

橋詰 保

北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター・教授

研究課題「異種接合 GaN 横型トランジスタのインバータ展開

## § 1. 研究実施体制

### (1)「北大」グループ

① 研究代表者: 橋詰 保 (北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター、教授)

#### ② 研究項目

- ・ドライエッチ面を含む  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{n-GaN}$  構造の界面準位評価、
- ・AlGaIn/GaN ヘテロ構造に形成した酸化ゲートのポテンシャル制御評価
- ・多重台形チャネル AlGaIn/GaN HEMT の動作特性の理解と電流安定性評価

### (2)「豊田中研」グループ

① 主たる共同研究者: 加地 徹 ((株)豊田中央研究所パワーエレクトロニクス研究部、主監)

#### ② 研究項目

- ・パルスドープ法による p-AlGaIn/i-AlGaIn/GaN 構造の結晶成長と評価
- ・アンペア級動作 AlGaIn/GaN HEMT の作製とパッケージ実装

### (2)「山口大」グループ

① 主たる共同研究者: 田中 俊彦 (山口大学理工学研究科、教授)

#### ② 研究項目

- ・GaN インバータ用のゲート制御回路設計・製作
- ・AlGaIn/GaN HEMT のインバータ実装と動作試験

・

## § 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

異種接合を利用した窒化ガリウム(GaN)横型トランジスタの高性能化・高信頼化を実現し、省エネルギーの核となる「GaN インバータ」の基盤技術を確立することにより、シリコンの材料限界を打破する次世代インバータへの展開をはかることを本研究の目標とする。平成 23 年度は、(1)ドライエッチ面を含む  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{n-GaN}$  構造の界面準位評価、(2)  $\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  ヘテロ構造に形成した酸化ゲートのポテンシャル制御評価、(3)多重台形チャンネル  $\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  HEMT の動作特性の理解と電流安定性評価、(4)アンペア級動作  $\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  HEMT の作製とパッケージ実装、(5) GaN インバータ用のゲート制御回路設計・製作とインバータ実装・動作試験に関する研究を実行した。

### 1)ドライエッチ面を含む $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{n-GaN}$ 構造の界面準位評価

誘導結合プラズマ(ICP)によりドライエッチングした n-GaN 表面に原子層堆積法で  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜を形成し、容量-電圧(C-V)法、透過電子顕微鏡観察および光電子分光法により  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$  界面の特性を評価した。ドライエッチングにより GaN 表面で窒素空乏が生じ、また、原子層オーダーの段差ラフネスが導入されることが明らかになった[6]。図1にC-V 結果より算出した界面準位密度分布を示す。ドライエッチ面を含む MOS 構造では、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$  界面に窒素空孔に関連した離散準位の発生と連続準位の密度増加が確認された。400°C程度の熱処理が、界面準位密度の低減に効果的であり、ドライエッチ面を含む MOS 構造においてもポテンシャル制御が可能であることが示された[6]。

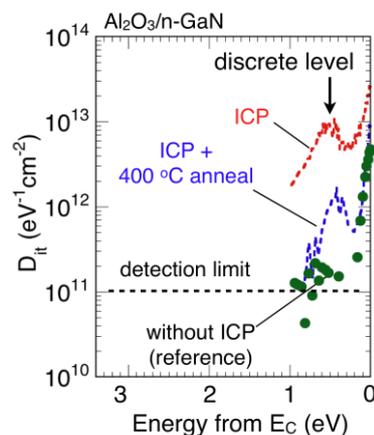


図1  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{n-GaN}$  構造の界面準位密度分布

### 2) $\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ ヘテロ構造に形成した酸化ゲートのポテンシャル制御評価

$\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  構造の  $\text{AlGaIn}$  表面に ALD 法により  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ゲートを作製し、そのポテンシャル制御をC-V法により理解した。図2にC-V測定結果を示す。2つのステップを含む特徴的なふるまいが観測された。順バイアスでは半導体領域のポテンシャルはほぼフラット状態にあり、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$  界面に電子蓄積が生じるため、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜で決定される絶縁膜容量が観測される。ゼロバイアス近傍では、 $\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  界面に2次元電子層が形成されるため、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜と  $\text{AlGaIn}$  層で決まる容量が見られ、2次元電子が存在するまでほぼフラットな容量を示す。負バイアス領域で表面ポテンシャルが

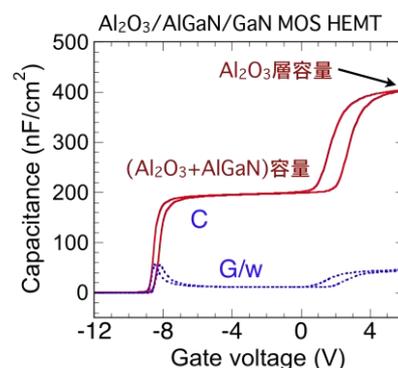


図2  $\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  構造に作製した  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ゲートの容量-電圧特性

引き上げられ、2次元電子が空乏する時、容量はほぼ0になる。このように、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  ゲートは AlGaIn/GaN ヘテロ構造のポテンシャルを制御可能であることが示されたが、計算値との比較や光支援 C-V 法により、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$  界面に、 $10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$  以上の電子捕獲準位が存在することが明らかになり、準位密度の低減が、MOS ゲート HEMT の安定動作に不可欠である [7]。

### 3) 多重台形チャネル AlGaIn/GaN HEMT の動作特性の理解と電流安定性評価

多重台形チャネル(MMC)素子と通常のプレーナ素子において、ドレインバイスを加えたままオフ状態を維持した「オフストレス」が、オン状態にスイッチした場合のドレイン電流に与える影響を調べた。結果を図3に示す。なお、両方の素子とも表面パシベーションは行っていない。プレーナ素子では、ストレス印加時のドレイン電圧が 30V 以上になると、オン抵抗が初期値の数倍になる顕著な電流コラプスが発生する。一方 MMC 素子では、ストレス印加時のドレイン電圧が 50V の場合でも、オン抵抗の増加は 1.5 倍にとどまっている。本研究で使用した HEMT のゲート電極幅は  $100 \mu\text{m}$  であり、この場合、オフストレス中でのドレインアクセス領域の抵抗増加は数  $100 \Omega$  と見積もられた。プレーナ素子のチャネル抵抗は数  $10 \Omega$  であるため、アクセス抵抗増加はオン抵抗増加に直結する。一方、MMC 素子のチャネル幅は  $100\text{nm}$  以下であり、チャネル抵抗は数  $\text{k}\Omega$  となる。この高インピーダンスにより、MMC では相対的にアクセス抵抗の影響が少なく、コラプス耐性に優れていると考えられる[5]。表面パシベーションとの組み合わせにより、優れた電流安定性を達成することができる。

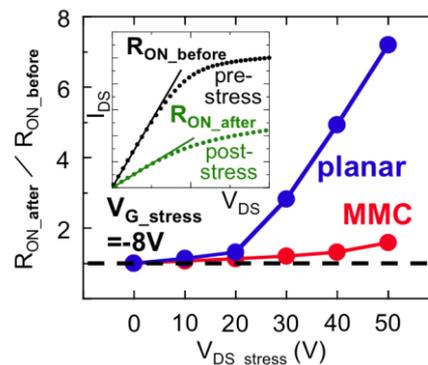


図3 AlGaIn/GaN HEMT におけるオフストレス印加後のオン抵抗の増加率

### 4) アンペア級動作 AlGaIn/GaN HEMT の作製とパッケージ実装

Si 基板上に成長した AlGaIn/GaN ヘテロ構造を用い、楕形電極の採用により、ノーマリオンではあるが、アンペア級のドレイン電流が流れる HEMT を作製した。ゲート電圧 0V、ドレイン電圧 5V の条件で、ドレイン電流 3A 以上を達成した。また、放熱板が接続可能なパッケージングを行い、インバータ回路への実装を行った。

### 5) GaN インバータ用のゲート駆動回路設計・製作とインバータ実装・動作試験

GaN HEMT インバータ用のゲート駆動回路を、市販の MOSFET 用駆動 IC をベースとして作製した。駆動 IC の出力に容量、ダイオードを接続して負荷容量の充放電を制御することにより、ノーマリオン GaN HEMT のスイッチングを可能とした。その後、太陽電池用のパワーコンディショナーを設定し、DC/AC インバータ回路の設計・製作と動作試験を行った。図4に回路図を示す。入力には DC25V とした。前段は昇圧チョッパ回路であり、スイッチング周波数を 500kHz で1個の GaN HEMT を駆動し、DC50V に昇圧した。後段はフルブリッジ型インバータであり、4 個の GaN HEMT を制御

し、出力負荷  $310\ \Omega$  には遮断周波数  $5\text{kHz}$  のローパスフィルターを接続している。インバータ出力を図5に示す。周波数  $60\text{Hz}$  の正弦波出力が得られ、高いスイッチング周波数を用いることで歪みの少ない交流出力を実現した[8]。今後は、より高振幅での動作実験を行い、損失評価・遅延評価を基盤として、最適設計を実施する。

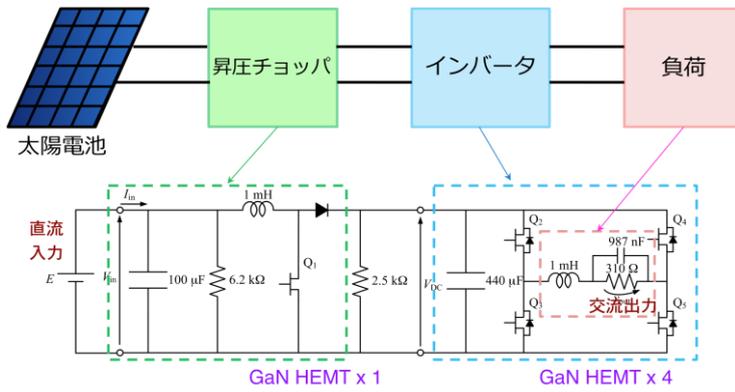


図4 AlGaIn/GaN HEMT によるDC/AC インバータ回路

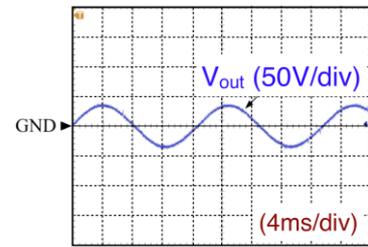


図5 インバータ出力波形

### § 3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### ●論文詳細情報

1. M. Tajima and T. Hashizume, “Impact of gate and passivation structures on current collapse of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs under off-state-bias stress”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 061001 (2011). (DOI: 10.1143/JJAP.50.061001)
2. M. Akazawa, B. Gao, T. Hashizume, M. Hiroki, S. Yamahata and N. Shigekawa, “Al<sub>0.44</sub>Ga<sub>0.56</sub>N spacer layer to prevent electron accumulation inside barriers in lattice-matched InAlN/AlGa<sub>N</sub>/AlN/Ga<sub>N</sub> heterostructures”, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 080201 (2011). (DOI: 10.1063/1.3578449)
3. P. Bidzinski, M. Miczek, B. Adamowicz, C. Mizue and T. Hashizume, “Impact of Interface States and Bulk Carrier Lifetime on Photocapacitance of Metal/Insulator/Ga<sub>N</sub> Structure for Ultraviolet Light Detection”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 04DF08 (2011). (DOI: 10.1143/JJAP.50.04DF08)
4. M. Miczek, P. Bidzinski, B. Adamowicz, C. Mizue and T. Hashizume, “The influence of interface states and bulk carrier lifetime on the minority carrier behavior in an illuminated metal/insulator/Ga<sub>N</sub> structure”, *Solid State Commun.* **151**, pp.830-833 (2011). (DOI: 10.1016/j.ssc.2011.03.021)
5. K. Ohi and T. Hashizume, “Reduction of current collapse in the multi-mesa-channel AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT”, *Phys. Status Solidi (C)* **9**, pp898-902 (2012). (DOI: 10.1002/pssc.201100301)
6. S. Kim, Y. Hori, W.-C. Ma, D. Kikuta, T. Narita, H. Iguchi, T. Uesugi, T. Kachi and T. Hashizume, “Interface properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-Ga<sub>N</sub> structures with inductively coupled plasma etching of Ga<sub>N</sub> surfaces”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** (in press).
7. Y. Hori, C. Mizue and T. Hashizume, “Interface state characterization of ALD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ga<sub>N</sub> and ALD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> structures”, *Phys. Status Solidi (C)* **9** (in press).
8. M. Okamoto, G. Toyoda, E. Hiraki, T. Tanaka, T. Hashizume and T. Kachi, “Loss evaluation of an AC-AC direct converter with a new Ga<sub>N</sub> HEMT SPICE model”, *The IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1795-1800(2012). (DOI: 10.1109/ECCE.2011.6064002)