

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00237

研究課題名（和文）量子構造中の正孔スピンドYNAMIKSの解明と制御

研究課題名（英文）Elucidation and control of hole spin dynamics in quantum structures

研究代表者

小寺 哲夫（KODERA, Tetsuo）

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：00466856

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,000,000円

研究成果の概要（和文）：半導体量子ドット中の正孔スピンは、スピン軌道相互作用を介した交流電界による高速操作が可能であり、高性能な集積量子ビットの候補として期待されているが、そのスピンドYNAMIKSの研究は初期段階にある。本研究の目的は、正孔スピンドYNAMIKSの測定に向けた技術の開発を行い、その物理を調べることにある。シリコンやゲルマニウムなどの Ⅳ族半導体量子ドットを新たに開発し、スピン量子ビットに関わる物理を調べた。集積化に向けた機械学習技術や量子ビット演算技術の開発に並行して、スピン軌道相互作用によるスピン操作や、量子状態の高速・高精度読み出しを実証し、集積正孔スピン量子ビットに向けた基盤となる結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、量子ビット集積化に向け優位な特性を持つ正孔スピンについて、ダイナミクスに関わる物理を調べる基盤的な研究である。シリコン量子構造中の正孔スピンの操作に成功しており、量子構造中においてはスピン軌道相互作用がバルク中とは異なることを示唆する結果が得られ、新分野の開拓に繋がる重要な学術的成果を挙げている。量子状態の高速読み出しや、デジタル信号処理による高精度読み出し、機械学習による量子ドットの電荷状態の調整補助なども実現した。さらに社会的に実現が期待されている誤り耐性量子コンピュータに向けた要素技術として、2量子ビット操作と誤り訂正の実証といったインパクトあるスピン量子ビット研究を遂行した。

研究成果の概要（英文）：Spins of holes in semiconductor quantum dots have the potential for high-speed manipulation through AC electric fields mediated by spin-orbit interactions, making them promising candidates for integrated qubits. However, research on the dynamics of hole spins is still in its early stages. In this study, we develop techniques for measuring hole spin dynamics and investigate their underlying physics. We newly developed group-IV semiconductor quantum dots, such as silicon and germanium quantum dots, and examined the physics related to spin qubits. In parallel with the development of machine learning techniques and qubit operations for large-scale integration, we successfully demonstrated spin manipulation based on spin-orbit interactions and fast and precision readout of quantum states, obtaining foundational results for integrated hole spin qubits.

研究分野：量子技術

キーワード：量子ドット シリコン ゲルマニウム 量子情報 スピン軌道相互作用

1. 研究開始当初の背景

半導体量子構造を用いたスピン量子情報デバイスの研究は GaAs 系からシリコン系への展開が急速に進んでいる。これは、核スピンによるデコヒーレンスを抑制できることと、エレクトロニクス技術との適合性が良いためである。また、シリコンスピン量子情報デバイスは物理的に小さいため、大規模な集積化を必要とする誤り耐性量子コンピュータの実現に向け、有力な候補の一つとなっている。研究開始当初の時点で、シリコン量子ドット中の電子スピンを用いて、量子誤り訂正に必要な忠実度を超える 99.9% の単一量子ビットの操作忠実度が実現されていた。一方で、シリコンスピン量子ビットの研究は主に電子スピンを対象としたものであり、正孔スピン量子ビットの研究は世界的にも初期段階にあった。正孔スピンは、電子スピンの操作で用いられる微小磁石や交流電流線が必要とせず、材料自体のもつスピン軌道相互作用を介した高周波電界によって操作できる。将来的な集積化に適している可能性があり、そのスピンドायナミクスを調べる意義があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、量子構造中の正孔スピンドायナミクスの測定に向けた技術の開発を行い、その物理を調べることにある。具体的な技術として、以下の (1) から (3) を開発することを目的とする。(1) 正孔スピン量子ドット開発：電場による高速操作が可能で集積化に適した量子ドットの開発を行う。(2) 集積量子ドット素子の高速調整・安定動作に向けた技術開発：将来的には人間の手では調整しきれないほど大規模集積化した系を自動調整することを見据えて、要素技術の開発を行う。(3) 量子ビット演算技術開発：将来的な量子計算に向け、2量子ビット操作や量子誤り訂正の技術開発を行う。これらを用いて、スピンドાયナミクスの物理を深耕することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、IV 族半導体を用いた量子ドット素子の作製を行う。シリコンやゲルマニウムのような IV 族半導体では、核スピンを持つ同位体の割合が少なく良好なコヒーレンスが期待される。本研究において、注目する物理は、スピン軌道相互作用である。このため、核スピン磁場によるデコヒーレンスを抑制した系として、波動関数が p 軌道対称性を持つため核スピンとの接触相互作用が打ち消される価電子帯の系を用いる。要素技術として、ダイナミクス測定のため、高周波電界を用いた電気双極子スピン共鳴 (EDSR) によるスピン操作に加え、RF 反射測定と呼ばれる高速読み出し技術やデジタル信号処理による高精度読み出し技術を開発する。また、集積量子ドット素子の高速調整・安定動作のため機械学習を用いた量子ドット中の電荷状態の自動検出技術の開発を行う。さらに、正孔スピン量子ビットに適用するため、高忠実度なシリコン電子スピン量子ビット利用して、量子ビット演算技術の開発を行う。

4. 研究成果

(1) 正孔スピン量子ドット開発

スピン軌道相互作用の理解を目的として、極低温下で量子ドットの電気特性評価を行った。まず、半導体を物理的に加工することで量子閉じ込めポテンシャルを形成する物理形成型のシリコン量子ドットにおいてスピンドાયナミクスを測定するため、デバイスの開発を行った。ゲートの持つ寄生回路成分により高周波が量子ドットまで届かないという問題を解決するために、上部ゲート電極構造を改良した。これにより、今まで開発してきた高周波によるスピン操作と高速な読み出しが期待される RF 反射測定が適用可能になった。

シリコン量子ドット中の正孔スピンの EDSR によるスピン操作を行うため、極低温下にお

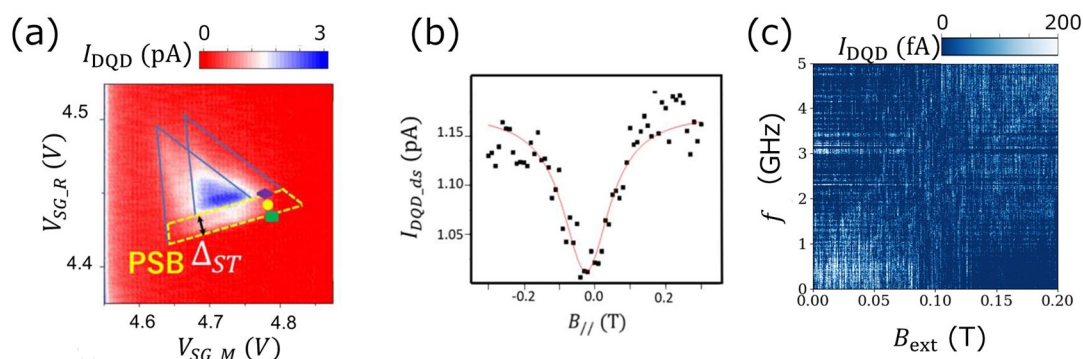


図1 シリコン正孔量子ドット操作技術の開発

いて物理形成 2 重量子ドット中で Pauli の排他律によるスピン閉塞状態 (PSB) の測定を行った (図 1(a))。ゲート電圧を調整することで、電荷三重点中で明瞭な PSB 領域の観測に成功し、その磁場依存性から g 因子を調べた。また、この PSB 領域に電圧を固定し、磁場を掃引することで電流値の変化を調べた。図 1(b) に示すように、ゼロ磁場を中心にディップ状の電流変化が起きていることがわかった。これは、ゼロ磁場では起きていなかったスピン軌道相互作用による緩和が外部磁場により生じるためであると考えられる。続いて、同様の PSB 領域において、高周波電界を印加し、EDSR によるピーク状のリーク電流を観測した (図 1(c))。これはゼーマン分裂の大きさと高周波の周波数が一致する条件で EDSR によるスピン回転が起こり、PSB が解けたためだと考えられる。ここで EDSR は、スピン軌道相互作用を介した有効高周波磁場によるものと考えられ、正孔スピンの持つ強いスピン軌道相互作用を示唆している。加えて、静磁場下で共鳴した高周波電界を印加し、高周波の印加時間に対する依存性を調べることで、コヒーレントな電流の振動も観測することができた。

このような正孔物理形成量子ドット系におけるスピン状態読み出しに向け、RF 反射測定技術の適用を行った (図 2)。電荷センサとしての機能が期待される量子ドットに LC の共振回路を接続し、共振周波数における量子ドットのコンダクタンスの変化を観測した。スピン読み出し信号を模擬する変調信号に対する応答を調べることで、この系がシリコン正孔スピンの読み出しに十分な帯域や感度を持つことを明らかにした。また、同様の RF 反射測定において、非常に大きな位相信号を観測できた。寄生成分を考慮した等価回路を用いた計算により、共振周波数から適度に周波数をずらすことで量子ドットのコンダクタンス変化を通常の振幅変化ではなく位相変化として観測されることを明らかにした。

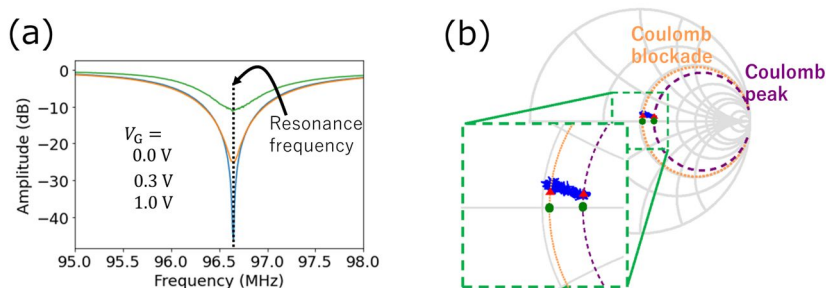


図 2 物理形成量子ドットでの RF 反射測定の開発

正孔スピンの緩和時間は電子に比べて短い可能性があり、そのような正孔スピンを読み出すには広帯域な測定が必要であると考えられる。しかし、帯域を広げると雑音が大きくなり、信号対雑音比が低下する。このような状況においても、緩和時間を精密に調べるため、デジタル信号処理技術を用いて、スピン読み出し信号の検出感度向上を行った (図 3)。スピンの状態を知るには、ステップ状もしくはパルス状のスピン依存信号の有無を確認する必要がある。しかしながら、雑音が大きいと単純に閾値を設定してステップやパルスの有無を判断することは困難になる。そこで、パルス応答 1 つ 1 つに対数尤度比検定に基づいたデジタル信号処理を行うことでステップ位置の検出を行った。ここでは、パルス応答のそれぞれのデータ点でステップ変化が起きている場合と起っていない場合とを仮定し、それらの尤度の比をとった。その値が最大となる点がステップ位置として最尤推定できる。この結果と、雑音を加えたスピン読み出し信号のシミュレーション結果から、雑音の大きい信号からの正確なスピン読み出しを実証した。

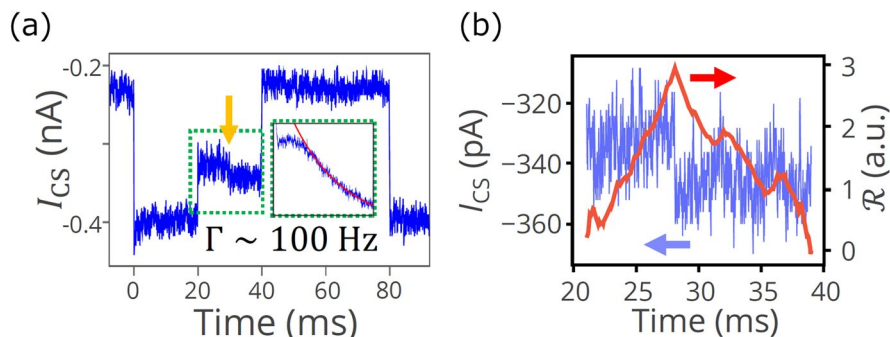


図 3 デジタル信号処理による読み出し精度の向上

また、量子ドット電荷センサのドレインとソースにオフセット電圧を印加することで電荷を誘起し、センサとして機能させつつゲート電極として機能させる技術を正孔量子ドット系において開発した(図4)。実験では、正孔2重量子ドットとその近傍に電荷センサとして集積された正孔単一量子ドットの系において、互いのオフセット電圧を制御することで、自身のポテンシャルを調整しつつお互いのゲートとして機能することを確認できた。将来の大規模化の際に、ゲート電極数を減らし集積化を容易にする技術となると期待される。

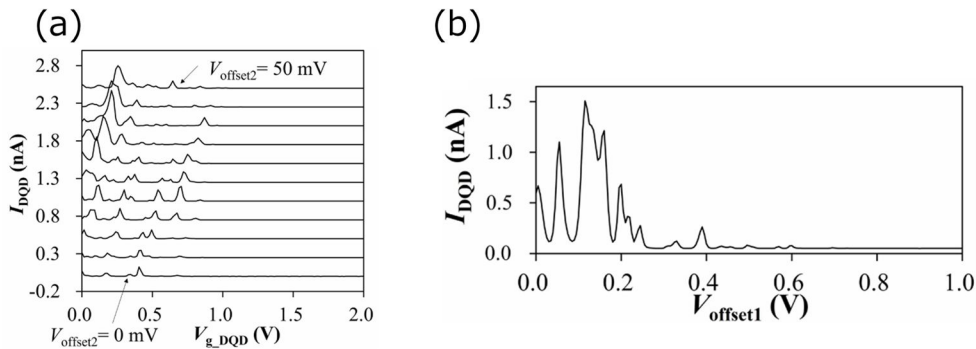


図4 オフセット電圧による量子ドットの調整

量子ビットの集積化が進むと配線の高密度化と重量の問題が生じる。その解決策として制御用の古典回路も極低温に置くこと、究極的には量子ビットと同一チップ上に置くことが提案されている。しかしながら、その極低温古典回路からの発熱のため、mK環境での同一チップ上での動作は難しく、より冷却能力の高い高温(~1 K)での量子ビット動作が望まれている。このような量子ビットの実現に向け、正孔物理形成量子ドットにおける電流特性の温度依存性を調べた(図5)。結果として、ゲート電極で定義された量子ドットよりもはるかに高い25 K程度まで、単正孔輸送を示すクーロンダイヤモンドを観測することができた。

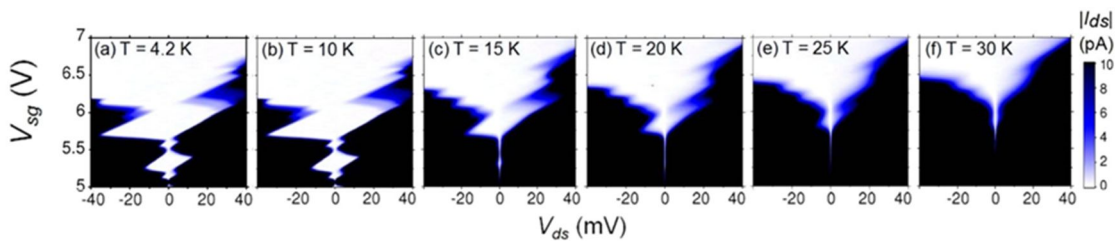


図5 物理形成量子ドットの高温動作

並行して、ゲルマニウムを用いた正孔スピン量子ビットの実現に向けて、量子ドットデバイスの作製と評価を行った。ここでは Ge/SiGe ヘテロ構造基板を用いてデバイスの作製を行った。Ge/SiGe ヘテロ構造基板では、面直方向の強い量子閉じ込め効果と圧縮歪みにより、面内有効質量の軽い正孔がキャリアとなる。この基板の評価のため、量子ドットデバイスの作製に先立って、ホールバーデバイスを作製した(図6(a))。ゲルマニウム量子井戸中に正孔を誘起するのに十分な電圧をゲート電極に印加し、極低温下で面直磁場を掃引することで、シュブニコフ・ドハース(SdH)振動と量子ホール効果の観測に成功した。次に Ge/SiGe ヘテロ構造基板上に微小ゲート電極を作製することで(図6(b))、量子井戸中に量子ドットとして機能するポテンシャルの形成を可能にしたデバイスを作製し、低温下(4.2 K)における電流測定でゲート電圧に依存し電流の制御が行えることを確認した。このように量子ビット測定に向けたデバイス開発を行うことができた。

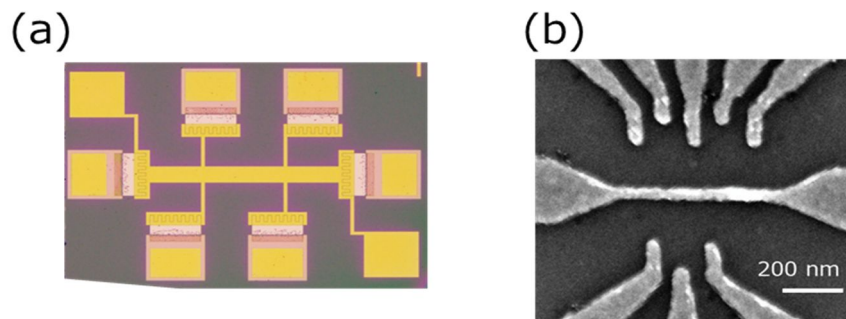


図6 ゲルマニウム量子デバイスの開発

(2) 集積量子ドット素子の高速調整・安定動作に向けた技術開発

集積量子ドット素子の高速調整に向けた技術開発として、量子ドットの電荷状態の自動認識技術を開発した。量子ドットデバイスでスピン量子ビットを実現するには、一般的に1つ程度の少数の電荷を閉じ込めることが多い。このような電荷状態への調整は、経験のある研究者が時間をかけて行う必要がある。より短い時間で量子ドットを調整するために自動調整技術が提案されているが、そのような技術の中で高精度に電荷状態を認識させる、機械学習と前処理を使用した手法を開発した(図7)。実際に電荷状態認識の動作を実証し、96%という高い精度を示すことを確認した。さらに、トレーニングされた機械学習モデルの説明可能性を分析し、モデルが電荷遷移線に基づいて状態を予測し、人間と同様の認識が実現されていることを示唆する結果を確認した。

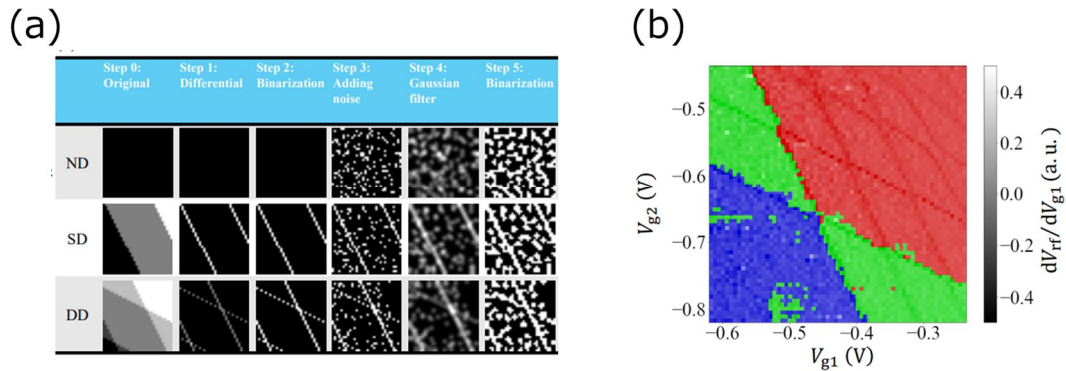


図7 機械学習を用いた電荷状態認識

(3) 量子ビット演算技術開発

シリコンを用いた量子ビットを開発し、高忠実度な2量子ビット操作や量子誤り訂正技術の開発を行った。

誤り耐性量子コンピュータを実現するために最も有望な符号化手法である表面符号では、99%以上の忠実度でゲート操作が求められる。超伝導量子ビットを始めとするいくつかの量子ビット系ではこのような操作が実現されていたが、シリコン量子ビットでは2量子ビット操作においてゲート操作の遅さから98%の忠実度に制限されていた。そこで微小磁石構造による磁場勾配を利用した高速な2量子ビット操作を実現し、シリコン量子ビットを用いて初めて99%を超える2量子ビット操作を実現し、また、単一量子ビットの忠実度も99%を超える値を実現した。このようなゲート操作を実現するための量子ビット操作速度と2量子ビット操作の忠実度の関係を調べ、最適な条件を明らかにした。さらに、高忠実度の量子ビット操作を活用し、3つ以上の結合した量子ビットを用いてシリコン量子ビット系で初めて量子誤り訂正を実現した。具体的には、3量子ビットの条件付き量子操作を利用することで、位相反転エラーが訂正可能であることを実証した(図8)。

このような誤り訂正を行う量子プロセッサの間を2量子ビット操作で繋ぐことがスケラブルな量子計算を行う上で重要になる。しかしながら、シリコン量子ドット中のスピン量子ビット間の操作には最近接にある量子ドット間での短距離交換相互作用を利用するため、離れた量子ビット間の結合は容易ではない。そこで、離れたシリコン量子プロセッサを結ぶための鍵となる技術である、スピンのコヒーレントなシャトリングによる2量子ビット操作を実証した。この技術を用いて、1000を超えるオンオフ比で交換結合の切り替えを実現し、近接する量子ドット間の移動でスピンのコヒーレンスが99.6%保たれることを確認することができた。

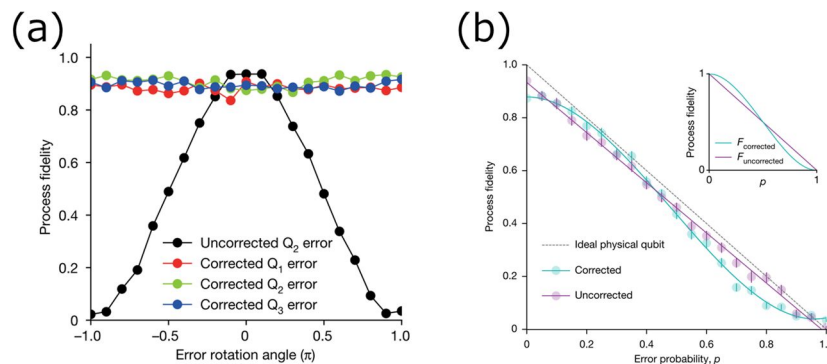


図8 シリコンスピン量子ビットの量子誤り訂正

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 8件）

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. 著者名 M. Machida, R. Mizokuchi, J. Yoneda, T. Tomura, T. Kodera | 4. 巻 62 |
| 2. 論文標題 Mixed-mode RF reflectometry of quantum dots for reduction of crosstalk effects | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 SC1086-1~4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acbb0e | 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 K. Tomari, J. Yoneda, T. Kodeara | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Contact pad design considerations for semiconductor qubit devices for reducing on-chip microwave crosstalk | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics | 6. 最初と最後の頁 1~5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2022FUS0001 | 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 J. Wang, S. Ota, H. Edlbauer, B. Jadot, P. Mortemousque, A. Richard, Y. Okazaki, S. Nakamura, A. Ludwig, A. D. Wieck, M. Urdampilleta, T. Meunier, T. Kodera, N. Kaneko, S. Takada, C. Bauerle | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Generation of a Single-Cycle Acoustic Pulse: A Scalable Solution for Transport in Single-Electron Circuits | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review X | 6. 最初と最後の頁 031035-1~13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.12.031035 | 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 溝口 来成、米田 淳、小寺 哲夫 | 4. 巻 J105-C |
| 2. 論文標題 シリコン量子ビット技術と集積化に向けた研究動向 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C | 6. 最初と最後の頁 227~234 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transelej.2021JC10017 | 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 S. Nishiyama, K. Kato, M. Kobayashi, R. Mizokuchi, T. Mori, T. Kodera | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 The functions of a reservoir offset voltage applied to physically defined p-channel Si quantum dots | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 10444-1~6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-14669-x | 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 K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, T. Kobayashi, S. Tarucha | 4. 巻 608 |
| 2. 論文標題 Quantum error correction with silicon qubits | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nature | 6. 最初と最後の頁 682~686 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-022-04986-6 | 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 A. Noiri, K. Takeda, T. Nakajima, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, S. Tarucha | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 A shuttling-based two-qubit logic gate for linking distant silicon quantum processors | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nature Communications | 6. 最初と最後の頁 5740-1~7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-33453-z | 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 M. Shinozaki, J. Igarashi, S. Iwakiri, T. Kitada, K. Hayakawa, B. Jinnai, T. Otsuka, S. Fukami, K. Kobayashi, H. Ohno | 4. 巻 107 |
| 2. 論文標題 Nonlinear conductance in nanoscale CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with perpendicular easy axis | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 094436-1~8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.094436 | 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 S. Bugu, S. Nishiyama, K. Kato, Y. Liu, S. Murakami, T. Mori, T. Ferrus, T. Kodera | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 4.2K Sensitivity-Tunable Radio Frequency Reflectometry of a Physically Defined p-channel Silicon Quantum Dot | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 20039-1~8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-99560-x | 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 M. Tadokoro, T. Nakajima, T. Kobayashi, K. Takeda, A. Noiri, K. Tomari, J. Yoneda, S. Tarucha and T. Kodera | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Designs for a two-dimensional Si quantum dot array with spin qubit addressability | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 19406-1~15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-98212-4 | 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 M. Shinozaki, Y. Muto, T. Kitada, T. Nakajima, M. R. Delbecq, J. Yoneda, K. Takeda, A. Noiri, T. Ito, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha and T. Otsuka | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Gate voltage dependence of noise distribution in radio-frequency reflectometry in gallium arsenide quantum dots | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Express | 6. 最初と最後の頁 035002-1~4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abe41f | 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 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1. 著者名 A. Noiri, K. Takeda, T. Nakajima, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci & S. Tarucha | 4. 巻 601 |
| 2. 論文標題 Fast universal quantum gate above the fault-tolerance threshold in silicon | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nature | 6. 最初と最後の頁 338~342 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-021-04182-y | 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 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名 K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, J. Yoneda, T. Kobayashi, S. Tarucha | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Quantum tomography of an entangled three-qubit state in silicon | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nature Nanotechnology | 6. 最初と最後の頁 965 ~ 969 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41565-021-00925-0 | 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 米田淳, 溝口来成, 小寺哲夫 | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 シリコン量子ドット単一キャリアスピンの高周波反射計測 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 固体物理 | 6. 最初と最後の頁 265-276 |
| 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 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 R. Mizokuchi, S. Bugu, M. Hirayama, J. Yoneda, T. Kodera | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Radio-frequency single electron transistors in physically defined silicon quantum dots with a sensitive phase response | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 5863-1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-85231-4 | 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 S. Bugu, S. Nishiyama, K. Kato, Y. Liu, T. Mori, T. Kodera | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 RF reflectometry for readout of charge transition in a physically defined p-channel MOS silicon quantum dot | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 SBBI07-1-4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abeac1 | 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 S. Bugu, F. Ozaydin, T. Kodera | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Surpassing the classical limit in magic square game with distant quantum dots coupled to optical cavities | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 22202-1-9 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-79295-x | 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 R. Mizokuchi, M. Tadokoro, T. Kodera | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Detection of tunneling events in physically defined silicon quantum dot using single-shot measurements improved by numerical treatments | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Express | 6. 最初と最後の頁 121004-1-4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abc923 | 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 N. Shimatani, Y. Yamaoka, R. Ishihara, A. Andreev, D. A. Williams, S. Oda, T. Kodera | 4. 巻 117 |
| 2. 論文標題 Temperature dependence of hole transport properties through physically defined silicon quantum dots | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 094001-1-5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0010981 | 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 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. 著者名 S. Hiraoka, K. Horibe, R. Ishihara, S. Oda, T. Kodera | 4. 巻 117 |
| 2. 論文標題 Physically defined silicon triple quantum dots charged with few electrons in metal-oxide-semiconductor structures | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 074001-1-5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0010906 | 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66件（うち招待講演 15件 / うち国際学会 20件）

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 C. Wen, H. Takahashi, S. I. Ibad, S. Nishiyama, K. Kato, Y. Liu, S. Murakami, T. Mori, R. Mizokuchi, J. Yoneda, T. Kodera |
| 2. 発表標題 Long-term characteristic stabilization of a semiconductor double quantum dot based on a multi-dimensional gradient descent technique |
| 3. 学会等名 2022 International Conference on Solid Device and Materials (SSDM 2022) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 小寺哲夫 |
| 2. 発表標題 量子コンピュータの発展とシリコン量子ビットの開発動向 |
| 3. 学会等名 東大シャープコロキウム (招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-----------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 小寺哲夫 |
| 2. 発表標題 半導体スピン量子ビット研究開発の動向 |
| 3. 学会等名 第10回つくば量子情報サロン「半導体ベース量子デバイスの現状と展望」(招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 近藤 知宏、溝口 来成、米田 淳、小寺 哲夫 |
| 2. 発表標題 モデルベース強化学習による量子ドットの自動調整 |
| 3. 学会等名 第70回応用物理学会秋春学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 K. Takeda |
| 2. 発表標題 High-fidelity quantum gates and quantum error correction with silicon spin qubits |
| 3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 武藤由依、中首拓、相澤拓海、篠崎基矢、北田孝仁、中島峻、Matthieu R. Delbecq、米田淳、武田健太、野入亮人、Arne Ludwig、Andreas D. Wieck、樽茶清悟、兼村厚範、志賀元紀、大塚朋廣 |
| 2. 発表標題 量子ドット電荷状態推定機械学習モデルの予測判断根拠可視化 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Y. Muto, T. Nakaso, T. Aizawa, M. Shinozaki, T. Kitada, T. Nakajima, M. R. Delbecq, J. Yoneda, K. Takeda, A. Noiri, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, A. Kanemura and T. Otsuka |
| 2. 発表標題 Noise robust recognition of charge states in quantum dots by machine learning and preprocessing |
| 3. 学会等名 International Conference on the Physics of Semiconductors 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 小寺哲夫 |
| 2. 発表標題 集積シリコン量子ビットに向けたMOS型物理形成量子ドット |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 領域4, 領域1, 領域3 シンポジウム 「半導体量子ビット研究の最前線」 (招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 | R. Mizokuchi, M. Hirayama, S. Nishiyama, K. Kato, Y. Liu, S. Murakami, T. Mori, J. Yoneda, T. Kodera |
| 2. 発表標題 | Equivalent Circuit Analysis of RF Reflectometry of Physically Defined Quantum Dot Systems |
| 3. 学会等名 | 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems/20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (EP2DS-24/MSS-20 Joint Conference) (国際学会) |
| 4. 発表年 | 2021年 |

| | |
|---------|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 | 小寺哲夫 |
| 2. 発表標題 | シリコン量子コンピュータに向けた工学的連携研究 |
| 3. 学会等名 | 2021年度量子情報工学研究会、量子情報工学の最前線 (招待講演) |
| 4. 発表年 | 2021年 |

| | |
|---------|--------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 | 小寺哲夫 |
| 2. 発表標題 | シリコン量子コンピュータに向けた基盤技術と物理に関する研究 |
| 3. 学会等名 | 第49回 薄膜・表面物理セミナー (2021) 量子コンピュータの現状とハードウェア研究最前線 (招待講演) |
| 4. 発表年 | 2021年 |

| | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 | Y. Muto, T. Nakaso, M. Shinozaki, T. Kitada, T. Nakajima, M. R. Delbecq, J. Yoneda, K. Takeda, A. Noiri, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, A. Kanemura, and T. Otsuka |
| 2. 発表標題 | Noise-robust charge state recognition in quantum dots utilizing machine learning and preprocessing |
| 3. 学会等名 | The 11th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information |
| 4. 発表年 | 2022年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 武藤由依、中曾拓、相澤拓海、篠崎基矢、北田孝仁、中島峻、Matthieu R. Delbecq、米田淳、武田健太、野入亮人、Arne Ludwig、Andreas D. Wieck、樽茶清悟、兼村厚範、大塚朋廣 |
| 2. 発表標題 機械学習と前処理によるノイズ耐性のある量子ドット電荷状態推定 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 T. Otsuka, M. Shinozaki, Y. Muto, T. Kitada, T. Nakajima, M. R. Delbecq, J. Yoneda, K. Takeda, A. Noiri, T. Ito, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha |
| 2. 発表標題 Noise analysis of radio-frequency reflectometry for single spin and charge detection in quantum dots |
| 3. 学会等名 1st Online RIEC International Workshop on Spintronics, Online (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 K. Takeda |
| 2. 発表標題 High-fidelity quantum gates and error-correction with silicon spin qubits |
| 3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2022) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 K. Takeda |
| 2. 発表標題 Quantum error correction with spins in silicon |
| 3. 学会等名 The 11th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 K. Takeda |
| 2. 発表標題 Manipulation of Three-Spin States in a Si/SiGe Triple Quantum Dot |
| 3. 学会等名 The 2021 MRS Fall Meeting (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, T. Kobayashi, S. Tarucha |
| 2. 発表標題 Three-qubit quantum error correction using electron spins in silicon |
| 3. 学会等名 Silicon Quantum Electronics Workshop 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 鈴木 優作、田所 雅大、Sayyid Irsyadul Ibad、西山 伸平、加藤 公彦、柳 永勲、村上 重則、森 貴洋、溝口 来成、米田 淳、小寺 哲夫 |
| 2. 発表標題 物理形成シリコン量子ドットにおける正孔スピン共鳴の 磁場依存性 |
| 3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 溝口 来成、西山 伸平、加藤 公彦、柳 永勲、村上 重則、森 貴洋、米田 淳、小寺 哲夫 |
| 2. 発表標題 P型物理形成シリコン量子ドットRF電荷センサの感度特性評価 |
| 3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 小寺哲夫 |
| 2. 発表標題 半導体量子ビットの研究動向と展望 |
| 3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会、シンポジウム「スピンを利用した量子技術の最前線 - 量子デバイス開発から新材料探索まで -」 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 小寺哲夫 |
| 2. 発表標題 族半導体量子ビット研究の動向と展望 |
| 3. 学会等名 ゲルマニウム系量子スピン研究会(招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------------|
| 1. 発表者名 小寺哲夫 |
| 2. 発表標題 シリコンスピン量子ビットの集積に向けた研究 |
| 3. 学会等名 第25回半導体におけるスピン工学の基礎と応用(招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 小寺哲夫 |
| 2. 発表標題 シリコン量子コンピュータデバイス技術 |
| 3. 学会等名 第224回応用物理学会シリコンテクノロジー分科会 研究集会 「量子コンピュータにおける半導体・デバイステクノロジー」(招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 T. Kodera |
| 2. 発表標題 Silicon quantum dot devices for spin-based quantum computing |
| 3. 学会等名 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop 2020 (SNW 2020), 5.1, (Virtual) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 中曽拓、篠崎基矢、相澤拓海、北田孝仁、武藤由依、中島峻、Matthieu R. Delbecq、米田淳、武田健、野入亮人、伊藤匠、Arne Ludwig、Andreas D. Wieck、樽茶清悟、兼村厚範、大塚朋廣 |
| 2. 発表標題 機械学習による量子ドットの電荷状態推定 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 田所 雅大、鈴木 優作、西山 伸平、加藤 公彦、柳 永勲、村上 重則、森 貴洋、溝口 来成、米田 淳、小寺 哲夫 |
| 2. 発表標題 物理的に形成されたp型シリコン二重量子ドットにおける正孔スピン共鳴 |
| 3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------------------|
| 1. 発表者名 溝口 来成、西山 伸平、加藤 公彦、柳 永勲、森 貴洋、小寺 哲夫 |
| 2. 発表標題 トンネル結合した電荷センサを持つ物理形成シリコン量子ドットの特性評価 |
| 3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|--------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 小寺 哲夫、他 | 4. 発行年 2023年 |
| 2. 出版社 技術情報協会 | 5. 総ページ数 483 |
| 3. 書名 量子技術の実用化と研究開発業務への導入方法 | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 東京工業大学 小寺研究室 http://www.quantum.ee.e.titech.ac.jp/ T2R2東京工業大学リサーチレポートリ https://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/researcherpublicationlist.cgi?q_researcher_content_number=CTT100574609 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

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 | 大塚 朋廣 (OTSUKA Tomohiro) (50588019) | 東北大学・電気通信研究所・准教授 (11301) | |
| 研究分担者 | 武田 健太 (TAKEDA Kenta) (80755877) | 国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員 (82401) | |
| 研究分担者 | 溝口 来成 (MIZOKUCHI Raisei) (90848772) | 東京工業大学・工学院・特任助教 (12608) | |

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 | | | |
|---------|-------------|---------------------------|-----|--|
| オランダ | デルフト大学 | トゥエンテ大学 | | |
| 英国 | 日立ケンブリッジ研究所 | A-Modelling Solutions Ltd | UCL | |
| オーストラリア | UNSW | | | |