

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 22 年度は、(1) AlGaIn のバルク電子準位および表面準位の評価、(2) p-AlGaIn/i-AlGaIn/GaN 構造の結晶成長、(3) 選択的電気化学酸化プロセスによる埋め込み MOS ゲート構造、(4) 原子層堆積による絶縁ゲート構造、(5) 多重台形チャネル AlGaIn/GaN HEMT の動作特性の理解としきい値制御、(6) GaN インバータ用の回路設計とインバータ実装構造の検討に関する研究を実行した。Al 組成 25~60%の AlGaIn 結晶に存在する電子捕獲準位を検出し、活性化エネルギーの Al 組成依存性が両性欠陥モデルに基づくフェルミ準位安定化エネルギーのそれと良く一致することから、空孔欠陥ペアを含む複合欠陥が電子準位の成因である可能性を初めて示した。また、パルスドーピング法を用いて $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上の Mg 密度を有する p-AlGaIn 層の成長を達成し、続いて p-AlGaIn/i-AlGaIn/GaN 構造の結晶成長に成功した。さらに、選択的電気化学酸化プロセスによる埋め込み MOS ゲート構造を形成し、AlGaIn/GaN トランジスタのノーマリオフ動作を達成した。原子層堆積による絶縁ゲート構造の形成プロセスを最適化し、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ 構造の界面準位密度を $10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 台に低減した。また、光支援 CV 法により $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ 構造の界面準位を評価することに初めて成功した。トランジスタ展開に関しては、多重台形チャネル構造の適用により AlGaIn/GaN HEMT のオフ状態ストレスによる電流低下が抑制可能であることを示し、MOS 型 HEMT の動作を確認した。また、GaN HEMT とショットキーダイオードを用いた AC/AC ダイレクトコンバータを設計し、高周波動作において低損失の電力変換が可能であることを明らかにした。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

- ・AlGa_N のバルク電子準位および表面準位の評価
- ・選択的電気化学酸化プロセスによる埋め込み MOS ゲート構造
- ・原子層堆積による絶縁ゲート構造
- ・多重台形チャネル AlGa_N/Ga_N HEMT の動作特性の理解としきい値制御

(2)「豊田中研」グループ

① 研究分担グループ長:加地 徹(豊田中央研究所情報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-AlGa_N/i-AlGa_N/Ga_N 構造の結晶成長と評価
- ・インバータ実装測定系の検討

(3)「山口大」グループ

① 研究分担グループ長:田中 俊彦(山口大学理工学研究科、教授)

② 研究項目

- ・SPICE を用いた Ga_N HEMT のモデル化とデバイスシミュレーション
- ・Ga_N インバータ用の回路設計とシミュレーション

§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 のバルク電子準位および表面準位の評価

有機金属気相成長により成長した AlGaN に過渡容量分光法 (DLTS) および光容量法を適用し、深い電子捕獲準位の検出を行った。図1は、検出された支配的準位のエネルギーを Al 組成に対してプロットした結果である [1]。本報告のデータは赤四角であり、その他のデータは既報告からの引用である。Al 組成の増加に従い、深い準位のエネルギー位置は禁制帯中央付近に近づき、両バンドに対して大きな活性化エネルギーを持つことになる。この Al 組成依存性は、両性欠陥モデルに基づくフェルミ準位安定化エネルギーと良く対応しており、欠陥形成エネルギーの考察より、逆位置欠陥と空孔欠陥ペアを含む複合欠陥が AlGaN 結晶中の支配的な深い準位の成因であることが示唆された。今後は、これらの準位とトランジスタの動作安定性との関連を評価する。

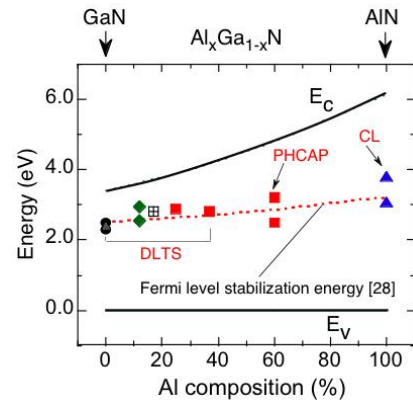


図1 AlGaN 結晶中に検出された深い準位エネルギーの Al 組成依存性

2) p-AlGaN/i-AlGaN/GaN 構造の結晶成長

Cp₂Mg をパルス的に供給する成長法により、急峻な Mg 密度分布を有する p-AlGaN/i-AlGaN/GaN 構造の結晶成長を検討した。図2に 2 次イオン質量分析の結果を示すが、パルスドーピングにより $1 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の範囲で p 層内の均一な Mg 密度分布を得ることができ、さらに p-AlGaN/i-AlGaN 界面で急峻なプロファイルを達成した。今後は、p 層の膜厚/Mg 密度としきい値電圧との相関を調べる。

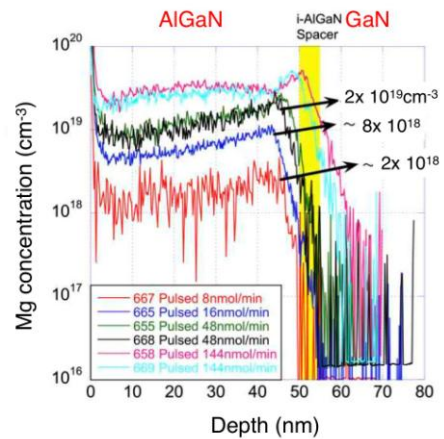


図2 パルスドーピングによる AlGaN 層の Mg 密度分布

3) 選択的電気化学酸化プロセスによる埋め込み MOS ゲート構造

選択的電気化学酸化により AlGaN/GaN 構造表面に埋め込み酸化膜を形成し、それをゲートに利用した MOS HEMT を作製した。ヘテロ構造のポテンシャルに対応したス

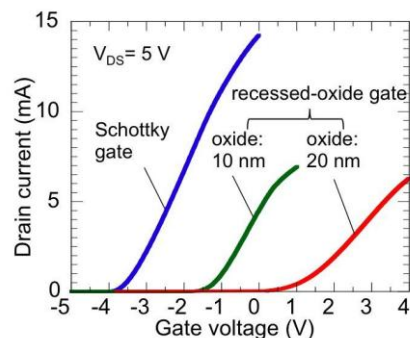


図3 埋め込み酸化ゲート AlGaN/GaN HEMT の伝達特性

トップ状の酸化反応電流が観測され、この反応電流のモニターにより酸化膜制御が可能である。図3に埋め込み MOS ゲート AlGaN/GaN HEMT の伝達特性を示す。酸化膜を形成しないショットキーゲート素子では、そのしきい値電圧は-3.4Vであった。酸化層の膜厚が厚くなるに従ってし

きい値は正方向にシフトし、膜厚 20nm の場合には+1.2V となりノーマリオフ動作が実現した。また、ショットキーゲート構造と比較して極めて低いゲート漏れ電流が観測された[5]。

4) 原子層堆積による絶縁ゲート構造

原子層堆積(ALD)による GaN 表面への Al₂O₃ ゲート構造の形成プロセスを最適化した。オーミック電極形成プロセスにおける熱処理が、Al₂O₃/GaN 界面の電子準位密度を増加させることを明らかにした。この対策として、図4の挿入図に示す様に、オーミックプロセスに表面保護構造を適用し、保護層を除去後に Al₂O₃ ゲート構造を形成した。このプロセスにより、図4に示す様に、界面準位密度を 10¹¹ cm⁻²eV⁻¹ 台に低減することが可能となった [2]。また、光支援 CV 法により Al₂O₃/AlGaIn/GaN 構造の界面準位を評価することに初めて成功した [7]。

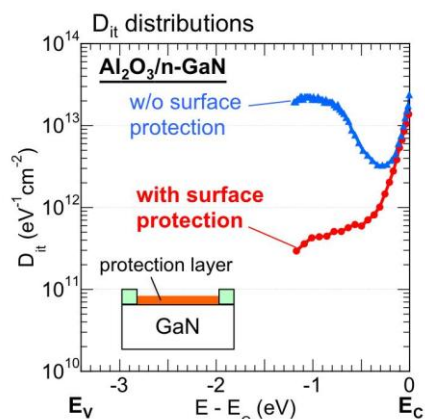


図4 Al₂O₃/GaN 構造の界面電子密度分布

5) 多重台形チャネル AlGaIn/GaN HEMT の動作特性の理解としきい値制御

多重台形チャネル(MMC)素子と通常の planar 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。その結果、planar 素子ではストレス印加後の電流値が初期値の 20-30%まで低下するのに対し、MMC 素子では電流低下はほとんど観測されず、MMC 素子の優れた電流安定性を確認した。また、ALD 法により Al₂O₃ ゲート構造を作製し、MOS 型 MMC 素子を実現した。

6) GaN インバータ用の回路設計とシミュレーション

GaN HEMT と GaN ショットキーダイオード(GaN SBD)を用いた AC/AC ダイレクトコンバータを設計し、高周波動作において低損失の電力変換が可能であることを明らかにした。まず、GaN ショットキーダイオードのスイッチング特性を Si-pn 接合ダイオードと比較した結果を図5に示す。Siダイオードでは約 100ns の回復時間を要するのに対し、GaN SBD では数 ns の極めて速い応答を示す。次に AC/AC ダイレクトコンバータにおいて、Si-IGBT+Si ダイオードを用いた場合との変換損失の比較を、シミュレーションにより評価した。その結果、50kHz/220W 動作条件で、Si 素子の場合には 7.6%の損失を伴うが、GaN 素子ではわずか 0.76%となり、AC/AC ダイレクトコンバータは GaN 素子の特長を活かす回路方式であることが示された。

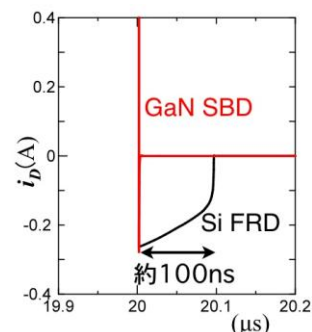


図5 ダイオードのスイッチング特性

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. K. Ooyama, K. Sugawara, S. Okuzaki, H. Taketomi, H. Miyake, K. Hiramatsu, and T. Hashizume, “Deep electronic levels of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ with a wide range of Al composition grown by metal-organic vapor phase epitaxy”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, Art. No. 101001 (2010). (DOI: 10.1143/JJAP.49.101001)
2. Y. Hori, C. Mizue, and T. Hashizume, “Process conditions for improvement of electrical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{n-GaN}$ structures prepared by atomic layer deposition”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, Art. No. 080201 (2010). (DOI: 10.1143/JJAP.49.080201)
3. D. Gregušova, R. Stoklas, C. Mizue, Y. Hori, J. Novák, T. Hashizume, and P. Kordoš, “Trap states in AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor structures with Al_2O_3 prepared by atomic layer deposition”, *J. Appl. Phys.* **107**, Art. No. 106104(2010). (DOI: 10.1063/1.3428492)
4. C.-Y. Hu, T. Hashizume, K. Ohi, M. Tajima, “Trapping effect evaluation of gateless AlGaIn/GaN heterojunction field-effect transistors using transmission-line-model method”, *Appl. Phys. Lett.* **97**, Art. No. 222103 (2010). (DOI: 10.1063/1.3506583)
5. N. Harada, Y. Hori, N. Azumaishi, K. Ohi and T. Hashizume, “Formation of recessed-oxide gate for normally-off AlGaIn/GaN HEMTs using a selective electrochemical oxidation”, *Appl. Phys. Express* **4**, Art. No. 021002 (2011). (DOI: 10.1143/APEX.4.021002)
6. E. Ogawa and T. Hashizume, “Variation of Chemical and Photoluminescence Properties of Mg-Doped GaN Caused by High-Temperature Process”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 021002 (2011). (DOI: 10.1143/JJAP.50.021002)
7. C. Mizue, Y. Hori, M. Miczek, and T. Hashizume, “Capacitance-voltage characteristics of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn/GaN}$ structures and state density distribution at $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ interface”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 021001 (2011). (DOI: 10.1143/JJAP.50.021001)
8. T. Uesugi and T. Kachi, “Electrical Characterization of GaN p-n Junctions Grown on Free-Standing GaN Substrate by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 031005 (2011). (DOI: 10.1143/JJAP.50.031005)