

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14485

研究課題名（和文）シリコン電子スピン量子ビットの高精度トンネル輸送技術の確立

研究課題名（英文）High-precision tunneling transport of silicon electron spin qubits

研究代表者

米田 淳（Yoneda, Jun）

東京工業大学・超スマート社会卓越教育院・特任准教授

研究者番号：60734366

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）：本研究課題では、量子コンピュータへの応用が期待されるシリコンスピン量子ビットを、位相コヒーレントにトンネル輸送する研究に取り組んだ。トンネル結合を大きく調整することで非断熱トンネルの影響を抑制し、高忠実度での位相コヒーレントなトンネルが可能であることを実証した。さらに、トンネル領域における電子スピンの位相コヒーレンスの理解、トンネル結合の雑音スペクトル推定、電荷雑音源を特徴づける活性化エネルギーの評価など、シリコン電子スピンの位相コヒーレントなトンネル輸送技術の確立に資する成果を得た。

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ビットは、制御性と量子コヒーレンスに優れ、集積回路技術と親和性が高いことから、量子コンピュータへの応用が期待されている。本研究課題では、位相コヒーレンスを保ったままこの量子ビットをトンネル輸送する技術の確立と、シリコン量子コンピュータにおける将来的な活用につながる成果を得た。このようなトンネル輸送技術の活用によって、シリコン量子アーキテクチャの結合性や設計自由度の大幅な向上が見込まれ、将来的なシリコン量子ビットの集積化に革新をもたらす技術となりうる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we focused on studying the coherent tunneling of electron spins in silicon quantum dots, a promising qubit platform for quantum computers. We demonstrated the feasibility of phase-coherent tunneling with high fidelity by enhancing the tunnel coupling between quantum dots and hence suppressing the effects of non-adiabatic tunneling. Furthermore, by understanding the phase coherence of electron spins in the tunneling region, estimating the noise spectrum of tunnel coupling based on measurements of spin exchange coupling fluctuations, and evaluating the activation energy characterizing the charge noise source, we have made progress in establishing phase-coherent tunneling of silicon spin qubits.

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：量子ビット 量子ドット 単スピン トンネル効果

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

大規模な量子コンピュータを実装する系として、シリコン量子ドットは、とりわけ集積回路技術との親和性の観点から期待されている。優れたコヒーレンスを示す電子スピンを量子ビットに応用する研究が、急速に進展してきた。高忠実度量子ビット操作や量子非破壊読み出しといった量子ビット単体の性能検証を経て、研究フェーズは次第にデバイスの集積化に移行しつつ、さらなる盛り上がりを見せている。

### 2. 研究の目的

量子ビットの集積化に際して重要となる指標に、量子もつれ操作が可能な量子ビットの組み合わせを表す結合性があげられる。シリコン量子ビットの結合性を向上する有力な手法のひとつが、量子ドット列をつたって量子ビットをトンネル輸送する方法である。この際の電子の輸送は、スピン量子コヒーレンスを保ったまま行う必要がある。そこで本研究では、トンネル過程がシリコン量子ドット中の電子スピんに与える影響を理解し、高精度なトンネル輸送の実現方法、達成可能な精度等について知見を確立することを目的とした。

### 3. 研究の方法

量子コヒーレンスと操作性にすぐれたシリコン量子ドットを用いて、トンネル過程が電子スピン状態に与える影響を高精度で測定、解析した。量子ドット試料の電極に電圧パルスを印加することで、量子ドット間のトンネル遷移を制御できる。これと電子スピン状態操作を組み合わせ、トンネル過程が電子スピンの位相コヒーレンスや量子状態に与える影響を評価した。さらに、電荷雑音がトンネル領域で電子スピんに与える影響を議論するため、量子ドットの輸送電流を実時間測定し、電流ゆらぎをポテンシャルゆらぎに換算して、量子ドット試料の電荷雑音を評価した。

### 4. 研究成果

ラムゼー干渉法とトンネル過程を組み合わせた実験から、トンネル領域における量子ビット周波数の電極電圧依存性を評価し、電子スピンの位相コヒーレンスを詳細に調べた(図1)。トンネル共鳴条件からのデチューニングに対する位相コヒーレンスの喪失レート依存性は、量子ドットデバイスに働く  $1/f$  の電荷雑音と、電子スピンの歳差周波数の電荷雑音感度を考慮することでおよそ説明できることが分かった。

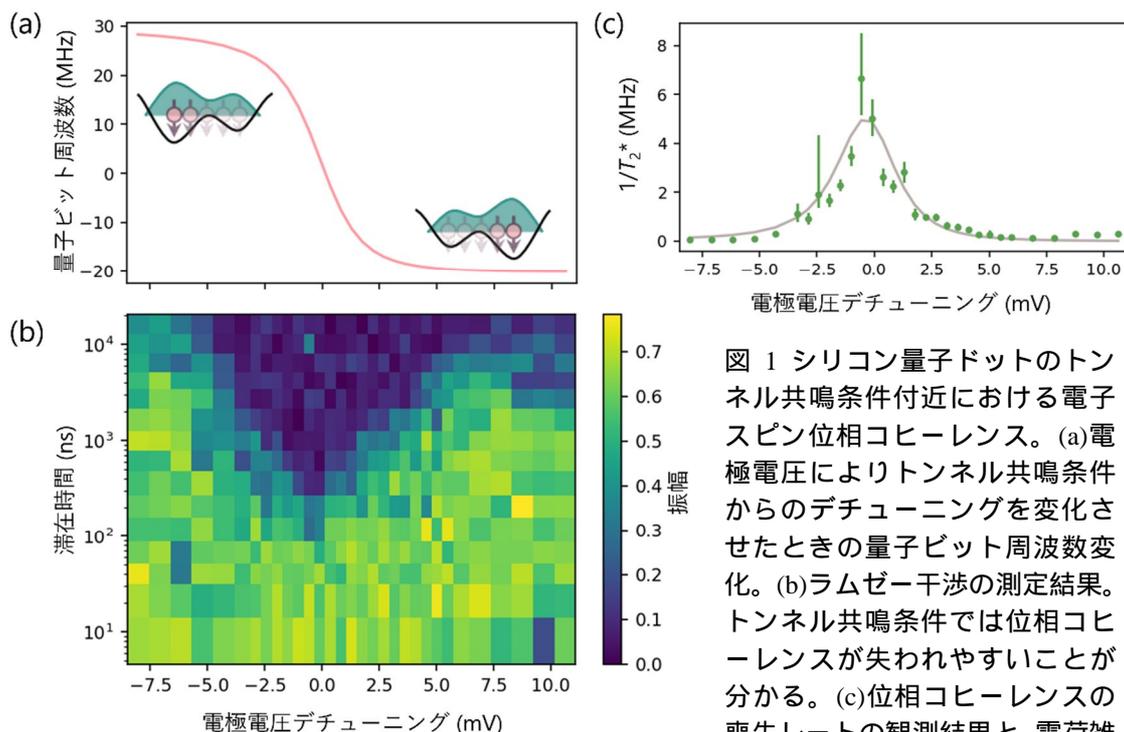


図1 シリコン量子ドットのトンネル共鳴条件付近における電子スピン位相コヒーレンス。(a)電極電圧によりトンネル共鳴条件からのデチューニングを変化させたときの量子ビット周波数変化。(b)ラムゼー干渉の測定結果。トンネル共鳴条件では位相コヒーレンスが失われやすいことが分かる。(c)位相コヒーレンスの喪失レートの観測結果と、電荷雑音の影響を予測した結果の比較。

トンネル輸送を制御する電極電圧パルスの掃引時間を变化させた際のコヒーレンス喪失率を詳細に解析したところ、量子ドット間のトンネル結合を 100 GHz 程度と大きくすると、エラー率が電圧パルス掃引時間に指数関数的に依存するような非断熱トンネルの影響が抑制できていることが分かった。トンネル過程におけるスピン偏極成分の喪失率は、位相コヒーレンスの喪失率と比べて小さい。位相コヒーレンスの喪失率のうち電圧パルス掃引時間に比例する成分が存在し、この原因として電荷雑音の影響が考えられる。量子状態トモグラフィーをもちいた測定から、トンネル過程の前後で電子スピンの量子状態がよく保たれたトンネルが実現できており、その忠実度はトンネル過程の反復によるエラー増幅とスピンの位相コヒーレンス測定を組み合わせた実験から、99.4%と見積もられる。これらの成果で、シリコン量子ビットの高精度なトンネル輸送が可能であることが実証された。

電荷雑音がトンネル結合そのものに与える影響についても実験的に明らかにすることができた。隣接する量子ドット間でエネルギー準位が揃った対称動作点において、スピン交換結合  $J$  の雑音はトンネル結合の雑音を反映するようになる。そこで対称動作点で  $J$  の揺らぎを実時間測定し、その雑音スペクトル密度とハバード模型を用いてトンネル結合の雑音スペクトル密度を推定した。700 MHz 程度のトンネル結合では、1 Hz における雑音スペクトル密度は  $0.5 \text{ neV}^2/\text{Hz}$  程度であることが分かった。これは同一試料で測定されたデチューニングの雑音スペクトル密度に比べて、5 桁以上小さい値である。

トンネル輸送に影響するシリコン量子ドットの電荷雑音についてさらなる知見を得るため、その温度依存性の詳細な測定を行い、電荷雑音源を特徴づける活性化エネルギーを算出するなどした(図 2)。加えて、電子スピンの位相コヒーレンスやトンネル輸送実験に対して、電荷雑音やクロストークが与える影響を低減する方法を見出した。さらに、高い精度で量子状態を保存したトンネル過程を量子ビットアレイ構造で活用する方法に関して、具体的な検討、提案を行った(図 3)。シリコン量子ビットアーキテクチャの結合性や設計自由度向上につながる成果といえる。

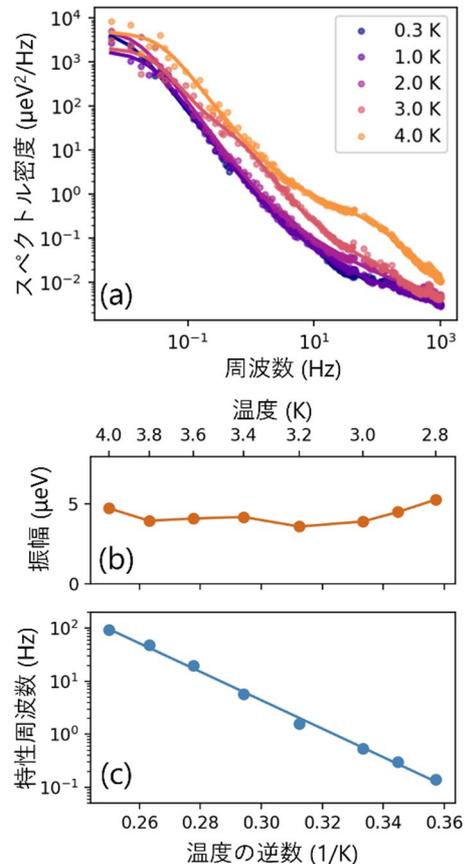


図 2 (a)シリコン量子ドットの電荷雑音の温度依存性。ポテンシャル揺らぎのパワースペクトル密度を評価している。(b),(c) 電荷雑音源のうち特定の二準位系のポテンシャルゆらぎの振幅(b)と特性周波数(c)の温度依存性。振幅はおよそ一定であるが、特性周波数は強い温度依存性を示す。

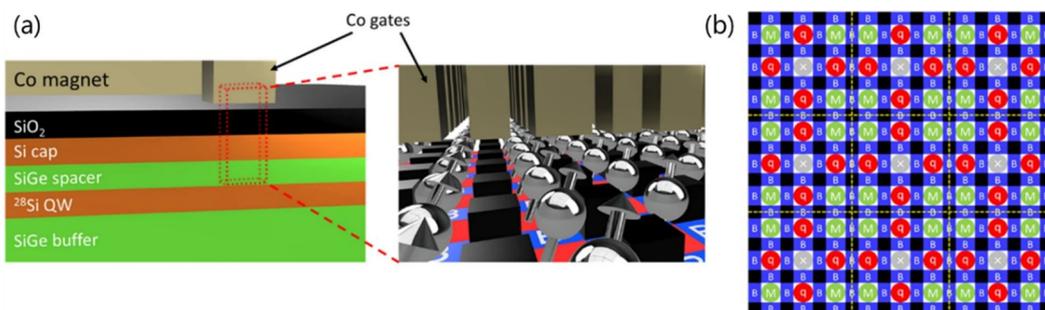


図 3 トンネル輸送技術を利用したシリコン量子ビット集積構造の例。(a)二次元量子ドットアレイの試料構造例。微小磁石電極が量子ビット操作に必要な局所磁場を発生させる。(b)二次元量子ドット配列における量子ビット(q)および補助量子ビット(M)の配置例。補助量子ビットは量子ビットの初期化および読み出しに用いる。×印の量子ドットには量子ビットが存在しない。量子ビットのトンネル輸送を利用し、隣接しない量子ビット同士を量子的に結合させることで、アレイ全体を集積された量子ビット系として動作させる。

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 1件/うちオープンアクセス 5件）

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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masahiro Tadokoro, Takashi Nakajima, Takashi Kobayashi, Kenta Takeda, Akito Noiri, Kaito Tomari, Jun Yoneda, Seigo Tarucha and Tetsuo Koderá	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 19406-1-7
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 J. Yoneda, W. Huang, M. Feng, C. H. Yang, K. W. Chan, T. Tanttú, W. Gilbert, R. C. C. Leon, F. E. Hudson, K. M. Itoh, A. Morello, S. D. Bartlett, A. Laucht, A. Saraiva and A. S. Dzurak	4. 巻 12
2. 論文標題 Coherent spin qubit transport in silicon	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4114-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-24371-7	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

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 K. Nakagoe, R. Tsuchiya, T. Mine, D. Hisamoto, H. Mizuno, R. Mizokuchi, J. Yoneda, T. Koderá
2. 発表標題 Temperature dependence of charge noise in a pMOS quantum dot
3. 学会等名 2022 Silicon Quantum Electronisc Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中越 一真、荒川 雄登、松岡 竜太郎、土屋 龍太、峰利 之、久元 大、水野 弘之、溝口 来成、米田 淳、小寺 哲夫
2. 発表標題 シリコン量子ドットにおけるデチューニングノイズの特性評価
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroki Takahashi, Shimpei Nishiyama, Sayyid Irsyadul Ibad, Kimihiko Kato, Yongxun Liu, Shigenori Murakami, Takahiro Mori, Raisei Mizokuchi, Jun Yoneda and Tetsuo Kodera
2. 発表標題 Consideration of stabilization methods of a double quantum dot towards long term and stable spin qubit operation
3. 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies (ISNTT) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022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		
オーストラリア	ニューサウスウェールズ大学		