

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14078

研究課題名(和文)半導体量子ドットスピン量子ビットにおける高忠実度2量子ビットゲートの実装

研究課題名(英文)High-fidelity two-qubit gates for semiconductor quantum-dot spin qubits

研究代表者

武田 健太 (Takeda, Kenta)

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

研究者番号：80755877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：半導体量子ドットを用いたスピン量子ビットでは、これまでに十分高い精度(忠実度99.9%程度)の1量子ビット制御が実現されている。量子計算を行うためには、これに加えて2量子ビット操作を高い精度で実装する必要がある。そこで、本研究ではスピン量子ビットにおける2量子ビット制御の実装、評価を行った。2量子ビット制御のためには、2スピン間の交換相互作用を用いる。交換相互作用が電氣的雑音に対して鈍感になるよう試料構造、制御方法を改良して2スピン状態(1重項-3重項スピン状態)の操作を実装した。ランダム化ベンチマーキングと呼ばれる評価方法を用いて、99.6%の精度でスピン操作ができていることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子コンピュータは、量子力学的重ね合わせ状態を用いた超並列計算を可能とする次世代のコンピュータである。量子コンピュータの基本単位である量子ビットの物理的実装のために様々な系が研究されている。シリコンを用いた量子ドットは、半導体製造技術を適用した集積可能性から、有力な量子ビット系として考えられている。本研究では、2つのシリコン量子ドット中に閉じ込めた2電子状態を用いた量子ビットを実装した。量子ドットのパラメータを最適化することで、電氣的雑音が量子ビットの情報保持時間(コヒーレンス時間)に与える影響を小さくし、十分高精度に量子ビットの操作が可能となることを示した。

研究成果の概要(英文)：Recent technical advances have enabled high-fidelity single-qubit gates (fidelity > 99.9%) for semiconductor quantum-dot spin qubits. In addition, to perform universal quantum operations, a two-qubit entangling gate is necessary. In this study, we perform implementation and characterization of two-spin control using a double-quantum-dot spin qubit. In order to control the two-spin state, it is necessary to utilize the exchange interaction between two spins. Unlike the single spin state that is only sensitive to the magnetic noise, the exchange interaction is sensitive to the electrical charge noise commonly present in the semiconductor material. Therefore, we designed our device and control scheme so that the exchange interaction becomes less sensitive to the charge noise in order to implement a high-fidelity spin control. We perform a randomized benchmarking measurement to evaluate the control fidelity of the singlet-triplet spin states and obtain a control fidelity of 99.6%.

研究分野：半導体物理

キーワード：量子ドット 量子ビット

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

量子コンピュータ開発のための様々な系が研究されているが、その中でも半導体を用いたものは、半導体製造技術を用いた将来的な集積性の面から有望であると考えられている。半導体量子ドットを用いたスピン量子ビットでは、これまでに十分高い精度(忠実度 99.9%程度)の1量子ビット制御が実現されている。量子計算を行うためには、これに加えて2量子ビット操作を高い精度で実装する必要がある。2スピンの操作では、単一スピンの場合とは異なり、電気的雑音の影響が操作精度に大きく影響を与えることが知られている。高精度の2量子ビット操作を実現するためには、デバイス構造、制御方法などの改善によって電気的雑音の影響を低減することが重要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、半導体量子ドット中の2つの電子スピンを用いた量子ビットについて、2量子ビット操作を高精度(高忠実度)で実装することを目的とする。2量子ビット操作を実装するためには、2スピン間の相互作用である交換相互作用を利用する。交換相互作用は電気的に容易に制御できる反面、電気的雑音によってその大きさが変動してしまうため、電気的雑音による量子ビット状態への擾乱の原因となる。この効果は、交換相互作用が電気的雑音に対して影響を受けづらいような量子ドットの制御方法を用いることで低減することができる。ここでは、量子ビットの位相緩和を評価することで、電気的雑音の影響が量子ドットの動作条件によってどのように変化するかを調べる。それにより、動作条件を最適化し、高精度な量子ビット操作を可能とすることも目的とする。

### 3. 研究の方法

図1(a)は、本研究で用いたシリコン量子ドットの電子顕微鏡写真である。Si/SiGe ヘテロ構造基板上に複数の微細ゲート電極が作製されている。微細ゲート電極は3層のアルミニウムが積層された構造になっており、互いに数nmの自然酸化膜で絶縁されている。各ゲート電極に適切に電圧を印加することによって、P1およびP2ゲート電極の直下に単一電子を電解誘起し量子ドットを形成することができる(図1(b))。ここでは、それぞれの電子の持つスピン状態を用いて量子ビットを実装する。

試料は、熱揺らぎの影響を低減するため、希釈冷凍機を用いて電子温度 40mK 程度に冷却した。また、スピンのゼーマン分裂が電子温度よりも十分大きくなるように、超電導磁石を用いて 0.5T 程度の外部磁場を印加した。ゲート電極には、量子ドット形成のための DC 電圧を印加するとともに、量子ビット操作のため高周波パルス電圧を印加する必要がある。そのため、ゲート電極は 50 の同軸ケーブルを用いて室温部に接続されている。高周波パルス電圧は、1GSa/sec で動作する任意波形発生器によって生成した。

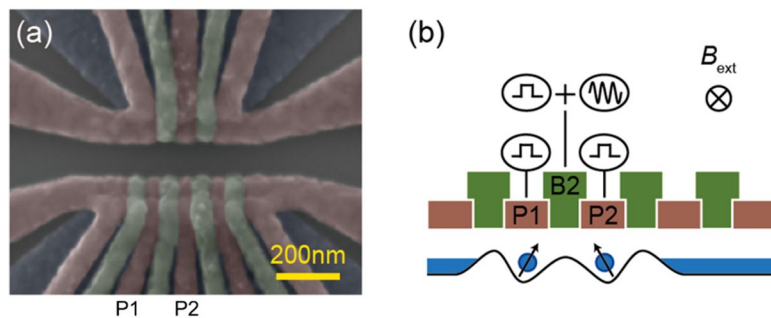


図1 (a)量子ドット試料の電子顕微鏡写真。赤色および緑色の電極に印加する電圧を制御することで、量子ドットを形成することができる。青色の電極は、赤色および緑色の電極の電場を遮蔽し、先端部分のみに制限するためのものである。下側の構造が量子ドットを形成するために用いられ、上側の構造は電荷計を形成するために用いられた。(b)ゲート電極の断面図。P1 および P2 ゲート電極先端直下に2重量子ドットを形成する。外部磁場は Si/SiGe ヘテロ構造に対して面内方向に印加した。

### 4. 研究成果

図2(a)は量子ドット近傍にある電荷計を用いて量子ドット形成を確認した結果である。図示されているのは電荷安定状態図と呼ばれるもので、線のところで量子ドット内の電子数が1個変化する。図中にある数字( $n_1, n_2$ )は、それぞれ量子ドット1に電子が $n_1$ 個、量子ドット2に電子が $n_2$ 個あることを示す。(0,0)状態から1個ずつ数えていくことで、電子が各量子ドットに1個ずつ閉じ込められた状態を確認できる。

続いて、2電子状態((1,1)状態)を用いて量子ビットを実装する。本研究では、交換相互作用を

用いた2スピン操作の研究を行うため、交換相互作用の影響がある状態である、 $S_z = 0$ の2つのスピン状態( $|\downarrow\uparrow\rangle$ と $|\uparrow\downarrow\rangle$ )、前者は左側のドットのスピンの向きが下向き、右側のドットのスピンの向きが上向きの状態、後者はその逆)に着目した。試料近傍の磁場勾配による各量子ドット間のゼーマンエネルギーの差 $\delta E_z$ および、スピン交換相互作用 $J$ に対して、この2準位系のハミルトニアン $H$ は以下のようなになる。

$$H = (\delta E_z)\sigma_z + J\sigma_x,$$

ここで $\sigma_i$ はパウリ行列である。

このハミルトニアンの固有値から、量子ビットのエネルギー分裂は、 $E = \sqrt{(\delta E_z)^2 + J^2}$ となる。 $J$ に変調を与えると、量子化軸に直交した成分のエネルギー変調を与えることができるので、変調周波数を $f_{\text{RF}} = \sqrt{(\delta E_z)^2 + J_0^2}/h$ ( $h$ はプランク定数、 $J_0$ は $J$ のDC成分)とすれば、通常のスピン共鳴と同様にして共鳴的に量子状態を制御することができる。図3(a)はそのような測定を行った結果で、共鳴周波数 $f_{\text{RF}} = 351$  MHz付近で共鳴となり、明瞭なラビ振動を得ることができた。ラビ振動の減衰時間は5マイクロ秒程度と、ラビ周波数に比べて十分長いことがわかった(図3(b))。これによって、高精度なスピン操作ができることが期待される。

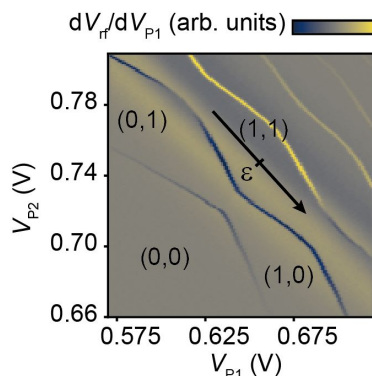


図2 電荷安定状態図。電荷計の信号 $V_{\text{rf}}$ をP1ゲート電圧 $V_{P1}$ で数値微分したものがプロットされている。傾きの異なる2種類の線が、P1およびP2ゲート電極の直下に形成された量子ドットの電子数変化を表す。

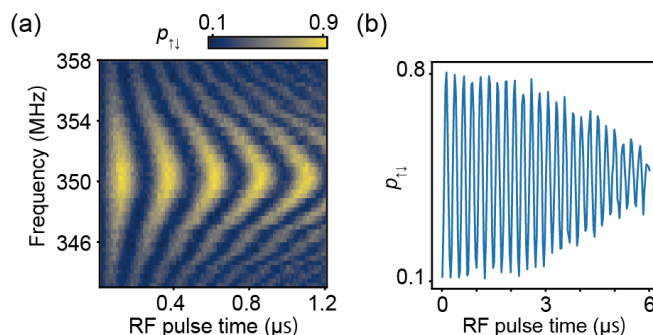


図3 (a) ラビ振動の周波数依存性(chvron pattern)。 $p_{\downarrow\uparrow}$ は $|\downarrow\uparrow\rangle$ 状態の検出確率を表す。(b)共鳴条件( $f_{\text{RF}} = 351$  MHz)におけるラビ振動。これより $1/e$ 減衰時間がおおよそ5マイクロ秒程度であることがわかる。ラビ周波数は4MHz程度である。

続いて、位相緩和の量子ドットパラメータ条件依存性について調査した。通常、 $J$ が十分大きいときには、 $\delta E_z$ の揺らぎは $J$ の揺らぎより十分小さいため、量子ビットの位相緩和を抑制するためには、 $J$ の揺らぎを抑制すればよいことになる。スピン交換相互作用 $J$ は、単純な2サイトハバード模型によると、各量子ドット間のエネルギー離調 $\epsilon$ 、量子ドット間のトンネル結合 $t_c$ に対して、 $J(\epsilon, t_c) = t_c^2 / (E_c + \epsilon) + t_c^2 / (E_c - \epsilon)$ となる。ここで $E_c$ は量子ドットの帯電エネルギーで、簡単のため、それぞれ量子ドットで同じであると仮定した。異なるとしても以下の議論に大きな影響はない。 $J$ の揺らぎを抑制するためには、これら2つのパラメータに対して、 $J$ の変化量が小さくなるようにする必要がある。実験的には、 $J$ の値を一定にとった場合、 $|dj/d\epsilon| \gg |dj/dt_c|$ であることが知られているので、ここでは $|dj/d\epsilon|$ について考えることにする。単純な計算により、 $|dj/d\epsilon| = 0$ で最小となり、位相緩和が最も抑制されることが分かる。また、 $\epsilon$ が大きくなるにつれて、 $|dj/d\epsilon|$ が大きくなり、位相緩和時間が短くなると考えられる。そこで、ラムゼー干渉法を用いて、集団位相緩和時間 $T_2^*$ を様々な $\epsilon$ に対して評価した(図4)。予想された通り、 $\epsilon = 0$ に近いところで $T_2^*$ が最大となることがわかった。つまり、コヒーレンスの観点からは $\epsilon = 0$ 付近が最適条件ということになる。しかしながら、 $\epsilon = 0$ では、 $J$ の制御性( $dj/dV_{B2} \sim (dj/dt_c)(dt_c/dV_{B2})$ )、つまり量子ビットの操作速度も最小化されてしまう。そのため、実際の最適動作点は、 $T_2^*$ が大きく影響を受けない範囲で、 $|\epsilon|$ が最も大きいところとなる。ここでは、量子ビットの最適動作点と

して、 $\varepsilon = 20$  mVを選んだ。この動作点では、 $T_2^* = 1.2$   $\mu\text{s}$ と十分長いながら、 $\varepsilon \sim 0$ における操作に比べて4倍程度高速に量子ビットの操作が可能である。また、図3(a)、(b)の測定はこの条件で行われた。

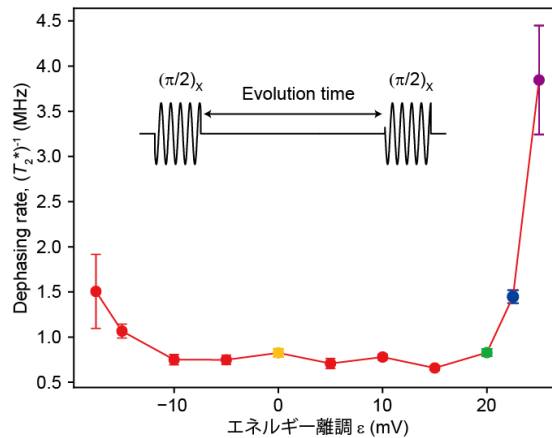


図4 位相緩和レート $1/T_2^*$ のエネルギー離調 $\varepsilon$ 依存性の測定結果。挿入図は、ラムゼー干渉の実験の模式図である。 $\varepsilon = 0$ 付近では、位相緩和レートはほぼ一定値となっており、量子ドットの条件に大きく依存しないことが分かる。これは、位相緩和が主にシリコン中の $^{29}\text{Si}$ 核スピンの磁氣的揺らぎによって制限されているためである。

最後に、量子ビット操作の精度（忠実度）を正確に評価するため、ランダム化ベンチマーキングと呼ばれる測定を行った。この測定では、ランダムに選ばれたクリフォード操作と呼ばれる操作を組み合わせることによって、様々な入力状態に対する量子ビットの平均的な操作精度を評価することができる。また、クリフォード操作回数を変化させて、その回数に対する信号の減衰のみを評価するため、測定の忠実度やスピンの初期化精度による影響を受けづらい利点がある。図5は、ランダム化ベンチマーキングの測定結果である。横軸がクリフォード操作の回数 $m$ で、縦軸がシーケンス忠実度 $F(m)$ である。 $F(m)$ の1クリフォード操作あたりの減衰量から、量子ビットの操作忠実度99.6%を得た。これは、現時点で半導体量子ドット中の2スピン操作の忠実度としては最高の値である。

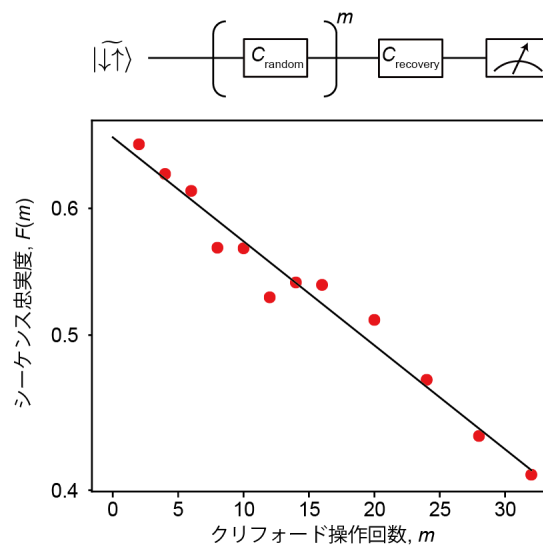


図5 ランダム化ベンチマーキングの測定結果。赤い点が測定結果で、黒線が指数的減衰関数 $F(m) = Vp_c^m$ によるフィッティング結果である。 $V$ はvisibilityであり、測定や初期化の忠実度を反映する。1操作あたりの $F(m)$ の減衰量 $p_c$ から、量子ビットの操作忠実度を求めることができる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 K. Takeda, J. Yoneda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh, S. Oda, T. Koderu and S. Tarucha	4. 巻 4
2. 論文標題 Optimized electrical control of a Si/SiGe spin qubit in the presence of an induced frequency shift	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41534-018-0105-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 Jun Yoneda, Kenta Takeda, Tomohiro Otsuka, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Giles Allison, Takumu Honda, Tetsuo Koderu, Shunri Oda, Yusuke Hoshi, Noritaka Usami, Kohei M. Itoh, and Seigo Tarucha	4. 巻 13
2. 論文標題 A quantum-dot spin qubit with coherence limited by charge noise and fidelity higher than 99.9%	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 102-106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41565-017-0014-x	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 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 1-5
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 Yoneda J., Takeda K., Noiri A., Nakajima T., Li S., Kamioka J., Koderu 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 1-7
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 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 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 K. Takeda, J. Yoneda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, A. Noiri, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh, S. Oda, T. Kodera and S. Tarucha
2. 発表標題 Control fidelities in isotopically natural and enriched silicon quantum dot qubits
3. 学会等名 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Takeda, J. Yoneda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, A. Noiri, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh, S. Oda, T. Kodera and S. Tarucha
2. 発表標題 Control fidelities in isotopically natural and enriched silicon quantum dot qubits
3. 学会等名 8TH SUMMER SCHOOL ON SEMICONDUCTOR/SUPERCONDUCTOR QUANTUM COHERENCE EFFECT AND QUANTUM INFORMATION
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenta Takeda, Jun Yoneda, Tomohiro Otsuka, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Giles Allison, Jun Kamioka, Takumu Honda, Tetsuo Kodera, Shunri Oda, Yusuke Hoshi, Noritaka Usami, Kohei M. Itoh, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Microwave induced frequency shift and its quadrature compensation for Si/SiGe spin qubits
3. 学会等名 Silicon quantum electronics workshop 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenta Takeda, Akito Noiri, Jun Yoneda, Takashi Nakajima, 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 Kenta Takeda, Akito Noiri, Jun Yoneda, Takashi Nakajima, Takashi Kobayashi, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Coherent manipulation of three-spin states in a Si/SiGe triple quantum dot
3. 学会等名 APS March meeting 2020
4. 発表年 2020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