することで、還流電流を高速にスイッチングすることができ、還流ダイオードがない場合に想定される電源短絡や過電圧の発生を防止することができる。第9図は、6素子のGITを集積したワンチップGaNインバータICのチップ写真であり、チップサイズは2.5 mm×2.7 mmである。第10図は、ワンチップGaNインバータのモータ駆動時の出力電流波形であり、正常なモータ駆動を確認した。ワンチップGaNインバータと従来のIGBT/FRDインバータの電力変換効率の出力依存性を測定した結果を、第11図に示す。ワンチップGaNインバータICで20 W出力時に効率95 %を得た。インバータの電力変換損失は、IGBTイ



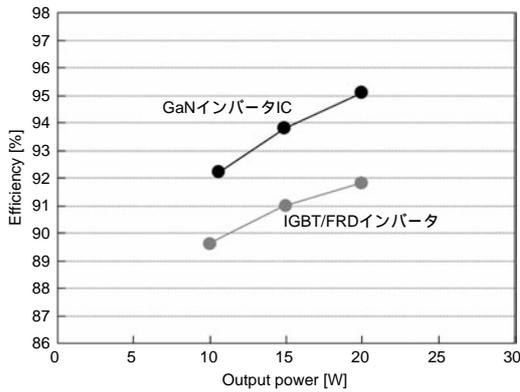
第9図 6素子のGITを集積したワンチップGaNインバータICのチップ写真

Fig. 9 Chip photograph of fabricated GaN monolithic inverter IC in which 6 GITs are integrated



第10図 作製したワンチップGaNインバータICのモータ駆動時における出力電流波形

Fig. 10 Waveforms of motor driving using fabricated GaN monolithic inverter IC



第11図 ワンチップGaNインバータとIGBT/FRDインバータの電力変換効率

Fig. 11 Power conversion efficiency of GaN monolithic inverter and conventional Si-IGBT/FRD one

ンバータが8%，GaNインバータが5%であり，IGBTインバータと比較し，GaNインバータで損失を42%低減できていることを確認した．これは， $I-V$ 特性にオフセット電圧のないGaNデバイスの特長を生かし，小電流での駆動時でも小さなオン抵抗で駆動できた結果といえる．

3. まとめ

Feイオン注入による素子分離法でGa_{0.5}In_{0.5}N-GITをワンチップに集積したGa_{0.5}In_{0.5}NインバータICを作製し，世界で初めてモータ駆動を確認した．Ga_{0.5}In_{0.5}NインバータICは，Ga_{0.5}In_{0.5}N-GITの逆導通モードを積極的に活用することで，従来インバータで必要不可欠であったファーストリカバリーダイオード（FRD）を用いないFRDフリーの状態でもータを駆動した．さらに，作製したワンチップGa_{0.5}In_{0.5}Nインバータは，20W出力で従来のIGBTインバータよりも効率が3%高い効率95%を示し，小電流でのモータ駆動においても高効率なモータ駆動を示した．

参考文献

[1] “電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査,” (株)富士経済, 2009.
 [2] M. Hikita et al., “350V/150A AlGa_{0.5}In_{0.5}N power HFET on silicon substrate with source-via grounding (SVG) structure,” IEEE Trans. Electron Device, vol.52, no.9, pp.1963-1968, 2005.
 [3] Y. Uemoto et al., “Gate injection transistor (GIT) - A normally-off AlGa_{0.5}In_{0.5}N power transistor using conductivity modulation,” IEEE Trans. Electron Device, vol.54, no.12, pp.3393-3399, 2007.
 [4] D. Ueda, “Ga_{0.5}In_{0.5}N power devices for microwave/switching applications,” DRC Conference Digest, pp.27-28, June 2007.

著者紹介



森田 竜夫 Tatsuo Morita
 セミコンダクター社 半導体デバイス研究センター
 Semiconductor Devices Research Center,
 Semiconductor Company



梅田 英和 Hidekazu Umeda
 セミコンダクター社 半導体デバイス研究センター
 Semiconductor Devices Research Center,
 Semiconductor Company



上本 康裕 Yasuhiro Uemoto
 セミコンダクター社 ディスクリート事業本部
 Corporate Discrete Devices Div.,
 Semiconductor Company



上田 哲三 Tetsuzo Ueda
 セミコンダクター社 半導体デバイス研究センター
 Semiconductor Devices Research Center,
 Semiconductor Company



田中 毅 Tsuyoshi Tanaka
 セミコンダクター社 半導体デバイス研究センター
 Semiconductor Devices Research Center,
 Semiconductor Company
 工学博士



上田 大助 Daisuke Ueda
 先端技術研究所
 Advanced Technology Research Labs.
 工学博士