

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13482

研究課題名(和文) 単一電子スピンシャトルを利用した高速スピン操作とその物理の研究

研究課題名(英文) Single-spin resonance enhancement using spin shuttle

研究代表者

藤田 高史 (Fujita, Takafumi)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：00809642

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)：本研究の成果は、スピンシャトル技術を活用して、電場駆動型の電子スピン共鳴を桁違いに増幅させる手法を実証したことである。量子ドット構造を用いて単一電子スピンは通常0次元的に閉じ込められているが、電場を与えることで隣の量子ドットへと確定的に移動させることが可能である。このシャトル技術と、高周波電場が作る有効磁場を組み合わせることで、電子スピン共鳴を起こす実験を行った。結果として、シャトルする状況を利用しない場合と比べて、40倍程度の増幅を確認し、最高速で200MHzのラビ振動を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子ドット様の閉じ込め間を電場を使ってスピンの移動する仕組みを整えられれば、スピン共鳴を増幅できる点から、材料系によらずにスピン共鳴を起こす新たな可能性を実証できた点に意義がある。そして、半導体電子スピンを基盤とする、量子情報ハードウェアの分野に直接貢献する成果である。半導体における量子情報は、メモリーの課題が取り上げられているが、スピン操作の速度を桁違いの増幅することで相対的に利用の幅を広げた。

研究成果の概要(英文)： Single spin shuttling is a technique to move a single electron spin between multiple sites of artificial atoms called quantum dots. There is another technique called electric dipole spin resonance, where an oscillating electric field forces an electron spin resonance if the resulting charge oscillating can produce an effective oscillating magnetic field. In this research, we combined these two techniques to realize a charge oscillation between multiple quantum dots using the same microwave applied for spin resonance, resulting in a largely enhanced charge oscillation thus effective magnetic field. Our achievement is an order of magnitude enhanced Rabi oscillation, which is as fast as 200 MHz and faster than the contemporary single spin manipulation techniques. We predict that this can further increase by using the well-known micromagnet technique.

研究分野：半導体量子ドット

キーワード：電子スピン共鳴 量子ドット スピン軌道相互作用 単一電子スピン 1次元多重量子ドット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

情報担体として磁化を扱うことは、その電気的な安定性において有利であり、その磁化の向きを電気的に制御することは、デバイスの集積化や制御速度の観点から各方面で長い間研究が続いている。磁化の最小単位である電子スピンの関係でも背景は同じであり、量子情報の分野では単一スピンの電気的な制御、つまりラビ振動をいかに精度よく電気的に制御するかが課題となっている。

半導体中で単一電子スピンを 0 次元的に閉じ込めた構造、量子ドットを基礎として、これまで様々なスピン操作の技術が確立されてきた。最も信頼性のある構造は、単一量子ドットの上に微小磁石を載せて、発生する磁場の勾配を利用した人工的なスピン軌道相互作用を活用する方法である。その手法は、スピン共鳴を起こす高周波の電場そのものを使って、電子の波動関数を量子ドットの中で揺らし、磁場勾配を有効磁場として活用し、スピン共鳴に適切な振動磁場を発生させる方法である。

微小磁石を使わない場合にも、半導体の原子配列に起因する、自然に内在するスピン軌道相互作用を活用することはできるが、その有効性は半導体の材料にも依り、デバイス構造を工夫して相互作用そのものを制御することも困難であった。

2. 研究の目的

図 1 の模式図に描いたように、電子が複数の量子ドット間を、行き来するような動きを発生させることで(シャトル) スピン軌道相互作用の効果がその移動距離に応じた、単一量子ドットの場合と比べて桁違いに増幅される原理を実証し、実際に電子スピン回転操作に応用することが目的である。

3. 研究の方法

以下の手法を組み合わせ、研究成果を得てゆく。

(1) 多重量子ドットの形成

トンネル効果を介して結合した量子ドット同士を、図 2 のように横一列に並べることで形成。共同研究者の希釈冷凍機を使い(電子温度 100 mK ~ 200 mK) デバイスを冷却したうえで、各電極に所定の電圧をかける

(2) 単一電荷及び単一電子スピン検出

隣接している電荷検出用の量子ドットを形成する。この量子ドットの伝導は、近傍の単一電荷が作る電場を敏感に感じ取り、単一電荷の違いや、その時間変化を数 10 MHz の帯域で測ることが可能。より高速に精度よく検出を行うために、マイクロ波反射型検出技術を利用している。量子ドット列のスピン検出は、印加した外部磁場に平行であれば伝導しない、反平行であれば電導する、という時間変化を実時間で検出し、多数の測定を統計的に解析する。

(3) スピン共鳴実験

外部磁場によってエネルギー的に分離した電子スピンに対応した周波数 $h = g\mu_B$ を、ドットを形成する電極の一つに印加する。

(4) スピンシャトルを起こす共鳴点の探索

スピンシャトルを共鳴中に起こすためには、ちょうどドット間トンネルが引き起こされる点にドットポテンシャルを調整しなくてはならない。エネルギー図で示すと例えば図 4 の条件になる。成果の項でこの詳細を調べた。

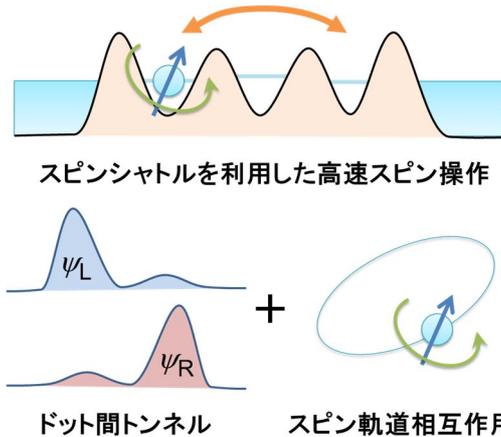


図 1 提案する高速スピン回転の原理。ドット間トンネルの距離に応じた、スピン軌道相互作用の効果が強められる。

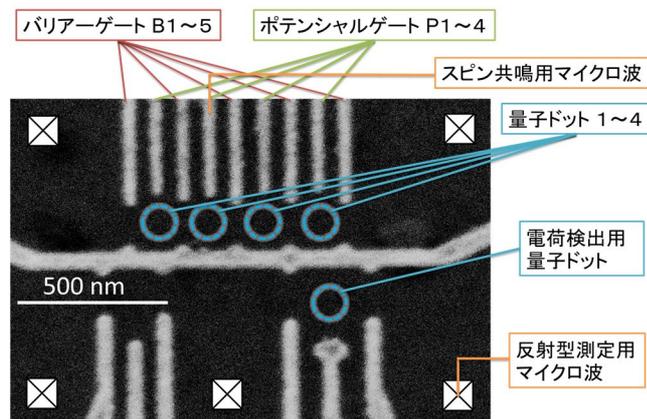


図 2 実際に用いたデバイスと同じ構造の電子顕微鏡写真。

4. 研究成果

(1) 3 重量子ドットにおけるスピン緩和時間短縮の観測

実験として初めて 3 重量子ドットが結合した状態を使って、単一電子スピンの縦緩和時間を単一ショット測定で観測した。単一量子ドットの場合と比べて短い緩和時間は、スピン軌道相互作用の影響が強くなっていることを示唆している。2 重から 3 重へと、探索パラメーターの次元を一つ増やしたスピン検出の展開が期待できる。

(2) トンネル結合力に依存した桁違いの変化の観測

ドット同士の順位が同じエネルギーを持った状態でトンネル結合していると、電子の波動関数は両方のドットにまたがって存在することになり、スピン軌道相互作用の影響がその分大きくなることは 2 重量子ドットで観測されていた。本成果は、これをさらに 3 重ドットに拡張した場合で、実際に相互作用の効果が増大していたことを観測した。結合数を増やすことでさらなる増大の見込みがある。

(3) 結合量子ドットでの電子スピン共鳴の観測

電子スピンを初期化した後、上記の電圧条件へと瞬時に移し、高周波を印加した。印加する周波数を掃引しながら、観測される電子スピンの統計を取ると、スピン共鳴が起こる周波数付近では電子スピンの変化している信号が得られる。これを 3 重量子ドットの条件で実現したことで以下の成果へとつながった。

(4) 共鳴周波数が共鳴点での最小化の観測

スピン軌道相互作用が元々強い系では観測されていたが、今回の GaAs の電子系では顕わに観測されていなかった。比較的弱い相互作用でも、多重量子ドットを活用することで材料に依らず増幅できることの実証となった。

(5) 高周波の強度の最適化による共鳴ピーク幅増大の観測

本研究の主な成果の一つであり、高周波の強度が電子をドット間で有効に移動させる条件として強く影響していることを実証した。高周波を用いながらも、その位相に合わせながら、電子の波動関数を一方のドットからもう一方のドットへと完全に移動させられる条件が最もスピン軌道相互作用を増大させる条件である。共鳴ピークの幅からは、ラビ周波数が大まかに見積もられるため、相互作用を最大化する最適な高周波の条件が得られるという実証になった。

(7) 結合量子ドットにおけるラビ振動の観測

高周波を印加する時間を制御して、時間軸上でスピンの向きを測定すると、ラビ振動を得る実験が可能になる。上記共鳴条件上でこれを適切に行い、コヒーレントな単一電子スピンの時間発展の様子が様々な電圧条件で観測された。スピン制御の精度や横緩和時間などの情報が得られる。

(8) ラビ周波数を抽出して各パラメーターに対する依存性を解析

結合量子ドットで大事なパラメーターが、トンネル結合力とドット間のポテンシャル差である。これらに対する依存性をラビ振動から直接パラメーターを抽出し、網羅的に得られたことは学術的に意義深い。

(9) 200M Hz を超えるラビ振動の実現

図 3 の実験結果に示すように、ドット形成の条件を変えることで 5 MHz から急激にラビ振動数が増大していることが観測され、これまで有効に使われていた 100 MHz 程度のラビ周波数を超える振動を実現した。有効に 3 重ドットの条件が使えているかは議論の余地が残されているが、この結果は、スピンシャトルを利用せずには実現不可能であると考えられるため、本目的の実証が十分達成された成果である。

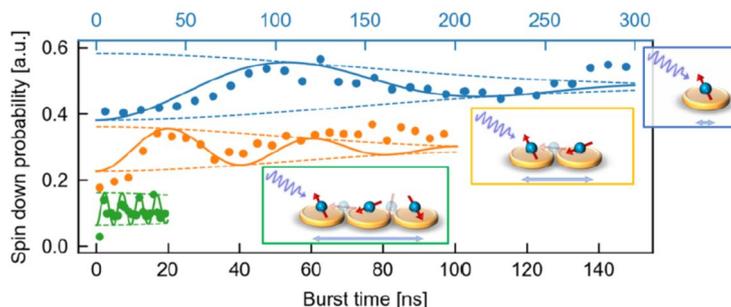


図 3 高速スピン操作の原理実証実験の結果。単一、2 重、3 重量子ドット様の条件ごとに急速に速くなるラビ振動。

(10) 新たな知見としてが、励起準位へのコヒーレントな遷移を示唆する結果を観測

当初想定していた操作は、図4に示したように、基底の準位のみを利用したスピントラップである。この条件を実現するために高周波の周波数や強度が大きすぎるとは、励起準位に遷移してしまうため望ましくない。それだけでなく、予想していたのは電荷の重ね合わせ状態が同時に発生してしまうことで、この状態の緩和時間がスピンに比べて早すぎると考えていたために、確実に回避するべきだということである。

しかし、条件によっては位相情報の喪失だけではなく、ラビ振動が遅くなるという、負の振動数の効果が観測された。負の振動数の効果は、励起準位において電場が逆方向に力を及ぼしていること示唆であり、励起準位が利用できることを示している。これを実際に観測することは予期しておらず、スピントラップの効果で電荷の緩和時間が想定よりも伸びていた可能性がある。将来的には昨今注目され始めた励起準位を利用したトポロジカル非平衡状態の物理への発展が期待される。

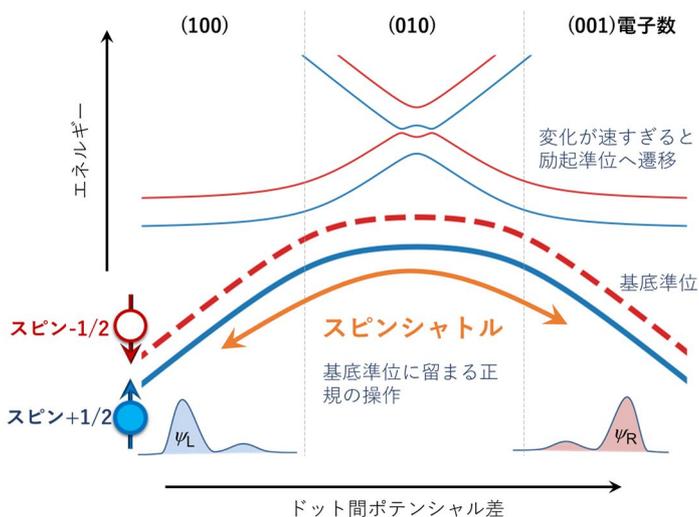


図4 第一目的に関して、高速スピン回転原理の概念図と手法を示すエネルギー図。ドット間トンネルの距離を利用して、スピン軌道相互作用の効果を増幅させる。

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 5件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Volk C., Zwerver A. M. J., Mukhopadhyay U., Eendebak P. T., van Diepen C. J., Dehollain J. P., Hensgens T., Fujita T., Reichl C., Wegscheider W., Vandersypen L. M. K.	4. 巻 5
2. 論文標題 Loading a quantum-dot based "Qubyte" register	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 29-1 - 29-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41534-019-0146-y	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 van Diepen C. J., Eendebak P. T., Buijtenorp B. T., Mukhopadhyay U., Fujita T., Reichl C., Wegscheider W., Vandersypen L. M. K.	4. 巻 113
2. 論文標題 Automated tuning of inter-dot tunnel coupling in double quantum dots	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 033101 ~ 033101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5031034	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 C. Volk, A. M. J. Zwerver, U. Mukhopadhyay, P. T. Eendebak, C. J. van Diepen, J. P. Dehollain, T. Hensgens, T. Fujita, C. Reichl, W. Wegscheider, L. M. K. Vandersypen	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Loading a quantum-dot based "Qubyte" register	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41534-019-0146-y	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10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 T. Fujita, Y. Matsumoto A. Ludwig, A.D. Wieck and A. Oiwa
2. 発表標題 Spin-orbit interaction induced electron spin resonance enhanced by charge tunneling between quantum dots
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Matsumoto, Takafumi Fujita, H. C. Ebler, Alfred Ludwig, Andreas D. Wieck, Akira Oiwa
2. 発表標題 Fast DC Scanning Method for Tuning Quantum Dots
3. 学会等名 The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON21) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田高史, 松本雄太, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, 大岩
2. 発表標題 GaAs系横型量子ドット列中の電子振動を使ったスピン共鳴
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本雄太, 藤田高史, H Ebler, A Ludwig, A Wieck, 大岩顯
2. 発表標題 量子ドット間のトンネルによる単一スピンへのスピン軌道相互作用の影響
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田高史
2. 発表標題 1次元量子ドット配列内の単一電子スピンコヒーレンスの研究
3. 学会等名 第17回低温工学・超電導若手合同講演会
4. 発表年 2018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
研究協力者	大岩 顕 (Oiwa Akira) (10321902)	大阪大学・産業科学研究所・教授 (14401)	