

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「二酸化炭素排出抑制に資する
革新的技術の創出」
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」

研究終了報告書

研究期間 平成21年10月～平成27年3月

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)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

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・高信頼化とインバータ展開を目標に、以下を柱として研究を実施した。

- ・異種接合の界面制御
- ・AlGaIn/GaN 高移動度電界効果トランジスタ(HEMT)の作製と評価
- ・HEMT 駆動回路・インバータ回路の設計と HEMT 実装試験

主な成果の概要を以下に示す。

1) 異種接合の界面制御: 厳密数値計算法と独自に開発した光支援容量-電圧(C-V)法を併用して、異種構造に形成した絶縁膜界面の電子準位密度分布を初めて同定することができた。また、転位密度の低い GaN 自立基板を用いたエピタキシャル成長を行い、理想値に近いショットキー接合電流-電圧特性が得られること、および AlGaIn/GaN 界面の2次元電子層移動度が格段に向上することが明らかになった。

2) 多重台形チャネル(MMC) AlGaIn/GaN HEMT の優れた電流安定性: 通常のプレーナ型 HEMT が、ドレインアクセス領域抵抗およびオフ時電圧印加に起因する電流低下が顕著に生じることと比較して、MMC-HEMTは格段に優れた電流安定性を持つことを示した。さらに、ナノチャネルの高インピーダンス性がアクセス領域の影響を低減する効果があり、電流安定性に大きく寄与していることを明らかにした。

3) アンペア級 HEMT および MMC-HEMT の作製とインバータ実装: アンペア級の電流駆動可能なプレーナ HEMT とショットキー型ダイオードを同一基板に作製し、良好な電流-電圧特性を得た。この素子をパッケージングしてインバータ回路への実装を可能にした。さらに、アンペア級 MMC-HEMT のレイアウト設計を最適化し、MMC 構造の特長を保持したまま 1A 以上の電流駆動を可能にする HEMT を実現した。

4) HEMT のゲート駆動回路およびインバータ回路の開発: 共振型ゲート駆動方式を採用し、ノーマリオン HEMT にも適用できる回路設計を行った。LC 共振を利用してゲート容量を充電し、充電されたエネルギーを直流電源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。さらに、太陽電池用のパワーコンディショナを模擬した DC/AC インバータ回路を設計し、実際に GaN HEMT を実装して動作実験を行った。比較的高いスイッチング周波数(50kHz)を用いることで、歪みの少ない正弦波出力を実現した。

北大 G は主として接合特性・電子準位評価と MMC HEMT 評価を行い、その成果は豊田中研での HEMT プロセスおよび構造の改善にフィードバックされた。豊田中研 G は異種基板および GaN 自立基板上へのエピタキシャル成長を最適化し、低転位・良質の結晶に接合を形成することで、理想値に近い接合特性を実現することができた。さらに、豊田中研で開発されたアンペア級 HEMT は山口大 G との共同でインバータ回路に実装され、山口大で検討されたゲート駆動回路と DC/AC インバータ回路を用いて、インバータ動作特性を評価することができた。

以上、3グループの機能的な連携体制により、異種接合の評価・制御、MMC 構造を含む GaN HEMT 開発、GaN HEMT を実装した DC/AC インバータ回路開発を実施し、GaN トランジスタの高性能化・高信頼化とインバータ展開に関して、いくつかの重要な成果を生み出すことができた。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 絶縁膜/AlGaIn/GaN 構造における界面電子準位密度分布の評価(論文 10)

概要: (200 字程度)

AlGaIn/GaN ヘテロ接合に原子層堆積法により Al_2O_3 膜を堆積し、容量-電圧法、光支援容量法を組み合わせた界面評価を行い、 Al_2O_3 /AlGaIn 界面の電子準位密度分布を初めて決定した。論文 10 で成果を公表したが、2011 年公表の論文にも関わらず、すでに 52 件の引用があり(Web of Science)、その成果が内外から注目されている。また、Jpn. J. Appl. Phys. の 2012 年度の被引用数 Top10 に入った。

2. 詳細な数値計算による絶縁膜/AlGaIn 界面の評価と MOS HEMT のしきい値変動機構の解明(論文 36、招待講演 29)

概要: (200 字程度)

界面電子準位密度分布および界面準位からの電子放出時定数を組み入れた数値計算法を開発し、MOS HEMT のしきい値変動と絶縁膜/AlGaIn 界面の電子準位との関係を初めて明らかにした。この成果の一部は、招待講演 29 の会議において公表したが、当該会議の論文委員および参加者の投票による Best Paper Award に選出された。また、Jpn. J. Appl. Phys. 誌の GaN 特集号で執筆依頼を受け、2014 年 10 月に公表された(論文 36)。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 多重台形チャネル AlGaIn/GaN HEMT の高い動作信頼性(論文 28、35)

概要: (200 字程度)

多重台形チャネル(MMC) AlGaIn/GaN HEMT において、オフ電圧ストレスを与えた後の動作電流を詳しく解析し、通常のプレーナ HEMT をはるかに凌ぐ優れた動作安定性(低い電流コラプス)と放熱特性が証明された。最近になって MIT、コロンビア大、中国科学院、韓国慶北大より相次いで類似構造の発表があり、MMC HEMT が注目されている。特に MIT からの最新の発表によれば(IWN-2014、ポーランド)、高周波増幅用 HEMT の利得線形性が大幅に向上することが示され、電流コラプスの低減が主たる要因である。この成果は、論文 28 で公表されたが、GaN 電子デバイスの特集号に際して「招待論文」の依頼を受けた。

2. GaN HEMT 用のゲート駆動回路と高周波インバータ回路の提案(論文 27、37)

概要: (200 字程度)

GaN HEMT のインバータ応用に不可欠なゲート駆動回路の設計・製作・動作試験を行った。ノーマリオン型にも適用可能な共振型駆動回路を提案した。この回路は、駆動回路内に容量に蓄積した電力を電源電圧に回生することで、駆動回路の電力損失を大幅に低減できる。GaN HEMT を実装した回路の動作試験を行い、ターンオン時間 8ns が得られ、また駆動回路の電力損失が従来方式と比較して 75% 低減できることを明らかにした。また、13.56MHz 駆動のインバータ回路を設計・製作し、GaN 素子の特長である高周波駆動を実現した。これらの成果は、IEEE 主催の伝統ある電力応用関連の国際会議で公表し、GaN インバータ回路の実用化に極めて有用な指針が示された。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「北大」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
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	H21.10～H27.3
佐藤 威友	同上	准教授	H21.10～H27.3
赤澤 正道	同上	准教授	H21.10～H27.3
古賀 裕明	同上	助教	H21.10～H23.3
吉田 俊幸	島根大学 総合理工学部	助教	H21.10～H25.3
久保 俊晴	北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター	非常勤研究員	H21.10～H22.3
胡 成余	同上	同上	H22.4～H24.8
Joel T. Asubar	同上	CREST 研究員	H22.4～H26.10
谷田部 然治	同上	CREST 研究員	H26.1～H27.3
田島 正文	北海道大学 大学院情報科学研究科	D2～3	H21.10～H23.3
水江 千帆子	同上	D2～3	H21.10～H23.3
小川 恵理	同上	D2～3	H21.10～H23.3
大井 幸多	同上	M2～D3	H21.10～H25.3
堀 祐臣	同上	M2～D3	H22.4～H26.3
原田 脩央	同上	M2	H22.4～H23.3
高 博	同上	M2	H23.4～H24.3
阿部 幸則	同上	M1	H23.4～H24.3
東石 直樹	同上	M1～2	H23.4～H25.3
金 聖植	同上	M1～D1	H23.4～H26.3
中野 智	同上	M1～2	H24.4～H26.3
馬 万程	同上	M1～2	H24.4～H26.3
西口 賢弥	同上	M1～	H25.4～H27.3
千崎 泰	同上	M1～	H25.4～H27.3
大平 城二	同上	M1～	H26.4～H27.3

研究項目

- ・AlGa_N の電子準位評価
- ・Ga_N 異種接合の電氣的評価
- ・絶縁膜/AlGa_N/Ga_N の電子準位評価
- ・電気化学プロセスによる n-Ga_N 表面酸化
- ・電気化学プロセスによる p-Ga_N の選択的エッチング
- ・AlGa_N/Ga_N HEMT の動作安定性評価
- ・多重台形チャネル AlGa_N/Ga_N HEMT の作製と動作性能評価

②「豊田中研」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
上杉 勉	豊田中央研究所 システ	主席研究員、室長	H21.10～H27.3

	ム・エレクトロニクス3部		
加地 徹	同上	主監	H21.10～H27.3
菊田 大悟	同上	研究員	H21.10～H27.3
成田 哲生	同上	研究員	H21.10～H27.3
兼近 将一	同上	主任研究員	H21.10～H27.3
井口 紘子	同上	副研究員	H22.4～H27.3
八木 雄二	同上	技師	H22.12～H27.3
片岡恵太	同上	研究員	H23.7～H27.3
西川 恒一	同上	研究部次長	H25.8～H26.3
富田 一義	同上	主任研究員	H26.7～H27.3

研究項目

- ・Mgドープ AlGa_N の結晶成長
- ・低転位 GaN 基板上への n-GaN および AlGa_N/GaN 結晶成長
- ・アンペア級 AlGa_N/GaN HEMT の作製と評価
- ・アンペア級 MMC HEMT の作製と動作評価
- ・HEMT のインバータへの実装技術

②「山口大」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
田中 俊彦	山口大学 大学院理工学研究科	教授	H21.10～H27.3
平木 英治	同上	准教授	H21.10～H25.9
岡本 昌幸	宇部工業高等専門学校 電気工学科	准教授	H22.4～H27.3
河口 祐樹	山口大学 大学院理工学研究科	D3	H21.10～H22.3
高原 貴昭	同上	M1～2	H21.10～H23.3
彼杵 祐子	同上	M1～2	H22.4～H24.3
豊田 玄紀	同上	M1～2	H23.4～H25.3
石橋 卓治	同上	M1～2	H24.4～H26.3
松井 光生	同上	M1～2	H24.4～H26.3
中西 佑太	同上	M1～2	H25.4～H27.3
松崎 公洋	同上	M1	H26.4～H27.3

研究項目

- ・ノーマリオン AlGa_N/GaN HEMT のゲート駆動回路の設計・シミュレーション・動作試験
- ・共振型ゲート駆動回路の設計・シミュレーション・動作試験
- ・AlGa_N/GaN HEMT を実装した DC/AC インバータの設計・作製・動作試験
- ・13.56MHz 動作 GaN インバータの設計・作製・動作試験

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- ・スロバキア科学院、シレシアン工科大学（ポーランド）とHEMT動作安定性、絶縁ゲート界面制御に関する共同研究を展開している。両機関と共同で論文執筆・公表を行い、また、両機関から研究者を受け入れている（学術振興会の外国人研究員1名、当センターの博士研究員

2名、当大学の外国人客員教授3名)。

・共同研究を通じて(各年4～5社)、各企業との連携・ネットワークを構築している。共同研究を通じて、開発したプログラムの提供も行っている。

§ 3 研究実施内容及び成果

4. 1 AlGa_xN 結晶の欠陥準位評価(北大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

有機金属気相成長により成長した AlGa_xN に過渡容量法 (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。特に Al 組成を広い範囲で変化させて、深い準位と組成との関連を調べた。AlGa_xN は禁制帯幅が 3.4~6.0eV まで変化し、深い準位のエネルギーが非常に大きいことが予想され、秒オーダーの測定窓を設定することにより大きな活性化エネルギーを持つ準位の検出を可能にした。また、光容量法を併用して midgap 近傍の準位の検出も試みた。

図1は、Al 組成が 25 および 37% の AlGa_xN にショットキー接合を形成し、DLTS 評価を行った結果である。最大 100 秒の測定窓を設定することで、それぞれ 1.0eV, 1.3eV の活性化エネルギー (ΔE) を有する深い準位の検出に成功した。また、Al 組成 60% の試料では、光容量法により $\Delta E=1.5\text{eV}$ の準位を検出した。

図 2 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。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 AlGa_xN 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。

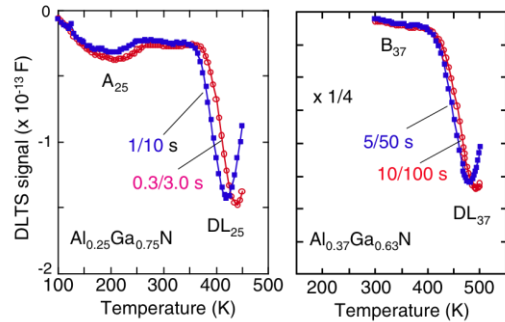


図 1 AlGa_xN 結晶中に検出された深い準位エネルギーの Al 組成依存性

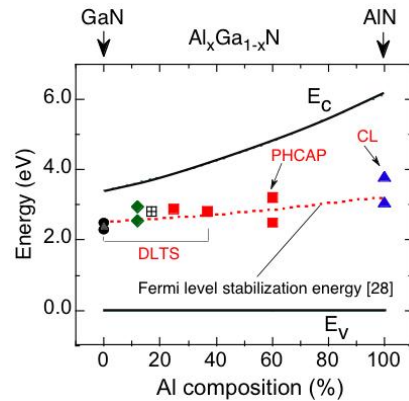


図 2 AlGa_xN 結晶中に検出された深い準位エネルギーの Al 組成依存性

4. 2 原子層堆積による絶縁ゲート構造の形成と評価(北大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

原子層堆積 (ALD) による n-GaN 表面への Al₂O₃ ゲート構造の形成プロセスを最適化した。原料には TMA と H₂O を用い、250~300℃ で堆積を行った。まず、XPS 解析により GaN 表面に堆積した Al₂O₃ 膜の分析を、サファイア標準試料と比較して行った。O1s 損失ピーク解析より堆積膜の禁制帯幅は 6.7eV と見積もられた。サファイア基板は 8.0eV であったので、アモーフাস薄膜状態での禁制帯幅はバルク結晶の値より小さいことがわかった。TEM 評価により Al₂O₃ 膜のアモーフাস状態が確認でき、また均一な膜厚と平坦な界面が観

20nm-Al₂O₃/n-GaN I-V特性

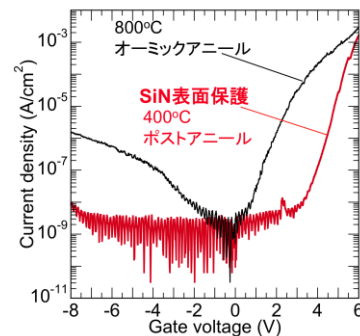


図 3 Al₂O₃/n-GaN 構造の I-V 特性

察され、ALD 法の膜厚制御性の良さが証明された。しかし、 Al_2O_3 膜の堆積後にオーミック電極を形成した場合、図 3 に示すように、MOS 構造に非常に大きな漏れ電流が観測された。オーミック電極形成時の 800°C 熱処理により、 Al_2O_3 膜に多数の微結晶が形成されることが TEM 観察で明らかになり、微結晶部の粒界がリークパスになり、大きな漏れ電流を引き起こす。従って、 Al_2O_3 膜では高温処理に注意を要する。

この漏れ電流の問題を解決するために、ohmic first プロセスを開発した。まず、SiN 表面保護膜を堆積し、ohmic 電極用の窓開けと電極 (Ti/Al/Ti/Au) の堆積を行った。次に 800°C アニールを行い、表面保護膜を除去した。その後、ALD で Al_2O_3 膜を堆積し、最後にゲート電極を形成した。図 4 に、容量-電圧 (C-V) 測定結果にターマン法を適用して得られた界面準位密度分布を示す。ohmic first プロセスの場合でも、GaN 表面を保護しない試料では界面特性が著しく劣化した。これは、 800°C 熱処理中に GaN 表面の化学的結合状態が乱れことに起因している。SiN または Al_2O_3 を表面保護膜としてオーミックプロセスを行い、その後表面保護膜を除去して再度 Al_2O_3 を堆積して MOS 構造を形成することで、良好な特性を持つ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ 界面が得られる。準位密度は $3\text{--}5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 程度に制御可能である。

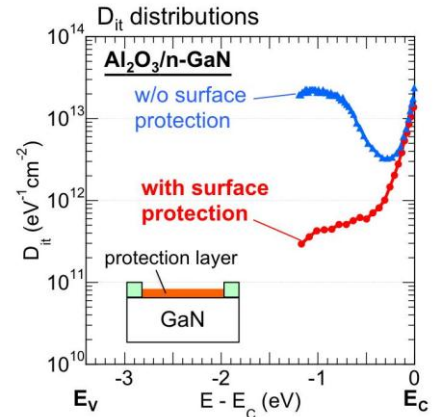


図 4 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ 構造の界面電子密度分布

4. 3 絶縁膜 AlGaIn/GaN 構造の C-V 特性の解釈 (北大グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

MOS ゲート構造を持つ AlGaIn/GaN HEMT や AlInN/GaN HEMT においては、絶縁膜/AlGaIn、絶縁膜/AlInN の界面特性を理解することが、良好なゲート制御を達成するために最重要課題である。しかし、これらの混晶において良質の厚膜成長は難しく、エピタキシャル単層膜を用いた MOS 構造評価の報告はない。また、実際のデバイス特性を予想する観点からは、HEMT 構造を用いて絶縁膜/AlGaIn 界面特性を評価することが望ましい。これまでに HEMT エピ層に絶縁膜を形成し、その C-V 測定結果を報告した例は多いが、その特性を正しく解釈した例はなかった。そこで、図 5 に示す HEMT-MOS 構造を作製し、その C-V 特性の評価を厳密計算により行った。

C-V 測定結果の一例を図 6 に示す。2つのステップを持つ特徴的な特性を示した。この C-V 特性を理解するために、1 次元ポアソン方程式に基づく厳密数値計算を行った。計算には、分極電荷と $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面の電子捕獲準位を仮定した。また、Shockley-Read-Hall (SRH) 統計に基づいた界面準位からの電子放出時定数を考慮し、C-V 測定の掃印時間内に応答する準位のみを電荷変化に取り入れた。

図 7 に計算結果の一例を示す。実線は $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面に電位準位を仮定しない場合の

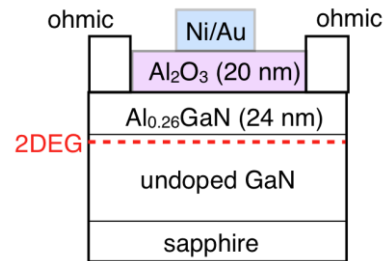


図 5 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ 構造

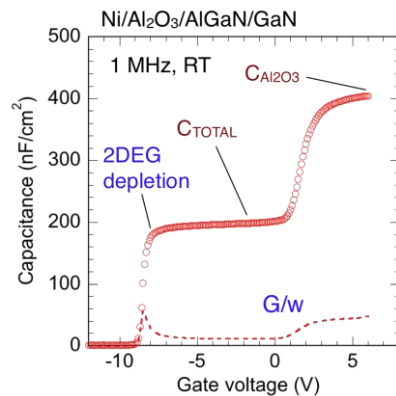


図 6 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ 構造の C-V 特性 (実験値)

理想 C-V 曲線である。順バイアス領域の一定容量は Al_2O_3 の絶縁膜容量に相当する。また、0～-8V の一定容量は、 Al_2O_3 膜と AlGaIn 膜の合成容量に対応している。次に、図 7 の挿入図に示す分布を仮定して、界面準位の影響を調べた。界面準位の影響は主として C-V 特性の順バイアス領域に出現する。この領域では E_F は AlGaIn の禁制帯内に位置するため、バイアス変化により界面準位の占有確率は変化する。また、 E_F 近傍の界面準位は伝導帯下端より比較的浅いエネルギーを持つため、 E_F 以上の準位からの電子放出時定数は小さい。したがって、通常の MOS 構造の特性と同様に、界面準位のイオン化による過剰電荷が C-V 曲線の傾きを減少させ、その度合いは準位密度に依存する。界面準位密度がきわめて高い場合、順バイアス領域での容量増加は観測されず、一定容量(C_{TOTAL})が広い領域で続くことになる。

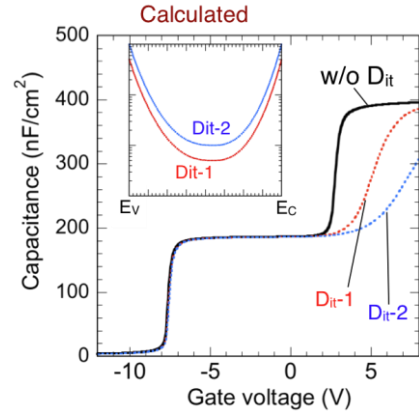


図 7 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ 構造の C-V 特性(計算値)。挿入図は計算に使用した界面準位密度分布。

一方、しきい値電圧近傍のバイアスでは、 E_F が AlGaIn の価電子帯上端よりはるかに低いエネルギー位置にあるため、界面準位の占有確率がバイアスに依存しない。このため、このバイアス領域では、イオン化した界面準位は固定電荷のごとくふるまい、主としてしきい値電圧シフトにその影響が現れる。これは、通常の MOS 構造の C-V 特性と大きく異なる点である。さらに、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面の電子準位の大部分は、伝導帯への電子放出時定数が室温で非常に大きくなるため、しきい値電圧シフトは見かけ上小さくなり、イオン化した界面準位電荷を正確に求めることが難しい(室温でも界面準位は凍結状態)。特にゲート電圧掃印が負バイアス領域に限られている場合、界面準位への電子捕獲が十分ではなく、見かけ上のしきい値電圧シフトは非常に小さくなる。このような場合、界面準位密度を過小評価する結果となり、これまでに公表されている多数の論文に、このような過小評価の例が多く見られる。

4. 4 ドライエッチ面を含む $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ 構造の界面準位評価(北大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

誘導結合プラズマ(ICP)支援によるドライエッチングが AlGaIn/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、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ 構造の容量-電圧(C-V)特性評価と光支援 C-V 評価を行った。ICP プロセスにより AlGaIn 表面を 7nm エッチングした後、原子層堆積法により Al_2O_3 膜を 20nm 形成した MOS 構造を作製した。

まず、4.3 に示した厳密数値計算をもとに、伝導帯下端から禁制帯中央に分布する界面準位密度の推定を行った。図 8 に C-V 特性の実験値と計算値を示す。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面に電子捕獲準位を仮定しない場合、理想 C-V 曲線は2つのステップとも急峻な変化を示す。しかし、実験値では、順バイアスにおいて、C-V 曲線の傾きは緩く、かつ、容量の立ち上がり電圧が正バイアス方向にシフトしていることがわかる。そこで、界面準位を仮定した計算により C-V 曲線の傾きと立ち上がり電圧の変化を再現することができた。この fitting 結果を基に、界面準位密度分布の推定を行った。しかし、室温 C-V 測定から得られる界面準位の情報は、AlGaIn の禁制帯幅の 1/3 程度に限定され、禁制帯中央より深い電子準位の検出は難

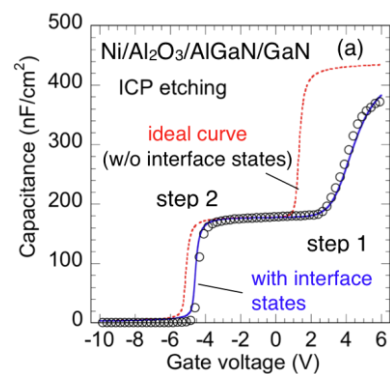


図 8 ICP エッチングした AlGaIn を含む $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ 構造の C-V 特性と計算値

しいことが明らかになった。

この問題を解決するために、光支援 C-V 法を開発した。原理図を図 9 に示す。暗状態で順バイアス印加により、バンドをほぼフラット状態にする（酸化膜容量が目安）。ここで、界面準位のほぼ全てが電子を捕獲した状態である。次に暗状態のまま逆バイアスに掃印し、2DEG 空乏（容量値はほぼ 0）のバイアスで、AlGaN の禁制帯幅以下のエネルギーを持つ単色光を照射する。図 9(a) に示すように、単色光エネルギーに対応した界面準位から電子放出が生じ、界面電荷変化をもたらす。次に、単色光を off し、暗状態で正バイアス方向に C-V 測定を再開すると、図 9(b) に示すように、界面電荷変化量に対応した C-V 曲線の並行シフトが観測される（負バイアス方向）。単色光のエネルギーを変化させて、光支援 C-V 測定を行うと、C-V シフト電圧は単色光のエネルギーに対応して大きくなる。

図 10 に光支援 C-V 測定結果の 1 例を示す。AlGaN の禁制帯幅以下のエネルギーを持つ単色光の照射により、C-V 曲線がほぼ完全な平行シフトを示している。これは、禁制帯中央より深い準位が室温においても「凍結状態」にあることを証明した結果である。光照射による電圧シフト量 (ΔV)、光エネルギー差 ($\Delta h\nu$) および C_{TOTAL} より準位密度を算出できる。

図 11 に、光支援 C-V 法と fitting 法により算出した、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}$ 界面の電子準位密度分布を示す。HEMT-MOS 構造を用いて算出した初めての結果である。禁制帯中央付近に最小値を持つ U 字分布を示した。ICP エッチングを行っていない試料では、準位密度の最小値は $10^{12}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ を下回る値となったが、注意深く形成した $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ 界面の場合より数倍高い値である。界面準位密度は下地結晶が含む欠陥密度に関連している可能性がある。一方、ICP エッチングされた AlGaN 面に形成した試料では、界面準位密度が約 1 ケタ増加している。TEM により、ICP エッチング後の AlGaN 表面には原子層オーダーのステップが多数観測された。これより、格子結合の乱れが発生し、ステップエッジを中心に高密度のダングリングボンドが存在すると思われる、エネルギー的に連続分布を持つ界面準位密度が増加したと考えられる。

さらに、絶縁ゲート GaN-HEMT で大きな問題になっている「しきい値変動」に関して研究を進めた。詳細な C-V 測定より、初期にゲートに加える順バイアスが大きいほど、しきい値電圧が浅くなる結果を得た。また、数値計算より、この実験結果を再現することができ、順バイアスの違いにより、界面準位のへの電子捕獲密度が異なることが、しきい値変動の主因であることを明らかにした。

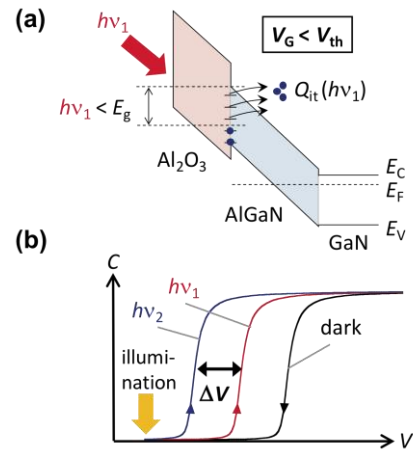


図 9 光支援 C-V 評価の原理図

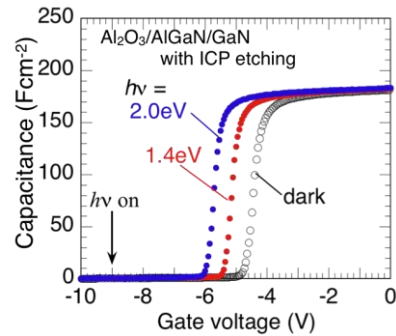


図 10 光支援 C-V 測定結果

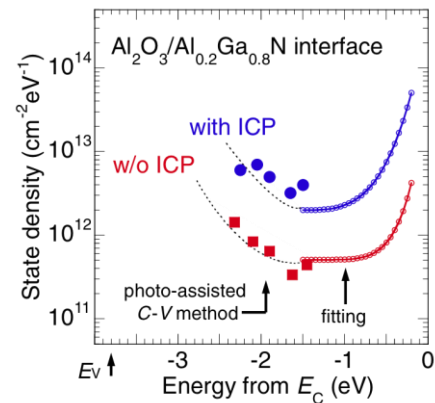


図 11 光支援 C-V 法と fitting により推定した $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}$ 界面の電子準位密度分布

4. 5 Al₂O₃/AlGa_N の界面準位評価と MOS ゲート HEMT の動作特性との相関 (北大グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

絶縁ゲート形 AlGa_N/Ga_N HEMT の特性向上のため、AlGa_N 表面の N₂O ラジカル処理の効果を検討した。光電子分光法により、N₂O ラジカル処理は数原子層の酸化膜を AlGa_N 表面に形成することがわかった。また、容量-電圧特性の周波数依存性により、AlGa_N の伝導帯下端近傍の界面電子準位を同定する手法を確立し、N₂O ラジカル処理が電子準位低減に効果的であることが明らかになった。この表面処理を HEMT 作製プロセスに適用した。ラジカル処理の有無が伝達特性に与える影響を評価した結果を図 12 に示す。ラジカル処理した場合、順バイアス領域で高いドレイン電流が得られた。伝導帯下端近傍の界面準位密度が低減し、ゲート制御効率が向上したことを示す結果が得られた。

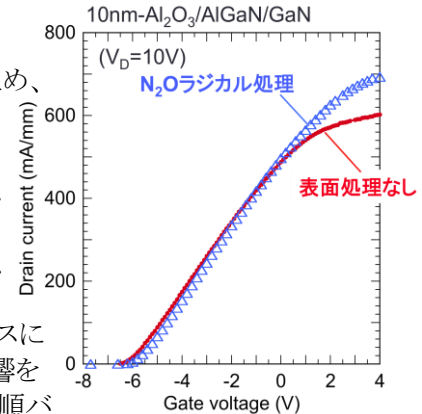


図 12 AlGa_N/Ga_N HEMT の伝達特性

4. 6 Ga_N エピ層/Ga_N 自立基板に形成したショットキー接合特性 (北大グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

サファイア基板や Si 基板上に成長した Ga_N エピタキシャル層にショットキー接合を形成した場合、その電流-電圧 (I-V) 特性は熱電子放出理論や熱励起電界放出理論に従わないことが知られていた。特に、逆方向漏れ電流の温度依存性は極めて弱く、トンネル漏れ電流に支配されるとされていた。

そこで、低転位 ($3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下) Ga_N 自立基板上に n-Ga_N をエピ成長し、ショットキー接合を形成してその特性を評価した。n-Ga_N 層の Si ドーピング密度は $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ である。比較試料として、サファイア基板上に成長したエピ層も用いた (転位密度は約 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ である)。図 13 に室温 I-V 特性の比較を示す。サファイア基板上 n-Ga_N に形成した接合は、理想因子が高く (1.3)、また逆バイアス領域で大きな漏れ電流とその強いバイアス依存性が見られた。一方、自立基板上エピ層に形成した試料は、直線性に優れた順方向特性を示し、その理想因子 n は 1.05-1.08 の良好な値となった。また、逆バイアス領域でも低い漏れ電流を示し、穏やかなバイアス依存性が観測された。サファイア基板エピ層の場合、転位密度は $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 程度であったが、自立基板上のエピ層では転位密度減少がショットキー界面近傍の点欠陥発生を抑制したため、特に逆方向漏れ電流の大幅な減少に関連していると思われる。

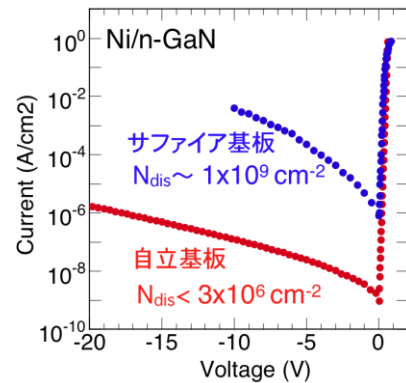


図 13 ショットキー接合の I-V 特性の比較

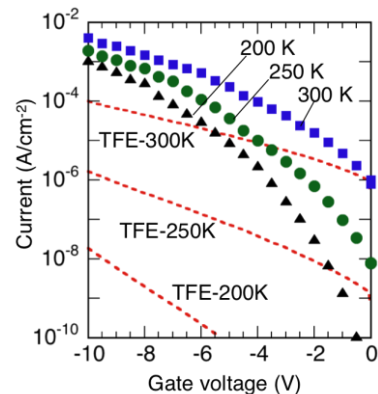


図 14 サファイア基板上エピに形成したショットキー接合の逆方向 I-V 特性の温度依存性

図 14 に、サファイア基板上 n-Ga_N に形成した接合の逆方向 I-V 特性の温度依存性とフィッティング結果を示す。解析には、熱励起電界放出 (Thermionic field emission: TFE) モデルを用いた。低温では電子のトンネルが金属のフェルミ準位近傍で生じるのに対し、温度上昇に伴い高エネルギー方向に電子分布が変化し、より障壁の薄

い領域でトンネル確率が高くなるモデルである。逆バイアスが強くなるとポテンシャル障壁は薄くなるため、漏れ電流のバイアス依存性が出現する。破線が障壁高 0.85 eV を用いた TFE モデルによる計算結果であるが、逆バイアス領域では、温度依存性・バイアス依存性ともに実験値と大きく離れている。この結果は、接合面でのトンネル輸送を促進する他の要因が存在することを示唆している。例えば、表面ドナー型欠陥（窒素空孔）の生成により、ショットキー障壁が表面近傍で極端に薄くなり、大きなトンネル電流の起源となっていると推定できる。深い逆バイアスではトンネル輸送が支配的になるため、温度依存性が非常に弱くなる。

一方、図 15 に示すように、自立基板上エピ層に形成した試料では、逆方向漏れ電流は TFE モデルによる計算値と非常に良く一致した。表面欠陥ドナーを仮定しなくとも、TFE モデルでバイアス依存性と温度依存性を同時に再現でき、良好なショットキー界面が形成されていることを示している。すなわち、低転位密度の結晶を使用することで、ほぼ理想に近いショットキー接合界面が形成できる可能性を示した結果である。

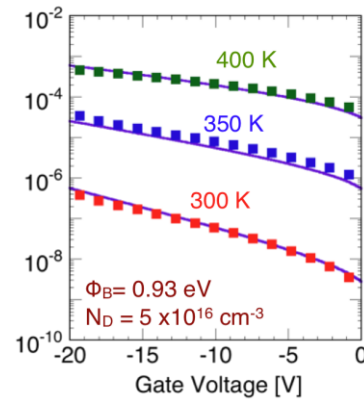


図 15 低転位 GaN 基板上エピに形成したショットキー接合の逆方向 I-V 特性の温度依存性

4. 7 疑似中間層がポテンシャル分布に与える影響(北大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

異種基板に形成する AlGaIn/GaN HEMT では、格子定数と熱膨張係数のミスマッチに対応するために、異種基板と GaN 層の中間に、超格子構造あるいは傾斜組成 AlGaIn 層などの中間緩衝層の成長を必要とする。しかし、中間層あるいは GaN/中間層界面の電子状態は未解明のままである。

そこで、GaN 自立基板上に AlGaIn/GaN/AlGaIn 層を含む n-GaN 層を形成し、ショットキー接合のポテンシャル制御に、疑似中間層がどのように影響するかを調べた。低転位密度 ($<3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$) の n-GaN 自立基板上に n-GaN を成長した。引き続き、 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}(5\text{nm})/\text{GaN}(50\text{nm})/\text{AlGaIn}(5\text{nm})$ 構造を成長し、最後に n-GaN を 0.6 μm 成長した。成長は MOCVD で行い、n-GaN 層には Si をドーピングした。この構造にショットキー接合を形成した。

C-V 特性より計算したキャリア密度分布を図 16 に示す。表面の n-GaN 領域で電子密度の減少が観測され、疑似中間層界面で高密度の電子蓄積が見られた。最初に、中間層界面に電子蓄積を仮定した計算を行った。この場合、キャリア蓄積は再現できたが、表面側 n-GaN 層でのキャリア空乏は説明できなかった。次に、AlGaIn/GaN/AlGaIn 中間層に分極電荷を導入し、計算を行った。図 17 に伝導帯下端のポテンシャル分布を示す。AlGaIn 層の両端に生じる負・正の分極電荷により、ポテンシャルの引き上げと井戸が生じ、キャリア空乏と蓄積の原因になったと考えられる。この結果は、超格子緩衝層を Si 基板上に成長する場合、分

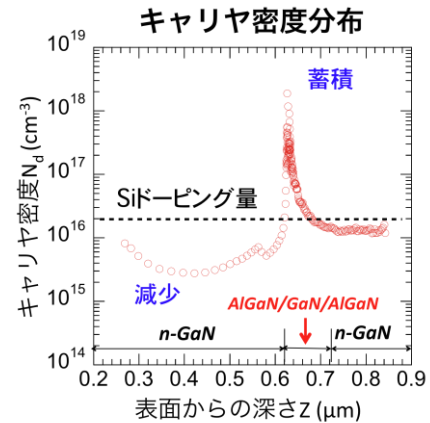


図 16 疑似中間層を持つ n-GaN のキャリアプロファイル

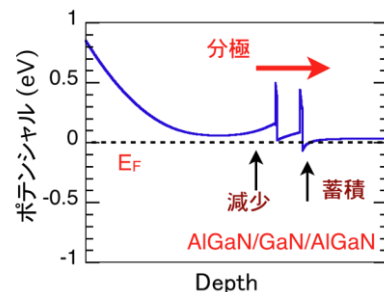


図 17 分極電荷を考慮した場合の伝導帯下端ポテンシャル

極効果により界面に電子蓄積が生じる可能性を示しており、成長構造設計に注意を要する。分極効果以外にも、界面欠陥・電子準位による電荷誘起の可能性も残されており、さらに詳細な評価が必要と思われる。

4. 8 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 (北大グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

選択的電気化学酸化により AlGaIn/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。電気化学酸化には、3%酒石酸とプロピレングリコールの混合液を用いた。また酸化反応に必要な正孔の生成を促すため、酸化プロセス中に半導体表面に UV 光を照射した。

図 18 に AlGaIn/GaN ヘテロ構造酸化時の反応電流値の時間変化と、プロセス初期の段階(図中 A の領域)における固液界面のバンド図を示す。プロセス初期ではバンド図に示すように、UV 照射により生成された正孔は、相当量が AlGaIn/GaN 界面の高密度の二次元電子ガスと再結合すると予想される。その結果、固液界面への正孔の供給量が制限され、低い反応電流値が観察されたと考えられる。その後 220s 付近から反応電流値の急激な上昇がみられた。この時の印加電圧値はおよそ 4.3V である。これはショットキーダイオードを形成した際のしきい値電圧と同程度であり、二次元電子ガスが空乏化し、固液界面に十分な量の正孔が供給され始めたため、反応電流値が上昇したと考えられる。このように、ヘテロ構造のポテンシャルに対応したステ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ことが明らかになった。

このプロセスを利用して、ゲート部分のみを選択的に電気化学酸化するプロセスを開発し、埋め込み MOS ゲート AlGaIn/GaN HEMT を作製した。図 19 に作製した MOS 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。以上の結果から、電気化学酸化を用いることで、ドライエッチングを行うことなくノーマリオフ MOS AlGaIn/GaN HEMT を作成することが可能であることがわかった。

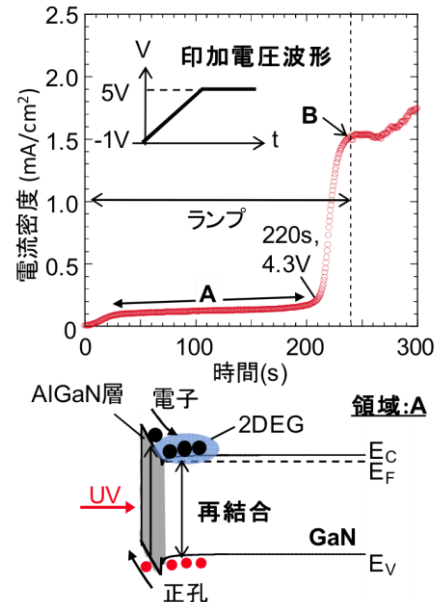


図 18 AlGaIn/GaN ヘテロ構造表面酸化時の反応電流と領域 A に対応するバンド図

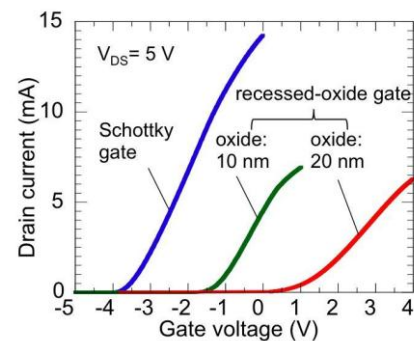


図 19 埋め込み MOS ゲート AlGaIn/GaN HEMT の伝達特性

4. 9 電気化学プロセスによる p-GaN 層の選択エッチング (北大グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

AlGaIn/GaN HEMT において、ノーマリオフ動作を実現する手法の一つとして、p-GaN ゲート構造が注目されている。この構造ではアクセス領域の p-GaN を選択的に取り除く必要があり、低損傷で制御性に優れたエッチング技術が求められる。通常はドライエッチングが用いられるが、プロセス時間によるエッチング量制御はバラツキがあり、また、プラズマ

ロセス中に導入される結晶欠陥の影響を避けられない。ここでは、電気化学手法を用いて p-GaN をエッチングするプロセスを開発した。

電解液は酒石酸をベースとし、pH 調整を行った。p-GaN を陽極とし、三角波状のバイアスを与えたところ、図 20 に示すように、陽極バイアス 1V 程度から反応電流が観測された。バイアス印加にしたがって p-GaN 表面のポテンシャルが引き上げられ、ホールが電解液/p-GaN 界面に供給される。このため p-GaN 表面で酸化反応

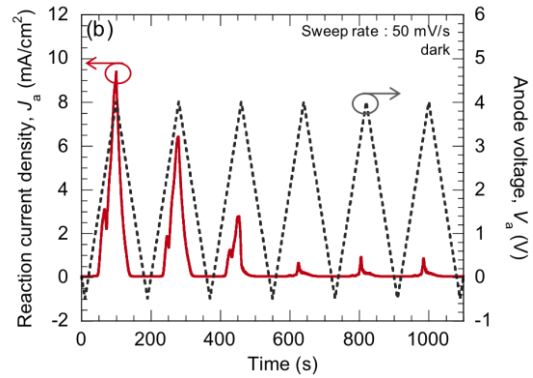


図 20 三角波状の陽極バイアスと電気化学反応電流

が進行することがわかった。バイアスが 1V を下回る時間領域において、形成された酸化膜が溶液中に溶解していると思われる。2サイクル目から電流値が減少しているが、p-GaN 層がエッチングにより薄層化して、p-GaN 層の抵抗が増加したためと考えられる。図 21 に原子間力顕微鏡による断面図を示すが、SiO₂ マスク以外の電解液に露出した部分は、p-GaN 膜厚(100nm)に相当する深さがエッチングされていることが明らかになった。またエッチング面の RMS ラフネスは 1nm 以下であり、比較的平坦な面が得られた。

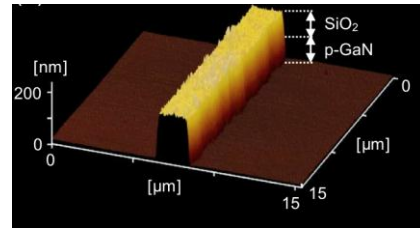


図 21 電気化学エッチング面の AFM 像

図 22 は電気化学プロセスにおける供給電荷量とエッチング深さの関係を示す。供給電荷量が小さい領域でエッチング深さはファラデー則にほぼ従っているが、エッチングは 100nm で停止する。p-GaN 層が全てエッチングされてホール供給が停止することにより、電気化学反応電流が停止したことを示しており、自己停止機構を利用した p-GaN 層のジャストエッチングの可能性が得られた。

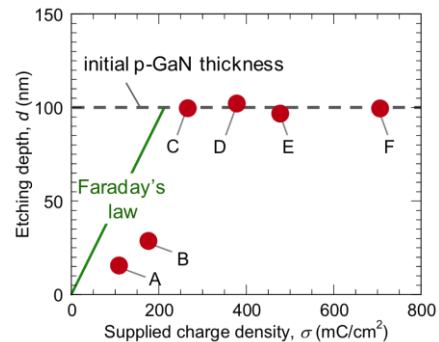


図 22 電気化学プロセスにおける供給電荷量とエッチング深さの関係

4. 10 AlGaIn/GaN HEMT における表面帯電と電流コラプスの関係 (北大グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

AlGaIn/GaN HEMT の実用化には、動作安定性の格段の向上が求められている。特に、電流コラプスの理解と制御は重要であり、アクセス領域の帯電状態と電流コラプスの関係を詳しく調べる必要がある。そこで本報告では、図 23 の2つのゲート電極を有するデュアルゲート AlGaIn/GaN HEMT を作製して、オフ状態ストレス印加後の電流コラプスの評価を、DC およびパルス測定により行った。HEMT には表面パシベーションは行っていない。

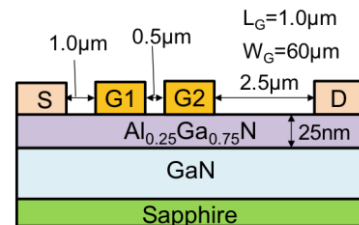


図 23 2重ゲート HEMT

まず、オフ状態を基底バイアスとしたパルス電圧を一方のゲートに加えストレス状態を設定した。基底バイアスは-5V で 500 μs、オンバイアスは-2V で 5 μs とした。この時、ドレイン電圧は 15V 一定とした。このストレス状態を 10 秒間保持した後に、もう一方のゲート駆動により I-V 特性を評価した。G2 にストレスを加え、その後に G1 駆動でドレイン I-V 特性を測定

した場合、図 24 に示すように、線形領域の電流が減少し(オン抵抗が増加し)、飽和電流値に変化は見られなかった。この場合、ストレス時に G2 端から AlGa_{0.25}N 表面への電子注入が生じ、G1 から見てドレイン側に表面帯電が生じるため、負バイアス仮想ゲート効果によるドレイン抵抗増加が起こると考えられる。このように、ドレイン抵抗のみの増加の場合、オン抵抗の増加のみが観測され、飽和電流値に変化はない。一方、G1 にストレスを加え、その後に G2 駆動した場合、オン抵抗の増加と飽和電流値の減少が同時に観測された。G2 から見てソース抵抗の増加が生じるため、飽和電流値の減少が起こる。通常のシングルゲートの電流コラプスの場合、オン抵抗増加と飽和電流減少が同時に観測されることが多い。これは、通常のシングルゲート構造の場合、ドレイン側とソース側のアクセス領域に同時に表面帯電が発生していることを示しており、これまで通説となっていた「ドレイン側仮想ゲートモデル」を修正する必要があることが判明した。

次に、図 25 に示すように、G1 にストレスを加え、その後に G2 駆動で伝達特性を測定した。オフストレス時にドレイン電圧を印加すると、G2 にはストレスを与えていないにも関わらず、しきい値電圧が正バイアス方向にシフトする現象が見られた。この現象を理解するために、2次元ポテンシャル計算を行った。結果を図 26 に示す。この場合、G1 と G2 間の AlGa_{0.25}N 表面に $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の負電荷を仮定した。G1 ストレス中に G1 端から G2 方向に電子注入が生じ、その表面帯電領域が G2 端まで達したと考えた。この表面帯電によって AlGa_{0.25}N 中のポテンシャルが変調され、図 26 に示すように、G2 端で AlGa_{0.25}N 表面のポテンシャルが引き上げられることが分かった。これにより G2 端直下の 2 次元電子密度が減少し、G2 駆動によるしきい値変化を起こしたものと推定される。計算結果によると、この表面帯電量の場合、2 次元電子密度は $9.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ から $7.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ に減少する。

これまで、オフストレス時の表面帯電領域に関する情報は極めて少なかったが、2重ゲート構造を用いることにより、表面帯電領域がサブミクロンまで延伸することが明らかになった。ゲート端から注入された電子が、AlGa_{0.25}N 表面の電子準位を介するホッピング伝導により表面帯電領域が広がるものと思われる。ドレイン電圧が大きいほど、電界支援によりホッピング伝導が増長される。

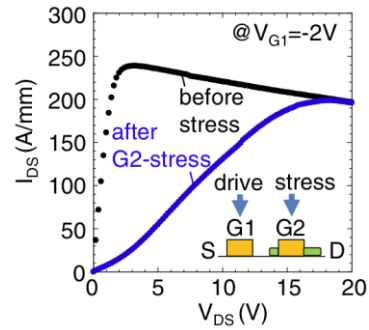


図 24 G2 にストレスを加え、その後に G1 駆動で測定したドレイン I-V 特性

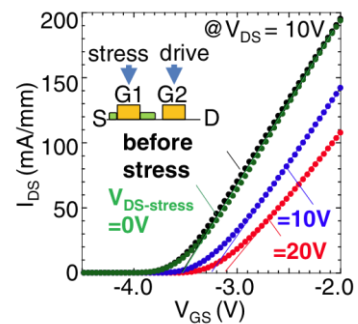


図 25 G1 にストレスを加え、その後に G1 駆動で測定した伝達特性

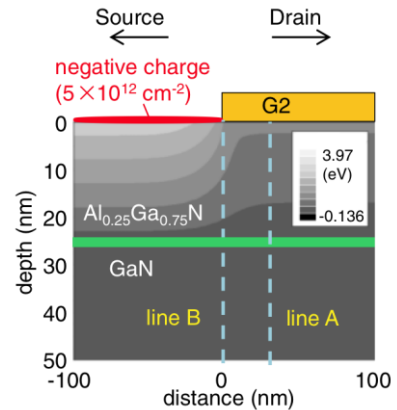


図 26 表面帯電を仮定した 2 次元ポテンシャル分布の計算値

4. 11 多重台形チャネルを有する AlGaIn/GaN HEMT の電流安定性(北大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

図 27 に示す多重台形チャネル (Multi-mesa-channel: MMC) AlGaIn/GaN HEMT は、ゲート側面からの電界効果が加わり、非常に良好な電流制御性を有する。本研究では、この HEMT 特性の詳細な評価と電流安定性の検討を行った。

まず、図 28 に、室温におけるサブスレシヨル領域の伝達特性を示す。通常のプレーナ構造では、伝達特性の傾き(S)は 100 mV/dec 程度であり、他の報告と同様の値であった。一方、MMC 構造では、チャネル幅を小さくするに従い S 値は小さくなり、チャネル幅が 100nm 以下になると横方向の電界制御効果が顕著に発現すると考えられる。この効果は2次元ポテンシャル計算によっても確認された。図 28 に示すように、チャネル幅 50nm の素子では、 S 値は 76 mV/dec となり、室温での理論値 (60 mV/dec) に近い値が得られた。

次に、電流安定性を詳細に評価した。GaN 系 HEMT は横型素子のため、耐圧を高くするためにゲートとドレイン間の距離(L_{GD})を大きくし、ゲート端の電界集中を抑制する手法を取っている。しかし、 L_{GD} の増加は、直接ドレイン抵抗を増大させてオン抵抗を大きくしてしまう。横方向素子においても、オン抵抗と耐圧はトレードオフの関係にある。そこで、 L_{GD} がドレイン I-V 特性に与える影響を比較した。図 29(a)に示したように、通常のプレーナ HEMT では、電流飽和が始まるドレイン電圧(Knee 電圧)は L_{GD} に非常に敏感であり、その増加に従ってオン抵抗も顕著に増加する。 L_{GD} に伴うドレイン抵抗増加を仮定した計算値は、実験値を良く再現した。一方、MMC HEMT では、 L_{GD} を増加させても Knee 電圧の変化は弱く、オン抵抗増加も顕著ではない。なお、図 29(b)の横軸は(b)の 4 倍になっていることに注意されたい。このように、MMC 構造は、G-D 間のアクセス領域の変化に電流特性が影響を受けにくい特長を持つことが判明した。

GaN 系横型素子では、オフ状態での帯電により、オン動作を開始した時の電流低下、いわゆる「電流コラプス」が最大の問題になっている。このコラプス特性を比較した。結果を図 30 に示す。それぞれ、ゲート電圧に-8Vを加えてオフ状態にし、同時にドレイン電圧を印加して 10 秒間ストレス状態を保持した。その後、図に示したそれぞれのゲート電圧により、ドレイン I-V 特性を測定した。プレーナ HEMT では、オフ状態ストレスにより電流値が顕著に低下し、例えばドレイン電圧 40V のストレスにより、オン抵抗はストレスを与える前

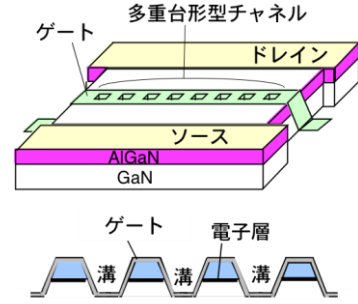


図 27 MMC 構造の模式図

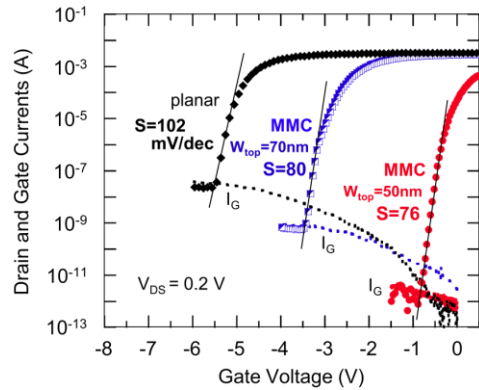


図 28 MMC HEMT のサブスレシヨル領域の伝達特性

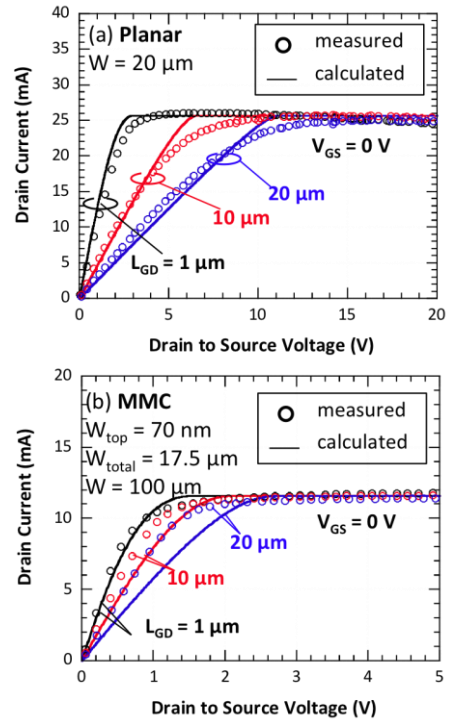


図 29 L_{GD} を変化した場合のドレイン I-V 特性

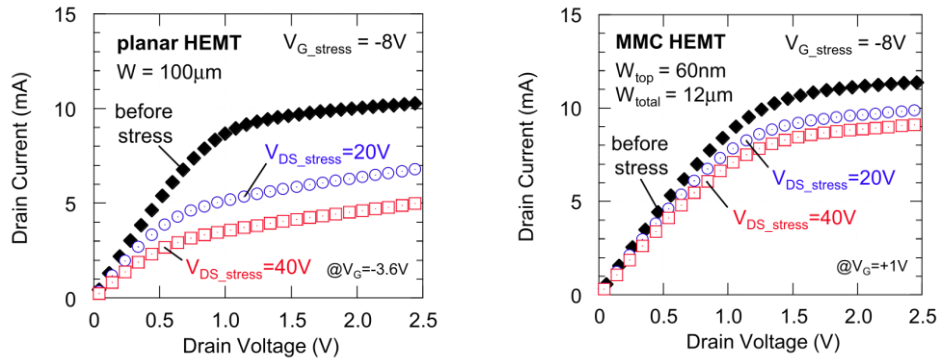


図 30 オフストレスを 10 秒間与えた後に測定したドレイン I-V 特性

の 50%以上に増加した。しかし、MMC HEMT は、オフ状態ストレス後も電流変動は小さく、ストレス後のオン抵抗増加率はプレーナ HEMT に比べて大きく抑制できることがわかった。このように、MMC HEMT は、アクセス領域抵抗の変化に影響が少なく、また電流コラプスにも耐性を持つことが明らかになった。その要因は 2 つ考えられる。第一に、図 27 の構造図に示すように、MMC 構造では、素子の幾何学的ゲート幅よりも実効チャンネル幅が小さい。このため、G-D 間のアクセス抵抗の影響を受けにくい。しかし、詳しいシミュレーションと実験により、この要素のみで実験結果を説明することはできないことがわかった。MMC 構造は 100nm 以下のチャンネル幅を持つため、各々のナノチャンネルのインピーダンスは極めて高い。例えば、チャンネル幅 50nm、ゲート長 $0.5 \mu\text{m}$ の MMC では、チャンネルインピーダンスは数 $\text{k}\Omega$ と見積もられ、この値は、ドレインアクセス抵抗より 2 ケタ程度大きい。この高インピーダンスチャンネルが、アクセス抵抗の影響を抑制し、図 29 および図 30 の結果が得られたものと考えられる。

4. 12 p-AlGaIn/i-AlGaIn/GaN 構造の結晶成長 (豊田中研グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

ノーマリオデバイス実現のための有力な手法の一つとして p 型 AlGaIn 層の導入を検討した。これを実現するためには AlGaIn 中に均一な p 型不純物ドーピングが必要であるが、唯一の p 型不純物である Mg には表面偏析効果と、チャンバー内への付着を起こす性質があり、均一な不純物ドーピングが困難であった。そこで、従来の不純物ドーブ法に代わる新たなパルスドーブ法を検討した。

実験には、GaN、AlGaIn の原料としてトリメチルガリウム(TMGa)、トリメチルアルミニウム(TMAI)、アンモニア(NH_3)を用い、p 型ドーパント Mg の原料として Cp_2Mg を用いた。 Cp_2Mg の供給方法として TMG、TMA と一緒に供給する従来の連続ドーブ法、および新たなパルスドーブ法を比較した。図 31 に SIMS 測定より得られた Mg の密度分布を示す。連続ドーブ法では Mg のドーピング量は供給開始から 15 nm 厚以上かけて緩やかに立ち上がり、その後

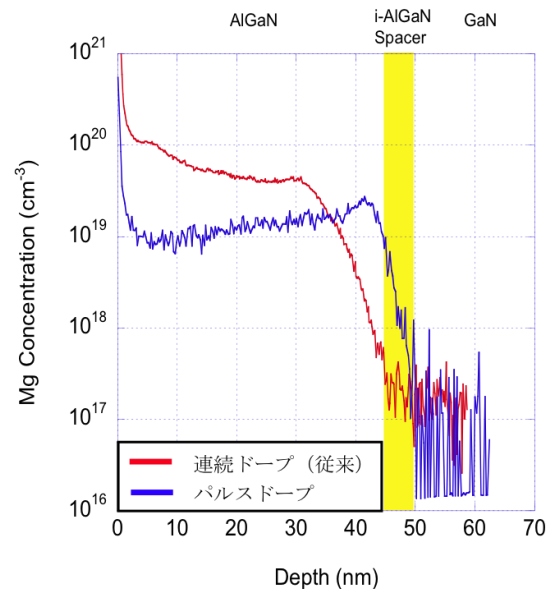


図 31 パルスドーブ法による AlGaIn 層の Mg 密度分布と連続ドーブ法の Mg 密度分布の比較

では Mg のドーピング量は供給開始から 15 nm 厚以上かけて緩やかに立ち上がり、その後

も $4 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ まで不均一に分布した。緩やかな立ち上がりは Mg のチャンバー内への付着が固層への取り込みを阻害するために生じ、不均一な分布は表示面偏析効果によって生じたと考えられる。これに対してパルスドーピングは i-AlGaN スペース層成膜直後に一定時間 Cp_2Mg を供給し、その後 Cp_2Mg の供給を断って p-AlGaN の成長を開始する手法である。パルス供給中に Mg をチャンバー壁に十分付着させて安定化させ、表面偏析効果を積極的に利用した均一なドーピングを狙った。図 31 に示すようにパルスドーピングによって p-AlGaN/i-AlGaN 界面で Mg 濃度は急峻に立ち上がり、その濃度も比較的均一に分布した。さらに Cp_2Mg 供給量を変化させることで、 $2 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の任意の濃度でドーピング制御が可能となった。

4. 13 低転位高抵抗 GaN 基板上への AlGaIn/GaN 構造の結晶成長(豊田中研グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

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 32 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} 台の 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 $1.2 \mu\text{m}$ 以上成長すると、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、室温で $1740 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 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。また同試料の AFM 測定を行ったところ、原子ステップが等間隔に並ぶ完全なステップフローモフォロジーが確認された(図 33)。この良質なモフォロジーが界面ラフネス散乱を抑制し、2 次元電子層の移動度を向上させたと考えられる。一方で、基板と成長層の界面にはピーク濃度で $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の Si の偏析が観測された。これは、クリーンルーム雰囲気からの有機 Si の付着に起因する。高電圧を印加した場合、この Si 偏析層はオフリーク電流に寄与し、高品質の高抵抗基板を用いた場合であっても C ドープ等の Si 補償技術を用いるか、Si 偏析そのものを抑制することが必要であることが明らかとなった。

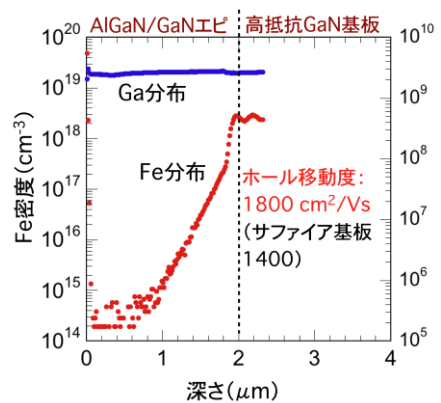


図 32 Feドープ高抵抗 GaN 基板上に成長した AlGaIn/GaN 構造の SIMS 分析

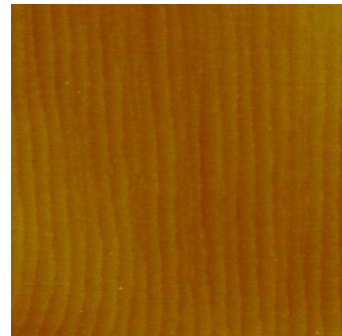


図 33. Feドープ高抵抗 GaN 基板上 AlGaIn/GaN 構造の $2 \mu\text{m}$ 角 AFM 像

4. 14 原子層堆積 Al_2O_3 膜の信頼性評価(豊田中研グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

Al_2O_3 をゲート絶縁膜に用いた GaN MOS ゲート構造はノーマリオフ動作デバイスを得るための有効な構造である。実用化するためには、ゲート絶縁膜の信頼性、特に絶縁膜寿命の把握が重要である。その目的で Al_2O_3 を用いた MIS キャパシタを作製し、その絶縁膜寿命を評価した。

図 34 は作製した MIS キャパシタの断面構造図である。MOS ゲート構造は AlGaIn/GaN 構造におけるゲート部の AlGaIn をエッチングで除去したリセス構造を作製した後、ゲート酸

化膜を形成する。そのため、デバイスと同じ酸化膜-半導体界面を形成するために、サファイア基板上に n 型 GaN を成長し、その表面をリセス構造を作製するドライエッチング条件でエッチング処理を施した。その上に原子層堆積 (Atomic Layer Deposition: ALD) 法により Al_2O_3 を成膜した。 Al_2O_3 の膜厚は 73.5nm で、屈折率と比誘電率はそれぞれ 1.65、8.9 であり、 Al_2O_3 の物性値に近い値であった。

エッチング加工した表面に形成した絶縁膜の寿命を評価するために、作製した MIS キャパシタの絶縁膜経時破壊 (Time-dependent dielectric breakdown: TDDB) 評価を行った。この評価では、ゲート電極に一定の正ストレス

電圧を印加し、絶縁破壊に至るまでの時間を測定している。測定は、室温と 250℃で行った。図 35 が評価した TDDB 特性であり、縦軸に絶縁破壊に至るまでの時間、横軸に絶縁膜中のストレス電界強度をプロットしている。室温時の評価結果より、3MV/cm 時の寿命は 4 万年以上であると推定される。一方、250℃時では、推定寿命はおよそ $10^2 \sim 10^3$ 秒と大幅に低下することがわかった。また、比較のためにドライエッチングを施していない n 型 GaN 上に作製した MIS キャパシタでも測定を行った。その結果、室温時の TDDB 特性は、エッチングを施した n 型 GaN 上の MIS キャパシタの特性と一致しており、エッチングによる寿命への影響はないことを確認した。

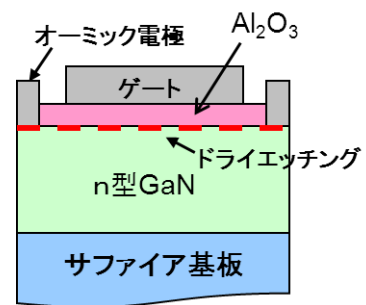


図 34 MIS キャパシタの断面構造図

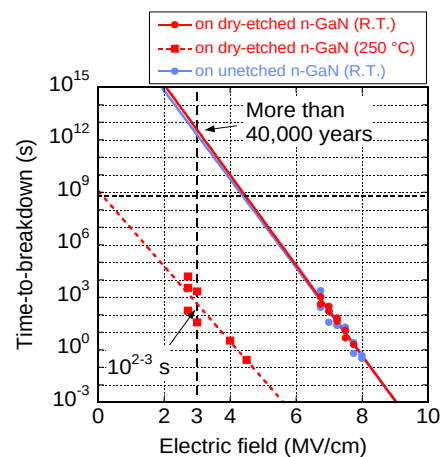


図 35 MIS キャパシタの TDDB 特性

4. 15 アンペア級動作 AlGaIn/GaN HEMT の作製とパッケージ実装 (豊田中研グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

AlGaIn/GaN HEMT の特徴を生かしたパワー回路の開発に使用するため、Si 基板上に成長した AlGaIn/GaN ヘテロ構造を用い、デバイスを試作した。パワー回路の検討には、電流として数 A のデバイスが必要となる。そこで楕形電極の採用により、ノーマリオン動作ではあるが、アンペア級のドレイン電流が流れる HEMT を作製した。

作製したデバイスの平面図を図 36 に示す。今回の試作では、フリーホイールダイオードとして使われるショットキーダイオード(SBD)もトランジスタに隣接して同一基板上に作製した。HEMT の断面構造を図 37 に示す。AlGaIn/GaN HEMT はショットキーゲート構造のノーマリオン動作デバイスで、ゲート長 $2\mu\text{m}$ 、ゲート幅 40mm とした。図 38 に試作した AlGaIn/GaN HEMT の I_d-V_d 特性を示す。HEMT の閾値電圧は -6V で、ゲート電圧 0V におけるドレイン電流は 3A 以上を達成した。試作したデバイスは、切り出して冷却可能なセラミック基板に組み付けた。試作デバイスは HEMT と SBD を集積しているので、その構造を

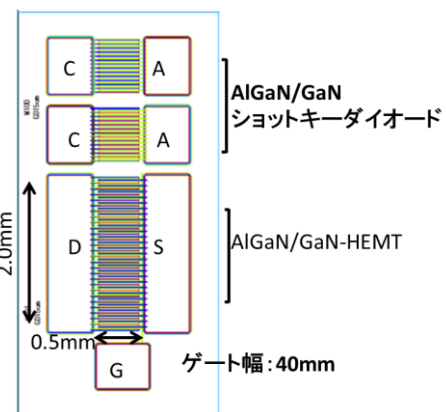


図 36 試作デバイスの平面図

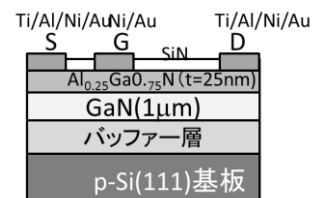


図 37 AlGaIn/GaN HEMT の断面構造

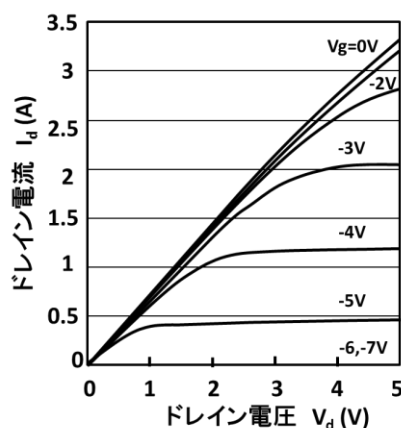


図 38 試作した AlGaIn/GaN HEMT の I_d - V_d 特性

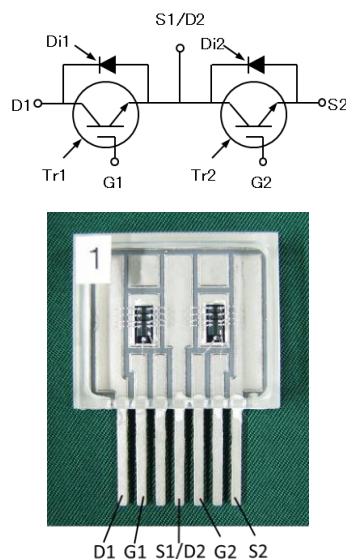


図 39 試作デバイスを組み付けた写真とその等価回路

活かすため、インバータの上下アームを単一のセラミック基板に組み付けるよう、パターンを設計した。組み付けた基板の写真と等価回路を図 39 に示す。この基板にキャップを付け、パッケージとして回路検討用に供給した。

4. 16 アンペア級 MMC HEMT の設計と試作(豊田中研グループ)

(1)研究実施内容及び成果

MMC HEMT 評価を目的にパターン設計を実施した。本チップには、メサ幅等の MMC 構造依存性を確認するシングルゲート TEG を初め、コンタクト抵抗評価用 TLM パターン、キャパシタ TEG 等を盛りこみ、最大チャネル幅 30mm の大電流素子も配置した。

素子は Si 基板上に形成したショットキーゲート型 HEMT で、ゲート電極には Au/Ni の積層金属を用いた。図 40 はゲート幅 $565\mu\text{m}$ の TEG のレイアウト写真である。この MMC HEMT の伝達特性を、図 41 に示す。図より、比較的大いメサ幅 200nm の MMC 構造においてもサブスレッショルド電流の立ち上がり電圧が正方向にシフトし、メサ幅の縮小に伴いさらにサブスレッショルド電流の立ち上がる電圧がより正方向にシフトすることがわかる。これは、図 28 に示した小電流 HEMT と同様の結果となり、MMC ゲートの横方向電界効果が大電流構造でも再現することができた。

また、ピンチオフ時のリーク電流も MMC 構造のない従来構造と比べ良好なことがわかる。これはピンチオフ時のリーク電流成分のうち、チャネル部でのリーク電流成分が MMC 構造によるポテンシャル制御により抑制されたためと考えられる。以上から、MMC 構造はしきい値電圧の正方向シフトが可能なののみならず、ピンチオフ時におけるチャネル部のリーク電流抑制にも効果があることが確認された。

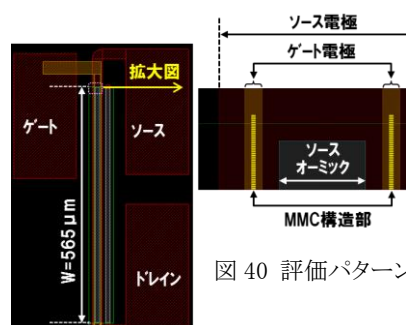


図 40 評価パターン

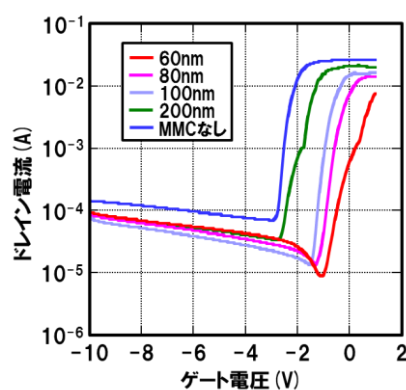


図 41 伝達特性のメサ幅依存性

図 42 は、ゲート幅 7.3mm 素子(アクティブ面積 0.37mm²)のドレイン I-V 特性を示す。最大で 1.9A 以上の大電流動作が確認でき、アンペア級素子を実現した。また、ゲート電圧 -2V 以下で良好なピンチオフ特性も確認できた。ゲート電圧 +1V における規格化オン抵抗は 4.4m Ω ・cm²であった。図で明らかのように、1A 以上の大電流動作においても低い Knee 電圧が得られており、MMC 構造の特長を示した結果である。

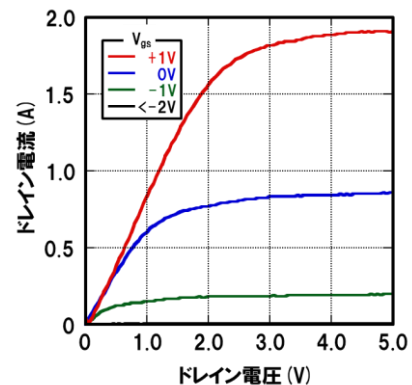


図 42 アンペア級 MMC HEMT のドレイン I-V 特性

4. 17 GaN AC/AC コンバータの損失評価(山口大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

GaN HEMT と GaN ショットキーバリアダイオード (GaN SBD) を用いた AC/AC ダイレクトコンバータを設計し、回路シミュレーションを行うことにより、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 HEMT と GaN ショットキーダイオードの I-V 特性、C-V 特性およびスイッチング特性を実測し、これに基づき回路シミュレータである SPICE 用のデバイスモデルを作成することによりコンピュータ上で素子の動作を良好に模擬できることを確認した。次に図 43 に示す AC/AC ダイレクトコンバータを設計し、GaN HEMT+GaN SBD の組み合わせで回路を構成した場合と Si-IGBT+Si ファストリカバリダイオード (FRD) の場合について電力変換効率を比較した。同図のダイレクトコンバータは図中の半導体スイッチ Q_1 、 Q_2 を 24kHz でスイッチングすることにより、60Hz の交流を整流することなく 24kHz の高周波交流に直接変換するコンバータである。

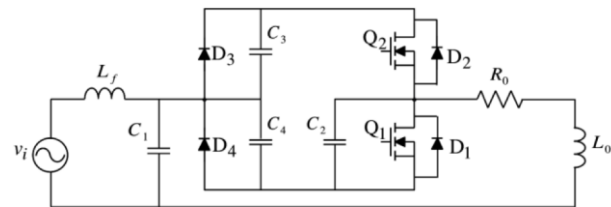


図 43 AC/AC ダイレクトコンバータの回路図

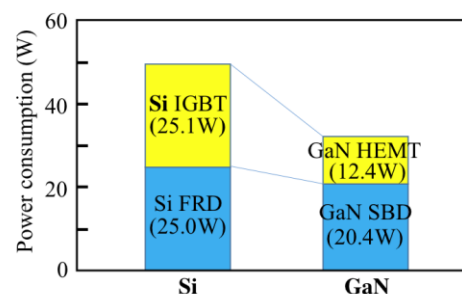


図 44 入力 1.4kW 時の損失比較

入力電力を 0.4kW から 1.4kW まで変えたときの電力変換効率を計算した。すべての入力電力において、GaN デバイスを用いた場合の効率は約 98% となり、Si デバイスを用いた場合(約 97%)に比べ 1% 程度向上している。図 44 に入力電力が 1.4kW の場合の各素子の損失分析を行った結果を示す。Si IGBT および Si FRD の損失はそれぞれ 25.1W、25.0W であるのに対し、GaN HEMT および GaN SBD の損失はそれぞれ 12.4W、20.4W となっており、GaN デバイスを使用することにより、スイッチ部では 50%、ダイオード部では 20% 程度の損失低減が実現できている。以上により、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。

4. 18 GaN インバータ用のゲート駆動回路設計・製作(山口大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

市販の MOSFET 用駆動 IC の出力にキャパシタとダイオードを接続するチャージポンプ方式を適用することにより、GaN インバータ用のノーマリオン GaN HEMT のスイッチングを可能とした。半導体スイッチを駆動するためのゲートドライブ (GD) 回路は、通常、スイッチングによるサージを抑制するためゲート抵抗を介してゲート容量を充電しているため、スイッチング周波数に比例して GD 回路の電力損失が大きくなる。

これを解決するため、GaN HEMT のゲート容量に充電した電荷を効果的に電源に回生する「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 45 に示す。図のようにゲート抵抗をインダクタ L_T に置き換え、 L_T と C_{iss} の LC 共振を利用してゲート容量 C_{iss} を充電する。そして、共振により 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。さらに、共振の周期を L_T により設計することができるため、サージを抑制しつつスイッチングを高速化することが可能となる。

HEMT のゲート容量を 100pF とし、駆動用 IC の電流定格を超えないよう共振インダクタおよびチャージポンプ用キャパシタの値をそれぞれ $L_T=90\text{nH}$ 、 $C_b=10\text{nF}$ に決定し、シミュレーションを行った。E=20V、 $V_{in}=40\text{V}$ 、スイッチング周波数 1MHz としたとき、ゲート抵抗を用いる駆動回路に比べ損失が約 50% 低減できることが明らかになった。実際に共振形駆動回路を作製し、回路動作実験を行った結果、図 46 に示すようにターンオン時間は 7.2ns となり、非常に良好なスイッチ特性を実現することができた。

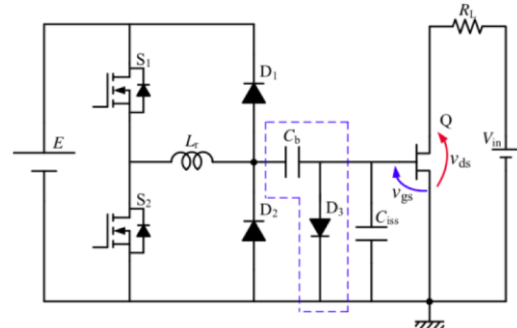


図 45 ノーマリオン AlGaIn/GaN HEMT に適用可能な共振型ゲート駆動回路

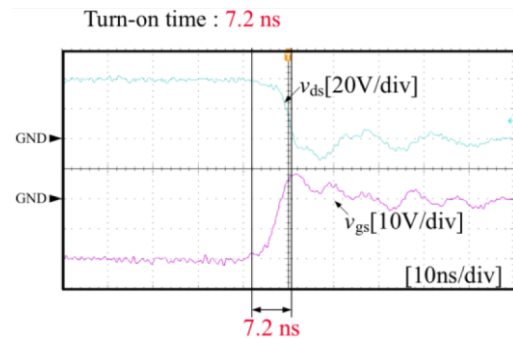


図 46 ターオン時のゲート電圧およびドレイン電圧波形

4. 19 GaN インバータ実装・動作試験(山口大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

太陽電池用のパワーコンディショナを想定し、DC/AC インバータ回路の設計・製作と動作実験を行った。図 47 に回路図を示す。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 とし、1個の GaN HEMT を駆動し、入力 DC25V を 2 倍の DC50V に昇圧してい

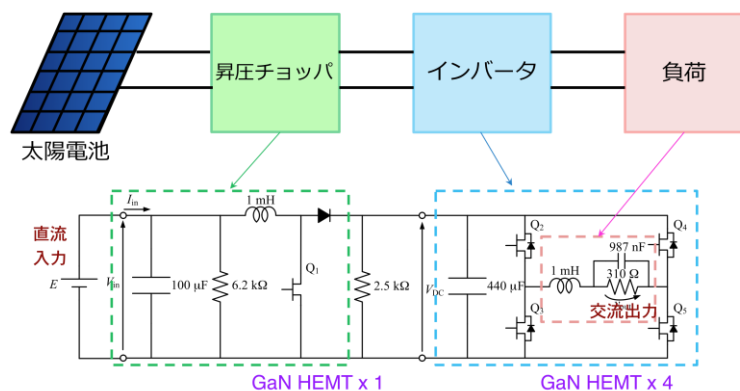


図 47 AlGaIn/GaN HEMT による DC/AC インバータ回路

る。後段はフルブリッジインバータであり、4個の GaN HEMT を三角波比較 PWM 方式によりスイッチング周波数 50kHz で制御し、出力負荷 310Ω に遮断周波数 5kHz のローパスフィルターを接続することにより 60Hz の正弦波を出力する。図中の 5 個のダイオードは全て GaN SBD である。前段および後段の合計 5 個の HEMT のゲート制御信号は全てルネサス社のマイコンである SH7125 により出力している。

インバータの出力電圧波形を図 48 に示す。図より、周波数 60Hz 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。今後は、より高振幅での動作実験を行い、MPPT(最大電力点追従)制御機能を追加するとともに、損失評価を基盤として、最適設計を実施する。

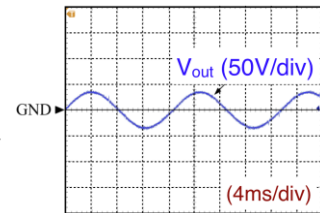


図 48 インバータ出力波形

4. 20 13.56MHz GaN インバータの設計と動作試験(山口大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

GaN HEMT の高速スイッチングの特長を活かすため、13.56MHz 高周波出力の E 級アンプの設計・製作・評価を行った。図 49 に回路図を示すが、E 級アンプはインダクタおよびキャパシタの共振現象を利用し、直流入力から高周波交流を出力する電力変換回路である。この方式では、共振周波数を適切に設計することにより、スイッチング時の損失を低減するソフトスイッチングが実現できることから、高い電力変換効率が可能である。

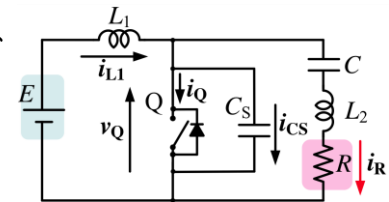


図 49 E 級アンプの基本回路図

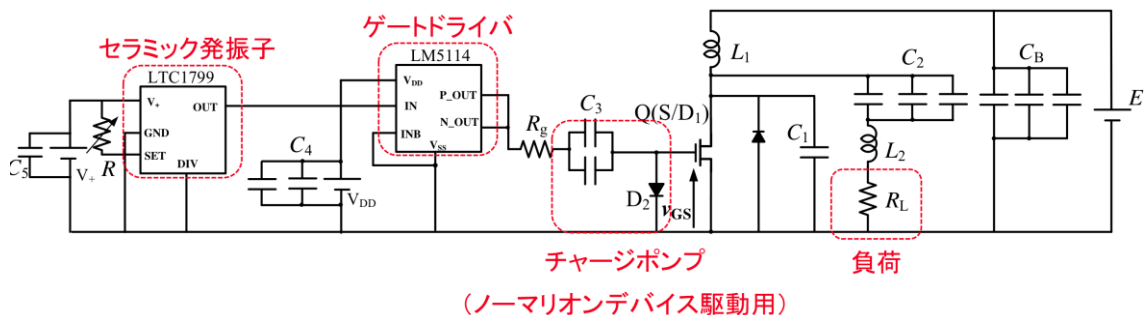


図 50 E 級アンプを含むインバータ回路の全体図

シミュレーションにより適切な回路定数を決定し、効率を計算すると 93.8% となり、既存の Si-MOSFET を用いた製品の効率 85% を大幅に向上できることが確認できた。図 50 の回路を製作し、実験を行った。セラミック発振子により 13.56MHz のパルスを発生し、チャージポンプ方式によりノーマリオン GaN HEMT を駆動している。キャパシタを並列に複数個接続しているのは、寄生の抵抗およびインダクタンスを抑制するためである。また、共振インダクタは鉄損などの損失を低減化するため、直径 1mm の導線を巻いた空心コイルを使用している。こ

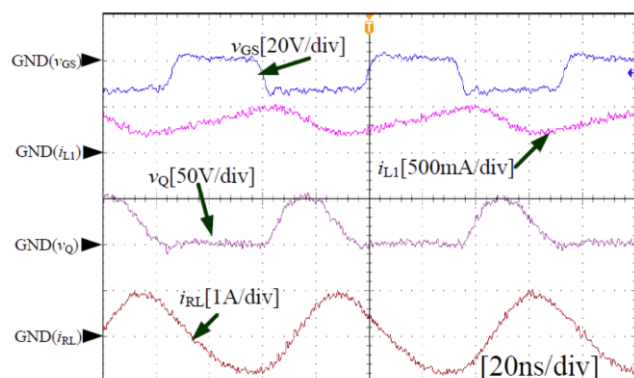


図 51 実験で得られた各信号波形

のときの実験波形を図 51 に示す。図中の波形は上から順にゲートソース間電圧、共振インダクタ電流、ドレインソース間電圧、負荷電流を表す。図に示すように、13.56MHz の負荷電流が得られており、GaN HEMT の高周波特性が有用であることが確認できた。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0 件、国際(欧文)誌 39 件)

- 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**, 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**, 132104 (2010). (DOI:10.1063/1.3368689)
- 3) 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**, 101001 (2010). (DOI: 10.1143/JJAP.49.101001)
- 4) 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**, 080201 (2010). (DOI: 10.1143/JJAP.49.080201).
- 5) D. Gregušová, 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**, 106104 (2010). (DOI:10.1063/1.3428492)
- 6) 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**, 222103 (2010). (DOI: 10.1063/1.3506583)
- 7) 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**, 021002 (2011). (DOI: 10.1143/APEX.4.021002)
- 8) 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)
- 9) M. Akazawa, B. Gao, T. Hashizume, M. Hiroki, S. Yamahata, and N. Shigekawa, "Measurement of valence-band offsets of InAlN/GaN heterostructures grown by metal-organic vapor phase epitaxy", J. Appl. Phys. **109**, 013703 (2011). (DOI: 10.1063/1.3527058)
- 10) C. Mizue, Y. Hori, M. Miczek, and T. Hashizume, "Capacitance-voltage characteristics of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ 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)
- 11) 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)

- 12) M. Tajima and T. Hashizume, “Impact of gate and passivation structures on current collapse of AlGaIn/GaN HEMTs under off-state-bias stress”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 061001 (2011). (DOI: 10.1143/JJAP.50.061001)
- 13) M. Akazawa, B. Gao, T. Hashizume, M. Hiroki, S. Yamahata, and N. Shigekawa, “Al_{0.44}Ga_{0.56}N spacer layer to prevent electron accumulation inside barriers in lattice-matched InAlN/AlGaIn/AlN/GaN heterostructures”, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 080201 (2011). (DOI: 10.1063/1.3578449)
- 14) P. Bidzinski, M. Miczek, B. Adamowicz, C. Mizue and T. Hashizume, “Impact of interface states and bulk carrier lifetime on photocapacitance of metal/insulator/GaN structure for ultraviolet light detection”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 04DF08 (2011). (DOI:10.1143/JJAP.50.04DF08)
- 15) T. Narita, D. Kikuta, N. Takahashi, K. Kataoka, Y. Kimoto, T. Uesugi, T. Kachi, and M. Sugimoto, “Study of etching-induced damage by X-ray photoelectron spectroscopy”, *Physica Status Solidi A* **208**, 1541-1544 (2011). (DOI: 10.1002/pssa.201000952)
- 16) 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/GaN structure”, *Solid State Commun.* **151**, pp.830-833 (2011). (DOI: 10.1016/j.ssc.2011.03.021)
- 17) M. Okamoto, G. Toyoda, E. Hiraki, T. Tanaka, T. Hashizume, and T. Kachi, “Loss evaluation of an AC-AC direct converter with a new GaN HEMT SPICE model” *The IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp.1795-1800 (2011). (DOI: 10.1109/ECCE.2011.6064002)
- 18) S. Kim, Y. Hori, W.-C. Ma, D. Kikuta, T. Narita, H. Iguchi, T. Uesugi, T. Kachi, and T. Hashizume, “Interface properties of Al₂O₃/n-GaN structures with inductively coupled plasma etching of GaN surfaces”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 060201 (2012). (DOI: 10.1143/JJAP.51.060201)
- 19) K. Ohi and T. Hashizume, “Reduction of current collapse in the multi-mesa-channel AlGaIn/GaN HEMT”, *Phys. Status Solidi (C)* **9**, pp.898-902 (2012). (DOI: 10.1002/pssc.201100301)
- 20) Y. Hori, C. Mizue and T. Hashizume, “Interface state characterization of ALD-Al₂O₃/GaN and ALD-Al₂O₃/AlGaIn/GaN structures”, *Physica Status Solidi C* **9**, 1356-1360 (2012). (DOI: 10.1002/pssc.201100656)
- 21) T. Narita, D. Kikuta, H. Iguchi, K. Ito, K. Tomita, T. Uesugi, and T. Kachi, “Reduction of peak electric field in GaN HEMT with carbon doping layer”, *Physica Status Solidi C* **9**, 915-918 (2012). (DOI: 10.1002/pssc.201100331)
- 22) D. Kikuta, T. Narita, N. Takahashi, K. Kataoka, Y. Kimoto, K. Tomita, T. Uesugi, and T. Kachi, “Study on post-annealing process on for p-type GaN using HAX-PES”, *Physica Status Solidi C* **9**, 927-930 (2012). (DOI: 10.1002/pssc.201100335)
- 23) C.-Y. Hu and T. Hashizume, “Non-localized trapping effects in AlGaIn/GaN heterojunction field-effect transistors subjected to on-state bias stress”, *J. Appl. Phys.* **111**, 084504 (2012) (DOI: 10.1063/1.4704393)
- 24) M. Matys, B. Adamowicz, and T. Hashizume, “Determination of the deep donor-like interface

state density distribution in metal/ Al_2O_3 /n-GaN structures from the photocapacitance–light intensity measurement”, Appl. Phys. Lett. **101**, 231608 (2012). DOI:10.1063/1.4769815]

- 25) Z. Yatabe, Y. Hori, S. Kim, and T. Hashizume, “Effects of Cl_2 -Based Inductively Coupled Plasma Etching of AlGaIn on Interface Properties of Al_2O_3 /AlGaIn/GaN Heterostructures”, Appl. Phys. Express **6**, 016502 (2013). DOI:10.7567/APEX.6.016502
- 26) D. Kikuta, T. Narita, K. Kutsuki, T. Uesugi, and T. Kachi, “Reliability Evaluation of Al_2O_3 Deposited by Ozone-Based Atomic Layer Deposition on Dry-Etched n-Type GaN”, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 08JN19-1-3 (2013). DOI: 10.7567/JJAP.52.08JN19
- 27) T. Ishibashi, M. Okamoto, E. Hiraki, T. Tanaka, T. Hashizume and T. Kachi, “Resonant Gate Driver for Normally-on GaN High-Electron-Mobility Transistor”, Proc. 5th Annual International Energy Conversion Congress and Exhibition for the Asia/Pacific region (ECCE Asia Downunder 2013), pp.365-371, DOI: 10.1109/ECCE-Asia.2013.6579122
- 28) K. Ohi, J. T. Asubar, K. Nishiguchi, and T. Hashizume, “Current stability in multi-mesa-channel AlGaIn/GaN HEMTs (Invited paper)”, IEEE Trans. Electron Devices, **60**, 2997-3004 (2013), DOI: 10.1109/TED.2013.2266663
- 29) T. Ishibashi, M. Okamoto, E. Hiraki, T. Tanaka, T. Hashizume D. Kikuta and T. Kachi, “Experimental Validation of Newly Fabricated Normally-on GaN High-Electron-Mobility Transistor”, Proc. IEEE 2013 Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2013), pp.1584-1591, DOI: 10.1109/ECCE.2013.6646894
- 30) Y. Hori, Z. Yatabe, and T. Hashizume, “Characterization of interface states in Al_2O_3 /AlGaIn/GaN structures for improved performance of high-electron-mobility transistors”, J. Appl. Phys. **114**, 244503-1-8 (2013), DOI: 10.1063/1.4859576
- 31) M. Matys, B. Adamowicz, Y. Hori, and T. Hashizume, “Direct measurement of donor-like interface state density and energy distribution at insulator/AlGaIn interface in metal/ Al_2O_3 /AlGaIn/GaN by photocapacitance method”, Appl. Phys. Lett. **103**, 021603-1-4 (2013), DOI:10.1063/1.4813407
- 32) T. Kachi, “Current status of GaN power devices”, IEICE Electronics Express (ELEX), **10**, No.21, pp.1-12, (2013). (DOI: 10.1587/elex. 10.20132005)
- 33) J. Asubar, K. Ohi, K. Nishiguchi, and T. Hashizume, “Improved current stability in Multi-Mesa-Channel AlGaIn/GaN transistors”, Physica Status Solidi C **11**, 857-861 (2014), DOI 10.1002/pssc.201300672
- 34) K. Nishiguchi, J. T. Asubar, and T. Hashizume, “Evaluation of off-bias-stress induced surface charging at AlGaIn/GaN surface using a dual-gate transistor structure”, Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 070301 (2014). DOI: 10.7567/JJAP.53.070301
- 35) J. T. Asubar, Z. Yatabe, and T. Hashizume, “Reduced Thermal Resistance in AlGaIn/GaN Multi-Mesa-Channel High Electron Mobility Transistors”, Appl. Phys. Lett. **105**, 053510-1-5 (2014). DOI:10.1063/1.4892538
- 36) Z. Yatabe, Y. Hori, W. C. Ma, J. T. Asubar, M. Akazawa, T. Sato and T. Hashizume, “Characterization of Electronic States at Insulator/(Al)GaIn Interfaces for Improved Insulated Gate and Surface Passivation Structures of GaN-based Transistors”, Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 100213-1-10 (2014). DOI:10.7567/JJAP.53.100213
- 37) M. Okamoto, K. Matsuzaki, H. Yamada, T. Tanaka and T. Hashizume, “13.56-MHz Class-E

RF Power Amplifier Using Normally-on GaN HEMT: Experimental Validation of Newly Fabricated Normally-on GaN High-Electron-Mobility Transistor”, Proc. of 40th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON2014), Dallas, USA, Oct. 2014 (掲載決定)

- 38) Z. Yatabe, J. T. Asubar, T. Sato, and T. Hashizume, “Interface Trap States in $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ Structure Induced by ICP Etching of AlGaIn Surfaces”, Physica Status Solidi A (掲載決定), DOI 10.1002/pssa.201431652
- 39) T. Ishibashi, M. Okamoto, E. Hiraki, T. Tanaka, T. Hashizume, D. Kikuta and T. Kachi, “Experimental validation of normally-on GaN HEMT and its gate drive circuit”, IEEE Trans. Industry Application **51** (掲載決定), DOI 10.1109/TIA.2014.2369818

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

- 1) 橋詰 保: GaN電子デバイスにおける絶縁膜界面制御(最近の展望)、応用物理、81巻、6号、479-484 (2012).
- 2) 橋詰 保、谷田部然治、佐藤威友、「窒化物半導体異種接合の界面評価と制御(研究紹介)」、表面科学、35巻、2号、2013.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 17 件、国際会議 23 件)

- 1) T. Hashizume, "Characterization and control of GaN and AlGaIn surfaces for high-performance GaN-based transistors", Huang Kun Forum, Chinese Academy of Science, Nov. 6, 2009, Beijing, China.
- 2) 橋詰 保、「窒化物半導体の MIS 界面電子準位」、日本学術振興会第 154 委員会・第 162 委員会合同研究会、2009 年 10 月 26 日、東京。
- 3) 橋詰 保、「窒化物半導体の特徴とデバイス展開」、第 27 回無機材料に関する最近の研究発表会-材料研究の最前線から-、2010 年 1 月 25 日、東海大学校友会館、東京。
- 4) T. Hashizume, "Effects of plasma processing on surface properties of GaN and AlGaIn", International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma-2010), Mar. 8-10, Nagoya, Japan.
- 5) T. Uesugi and T. Kachi, "GaN Power Switching Devices for Automotive Applications", International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma-2010), Mar. 8-10, Nagoya, Japan.
- 6) 橋詰保「AlGaIn の深い電子準位と表面ポテンシャル」、応用物理学会応用電子物性分科会研究会、2010 年 5 月 21 日、大阪大学銀杏会館、大阪。
- 7) T. Hashizume and K. Ohi, “Current controllability and stability of multi-mesa-channel AlGaIn/GaN HEMTs”, 2010 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), Osaka, May 13-14, 2010.

- 8) T. Kachi, “Recent Advances of GaN Power Transistors for Automotive Applications”, 34th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (34th WOCSDICE), May 16-19, 2010, Darmstadt/Seeheim, Germany.
- 9) 上杉 勉、「自動車用 GaN パワーデバイス」、第8回窒化物半導体応用研究会、2010年6月24日、名古屋工業大学、名古屋。
- 10) T. Hashizume, Y. Hori and C. Mizue, “Interface control technologies of GaN-based MOS structures for high-efficiency power switching transistors”, Workshop on Dielectrics in Microelectronics (WoDiM 2010), Bratislava, Slovak, June 28-30, 2010.
- 11) 橋詰 保「窒化物半導体の表面・界面制御とパワートランジスタ展開」、日本学術振興会アモルファス・ナノ材料第147委員会第108回研究会、2010年7月9日、主婦会館、東京。
- 12) 橋詰 保「MOVPE 法による AlGaIn 中の深い準位」、応用物理学会シンポジウム（ワイドギャップ窒化物 AlGaIn の結晶評価と深紫外光デバイス応用）、2010年9月16日、長崎大学、長崎。
- 13) M. Kanechika, T. Uesugi and T. Kachi, “Advanced SiC and GaN Power Electronics for Automotive Systems”, International Electron Device Meeting (IEDM-2010), Dec.6-8, 2010, San Francisco, USA.
- 14) T. Kachi, “Power Electronics for Hybrid and All Electric Automobiles”, SPIE 2011 Photonics West, Jan. 22-27, 2011, San Francisco, USA.
- 15) M. Kanechika, T. Uesugi and T. Kachi, “GaN devices for hybrid vehicles”, 38th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2011), May 22-26, 2011, Berlin, Germany.
- 16) 橋詰 保、「GaN ヘテロ接合トランジスタの次世代インバータ展開」、日本金属学会第3分科会シンポジウム「環境・医療・IT 調和型デバイス、及び材料の最前線」、2011年9月22日、科学技術館、東京。
- 17) T. Hashizume, Y. Hori, and C. Mizue, “Characterization and control of GaN-based MOS structures”, 2011 Meijo International Symposium on Nitride Semiconductors (MSN 2011), Dec. 10, 2011, Nagoya.
- 18) J. T. Asubar and T. Hashizume, “GaN transistors for next-generation power conversion system”, International Symposium on Technology for Sustainability, King Mongkut's Institute of Technology-ISTS2012, Jan. 26-28, 2012, KMITL, Bangkok, Thailand.
- 19) T. Tanaka, M. Okamoto, and E. Hiraki, “Let’s Feel “Power Electronics” Familiar! – A Key Technology to Save Environment on Earth,” International Symposium on Technology for Sustainability - ISTS2012, Jan. 26-28, 2012, KMITL, Bangkok, Thailand.
- 20) T. Hashizume, “GaN-based MOS structures processed with plasma-assisted dry etching”, 4th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2012), Mar. 5-8, 2012, Nagoya.
- 21) 橋詰 保、「GaN 系ヘテロ界面構造の特徴とその評価」、第59回応用物理学関係連合講演会シンポジウム[窒化物半導体における特異構造の理解と制御]、2012年3月15日、早稲田大学、東京。
- 22) 橋詰 保、「GaN および AlGaIn のバルク準位と界面準位評価」、第4回窒化物半導体結晶成長講演会、2012年4月27-28日、東京大学生産技術研究所、東京。

- 23) T. Kachi, D. Kikuta and T. Uesugi, "GaN Power Devices and Reliability for Automotive Applications", 2012 International Reliability Physics Symposium, Anaheim (USA), April 15-19, 2012.
- 24) T. Hashizume, "In-grown and process-induced deep levels in AlGaN alloys". International Workshop on "Frontier of Nitride Semiconductor Alloy Photonics (NSAP)", Hotel Springs, Chiba, May 10, 2012.
- 25) T. Hashizume, "Insulated gate technologies for high-performance GaN transistors", International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (IWN2012), October 14-19, 2012, Sapporo, Japan.
- 26) T. Hashizume, "Characterization and control of insulated gates for GaN power switching transistors", The Ninth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (ASDAM-2012), November 11–15, 2012, Smolenice, Slovakia.
- 27) 橋詰保、「GaN パワーデバイスにおける異種接合界面の制御」、日本表面科学会第74回表面科学研究会平成24年度中部表面科学シンポジウム、2013年1月26日、名古屋大学
- 28) T. Uesugi and T. Kachi, "GaN Power Devices for Automotive Applications", SPIE Photonics West 2013, February 4-7, 2013, San Francisco, USA
- 29) T. Hashizume and M. Akazawa, "Characterization and Control of Insulated Gate Interfaces on GaN-Based Heterostructures", 2013 International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS-MANTECH), Hilton New Orleans Riverside, New Orleans, USA, May 13-16, 2013.
- 30) T. Hashizume, Y. Hori and T. Sato, "Interface control of GaN-based heterostructures for power switching transistors", 6th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-VI), Kyushu University, Centennial Hall of School of Medicine, Kyushu University, Fukuoka, Japan on June 2-6, 2013.
- 31) 橋詰 保、「GaN 系パワー電子デバイスのための異種接合制御とプロセス技術」、日本機械学会 2013 年度年次大会「先端技術フォーラム」(情報・知能・精密機器部門特別企画)、2013 年 9 月 11 日、岡山大学、岡山。
- 32) Y. Hori, T. Sato and T. Hashizume, "Control of Insulated gate interfaces on AlGaN/GaN heterostructures for power devices", IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, Oct. 27-29 2013.
- 33) 堀 祐臣、谷田部然治、橋詰 保、「GaN 系材料の絶縁膜界面評価」、SiC 及び関連半導体研究会第 22 回講演会、埼玉会館、さいたま市、2013 年 12 月 9 日～10 日
- 34) 橋詰 保、「パワー素子応用のための GaN 系電子デバイス技術の現状と可能性」、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティプレナリーセッション、新潟大学、2014 年 3 月 19 日。
<https://www.ieice.org/ieice-es/movie>
- 35) 佐藤威友、赤澤正道、橋詰 保、「窒化物半導体異種接合の評価と制御」、第61回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム（窒化物半導体特異構造の科学～成長・作製と新機能の発現～）、青山学院大学相模原キャンパス、2014年3月19日
- 36) 橋詰 保、「AlGaN/GaN HEMTのMIS界面欠陥の評価と制御」、応用物理学会結晶工学分科会第141回研究会、名古屋大学、2014年6月6日

- 37) T. Uesugi, "Advanced GaN Power Devices for Automotive Applications", 38th Workshop on Compound Semiconductors Devices and Integrated Circuits, June 15-20, 2014, Delphi, Greece
- 38) 橋詰 保、西口賢弥、谷田部然治、佐藤威友、「界面・バルク電子準位が GaN トランジスタの動作特性に与える影響」、応用物理学会先進パワー半導体分科会第 1 回研究会、東工大大岡山キャンパス、2014 年 7 月 30 日
- 39) Zenji Yatabe, Taketomo Sato and Tamotsu Hashizume, "Interface Trap States in Al₂O₃/AlGa_{0.3}N/GaN Structure Induced by ICP Etching of AlGa_{0.3}N Surfaces", International Workshop on Nitride Semiconductors 2014 (IWN2014), August 24-29, 2014, Centennial Hall, Wroclaw, Poland.
- 40) 橋詰 保、「周期的トレンチ構造を持つ GaN トランジスタ」、第 62 回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム(窒化物半導体特異構造の科学～成長・プロセスとエレクトロニクス展開～)、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学、平塚市、2015 年 3 月 11-14 日

② 口頭発表 (国内会議 65 件、国際会議 33 件)

- 1) N. Harada, N. Shiozaki, and T. Hashizume, "Electrochemical oxidation of GaN for surface control of GaN-based device structures, 2009 International Conference on Solid-State Devices and Materials (SSDM2009), Sendai, Oct. 7-8.
- 2) Y. Hori, C. Mizue, K. Ooyama, M. Miczek and T. Hashizume, "Chemical and electronic properties of ALD-Al₂O₃/AlGa_{0.3}N interfaces", 2009 International Conference on Solid-State Devices and Materials (SSDM2009), Sendai, Oct. 7-8.
- 3) M. Tajima and T. Hashizume, "Correlation between surface leakage current and operation degradation of AlGa_{0.3}N/GaN HEMTs", 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Oct. 18-23, 2009, Jeju, Korea.
- 4) K. Ohi and T. Hashizume, "Multi-Mesa-Channel Structure for Improvement of Gate Controllability and Current Stability in AlGa_{0.3}N/GaN HEMTs", 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Oct. 18-23, 2009, Jeju, Korea.
- 5) T. Takahara, E. Hiraki, T. Tanaka, and K. Nishimura, "A Novel Soft Switching Three-Phase Utility Frequency AC to High Frequency AC Direct Power Converter with PFC Function for Industrial IH Appliance," IEEE Eighth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Nov. 2-5, Taipei, Taiwan.
- 6) 小川恵理、橋詰保、「Mgドーピング GaN の表面特性と深い準位の評価」、第 57 回応用物理学関係連合講演会、2010 年 3 月 17-20 日、東海大学、平塚。
- 7) 原田脩央、橋詰保、「GaN ヘテロ構造および pn 接合構造への電気化学酸化プロセス」、第 57 回応用物理学関係連合講演会、2010 年 3 月 17-20 日、東海大学、平塚。
- 8) 堀 祐臣、水江千帆子、橋詰保、「ALD-Al₂O₃/GaN 構造の形成プロセスと界面評価」、第 57 回応用物理学関係連合講演会、2010 年 3 月 17-20 日、東海大学、平塚。

- 9) 田島正文, 橋詰 保, 「デュアルゲート AlGaN/GaN HEMT における表面リーク電流と表面状態の関係」、第 57 回応用物理学関係連合講演会、2010 年 3 月 17-20 日、東海大学、平塚。
- 10) 大井幸多、橋詰保, 「周期的メサゲート構造を有する AlGaN/GaN HEMT」、電子情報通信学会電子デバイス研究会、2010 年 1 月 13-15 日、機会振興会館、東京。
- 11) 赤澤正道, 橋詰 保, 廣木正伸, 山幡章司, 重川直輝, 「In_{0.17}Al_{0.83}N/GaN ヘテロ界面の XPS 観察」、第 57 回応用物理学関係連合講演会、2010 年 3 月 17-20 日、東海大学、平塚。
- 12) 菅原克也、久保俊晴、武富浩幸、三宅秀人、平松和政、橋詰保, 「高 Al 組成 AlGaN の表面特性と深い電子準位」、電子情報通信学会電子デバイス研究会、2009 年 11 月 19-20 日、徳島大学、徳島。
- 13) 高原貴昭, 平木英治, 田中俊彦, 橋詰保, 加地徹, 「三相商用 AC-高周波 AC ダイレクトコンバータに用いる三相誘導加熱負荷の試作と動作解析」、平成 22 年電気学会全国大会、2010 年 3 月 17-19 日、明治大学、東京。
- 14) 河口祐樹, 平木英治, 田中俊彦: 「ソフトスイッチング PFC コンバータへの SiC-SBD 導入による高効率化の検証」、平成 22 年電気学会全国大会、2010 年 3 月 17-19 日、明治大学、東京。
- 15) 高博、赤澤正道、橋詰 保、廣木正伸、山幡章司、重川直輝, 「XPS による GaN 上極薄 InAlN 内分極誘起電界の検出」、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日。
- 16) 奥崎慎也、菅原克也、武富浩幸、三宅秀人、平松和政、橋詰保, 「高 Al 組成を有する Al_xGa_{1-x}N の深い電子準位の評価」、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日。
- 17) 小川恵理、橋詰 保, 「Mg ドープ密度の違いと高温熱処理による深い準位の変化」、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日。
- 18) 堀 祐臣、水江千帆子、橋詰 保, 「ALD-Al₂O₃/GaN MOS 構造における界面特性の評価と制御」、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日。
- 19) 胡 成余、橋詰 保、大井幸多、田島正文, 「ゲートなし AlGaN/GaN ヘテロ接合電界効果トランジスタの表面トラッピング効果」、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日。
- 20) 原田脩央、橋詰 保, 「AlGaN/GaN HEMT への埋め込み酸化膜ゲートの形成と評価」、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日。
- 21) 水江千帆子、橋詰 保, 「ALD-Al₂O₃/AlGaN/GaN 構造におけるポテンシャル制御および界面特性」、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日。
- 22) 大井幸多、橋詰 保, 「多重台形チャネル AlGaN/GaN HEMT における電流制御性と熱的安定性」、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日。
- 23) 水江千帆子、橋詰保, 「AlGaN/GaN MIS 構造における C-V 特性の解釈」、電子情報通信学会電子デバイス研究会、2010 年 6 月 17-18 日、北陸先端大学院大学、能美市。
- 24) 大井幸多、橋詰 保, 「多重台形ナノチャネル AlGaN/GaN HEMT の電流制御性」、電子情報通信学会電子デバイス研究会、2010 年 11 月 11-12 日、大阪大学中之島センター、大阪。
- 25) 堀 祐臣、原田脩央、水江千帆子、橋詰 保, 「GaN および AlGaN/GaN 構造への絶縁ゲート

形成と評価」、電子情報通信学会電子デバイス研究会、2010 年 11 月 11-12 日、大阪大学中之島センター、大阪。

- 26) 岡本昌幸、平木英治、田中俊彦、橋詰 保、加地徹:「PSPICE による GaN パワーMOSFET のスイッチング特性解析」、平成 22 年電気学会産業応用部門大会、2010 年 8 月 24-26 日、芝浦工大、東京。
- 27) 豊田玄紀、岡本昌幸、平木英治、田中俊彦、橋詰 保、加地 徹:「PSpiceを用いたGaN 横型トランジスタのデバイスモデル作成」、平成 22 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会、2010 年 10 月 23 日、岡山県立大学、岡山。
- 28) 菊田大悟、成田哲生、高橋直子、片岡恵太、木本康司、上杉 勉、加地 徹、杉本雅裕:「硬 X 線光電子分光法による p 型 GaN のドライエッチングダメージ評価」、電子情報通信学会電子デバイス研究会、2010 年 11 月 11-12 日、大阪大学中之島センター、大阪。
- 29) Y. Hori, C. Mizue and T. Hashizume, "Interface state properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{n-GaN}$ prepared by atomic layer deposition", International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), Osaka, May 13- 14, 2010.
- 30) C. Mizue and T. Hashizume, "C-V characterization of ALD- Al_2O_3 insulated gates on AlGaIn/GaN structure", Workshop on Dielectrics in Microelectronics (WoDiM 2010), Bratislava, Slovak, June 28-30, 2010.
- 31) N. Harada and T. Hashizume, "A recessed oxide gate structure for threshold voltage control in AlGaIn/GaN HEMTs by electrochemical process", 2010 International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN-2010), Tampa, USA, Sep. 19- 24, 2010.
- 32) Y. Hori, C. Mizue and T. Hashizume, "Effects of fabrication processes on electrical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{n-GaN}$ structures prepared by atomic layer deposition", 2010 International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN-2010), Tampa, USA, Sep. 19- 24, 2010.
- 33) C.-Y. Hu, T. Hashizume, K. Ohi, M. Tajima, "Trapping Region Extension at the Gate-Drain Opening of AlGaIn/GaN Heterojunction Field-Effect Transistors Subjected to On-State Stress", 2010 International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN-2010), Tampa, USA, Sep. 19- 24, 2010.
- 34) S. Okuzaki, K. Sugawara, H. Taketomi, H. Miyake, K. Hiramatsu and T. Hashizume, "Deep level characterization of MOVPE-grown AlGaIn with high Al compositions", 2010 International Conference on Solid-State Devices and Materials (SSDM2010), Tokyo, Sep. 22-24, 2010.
- 35) T. Uesugi, T. Kachi, and T. Hashizume, "Characteristics of GaN P-N Diode with Damages Layer Induced by ICP Plasma Process", Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD) 2010, June 30-July 2, 2010, Tokyo.
- 36) T. Takahara, M. Okamoto, E. Hiraki, T. Tanaka, T. Hashizume, and T. Kachi, "Performance Verification of a Novel Soft Switching Three-Phase Utility Frequency AC to High Frequency AC Direct Power Converter with PFC Function for Industrial IH Applications," The 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2010, Sep. 6-8, Ohrid, Macedonia.
- 37) アスバール ジョエル、田島 正文、橋詰 保、「オフストレス印加による AlGaIn/GaN HEMTs の電流コラプス」、第 72 回応用物理学会学術講演会、2011 年 9 月 1 日～4 日、山形大学、山形。

- 38) 大井 幸多、橋詰 保、「多重台形チャネル AlGaIn/GaN HEMT におけるオフストレス印加時の電流コラプス評価」、第 72 回応用物理学会学術講演会、2011 年 9 月 1 日～4 日、山形大学、山形。
- 39) 堀 祐臣、橋詰 保、「GaN および AlGaIn 表面処理が与える MOS 界面特性への影響」、第 72 回応用物理学会学術講演会、2011 年 9 月 1 日～4 日、山形大学、山形。
- 40) 胡 成余、橋詰 保、「AlGaIn/GaN ヘテロ接合電界効果トランジスタの非局在化トラッピング効果」、第 72 回応用物理学会学術講演会、2011 年 9 月 1 日～4 日、山形大学、山形。
- 41) 金 聖植、堀 祐臣、東石 直樹、橋詰 保、「ドライエッチ GaN 表面に形成した MOS 構造の評価」、第 72 回応用物理学会学術講演会、2011 年 9 月 1 日～4 日、山形大学、山形。
- 42) 東石 直樹、原田 修央、橋詰 保、「選択的電気化学酸化による埋込酸化ゲート構造」、第 72 回応用物理学会学術講演会、2011 年 9 月 1 日～4 日、山形大学、山形。
- 43) 谷田部 然治、東石 直樹、佐藤 威友、橋詰 保、「ドライエッチした GaN および AlGaIn 表面の評価と制御」、第 72 回応用物理学会学術講演会、2011 年 9 月 1 日～4 日、山形大学、山形。
- 44) 赤澤 正道、高 博、橋詰 保、廣木 正伸、山幡 章司、重川 直輝、「In ドープした MOVPE 成長 AlGaIn 膜の内部電界」、第 72 回応用物理学会学術講演会、2011 年 9 月 1 日～4 日、山形大学、山形。
- 45) 高 博、赤澤 正道、橋詰 保、廣木 正伸、山幡 章司、重川 直輝、「Al₂O₃/InAlN/AlGaIn/GaN 構造における AlGaIn スペーサ層の検討」、第 72 回応用物理学会学術講演会、2011 年 9 月 1 日～4 日、山形大学、山形。
- 46) J. T. Asubar, T. Tajima, and T. Hashizume, “The Role of the Gate-Source Region on the Off-state Bias-induced Current Collapse of AlGaIn/GaN HEMTs”, 5th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS), May 22-25, 2011, Toba.
- 47) Y. Hori, C. Mizue and T. Hashizume, “Control of Electronic States at Al₂O₃/GaN and Al₂O₃/AlGaIn Interfaces Prepared by Atomic Layer Deposition”, 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), July 10-15, 2011, Glasgow, UK.
- 48) K. Ohi and T. Hashizume, “Multi-Mesa-Channel AlGaIn/GaN HEMT with Resistance to Off-Stress-Induced Current Collapse”, 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), July 10-15, 2011, Glasgow, UK.
- 49) N. Azumaishi, N. Harada and T. Hashizume, “Selective Electrochemical Formation of Recessed-Oxide-Gate Structures for AlGaIn/GaN HEMTs”, 2011 International Conference on Solid-State Devices and Materials (SSDM2011), Nagoya, Sep. 28-30, 2011.
- 50) S. Kim, Y. Hori, N. Azumaishi and T. Hashizume, “Impacts of Dry Etching of GaN and AlGaIn Surfaces on Interface Properties of GaN-based MOS Structures”, 2011 International Conference on Solid-State Devices and Materials (SSDM2011), Nagoya, Sep. 28-30, 2011.
- 51) Z. Yatabe, S.-S. Kim, N. Azumaishi, T. Sato, T. Hashizume, “Characterization and control of dry-etched GaN surfaces”, 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6), Tokyo, Dec.11-15, 2011
- 52) 豊田玄紀、岡本昌幸、平木英治、田中俊彦、橋詰 保、加地徹:「GaN HEMT のスケールアップモデルとスイッチング特性」、平成 23 年電気学会産業応用部門大会、2011 年 9 月 6 日～8 日、琉球大学、那覇。

- 53) 石橋卓治, 岡本昌幸, 平木英治, 田中俊彦, 橋詰 保, 加地徹:「GaN デバイス用高速ドライブ回路の開発」, 平成 23 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2011 年 10 月 22 日、広島工業大学、広島。
- 54) 金 聖植、堀 祐臣、橋詰 保、「Al₂O₃/ICP エッチ GaN 構造の界面評価」、第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 3 月 15 日～18 日、早稲田大学、東京。
- 55) 東石直樹、橋詰 保、「AlGaIn/GaN ヘテロ構造の電気化学酸化と界面評価」、第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 3 月 15 日～18 日、早稲田大学、東京。
- 56) 堀 祐臣、橋詰 保、「AlGaIn/GaN 上に形成した絶縁ゲート構造に対する表面処理の影響」、第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 3 月 15 日～18 日、早稲田大学、東京。
- 57) 胡 成余、橋詰 保、「N₂O ラジカル処理が AlGaIn/GaN 電界効果トランジスタの安定性に与える影響」、第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 3 月 15 日～18 日、早稲田大学、東京。
- 58) 石橋卓治, 岡本昌幸, 平木英治, 田中俊彦, 橋詰 保, 加地徹:「新開発 GaN HEMT のスイッチング特性」, 平成 24 年電気学会全国大会, 2012 年 3 月 21 日～23 日、広島工業大学、広島。
- 59) 豊田玄紀, 岡本昌幸, 平木英治, 田中俊彦, 橋詰 保, 加地徹:「新開発 GaN HEMT を用いたインバータ回路」, 平成 24 年電気学会全国大会, 2012 年 3 月 21 日～23 日、広島工業大学、広島。
- 60) K. Ohi and T. Hashizume, “Reduction of off-stress-induced current collapse in multi-mesa-channel AlGaIn/GaN HEMT”, 36th Workshop on Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCS-DICE-2012), May 28-30, 2012, Porquerolles, France.
- 61) Z. Yatabe, Y. Hori, S. Kim and T. Hashizume, “Effects of ICP Etching of AlGaIn on Interface Properties of Al₂O₃/AlGaIn/GaN Structures”, 36th Workshop on Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCS-DICE-2012), May 28-30, 2012, Porquerolles, France.
- 62) Y. Hori, Z. Yatabe and T. Hashizume, “Characterization of MOS interfaces based on GaN-related heterostructures”, Workshop on Dielectrics in Microelectronics (WoDiM 2012), Dresden, Germany, June 25-27, 2012.
- 63) K. Ohi and T. Hashizume, “Improved current stability in multi-mesa-channel AlGaIn/GaN HEMTs”, Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD2012), June 27-29, 2012, Okinawa.
- 64) 石橋卓治、豊田玄紀、岡本昌幸、平木英治、田中俊彦、橋詰 保、加地 徹:高速スイッチング動作を実現するノーマリオン形 GaN HEMT、半導体電力変換・モータドライブ合同研究会、2012 年 6 月 8 日～9 日、苫小牧工業高等専門学校
- 65) 橋詰保、堀 祐臣、赤澤正道:AlInN/GaN 系ヘテロ構造の表面・界面評価、電子情報通信学会電子デバイス研究会、2012 年 7 月 26 日～27 日、福井大学
- 66) 堀 祐臣、橋詰 保:Al₂O₃/AlGaIn/GaN HEMT の電気特性と MOS 界面準位の評価、第 73 回応用物理学会学術講演会、2012 年 9 月 11 日～14 日、愛媛大学および松山大学
- 67) 東石直樹、橋詰 保:電気化学プロセスによる AlGaIn の表面制御、第 73 回応用物理学会学術講演会、2012 年 9 月 11 日～14 日、愛媛大学および松山大学

- 68) 金 聖植, 堀 祐臣, 橋詰 保: ICP エッチ GaN 表面に形成した MOS 構造の界面制御、第 73 回応用物理学会学術講演会、2012 年 9 月 11 日～14 日、愛媛大学および松山大学
- 69) 中野 智, 橋詰 保: 自立基板上 GaN エピ層に形成したショットキー接合の評価、第 73 回応用物理学会学術講演会、2012 年 9 月 11 日～14 日、愛媛大学および松山大学
- 70) 馬 万程, 堀 祐臣, 谷田部然治, 橋詰 保: AlGaIn/GaN ヘテロ構造に形成した MOS 界面の評価、第 73 回応用物理学会学術講演会、2012 年 9 月 11 日～14 日、愛媛大学および松山大学
- 71) 石橋 卓治、豊田 玄紀、平木 英治、田中 俊彦、岡本 昌幸、橋詰 保、加地 徹: ノーマリオン形 GaN HEMT 用共振形ゲートドライブ回路、平成 24 年度 (第 63 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会、2012 年 10 月 20 日、島根大学
- 72) 堀 祐臣, 谷田部然治, 馬 万程, 橋詰 保: プロセス条件が AlGaIn/GaN ヘテロ MOS 構造特性に与える影響、電子情報通信学会電子デバイス研究会、2012 年 11 月 29 日～30 日、大阪大学
- 73) 1 石橋卓治、平木英治、田中俊彦、岡本昌幸、橋詰 保、加地 徹: ノーマリオン形 GaN HEMT 用共振形ゲートドライブ回路の実験的検証、平成 25 年電気学会全国大会、2013 年 3 月 20 日～3 月 22 日、名古屋大学
- 74) 谷田部然治, 堀 祐臣, 馬 万程, 橋詰 保: ドライエッチングが AlGaIn/GaN MOS 構造の界面に与える影響、第 60 回応用物理学関係連合講演会、2013 年 3 月 27 日～30 日、神奈川工科大学
- 75) 堀 祐臣, 谷田部然治, 橋詰 保: AlGaIn/GaN MOS-HEMT の電気特性とヘテロ MOS 界面評価、第 60 回応用物理学関係連合講演会、2013 年 3 月 27 日～30 日、神奈川工科大学
- 76) 馬 万程, 堀 祐臣, 谷田部然治, 橋詰 保: 緩衝層が GaN 接合特性に与える影響、第 60 回応用物理学関係連合講演会、2013 年 3 月 27 日～30 日、神奈川工科大学
- 77) Z. Yatabe, Y. Hori, S. Kim and T. Hashizume, “Interface characterization of Al₂O₃/AlGaIn/GaN structure with inductively coupled plasma etching of AlGaIn surface”, 2012 International Conference on Solid-State Devices and Materials (SSDM2012), Kyoto, Sep. 25-27, 2012.
- 78) 6. M. Matysi, M. Miczek, B. Adamowicz, and T. Hashizume, “ A novel method for the determination of the full energetic distribution of interface state density in metal/insulator/GaN structures from capacitance–voltage and photocapacitance–light intensity measurements”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2012), Jul. 29-Aug. 3, 2012, Zurich, Switzerland.
- 79) 馬万程, 橋詰 保: AlGaIn緩衝層がGaNショットキー接合特性に与える影響、第74回応用物理学会秋期学術講演会、2013年9月16日～20日、同志社大学
- 80) 西口賢弥, J. T. アスバール、橋詰 保: デュアルゲート構造による AlGaIn/GaN HEMT の電流コラプス評価、第74回応用物理学会秋期学術講演会、2013年9月16日～20日、同志社大学
- 81) 堀 祐臣, 谷田部然治、橋詰 保: GaN系MOS-HEMTにおけるMOS界面準位評価と電気特性への影響、第74回応用物理学会秋期学術講演会、2013年9月16日～20日、同志社大学

- 82) 石橋卓治、岡本昌幸、平木英治、田中俊彦、橋詰 保: ノーマリオン GaN HEMT 用共振形ゲートドライブ回路、平成25年電気学会産業応用部門大会、2013年8月28日～30日、山口大学
- 83) 西口賢弥, J. T. アスバール、橋詰 保: デュアルゲート構造による $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMT のオフ状態ストレスによる電流変動評価、第49回応用物理学会北海道支部学術講演会、2013年12月9-10日、北海道大学
- 84) 熊崎祐介、佐藤威友、橋詰 保、 $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ ヘテロ構造上に形成した p-GaIn 層の選択的電気化学エッチング、第61回応用物理学会春期学術講演会、2014年3月17日～20日、青山学院大学淵野辺キャンパス
- 85) 西口賢弥、ジョエル・アスバール、橋詰保、 $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMT におけるオフストレス後の電流変動評価、第61回応用物理学会春期学術講演会、2014年3月17日～20日、青山学院大学淵野辺キャンパス
- 86) 谷田部然治、堀祐臣、橋詰保、ドライエッチング面を有する $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ 構造の MOS 界面評価、第61回応用物理学会春期学術講演会、2014年3月17日～20日、青山学院大学淵野辺キャンパス
- 87) J. T. Asubar, K. Ohi, K. Nishiguchi, and T. Hashizume, “Drain Current Stability in Multi-Mesa-Channel $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMTs”, 10th International Conference on Nitride Semiconductors 2013 (ICNS-10), Gaylord National Hotel and Convention Center, Washington DC, USA, Aug. 25-30, 2013.
- 88) Z. Yatabe, Y. Hori, and T. Hashizume, “Interface state characterization of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ structure with inductively coupled plasma etched AlGaIn surface”, 10th International Conference on Nitride Semiconductors 2013 (ICNS-10), Gaylord National Hotel and Convention Center, Washington DC, USA, Aug. 25-30, 2013.
- 89) W.-C. Ma and T. Hashizume, “Effect of intermediate AlGaIn layer on properties of GaIn Schottky diodes”, 10th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2013), Hakodate Kokusi hotel, Hakodate, Sep.2-5, 2013.
- 90) Y. Yatabe and T. Hashizume, “Impact of dry etching of AlGaIn on interface properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ structure”, 10th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2013), Hakodate Kokusi hotel, Hakodate, Sep.2-5, 2013.
- 91) J. T. Asubar, K. Nishiguchi, and T. Hashizume, “Current stability characterization of $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMT using a dual-gate structure”, 10th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2013), Hakodate Kokusi hotel, Hakodate, Sep.2-5, 2013.
- 92) T. Ishibashi, M. Okamoto, E. Hiraki, T. Tanaka, T. Hashizume and T. Kachi, “Resonant Gate Driver for Normally-on GaIn High-Electron-Mobility Transistor”, 5th Annual International Energy Conversion Congress and Exhibition for the Asia/Pacific region (ECCE Asia Downunder 2013), Jun.3-6, 2013, Melbourne, Australia
- 93) T. Ishibashi, M. Okamoto, E. Hiraki, T. Tanaka, T. Hashizume D. Kikuta and T. Kachi, “Experimental Validation of Newly Fabricated Normally-on GaIn High-Electron-Mobility Transistor”, IEEE 2013 Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2013), Sep.15-19, 2013, Colorado, USA
- 94) 松崎 公洋, 山田 洋明, 田中 俊彦, 岡本 昌幸、ノーマリオン形 GaIn HEMT を用いた

13.56MHz 石型高周波インバータ、平成 26 年度(第 65 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会、2014 年 10 月 25 日、。福山大学、福山

- 95) M. Okamoto, K. Matsuzaki, H. Yamada, T. Tanaka, T. Hashizume, "13.56MHz Class-E RF Power Amplifier Using Normally-on GaN HEMT", 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'2014), (2014.10.29-11.1), Dallas, TX-USA
- 96) 西口賢弥、橋詰保、AlGaIn/GaN HEMT におけるオフストレス後の表面帯電の影響、電子情報通信学会電子デバイス研究会、大阪大学吹田キャンパス、吹田市、2014 年 11 月 27-28 日
- 97) 大平 城二、千崎 泰、谷田部 然治、橋詰 保、酸素雰囲気熱処理プロセスが GaN MOS 界面特性に与える影響、第 62 回応用物理学会春期学術講演会、東海大学、平塚市、2015 年 3 月 11-14 日
- 98) 西口賢弥、橋詰保、AlGaIn/GaN HEMT におけるオフ状態ストレス後の表面帯電評価、第 62 回応用物理学会春期学術講演会、東海大学、平塚市、2015 年 3 月 11-14 日

③ ポスター発表 (国内会議 3件、国際会議 17 件)

- 1) Y. Hori, Z. Yatabe and T. Hashizume, "Characterization of MOS interfaces based on GaN-related heterostructures", Workshop on Dielectrics in Microelectronics (WoDiM 2012), Dresden, Germany, June 25-27, 2012.
- 2) T. Kubo, K. Sugawara, H. Taketomi, H. Miyake, K. Hiramatsu and T. Hashizume, "Chemical and Electronic Properties of MOVPE-grown $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Surfaces ($0.25 < x < 0.68$)", 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Oct. 18-23, 2009, Jeju, Korea.
- 3) C. Mizue, Y. Hori, M. Miczek and T. Hashizume, "Characterization of interface electronic states in ALD- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn/GaN}$ structures", 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Oct. 18-23, 2009, Jeju, Korea.
- 4) E. Ogawa and T. Hashizume, "Mg accumulation and defect formation at p-GaN surfaces caused by a high-temperature annealing", 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Oct. 18-23, 2009, Jeju, Korea.
- 5) K. Sugawara, T. Kubo, H. Taketomi, H. Miyake, K. Hiramatsu and T. Hashizume, "Characterization of Schottky interface properties and deep levels of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.25 < x < 0.68$) grown by MOVPE", 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Oct. 18-23, 2009, Jeju, Korea.
- 6) E. Ogawa and T. Hashizume, "Effects of Mg-doping density and high-temperature annealing on deep levels in Mg-doped GaN", 2010 International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN-2010), Tampa, USA, Sep. 19- 24, 2010.
- 7) K. Ohi and T. Hashizume, "Current Controllability and Stability in Multi-Mesa-Channel AlGaIn/GaN HEMT", 2010 International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN-2010), Tampa, USA, Sep. 19- 24, 2010.
- 8) Y. Hori, C. Mizue, and T. Hashizume, "Electronic State Characterization of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn/GaN}$ Structures Prepared by Atomic Layer Deposition", 13th International Conference on Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-13), July 3-8, 2011, Prague, Czech Republic.
- 9) K. Ohi, N. Harada, N. Azumaishi, and T. Hashizume, "Normally-Off AlGaIn/GaN HEMT with Recessed-Oxide Gate by Selective Electrochemical Oxidation", 13th International Conference

on Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-13), July 3-8, 2011, Prague, Czech Republic.

- 10) J. T. Asubar, M. Tajima and T. Hashizume, "Characterization of Off-State-Induced Current Collapse in AlGaIn/GaN HEMTs Using Dual-gate Architecture", 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), July 10-15, 2011, Glasgow, UK.
- 11) C.-Y. Hu and T. Hashizume, "On-State Bias Stress Induced Trapping Effects in Access Region of AlGaIn/GaN HEMTs, 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), July 10-15, 2011, Glasgow, UK.
- 12) 大井幸多、橋詰 保: 多重台形チャネル AlGaIn/GaN HEMT における電流コラプス評価、第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 3 月 15 日～18 日、早稲田大学、東京。
- 13) 松井光生、平木英治、田中俊彦、岡本昌幸: 三相 AC-AC ダイレクトコンバータにおける負荷等価回路の検討、平成25年電気学会産業応用部門大会、2013 年 8 月 28 日～30 日、山口大学
- 14) T. Narita, H. Iguchi, T. Uesugi, T. Kachi and T. Hashizume, "The Effect of Residual Impurities in the Epitaxial Layer on Fe-Doped GaN", 10th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-10), Aug. 28, 2013, Washington, DC
- 15) Y. Hori, Z. Yatabe and T. Hashizume, "Characterization and Control of MOS interface states in GaN-based MOS-HEMTs using Al₂O₃ Gate Insulator", 10th International Conference on Nitride Semiconductors 2013 (ICNS-10), Gaylord National Hotel and Convention Center, Washington DC, USA, Aug. 25-30, 2013.
- 16) Y. Kumazaki, N. Azumaishi, T. Sato, T. Hashizume, H. Ueda, M. Kanechika, and H. Tomita, "Selective etching of p-GaN layers for normally-off AlGaIn/GaN HEMTs by electrochemical process", 10th International Conference on Nitride Semiconductors 2013 (ICNS-10), Gaylord National Hotel and Convention Center, Washington DC, USA, Aug. 25-30, 2013.
- 17) K. Nishiguchi and T. Hashizume, "Surface charging effects on current stability of AlGaIn/GaN HEMTs", The 2014 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK-2014), Ryukoku University Avanti Kyoto Hall, Kyoto, June 19-20, 2014.
- 18) K. Nishiguchi, J. T. Asubar and T. Hashizume, "Spatial discrimination of surface charging region in AlGaIn/GaN HEMTs investigated using dual-gate architecture", 2014 International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN-2014), Congress Center at Centennial Hall, Wrocław, Poland, 24-29 August 2014.
- 19) J. T. Asubar, K. Nishiguchi and T. Hashizume, "Reduced Thermal Resistance in AlGaIn/GaN Multi-Mesa-Channel High Electron Mobility Transistors", Congress Center at Centennial Hall, Wrocław, Poland, 24-29 August 2014.
- 20) 谷田部然治、大平城二、佐藤威友、橋詰保、ドライエッチングか Al₂O₃/AlGaIn/GaN 構造の MOS 界面特性に与える影響、第 62 回応用物理学会春期学術講演会、東海大学、平塚市、2015 年 3 月 11-14 日

(4)知財出願

①国内出願 (3 件)

1. 発明の名称:電界効果トランジスタおよびその製造方法
発明者:廣木正伸、橋詰保、赤澤正道
出願人:日本電信電話株式会社、北海道大学
出願日:2011 年 9 月 26 日
出願番号:特願 2011-208741
2. 発明の名称:半導体装置
発明者:上杉 勉, 加地 徹, 菊田 大悟, 成田 哲生
出願人:豊田中央研究所
出願日:2014 年 2 月 6 日
出願番号:特願 2014-21142
3. 発明の名称:半導体装置
発明者:上杉 勉, 加地 徹, 菊田 大悟, 成田 哲生、井口 紘子
出願人:豊田中央研究所
出願日:2014 年 12 月(予定)
出願番号:未定

②海外出願 (0 件)

(5)受賞・報道等

①受賞

- 1) 電子情報通信学会電子デバイス研究会論文発表奨励賞、2010 年 1 月 15 日
大井幸多、橋詰保、「周期的メサゲート構造を有する AlGaIn/GaN HEMT」
- 2) 日本成長学会ナノエピ分科会第 2 回窒化物半導体結晶成長講演発表奨励賞、2010 年 5 月 15 日
小川恵理、橋詰保、「Mg-doped GaN (Mg: $7 \times 10^{17} \sim 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)の深い準位の評価」
- 3) 電子情報通信学会電子デバイス研究会論文発表奨励賞、2010 年 6 月 18 日
水江千帆子、橋詰保、「AlGaIn/GaN MIS 構造における C-V 特性の解釈」
- 4) 電子情報通信学会電子デバイス研究会論文発表奨励賞、2010 年 11 月 12 日
堀 祐臣、橋詰保、「GaN および AlGaIn/GaN 構造への絶縁ゲート形成と評価」
- 5) 電子情報通信学会電子デバイス研究会論文発表奨励賞、2011 年 1 月 14 日
田島正文、橋詰保、「デュアルゲート構造を用いた AlGaIn/GaN HEMT の電流コラプスの表面帯電部位依存性の評価」
- 6) Best Paper Award, 2013 International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS-MANTECH)、2013 年 5 月
T. Hashizume and M. Akazawa, “Characterization and Control of Insulated Gate Interfaces on GaN-Based Heterostructures”
- 7) Poster Award、10th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-10)、

2013 年 8 月

Y. Hori, Z. Yatabe and T. Hashizume, “Characterization and Control of MOS interface states in GaN-based MOS-HEMTs using Al₂O₃ Gate Insulator”

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

1) 内閣府の「次世代パワーエレクトロニクス」事業(SIP:NEDO 実施)に採択され、2014 年 10 月より実施予定。

・課題名: GaN 縦型パワーデバイスの基盤技術開発(研究代表者: 須田淳(京大))、北大・橋詰と豊田中研・加地および上杉が参加

・課題名: 次世代パワーモジュールを使用したパワーエレクトロニクス機器とその統合システムの包括的研究開発(研究代表者: 赤木泰文(東工大)、山口大・田中が参加

2) 各種セミナーなどで、本研究で開発した異種接合 MOS 界面の評価法について、参加研究者に紹介・指導を行っている。また、希望者には、開発した計算プログラムを提供している。

②社会還元的な展開活動

1) 得られた成果のうち、絶縁膜界面評価・制御に関する部分をまとめ、応用物理学会誌および表面科学に解説論文として公表した(応用物理、81 巻、6 号、479-484 (2012)、表面科学、35 巻、2 号、96-101 (2013))。

2) 成果の一部を pdf スライドにまとめ、研究室 HP (<http://www.rcige.hokudai.ac.jp/gcp/index.html>) で 2011 年 11 月より公開しており、毎月 3000 ~ 6000 回のヒット数(ダウンロード数)を記録している。

3) 北海道大学の「国民との科学・技術対話」推進に関する研究支援事業とタイアップして、得られた成果の一部を含む「創・省エネルギーに貢献する半導体テクノロジー」に関して、北海道内の高等学校において「出前講義」を行うことが決定している。

§ 5 研究期間中の活動

5. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2010 年 3 月 1-2 日	2010 International RCIQE/CREST Joint Workshop	北海道大学 学術交流会 館	100 名	北大量子集積エレクトロニクス研究センターと本プロジェクトの合同で国際ワークショップを開催した。代表者と主たる共同研究者が論文発表を行った。
2012 年 3 月 5-6 日	2012 RCIQE International Workshop for Green Electronics	北海道大学 学術交流会 館	90 名	北大量子集積エレクトロニクス研究センター主催国際ワークショップにおいて代表者と主たる共同研究者が論文発表を行った。
2013 年 7 月 19-20 日	CREST パワー・先端素子 半導体に関するシンポジ ウム	北大	30 名	本プロジェクトが主催し、GaN およびダイヤモンドに関する先端素子の論文が発表された。代表者と主たる共同研究者が論文発表を行った。

§ 6 最後に

まず、本研究の実施において、チームとして機能してきたことが最もアピールできる点です。ミーティングを重ねることにより、各研究 G の特長をお互いに理解し、機能的な連携体制を構築しつつ、接合の基礎評価／プロセス・デバイス／回路の一体型研究開発の基盤を確立しました。基礎と応用の相補的研究アプローチを取りつつ、接合の特性をデバイス動作に反映させ、次にデバイス特性をインバータ動作に反映させることで、GaN の優れた材料特性をインバータ技術に展開させることが可能になりました。豊田中研 G、山口大 G とともに、議論を重ねてよい結果を出そうという意識が高く、また協力体制も整い、研究代表者としてスムーズにプロジェクト運営ができました。

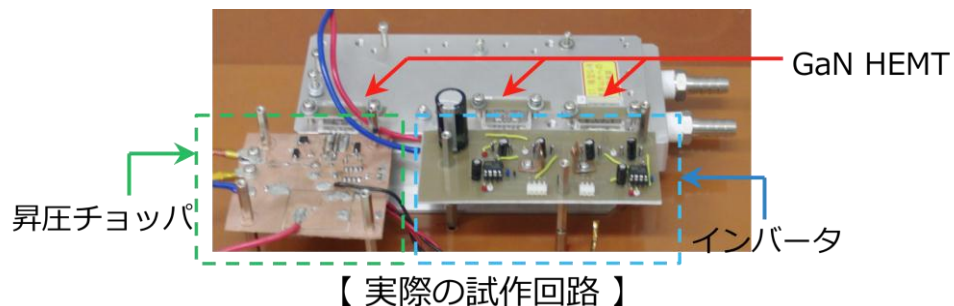
研究成果に関しては、特に、接合界面の理解、MMC 型 HEMT の動作安定性、アンペア級 HEMT のインバータ実装、ゲート駆動回路・13.56MHz 駆動インバータ回路の試作は、今後の GaN トランジスタの性能向上およびインバータ展開に寄与できる結果と思っています。これらの結果を基盤として、今後も GaN インバータの実現に貢献する所存です。

また、46 ページにも記載しましたが、今回のメンバー全員が、2014 年 10 月にスタートする、戦略的イノベーション推進事業(SIP:NEDO 担当)に参加することが決定しました。本 CREST 事業の成果が大きく寄与していると感じています。今後は、この SIP 事業とともに、他の共同研究プロジェクトを基盤として、省エネルギーに貢献する電子デバイス・回路の研究を進める予定です。

最後に、本事業で研究員として雇用したアズバール氏が福井大学助教に就任することは、事業推進者として、非常に嬉しいことです。もう1名の谷田部氏のサポートも、今後強力に行います。

最後に、本事業で開発したインバータ回路、導入した主な装置、北大と山口大の研究室の集合写真を添付します。

1) 豊田中研で作製した GaN HEMT を実装し、山口大学で作製したインバータ回路



2) 北大に導入した表面処理装置と精密薄膜堆積装置



3) 北大と山口大の研究室集合写真



北大 G の研究室風景



山口大 G の研究室風景