

「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」  
平成21年度採択研究代表者

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

## 異種接合 GaN 横型トランジスタのインバータ展開

### § 1. 研究実施の概要

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 21 年度は、(1) AlGaIn の電子準位の評価、(2)p-AlGaIn の結晶成長、(3)選択的電気化学酸化プロセス、(4)多重台形チャネル AlGaIn/GaNトランジスタの安定性評価、(5) GaN インバータの性能予測計算に関する研究を実行した。Al 組成 25～60%の AlGaIn 結晶に活性化エネルギーが 1.0eV 以上の電子捕獲準位を初めて検出し、比較的高い密度を有すること、および Al 組成の増加に従いエネルギーが大きくなることを明らかにした。また、100nm 以下の膜厚を持つ p-AlGaIn の有機金属相成長には、Mg のパルスドーピングが有効であることが判明した。さらに、AlGaIn/GaN 異種構造に特有な電気化学反応電流を見出し、「リセス+酸化ゲート構造」を同時に形成するプロセスを開発した。トランジスタ展開に関しては、高インピーダンスチャネル特性と熱放散効果が、多重台形チャネル AlGaIn/GaNトランジスタの安定動作と密接な可能性があることを明らかにした。また、GaN インバータの性能予測を行うシミュレーションプログラムを開発し、AC/AC ダイレクトコンバータへの展開が GaN トランジスタの優位性を発揮する回路設計の1つであることを示した。これらの成果を基盤とし、GaNトランジスタの高性能化・高信頼化と具体的なインバータ回路設計/動作シミュレーションに関してより詳細な検討を行う。

### § 2. 研究実施体制

(1)「北大」グループ

① 研究分担グループ長:橋詰 保 (北海道大学、教授)

## ② 研究項目

- AlGaN の電子準位の評価
- 選択的電気化学酸化プロセス
- 多重台形チャネル AlGaN/GaN トランジスタの安定性評価

## (2)「豊田中研」グループ

① 研究分担グループ長: 加地 徹 (豊田中央研究所、室長)

## ② 研究項目

- p-AlGaN/i-AlGaN の結晶成長

## (3)「山口大」グループ

① 研究分担グループ長: 田中 俊彦 (山口大学、教授)

## ② 研究項目

- GaN インバータの性能予測計算と応用回路の設計

## § 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

### (1) AlGaN 結晶の電子捕獲準位評価

有機金属気相成長により成長した AlGaN (Al 組成: 25-60%、膜厚: 1 $\mu$ m) にショットキー接合を形成し<sup>1)</sup>、過渡容量分光法 (DLTS) および光容量法による深い電子捕獲準位の検出を行った。測定結果の 1 例を図 1 に示す。なお、通常の DLTS 法は測定時間窓を ms オーダーとするが、禁制帯幅が 4eV を超える半導体のため、最大で 100s の時間窓を設定して低温領域で電子準位の検出を可能とした。Al 組成 37% では、図 1 に示すように 500K 付近に密度  $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  の電子準位の存在が明らかになった。そのエネルギー位置は伝導帯下端から 1.3eV となり、AlGaN 結晶で 1.0eV 以上の準位を初めて検出した。Al 組成 25% の結晶では、活性化エネルギー 1.0eV の準位が検出され、Al 組成と主要な電子捕獲準位エネルギーは相関があるように思われる。このような電子準位の成因およびトランジスタの動作安定性との関連を明らかにすることが重要である。

### (2) p-AlGaN/i-AlGaN 構造の結晶成長

GaN、AlGaN の原料としてトリメチルガリウム (TMG)、トリメチルアルミニウム (TMA)、アンモニア

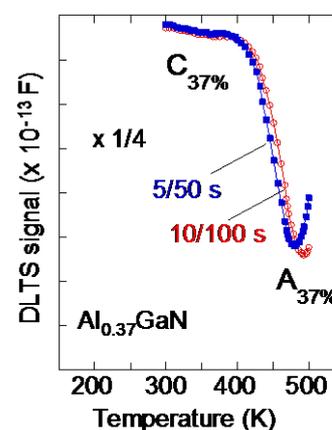


図 1 Al 組成 37% の AlGaN の DLTS 測定結果

(NH<sub>3</sub>)を用い、p 型ドーパント Mg の原料として Cp<sub>2</sub>Mg を用いた。Cp<sub>2</sub>Mg の供給方法として TMG、TMA と一緒に供給する連続ドーピング法、およびパルス的に単独供給するパルスドーピング法を比較した。図2に SIMS 測定より得られた Mg の密度分布を示す。連続ドーピングでは、Mg のドーピング量は供給開始から緩やかな立ち上がりを示すが、パルスドーピングでは、急峻な立ち上がりが観測され、急峻な不純物プロファイルをもつ p-AlGa<sub>0.3</sub>N/AlGa<sub>0.3</sub>N が形成された。

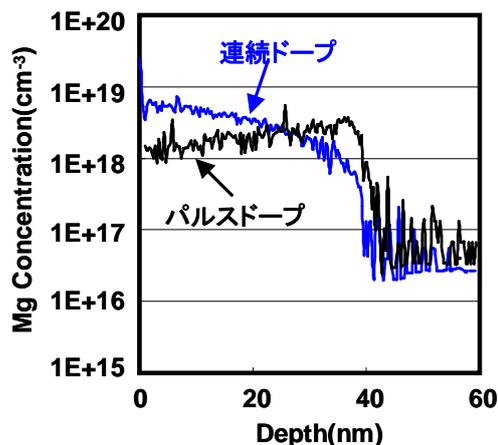


図2 供給方法による Mg 濃度分布の比較

### (3) 電気化学酸化によるリセス酸化ゲート構造の形成

ノーマリオフ特性を持つ AlGa<sub>0.3</sub>N/GaN トランジスタの実現には、リセス絶縁ゲート構造が有力である。通常は、ドライエッチングによりゲート直下の AlGa<sub>0.3</sub>N 層の一部を除去し、その後堆積法により絶縁膜(酸化膜)を形成する。しかし、この手法では、ドライエッチング中での欠陥導入、エッチング深さの精密制御、絶縁膜/AlGa<sub>0.3</sub>N 界面特性に課題を残している。我々は、原子層堆積 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜をマスクに利用し、かつ、AlGa<sub>0.3</sub>N/GaN 構造の電気化学酸化で観測される特有の酸化反応電流を制御することにより、AlGa<sub>0.3</sub>N の一部を選択酸化することに成功し、一度のプロセスで「リセス+酸化ゲート構造」が形成可能であることを実証した。

### (4) 多重台形チャネル AlGa<sub>0.3</sub>N/GaN トランジスタの安定性評価

AlGa<sub>0.3</sub>N/GaN トランジスタでは、オフ状態からオン状態へスイッチさせた場合、準静的に測定される電流値より大幅に低いドレイン電流しか得られない場合が多く(電流コラプス)、この対策が急務となっている。そこで、多重台形チャネル(MMC)素子の構造設計を最適化し、通常の planar ゲート素子と同程度のドレイン電流を実現し、オフ状態ストレス印加後の電流特性を調べた。結果を図3に示すが、planar 素子ではストレス印加後に電流値が20-30%低下するのに対し、多重台形素子では電流低下はほとんど見られない(5%以内)。チャネル部が高インピーダンスであるため、ドレイン-ゲート間のアクセス領域の表面状態変化による電流変動の影響が非常に小さいためと考えられる。また、多重台形素子のチャネル幅は100nm以下で、かつ、トレンチ部によりチャネル間が分離されているため点熱源として作用し、チャネル部の温度上昇が抑制されることを明らかにした。さらに、高い Al

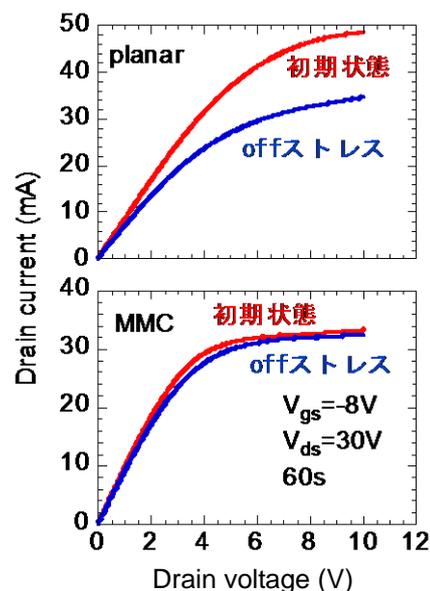


図3 通常トランジスタと多重台形チャネル素子のオフストレス後の電流変化の比較

組成を有する AlGaIn/GaN 界面のバンド不連続量を評価する手法を検討した<sup>2)</sup>。

(5) GaN インバータの性能予測計算と応用回路の設計

GaN 横型トランジスタの特長を活かす回路応用として、高周波化と低損失化による超高密度変換器が達成できる AC/AC ダイレクトコンバータを提案し、その有効性を確認した。図4に、本研究で提案したダイレクトコンバータの主回路構成図を示す。通常の高周波インバータでは、AC/DC および DC/AC の 2 段階により高周波電圧を得るが、DC 部分には 1000 $\mu$ F 以上の大容量電解コンデンサを必要とする。提案する回路では、この電解コンデンサが不要で、かつ、フィルタ用および共振用に用いられるキャパシタは数  $\mu$ F 程度であり、大幅に高密度化が可能である。GaN 横型トランジスタでは、原理的に導通損を Si 系デバイスに対して大幅に低減できる。しかしながら、高周波スイッチングではスイッチング損が増大する。そこで、本回路では、 $C_{3u}$  または  $C_{4u}$  と負荷側のインダクタでゼロ電流スイッチ ON、 $C_{2u}$  でゼロ電圧スイッチ OFF を実現し、スイッチング損失が発生しないソフトスイッチングを実現している。H21 年度の検討結果から、商用電源側で高調波抑制指針を満足しながら、0.64kW から 6.7kW の範囲でソフトスイッチングが実現できることを計算機シミュレーションにより明らかにした。

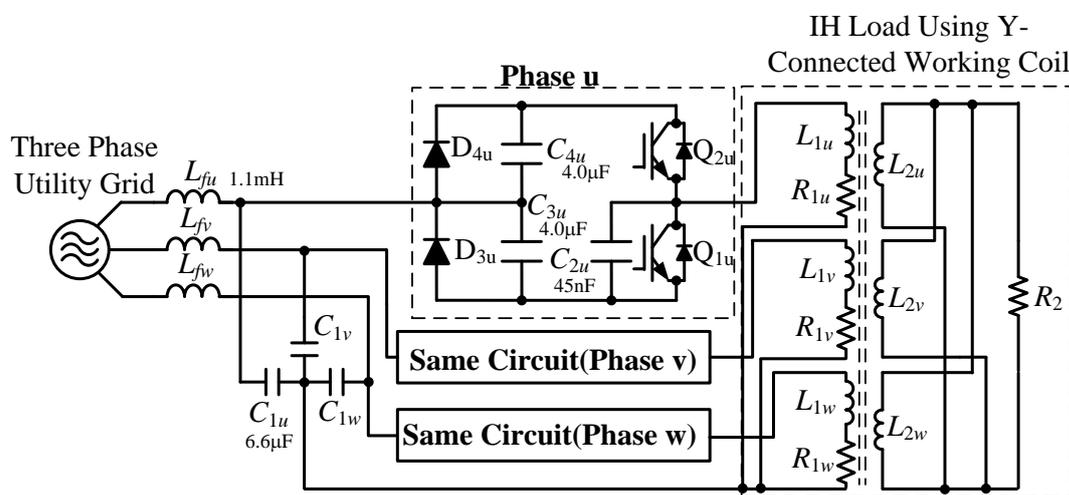


図 4 提案した AC/AC ダイレクトコンバータの主回路構成図

## § 4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ●論文詳細情報

1. T. Kubo, H. Taketomi, H. Miyake, K. Hiramatsu, and T. Hashizume, “Variation of surface potentials of Si-doped  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 < x < 0.87$ ) grown on AlN/sapphire template by metal-organic vapor phase epitaxy”, Appl. Phys. Express **3**, Art. No. 021004(2010). DOI:10.1143/APEX.3.021004
2. M. Akazawa, T. Matsuyama, T. Hashizume, M. Hiroki, S. Yamahata, and N. Shigekawa, “Small valence-band offset of  $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{GaN}$  heterostructure grown by metal-organic vapor phase epitaxy”, Appl. Phys. Lett. **96**, Art. No. 132104 (2010). DOI:10.1063/1.3368689