様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　 ６ 月　 ９ 日現在

機関番号：１７４０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：１９Ｋ０４４７３

研究課題名（和文）ミストCVD法による窒化物半導体の表面パッシベーション・絶縁ゲート構造の開発

研究課題名（英文）Surface passivation and insulated gate structures for nitride-based semiconductor devices using mist-CVD method

研究代表者

谷田部　然治（Yatabe, Zenji）

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・准教授

研究者番号：００６２１７７３

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）：ミスト化学気相成長(CVD)法を利用した、AlGaN/GaN高電子移動度トランジスタ(HEMT)のゲート絶縁膜堆積プロセスを開発した。堆積プロセスを最適化をすることにより、平坦かつ従来手法である原子層堆積(ALD)法と同程度の物性値を持つ絶縁膜の堆積が可能であることを見出した。さらに実際にミストCVD法により堆積したゲート絶縁膜を有するAlGaN/GaN(金属-絶縁膜-半導体)MOS-HEMT作製し、従来デバイスと比べても遜色のない界面準位密度分布を有するゲート絶縁膜/AlGaN界面を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
ミストCVD法は、ALD法など従来の絶縁膜形成プロセスと比較して大掛かりな真空装置を必要としない大気圧下でのプロセスであり、従来手法と比較し低コストで環境負荷が低いプロセスである。本研究課題で得られた成果はSiやGaAsに代わる次世代電力変換用トランジスタ・高周波デバイスとして注目されているGaN系トランジスタの低コスト化、また動作安定性・信頼性向上に繋がると期待される。

研究成果の概要（英文）：We have developed a gate insulator deposition process for AlGaN/GaN metal-insulator-semiconductor (MIS-HEMTs) using cost-effective and environmental-friendly mist chemical vapor deposition (mist-CVD) method. Mist-deposited gate insulators deposited using optimum condition exhibited characteristics that are comparable to those reported from high-quality amorphous films prepared by the more conventional method of atomic layer deposition (ALD). In addition, we obtained good transistor characteristics from the fabricated devices suggesting high interfacial quality of the resulting insulator/AlGaN interface. These results demonstrate the potential and viability of non-vacuum mist-CVD technique in the development of high-performance AlGaN/GaN-based MIS-HEMTs.

研究分野：半導体工学

キーワード：ミストCVD　ゲート絶縁膜　表面パッシベーション　窒化物半導体　高電子移動度トランジスタ　パワーデバイス　高周波デバイス　窒化ガリウム

※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

地球温暖化の主要因とされている二酸化炭素の排出抑制などの観点などから、省エネルギー社会を実現する必要がある。特に電気エネルギーは家電から照明、熱、自動車、電車など広い分野で利用されており、既存の技術よりも超高効率の「インバータ」と称される電力変換機器の実現が強く望まれている。現在インバータの中核素子として用いられているシリコン(Si)パワーデバイスは、その物性値の限界のため、現状の変換効率を大幅に向上させることは困難である。そこで炭化ケイ素(SiC)、窒化ガリウム(GaN)、酸化ガリウム(Ga_2O_3)、ダイヤモンド(C)、窒化アルミニウム(AlN)などのワイドギャップ半導体が、次世代パワーデバイス半導体材料として注目されている。特に GaN 系半導体の特筆すべき特徴として、図 1 に示すようにヘテロ接合界面の高密度・高移動度の 2 次元電子ガス(2DEG)層を巧みに利用できる点があり、GaN 系半導体は次世代電力変換用トランジスタ・高周波デバイスとして非常に期待されている。しかしながら、GaN 系トランジスタには信頼性・安定性・コストに関わる大きな問題が残っており、広範な普及には至っていない。その要因として絶縁膜/GaN 系半導体の界面特性が未解明であり、良好な絶縁膜/GaN 系半導体界面が未だに得られていない点などが挙げられる。加えてデバイスの広範な普及にはプロセスの低コスト化が望まれる。

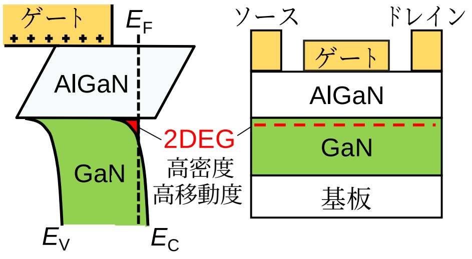

図 1: AlGaN/GaN ヘテロ構造

２．研究の目的

上述の問題点を解決し GaN 系トランジスタの実用化に寄与するために、本研究課題では図 2 に示すミスト化学気相成長(ミスト CVD)法を用いた GaN 系半導体向けゲート絶縁膜堆積プロセスを開発することを目的とした。また申請者らが、これまで培ってきた「絶縁膜/GaN 系半導体の評価・制御技術」を駆使し、絶縁膜/GaN 系半導体界面特性を正しく評価し、評価結果をゲート絶縁膜堆積プロセスにフィードバックをし、極めて良好な界面特性を得ることを目指した。

本研究課題の最大の特徴であるミスト CVD 法は従来の絶縁膜形成プロセスと比較して大掛かりな真空装置を必要としない大気圧下での低コスト・低エネルギープロセスであり、絶縁膜堆積プロセスに起因する電子準位の発生が極めて少なく、繊細な MOS 界面の形成に優れていると考えられる。本研究課題では、ミスト CVD 法により AlGaN/GaN ヘテロ構造にゲート絶縁膜を堆積し、その金属-酸化膜-半導体(MOS)界面特性、特に電子準位密度とトランジスタ特性について評価を行い、ミスト CVD 法によるトランジスタのゲート絶縁膜堆積プロセスの開発を行った。

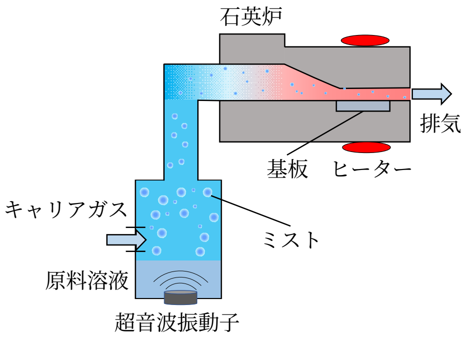

図 2: ミスト CVD 装置

３．研究の方法

本研究では、まずミスト CVD 法によるゲート絶縁膜として GaN 系半導体のゲート絶縁膜として最も用いられている酸化アルミニウム(Al_2O_3)を採用した。また Al_2O_3 の誘電率を高くするために Al と Ti の混晶膜であるチタン酸アルミニウム($Al_{1-x}Ti_xO_y$)の作製も試みた。またキャリアガス流量、堆積温度、溶液濃度を精密に調整し、基板表面での反応を制御し最適化を行った。続いてゲート絶縁膜/AlGaN 界面を評価するために mist-Al_2O_3/AlGaN/GaN MOS ダイオードを作製し、容量－電圧(*C–V*)特性から mist-Al_2O_3/AlGaN 界面の電子準位密度を評価した。最後に本手法で AlGaN/GaN MOS-HEMT を試作し、その電気特性を評価した。

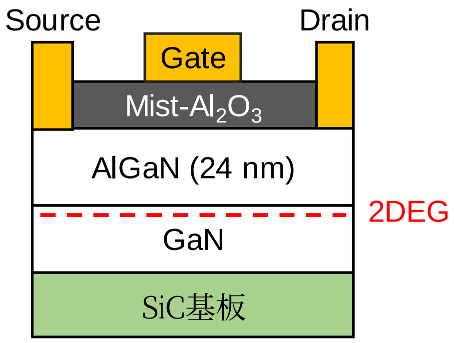

図 3: AlGaN/GaN MOS-HEMT

４．研究成果

(1) ミスト CVD 法により作製したゲート絶縁膜の特性

Si 基板上にミスト CVD 法により堆積したゲート絶縁膜の膜厚制御性と光学特性を評価し、ゲート絶縁膜堆積プロセスの精密な制御につながる基礎的知見を得た。図 4(a)にミスト CVD 法に

より Si 基板上に堆積した Al_2O_3 膜厚の堆積時間依存性を示す。ミスト Al_2O_3 膜厚と堆積時間には線型関係があり良好な膜厚制御性を有していることが明らかになった。また堆積速度は本実験条件では約 30 nm/min であり、一般的な原子層堆積(ALD)法よりも高速であった。図 4(b)に堆積速度の溶液濃度依存性を示す。溶液濃度についても線型関係があり、良好な膜厚制御性を有していることを示している。さらに原料溶液にオルトチタン酸テトライソプロピルを添加することにより、チタン酸アルミニウム($Al_{1-x}Ti_xO_y$)を作製することにも成功し、その禁制帯幅、屈折率、密度などの物性値は ALD 法で作製した薄膜と同等の値が得られた。すなわち低コストかつエコフレンドリーなミスト CVD 法で ALD 法と同等の膜質を有する Al_2O_3 を含む $Al_{1-x}Ti_xO_y$ 薄膜が比較的に速い堆積速度で得られたことを示唆している。

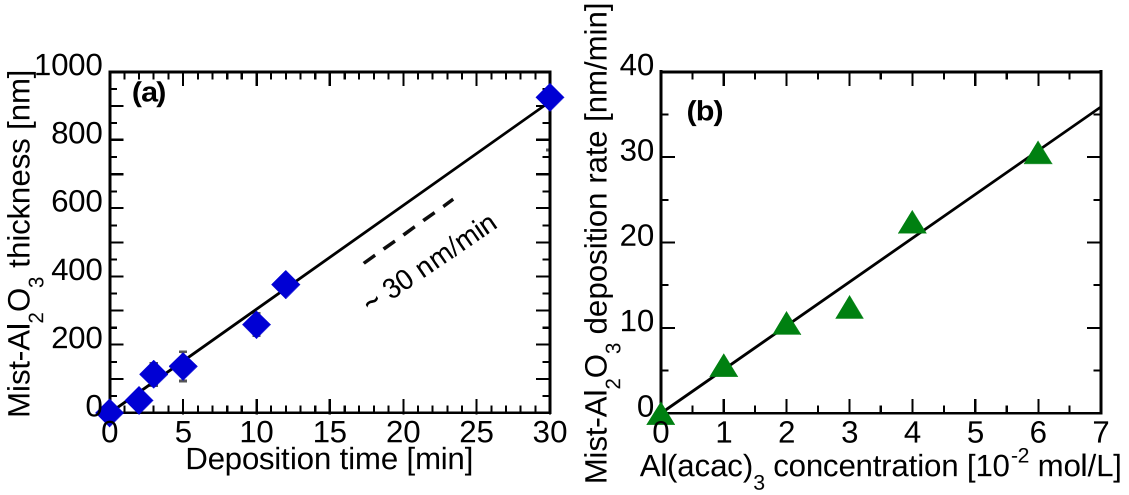

図 4: ミスト法の膜厚制御性 (a) 堆積時間依存性 (b) 溶液濃度依存性

(2) ミスト CVD 法により堆積したゲート絶縁膜を有する AlGaN/GaN MOS-HEMT の試作

ミスト CVD 法を用いて AlGaN 表面上にゲート絶縁膜を堆積することにより、ALD 法と同等のゲート絶縁膜/AlGaN 界面の電子準位密度分布を有する AlGaN/GaN MOSHEMT の作製に成功した。さらにミスト CVD 法によるゲート絶縁膜を AlGaN リセスゲート構造上へ堆積し、ノーマリーオフ動作にも成功した。

MOS 界面評価用に作製したプレーナ型 AlGaN/GaN MOS ダイオードの *C*–*V* 特性を図 5(a)に示す。GaN 系 MOS-HEMT 特有の 2 ステップの *C*–*V* 特性が観測され、良好な Al_2O_3/AlGaN 界面が形成されていることが示唆された。試算した界面準位密度 D_{it} を図 5(b)に示す。$E_c - 0.7$ eV 付近で約 2×10^{11} $eV^{-1}cm^{-2}$ 程度であり、ALD-Al_2O_3/AlGaN で報告されている D_{it} と同程度、もしくは良好な値が得られた。

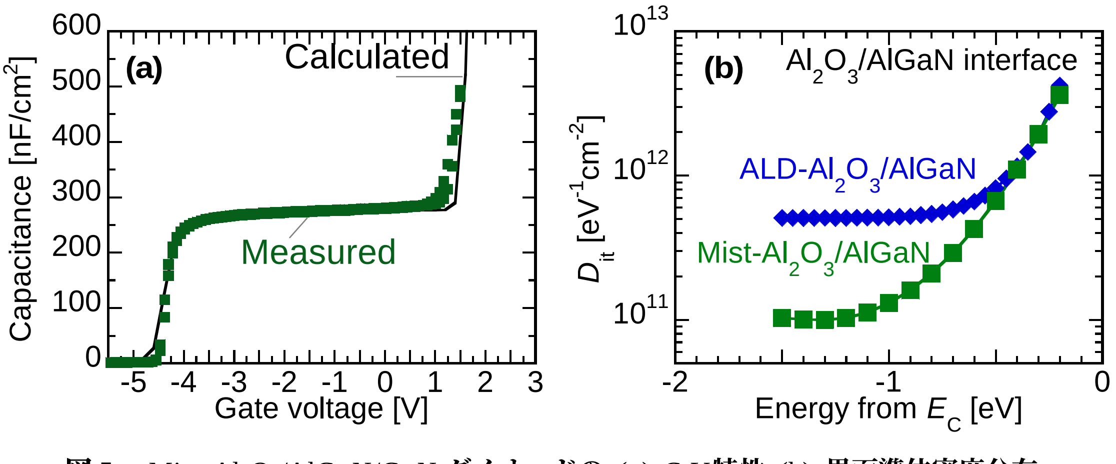

図 5: Mist-Al_2O_3/AlGaN/GaN ダイオードの (a) *C*-*V* 特性 (b) 界面準位密度分布

最後にショットキーゲート HEMT とミスト CVD 法を利用し作製した 3 端子 MOS-HEMT のトランジスタ特性を比較した。この結果ミスト法で作製した MOS-HEMT はショットキーゲートデバイスとほぼ等しいしきい値電圧を示した。この結果は、AlGaN 層のリセス深さが比較的浅くても、ノーマリオフ動作が実現できることを示唆しており、リセス構造を持つ GaN 系 MOS-HEMT における長年の課題だった最大ドレイン電流としきい電圧のトレードオフの解決策として有望である可能性が示唆された。実際にリセスゲート AlGaN 上にミスト CVD 法によ

るゲート絶縁膜を堆積し、トランジスタ特性を評価した所、ノーマリーオフ動作が得られた。
　以上より、本研究課題において、ミスト CVD 法を GaN 系デバイスの表面パッシベーション膜・ゲート絶縁膜堆積プロセスに応用し、MOS 界面制御、ノーマリーオフ動作を達成し、高品質かつ安価なゲート絶縁膜堆積手法としてミスト CVD 法が有望であると実証したと結論付けられる。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計3件（うち査読付論文　3件／うち国際共著　1件／うちオープンアクセス　2件）

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, Tomohiro Motoyama, Zenji Yatabe	４．巻 14
２．論文標題 GaN-based MIS-HEMTs with Al2O3 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 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 Zenji, Yatabe, Koshi Nishiyama, Takaaki Tsuda, Kazuki Nishimura, Yusui Nakamura	４．巻 58
２．論文標題 Synthesis and characterization of mist chemical vapor deposited aluminum titanium oxide films	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	６．最初と最後の頁 070905-1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab29e3	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17件（うち招待講演　0件／うち国際学会　10件）

１．発表者名 浦野 駿, アスバル ジョエル, ロウ ルイシャン, ムハンマド ファリス, 石黒 真輝, 永瀬 樹, バラトフ アリ, 本山 智洋, 中村 有水, 葛原 正明, 谷田部 然治
２．発表標題 Mist-Al2O3とALD-Al2O3を絶縁膜としたAlGaN/GaN MIS-HEMTs
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
本山 智洋，浦野 駿，バラトフ アリ，中村 有水，葛原 正明，アスバル ジョエル，谷田部 然治

２．発表標題
ミストCVD法により堆積したAl2O3絶縁膜の評価とmist-Al2O3/AlGaN/GaN MOS-HEMTへの応用

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
M. Ishiguro, S. Urano, R. S. Low, M. Faris, I. Nagase, A. Baratov, J. T. Asubar, T. Motoyama, Y. Nakamura, Z. Yatabe, M. Kuzuhara

２．発表標題
Recessed gate GaN-based MIS-HEMTs with Al2O3 gate dielectric deposited by mist-CVD method

３．学会等名
The 2021 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK 2021)（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
S. Urano, R. S. Low, M. Faris, M. Ishiguro, I. Nagase, A. Baratov, J. T. Asubar, T. Motoyama, Y. Nakamura, Z. Yatabe, M. Kuzuhara

２．発表標題
Electrical properties of GaN-based MISHEMTs with Al2O3 gate insulator deposited by ALD and mist-CVD techniques

３．学会等名
The 2021 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK 2021)（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
S. Urano, R. S. Low, M. Faris, M. Ishiguro, I. Nagase, A. Baratov, J. T. Asubar, T. Motoyama, Y. Nakamura, Z. Yatabe, M. Kuzuhara

２．発表標題
Electrical properties of GaN-based MISHEMTs with Al2O3 gate insulator deposited by ALD and mist-CVD techniques

３．学会等名
The 2021 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK 2021)（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
Tomohiro Motoyama, Zenji Yatabe, Yusui Nakamura, Ali Baratov, Rui Shan Low, Shun Urano, Joel T. Asubar, Masaaki Kuzuhara

２．発表標題
Mist chemical vapor deposited-Al2O3/AlGaN interfacial characterization for GaN MIS-HEMTs

３．学会等名
The 2021 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK 2021)（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
本山 智洋, Ali Baratov, Rui Shan Low, 浦野 駿, 中村 有水, 葛原 正明, Joel T. Asubar, 谷田部 然治

２．発表標題
ミストCVD法により作製したAl2O3薄膜とGaN系MIS-HEMTへの応用

３．学会等名
2021年日本表面真空学会学術講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
本山 智洋, Ali Baratov, Rui Shan Low, 浦野 駿, 中村 有水, 葛原 正明, 谷田部 然治, Joel T. Asubar

２．発表標題
ミストCVD法によるAl2O3絶縁膜を用いたAlGaN/GaN MIS-HEMTの作製と評価

３．学会等名
第10回TIAパワーエレクトロニクス・サマースクール

４．発表年
2021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 Al2O3 films on AlGaN/GaN heterostructures

３．学会等名
IEEE IMFEDK 2020 Satellite event（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
ロー ルイ シャン，永瀬 樹，バラトフ アリ，アスバル ジョエル タクラ，徳田 博邦，葛原 正明，谷田部 然治，内藤 健太，本山 智洋，中村 有水

２．発表標題
Mist-CVD法によるAl2O3絶縁膜を用いたAlGaN/GaN MIS-HEMTの電気特性

３．学会等名
電子情報通信学会 電子デバイス研究会

４．発表年
2020年

１．発表者名
Low Rui Shan，河端 晋作，Joel T. Asubar，徳田 博邦，葛原 正明，谷田部 然治，内藤 健太，西村 和樹，中村 有水

２．発表標題
ミストCVD法による4-nm Al2O3ゲート絶縁膜を用いたAlGaN/GaN MIS-HEMTの電気特性

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
Kazuki Nishimura, Kenta Naito, Zenji Yatabe, Yusui Nakamura

２．発表標題
Formation of amorphous Al2O3 thin films by mist chemical vapor deposition

３．学会等名
14th International Student Conference on Advanced Science and Technology 2019 (ICAST 2019)

４．発表年
2019年

１．発表者名
Kenta Naito, Kazuki Nishimura, Zenji Yatabe, Joel T. Asubar, Yusui Nakamura

２．発表標題
Al2O3 thin films deposited by mist-CVD for gate insulator application in GaN-based devices

３．学会等名
The 4th Asian Applied Physics Conference (Asian-APC)（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
Zenji Yatabe, Koshi Nishiyama, Kazuki Nishimura, Yusui Nakamura

２．発表標題
Characterization of Al1-xTixOy thin films deposited by mist-CVD

３．学会等名
2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2019)（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
Zenji Yatabe, Koshi Nishiyama, Kazuki Nishimura, Yusui Nakamura

２．発表標題
Characterization of AlxTi1-xOy thin films synthesized using mist-CVD

３．学会等名
13th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2019)（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
Zenji Yatabe, Koshi Nishiyama, Takaaki Tsuda, Kazuki Nishimura, Yusui Nakamura

２．発表標題
Synthesis and characterization of AlTiO films by mist-CVD

３．学会等名
Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019)（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
Zenji Yatabe, Koshi Nishiyama, Takaaki Tsuda, Kazuki Nishimura, Yusui Nakamura

２．発表標題
Characterization of amorphous aluminium oxide thin films synthesized by mist-CVD

３．学会等名
Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019)（国際学会）

４．発表年
2019年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap
https://researchmap.jp/zenji.yatabe

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	ＡＳＵＢＡＲ　ＪＯＥＬ (Asubar Joel) (10574220)	福井大学・学術研究院工学系部門・准教授 (13401)	
研究分担者	末吉　哲郎 (Sueyoshi Tetsuro) (20315287)	九州産業大学・理工学部・准教授 (17401)	
研究分担者	中村　有水 (Nakamura Yusui) (00381004)	熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・教授 (17401)	

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			
スロバキア	Slovak Academy of Sciences			