

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：13401
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2019～2021
 課題番号：19K04528
 研究課題名(和文) Highly Stable Normally-off GaN-based transistors via Structures and Process

 研究課題名(英文) Highly Stable Normally-off GaN-based transistors via Structures and Process

 研究代表者
 ASUBAR JOEL (Asubar, Joel)

 福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

 研究者番号：10574220
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：独自のAlGaIn再成長技術及びドライエッチングレシピを使用して、GaNベースの金属絶縁体・絶縁体・半導体高電子移動度トランジスタ高性能のノーマリーオフ動作を実現した。また、開発したデバイスプロセスは、Al₂O₃絶縁膜/AlGaIn界面だけでなく、Al(Ga)N/hi-K絶縁膜系にも適用できることが分かった。さらに、作製した絶縁膜/再成長AlGaIn/GaN MISコンデンサは、比較的低い界面準位密度を示し、ヒステリシスが低く、動作が非常に安定している。有機金属気相成長法で再成長したAlGaIn層を使用して、低ヒステリシス、高性能のノーマリーオフGaNベースのデバイスを実現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

AlGaIn / GaN HEMTは、負のしきい値電圧を持つノーマリーオンデバイスである。これは、ゲート制御電圧が印加されていない場合でも、電流が流れてしまうことを意味する。回路が故障した際の安全を保障するために、正の高いV_{TH}を持つノーマリーオフデバイスが望まれる。しかし、GaNベースのデバイス構造を使用して、高いV_{TH}、大電流、および高安定性を同時に達成することは困難である。この研究の結果として、高いV_{TH}、高最大ドレイン電流、および低ヒステリシスGaNベースのデバイスを実証した。

研究成果の概要(英文)：Using dry etching recipe and AlGaIn regrowth technology originally developed by our group, we have achieved high performance normally-off operation in our GaN-based metal-insulator-semiconductor high-electron-mobility transistors (MIS-HEMTs). It was also found that the developed process is applicable not only to conventional Al₂O₃ insulator/AlGaIn interfaces but also can be extended to Al(Ga)N/hi-K insulator systems. Furthermore, the fabricated insulator/regrown-AlGaIn/GaN MIS capacitors revealed relatively low interface state density, leading to low hysteresis and highly stable operation. We have therefore succeeded in realizing low hysteresis, high performance normally-off GaN-based MIS-HEMTs using AlGaIn layer regrown by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD).

研究分野：電子デバイス

キーワード： Gallium nitride normally-off operation power device semiconductor AlGaIn/GaN HEMT MIS Insulated Gate

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

GaN (窒化ガリウム) は、地球温暖化防止やカーボンニュートラルな社会を実現するための環境にやさしい材料の一つとして注目されている広いバンドギャップを有する半導体である。GaN のバンドギャップエネルギー E_g は 3.4 eV で、従来の半導体材料の Si (1.11 eV) の 3 倍以上である。破壊電界 E_{cr} は E_g の 2 乗に比例するため、GaN の E_{cr} は Si の 10 倍近くにもなる。その結果、同じ耐圧電圧 V_{BR} であれば、GaN デバイスの方が Si デバイスよりも小型化ができ、抵抗も小さく、電気エネルギーを熱として浪費しないため、エネルギー効率が向上する。さらに、窒化物系ヘテロ構造、特に図 1 に示す高電子移動度トランジスタ (HEMT) の基礎となる AlGaIn/GaN ヘテロ構造の可能性は、他の広いバンドギャップを有する半導体に対する GaN の大きな優位点である。AlGaIn/GaN ヘテロ構造では、強い分極場によって、AlGaIn/GaN 界面近傍の GaN 側においてシート状に高移動度な電子の集まりが形成される。この電子の集まりは 2 次元電子ガス (2DEG) と呼ばれ、ドレイン-ソース電極間のチャネルを構成し、ゲートからの外部印加電圧によって変調される。しかし、この AlGaIn/GaN 界面近傍の 2DEG の存在により、AlGaIn/GaN HEMT はノーマリーオン動作をする。つまり、ゲート電圧が印加されていない状態でも、ソース-ドレイン端子間には電流が正常に流れてしまう。何らかの原因でゲートを制御する回路が故障した際に、ドレイン-ソース間に大きな電流が流れる可能性がある。このため、回路が故障した際の安全を確保するためには、高い正の V_{TH} を有するノーマリーオフのパワーデバイスが望ましい。しかし、 V_{TH} の増加にはドレイン電流の低下や安定性の低下、リーク電流の増加などのトレードオフが存在する。

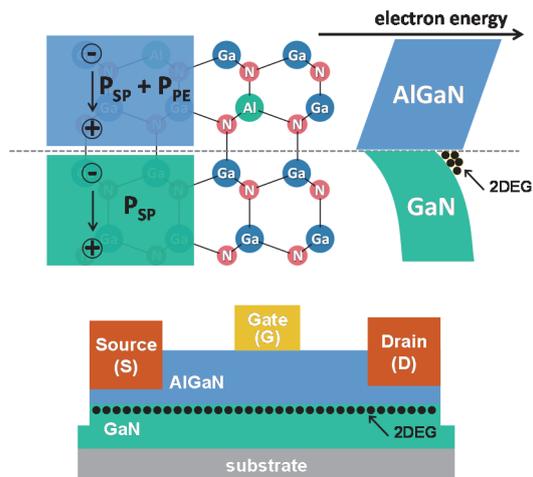


図 1 AlGaIn 層の自発分極と圧電分極、AlGaIn/GaN ヘテロ構造のバンド図と 2DEG、及び AlGaIn/GaN 高電子移動度トランジスタの模式図

2. 研究の目的

本研究の目的は、提案するノーマリーオフデバイスにおいて、大電流動作、低オン抵抗、低リーク、低ヒステリシス動作を実現することである。Ni/絶縁膜/再成長 AlGaIn/GaN MIS-HEMT リセスゲート構造を用いたノーマリーオフ AlGaIn/GaN MIS-HEMT (Metal-Insulator-Semiconductor HEMT) を提案する。また、Ni/絶縁膜/再成長 AlGaIn/GaN MIS キャパシタを作製し、得られた再成長 AlGaIn/絶縁膜界面を正確かつ効率的に評価することを目的とした。当研究室で開発した低電力ドライエッチングプロセスレシピの最適化により、高品質な再成長 AlGaIn/絶縁膜界面を実現することをあらかじめの目標としている。デバイス用の高品質な再成長 AlGaIn/GaN 界面を得るためには、きれいで平坦な GaN 表面が不可欠である。しかし、ドライエッチングは AlGaIn の一部を除去するだけでなく、汚染物質の混入や (Al)GaIn 表面へのダメージも引き起こす。そこで、最近開発した塩酸を用いたウェットエッチングと成膜室内の $NH_3 + H_2$ 熱処理を用いて、この問題を解決することを調べる。また、得られた知見をもとに、いわゆる高誘電率 (high-K) 絶縁体の研究を拡張することも意図しており、より困難ではあるが、理論的にはそれがより高いドレイン電流と正の V_{TH} シフトをもたらすことになる。

3. 研究の方法

本研究では、最適な低電力ドライエッチングプロセスにより、チャネル領域にあった元々の 25 nm 厚の AlGaIn 層を完全にエッチングし、この領域の 2DEG を除去することができた。その後、福井大学独自の技術

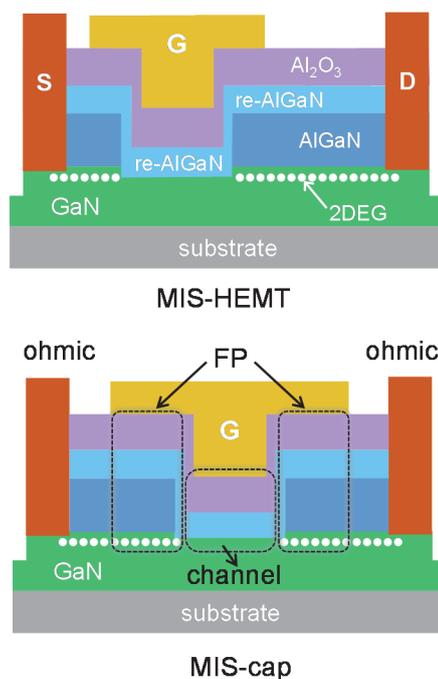


図 2 提案する Ni/Al₂O₃/再成長 AlGaIn(re-AlGaIn)/GaN MIS-HEMT および MIS-capacitor

を用いた有機金属気相成長法(MOCVD: metal-organic chemical vapor deposition)で成長させた厚さ5 nm以下のAlGaIn層に置き換えた。正の V_{TH} と十分な電流値を与えるノーマリーオフ動作を得るには、チャンネル領域のAlGaIn層を厚くとも5 nmまでにする必要があることを言及しておく。ドライエッチングを用いても不可能ではないものの、この膜厚までAlGaInの厚さを制御することは困難である。しかし、再成長技術を用いれば、AlGaInの膜厚を制御することがより現実的になるだけでなく、良好な均一性を実現することができる。また、チャンネル領域のAlGaInの膜厚をより正確に制御することで、GaIn系デバイスの V_{TH} 設計の自由度が高くなる。そこで、福井大学のクリーンルーム設備を用いて、図2に示すNi/絶縁膜/再成長AlGaIn/GaN MIS-HEMTおよびMIS-capacitorを作製し、電流-電圧特性および静電容量-電圧特性を評価した。

4. 研究成果

図3は、提案したデバイスで測定した伝達特性を片対数グラフおよび線形グラフで示したものである。明らかに、直線外挿法で抽出した V_{TH} は約+5Vのノーマリーオフ動作を達成している。この高い V_{TH} は、ノイズに対する高い余裕(noise margin)も確保し、不要な誤動作を防ぐことができる。さらに、ゲートソース間電圧 V_{GS} が+16Vのときに、425 mA/mmという非常に高い最大ドレイン電流 I_{Dmax} を同時に得ることができた。この V_{TH} と I_{Dmax} の組み合わせは、現在まで文献で報告されている最先端デバイスと比較しても、非常に高い競争力を有する。また、印加可能なゲート電圧の範囲は10 V以上(+5 V < V_{GS} < +16 V)と高い値を達成した。さらに、ゲート掃引速度1 V/sで得られた双方向の I_D - V_{GS} 曲線から、0.8 Vという良い値の V_{TH} のヒステリシスが確認された。これらの特性は、Al₂O₃/AlGaIn界面の品質の高さが大きく寄与していると考えられる。

図4の白抜き丸印は、Ni/Al₂O₃/再成長AlGaIn/GaN MISキャパシタの静電容量-電圧(C-V)特性の測定結果を示している。このC-V特性は、並列に接続されたフィールドプレート容量 C_{FP} とチャンネル容量 $C_{channel}$ が有する静電容量である。次に、測定したデバイス構造の C_{FP} と $C_{channel}$ を合わせた静電容量 C_{total} のC-V曲線を、自己無撞着なポアソン-シュレディンガー方程式を含む一次元シミュレーションを用いてフィッティングした。厳密な数値フィッティングにより、上述の C_{FP} と $C_{channel}$ の並列接続を仮定して測定されたC-V特性を適切に再現することができた。さらに、FP領域とチャンネル領域のAlGaInバンドギャップ内におけるU字型のAl₂O₃/AlGaIn界面準位密度分布(D_{IT})も抽出された。それを図5に示す。興味深いのは、FP領域とチャンネル領域の D_{IT} プロファイルがほぼ重なっていることである。これはチャンネル領域がドライエッチングを受けたとしても、その後の再成長技術によってエッチングダメージが軽減されていることを示唆しており、我々が期待したものと一致している。さらに、興味深いことに、チャンネル領域から+5Vという非常に高い V_{TH} が得られており、対応するトランジスタデバイスの測定結果を裏付けている。今後、構造、プロセス、材料をさらに最適化することで、これまでにない V_{TH} と I_{Dmax} を両立させることができると考えている。

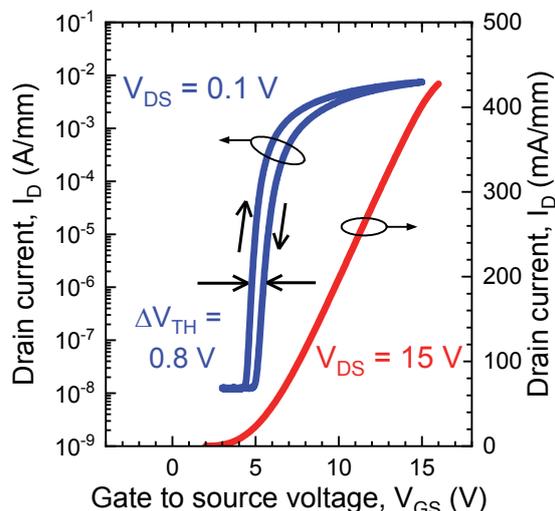


図3. 作成した提案する Ni/Al₂O₃/再成長AlGaIn/GaN MIS-HEMTの I_D - V_{GS} 特性

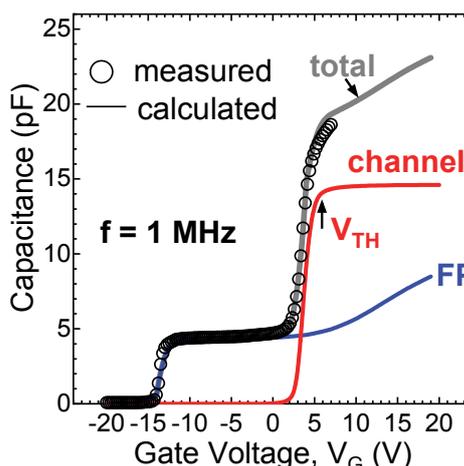


図4. 作成した提案する Ni/Al₂O₃/再成長AlGaIn/GaN MIS-capのC-V特性

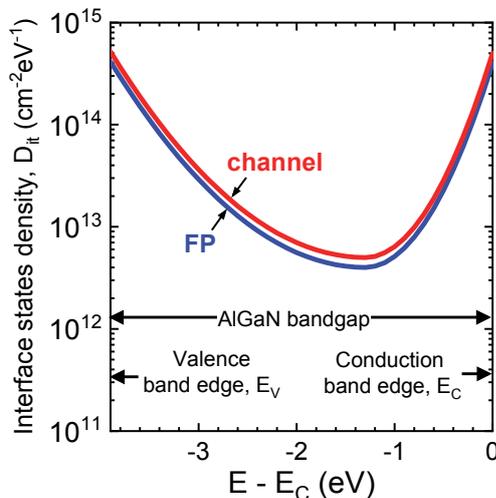


図5. 作成した提案する Ni/Al₂O₃/再成長AlGaIn/GaN MIS-capのチャンネルとFPの界面準位密度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Joel T. Asubar, Zenji Yatabe, Dagmar Gregusova, Tamotsu Hashizume	4. 巻 129
2. 論文標題 Controlling surface/interface states in GaN-based transistors: Surface model, insulated gate, and surface passivation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 121102-1-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0039564	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 該当する
1. 著者名 Rui Shan Low, Joel T. Asubar, Ali Baratov, Shunsuke Kamiya, Itsuki Nagase, Shun Urano, Shinsaku Kawabata, Hirokuni Tokuda, Masaaki Kuzuhara, Yusui Nakamura, Kenta Naito, Tomihiro Motoyama, Zenji Yatabe	4. 巻 14
2. 論文標題 GaN-based MIS-HEMTs with Al ₂ O ₃ dielectric deposited by low-cost and environmental-friendly mist-CVD technique	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 031004-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/abe19e	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 Hirokuni Tokuda, Joel T. Asubar, Masaaki Kuzuhara	4. 巻 59
2. 論文標題 Design considerations for normally-off operation in Schottky gate p-GaN/AlGaIn/GaN HEMTs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 084002-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/aba329	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 Hirokuni Tokuda, Sayaka Harada, Joel T. Asubar, and Masaaki Kuzuhara	4. 巻 58
2. 論文標題 Influence of reactive-ion-etching depth on interface properties in Al ₂ O ₃ /n-GaN MOS diodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 106503-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab3d11	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 Akio Yamamoto, Keito Kanatani, Norifumi Yoneda, Joel T. Asubar, Hirokuni Tokuda, and Masaaki Kuzuhara	4. 巻 217
2. 論文標題 Enhancement Mode AlGaIn/GaN Vertical Trench Metal-Insulator-Semiconductor High Electron Mobility Transistors with a High Drain Current Fabricated Using the AlGaIn Regrowth Technique	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica Status Solidi A	6. 最初と最後の頁 1900622-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.201900622	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 Joel T. Asubar, Shinsaku Kawabata, Hirokuni Tokuda, Akio Yamamoto, and Masaaki Kuzuhara	4. 巻 41
2. 論文標題 Enhancement-Mode AlGaIn/GaN MIS-HEMTs With High VTH and High IDmax Using Recessed-Structure With Regrown AlGaIn Barrier	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Electron Device Letters	6. 最初と最後の頁 693-696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LED.2020.2985091	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 -

[学会発表] 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Itsuki Nagase, Joel T. Asubar, Rui Shan Low, Shun Urano, Shunsuke Kamiya, Ali Baratov, Hirokuni Tokuda, Akio Yamamoto, Masaaki Kuzuhara
2. 発表標題 Improved Interfaces of high-K ZrO ₂ and AlGaIn via ex-situ MOVPE regrowth
3. 学会等名 The IEEE 2020 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Urano, Joel T. Asubar, Itsuki Nagase, Rui Shan Low, Shunsuke Kamiya, Ali Baratov, Hirokuni Tokuda, Akio Yamamoto, Masaaki Kuzuhara
2. 発表標題 Effect of Post-Metallization Annealing on Properties of ZrO ₂ /regrown-AlGaIn/GaN structures
3. 学会等名 The IEEE 2020 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohiro Motoyama, Kenta Naito, Yusui Nakamura, Zenji Yatabe, Rui Shan Low, Itsuki Nagase, Ali Baratov, Hirokuni Tokuda, Masaaki Kuzuhara, Joel T. Asubar
2. 発表標題 Characterization of mist-CVD deposited Al ₂ O ₃ films on AlGaN/GaN heterostructures
3. 学会等名 The IEEE 2020 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Low Rui Shan, Itsuki Nagase, Ali Baratov, Joel Tacla Asubar, Hirokuni Tokuda, Masaaki Kuzuhara, Zenji Yatabe, Kenta Naito, Motoyama Tomohiro, Yusui Nakamura
2. 発表標題 GaN-based MIS-HEMTs with Mist Chemical Vapor Deposited Al ₂ O ₃
3. 学会等名 IEICE Electron Device 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunsuke Kamiya, Takashi Nishitani, Yu Matsuda, Nozomu Takano, Joel T. Asubar, Hirokuni Tokuda, Masaaki Kuzuhara
2. 発表標題 Enhanced Breakdown Voltage in AlGaN/GaN HEMTs by Oxygen Plasma Treatment
3. 学会等名 IEICE Electron Device 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ali Baratov, Takashi Ozawa, Shunpei Yamashita, Joel T. Asubar, Hirokuni Tokuda, Masaaki Kuzuhara
2. 発表標題 Improved performance in GaN-based HEMTs with insulated gate structures
3. 学会等名 IEICE Electron Device 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Itsuki Nagase, Joel T. Asubar, Rui Shan Low, Shun Urano, Hirokuni Tokuda, Akio Yamamoto, Masaaki Kuzuhara
2. 発表標題 Normally-off Recessed-gate ZrO ₂ /AlGaIn/GaN MIS-HEMTs with Regrown AlGaIn Barrier
3. 学会等名 Solid State Devices and Materials 2020 (SSDM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Joel T. Asubar, Shinsaku Kawabata, Hirokuni Tokuda, Akio Yamamoto, and Masaaki Kuzuhara
2. 発表標題 Recent progress in Normally-off GaN-based transistors
3. 学会等名 日本表面真空学会 関西支部 合同セミナー-2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsaku Kawabata, Joel Asubar, Hirokuni Tokuda, Akio Yamamoto, Masaaki Kuzuhara
2. 発表標題 Threshold voltage control in normally-off Al ₂ O ₃ /AlGaIn/GaN MOS-HEMTs through Al ₂ O ₃ thickness variation
3. 学会等名 The 80th JSAP Autumn Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsaku Kawabata, Joel T. Asubar, Hirokuni Tokuda, Akio Yamamoto, and Masaaki Kuzuhara
2. 発表標題 Improved insulator/semiconductor interfaces in Al ₂ O ₃ /AlGaIn/GaN structures by AlGaIn layer regrowth
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Joel T. Asubar, Shinsaku Kawabata, Low Rui Shan, Hirokuni Tokuda, Akio Yamamoto, and Masaaki Kuzuhara
2. 発表標題 Impact of regrown AlGaIn layer on the properties of Al2O3/AlGaIn/GaN metal-insulator-semiconductor structures
3. 学会等名 Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits held in Europe (WOCSDICE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Google Scholar https://scholar.google.com/citations?user=1N1RAggAAAAJ&hl Researchgate https://www.researchgate.net/profile/Joel-Asubar Researchmap https://researchmap.jp/joel_asubar/ Publons https://publons.com/researcher/2992442/joel-asubar/ Homepage https://sites.google.com/view/uf-electron-device-lab/home-%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0?authuser=0&fbclid=IwAR0mknc9L9NLHw09aebxv-BH_1va6I98_JG6jY9iS_hg7scmDFmSsg5H0A4 Google Scholar https://scholar.google.com/citations?user=1N1RAggAAAAJ&hl=en Researchgate https://www.researchgate.net/profile/Joel-Asubar Researchmap https://researchmap.jp/joel_asubar/?lang=english Publons https://publons.com/researcher/2992442/joel-asubar/</p>
--

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	葛原 正明 (Kuzuhara Masaaki) (20377469)	関西学院大学・理工学部・教授 (34504)	

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
---------	---------