

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15030

研究課題名（和文）2DHGダイヤモンドNano-Fin構造における量子伝導機構の解明とFET応用

研究課題名（英文）Exploration of quantum transport in 2DHG diamond Nano-Fin structure and its FET application

研究代表者

蔭浦 泰資（KAGEURA, Taisuke）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・NIMSポスドク研究員

研究者番号：20801202

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：三次元構造に微細加工されたダイヤモンドの水素終端表面に誘起される二次元正孔ガス層の電気伝導を利用することで、高い電流密度や低いオン抵抗を有する高性能ダイヤモンド電子デバイスの実現を目的とした。そこで本研究では、三次元構造を形成するための基盤技術となるダイヤモンドナノ微細加工技術を構築し、三次元構造化によるダイヤモンドデバイスの特性向上を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

優れた物性値から近年注目を集めているダイヤモンドパワーデバイスは、大電力を必要とする大型輸送車両などへ搭載することで大幅な省エネルギー化が期待され、衛星通信システムなどの高周波電力増幅器に適用することで飛躍的な通信速度の向上が期待されている。本研究成果は、三次元構造化によりダイヤモンドデバイスの性能を飛躍的に向上できることを示した共に、その過程で構築した微細加工プロセスは、ダイヤモンドを用いた他の量子デバイス（超伝導・スピン）へ応用可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to realize high-performance 2DHG diamond electronic devices with high current density and low on-resistance by utilizing the three-dimensional channel structure. In this study, we developed a novel diamond microfabrication technique and demonstrated the operation of a three-dimensional structured diamond electronic devices.

研究分野：半導体・量子工学

キーワード：ダイヤモンド 微細加工 二次元正孔ガス 電界効果トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンドは、表面を水素結合 C-H で終端させて負イオンが吸着することで、二次元正孔ガス (2DHG) 層が表面から深さ数 nm 程度に誘起される。この 2DHG 層は、浅いアクセプタ準位 (< 50 meV)、高い表面キャリア密度 ($\sim 10^{13}$ cm $^{-2}$) を有しており、広い温度領域 (10-673K) で安定した p 型伝導を発現する。これらの優れた特性はデバイスのチャネルとして適しており、SiC や GaN を凌駕する p-FET (電界効果トランジスタ) 動作を実現させる。先行研究では、2kV を超える絶縁破壊電圧、高いドレイン電流密度 (700 mA/mm)、ノーマリーオフ化などパワーデバイス応用に向けた特性向上がすでに報告されている。

従来のダイヤモンドデバイスは平面型構造であり、絶縁膜やゲート界面の高品質化、素子寸法の最適化による特性向上がなされてきた。一方我々は、素子性能を飛躍的に向上させる手法として素子の三次元構造化に着目した。そのひとつが FinFET である。これは、チャネル領域を魚のヒレ (Fin) 状の三次元構造にすることで実効的なチャネル面積を増大させ、高電流密度、高速スイッチング、低漏れ電流を実現させる素子である。FinFET の高性能化には高いアスペクト比をもつ Fin の形成とナノスケールでの集積化が必要である。Nano-FinFET は Si などで既に実用化されているが、ダイヤモンドでは動作報告がされていなかった。この要因として、ダイヤモンドの微細加工技術が未成熟であることが挙げられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、I. 微細 FinFET 構造によるダイヤモンドパワーデバイスの特性向上、II. Nano-Fin 構造における量子的な電気伝導の探究および量子伝導を用いた新奇ダイヤモンド量子デバイスの創出である。従来 2DHG 層はダイヤモンド表面下へ方向に誘起されるが、Fin 構造では Fin 幅をナノスケールまで薄層化することで Fin 両側面から 2DHG 層を重ね合わせて誘起することができる。そのとき、どのような伝導が発現するかは未知であり、その伝導機構を解明して量子デバイスへ応用することを目指した。

3. 研究の方法

(1) ダイヤモンド微細加工技術の構築

ナノスケールの三次元構造をダイヤモンドで実現するためには、新たなダイヤモンド微細加工技術を構築する必要があった。これは、従来の微細加工では金属マスクを用いた酸素系ガスによるプラズマエッチングを用いており、アスペクト比の低さ、異方性制御の難しさ、エッチングによる表面損傷、マイクロマスクの形成など多くの課題が存在するためであった。そこで本研究では、図 1 に示す新しいダイヤモンド微細加工プロセスを提案した。従来のエッチングマスクは Al などの金属を用いてきたが、本研究では MgO (酸化マグネシウム) を利用した。これは、MgO が金属材料と比較してイオン衝撃に対する耐性があり高アスペクト比が期待でき、強い潮解性により水 (酸・アルカリが不要) のみで表面損傷なくマスク除去が可能であるためである。高アスペクト比かつ垂直壁を有する Fin 形成を目指して、2 段階エッチングプロセスを実施した。1 段階目は、酸素ガスによる高バイアス出力 ICP-RIE (誘導結合型反応性イオンエッチング) である。高いバイアス出力 (1kV) によってイオンを基板垂直方向へ強く引き付けることで高いアスペクト比が得られる。一方上記手法のみでは垂直な加工が困難であり、ある程度のテーパ角度が生じてしまう。そこで 2 段階目のエッチングとして、水素ガスによる低出力マイクロ波プラズマエッチングを施した。これは、ICP-RIE のようなバイアス印加のない状況下で低密度の水素プラズマに曝すことで、Fin 側面が異方的かつ低速にエッチングされ、特定の低指数面を側壁面へ露出させることができるのではないかと推定に基づいたプロセスである。露出する側壁面方位に対するエッチングプロセスの影響を調査するため、本研究で我々は (110) 基板に着目した。これは、特定の面内角度にて Fin 構造を形成することで、側壁面へ (1-11), (001), (1-10) と異なる 3 つの低指数面を露出させることができるためである。形成した Fin の表面形状は、走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察した。

(2) 新規ダイヤモンドデバイスの開発

得られた技術・知見を基に、縦型 2DHG ダイヤモンド MOSFET およびステップエッジ型ダイヤモンド超伝導量子干渉素子 (SQUID) を開発した。

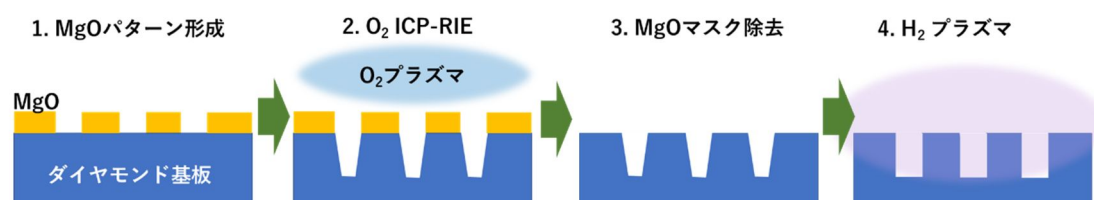


図 1. 2 段階プラズマエッチングによるダイヤモンド微細 Fin 構造形成プロセス

4. 研究成果

(1) 2段階プラズマエッチングによるダイヤモンド微細加工はじめに、MgO マスク + 高バイアス出力 ICP-RIE によりどこまで微細な Fin 構造が形成可能であるか検証した。図 2(a)は作製した Fin 構造の SEM 像である。従来の金属マスクによるエッチングの際に見られるようなマイクロマスク起因の凹凸は見られなかった。これは、MgO がダイヤモンドのエッチングマスクとして適していることを意味する。また、最小で幅 50nm 程度の Fin 構造が形成可能であることを実証した (図 2(b))。一方、垂直方向に対して 20° 程度のテーパ角度が出現することも観測された。このテーパ角度と Fin 側面へ露出させる面方位の依存性は見られず、どの面内方位に対しても同じような形状の Fin 構造が形成された (図 3(a)-(c))。

続いて、2段階目の水素プラズマが Fin 形状へ与える影響を評価した。図 3(a)-(f)は水素プラズマ前後における各面内方位の Fin 構造の SEM 像を示している。水素プラズマの前後で Fin 幅の大きな変化は見られなかったが、側壁面方位によって Fin 形状の違いが見られた。{100}側面の Fin は比較的垂直な側面が得られ、Fin 上部が平坦であった(f)。一方{110}、{111}側面では、Fin に対して左右非対称な傾斜面が形成され、Fin 上部は平坦ではなくハの字形であった(d),(e)。これは、同条件の水素プラズマであっても面方位毎にエッチング速度が異なり、結果として露出する面方位が異なることを示している。またこの結果は、本手法を用いてダイヤモンド Fin 構造を形成する場合、側壁面方位が Fin 形状を決定する重要な要素となることを意味している。本研究では、2DHG が重なるほど微細な Fin 構造 (幅 ~ 数 nm) を得られなかったが、今後は上記技術を発展させ、Nano-FinFET の実現および 2DHG Nano-Fin 構造における伝導機構の解明を目指す。

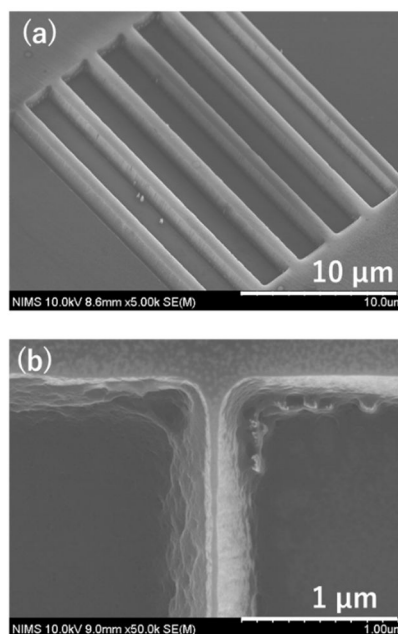


図 2. ICP-RIE 後の Fin SEM 像。

Fin 幅 (a) 1 μm (b) 50 nm

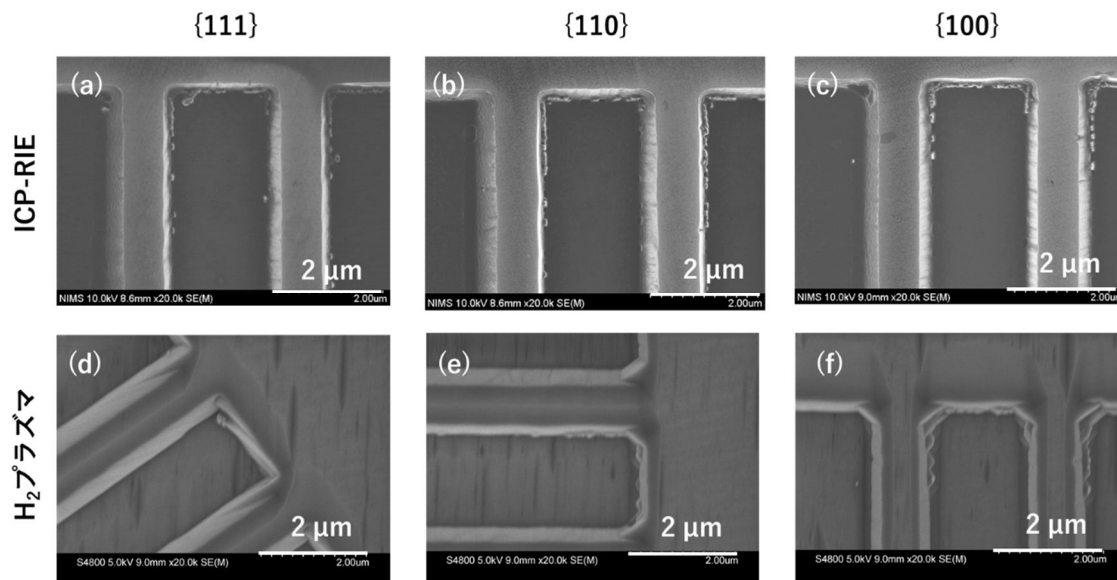


図 3 H₂ プラズマエッチング前後における Fin 構造の SEM 像 (Fin 幅 1 μm)

(2)- 縦型水素終端 2DHG ダイヤモンド MOSFET の開発
高バイアス ICP-RIE 法により形成した微細トレンチ構造へマイクロ波化学気相堆積法 (MPCVD 法) にて高純度ダイヤモンド薄膜をホモエピタキシャル成長させることで、エッチング過程で生じるチャネル領域への損傷を低減する手法を確立した。本手法を用いて、図 4 のようなゲート (G)-ソース (S) オーバーラップ構造を有する縦型 2DHG ダイヤモンド MOSFET を開発した。幅 2 μm のトレンチを形成し、ゲート電極の一部をソース電極上の Al₂O₃ 絶縁膜とオーバーラップするように配置することで、S-G 電極間の抵抗を低減させた。その結果、V_{DS} = -50 V において最大ドレイン電流密度 12800 A/cm²、V_{DS} = -10 V においてオン抵抗 3.2 mΩcm² が得られた。また、高温下 (200°C) においてもドレイン電流の高いオン/オフ比 (7 桁) を実現した。(参考文献 1)

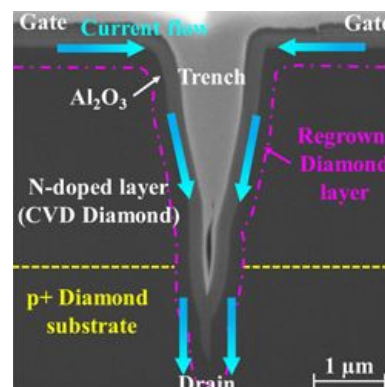


図 4 縦型ダイヤモンド MOSFET の断面 SEM 像

(2)- ステップエッジ型ダイヤモンド SQUID の開発

本研究で得られたエッチング技術を活用して単結晶ダイヤモンド SQUID を開発した。これは、ICP-RIE 法による微細ステップ構造上へ MPCVD 法にて傾斜面を形成し、その直上にホウ素添加超伝導ダイヤモンドをエピタキシャル成長させることで実現した (図 5(a),(b))。従来のダイヤモンド SQUID は動作温度が液体ヘリウム温度 (4.2K) 以下であったが、我々は 10K まで向上させた。これは、超伝導転移温度の高い (111) 単結晶 (10K) の利点を、厚さ数十 nm 程度のステップエッジ構造を形成することで引き出すことができたためである。またデバイス構造を最適化する過程で、ジョセフソン接合の特性はステップ角度および高さに強く依存することを明らかにした (図 5(c))。ステップ角度が急峻である場合、上部と下部の超伝導層が断裂して残留抵抗が生じた。一方、ステップ角度が浅い場合は上部と下部の超伝導層がコヒーレントに伝導し、ひとつの超伝導体として振る舞うことが明らかとなった。ステップ角度が穏やかな場合、特に斜面へ {100} などの低指数面が形成されたときに良好なジョセフソン接合が得られた。また、動作温度だけでなく、磁場感度も従来素子より 1 桁以上向上した (図 5(d))。また上記の微細ステップ構造で得た知見を基に、収束イオンビーム法で形成した微細トレンチ構造を利用したダイヤモンド SQUID を開発し、トレンチ構造においても 10K で動作が可能であることを実証した。(参考文献 2,3)

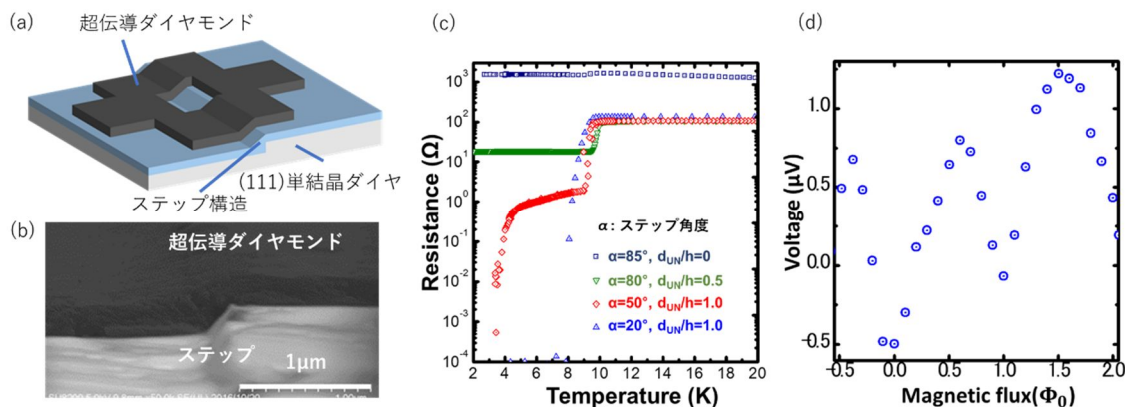


図 5 (a), (b) ステップエッジ型ダイヤモンド SQUID の模式図および SEM 像 (c) 異なるステップ角度におけるジョセフソン接合の抵抗-温度特性 (d) 2.6K における電圧の印加磁場依存性

参考文献

1. M. Iwataki, N. Oi, K. Horikawa, S. Amano, J. Nishimura, T. Kageura, M. Inaba, A. Hiraiwa, and H. Kawarada, "Over 12000 A/cm² and 3.2 mΩcm² miniaturized vertical-type two-dimensional hole gas diamond MOSFET", IEEE Electron Device Letters, 41, 1, 111-114 (2020).
2. T. Kageura, M. Hideko, I. Tsuyuzaki, A. Morishita, A. Kawano, Y. Sasama, T. Yamaguchi, Y. Takano, M. Tachiki, S. Ooi, K. Hirata, S. Arisawa and H. Kawarada, "Single-crystalline boron-doped diamond superconducting quantum interference devices with regrowth-induced step edge structure", Scientific Reports, 9, 15214/1-9 (2019).
3. A. Morishita, S. Amano, I. Tsuyuzaki, T. Kageura, Y. Takahashi, M. Tachiki, S. Ooi, M. Takano, S. Arisawa, Y. Takano and H. Kawarada, "Crystal analysis of grain boundaries in boron-doped diamond superconducting quantum interference devices operating above liquid helium temperature", Carbon, 181, 379-388 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Iwataki Masayuki, Oi Nobutaka, Horikawa Kiyotaka, Amano Shotaro, Nishimura Jun, Kageura Taisuke, Inaba Masafumi, Hiraiwa Atsushi, Kawarada Hiroshi	4. 巻 41
2. 論文標題 Over 12000 A/cm ² and 3.2 m cm ² Miniaturized Vertical-Type Two-Dimensional Hole Gas Diamond MOSFET	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Electron Device Letters	6. 最初と最後の頁 111 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LED.2019.2953693	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 Morishita Aoi, Amano Shotaro, Tsuyuzaki Ikuto, Kageura Taisuke, Takahashi Yasuhiro, Tachiki Minoru, Ooi Shuuichi, Takano Miwako, Arisawa Shunichi, Takano Yoshihiko, Kawarada Hiroshi	4. 巻 181
2. 論文標題 Crystal analysis of grain boundaries in boron-doped diamond superconducting quantum interference devices operating above liquid helium temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 379 ~ 388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2021.04.097	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 Sasama Yosuke, Kageura Taisuke, Komatsu Katsuyoshi, Moriyama Satoshi, Inoue Jun-ichi, Imura Masataka, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Uchihashi Takashi, Takahide Yamaguchi	4. 巻 127
2. 論文標題 Charge-carrier mobility in hydrogen-terminated diamond field-effect transistors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 185707 ~ 185707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0001868	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 Kageura Taisuke, Hideko Masakuni, Tsuyuzaki Ikuto, Morishita Aoi, Kawano Akihiro, Sasama Yosuke, Yamaguchi Takahide, Takano Yoshihiko, Tachiki Minoru, Ooi Shuuichi, Hirata Kazuto, Arisawa Shunichi, Kawarada Hiroshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Single-crystalline boron-doped diamond superconducting quantum interference devices with regrowth-induced step edge structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-51596-w	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8件（うち招待講演 1件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Y. Takahashi, A. Morishita, S. Amano, T. Kageura, Y. Takano, M. Tachiki, S. Ooi, S. Arisawa, H. Kwarada
2. 発表標題 Boron-doped Diamond SQUIDs with Miniaturized Josephson Junctions
3. 学会等名 4th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2020/2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kageura, Y. Takano and H. Kwarada
2. 発表標題 Fundamental Properties and Device Applications of Superconducting Single-crystalline Boron-doped Diamond
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Takahashi, S. Amano, A. Morishita, T. Kageura, Y. Takano, M. Tachiki, S. Ooi, S. Arisawa, H. Kwarada
2. 発表標題 Diamond Superconducting Quantum Interference Devices with New Structure of Josephson Junctions for Magnetic and Quantum Application
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Morishita, S. Amano, T. Kageura, M. Tachiki, S. Ooi, S. Arisawa, Y. Takano, H. Kwarada
2. 発表標題 Boron-doped Diamond Superconducting Quantum Interference Devices Operating above Liquid Helium Temperature
3. 学会等名 2019 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Morishita, I. Tsuyuzaki, T. Kageura, S. Amano, Y. Takano, M. Tachiki, S. Ooi, S. Arisawa and H. Kawarada
2. 発表標題 Boron-doped Diamond Superconducting Quantum Interference Devices Operating up to 10 K
3. 学会等名 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 泰裕, 天野 勝太郎, 森下 葵, 蔭浦 泰資, 高野 義彦, 立木 実, 大井 修一, 有沢 俊一, 川原田 洋
2. 発表標題 単一段差ジョセフソン接合で構成されるダイヤモンドSQUID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 高橋 泰裕, 天野 勝太郎, 森下 葵, 蔭浦 泰資, 高野 義彦, 立木 実, 大井 修一, 有沢 俊一, 川原田 洋
2. 発表標題 超伝導ボロンドープダイヤモンド(111)成長層を用いた液体ヘリウム温度以上で動作可能な超伝導量子干渉計の作製
3. 学会等名 第33回ダイヤモンドシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 泰裕, 天野 勝太郎, 森下 葵, 蔭浦 泰資, 高野 義彦, 立木 実, 大井 修一, 有沢 俊一, 川原田 洋
2. 発表標題 (111)成長層の単一段差で構成される超伝導ボロンドープダイヤモンドジョセフソン接合
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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