

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

- ・厳密数値計算による絶縁膜/AlGa_N/Ga_N 構造の容量・電圧特性の解析
- ・ドライエッチ面を含む Al₂O₃/AlGa_N/Ga_N 構造の界面準位評価
- ・多重台形チャネル AlGa_N/Ga_N HEMT の電流安定性評価

(2)「豊田中研」グループ

① 主たる共同研究者:加地 徹(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

- ・低転位高抵抗 Ga_N 基板上への AlGa_N/Ga_N 構造の結晶成長
- ・アンペア級動作 AlGa_N/Ga_N HEMT の作製プロセスの検討

(3)「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 インバータ用の新しいゲート制御回路の設計
- ・AlGa_N/Ga_N HEMT のスイッチング速度評価

§ 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)

(1)ドライエッチ面を含む Al₂O₃/AlGa_{0.3}N/GaN 構造の界面準位評価

誘導結合プラズマ(ICP)支援によるドライエッチングが AlGa_{0.3}N/GaN 接合の表面ポテンシャル制御に与える影響を調べるために、Al₂O₃/AlGa_{0.3}N/GaN 構造の容量-電圧(C-V)特性評価を行った。バンド不連続量、分極効果、電子捕獲準位の放出時定数を取り入れた C-V 特性の厳密数値計算と実験値を比較する手法により、Al₂O₃/AlGa_{0.3}N の界面準位密度分布を推定した。図1に、ICPプロセスによりAlGa_{0.3}N表面を7nmエッチングした後に原子層堆積法によりAl₂O₃膜を20nm形成したMOS構造の特性を示す。界面準位を考慮しない計算と比較すると、順バイアス領域でのC-V曲線の傾きと立ち上がり電圧(Step1)に大きな差が見られた。エネルギー的に連続な電子捕獲準位を導入すると、図1に示すように、実験値を再現することができた。ICPエッチングにより、AlGa_{0.3}N表面に多数の原子ステップが形成されることがTEM観測から明らかになり、ステップ端に生じるダングリングボンドが高密度の電子捕獲準位の成因であると推定される。また、光支援C-V法との併用により、禁制帯中央より伝導帯下端にわたって、 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 以上の電子準位が分布することが明らかになった[5]。

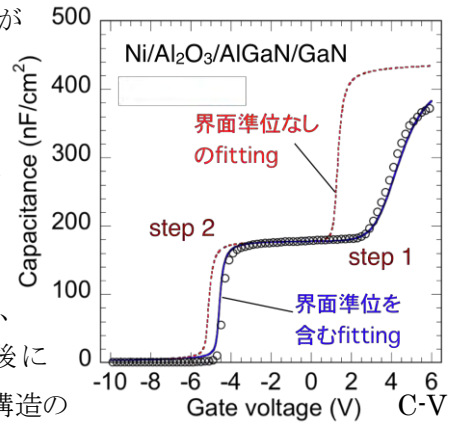


図 1 Al₂O₃/AlGa_{0.3}N/GaN 構造の C-V 測定結果と計算値

(2)多重台形チャネル AlGa_{0.3}N/GaN HEMT の電流安定性評価

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-ゲート間の電極距離(L_{GD})を変化させた構造を作製し、電流-電圧特性を評価した。結果を図2に示すが、2つの図で横軸の値が異なることに注意されたい。プレーナでは、L_{GD}の増加に伴ってKnee電圧が増加し、かつ、線形領域の傾きが著しく低下する。L_{GD}の増加に従って、ドレイン-ゲート間のアクセス抵抗が増大するため、トランジスタのオン抵抗に大きな影響を与える。一方、MMC素子では、Knee電圧・オン抵抗の両方ともL_{GD}依存性が弱いことが分かった。さらに、バイアス点をオフ領域に設定したパルス電流測定により電流変動特性を評価し、プレーナ素子よりも格段に電流変動が少ないことを見いだした。これらは、多重台形チャネル素子の高チャネルインピーダンス性に起因すること

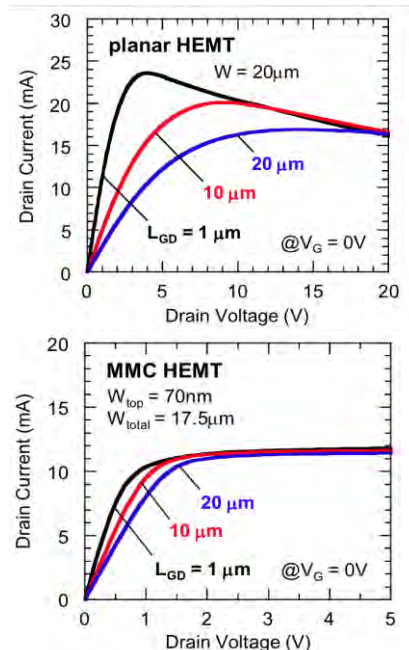


図 2 ドレイン-ゲート間距離を変化させた時の電流-電圧特性

を明らかにし、GaN系トランジスタの高安定化に寄与する知見を得ることができた。

(3) 低転位高抵抗 GaN 基板上への AlGaIn/GaN 構造の結晶成長

Si などの異種基板上に成長したヘテロ接合を用いた HEMT の電流安定性を解明するためにも、GaN 基板上の歪みの無い接合を用いた素子との比較が重要である。この目的で、Feドープ高抵抗 GaN 基板上への AlGaIn/GaN 接合の成長を行った。この時、最も注意しなければならない点は、基板からエピ層への Fe 拡散である。図3に2次イオン質量分析(SIMS)による Ga および Fe 元素のプロファイルを示す。GaN基板には 10^{18}cm^{-3} 程度の Fe がドープされており、GaN 成長層に向かって明らかな拡散が観測された。GaN を $1.2\mu\text{m}$ 程度成長すると、Fe 原子密度は SIMS の検出限界以下になった。このため、最表面の AlGaIn/GaN 接合の電気的特性に Fe の影響は無いと推定される。実際に、2次元電子層の移動度を測定したところ、 $1800\text{cm}^2/\text{Vs}$ が得られ、サファイア基板上接合の値より格段に高いことがわかった。

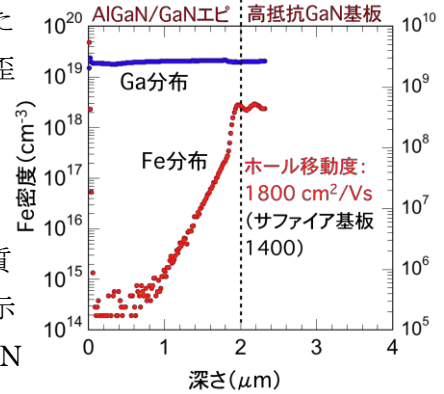


図3 Feドープ高抵抗 GaN 基板上に成長した AlGaIn/GaN 構造の SIMS 分析

(4) GaN インバータ用の新しいゲート制御回路の設計

インバータ用のゲートドライブ(GD)回路は、通常、ゲート抵抗を介してゲート容量を充電しているため、高周波スイッチングにより GD 回路の電力損失が大きくなる。これを解決するため、「共振型 GD 方式」を採用し、ノーマリオン HEMT にも適用できる回路設計を行った。回路図を図4に示す。ここでは、 L_T と C_b の LC 共振を利用してゲート容量 C_{iss} を充電する。さらに C_{iss} に充電されたエネルギーを電源 E に回生することが可能になるため、HEMT 駆動時の消費電力を低減できる。図5にターオン特性のシミュレーション結果を示す。ノーマリオン HEMT を仮定しており、入力信号は $-10\sim 0\text{V}$ とした。また、 L_T と C_b の共振条件から L_T を 90nH と設定した。良好なターオン特性が得られ、従来の GD 回路より消費電力が 75% 低減することが明らかになった。

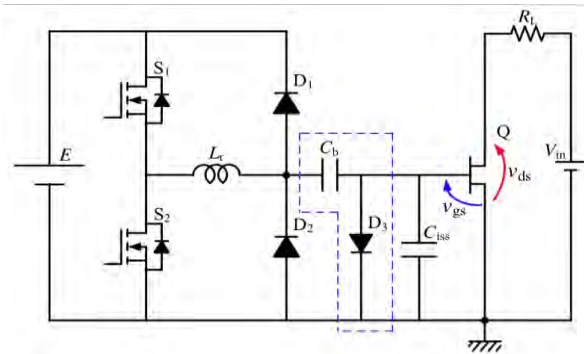


図4 ノーマリオン AlGaIn/GaN HEMT に適用可能な共振型ゲートドライブ回路

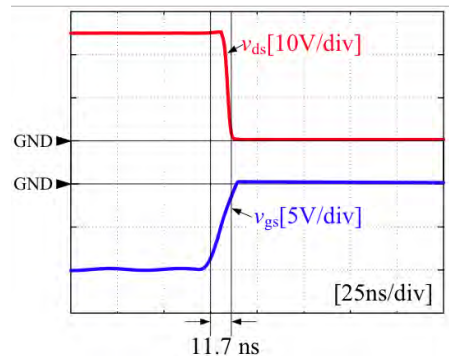


図5 AlGaIn/GaN HEMT のターオン特性のシミュレーション結果

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. C.-Y. Hu and T. Hashizume, “Non-localized trapping effects in AlGa_N/Ga_N heterojunction field-effect transistors subjected to on-state bias stress”, J. Appl. Phys. **111**, 084504 (2012); DOI: 10.1063/1.470439
2. M. Matys, B. Adamowicz, and T. Hashizume, “Determination of the deep donor-like interface state density distribution in metal/Al₂O₃/n-GaN structures from the photocapacitance–light intensity measurement”, Appl. Phys. Lett. **101**, 231608 (2012). DOI:10.1063/1.4769815]
3. Z. Yatabe, Y. Hori, S. Kim, and T. Hashizume, “Effects of Cl₂-Based Inductively Coupled Plasma Etching of AlGa_N on Interface Properties of Al₂O₃/AlGa_N/Ga_N Heterostructures”, Appl. Phys. Express **6**, 016502 (2013). DOI:10.7567/APEX.6.016502

(3-2) 知財出願

- ① 平成 24 年度特許出願件数(国内 0 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)