

# AlGaN/GaN HEMT パワーデバイス

AlGaN/GaN HEMT Power Devices

高田 賢治 津田 邦男

■ TAKADA Yoshiharu

■ TSUDA Kunio

窒化ガリウム (GaN) 系半導体を材料に用いた電子デバイスは、高い破壊電界強度と二次元電子ガスチャネルの高い移動度から、モータ駆動や電源回路に用いるパワー半導体デバイスとして魅力的なデバイスである。そこで、試作した窒化アルミニウムガリウム (AlGaN) /GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor) においてフィールドプレート構造を用いることで、600 V という高耐圧と、Si-MOSFET (シリコン MOS 型電界効果トランジスタ) の 1/20 に相当する超低オン抵抗を実現した。更に、フィールドプレート長やコンタクト長などを最適設計することで、オン抵抗と耐圧のトレードオフをいっそう改善することが可能である。また、試作したデバイスを用いて DC-DC (直流-直流) コンバータ回路の連続運転を行い、ダウチョッパ回路において、高電圧印加時の大電流連続スイッチング動作を確認した。以上の結果は、GaN パワーデバイスは次世代のパワースwitchングデバイスとして極めて有望であることを示している。

GaN semiconductors are very attractive for use in switching power devices for motor drive and power supply applications because of their high critical electric field and high mobility in the two-dimensional electron gas (2DEG) channel. Toshiba has fabricated AlGaN/GaN high electron mobility transistors (HEMTs) that realize a breakdown voltage of 600 V by employing the field plate technique as well as a low on-state resistance of 3.3 mΩcm<sup>2</sup>, which is 20 times lower than that of silicon MOSFETs. The trade-off characteristics between the breakdown voltage and the on-resistance can be further improved by optimized design of the field plate structure and the electrode contact region. The optimized on-resistance is estimated to be about 0.5 mΩcm<sup>2</sup> for a 600 V device.

A DC-DC converter circuit was demonstrated using a fabricated device. Operation of the down chopper circuit was achieved with an input voltage of 200 V at a switching frequency of 500 kHz. These results show that GaN devices are promising candidates for the next generation of power switching devices for power electronics applications.

## 1 まえがき

パワーエレクトロニクス機器の省エネルギー・小型化の要求に応えるために、パワーデバイスの低オン抵抗化が求められている。もっとも広く用いられているパワーデバイスである 600 V クラスの Si パワー MOSFET において、オン抵抗は Si の材料限界に迫る値が実現されており<sup>(1)</sup>、またスーパージャンクション構造を用いることで、Si 限界を超える低オン抵抗<sup>(2)</sup>も実現されているものの、更なる低オン抵抗化は材料物性的にもデバイス構造的にも困難になりつつある。そこで、飛躍的にオン抵抗を低減できる方法として、より高い破壊電界強度を持つワイドバンドギャップ半導体の採用が期待されている。

表 1 に示すように、炭化シリコン (SiC) や窒化ガリウム (GaN) などのワイドバンドギャップ半導体の破壊電界強度は Si の約 10 倍となる。この高い破壊電界強度により、パワーデバイス材料に用いた場合にドリフト層厚を薄く、かつドーピング濃度を高くすることが可能となる。オン抵抗の材料限界は破壊電界強度の 3 乗に反比例するので、SiC や GaN をデバイス材料に用いた場合に、Si 限界の約 1/1,000 といった超低オン抵

抗が期待できる<sup>(3)</sup>。このことから、現在、活発に内外の各研究機関、大学、メーカーによってワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスの研究開発が進められている。SiC においては、海外メーカーにより 600 V 級 SBD (Schottky Barrier Diode) が製品化されている。

これに対して GaN は高周波高出力デバイスとして注目を集め、研究開発が進められてきた。表 1 に示したように、高周波デバイスに用いた場合のバリガー性能指数の値から、GaN の優れた高周波デバイス適応性がうかがえるが、一方で低周波応用でのバリガー性能指数は更に際だって大きく、パワーデバイス応用の観点でも、他の材料と比較して GaN は非常に魅力的であることがわかる。GaN の場合、窒化アルミニウムガリウム (AlGaN) と組み合わせて AlGaN/GaN ヘテロ構造を形成することで、ヒ化ガリウム (GaAs) 系デバイスと同様に二次元電子ガスチャネルが得られ、チャネル移動度は非常に高くなる。また、AlGaN と GaN の間に発生する格子ひずみによるピエゾ分極と自発分極の相乗効果によって、極めて高いシートキャリア濃度が容易に得られることも特長であり、Si 材料限界を大きく下回る低オン抵抗が実現されている<sup>(4)-(6)</sup>。

表 1. 各種半導体の物性定数

Physical properties of semiconductor materials

項目	デバイス材料				
	GaN	4H-SiC	6H-SiC	GaAs	Si
バンドギャップ (eV)	3.39	3.26	3.00	1.43	1.12
電子移動度: $\mu_e$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	2,000 (2DEG)	1,020/850	80/400	8,500	1,400
正孔移動度: $\mu_h$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	150	115	90	400	600
絶縁破壊電界強度: $E_c$ (V/cm)	$3.3 \times 10^6$	$2.2 \times 10^6$	$3.5 \times 10^6$	$4.0 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$
熱伝導率: $\lambda$ (W/cm·K)	2.0	4.9	4.9	0.5	1.5
飽和速度: $v_{sat}$ (cm/s)	$2.7 \times 10^7$	$2.2 \times 10^7$	$1.9 \times 10^7$	$2.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$
誘電率: $\epsilon$	9	9.7	10	12.8	11.8
バルク成長	△	○	○	◎	◎
エピタキシャル成長	○	○	○	◎	◎
BM (対 Si)	2,270	236	140	16	1
BHFM (対 Si)	179	39	20	11	1
用途	青色発光デバイス 高周波デバイス パワーデバイス	パワーデバイス	パワーデバイス	超高速デバイス 高周波デバイス	主要半導体デバイス

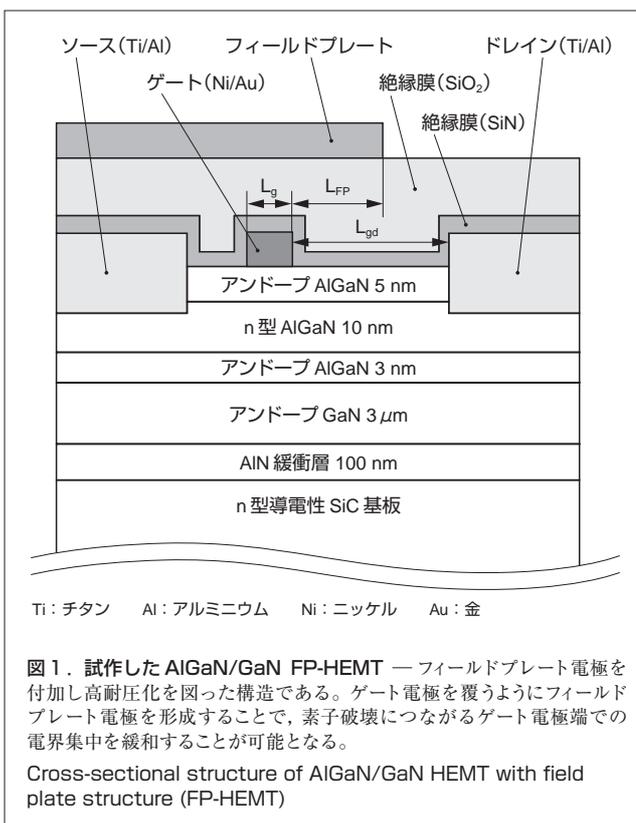
BM (バリガー性能指数: 低周波) =  $\epsilon\mu_e E_c^3$ , BHFM (バリガー性能指数: 高周波) =  $\mu_e E_c^2$   
 △: 基礎研究レベル ○: 試作開発レベル ◎: 市販製品レベル

## 2 高耐圧 GaN デバイスの開発

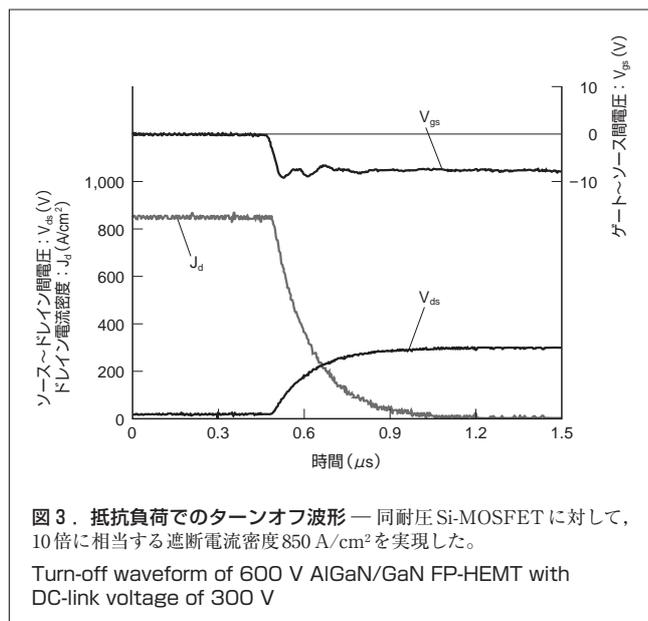
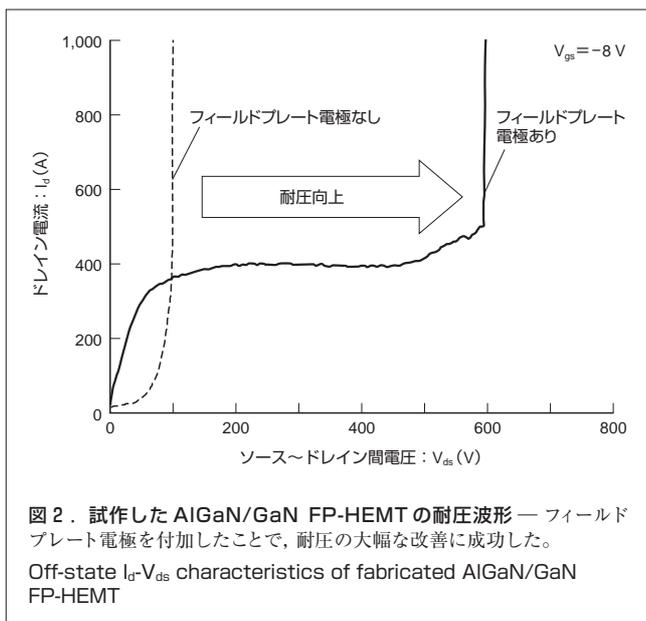
これまで報告されている GaN パワーデバイスは、先行して研究開発が進められてきた高出力高周波 GaN デバイスと同じ構造が用いられており、パワーデバイスに特化した設計は行われていない。パワーデバイスでは、オン抵抗と耐圧間のトレードオフの関係が重要な性能指標であり、この点に注目した設計が要求される。

更に、電流遮断能力もスイッチングデバイスとして重要な性能の一つである。一般にパワーデバイスは高電圧を印加した状態でスイッチングを行うため、デバイスを破壊せずにどの程度の電流密度を遮断可能であるかが、スイッチングデバイスの一つの性能指標となる。

東芝では、数百 V という高耐圧を安定して実現するために、フィールドプレート (FP) 構造を採用した AlGaIn/GaN HEMT を試作した。試作したデバイスの断面構造を図 1 に示す。各寸法は、ゲート長 ( $L_g$ ) = 1.5  $\mu\text{m}$ , ゲート～ドレイン間距離 ( $L_{gd}$ ) = 10  $\mu\text{m}$ , フィールドプレート長 ( $L_{FP}$ ) = 5  $\mu\text{m}$ , ゲート幅 ( $W_g$ ) = 200  $\mu\text{m}$  である。デバイス作製には、MOCVD (有機金属化学気相成長) により (0001) n 型導電性 SiC 基板上に AlGaIn/GaN ヘテロ構造を結晶成長させたウェーハを用いた。AlGaIn 層の Al の混晶比は 30% であり、n 型 AlGaIn 層のドーピング濃度は  $5.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  である。ソース電極に接続される FP 電極がドレイン電極からの電界をシールドすることで、デバイス破壊の原因となるゲート電極端部への電界集中を抑制し、高耐圧化を可能としている<sup>(7)</sup>。特に、試作したデバイスでは、n 型導電性 SiC 基板をソース電極に電気的に接続することで、SiC 基板も FP 電極として働かせシールド効果を高めている。



試作したデバイスのしきい値電圧 ( $V_{th}$ ) = -6 V 以下のオフ状態となるゲート～ソース間電圧 ( $V_{gs}$ ) = -8 V での耐圧波形を図 2 に示す。FP 電極を持たない通常構造の HEMT のオフ耐圧が 100 V であるのに対して、FP 電極を加えることによりオフ耐圧が 600 V に劇的に増加している。これによって、FP 構造が数百 V 耐圧を実現する構造として有効であることが示された。オン特性から単位面積当たりのオン抵抗を



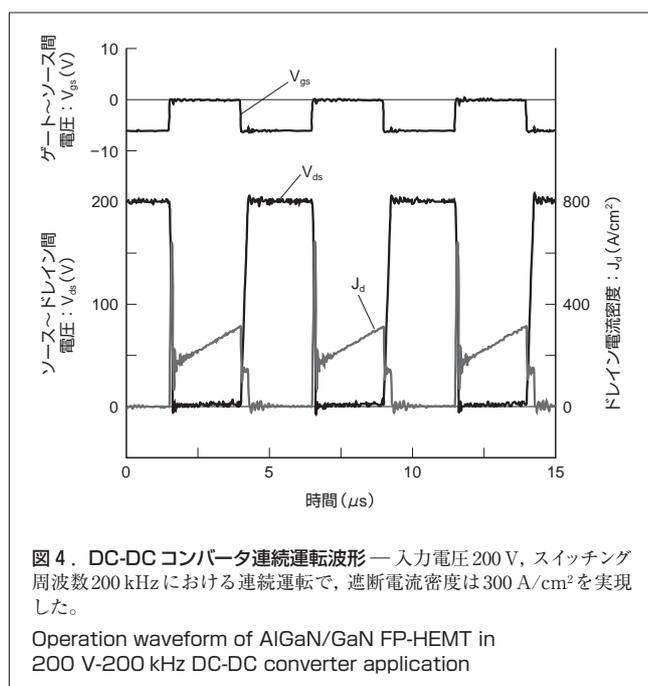
見積もると、オン抵抗 ( $R_{onA}$ ) は  $3.3 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  が得られた。このオン抵抗は、同じ耐圧の Si-MOSFET と比べて  $1/20$  に相当する。二次元シミュレーションを用いて低オン抵抗化への検討を行った結果、デバイスの各部の寸法を最適設計することで、更にオン抵抗を低減することが可能であり<sup>(8)</sup>、特にコンタクト抵抗率を現状の  $50 \mu\Omega\text{cm}^2$  から  $10 \mu\Omega\text{cm}^2$  まで低減すると、試作結果の  $1/7$  にあたる  $0.5 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  まで低オン抵抗化が可能となることが示された。

### 3 高電圧 DC-DC コンバータの連続運転

GaN デバイスをパワーエレクトロニクス機器に応用した場合を想定して、高電圧を印加した状態でのスイッチング特性を評価した。試作した 600 V 耐圧 AlGaIn/GaN FP-HEMT の抵抗負荷でのターンオフ波形を図3に示す。300 V 印加した状態で、ドレイン電流密度  $850 \text{ A/cm}^2$  の電流遮断特性を確認できた。

この遮断電流密度  $850 \text{ A/cm}^2$  は、Si-MOSFET における電流密度の10倍に相当する。FP構造を用いることでデバイスは破壊に至らず、高電圧を印加した状態でスイッチング動作が可能であることが示された。ターンオン時間は  $126 \text{ ns}$ 、ターンオフ時間は  $274 \text{ ns}$  であり、これらのスイッチング時間は寄生容量の充放電時間により決まるが、主な寄生容量はドレイン電極パッドと SiC 基板間の容量である。寄生容量の大きさはデバイスの出力容量の90倍であり、寄生容量を取り除くことで、ターンオン時間は  $1.5 \text{ ns}$  に、ターンオフ時間は  $3.2 \text{ ns}$  にまで短縮できると見積もられる。

良好なスイッチング特性を確認できたので、試作したデバイスを用いて高電圧 DC-DC コンバータの運転試験を行った。



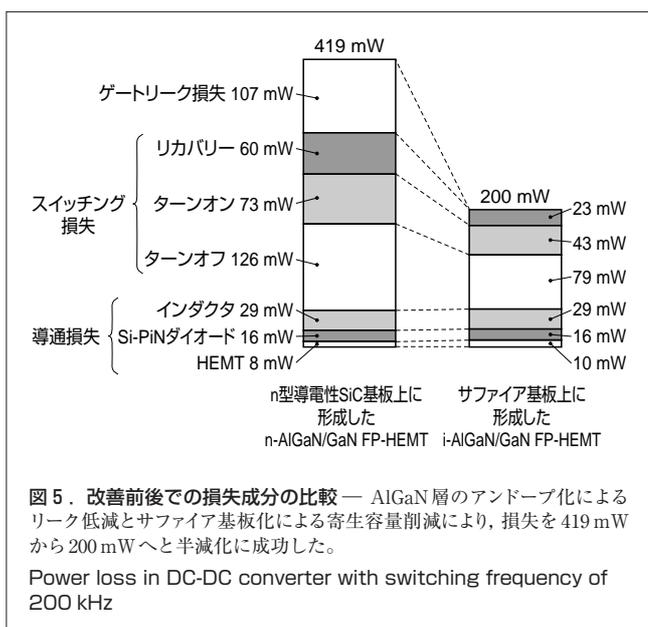
試験したダウンチョップ回路は、試作した 600 V 耐圧 AlGaIn/GaN FP-HEMT と Si-PiN ダイオード、チョークコイル、抵抗負荷で構成され、ゲート入力信号のデューティ比により出力電圧を制御する回路である。今回の試験では、デューティ比は  $0.5$  一定で行った。入力電圧  $200 \text{ V}$ 、スイッチング周波数  $200 \text{ kHz}$  における連続運転波形を図4に示す。ピーク電流密度は  $300 \text{ A/cm}^2$  であった。スイッチング周波数を変化させて、 $500 \text{ kHz}$  まで動作させた。損失はスイッチング周波数に伴い増加し、 $200 \text{ kHz}$  で  $83\%$  であった電力変換効率は、 $500 \text{ kHz}$  では  $75\%$  まで低下した。

## 4 低損失高効率化への改善

前章で示したように、高電圧・大電流密度での連続スイッチング動作を確認できたn型導電性SiC基板上のAlGaIn/GaN FP-HEMTであるが、評価の結果から、回路内の損失成分は、導通損失に比べてスイッチング損失とゲートリーク損失の割合が非常に大きく、損失全体の大部分を占めている。この二つの損失を低減することで電力変換効率を大幅に改善できる。

具体的には、サファイア基板のような絶縁性基板を用いてデバイスと基板間の寄生容量を削減することでスイッチング時間が短縮され、低スイッチング損失化が実現可能である。絶縁性基板を用いることで、n型導電性SiC基板では得られた基板からのFP効果はなくなり、耐圧の低下が懸念されるが、デバイス破壊の原因となるゲート電極端での電界集中を緩和させる目的でAlGaIn層をアンドープ化することで、大幅な耐圧低下を防ぐ。加えて、このアンドープ化によって、低ゲートリーク電流化が可能になり、リークによる損失の低減も図られる。

実際にサファイア基板化とAlGaIn層のアンドープ化を施したFP-HEMTを試作し、高電圧DC-DCコンバータ連続運転試験を行った。SiC基板に比べて低コストで大口径化が容易なサファイア基板を用いても、アンドープAlGaIn化によって470 Vという高耐圧が得られ、リーク電流も1/200に低減された。また、アンドープAlGaIn化によってオン抵抗は $3.9\text{ m}\Omega\text{cm}^2$ と劣化した。約20%の増加にとどまっている。加えて、サファイア基板化によってデバイス容量は34 pFから19 pFへ低減された結果、図5に示すように、n型導電性SiC基板上のデバイスに対して損失がほぼ半減され、200 kHzにおける電力変換効率は90.7%まで改善している。



今回述べたデバイス特性はオンウェーハ評価の結果であり、パッケージに組み立てて測定系の寄生成分を取り除くことで更に低損失動作が期待でき、より最適化を図ることで、3 MHz以上で95%を越える電力変換効率を実現できると見積もられる。

## 5 あとがき

以上に述べたように、GaNパワーデバイスは、Siパワーデバイスでは到達が困難な低オン抵抗と電流遮断特性が得られ、次世代パワーデバイスの一つの候補として、非常に期待される。

一方で、GaNパワーデバイス実現に向けての課題は存在する。ここに示したデバイスはノーマリーオン型であるが、パワーエレクトロニクスの分野ではノーマリーオフ型が望まれている。また、安全動作領域の拡大、高電圧印可時の結晶品質の信頼性など、解決しなければならない技術課題は残されている。今後は、優れた物性を持つGaN本来の性能を更に引き出し、将来のパワーエレクトロニクスの期待に応えられるデバイスの開発を進めていく。

## 文献

- (1) Kobayashi, T., et al. High-voltage power MOSFETs reached almost silicon limit. Proceedings of ISPSD 01, 2001, p.435 - 438.
- (2) G. Deboy, G., et al. A new generation of high voltage MOSFETs breaks the limit line of silicon. Proceedings of IEDM 98, 1998, p.683 - 685.
- (3) Cooper Jr, J. A. and Agarwal, A. SiC power-switching devices - the second electronics revolution. Proc. IEEE, 90, 6, 2002, p.956 - 968.
- (4) Zhang, N. -Q., et al. High breakdown GaN HEMT with overlapping gate structure. IEEE Electron Device Lett., 21, 2000, p.421 - 423.
- (5) Zhang, N. -Q., et al. Effects of surface traps on breakdown voltage and switching speed of GaN power switching HEMTs. Proceedings of IEDM 01, 2001, p.589 - 592.
- (6) Yoshida, S., et al. A high-power AlGaIn/GaN heterojunction field-effect transistor. Solid-State Electronics, 47, 2003, p.589 - 592.
- (7) Ando, Y., et al. 10-W/mm AlGaIn/GaN HFET with a field modulating plate. IEEE Electron Device Lett., 24, 5, 2003, p.289 - 291.
- (8) Saito, W., et al. Design of GaN power-device with field plate structure. Technical report of IEICE, ED2003, 2003, p159 - 604.



高田 賢治 TAKADA Yoshiharu

研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー。  
GaN電子デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会会員。  
Advanced Electron Devices Lab.



津田 邦男 TSUDA Kunio

研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー主任研究員。  
GaN電子デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会、  
電子情報通信学会会員。  
Advanced Electron Devices Lab.