

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01276

研究課題名（和文）シリコン量子ビット集積化に向けたスピン結合基本技術の創製

研究課題名（英文）Creation of spin-coupling technology suitable for Si quantum bit integration

研究代表者

安田 哲二（Yasuda, Tetsuji）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・部長

研究者番号：90220152

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,100,000円

研究成果の概要（和文）：トンネルFET型シリコンスピン量子ビット素子を用いて、2つ以上の量子ビット間において長距離スピン結合を実現する基本技術を目指して研究を行った。まず単体素子について、研究開始当初は1.5Kだった動作温度の上限を10Kまで改善するとともに、素子動作のシミュレーション技術を開発した。スピン結合動作を評価するための基本技術として、2量子ビットの独立操作技術を確立した。スピン結合技術に関して、スピン鎖形成を実現する足掛かりとして、マイクロ波励起トンネルにおける複数の干渉経路の共存および4スピンESRという2つの新規現象の観測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年注目を集める量子コンピューターの大規模集積化のためにSi量子ビットは有望な素子であるが、量子ビット間のスピン結合技術の目途が立っていない。本研究で観測した新規物理現象は、複数スピン系の相互作用によるものと考えられ、量子ビット間をつなぐスピン鎖開発に向けた足掛かりとしての学術的意義がある。また、本研究の過程で実現された10Kという世界最高温度での量子ビット動作は、大型希釈冷凍機を必要としない量子集積回路の可能性を示すものであり、量子コンピューターの利用場面の拡大につながるという社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This project aimed to develop a technology for long-distance spin coupling among two or more qubits that had been formed in a tunnel field-effect transistor (TFET). The upper limit of the operation temperature for the TFET-type qubits was raised from 1.5 K to 10 K. Device simulator for the TFET-type qubits was also developed. Independent manipulation of two qubits was successfully demonstrated as a basic technique for studying the spin-coupling phenomena. As for the spin-coupling technology, we observed two new phenomena: coexistence of multiple interference paths in microwave-assisted tunneling and four-spin ESR, which suggested possibility of the spin chain for realizing spin coupling.

研究分野：電子デバイス材料

キーワード：量子ビット スピнкаプラー トンネルFET シリコン 等電子トラップ 量子コンピューター

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

昨今、量子コンピュータに高い注目が集まっている。超伝導量子ビットを用いた量子アニーリング機械がすでに市販され、また半導体産業と情報産業とに関わる多くの企業がゲート方式量子コンピュータの開発を進めている。超伝導量子ビットによるハードウェア開発が先行する中、将来の大規模集積に適した素子として、シリコンスピン量子ビットに期待が高い。ゲート方式量子コンピュータでは正方格子型ビット配置が必要とされ、従来のノイマン型計算機を超える処理性能の実現には、最低  $10^7$  個程度の量子ビット集積が必要とされている。シリコンスピン量子ビットでは、Gate-Defined 型と MOSFET 型の 2 種類が主流である。Gate-Defined 型ではスピン交換相互作用でビット間結合を実現する。そのため、ビットを近接配置する必要があり、配線が極めて複雑となり集積化が難しい。一方の MOSFET 型は集積化が容易だが、ビット間結合を実現する技術が確立されていない。ビット間結合技術の欠落が、成熟したシリコン技術を用いているにも関わらず、超伝導量子ビットに集積度の観点で水を空けられている理由となっている。

シリコン量子ビットには高温動作という期待もある。本研究チームではトンネルトランジスタ (TFET) 型の量子ビットを世界で初めて提案し、本研究の開始時に 1.5 K での量子ビット動作に成功、また単一電子輸送としては 300K での観測に成功していた。これは量子ビットの高温動作実現に道を開くものであるが、TFET 型も MOSFET 型と同様に、ビット間結合技術に課題がある。

このように、TFET 型や MOSFET 型のスピン量子ビットでは、距離の離れたビット間のスピン状態を結合させる技術が求められている。本研究では、これを「スピнкаプラー」と呼称する。スピнкаプラーはマイクロ波共振器を用いる方法や、スピン鎖を用いる方法などが提案されている。前者は超伝導量子ビットで実績があるが、サイズが大きく (mm オーダー)、高集積化には不向きである。後者はコンセプト提案だけであり実験実証がなされていない。また、スピнкаプラーをはじめとする長距離結合手法を実際に TFET 型に適用するには、十分に小さいゲート幅の素子を実現し、かつ適切な位置に量子ビット機能を発現する不純物を配置することが求められる。すなわち、量子ビット構造の最適化も必要である。

### 2. 研究の目的

上記の背景の下、大規模に集積した高温動作可能な量子コンピュータ実現に向けて、本研究はシリコン量子ビット集積化に向けたスピン結合基本技術の確立を目的とし、具体的には以下の目標を設定した。

TFET 型スピン量子ビットを用いたスピンチェーン型スピнкаプラーの実証実験

狭ゲート幅 TFET 型スピン量子ビットの動作実証と不純物配置技術の確立

これらの技術が揃えば、集積可能な結合スピン量子ビットによって、ゲート方式量子コンピュータの基本論理ゲートである Controlled NOT (CNOT) 動作を、高温動作可能な TFET 型スピン量子ビットを用いて実行することが可能になる。研究の実施においては、上記の目的のために必要となる TFET 型スピン量子ビット自体の評価に関する研究も並行して進めた。

### 3. 研究の方法

本研究の実施体制としては、研究全体を代表研究者である産業技術総合研究所・安田が統括、素子試作および動作シミュレーションを産総研の安田と森が担当、素子設計を慶応大学・伊藤が担当、素子評価を理化学研究所・大野および物質・材料研究機構の森山が担当した。また、理論面での連携研究者として、産総研・川畑と千葉大学・中山が参加した。

TFET 型量子ビットおよび実証実験用デバイスの試作は産総研クリーンルームにて行った。デバイス試作を効率化するために、設計ツールとして従来半導体素子開発に用いられてきた TCAD (Technology Computer-Aided-Design) の一部を担う、ドリフト拡散輸送方程式に基づくデバイスシミュレータを、必要な機能を拡張した上で活用した。素子評価については、理研および物材機構が有する 1.5 K 超伝導マグネットが付帯する低温電気測定システムを利用した。両機関が備える測定システムは、測定機能にそれぞれ特徴があるため、評価内容に応じてシステムを選択して実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) TFET 型スピン量子ビットの 10K までの高温動作

研究開始当初は 1.5 K までの動作に留まっていた TFET 型スピン量子ビットについて、本研究開発の中で 10K までの高温動作に成功した。図 1 はスピン操作に成功したことを示す、いわゆるシェブロンパターン (ラビ振動のスピン操作マイクロ波に対する周波数依存性) を観測した結果である。10 K までの温度について、パターンが観測されていることがわかる。このスピン量子ビットは TFET 中に導入した Al-N 不純物が形成する等電子トラップ (Iso-Electronic Trap; IET) 準位と、これに偶発的に近接した準位とが二重ドットを形成し、スピン閉塞の原理によって動作するものである。IET 不純物はバンドギャップ中に十分に深いエネルギー準位を形成するが、一方の偶発的準位は浅いものと考えられ、後者によって温度特性が決定されているものと考えている。よって、偶発的に形成された浅い準位を、人為的に形成した深い準位と置き換えることで、今後更なる動作温度の改善と、歩留まりの改善が期待される。本研究成果は単一のスピン量子ビット動作温度としては現時点では世界最高である (他機関からの報告での動作

温度は 1 K 前後)。本研究成果に関しては、Scientific Reports 誌に論文発表を行ったほか、複数の学会発表や招待解説記事につながっている。本成果は産総研が素子作成を担当し、理研及び物材機構において評価実験を実施したものである。

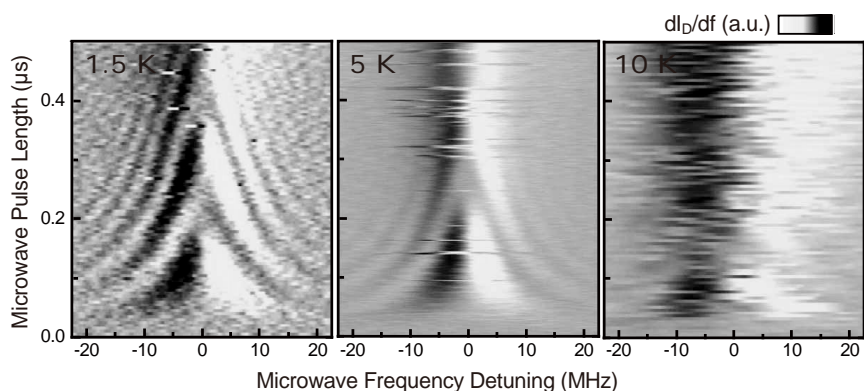


図 1 スピン量子ビット動作を示すシェブロンパターン

### (2) 設計技術の開発：クーロン閉塞を模擬するシミュレータ

素子設計のためのデバイスシミュレーションを実施していくにあたり、クーロン閉塞を模擬するデバイス特性シミュレータを開発した。これは産総研が開発した Impulse TCAD と呼称する設計統合環境に搭載されているドリフト拡散輸送方程式ベースのデバイスシミュレータに、クーロン閉塞を再現する量子トンネル輸送をキャリアの生成再結合項として導入することで実現した。図 2 にシミュレーションによって得られた TFET 型量子ビット素子の単電子量子輸送特性、いわゆるクーロンダイヤモンドを再現した計算結果を示している。ゲート電圧とドレイン電圧の両者を変化させた際の、量子トンネル輸送によって生じる電流をプロットしたものである。緑色の補助線に示すように、ダイヤモンド形状の輸送特性が良く再現されている。ドリフト拡散輸送方程式を用いたデバイスシミュレーション技術は一般に集積素子の開発に活用されているものであるが、本シミュレーションはそのプラットフォーム上にクーロン閉塞に関わる輸送現象を組み込んだ世界初の例である。本研究成果に関しては Japanese Journal of Applied Physics 誌に論文発表を行ったほか、複数の学会発表を行っている。本シミュレータは産総研が開発し、慶応大での設計に活用した。

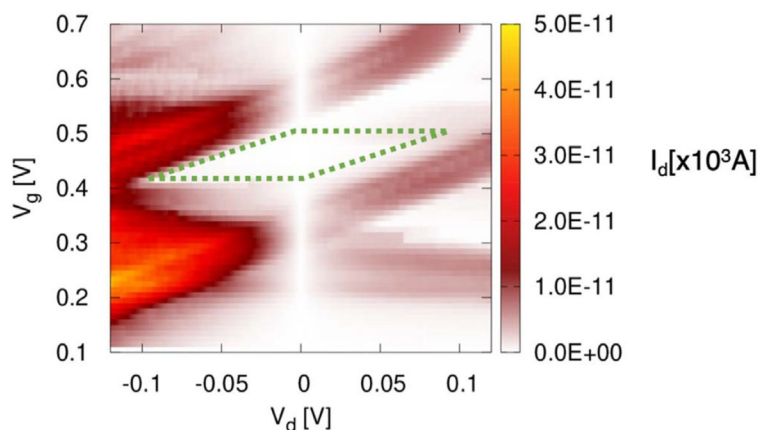


図 2 シミュレーションによって再現されたクーロン閉塞の電流電圧特性

### (3) 強磁場下における LZSM 干渉の観測

TFET 型スピン量子ビットにおいて、スピン担体に存在する相互作用についての基礎的知見を得るため、磁場下での 2 重結合量子ドット間の共鳴トンネル現象の観測およびそのマイクロ波スペクトロスコピーを実施した。ゼロ磁場下において、連続マイクロ波を照射したときの共鳴トンネルピークのマイクロ波強度依存性は、複数のサテライトピークが印可したマイクロ波周波数  $f$  の単一光子のエネルギー  $hf$  ( $h$ : プランク定数) に対応して発現する。さらにメインおよびサテライトの共鳴トンネルによる電流ピークがマイクロ波強度に対して Bessel 関数の 2 乗に比例して変化する。この Landau-Zener-Stückelberg-Majorana (LZSM) 干渉、いわゆるマイクロ波励起トンネリングが生じていることが TFET 型スピン量子ビット素子において確認された。図 3 は、ゼロ磁場および共鳴トンネルが発現するあるゲート電圧下における、ドレイン電圧変化に対する電流特性である。これに見られるように、2 重量子ドットにおける共鳴トンネルによる電流ピークにおいて、磁場下ではゼーマン分裂を反映して左右に新たなピークが生じている。

中心にあるピークはスピンを保存した共鳴トンネルによるものであり、左右の追加ピークはスピン反転を伴う共鳴トンネルによるものである。中心のピークから両側のピークのエネルギー差は、別途スピン閉塞領域の単一電子スピン共鳴測定で得られた  $g$  値およびそのゼーマンエネルギーと一致している。そして一定磁場下におけるマイクロ波スペクトロスコピーを観測した結果、ゼーマン分裂した量子準位に対しても LZSM 干渉が発現し、スピン保存およびスピン反転を伴うトンネリングにおいても LZSM 干渉が発現することを発見した。この結果は、TFET 型スピン量子ビットにおいて、磁場に応じた複数のスピン反転を伴う干渉経路が共存していることを示唆する結果となっている。スピン反転の原因は何らかの相互作用に起因すると考えられ、スピン鎖形成に関する知見を与え得る物理現象と考えられる。本研究においてはどのような相互作用が働いているかを明らかにするまでには至らず、これは今後の課題である。本研究成果については現在論文を執筆中であり、令和 2 年度内の発表を目指している。本実験は、物質・材料研究機構の測定システムを利用して実施した。

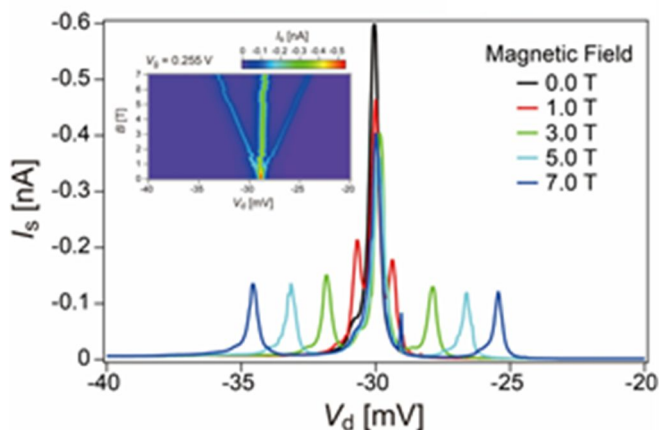


図 3 強磁場下における共鳴トンネルを観測した電流電圧特性

#### (4) 2つの量子ビットを独立に操作

最終目標は 2 つの独立した TFET 素子がそれぞれ内包する量子ビットを結合させ、その相互作用を検証することであるが、その前段階として、単一の TFET 素子が内包する 2 つのスピンを 2 量子ビットとして独立に制御した。将来の相互作用検証に必要な評価技術を確立できたことに意義がある。この TFET 素子では、素子が有する 2 つのスピンの間に働くパウリの排他率が TFET 素子の電気伝導の ON/OFF を決めており、2 つのスピンの互いに平行の場合には伝導特製が OFF、互いに反平行では ON となる。スピンに何も制御を加えない状態、すなわち初期状態では平行状態となっている。2 つのスピンは異なる量子ビットエネルギーを持つため異なる周波数のマイクロ波を印可することでそれぞれの量子ビットをクロストークなしに独立に制御できる。量子ビットエネルギーが異なるのは、局在スピンを有する不純物の種類の違いにより、スピン  $g$  因子が異なるためである。実験では 2 つのマイクロ波周波数を各スピンの量子ビットエネルギーに設定し、かつそれぞれのマイクロ波をパルス変調して照射しつつ素子の ON/OFF 特性を測定した。

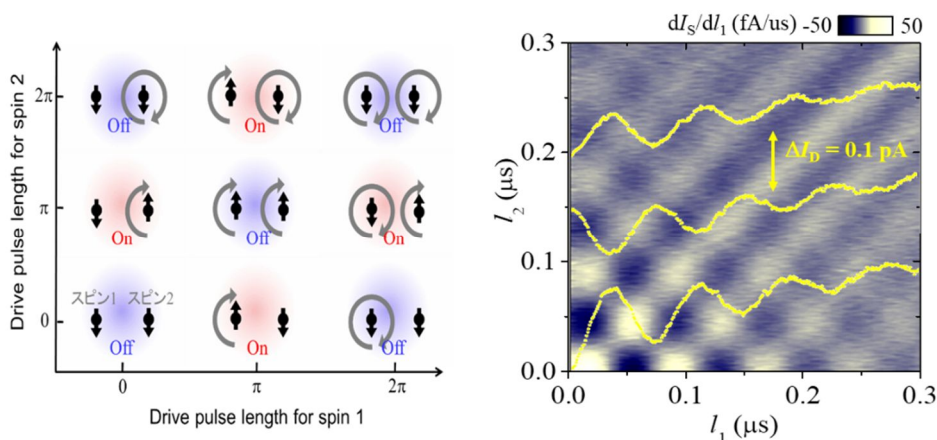


図 4 2つ量子ビットを独立にスピン操作したことを示す電流特性

図 4(a)は 2 つのマイクロ波パルス長に対し、スピン状態と素子の ON/OFF 状態の変化を模式的に示した図である。また図 4(b)は測定で得られた素子の ON/OFF を示す電流量の変化を濃淡表示したものである。実験で得られたチェッカーパターンは、2 つの量子ビットがそれぞれに独立して操作されたことを示している。本研究成果は、ビット間の相互作用の確認実験に必要な測定系が構築できたことを示すものであり、現在論文を準備中である。本成果は理化学研究所の測定システムを用いて実施した。

#### (5) 4 スピンの電子スピン共鳴

量子ビット近傍に複数のスピンが存在する系において電流検出法による電子スピン共鳴の観測を行った。スピン結合機能を担うスピン鎖形成の実証の足がかりとなる物理現象を観測したものとして意義がある。素子は従来の Al-N 不純物により IET を導入した TFET において、素子チャネル部分にも B を導入したものである。この素子においては IET と、B からなる 2 重量子ドットによりスピン量子ビットが形成される。B の濃度は IET 濃度よりも大きいので従来の 2 重量子ドットよりも複雑な結合をもつ多重量子ドット系が形成されやすい。図 5(a)、(b)はそのような 4 重ドットの例である。これら 4 重量子ドット系においては、2 重ドットのスピン閉鎖と同様に、4 つのスピンすべての方向が揃った状態で電流閉鎖がおり、全スピン状態が確定する。この状態からスピン閉鎖を解除するには 4 つのスピンのうちのどれか 1 つを電子スピン共鳴により反転すればよい。この結果、最大で 4 つの電子スピン共鳴線が現れることになる。図 5(c)は上記素子の 1 つで得られた電子スピン共鳴特性で 4 つ共鳴線が観測された結果を示している。図 5(b)は 2 重量子ドットと 2 電子スピンと小規模スピン鎖との結合系とみなすことができる。このような量子ビットとスピン鎖結合系、さらにはより大規模なスピン鎖との結合系を研究することは、大規模スピン鎖を介した量子ビット間の長距離結合の実現につながるものと考えられる。本研究成果に関しては、現在論文投稿を準備中である。本成果は理化学研究所の測定システムを用いて実施した。

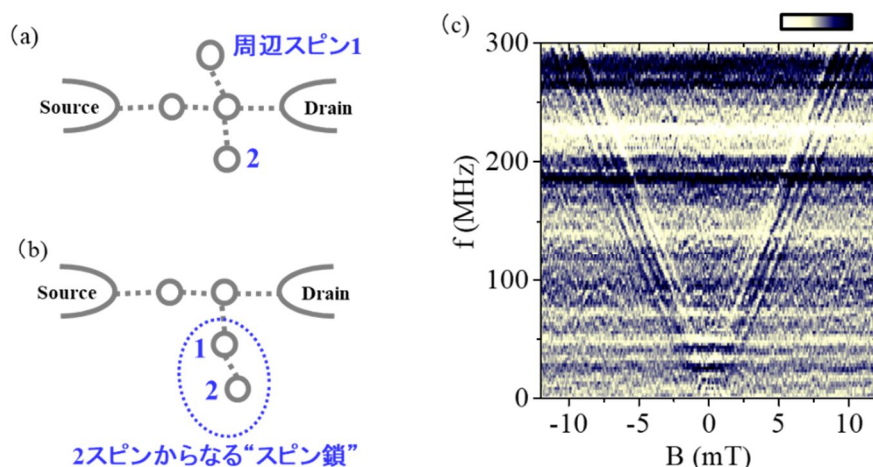


図 5 4 つのスピンの結合した電子スピン共鳴特性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 森貴洋, 樽茶清悟	4. 巻 85
2. 論文標題 シリコン量子ビット素子の研究動向	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 1052-1056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2493/jjspe.85.1052	査読の有無 無
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. Ono, S. N. Shevchenko, T. Mori, S. Moriyama, and F. Nori	4. 巻 122
2. 論文標題 Quantum Interferometry with a g-Factor-Tunable Spin Qubit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 207703-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.207703	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. Ono, T. Mori, and S. Moriyama	4. 巻 9
2. 論文標題 High-temperature operation of a silicon qubit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 469-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-36476-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 -
1. 著者名 Mori Takahiro, Morita Yukinori, Matsukawa Takashi	4. 巻 8
2. 論文標題 Effect of post-implantation annealing on Al-N isoelectronic trap formation in silicon: Al-N pair formation and defect recovery mechanisms	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 055024 ~ 055024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5030795	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24件（うち招待講演 14件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 森貴洋
2. 発表標題 シリコン量子コンピュータの研究開発動向
3. 学会等名 第67回応用物理学会春期学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hidehiro Asai, Shota Iizuka, Junichi Hattori, Tsutomu Ikegami, Koichi Fukuda, and Takahiro Mori
2. 発表標題 Development of simulator for silicon quantum dot devices based on technology computer aided design (TCAD)
3. 学会等名 APS March Meeting（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森貴洋
2. 発表標題 シリコン量子コンピュータの研究開発動向
3. 学会等名 非ノイマン型情報処理へ向けたデバイス技術分科会（一般社団法人電子情報産業協会）（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Moriyama
2. 発表標題 Spin qubits based on silicon tunnel field-effect transistors
3. 学会等名 Topical Conference on Quantum Computing 2019（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Oka, Takashi Matsukawa, and Takahiro Mori
2. 発表標題 Cryogenic Characterization of Low-frequency Noise in Silicon CMOS Transistors
3. 学会等名 Topical Conference on Quantum Computing 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hidehiro Asai, Shota Iizuka, Junichi Hattori, Koichi Fukuda, and Takahiro Mori
2. 発表標題 Development of Simulation System for Semiconductor Qubit Design based on Technology Computer Aided Design
3. 学会等名 Topical Conference on Quantum Computing 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Shevchenko, K. Ono, T. Mori, S. Moriyama, and F. Nori
2. 発表標題 A single spin-1/2 as a “heat engine” exhibiting quantum interferometry
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and Photonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ono, T. Mori, S. Moriyama, S. Shevchenko, and F. Nori
2. 発表標題 A high-temperature silicon qubit and its quantum interference
3. 学会等名 2019 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 S. Moriyama, T. Mori, and K. Ono
2. 発表標題 Spin Qubits in Silicon Tunnel Field-Effect Transistors
3. 学会等名 World Materials Research Institute Forum 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森貴洋
2. 発表標題 シリコン量子コンピュータの研究開発動向
3. 学会等名 研究産業技術懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森貴洋
2. 発表標題 集積化に適したシリコン量子ビット素子の開発
3. 学会等名 新世代コンピューティングシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大野圭司、森貴洋、森山悟士
2. 発表標題 スピントラップ状態にある2つのスピンのラビ振動とその相関
3. 学会等名 2018年日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ono
2. 発表標題 A high-temperature silicon qubit and its quantum interference
3. 学会等名 The 2nd Symposium for World Leading Research Centers Materials Science and Spintronics (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ono
2. 発表標題 A high-temperature silicon qubit and its quantum interference
3. 学会等名 RIKEN-Berkeley workshop on Quantum Information Science (RB19) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ono
2. 発表標題 Quantum interference of energy-modulated spin qubit
3. 学会等名 International Workshop on Hybrid Quantum Systems (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森貴洋、浅井栄大、松川貴
2. 発表標題 等電子トラップ技術によるシリコントンネルFETの機能開拓：ロジックLSIおよび量子計算機への展開
3. 学会等名 理研 - 産総研 第三回 量子技術イノベーションコアワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森貴洋、大野圭司
2. 発表標題 トンネルトランジスタを利用した高温動作量子ビットの開発
3. 学会等名 理研 - 産総研 第三回 量子技術イノベーションコアワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森貴洋、大野圭司
2. 発表標題 シリコン技術による室温動作量子計算機への挑戦
3. 学会等名 理化学研究所・産業技術総合研究所 合同シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森貴洋、森山悟士、松川貴、安田哲二、大野圭司
2. 発表標題 シリコントンネルトランジスタのスピン量子ビット応用
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Moriyama, Takahiro Mori, Keiji Ohno
2. 発表標題 Quantum-dot Transport via Deep levels in Silicon Tunnel Field-effect Transistors (TFETs)
3. 学会等名 29th International Conference on Defects in Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoshi Moriyama, Takahiro Mori, Keiji Ohno
2. 発表標題 Quantum dots and spin qubits based on silicon tunnel field-effect transistors
3. 学会等名 2017 Workshop in Innovative Nanoscale Devices and Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大野圭司
2. 発表標題 最近の半導体量子ドット・スピン量子ビット研究を理解するための基礎知識
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会 (岩手大学、岩手県盛岡市) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keiji Ohno
2. 発表標題 Toward high operation temperature of spin qubits in silicon tunnel field-effect transistor
3. 学会等名 Low-Dimensional Science workshop 2017 (National Chung Hsing University, Taichung) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大野圭司
2. 発表標題 シリコン量子系のスピン制御、シンポジウムハイブリッド量子系における電磁界制御
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋期学術講演会 (福岡国際会議場、福岡県福岡市) (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 森貴洋 (分担執筆)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 (株)情報機構	5. 総ページ数 263
3. 書名 量子コンピュータ/イジング型コンピュータの研究開発最前線	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Takahiro MORI, AIST  <a href="https://staff.aist.go.jp/mori-takahiro/">https://staff.aist.go.jp/mori-takahiro/</a></p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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	大野 圭司  (Keiji Ono)  (00302802)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員   (82401)	
研究分担者	森山 悟士  (Satoshi Moriyama)  (00415324)	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・主任研究員   (82108)	
研究分担者	伊藤 公平  (Kouhei Ito)  (30276414)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授   (32612)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	森 貴洋  (Takahiro Mori)  (70443041)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・ 製造領域・主任研究員   (82626)	
連携 研究者	中山 隆史  (Nakayama Takashi)  (70189075)	千葉大学・大学院理学研究科・教授   (12501)	
連携 研究者	川畑 史郎  (Kawabata Shiro)  (30356852)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・ 製造領域・研究グループ長   (82626)	