

# AlGaN/GaN パワー FET

## AlGaN/GaN Power FET

吉田 清輝\*

Seikoh Yoshida

概要 GaN系半導体はSiC, ダイヤモンドと同様ワイドバンドギャップ半導体材料でバンドギャップが大きいだけでなく融点が高く絶縁破壊電界も従来のSiやGaAsよりも大きいため, 高耐圧, 高周波, 高温動作のパワーデバイス用材料として期待されている。GaNの開発は青色LED, レーザ等が先行したが電子デバイス開発が米国を中心に活発化してきた。国内でも当社が高温動作FETを開発して以来, 電気メーカを中心に高周波デバイス開発が始まった。当社は, 特にGaNが電界効果トランジスタ(FET)として高耐圧で大電流動作が可能であるということに注目し, パワーデバイスとしてのFET開発を行った。その結果, 20 A動作できるGaN FETを世界で初めて試作することができた。FETのオン抵抗の最小値としては $2 \text{ m}\cdot\text{cm}^2$  (100 V耐圧)とGaNでは最も小さく, 同一耐圧のSiと比較してオン抵抗が1/4と非常に小さいものが実現できた。

### 1. はじめに

21世紀に入り, 二酸化炭素の削減など環境対策を考えたエネルギー開発の必要性がますます高まってきた。すなわち効率の良い電力生産及び省エネルギー対策が必要になってくる。電力変換デバイスにはSi系のスイッチングデバイスが使われ, パワーデバイスの損失を減らすため, Siデバイスの集積度も十分に上がりSiのMOSFET等の動作時のオン抵抗は物性上の限界値に近づいてきた。これに対しワイドバンドギャップ半導体であるSiC, GaN, AlN等のIII-V族窒化物半導体, ダイヤモンド等はバンドギャップが大きいだけでなく原子間の結合距離が小さく結合エネルギーが大きく(耐放射線性に強い)更に融点が高く熱的・化学的に安定でハードエレクトロニクス材料として注目されている<sup>1)</sup>。ハードエレクトロニクス材料に適しているか否かを示す物性値として, バンドギャップのほかに, 絶縁破壊電界, 飽和ドリフト速度, 熱伝導度, 移動度, 誘電率等の物性値が挙げられる。これらの物性値を組み合わせた高出力, 高速, 高周波, 低損失等のデバイスの性能指数 (figure of merit) が幾つか提案され<sup>2)-6)</sup>, GaNはSi, GaAsに比べていずれも大きな性能指数をもつことが報告されている<sup>7)</sup>。

特に今回注目すべき点は, 動作時のオン抵抗が理想的にはSiよりも1桁以上小さくでき, パワー損失が少なく発熱の少ないスイッチングデバイス及びインバータ等の冷却フリーの電力用パワーデバイスとして, Siでは実現しにくい性能を有するデバイスへの応用が期待されていることである。

高温動作デバイスの用途は, 高温用センサー, 飛行機, 宇宙用ロケットエンジンの制御部, 原子力, 地下探索用測定器材等がある。高温動作の特徴は, 従来のデバイスが安定な動作を維持するために動作時の発熱を抑える大がかりな冷却装置を必要としたのに対し, 冷却設備を最小化又は冷却フリーで動作できるという大きな利点を持っている。GaNの電子デバイスの開発は最近になって米国を中心に高周波動作や高温動作等の報告がようやく活発に行われるようになった。

GaNの高温動作デバイスの報告例としてはMESFET (metal semiconductor field-effect transistor<sup>8)-10)</sup>, HFET (hetero-field effect transistor)<sup>1)</sup>, MODFET (modulation-doped field effect transistor)<sup>12)</sup>等があげられる。また, 最近米国を中心に日本でも高周波デバイス応用を目的としてAlGaIn/GaNのヘテロ構造を用い, 2次元電子ガスを利用したHEMT (high electron mobility transistor)やHFET等が作られ, 最大動作周波数も130 GHzを超えることが報告されている。米国ではGaN系高周波デバイスの製造販売を目的として幾つかのベンチャー会社が設立されている。更に軍用途として米国のAir forceやNaval Researchが研究を盛んに行っていて, また, 民間企業, 大学への研究助成を行っている。更に, GaNは低損失のデバイス作成が期待されることから, インバータ, コンバータ等への電力変換機器への搭載を目的としたパワーデバイスの研究も行われるようになってきた。我々は, GaNの低損失の電力変換デバイス, スwitchングデバイス, 高周波デバイス等への応用を目的としAlGaIn/GaNのヘテロ構造を利用したパワーデバイスを作成し, FETのオン抵抗が耐圧100 Vで $2 \text{ m}\cdot\text{cm}^2$ とSIMOSFETの1/3の値を実現した。FETは最大20 Aまで動作できることを確認し, ショットキーダイオードの耐圧は最大600 Vとなることを確認したので報告する。

\* 横浜研究所 基盤技術センター

## 2. 大電流動作MESFETの試作

まず、我々は構造的に Simple な MESFET により大電流動作 FET の試作を行った<sup>13)-19)</sup>。このときの FET 構造を図 1 に示す。GaN バッファ層の上にアンドープ GaN を 2000 nm 形成しその上に活性層の Si ドープ GaN を 200 nm 成長した。キャリア濃度は  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  で移動度  $200 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$  のものを用いた。更に最上層にコンタクト層になる Si ドープ GaN (Si:  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) を成長した。FET 作成プロセスを簡単に説明するとまず、GaN エピタキシャル膜上に絶縁膜として  $\text{SiO}_2$  膜を 200 nm 成膜した。その後フォトリソ等であらかじめパターニングした後、 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$  の混合ガスを用いる ECR (electron cyclotron resonance) plasma エッチングにより GaN をエッチングした。このときのエッチングレートは  $14 \text{ nm}/\text{min}$  である。エッチング後の GaN 表面は SEM (scanning electron microscope) 観察からスムーズな面であることがわかった。つぎにソースドレインのオーミック電極材料として Al/Ti 系材料を蒸着した後、ショットキーゲート電極として Pt 系材料を蒸着し FET を作成した。単位ユニット当たりゲート長は  $2 \mu\text{m}$  でゲート幅は  $500 \mu\text{m}$  である。この FET を多層配線電極を用いて連結しゲート長を変えずにゲート幅を 20 cm (40 倍) まで拡大した。図 2 に大電流動作 FET の光学写真を示す。まずソースドレイン電極の電流電圧測定を熱処理なしの条件で行うと良好なオーミックコンタクトになっていることが確認された。図 3 に

コンタクト層のキャリア濃度と接触抵抗の関係を示す。コンタクト抵抗はキャリア濃度  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  で  $1 \times 10^{-6} \text{ } \cdot \text{cm}^2$  と低い値が得られた。ゲートソース間のショットキー特性を調べるとやはり熱処理なしの条件で整流特性が得られた。図 4 に FET のゲートソース間のショットキーダイオード特性を示す。逆方向耐圧は 500 V を超え、耐圧は最大 600 V を越え十分大きい値を示した。容量-電圧 (C-V) 測定では、Pt ゲートのバリアの高さは約 1.0 eV であることが分かった。室温での FET の電流・電圧の安定した特性が得られた。単位ユニット FET のオン抵抗は 100 V 当たり  $60 \text{ m} \cdot \text{cm}^2$  であった。

つぎに多層配線し、ゲート長を 20 cm とした場合の I-V を図 5 に示す。FET は 5 A 以上で操作し最大 10 A まで動作した。これは従来報告された GaNMESFET では最大の動作電流であった。MESFET のオン抵抗は MESFET の活性層のキャリア濃度を  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  程度までしか上げられないため (ショットキー接合がくずれてしまうため)、これ以上の低オン抵抗化が期待できないので、更に活性層の高キャリア濃度化 (シートキャリア濃度  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  以上) や更なる低オン抵抗が期待できる 2 次元電子ガス層を利用した AlGaIn/GaN のヘテロ構造の FET の試作を検討した。

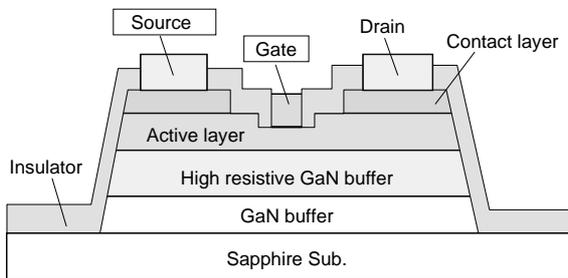


図 1 単位ユニットの GaNMESFET の概略構造  
Structure of a unit GaNMESFET

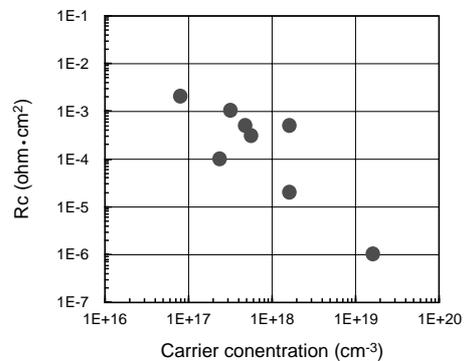


図 3 FET のコンタクト層のキャリア濃度と接触抵抗の関係  
Contact resistance versus carrier concentration of contact layer of FET

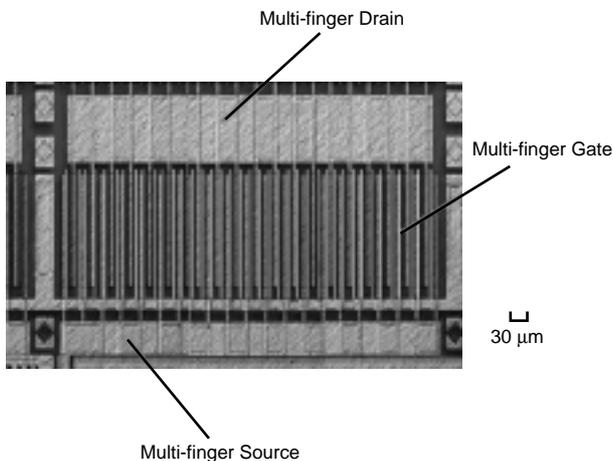


図 2 大電流動作 GaNMESFET の光学写真  
Nomarski photograph of GaNMESFET for a large current operation

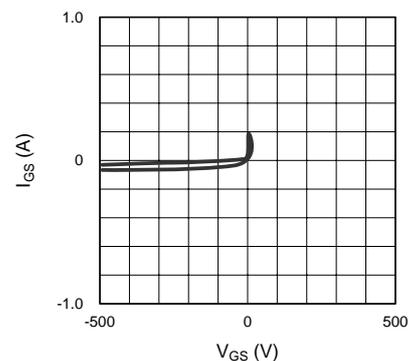


図 4 FET のゲートソース間のショットキーダイオード特性  
Schottky property of gate and source

### 3. AlGaN/GaNパワーHFET

AlGaN/GaNヘテロ構造は、サファイア基板を用い、ガスソースMBE (molecular beam epitaxy) やMOCVD (metal-organic chemical vapor deposition) 法等により作成した。MOCVD法の場合、サファイア基板上に550℃で50 nmの単結晶ライクGaNパツファを形成し、その後1050℃で2 μmのアンダー高抵抗GaNを形成し、更にその上にアンダーの30 nmのAl<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N層を形成した。アンダーGaN層のシート抵抗は100 mΩ/cm<sup>2</sup>を超えた。最後にコンタクト層となるSiドープ(5 × 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>)のGaN層を20 nm成長した。このAlGaN/GaNのヘテロエピタキシャル膜を用いてヘテロ接合FET (HFET) を作成した<sup>20), 21)</sup>。FET作成前にエピ表面のシート抵抗を測定すると、2インチ面内で平均600 Ω/cm<sup>2</sup>と低い値を示した。また、Hall測定より移動度を求めると室温で移動度は1200 cm<sup>2</sup>/V·sであった。また、シートキャリア濃度は1 × 10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup>と高い値を示した。このようなエピを用いてHFETの作成を行った。FET作成はMESFETと同じようにドライエッチングにより加工を行った。FETの素子構造もMESFETと同様、図6に示すような単位ユニットのFETを形成した後、多層配線電極により連結してゲート幅20 cmまで拡大する構造である。多層配線電極は当社独自のプロセス開発で実現した。FETのゲート長はコンタクトアライナーを使用しているため2 μmが限界でこれ以上の細線は難しい。単位ユニットのゲート幅は500 μmで多層配線で20 cmとしている。この構造の概略を図7に示す。

FETのゲートソース間のショットキー特性を図8に示す。ショットキーダイオードの逆耐圧は測定上は400 Vまでである

が、絶縁破壊するまで電圧を印加すると600 Vとなり、MESFET同様高耐圧が得られた。単位ユニットのFETのI-V特性を図9に示す。チップ面積当たりのオン抵抗を見積もると耐圧100 Vで2 mΩ·cm<sup>2</sup>とGaN系では最も小さい値が得られた。この値はSiに比べても1/4以下の小さい値であり、GaN系FETのオン抵抗がSiデバイスよりも小さくなるのが初めて実証された。更に、ゲート幅20 cmの大面积のAlGaN/GaNHFETのI-V特性を図10に示す。HFETは冷却装置なしで10 A以上で動作し、最大20 Aまで動作できることがわかった。このようにAlGaN/GaNHFETは低オン抵抗動作可能で10 A以上の大電流動作できることが世界で初めて確認された。このような低オン抵抗動作のGaNFETは高効率のインバータ、コンバータあるいはスイッチング素子等、電力変換装置への応用として極めて有望である。

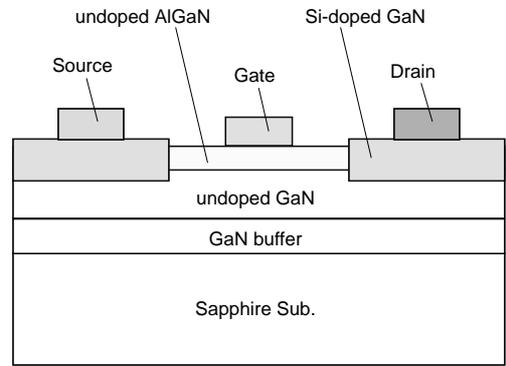


図6 単位ユニットのAlGaN/GaNHFETの概略構造  
Schematic structure of a unit AlGaN/GaNHFET

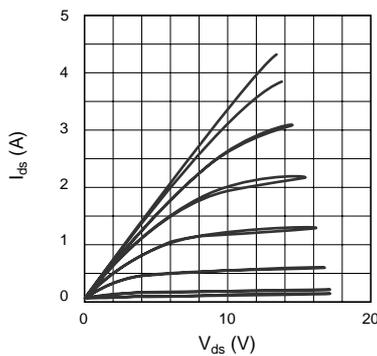


図5 大電流動作 GaNMESFETの電流電圧特性  
Current-voltage property of GaNMESFET for a large current operation

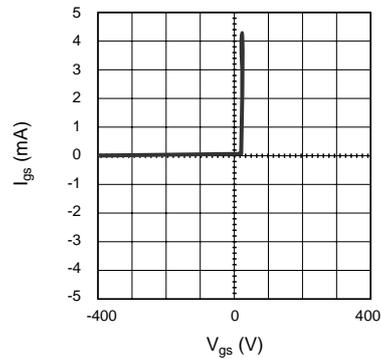


図8 AlGaN/GaNHFETのゲートソース間のショットキーダイオード特性  
Schottky property of a gate and source of AlGaN/GaNHFET

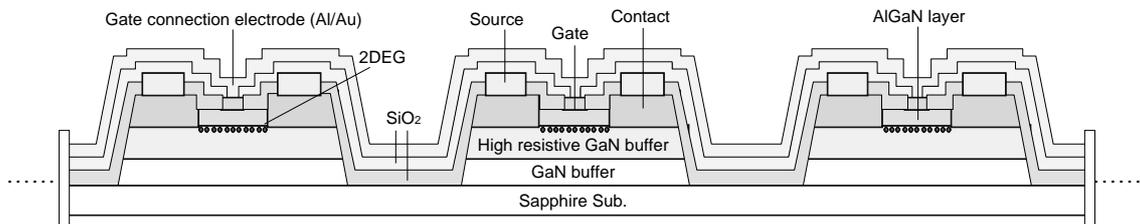


図7 大電流動作 AlGaN/GaNHFETの概略構造  
Schematic structure of AlGaN/GaNHFET for a large current operation

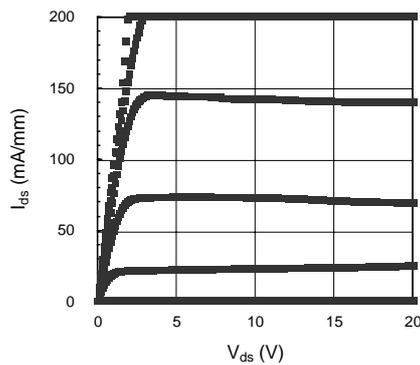


図9 単位ユニットのAlGaN/GaNHFETの電流電圧特性  
Current-voltage property of a unit AlGaN/GaNHFET

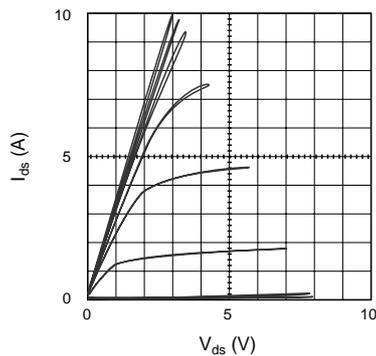


図10 大電流動作AlGaN/GaNHFETの電流電圧特性  
Current-voltage property of AlGaN/GaNHFET for a large current operation

#### 4. おわりに

AlGaN/GaNのヘテロ構造を作成し、FETの動作時のオン抵抗が小さく大電流動作可能なパワーFETを作成した。このFETの特徴は $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ ヘテロ構造により2次元電子ガス層をヘテロ界面に発生させFETの活性層になる部分に高キャリア濃度を得ることである。実際にこのヘテロ接合でシートキャリア濃度が $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ で電子移動度が $1200 \sim 1500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  (室温)のものを得ることが出来た。このエピを用いFETを作成した。FETのゲート長は $2 \mu\text{m}$ 、ゲート幅は $20 \text{ cm}$ である。このFETの特徴はゲート長 $2 \mu\text{m}$ 、ゲート幅 $500 \mu\text{m}$ の単位ユニットFETを多層配線で $20 \text{ cm}$ まで拡張した点である。ソースドレイン間隔は $8 \mu\text{m}$ である。このFETのショットキー耐圧を測定すると $600 \text{ V}$ を超えた。このFETの単位ユニットの動作時のオン抵抗は $2 \text{ m} \cdot \text{cm}^2$  (@ $100 \text{ V}$ )でSiMOSFETよりも $1/3$ 以下の値でGaNでは最も低い値を実現した。更にこのFETは $20 \text{ A}$ まで動作可能であることを確認した。今後このFETは電力変換装置等へ応用が期待できる。

#### 参考文献

- 1) 吉田清輝: 応用物理学会誌 68, 787(1999).
- 2) E. O. Johnson: RCA Rev. 26, 163(1965).
- 3) R. W. Keys: Proc. IEEE, 60, 225,(1972).
- 4) B. J. Baliga: IEEE Electron Device Lett. 10, 455,(1989).
- 5) B. J. Baliga: J. Appl. Phys., 53, 1759,(1982).

- 6) K. Shenai, R. S. Scott, and B. J. Baliga: IEEE Trans. Electron Devices, 36, 1811,(1989).
- 7) T. P. Chow and R. Tyagi: IEEE Trans. Electron Devices, 41, 1481,(1994).
- 8) S. C. Binari, K. Doverspike, G. Kelner, H. B. Dietrich, and A. E. Wickenden: Solid State Electron. 41, 97(1997).
- 9) S. Yoshida and J. Suzuki: Jpn. J. Appl. Phys. Lett. 37, L482(1998).
- 10) S. Yoshida and J. Suzuki: J. Appl. Phys. 84, 2940(1998).
- 11) M. A. Khan, M. S. Shur, J. N. Kuzunia, Q. Chin, J. Burm, and W. Schaff, Appl. Phys. Lett. 66, 1083(1995).
- 12) A. Ozgur, W. Kim, Z. Fan, A. Botchkarev, A. Salvador, S. N. Mohammad, B. Sverdlov, H. Morkoc: Electron. Lett. 31, 1389(1995).
- 13) S. Yoshida, M. Sasaki, and H. Kawanishi: J. Cryst. Growth 136, 37(1994).
- 14) S. Yoshida and M. Sasaki, Appl. Surf. Sci. 82/83, 28(1995).
- 15) S. Yoshida: J. Appl. Phys. 81, 7966(1997).
- 16) S. Yoshida: J. Cryst. Growth, 181, 293(1997).
- 17) S. Yoshida: J. Cryst. Growth, 191, 279(1997).
- 18) S. Yoshida and J. Suzuki, J. Appl. Phys. 85, 7931(1999).
- 19) S. Yoshida and H. Ishii, Proc. Mat. Res. Soc.,(2001)G13.4.
- 20) S. Yoshida and H. Ishii, to be published in Physica status Solidi (B) (2001).
- 21) S. Yoshida and H. Ishii, to be published in Proc. ICSCRM (2001).