

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03224

研究課題名(和文) 自己停止酸化機構を利用した窒化物半導体低損傷加工プロセスの開発とトランジスタ応用

研究課題名(英文) Low-damage Processing of Nitride Semiconductors Based on Self-stopping Oxidation and Transistor Applications

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) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：光電気化学反応を利用したAlGaIn/GaN 高電子移動度トランジスタ(HEMT)のゲートリセス加工プロセスを開発した。溶液とAlGaIn界面でおこる反応の基礎過程を明らかにし、AlGaIn層で光励起される正孔を利用することにより、平坦でかつ深さ制御されたエッチングが可能であることを見出した。さらに最適な反応条件では、エッチングが自己停止することを発見し、チップ面内において均一な深さで加工を止める方法を確立した。これにより作製されたショットキー型およびMIS型HEMTは、従来素子と比べて、しきい値電圧のばらつきが小さく、ゲート制御性が向上することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題で開発した光電気化学(PEC)エッチングにより、従来のドライエッチングで問題となっていた加工損傷を大幅に抑制させることに成功し、ナノメートルスケールでエッチング深さの精密制御が達成された。さらに、エッチング機構を解明し広範の窒化物材料に適用するための基盤技術を確立した。これらの成果は、Siに代わる次世代電力変換用トランジスタとして期待されているGaN系トランジスタの信頼性・安定性向上に繋がると期待される。

研究成果の概要(英文)：The photo-electrochemical (PEC) process was developed for fabricating recessed-gate AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors (HEMTs). The photo-carriers generated in the top AlGaIn layer caused homogeneous etching of AlGaIn with a smooth surface. Self-termination phenomena observed under optimal PEC condition were useful for precisely controlling the etching depth in the AlGaIn layer. Two types of HEMTs, i.e., Schottky-gate and metal-insulator-semiconductor (MIS)-gate, were fabricated. A recessed-gate AlGaIn/GaN structure fabricated with PEC etching showed positive threshold voltage, and its variation was very small. A recessed-gate structure with PEC etching showed better current transport controllability with a small subthreshold-slope than that of planar-gate and dry-etched-gate AlGaIn/GaN structures.

研究分野：電気電子工学

キーワード：窒化ガリウム 電気化学プロセス 低損傷エッチング トランジスタ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

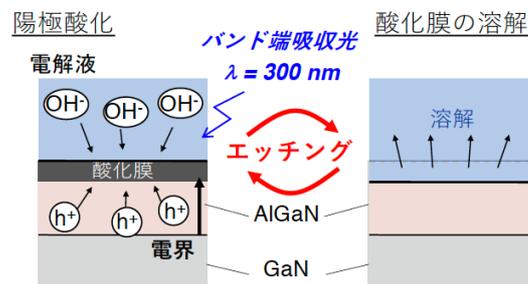
1. 研究開始当初の背景

近年、化石燃料の枯渇や地球温暖化の問題から省エネルギー社会の実現が急務となっており、高効率な電力変換器「インバータ」の需要が高まっている。現在インバータの中核素子として主流であるシリコン (Si) パワートランジスタは、長年の技術蓄積を糧に研究開発が着実に進められているが、材料限界により変換効率の大幅な向上は困難である。一方、窒化ガリウム (GaN) は、Si に比べ、約 3 倍のバンドギャップ、約 10 倍の破壊電界をもち、電子飽和速度が高いなど材料的優位性を有している。このことから、GaN 系トランジスタは Si よりもオン抵抗を 2 桁以上低減でき、ジュール損失を著しく抑制することが可能であるため、Si に代わる次世代電力変換用トランジスタ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・安定性に関わる大きな課題が残っており、実用化の障害となっている。例えば、精密なしきい値制御とノーマリーオフ動作に有望なリセスゲート構造作製には、通常プラズマ支援ガスエッチング (ドライエッチング) 工程が用いられるが、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。また、高耐圧動作に適した縦型トランジスタの作製には、欠陥の少ない自立 GaN 基板の結晶層が用いられる。しかし本構造に対してもプラズマ加工による損傷は深刻で、橋詰らの研究により、ドライエッチング面に形成したゲート電極の界面特性は大幅に劣化することが明らかとなっている。

2. 研究の目的

これに対し本研究提案では、申請者らがこれまで培ってきた「半導体表面の電気化学的制御技術」を駆使して、表面・界面準位の影響を抑制した高信頼性 GaN 系パワートランジスタの実現を目指す。その核となる技術として、電気化学法による表面酸化の自己停止と溶解を連続制御する独自の加工プロセスを開発することを目的とした。

電気化学法は、半導体と電解液界面の電気化学反応を利用したウェットプロセスであり、従来法と比べ半導体表面への損傷が極めて少ない (図 1)。申請者らは、GaN 表面に厚さ数 10nm の酸化膜の形成に成功し、その界面準位密度は極めて低く、電気化学法が窒化物半導体の界面特性の向上に有望であることを示してきた。本課題では、これらの知見を活かしつつ、AlGaIn/GaN ヘテロ構造に対する光電気化学 (PEC: Photo-electrochemical) 反応を制御し、トランジスタのゲートリセス加工プロセスの開発を行った。



電気化学反応による表面酸化 (AlおよびGa酸化膜の形成) と溶解 = エッチング

図 1 電気化学エッチング法の概念図。

3. 研究の方法

光電気化学 (PEC) プロセスに用いた実験セットアップを図 2 (a) に示す。プロセスには 3 電極式の電気化学セルを用い、作用電極 (W.E.)、参照電極 (R.E.)、対向電極 (C.E.) をそれぞれ AlGaIn/GaN 試料、飽和 Ag/AgCl、Pt とした。本研究では、SiC 基板上に結晶成長した AlGaIn/GaN ヘテロ接合を有する試料を用いた (図 2 (b))。電極電位を走査し反応電流を流すためにオーミック電極を 2DEG に形成し、エッチング保護マスクとして SiO<sub>2</sub> をスパッタリングにより成膜した。

本研究では、電解液として硫酸とリン酸を混合した酸性溶液を用い、半導体表面に生成した酸化物を直接電解液に溶解させる PEC エッチングを採用した。また、作用電極の電位と照射光の波長および強度を精密に調整し、反応電流を制御した。

はじめに、AlGaIn/GaN ヘテロ構造の光電気化学特性を評価するため、暗中小および単色光照射下において電流-電圧 (JEC-VEC) 特性を測定した。次に、種々の光電気化学条件により AlGaIn/GaN ヘテロ構造の PEC エッチングを行い、原子間力顕微鏡 (AFM) および走査型電子顕微鏡 (SEM)

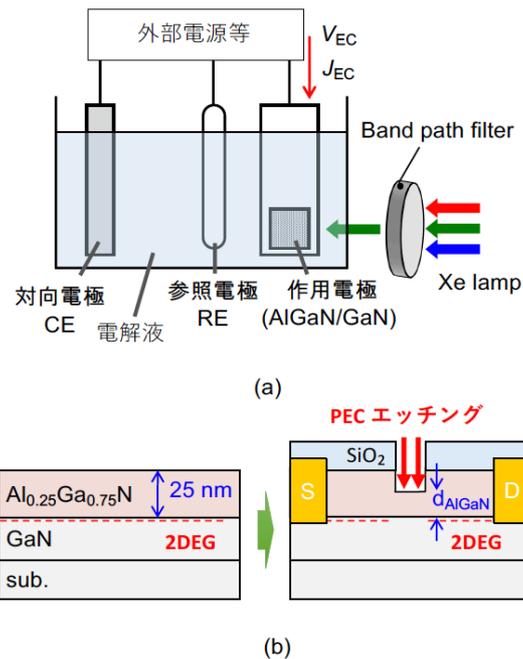


図 2 (a) PEC プロセスのセットアップと (b) 試料の模式図。

によりエッチング後の構造評価を行った。最後に、本手法で AlGaN/GaN リセスゲート HEMT を試作し、その電気的特性を評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) AlGaN/GaN ヘテロ構造試料の光電気化学特性

AlGaN/GaN ヘテロ構造に対して単色光照射時の光電気化学特性を明らかにし、PEC エッチングの精密な制御につながる基礎的知見を得た。図 3 (a)に、暗中所および波長  $\lambda = 300 \text{ nm}$ ,  $360 \text{ nm}$ ,  $400 \text{ nm}$  の単色光を AlGaN 側から照射して得られた JEC—VEC 特性と、図 3 (b)に、一次元ポテンシャル計算により求めた VEC = 1.0 V における電解液/AlGaN/GaN 系のバンドダイアグラムを示す。すべての条件下において、VEC = -0.8 V 付近を閾値として負の電流（還元電流）が流れている。これは、負電圧の印加により AlGaN 障壁が小さくなり、2DEG から電解液/AlGaN 界面に電子が供給されることで還元反応が進行したこと起因する。正方向に電極電位を掃引した際、暗中所および  $\lambda = 400 \text{ nm}$  の光照射下においては正負どちらの方向にも電流が見られない。本条件下では電極内に正孔がほとんど存在せず、また電子は AlGaN 障壁により電解液に移動できないため、電解液/AlGaN 界面において電気化学反応が起こらないと考えられる。これは AlGaN/GaN ショットキーダイオードにおけるキャリアの振る舞いと類似しており、電解液/AlGaN/GaN 系においても同様の整流特性が得られることが明らかとなった。

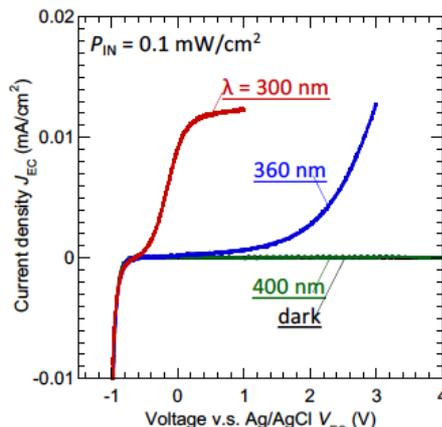
一方で、半導体電極内に光励起キャリアが生成される条件下では、正バイアス領域において異なる特性が得られた。AlGaN 層を透過し GaN 層で選択的に吸収される  $\lambda = 360 \text{ nm}$  の光照射下では、VEC = 1.0 V 付近を閾値として正の電流（酸化電流）が流れはじめた。VEC = 1.0 V におけるバンド図（図 3 (b)）を見てみると、AlGaN/GaN 界面には 2DEG が存在しており、GaN 層側ではバルク方向に電界が生じている。このとき、VEC = 1.0 V 以下の低い電圧では、電子および正孔は共に電解液/AlGaN への移動を抑制され、結果として大半の電子-正孔対は再結合し消滅すると考えられる。しかし、VEC が 1.0 V を越えると、しだいに 2DEG 密度は減少していきやがて枯渇する。このような状況下では、光励起により GaN 層内に生成した正孔は、高電界により AlGaN 障壁を越え電解液/AlGaN 界面に供給されるため、正の酸化電流として観測されたと考えられる。

これに対し、AlGaN 層においても光励起キャリアが生成される  $\lambda = 300 \text{ nm}$  の光照射下では、VEC = -0.5 V 付近を閾値として酸化電流を観測し、VEC = 0 V 付近で飽和する特性を得た。VEC = 1.0 V 以下（図 3 (b)）でも AlGaN 層内には強い分極が生じており、生成した電子および正孔はそれぞれ 2DEG と電解液/AlGaN 界面へ輸送され、酸化電流として観測されたと考えられる。また、先の議論の通り VEC = 1.0 V 以下では、高濃度の 2DEG により GaN 層で光励起されるキャリアはほとんど電気化学反応に寄与せず、AlGaN 層で光励起されたキャリアのみが反応に寄与すると考えられる。そのため、本条件下で見られた正の飽和電流値は、AlGaN 層における光励起キャリア量に相当することを示唆している。

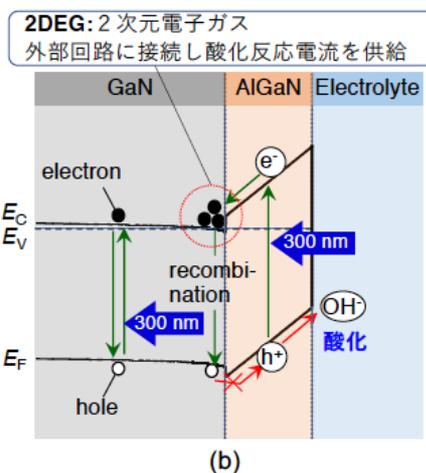
このように、AlGaN/GaN ヘテロ接合電極の酸化反応には、①GaN 層における光励起キャリアが寄与する GaN 層供給過程と、②AlGaN 層における光励起キャリアが寄与する AlGaN 層供給過程の二種類に分類され、それらは、照射光波長  $\lambda$  および電極電位 VEC の調整により選択可能であることが明らかとなった。

##### (2) AlGaN/GaN ヘテロ構造の光電気化学エッチング

本研究では、前節で述べた②AlGaN 層における光励起キャリアを利用することにより、AlGaN 上面層に対して平坦かつ深さ制御されたエッチングが可能であることを明らかにした。また、PEC エッチングレートは電気化学条件で制御され、例えば 1nm/min 以下の低レートでナノメートル精度の加工が可能であることを明らかにした。さらに、最適な電気化学条件下では、エッチングの自己停止機構が発現することを発見した。



(a)



(b)

図 3 (a) 電解液中で測定した反応電流 ( $J_{EC}$ )—電圧 ( $V_{EC}$ ) 特性、(b) 電解液/AlGaN/GaN 接合界面の電位分布。

図 3 (a) 電解液中で測定した反応電流 ( $J_{EC}$ )—電圧 ( $V_{EC}$ ) 特性、(b) 電解液/AlGaN/GaN 接合界面の電位分布。

図4(a),(b)に、GaN 層供給過程のキャリアを利用の条件下 ( $\lambda=360\text{ nm}$ ,  $\text{VEC}=5.0\text{ V}$ ) で電気化学エッチングを行った試料の上面と断面SEM像を示す。照射光強度 PIN は  $1.0\text{ mW cm}^{-2}$  とした。被エッチング領域は直径  $20\text{ nm}$  以下の孔が無数に存在する多孔質構造となっていることがわかった。断面SEM像から、孔深さは約  $240\text{ nm}$  と見積もられ、孔は AlGaIn 層を貫通し GaN 層まで到達していた。また、AlGaIn 層内で形成された孔の直径は上面SEM像から見積もられる孔と同様  $20\text{ nm}$  以下であるのに対し、GaN 層内に形成された孔の直径は約  $50\sim 100\text{ nm}$  であった。エッチング時間を長くすると、AlGaIn 層内の孔には変化が見られず、GaN 層内の孔の密度及び深さが増加した。これは、孔が AlGaIn 層を貫通し GaN 層に到達すると、AlGaIn 表面でのエッチング反応が起きないことを意味している。

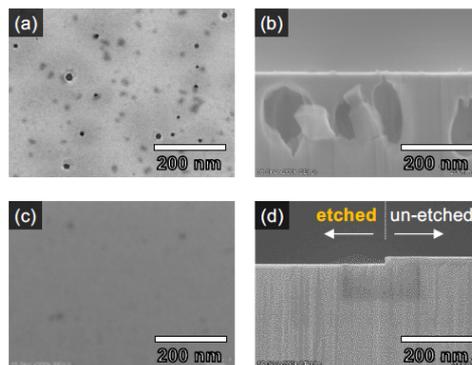
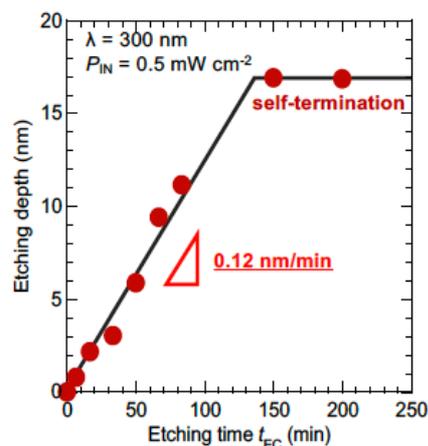


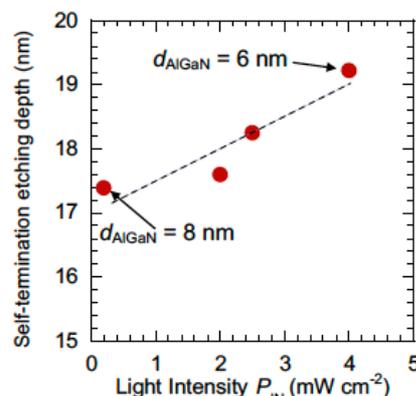
図4 GaN 層供給過程のキャリアを利用した試料の SEM 像 : (a) 表面、(b) 断面。AlGaIn 層供給過程のキャリアを利用した試料の SEM 像 : (c) 表面、(d) 断面。

図4(b),(c)に、AlGaIn 層供給過程のキャリアを利用の条件下 ( $\lambda=300\text{ nm}$ ,  $\text{VEC}=-0.2\text{ V}$ ) で電気化学エッチングを行った試料の上面と断面SEM像を示す。PIN は同じく  $1.0\text{ mW cm}^{-2}$  とした。被エッチング面と保護面の間に約  $20\text{ nm}$  の段差が見られ、AFM による被エッチング面における高さの二乗平均平方根 RMS の 5 点平均は  $0.41\text{ nm}$  と良好な値が得られた。上面および断面の SEM 像からは、GaN 層供給過程のキャリアを利用したエッチングで見られた孔は確認されなかった。以上より、AlGaIn 層供給過程のキャリアを利用する電気化学条件下では、局所エッチングが抑制された均一なエッチングが実現されることがわかった。



(a)

図5(a)は  $\text{PIN} = 0.5\text{ mW cm}^{-2}$  の時に得られたエッチング深さの時間依存性である。エッチング初期では深さが時間に対し線形に増加しているが、ある深さで飽和しており、エッチングが自己停止することが明らかになった。初期 AlGaIn 膜厚は  $25\text{ nm}$  であるため、AlGaIn 層の途中でエッチングが自己停止したことを示している。図5(b)は自己停止深さの照射光強度 PIN 依存性である。自己停止深さは PIN に対して線形的に増加していることから制御可能であり、また AlGaIn 層内で生成する光励起キャリア量が自己停止深さに影響することが明らかになった。



(b)

図5(a) PEC エッチング深さと時間の関係、(b) エッチング自己停止深さと照射光強度の関係。

このように AlGaIn 層供給過程のキャリアのみを用いることにより、表面平坦性および深さ制御性において良好な結果が得られ、自己停止機構の発現によりエッチング深さのばらつき抑制にも効果的であることがわかった。従来のドライエッチング法では、エッチングストップ層などの導入により材料選択比を利用したエッチング深さを制御するのが一般的である。今回の結果は、より簡便な方法でエッチング深さを制御できることを示したものであり、デバイスプロセスの大幅な簡略化につながる成果である。以上より、AlGaIn 層供給過程のキャリアを利用した PEC エッチングは、リセス加工に非常に有望であるといえる。

### (3) 光電気化学エッチング法によるリセスゲート AlGaIn/GaN HEMT の試作

PEC エッチング法を用いてゲートリセス加工を施すことにより、ノーマリーオフ動作する AlGaIn/GaN HEMT の作製に成功した。同一チップ上に 29 個の HEMT を作製し電気的特性を評価した結果、PEC エッチング法は、ゲート電圧によるドレイン電流の制御特性の向上、しきい値電圧のばらつき抑制にも有効であることを明らかにした。

上層の AlGaIn 面に直接ゲート金属を形成したショットキーHEMT は、良好なピンチオフ特性および飽和特性を示し、ドレイン電流が 0 となるしきい値電圧は、ゲートリセス加工により約  $3\text{ V}$  ほど正側にシフトして  $V_{th}=+0.2\text{ V}$  となった。ゲート電極直下の AlGaIn 層を薄層化することにより、当初の目的の通り、しきい値電圧を制御しノーマリーオフ動作 ( $V_{th}>0\text{ V}$ ) を達成した。

ゲート電極に MIS (金属-絶縁体-半導体) 構造を用いた AlGaIn/GaN HEMT の結果について説明する。図 6 (a) は、ゲート絶縁膜に厚さ 30nm の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を用いたリセスゲート HMET のドレイン電流-電圧 (ID-VD) 特性である。ショットキー-HEMT と同様に、良好なピンチオフ特性を示したが、しきい値電圧は期待される値より大幅に負側にずれていた (V<sub>th</sub>=-10V)。その可能性の 1 つに、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜中に酸素欠陥由来の固定電荷が導入されたことが考えられる。これを改善するために、作製した MIS-HEMT に post metallization annealing (PMA) を施した。図 6 (b) に、PMA 前後の HEMT の伝達特性 (ID-VG 特性) を比較して示す。PMA 工程により、しきい値電圧を正側にシフトさせることに成功し、トランスコンダクタンス (gm) も向上した。

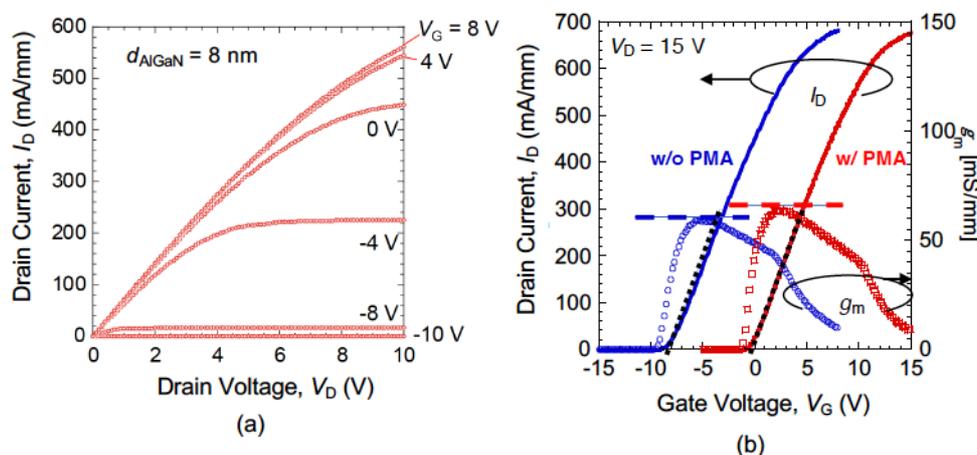


図 6 (a) PEC エッチングによりリセス加工を施した MIS-HEMT のドレイン電流-電圧 (I<sub>D</sub>-V<sub>D</sub>) 特性と、(b) PMA プロセス前後での伝達特性 (I<sub>D</sub>-V<sub>G</sub> 特性) の比較。

1 つのチップ上に作製したショットキー-HEMT および MIS HEMT の ID-VG 特性としきい値電圧のヒストグラムを、図 7 (a),(b) にそれぞれ示す。得られた ID-VG 特性はデバイス間で大きなばらつきはなく、しきい値電圧のヒストグラムは非常に鋭い形状となった。その標準偏差は、ショットキー-HEMT および MIS HEMT でそれぞれ 19 mV と 32 mV であり、無加工のプレーナゲート HEMT と比べて、素子の均一性が大幅に向上していることが分かった。この要因の 1 つは、開発した PEC プロセスに見られるエッチングの自己停止機構である。エッチングの進行により、チップ上のどの領域においても光強度で決まった厚さでエッチングが自己停止したことを示唆している。また、ドライエッチングによりゲートリセス加工を施した MIS ゲート HEMT の電気的特性と比較したところ、ID-VG 特性 (片対数グラフ) の直線部分から見積もられるサブスレッショルド-スロープ (SS) の値は、Planar-HEMT: 141 mV/dec、PEC-HEMT: 121 mV/dec、ICP-HEMT: 480 mV/dec であり、PEC-HEMT で値がもっとも小さくゲート制御性に優れていることが分かった。これは、PEC エッチングプロセスが、従来プロセスと比べて表面に導入される損傷が小さく、デバイス特性を劣化させることなくリセス加工が可能であることを示している。

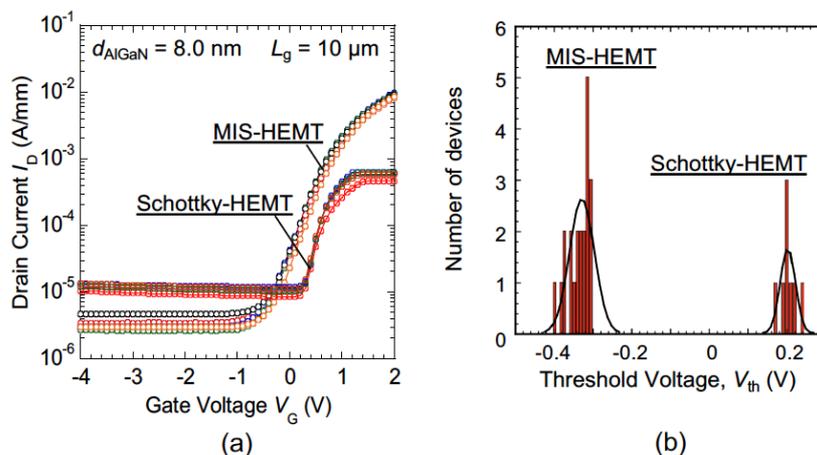


図 7 PEC プロセスにより同一チップ上に作製したリセスゲート HEMT の (a) I<sub>D</sub>-V<sub>G</sub> 特性と、(b) しきい値電圧のヒストグラム。

以上より、本課題において、PEC エッチングプロセスを AlGaIn/GaN HEMT のゲートリセス加工に応用し、エッチング深さの制御、ノーマリーオフ動作、しきい値電圧のばらつき抑制、ゲート制御性の向上を達成したと結論づけられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Horikiri Fumimasa, Fukuhara Noboru, Ohta Hiroshi, Asai Naomi, Narita Yoshinobu, Yoshida Takehiro, Mishima Tomoyoshi, Toguchi Masachika, Miwa Kazuki, Ogami Hiroki, Sato Taketomo	4. 巻 13
2. 論文標題 Thermal-assisted contactless photoelectrochemical etching for GaN	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 046501 ~ 046501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab7e09	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 -
1. 著者名 Miwa Kazuki, Komatsu Yuto, Toguchi Masachika, Horikiri Fumimasa, Fukuhara Noboru, Narita Yoshinobu, Ichikawa Osamu, Isono Ryota, Tanaka Takeshi, Sato Taketomo	4. 巻 13
2. 論文標題 Self-termination of contactless photo-electrochemical (PEC) etching on aluminum gallium nitride/gallium nitride heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 026508 ~ 026508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab6f28	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 -
1. 著者名 Sato Taketomo, Toguchi Masachika, Komatsu Yuto, Uemura Keisuke	4. 巻 32
2. 論文標題 Low-Damage Etching for AlGaIn/GaN HEMTs Using Photo-Electrochemical Reactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing	6. 最初と最後の頁 483 ~ 488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSM.2019.2934727	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Horikiri Fumimasa, Sato Taketomo, Fukuhara Noboru, Ohta Hiroshi, Asai Naomi, Narita Yoshinobu, Yoshida Takehiro, Mishima Tomoyoshi, Toguchi Masachika, Miwa Kazuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Photoelectrochemical Etching Technology for Gallium Nitride Power and RF Devices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing	6. 最初と最後の頁 489 ~ 495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSM.2019.2944844	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toguchi Masachika, Miwa Kazuki, Sato Taketomo	4. 巻 166
2. 論文標題 Communication?Anisotropic Electrochemical Etching of Porous Gallium Nitride by Sub-Bandgap Absorption Due to Franz-Keldysh Effect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of The Electrochemical Society	6. 最初と最後の頁 H510 ~ H512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/2.0551912jes	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 -

1. 著者名 Uemura Keisuke, Deki Manato, Honda Yoshio, Amano Hiroshi, Sato Taketomo	4. 巻 58
2. 論文標題 Effect of photoelectrochemical etching and post-metallization annealing on gate controllability of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCD20 ~ SCCD20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab06b9	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 -

1. 著者名 Toguchi Masachika, Miwa Kazuki, Horikiri Fumimasa, Fukuhara Noboru, Narita Yoshinobu, Yoshida Takehiro, Sato Taketomo	4. 巻 12
2. 論文標題 Electrodeless photo-assisted electrochemical etching of GaN using a H3PO4-based solution containing S2O8 2- ions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 066504 ~ 066504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab21a1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Horikiri Fumimasa, Fukuhara Noboru, Ohta Hiroshi, Asai Naomi, Narita Yoshinobu, Yoshida Takehiro, Mishima Tomoyoshi, Toguchi Masachika, Miwa Kazuki, Sato Taketomo	4. 巻 12
2. 論文標題 Simple wet-etching technology for GaN using an electrodeless photo-assisted electrochemical reaction with a luminous array film as the UV source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 031003 ~ 031003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab043c	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 -

1. 著者名 Matsumoto Satoru, Toguchi Masachika, Takeda Kentaro, Narita Tetsuo, Kachi Tetsu, Sato Taketomo	4. 巻 57
2. 論文標題 Effects of a photo-assisted electrochemical etching process removing dry-etching damage in GaN	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 121001 ~ 121001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.121001	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 -

1. 著者名 Kumazaki Yusuke, Matsumoto Satoru, Sato Taketomo	4. 巻 164
2. 論文標題 Precise Structural Control of GaN Porous Nanostructures Utilizing Anisotropic Electrochemical and Chemical Etching for the Optical and Photoelectrochemical Applications	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of The Electrochemical Society	6. 最初と最後の頁 H477 ~ H483
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/2.0771707jes	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 -

1. 著者名 Kumazaki Yusuke, Uemura Keisuke, Sato Taketomo, Hashizume Tamotsu	4. 巻 121
2. 論文標題 Precise thickness control in recess etching of AlGaIn/GaN hetero-structure using photocarrier-regulated electrochemical process	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 184501 ~ 184501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4983013	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 -

1. 著者名 植村圭佑, 松本悟, 渡久地政周, 伊藤圭亮, 佐藤 威友	4. 巻 117
2. 論文標題 光電気化学反応を利用した窒化物半導体の低損傷エッチングと電子デバイスへの応用	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 23 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計42件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 24件）

1. 発表者名 三輪 和希, 大神 洸貴, 渡久地 政周, 堀切 文正, 福原 昇, 成田 好伸, 吉田 丈洋, 佐藤 威友
2. 発表標題 加熱による硫酸ラジカルの生成とn-GaN光電気化学 (PEC) エッチングへの応用
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀切 文正, 福原 昇, 太田 博, 浅井 直美, 成田 好伸, 吉田 丈洋, 三島 友義, 渡久地 政周, 三輪 和希, 大神 洸貴, 佐藤 威友
2. 発表標題 GaN の光電気化学(PEC)エッチングが有する可能性 加熱によるエッチング速度の向上
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020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 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67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田 健太郎, 山田 真嗣, 渡久地 政周, 加地 徹, 佐藤 威友
2. 発表標題 電気化学的手法を用いたICP-RIE加工n-GaN表面の評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 F. Horikiri, N. Fukuhara, M. Toguchi, and T. Sato
2. 発表標題 GaN Wet Etching Process for HEMT Devices
3. 学会等名 12th International symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 威友, 渡久地 政周
2. 発表標題 III-V族化合物半導体のウェットエッチング ~窒化物半導体に関する最近の話題を中心に~
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019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 K2S2O8/H3PO4 混合溶液を用いた n-GaN のコンタクトレスエッチング
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武田 健太郎, 渡久地 政周, 佐藤 威友
2. 発表標題 電気化学インピーダンス法を用いたn-GaN加工表面の評価 (2)
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三輪 和希, 渡久地 政周, 佐藤 威友
2. 発表標題 高濃度n型GaN基板に対する光電気化学(PEC)エッチングの調査
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松 祐斗, 渡久地 政周, 齊藤 早紀, 三好 実人, 佐藤 威友
2. 発表標題 AlGaInN/AlGaInNヘテロ構造の光電気化学エッチング(2)
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Sato, K. Uemura, and M. Toguchi
2. 発表標題 Damage-less Wet Etching for Normally-off AlGaIn/GaN HEMTs using Photo-electrochemical Reactions
3. 学会等名 2019 International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Horikiri, N. Fukuhara, H. Ohta, N. Asai, Y. Narita, T. Yoshida, T. Mishima, M. Toguchi, K. Miwa, and T. Sato
2. 発表標題 GaN Wet Etching Process for Power and RF Devices
3. 学会等名 2019 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 F. Horikiri, N. Fukuhara, H. Ohta, N. Asai, Y. Narita, T. Yoshida, T. Mishima, M. Toguchi, K. Miwa, and T. Sato
2 . 発表標題 GaN Wet Etching Process
3 . 学会等名 13th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Miwa, M. Toguchi, T. Sato
2 . 発表標題 Photo-electrochemical etching optimized for high-doped n-type GaN
3 . 学会等名 13th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Takeda, M. Toguchi, T. Sato
2 . 発表標題 Characterization of processing-damage induced on n-GaN surface utilizing electrochemical methods
3 . 学会等名 13th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 F. Horikiri, N. Fukuhara, H. Ohta, N. Asai, Y. Narita, T. Yoshida, T. Mishima, M. Toguchi, K. Miwa, and T. Sato
2 . 発表標題 GaN Wet Etching Process for Power and RF Devices
3 . 学会等名 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Komatsu, M. Toguchi, and T. Sato
2 . 発表標題 Precise control in recessed-gate etching for AlGaIn/GaN HEMTs by utilizing photo- electrochemical reactions
3 . 学会等名 The 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 F. Horikiri, N. Fukuhara, Y. Narita, T. Yoshida, M. Toguchi, K. Miwa, and T. Sato
2 . 発表標題 Simple Photoelectrochemical Etching for GaN HEMT Application
3 . 学会等名 The 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Toguchi, K. Miwa, F. Horikiri, N. Fukuhara, Y. Narita, T. Yoshida, and T. Sato
2 . 発表標題 Evaluation of Radical Production Rate from S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> <sup>2-</sup> ions for GaN Etching
3 . 学会等名 The 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Komatsu, M. Toguchi, and T. Sato
2 . 発表標題 Precise Control in Threshold Voltage of AlGaIn/GaN HEMTs by Photoelectrochemical Etching
3 . 学会等名 Materials Research Meeting 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Toguchi, K. Miwa, F. Horikiri, N. Fukuhara, Y. Narita, T. Yoshida, and T. Sato
2. 発表標題 Contactless Photoelectrochemical Etching of n-GaN in K2S2O8 solution
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Horikiri, N. Fukuhara, Y. Narita, T. Yoshida, M. Toguchi, K. Miwa, and T. Sato
2. 発表標題 Simple Photoelectrochemical Etching of GaN for RF Application
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Sato and M. Toguchi
2. 発表標題 Precisely-controlled etching of gallium nitride utilizing electrochemical reactions
3. 学会等名 Nanotech Malaysia 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Toguchi, S. Matsumoto, and T. Sato
2. 発表標題 Control of Pore Depth in GaN Porous Structures Utilizing a Photoabsorption Process Under below-Bandgap Illumination
3. 学会等名 233rd ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Sato and M. Toguchi
2. 発表標題 Electrochemical Formation and Application of Porous Gallium Nitride
3. 学会等名 Americas International Meeting on Electrochemistry and Solid State Science (AiMES 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Sato
2. 発表標題 Low-damage Etching for GaN-based Electronic Devices utilizing Photo-electrochemical Reactions
3. 学会等名 4th Intensive Discussion on Growth of Nitride Semiconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Uemura, M. Deki, Y. Honda, H. Amano, and T. Sato
2. 発表標題 Effect of Photo-electrochemical Etching and Post-metallization Annealing on Gate-controllability of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors
3. 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (IWN2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武田健太郎, 渡久地政周, 佐藤 威友
2. 発表標題 電気化学インピーダンス法を用いたn-GaN加工表面の評価
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Uemura, M. Deki, Y. Honda, H. Amano, and T. Sato
2. 発表標題 Recessed-gate AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors (HEMTs) Prepared by Photo-electrochemical Etching and Post-metallization Annealing
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡久地政周, 武田健太郎, 佐藤威友
2. 発表標題 窒化ガリウム加工基板に対する選択的光電気化学エッチングの検討 "
3. 学会等名 2018 年 電気化学秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小松祐斗, 植村圭佑, 渡久地政周, 佐藤威友
2. 発表標題 AlGaIn/GaNヘテロ構造トランジスタを基盤とする高感度化学センサの検討
3. 学会等名 2018 年 電気化学秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Uemura, Y. Komatsu, and T. Sato
2. 発表標題 Low-damage wet etching for AlGaIn/GaN recessed-gate HEMTs using photo-electrochemical reactions
3. 学会等名 11th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitride and Nanomaterials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Takeda, M. Toguchi, and T. Sato
2. 発表標題 Electrochemical characterization of etching damage induced to n-GaN surface
3. 学会等名 11th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitride and Nanomaterials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀切文正, 福原昇, 太田博, 浅井直美, 成田好伸, 吉田文洋, 三島友義, 渡久地政周, 三輪和希, 佐藤威友
2. 発表標題 GaNの光電気化学(PEC)エッチングが有する可能性 コンタクトレスでのエッチング
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019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, 吉田文洋, 佐藤威友
2. 発表標題 ペルオキシ二硫酸イオン(S2O8 <sup>2-</sup> )含有電解液におけるGaNの電気化学特性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松祐斗, 植村圭佑, 佐藤威友
2. 発表標題 AlGaInN/AlGaInNヘテロ構造の光電気化学エッチング
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Sato, K. Uemura, Y. Kumazaki, and T. Hashizume
2 . 発表標題 Precise thickness control in recess-etching for normally-off AlGaIn/GaN HEMTs using a low damage photo-electrochemical reaction
3 . 学会等名 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS 12) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Uemura, Y. Kumazaki, T. Sato, and T. Hashizume
2 . 発表標題 Highly-controllable etching for AlGaIn/GaN recessed-gate structures utilizing low-damage electrochemical reactions
3 . 学会等名 12th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Matsumoto, M. Toguchi, and T. Sato
2 . 発表標題 Removal of reactive-ion-etching damage from n-GaN surface using a photoelectrochemical process
3 . 学会等名 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Sato, K. Uemura, and T. Hashizume
2 . 発表標題 Improved wet-etching processes for GaN-based electron devices
3 . 学会等名 2017 MRS Fall Meeting and Exhibit (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 植村圭佑、佐藤威友、橋詰保
2. 発表標題 光電気化学(PEC)反応を利用したリセスゲートAlGaIn/GaN HEMTの作製
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松本悟、佐藤威友、成田哲生、加地徹、橋詰保
2. 発表標題 光電気化学反応を利用したn-GaN表面層の低損傷エッチング
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 構造体の製造方法および中間構造体	発明者 堀切文正、福原昇、 佐藤威友、渡久地政 周	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-086053	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 エッチング方法及びエッチング装置	発明者 佐藤威友、熊崎祐 介、橋詰保	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2018-195609	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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 電気化学グループ <a href="http://hydrogen.rciqe.hokudai.ac.jp/~taketomo/ec/index.html">http://hydrogen.rciqe.hokudai.ac.jp/~taketomo/ec/index.html</a> 北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター <a href="http://www.rciqe.hokudai.ac.jp">http://www.rciqe.hokudai.ac.jp</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	本久 順一  (Motohisa Junichi)  (60212263)	北海道大学・情報科学研究科・教授    (10101)	
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・教授    (10101)	