

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02562

研究課題名（和文）スピン軌道相互作用を利用したナノ構造複合型素子開発と機能解明

研究課題名（英文）development of hybrid nanostructured devices based on spin-orbit interaction and elucidations of their functions

研究代表者

高瀬 恵子（Takase, Keiko）

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子科学イノベーション研究部・主任研究員

研究者番号：60553245

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スピン軌道相互作用が大きい III-V 属半導体からなるナノワイヤを用いてスピン軌道相互作用の高効率電界制御を目的とした様々な素子を開発した。低ゲート電圧でスピン軌道相互作用の高効率制御に成功し、将来的なスピン電界効果トランジスタの実現に向けて端緒を開いた。さらにスピントロニクスとオプトエレクトロニクスの融合が期待できる高周波応用可能な導電性酸化物を利用した新型素子も開発した。また、超伝導・ナノワイヤ複合型量子ドット素子においてショットノイズ測定を行い、実験と理論両面から量子コトンネリングにおけるスピン反転緩和の重要性を明らかにした。また、スピンフィルタリングの効果等も調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低ゲート電圧でスピン軌道相互作用の高効率制御に成功したことは、将来的に電流ではなくてスピんでトランジスタの ON/OFF を切り替えるスピン電界効果トランジスタの実現につながり、低消費電力社会の実現にも貢献できる。さらに、スピントロニクスとオプトエレクトロニクスの融合が期待できる素子構造は新たな産業応用の基盤となる可能性がある。また、量子コトンネリングにおけるスピン反転緩和の解明は、学理構築に重要なだけでなく将来的な量子コンピュータの要素技術開発にも役立つと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed various devices to obtain highly efficient electric-field control of spin-orbit interaction using III-V semiconductor nanowires that have large spin-orbit interaction. We have succeeded in highly efficient control of the spin-orbit interaction at low gate voltages, providing a prototype of a spin field-effect transistor that will be demonstrated in the future. We also developed a new type of device using conductive oxides for high-frequency applications, which is expected to integrate spintronics and optoelectronics. We also performed high-sensitivity current fluctuation measurements in a superconductor-nanowire quantum dot device and clarified the importance of spin-flip relaxation in quantum cotunneling from both experimental and theoretical perspectives. In addition, the effect of spin filtering was also investigated.

研究分野：低次元量子電子物性

キーワード：ナノワイヤ スピン軌道相互作用 ショットノイズ 電界効果トランジスタ 量子ドット

1. 研究開始当初の背景

スピン軌道相互作用は外部磁場がない状態でも電子に有効磁場として作用し電子スピンを回転させる量子相対論効果である。スピン軌道相互作用には半導体の結晶構造に起因するドレッセルハウズ型と外部電場の印加によって変化するラシュバ型があるが、ラシュバ型では、伝導電子の運動量と垂直方向に外部電場を印加することでさらに垂直方向に有効磁場が生じ、それが電子スピんに作用することでスピンの歳差運動しながら伝導電子が移動する。これを利用すれば外部電場でスピンの向きを制御できるようになるため、ゲート電圧で ON/OFF を制御する電界効果トランジスタ (FET) において、従来の電流量の代わりにスピンの向きで ON/OFF を制御する FET (スピン FET) が実現できる。スピン FET は Datta らによって 1990 年に提案されたが、トランジスタのソース・ドレイン電極を強磁性体にしてチャンネルにスピンを注入させ、実際にスピン軌道相互作用によりスピンを回転させることが重要になる。

それ以来、バンド構造からスピン軌道相互作用が大きいと知られており高易動度である III-V 属半導体がスピン FET の候補として研究されてきた。特にラシュバスピン軌道相互作用はその大きさが電場に比例するため、実際にスピン軌道相互作用がゲート電圧で変調できるか精力的に研究された。スピン軌道相互作用のゲート変調が二次元量子井戸で初めて実証された後は低消費電力化や高集積化を目指して、微細加工した量子ワイヤ FET や、ボトムアップ型ナノワイヤ素子が世界中で研究されてきた。しかし、ショットキー型や MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) 型ではスピン軌道相互作用のゲート制御効率は大きく向上しなかった。そのような状況の中、イオン液体をゲート絶縁膜として用いて電気二重層を利用したナノワイヤ FET において、ゲート電圧を変調させるとスピン軌道相互作用が従来に比べて 10 倍以上大きく制御できることが報告された (Liang et al., Nano Lett. (2012))。しかし、ゲート電圧の変調に極低温・室温間の温度変化が必要であるため in-situ で変調できず、ゲート電圧を変化させるたびにその安定化に数時間必要となる欠点があり、実用的でなかった。

それに対して私たちは最近、(i) インジウムヒ素 (InAs) ナノワイヤの軸周りに均一にゲート電極を作製した構造のゲート・オール・アラウンド型 MOSFET を開発した。極低温における量子輸送測定で弱局在・弱反局在転移を観測することで、スピン軌道相互作用がゲート電圧で in-situ で制御でき、そのゲート効率が従来の MOS 型およびショットキー型 FET に比べて 10 倍以上高く、MOS 型/ショットキー型の中で世界最高効率となることを実現した (Takase et al., Sci. Rep. 7, 930 (2017))。その後、(ii) InSb ナノワイヤを用いた近接型バックゲート構造 FET を開発し、(i) と同程度のスピン軌道相互作用のゲート制御効率および巨大スピン軌道相互作用を達成し、将来的な低消費電力スピン FET の実現に近づいた (Takase et al., Appl. Phys. Express 12, 117002 (2019))。

そこで本研究では、それまでのスピン軌道相互作用制御効率の世界記録であるイオン液体利用 FET に比べて私たちの素子のゲート電圧の応答速度が格段に速く実用的であることをふまえて、将来的に高周波利用やオプトエレクトロニクスとの融合ができる新しい素子開発とその特性評価を行うことにした。さらに、私たちが成功しているスピン軌道相互作用の電界制御と大きなスピン軌道相互作用を実現した技術は、近年固体中で発現すると報告されているマヨラナ束縛状態の研究に役立つと考えられる。そのため、スピン軌道相互作用の大きい InAs ナノワイヤと超伝導が接合したナノ構造素子を作製し、高感度電流揺らぎ測定 (ショットノイズ測定) を行うことで、量子状態を調べる研究に着手することにした。

2. 研究の目的

上記の研究背景から、本研究課題では、スピン軌道相互作用の大きい III-V 半導体ナノワイヤを用いて、(1) 将来的に高周波利用やオプトエレクトロニクスとの融合ができる新しい素子開発 (導電性酸化膜を用いたゲート・オール・アラウンド型素子開発) と、それを用いたスピン軌道相互作用の電界制御 (2) InAs ナノワイヤ・超伝導接合素子開発とショットノイズ測定による量子状態の検出 を目的として進めることにした。

3. 研究の方法

本研究課題の遂行にあたって、実験研究と理論研究の両面から研究を進めることにした。実験研究では、MOCVD (有機金属気相成長) 装置等を用いて InAs ナノワイヤを成長した。それに対して、電子線露光装置や ALD (原子層堆積) 装置を用いて、ゲート・オール・アラウンド型の素子や超伝導接合素子を作製した。測定は室温や極低温において磁場を印加して低周波電気伝導度測定や高感度電流揺らぎ測定、高周波測定を行った。

理論研究では、実験結果の解析を行うための弱反局モデルを複数検討した。さらに、InAs ナノワイヤ・超伝導接合量子ドットにおける量子コトンネリングについて完全係数統計を用いて電流揺らぎの大きさやその評価指標のファノファクターを計算した。

4. 研究成果

当初の計画に基づき研究を進めた。その過程で、想定された以上の発展的研究まで行うことができた。以下に具体的に記述する。

(1) 将来的に高周波利用やオプトエレクトロニクスとの融合ができる新しい素子開発(導電性酸化膜を用いたゲート・オール・アラウンド型素子開発)と、それを用いたスピン軌道相互作用の電界制御

InAs ナノワイヤに対して、アルミナ (Al_2O_3) をゲート絶縁膜、導電性酸化膜であるジंकオキサイド (ZnO) をゲート電極として用いたゲート・オール・アラウンド型電界効果トランジスタを作製した。まず InAs ナノワイヤ周囲に Al_2O_3 、続いて ZnO を ALD 装置内で in-situ で成長し、その後 ALD 装置から取り出して SiO_2/Si 基板上的プレゲート構造上に配置し、電極を作製する。この手法を用いると、通常の金属を蒸着してゲート構造を作製する場合に比べて、ゲート絶縁膜表面の汚染を防ぐと同時に理想的なゲート・オール・アラウンド構造が作製できる。さらに、通常の金属に比べて本課題で使用した導電性酸化膜 ZnO は高周波の遮蔽効果が小さいため、将来的なオプトエレクトロニクスとの融合が期待できる素子構造となる。図 1 (a) に断面透過電子顕微鏡 (TEM) 像、図 1 (b) から (g) にエネルギー分散型 X 線分光 (energy dispersive X-ray spectrometry, EDS) による元素分析の画像を示す。図 1 を見ることで、ナノワイヤの周囲に ALD により成膜されている材料が確かに Al_2O_3 、 ZnO であり、それぞれの場所で不純物やマイグレーションなどがない様子が観測できる。このように汚染の少ない構造を用いて、図 1 (h) に示したような素子を作製した。

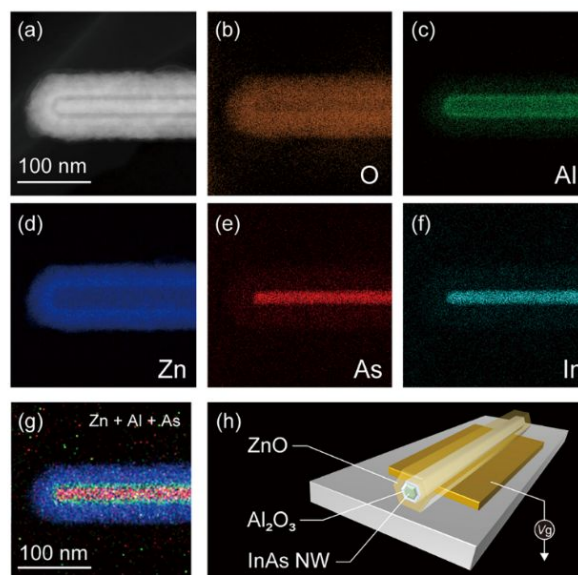


図 1 (a) TEM 像。(b)-(g) EDS 像。(h) 素子構造の模式図。

このような素子に対して FET 特性 (ソース・ドレイン電流のゲート電圧依存性等) を室温・極低温で調べ、世界で報告されているナノワイヤ FET に比べても、十分に高性能なナノワイヤ FET が作製できていることがわかった。さらに、極低温・磁場印加時の磁気伝導度を測定し、弱局在・弱反局在現象を観測した。それを解析することでスピン軌道相互作用長 l_{so} を求めると、図 2 (a) に示すように、低ゲート電圧で大きく変調できることが分かった。さらに、スピン軌道相互作用の大きさを示すラシュバ結合定数を求めると、図 2 (b) に示すように、私たちの以前の結果である通常の金属を用いたゲート・オール・アラウンド型構造の FET と同程度に高効率なスピン軌道相互作用のゲート電界変調が達成できていることがわかった。本研究の素子が高周波利用が可能な導電性酸化膜を用いた構造であることをふまえると、本研究成果は将来的なスピン FET とオプトエレクトロニクスの融合が期待できる成果であると言える。

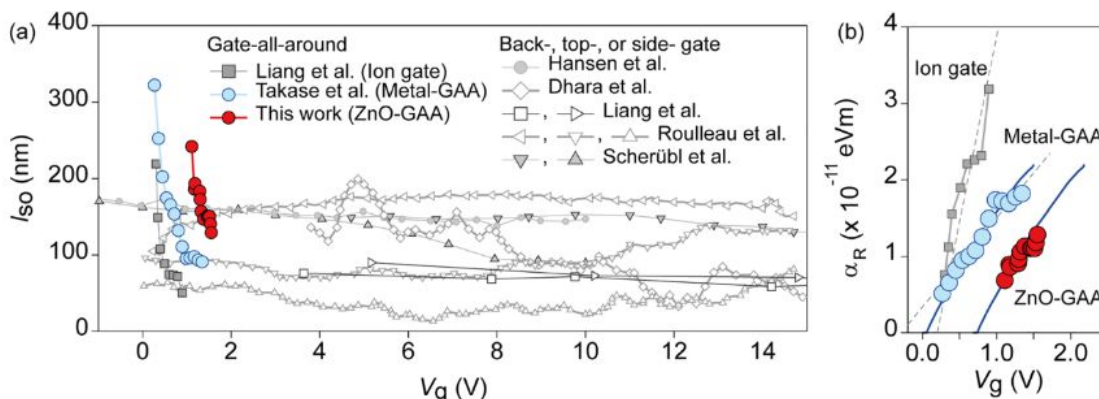


図 2 (a) スピン軌道相互作用長のゲート電圧依存性。過去に報告された InAs ナノワイヤ FET のスピン軌道相互作用長と比較している。(b) ラシュバ結合定数のゲート電圧依存性。

(2) InAs ナノワイヤ・超伝導接合素子開発とショットノイズ測定による量子状態の検出

InAs ナノワイヤと超伝導を接合させた素子を作製した。試料作製時の汚染を小さくするため、電極にナノワイヤを架橋した構造とした。極低温における電気伝導度測定を行ったところ、クーロンダイヤモンドが観測された。さらに、ショットノイズ測定も行い、ファノファクター F (ショットノイズを S 、電流値 I 、素電荷 e としたときに、 $F = S/2eI$ で定義される) を調べたところ、ゼロ磁場において、クーロンブロック領域において量子ドット内の電子数が偶数のときに $F \sim 2$ (スーパー・ポアソニンノイズ)、奇数のときに $F \sim 1$ (ポアソニアンノイズ) となることがわかった。また、磁場を印加すると $F \sim 1$ となることもわかった。その物理的メカニズムを説明するために、完全係数統計を用いてファノファクターの数値計算を行った。その結果、量子コトンネリングの過程においてスピン反転緩和を取り入れると実験結果をゼロ磁場から有限磁場まで定量的に説明できることがわかった。このようなスピン反転緩和まで取り入れた理論モデルはこれまで提案されておらず、これらの理論モデルは、私たちの研究のようにスピン軌道相互作用が大きい系において有用なモデルとなると期待される。

上記に示した(1)(2)の研究を行う過程で、スピンフィルタリングの効果を調べた研究や、InAs ナノワイヤの周囲に半絶縁性 InP を成長したコアシェルナノワイヤを利用した研究も行った。このときに想定外に巨大なスピン軌道相互作用を観測した。その原因として歪みの効果であると考えられ、今後さらなる研究によって spintronics と straintronics の研究を融合・発展させることができると期待される。また、今回の研究成果で明らかになったスピン軌道相互作用の電界制御性や超伝導接合素子の特性、および精密測定技術の蓄積は、今後のマヨラナ粒子やトポロジカル・量子コンピューティングの学理構築ならびに要素技術の研究、低消費電力スピン FET の実現に向けた研究に役立つと期待される。

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|---------------------------------|
| 1. 著者名 Takase Keiko, Tateno Kouta, Sasaki Satoshi | 4. 巻 119 |
| 2. 論文標題 Electrical tuning of the spin-orbit interaction in nanowire by transparent ZnO gate grown by atomic layer deposition | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 013102 ~ 013102-5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0051281 | 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 TAKASE Keiko, TATENO Kouta, SASAKI Satoshi | 4. 巻 64 |
| 2. 論文標題 Highly Efficient Electric-field Control of Rashba Spin-orbit Interaction in Semiconductor Nanowire Field-effect Transistors | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Vacuum and Surface Science | 6. 最初と最後の頁 118 ~ 125 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.64.118 | 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 Takase Keiko | 4. 巻 21 |
| 2. 論文標題 Quantum transport and its manipulation in semiconductor quantum devices | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of The Society of Japanese Women Scientists | 6. 最初と最後の頁 30 ~ 40 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5939/sjws.21004 | 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 Utsumi Yasuhiro, Kato Takemitsu, Entin Wohlman Ora, Aharony Amnon | 4. 巻 62 |
| 2. 論文標題 Spin-Filtering in a p-Orbital Helical Atomic Chain | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Israel Journal of Chemistry | 6. 最初と最後の頁 e202200107 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ijch.202200107 | 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 該当する |

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件）

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 高瀬恵子 |
| 2. 発表標題 半導体ナノワイヤを用いたスピンオービトロニクスの開拓 |
| 3. 学会等名 2022年度第2回BC、MtM合同委員会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高瀬恵子 |
| 2. 発表標題 新奇半導体材料における量子輸送およびスピン軌道相互作用制御の研究 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 加藤健晃, 内海裕洋, Ora Entin-Wohlman, Amnon Aharony |
| 2. 発表標題 カイラル分子の螺旋対称性とCISS効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 加藤 健晃, 内海裕洋, Amnon Aharony, Ora Entin-Wohlman |
| 2. 発表標題 CISS効果により有限分子鎖両端で誘起される電子状態の解析 |
| 3. 学会等名 ISSPワークショップ「カイラル物質科学の新展開」 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 加藤 健晃, 内海裕洋, Amnon Aharony, Ora Entin-Wohlman |
| 2. 発表標題 CISS効果により有限分子鎖両端で誘起される電子状態の解析 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高瀬恵子, 舘野功太, 佐々木智 |
| 2. 発表標題 透明電極を用いたゲート・オール・アラウンド型コアシェルナノワイヤFETにおけるスピン軌道相互作用制御 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高瀬恵子, 芦川耶真登, 章国強, 舘野功太, 佐々木智 |
| 2. 発表標題 超伝導・InAsナノワイヤ複合型量子ドットにおけるコトンネリング・ピークの偶奇性効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Keiko Takase, Kouta Tateno, Satoshi Sasaki |
| 2. 発表標題 Spin-orbit interaction engineering in gate-all-around core-shell nanowire |
| 3. 学会等名 EP2DS-24/MSS-20 Joint Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Keiko Takase, Yasuhiro Utsumi, Yamato Ashikawa, Guoqiang Zhang, Kouta Tateno, Yuma Okazaki, Satoshi Sasaki |
| 2. 発表標題 Parity-dependent cotunneling spectroscopy and shot noise in a hybrid superconductor-nanowire quantum dot: a role of spin-flip effect |
| 3. 学会等名 EP2DS-24/MSS-20 Joint Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 高瀬恵子 |
| 2. 発表標題 ナノワイヤを用いたスピン軌道相互作用エンジニアリング |
| 3. 学会等名 2021年日本表面真空学会学術講演会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Takase, S. Tateno, and S. Sasaki |
| 2. 発表標題 Tunable giant spin-orbit interaction in gate-all-around core-shell nanowire |
| 3. 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies (ISNTT2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Utsumi, O. Entin-Wohlman, A. Aharony |
| 2. 発表標題 Spin Selectivity through Time-reversal Symmetric Helical Junctions |
| 3. 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies (ISNTT2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高瀬恵子 |
| 2. 発表標題 半導体量子ナノ構造における量子輸送とスピン軌道相互作用制御 |
| 3. 学会等名 日本女性科学者の会 学術大会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Keiko Takase, Kouta Tateno, Satoshi Sasaki |
| 2. 発表標題 Gate control of spin-orbit interaction in a nanowire gate-all-around FET with atomic-layer-deposited Al ₂ O ₃ /ZnO gate-stack |
| 3. 学会等名 2020 International Conference on Solid States Devices and Materials (SSDM2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高瀬恵子, 内海裕洋 |
| 2. 発表標題 量子ドットのsuper-Poissonian shot noiseにおけるスピン・フリップ効果を取り入れた解析解導出と数値計算マッピング |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

| | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 ナノ構造デバイスの作製方法 | 発明者 館野功太、滝口雅人、佐々木智、江端一晃、熊倉一英 | 権利者 同左 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/005359 | 出願年 2022年 | 国内・外国の別 外国 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

| |
|--|
| 個人ホームページ (NTT物性科学基礎研究所) http://www.brl.ntt.co.jp/people/takase/ 量子科学イノベーション研究部 量子固体物性研究グループホームページ (NTT物性科学基礎研究所) https://www.brl.ntt.co.jp/group/butsuryo-g/index-j.html NTT物性科学基礎研究所ホームページ http://www.brl.ntt.co.jp/J/index.html |
|--|

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 | 内海 裕洋 (Utsumi Yasuhiro) (10415094) | 三重大学・工学研究科・准教授 (14101) | |
| 研究分担者 | 舘野 功太 (Tateno Kouta) (20393796) | 日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・多元マテリアル創造科学研究部・主任研究員 (92704) | |
| 研究分担者 | 佐々木 智 (Sasaki Satoshi) (80393768) | 日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・フロンティア機能物性研究部・主任研究員 (92704) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|