

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14640

研究課題名（和文）シリコン量子ドット中の電子スピンを用いた量子計算基盤技術の高性能化に関する研究

研究課題名（英文）Enhancing performance of quantum control techniques for electron spin qubits in silicon quantum dots

研究代表者

野入 亮人 (Noiri, Akito)

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・基礎科学特別研究員

研究者番号：40804042

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：初めに、量子ビットとしてよく動作する、高安定かつ操作性の高いシリコン量子ドット試料を再現性良く作製するための技術開発を行った。作製した試料において、当初の計画に沿って単一スピン量子ビットでの高忠実操作および一重項-三重項量子ビットとしての動作原理検証を行った。次に、2つの単一スピン量子ビット間の2量子ビット操作の高性能化に取り組んだ。最適な試料設計に基づいた操作の高速化によって、2量子ビット操作忠実度を改善するとともに、新しい量子ビット間の結合の制御方法を開発し、結合のオンオフ比を大幅に改善した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シリコンスピン量子コンピュータでは、量子ビットの種類、2量子ビット操作の実装手法など基本動作においても複数の候補があり、その優位性はいまだ決まっていない。本研究では、異種スピン量子ビット複合系の実現可能性や既存の2量子ビット操作手法における高忠実操作の実現、およびより拡張性に優れた新しい2量子ビット操作手法の開発を行うことで、各手法の性能や相性を明らかにし、今後のシリコンスピン量子コンピュータの開発方針に指針を与えた。

研究成果の概要（英文）：We developed device fabrication techniques to fabricate stable and tunable silicon quantum dots with a high yield. We realized a high-fidelity single-qubit control in single electron spin qubits and also demonstrated a single-qubit operation for a singlet-triplet qubit. Then we focused on improving a performance of a two-qubit gate between two single electron spin qubits. We carefully designed the device to make the two-qubit gate faster and as a result, we succeeded in enhancing a two-qubit gate fidelity. Furthermore, we established a new technique to control a two-qubit coupling and drastically enhanced on off ratio of the two-qubit coupling.

研究分野：半導体物理

キーワード：量子ビット 量子ドット 電子スピン

1. 研究開始当初の背景

半導体量子ドット中の電子スピンは、既存の半導体集積技術との相性から大規模量子計算機を実装しうる物理系として注目を集めている。とりわけシリコン量子ドットでは、単一電子スピンを量子ビットとして動作させることで操作忠実度 99.9%を超える高忠実な単一量子ビット操作が可能であることが実証された。一方で、複数の電子スピンを用いて 1 つの量子ビットとして動作させることも可能である。特に 2 電子スピンから成る一重項-三重項量子ビットは、検出速度および忠実度の観点で優れていることが知られている。異種量子ビット間で 2 量子ビット操作を実現すれば異なる利点を融合した効率的な量子計算の可能性が拓ける。また、同種量子ビット間においても、量子誤り訂正閾値である 99%を超える忠実度での 2 量子ビット操作は実現していない。試料設計や操作手法を最適化することで 2 量子ビット操作忠実度を向上できれば、実用的なスピン量子計算の実現可能性に指針を与えることができる。

2. 研究の目的

本研究では、スピン量子計算の基盤技術の高性能化を実現する。具体的には、以下 3 点に取り組む。(1) 安定で操作性の高いシリコン量子ドット試料の作製技術の開発を行う。(2) 同一試料上で単一電子スピン量子ビットおよび一重項-三重項量子ビットを実現する。(3) 2 つの単一電子スピン量子ビット間の 2 量子ビット操作の高忠実度化を行う。

3. 研究の方法

量子ドット試料はシリコン/シリコンゲルマニウムヘテロ構造基板上に微細金属加工を施すことにより作製した。金属ゲート電極はアルミニウムを用い、3 層の電極を精密に位置合わせして重ね合わせることで作製した (図 1)。この試料構造は制御性および安定性において優れていることが知られている。また、量子ドット近傍にコバルトによる微小磁石を配置することで、量子ビット動作に必要な空間的に不均一な局所磁場を生成した。試料は希釈冷凍機で冷却し、温度 20 mK で測定した。各金属ゲート電極には独立に dc および ac の電圧を印加し、量子ドットのポテンシャルおよびドット間もしくはドットとリード電極間の結合を制御した。

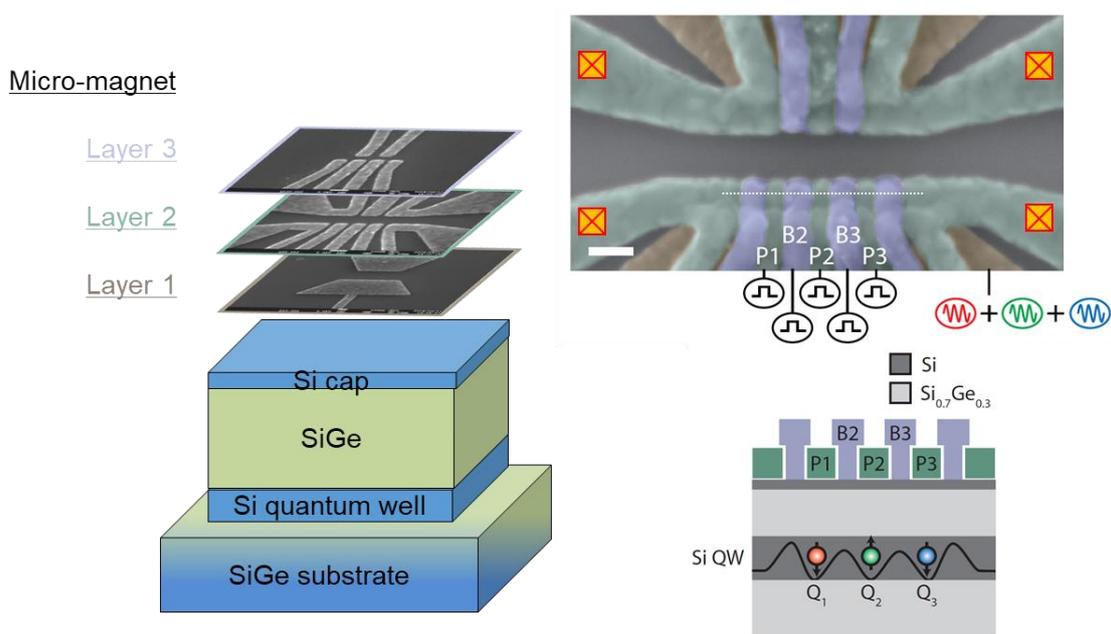


図 1. 試料構造および 3 層のアルミニウムゲート電極(左)と積層後の試料の走査電子顕微鏡写真(右上)。白のスケールバーは 100 nm に対応する。右下図は右上図の白の点線部分の断面図を表す。

4. 研究成果

まず再現性良く試料を作製するために、ゲート積層型構造の試料作製技術開発を行った。研究開始時、この構造では、異なる層間のゲート電極が電氣的にショートしてしまうという問題があった。本研究によって、この主な要因は試料作製中に静電破壊が生じるためであることが明らかになった。この問題は、試料作製中常に金属ゲート電極が帯電しないように工夫することで回避できることが分かった。以上の改善により、再現性良くゲート積層型試料を作製する技術を確認し、目的(1)を達成した。

次に、作製した3重量子ドット試料の特性評価を行った。まずは、量子ドットの準位、量子ドット間およびドットとリード電極間の結合の各パラメータが十分ゲート電圧で制御可能であることを確認した。続いて、各ドットの電子スピンに対して、電子スピン共鳴による単一スピン回転操作を行った。量子ドット近傍に配置した微小磁石の漏れ磁場により、それぞれのスピンを独立に操作可能であることを確かめた。この結果は、この試料が3つの単一スピン量子ビットによる3量子ビット系として動作可能であることを意味している。また、ランダム化ベンチマーク法で3つの量子ビットに対して単一量子ビット操作精度を評価したところ、全て99%以上の忠実度で操作可能であることがわかった(図2)。

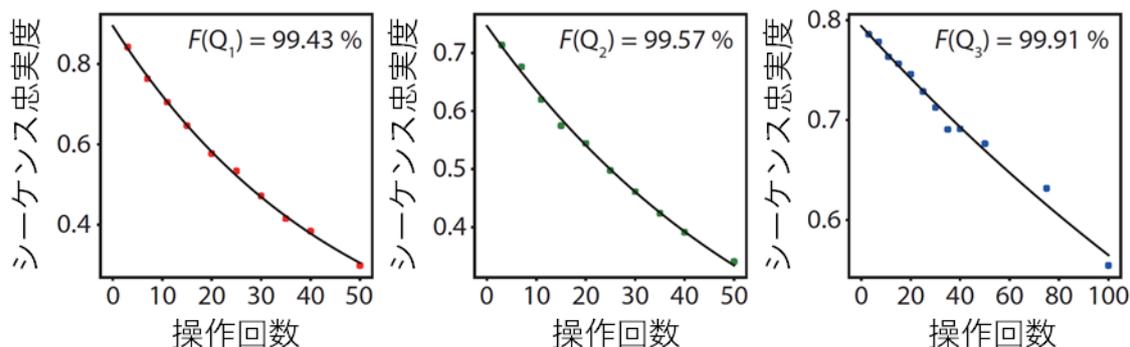


図2. ランダム化ベンチマーク法による3つの単一電子スピン量子ビットの単一量子ビット操作忠実度評価。操作回数に対するシーケンス忠実度の減衰から操作忠実度を評価可能。

さらに、3つのドットのうち隣接する2つのドットを用いて一重項-三重項量子ビットとしての動作原理検証を行った。これまでシリコン試料では、このタイプのスピン量子ビットの操作忠実度は検証されていなかった。今回ランダム化ベンチマーク法を用いて一重項-三重項量子ビットの単一量子ビット操作精度を検証したところ、こちらも99%以上という高忠実制御が可能であることがわかった。以上の成果より、シリコン試料における、単一スピン量子ビットと一重項-三重項量子ビットからなる異種スピン量子ビット複合系の実現可能性に道筋を示し、目的(2)を達成した。

続いて、2つの単一スピン量子ビット間の2量子ビット操作の高性能化に取り組んだ。これまでの研究では、2量子ビット操作で最大98%の忠実度が報告されており、この制限要因がコヒーレンス時間に対して遅い操作であることがわかっている。そこで本研究では、2量子ビット操作を高速化することで操作忠実度を向上しようと試みた。ここで鍵となるのは、作製した試料の量子ビット間の結合の制御性の高さ、微小磁石による局所磁場およびこれを用いた高速単一スピン回転操作である。実際にこれらの要素を組み合わせることで、2量子ビット操作速度を従来の10倍向上し、99%以上の操作忠実度を達成した(図3)。

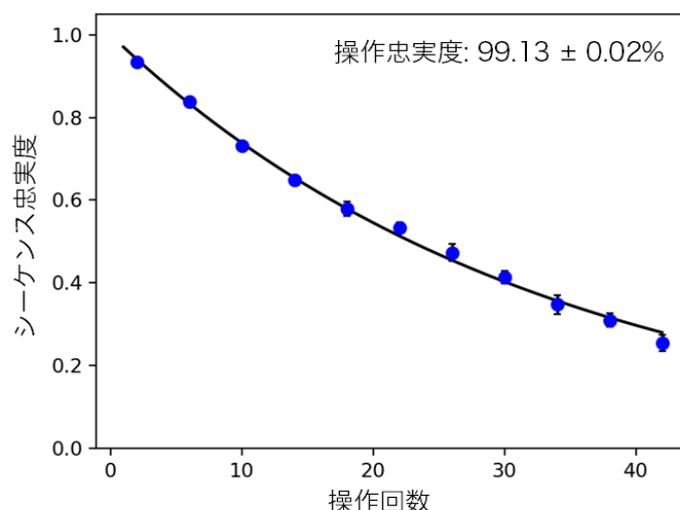


図3. ランダム化ベンチマーク法による2量子ビット忠実度評価。最後に、効率的な量子ビット間の結合の操作手法の開発を行った。上記の手法では、量子ビット

間の結合は常に一定(オン)であり、2量子ビット操作の煩雑性は低いものの、系を拡張していく際には適さない。量子ビット間の結合のオンオフは、隣接量子ドット間のトンネル障壁をゲート電圧で制御するのが一般的である。雑音や測定温度の観点からも、パルスで印加できるゲート電圧にはある程度の大きさの制限があるため、既存の手法では、量子ビット間の結合のオンオフ比は100程度以下に限られていた。結合オン時の結合の大きさは2量子ビット操作速度を決めるので大きい方がよく(>10 MHz)、一方でオフ時に残っている結合の分だけ単一量子ビット操作忠実度が下がるため、オンオフ比1000以上を達成することが拡張性のある2量子ビット操作の必要要件であるといえる。そこで、本研究では量子ビット間の結合を制御する新しい手法を開発した。3重量子ドット中の2電子スピンに対し、2つのスピンの両端の量子ドットにいる場合を結合オフとし、片方のスピンを中央の量子ドットへコヒーレントにシャトルリングすることで結合をオンにすることができる(図4)。この手法で結合を制御したところ、オンオフ比1000以上を達成することに成功した。さらに、オンオフは1 ns程度と高速に切り替えることができ、その忠実度も99%以上であることを確かめた。以上の成果により2量子ビット操作の高性能化を推し進めることができたとともに、今後の研究開発方針に指針を与え、目的(3)を達成した。

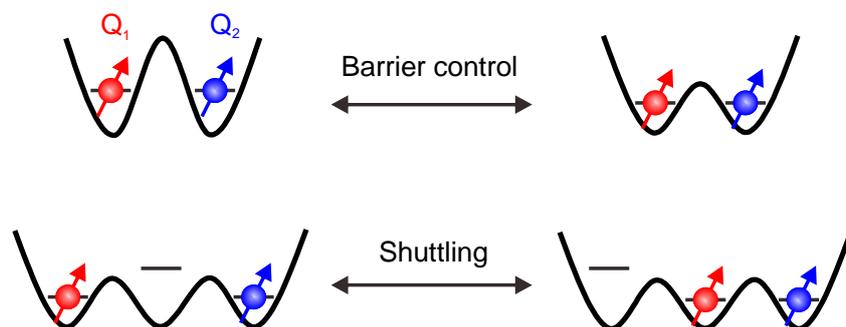


図4. 従来(上)および本研究で新しく開発した(下)量子ビット間の結合制御手法

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Noiri Akito, Takeda Kenta, Yoneda Jun, Nakajima Takashi, Kodera Tetsuo, Tarucha Seigo	4. 巻 20
2. 論文標題 Radio-Frequency-Detected Fast Charge Sensing in Undoped Silicon Quantum Dots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 947 ~ 952
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b03847	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 Yoneda J., Takeda K., Noiri A., Nakajima T., Li S., Kamioka J., Kodera T., Tarucha S.	4. 巻 11
2. 論文標題 Quantum non-demolition readout of an electron spin in silicon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	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/s41467-020-14818-8	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 Nakajima Takashi, Noiri Akito, Kawasaki Kento, Yoneda Jun, Stano Peter, Amaha Shinichi, Otsuka Tomohiro, Takeda Kenta, Delbecq Matthieu R., Allison Giles, Ludwig Arne, Wieck Andreas D., Loss Daniel, Tarucha Seigo	4. 巻 10
2. 論文標題 Coherence of a Driven Electron Spin Qubit Actively Decoupled from Quasistatic Noise	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review X	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) 10.1103/PhysRevX.10.011060	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 Takeda K., Noiri A., Yoneda J., Nakajima T., Tarucha S.	4. 巻 124
2. 論文標題 Resonantly Driven Singlet-Triplet Spin Qubit in Silicon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) 10.1103/PhysRevLett.124.117701	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 Takashi Nakajima, Yohei Kojima, Yoshihiro Uehara, Akito Noiri, Kenta Takeda, Takashi Kobayashi and Seigo Tarucha	4. 巻 15
2. 論文標題 Real-Time Feedback Control of Charge Sensing for Quantum Dot Qubits	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	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) 10.1103/PhysRevApplied.15.L031003	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 Y. Kojima, T. Nakajima, A. Noiri, J. Yoneda, T. Otsuka, K. Takeda, S. Li, S. D. Bartlett, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha	4. 巻 7
2. 論文標題 Probabilistic teleportation of a quantum dot spin qubit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	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/s41534-021-00403-4	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 該当する

1. 著者名 Kenta Takeda, Akito Noiri, Takashi Nakajima, Jun Yoneda, Takashi Kobayashi, and Seigo Tarucha	4. 巻 -
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 -
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 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Yohei Kojima, Takashi Nakajima, Akito Noiri, Jun Yoneda, Tomohiro Otsuka, Kenta Takeda, Sen Li, Stephen D. Bartlett, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Towards quantum teleportation with quantum-dot spin qubits
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Yoneda, Kenta Takeda, Akito Noiri, Takashi Nakajima, Sen Li, Tetsuo Koderu, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Quantum non-demolition readout of an electron spin in a Si/SiGe quantum dot
3. 学会等名 Silicon Quantum Electronics Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenta Takeda, Akito Noiri, Takashi Nakajima, Jun Yoneda, Sen Li, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 High-fidelity resonant operation of a Si-based singlet-triplet qubit
3. 学会等名 Silicon Quantum Electronics Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akito Noiri, Kenta Takeda, Takashi Nakajima, Jun Yoneda, Takashi Kobayashi, Sen Li, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Coherent electric dipole spin resonance manipulation of three individual spins in a Si/SiGe triple quantum dot
3. 学会等名 Silicon Quantum Electronics Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Kobayashi, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Akito Noiri, Takashi Nakajima, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Deterministic initialization of a Si/SiGe spin qubit
3. 学会等名 Silicon Quantum Electronics Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 akashi Kobayashi, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Akito Noiri, Takashi Nakajima, and Seigo Tarucha
2 . 発表標題 Measurement-based deterministic initialization of a Si/SiGe spin qubit
3 . 学会等名 EU-USA-Japan International Symposium on Quantum Technology(ISQT) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Akito Noiri, Takashi Nakajima, Jun Yoneda, Peter Stano, Tomohiro Otsuka, Kenta Takeda, Daniel Loss, and Seigo Tarucha
2 . 発表標題 Enhancing coherence of a single electron spin by realtime probing of magnetic noise
3 . 学会等名 EU-USA-Japan International Symposium on Quantum Technology(ISQT) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kenta Takeda, Akito Noiri, Takashi Nakajima, Jun Yoneda, Takashi Kobayashi, Sen Li, and Seigo Tarucha
2 . 発表標題 Coherent electric dipole spin resonance manipulation of three individual spins in a Si/SiGe triple quantum dot
3 . 学会等名 EU-USA-Japan International Symposium on Quantum Technology(ISQT) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Akito Noiri, Kenta Takeda, Takashi Nakajima, Takashi Tobayashi, Sen Li, and Seigo Tarucha
2 . 発表標題 Two-qubit gate control in silicon
3 . 学会等名 9th Summer School on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei Kojima, Takashi Nakajima, Akito Noiri, Jun Yoneda, Tomohiro Otsuka, Kenta Takeda, Sen Li, Arne Ludwig, Andreas. D. Wieck and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Quantum teleportation with quantum-dot spin qubits
3. 学会等名 9th Summer School on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Ito, Tomohiro Otsuka, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Shinichi Amaha, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Akito Noiri, Giles Allison, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Control and measurement of electron spin states in quadruple quantum dots
3. 学会等名 9th Summer School on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiro Uehara, Yohei Kojima, Takashi Nakajima, Akito Noiri, Kenta Takeda, Takashi Kobayashi, Sen Li, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Improvement of the micro-magnet technique in a spin-based quantum computer
3. 学会等名 9th Summer School on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Marian Marx, Jun Yoneda, Angel Gutierrez Rubio, Peter Stano, Kenta Takeda, Yu Yamaoka, Tomohiro Otsuka, Takashi Nakajima, Akito Noiri, Sen Li, Daniel Loss, Tetsuo Koderu, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Determination of the direction of the spin-orbit field in a physically-defined p-type MOS silicon double quantum dot
3. 学会等名 9th Summer School on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Juan Rojas Arias, Takashi Nakajima, Kenta Takeda, Akito Noiri, Takashi Kobayashi, Sen Li, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Flip-chip implementation of cQED
3. 学会等名 9th Summer School on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤匠、大塚朋廣、中島峻、Matthieu Delbecq、天羽真一、米田淳、武田健太、野入亮人、Giles Allison、Arne Ludwig、Andreas D. Wieck、樽茶清悟
2. 発表標題 4重量子ドットにおける4電子スピン状態測定法の開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野入亮人、武田健太、米田淳、中島峻、小寺哲夫、樽茶清悟
2. 発表標題 高周波反射測定による電界誘起型シリコン量子ドットの高速電荷検出
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林嵩、米田淳、武田健太、野入亮人、中島峻、樽茶清悟
2. 発表標題 シリコン・スピン量子ビットに対する測定ベースの決定性初期化プロトコル
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 米田淳、武田健太、野入亮人、中島峻、Sen Li、神岡純、小寺哲夫、樽茶清悟
2. 発表標題 シリコン量子ドットにおける電子スピン量子非破壊測定
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yosuke Sato, Xin Liu, Kenta Takeda, Akito Noiri, Takashi Nakajima, Kento Ueda, Sadashige Matsuo, Amir Sammak, Menno Veldhorst, Giordano Scappucci, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Universal behavior of low-dimensional systems on Si and Ge quantum well
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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野入亮人、武田健太、中島峻、米田淳、小林嵩、樽茶清悟
2. 発表標題 シリコン3量子ビットプロセッサー(I)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田健太、野入亮人、中島峻、米田淳、小林嵩、樽茶清悟
2. 発表標題 シリコン3量子ビットプロセッサー(II)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上原義裕、中島峻、小嶋洋平、野入亮人、武田健太、小林嵩、樽茶清悟
2. 発表標題 スピン量子ビットのための電荷計のフィードバック制御
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021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
---------	---------