

令和 5 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101  
研究種目：基盤研究(B) (一般)  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20H02175  
研究課題名(和文) 強力な酸化剤を用いた窒化物半導体ウェットエッチング技術の開発とトランジスタ応用

研究課題名(英文) Development of wet etching technology for nitride semiconductors using strong oxidizing agents and application to transistors

研究代表者  
佐藤 威友 (Sato, Taketomo)  
北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・准教授

研究者番号：50343009  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：強力な酸化力を持つ硫酸ラジカル( $\text{SO}_4^{\cdot-}$ )を前駆体のペルオキシ二硫酸イオン( $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ )から安定に生成・供給する条件を見出し、簡便で低損傷かつ高い制御性を有するGaNのウェットエッチング技術を開発した。さらに、AlGaN/GaNヘテロ構造トランジスタのゲートリセス加工に適用し、しきい値電圧の精密な制御およびその面内バラツキの抑制を同時に達成した。また、エッチング速度(化学反応速度)は光照射強度により制御可能であることを示すとともに、より広範囲の窒化物半導体材料へ適用可能であることを明らかにした。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

化学的に強固な窒化物半導体の加工を簡便に行うウェットエッチング法を開発した。薬液に試料を浸し紫外線を照射するだけというシンプルなセットアップであると同時に、これまで問題となっていた加工損傷を大幅に抑制することに成功した。さらに、高周波パワーデバイス応用が期待されるGaN系トランジスタのゲートリセス加工に適用し、しきい値電圧の精密制御を達成した。エッチングの自己停止現象を利用した高い加工精度を示し、性能バラツキの抑制と低コスト加工が可能であることから、産業応用にも有望である。

研究成果の概要(英文)：A simple, low-damage, and highly controllable wet etching technique for GaN using sulfuric acid radicals ( $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ), which have strong oxidizing power, has been developed by finding conditions to stably generate and supply  $\text{SO}_4^{\cdot-}$ . Furthermore, the technique was applied to the gate-recess etching of AlGaN/GaN heterostructure field effect transistors, and precise control of the threshold voltage and suppression of its in-plane variation were simultaneously achieved. It was also shown that the etching rate (chemical reaction rate) can be controlled by light irradiation intensity, and that the technique can be applied to a wider range of nitride semiconductor materials.

研究分野：電気電子工学

キーワード：窒化物半導体 ウェットエッチング 電気化学反応

### 1. 研究開始当初の背景

窒化ガリウム (GaN) は、大電力駆動に適した電子物性 (大きな破壊電界や高い電子飽和速度など) を有しており、シリコン (Si) に代わる次世代パワーデバイス材料として期待されている。しかし、GaN 系トランジスタには信頼性・安定性に関わる克服すべき大きな課題が残っており、実用化の障害となっている。その 1 つが、窒素と III 族元素の強い化学結合に起因する加工の難しさである。例えば、ノーマリオフ動作としきい値電圧制御に有望なリセスゲート構造の作製にはプラズマ支援ドライエッチングが一般的であるが、プラズマダメージによる結晶欠陥の導入が界面特性を大きく劣化させるため、安定なゲート制御が達成されない。窒化物半導体の物性を最大限に活かすためには、化学的酸化と溶解反応を利用するウェットエッチングのような、より低損傷な加工プロセスの開発が望まれている。

近年、過酸化水素 ( $H_2O_2$ ) より強力な酸化力を持つ硫酸ラジカル ( $SO_4^{\cdot-}$ ) を GaN のウェットエッチングに適用した例が報告された [例えば Bardwell 他, J. Appl. Phys. (2001)]。この手法は、大掛かりな真空装置や電気配線を必要としない簡便な方法であるため、デバイスプロセスへの適合性が高い。代表者らも、 $SO_4^{\cdot-}$  が pH 値の異なる数種類の水溶液中で酸化剤として働くことを明らかにし、n-GaN のエッチングに有効であることを実証した [Toguchi, Sato 他, Appl. Phys. Express (2019)] (図 1)。ただし、 $SO_4^{\cdot-}$  の寿命は短く安定な供給方法やエッチング機構の多くは依然として不明であり、実用化には多くの課題が残されていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、前駆体であるペルオキシ二硫酸イオン ( $S_2O_8^{2-}$ ) への紫外 (UV) 照射などにより、 $SO_4^{\cdot-}$  を安定に生成・供給する条件を見出し、簡便で低損傷かつ高い制御性を有する GaN のウェットエッチング技術を開発することを目的とした。さらに、 $SO_4^{\cdot-}$  を含有した種々の酸およびアルカリ水溶液中と窒化物半導体の表面電位差を測定して  $SO_4^{\cdot-}$  の酸化剤としての機能・有効性を明らかにし、混晶を含めた広範の窒化物半導体材料、および GaN 系トランジスタのゲート加工プロセスへ応用することを目指した。

### 3. 研究の方法

本研究で用いた実験セットアップを図 1 (a) に示す。ペルオキシ二硫酸カリウム ( $K_2S_2O_8$ ) 水溶液中に試料を浸漬し上方から UV 光を照射することにより、硫酸ラジカル (溶液中) と光キャリア (試料表面) の生成を同時に行う。高濃度 n+ GaN 自立基板上に結晶成長した n-GaN 層試料を例にとると、光励起により生成した正孔と電子は内部電界により空間的に分離され、正孔は n-GaN 表面の酸化反応に利用される。酸化反応により形成される GaN 母体酸化膜は、酸性および塩基性溶液に溶解する。また、電解液の pH 値や電極電位によっては、必ずしも酸化膜が表面に形成されるわけではなく、Ga 元素を含む分子イオンを構成し即座に溶解する。一方、電子は裏面の高濃度 n+ GaN へ輸送される。n+ GaN は電解液との電氣的な接触抵抗が低く、電子を溶液へと受け渡す擬似電極の役割を果たす。また、AlGaIn/GaN ヘテロ構造を利用した電界効果トランジスタ (HFET) のエッチングには、図 1 (b) に示すように絶縁性基板の上に結晶成長した構造であるため、電子を溶液へ受け渡すための Ti 電極を試料表面に形成した。本構造では、エッチング領域で生成した光キャリアが内部電界で分離された後、電子は AlGaIn/GaN 界面の 2 次元電子ガス (2DEG) チャンネルを通して Ti 電極まで輸送され、溶液へと受け渡される。

はじめに、n+GaIn 基板上に結晶成長した n-GaN ( $N_D \sim 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) に対してエッチングを実施した。光源には、中心波長 260 nm でスペクトル半値幅が約 50 nm の面発光光源を用いた (以後 UVC 光源)。こちらは、ペルオキシ二硫酸カリウム水溶液が吸収可能な波長を含んでおり、前述のように、硫酸ラジカルの生成と試料表面での光キャリアを同時に生成する。また、中心波長 360 nm でバンドパスフィルターを通してスペクトル半値幅を約 10 nm とした光源を補助的に用いた (以後 UVA 光源)。こちらは、溶液で吸収されることなく n-GaN 表面に到達するため、溶液のラジカル濃度を変えることな

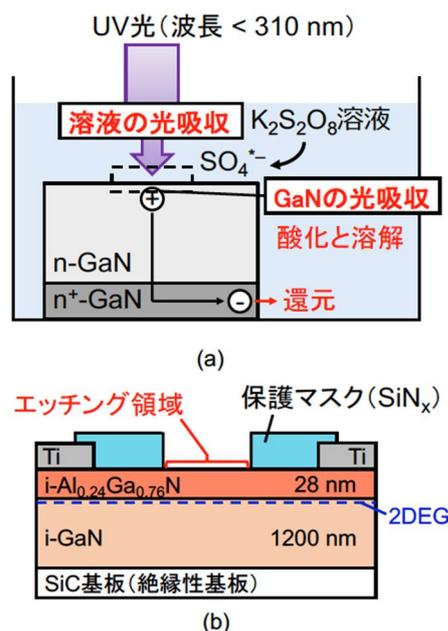


図 1 硫酸ラジカル水溶液を用いたウェットエッチング。(a) n+GaIn 上の n-GaN 層試料に対する実験セットアップ。(b) AlGaIn/GaN ヘテロ構造試料の模式図。

く、試料表面での光キャリア量を制御することができる。次に、AlGaIn/GaN ヘテロ構造に対する光電気化学特性を調査し、その結果をもとに AlGaIn 層のエッチングを行った。得られた結果を用いて、リセスゲート構造を有する AlGaIn/GaN ヘテロ構造トランジスタを作製し、その電気的特性を評価した。さらに、本技術をよりバンドギャップの広い AlGaInN/AlGaIn ヘテロ構造トランジスタのゲートリセス加工に適用し、同様のプロセスを用いて作製したトランジスタの電気的特性を評価した。全ての実験に対して加工面の形状や平坦性は、走査型電子顕微鏡 (SEM) および原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 硫酸ラジカル ( $\text{SO}_4^{\bullet-}$ ) 溶液を使った n-GaN 表面のエッチング

UVC 光照射により生成された硫酸ラジカル ( $\text{SO}_4^{\bullet-}$ ) 含有水溶液を使って n-GaN 表面をエッチングし、初期表面状態やエッチング条件とエッチング後に得られる表面モロロジーの関連性を明らかにした。初期表面にドライエッチングによる加工損傷を加えた試料では、未処理試料と比較して、エッチングレートが大幅に低下した。加工損傷により n-GaN 表面近傍に欠陥準位が生成され、光励起キャリアの再結合 (消滅) を促し、光電気化学反応量が低下したことに起因する。また、UVC 光源に加えて UVA 光源を同時照射することにより、同じ損傷試料に対しても十分なエッチングレートが得られることを明らかにした。

具体的には、バイアスパワー ( $P_{\text{bias}}$ ): 30W に設定し誘導結合型反応性イオンエッチング (ICP-RIE) 加工を施した試料を用意した (試料名: ICP30W)。現有の UVC 光源を最大出力 ( $10 \text{ mW/cm}^2$ ) に設定して照射しても、エッチングは進行しなかった。これに加えて、光強度:  $20 \text{ mW/cm}^2$  の UVA 光源を同時照射すると、 $1.8 \text{ nm/min}$  のエッチングレートが得られたが、表面のラフネスは大きく rms 値は  $10 \text{ nm}$  であった。さらに強度を上げて UVA 強度を  $45 \text{ mW/cm}^2$  に設定すると、エッチングレートは  $2.5 \text{ nm/min}$  まで増加し加工面のラフネスは  $2 \text{ nm}$  と大きく改善した。これは、UVA 光強度の増大により十分な正孔が溶液界面へ供給され、反応がイオン拡散律速へと移行したためだと考えられる。

##### (2) AlGaIn/GaN ヘテロ構造試料表面のエッチングと光起電力測定

AlGaIn/GaN ヘテロ構造に対して、上層 AlGaIn 層のウェットエッチングに成功した。UVC 照射強度とともに  $\text{SO}_4^{\bullet-}$  生成レートは上昇し、同時にエッチングレートも増大した。また、反応初期では、エッチング深さは UVC 照射時間に比例して増大したが、時間の経過とともにエッチング量が飽和し自己停止した。自己停止深さは UVC 光強度に大きく依存し、溶液/AlGaIn 界面の光起電力測定から、そのエッチング機構について理解を深めた。

図 2 は、UV 光の照射強度 ( $P_{\text{in}}$ ) と自己停止したエッチング深さの関係を示している。光強度を上げると上層 AlGaIn のエッチングレートは上昇するが、時間とともに飽和し、それ以上エッチングが進行しなくなる (エッチングの自己停止)。自己停止深さと光強度の関係は、大きく 3 つの特徴に分けられる。光強度の低い Region(1) では、強度の増大とともに自己停止深さは増加傾向にあるのに対し、Region(2) ではほとんど変化しない。またさらに強度の高い Region(3) では、エッチングは自己停止せず加工面は荒れたモロロジーとなる。各領域で実施したエッチング加工面を図 3 に示す。Region(1), (2) の光強度では、エッチングが上層

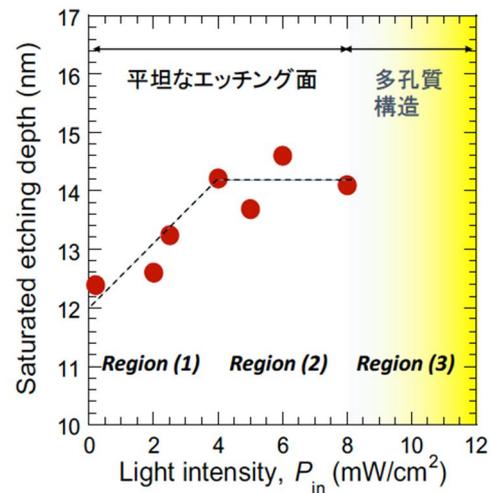


図 2 AlGaIn/GaN ヘテロ構造のエッチング深さと照射光強度の関係。

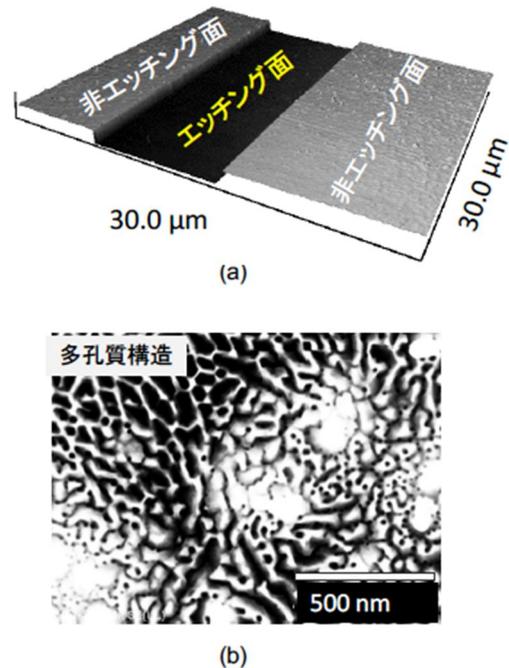


図 3 AlGaIn/GaN ヘテロ構造のエッチング面。(a) Region(1), (2) の平坦化エッチング後の AFM 像。(b) Region(3) の多孔質化エッチング後の SEM 像。

の AlGaN 内で自己停止し、加工面の平坦性は加工前と同等であった (図 3(a))。一方、光強度度の最も高い Region(3)では、前述のように自己停止せず、下層の GaN まで到達する多孔質構造が形成された (図 3 (b))。

次に、エッチング時の照射光強度がエッチング形状や深さの制御性に与える影響を明らかにするため、3 電極式の電気化学セルを用いて、溶液と AlGaN 界面に発生する光起電力 ( $V_{OC}$ ) を測定した。図 4 に示すように、 $4 \text{ mW/cm}^2$  以下の場合 (Region(1))、電解液/AlGaN/GaN 系の光起電力効果により、 $V_{OC}$  は  $P_{in}$  の増加とともに負方向に増加した。 $P_{in}$  が  $5 \text{ mW/cm}^2$  を超えると (Region (2))、 $V_{OC}$  は一定値を保持し、 $9 \text{ mW/cm}^2$  以上で再び徐々に増加した。このように、電解液 /AlGaN/GaN 系の  $V_{OC}$  は  $P_{in}$  によって変化し、図 3 と比較すると、エッチングの自己停止特性と強い相関があることが示唆された。

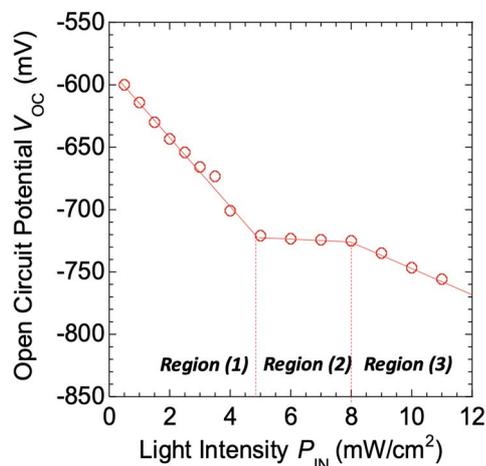


図 4 溶液/AlGaN 界面の光起電力測定。

### (3) AlGaN/GaN ヘテロ構造トランジスタのゲートリセス加工と電気的評価

開発したウェットエッチング法を、AlGaN/GaN ヘテロ構造を利用したヘテロ構造電界効果トランジスタ (HFET) のゲートリセス加工に適用した。ゲートリセス加工により、トランジスタの閾値電圧 ( $V_{th}$ ) は正方向にシフトし、ノーマリーオフ動作 ( $V_{th} < 0 \text{ V}$ ) を達成した。また、AlGaN 層内でエッチングを自己停止することにより、同一チップ上に作製したトランジスタの閾値電圧のばらつきを抑えることに成功した。

AlGaN/GaN 構造上に形成したショットキーダイオードの電流-電圧 (I-V) 特性と MIS キャパシタの容量-電圧 (C-V) を図 5 (a), (b) に示す。ここでは、エッチング無し試料とエッチングにより AlGaN 層の厚さ ( $d_{AlGaN}$ ) を  $6.1 \text{ nm}$  まで薄層化した試料の特性を比較している。図 5 (a) が示すように、エッチング無し試料の  $V_{th}$  は約  $-4.4 \text{ V}$  であり、 $V_{th}$  以上の電圧印加時に AlGaN/GaN 界面に電子が蓄積し、AlGaN 層厚さに対応する容量値が現れている。一方、エッチング試料では測定電圧範囲において容量値の立ち上がりが見られない。これは、AlGaN 層を薄層化したことにより、AlGaN/GaN 界面に電子が蓄積しなかった (界面 2DEG が空乏化した) ことを示している。また、エッチング試料では、印加電圧が  $0.1 \text{ V}$  を超えるとリーク電流が増加するため、容量値が測定不能となった。

図 4(b) に示すように、エッチング無しの MIS キャパシタの C-V 特性は、MIS ゲート AlGaN/GaN 構造で観察される典型的な 2 段階特性を示した。 $-10 \text{ V}$  以下のバイアスでは、AlGaN/GaN 界面の 2DEG が空乏化するため容量が観測されず、印加電圧が  $-10 \text{ V}$  を超えると電子が蓄積し始める。この時、測定容量値は 2 つの誘電体 (AlGaN 層と  $\text{Al}_2\text{O}_3$  絶縁膜層) の静電容量が合算される。印加電圧が  $5 \text{ V}$  を超えると、容量値は再び増加した。これは、正バイアス下で AlGaN/GaN 界面に形成された電位障壁を乗り越えて、電子が MIS 界面 ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}$  界面) に蓄積し始めたためである。エッチングあり MIS キャパシタの C-V 特性に着目すると、第 1 ステップの立ち上がり電圧は  $0 \text{ V}$  付近にシフトしていた。この容量値は、前述した 2 つの誘電体 (AlGaN 層と  $\text{Al}_2\text{O}_3$  絶縁膜層) の合成容量であると仮定すると、 $d_{AlGaN}$  は  $6.6 \text{ nm}$  と見積もられた。これは、AFM で測定した値と非常によく一致する。さらに、5 つのエッチングあり MIS デバイスの C-V 曲線をプロットしたところ、特性のばらつきはほとんどないことがわか

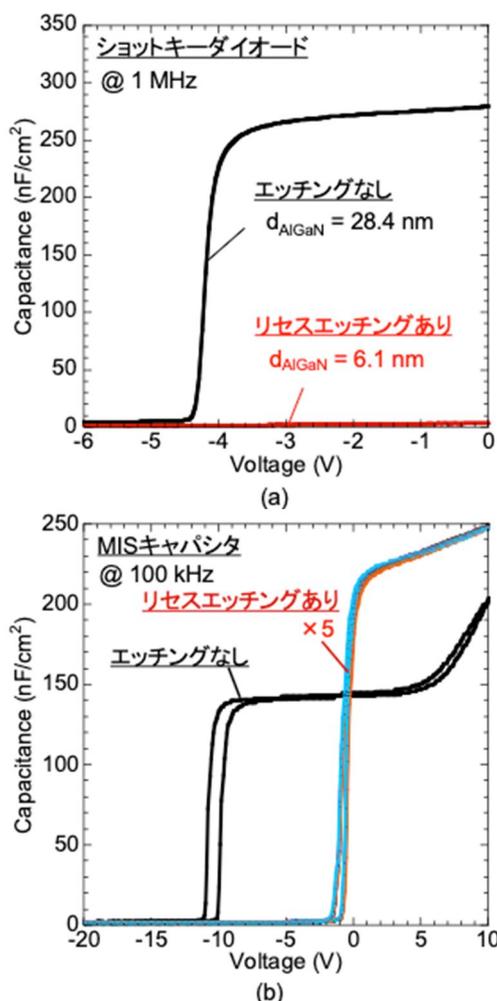


図 5 AlGaN/GaN ヘテロ構造上に形成したショットキーダイオードおよび MIS キャパシタの電気的特性。

特性のばらつきはほとんどないことがわか

った。これらの結果から、本手法によるエッチングは自己停止現象を利用することでチップ上の AlGaIn 層の厚みを均一化し、素子の特性ばらつきを抑制する効果が期待できる。

次に、本エッチング技術によりゲートリセス加工を施した試料に対してソース-ドレイン電極およびゲート電極を形成し、AlGaIn/GaN HFET を作製した。ゲートリセス加工を施したトランジスタは良好なピンチオフ特性を示し、本エッチングによる加工損傷の導入は見られなかった。同一チップ上に作製したトランジスタの  $V_{th}$  のばらつきを評価した。図 6 は、2 種類のゲート構造（ショットキーゲート、MIS ゲート）に対し、ゲートリセスエッチング無しと有りの試料を比較している。どちらのゲート構造においても、ゲートリセス加工により  $V_{th}$  は正方向にシフトしており、その分布（標準偏差）も小さくなっている。その値は、リセス加工ショットキーHFET で 5.46 mV、リセス加工 MIS-HFET で 16.7 mV であった。この結果は 1cm 角のテストチップで得られたものであるが、非常に高い均一性を示しており生産レベルに達していると考えられる。

#### (4) AlGaInN/AlGaIn ヘテロ構造トランジスタのゲートリセス加工と電氣的評価

開発したウェットエッチング法を、AlGaInN/AlGaIn ヘテロ構造に適用し、AlGaIn/GaN 構造と同様にエッチング可能であることを実証した。ゲートリセス加工により、ノーマリーオフ動作 ( $V_{th} < 0 V$ ) を達成するとともに、AlGaInN 層内でエッチングが自己停止する現象を利用することで、同一チップ上に作製したトランジスタの閾値電圧のばらつきを抑えることに成功した。

ここで用いたエッチング手法は、硫酸ラジカルの高い酸化力を用いず強制的に酸化電流を流す配線式の光電気化学エッチングである。AlN 層/サファイアテンプレート上に MOCVD 法を用いて AlGaInN チャネル層と AlGaInN バリア層を積層成長した資料を用いた。AlGaInN は、チャネル層の AlGaIn より禁制帯幅が広く、オーミック抵抗の低減に有利な高温合金化プロセスが適用可能であることが報告されている。本研究では、AlGaInN チャネル層の厚さを 2  $\mu m$ 、AlGaInN バリア層の初期膜厚を 20 nm に設計した。ゲートリセスエッチングを施した後、ソース-ドレイン電極、ゲート絶縁膜 ( $Al_2O_3$ : 30 nm) ゲート電極を形成し、AlGaInN/AlGaIn HFET を完成させた。

エッチングにより作製したリセスゲート型 MIS HFET は良好なピンチオフ特性を示し、しきい値電圧は、エッチング無しの素子と比較すると約 12 V 正側にシフトした。また、リセス加工深さと  $V_{th}$  には強い相関が見られ、エッチング量によるしきい値電圧の精密な制御が達成された。

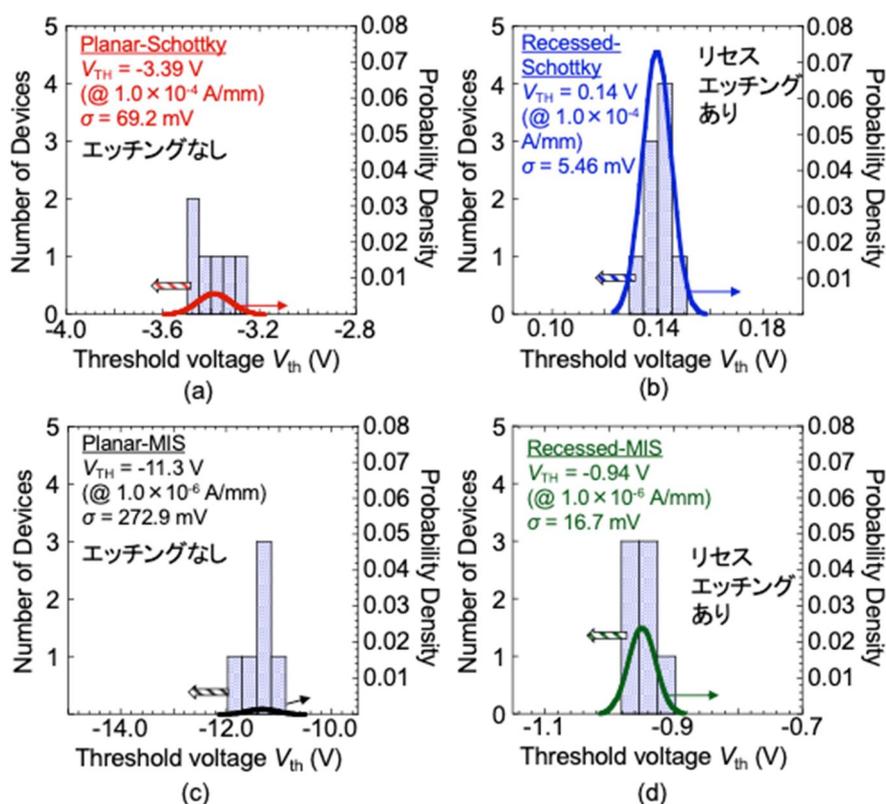


図 6 同一チップ上に作製した AlGaIn/GaN HFET の  $V_{th}$  分布。(a) エッチング無しショットキーゲート、(b) エッチング有りショットキーゲート、(c) エッチング無し MIS ゲート、(d) エッチング有り MIS ゲート。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Toguchi Masachika, Miwa Kazuki, Horikiri Fumimasa, Fukuhara Noboru, Narita Yoshinobu, Ichikawa Osamu, Isono Ryota, Tanaka Takeshi, Sato Taketomo	4. 巻 130
2. 論文標題 Self-terminating contactless photo-electrochemical (CL-PEC) etching for fabricating highly uniform recessed-gate AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors (HEMTs)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 024501 ~ 024501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0051045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 R. Ochi, T. Nabatame, T. Hashizume, T. Sato
2. 発表標題 HfSiO <sub>x</sub> -gate AlGaIn/GaN MOS HEMTs with improved operation stability
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Devices and Materials（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 滉朔、小松裕斗、渡久地 政周、井上暁喜、田中さくら、三好実人、佐藤 威友
2. 発表標題 電子情報通信学会電子デバイス研究会
3. 学会等名 光電気化学エッチング法を用いたAlGaInN/AlGaIn HFETの作製
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡久地 政周、三輪 和希、堀切 文正、福原 昇、成田 好伸、市川 磨、磯野 僚多、田中 丈士、佐藤 威友
2. 発表標題 電子情報通信学会電子デバイス研究会
3. 学会等名 低損傷コンタクトレス光電気化学エッチングを利用したリセスゲートAlGaIn/GaN HEMTsの作製
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	M. Toguchi, K. Miwa, F. Horikiri, N. Fukuhara, Y. Narita, O. Ichikawa, R. Isono, T. Tanaka, and T. Sato
2. 発表標題	Fabrication of Recessed-gate AlGaIn/GaN HEMTs by Low-Damage Contactless Photo-Electrochemical Etching
3. 学会等名	14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	越智亮太, 橋詰保, 佐藤 威友
2. 発表標題	AlGaIn/GaN MIS-HEMTsにおけるパラレル伝導評価
3. 学会等名	第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	大神洗貴, 大澤由斗, 渡久地政周, 堀切文正, 福原昇, 佐藤威友
2. 発表標題	n-GaN加工損傷面に対するコンタクトレス光電気化学 (CL-PEC) エッチング
3. 学会等名	第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	T. Sato, and M. Toguchi
2. 発表標題	Photo-Electrochemical Etching and Porosification of III-Nitride Semiconductors
3. 学会等名	2020 Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid State Science (PRiME 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名 M. Toguchi, K. Miwa, F. Horikiri, N. Fukuhara, Y. Narita, O. Ichikawa, R. Isono, T. Tanaka, and T. Sato
2. 発表標題 Fabrication of Recessed-Gate AlGaIn/GaN HEMTs Utilizing Contactless Photo-Electrochemical (CLPEC) Etching
3. 学会等名 2020 Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid State Science (PRiME 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Sato, M. Toguchi, K. Itoh, T. Hashizume
2. 発表標題 Precise control in threshold voltage of AlGaIn/GaN HEMTs utilizing a photoelectrochemical (PEC) etching
3. 学会等名 The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-8) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡久地政周, 三輪和希, 堀切文正, 福原昇, 成田好伸, 吉田丈洋, 佐藤威友
2. 発表標題 コンタクトレス光電気化学エッチングによるリセスゲートAlGaIn/GaN HEMT の作製
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤滉朔, 小松裕斗, 渡久地政周, 井上暁喜, 三好実人, 佐藤威友
2. 発表標題 光電気化学エッチング法を用いたAlGaInN/AlGaInリセスゲートHFETの作製
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福原昇, 堀切文正, 渡久地政周, 三輪和希, 大神洸貴, 佐藤威友
2. 発表標題 n+GaN基板上n-GaN層の光電気化学(PEC)エッチング時のカソード電極
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター・ホームページ <a href="https://www.rciqe.hokudai.ac.jp">https://www.rciqe.hokudai.ac.jp</a> 北海道大学量子知能デバイス研究室電気化学グループ・ホームページ <a href="https://hydrogen.rciqe.hokudai.ac.jp/~takekoto/ec/index.html">https://hydrogen.rciqe.hokudai.ac.jp/~takekoto/ec/index.html</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三好 実人  (Miyoshi Makoto)  (30635199)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授    (13903)	
研究分担者	橋詰 保  (Hashizume Tamotsu)  (80149898)	北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・特任教授    (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------