

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25790006

研究課題名(和文)電子波の軌道制御によるスピン量子回路の研究

研究課題名(英文)Control of Electron Wave Orbitals for Quantum Spin Circuits

研究代表者

中島 峻(Nakajima, Takashi)

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・特別研究員

研究者番号：60534344

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：近年、固体デバイス中の電子の量子力学的性質を制御することで、量子計算や様々な新奇デバイスを実現することに期待が高まっている。研究代表者等はエッジ状態と呼ばれるコヒーレントな電子波を制御することにより、核スピンの揺らぎを検出し、その揺らぎが電子スピンの量子力学的性質に与える影響を解明した。また、量子ドットに対する電子スピン状態の選択的な注入を実現した。これらの成果は半導体デバイス中の電子スピンを用いた様々な量子デバイスの発展に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：Recent technical advances in manipulating quantum mechanical properties of electrons in solid-state devices suggest that the development of novel quantum technologies including quantum computation is feasible in near future. We aimed to use coherent electron waves known as edge states to unveil the influence of nuclear spin fluctuations against the quantum mechanical properties of electron spins. Then we realized selective spin injection to a quantum dot structure by using the edge states. We believe that our results will contribute to development of future quantum devices based on electron spins.

研究分野：半導体量子物性

キーワード：電子スピン コヒーレント制御 量子ドット エッジチャネル

1. 研究開始当初の背景

近年、固体デバイス中を散乱されることなくコヒーレントに移動できる電子を制御することで、電子をあたかも光子(光子)のように扱い、電子版量子光学を実現できる可能性に注目が集まっている[M. Yamamoto *et al.*, Nature Nanotech. **7** 247 (2012), G. Fève *et al.*, Science **316** 1169 (2007)]. 固体素子においては、これまでに「人工原子」とも呼ばれる量子ドット中の単一電子スピンを制御することで、量子ビット(量子情報処理の基本単位)としての応用が研究されている。一方で、固体デバイス中を移動する電子のスピンをコヒーレントに制御する方法はこれまでに存在しなかった。しかしながら、コヒーレントに制御可能な伝導電子のスピンの「飛行スピ量子ビット」が実現できれば、(i)電子スピンによる量子光学実験や、(ii)量子ドット間のスピン情報インターフェースを実現できる可能性が大きく拓ける。

研究代表者はこのような観点から整数量子ホール効果において現れる「エッジ状態」のスピンを DC ゲート電圧(静電ポテンシャル)のみで制御する方法を模索してきた。電子が静電場ポテンシャル中を移動する過程で相対論的な有効磁場を感じ、これにより電子のスピン状態を任意に制御できると考えられる。エッジ状態はレーザーのようにコヒーレンスを保った一次元的な電子波であり、このような応用には最も有望である[Y. Ji *et al.*, Nature **422** 415 (2003)]. 研究代表者らは最近、スピン軌道相互作用(SOI)を利用することにより電氣的にスピンの歳差運動を制御し検出することに成功した[T. Nakajima *et al.*, AIP Conference Proceedings **1566** 301-302 (2013)]. これにより固体デバイス中を移動する電子スピンの歳差運動をコヒーレントに制御できることを実証した。また、この過程においては量子ドットにおける電子スピンと同様に、核スピンとの超微細相互作用が重要な役割を果たすことを見出している [T. Nakajima *et al.*, Phys. Rev. B **82** 201302(R) (2010), T. Nakajima *et al.*, Phys. Rev. B **81** 85322 (2010)].

2. 研究の目的

本研究は上記の研究成果に基づき、移動する電子スピンのコヒーレント制御や量子ドットデバイスとのスピン情報インターフェース実現に向けて大きく発展させることを目的とする。具体的には以下の3項目について解明することを目指した。

- (1) エッジ状態電子スピンの静電磁場によるコヒーレント制御の実現。ゲートに印加した DC 電圧や核スピンの作る静磁場を利用することで電子スピンをコヒーレントに制御する量子回路の実現を目指す。
- (2) 量子ドットとエッジ状態とのスピン情報インターフェースの実現。エッジ状態中の電

子スピンが選択的に注入・検出できることを利用し、量子ドットへの電子スピン注入やスピン状態読み出しを目指す。

(3) 電子スピンのコヒーレンス喪失メカニズムの解明。電子スピンの量子力学的性質を利用する上で最も重要な指標であるコヒーレンスが、核スピン雑音などの影響を通じて失われる物理的機構を解明する。

3. 研究の方法

(1) 周期的な静電ポテンシャル中を電子が移動すると、相対論的な効果により実効的な振動磁場が生じることになる。この振動磁場を電子スピンのゼーマンエネルギーと一致させることにより、電子スピン共鳴を観測することを試みた。一方で電子が静磁場中を移動する際には、磁場の大きさに応じて歳差運動の位相を獲得する。この効果を使って核スピン場による電子スピンのコヒーレント制御も試みた。

(2) ゲート形成型量子ドットとスピン偏極したエッジ状態とをトンネル結合させることにより、偏極したスピンを選択的に量子ドットに注入したり読み出したりすることを試みた。こうして実現したスピンフィルターの効率を評価した。

(3) 量子ドットデバイスにおいて電子スピンのコヒーレントな振動を高速で検出する新技術を開発し、核スピンの揺らぎを高精度に検出した。この揺らぎダイナミクスの解析を通じて、電子スピンのコヒーレンス喪失メカニズムについて検討した。

4. 研究成果

(1) 最初に、核スピンによる静磁場の効果でエッジ状態中の電子スピンの位相を制御する実験を行った。静電ポテンシャルにより形成された適切な軌道に沿ってエッジ状態を形成させると SOI により誘起されたスピンの歳差運動を観測することができるが、この歳差運動が獲得する位相は磁場の大きさに比例する。研究代表者はエッジ状態に非平衡分布を形成し核スピン偏極をポンプすることにより、核スピンの作る有効磁場(オーバーハウザーシフト)を検出した。これにより、歳差運動の位相が核スピン偏極の進行に伴って数十秒から数分の時間スケールで連続的にシフトしていく様子を捉えることに成功した。

エッジ状態の電子散乱を使うことによりこのスケールでの核スピン偏極を高感度に捉えられることが知られているが、今回発見した歳差運動の位相を捉える方法では、この手法のさらなる高感度化を実現できる可能性があり、様々なスピンデバイスにおけるミクロな相互作用の解明に役立つと考えられる(論文執筆中)。

一方、静電場による電子スピン共鳴の測定においては、電場によるスピン回転の効果と上記核スピン磁場による効果の競合が見られることがわかった。特に不純物等による乱雑

ポテンシャルが多い場合には後者の効果が支配的となる。したがって、電子スピン共鳴の効果はより高移動度の二次元電子系基板を用いることによってより明瞭に観測することができると考えられる。

(2) エッジ状態における電子スピンの選択性を利用して、量子ドットに選択的なスピンの注入を行った。エッジ状態の空間的なスピンの分離を利用すれば選択的な注入ができることは従来から知られていたが、その効率は決して高いものではなかった。代表者等はエッジ状態にバイアスをかけて非平衡分布を作ることによりこのスピン注入の効率改善を試みた。その結果、従来よりも20%程度効率の高い40-50%の効率で選択的にスピンを注入することができた[雑誌論文4]。逆に量子ドットからエッジ状態にスピンを取り出せば、量子ドット中の電子状態読み出しにも利用することができ、これらは量子ドット中の単一電子スピンの初期化・読み出しや輸送に応用することが可能である。これによって、多数の量子ドットを結合した電子スピンによる量子情報処理の実現に向けた研究を進めている。

(3) 電子スピンの量子力学的性質を利用する際に大きな問題となるのが、核スピンの揺らぎによるコヒーレンスの喪失である。上記の結果(1)で述べたように核スピンの集団がランダムに揺らぐことによって、電子スピン歳差運動の周波数がシフトすることになる。研究代表者らは多重量子ドット中の電子スピン

歳差運動を高速で測定することにより、核スピン揺らぎのダイナミクスの検出と電子スピンコヒーレンスに与える影響の解析を行った[雑誌論文1,2,3,5,6]。その結果、図1に示すように、短い時間スケールで揺らぎのスペクトルを限定することで電子スピンの実効的なコヒーレンス時間(集団位相緩和時間)が延びることを見出した[雑誌論文2]。

この有限時間で定義されるコヒーレンス時間は、その物理的な意味づけに応じて異なる値を取り得ることが明らかになった。伝統的には集団位相緩和時間として定義される値は、関連する核スピン揺らぎの分散と一対一の関係で結びつけられている。しかし有限時間においてはこれらは必ずしも一致せず、また、量子情報処理への応用を視野に入れる場合には異なる導出方法によりコヒーレンス時間を評価する必要があることが明らかとなった。

本研究により量子的なコヒーレンスが雑音によって喪失する仕組みの一端が明らかとなり、量子情報処理技術の発展に寄与すると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6件)

1. A. Noiri, J. Yoneda, T. Nakajima, T. Otsuka, M. R. Delbecq, K. Takeda, S. Amaha, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, Coherent electron-spin-resonance manipulation of three individual spins in a triple quantum dot, *Applied Physics Letters* Vol. 108, 2016, 153101
2. M. R. Delbecq, T. Nakajima, P. Stano, T. Otsuka, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, Quantum Dephasing in a Gated GaAs Triple Quantum Dot due to Nonergodic Noise, *Physical Review Letters*, Vol. 116, 2016, 046802
3. T. Otsuka, S. Amaha, T. Nakajima, M. R. Delbecq, J. Yoneda, K. Takeda, R. Sugawara, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, Fast probe of local

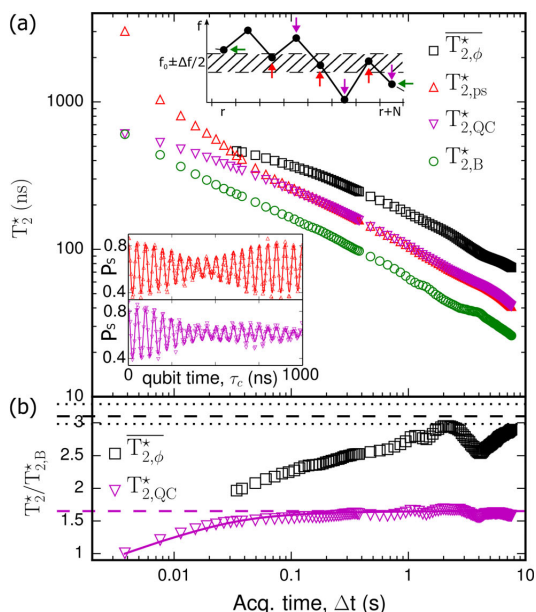


図1 電子スピン集団位相緩和時間の測定時間依存性[M. R. Delbecq *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **116** 046802 (2016)より]。揺らぎの時間スケールを反映して緩和時間の導出方法により異なる振る舞いが見られる(a)。各緩和時間のずれの測定時間依存性(b)。

electronic states in nanostructures utilizing a single-lead quantum dot, Scientific Reports Vol. 5, 2015, 14616

4. H. Kiyama, T. Nakajima, S. Teraoka, A. Oiwa, S. Tarucha, Spin-dependent current through a quantum dot from spin-polarized nonequilibrium quantum Hall edge channels, Physical Review B, Vol. 91, 2015, 155302
5. J. Yoneda, T. Otsuka, T. Nakajima, T. Takakura, T. Obata, M. Pioro-Ladriere, H. Lu, C. J. Palmstrom, A. C. Gossard, S. Tarucha, Fast Electrical Control of Single Electron Spins in Quantum Dots with Vanishing Influence from Nuclear Spins, Physical Review Letters, Vol. 113, 2014, 267601
6. M. R. Delbecq, T. Nakajima, T. Otsuka, S. Amaha, J. D. Watson, M. J. Manfra, S. Tarucha, Full control of quadruple quantum dot circuit charge states in the single electron regime, Applied Physics Letters, Vol. 104, 2014, 183111

[学会発表] (計 12 件)

1. 中島峻他、三重量子ドットにおける準安定電荷状態を利用したスピン・電荷変換、日本物理学会年次大会第71回年次大会、2016年3月19日、東北学院大学(仙台)
2. T. Nakajima et al., Controlling entanglement of spin qubits in a triple quantum dot, International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems, Jan 12, 2016, Research Center for Advanced Science and Technology (Komaba)
3. T. Nakajima, Generation of locally and non-locally entangled electron spin pairs in a triple quantum dot (Invited), International Workshop: Quantum Nanostructures and Electron-Nuclear Spin Interactions, Oct 20, 2015, 東北

大学(仙台)

4. 中島峻他、三重量子ドットにおける非隣接スピンもつれ状態の形成と観測、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月16日、関西大学(大阪)
5. T. Nakajima et al., Probing spin states in a triple quantum dot by Fourier transform spectroscopy, Spintech VIII, Aug 10-13, 2015, Basel (Switzerland)
6. T. Nakajima et al., Electrically Pulsed Fourier Transform Spectroscopy of Coupled Electron Spins in Triple Quantum Dot, 21st International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Jul 28, 2015, 仙台国際センター(仙台)
7. 中島峻他、三重量子ドットにおけるスピン量子ビット実験の忠実度向上、日本物理学会第70回年次大会、2015年3月23日、早稲田大学(東京)
8. T. Nakajima, Addressable single-spin control in multiple quantum dots coupled in series, American Physics Society March Meeting 2015, Mar 2-6, 2015, San Antonio (USA)
9. T. Nakajima et al., Probing Fast Dynamics of Nuclear Polarization with RF Reflectometry, International Symposium on Quantum System and Nuclear Spin Related Phenomena, Feb 18-20, 2015, 宮城蔵王ロイヤルホテル(宮城)
10. 中島峻他、三重量子ドットを用いたスピン・キュービット実験 II、日本物理学会2014年秋季大会、2014年9月8日、名古屋大学(名古屋)
11. T. Nakajima et al., Addressable control of single spin qubits in lateral triple quantum dot, 27th International Conference on Low Temperature Physics, Aug 6-13, 2014, Buenos Aires (Argentina)
12. T. Nakajima et al., Scaling-up Spin Qubits in Semiconductor Quantum Dots, FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology, Jan 29, 2014, 東京大学(本郷)

[図書] (計 1 件)

1. 樋田啓、中島峻、小宮山進、半導体量子ド

ットによる回路共振器量子電磁力学、固体
物理、Vol. 48、2013、85-93

[その他]

ホームページ等

<http://qfsrg.riken.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 峻 (NAKAJIMA, Takashi)

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・特別研究員

研究者番号：60534344